Министерство образования Республики Беларусь

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

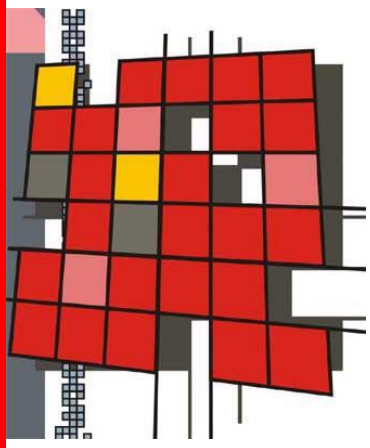
Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования
«Белорусско-Российский университет»

Государственное научное учреждение
«Институт прикладной физики НАН Беларуси»

Научный совет Международной ассоциации академий наук по неразрушающему контролю и технической диагностике

Российское общество по неразрушающему контролю и технической диагностике

# СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА И ДИАГНОСТИКИ СОСТОЯНИЯ ОБЪЕКТОВ



Сборник статей 10-й Международной научно-технической конференции

Могилев, 24–25 сентября 2026 года

Могилев
2026

Министерство образования Республики Беларусь

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования
«Белорусско-Российский университет»

Государственное научное учреждение
«Институт прикладной физики НАН Беларуси»

Научный совет Международной ассоциации академий наук по
неразрушающему контролю и технической диагностике

Российское общество по неразрушающему контролю
и технической диагностике

# СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА И ДИАГНОСТИКИ СОСТОЯНИЯ ОБЪЕКТОВ

Сборник статей 10-й Международной
научно-технической конференции

(Могилев, 24–25 сентября 2026 года)

Могилев
«Белорусско-Российский университет»
2026

УДК 620.179.1
ББК 34.9
С56

Редакционная коллегия: д-р техн. наук, проф. *М. Е. Лустенков* (гл. редактор); д-р техн. наук, проф. *В. М. Пашкевич* (зам. гл. редактора); д-р техн. наук, проф. *В. А. Новиков* (зам. гл. редактора); канд. техн. наук, доц. *А. А. Афанасьев*; д-р техн. наук, проф. *А. Р. Баев*; канд. техн. наук, доц. *С. В. Болотов*; канд. техн. наук, доц. *С. С. Сергеев*; д-р физ.-мат. наук, доц. *А. В. Хомченко*; *Н. С. Манкевич* (отв. секретарь)

Рецензенты: д-р техн. наук, проф. *В. А. Новиков*; д-р техн. наук, проф. *А. Р. Баев*; д-р физ.-мат. наук, доц. *А. В. Хомченко;* канд. техн. наук, доц. *С. В. Болотов*; канд. техн. наук, доц. *Н. В. Герасименко*; канд. техн. наук, доц. *С. С. Сергеев;* канд. физ.-мат. наук П.Я. Чудаковский

С56 **Современные** методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов : сб. ст. 10-й Междунар. науч.-техн. конф. / М-во образования Респ. Беларусь, М-во науки и высш. образования Рос. Федерации, Бел.-Рос. ун-т, Ин-т прикладной физики НАН Беларуси, Научный совет Междунар. ассоц. акад. наук по неразрушающему контролю и техн. диагностике, Рос. о-во по неразрушающему контролю и техн. диагностике; редкол.: М. Е. Лустенков (гл. ред.) [и др.]. – Могилев : Белорусско-Российский университет, 2026. – 364 с. : ил.

ISBN 978-985-492-329-1.

Представлены результаты фундаментальных, поисковых и прикладных исследований в области физики взаимодействия различных полей и излучений с объектами и средами; техники восприятия, передачи, преобразования и отображения измерительной информации о параметрах объектов; мониторинга и диагностики состояния технических объектов.

Рассмотрены вопросы применения современных методов, приборов и технологий неразрушающего контроля и технической диагностики в энергетике, транспорте и строительстве, а также проблемы подготовки специалистов по контролю качества для различных отраслей промышленности.

Сборник статей предназначен для инженерно-технических и научных работников, аспирантов и студентов вузов.

**УДК 620.179.1**
**ББК 34.9**

**ISBN 978-985-492-329-1**

© Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования «Белорусско-Российский университет», 2026

СОДЕРЖАНИЕ

АББАКУМОВ К. Е. Акустические характеристики слоистых сред в зависимости от параметров граничных условий в приближении «линейного скольжения»..... 8
АФАНАСЬЕВА В. Д., БЕНИН А.В., КОНШИНА В.Н., НИКОЛАЕВ С.В. Программное средство для автоматизации выбора режимов ультразвукового контроля сварных швов в отраслях транспорта и нефтегазопровода ..... 14
БАБАСКИН Ю. Г. Диагностика горных пород при строительстве автомобильных дорог..... 20
БАБАСКИН Ю. Г., СОБОЛЕВСКАЯ С. Н. Применение поверхностно-активных веществ и композитов при проектировании бетонных смесей..... 26
БАЕВ А. Р., ВОРОБЕЙ А.В., АСАДЧАЯ М.В., ДЕЛЕНКОВСКИЙ Н.В. Особенности возбуждения и распространения поверхностных волн в телах с цилиндрической и сферической формой..... 32
БАЕВ А. Р., МАЙОРОВ А. Л., АСАДЧАЯ М. В., БУРНОС А. Ю., ЗАГОРСКИЙ И.Е. Некоторые возможности двухпараметрового способа контроля глубины упрочнения стальных изделий..... 39
БАЗРОВ Б. М., ГУРЕВИЧ В. Л, ГРЕЦКИЙ Н. Л., ХЕЙФЕЦ М. Л., ЮРЕВИЧ Н. М. Гармонизация с международными требованиями стандарта «Базы и базирование в машиностроении. Термины и определения»..... 45
БАЗЫЛЕВ Е. Н., БРАНЦЕВИЧ П. Ю. Особенности использования встроенных систем в виброизмерительных приборах..... 52
БАРАТ В.А., БАРДАКОВ В.В., МАРЧЕНКО А.Ю., ПАНЬКИНА А.А., ЛУКАШЕВ И. А. Выявление межкристаллитной коррозии на натурных образцах труб из стали аустенитного класса методом акустической эмиссии..... 58
БЕЛОКОПЫТОВ Р. О., ЛУНИН В. П. Распознавание скрытых дискообразных металлических объектов импульсным вихретоковым методом с применением машинного обучения..... 63
БЕРЕГОВОЙ В. А., ЛАВРОВ И. Ю., СЕМИЛЕТКОВ А. В. Совершенствование методологической и лабораторной базы для неразрушающего контроля динамических характеристик конструкционных материалов..... 69
БОГОТОВ И. М., ШЕПЕЛЕВ А. К., ЛУНИН В. П. Повышение чувствительности преобразователя в оценке степени коррозионного повреждения арматуры в железобетонных конструкциях..... 76
БОЛОХОВЦЕВ А. В., ЧЬЕ ЕН УН, КАЛИНОВ Д. Г. Бесконтактный оптический контроль угла закручивания поверхности материала по спекл-изображению: влияние погрешности определения оси кручения..... 82

БРУЦКИЙ-СТЕМПКОВСКИЙ К. В. Особенности контроля внутри барабанных устройств паровых котлов ТП-35..... 88
БУРАК В. А., КУЛАГИН В. Н., ОСИПОВ А. А. Оценка возможности использования для контроля сталей 10ХСНД и 15ХН5МФ многопараметрового метода..... 93
ВОРОБЕЙ А. В., КИРИЕНКО А. С., ЖУПИНА А. О., МИХАЧЁВ А. Н. Контроль толщины внутренних отложений теплообменных труб радиографическим методом..... 99
ГУСЕВ А. П., ЗАГОРСКИЙ И. Е., ПОЛОНЕВИЧ А. А. Зависимость магнитного поля подповерхностных дефектов от размагничивающего фактора формы тела..... 105
ДМИТРИЕВ С. Р., МИШАРИНА А. А. Современные автоматизированные установки магнитопорошкового и капиллярного контроля: «ЕрМаг 3D» и «КАМА»..... 111
ДРОКОВ В. Г., ДРОКОВ В. В., КАЗМИРОВ А. Д., КУЗНЕЦОВ А. А., МУРЫЩЕНКО В. В. Оценка представительности диагностического материала при оценке состояния узлов маслосистемы тепловозного дизеля в зависимости от точки отбора..... 115
ДРОКОВ В. Г., ДРОКОВ В. В., КАЗМИРОВ А. Д., МУРЫЩЕНКО В. В. Моделирование накопления частиц изнашивания в маслосистеме тепловозных дизелей методом Монте-Карло..... 122
ДУБИНОВ Ю. С., СЕЛЕЗНЕВА Р. Р., ЯСАШИН В. А. Оценка влияния эксплуатационных факторов на прочностные характеристики композиционных материалов..... 126
ЖИВКО А. А., ВОБЛАЯ И. Н. Совершенствование методов контроля персонала в условиях цифровой трансформации управления..... 131
ЗАПЛЕТНЮК В. О., БРЫЛОВА Т. Б., КОНДРАТЕНКО Е. В. Комплексный магнитный контроль как основа для прогнозирования остаточного ресурса надрессорных балок грузовых вагонов..... 135
ЗОТОВ К. В., ЛУНИН В. П. Применение адаптивного метода полного фокусирования при ультразвуковом контроле сварных соединений..... 141
КОТЛЯРОВА И. А., МАКАРЕНКО К. В., КИРИЧЕК А. В., ЗЕНЦОВА Е. А., ИЛЮШКИН Д. А., ЧИРКОВ В. В. Комплексный анализ оценки пористой структуры заготовок, синтезированных из алюминиевого сплава АМг3 по WAAM-технологии..... 147
КОТОВЩИКОВ И. О. Опыт разработки и внедрения современных систем активного теплового контроля качества композитных авиационных объектов..... 153
КОЧЕТОВ Н. В., МИРАНОВИЧ О. Л., ТИМОШУК Д. А. Особенности проектирования и изготовления специального испытательного стенда для двухколесного электротранспорта..... 159
КУВШИННИКОВ В. С., КОВШОВ Е. Е., СУДАРЕВ А. В. Генерация синтетических наборов данных для обучения AI-моделей в цифровой радиографии..... 164

КУЛАН А. В., МОЙСЕЙЧИК Е. А., САВИНА Е. Н., ЯКОВЛЕВ А. А. Методика контроля геометрии стальных и железобетонных конструкций на основе облаков точек и BIM-моделирования..... 168
ЛЕНЕВСКИЙ Г. С., КОРНЕЕВ А. П. Метод контроля электромагнитного поля машины постоянного тока..... 174
ЛИ ЦИ, САВИН С. Н. Современное состояние и перспективы исследований в области динамического детектирования повреждений и мониторинга состояния конструкций..... 179
МАЛОЗЁМОВ Б. В., МАРТЮШЕВ Н. В., ВНУКОВ С. А., ЕРЕЩЕНКО Н. Д. Диагностическая оценка надежности и остаточного ресурса городского электротранспорта по эксплуатационным параметрам..... 184
МАЛОЗЁМОВ Б. В., МАРТЮШЕВ Н. В., ВНУКОВ С. А., ЕРЕЩЕНКО Н. Д. Мультимодальный неразрушающий контроль элементов электротранспорта по тепловым, виброакустическим и электромагнитным признакам..... 191
МАЛОЗЁМОВ Б. В., МАРТЮШЕВ Н. В., ВНУКОВ С. А., ЕРЕЩЕНКО Н. Д. Цифровой двойник электротранспорта для прогнозирования ресурса и приоритизации технического обслуживания..... 197
МАРКОВ А. Н., МАРКОВ В. А., ВОЙНАШ С. А., ЕРЫГИН В. В., ПАРФЕНОПУЛО Г. К. Оценка равнопрочности узлов, агрегатов, машин и технологические рекомендации для ее повышения..... 204
МАХОТИН Д. Д., ЗОТОВ К. В., ЛУНИН В. П. Учет влияния анизотропии при измерении координат дефектов при ультразвуковом контроле кольцевых соединений магистральных газопроводов..... 210
НИКИТИНА О. А., КЛЕНИН В. Л., КОТОВЩИКОВ И. О. Анализ подходов к автоматическому определению геометрических параметров дефектов, выявленных при флуоресцентном капиллярном контроле..... 215
НОВИКОВ В. А., КУШНЕР А. В., ШИЛОВ А. В. Магнитографический метод контроля. Современное состояние и перспективы применения..... 221
ПАНИН В. И., ХОЛИЧЕВ Д. Д., ЧЬЕ ЕН УН. Обработка сигналов при неразрушающем контроле электромагнитно-акустическим методом..... 226
ПОВОЛОЦКАЯ А.М, МУШНИКОВ А.Н., МАЛЫГИНА К.Д., ГОРУЛЕВА Л.С. Эволюция магнитных и электромагнитных характеристик метастабильной аустенитной стали при двухосном растяжении..... 232
ПОНКРАТОВ Д. В., СОТСКИЙ А. Б., СОТСКАЯ Л. И. Изгибные потери энергии мод открытых волноводов коаксильной геометрии..... 237
ПОПОВ Д. И., МИНЖАСОВ Е. И. Исследование влияния несущей частоты управляемых инверторов на работу системы испытания асинхронных двигателей методом взаимной нагрузки..... 243

ПОПРУКАЙЛО А. В., КОСТЮКОВИЧ Г. А., КИПНИС М. Е., ОВЧИННИКОВ Е. В. Свойства и структура стали 60ПП в технологии изготовления крестовин карданных передач..... 247
ПРИМАК И. У. Чувствительность призменных волноводных датчиков адсорбционного типа в условиях, близких к критическим..... 255
ПРИМАК И. У., ХОМЧЕНКО А. В. Оценка возможностей и ограничений поляризационно-оптического метода при наклонном просвечивании закаленного стекла..... 262
РЯБЦЕВ В. Н., БУСЬКО В. Н. Применение методов цифровой обработки сигналов для подбора оптимальных характеристик преобразователей Баркгаузена к специфике решаемых задач..... 269
САВИНА Е. Н., ЯКОВЛЕВ А. А., КУЛАН А. В., МОЙСЕЙЧИК Е. А. Интеграция цифровых информационных моделей транспортных сооружений, построенных по данным лазерного сканирования, с технологиями дополненной и виртуальной реальности для задач диагностики..... 274
САВИЧЕВ М. П., АТРОЩЕНКО В. В., ЛОГАЧЁВ Ю. В., ПАУТОВ А. Н. Ультразвуковой контроль точечной сварки, выполненной методами контактной и лазерной сварки..... 281
САНДОМИРСКИЙ С. Г. Анализ причин появления в научной и справочной литературе недостоверных данных об остаточной намагниченности и магнитной проницаемости сталей..... 287
САНДОМИРСКИЙ С. Г. Методики контроля режима отпуска изделий из среднеуглеродистых сталей по результатам измерения их магнитных параметров в замкнутой магнитной цепи..... 292
СЛЕСАРЕВ Д. А., СЛЕСАРЕВА Н. А. Применение методов машинного обучения для оценки критичности дефектов стальных канатов при их магнитной дефектоскопии..... 296
СТАСЬКОВ Н. И., ПАРАШКОВ С. О. Обобщенный эффект Брюстера в спектральной эллипсометрии слоя диэлектрика на полупроводниковой подложке..... 304
ТИМОФЕЕВА А. О., УШАКОВА О. В. Проектирование блока спутниковой навигации для систем мониторинга и диагностики технических объектов..... 309
ТУМАНОВ А. В. Компьютерные технологии в неразрушающем контроле: методы и приборы контроля качества состояния объектов…. 313
ФИЛОНИНА Е. А., ВЕРЕТЕНОВА А. А. Сравнительный анализ точности измерений геометрических параметров детали..... 319
ЧУДАКОВСКИЙ П. Я. Моделирование оптических свойств многослойной плазмонной структуры для сенсорных приложений..... 323
ЧЭНЬ Ч., САВИН С. Н. Оценка работы деформационных швов в зданиях сложной формы на основе метода свободных колебаний..... 329
ШАРАНДО В.И., ГУСЕВ А.П., ЗАГОРСКИЙ И.Е., ПОЛОНЕВИЧ А.А. Применение магнитодинамического метода для контроля

ферромагнитных материалов..... 334
ШЕПЕЛЕВ А. К., ДОБРЕНКО А. М., ЛУНИН В. П., ГЛАДОВСКИЙ В. А. Испытания спроектированного импульсно-вихретокового устройства для контроля коррозии ферромагнитных труб..... 340
ШИЛОВ А. В., СОТСКИЙ А. Б., ЧУДАКОВ Е. А., ПОНКРАТОВ Д. В., ПОДЫМАКО М. Э. Оптический контроль ориентации прямоугольных балок..... 345
ЩЕРБО А. Д., МОЙСЕЙЧИК Е. А., ЯКОВЛЕВ А. А., КРАВЧЕНКО Д. И. Алгоритм автоматизированной оцифровки и стадийного анализа диаграмм кратковременного сжатия древесины сосны вдоль волокон..... 350
ЯСНЕВ Д. А., РЫКЛИН Д. Б. Влияние кондиционирования пробы из смешанных текстильных волокон на ее влажность и результаты испытаний емкостным методом..... 356

УДК 620.179.16

***К. Е. АББАКУМОВ**, д-р техн. наук, проф.*
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина) (Санкт-Петербург, Россия)

# АКУСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СЛОИСТЫХ СРЕД В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ПАРАМЕТРОВ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ В ПРИБЛИЖЕНИИ «ЛИНЕЙНОГО СКОЛЬЖЕНИЯ»

**Аннотация.** Рассмотрены частные случаи моделей конструкционных материалов (технологических сред), обладающих слоистой структурой, применительно к задачам неразрушающего контроля и определения физико-механических характеристик. В длинноволновом приближении получены в явном виде выражения дисперсионных уравнений, используемых для определения фазовых скоростей эффективных упругих волн, распространяющихся в изучаемых слоисто-неоднородных структурах. Их отличительной особенностью являлись нарушения условий акустического контакта на границах трещиноподобных несплошностей. При формировании граничных условий использовалось приближение «линейного скольжения», позволяющее учитывать наличие микрошероховатостей на прилегающих участках поверхностей микротрещин. На основании численных решений дисперсионных уравнений проводились исследования зависимости фазовых скоростей упругих волн от параметров материалов приграничных областей, результаты которых и обсуждаются в статье.

**Ключевые слова:** конструкционные материалы, слоистые среды, эффективные упругие волны, фазовые скорости, дисперсионные уравнения.

В современных условиях научно-технического прогресса широкое распространение получают новые конструкционные материалы. Отличительной особенностью их строения являются комбинированные структуры, получающиеся путем внедрения разнообразных объектов в основной материал, что позволяет получать вещества с новыми характеристиками, используемыми при изготовлении как традиционных, так и новых изделий. Для решения задач структурометрии, важных с целью определения на основании результатов ультразвуковых измерений физико-механических характеристик новых материалов, представляет интерес получение аналитических соотношений, связывающих характеристики упругих волн с параметрами структуры моделируемых сред.

В [1] рассмотрена модель слоисто-неоднородной среды, образованной двумя монолитными веществами. Показано, что подобная неоднородность должна учитываться при формировании граничных условий в приближении "линейного скольжения", а, значит. будет оказывать влияние на волновые процессы, формируемые в окрестностях подобных границ. Основными параметрами, учитывающими эти особенности, являются контактные жесткости [1].

Другой практически важный случай будет возникать в случае, когда одна из сред, образующих слоистую структуру, оказывается консолидированной (гранулированной). Из теории известно, что акустические характеристики

подобных сред могут значительно отличаться от случая монолитного вещества, таким образом, учитываться при формировании сходных граничных условий [1, 2]. Вариант такой среды и рассматривался в настоящей работе.

Ранее, по аналогии с работой [2], было показано, что для модели замещения гранул среды упругими сферами при плотной "гексагональной упаковке" значения фазовых скоростей эффективной продольной *clr* и поперечной *ctr* волн, соответственно, распространяющихся в консолидированной среде могут быть вычислены с использованием следующих соотношений:

$$clr = \frac{32 \cdot \rho \cdot \omega^2}{27 \cdot Q \cdot DG} \cdot (r_{макс}^4 - r_{мин}^4), \quad ctr = \frac{32 \cdot \rho \cdot \omega^2}{27 \cdot Q \cdot DG} \cdot (r_{макс}^4 - r_{мин}^4) \cdot \sqrt{\frac{1-2 \cdot \nu}{2 \cdot (1-\nu)}}, \qquad (1)$$

где: ρ – плотность монолитной среды, ω – циклическая частота, $Q$ – механическая добротность, $r_{макс}$, $r_{мин}$ – максимальный и минимальный размеры замещающих микросфер, $DG$ – статическая контактная жесткость, определяемая выражением: $DG = 4 \cdot \mu \cdot a/(1-\nu)$, где: "μ" – модуль сдвига, "$a$" – радиус контактного пятна на поверхностях замещающих сфер, ν – коэффициент Пуассона [3].

Следует отметить, что при выводе формул (9) [3] особое значение имело распределение гранул вещества по размерам. В данном случае функция плотности вероятности распределения по размерам, по рекомендации [3], имела вид: $f(r) = 1/r^4$. Далее при вычислениях использовались следующие значения параметров модели: $Q$l = 25, $Q$t = 15 – добротности замечающих колебательных систем для продольных и поперечных волн, соответственно; $r = 1 \cdot 10^{-3}$м – радиус максимального замещающего включения (сферы); α = 0,2 – отношение размеров минимального и максимального включений; $a = 0{,}2 \cdot 10^{-3}$м – радиус контактного пятна.

В качестве примера проводились вычисления по формулам (4, 5) для материалов слоев 1 и 2 соответственно: $\rho_1$ = 2500 кг/м$^3$, $c_{l1}$ = 4000 м/с, $c_{t1}$ = 1600 м/с (плотный металлургический шлак); $\rho_2$ = 7800 кг/м$^3$, $c_{l2}$ = 5920 м/с, $c_{t2}$ = 3230 м/с (углеродистая сталь) [1]; частота ультразвука – 1 МГц, пространственный период в направлении оси $Y$ слоистой структуры – $h_1 + h_2$ = 1 мм. При указанных значениях параметров модели значения эффективных скоростей составили: для продольных волн *clr* = 2182 м/с; для поперечных волн *ctr* = 581 м/с.

На первом этапе рассматривалась модель плоскослоистой среды в виде чередующихся слоев с заданными характеристиками. На рис.1 представлен фрагмент модели такой среды с обозначенными параметрами. Как следует из рисунка, исследуемая среда представляет собой периодическую структуру в виде комбинации слоев материалов с различными свойствами (плотностью и коэффициентами Ламэ), соответственно: $\rho_э$, $\lambda_э$, $\mu_э$ – толщиной $h_1$ и $\rho_2$, $\lambda_2$, $\mu_2$ – толщиной $h_2$, общей толщиной $h = h_1 + h_2$.

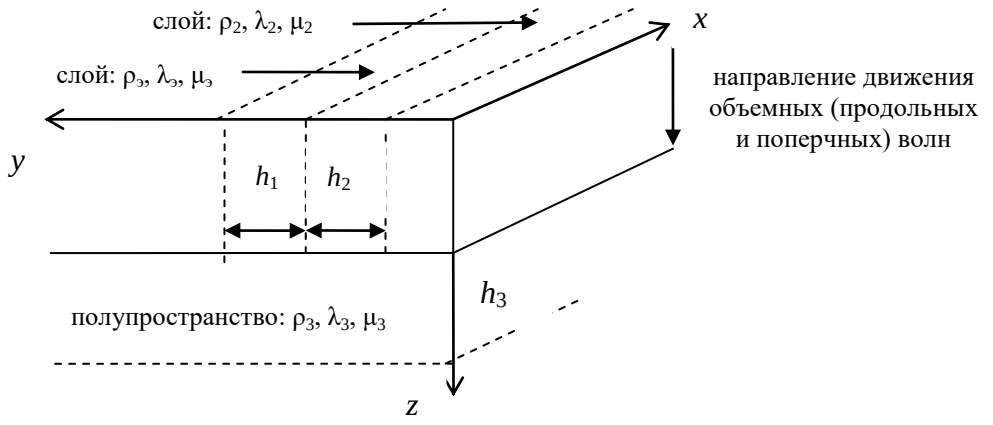



Рис. 1. Система координат и схема движения объемных волн вдоль слоев, образующих плоскослоистую структуру

После преобразований с учетом малости волновых размеров слоев $h_1$ и $h_2$ можно показать, что дисперсионное уравнение (1) преобразуется в алгебраическое, решения которого для значений фазовых скоростей продольной волны имеет вид:

$$clnp = \sqrt{\frac{1 + n(1-n)\cdot\dfrac{(\rho_1 ctr^2 - \rho_2 {c_{t2}}^2)\cdot[\rho_1(clr^2 - ctr^2) - \rho_2({c_{l2}}^2 - {c_{t2}}^2)]}{\rho_1 \cdot clr^2 \cdot \rho_2 \cdot {c_{l2}}^2}}{[\rho_1 \cdot n + \rho_2 \cdot (1-n)]\cdot\left[\dfrac{n}{\rho_1 \cdot clr^2} + \dfrac{1-n}{\rho_2 \cdot {c_{l2}}^2}\right]}}, \qquad (2)$$

где: $n = h_1/h_1 + h_2$, $1 - n = h_2/h_1 + h_2$ – относительные толщины слоев.

Проведя аналогичные действия по отношению к поперечной волне с упругим смещением вдоль оси "*Y*» (в плоскости *YX*) при тех же допущениях можно найти выражение для фазовой скорости эффективной поперечной волны

$$ctn = \sqrt{\frac{n \cdot \rho_1 \cdot ctr^2 + (1-n)\cdot \rho_2 \cdot {c_{t2}}^2)}{\rho_1 \cdot n + \rho_2 \cdot (1-n)}}. \qquad (3)$$

Результаты вычислений по формулам (2), (3) представлены на рисунках 2 и 3. Как следует их графиков, приведенные зависимости носят монотонный характер, что согласуется с физическими представлениями. Полученные зависимости для фазовых скоростей использовались далее для оценки влияния структурных особенностей на модули контактных жесткостей, используемых при формировании граничных условий в приближении "линейного скольжения". С этой целью полученные выражения (2), (3) подставлялись в формулы [1]. Результаты вычислений представлены на рис. 3(а, б). для нормальной и тангенциальной контактных жесткостей. Как следует из анализа построенных графических зависимостей, во всем диапазоне изменений

учитываемых параметров отмечаются значимые отличия в величинах контактных жесткостей, которые могут влиять на волновые процессы в приграничных областях.

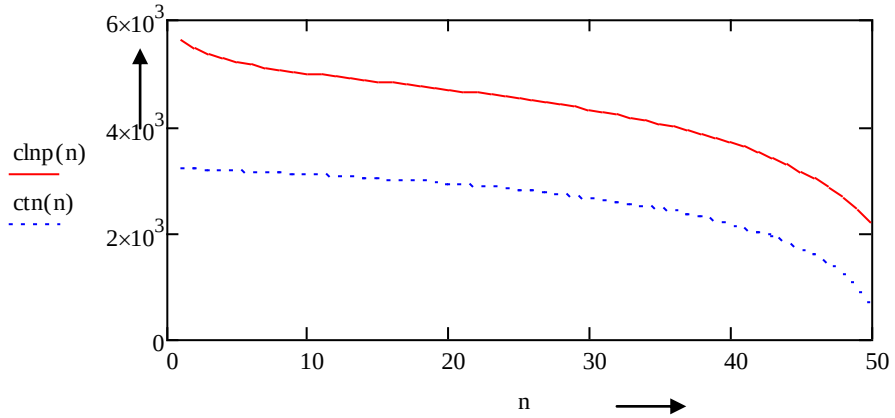



Рис. 2. Зависимости фазовой скорости продольной (—) и поперечной (---) волн от относительной толщины слоев в неоднородной структуре при волновом движении вдоль слоев

Другой важный в плане прикладного использования вариант слоистой среды формируется в случае ортогонального распространения волнового процесса по отношению к слоям. Система координат и схема движения волн в направлении, ортогональном слоям, представлены на рис. 4

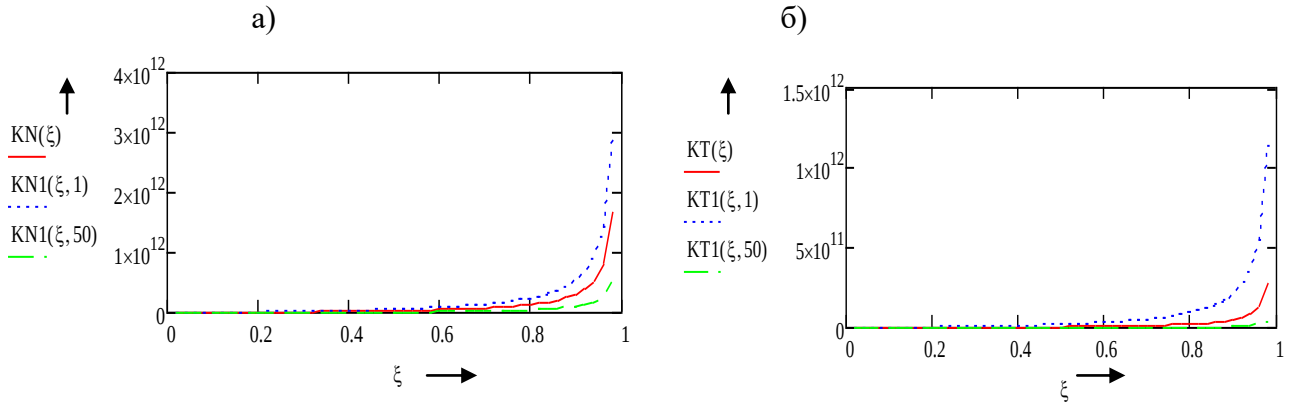



Рис. 3. Зависимости нормальной (а) и тангенциальной (б) контактных жесткостей от коэффициента перфорации: (—) – контакт монолитных сред; (---) – слоистая структура при относительной толщине слоев $n$ = 0,1; (•••) – слоистая структура при относительной толщине слоев $n$ = 0,9; распространение волны вдоль слоев

Вычисление фазовой скорости продольной волны, следуя рекомендациям [2], осуществлялось на основании выражения (4):

$$clnh = \sqrt{\frac{1}{(\rho 1 \cdot n + \rho 2 \cdot (1-n)) \cdot \left(\frac{n}{\rho 1 \cdot (clr)^2} + \frac{(1-n)}{\rho 2 \cdot (c_{t2})^2}\right)}}, \qquad (4)$$

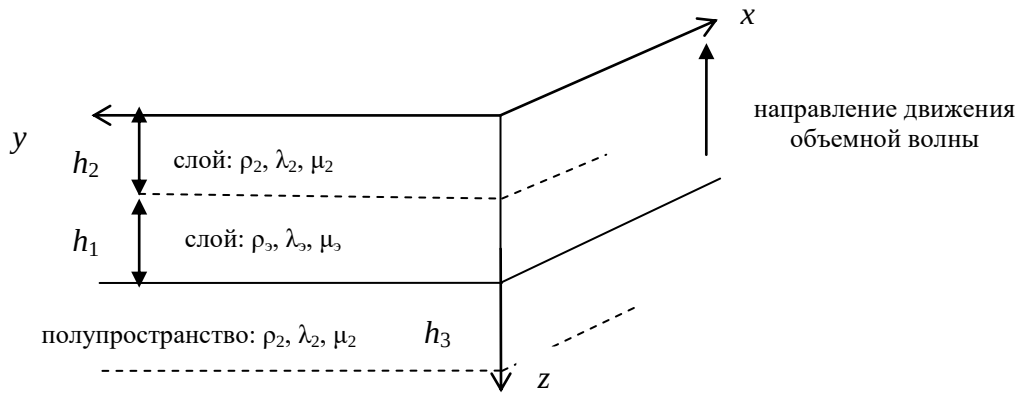



Рис. 4. Система координат и схема движения объемных волн поперек слоев, образующих плоскослоистую структур

Вычисление фазовой скорости поперечной волны осуществлялось на основании выражения (5):

$$ctn2 = \sqrt{\frac{n \cdot \mp 1 \cdot ctr^2 + (1-n) \cdot c_{t2}{}^2}{\rho 1 \cdot n + \rho 2 \cdot (1-n)}}, \qquad (5)$$

Результаты вычислений по формулам (4). (5) представлены на рис.6. Сравнение графиков на рис. (2) и (6) позволяет сделать вывод о более значимом воздействии особенностей структуры на волновой процесс при его движении поперек слоев.

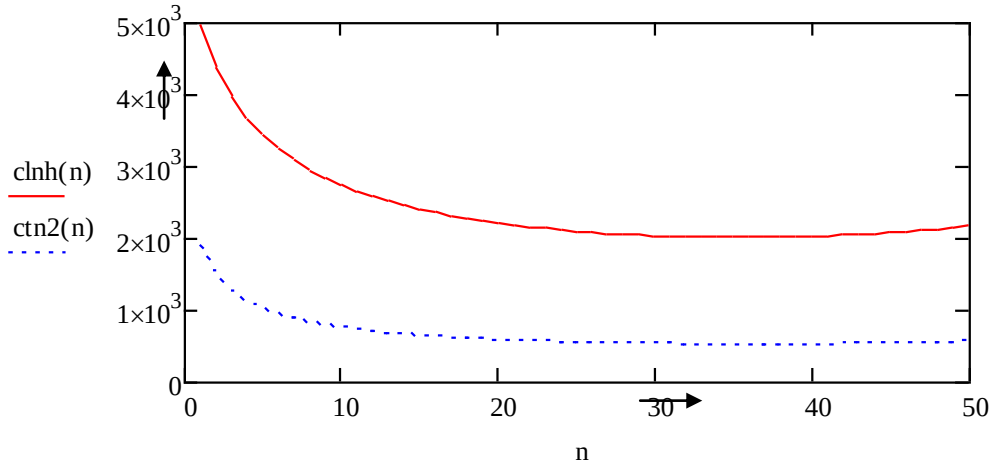



Рис. 6. Зависимости фазовой скорости продольной (—) и поперечной (---) волн от относительной толщины слоев в неоднородной структуре при волновом движении ортогонально слоям

Влияние рассматриваемых структурных особенностей на контактные жесткости учитывалось при подстановке выражений (4), (5) в выражения (1). Результаты вычислений приведены на рис. 7 (а, б)

а) б)

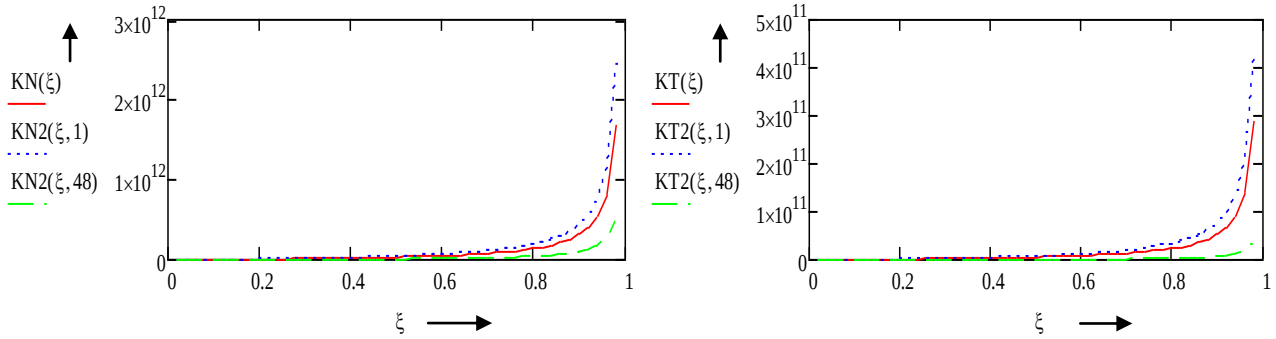



Рис. 7. Зависимости нормальной (а) и тангенциальной (б) контактных жесткостей от коэффициента перфорации: (—) – контакт монолитных сред; (---) – слоистая структура при относительной толщине слоев $n$ = 0,1; (•••) – слоистая структура при относительной толщине слоев $n$ = 0,9; распространение волны ортогонально слоям

**Список литературы**

1. Аббакумов К. Е. Акустические характеристики твердых упругих сред с ориентированной трещиноватостью/ К. Е. Аббакумов, А. В. Вагин, И. Г. Сидоренко // Дефектоскопия. – 2022. – №7. – С.1-13.

2.Бреховских Л. М. Акустика слоистых сред / Л. М. Бреховский, О. А. Годин. – Москва: Наука, 1989. – 416 с.

3. Быков В. Г. Поглощение упругих волн в тонком слое зернистой среды/ В. Г. Быков // Акустический журнал. – 1997. – Т.43, №3. – С. 323–328.

Контакты:
keabbakumov@etu.ru (Аббакумов Константин Евгеньеви)

УДК 620.179.1

***В. Д. АФАНАСЬЕВА***
***А. В. БЕНИН**, канд.техн.наук, доц.*
***В. Н. КОНШИНА**, канд.техн.наук, доц.*
***С. В. НИКОЛАЕВ**, канд.техн.наук, доц.*
Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I (Санкт-Петербург, Россия)

# ПРОГРАММНОЕ СРЕДСТВО ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ ВЫБОРА РЕЖИМОВ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЯ СВАРНЫХ ШВОВ В ОТРАСЛЯХ ТРАНСПОРТА И НЕФТЕГАЗОПРОВОДА

**Аннотация.** Представлена специализированная компьютерная программа, которая предназначена для определения параметров проведения ультразвукового неразрушающего контроля сварных соединений. Областью применения данной программы являются объекты железнодорожной инфраструктуры, а также системы транспортировки нефти и газа. Разработка выполнена с использованием языка программирования Python и графической библиотеки FreeSimpleGUI. Основными задачами программы являются автоматизация процесса подбора необходимой нормативно-технической документации, выполнение расчетов, связанных с чувствительностью контроля, в том числе определение коэффициента выявляемости дефектов и эквивалентной площади дефектов, а также визуализация схем контроля и сканирования. Отличительными особенностями программы считаются простота ее интерфейса, небольшой размер дистрибутива, составляющий 20 мегабайт, и наличие встроенной системы контроля правильности вводимых данных. Применение данной разработки позволяет сократить временные затраты специалиста по дефектоскопии и снизить вероятность ошибок при выборе параметров контроля.

**Ключевые слова:** ультразвуковой контроль, сварные соединения, компьютерная программа, Python, дефектоскопия, чувствительность контроля, нормативная документация.

Процесс использования нормативной документации при организации ультразвукового контроля сварных соединений в ряде случаев предполагает необходимость составления технологической документации, где фиксируются конкретные числовые значения параметров контроля и сканирования, например, как это указано в работе [1]. Кроме того, даже если разработка технологических инструкций не является обязательной, применение нормативных документов в печатном или отсканированном виде создает определенные неудобства для дефектоскописта. Это выражается в увеличении времени, затрачиваемого на поиск необходимых сведений, соответствующих текущим условиям проведения контроля. Также следует учитывать, что при необходимости выполнения сложных расчетов, например, таких как вычисление эквивалентной чувствительности или таких характеристик дефектов, как коэффициент выявляемости (Кд) и эквивалентная площадь (Sэ) [1], существует достаточно высокая вероятность появления ошибок в получаемых результатах. Для того чтобы облегчить работу дефектоскописта и повысить точность расчетов, целесообразно перевести информацию из

нормативных документов в формат программного кода, то есть создать специализированную компьютерную программу.

Перед началом разработки такой программы необходимо детально изучить содержание нормативных документов, которые будут составлять ее основу. Из всего объема информации следует выделить только те данные, которые имеют отношение к контролю сварных соединений в конкретных областях, а именно в железнодорожной отрасли и в системах нефте- и газотранспорта [2 – 7]. Программа была реализована на языке Python (рисунок 1) с применением библиотеки FreeSimpleGUI, которая является копией библиотеки PySimpleGUI и позволяет обеспечивать свободное распространение программы без ограничений, связанных с лицензионными условиями [8].

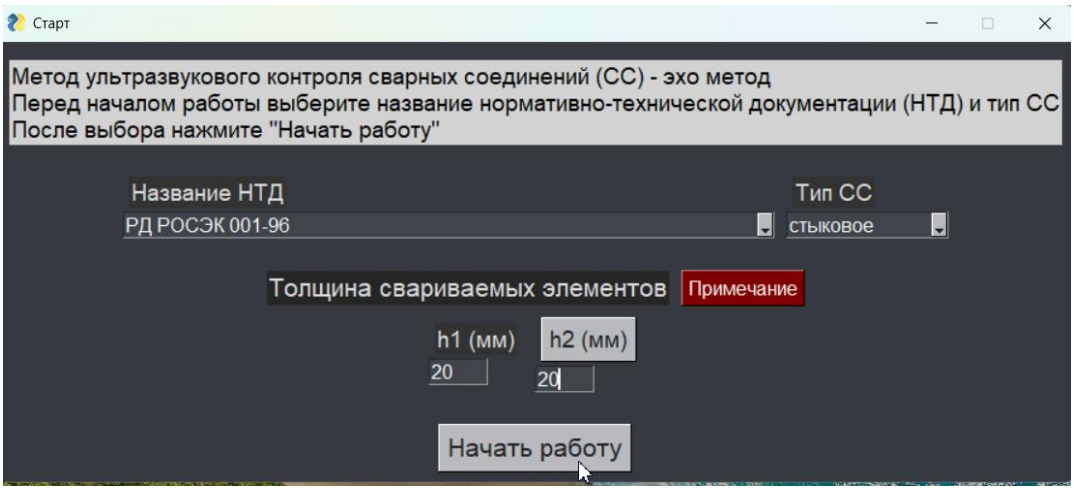



Рис. 1. Стартовое окно компьютерной программы

После запуска программы пользователю предлагается выбрать нормативный документ, согласно которому подбираются: тип сварного соединения, например, стыковое, угловое, нахлесточное или тавровое, а также указать толщину соединяемых элементов. Кнопка с названием «Примечание» служит для вызова справочного окна, в котором может содержаться расшифровка аббревиатур или дополнительная информация (см. рис. 1).

Программа имеет в своем составе шесть активных вкладок, которые позволяют изменять соответствующие параметры (рис. 2). В первой вкладке, которая называется «Параметры УЗ волны», позволяет ввести необходимые значения скоростей (продольной или поперечной волны) ультразвука в материале объекта контроля, а также известную скорость в материале призмы или (и) протектора пьезоэлектрического преобразователя. Для удобства пользователя предусмотрена кнопка «Справочник значений скоростей УЗ волны», нажатие на которую открывает дополнительное окно со справочными данными по скоростям ультразвука в различных материалах, преимущественно в различных марках стали.

Следующая вкладка программы предназначена для задания параметров сварного соединения и схемы контроля. В ней пользователь указывает данные, соответствующие ранее выбранному типу соединения. Нажатие кнопки

«Определение размера ОЗ» вызывает окно с информацией о размере околошовной зоны или с сообщением об отсутствии этих данных в нормативной документации. Кнопка «Схема контроля» предназначена для отображения схемы контроля, которая соответствует выбранным параметрам соединения (рис. 3).

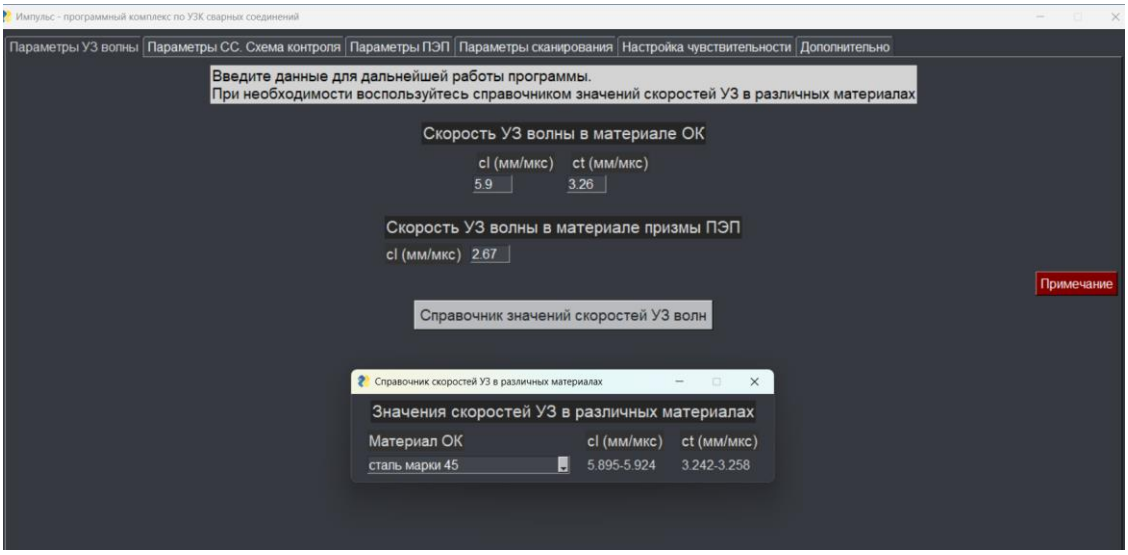



Рис. 2. Главное окно компьютерной программы. Вкладка «Параметры УЗ волны»

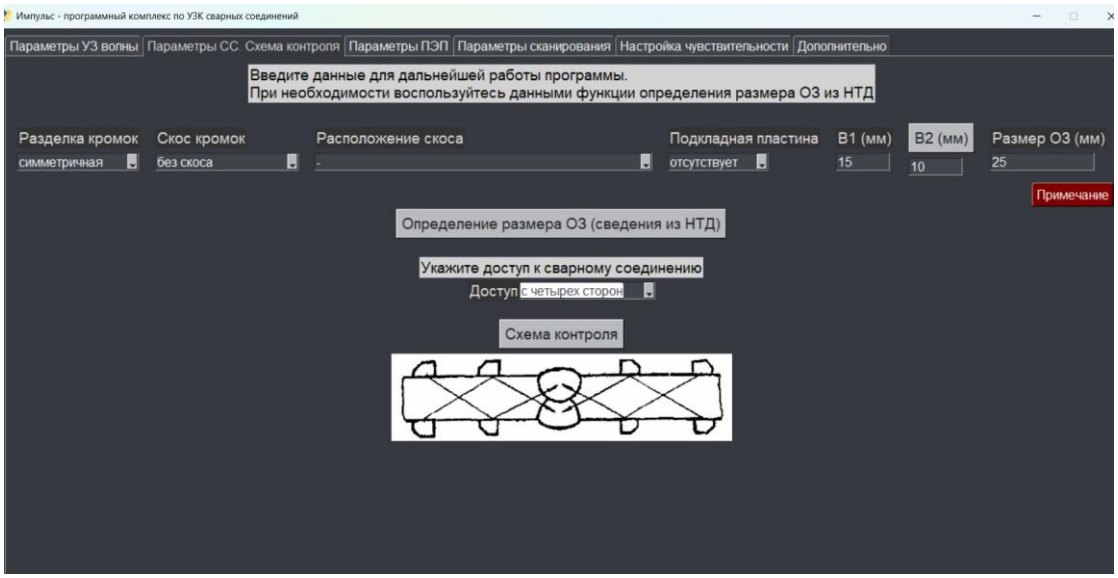



Рис. 3. Главное окно компьютерной программы. Вкладка «Параметры СС. Схема контроля»

Вкладка «Параметры ПЭП» содержит две основные части. В верхней части после нажатия кнопки «Отобразить» выводятся тип пьезоэлектрического преобразователя и тип луча, взятые из нормативного документа. В нижней части происходит вывод параметров преобразователя. Кнопка «Выбор параметров наклонных ПЭП» позволяет открыть дополнительное окно с параметрами, которые позволяют проводить контроль в зоне термического влияния на основной металл. Кнопка «Условия прозвучиваемости» позволяет

проверить выполнение соответствующего условия для стыковых швов [9]. Кнопка «Пересчет прямоугольной пьезопластины в круглую» дает возможность ввести размеры прямоугольной пластины и произвести пересчет [10]. В случае разных толщин элементов переключатель устанавливается сначала для одного элемента, а затем для второго. Ввод параметров ПЭП является необходимым действием для дальнейшей работы компьютерной программы (рис. 4).

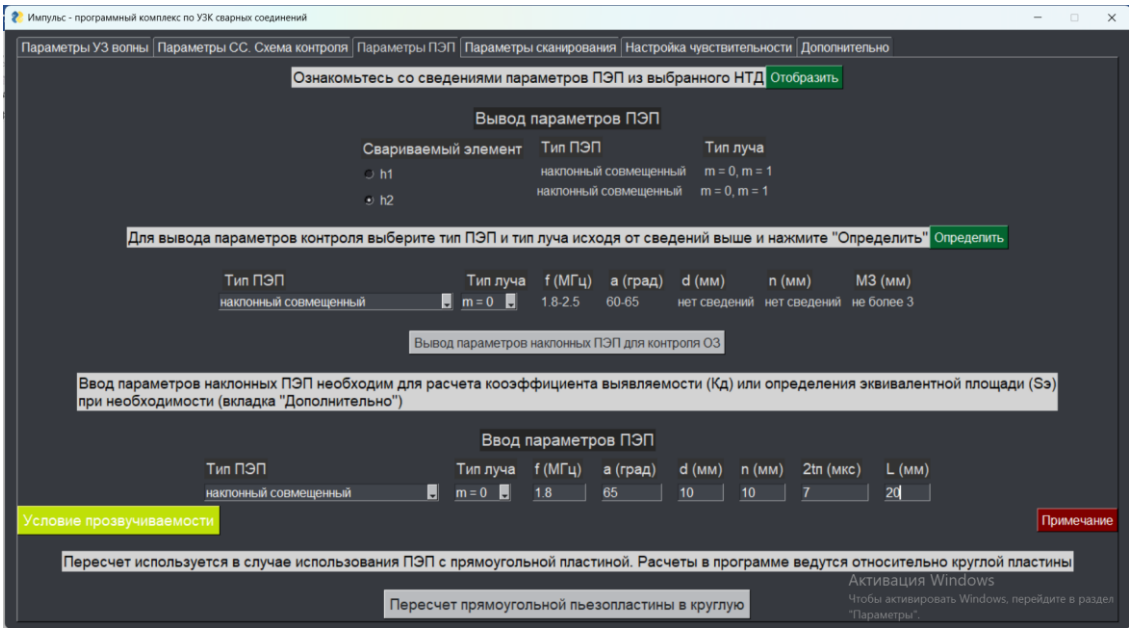



Рис. 4 – Главное окно компьютерной программы. Вкладка «Параметры ПЭП»

Вкладка «Параметры сканирования», в данном режиме, компьютерная программа позволяет провести расчет границ зон перемещения преобразователя, а также визуализировать вывод информации о типе сканирования и величине шага. Кнопка «Схема границ зон перемещения ПЭП» отображает соответствующую зону сканирования. Кнопки «Поперечно-продольное перемещение ПЭП» вызывают дополнительные окна для расчета шага сканирования с учетом параметров преобразователя и превышения поискового уровня над браковочным [9]. Кнопка «Схема сканирования» выводит на экран схему сканирования (рис. 5).

Вкладка «Настройка чувствительности» позволяет при воспроизведении кнопкой «Отобразить» перейти в способ настройки, тип отражателя и его размеры вид чувствительности, и дополнительные сведения. Кнопка «ВРЧ» открывает окно для настройки временной регулировки чувствительности и отображения схемы. Кнопкой «Критерии браковки» переходим в режим для ввода параметров с целью определения критериев браковки по выбранному документу. Кнопка «Схема настройки» визуализирует схему настройки (рис. 6).

Вкладка «Дополнительно» предоставляет возможность выполнить расчет коэффициента Кд и эквивалентной площади Sэ. Кнопка «Корректность расчета» проверяет соблюдение условия трех ближних зон, согласно которому расчеты справедливы только для дальней зоны [9]. Кнопка «Пересчет углового

отражателя» открывает окно для ввода параметров отражателя и пересчета по ГОСТ Р 55724 [11] (рис. 7).

Рис. 5. Главное окно компьютерной программы. Вкладка «Параметры сканирования»

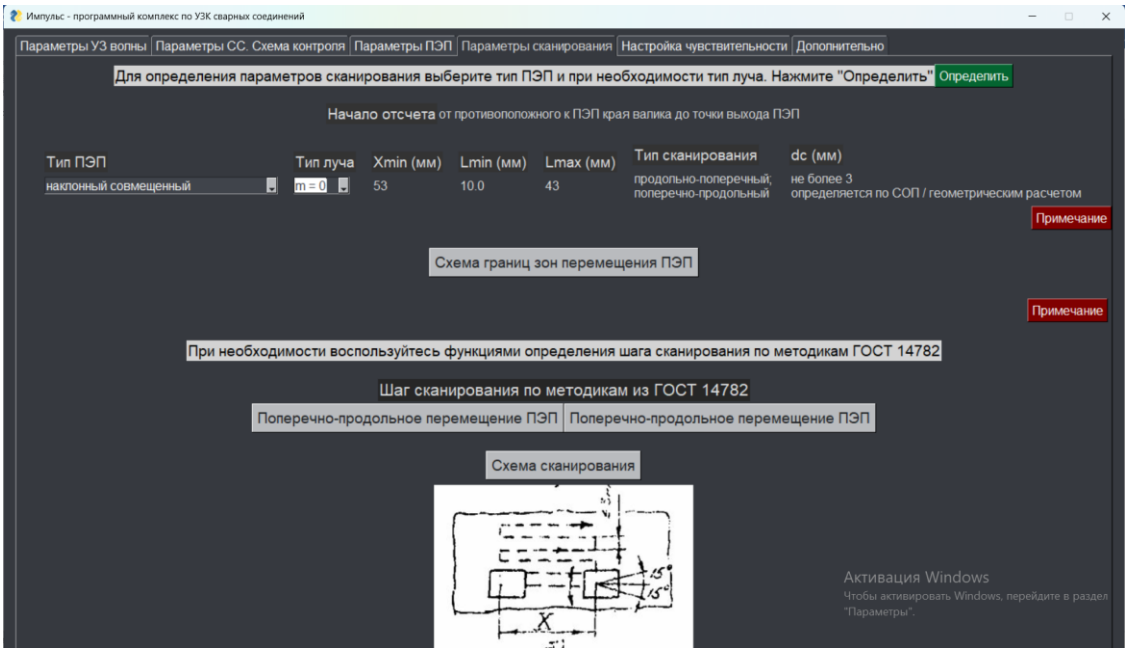



Рис. 6. Главное окно компьютерной программы. Вкладка «Параметры сканирования»

В случае если пользователь пропускает ввод какого-либо параметра, программа выводит сообщение об ошибке с рекомендациями по исправлению ситуации. Быстродействие программы обеспечивается простотой интерфейса. Объем программы менее 20 МБ, что способствует ее легкой установке на компьютер.

На программу получено свидетельство о регистрации [12]. Дальнейшее применение программы позволит количественно оценить сокращение времени подготовки к контролю.

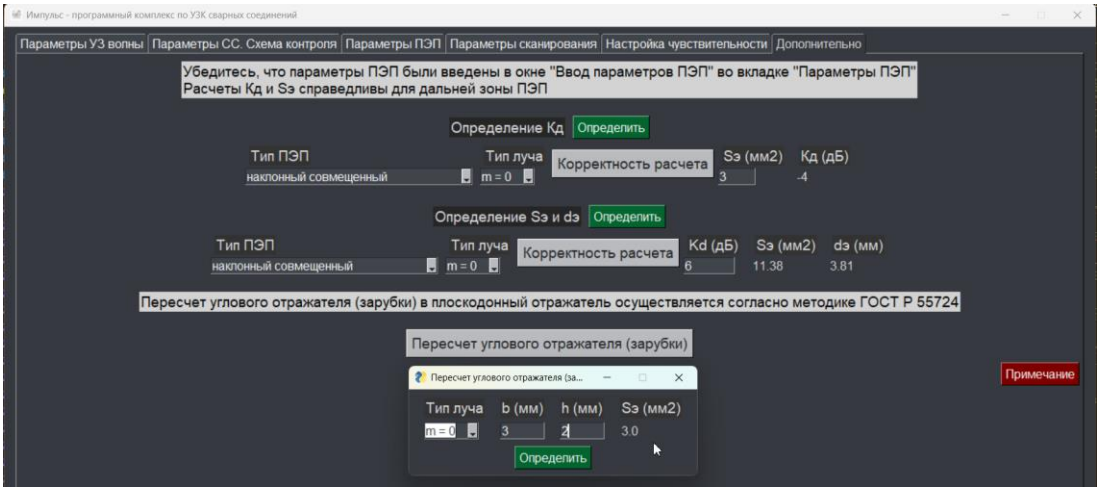



Рис. 7. Главное окно компьютерной программы. Вкладка «Дополнительно»

**Список литературы**

1. Особенности применения требований ГОСТ ISO 11666 "УЗК. Уровни приемки" в практике контроля сварных соединений. Коншина В.Н., Николаев В.С., Цомук С.Р. Дефектоскопия. 2025. № 9. - С. 26-31.
2. ГОСТ 34991-2023. Соединения сварные в стальных конструкциях подвижного состава. Методы ультразвукового контроля.
3. РД РОСЭК 001-96. Машины грузоподъемные. Конструкции металлические. Контроль ультразвуковой. Основные положения [Текст]. – М. : Машиностроение, 1998.
4. СТО Газпром 15-2.3-005-2023. Сварка и неразрушающий контроль сварных соединений. Ультразвуковой контроль качества сварных соединений [Текст]. – СПб. : ПАО «Газпром», ООО «НИИ природных газов газовых технологий – ВНИИГАЗ», 2023.
5. СТО Газпром 15-1.3-004-2023. Сварка и неразрушающий контроль сварных соединений. Неразрушающие методы контроля качества сварных соединений промысловых и магистральных трубопроводов [Текст]. – СПб.: ПАО «Газпром», ООО «НИИ природных газов газовых технологий – ВНИИГАЗ», 2023.
6. ОСТ 36-75-83. Контроль неразрушающий. Сварные соединения трубопроводов. Ультразвуковой метод [Текст]. – М. : ВНИИмонтажспецстрой, 1984.
7. РД 19.100.00-КТН-545-06 Ультразвуковой контроль стенки сварных соединений при эксплуатации и ремонте вертикальных стальных резервуаров. –М.: ОАО «АК «Транснефть», 2006.
8. Python: что это за язык программирования и где применяется [Электронный ресурс] // Skillfactory Media. M., 2024. URL: https://blog.skillfactory.ru/glossary/python/.
9. Справочные диаграммы направленности искателей ультразвуковых дефектоскопов Гурвич А.К., Кузьмина Л.И. Киев, Техника 1980. 103 с.
10. Алешин, Н.П. Физические методы неразрушающего контроля сварных соединений [Электронный ресурс] : учебное пособие. — Электрон. дан. — М. : Машиностроение, 2013. — 576 с. — Режим доступа: http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=63211.
11. ГОСТ Р 55724-2013. Контроль неразрушающий. Соединения сварные. Методы ультразвуковые [Текст]. – М. : Стандартинформ, 2019.
112. Определение параметров ультразвукового контроля сварных соединений в транспортных системах Николаев С.В., Афанасьева В.Д., Коншина В.Н., Воробьев А.А. Свидетельство о регистрации RU 2026663560, 07.05.2026.

**Контакты:**
nikol_ndt@mail.ru (Николаев Сергей Викторович)

УДК 622.23.01

***Ю. Г. БАБАСКИН**, канд. техн. наук, проф.*
Белорусский национальный технический университет (Минск, Беларусь)

# ДИАГНОСТИКА ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ

**Аннотация**. При строительстве автомобильных дорог применяется большое количество горных пород в виде щебня, гальки, дресвы, гравия, песка, представленные магматическими, метаморфическими и осадочными породами. Для определения петрографического состава проводится диагностика горных пород по совокупности различных признаков. Методика определения названия горной породы включает: разделение по прочности, генезису, текстуре и структуре, по определению минералогического состава и сравнения полученных признаков с определителем.

**Ключевые слова:** порода, минерал, диагностика, классификация, прочность, текстура, структура, определитель, анализ.

При строительстве автомобильных дорог применяется большое количество различных горных пород, которые имеют осадочное или вулканическое происхождение. Горные породы являются сырьем для получения дорожно-строительных материалов. Сооружение насыпи автомобильной дороги связано с применением песчаных и пылевато-глинистых грунтов, относящихся к породам осадочного происхождения. Создание различных бетонных смесей (асфальтобетона, цементобетона) требует применения щебня и гравия, которые относятся к породам магматического или метаморфического происхождения, а производство минерального порошка для асфальтобетонных смесей связано с дроблением таких осадочных горных пород, как известняк, доломит и др., относящимся к органогенным и карбонатным отложениям.

Рассмотренная диагностика касается определения наименования горной породы, относящейся к таким видам как осадочная сцементированная, магматическая и метаморфическая. Рыхлые осадочные горные породы (песок, супесь, суглинок и глина) диагностируются по другим принципам, относящимся к гранулометрическому составу, содержанию пылеватых и глинистых частиц и другим параметрам.

В практике инженерной геологии существует классификация горных пород, подразделяющая их на магматические, метаморфические и осадочные, каждая из которых классифицируется в зависимости от залегания, содержания двуокиси кремния, перекристаллизации, процесса разрушения и ряда других условий. Все эти признаки влияют на их структуру, которая отражает прочностные свойства горных пород, что является определяющим при выборе материала при строительстве дорог. В связи с этим, немаловажное значение имеет диагностика горной породы, при её залегании в земной коре в виде формации, чем и занимаются петрография и литология.

Учебные программы подготовки инженеров дорожного строительства предусматривают изучение диагностики минералов, которая имеет

отличительные признаки от диагностики горной породы. Дело в том, что минералы, как правило, имеют химическую формулу, отражающую их состав и внутреннее строение, а горная порода состоит из множества минералов, что делает, в большинстве случаев, невозможным отражения их химического состава через конкретную формулу. Учитывая, что в горных породах химические элементы связаны с кислородом, то их химический состав отражается окислами (с кремнием, алюминием, железом, магнием, кальцием и др.). Химические элементы помогают разделить похожие горные породы на конкретную породу, имеющую определенное наименования. Например, гранит состоит из ряда минералов, таких как: кварц, полевой шпат, слюда, роговая обманка и др. В связи с этим, диагностика минерала является более простой и включает определение его физических свойств, несложные химические испытания и сравнение полученных данных с диагностическими признаками определителя, в котором эти признаки сгруппированы по цвету, блеску, твердости, удельному весу и др.

Для проведения диагностики горных пород необходимо предусмотреть так называемый подготовительный цикл, заключающийся в изучении различий между отдельными видами горных пород (например, между магматическими, метаморфическими и осадочными породами), владеть навыками определения физических свойств горных пород и распознавания основных породообразующих минералов (кварца, полевого шпата, цветных минералов, карбонатов и др.), уметь проводить химические испытания: на фосфор, на взаимодействие с 10 %-ной соляной кислотой, на окрашивание азотной кислотой карбонатов и глинистых минералов. При сравнении полученных данных с показателями определителя, потребуется выполнить анализ многолучевой диаграммы.

Диагностика горной породы производится по совокупности различных признаков. Для проведения визуального (макроскопического) анализа, с целью определения петрографического состава горной породы, необходимо иметь соответствующий материал в виде 2-3 крупных обломков (размером ориентировочно 30х30х20 см) со свежими сколами, по которым можно изучить структуру и текстуру распознаваемой породы. При невозможности получения образца искомого размера, его крупность может быть снижена до 12х9х2 см. В полевых условиях для ориентировочной оценки выполняют только визуальный анализ, для этого с целью рассмотрения отдельных зерен, необходимо иметь увеличительное стекло (кратность увеличения 7-10). В местах коренного выхода породы на поверхность необходимо зафиксировать условия её залегания, чтобы в дальнейшем дать правильную оценку образования породы.

Однако, более подробное исследование можно выполнить только в камеральных условиях. Прежде всего образцы породы необходимо разделить визуально на отдельные их виды: магматические, метаморфические и осадочные, с учетом особенностей их структуры и текстуры.

Например, магматические породы классифицируются по количественному соотношению (семь групп) породообразующих минералов (классификация

А. Н. Заварицкого), для которых важнейшими классификационными минералами являются: плагиоклаз, ортоклаз, микроклин, кварц, оливин, биотит, роговая обманка, нефелин. Для хорошо раскристаллизованных пород характерна плотная структура с кристаллами различных размеров.

Самым типичным отличием метаморфических пород от магматических является их слоистость. Однако, надо учитывать, что отдельные виды метаморфических пород, например, мрамор, не имеют слоистости, поскольку они состоят из кальцита и кварцита. Осадочные породы в большей степени характеризуются зернистостью, а не кристаллами, кроме того, они имеют пористую структуру. И конечно самым наглядным примером отличия этих пород друг от друга является их прочность. Поэтому, придав искомому образцу правильную форму и подвергнув образец испытанию на прессе, можно получить данные, характеризующие их прочность (таблица 1).

Табл. 1. Прочностные результаты горных пород

| Наименование горной породы | Средняя плотность, г/см$^3$ | Предел прочности при сжатии, МПа |
|---|---|---|
| Магматические интрузивные: | | |
| гранит, сиенит | 2.5-2,9 | 100-330 |
| габбро | 2.9-3,2 | 100-300 |
| Магматические эффузивные: | | |
| кварцевый порфир | 2.5-2.7 | 80-300 |
| трахит | 2.0-2,4 | 32-240 |
| андезит | 2,3-2.4 | 160-330 |
| Метаморфические: | | |
| мрамор | 2,6-2,8 | 60-300 |
| кварцит | 2,5-2,7 | 250-400 |
| Осадочные: | | |
| известняк | 1,8-2,6 | 15-100 |
| доломит | 2,2-2,8 | 15-200 |
| известняк метоморфизированный | 2,6-2,8 | 60-180 |
| гипсовый камень | 2,0-2.3 | 30-300 |

Скальные горные породы с пределом прочности на одноосное сжатие более 120 МПа, относятся к очень прочным, с пределом прочности 120…50 МПа к прочным, 50…15 МПа средней прочности, 15…5 МПа к малопрочным.

В лабораторных условиях точную характеристику структуры горной породы можно получить с помощью поляризационного микроскопа. Кроме того, только в лабораторных условиях можно провести различные химические анализы, начиная о обычных качественных и количественных до дериватографического и рентгеноструктурного. С помощью 10 %-ной соляной кислоты можно наблюдать кипение с выделением углекислого газа, что свидетельствует о том, что главный породообразующий минерал относится к классу карбонатов (предположительно – кальцит (известковый шпат)).

На основании вышеизложенного материала можно заключить, что методика определения вида горной породы включает отдельные этапы.

1) Разделение породы на сыпучую, легко-, трудно- и неломающуюся руками производят на основании предварительного изучения горной породы. По этому признаку можно отнести породу к осадочной рыхлой или сцементированной, или к кристаллической. По наличию кристаллов магматические породы необходимо разделить на интрузивные с зернистой структурой (полнокристаллической) и эффузивные (порфировой, стекловатой, пористой структурой). По цвету каждую породу можно отнести к группе: лейкократовой (кислые породы), мезократовые (средние по цветовому индексу) и меланократовой (основные или ультраосновные породы). У средних пород преобладает серая окраска. Метаморфические породы необходимо разделить по текстуре на: сланцеватую, пятнистую, плойчатую, массивную.

2) Разделение пород на группы в зависимости от их генезиса. На основании визуального анализа можно произвести разделение на магматические и метаморфические породы, по наличию или отсутствию слоистости.

3) Инструментальные исследования по определению микро- и макроскопического строения изучаемой породы (структуры, текстуры), при этом фиксируются внешние петрографические признаки (цвет, однородность, блеск, характер скола, наличие и характер различных включений, трещины). Микроскопическое исследование минералов в образце включает применение метода окрашивания карбонатов с помощью ализарина. В результате проведения анализа изучают окраску различных минералов. Например, кальцит окрашивается в розовый цвет, доломит и сидерит остаются бесцветными.

4) Лабораторные химические исследования, на основании которых можно обозначить минералогический состав горной породы. Например, кварц растворяется во фтористоводородной кислоте, а в других кислотах не растворяется; кальцит растворяется в разбавленной соляной кислоте. Воздействие 10 процентной соляной кислотой позволит выделить карбонатные породы. При определении фосфора в горных породах (реакция на фосфор), путем воздействия азотной кислоты на образец, можно определить наличие таких минералов как апатиты, фосфориты. Если поверхность образца покрыть на 2 минуты фиолетовыми чернилами, разбавленными HCl до позеленения, то на кальците пятно станет фиолетовым, а на доломите останется зеленым. При удалении чернил фильтровальной бумагой кальцит останется фиолетовым, а доломит – бесцветным. Кварц растворяется во фтористоводородной кислоте, электричество не проводит, обладает пироэлектрическим и пьезоэлектрическим эффектами;

5) сравнение результатов проведенных анализов с характеристиками таблицы-определителя, составленной с учетом многолучевой диаграммы [1].

Определитель горных пород составлен с учетом их разделения на:

- породы, состоящие из основной массы и включений;

- породы полосчатые, слоистые, где отдельные слои имеют однородное строение;

- породы однородные.

Дальнейшие исследования проводят по следующим признакам:

- наличие шарообразных кристаллов;

- характеристика текстуры (пористая, губчатая, пузыристая);

- характеристика структуры (зернистой - тонкозернистой, скрытокристаллической – сланцеватой, массивной);

- присутствие сцементированных обломков горных пород и отдельных минералов;

- наличие цветных минералов (более 50 %, 50 - 5 %, 5 – 0 %);

- присутствие породообразующих минералов (кварц, полевой шпат, кальцит, нефелин и др.).

При наличии выбранных показателей переходят к многолучевой диаграмме, которая представляет собой схему в виде ветвей, на которой обозначены выше приведенные признаки. Последовательное перемещение по ветви с учетом полученных данных позволит дойти до конца ветви, где будет приведено название горной породы. Диаграммы для пород с включениями, слоистых и однородных, составлены с учетом разделения пород на виды. В результате выполнения всех этапов по выше обозначенной методике определяют название, как правило, нескольких горных пород, совпадающих по отдельным признакам, из которых необходимо выбрать единственную. Для этого необходимо воспользоваться описанием выбранных пород в разделе «Диагностика», выбранного определителя, и сравнить данные из этого раздела с полученными характеристиками при полевом и лабораторном исследовании.

Немаловажное значение имеют условия залегания горной породы, которые должны быть зафиксированы при полевом обследовании и с учетом которых можно диагностировать наименование горной породы. Однако, для этого необходимы более глубокие знания и соответствующий опыт работы.

В лабораторных условиях для диагностики минерала или минералогических скоплений может быть применен дифференциальный термический анализ – ДТА, позволяющий получить дифференциальные термограммы, отражающие изменение тепла в виде его поглощения или выделения. Более совершенным методом, позволяющим наряду с тепловыми процессами получить дополнительные сведения по изменению массы кристаллических образцов минералов при нагревании, является дериватографический метод. Применяется данный метод для исследования быстро протекающих процессов перехода от одного состояния к другому, при разделении молекулярных комплексов на большее количество молекулярных элементов, например, при определении количества воды и гидроксидов в минералах.

Качественная диагностика кристаллического материала может быть проведена с помощью рентгеноструктурного анализа (РСА), в основе которого лежит прохождение рентгеновских лучей сквозь кристаллическую решетку

минерального образца. Под действие рентгеновских лучей электроны атомов кристаллического образца приобретают вынужденные колебания определенной частоты, в результате чего происходит рассеивание рентгеновских лучей, сопровождающееся дифракцией, т. е. огибанием волнами электронов, а при наложении волн друг на друга происходит изменение результирующей амплитуды. Такое явление называется интерференцией. Этот метод применим для диагностики более чем двухсот минералов, относящихся к классу угольной кислоты (карбонатам) и имеющие в своем составе такие химические элементы как кальций, натрий, магний, железо и др. Данные, полученной в результате диагностики, необходимо обсудить на консультациях с квалифицированными специалистами.

Наиболее сложными исследованиями в изучении горных пород являются геофизические, которые включают в себя электрический каротаж в сочетании с радиоактивными и акустическими методами, позволяющими определить литологический состав горной породы.

Выбранная методика позволяет определить название горной породы.

На основании приведенных данных можно сделать следующие выводы.

Вид горной породы, при её использовании в качестве материала для строительства автомобильных дорог, оказывает большое влияние на прочностные свойства инженерной конструкции. В связи с этим, необходимо возможно точно определить название горной породы, с целью обеспечения необходимых эксплуатационных свойств дороги.

Диагностика горных пород может быть проведена специалистом, обладающим необходимыми знаниями по определению вида минерала, полевым инженерно-геологическим обследованиям, определению физических и химических свойств минералогических образований.

Процесс диагностики включает подготовительный этап, проведение визуального анализа минеральных образцов, серию лабораторных инструментальных испытаний по определению физических и химических свойств исследуемых образцов.

Определение названия горной породы основывается на сравнении результатов проведенных анализов с данными таблицы-определителя и консультативном заключении.

**Список литературы**

1. Материалы и горные породы СССР / Здорик Т. Б. [и др.]. – Москва: Мысль – 1970. – 438с.

Контакты:
babaskiny@mail.ru (Бабаскин Юрий Георгиевич).

УДК 625

***Ю. Г. БАБАСКИН**, канд. техн. наук, проф.*
***С. Н. СОБОЛЕВСКАЯ***
Белорусский национальный технический университет (Минск, Беларусь)

# ПРИМЕНЕНИЕ ПОВЕРХНОСТНО-АКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ И КОМПОЗИТОВ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ БЕТОННЫХ СМЕСЕЙ

**Аннотация**. Асфальтобетон, как дорожно-строительный материал, относится к технологическим, поскольку под действием изменения температуры он может приобретать новое состояние. С целью экономии дорогостоящих минеральных материалов, при производстве составов асфальто- и цементобетонов, часто применяют побочные продукта различных производств. Модификацию битума производят с целью повышения его когезионных и адгезионных свойств и улучшения его термостойкости. Рассмотрена взаимосвязь между минеральными компонентами и органическим вяжущим. Представлены результаты по разработке таких композиционных вяжущих, как асфальтоцементы, имеющие сложную структуру микроагрегатов цементных зерен, покрытых пленкой органического вяжущего. Для улучшения адгезионных связей между органическим вяжущим и минеральным материалом применяют поверхностно-активные вещества или композиты.

**Ключевые слова:** асфальтобетон, цементобетон, адгезия, когезия, поверхностно-активные вещества, заполнитель, асфальтоцемент.

Капитальные покрытия автомобильных дорог Беларуси представлены жесткими (цементобетонными) и нежесткими (асфальтобетонными) покрытиями. Общая протяженность республиканских дорог составляет около 16 тыс. км., из них 96 % имеют асфальтобетонное покрытие и порядка 2 % - цементобетонные. Асфальтобетон, как дорожно-строительный материал относится к технологическим, поскольку под действием изменения температуры он может приобретать новое состояние, а при дополнительной обработке вяжущим веществом восстанавливать свои первоначальные свойства. Современные составы асфальтобетона проектируются в два этапа, с разработкой минеральной части и с добавлением битума, в соответствии с методиками объемного проектирования по Маршалу или Superpave. С целью экономии дорогостоящих каменных составляющих все чаще находят применение добавки строительного лома, доломита, известняка, сталеплавильного шлака и др. Весьма эффективно себя зарекомендовали применение волокнистых добавок в виде джутовых, стальных, керамических волокон, диатомитового стекловолокна, фибрами стекловолокна, армирующие битумные смеси.

Поиск новых рецептур касается не только крупного заполнителя, но и минерального порошка. Например, в качестве минерального порошка находят применение порошок, получаемый при измельчении керамической плитки, молотого доменного шлака, золошлаковые отходы, гашеная известь, отработанная формовочная смесь и многие другие.

Кроме замены минеральных компонентов в асфальтобетоне проводятся научные исследования по модификации битума, позволяющие улучшить качество органического вяжущего и повысить его долговечность. Одной из основных задач в материаловедении является повышение когезионных свойств битумов, его термостойкости как при высоких, так и при низких температурах. Отдельные задачи решены в результате применения полимербетонов, созданных на основе латексов, термоэластопластов и других полимерных добавок, а также гранулированных добавок переработанных резиновых шин.

Для обоснования применения того или иного компонента, для модификации органического вяжущего, необходимо рассмотреть состояние минерального составляющего, а также возможность взаимодействия компонентов битума с поверхностью минеральной частицы. При обработке каменного материала органическим вяжущим между ними возникает связь, ведущая к прилипанию (адгезии) битума к поверхности минеральной частицы. Каменные материалы могут относиться по содержанию двуокиси кремния к широкому диапазону минералогических образований - от кислых (65…75 %) до основных (40…52 %) соединений. Например, кварцевый песок состоит из ионов $(SiO_4)^{4-}$ в виде тетраэдров, в центре которых расположены катионы $(Si^{4+})$, связанные с анионами $(O^{2-})$. В связи с этим можно заключить, что поверхность частицы имеет отрицательный заряд. Основными минералами, входящими в состав гранита, являются: полевые шпаты 60…65 %, кварц 25…35 % и слюды 5…10 %, причем содержание двуокиси кремния составляет порядка 68…73 %. Таким образом кварцевый песок или гранит концентрируют на своей поверхности отрицательный заряд, а известняк или доломит положительный.

Битум в свою очередь представляет собой сложную систему высокомолекулярных углеводородных соединений. Как правило химический состав битумов колеблется в пределах: 80…87 % углерода, 8…12 % водорода, 0,2…4 % кислорода, 0,5…7 % серы, 0,2…0,5 % азота, причем атом углерода обладает дипольным моментом Групповой состав включает содержание: масла — 40…60 %, смолы — 20…40 %, асфальтенов — 10…25 %, карбенов и карбоидов — 1…3 %. В зависимости от содержания этих компонентов различают три структуры битума (по А.С. Колбановской).

Первая структура характерна для твердого битума, представляющая сетку из мицелл (дисперсная фаза), которые состоят из асфальтенов, образующих ядро размером порядка 18…29 мкм, окруженных оболочкой смолы, а сами мицеллы окружены дисперсионной средой в виде раствора смол в маслах. Битумы с такой структурой содержат: асфальтенов более 25 %, смол менее 25 % и масел более 50 %.

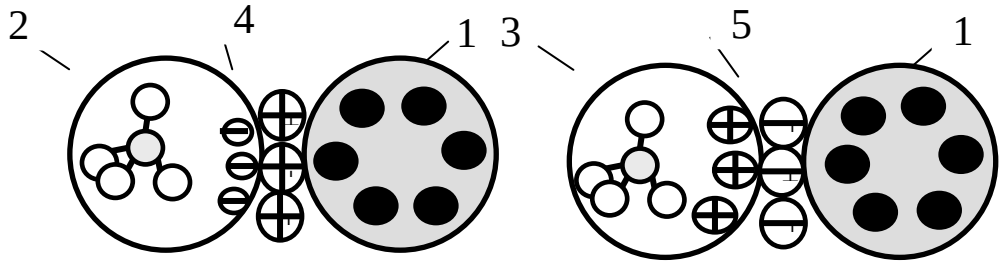
Вторая структура характерна для жидкого битума, в котором содержание асфальтенов ниже чем в первой структуре, в связи с чем прочность связей обусловлена содержанием смол. Битумы с такой структурой содержат: асфальтенов не более 20 %, смол свыше 35 % и масел менее 50 %

Третья структура представляет собой промежуточную формацию между первой и второй и характерна для вязких битумов. Такая структура

характеризуется содержанием основных компонентов: асфальтенов 20…25 %, смол более 30 % и масел до 50 %.

При нанесении органического вяжущего на поверхность минерального материала, между ними возникает довольно прочная физическая связь за счет возникающих сил межмолекулярного взаимодействия (ван-дер-ваальса), энергия которых во много раз меньше химических валентных сил. Это связано с достаточно большим расстоянием между молекулами вещества, что сказывается на величине энергии притяжения.

При эксплуатации асфальтобетонных покрытий часто наблюдается их недостаточная водо- и морозостойкость, вызванная низким качеством сцепления битума с минеральным заполнителем, особенно на кислых породах. Одним из современных способов повышения адгезионных связей между органическим вяжущим и минеральным материалом является применение поверхностно-активных веществ (ПАВ), обеспечивающих высокую степень эксплуатационной надежности дорожно-строительных материалов. ПАВ могут нести положительный (катионные – соли алифатических аминов) или отрицательный (анионные) заряд (рис. 1). В качестве катионного ПАВ широкое применение нашла смесь на основе полиэтиленполиамина и синтетических жирных кислот, а анионного - госсиполовая смола (3…7 % по массе). Следовательно, применение катионных ПАВ предпочтительней на кислых горных породах, а анионный на основных, относящихся к карбонатным.




1 – битум, 2 – минеральный материал кислой породы, 3 – минеральный материал основной породы, 4 - ПАВ катионного типа, 5 – ПАВ анионного типа

Рис.1. Схема влияния поверхностно-активного вещества на взаимодействие органического вяжущего с минеральным материалом:

В дорожном строительстве нашли применения поверхностно-активные вещества, полученные на основе полиаминоамидов и полиаминоимидазолинов, а также продукт взаимодействия высокомолекулярных кислот с полиэтиленполиаминами, смеси соединений типа имидазолинов и др. [1].

В последнее время большое внимание уделяется такому виду дорожно-строительных материалов как композитным, которые представляют собой смесь, состоящую из материалов, обладающие специфическими свойствами, недоступными для отдельных компонентов. При строительстве и

реконструкции автомобильных дорог, для создания дорожных покрытий, модульных плит, а также в элементах мостов, эстакад, дренажных сооружениях, нашли применение композиты на основе эпоксидных, полиэфирных и углеродистых волокон. Например, в традиционных бетонах используют армирующие материалы, которые увеличивают прочность и долговечность дорожных конструкций, углеродистые композиты являются прочными и легкими заменителями металлических конструкций

Наряду с применением поверхностно-активных веществ в Белорусском национальном техническом университете проводятся исследования по разработке композитных вяжущих, представляющих собой смесь органического и минерального вяжущего и называемые асфальтоцементами. При смешивании битума и портландцемента образуется структура, состоящая из микроагрегатов цементных зерен, покрытых пленкой органического вещества. Такие вяжущие вещества имеют сложную структуру, состоящую из отдельных матриц, обладающих как коагуляционными связями, свойственными для битума, так и кристаллизационными, свойственными для цемента.

Для того чтобы рассмотреть взаимодействие этих двух термодинамически несовместимых вяжущих необходимо было изучить каждое из вяжущих. Битум был представлен краткой характеристикой изложенной выше. То, что касается кристаллических связей были рассмотрены на основании результатов исследований д.т.н., проф. И.Н. Ахвердова [2]. Следует учитывать, что минералы цемента имеют в основном ионную кристаллическую структуру (решетку), причем между ионами минерала и молекулой воды будет происходить взаимодействие в виде притяжения к положительным ионам (катионам) минерала - молекулы воды через атомы кислорода и к отрицательным ионам (анионам) минерала - молекулы воды через атомы водорода. В результате поверхностные ионы кристаллической решетки минерала перейдут в раствор, образуя гидратную оболочку. Таким образом при затворении цемента водой на поверхностях частиц возникают некомпенсированные заряды, которые создают гидратацию цементных зерен. Причем вода неравномерно распределяется по всему объему, в результате чего возникает система, состоящая из агрегатов дисперсных частиц внутри которых имеется определенное количество сухих цементных зерен. Толщина сольватных пленок увеличивается, а плотность жидкости в цементном геле уменьшается, что ведет к сближению частиц до определенного состояния, после чего происходит качественное изменение, приводящее к образованию крупных комплексов и в результате к формированию структуры цементного геля.

Переход цементного геля, в результате его перенасыщения выше границы местабильности, в твердое вещество связано с образованием центров кристаллизации. В течение периода кристаллизации, при котором не происходит изменение концентрации ионного раствора (индукции), возникающие кристаллы увеличиваются в объеме и срастаются между собой.

Для гидратации цементных зерен с образование кристаллогидратов в виде цементного камня в смесь вводится вода, у которой поверхностная энергия больше, чем у битума (рис. 2).

Основное внимание было уделено зонам контакта между двумя термодинамически несовместимыми материалами /3/. Изучена поверхность раздела и структурные связи, возникающие в ней, или с позиции композитных материалов, связь между матричной и дисперсной фазами.

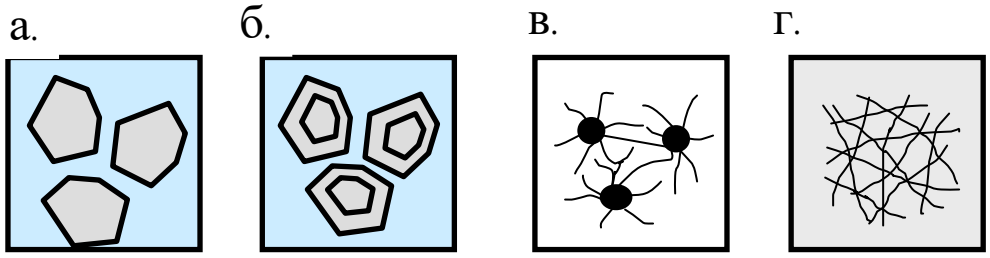



Рис.2. Гидратация цементных зерен: а – состояние цементных зерен в момент контакта с водой; б – образование солватной оболочки вокруг зерен цемента; в – образование волнистых структур в порах цементного камня; г - формирование кристаллической структуры

Приведенные данные коэффициента линейного расширения и релаксационного модуля свидетельствуют о различных физических свойствах органического и минерального составляющих асфальтоцементного композита. Представлены физико-химические особенности органического и минерального составляющих компонентов. Для улучшения адгезионных связей в зонах контакта предложено использование в качестве поверхностно-активного вещества применять живичную канифоль, структура которой включает полярные карбоксильные группы, вступающие во взаимодействие с карбонатными породами. Результаты экспериментальных исследований подтвердили теоретические выводы, сделанные при изучении композитных материалов.

Помимо активации поверхности минерального заполнителя проводятся исследования по модификации отдельных компонентов комплексного вяжущего и разработке новых рецептур органо-минерального вяжущего. Были проведены исследования по введению в битум, побочного продукта, образующегося при окислении циклогексана в процессе производства капролактама, в количестве 0,5, 1,0, 1,5 % от его массы.

Заслуживает внимание направление исследований, связанное с рассмотрением зоны контакта, как между композиционным вяжущим и минеральным заполнителем, так и в самом композиционном вяжущем между органическим и минеральным составляющими. Поверхность контакта этих компонентов можно обозначить как субстат, в качестве которых рассмотрены, с одной стороны минеральный заполнитель и цементный камень, а с другой

органическое вяжущее. Для повышения адгезии между минеральными и органическими составляющими использованы так называемые праймеры, имеющие положительную адгезию, как к битуму, так и к цементу. Наилучшими материалами-праймерами являются синтетические полимеры, которые, согласно молекулярной теории, взаимодействуют по поверхности раздела в две стадии: вначале макромолекулы мигрируют к поверхности, в затем они адсорбируются на ней и ориентируются. Учитывая, что для затворения цементных зерен необходима вода были проанализированы водорастворимые олигомеры, занимающие согласно молекулярной массы промежуточное положение между мономерами и высокомолекулярными соединениями. Одним из выбранных материалов была карбамидноформальдегидная смола, которая хорошо смешивается с водой и отверждается в кислой среде.

На основании выполненных теоретических и лабораторных исследований можно сделать следующее заключение.

При проектировании асфальтобетонных смесей в качестве добавок широко применяют побочные продукты различных производст. Модификация битума и поверхности минеральных компонентов, а также разработка праймеров, позволяют повысить качество вяжущего и улучшить адгезию. Одним из направлений по улучшению адгезионных свойств является применение поверхностно-активных веществ. Применение в дорожном строительстве таких композиционных материалов как асфальтоцемент позволяют получить новые материалы с более высокими физическими свойствами. Учитывая, что при адсорбции воды на частицах двуокиси кремния, поверхность цементных зерен становиться насыщенной силальными группами, то более высокую адгезию будут иметь материалы, содержащие функциональные полярные группы.

**Список литературы**

1. Руководство по применению поверхностно-активных веществ при устройства асфальтобетонных покрытий. Отраслевой дорожный методический документ. Росавтодор . М., 2003 – С 42.

2. Ахвердов И.Н. Основы физики бетона. – М.: Стройиздат, 1981. - 464 с.

3. Веренько В.А. Дорожные композитные материалы. Структура и механические свойства / Под ред. И.И.Леоновича. – Мн.: Наука и техника, 1993. – 246 с.

Контакты;
babaskiny@mail.ru (Бабаскин Юрий Георгиевич)
svsobolevskaj@bntu.by (Соболевская Светлана Николаевна)

УДК 620.179.161. 534.1

***А. Р. БАЕВ*[1]*,*** *д-р техн. наук*
***А. В. ВОРОБЕЙ*[2]**
***М. В. АСАДЧАЯ*[1]*,*** *канд. техн. наук*
***Н. В. ДЕЛЕНКОВСКИЙ*[1]*,*** *канд. техн. наук*
[1]Институт прикладной физики НАН Беларуси (Минск, Беларусь)
[2]ОАО «БЕЛГАЗСТРОЙ» - управляющая компания холдинга» (Минск, Беларусь)

# ОСОБЕННОСТИ ВОЗБУЖДЕНИЯ И РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОЛН В ТЕЛАХ С ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ И СФЕРИЧЕСКОЙ ФОРМОЙ

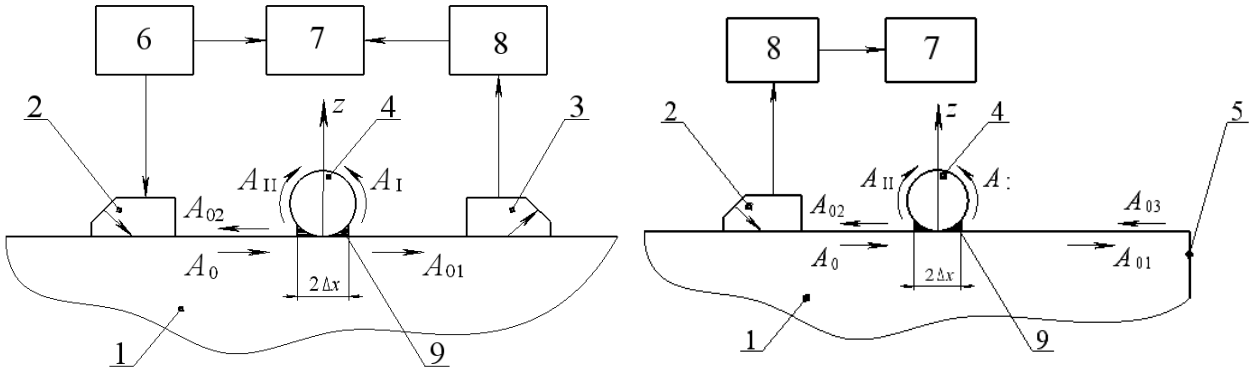
**Аннотация.** Развит предложенный нами метод контроля объектов с цилиндрической и сферической поверхностью путем дистанционного возбуждения в них поверхностных вращающихся мод и их прием ультразвуковыми (контактными) преобразователями. Проанализирован акустический тракт и представлены новые опытные данные об акустических параметрах поверхностных вращающихся мод, зависящих от их рабочей частоты, геометрии объекта, поверхностной структуры объекта, включая наличие трещин разной ориентации.

**Ключевые слова:** поверхностные вращающиеся моды (ПВМ), угловое волновое число, трещины

Повышение эффективности акустической диагностики твердотельных объектов с криволинейной поверхностью, имеющих, например, форму цилиндра, сферы и др. является актуальной производственной задачей. В частности, значительный интерес представляют задачи контроля поверхностной структуры значительного числа объектов промышленного производства объектов. Для этой цели нашли применение, как правило, контактные методы и средства акустического контроля, основанные на возбуждении поверхностных акустических волн (ПАВ), по данным амплитудных, спектральных характеристик, а также скорости ультразвуковых волн, представляется возможным выявлять микроповрежденность металла, глубину упрочненного слоя, трещины и др. [1]. Для этих целей могут применяться и другие – бесконтактные и комбинированные методы, основанные как непосредственно на ЭМА-эффекте, так и оптико-акустических методиках [1]. Однако, применение последних ограничено рядом факторов, включая свойства материала и требования к состоянию поверхности объекта и др. В случае же использования традиционных контактных способов [1] процесс контроля может усложниться, если объект имеет достаточно высокую температуру, ограниченный доступ к нему и другими факторами, а также требуется высокая производительность контроля.

Для решения подобных задач нами ранее [2, 3] был предложен способ «дистанционного» контроля указанных объектов поверхностными вращающимися модами (ПВМ), возбуждаемыми в результате трансформации части потока энергии волны Рэлея, проходящей через граничный контактный слой между стальной подложкой и исследуемым объектом контроля, имеющим форму цилиндра и сферы. При *n*-кратном огибании ПВМ поверхности объекта

происходит «накопление» информации о состоянии его поверхностного и подповерхностного слоя, включая физико-механические свойства, наличие дефектов и другие. При этом для характеристики состояния поверхностного слоя объекта в качестве информативных параметров может быть использовано время распространения волны $\Delta t$, амплитуда $A$, спектр и др. характеристики (рисунок 1) акустических сигналов.




а) б)

Рис.1. Пояснение к предложенному способу дистанционного контроля объектов цилиндрической (или сферической) формы, реализуемого путем использования для возбуждения-приема поверхностных волн двух (а) и одного (б) преобразователя: 1 – подложка, служащая в качестве «линии задержки»; 2 и 3 – излучающий и приемный преобразователи соответственно;4 – объект исследования или тело акустической нагрузки цилиндрической, сферической или др. подобной формы; 5 – торец подложки, служащий в качестве отражателя или опорного сигнала поверхностных акустических волн; 6 – генератор импульсов; 7 – осциллограф; 8 –блок усиления принимаемого сигнала; 9 – жидкость, обеспечивающая акустический контакт.

Ниже рассмотрены вопросы совершенствования методики измерений и предложенного способа контроля объектов в форме цилиндра и сферы, выполненных из стали и дюралюминия, и существенно отличающиеся удельным акустическим сопротивлением практически в ~ 2,8 раза. В качестве исследуемых ниже и важных параметров для оптимальной реализации предложенных схем прозвучивания служит коэффициент прохождения волны Рэлея от излучающего к приемному преобразователю (ПЭП) через границу контакта подложка-объект контроля – $A_{01}/A_0$, а также коэффициент их ослабления (усредненный) $K_{n,n-1}=(\sum A_n/A_{n-1})/n$, позволяет оценить потери энергии вращающейся моды в результате $n$-кратного прохождения ею поверхности объекта. При этом $A_{01}$ – амплитуда импульса волны Рэлея, приходящая на приемный ПЭП от источника излучения при наличии на поверхности подложки объекта контроля, а $A_0$ – в отсутствие его. Этот параметр характеризует энергию, передаваемую волной Рэлея в объект контроля для возбуждения ПВМ. Что касается $A_n$, то это амплитуда импульса ПВМ с порядковым номером $n$, характеризующим количество кругового огибания акустическим импульсом исследуемой поверхности.

Приведенные на рисунке 1 схемы, могут быть использованы при контроле объектов как в режиме эхо, теневом (рис1а), также предлагаемым комбинированным способом (рис.1б). Причем одна из схем (рис.1а, вариант I),

предназначена для сугубо теневого прозвучивания объектов, выполненных из стали и дюралюминия. Что позволяет выявлять параметры акустического тракта как в отсутствие дефектов, так и при их наличии, используя в качестве информативных амплитудные, временные и другие параметры поверхностных волн. С другой стороны, иногда может быть использован вариант измерений II как дополнительный, при котором поверхностные трещины или поры выявляются с помощью одного ПЭП, работающего в режиме эхо. При этом, в результате отражения от дефекта зондирующего импульса ПВМ приобретает вращение в обратную сторону (по часовой стрелке) и принимается источником волн Рэлея после обратного преобразования.

Необходимо обратить внимание на возможности использования комбинированной схемы прозвучивания, поясняемой рисунком 1б, для повышения чувствительности измерений и контроля поверхностных дефектов, используя режим эхо прозвучивания, но отражателем служит не сам дефект, а торец подложки. Как следует из анализа акустического тракта при реализации определенных условий, возможно повышение чувствительности метода обнаружения дефекта в результате рассеяния на нем *n*-го импульса ПВМ дважды – приближаясь к отражателю поверхностных волн (↑) и обратно (↓) – к их источнику. Так, что при реализации рассматриваемого способа обнаружения дефектов функция прохождения зондирующего сигнала $\Xi_n$ может быть представлена в виде произведения упомянутых выше коэффициентов $K^{\uparrow}{}_{n,n-1}$ и $K^{\downarrow}{}_{n,n-1}$ , а также коэффициента отражения волны Рэлея от торца подложки $K_R$ и коэффициентов ослабления ПВМ трещиной в результате рассеяния на ней – $\delta_n^{\uparrow}$ и $\delta_n^{\downarrow}$, соответственно

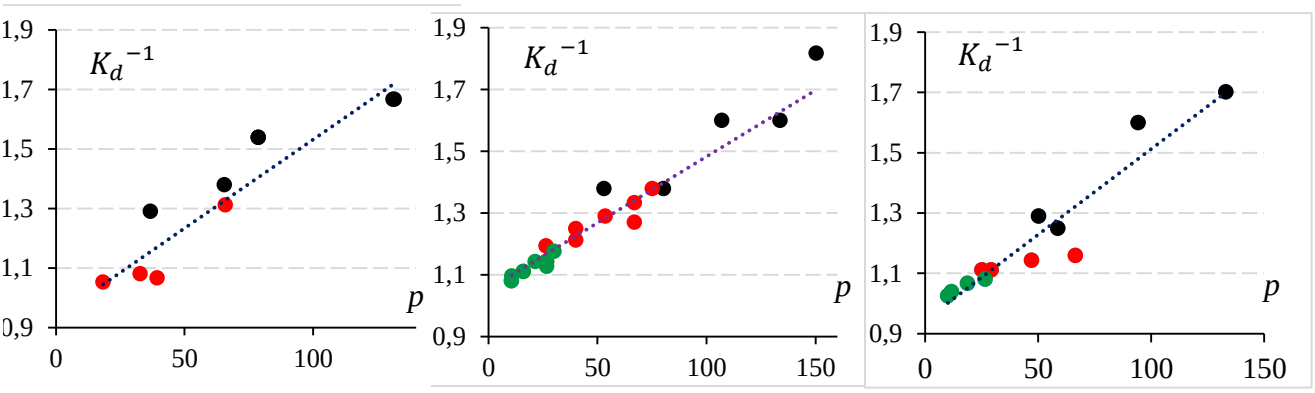
$$\Xi_n \sim K_R{}^2 D_P \prod_{n=1}^{n=n_0} K^{\uparrow}{}_{n,n-1}\, K^{\downarrow}{}_{n,n-1}\left(1-\delta^{\uparrow}{}_n\right)\left(1-\delta^{\downarrow}{}_n\right), \qquad (1)$$

где $D_P$ – коэффициент трансформации волны Рэлея в ПВМ на границе подложка-объект. При реализации теневого режима прозвучивания, в выражение (1) следует подставить $\delta_n^{\downarrow} = K^{*\downarrow}{}_{n,n-1} = 0$, а вместо $K_R - 1$. Очевидно, что если используется традиционный режим эхо прозвучивания (рис.1а), то выражение (1) существенно упрощается.

**Особенности экспериментального исследования**. Для проведения экспериментального исследования использована преимущественно аппаратура, применяемая ранее [3]. При этом, электронная часть схемы экспериментальной установки содержит в качестве источника и приемника электрических импульсов ПАВ блоки стандартного дефектоскопа, включая генератор с частотой следования импульсов 0,5 кГц, блока их усиления с выходом как недетектированного, так и детектированного информативных сигналов на прибора RigolDS7024 с частотой выборки 200 МГц и измерения временных интервалов с погрешностью до ~ 5 нс. Рабочая частота заполнения импульсов $\nu$ = 1,0, 2,5 и 5,0 (МГц). При проведении исследований значительное внимание обращено на создание стабильного акустического контакта преобразователей, для чего использованы магнитные

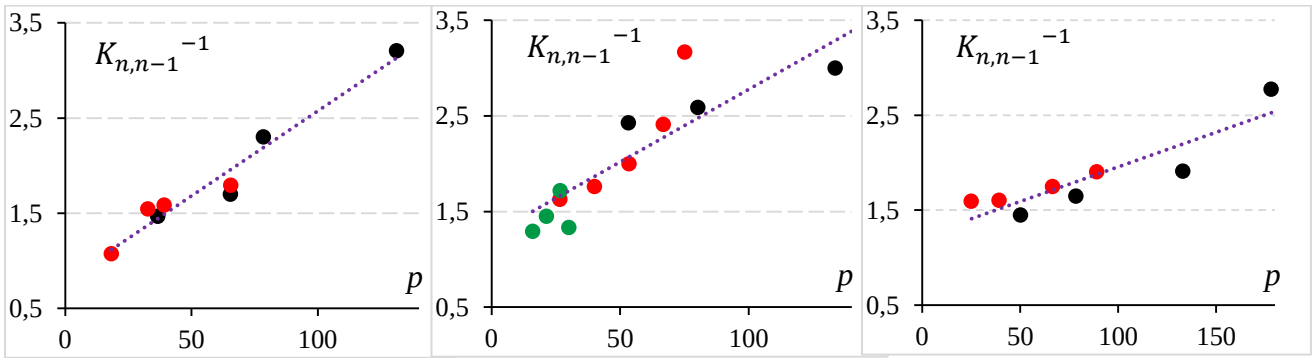
насадки, а также определялись оптимальные условия для преобразования волны Рэлея в ПВМ, создавая постоянный контактный слой между объектом контроля и подложкой. Каждое измерение проводилось 3 раза. Модельные образцы с трещинами с раскрытием их устья до десятка мкм и глубиной до 0,5 – 0,8 мм выполнены путем использования специальной технологии [4].

Результаты экспериментальных исследований приведены на рисунках 2 – 4. Причем на рисунках 2 и 3 впервые иллюстрируются зависимости обратного коэффициента прохождения $K_d^{-1}$ и коэффициента ослабления поверхностных волн $K_{n,n-1}^{-1}$, измеренные теневым способом на стальных и дюралевых цилиндрах, а также стальных сферах разного радиуса. При этом диапазон варьируемого углового волновое числа, определяемого радиусом объекта $R$ и длиной рэлеевской волны $\lambda$ составляет $p = 2\pi R/\lambda$=170 – 180. На рисунке 4 иллюстрируются некоторые возможности использования предложенного метода для выявления поверхностных трещин теневым и комбинированным методом.




а) б) в)

Рис.2. Зависимость обратного коэффициента прохождения $K_d^{-1}$ волной Рэлея акустической нагрузки в виде стального (а) и дюралевого (б) цилиндров, а также стальной сферы (в), установленных на стальной подложке, от углового волнового числа $p = 2\pi R/\lambda$ при реализации теневого варианта прозвучивания на рабочей частоте f, МГц=5 ( ), 2,5( ) и 1( )




а) б) в)

Рис.3. Зависимость обратного коэффициента ослабления волны $K_{n,n-1}^{-1}$ в виде стального (а) и дюралевого (б) цилиндров, а также стальной сферы (в), установленных на стальной подложке, от углового волнового числа $p = 2\pi R/\lambda$ при реализации теневого варианта прозвучивания на рабочей частоте: $f$, МГц=5 ( ), 2,5 ( ) 1( )

Как видно из проведенных экспериментальных исследований (рис.2 и 3) зависимости обратных коэффициента прохождения $K_d{}^{-1}$ волной Рэлея акустической нагрузки в виде цилиндра и сферы и однократного ослабления поверхностной вращающейся модой $K_{n,n-1}{}^{-1}$ являются возрастающими функциями от углового волнового числа и преимущественно имеют квазилинейный вид. Как видно, чем больше угловое волновое число, то есть чем больше радиус исследуемого объекта и меньше длина ультразвуковой волны, тем меньше доля поверхностной волны в подложке пройдет область акустического контакта. Приведенное уменьшение коэффициента прохождения может быть вызвано увеличением доли энергии ПВМ.

Согласно рисунку 3, чем больше угловое волновое число, тем быстрее уменьшается регистрируемая серия импульсов ПВМ. Приведенные зависимости означают, что с увеличением радиуса образца и уменьшением длины ультразвуковой волны поверхностная вращающиеся мода большую долю энергии отдает в подложку, в виде возбуждения волны Рэлея, при каждом прохождении области акустического контакта объект-подложка. Коэффициент ослабления серии импульсов ПВМ характеризует чувствительность предложенного способа контроля и может являться критерием наличия дефектов на поверхности исследуемого объекта. Поверхностные дефекты изменяют коэффициент ослабления. Стоит отметить, что для цилиндрических и сферических образцов коэффициенты ослабления имеют один порядок и близки друг к другу, что может быть связано с преимущественным влиянием геометрии акустического контакта на формирование акустического тракта в плоскости прозвучивания (рис. 1), в которой цилиндрические и сферические образцы идентичны.

На рисунке 4 приведены А-сканы серии импульсов ПВМ при контроле стального цилиндрического образца с трещиной, расположенной вдоль оси цилиндра, теневым (рис.4 а, б) и комбинированным способами (рис.4 в, г). При теневом способе контроля, при наличии дефекта на поверхности контролируемого объекта, в зависимости от его размера, уменьшается количество регистрируемых импульсов ПВМ: 6 импульсов на бездефектном образце (рис.4 а), 4 импульса при наличии трещины (рис.4 б). Количественным показателем наличия дефектов, в этом случае, может являться коэффициент ослабления $K_{n,n-1}$, который, при этом претерпевает изменение (рис.4 а, б). При комбинированном способе часть ультразвуковой энергии возвращается к приемному ПЭП через отражения волны от дефекта, при этом наблюдается увеличение амплитуды соответствующих импульсов (импульсы 1 и 2, рисунок 4 в, г). Часть ультразвуковой волны, в зависимости от размеров дефекта, проходит через него, совершаю многократные обегания. Данная серия импульсов регистрируется аналогично как при теневом способе: импульсы 4 ÷ 7 (рис. 4,в) на бездефектном образце; импульсы 4 и 5 (рис. 4,г) при наличии дефекта. Комбинированный способ совмещает как эхо, так и теневой режимы.

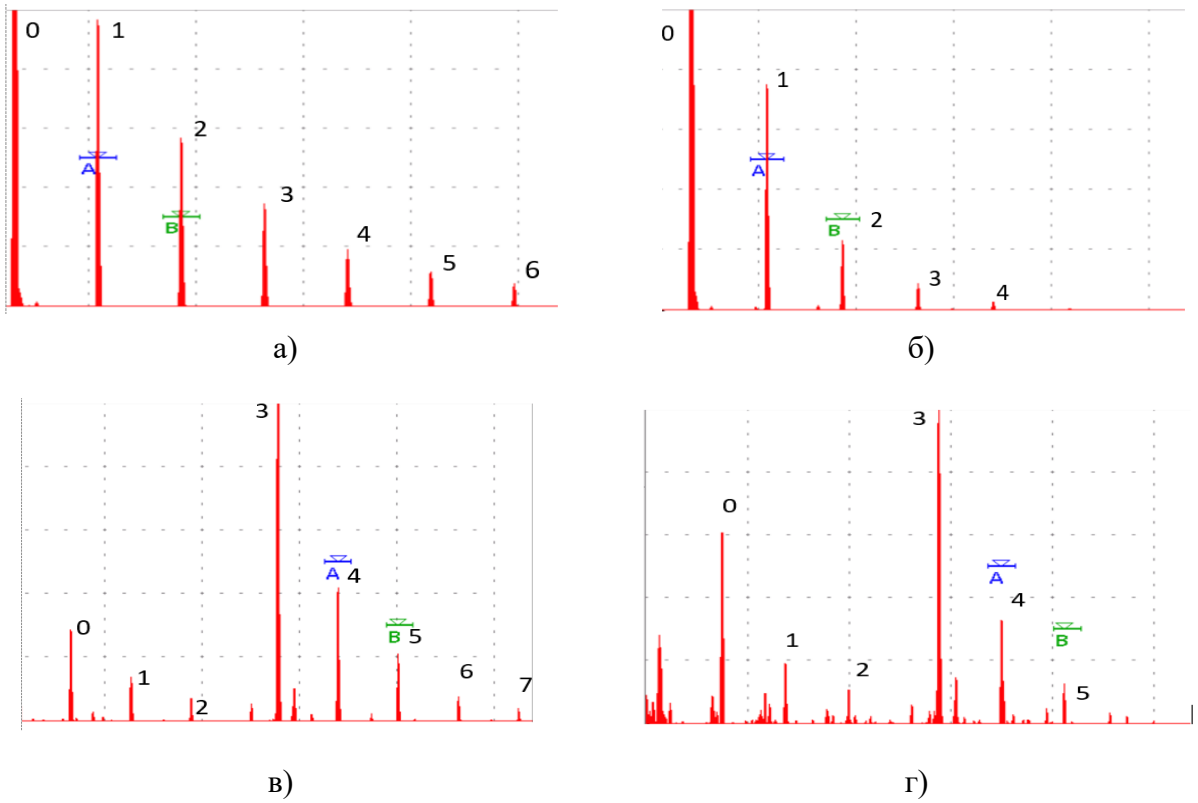



Рис.4. А-сканы результатов контроля стального цилиндра Ø10 мм с трещиной вдоль оси на частоте 2,5 МГц теневым (а, б) и комбинированным (в, г) способами: дефект отсутствует (а, в); дефект в виде продольной трещины (б, г), где (а, б): 0 – импульс опорного сигнала $A_{01}$, прошедшего через акустический контакта объект-подложка; 1 ÷ 6 – номера импульсов вращающейся моды; (в, г): 0 – импульс опорного сигнала $A_{02}$, отраженного от области акустического контакта объект-подложка; 3 – импульс опорного сигнала $A_{01}$ прошедшего через акустический контакт объект-подложка, отразившегося от грани подложки и вернувшегося обратно к приемному преобразователю; 1 ÷ 2 – номера импульсов вращающейся моды по часовой стрелки; (б): 4 ÷ 7 – номера импульсов вращающейся моды против часовой стрелки

Таким образом, в результате проведенных экспериментальнбых исследований и анализа акустического тракта предложенных схем прозвучивания объектов из стали и дюрали, имеющих цилиндрическую и сферическую форму, с целью выявления их дефектности, установлены зависимости коэффициентов прохождения волны Рэлея через границу контакта подложка-объект $K_d^{-1}$, а также их ослабления $K_{n,n-1}^{-1}$, вызванного совершением ПВМ одного оборота, при варьировании углового волнового числа в диапазоне $p = 10 \div 180$. Выявлен близкий к квазилинейному рост обратных значений указанных коэффициентов, что обусловлено особенностями трансформации и отражения поверхностных волн на границе контактирующих материалов, а также расхождением их волнового фронта. Причем изменение величины $K_d^{-1}$ в указанном диапазоне углового волнового числа составляет 1,05 ÷ 1,80, а $K_{n,n-1}^{-1}$, соответственно изменяется в диапазоне 1,1 ÷ 3,4. Установлено, что коэффициент ослабления $K_{n,n-1}^{-1}$ может являться количественным критерием наличия дефектов на поверхности криволинейных объектов, подвергаемых контролю. При определенных условиях для повышения чувствительности контроля поверхностных дефектов, включая,

например, трещины, поры, эффективен комбинированный способ контроля, реализующий эхо режим прозвучивания, где в качестве отражателя опорного сигнала служит оппозитный торец подложки. Это позволяет практически в 2 раза увеличить акты взаимодействия поверхностной вращающейся моды с дефектом, ослабляя зондирующий сигнал. Также дистанционный ультразвуковой контроль может проводиться эхо способом – по данным отраженного непосредственно от дефекта первого импульса.

**Список литературы**


1. Неразрушающий контроль. Справочник. под ред. В.В. Клюева, т 3. Москва: «Машиностроение», 2006. 859 с.
2. Чабанов В.Е. Лазерный ультразвуковой контроль материалов, - Л.:, изд. Наука, 1986. - 215 с
3. Баев А.Р., Воробей А.В., Деленковский Н.В. Экспериментальное исследование влияния формы тела акустической нагрузки на распростронение поверхностных волн // Санкт-Петербург. – Тезисы докладов «Методология ультразвукового контроля: фундамент и современная надстройка». 2025. – С.121-123.
4. Baev A.R., Vorobei A.V., Mayorov A.L., Asadchaya M.V., Delenkovsky N.V. Distant Excitation of Rotating Surface Waves in Bodies with Cylindrical and Spherical Surface as Applied to Ultrasonic Control. Devices and Methods of Measurements, 2025; № 2(16): 106-120.
5. Деленковский Н.В., Гнусин А.Б. Контрольные образцы для капиллярной дефектоскопии // Дефектоскопия. - 2024. - №2. - С. 43-48.



Контакты:
baev@iaph.bas-net.by (Баев Алексей Романович);
vorobey@belgazstroy.by (Воробей Алексей Васильевич);
asadchaya@iaph.bas-net.by (Асадчая Мария Владимировна);
delenkovskij@iaph.bas-net.by (Деленковский Николай Владимирович)

УДК 620.179.16

***А. Р. БАЕВ**, д-р техн. наук, проф.*
***А. Л. МАЙОРОВ**, канд. техн. наук*
***М. В. АСАДЧАЯ**, канд. техн. наук*
***А. Ю. БУРНОС,***
***И. Е. ЗАГОРСКИЙ,***
Институт прикладной физики НАН Беларуси (Минск, Беларусь)

# НЕКОТОРЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ДВУХПАРАМЕТРОВОГО СПОСОБА КОНТРОЛЯ ГЛУБИНЫ УПРОЧНЕНИЯ СТАЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ

**Аннотация.** Исследованы особенности совместного использования акустического и магнитного методов для неразрушающего контроля глубины упрочнения поверхностного слоя (УПС) стальных изделий. Показано, что в ряде случаев представляется возможным оценивать глубину УПС не только как «усредненную» характеристику скорости поверхностной ультразвуковой волны, определяемую акустической базой прозвучивания, но и локально – по данным остаточного магнитного поля, что позволяет выявить области материала с неоднородной структурой. Предложен способ и макет устройства для двухпараметрового контроля глубины упрочненного поверхностного слоя стальных объектов.

**Ключевые слова:** глубина УПС, скорость поверхностной волны, остаточное магнитное поле.

Повышение надежности неразрушающего контроля глубины упрочнения поверхностного слоя (УПС) стальных изделий путем ТВЧ закалки, цементирования, азотирования, лазерной обработки и др. термохимическими методами является актуальной задачей современного производства. В результате изменения структуры поверхностного слоя изменяются физико-механические, эксплуатационные свойства объекта. В большинстве случаев до настоящего времени контроль качества упрочнения производится разрушающими методами – по бальности зерна, твердости в сечении УПС и др. [1]. Анализ известных исследований показывает значительные перспективы использования именно акустических методов, например по данным скорости распространения поверхностной волны $C_{ПАВ}$ т.к. модуль Юнга $E$, скорость (ПАВ), плотность ρ и твердость $T$ связаны соотношениями [2,3]:

$$C_{ПАВ} \sim (E/\rho),\ \Delta C_{ПАВ} = C_{ПАВ} - C_{ПАВ,0} \sim \Delta T = T - T_0,$$

где индекс 0 характеризует твердость материала в отсутствие воздействия упрочняющих технологий.

С другой стороны, актуальной прикладной задачей является определение областей с поверхностно неоднородным упрочнением, характеризуемым изменением глубины УПС вдоль поверхности. Для этого может быть использован также акустический метод, подобный тому, что предложен нами в

работе [4] для структуроскопии чугунов по данным локального рассеяния продольных волн поверхностной структурой акустических импульсов. Однако для этого требуется специальные условия, затрудняющие измерения. Как показывает системный анализ традиционных способов измерений структуры поверхностных слоев сталей, для этого перспективно использование магнитных методов, например [5].

**Методические особенности измерений**

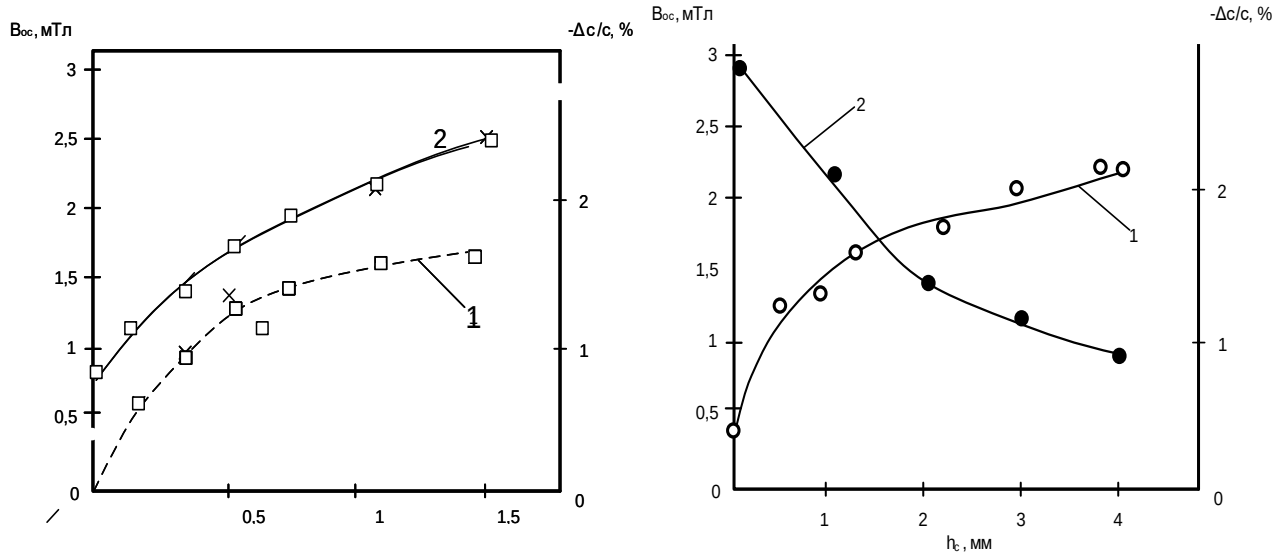
Ниже рассмотрены возможности и особенности использования преимущественно двухпараметрового контроля поверхностно упрочняемых ТВЧ закалкой и лазерным отжигом сталей, совмещая акустический и магнитный методы. Так, определение глубины УПС по данным скорости поверхностной волны $C_{ПАВ}$ производится по данным времени прохождения ПАВ между двумя малоапертурными ПЭП с магнитным прижимом на рабочих частотах 1,8 – 4 МГц: $\Delta t=L(t_2 - t_1)$. Измерение же скорости УЗК производится с точностью 0,3-0,5% согласно изложенной в работе [2] методики. Определение индукции остаточного магнитного поля $B_{ос}$ на стальных образцах выполняется по методу «отрыва» [3,4] с использованием разработанного в ИПФ НАН Беларуси измерителя магнитных полей ИМП-1.2 с погрешностью измерений не более 3%, а также локально намагничивающего образцы устройства, где в качестве первичного источника использован цилиндрический стальной стержень с расположенными на его торцах самарий-кобальтовыми магнитами, поляризованными в одном направлении. Нормальная составляющая поля намагничивающего устройства, измеренная на расстоянии 0,5 мм от него, составляет $B_n$=275 мТл. В качестве объекта исследований использованы образцы с ТВЧ закалкой и полученные лазерной обработкой при наличии поверхностного среза металла и без него. Причем в первом случае использованы плоские образцы с однородно упрочненной поверхностью, превышающие размер акустической базы измерительного ПЭП, составляющей 43,2 мм. А во втором случае упрочняемые лазерной обработкой “дорожки” выполнены длиной 70 мм, шириной 9-10 мм и разной глубиной на стальной плите в виде ленты.

**Исследование влияния глубины упрочнения сталей на их акустические и магнитные параметры**

На основе разработанной методики и средств измерений получены новые данные, касающиеся повышения надежности и расширения возможности контроля упрочнения сталей (преимущественно ТВЧ закалкой и лазерной обработкой) как акустическим, так и двухпараметровым методом, используя дополнительно данные об индукции остаточного магнитного поля $B_{ос}$. Основные результаты исследований отображаются на рис.1–2, где сопоставляются данные о глубине УПС $h$, полученные металлографическим (разрушающим) методом, и данные, полученные в результате акустических и магнитных измерений. Причем на рис.1 представлены характерные

зависимости влияния глубины упрочняемых слоев ($h_y$ =0 – 1,5 мм) и глубины среза ($h_c$=0 – 4 мм) на изменение скорости УЗК $\Delta C$ и величину индукции остаточного магнитного поля $B_{ос}$ в образцах из стали Ст45, подвергнутых ТВЧ закалке разной интенсивности и времени воздействия. Подобные зависимости имеют место и в случае, когда упрочнение поверхности изделия происходит под воздействием потока высокоинтенсивного лазерного излучения. Результаты исследования образцов сталей разных марок, подвергнутых лазерному воздействию, поверхности которых имеют вид дорожек, приведены на рис.2. Там представлены данные сравнения глубины УПС, определенной металлографическим и акустическим методами - причем образец (рис.2а) был подвергнут намагничиванию с последующим измерением $B_{ос}$.

При анализе результатов исследования взаимосвязи акустических и магнитных свойств с глубиной упрочнения ТВЧ закалкой слоев (вариант I, рис.1а), а также высотой среза УПС (вариант II, рис.1б), в обоих случаях наблюдается изменение не только скорости ПАВ, но и остаточного магнитного поля $B_{ос}$. При этом для измеряемых физических параметров характерны следующие изменения – согласно двум вариантам исследований: вариант I - $\Delta C(h_y)=C_0-C_y>0$; $\Delta B_{ос}(h_y)=(B_{ос})_o-B_{ос,y}<0$; вариант II - $\Delta C(h_c)=C_0-C_c<0$; $\Delta B_{ос}(h_c)>0$, где $C_y$ и $C_c$ - скорости ПАВ в зависимости от глубины УПС и среза поверхностного слоя, соответственно.

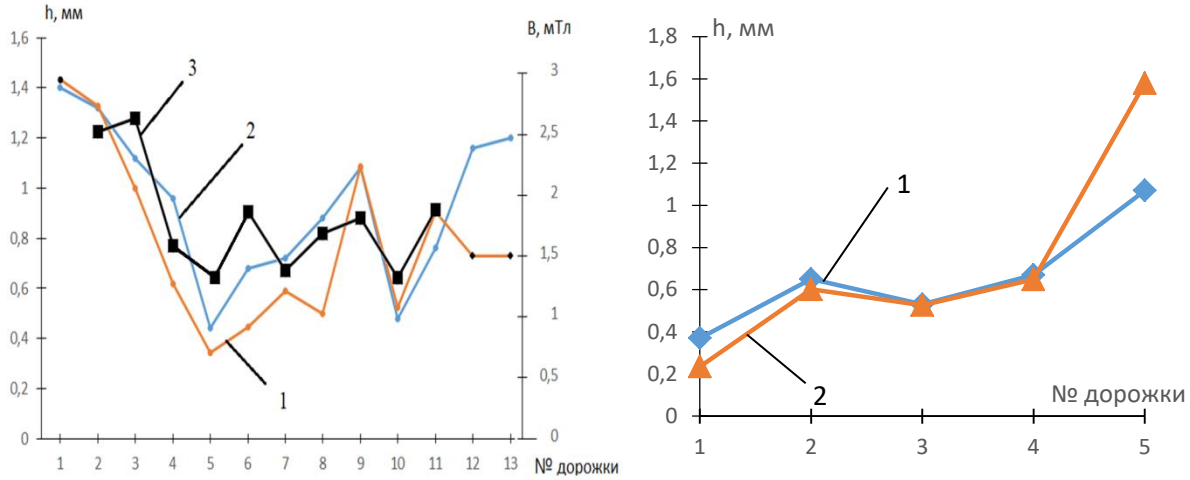



а) б)

Рис. 1. Характерные зависимости влияния глубины упрочненного поверхностного слоя (а) и глубины среза УПС поверхностного слоя (б) на скорость поверхностной волны (1) и величину остаточного магнитного поля (2)

Как известно, увеличение твердости поверхностного слоя и его глубины при упрочнении сталей в процессе ТВЧ закалки, цементирования, лазерной обработки сопровождается уменьшением в слое модуля Юнга $E$ и плотности $\rho$, что, в конечном счете, приводит к уменьшению скорости УЗК. При этом предполагается, что увеличение толщины слоя УПС и объема мартенситной

фазы приводит к росту поля зеркально отображаемых магнитных зарядов или росту остаточной индукции $B_{ос}$. Одновременно возрастает и твердость слоя, что сопровождается уменьшением скорости ПАВ. Очевидно, что при срезе слоя УПС будет наблюдаться обратная тенденция, что и имеет место на практике. Т.о., увеличение глубины упрочненного ТВЧ закалкой слоя или глубины его среза сопровождается изменением скорости ПАВ и индукции нормальной составляющей остаточного магнитного поля $B_{ос}$ в оппозитных направлениях.




а) б)

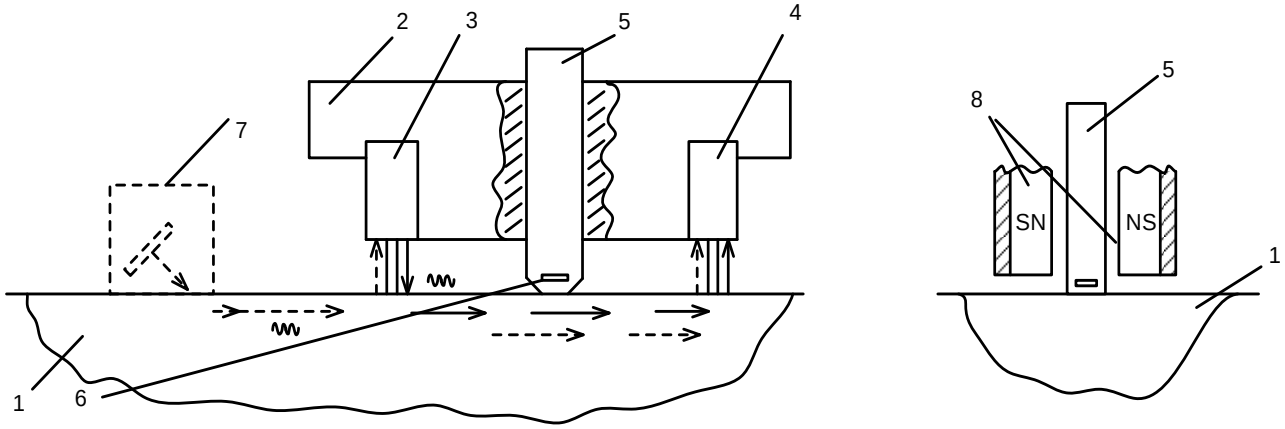
Рис. 2. Глубина упрочненного лазерной обработкой слоя, измеренная акустическим, металлографическим и магнитным методом, на разных «дорожках» (зонах поверхности образца, полученных при варьировании интенсивности и времени упрочнения): а) сталь 65Г: 1 – акустический метод, 2 – металлографический метод, 3 – величина нормальной составляющей магнитного поля остаточной индукции; б) сталь 7Х3: 1 - металлографический метод, 2 - акустический метод

Важно отметить, что приведенные на рис.1а данные указывают и на то, что при ТВЧ обработке именно в диапазоне небольших глубин УПС $h^*$=0,5-0,6 мм наблюдается наиболее высокая чувствительность к их изменению при использовании именно магнитного метода, если учесть, что погрешность измерения $B_{ос}$ не превышает 3%. Оцененная же погрешность измерений акустическим методом глубины УПС по данным изменения скорости ПАВ в указанном диапазоне $h$ не менее 20%, что обусловлено такими факторами, как стабильность акустического контакта, влиянием дифракции и др. В то же время при характерных значениях высоты УПС $h>h^*$ наблюдается резкое уменьшение магнитного параметра $\varepsilon_{Bh}=dB_{ос}/dh$, обусловленное особенностями хода кривой намагничивания УПС от $h$.

Подобный результат может иметь место и для других марок сталей, упрочняемых лазерной обработкой, что подтверждается данными на рис.2а, где упрочнению подвергнута сталь 65Г. Интересно, что именно в этом случае наблюдается неплохая корреляция между величиной магнитного параметра и глубиной УПС, изменяющейся в диапазоне $h$=0,6-1,2 мм.

**Устройство для двухпараметрового контроля поверхностного упрочнения сталей ТВЧ закалкой**

Учитывая необходимость одновременного использования как магнитного, так и акустического способа для повышения надежности контроля качества УПС, был предложен способ и базовый макет устройства для двухпараметрового контроля глубины упрочненного поверхностного слоя стальных объектов. Использование разработки направлено на расширение технических возможностей и повышение надежности контроля параметров УПС не только при ТВЧ закалке, но и при лазерной обработке стальных изделий, а также, как предполагается, и других способов упрочнения металлоизделий. Как видно из рис.3, устройство содержит наклонный ПЭП для излучения поверхностных волн и два малоапертурных преобразователя (МАП) для их приема, расположенные в корпусе, где посередине между ними размещено намагничивающее устройство и датчик Холла (рис.3б). Особенность намагничивающего устройства заключается в том, что магниты расположены по обеим сторонам от датчика Холла и поляризованы навстречу друг другу.




а) б)

Рис. 3. Пример базовой схемы разработанного макета для двухпараметрового контроля глубины упрочненного поверхностного слоя стальных объектов: 1 – объект с УПС; 2 – корпус преобразователя; 3 и 4 – приемники ПАВ; 5 – корпус датчика Холла; 6 - датчик Холла; 7 – источник ПАВ; 8 – магниты с накладками

Величина индукции остаточного магнитного поля $B_{ос}$ измеряется путем удаления источника намагничивающего поля из рабочего положения. Базовая схема разработанного макета для двухпараметрового контроля глубины УПС может быть использована как для объектов с плоской, так и криволинейной поверхностью, включая, прежде всего, цилиндрическую, путем прозвучивания вдоль образующей.

Таким образом в результате проведенных экспериментальных исследований установлено, что одновременное использование магнитного и

акустического способов позволяет повысить надежность контроля качества УПС на стальных изделиях, полученных ТВЧ закалкой и лазерным упрочнением. Предложен способ и базовый макет устройства для двухпараметрового контроля глубины упрочненного поверхностного слоя стальных объектов.

**Список литературы**


[1] Неразрушающий контроль: справочник: в 7 т. Т.3: Ультразвуковой контроль. / И. Н. Ермолов, Ю. В. Ланге; под ред. чл.-корр. РАН В. В. Клюева. – М.: Машиностроение, 2004. – 864 с.

[2] Баев, А.Р. Особенности распространения поверхностных и подповерхностных волн в объектах со слоистой структурой. Ч. 2. Упрочненный неоднородный поверхностный слой / А.Р. Баев, А.Л. Майоров, Н.В. Левкович, М.В. Асадчая // Приборы и методы измерений. - 2019. – Т. 10, № 1. - С.69-72.

[3] Баев, А.Р. Способ ультразвукового контроля глубины закаленного слоя детали, выполненной из стали: патент РБ на изобретение № 23417/ А.Р. Баев, А.Л. Майоров, В.В. Парадинец, Н.Н. Гиль, Г.Е. Коновалов. опубл. 30.06.2021, офиц. бюлл. № 3, 2021.

[4] Baev, A.R. Backscattering of Ultrasonic Waves as the Basis of the Method of Control of Structure and Physico-Mechanical Properties of Cast Irons / A.R. Baev, N.V. Levkovich, E.P. Babuk, M.V.Asadchaya // Devices and Methods of Measurements. – 2023. – Vol.14, no.3. – Pp.191-198.

[5] Сандомирский, С.Г. Статистический анализ и использование взаимосвязей между физико-механическими свойствами сталей и чугунов / С. Г. Сандомирский ; Национальная академия наук Беларуси, Объединенный институт машиностроения. – Минск : Беларуская навука, 2021. – 147 с.



Контакты:
baev@iaph.bas-net.by (Баев Алексей Романович);
mayorov@iaph.bas-net.by (Майоров Александр Леонидович;
asadchaya@iaph.bas-net.by (Асадчая Мария Вадимовна);
burnos@iaph.bas-net.by (Бурнос Артем Юрьевич);
lab1@iaph.bas-net.by (Загорский Иван Евгеньевич)

*УДК 621.91.01*

***Б. М. БАЗРОВ***[1]*, д-р техн. наук, проф.*
***В. Л. ГУРЕВИЧ***[2]*, канд. техн. наук, доц.*
***Н. Л. ГРЕЦКИЙ***
***М. Л. ХЕЙФЕЦ***[2]*, д-р техн. наук, проф.*
***Н. М. ЮРЕВИЧ***[2]
[1]Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН (Москва, Россия)
[2]Институт прикладной физики НАН Беларуси (Минск, Беларусь)

# *ГАРМОНИЗАЦИЯ С МЕЖДУНАРОДНЫМИ ТРЕБОВАНИЯМИ СТАНДАРТА «БАЗЫ И БАЗИРОВАНИЕ В МАШИНОСТРОЕНИИ. ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ»*

**Аннотация.** Размерные связи играют большую роль, как в создании изделия, особенно с использованием как прецизионных, аддитивных и других технологий, так и в процессе его функционирования и обслуживания. Размерные цепи, их описывающие, возникают при решении конструкторских, технологических и метрологических задач машиностроения и зависят от выбора баз, поэтому построению размерных цепей должен предшествовать анализ базирования.

**Ключевые слова:** гармонизация, актуализация, международные требования, базы и базирование в машиностроении

## Введение

Установление требований к геометрическим параметрам изделий машиностроения, включая заготовки, детали, сборочные единицы, (далее – изделие) является ключевым требованием к обеспечению их качества и взаимозаменяемости, а также реализации функциональных свойств готового изделия, включая показатели надежности [1, 2]. Фундаментальную роль в подходе к установлению геометрических параметров изделий играет стандартизация как на международном, так и национальном уровнях [3 - 5].

Базовая концепция, принципы и правила, применяемые для установления, интерпретации и верификации технических требований к геометрическим параметрам изделий установлены в международных стандартах ISO GPS – (Система стандартов на технические требования к геометрическим параметрам изделий и их проверку, разработанная в рамках Международной организации по стандартизации ISO техническим комитетом по стандартизации ISO/TC 213 «Размерные и геометрические требования и верификация изделий»).

Широкое практическое применение получили стандарты Американского общества инженеров-механиков ASME Y14.5, которые подобны стандартам ISO GPS, но имеют определенные отличия. Точность языка стандартов ISO GPS приводит к установлению в них большего числа требований по отношению к ASME Y14.5.

Стандарты ISO GPS взаимоувязаны с международные стандартами, разрабатываемыми ISO/TC 10 «Техническая документация на продукцию», ISO/TC 184 «Системы автоматизации и интеграция» и др. с целью обеспечения скоординированного и единообразного подхода к установлению требований к технической документации на продукцию (TPD) в 2D-чертежах и 3D-моделях систем автоматизированного проектирования (САПР) на протяжении всего жизненного цикла изделия, чтобы облегчить разработку, управление, хранение, поиск, воспроизведение, обмен и использование TPD. Следует отметить, что многие CAD-платформы и средства измерений поддерживают оба стандартизованных подхода [2, 5, 6].

Общепринятая на международном уровне концепция нормирования геометрических параметров изделий ISO GPS (установлена в ISO 14638:2015) представляет интегрированную и взаимодополняющую систему установления требований, определяющих геометрию (микро- и макро-) изделия, правила назначения баз, соответствующие требования к средствам измерений, включая координатно-измерительные машины, их оценку и калибровку, а также правила принятия решения о соответствии/несоответствии изделия заданным требованиям.

ISO GPS представляет собой группу международных стандартов, определяющих основные соотношения между размерными и геометрическими допусками, и включает стандарты, которые связаны с требованиями к конструкции, а также с надлежащим процессом изготовления и контроля продукции для оценки ее геометрических параметров. Стандарты ISO GPS основаны на принципе двойственности спецификации и верификации.

В Республике Беларусь часть международных стандартов ISO GPS принята в качестве государственных стандартов. Однако, преимущественно это устаревшие версии стандартов ISO GPS.

**Геометрические допуски**

Геометрические допуски должны устанавливаться на основании предъявляемых к изделию функциональных требований с учетом особенностей изготовления и контроля изделия. При этом указание геометрических допусков на чертеже не предполагает обязательного использования какого-либо конкретного метода изготовления, измерения или контроля.

Геометрический допуск, установленный для элемента изделия, определяет поле допуска, внутри которого должен целиком располагаться этот элемент. Геометрический элемент представляет собой отдельную часть детали, такую как точка, линия или поверхность. Он может быть полным элементом (поверхность, линия на поверхности) или производным элементом (центральная точка, средняя линия, средняя поверхность).

В зависимости от нормируемой геометрической характеристики элемента и способа указания допуска на чертеже поле допуска может представлять собой: область внутри окружности; область между двумя концентрическими окружностями; область между двумя равноотстоящими (эквидистантными)

линиями или двумя параллельными прямыми линиями; область внутри цилиндра; область между двумя соосными цилиндрами; область между двумя равноотстоящими (эквидистантными) поверхностями или двумя параллельными плоскостями; область внутри сферы.

Для определения месторасположения и/или ориентации поля допуска или идеального элемента, представляющего, например, воображаемую границу, а также придание заготовке или изделию требуемого положения относительно выбранной системы координат в процессе базирования устанавливаются базы при проектировании, изготовлении, эксплуатации и ремонте изделий машиностроения.

При этом базовые элементы должны быть идентифицированы в конструкторской документации и использованы в производстве. Конструкторская документация может быть представлена в форме традиционных двумерных (2D) проекционных видов на чертежах или в форме компьютерных файлов, содержащих представления трехмерных (3D) моделей. В процессе производства базовые элементы используются для планирования производственных процессов. Например, какие элементы следует обрабатывать в первую очередь и в пределах каких допусков, и как расположить заготовку в приспособлении для обработки. Также базовые элементы детали используются для планирования контроля. Например, для проведения измерений в процессе производства с целью контроля качества и для проверки соответствия изготовленной детали геометрическим допускам, указанным в конструкторской документации.

Процессу базирования изделия (заготовки, детали или сборочной единицы) посвящены многочисленные работы, в связи с тем, что он оказывает огромное влияние на качество изделия и трудоемкость его изготовления. Но до сих пор базирование в технологиях, объединяющих как традиционные, так и аддитивные процессы, не отражено в стандартах [4, 5].

**Базы и базирование**

Основы теории базирования при современном развитии производства актуализируются с учетом перехода от существующего описания из теоретической механики посредством положения трех координатных точек; к новому описанию из теории машин и механизмов путем лишения предмета базирования степеней свободы (подвижности) в технической системе [3 - 5].

В результате проектирование конструкции изделия, технологии его производства и измерения характеристик следует проводить, рассматривая системы, включающие станки и приспособления, измерительные машины и метрологическое оснащение в качестве механизмов, в том числе самоцентрирующих и при наличии их избыточных степеней подвижности, замыкающим звеном которых является предмет базирования [7].

Развитие требований к базам и системам базирования получило в международных стандартах ISO GPS. Базы формируют часть геометрических требований к изделию, с помощью которых устанавливаются и контролируются

допуски расположение и/или формы геометрических элементов, а также допуски на биение. Базы устанавливают от реальных поверхностей, идентифицированных на детали. Базы определяют ориентацию или месторасположение полей допусков, а также воображаемые границы (например, воображаемая граница максимума материала согласно ISO 2692). С помощью баз формируется система координат, в пределах которой располагается зона допуска геометрических требований.

Правила определения и практического установления баз, а следовательно, и систем координат, подробно изложены в ISO 5459 : 2024 «Геометрические характеристики изделий (GPS) — Геометрические допуски — Базы и системы баз.»

Базы рассматриваются как средство лишения поля допуска степеней свободы. Число степеней свободы, которых лишено поля допуска, зависит от номинальной формы элементов, используемых для установления базы или комплекта баз (независимо от того, является ли база первичной, вторичной или третичной), и от характеристики, допуск которой указан в рамке геометрического допуска.

По умолчанию, база лишает поле допуска (геометрический параметр, указанный в рамке допуска) всех тех степеней свободы, которых она только может лишить (и которые обусловлены его формой), и которые не были лишены предшествующими базами (в комплекте баз).

Базы и комплекты баз являются теоретически точными геометрическими элементами, которые применяют совместно с явными и неявными теоретически точными размерами, для определения месторасположения или ориентации полей допусков элементов с допуском, или воображаемых границ, например, в случае требования максимума материала.

**Методы присоединения баз**

База состоит из совокупности элементов положения идеального элемента. Базовые элементы могут быть полными элементами или их идентифицированными частями.

Комплект баз состоит из нескольких баз (более одной). Геометрический тип присоединенного элемента может принадлежать одному из следующих классов инвариантности: сферическому (т.е. сфера); планарному (т.е. плоскость); цилиндрическому (т.е. цилиндр); винтовому (например, резьбовая поверхность); вращательному (например, конус или тор); призматическому (например, призма); комплексному (например, поверхность произвольной формы).

Методы присоединения баз устанавливают связь реальных элементов с базами и однозначным набором ограничений, результатом чего является идентификация однозначно определяемых баз или комплектов баз. Присоединенный элемент может быть определен при помощи операции присоединения, включающей ограничения, исходящие от самого элемента или

одного или нескольких других элементов. Элементы положения, составляющие базу, определяют от этих присоединенных элементов [8].

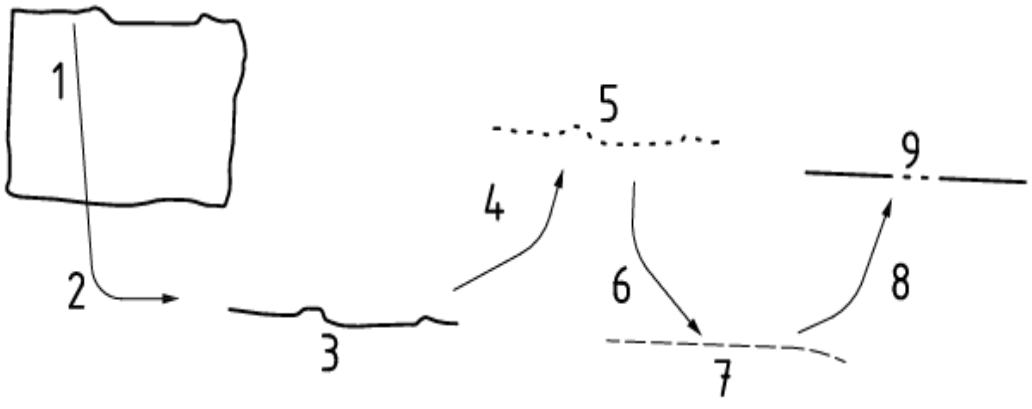
Методы присоединения баз устанавливают связь реальных элементов с базами и однозначным набором ограничений, результатом чего является идентификация однозначно определяемых баз или комплектов баз.

Присоединенные элементы устанавливают от реальных или выявленных единичных элементов, используемых для установления базы. Присоединенный элемент может быть определен при помощи операции присоединения, включающей ограничения, исходящие от самого элемента или одного или нескольких других элементов. Элементы положения, составляющие базу, определяют от этих присоединенных элементов.

Критерием присоединения является целевая функция для присоединения, которая представляет математический критерий (формулу), на основании которого оценивается, насколько качественно и правильно идеальный элемент прилегает к реальной поверхности. При этом применяется набор ограничений на изменчивость математических параметров, описывающих присоединенный элемент в процессе оптимизации. Например, различными типами ограничений могут являться ограничения ориентации, ограничения расположения, ограничения материала или ограничения существенной характеристики.

Для установления присоединенного элемента требуется выполнить разделение, выявление, фильтрацию и присоединение (Рис.1).

Методики присоединения для баз определяют независимо от разделения, выявления и фильтрации. Фильтрация сохраняет наивысшие точки реального полного элемента. Результатом фильтрации плоского или выпуклого номинального элемента (такого как вал) является выпуклый элемент. Для других типов номинальных элементов (таких как отверстие), подобным образом удаляют раковины с поверхности.




**Обозначение**

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | реальная деталь | 4 | выявление | 7 | фильтрованный элемент |
| 2 | разделение | 5 | выявленный полный элемент | 8 | присоединение |
| 3 | реальный полный элемент | 6 | фильтрация | 9 | присоединенный элемент |

Рис. 1. Пример процедуры установления присоединенного элемента

Базовые элементы указываются в конструкторский документации, в которой отображаются геометрические параметры, а их размеры соответствуют номинальным размерам. Базовые элементы могут быть индивидуальными или общими, и оба типа могут образовывать системы базовых элементов.

**Контрольные операции**

Для выполнения операций контроля базовые элементы необходимо устанавливать на основе реальных геометрических характеристик изделия со всеми возможными и допустимыми отклонениями. Один из принципов заключается в том, что целесообразно сначала убедиться, используя геометрические параметры формы и расположения, что эти характеристики также обладают надлежащим качеством (плоскость, прямолинейность и т.д.) после изготовления.

Декартова система координат проще всего создается с помощью трех плоских базовых элементов, ортогонально ориентированных друг относительно друга, но возможны и другие комбинации. Такая система базовых элементов блокирует все степени свободы перемещения (три перемещения, три вращения) твердого тела, что является необходимым условием при необходимости контроля всех геометрических характеристик, прежде всего, их расположения. Если необходимо контролировать только расположение, достаточно заблокировать четыре или пять степеней свободы. При использовании базовых систем последовательность (первичная, вторичная, третичная) для установленного допуска имеет решающее значение, поскольку она также обеспечивает повторяемую установку изделия в измерительном оборудовании, тем самым гарантируя повторяемые и сопоставимые измерения.

Базы также могут быть установлены математически из облаков измеренных точек. При этом для определения подходящей математической характеристики из облака точек, которая будет использоваться для установления базовой системы, могут быть использованы различные операции. Если, например, для единичной базы выбран производный элемент (например, ось), то можно использовать требования к материалу и соответствующее моделирование базовой оси.

Можно также задать, для каких характеристик будет использоваться каждая базовая точка и какие степени свободы она должна фиксировать.

**Заключение**

Таким образом, с развитием техники и технологии появилась необходимость в пересмотре подхода и некоторых понятий, а также введения новых, уточняющих требования к базированию и базам, относящимся к нормированию точности изделий.

При актуализации должен быть использован язык, позволяющий описывать модели, определенные в файлах цифровых данных и программном обеспечении для CAD / CAM / CAQ - систем. Данные требования должны быть

установлены в соответствующем государственном стандарте, гармонизированном с ISO 5459:2024.

**Список литературы**


1. Базров, Б.М. Базис технологической подготовки машиностроительного производства / Б.М. Базров. – М.: КУРС, 2023. – 324 с.
2. Базров, Б.М. Системология объектов и процессов при цифровизации жизненного цикла изделий машиностроения / Б.М. Базров, М.Л. Хейфец, В.Л. Гуревич, Н.Н. Попок // Доклады Национальной академии наук Беларуси. 2021. Т. 65, № 4. – С. 516–525.
3. Чижик, С.А. Совершенствование основ теории базирования с учетом развития технологий, оборудования и средств их оснащения / С.А. Чижик, М.Л. Хейфец, В.Л. Гуревич, Б.М. Базров, М.Н. Ерофеев, Н.А. Родионова, Ю.В.Будкин // Неразрушающий контроль и диагностика. – 2022, № 2. – С. 3-14.
4. Базров, Б.М. Научно-методические основы актуализации теории базирования на основании анализа степеней свободы предмета базирования / Б.М. Базров, Н.А. Родионова, Ю.В. Будкин, С.А. Чижик, М.Л. Хейфец, В.Л. Гуревич // Механика машин, механизмов и материалов. - 2022. - № 2 (59). – С. 77-87.
5. Базров, Б.М. Совершенствование основ теории базирования с учетом развития традиционных и аддитивных технологий / Б.М. Базров, М.Л. Хейфец // Доклады Национальной академии наук Беларуси. – 2020. Т. 64, № 5. – С. 617 – 623.
6. Базров, Б.М. Метод представления изделия как объекта цифровизации производства структурированным множеством модулей / Б.М. Базров, М.Л. Хейфец // Доклады НАН Беларуси. – 2019, Т. 63, № 3. – С. 377-384.
7. Базров, Б.М. Схемы базирования изделий в самоцентрирующих механизмах с использованием комплектов скрытых баз / Б.М. Базров, М.Л. Хейфец, Н.А. Родионова, В.Л. Гуревич // Доклады Национальной академии наук Беларуси. – 2022. - Т. 66, № 6. – С. 622-628.
8. Базров, Б.М. Компоновочный синтез на основе модульного принципа элементной базы мехатронных технологических комплексов / Б.М. Базров, М.Л. Хейфец // Доклады Национальной академии наук Беларуси. – 2022. – Т. 66, № 2. – С. 229-236.



Контакты:
modul_lab@mail.ru (Базров Борис Мухтарбекович)
valery.hurevich@gmail.com (Гуревич Валерий Львович)
nikolay_gnl@mail.ru (Грецкий Николай Леонидович)
mlk-z@mail.ru (Хейфец Михаил Львович)
nataxnata13@mail.ru (Юревич Наталья Михайловна)

УДК 519.65+004.3+004.42+004.9

***Е. Н. БАЗЫЛЕВ***
***П. Ю. БРАНЦЕВИЧ****, д-р. техн. наук, доц.*
Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (Минск, Беларусь)

# ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВСТРОЕННЫХ СИСТЕМ В ВИБРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРАХ

**Аннотация.** Для обнаружения редких кратковременных изменений структуры вибрационного сигнала и выявления причинно-следственных связей между их появлением и развитием дефектов контролируемых объектов требуется создавать приборы, способные накапливать и обрабатывать длительные непрерывные вибрационные сигналы. Рассмотрены структура, функциональные возможности, программное обеспечение регистратора вибрационных сигналов на встроенном процессоре.

**Ключевые слова:** вибрация, сигнал, накопление, встроенная система, Arduino.

При анализе существующих аналогов накопителей сигналов было установлено, что использование SD Card (Secure Digital − компактный портативный флеш-накопитель) в качестве накопителя данных позволяет записывать сигналы длительностью значительно больше, чем одни сутки, имея при этом низкое энергопотребление. Поэтому для решения задачи накопления вибросигнала на протяжении длительных временных интервалов представляется возможным создавать устройства на базе современных микроконтроллеров [1, 2].

В состав микроконтроллеров, как правило, входит аналого-цифровой преобразователь (АЦП), запускаемый аппаратно таймером. При этом нет необходимости обрабатывать прерывание от таймера. Запрограммировав период повторения таймера, достаточно обрабатывать прерывание от АЦП с последующей буферизацией кода с его выхода. Буферизируемые данные перемещаются в накопитель данных, не допуская переполнения. В качестве накопителя используется энергонезависимая память или, в лучшем случае, носитель с файловой системой.

Современные встроенные системы оснащены часами реального времени, что позволяет устройству работать независимо длительное время без внешнего вмешательства. Кроме того, микроконтроллеры имеют последовательные и параллельные интерфейсы для ввода-вывода данных. Посредством интерфейсов ввода-вывода возможна организация передачи данных для дальнейшей обработки на современные многофункциональные мобильные либо настольные платформы с последующим отображением данных в табличном и графическом виде.

Через микроконтроллерные интерфейсы осуществляется управление процессом накопления цифрового вибросигнала, задание коэффициентов передачи и усиления, частоты дискретизации, размера выборки, времени

запуска и останова накопления. Для контроля скорости передачи и целостности данных обмен данными организуется по принципу запрос–ответ.

Поток данных, передаваемый посредством интерфейса ввода вывода, разделяется на пакеты данных, каждый из которых должен заканчиваться контрольный суммой (хэш-значение) для контроля целостности передачи данных. Первые два байта такого пакета − идентификатор (директива) и номер пакета.

При разработке программного обеспечения используются аппаратно-независимые языки программирования. Для упрощения сопровождения программного проекта, а также минимизации трудозатрат при переходе на другую микроконтроллерную платформу, архитектура программного средства встроенной системы подразделяется на два уровня – аппаратно-зависимый и независимый. Следовательно, при переходе на другой микроконтроллер требуется переработка только аппаратно-зависимого уровня программного обеспечения.

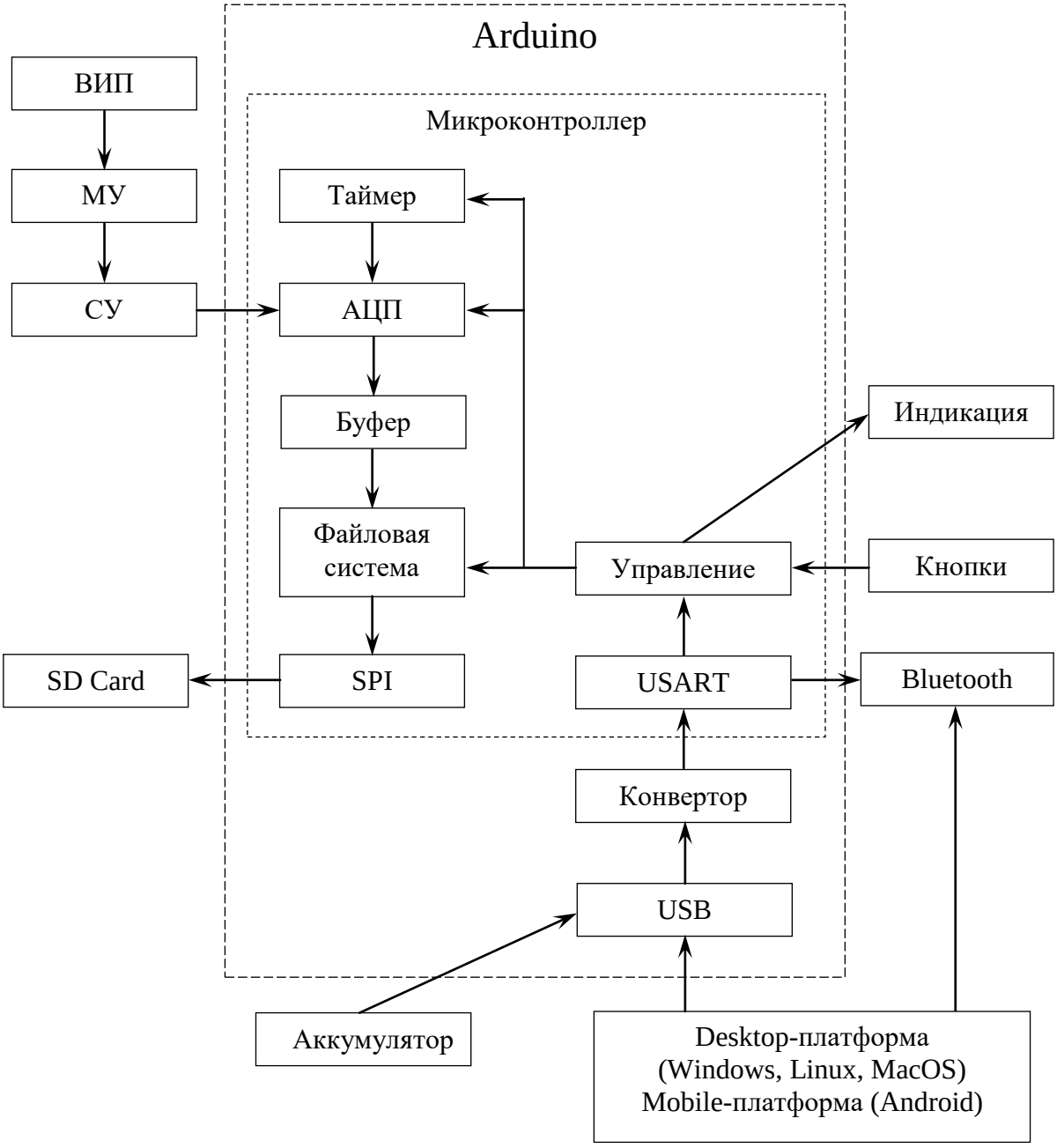
Передача потока данных на мобильную или настольную платформу организуется независимо от конкретного интерфейса обмена данными, а обработка данных на мобильной или настольной платформе осуществляется с использованием технологии, упрощающей перенос программного кода на другие операционные системы, а также в интернет.

Разработан прототип системы регистрации длительных во времени вибрационных сигналов (рис. 1). Встроенная система использует 8-битный микроконтроллер ATmega фирмы Microchip [3], который имеет встроенный 10-битный АЦП, управляемый 8-битным или 16 битным таймером.

В качестве накопителя данных применяется SD Card [4], управляемый с помощью SPI интерфейса, аппаратный модуль которого уже встроен в микроконтроллер. SPI (Serial Peripheral Interface) − это последовательный синхронный интерфейс для связи между микроконтроллерами и периферийными устройствами (датчиками, дисплеями, памятью). Он обеспечивает высокую скорость и полнодуплексную передачу данных (одновременный прием и отправку).

Значительная часть вычислительной мощности микроконтроллера задействована для управления файловой системой, для чего использована популярная в интернете библиотека FatFs [5]. FatFs − это популярная универсальная библиотека с открытым исходным кодом, написанная на языке Си, которая используется для реализации файловых систем FAT (File Allocation Table) и exFAT во встраиваемых системах и микроконтроллерах. Она позволяет легко организовать чтение, запись и хранение файлов на SD-картах, USB-флешках или внешней Flash-памяти независимо от используемого оборудования.

Управление встроенной системой осуществляется посредством популярного интерфейса последовательного порта USART, благодаря которому происходит обмен данными через ноль-модем либо модуль Bluetooth.




ВИП – виброизмерительный преобразователь; МУ – масштабный усилитель; СУ – согласующее устройство; SPI – Serial Peripheral Interface (стандарт последовательной передачи данных); USART – Universal Synchronous-Asynchronous Receiver-Transmitter (универсальный синхронно-асинхронный приемопередатчик); USB – Universal Serial Bus (универсальный стандарт для передачи данных и питания между устройствами).

Рис. 1. Архитектура устройства накопления данных

Для контроля целостности пакетной передачи данных применяется циклическая избыточная проверка CRC16 (Cyclic Redundancy Check 16 bits − циклический избыточный код, 16 бит), обладающая хорошими свойствами хэш-функций [6]. Со стороны мобильной либо настольной операционной системы для организации байтовой или пакетной передачи данных через порты ввода вывода при программировании применен шаблон объектно-ориентированного проектирования “Декоратор”.

Для разработки устройства регистрации длительных вибрационных сигналов использован проект Arduino [7]. Arduino (Ардуино) − это открытая аппаратно-программная платформа для создания простых электронных устройств и роботов. Она состоит из небольших управляющих плат (с микроконтроллером) и удобной программы Arduino IDE (Integrated Development Environment, интегрированная среда разработки) для написания кода. Это рабочая программа для программиста, которая объединяет все необходимые инструменты для создания программных средств в одном удобном интерфейсе.

Так как 8-битный микроконтроллер не обеспечивает требуемое быстродействие вычислений, полученные от АЦП двухбайтные коды напрямую сохраняются в файл, и в последующем производится дальнейшая обработка на мобильной или настольной платформе. При этом, при частоте дискретизации 25кГц для записи 10 минут вибросигнала требуется 30 мегабайт.

Для последующей обработки накопленные данные передаются на мобильное устройство. В современных многофункциональных операционных системах, как правило, имеется три способа обмена данными: USB- интерфейс, Bluetooth, Wi-Fi. При использовании USB целесообразно использовать CDC (Communications Device Class) интерфейс, при этом создается виртуальный последовательный порт, работающий со скоростью USB интерфейса.

При работе с Bluetooth использованы радио-модули HC-06 [8], при этом реализован беспроводный ноль-модем, скорость которого достигаем 1,3 Мегабит. Радио-модули HC-06 − это популярные и недорогие Bluetooth-адаптеры, применяемые для беспроводной связи между микроконтроллерами (например, платами Arduino) и другими устройствами, такими как смартфоны, планшеты или компьютеры.

В случае Wi-Fi применяется WizFi250-EVB [9], при этом обеспечивается доступ к ресурсам современных TCP/IP сетей. WizFi250-EVB − это отладочная плата (Evaluation Board) от южнокорейской компании WIZnet, созданная для быстрого тестирования и разработки проектов на базе беспроводного Wi-Fi модуля WizFi250. Основной компонент WizFi250 компактный Wi-Fi модуль (стандарт 802.11 b/g/n), предназначенный для интеграции устройств в интернет вещей (IoT), домашнюю автоматизацию или промышленные системы.

Структуру программного средства условно можно разбить на несколько подсистем: 1. Подсистема АЦП; 2. Файловая система; 3. Подсистема времени; 4. Подсистема передачи данных; 5. Подсистема управления.

Подсистема АЦП определяет все параметры цифрового вибросигнала, которые хранятся в энергонезависимой памяти и сохраняются в ini-файл в момент запуска накопления результатов преобразования. Запуск АЦП осуществляется таймером, период которого определяется частотой дискретизации. При завершении АЦП преобразования срабатывает соответствующее прерывание и двухбайтное оцифрованное значение сохраняется в буфере. Очень важно оценить необходимый размер буфера в процессе тестирования, который зависит от параметров и скорости работы

файловой системы. Необходимо, чтобы по времени размера буфера было достаточно на открытие, закрытие файлов и сохранение данных.

Файловая система записывает и читает данные порциями кратными 512 байт. При форматировании диска надо учесть, что чем больше размер кластера, тем меньше изменений приходиться вносить в таблицу FAT при записи больших файлов. Запись на SD Card одного только байта физически занимает до двух миллисекунд, поэтому скорость записи можно увеличить только путем параллельной записи массива байт размером кратным 512 байт. Буфер АЦП организован в виде нескольких последовательных массивов, размер каждого равен или кратен 512 байт, чем больше размер буфера, тем выше скорость записи. Это необходимо учитывать в первую очередь при выборе микроконтроллера.

Подсистема времени необходима для организации расписания запуска/останова процесса накопления вибросигнала и для файловой системы при создании файла. Время удобно хранить в виде числа, которое является счетчиком секунд от 1 января 1970 года. Для инициализации счетчика времени используется календарь в виде отдельной микросхемы с отдельным аккумулятором и кварцевым резонатором 32768 кГц.

Подсистема передачи данных позволяет обмениваться потоками данных с настольными или мобильными платформами и использовать любые интерфейсы передачи данных, такие как последовательный порт, USB, Bluetooth, Ethernet, Wi-Fi. Разработаны отдельные аппаратно-зависимые драйверные функции для побайтного чтения/записи соответствующего интерфейса, с тем учетом, что при адаптации к новой аппаратуре перерабатывать придется только их. Аппаратно-независимая часть подсистемы обрабатывает поток данных, кодирует/декодирует пакеты данных, проверяя их целостность (номера пакетов, контрольные суммы). Первый байт каждого пакета представляет собой директиву, определяющую структуру всего пакета. Директивы и соответствующие им пакеты делятся на две группы: пакеты, организованные по принципу запрос/ответ, и одиночные пакеты, формируемые и передаваемые по инициативе самого устройства. По умолчанию, разработаны директивы чтения/записи памяти и специальный пакет (текстовое сообщение) для трассировки работы устройства, облегчающий понимание процессов внутри системы. В зависимости от конфигурации к ним могут быть добавлены директивы чтения/установки времени, директивы для работы с файловой системой (чтение содержимого директории, удаление, переименование и копирование файлов) и транспортная директива передачи любых типизированных данных.

Подсистема управления ожидает пакет с типизированными данными, посредством которых настраиваются все параметры устройства, сохранение в энергонезависимую память и пуск/останов процесса накопления вибросигнала. Запуск/останов осуществляется путем нажатия кнопки на устройстве, или при достижении определенного значения времени, если предварительно настроено

расписание, при этом устройство посылает соответствующий одиночный пакет-уведомление через подсистему передачи данных.

Таким образом, разработаны принципы создания приборов, способных накапливать и обрабатывать длительные непрерывные вибрационные сигналы при обнаружении редких кратковременных изменений структуры вибрационного сигнала и выявления причинно-следственных связей между их появлением и развитием дефектов контролируемых объектов. Рассмотрены структура, функциональные возможности, программное обеспечение регистратора вибрационных сигналов на встроенном процессоре

**Список литературы**

1. Бранцевич, П. Ю. Цифровая обработка вибрационных сигналов / П. Ю. Бранцевич. – Минск: Бестпринт, 2022. – 297 с.

2. Бранцевич, П. Ю. Компьютерные системы и комплексы обработки вибрационных сигналов / П. Ю. Бранцевич. – Минск: Бестпринт, 2023. – 282 с.

3. Atmel AVR 8-bit and 32-bit Microcontrollers [Электронный ресурс] – Электронные данные. – Режим доступа: https://static.chipdip.ru/lib/934/ DOC011934714.pdf

4. SD Card Shield V4 [Электронный ресурс] - Электронные данные. - Режим доступа: https://static.chipdip.ru/lib/126/DOC001126515.pdf

5. FatFs - Generic FAT File System Module [Электронный ресурс] – Электронные данные. – Режим доступа: https://elm-chan.org/fsw/ff

6. Циклический избыточный код [Электронный ресурс] – Электронные данные. – Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/Циклический_ избыточный_код

7. Arduino MEGA 2560 [Электронный ресурс] – Электронные данные. – Режим доступа: https://static.chipdip.ru/lib/042/DOC001042722.pdf

8. HC-05/06 Bluetooth Modules [Электронный ресурс] - Электронные данные. - Режим доступа: https://dcc-ex.com/reference/hardware/bluetooth/hc-05-06.html

9. WizFi250 [Электронный ресурс] - Электронные данные. - Режим доступа: https://github.com/Wiznet/WizFi250_arduino_library

**Контакты:**
e.bazylev@bsuir.by (Базылев Евгений Николаевич);
branc@bsuir.edu.by (Бранцевич Петр Юльянович).

УДК 621.9.047

***В. А. БАРАТ*[1,2]**, *д-р. техн. наук, доц.*
***В. В. БАРДАКОВ*[1]**, *канд. техн. наук*
***А. Ю. МАРЧЕНКОВ*[1]**, *канд. техн. наук, доц.*
***А. А. ПАНЬКИНА*[1]**
***И. А. ЛУКАШЕВ*[1,2]**
[1]Национальный исследовательский университет «МЭИ» (Москва, Россия)
[2] ООО «ИНТЕРЮНИС-ИТ» (Москва, Россия)

# ВЫЯВЛЕНИЕ МЕЖКРИСТАЛЛИТНОЙ КОРРОЗИИ НА НАТУРНЫХ ОБРАЗЦАХ ТРУБ ИЗ СТАЛИ АУСТЕНИТНОГО КЛАССА МЕТОДОМ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

**Аннотация.** Работа посвящена обнаружению межкристаллитной коррозии (МКК) аустенитной стали AISI 304 методом акустической эмиссии (АЭ). Объектом исследования являются натурные образцы в виде фрагментов труб с наружным диаметром 25 мм и толщиной 2,5 мм. Часть образцов исследовалась в исходном состоянии, а часть – после сенсибилизирующей термообработки и последующей коррозионной обработки, в результате которой произошло появление и развитие МКК. Образцы испытывались циклическим растяжением с максимальным напряжением цикла 75 МПа, соответствующим упругой области диаграммы растяжения с применением метода АЭ. На основании анализа данных АЭ было установлено, что МКК даже на ранних стадиях развития может быть выявлена на основании регистрации импульсов АЭ со средней активностью до 1.8 имп./цикл и амплитудой до 55 дБ, а также на основании результатов локации источников АЭ, совпадающих по расположению с зонами МКК.

**Ключевые слова:** межкристаллитная коррозия, обнаружение межкристаллитной коррозии методом акустической эмиссии, мониторинг развития межкристаллитной коррозии

## Введение

Межкристаллитная коррозия – один из самых опасных видов повреждений аустенитных сталей. МКК при малой степени повреждений не имеет выраженных визуальных признаков и представляет собой дефект микроскопического размера, ниже уровня чувствительности большинства методов неразрушающего контроля. Около 11 % аварий промышленного оборудования происходит из-за несвоевременного выявления МКК [1].
На сегодняшний день МКК при малой степени повреждений выявляют на основании косвенных признаков – по изменению электрической проводимости [2] или по увеличению коэффициента затухания акустических волн [3].

В данной работе рассматривается возможность выявления МКК с помощью метода акустической эмиссии (АЭ). Метод АЭ позволяет выявлять МКК при малой степени повреждения до появления выраженных дефектов сплошности, так как образование карбидной сетки и охрупчивание границ зерен приводит к изменению характера дислокационного скольжения, и изменению параметров акустического излучения, ассоциированных с этими источниками [4]. Поэтому наличие МКК в контролируемых объектах должно приводить к изменению динамики накопления импульсов АЭ по сравнению с бездефектными случаями.

В качестве объекта исследования в данной работе была выбрана аустенитная коррозионно-стойкая сталь AISI 304. Выбор данной марки обусловлен её широкой распространенностью и повышенной восприимчивостью к МКК, вызванной высоким содержанием углерода (до 0,12 %) и отсутствием в системе легирования стабилизаторов (титан, ниобий), обладающих большим сродством к углероду, чем хром. Испытания, проведенные на фрагментах труб стали AISI 304, выявили существенное различие в активности и амплитудах импульсов АЭ для образцов с МКК и референсных бездефектных образцов без МКК.

**Материалы и методы исследования**

Испытаниям подвергались натурные элементы трубопроводов — фрагменты труб с наружным диаметром 25 мм и толщиной стенки 2,5 мм. Каждый образец представлял собой сборку из трёх секций: двух крайних секций длиной по 150 мм и центральной секции длиной 100 мм, соединённых между собой кольцевыми сварными швами. Сборку выполняли стыковой аргонодуговой сваркой неплавящимся вольфрамовым электродом (TIG) в качестве присадочного материала применяли порошковую проволоку «Сабарос O 101» диаметром 1,6 мм.

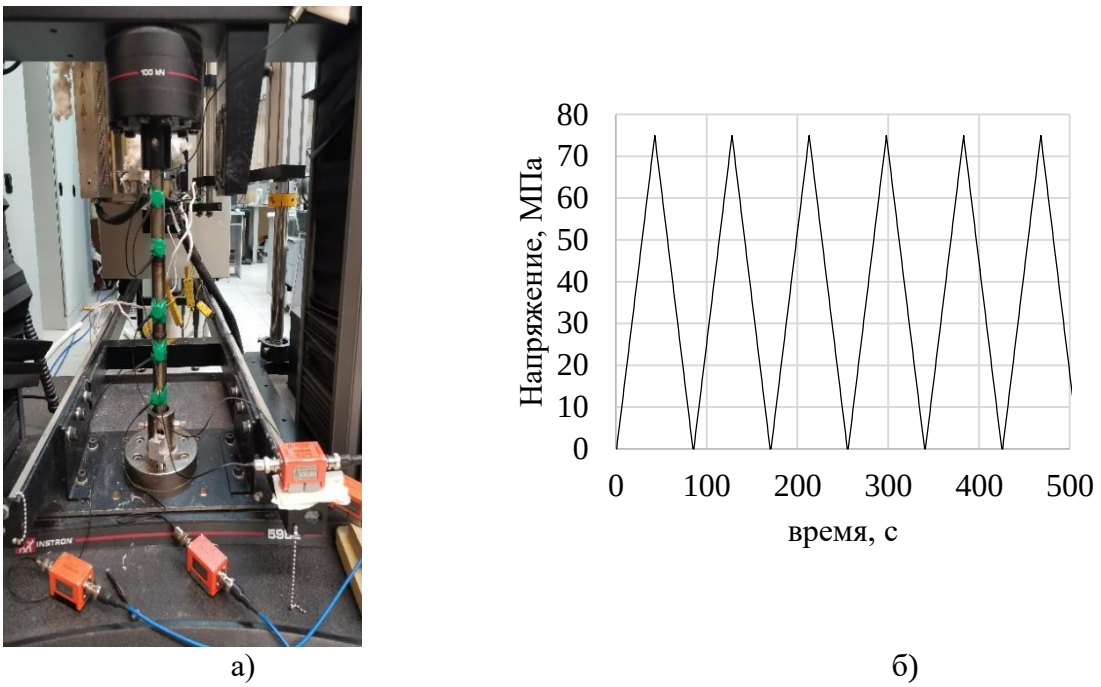
Рис. 1. Фотография сварного образца для проведения испытаний

Крайние секции всех образцов изготавливались из труб в состоянии поставки. Центральные секции части образцов перед вваркой подвергали предварительной сенсибилизирующей термической обработке и коррозионной обработке. Термическая обработка проводилась при температуре 600 °С в течение 25 часов, коррозионная обработка проводилась с помощью выдержки в кипящем растворе сернокислой меди и серной кислоты в присутствии металлической меди (метод АМУ, ГОСТ 6032-2017) в течение 8 часов.

Таким образом, часть изготовленных сварных образцов содержала участки сенсибилизированного металла с нанесенной МКК, часть образцов были полностью изготовлены из металла в состоянии поставки и использовались в качестве референсных (бездефектных).

Механические испытания образцов проводили на универсальной испытательной машине Instron 5982 (рис. 2а). Циклическое нагружение

образцов проводили циклами треугольной формы частотой 0,011 Гц с максимальным напряжением цикла $\sigma_{max}$ = 75 Мпа и коэффициентом асимметрии цикла $R$ = 0,1 (рис. 2б). Нагружение проводилось в течение 50 циклов с регистрацией данных АЭ. Данные АЭ регистрировали с помощью системы A-Line 32 (ООО «ИНТЕРЮНИС-ИТ») с предусилителями ПАЭФ-014 и преобразователями АЭ GT200 (ООО «Глобал Тест») с резонансной частотой 180 кГц.




а) б)

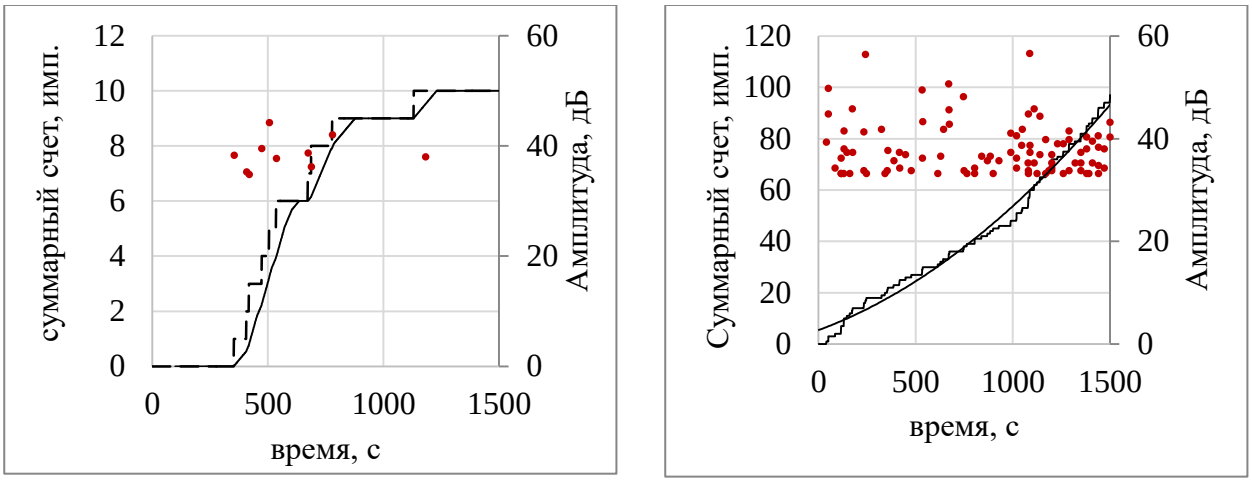
Рис.2. Установка для испытания образцов (а), диаграмма циклического нагружения (б)

В эксперименте использовались пять преобразователей АЭ, три из которых устанавливались в центральной части образца, а два оставшихся использовались в качестве сторожевых преобразователей и устанавливались у захватов испытательной машины (рис. 2а). На этапе предварительной обработки данных из рассмотрения исключались данные об акустических событиях, у которых времена прихода импульсов на сторожевые преобразователи были меньше, чем на преобразователи, установленные в центре образца.

**Результаты**

По данным АЭ наблюдается существенное различие АЭ параметров при испытании образца в исходном состоянии (бездефектного) и образца с МКК. При испытании бездефектного образца (рис.3а) наблюдаются единичные случайные импульсы (10 импульсов за 50 циклов нагружения), амплитуда импульсов не более 45 дБ. Образец после термической обработки и коррозионной обработки характеризуется существенно большей АЭ активностью, импульсы регистрируются регулярно, в течение каждого цикла

нагружения. Средняя активность составляет порядка 1,8 имп./цикл, амплитуды импульсов АЭ достигают 55 дБ.




а) б)

Рис.3. Параметры импульсов АЭ: суммарный счет и значения амплитуд для образца в исходном состоянии (а) и для образца с МКК (б)

На рис.4 показаны результаты линейной локации источников АЭ для образца с МКК. Всего зарегистрировано 45 АЭ событий, преимущественно в центральной части образца, соответствующей расположению участка трубы, прошедшего термическую и коррозионную обработку.

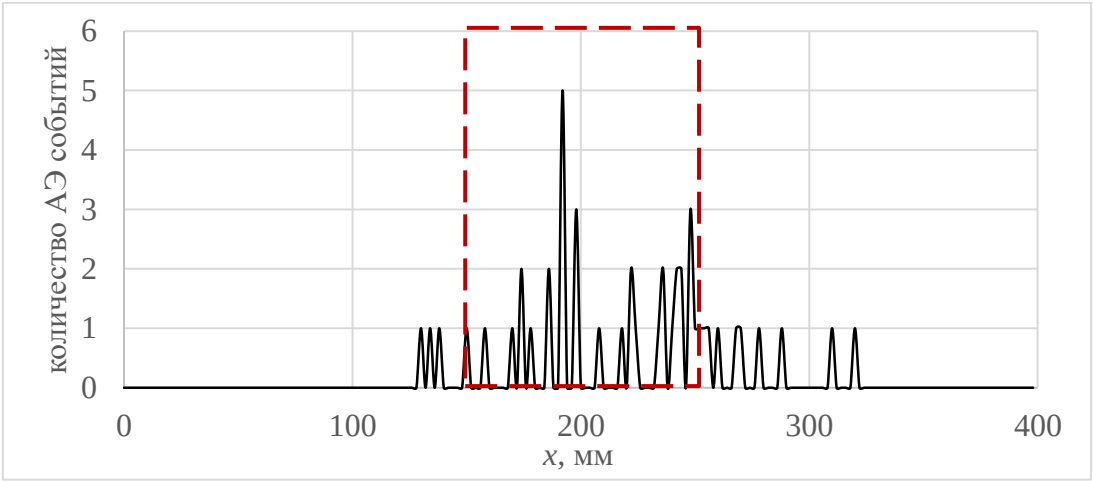



Рис.4 – Результат локации АЭ событий для образца с МКК (красная рамка – область локализации МКК в центральной части образца)

**Заключение**

При циклическом нагружении образца в исходном состоянии генерация АЭ практически не наблюдаются. Низкая АЭ активность объясняется малым значением максимального напряжения цикла $\sigma_{max} = 75$ МПа, которое приблизительно в 2,5 раза меньше предела текучести стали AISI 304 ($\sigma_{0,2} \sim 205$ МПа). Единичные импульсы малой амплитуды, зарегистрированные

во время испытаний, могут быть связаны с эффектами микропластической деформации в материале образца.

Наличие активного процесса АЭ в образце с МКК, выраженного возрастающим трендом суммарного счета и относительно высокими значениями амплитуд импульсов АЭ, может объясняться влиянием хрупких фаз, образовавшихся в результате коррозионного процесса, а также возможным снижением характеристик прочности в результате длительной коррозионной обработки.

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 5-29-01394, https://rscf.ru/project/25-29-01394/.

**Список литературы**

1. Петровнина И.Н., Скороходов В.А. Катодные процессы при межкристаллитной коррозии хромоникелевой нержавеющей стали // Инженерный вестник Дона. 2019. № 1. С. 1–14.

2. Sánchez-Amaya J.M., González-Rovira L., Amaya-Vázquez M.R., Botana F.J. Experimental correlation between metallographic evaluation and electrochemical noise in intergranular corrosion tests of aluminium alloys // Surface and Interface Analysis. 2012. Vol. 44. № 9. P. 1279–1286

3. Doerr C., Kim J., Singh P., Wall J.J., Jacobs L.J. Evaluation of sensitization in stainless steel 304 and 304L using nonlinear Rayleigh waves // NDT and E International. 2017. Vol. 88. P. 17–23.

4. Barat V.A., Marchenkov A.Yu., Pankina A.A., Lavrik N.V., Lepsheev E.A. Study of the feasibility of using the acoustic emission method to determine the corrosion resistance of austenitic steels // Frontier Materials & Technologies. 2026. № 1. P. 9–21.

Контакты:
BardakovVV@mpei.ru (Бардаков Владимир Васильевич)
BaratVA@mpei.ru (Барат Вера Александровна)
Marchenkovay@mpei.ru (Марченков Артем Юрьевич)
PankinaAA@mpei.ru (Панькина Анастасия Алексеевна)
Lukashevia@interunis-it.ru (Лукашев Иван Алексеевич)

УДК 620.179.14

***Р. О. БЕЛОКОПЫТОВ***
***В. П. ЛУНИН****, д-р техн. наук, проф.*
Национальный исследовательский университет «МЭИ» (Москва, Россия)

# РАСПОЗНАВАНИЕ СКРЫТЫХ ДИСКООБРАЗНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ ИМПУЛЬСНЫМ ВИХРЕТОКОВЫМ МЕТОДОМ С ПРИМЕНЕНИЕМ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

**Аннотация.** Рассмотрена задача распознавания скрытых металлических объектов, имеющих форму диска, по признакам импульсного вихретокового сигнала методами машинного обучения. В отличие от восстановления непрерывного вектора параметров, распознавание объекта из известного конечного набора представляет собой хорошо обусловленную задачу и допускает возможность строгой количественной оценки точности. Обучающая выборка сформирована на основе анализа электромагнитного взаимодействия вихретокового преобразователя с объектом на трёхмерной конечно-элементной модели. В качестве объектов использованы 16 типов монет – восемь российских номиналов и восемь зарубежных. Распознавание выполнено в два этапа: сначала разделение монет на два класса (отечественные и зарубежные), а затем определение номинала монет. Показано, что информативные признаки сигнала обеспечивают точность около 92% на первом этапе и около 90% на втором, а ошибки распознавания сосредоточены на физически трудноразличимых парах монет. Проанализированы приоритеты влияния признаков: на обоих уровнях определяющими являются временные характеристики сигнала, связанные с материалом и геометрией объекта.

**Ключевые слова:** импульсный вихретоковый контроль, конечно-элементное моделирование, машинное обучение, распознавание объектов, классификация, градиентный бустинг.

## Введение

Определение характеристик скрытых (например, под слоем бетона) проводящих объектов методом импульсного вихретокового контроля представляет собой обратную задачу: по характеристикам и форме регистрируемого сигнала требуется восстановить параметры объекта – геометрические размеры и расстояние до него, а также электропроводность, магнитную проницаемость материала. Принципиальная трудность состоит в том, что отклик преобразователя определяется этими параметрами совместно, и различные их сочетания способны формировать близкие по форме и характеристикам сигналы.

Импульсное вихретоковое (ИВТ) возбуждение, благодаря широкополосному характеру сигнала, обеспечивает большую глубину проникновения вихревых токов и повышенную помехоустойчивость по сравнению с гармоническим возбуждением [1, 2]. Информацию о параметрах объекта из зарегистрированного сигнала извлекают в виде набора амплитудных и временных признаков. Эти признаки, как правило, чувствительны сразу к нескольким параметрам объекта, а амплитудные к тому же сильно зависят от зазора между датчиком и объектом [3, 4]. Традиционные подходы,

сопоставляющие каждому параметру отдельный признак, плохо учитывают это совместное влияние и потому ограничены.

Альтернативой раздельному анализу признаков служит решение обратной задачи методами машинного обучения, когда модель распознавания обучается на массиве сигналов с известными параметрами объектов, а затем используется для восстановления искомых характеристик контролируемого объекта. Однако восстановление полного вектора параметров произвольного образца для ряда характеристик нередко оказывается плохо обусловленным – их влияние на сигнал косвенно и взаимно маскируется, а само значение коэффициента детерминации не всегда даёт представление о надежности в применимости метода. В то же время многие практические задачи контроля сводятся не к восстановлению произвольного вектора, а к отнесению объекта к одному из известных типов-классов, каждому из которых отвечает фиксированное сочетание геометрии и материала. Такая постановка хорошо обусловлена и допускает строгую оценку точности.

В настоящей работе эта постановка исследована на примере распознавания монет – доступных металлических объектов дисковидной формы с точно документированными диаметром, толщиной и электрофизическими свойствами материала. Это позволяет оценить достижимую точность распознавания и проанализировать, какие признаки сигнала являются определяющими.

**Конечно-элементная модель процедуры контроля**

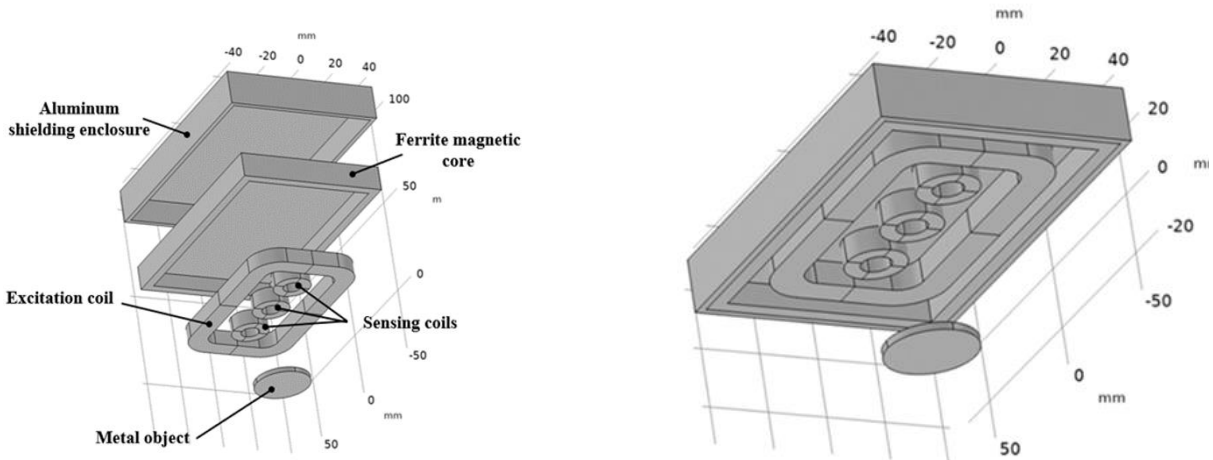
Обучающая выборка сформирована анализом на трёхмерной конечно-элементной модели электромагнитного взаимодействия импульсного преобразователя [5] и контролируемого металлического объекта в COMSOL Multiphysics. Преобразователь включает возбуждающую катушку, три приёмные катушки, ферритовый магнитопровод и алюминиевый экранирующий корпус (рис. 1). Объект контроля – диск с варьируемыми толщиной, радиусом, материалом и расстоянием до преобразователя (зазором, имитирующим слой бетона).

К возбуждающей катушке (400 витков) подключена электрическая цепь, задающая импульсный ток со скважностью 50% и частотой 40 Гц; каждая из трёх приёмных катушек содержит 600 витков. Анализируется разностное напряжение на центральной приёмной катушке – разность сигналов при наличии образца и без него (рис. 2). Такое вычитание выделяет часть сигнала, несущую информацию об объекте.

**Формирование обучающей выборки и извлечение признаков**

Расчёт сигналов для большого числа сочетаний параметров объекта выполнялся автоматизированно с использованием связки COMSOL Multiphysics и пакета MATLAB через интерфейс LiveLink for MATLAB. Управляющий скрипт осуществлял перебор заданных сочетаний параметров, для каждого из которых рассчитывался сигнал при наличии объекта и в его

отсутствие, после чего вычислялся разностный сигнал и извлекались информативные признаки.




а) б)

Рис. 1. Трёхмерная модель вихретокового преобразователя и образца: а – раздельное представление компонентов; б – собранная конфигурация

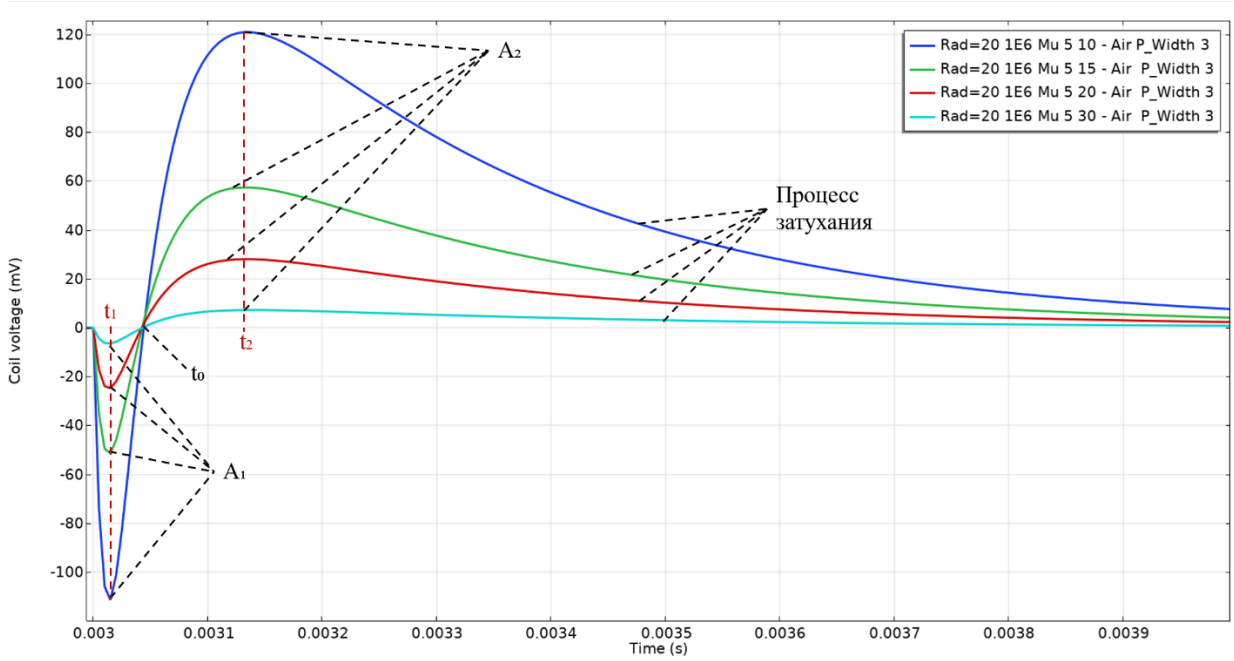



Рис. 2. Пример разностного сигнала и выделяемых признаков

Из каждого разностного сигнала извлекались признаки двух групп (рис. 2). Первая группа – амплитудные и временные признаки: значения первого и второго экстремумов $A_1$ и $A_2$ и моменты их наступления, время перехода сигнала через ноль $t_0$ и временные интервалы относительно него, отношение амплитуд $A_2/A_1$. Моменты экстремумов и нулевого перехода определялись с применением сплайн-интерполяции, что обеспечивало точность выше дискретности временной сетки расчёта.

Вторая группа признаков характеризует затухание сигнала. Постоянная времени затухания вихревых токов в проводящем слое пропорциональна квадрату его толщины, что отражается в скорости спада сигнала на завершающей стадии. На участке после второго экстремума затухание носит близкий к экспоненциальному характер, поэтому логарифм модуля напряжения аппроксимировался линейной зависимостью

$$\ln|U(t)| \approx k \cdot t + b,$$

где угловой коэффициент $k$ служит признаком, связанным с параметрами объекта и его материалом.

Аппроксимация выполнялась как по всему участку спада ($k$_full), так и раздельно по его первой ($k$_early) и второй ($k$_late) половинам. Качество линейной аппроксимации оценивалось коэффициентом детерминации $R^2$.

**Распознавание монет**

*Постановка задачи и данные.* В качестве объектов распознавания выбраны 16 типов монет: восемь номиналов Российской Федерации (от 1 копейки до 10 рублей) и восемь зарубежных монет (50 центов, 1 и 2 евро, 10 и 25 центов США, 1 и 2 доллара и 5 центов Канады). Для каждой монеты по описанной методике рассчитан разностный сигнал при шести значениях зазора в диапазоне 10–35 мм, что дало возможность сформировать обучающую выборку из 96 образцов. Распознавание выполнено в два этапа. На первом решается задача отделения отечественных монет от зарубежных, на втором – определения номинала среди монет РФ.

*Обучение и приоритеты влияния признаков*. Для распознавания сравнивались три алгоритма машинного обучения: XGBoost, Gradient Boosting и Random Forest [6]. Ввиду ограниченного объёма выборки качество оценивалось методом стратифицированной перекрёстной проверки, при которой доли классов сохраняются в каждой части выборки. Наилучшее качество показали Gradient Boosting на первом уровне и Random Forest на втором.

Анализ важности признаков позволяет установить, какие характеристики сигнала являются определяющими (рис. 3). На первом этапе доминируют временные признаки, связанные с переходом сигнала через ноль и первым экстремумом. Это физически обосновано: отечественные и зарубежные монеты различаются прежде всего материалом – проводимостью и магнитной проницаемостью, а материал изменяет весь временной масштаб переходного процесса, что и отражается в моментах характерных точек сигнала. На втором этапе, где материал у всех монет близок, к временным признакам добавляется отношение амплитуд $A_2/A_1$. Различия между номиналами определяются главным образом диаметром монеты, который проявляется в соотношении амплитуд и во временных интервалах. Наклоны затухания при этом не входят в число ведущих признаков: среди монет одного материала номинал

определяется прежде всего диаметром, тогда как толщина, отражаемая скоростью спада хвоста сигнала, играет второстепенную роль.

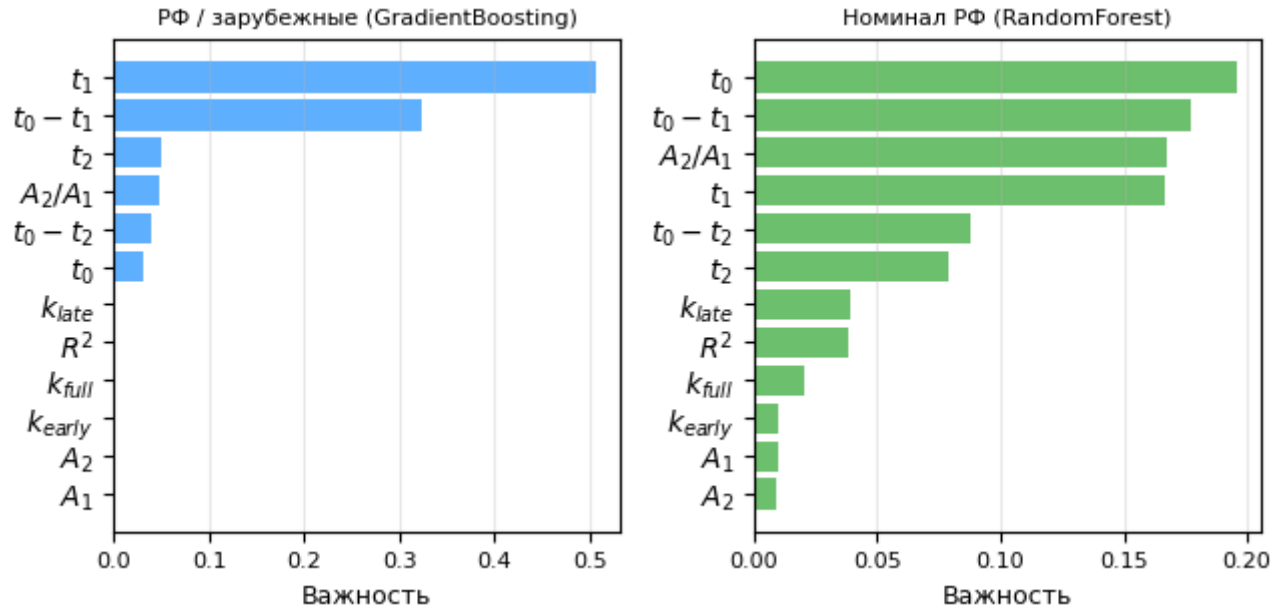



Рис. 3 – Важность признаков при распознавании монет

*Результаты распознавания*. На первом этапе достигнута точность около 92% – верно классифицированы 88 из 96 образцов. Соответствующая матрица ошибок приведена на рис. 4, а. Ошибки распределены между классами симметрично.

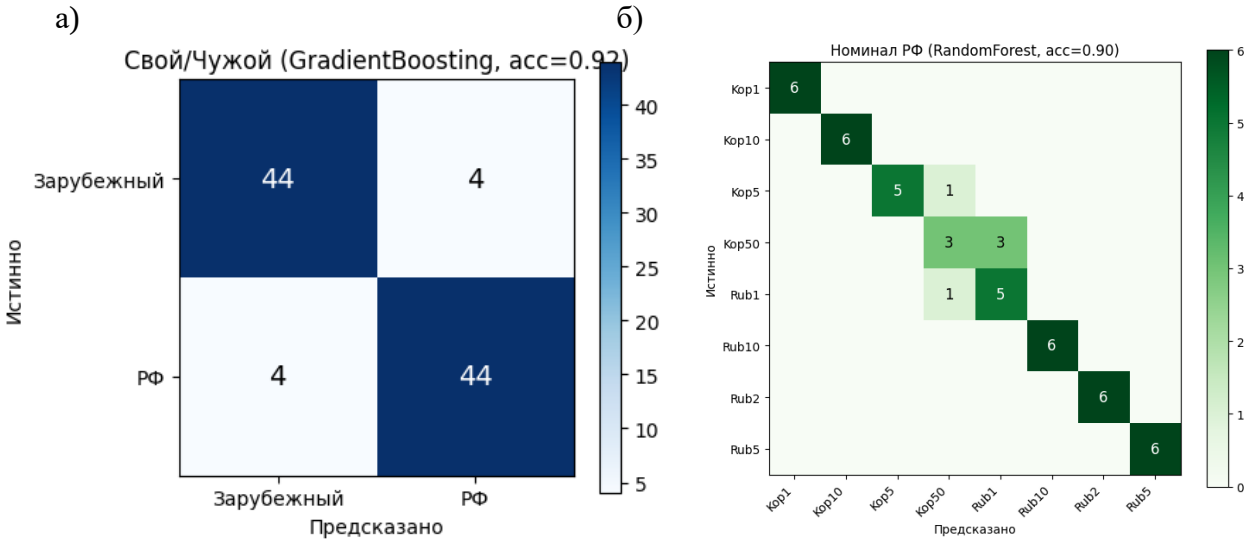



Рис. 4 – Матрицы ошибок распознавания монет: а – «РФ/зарубежный»; б – номинал монет РФ

На втором этапе точность составила около 90% – верно 43 из 48 образцов (рис. 4, б). Почти все ошибки приходятся на пару 50 копеек и 1 рубль. Это объясняется физически: указанные монеты имеют почти совпадающие диаметр (радиус 9,75 и 10,25 мм) и одинаковую толщину (1,5 мм) при одном и том же

материале, вследствие чего формируют неразличимые вихретоковые сигналы. Монеты, различающиеся диаметром или материалом, разделяются уверенно. Таким образом, ошибки распознавания возникают не из-за недостатков метода, а вследствие объективной физической вырожденности отдельных пар объектов.

## Заключение

В работе исследована возможность распознавания дискообразных металлических объектов по признакам импульсного вихретокового сигнала методами машинного обучения. Показано, что постановка распознавания объекта из известного набора, в отличие от восстановления непрерывного вектора параметров, хорошо обусловлена и допускает строгую количественную оценку точности. На примере 16 типов монет достигнута точность отделения отечественных монет от зарубежных около 92% и определения номинала около 90%. Анализ приоритетов влияния признаков показал, что на обоих этапах распознавание опирается прежде всего на временные характеристики сигнала. На первом этапе они отражают различие материалов, а на втором совместно с отношением амплитуд – геометрию монет. Ошибки распознавания сосредоточены на физически неразличимых парах объектов – 50 копейках и 1 рубле, что указывает на достижение предела, обусловленного не методом, а вырожденностью самих объектов.

Дальнейшее развитие работы связано с расширением набора распознаваемых объектов и обучающей выборки, а также с распространением подхода на другие классы задач импульсно-вихретокового контроля.

### Список литературы


1. Adewale I., Tian G. Decoupling the influence of permeability and conductivity in pulsed eddy-current measurements // IEEE Transactions on Magnetics. 2013. Vol. 49, № 3. P. 1119–1127.
2. Yang F., Li Z., Fu Y. et al. Comparison of different types of focusing probes in pulsed eddy current testing // AIP Advances. 2022. Vol. 12. Art. 075010.
3. Mandache C., Lefebvre J. H. V. Transient and harmonic eddy currents: Lift-off point of intersection // NDT & E International. 2006. Vol. 39, № 1. P. 57–60.
4. Tian G. Y., Li Y., Mandache C. Study of lift-off invariance for pulsed eddy-current signals // IEEE Transactions on Magnetics. 2009. Vol. 45, № 1. P. 184–191.
5. de Alcântara Jr. N. P., Gonçalves Jr. L. Simulation of an ECT sensor to inspect the reinforcement of concrete structures // Proceedings of the COMSOL Conference. Boston, 2015.
6. XGBoost: Chen T., Guestrin C. XGBoost: A Scalable Tree Boosting System // Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining. 2016. P. 785–794.



**Контакты:**
BelokopytovRO@mpei.ru (Белокопытов Роман Олегович)
luninvp@mpei.ru (Лунин Валерий Павлович)

УДК 691.32:620.1.08

***В. А. БЕРЕГОВОЙ****, д-р техн. наук, проф.*
***И. Ю. ЛАВРОВ****, канд. техн. наук*
***А. В. СЕМИЛЕТКОВ***
Пензенский государственный университет архитектуры и строительства
(Пенза, Россия)

# СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОЛОГИЧЕСКОЙ И ЛАБОРАТОРНОЙ БАЗЫ ДЛЯ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

**Аннотация.** В работе приведены результаты экспериментального сравнения величин коэффициентов вариации, полученных различными методами вибрационного нагружения образцов стали, алюминиевого сплава и высокопрочного мелкозернистого бетона. Описана структура лабораторного комплекса и предложены апробированные на практике рекомендации, обеспечивающие рост показателей точности и воспроизводимости измерений при неразрушающем контроле динамических свойств бетона.

**Ключевые слова:** неразрушающий контроль, динамический модуль упругости, логарифмический декремент, свободные колебания, резонансный метод, бетон, лабораторный комплекс, демпфирование.

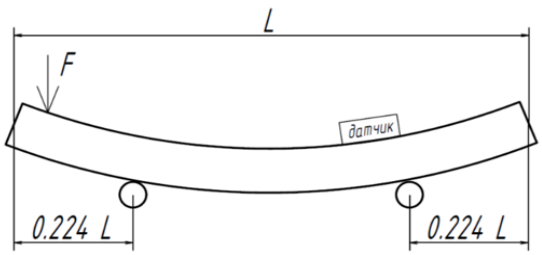
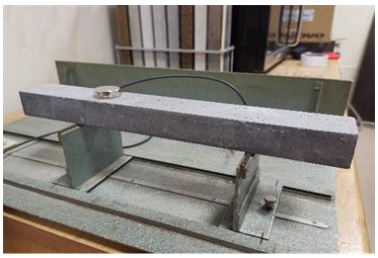
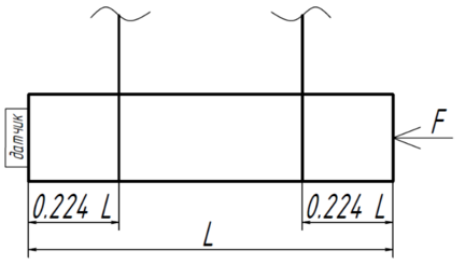
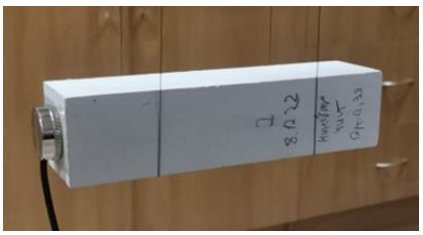
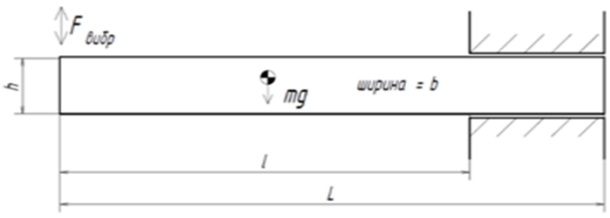
## Введение

Бетон, работающий в условиях вибрационной нагрузки, должен соответствовать регламентированным динамическим характеристикам – динамическому модулю упругости $E_d$ и логарифмическому декременту колебаний δ, определение которых является важной задачей неразрушающего контроля, поскольку эти параметры влияют на резонансные частоты и затухание колебаний конструкции [1–6]. Стандартизованные методики – ГОСТ 10060-2012 и ASTM E1876 – предусматривают регистрацию отклика на изгибные или продольные колебания образца-балочки с использованием резонансного метода или метода свободных затухающих колебаний [7,8]. Однако оба подхода имеют ограничения: потери энергии в узлах крепления приводят к искажению $E_d$ и $\delta$, и низкую повторяемость из-за случайных флуктуаций сигнала, а серийные приборы, например, ИКВТ-2, ограничены по частотному диапазону и не допускают гибкой настройки.

Для устранения перечисленных недостатков был разработан лабораторный комплекс и написан программный код, в котором реализован метод свободных колебаний с автоматическим определением динамических параметров и построением огибающей сигнала.

**Методика неразрушающего контроля вибродинамических параметров бетона**

Направление распространения колебаний по материалу обуславливает выбор экспериментального метода определения их параметров в рамках оценки вибродинамических характеристик. В случае поперечных колебаний образец устанавливается на двух опорах, тогда как при их продольном характере предпочтительнее подвешивание материала на нитях [9]. Консольное закрепление является более универсальным и позволяет задействовать инструментарий обоих методов испытаний. Его основной недостаток – бóльшая величина рассеивания энергии в месте зажима, что вносит дополнительную погрешность в результаты экспериментов (рис. 1) [10].

| 1 | |
|---|---|
| a | b |
|  |  |
| 2 | |
| a | b |
|  |  |
| 3 | |
| a | b |
|  | |

1 –размещение на двух опорах; 2 –подвешивание; 3 –консольное закрепление.

Рис.1. Исследование поперечных и продольных колебаний различными методами (a – схема испытания; b – фото контрольного образца)

Лабораторные испытания образцов бетона осуществляли посредством свободных колебаний с использованием образцов-балочек длиной 300 мм с

сечением 40х28 мм. Для валидации результатов, полученных в ходе эксперимента для высокопрочного мелкозернистого бетона, использовали эталонные образцы из углеродистой стали 20, алюминиевого сплава *Д*16*Т* с заранее известными показателями (рис. 2). При этом испытания производили двумя методами закрепления: консольным и на двух опорах.

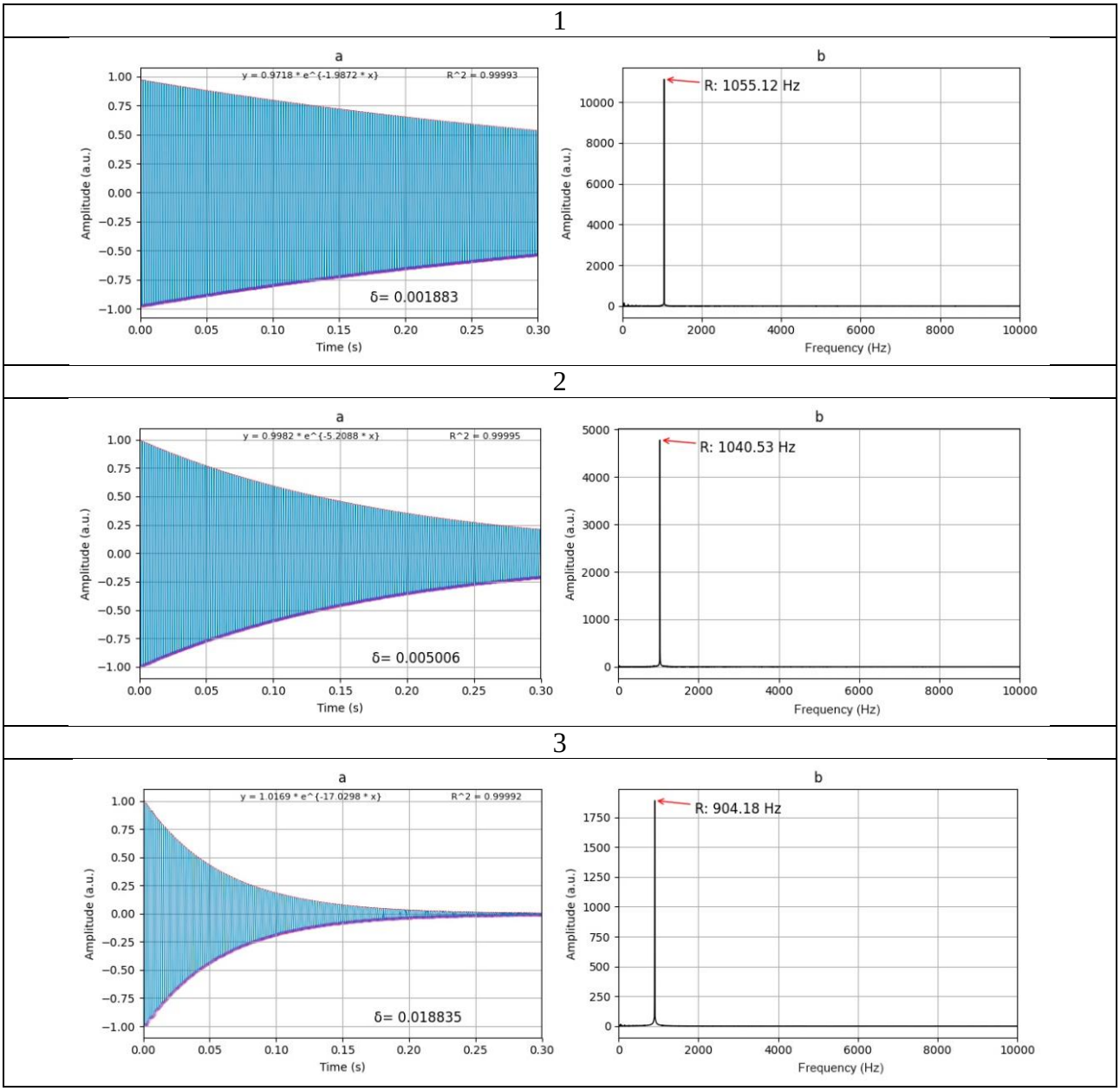
Бетонную смесь готовили на портландцементе ЦЕМ 0 52,5Н с добавлением кварцевой муки, микрокремнезёма и поликарбоксилатного гиперпластификатора; расход компонентов (кг/м³): цемент – 623, кварцевая мука – 249, песок – 1247, пластификатор Melflux 5581f – 3,12, вода – 222. После распалубки через 24 ч образцы выдержали 14 суток в камере нормального твердения, а затем перемещали в воздушно-сухие условия ($t$ = 20 ± 2 °*C*, φ = 29±7 %). Изготовление производилось на ребре 28 мм, в соответствии с рекомендациями ГОСТ 24544-2020 (Приложение Е). Общие рекомендации по изготовлению контрольных образцов основаны на ГОСТ 10180-2012, ГОСТ 22685-89 и учитывают практические аспекты испытаний бетонов различных видов [11, 12].

Отклонения геометрических размеров контрольных образцов по плоскостности опорной поверхности и поверхности, прилегающей к датчику, не превышали 0,05 мм, а по величинам перпендикулярности смежных граней – 1 мм. Непосредственно перед испытанием определяются масса и геометрические параметры образца: в его середине и на расстояниях 10 мм от торцов. Затем на верхнюю грань образца с помощью двусторонней клейкой ленты толщиной 0,1 мм крепится датчик пьезоэлектрического типа для регистрации колебаний. Оптимальным вариантом является расположение датчика вблизи опор (см. рис.1). Размещение датчика в центре верхней грани повышает качество фиксации колебательного процесса, но больше влияет на процесс колебаний. Важным условием является одинаковое расположение датчика относительно опор и образца на протяжении испытаний всех образцов. Величина шероховатости поверхности (*Ra*) образца в месте приклеивания датчика должна быть не более 3,2.

Образец с датчиком помещается на опоры из резины или иного упругого материала с твердостью 70-90 единиц Шора А, расположенные на расстоянии 0,224*L* от его торцов. При таком расположении рассеивание энергии в зоне контакта образца и опоры минимально, что повышает достоверность получаемых данных. Ширина опор в плане не должна превышать 3 мм. При исследовании образцов бетона первая собственная частота изгибных колебаний находится в диапазоне 900-1400 Гц, поэтому собственные резонансные частоты опор и станины установки в указанном диапазоне должны быть минимизированы или отсутствовать. Образцы испытываются в положении плашмя (на ребре 40 мм). Для придания образцу колебаний используется модальный молоток или стальной шарик на упругом стержне. Удар наносится по верхней грани на расстоянии 5-10 мм от торца образца (схема на рис.1).

Обработка сигнала свободных затухающих колебаний выполнялась в разработанной авторами программе на языке Python. Алгоритм включает:

построение частотного спектра и определение первой собственной частоты *f*; поиск локальных амплитудных пиков на временной развёртке; аппроксимацию пиков экспоненциальной функцией $A = A_0 \exp(-xt)$ методом наименьших квадратов с вычислением коэффициента детерминации $R^2$ (результат принимали, если $R \geq 0{,}98$); расчёт логарифмического декремента по полученной модели. Такой подход эквивалентен осреднению по всему процессу затухания и исключает влияние случайных выбросов амплитуды.




1 – сталь; 2 – алюминиевый сплав; 3 – высокопрочный мелкозернистый бетон.

Рис.2. Сигнал и частотный спектр колебаний образцов конструкционных материалов (a – сигнал; b – частотный спектр сигнала)

В результате оцифровки показаний датчика строится график затухающих колебаний. С помощью дискретного преобразования Фурье формируется частотный спектр сигнала и определяется основная частота для дальнейших

вычислений. Для качественной оцифровки аналогового сигнала датчика рекомендуется применять аналого-цифровой преобразователь с частотой дискретизации, на порядок превышающей максимальную частоту колебаний образца.

На первом этапе выделяются локальные амплитудные пики, по которым осуществляется построение аппроксимирующей функции, (рис.3) вида

$$A = A_0 e^{-xt}$$

где $A$ – мгновенная амплитуда в момент времени $t$, м; $A_0$ – начальная амплитуда, м; $x$ – коэффициент; $t$ – время, с (для двух последовательных амплитуд соответствует периоду колебаний).

Полученные таким образом модель затухания и значение собственной частоты колебаний используются при нахождении величин двух последовательных амплитуд для расчёта по формуле (1).

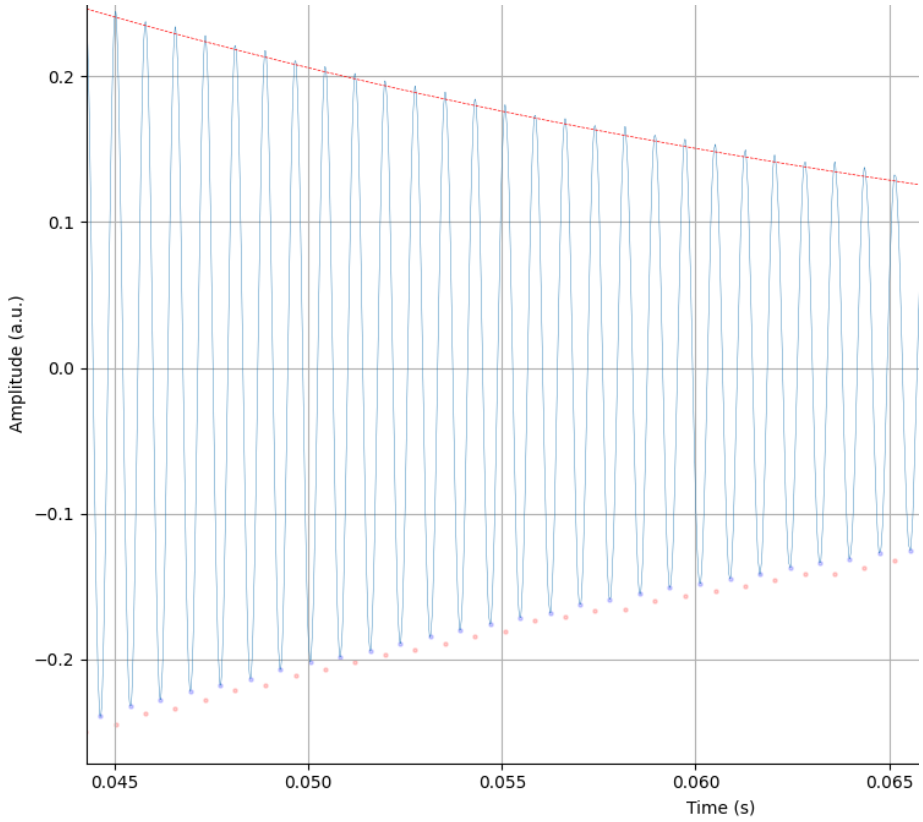



Рис.3. Фрагмент сигнала и построенная модель затухания колебаний

Как было установлено в экспериментах [13], традиционные образцы-балочки квадратного сечения размером 160x40x40 мм не вполне подходят, поскольку первая и вторая собственные частоты такого образца слабо отличаются, из-за чего в выходном сигнале могут присутствовать биения (рис.4). Это снижает точность определения величины демпфирования, а наилучшие результаты достигаются при отношении ширины сечения образца к высоте в диапазоне 1,2 – 1,6.

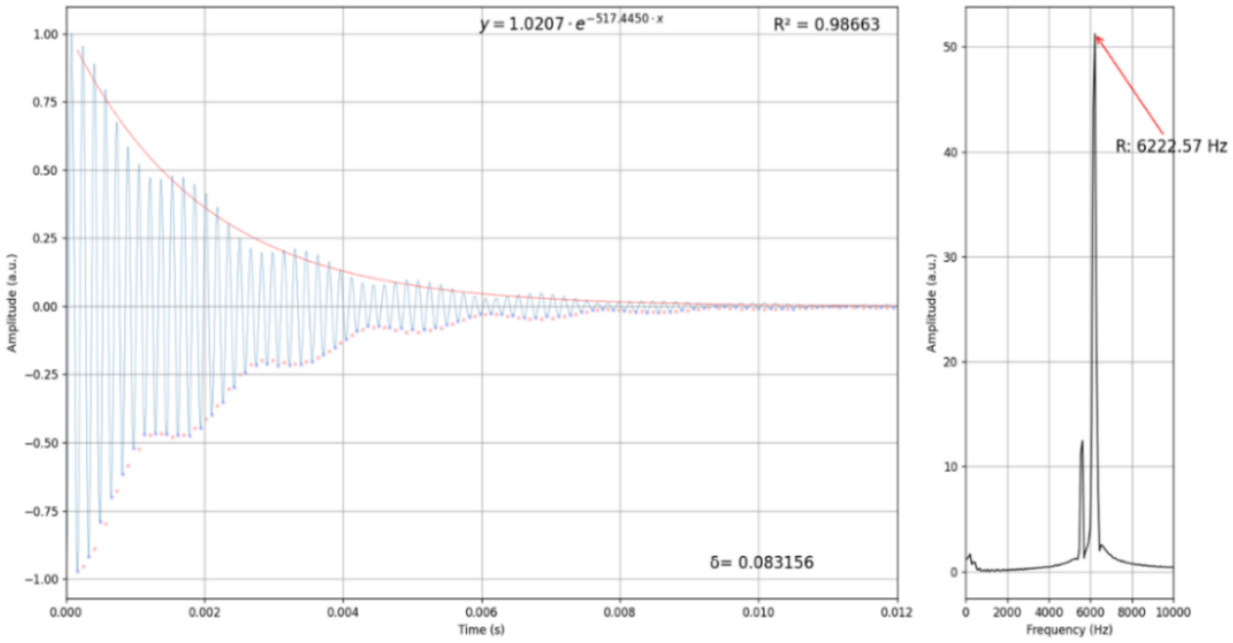



Рис.4. Фиксируемые биения при неблагоприятном соотношении ширины сечения образца к высоте ($a/h \approx 1$)

## Заключение

Проведённые исследования подтвердили эффективность предложенной методики неразрушающего контроля динамических характеристик конструкционных материалов. Лабораторный комплекс успешно справляется с определением параметров, при этом точность измерений существенно возросла по сравнению с существующими подходами.

Разработанные рекомендации по подготовке образцов, условиям испытаний и критериям обработки результатов обеспечивают системность и надёжность контроля. Представленные решения вносят вклад в совершенствование методологической и приборной базы неразрушающего контроля вибродинамических параметров бетона и других материалов промышленного назначения.

## Список литературы

1. Ashby, M. F. Materials selection in mechanical design / M. F. Ashby. – 3rd ed. – Oxford (Conn.) : Elsevier/Butterworth Heinemann, 2005. – 602 p.

2. Slocum, A. H. Precision Machine Design / A. H. Slocum. – Society of Manufacturing Engineers, 1992. – 776 p.

3. Лавров, И. Ю. Численно-экспериментальная оценка деформативности бетонных элементов машиностроительных конструкций при динамическом нагружении / И. Ю. Лавров, В. А. Береговой // Тезисы докладов IX Международного симпозиума. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2025. – С. 201–203.

4. Chung, I. S. Dynamic characteristics of lathe using concrete bed / I. S. Chung, M. Tsutsumi, Y. Ito // Bulletin of JSME. – 1985. – Т. 28, № 239. – P. 987–993.

5. Development of Machining Center with Concrete Bed (1st Report) / O. Nagayasu, T. Shinnoh, H. Sugishita [et al.] // Journal of the Japan Society for Precision Engineering. – 1986. – Т. 52, № 2. – P. 313–318.

6. Береговой, В. А. Опыт применения высокофункционального бетона в конструкции современного станка / В. А. Береговой, К. Н. Махамбетова, И. Ю. Лавров // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. – 2023. – № 5 (280). – С. 31–37.

7. Long term vibration monitoring of an RC slab: Temperature and humidity effect / Y. Xia, H. Hao, G. Zanardo, A. Deeks // Engineering Structures. – 2006. – Т. 28, № 3. – P. 441–452.

8. Лавров, И. Ю. Лабораторный комплекс для исследования вибродинамических показателей конструкционных бетонов / И. Ю. Лавров, В. А. Береговой // Региональная архитектура и строительство. – 2023. – № 4 (57). – С. 56–65.

9. Лавров, И. Ю. Демпфирующая способность и деформативность высокопрочного мелкозернистого бетона / И. Ю. Лавров // Ресурсоэнергоэффективные технологии в строительном комплексе региона. – 2024. – № 1 (16). – С. 41–47.

10. Experimental study on damping properties of rubber powder modified styrene-acrylic emulsion concrete beam / J. Mo, L. Zeng, F. Guo [et al.] // Journal of Building Engineering. – 2020. – Т. 32. – P. 101728.

11. Бетоны нового поколения на основе сухих тонкозернисто-порошковых смесей / В. И. Калашников, О. В. Тараканов, Ю. С. Кузнецов [и др.] // Magazine of Civil Engineering. – 2012. – № 8 (34). – С. 47–53.

12. Лавров, И. Ю. Высокофункциональные бетоны для промышленного строительства и машиностроения / И. Ю. Лавров, В. А. Береговой // Строительные материалы. – 2024. – № 12. – С. 42–48.

13. Лавров, И. Ю. Технические аспекты определения динамических характеристик бетона при вибрационном воздействии / И. Ю. Лавров, А. С. Присевка, О. В. Суздальцев // Материалы I международной конференции молодых ученых. – Владимир : Press-Book.ru, 2024. – С. 112–118.

Контакты:
techbeton@pguas.ru (Береговой Виталий Александрович);
lavrov0909@gmail.com (Лавров Иван Юрьевич);
techbeton@pguas.ru (Семилетков Александр Викторович).

УДК 620.179.14

***И. М. БОГОТОВ***
***А. К. ШЕПЕЛЕВ***
***В. П. ЛУНИН****, д-р техн. наук, проф.*
Национальный исследовательский университет «МЭИ» (Москва, Россия)

# ПОВЫШЕНИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ В ОЦЕНКЕСТЕПЕНИ КОРРОЗИОННОГО ПОВРЕЖДЕНИЯ АРМАТУРЫ В ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЯХ

**Аннотация.** Представлены результаты модельных исследований преобразователя специальной формы для мониторинга коррозионного состояния стальных стержней в железобетонных конструкциях с использованием вихретокового метода. Для исследования была построена строгая трехмерная конечно-элементная модель многовитковой катушки, интегрированной в резонансную RLC-цепь. Численный анализ был сосредоточен преимущественно на двух контролируемых ключевых параметрах в области резонанса: эффективном сопротивлении Reff и эффективной индуктивности Leff системы «катушка – ферромагнитный стержень», которые продемонстрировали устойчивую зависимость от степени коррозионного повреждения. Результаты исследований подтвердили высокую чувствительность разработанной схемы контроля к изменениям состояния арматуры, что позволяет не только обнаруживать наличие коррозии, но и количественно оценивать степень повреждения. Это подтверждает перспективность предлагаемого метода для эффективного контроля железобетонных конструкций без нарушения целостности защитного бетонного слоя.

**Ключевые слова:** железобетонные конструкции, корродированные арматурные стержни, вихретоковый контроль, резонансная RLC - цепь

## Введение

Железобетонные конструкции, широко применяемые при возведении мостов, зданий и других объектов гражданской инфраструктуры, подвержены коррозии стальной арматуры, что может существенно снизить их несущую способность и эксплуатационную надежность. Своевременный и точный контроль состояния этой арматуры является критически важным условием обеспечения долговечности таких сооружений [1]. Один из электромагнитных методов контроля, вихретоковый, может быть успешно использован для инспектирования арматурных стержней, где дефекты, вызванные коррозией металла, как правило, проявляются либо в виде уменьшения диаметра стержня, либо его разрыва. Этот метод использует гармоническое возбуждение тока фиксированной частоты в катушке, что вызывает квазистационарный электромагнитный процесс возникновения вихревых токов в находящемся вблизи контролируемом электропроводящем изделии, который влечет за собой, в частности, изменение комплексного сопротивления (индуктивности и резистивности) самой катушки. Регистрируемое изменение этого сопротивления зависит как от электрофизических и геометрических параметров катушки и контролируемого изделия, так и от дефектов различных форм и

размеров, которые могут быть в этом изделии. Такие дефекты трудно обнаружить с помощью традиционных методов, таких как ультразвуковой, из-за большого затухания ультразвуковой волны в бетоне [1].

Настоящая работа посвящена исследованию на трёхмерной конечно-элементной модели распределения электромагнитного поля, создаваемого вихретоковой катушкой в присутствии ферромагнитного арматурного стержня, при этом сама катушка интегрируется в настраиваемую резонансную электрическую цепь, а доступные для измерения изменяемые параметры которой позволяют оценивать степень коррозии арматурного стержня, в частности, потерю его сечения и разрыв.

Цель работы - доказать принципиальную возможность использования вихретокового метода для контроля качества армирования бетонных конструкций. Для достижения цели предполагалось выбрать базовую конструкцию вихретокового преобразователя, наиболее подходящую для решения задачи, определить информативные параметры контроля; создать трехмерную конечно-элементную модель преобразователя в программе COMSOL Multiphysics; предложить электрическую схему измерительного устройства для регистрации малых изменений параметров индуктивной катушки; предложить способ выявления и оценивания дефектов арматуры железобетонных конструкций, таких как коррозия.

## 1. Объект исследования и параметры модели

Объектом исследования являются отдельные стержневые элементы арматуры класса A-V (A800) (марка стали 23Х2Г2Т с электрической проводимостью 6 МСм / м и магнитной проницаемостью 200), рассмотрены два типовых диаметра стержней – 12 мм и 20 мм. Диаметр 12 мм характерен для армирования плит перекрытий и лёгких балок, а 20 мм применяется в колоннах, ригелях и других массивных несущих элементах [2].

Для изучения влияния коррозии на электрические характеристики системы «катушка – арматурный стержень» использован метод конечных элементов в программе COMSOL Multiphysics (модули Magneticfields и Electrical circuit раздела AC/DC). Рисунок 1 демонстрирует расчётную геометрию: цилиндрический участок стержня заданного диаметра и базовую конструкцию вихретокового преобразователя [3] – прямоугольную многовитковую катушку, расположенную на фиксированном расстоянии от поверхности стального стержня (имитация слоя бетона).

После расчета распределения электромагнитного поля системы (в модуле Magneticfields) определялись доступные для измерения электрическиепараметры измерительной электрической цепи (в модуле Electrical circuit), то есть изменения комплексного сопротивления индуктивной катушки, вызванные наличием вблизи как самой арматуры, так и арматуры с постулированными коррозионными дефектами.

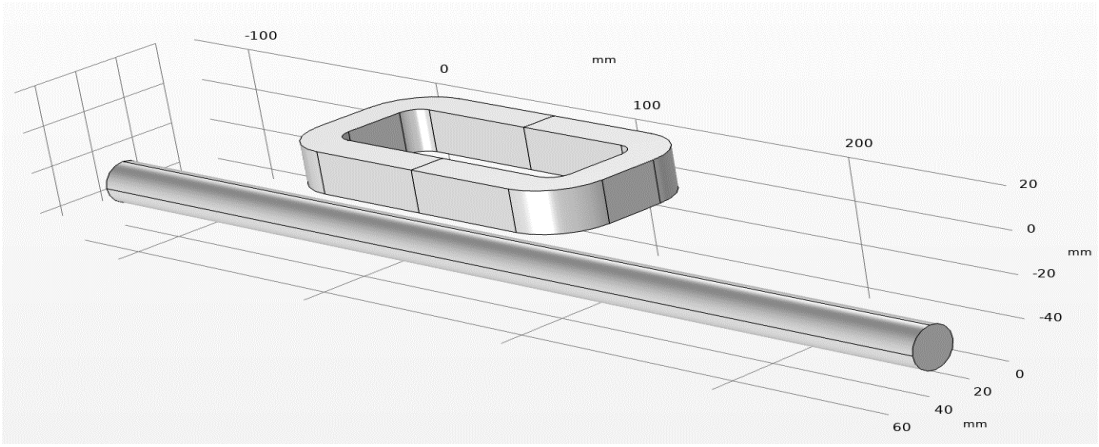



Рис. 1. Геометрия вихретоковой катушки и арматуры

Электрическая цепь представляет собой последовательную RLC схему (рисунок 2). В неё входят: идеальный источник гармонического напряжения Usource с плавной регулировкой частоты и амплитуды; настроечный реостат *R*var = 5 - 100 Ом; многовитковая катушка, описываемая эквивалентным комплексным сопротивлением *R*coil + j*ωL*coil; а также набор конденсаторов емкостью *C*cond = 1 - 20 нФ. В среде COMSOL Multiphysics цепь соединена с терминалами катушки через интерфейс Electrical Circuit – Terminal, что позволяет прямо в численной модели отслеживать изменение комплексного импеданса катушки при различных условиях. Наиболее удобный регистрируемый параметр – напряжение *U*cond на конденсаторе. В расчетах предполагается: емкость *C*cond = 11 нФ; настроечный резистор Rvar = 5 Ом.

Применяя второй закон Кирхгофа к электрической цепи, получаем следующие выражения для комплексных значений входного напряжения в отсутствии контролируемого образца («в воздухе»)

$$\underline{U}_{source} = (R_{coil} + R_{var})\underline{I} + j\left(\omega L_{coil} - \frac{1}{\omega C_{cond}}\right)\underline{I}, \quad (1)$$

Добавляя в схему омические потери $\Delta R_e$ и приращение индуктивности $\Delta L_e$, обусловленные влиянием контролируемого образца, введем эффективные параметры $R_{eff}$ и $L_{eff}$.

$$L_{eff} = L_{coil} + \Delta L_e, R_{eff} = R_{coil} + R_{var} + \Delta R_e \quad (2)$$

С их учетом уравнение (1) принимает вид

$$\underline{U}_{source} = R_{eff}\underline{I} + j\left(\omega L_{eff} + \frac{1}{j\omega C_{cond}}\right)\underline{I}$$

или, раскладывая $L_{eff}$,

$$\underline{U}_{source} = R_{eff}\underline{I} + j\left(\omega L_{coil} - \frac{1}{\omega C_{cond}}\right)\underline{I} + j\omega\Delta L_e\underline{I}. \quad (3)$$

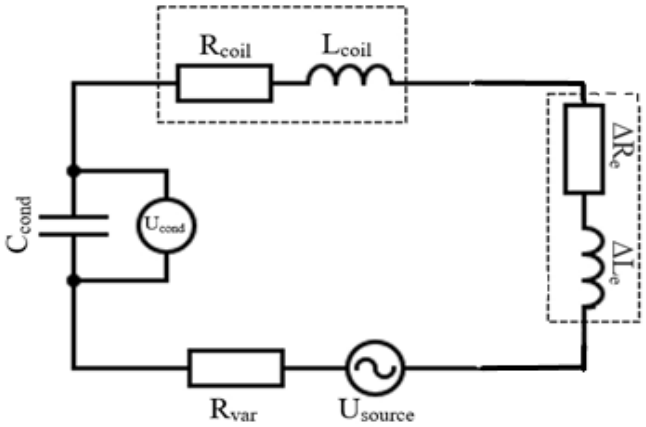



Рис. 2. Эквивалентная измерительная электрическая схема устройства

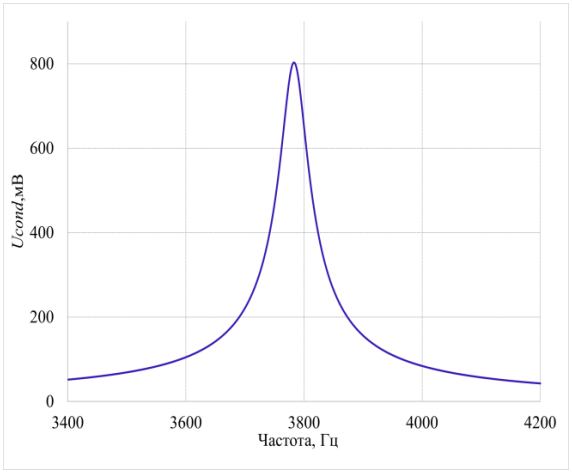



Рис. 3. Частотная характеристика $U_{cond}$; стержень Ø20 мм, расстояние 20 мм

Изменением частоты схема первоначально настраивается так, чтобы выполнялось резонансное условие

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{coil}C_{cond}}}. \tag{4}$$

Напряжение на конденсаторе при резонансной частоте

$$\underline{U_{cond}} = \underline{I} \cdot \frac{1}{j\omega_0 C_{cond}} = -j\frac{\underline{U_{source}}(R_{eff} - j\omega_0 \Delta L_e)}{\omega_0 C_{cond}\left(R_{eff}^2 + (\omega_0 \Delta L_e)^2\right)} \tag{5}$$

На рисунке 3 показана резонансная характеристика измерительной RLC-цепи при работе катушки в воздушной среде (без исследуемого образца). Наблюдается четкий резонансный пик амплитудой около 800 мВ при частоте 3780 Гц. Крутизна резонансной кривой свидетельствует о высокой чувствительности системы: даже незначительное изменение частоты на 1% приводит к снижению амплитуды сигнала на 15 – 20 %. Такие характеристики позволяют уверенно детектировать малые изменения импеданса катушки, возникающие при сканировании корродированной арматуры.

При размещении датчика над контролируемым стержнем частота источника подстраивается до нового резонанса $f_n$, и тогда

$$L_{coil} + \Delta L_e = \frac{1}{(2\pi f_n)^2 C_{cond}} \tag{7}$$

$$(R_{coil} + R_{var} + \Delta R_e) = \frac{\underline{U_{source}}}{2\pi f_n C_{cond} \underline{U_{cond}}} \tag{8}$$

Эти выражения позволяют напрямую вычислить эффективные индуктивность и сопротивление при разных степенях коррозии арматуры и далее использовать их для количественного анализа дефектов.

## 2. Анализ влияния коррозионных дефектов и толщины защитного слоя на параметры вихретокового сигнала

Моделирование в COMSOL Multiphysics позволило исследовать влияние параметров коррозии на вихретоковый отклик. На рисунках 4-7 представлены зависимости эффективной индуктивности ($L_{eff}$) и сопротивления ($R_{eff}$) от трех ключевых факторов: степени утонения сечения с учетом протяженности поврежденного участка ($L_{corr}$), объема корродированного металла, а также от глубины залегания арматуры.

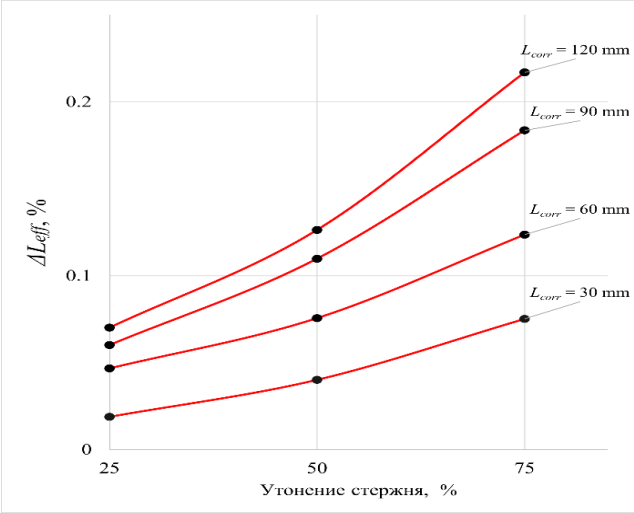



Рис. 4. Зависимость $L_{eff}$ от степени коррозии для стержней диаметром 12 мм

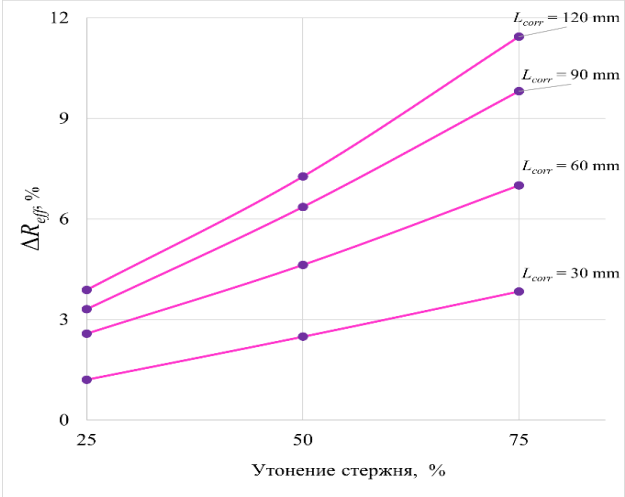



Рис. 5. Зависимость $R_{eff}$ от степени коррозии для стержней диаметром 20 мм

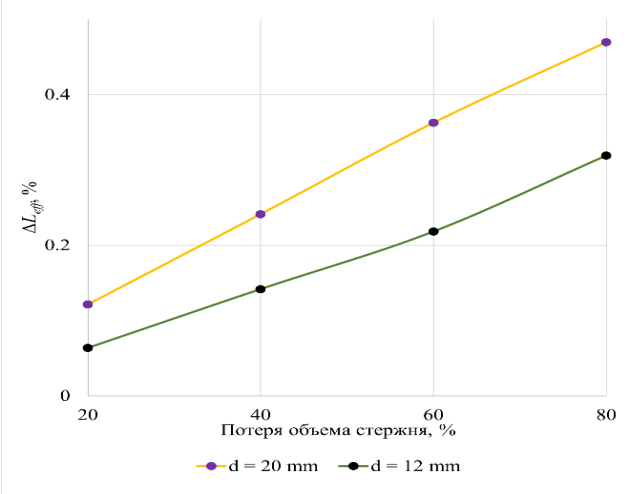



Рис. 6. Влияние объема корродированного металла на значение эффективной индуктивности $L_{eff}$

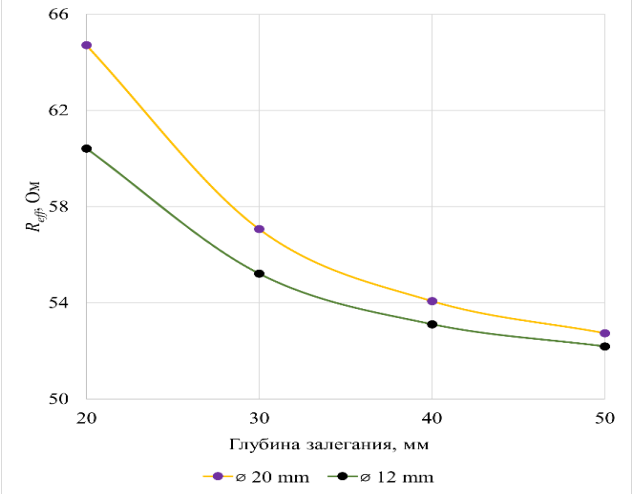



Рис. 7. Влияние глубины залегания арматуры на значение эффективного сопротивления $R_{eff}$

Для обоих диаметров стержней (12 и 20 мм) наблюдаются устойчивые изменения *L*eff при развитии коррозии (см. рис. 4). Эффективная индуктивность демонстрирует выраженную зависимость от объема утраченного металла. Наибольшие изменения отмечаются при протяженности дефектов свыше 60 мм. Аналогичные закономерности прослеживаются и для эффективного сопротивления (рис. 5). $R_{eff}$ реагирует на коррозионные повреждения, причем изменения более выражены при больших значениях $L_{corr}$. Это объясняется интегральным характером омических потерь в системе.Сопоставление данных (рис. 6) подтверждает, что оба контролируемого параметра ведут себя аналогично при изменении объема корродированного металла.

Влияние толщины защитного слоя бетона приведено на рис. 7. С увеличением глубины залегания отмечается закономерное ослабление сигнала, обусловленное уменьшением плотности электромагнитного поля в стальном стержне. Однако даже при значительных толщинах покрытия (до 50 мм) сохраняется возможность детектирования дефектов, что подтверждает перспективность метода для обследования реальных конструкций.

## Заключение

Проведённое исследование подтвердило возможность вихретокового метода для эффективной оценки коррозионного состояния арматуры в железобетонных конструкциях. Моделирование в COMSOL Multiphysics показало, что параметры $R_{eff}$ и $L_{eff}$ чувствительны к изменению сечения стержней даже при значительной глубине их залегания. Метод позволяет не только обнаруживать дефекты, но и количественно оценивать степень повреждения. Комплексный анализ резонансных характеристик и разностного сигнала обеспечивает возможность локализации коррозионных участков.

В дальнейшем планируется разработать надежные алгоритмы анализа данных с учётом влияния реальных условий контроля и провести натурные испытания.

### Список литературы

1. Качанов В.К., Соколов И.В. – Акустический импакт-эхо метод и прибор для диагностики зданий и сооружений из бетона толщиной более 2-х метров: ФГБОУ ВО “НИУ “МЭИ”.- 2018.

2. ГОСТ 22904-93. Конструкции железобетонные. Термины и определения. дата введения 1995-01-01. – https://docs.cntd.ru/document/1200000043 (дата обращения 07.06.2024).

3. Naasson P. de Alcantara Jr., Luiz Gonçalves Jr. Simulation of an ECT Sensor to Inspect the Reinforcement of Concrete Structures: São Paulo State University – Unesp. Department of Electrical Engineering 2015, 6.

Контакты:
bogotovIM@mpei.ru (Боготов Ислам Муратович)
sashashep17ru@gmail.com (Шепелев Александр Константинович)
luninvp@mpei.ru (Лунин Валерий Павлови

УДК 620.179.18

***А. В. БОЛОХОВЦЕВ*[1]**
***ЧЬЕ ЕН УН*[1]**, *д-р техн. наук, проф.*
***Д. Г. КАЛИНОВ*[2]**, *канд. техн. наук*
[1]Тихоокеанский государственный университет (Хабаровск, Россия)
[2]ООО «Тордоки» (Хабаровск, Россия)

# БЕСКОНТАКТНЫЙ ОПТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ УГЛА ЗАКРУЧИВАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ МАТЕРИАЛА ПО СПЕКЛ-ИЗОБРАЖЕНИЮ: ВЛИЯНИЕ ПОГРЕШНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОСИ КРУЧЕНИЯ

**Аннотация.** Рассмотрено применение корреляционного анализа спекл-изображений для бесконтактного оптического контроля крутильной деформации поверхности материала: угол закручивания определяется методом циклической взаимной корреляции сигналов, сформированных по концентрическим окружностям. Исследовано влияние погрешности определения оси кручения: смещение оси порождает систематическое смещение оценки, растущее быстрее линейного, при слабом росте случайной составляющей. Ось определяется по самим изображениям – совместной минимизацией рассогласования, опорного и повёрнутого кадров по координатам оси и углу с погрешностью ~0,001 пикселя, что удерживает систематическое смещение на уровне ~0,0002°. Достигнутая погрешность случайной составляющей $\sigma_{max} \approx 0{,}003°$ соответствует уровню прецизионного оптического контроля на штатной КМОП камере без когерентного источника.

**Ключевые слова:** неразрушающий контроль, оптический контроль, крутильная деформация, угол закручивания, спекл-паттерн, циклическая взаимная корреляция, ось кручения, систематическая погрешность, определение оси кручения.

## 1. Введение

Контроль напряжённо-деформированного состояния материалов и элементов, работающих на кручение, – типичная задача технической диагностики и неразрушающего контроля (НК) [1, 2]. Угол закручивания нагруженного участка однозначно связан со сдвиговой деформацией и касательными напряжениями его поверхности, то есть отражает крутильное напряжённо-деформированное состояние объекта – измеряемый параметр в задачах диагностики. При малых углах контактная тензометрия даёт удовлетворительные результаты при низком отношении сигнал/шум, поэтому предпочтительны бесконтактные оптические методы, регламентируемые стандартами оптического НК [3].

Один из таких подходов – корреляционный анализ спекл-изображений: поверхность с текстурой регистрируется до и под нагрузкой, а угол закручивания находят по максимуму циклической взаимной корреляции одномерных сигналов, формируемых вдоль концентрических окружностей вокруг оси кручения [4, 5]. На результат влияет не только алгоритм формирования сигнала, но и, погрешность привязки оси кручения, которая напрямую переносится в оценку угла.

Погрешность привязки оси кручения неизбежна из-за конечной точности установки образца и определения оси. В двумерном (полевом) методе цифровой корреляции изображений (Digital Image Correlation, DIC) исследовались устойчивость к большим поворотам и влияние начального приближения на сходимость [6, 7], однако ось (центр) вращения там не является параметром метода. В корреляционных же методах на основе выборки вдоль концентрических окружностей центр задаётся явно, и погрешность определения его местоположения напрямую искажает формируемый сигнал. При этом количественный анализ погрешности влияния этого эффекта для одномерных методов отсутствует.

Цель работы – количественно оценить влияние погрешности определения оси кручения на погрешность измерения угла закручивания и предложить способ её минимизации.

## 2. Измерительная система и метод

***Метод измерения.*** Метод основан на формировании одномерных угловых сигналов f(θ) и g(θ) вдоль окружности радиуса R вокруг оси кручения из двух спекл-изображений поверхности – исходного (ненагруженного) и деформированного (под крутящей нагрузкой). Угол закручивания оценивается по положению максимума их циклической взаимной корреляции

$$C[k] = \sum_{n=0}^{N-1} \quad f[n]g[(n+k) mod N], \varphi = \frac{k^*}{N} \cdot 360^\circ \qquad (1)$$

где $k^*$ – номер отсчёта, при котором циклическая корреляция $C[k]$ максимальна; $N$ – число отсчётов; φ – оценка угла закручивания.

Положение максимума корреляционной функции $C[k]$ уточняется до дробного значения квадратичной аппроксимации пика в окрестности ±7 отсчётов; интенсивность в точках с дробными координатами вычисляется билинейной интерполяцией по четырём соседним пикселям (субпиксельное разрешение при малых затратах).

При кручении поперечное сечение поворачивается как жёсткий диск на угол закручивания $\varphi$; именно этот угол измеряется по спекл-изображению – независимо от радиальной неоднородности сдвига, которая проявляется лишь как осевой градиент $d\varphi/dz$ ($z$ – координата вдоль оси). Тем самым измеренный угол $\varphi$ несёт информацию о напряжённо-деформированном состоянии участка: при рабочей длине $L$ сдвиговая деформация поверхности на радиусе $r$ от оси равна $\gamma = r \cdot \varphi/L$, а касательное напряжение $\tau = G \cdot \gamma$ ($G$ – модуль сдвига). Поэтому достижимая погрешность определения $\varphi$ задаёт чувствительность контроля по деформации и напряжению и определяется рассматриваемой ниже точностью привязки оси кручения.

***Оптическая установка.*** Регистрация выполнялась компактной оптической установкой (КОУ, рис. 1) из короткофокусного объектива, КМОП-

матрицы UM012C 2592×1944 пикс. [8] и кольцевой подсветки. Изображения приводились к градациям серого.

Рис. 1. Внешний вид компактной оптической установки (КОУ)

***Условия эксперимента.*** Контролируемая поверхность несёт случайную текстуру – частицы графита (50 – 100 мкм) на матовом фоне, зафиксированные нитролаком (спекл-подобный паттерн в смысле DIC, а не лазерный спекл). Для каждого из 36 углов формировалось по 99 пар «опорный кадр – повёрнутый». Опорный и повёрнутый – это два независимых реальных снимка неподвижной мишени, один из которых повёрнут программно (аффинным преобразованием вокруг заданной оси), поэтому случайная составляющая $\sigma_{max}$ отражает независимый шум КМОП-матрицы [8], а не коррелированный. Диапазон углов закручивания φ = 0,333°– 350,333° с шагом 10°; начальное смещение 0,333° уводит от точного совпадения с пиксельной сеткой и от тривиального нуля. Ось вращения предварительно находилась итерационным перебором координат с минимизацией суммы квадратов разностей интенсивностей опорного и повёрнутого кадров (погрешность привязки ~ 0,001 пикселя). Показатели погрешности – максимальные по диапазону СКО $\sigma_{max}$ (случайная составляющая) и смещение среднего $\Delta X_{max}$ (систематическая).

## 3. Влияние погрешности определения оси кручения

***Геометрическая модель.*** Пусть истинная ось кручения проходит через точку O, а используемая в алгоритме смещена относительно неё на вектор $S$ (модуль $S$, направление $\alpha_S$). При закручивании на угол φ точка P на расстоянии r от O переходит в P′, также удалённую на $r$; окружность радиуса $R$ с центром в смещённой оси проходит через P лишь приближённо, с отклонением порядка $S$. Для выборки вдоль такой окружности локальная фаза сигнала смещается на

$$\Delta\varphi \approx \frac{S\sin(\alpha-\alpha_S)}{R} \text{ [рад]} \qquad (2)$$

Локальный сдвиг зависит от углового положения точки на окружности; его амплитуда – порядка $S/R$ (при $R$ = 116 и $S$ = 1 пиксель $S/R$ = 0,49°). После усреднения по окружности результирующее систематическое смещение оценки

остаётся того же порядка, $\Delta X_{max} \sim S/R$. Точная форма зависимости $\Delta X_{max}(S)$ определяется угловым откликом конкретного спекл-паттерна и здесь не выводится.

Эксперимент (п. 3.2) согласуется с этой оценкой по порядку: $\Delta X_{max} \approx 0{,}5°$ при $S = 1$ пикселя (совпадает с $S/R$) и приблизительно 1,5° при $S = 2$; при малых $S$ (< 0,1 пикселя) смещение ограничено снизу алгоритмическим полом ~0,02°, а при больших $S$ превышает линейную оценку $S/R$. Случайная составляющая $\sigma_{max}$ реагирует на $S$ существенно слабее.

***Экспериментальное исследование.*** Смещение $S$ вводилось как намеренная ошибка координат оси кручения при вычислении сигнала; диапазон $S$ = 0,01–2,0 пикселя, для каждого $S$ по 99 парам × 36 углам вычислялись $\sigma_{max}$ и $\Delta X_{max}$ (рис. 2). Радиус анализа фиксирован ($R$ = 116 пикселей): согласно $\Delta X_{max} \sim S/R$, увеличение R снижает чувствительность к погрешности оси, но усиливает декорреляцию; зависимость показателей от R составляет предмет отдельного исследования.

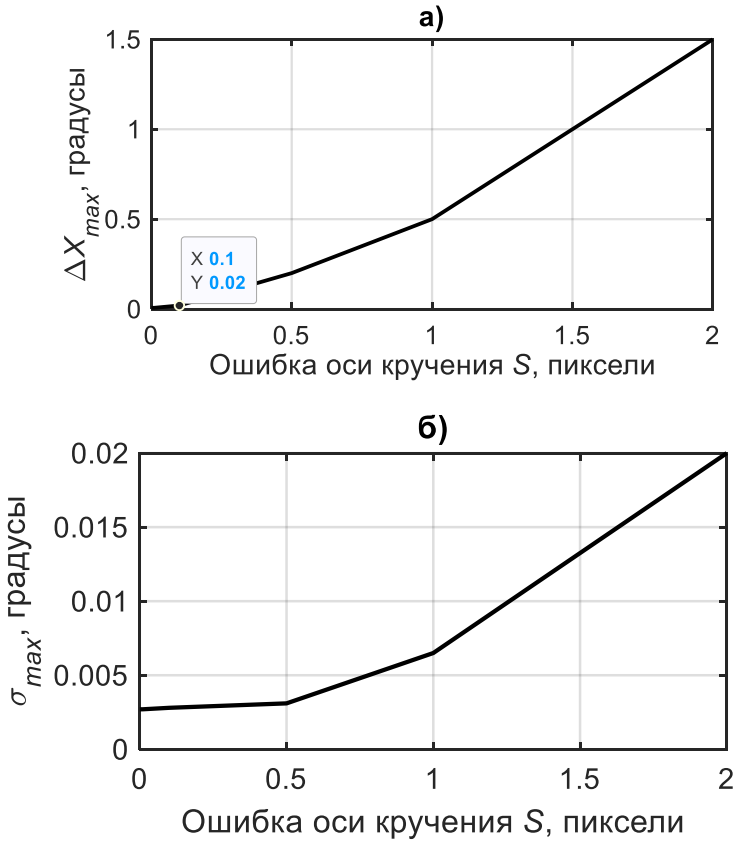



Рис. 2. Зависимость показателей погрешности от ошибки определения оси кручения: а) – систематическая составляющая; б) – случайная составляющая

При $S$ < 0,1 пикселя погрешность определяется алгоритмом ($\sigma_{max} \approx 0{,}003°$, $\Delta X_{max} \approx 0{,}02°$). С ростом $S$ систематическая составляющая быстро доминирует: при $S = 1$ пикселя $\Delta X_{max} \approx 0{,}5°$ – почти на два порядка выше $\sigma_{max} \approx 0{,}0065°$, при $S = 2$ – ≈ 1,5°; $\sigma_{max}$ растёт медленнее, от 0,003° до 0,02°. Таким образом, ошибка

привязки оси проявляется прежде всего как систематическое смещение, устранимое точным определением оси.

***Определение оси кручения.*** Ось кручения определяется по самим изображениям – совместной минимизацией суммы квадратов разностей интенсивностей опорного и повёрнутого кадров по координатам оси и углу поворота. Достигаемая точность привязки ~ 0,001 пикселя удерживает систематическое смещение на уровне ~ 0,0002° – значительно ниже случайной составляющей $\sigma_{max} \approx 0{,}003°$, то есть метод работает в алгоритмически-ограниченном режиме. Следует оговорить: это значение получено в идеализированном вычислительном эксперименте, где прямая (аффинный поворот) и обратная (минимизация SSD) модели тождественны; на реальной нагрузке декорреляция спекла, расфокус и перспектива при рабочем расстоянии 2,5 см, собственно сдвиговая деформация поверхности и неравномерность подсветки ухудшат привязку оси, поэтому ~ 0,001 пикселя следует считать верхней оценкой возможностей метода.

Дрейф оси во времени (тепловые расширения, вибрации) обесценивает однократно найденную ось. Поскольку определение оси не требует эталонов, его можно повторять на каждом измерении – тогда ось остаётся актуальной и дрейф не влияет ценой дополнительных вычислений. Если же ось фиксируют ради быстродействия, требуется механическая или термическая стабильность оптического модуля.

## 4. Обсуждение

Выделены два режима контроля по доминирующему источнику погрешности: алгоритмически ограниченный: $S < 0{,}1$ пикселя; погрешность задаётся алгоритмом и структурой паттерна ($\sigma_{max} \approx 0{,}003°$, $\Delta X_{max} \approx 0{,}02°$); ограниченный привязкой оси: $S > 0{,}1$ пикселя – доминирует смещение $X_{max}$; улучшение алгоритма не помогает – ось нужно определить точнее или повторить её поиск при дрейфе.

Достижение режима А требует лишь точной привязки оси кручения – условия, не зависящего от алгоритма формирования сигнала и обеспечиваемого самим определением оси по изображениям.

Сравнение с опубликованными методами носит ориентировочный характер из-за разных постановок задач и тестовых данных. Прецизионные когерентно-оптические методы точнее: голографическая микроскопия [9] даёт ≈ 0,0001°, но требует лазера и виброзащиты. Прикладные методы грубее: 1D - фазовая корреляция с радон-преобразованием [10] – ошибка ≈ 0,05–0,2° (в среднем ~0,11°), двухмасштабная кольцевая проекция [11] – до 0,05°, оценка поворота по признакам (HOG) [12] – ~ 1–1,6°.

## 5. Заключение

1. Метод обеспечивает бесконтактное определение угла закручивания поверхности со случайной составляющей $\sigma_{max} \approx 0{,}003°$ на штатной КМОП-камере без когерентного источника. Для двухсеченной схемы (база $L = 50$ мм) этому соответствовало бы разрешение $\sim 1 \cdot 10^{-5}$ по сдвиговой деформации и ~1 МПа по напряжению (сталь); реализация такой схемы и выявление дефектов по аномалиям угла – предмет дальнейшей работы.

2. Погрешность $S$ привязки оси кручения даёт систематическое смещение, растущее быстрее линейного ($\approx 0{,}5°$ при $S = 1$ пиксель, порядка $S/R$), тогда как $\sigma_{max}$ к $S$ малочувствительна. Поскольку ось определяется по самим изображениям с точностью ~0,001 пикселя, это смещение остаётся пренебрежимым (~0,0002°).

## Список литературы


1. Любутин П. С., Панин С. В., Титков В. В. и др. Развитие метода корреляции цифровых изображений для изучения процессов деформации и разрушения конструкционных материалов // Вестник науки Сибири. 2020. № 1(36). С. 13–52.

2. Niezrecki C., Baqersad J., Sabato A. Digital image correlation techniques for non-destructive evaluation and structural health monitoring // Handbook of Advanced Non-Destructive Evaluation. Cham: Springer, 2019. P. 1545–1590.

3. ГОСТ Р 58399–2019. Контроль неразрушающий. Методы оптические. Общие требования. М.: Стандартинформ, 2019. 12 с.

4. Tsai D.-M., Tsai Y.-H. Rotation-invariant pattern matching with color ring-projection // Pattern Recognition. 2002. Vol. 35, No. 1. P. 131–141.

5. Zhang L., Lin S. Z. Rotated image matching and correction method based on improved circular projection // Applied Mechanics and Materials. 2013. Vol. 401–403. P. 1484–1488.

6. Zhong F., Quan C. Digital image correlation in polar coordinate robust to a large rotation // Optics and Lasers in Engineering. 2017. Vol. 98. P. 153–158.

7. Wu R., Qian H., Zhang D. Robust full-field measurement considering rotation using digital image correlation // Measurement Science and Technology. 2016. Vol. 27, No. 10. P. 105002.

8. Болоховцев А. В., Калинов Г. А., Чье Е. У. Исследование шумовой составляющей сигнала КМОП-матрицы // Датчики и системы. 2025. № 283. С. 56–61.

9. Wu Y., Cheng H., Wen Y. High-precision rotation angle measurement method based on a lensless digital holographic microscope // Applied Optics. 2018. Vol. 57, No. 1. P. 112–118.

10. Fujisawa T., Ikehara M. High-accuracy image rotation and scale estimation using Radon transform and sub-pixel shift estimation // IEEE Access. 2019. Vol. 7. P. 22719–22728.

11. Xie P., Lu Z.-R., Lin G. et al. A ring-projection-based two-scale approach for accurate digital image correlation of large translations and rotations // Experimental Mechanics. 2024. Vol. 64. P. 875–893.

12. Bratanič B., Pernuš F., Likar B., Tomaževič D. Real-time rotation estimation using histograms of oriented gradients // PLoS ONE. 2014. Vol. 9, No. 3. P. e92137.



Контакты:
chev_@mail.ru (Болоховцев Антон Васильевич);
000487@togudv.ru (Чье Ен Ун);
kalinov.d.g@gmail.com (Калинов Денис Геннадьевич).

УДК 621.18.004

***К. В. БРУЦКИЙ-СТЕМПКОВСКИЙ***
Филиал «Могилевские тепловые сети» РУП «Могилевэнерго» (МТС) (Могилев, Беларусь)

# ОСОБЕННОСТИ КОНТРОЛЯ ВНУТРИ БАРАБАННЫХ УСТРОЙСТВ ПАРОВЫХ КОТЛОВ ТП-35

**Аннотация.** В статье кратко изложен процесс парообразования и пароотделения в барабанах паровых котлов ТП-35, выпускавшихся в 1950-1970 годах на котельных заводах СССР. Приведены их характеристики, компоновка, этапы хода воды через котел и преобразования её в перегретый пар. Основной целью статьи является ознакомить читателя с условиями эксплуатации оборудования, элементами внутри барабанных устройств наиболее подверженных коррозионному износу и требующих дополнительного внимания со стороны дефектоскопистов. На основании производственного опыта контроля данного оборудования предложен на рассмотрение период замены внутри барабанных питательных труб через 15 лет эксплуатации без вывода котла из работы для обследования их технического состояния.

**Ключевые слова:** дефект, паровой котел, коллектор, коррозия, насыщенный пар, пароотделение, парообразование, перегретый пар, сепарация, техническое диагностирование, эксплуатация.

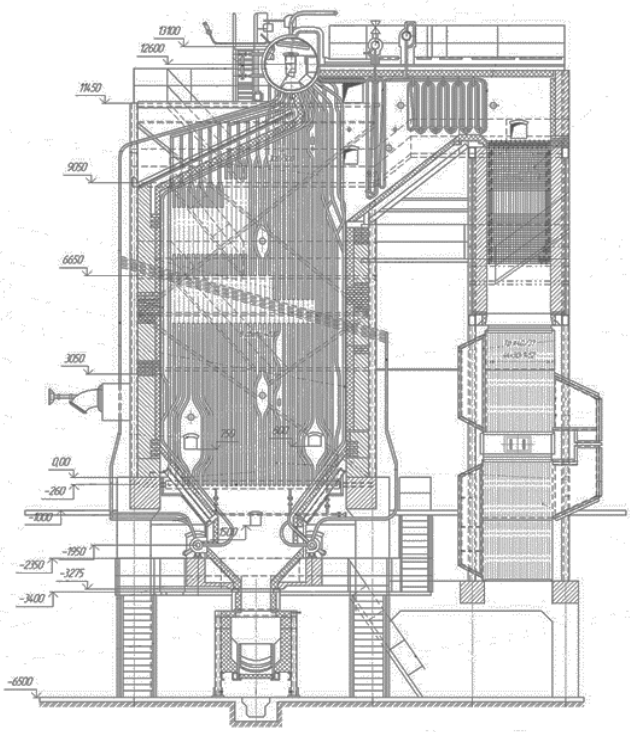
Паровые котлы типа ТП-35 (рис.1) выполненные по П-образной схеме для сжигания бурого угля и фрезерного торфа выпускались в 1950-1970-ых г. Таганрогским, Барнаульским, Подольским и Белгородским котельными заводами СССР. Котлы данного типа до сих пор применяются в энергетике на станциях среднего давления, которые после нескольких плановых этапов модернизации и реконструкции с начала были переведены на сжигание мазута (70-80х г.), а в дальнейшем природного газа (85-95х г.).

Паровой котел ТП-35 – однобарабанный, вертикально-водотрубный, с естественной циркуляцией, выполненный по П-образной схеме компоновки поверхностей нагрева, двухходовой по движению продуктов сгорания [3]. Оснащен 4-я горелками типа ГМ-10 по 2 на левый и правый боковые экраны. Каркас котла рассчитан на сейсмичность 6 баллов. При сейсмичности 7 баллов на каркасе ставятся дополнительные усилия. Обмуровка котла тяжелая [5].

Котлы снабжаются системой автоматического регулирования уровня воды в барабане котла, температуры перегретого пара, а также производительности котла в зависимости от потребляемой нагрузки [2].

Питательная вода котла температурой 145°С, отбираемая из питательных магистралей, проходит 2 ступени нагрева через водяной экономайзер Ø32х4 мм и собирается в верхнем коллекторе водяного экономайзера Ø273х24 мм. При этом температура питательной воды составляет уже 200-240°С, далее через питательный трубопровод Ø83х4 мм вода подводится на высоту барабана со стороны фронта котла. В обечайке барабана котла есть проходные штуцеры Ø70 мм, в которые вварены два ряда труб Ø60х4 мм по 4 штуки в каждом.

Через эти горизонтально расположенные трубы питательная вода и попадает в барабан котла (рис. 2) [6].



Параметры котла ТП-35:
Паропроизводительность – 35 т/ч, Расчетное рабочее давление – 3,9 МПа, Температура пара в барабане – 250°С, Температура пара на выходе – 435°С, Температура пит.воды – 145°С, Температура горячего воздуха – 380°С, Температура дымовых газов – 190°С, КПД котла – 91% (на газу), Способ сжигания топлива – камерный, Топливо – газ (мазут).

Рис. 1. Паровой котел ТП-35 общий вид

Рис. 2. Внутри барабанные питательные трубы Ø60х4 мм (сталь 20) котла ТП-35 (“А”) (после демонтажа сепарационных устройств)

Потом собираясь в сборном коллекторе (см. справа вверху на рис.2) вода через выходящий плавник распыляется в паровом объеме барабана котла. Барабан котла сделан из обечайки Ø1600х52 мм и двух днищ (сталь 22К). В барабане происходит две стадии: парообразование и пароотделение. Парообразование - свойство капельных жидкостей изменять своё агрегатное состояние и превращаться в пар. Пароотделение – отделение пузырьков пара от поверхности воды и его отвод из барабана в пароперепускные трубы Ø38х4 мм, при этом уровень воды в барабане должен оставаться неизменным. Проходя через пароперепускные трубы, насыщенный пар проходит 2 ступени пароперегревателя Ø38х4 и Ø42х3,5 мм, где его температура поднимается сначала до 350°С, а потом до 435°С (при давлении 3,9 МПа) [6]. Такой пар называется перегретым и по своим ключевым свойствам является абсолютно сухим. Именно такой пар подается на турбоагрегаты для последующей выработки электроэнергии. Перегретый пар не имеет мелких капель воды, присутствие которых могло бы повредить лопатки турбины на большой скорости [1].

Существенное влияние на надежность работы котла оказывает процесс кипения, под которым понимают процесс образования пара внутри объема жидкости. Условия кипения воды в котлах сложны и своеобразны [4].

Внутри барабанные питательные трубы котла ТП-35 конструктивно расположены ниже границы раздела сред вода/пар в водяном объеме, а гибы проходят через границу сред и выходят в паровой объём. На основании производственного опыта и практики контроля металла барабанов котлов типа ТП-35 можно сделать вывод, что данные трубы испытывают наибольшие коррозионно-эрозионные повреждения. Наиболее частыми видами повреждений таких труб являются утонение стенок труб и свищи на границе сварных соединений и основного металла в нижней половине трубы (рис.3).

Свищ – недопустимый дефект, выявляемый визуальным методом контроля, представляющий собой сквозное повреждение металла округлой формы. Данный дефект нарушает герметичность оборудования под давлением и требует незамедлительного ремонта. Технически правильным и надежным способом ремонта трубы с таким типом дефекта является вырезка поврежденного участка трубы с последующей вставкой и контролем стыковых сварных соединений неразрушающими методами контроля [7].

Несмотря на то, что дефекты типа свищей являются недопустимыми согласно «Правил по безопасной эксплуатации оборудования работающего под избыточным давлением», утв. Постановлением МЧС РБ от 27.12.2022, в данном случае они не оказывают какое-либо влияние на безопасную эксплуатацию котла, так как расположены уже в водяном объеме барабана котла. Через свищи питательная вода оказывается несколько раньше в барабане и как было сказано ранее минует процесс распыления на плавнике. Только при больших повреждениях питательных труб это может оказывать незначительное влияние на равномерность процесса парообразования. Также повреждения таких труб не

регистрируются приборами КИПиА и не вызывают значительные изменения параметров рабочих сред котла.

Рис. 3. Свищи, выявленные при контроле металла котла ТП-35 (“Б”) во время капитального ремонта (15 лет эксплуатации)

В результате проведения ультразвуковой толщинометрии в период технических диагностирований и капитальных ремонтов котлов ТП-35, наименьшая толщина внутри барабанных труб наблюдается в нижней половине трубы, расположенной в водяном объёме. Так за период эксплуатации котла 5 лет или ≈40 000 тыс.часов с учетом плановых остановов и текущих ремонтов, может наблюдаться уменьшение толщины стенки питательных внутри барабанных труб Ø60х4 мм на ≈15-25%. А за следующий пятилетний период эксплуатации на ≈35-45%, еще через 5 лет на ≈55-65% и далее до сквозного повреждения (рис. 4).

Причинами образования таких дефектов являются: тяжелые условия эксплуатации труб при расположении через границу раздела сред вода/пар; разная температура сред – внутри вода температурой 200-240°С (при Р≤5 МПа), а снаружи пароводяная смесь температурой 250°С (при Р=3,9 МПа); высокий коррозионно-эрозионный износ за счет движения потоков среды.

Предложенные способы снижения износа внутри барабанных питательных труб: строгое соблюдение водно-химического режима котла, а лучше ужесточение требований по составу котловой воды (минералы и соли, растворенные в воде, могут действовать как абразив); увеличение номинальной толщины стенки внутри барабанных питательных труб до 5-6 мм (при оценке на перспективу позволяет отложить их замену, тем самым сэкономить материальные и человеческие ресурсы в следующие капитальные ремонты).

Рис. 4. Сквозное повреждение внутри барабанной трубы выявленное при контроле металла котла ТП-35 (“В”) во время кап. ремонта при наработке 25 лет

Таким образом, можно сделать вывод, что внутри барабанные питательные трубы Ø60х4 мм (8 шт., сталь 20), отработав 15 лет, требуют замены, чтобы значительное утонение стенки и появляющиеся крупные дефекты (свищи) не нарушали процесс парообразования, заложенный проектировщиками. При этом в ходе каждого третьего капитального ремонта котла ТП-35 (~ одного раза в 15 лет) рекомендуется планировать замену данных труб без предварительного вывода котла из работы, демонтажа сепарационных устройств, перегородок соленых отсеков и обследования технического состояния данных труб.

**Список литературы**

1. Бойко Е.А. Котельные установки и парогенераторы, Красноярск, 2005. – 264 с.
2. Киселев Н.А. Котельные установки, Москва, 1979. – 192 с.
3. Мейкляр М.В. Паровые котлы с естественной циркуляцией, Москва, 1955. – 43 с.
4. Соколов Б.А. Котельные установки и их эксплуатация, Издательский центр “Академия”, 2005. – 18 с.
5. Типовой паспорт котла ТП-35,1953. – 12 с.
6. Типовое руководство по эксплуатации котла ТП-35, 1953. – 19 с.
7. Шастин В.Н. Справочник по ремонту котлов вспомогательного и котельного оборудования, Москва 1981. – 173 с.

Контакты:
kirillmrorangeonly@yadex.by (Бруцкий-Стемпковский Кирилл Владимирович)

УДК620.179.14

***В. А. БУРАК**, канд. техн. наук, доц.*
***В. Н. КУЛАГИН***
***А. А. ОСИПОВ**, канд. техн. наук*
Институт прикладной физики НАН Беларуси (Минск, Беларусь)

# ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДЛЯ КОНТРОЛЯ СТАЛЕЙ 10ХСНД И 15ХН5МФ МНОГОПАРАМЕТРОВОГО МЕТОДА

**Аннотация:** Рассмотрена возможность контроля сталей 10ХСНД и 15ХН5МФ многопараметровым методом с использованием магнитных параметров. Проведена оценка достоверности контроля.

**Ключевые слова:** многопараметровый контроль, магнитные параметры, множественный коэффициент корреляции, остаточная дисперсия, температура отпуска, приведенная погрешность

Надежность используемого оборудования и выпускаемых промышленными предприятиями изделий зависит от качества применяемых в производстве сталей. Для обеспечения достаточного уровня качества необходимо всестороннее изучение особенностей используемых материалов, что можно достигнуть при использовании достаточно большого числа параметров неразрушающего контроля.

Причем индивидуальные характеристики материалов по ряду свойств (механические, магнитные и т. д.) могут существенно различаться не только между разными сталями, но и партиями, изготовленными на одном и том же промышленном предприятии.

Рассмотрим возможности многопараметрового контроля на примере сталей 10ХСНД и 15ХН5МФ.

В простейших случаях в таких задачах достаточно использовать линейные уравнения вида

$$y = b_0 + \sum_{j=1}^{p} \left(b_j x_j\right) \qquad (1)$$

где $b_j$ – коэффициенты многопараметровой модели, $y$ – зависимые переменные модели, $x_j$– независимые переменные данной многопараметровой модели.

Из (1), если для упрощения использовать только мультипликативные погрешности независимых переменных $\delta_j$, следует уравнение для мультипликативной погрешности $\delta_y$ зависимой переменной [1, 2]

$$\delta_y = \sum_{j=1}^{p} \left(b_j x_j / y\right)\delta_j = \sum_{j=1}^{p} K_j \delta_j \qquad (2)$$

где $K_j$– коэффициенты значимости мультипликативных ошибок $\delta_j$ независимых переменных. Использование выражений (1) и (2) приводится в работе [3].

Воспользуемся для обеих сталей 10*ХСНД* (температура закалки $T_з$ = 950 °С, температура отпуска $T_о$ от 20 °С до 800 °С, количество измерений 17) и 15*ХН*5*МФ* (температура закалки $T_з$ = 900 °С, температура отпуска $T_о$ от 20 °С до 850 °С, количество измерений 19) известными экспериментальными данными из монографии [4].

Используемые в [4] независимые переменные для данных сталей одинаковые:

– коэрцитивная сила $H_c$;

– намагниченность насыщения $M_s$;

– остаточная намагниченность $M_r$;

– начальная восприимчивость $\chi_н$;

– максимальная проницаемость $\mu_{max}$.

Зависимой переменой для каждой из стали является температура отпуска $T_о$ (твердость в [4] не приводится).

В качестве дополнительных независимых переменных использовались три обратные значения исходных: $1/H_c$; $1/M_r$ и $1/\chi_н$, то есть суммарно восемь независимых переменных. Строились две модели по температуре отпуска для двух сталей.

При использовании стандартного множественного регрессионного анализа получаем значения:

– для стали 10ХСНД: множественный коэффициент корреляции $R$ = 0,99788, по $F$ – критерию Фишера 235, остаточная дисперсия $S_{ост}$= 23;

– для стали 15ХН5МФ: множественный коэффициент корреляции $R$ = 0.996779, по $F$ – критерию Фишера 193, остаточная дисперсия $S_{ост}$= 28.

Еще одним параметром, который характеризует точность восстановления является приведенная погрешность γ, которая для множественного коэффициента корреляции при $R$ > 0,9 имеет вид [5]:

$$\gamma = ((1-R^2)/3)^{0,5}. \qquad (3)$$

Значения погрешности γ для этих сталей, соответственно, равны 3,8 % и 4,6 %.

Однако, согласно (2), максимальные коэффициенты значимости $K_j$ мультипликативных ошибок $\delta_j$ независимых переменных превышают не только десятки, но и сотни (133 и 341, соответственно). Повторные измерения и имитирующие их расчеты будут приводить к существенному колебанию результатов в зависимости от случайного распределения ошибок измерения независимых переменных (десятки процентов и более).

Нельзя исключать, что при подобном выборе независимых переменных, возможна существенная компенсация погрешностей в (2), но в данном случае такой вариант не подтверждается при расчетах (приводится для температуры отпуска равной 20 °С)

$$\delta_{у_10ХСНД} = -30.2\cdot\delta_{Hc} + 133.2\cdot\delta_{Ms} + 16.3\cdot\delta_{Mr} + 1.6686\cdot\delta_{\chi н} + 1.487\cdot\delta_{\mu max} - $$
$$-0.0674\cdot\delta_{Hc} - 25.31\cdot\delta_{Mr} + 17.28\cdot\delta_{\chi н} \qquad (4)$$

$$\delta_{y_15XH5МФ} = -72.9904\cdot\delta_{Hc} - 341.4\cdot\delta_{Ms} + 6.7279\cdot\delta_{Mr} + 20.44\cdot\delta_{\chi н} + \\ + 4.693\cdot\mu_{max} + 4.50\cdot\delta_{Hc} - 15.70\cdot\delta_{Mr} - 42.85\cdot\delta_{\chi н} \quad (5)$$

Из выражений (4) и (5) видно, что частичная компенсация (больше 10 %) возможна для остаточной намагниченности $M_r$ и начальной магнитной проницаемости $\delta_{\chi н}$.

Если такого уровня достоверности контроля недостаточно в данном конкретном случае, то для увеличения надежности восстановления зависимых переменных при создании многопараметровой модели вводят в нее погрешность [1, 2].

Тогда, при введении в модель множественного регрессионного анализа погрешности для всех независимых переменных равной 1 %, получаем следующие значения:

– для стали 10*ХСНД*: множественный коэффициент корреляции $R$ = 0.997444, по $F$ – критерию Фишера 195, остаточная дисперсия $S_{ост}$= 25, приведенная погрешность $\gamma$= 4,1 %;

– для стали 15*ХН*5*МФ*: множественный коэффициент корреляции $R$= 0.992529, по $F$ – критерию Фишера 87.7, остаточная дисперсия $S_{ост}$= 40, приведенная погрешность $\gamma$ = 7 %.

Максимальные коэффициенты значимости $K_j$ мультипликативных ошибок $\delta_j$ независимых переменных из (2) равны 24,6 и 259, соответственно. То есть ниже, чем без введения погрешности в модель.

Причем имеются значительные различия между сталями (для температуры отпуска 20 °С): если для стали 10*ХСНД* максимальный коэффициент значимости по абсолютному значению уменьшается в несколько раз, то для стали 15ХН5МФ он уменьшается на несколько десятков процентов

$$\delta_{y_10XСНД} = -24.59\cdot\delta_{Hc} + 8.72\cdot\delta_{Ms} + 11.62\cdot\delta_{Mr} + 7.932\cdot\delta_{\chi н} + 1.861\cdot\delta_{\mu max} - \\ - 0.592\cdot\delta_{Hc} - 19.5887\cdot\delta_{Mr} + 7.18\cdot\delta_{\chi н} \quad (6)$$

$$\delta_{y_15XH5МФ} = -51.59\cdot\delta_{Hc} - 259.47\cdot\delta_{Ms} + 70.69\cdot\delta_{Mr} + 7.84\cdot\delta_{\chi н} - \\ - 21.8\cdot\mu_{max} - 9.422\cdot\delta_{Hc} - 51.02\cdot\delta_{Mr} + 8.897\cdot\delta_{\chi н} \quad (7)$$

Из выражений (6) и (7) видно, что частичная компенсация (больше 10 %) возможна только для остаточной намагниченности $M_r$.

Важным параметром для оценки уровня точности восстановления зависимых переменных является сумма модулей коэффициентов значимости $|K_j|$ (82 и 481 для этих сталей, соответственно). Данный параметр обеспечивает объективную и быструю оценку надежности модели и величину ее максимальной погрешности при расчетах. Понятно, что более точно максимальную погрешность модели $\delta_{y_макс}$ следует считать по выражению аналогичному (2)

$$\delta_{y_макс} = \sum_{j=1}^{p} \left| \left(\frac{b_j x_j}{y}\right) \delta_j \right| = \sum_{j=1}^{p} |K_j \delta_j|. \quad (8)$$

Выражение (8) применимо во всем диапазоне изменения температуры отпуска рассматриваемых сталей, однако предполагает наличие достоверных значений погрешностей $\delta_j$ для всех независимых переменных $x_j$.

Дальнейшее увеличение точности восстановления зависимых переменных возможно при увеличении сложности независимых переменных моделей (случай без введения погрешности в модели при их создании), например:

– для стали 10ХСНД: $H_c^{-1}\cdot M_r^{-1}$; $H_c\cdot\chi_н$; $H_c^2$; $H_c\cdot M_r$; $H_c\cdot M_s$; $\mu_{max}^2$; $\mu_{max}$; $H_c$ (независимые переменные), множественный коэффициент корреляции $R$= 0.999715, $F$-критерий Фишера 1751, остаточная дисперсия $S_{ост}$= 8.3, приведенная погрешность γ = 1.4 %;

– для стали 15*ХН*5*МФ*: $H_c\cdot M_s$; $H_c^{-1}\cdot\chi_н$; $M_r\cdot\chi_н$; $M_r^2$; $H_c\cdot M_r^{-1}$; $H_c^{\ 2}$; $H_c\cdot M_r$; $M_s^2$ (независимые переменные), множественный коэффициент корреляции $R$= 0.99948, $F$-критерий Фишера 1193, остаточная дисперсия $S_{ост}$= 11, приведенная погрешность γ = 1.9 %.

Максимальные коэффициенты значимости $K_j$ мультипликативных ошибок $\delta_j$ независимых переменных из (2) равны 752 и 2006, соответственно. Причем существенно выше, чем в предыдущих моделях.

Из представленных на рисунке 1 зависимостей температуры отпуска вычисленной $T_{о_в}$ от температуры отпуска измеренной $T_{о_и}$ (без введения погрешности в модели при их создании, но с введением погрешности 1 % при вычислениям по ним) для двух сталей видно, что достоверность восстановления температуры отпуска по ним существенно различна как по коэффициенту множественной корреляции, так и по другим параметрам оценки точности расчетов.

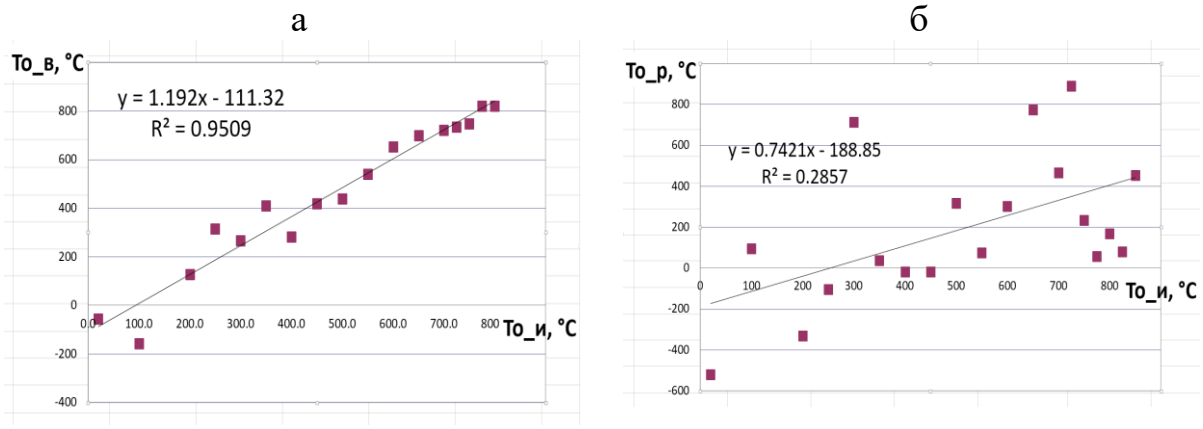



Рис. 1. Зависимость температуры отпуска восстановленной $T_{о_в}$ от температуры отпуска измеренной $T_{о_и}$ (без введения погрешности в модели при их создании, но с введением погрешности 1 % при вычислениям по ним); а – сталь 10*ХСНД*, б – сталь15*ХН*5*МФ*

Из (8) при температуре отпуска 20 °С для сталей 10*ХСНД* и 15*ХН*5*МФ* следуют значения сумм модулей коэффициентов значимости $|K_j|$: 1703 и 6641, величина которых является объективным параметром для оценки уровня точности восстановления зависимых переменных этих сталей.

Дальнейшее практическое увеличение точности восстановления зависимых переменных возможно не только при увеличении сложности независимых переменных моделей, но и с введением погрешности в модели при их создании:

– для стали 10*ХСНД*: $H_c^2$; $M_r^2$; $H_c^{-1}\cdot\chi_н^{-1}$; $H_c^{-2}$; $H_c^{-1}\cdot M_r^{-1}$; $\mu_{max}\cdot M_r$; $M_s$; $M_r^{-1}$ (независимые переменные), множественный коэффициент корреляции $R$ = 0.99841, $F$ – критерий Фишера 314, остаточная дисперсия $S_{ост}$= 19, приведенная погрешность $\gamma$ = 3.3 %;

– для стали 15*ХН*5*МФ*: $M_s\cdot\mu_{max}$; $M_s$; $M_r^{-1}\cdot\chi_н^{-1}$; $H_c^2$; $M_s^2$; $M_r^{-1}\cdot M_s\cdot$; $M_r\cdot\chi_н$; $\mu_{max}$ (независимые переменные), множественный коэффициент корреляции $R$= 0.99619, $F$ – критерий Фишера 163, остаточная дисперсия $S_{ост}$= 29, приведенная погрешность $\gamma$ = 5 %.

Максимальные коэффициенты значимости $K_j$ мультипликативных ошибок $\delta_j$ независимых переменных из (2) равны 22 и 117, соответственно. То есть значения ниже, чем в предыдущих моделях, которые создавались без введения в них ошибки.

Из представленных на рисунке 2 зависимостей температуры отпуска вычисленной $T_{о_в}$ от температуры отпуска измеренной $T_{о_и}$ (с введением погрешности в модели при их создании, а также с введением погрешности 1 % при вычислениях по ним) для двух сталей видно, что достоверность восстановления температуры отпуска по ним различается меньше, чем на рис. 1.

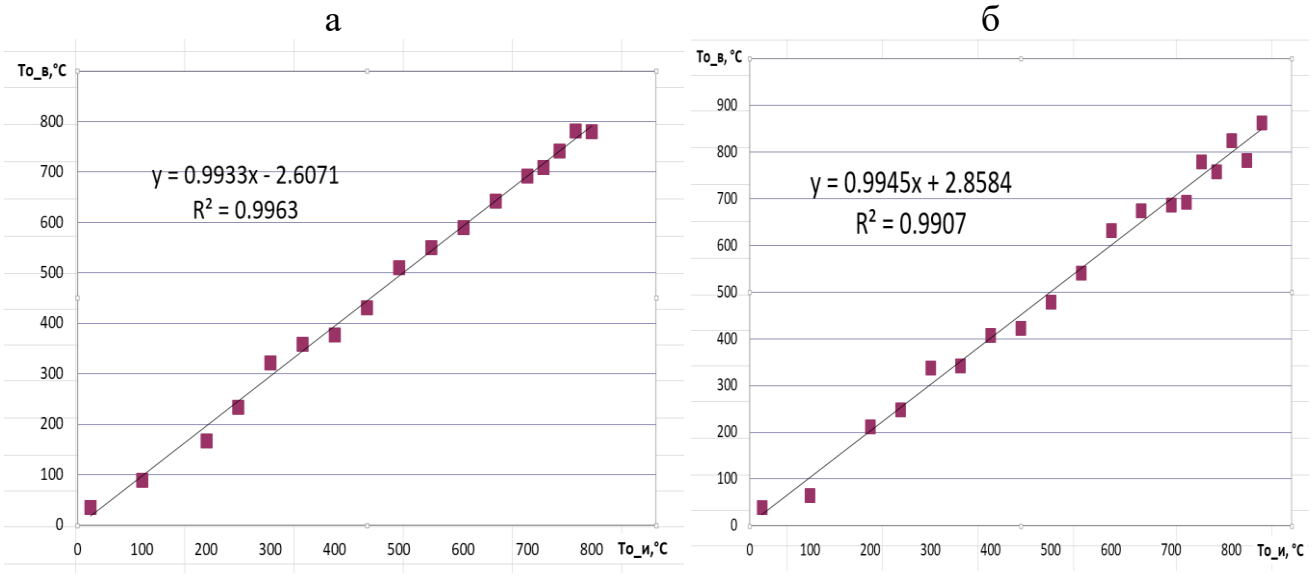



Рис. 2. Зависимость температуры отпуска восстановленной $T_{о_в}$ от температуры отпуска измеренной $T_{о_и}$ (с введением погрешности в модели при их создании, а также с введением погрешности 1 % при вычислениях по ним); а – сталь 10*ХСНД*, б – сталь15*ХН*5*МФ*

Из (8) при температуре отпуска 20 °С для сталей 10*ХСНД* и 15*ХН*5*МФ* следуют значения сумм модулей коэффициентов значимости $|K_j|$: 75 и 299, величина которых является объективным параметром для оценки того, что

уровень точности восстановления зависимых переменных для стали 10ХСНД в несколько раз выше. Поскольку контроль проводится для сталей в определенном интервале, который обуславливается производственной необходимостью, то можно ожидать, что погрешность в этих интервалах будет не столь высокой (согласно рис. 2).

Так, при температуре отпуска 700 °С, для сталей 10*ХСНД* и 15*ХН*5*МФ* получаются значения сумм модулей коэффициентов значимости $|K_j|$: 4 и 9, что является неплохим результатом и может найти применение в производственных условиях. В то время, как без введения погрешности в модели при их создании результаты существенно хуже: 13 и 105, но и здесь сталь 10*ХСНД* может быть проверена существенно надёжней, чем сталь 15*ХН*5*МФ*, если есть необходимость (по тем или иным причинам) использовать только этот подход при контроле на производстве.

## Список литературы


1. Осипов, А. А. Оценка точности многопараметровых регрессионных моделей в задачах неразрушающего контроля / А. А Осипов // Дефектоскопия. – 1995. – № 1. – С. 78-84.
2. Осипов, А. А. Применение множественного регрессионного анализа в некоторых задачах неразрушающего контроля / А. А Осипов // Дефектоскопия. – 1995. – № 4. – С. 87-93.
3. Короткевич, З.М. Многопараметровая модель для контроля качества закалки инструментальной углеродистой стали У8А с использованием прибора ИМИ-И / З. М. Короткевич, А. А. Осипов, В. А. Бурак // Неразрушающий контроль и диагностика. – 2021. – № 2. – С. 38–45
4. Бида, Г. В. Магнитные свойства термообработанных сталей / Г. В. Бида, А. П. Ничипурук. – Екатеринбург: УрО РАН, 2005. – 219 с.
5. Новицкий, П. В. Оценка погрешностей результатов измерений / П. В. Новицкий, И. А. Зограф. – Ленинград: Энергоатомиздат, 1985. – 248 с.



Контакты:
veronika.burak@gmail.com (Бурак Вероника Анатольевна)
kulagin@iaph.bas-net.by (Кулагин Валерий Николаевич)
osipov@iaph.bas-net.by (Осипов Александр Александрович)

УДК 620.179.15:621.565.952

***А. В. ВОРОБЕЙ***
***А. С. КИРИЕНКО***
***А. О. ЖУПИНА***
***А. Н. МИХАЧЁВ***
ОАО «БЕЛГАЗСТРОЙ» - управляющая компания холдинга» (Минск, Беларусь)

# КОНТРОЛЬ ТОЛЩИНЫ ВНУТРЕННИХ ОТЛОЖЕНИЙ ТЕПЛООБМЕННЫХ ТРУБ РАДИОГРАФИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

**Аннотация.** Отложения на внутренней поверхности теплообменных труб ухудшают эксплуатационные характеристики тепловых агрегатов. Контроль величины отложений – трудоёмкая задача, требующая демонтажа сомнительных участков для прямых измерений. Цель работы: анализ чувствительности и точности контроля толщины внутренних отложений радиографическим методом. Разработана математическая модель, с помощью которой установлены влияния диаметра и толщины стенки трубопровода, энергии ионизирующего излучения на точность измерений толщины отложений радиографическим методом. Получены первичные экспериментальные данные, согласующиеся с теоретическим анализом.

**Ключевые слова:** тангенциальный радиографический контроль, цифровая радиография, ионизирующее излучение (ИИ), профильное сечение трубы, уровень серого.

Радиографический контроль – метод, который позволяет не только контролировать сварные соединения и основной металл на сплошность, но и измерять остаточную толщину стенки трубопроводов и толщину отложений [1]. Метод можно применять без вывода трубопровода из эксплуатации и без снятия тепловой изоляции, если она присутствует. Метод предполагает профильное просвечивание стенки трубы (рис. 1) поэтому называется тангенциальным радиографическим контролем (RT-T). Контроль выполняют с помощью цифровой радиографии, что значительно расширяет динамический диапазон. На рисунке 1 представлена схема измерения толщины отложений радиографическим методом с указанием влияющих параметров.

## Моделирование измерений

Измерение толщины стенки трубопроводов радиографическим методом основано на зависимости просвечиваемой толщины от диаметра и толщины стенки трубы. Законы изменения просвечиваемой толщины различаются в разных просвечиваемых частях трубопровода. Выделяются три области с одинаковым характером изменения просвечиваемой толщины: 1, 2 и 3 (рис. 1). Область 1 – прямая засветка детектора без прохождения ионизирующего излучения через контролируемый объект. Область 2 – ИИ по касательной проходит через стенку трубопровода. В этой области просвечиваемая толщина изменяется от нуля (на границе областей 1 и 2) до максимального значения (на границе областей 2 и 3). Область 3 – ИИ дважды проходит через стенку

трубопровода, просвечиваемая толщина уменьшается до значения соответствующее двум номинальным толщинам трубопровода. Различные законы изменения просвечиваемой толщины, в соответствующих областях, приводят к различному изменению интенсивности ИИ, которое регистрируется детектором. Информационным параметром изменения интенсивности поля, а следовательно, и просвечиваемой толщины, является уровень серого цифрового радиографического снимка. Идентификация областей, выполняемая по анализу изменения уровня серого на цифровом снимке, позволяет измерить толщину стенки трубопровода. В работе [2] отмечено влияние диаметра трубопровода *D*, толщины стенки трубопровода *S*, энергии ИИ и расстояния $f$ на точность измерений толщины стенки трубопровода тангенциальным радиографическим методом.

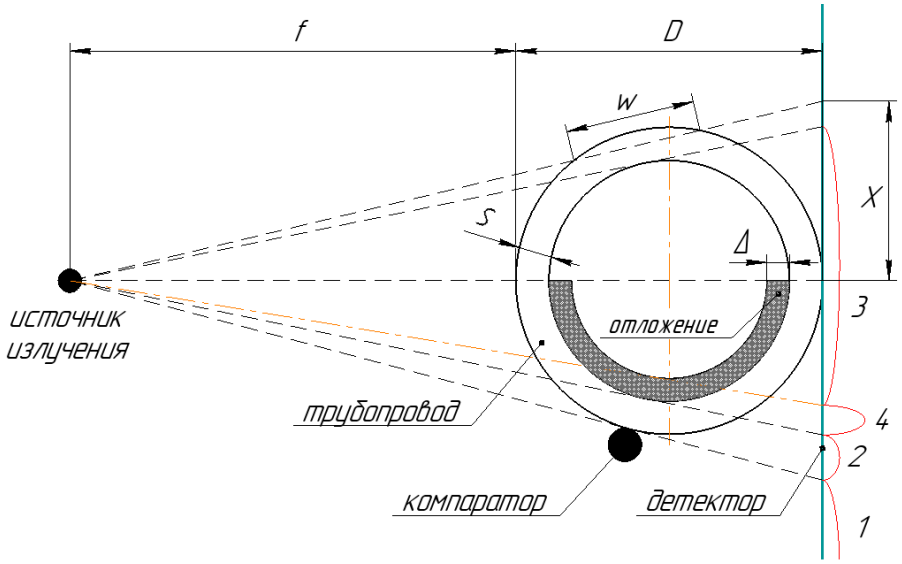



Рис. 1. Схема тангенциального радиографического контроля толщины стенки и отложений трубопровода: *D, S* –диаметр и толщина трубопровода соответственно; $f$ – расстояние от источника излучения до трубопровода; Δ - толщина отложений; $w$ – просвечиваемая толщина при координате смещения *X*

Наличие отложений внутри трубопровода приводит к изменению интенсивности прошедшего ИИ, что наблюдается по уровню серого цифрового снимка. Характер изменения интенсивности поля, вызываемого отложением, определяется внутренним диаметром трубы и толщиной отложений. Отложение можно рассматривать как «труба в трубе». В результате выделяется дополнительная область проекций – профильное сечение отложения 4 (рис.1). Идентификация границ областей 2 и 4 по уровню серого позволяет провести измерения толщины стенки трубы и толщины отложения соответственно. Существенные различия линейных коэффициентоов затухания ИИ для материала трубы и отложений могут влиять на чувствительность метода.

При моделировании получена функциональная зависимость просвечиваемой толщины стенки трубы $w_{\text{м}}$ и просвечиваемой толщины отложений $w_d$ от влияющих параметров контроля. Функциональные зависимости выражаются через смещение $x$, отмечаемое на цифровом

радиографическом снимке, поскольку анализ изменения уровня серого проводится по этой координате:

$$w_{\text{м}} = f(D, s, f, x)\,,$$
$$w_d = g(D, s, f, \Delta, x)\,.$$

Далее проводился расчет уровня серого, исходя из особенностей цифровой радиографии: уровень серого $GV$ цифрового радиографического снимка прямо пропорционален дозе ИИ [3]. Полученные зависимости нормализованы к максимальному значению уровня серого, наблюдаемого в области 1 – прямой засветки детектора:

$$GV = k \cdot I_0 \cdot e^{-\mu_{\text{м}} \cdot w_{\text{м}}} \cdot e^{-\mu_d \cdot w_d}\,,$$

где $k$ – коэффициент пропорциональности; $I_0$ – интенсивность падающего ИИ; $\mu_{\text{м}}$ и $\mu_d$ – соответственно линейные коэффициенты ослабления ИИ металлом трубы и отложениями.

**Анализ полученных зависимостей**

На рисунке 2 показаны рассчитанные зависимости нормализованного уровня серого поперёк оси трубопровода Ø57×4,0 мм: без отложений (кривая 1) и при наличии отложений толщиной 4,0 мм (кривая 2). Отмечены различные характерные области просвечивания (1, 2, 3 и 4), согласно рисунку 1.

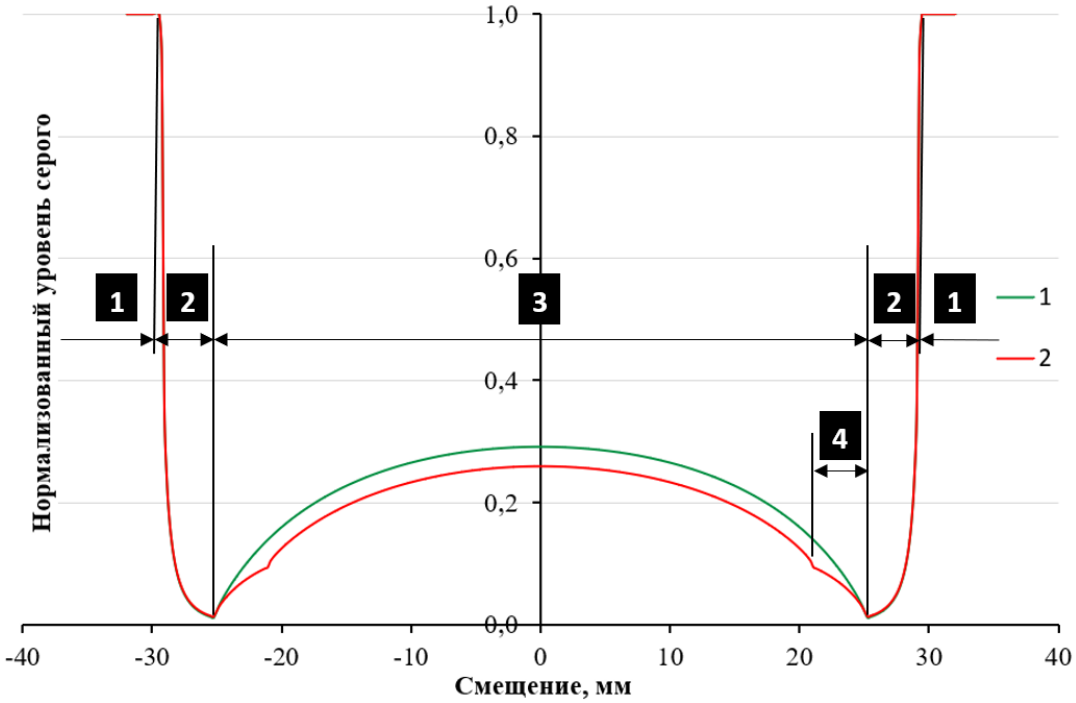



Рис. 2. Рассчитанные зависимости нормализованного уровня серого поперек оси трубы Ø57×4,0 мм при отсутствии отложений (кривая 1) и при наличии отложений толщиной 4,0 мм (кривая 2).

Согласно рисунку 2 внутренние отложения изменяют распределение уровня серого поперёк оси трубы. А в направлении, соответствующем максимальной просвечиваемой толщине отложений (то есть в профильном

сечении), они максимально ослабляют интенсивность ИИ, что вызывает локальный минимум уровня серого (рис.2). Этот локальный минимум позволяет идентифицировать границы областей 4 и 3, т.е. измерить толщину отложений. Чем больше глубина локального провала уровня серого из-за отложений, тем точнее определяется граница области и тем точнее выполняется измерение. На рисунке 3 представлены рассчитанные зависимости нормализованного уровня серого поперек оси трубопровода Ø57×4,0 мм при различной толщине отложений (кривые 1-5). Кривые приведены в области локальных минимумов уровня серого, что соответствует границам стенки трубы и отложений в профильном сечении.

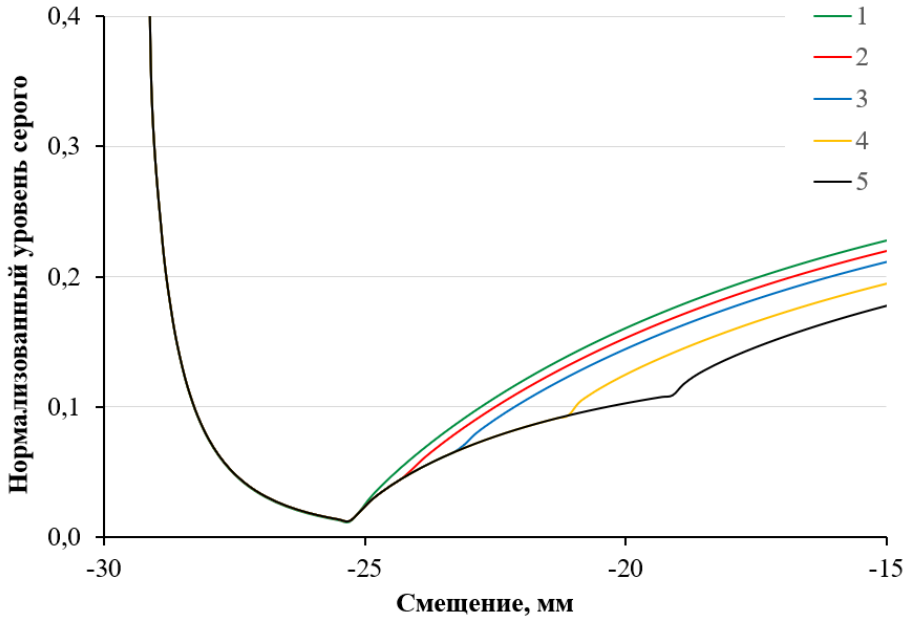



Рис.3. Рассчитанные зависимости нормализованного уровня серого поперек оси трубы Ø57×4,0 мм при различной толщине отложений: отложения отсутствуют (1); толщина отложений 1,0 мм (2), 2,0 мм (3), 4,0 мм (4), 6,0 мм (5).

Согласно рисунку 3, при прочих равных условиях увеличение толщины отложений вызывает более глубокий локальный провал уровня серого, что повышает точность его оценки. Небольшие отложения могут не обнаруживаться, поскольку вызываемый ими локальный минимум оказывается сравним с уровнем шумов. Диаметр и толщина трубопровода влияют на выявляемость и точность измерения толщины отложений. Характер этого влияния аналогичен влиянию на точность измерения толщины стенки трубопровода и определяется вызываемой ими кривизной наружной и внутренней поверхностей трубы, а также возможностью компенсировать уменьшение интенсивности ИИ при увеличении просвечиваемой толщины [2]. При увеличении диаметра трубопровода при неизменной толщине стенки трубы и отложений глубина локального минимума уровня серого уменьшается, что ухудшает выявляемость и точность измерений отложений. Однако при компенсации уменьшения интенсивности ИИ, вызванного увеличением просвечиваемой толщины металла, влияние увеличения диаметра на

выявляемость и измерение отложений практически сводится к нулю. Компенсация ограничена условиями недопустимости перенасыщения уровня серого цифрового снимка [1], что проявляется в области прямой засветки (область 1 на рис.1).

Увеличении толщины трубопровода при неизменном диаметре и величине отложений также приводит к ухудшению выявляемости и точности измерений отложений. Компенсация уменьшения интенсивности ИИ, вызванного увеличением просвечиваемой толщины, может повышать чувствительность контроля и точности измерений, но и здесь она ограничена техническими возможностями применяемой цифровой детекторной системы и условиями контроля.

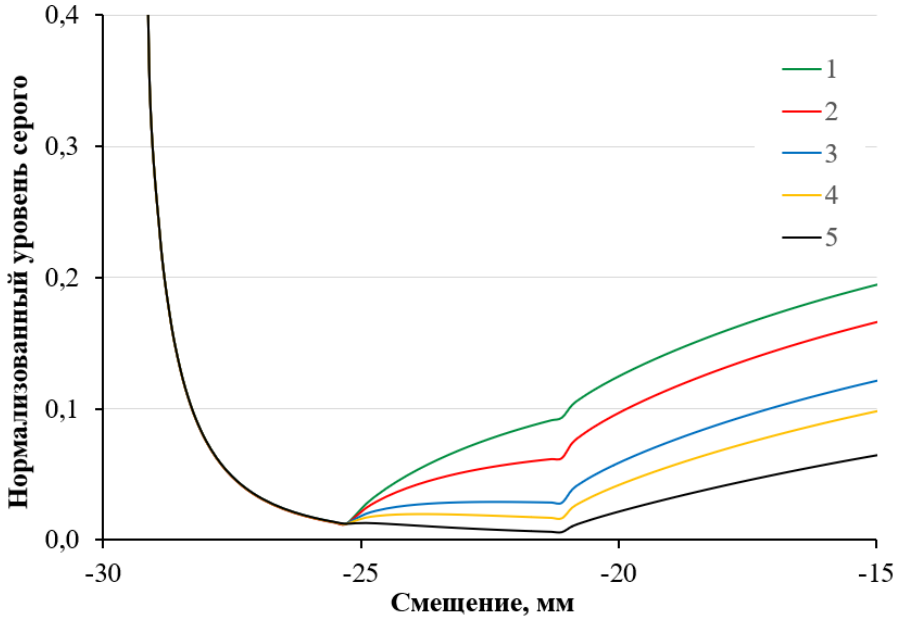



Рис.4. Рассчитанные зависимости нормализованного уровня серого поперек оси трубы Ø57×4,0 мм при толщине отложений 4,0 мм: коэффициент линейного ослабления отложениями 0,015 мм$^{-1}$ (1), 0,03 мм$^{-1}$ (2), 0,06 мм$^{-1}$ (3), 0,08 мм$^{-1}$ (4), 0,12 мм$^{-1}$ (5).

На рисунке 4 представлены рассчитанные зависимости нормализованного уровня серого поперек оси трубопровода Ø57×4,0 мм при различном коэффициенте линейного ослабления ИИ материалом отложений при толщине последних 4,0 мм. Линейный коэффициент ослабления изменялся от 0,015 мм$^{-1}$ (кривая 1), до 0,12 мм$^{-1}$ (кривая 5). Линейный коэффициент ослабления металла оставался постоянным – 0,1539 мм$^{-1}$.

Коэффициент линейного ослабления ИИ определяется составом отложений и энергией ионизирующего излучения. При изменении энергии – меняется линейный коэффициент ослабления ИИ для металла и отложений. Зависимости, приведенные на рисунке 4, рассчитаны при постоянном линейном коэффициенте ослабления металла и при варьирующем коэффициенте ослабления отложений. Согласно рисунку 4, чем сильнее отложения ослабляют ИИ, тем хуже они выявляются и измеряются. Так как хуже идентифицируется граница областей 2 и 4 (рис.1). Чем ближе коэффициенты ослабления отложения и металла, тем менее различимы изменения уровня серого областей

2 и 4. При равенстве коэффициентов эти области можно рассматривать как одну – сплошной металл: граница областей 2 и 4 не идентифицируется.

**Практические исследования**

На рисунке 5 представлены результаты измерений толщины отложений в тепловых трубах котла Ø57×4,0.

а) б)

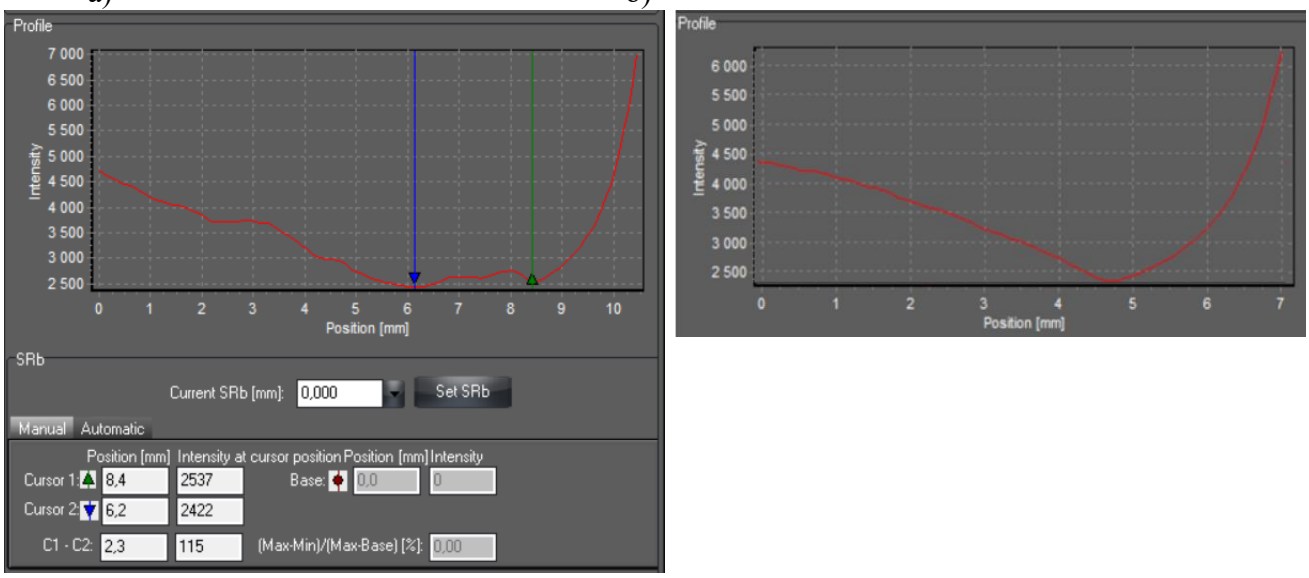



Рис.5. Практические результаты измерения толщины отложений в трубе Ø57×4,0 при наличии отложений (а), изменение уровня серого в профильном сечении трубы при отсутствии отложений (б).

На рисунке 5б показано изменение уровня серого поперек оси трубы при отсутствии внутренних отложений. На рисунке 5а выполнено измерение толщины отложений в профильном сечении. Результат измерений – 2,3 мм.

**Список литературы**

[1] ISO 20769-1:2018 Non-destructive testing – Radiographic inspection of corrosion and deposits in pipes by X- and gamma rays – Part 1: Tangential radiographic inspection.

[2] Воробей А.В., Жупина А.О., Михачёв А.О. Моделирование измерения толщины стенки трубопроводов радиографическим методом для анализа влияния параметров контроля на точность измерений // Тез. докл. «Неразрушающий контроль 21 века: синергия технологий и разума». Москва, 2026. С. 193-197.

[3] ГОСТ ISO 17636-2-2017 Неразрушающий контроль сварных соединений. Радиографический контроль. Часть 2. Способы рентгено- и гаммаграфического контроля с применением цифровых детекторов.

Контакты:
vorobey@belgazstroy.by (Воробей Алексей Васильевич);
kirienko@belgazstroy.by (Кириенко Александр Сергеевич);
zhupina@belgazstroy.by (Жупина Артём Олегович);
mihachev@belgazstroy.by (Михачёв Артём Олегович).

УДК 620.179.14

***А. П. ГУСЕВ**, д-р техн. наук*
***И. Е. ЗАГОРСКИЙ***
***А. А. ПОЛОНЕВИЧ***
Институт прикладной физики НАН Беларуси (Минск, Беларусь)

# ЗАВИСИМОСТЬ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ПОДПОВЕРХНОСТНЫХ ДЕФЕКТОВ ОТ РАЗМАГНИЧИВАЮЩЕГО ФАКТОРА ФОРМЫ ТЕЛА

**Аннотация.** Представлены результаты экспериментальных исследований магнитного поля рассеяния подповерхностных дефектов сплошности материала образцов магнитомягкой стали в форме призмы, намагничиваемых постоянным полем, в зависимости от размагничивающего фактора формы тела.

**Ключевые слова**: магнитное поле, намагниченность материала, дефект, магнитное поле дефекта, размагничивающий фактор

Одним из основных условий эффективности магнитного неразрушающего контроля стальных изделий машиностроения, металлургии, транспорта, строительной отрасли является создание в объеме контролируемого изделия необходимой намагниченности материала для наилучшей регистрации интересующего параметра. В частности, эффективность интерпретации и достоверности результатов контроля таких изделий методом магнитной дефектоскопии определяется использованием зависимостей формирования магнитных полей рассеяния дефектов сплошности под действием магнитных потоков намагниченности материала [1-5]. В связи с этим для создания необходимой намагниченности материала в объеме тела актуальной задачей является разработка соответствующих намагничивающих систем применительно к конкретным типам стальных изделий, то есть – с учетом их формы, размеров и магнитных свойств материала.

При описании намагниченности **J** материала ферромагнитных тел разомкнутой формы широко применяется модель магнитной поляризации тела во внешнем намагничивающем поле $\mathbf{H_o}$ [6-8]: магнитные моменты диполей в объеме тела ориентируются (с поправкой на магнитное взаимодействие диполей) в направлении $\mathbf{H_o}$, в результате чего на краях тела образуются магнитные полюсы, магнитное поле $\mathbf{H_p}$ которых внутри тела направлено навстречу $\mathbf{H_o}$, а его интенсивность пропорциональна намагниченности **J** материала тела $\mathbf{H_p = N \cdot J}$, где величина **N** называется размагничивающим фактором.

При однородном намагничивании (тела правильной сферической формы) размагничивающий фактор **N** является коэффициентом, зависящим от формы тела и от соотношения его размеров в разных направлениях, в частности - от отношения поперечного размера **d** тела к его длине **L**:

$$N = d/L \qquad (1)$$

Намагниченность **J** материала тела при этом формируется под действием внутреннего результирующего поля

$$\mathbf{H_i} = \mathbf{H_0} - \mathbf{N} \cdot \mathbf{J} \qquad (2)$$

В общем случае (при неоднородном намагничивании) использование размагничивающего фактора **N** возможно**,** как коэффициента, если **J** определяется в виде усредненной по объему тела величины, либо - как координатного тензора. В этих случаях значения всех величин, входящих в (2), зависят от расположения точки внутри намагничиваемого тела, а расчетное определение намагниченности **J** - достаточно сложная задача из-за взаимозависимости величин $\mathbf{H_i}$, **J** и **N** в связи с нелинейностью магнитной проницаемости материала.

В связи с изложенным, для выявления зависимости формирования магнитных полей рассеяния поверхностных дефектов стальных прутков от намагниченности материала проведен ряд экспериментальных исследований [9–12] при расположении дефектов в различных местах по длине прутка и в зависимости от длины **L** прутков [12] в диапазоне 200–950 мм. Полученные результаты авторы объясняют на основе зависимости поля дефекта от намагниченности материала в зоне дефекта, от влияния торцов прутка на намагниченность материала и от образования под дефектом магнитного диполя.

В данной работе представлены результаты исследования индукции магнитных полей рассеяния дефектов сплошности материала образцов магнитомягкой стали в зависимости от размагничивающего фактора **N** формы тела, определяемого по (1). Целью эксперимента является определение степени изменений намагниченности материала тела по магнитному полю рассеяния подповерхностных дефектов при изменении размеров исследуемых образцов.

**Образцы и метод исследования**

Исследования выполнены на образцах конструкционной стали 3, так как взаимосвязь формирования намагниченности материала ферромагнитных тел с их формой сильнее проявляется в магнитомягких ферромагнетиках. Образцы в начале эксперимента – прямоугольные призмы сечением 12 х 6 мм и длиной **L** = 200 мм. Данные размеры образцов выбраны для возможности изменения размагничивающего фактора уменьшением их длины. Форма дефектов – поперечные сквозные цилиндрические отверстия диаметром 1,6 мм на одинаковом от концов образца расстоянии. В каждом образце выполнено по одному дефекту на различной глубине **h** (расстояние от поверхности образца до центра отверстия): 1,6; 2,6; 3,6; 3,9; 4,2; 5,0 мм.

В процессе исследований образцы намагничивались вдоль их длины однородным магнитным полем от источника соленоидального типа с индукцией $\mathbf{B_0}$ = 20 мТл. Степень неоднородности индукции намагничивающего поля на длине 200 мм не превышала 1,5 %, на длине 190 мм – не более 1%. Образцы при измерениях располагались вдоль продольной оси катушек таким

образом, что положение центра дефектов на оси OX соответствовало координате $x_д = 0$ (центр намагничивающей системы).

Измерение распределения индукции магнитного поля рассеяния дефектов производилось сканированием поверхности образцов датчиком Холла с зазором 0,2 мм в направлении их намагничивания (по оси OX). Датчик Холла подключен на вход прецизионного измерительного канала автоматизированной установки и для сканирования установлен на координатном устройстве с разрешающей способностью 2,5 мкм.

Значение нормальной составляющей магнитной индукции $\mathbf{B_⊥}$ поля рассеяния дефекта в каждой точке $x_i$ определялось по разности двух измерений $\mathbf{B_{⊥i} = B_{Σi} − B_{0⊥i}}$, где: $\mathbf{B_{0⊥}}$ - значение индукции магнитного поля бездефектных образцов, $\mathbf{B_Σ}$ - значение индукции магнитного поля образцов с дефектами.

Для получения зависимости распределения $\mathbf{B_⊥}(x)$ от размагничивающего фактора **N** процесс измерения магнитной индукции имел циклический характер: сначала измерения проводились на образцах длиной 200 мм, на следующих циклах измерений образцы (бездефектные и с дефектами) укорачивались с обоих концов по 20 мм. На последнем цикле длина образцов была равна 80 мм.

**Результаты измерений и их обсуждение**

Экспериментально получено распределение нормальной составляющей $\mathbf{B_⊥}$ индукции магнитного поля рассеяния подповерхностных дефектов образцов из стали 3 в зависимости от глубины **h** залегания дефектов при различных значениях размагничивающего фактора **N**, определяемого по (1), в диапазоне 0,06 ÷ 0,15. В качестве примера распределение нормальной составляющей $\mathbf{B_⊥}$ индукции магнитного поля дефектов образцов длиной 160 мм, иллюстрируется графиками на рис. 1**.**

Распределение составляющей $\mathbf{B_⊥}$ индукции магнитного поля дефектов, как видно на рис.1, характеризуется следующими параметрами: нормальная составляющая индукции над центром дефекта имеет нулевое значение; с двух сторон от дефекта – экстремальные различного знака значения $\mathbf{B_{⊥э}}$; при дальнейшем удалении от экстремумов по оси абсцисс значения $\mathbf{B_⊥}$ уменьшаются по экспоненте. С увеличением глубины **h** залегания дефектов величина экстремумов $\mathbf{B_{⊥э}}$ уменьшается, а расстояния $Δx_э$ по оси абсцисс между экстремальными точками увеличиваются.

Зависимость амплитуды экстремальных значений индукции $\mathbf{B_{⊥э}}$ поля рассеяния дефектов, находящихся на различной глубине **h,** от размагничивающего фактора **N** представлена на рис. 2. Экстремальные значения индукции магнитных полей подповерхностных дефектов, как видно из графиков $\mathbf{B_{⊥э}}$ на рис. 2, тем больше, чем меньше глубина **h** залегания и чем больше длина образцов **L**. Данные зависимости с учетом уменьшения расстояния между экстремальными точками $Δx_э$ распределения $\mathbf{B_⊥}$ вдоль оси

абсцисс (рис. 1) характеризуют степень пространственной локализации магнитных полей рассеяния подповерхностных дефектов в зоне их расположения с различной глубиной залегания.

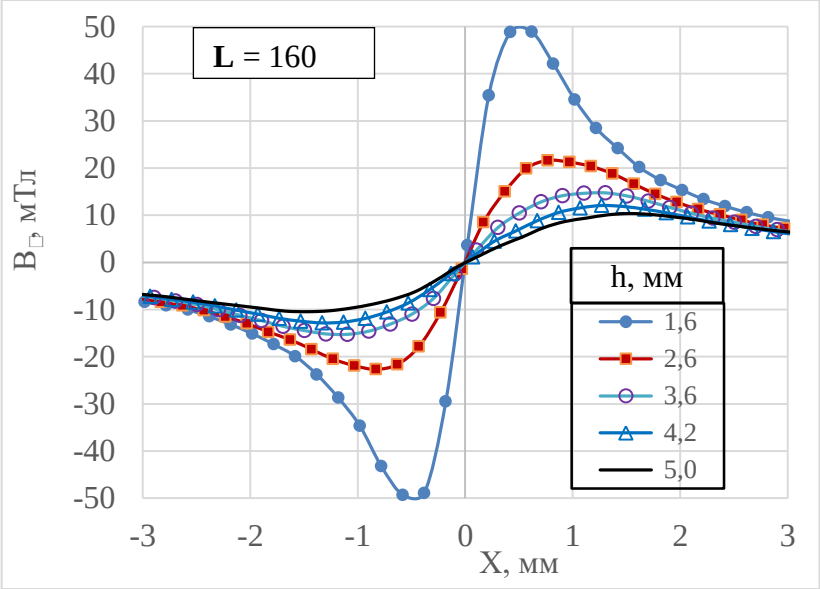



Рис. 1. Распределение нормальной составляющей $\mathbf{B_{\perp}}$ индукции магнитного поля дефектов, расположенных на различной глубине **h**

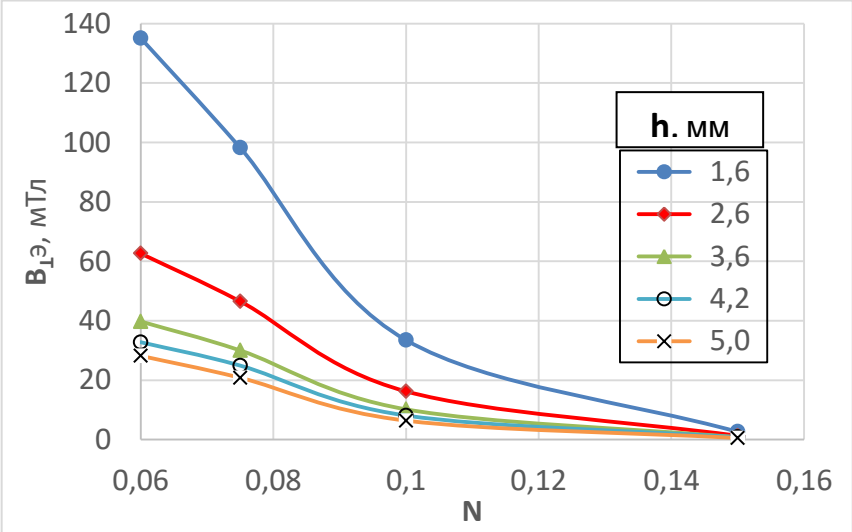



Рис. 2. Зависимость экстремальных значений $\mathbf{B_{\perp э}}$ индукции магнитных полей дефектов от размагничивающего фактора **N**

Особенностью зависимостей на рис. 2 является то, что для образцов длиной 200 и 180 мм значения $\mathbf{B_{\perp э}}$ индукции полей рассеяния всех дефектов до глубины **h** = 5 мм превышают значение 20 мТл – величину индукции намагничивающего поля. Данное явление объясняется тем, что поле рассеяния дефектов формируется намагниченностью **J** материала внутри тела.

Уменьшение намагниченности материала с увеличением размагничивающего фактора видно на рис.2 по уменьшению значений $\mathbf{B_{\perp э}}$ с увеличением **N**. При этом степень уменьшения индукции полей дефектов, находящихся в центральном сечении образцов, не зависит (в диапазоне исследованных значений **N**) от глубины **h** их залегания. Данный вывод подтверждается отношением значений $\mathbf{B_{\perp}}$ индукции полей дефектов образцов длиной **L**=200 мм к значениям $\mathbf{B_{\perp}}$ индукции полей дефектов образцов длиной **L**=80 мм (таблица 1).

Таблица 1. Отношение значений индукции магнитного поля дефектов образцов длиной 200 мм к индукции поля дефектов образцов длиной 80 мм

| **h,** мм | 1,6 | 2,6 | 3,6 | 4,2 | 5 |
|---|---|---|---|---|---|
| $\mathbf{B_{\perp 200}}$ / $\mathbf{B_{\perp 80}}$ | 51,6 | 48,8 | 49,8 | 46,7 | 52,9 |

Учитывая известное положение, что интенсивность поля рассеяния дефекта пропорциональна намагниченности материала, представленное в таблице 1 уменьшение интенсивности магнитного поля рассеяния дефектов в 50 раз относится и к изменению намагниченности **J** материала. При этом, как следует из (2), с увеличением **N** в 2,5 раза и уменьшении намагниченности материала в 50 раз интенсивность результирующего поля внутри намагничиваемых образцов уменьшилась в 20 раз.

## Заключение

Полученные в результате эксперимента соотношения величин, входящих в (2), являются конструкцией используемой модели магнитной поляризации тела во внешнем намагничивающем поле $\mathbf{H_o}$. Размагничивающий фактор **N** по данной модели, характеризующий влияние формы тела на намагниченность материала является лишь вспомогательной величиной для формального описания процесса намагничивания тел разомкнутой формы.

В реальности форма тела имеет значение для процесса намагничивания лишь как пространственное расположение его поляризованных частей относительно друг друга. Однако процесс намагничивания тела – не просто поляризация магнитных моментов, но и магнитное взаимодействие частей тела друг с другом, результат которого зависит от их взаимного расположения, что в модели поляризации тела частично учитывается представлением фактора **N** в виде координатного тензора. Например, при уменьшении длины намагничиваемых образцов в проведенном эксперименте происходит не только удаление концевых намагниченных частей вместе с их магнитным полем, но при этом исчезает и магнитное взаимодействие (в данном случае – подмагничивающее [13]) этих частей с оставшейся укороченной средней частью образца.

Кроме того, выражение – «поляризация тела разомкнутой формы» – по умолчанию рассматривает лишь проходящий через тело суммарный магнитный поток - намагничивающего поля и намагниченности материала. Поэтому данная модель не учитывает замкнутые внутри тела магнитные потоки [14], что для магнитной дефектоскопии имеет существенное значение.

**Список литературы**


1 Янус, Р. И. Приближенное решение задачи магнитной дефектоскопии. - НТО, 1935, т. 5, вып. 7, с. I3I4-I3I5.

2 Аркадьев, В. К. О развитии теоретических основ дефектоскопии. - Известия АН СССР, ОТН, 1937, 2, с. 233-240.

3 Вонсовский, С. В. Простейшие расчеты для задач магнитной дефектоскопии. - ЖТФ, 1938, т. 8, вып. 16, с. 1453-1467.

4 Янус, Р. И. Магнитная дефектоскопия. - Гостехиздат, 1946, с. 32-48.

5 Сапожников А. Б. Об учете нелинейности кривой намагничивания в задачах магнитной дефектоскопии. - Труды СФТИ при ТГУ, Томск, 1948, вып. 26, с. 183-188.

6 Neumann H., Warmut K. - “Wiss. Veröff. Siemenskonzern”. 1932. № 2, s. 11.

7 Аркадьев, В. К. - Электромагнитные процессы в металлах, ч. 1. ОНТИ, Москва-Ленинград, 1934, с.114-123.

8 Чернышев, Е. Т. Магнитные измерения / Е. Н. Чечурина, Н. Г. Чернышева, Н. В. Студенцов. - Изд-во комитета стандартов, мер и измерительных приборов при СМ СССР, Москва, 1969, с. 144-155.

9 Александров, А. Г. О структуре поля над дефектом при намагничивании образца по частному циклу в открытой цепи электромагнита. - Тезисы докладов IX Всесоюзной н.-т. конф. “Неразрушающие физические методы и средства контроля”. Секция В – магнитные методы. Минск, 1981, с. 235–237.

10 Чернышев, А. В. Магнитное поле в полости поверхностной щели при намагничивании образца в разомкнутой магнитной цепи / Н. Н. Зацепин, Н. О. Гусак, В. И. Шевкунов. - Дефектоскопия, 1986, №1, с. 13–17.

11 Чернышев А. В. Нормальная составляющая магнитного поля дефекта в убывающем намагничивающем поле / Н. Н. Зацепин, Н. О. Гусак. - Изв. АН БССР, сер. физ.–техн. наук, 1988, № 1, с. 93–95.

12 Чернышев А. В. Магнитное поле рассеяния в области поперечного паза. - ISSN 0235 – 3474. Техническая диагностика и неразрушающий контроль, 1991, №2, с. 27–29.

13 Гусев, А. П. Экспериментальное исследование магнитного взаимодействия ферромагнитных тел. – Дефектоскопия, 1994, №1, с.14-18

14 Гусев, А. П. Модели магнитных зарядов и потоков в задаче дефектоскопии с локальным намагничиванием. - Дефектоскопия. – 2014. № № 6. – С. 46 – 53.



Контакты:
gusevap@iaph.bas-net.by (Гусев Александр Петрович)

УДК 620.179.1

***С. Р. ДМИТРИЕВ***
***А. А. МИШАРИНА***
ООО «АктивТестГруп» (Санкт-Петербург, Россия)

# СОВРЕМЕННЫЕ АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ УСТАНОВКИ МАГНИТОПОРОШКОВОГО И КАПИЛЛЯРНОГО КОНТРОЛЯ: «ЕРМАГ 3D» И «КАМА»

**Аннотация.** В статье рассмотрено современное автоматизированное оборудование для проведения контроля неразрушающими методами: бесконтактный магнитопорошковый дефектоскоп «ЕрМаг 3D» и установка капиллярного контроля «КАМА». Описаны принципы работы, технические характеристики и преимущества оборудования. Показано, что применение данных установок для контроля качества повышает производительность контроля и снижает влияние человеческого фактора.

**Ключевые слова:** магнитопрошковый контроль, капиллярный контроль, автоматизация, поиск дефектов, повышение производительности.

В настоящее время к промышленным предприятиям предъявляются высокие требования к качеству и безопасности выпускаемой продукции. Неразрушающий контроль является ключевым инструментом для обеспечения надежности деталей.

На сегодняшний день, в связи с быстрым темпом роста промышленности, остро стоят задачи автоматизации контроля, повышения его производительности и снижения влияния человеческого фактора. Компания ООО «АктивТестГруп», работающая на рынке неразрушающего контроля с 2010 года, предлагает инновационные решения в области магнитопорошкового и капиллярного контроля. В данной статье рассматриваются две автоматизированные установки, направленные на повышение качества проведения неразрушающего контроля – магнитопорошковый дефектоскоп «ЕрМаг 3D» и установки капиллярного контроля «КАМА».

Магнитопорошковый метод контроля основан на регистрации магнитных полей рассеяния, возникающих над несплошностями при намагничивании детали. Контроль изделий магнитопорошковым методом нашел широкое применение для выявления поверхностных и подповерхностных несплошностей. Однако у данного метода существует ряд недостатков:

− длительный и трудоемкий контроль деталей геометрически сложной формы;

− риск образования прижогов при пропускании тока по детали.

Внешний вид и конструкция дефектоскопа «ЕрМаг 3D» изображены на рисунке 1. В дефектоскопе «ЕрМаг 3D» применяется бесконтактное комбинированное намагничивание шестью соленоидами. Детали размещаются на поворотный стол в камере намагничивания.

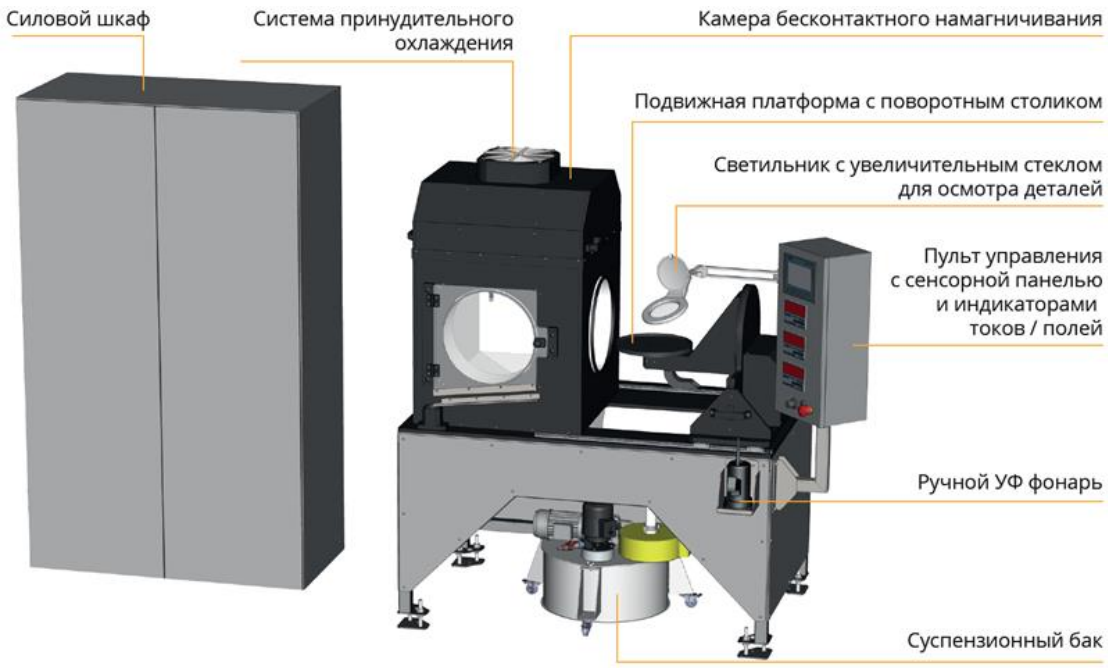



Рис. 1. Внешний вид дефектоскопа «ЕрМаг 3D»

По соленоидам камеры намагничивания протекает переменный ток со сдвигом фаз между парами соленоидов равным $2\pi/3$. Конец вектора магнитного поля за период намагничивания принимает пространственное положение, при котором происходит намагничивание детали во всех возможных направлениях. Это позволяет обнаруживать дефекты всех возможных ориентаций за один цикл контроля, включая сложные зоны резьбы и зубчатых венцов. Также намагничивание детали без зажима позволяет ликвидировать риск прижогов на небольших деталях и деталях с малой контактной поверхностью. Вектор намагничивания при бесконтактном намагничивании деталей с помощью шести соленоидов изображен на рисунке 2.

Рис. 2. Намагничивание детали с помощью шести соленоидов

Изображение дефектной детали после намагничивания и полива на установке «ЕрМаг 3D» приведено на рисунке 3.

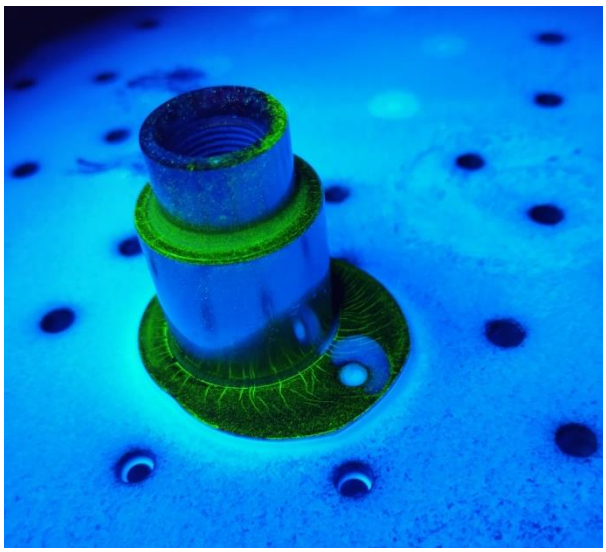


Рис. 3. Деталь с выявленными дефектами

За счет отсутствия необходимости зажима деталей и возможности загрузки в оборудование более одной детали повышается производительность.

Технические характеристики «ЕрМаг 3D»:

− диаметр поворотного столика для размещения деталей – 300 мм;

− масса загрузки – не более 20 кг;

− максимальное амплитудное значение напряженности магнитного поля в центре зазора между парами соленоидов модуля бесконтактного намагничивания – не менее 200 А/см [1].

Существует метод контроля аналогичный магнитопорошковому – капиллярный контроль. В капиллярном контроле используются флуоресцентные и цветные материалы для обнаружения поверхностных несплошностей.

При отсутствии механизации и автоматизации процесс капиллярного контроля занимает продолжительное время (от 30 до 90 минут на деталь) за счет большого количества операций. Специалисты предприятия ООО «АктивТестГруп» разработали инновационную технологию FPI All-in-VAC, реализованную в установках серии «КАМА». Суть технологии заключается в том, что все операции капиллярного контроля, за исключением осмотра, выполняются на одной установке [2].

Внешний вид установки «КАМА» приведен на рисунке 4.

В камере установки последовательно выполняются следующие операции:

1. Очистка поверхности деталей
2. Промывка деминерализованной водой с поддержанием температуры воды;
3. Вакуумная сушка, при которой давление в камере не более 800 Па;
4. Нанесение пенетранта из форсунок в вакууме;
5. Нанесение на деталь эмульгатора и его последующая смывка
6. Нанесение проявителя из форсунок;
7. Осмотр детали в отдельностоящей кабине затемнения.

Рис. 4. Внешний вид автоматизированной установки «КАМА»

Длительность полного цикла контроля от 60 до 90 минут. При этом в установку загружается несколько деталей, что повышает производительность контроля. «КАМА» позволяет снизить влияние человеческого фактора за счет автоматизации процессов.

Дефектоскописты, проводящие капиллярный контроль меньше контактируют с дефектоскопическими материалами, за счет этого создаются более комфортные и безопасные условия работы.

Магнитопорошковый дефектоскоп «ЕрМаг 3D» и установка капиллярного контроля КАМА представляют собой современные автоматизированные системы, соответствующие мировому уровню развития неразрушающего контроля. Внедрение бесконтактного намагничивания и технологии FPI All-in-VAC позволяет повысить чувствительность и достоверность контроля.

Оборудование для неразрушающего контроля активно развивается. При необходимости еще большего повышения производительности есть возможность внедрить машинное зрение и автоматическую обработку результатов контроля с помощью искусственного интеллекта.

**Список литературы**

1. АктивТестГруп / [Электронный ресурс] Бесконтактные магнитопорошковые дефектоскопы. Режим доступа: URL: https://activetest.ru/beskontaktnye-magnitoporoshkovye-defektoskopy-ermag3d.

2. АктивТестГруп / [Электронный ресурс] Автоматизированные системы КАМА. Режим доступа: URL: https://activetest.ru/avtomatizirovannaja-sistema-kapilljarnogo-kontroljа-kama.

Контакты:
dsr@activetest.ru (Дмитриев Сергей Романович)
ma@activetest.ru (Мишарина Анастасия Андреевна)

УДК 629.424:543.42

***В. Г. ДРОКОВ***[1]*, д-р техн. наук*
***В. В. ДРОКОВ***[2]*, канд. техн. наук*
***А. Д. КАЗМИРОВ***[1]*, канд. физ-мат. наук*
***А. А. КУЗНЕЦОВ***[3]*, д-р техн. наук, проф.*
***В. В. МУРЫЩЕНКО***[4]*, канд. техн. наук*
[1]Иркутский государственный университет (Иркутск, Россия)
[2]Байкало-Амурский институт железнодорожного транспорта, филиал Дальневосточного государственного университета путей сообщения в г. Тында (Тында, Россия)
[3]Омский государственный университет путей сообщения (Омск, Россия)
[4]ООО «ЦСД-ТМХ» (Москва, Россия)

# ОЦЕНКА ПРЕДСТАВИТЕЛЬНОСТИ ДИАГНОСТИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА ПРИ ОЦЕНКЕ СОСТОЯНИЯ УЗЛОВ МАСЛОСИСТЕМЫ ТЕПЛОВОЗНОГО ДИЗЕЛЯ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ТОЧКИ ОТБОРА

**Аннотация:** Рассмотрена эффективность двух точек отбора диагностического материала для оценки технического состояния узлов маслосистемы тепловозного дизеля по параметрам частиц изнашивания. В качестве более эффективной предложена точка отбора пробы с центробежного фильтра (ЦФ) тепловоза. Данная точка позволяет исключить (снизить) влияния, связанные с недостаточной представительностью анализируемой пробы. Разработана конструкция пробоотборника, методика отбора с ротора ЦФ и методика пробоподготовки для проведения анализа на СВЧ плазменном анализаторе. Показано, что частицы по высоте ротора распределены достаточно равномерно и отбор пробы на анализ можно производить из любой области ротора. Предложено использовать значение рейтинга «сложных» частиц в качестве количественной оценки степени повреждения узла и продемонстрировано, что «сложные» частицы позволяют идентифицировать поврежденный узел дизеля.

**Ключевые слова:** дизель, тепловоз, центробежный фильтр, частицы изнашивания, элементный состав частиц, СВЧ плазменный анализ.

Оценка технического состояния узлов, смазываемых маслом, тепловозных дизелей регламентируется ГОСТом 20759-90. Для этого, на работающем дизеле, с прогретого до рабочей температуры, отбирается проба масла и направляется в лабораторию на спектральный анализ для измерения массовой доли нескольких элементов. По величине измеренной массовой доли судят о техническом состоянии узлов маслосистемы дизеля.

Длительный опыт использования на железнодорожном транспорте данного подхода показал, что величина массовой доли не всегда достоверно отражает техническое состояние дизеля [1].

Нами предпринята попытка использования СВЧ плазменного (сцинтилляционного) метода для разработки технологии оценки состояния узлов маслосистемы тепловозного дизеля. СВЧ плазменный метод, в отличии от рекомендуемого ГОСТом 20759-90 атомно-эмиссионного, позволяет производить комплексное измерение параметров частиц изнашивания. За время

10 минут выдается информация по массовой доле элементов в виде раствора, массовой доле элементов в виде частиц изнашивания, количестве, размерам и элементном составе частиц. Всего измеряется более 40 параметров. Число одновременно измеряемых элементов-12. Принцип действия метода описан в работе [2].

В процессе разработки новой технологии столкнулись с проблемой представительности отбора пробы на анализ с точек отбора, рекомендуемых ГОСТом. Проблемы с недостаточной представительностью пробы возникали, например, при отборе в зимний период с замороженного дизеля, в летний период с заглушенного дизеля, влияние представительности сказывалось, когда в заведомо неисправном дизеле в пробе масла регистрировалось очень малое количество частиц, не характерное для неисправного дизеля, либо частицы в пробе вообще отсутствовали. Нередко возникала необходимость оценки состояния дизеля, в котором масло было слито, и непонятны были действия в такой ситуации. На некоторых тепловозах, по разным причинам, приходилось отбирать пробу со сливной трубы картера. Здесь зачастую сливали до десятков литров воды и эмульсии, и не было уверенности, отражают ли частицы изнашивания в отобранной пробе состояние дизеля.

Изначально СВЧ плазменный метод успешно применялся для оценки состояния узлов маслосистемы автомобильных и авиационных газотурбинных двигателей [3, 4]. Высокая достоверность диагностирования в авиационной отрасли была достигнута нами, в том числе, за счет отбора пробы с маслофильтра. Данная точка отбора всегда обеспечивала необходимую представительность пробы и несла достаточное количество диагностической информации для достоверной оценки технического состояния узлов маслосистемы авиадвигателя.

В настоящей работе предпринята попытка адаптации подхода, разработанного при диагностировании авиационных ГТД для оценки состояния узлов маслосистемы тепловозного дизеля. Цель работы заключалась в поиске альтернативной, представительной точки отбора пробы, характеристики которой (пробы) не зависят от конструктивных особенностей маслосистемы, внешних температурных условий, а измеренные параметры частиц изнашивания коррелируют с техническим состоянием тепловоза.

В тепловозах для разделения частиц изнашивания и смазочного масла применяются центробежные масляные фильтры (ЦФ).

В процессе эксплуатации тепловоза на стенку ротора ЦФ осаждаются углеродистые отложения и различные частицы изнашивания. Понятно, что отбор пробы со стенки ротора ЦФ устраняет проблемы, связанные с недостаточной представительностью пробы и влиянием температурных и конструктивных факторов.

При оценке состояния дизеля по результатам анализа пробы масла диагностическим признаком является абсолютная величина массовой доли. В исправном дизеле массовая доля характеризует равновесное значение системы и ее увеличение свидетельствует о повышенном износе.

В отличие от анализа проб масла, использование абсолютных значений массовой доли при анализе пробы с ЦФ при диагностировании невозможно связать с техническим состоянием дизеля. Указанные параметры зависят от времени накопления на ЦФ продуктов износа, индивидуальных особенностей дизеля, технологии отбора, степени разбавления пробы и других факторов, которые невозможно учесть в реальной практике. Поэтому нами использовались относительные значения диагностических признаков, рейтинговый подход [5]. Рейтинг частиц износа рассчитывался как количество частиц определенного сорта, приходящихся на 1000 частиц износа.

Работа проводилась на базе СЛД «Зиминское» Иркутской области. На исследование были предоставлены, поступившие в ремонт тепловозы серии ТЭ10 с дизелями 10Д100 и Д49:

1. дизель 10Д100, 2ТЭ10М №3152Б. Были отобраны три пробы из ЦФ (низ, середина, верх) и проба масла из картера. Пробу масла отобрали со сливной трубы картера после слива 10 литров воды и 40 литров густой эмульсии (дизель зашел в ремонт по обводнению);
2. дизель 10Д100, 2ТЭ10М №0441, зашел в депо на плановый ремонт, пробу масла отобрать не было возможности, дизель был без масла;
3. дизель Д49, 2ТЭ10МК №0096. Отобрана «общая» проба из ЦФ и проба масла со сливной трубы картера.

Для отбора проб с ЦФ снимался защитный кожух. Осадок частиц и сажи, как правило, был плотно распределен по внутренней стенке ротора. Толщина слоя осадка могла составлять от 2 до 5см. Пробы для анализа отбирались специальным пробоотборником.

Анализ на СВЧ плазменном анализаторе проводился без специальной подготовки, аликвоты исходной пробы объемом 0,5 $см^3$ вводились в 200 мл «чистого» масла МС-8П. Пробы обрабатывались в УЗ ванне в течение 20 мин, затем анализировались с подбором степени разбавления.

Была проверена неоднородность осаждения частиц изнашивания по высоте ротора. Для этого пробы из ЦФ отбирались из нижней, средней и верхней части ротора. Полученные результаты свидетельствовали, что частицы по высоте ротора распределены достаточно равномерно и отбор пробы на анализ можно производить из любой области ротора.

Одним из важных диагностических признаков является рейтинг общего количества частиц – $R_0(\text{Эл})$ [5]. Рейтинг рассчитывается как отношение количества частиц определенного элемента к общему количеству частиц, зарегистрированного за измерение и нормированного на 1000.

$$R_0(\text{Эл.}) = \frac{n_0(\text{Эл.})}{N_0} \times 1000$$

где $n_0(\text{Эл.})$ – общее число частиц всех типов (составов), содержащих данный элемент, зарегистрированных в пробе за измерение или, что одно и то же, число всех импульсов, зарегистрированных за экспозицию на канале этого элемента;

$N_0$ – число частиц всех типов (составов), зарегистрированных в пробе за измерение.

Из тепловоза 2ТЭ10М №3152Б были отобраны пробы масла с ЦФ и картера дизеля. В табл. 1 приведены значения *R*o для указанных проб.

Табл. 1. Значения параметра $R_o$ в пробах с ЦФ и масла, слитого с картера дизеля тепловоза 2ТЭ10М №3152Б

| $R_o$ | | | |
|---|---|---|---|
| Элемент | 3152Б | | |
| | ЦФ | масло | Cv, % |
| Al | 10,6 | 15,5 | 26,6 |
| Cr | 29,1 | 38,1 | 18,9 |
| Ni | 2,5 | 2,7 | 5,4 |
| Mg | 0 | 0 | - |
| Fe | 766,2 | 734,9 | 2,9 |
| Cu | 185,3 | 195,1 | 3,6 |
| Ag | 0,1 | 4,2 | - |
| V | 0 | 0 | - |
| Mn | 5,8 | 7,5 | 18,1 |
| Mo | 0,3 | 1,3 | - |
| Ti | 0,2 | 0,8 | - |

Отбор пробы масла с картера дизеля считается, согласно ГОСТ 20759-90, эффективной диагностической точкой. При использовании СВЧ плазменного метода количественным значением данной точки являются величины Ro. С другой стороны, рейтинги Ro при отборе пробы с ЦФ должны быть сопоставимы с соответствующими рейтингами пробы масла. В пределах погрешности измерений данное утверждение наблюдается в табл. 1. Видно, что для основных элементов (Al, Cr, Ni, Fe, Cu, Mn) погрешность измерений не превышает 30%. Следовательно, точка отбора пробы с ЦФ может являться альтернативой точке отбора пробы масла с картера дизеля.

Еще одним важным диагностическим признаком является рейтинг «сложных» частиц (частиц, состоящих из двух и более элементов), который рассчитывается как

$$R_0(\text{Эл.}1-\text{Эл.}2-\cdots)=\frac{n_0(\text{Эл.}1-\text{Эл.}2-\cdots)}{N_0}\times 1000$$

где $n_0(\text{Эл.}1-\text{Эл.}2-\cdots)$ – количество частиц определенного состава, зарегистрированных в пробе за измерение; $N_0$ – число частиц всех типов (составов), зарегистрированных в пробе за измерение.

В табл. 2 приведены рассчитанные значения рейтингов для «сложных» частиц дизеля тепловоза 2ТЭ10М №3152Б в пробах, отобранных с ЦФ и картера дизеля. Для пробы с ЦФ, в таблице приведены первые 13 составов «сложных» частиц. Из табл. 2 видно, что ситуация с параметрами «сложных» частиц аналогична с поведением параметра *R*o. Составы «сложных» частиц не только совпадают по значению рейтинга в пределах погрешностей, но и совпадет порядок составов.

Табл. 2. Параметры «сложных» частиц в пробах из ЦФ и пробы масла, отобранных из дизеля тепловоза 2ТЭ10М №3152Б

| 3152Б | | | |
|---|---|---|---|
| ЦФ | | масло | |
| Состав | Рейтинг | Состав | Рейтинг |
| -Fe-Cu | 19,49 | -Fe-Cu | 19,18 |
| -Cr-Fe | 2,78 | -Fe-Mn | 3,74 |
| -Fe-Mn | 2,66 | -Cr-Fe | 2,99 |
| -Ni-Fe | 1,04 | -Cr-Fe-Cu | 2,24 |
| -Al-Fe | 0,63 | -Cr-Fe-Cu-Ag | 1,49 |
| -Al-Cu | 0,54 | -Al-Cu | 1 |
| -Fe-Cu-Mn | 0,38 | -Cr-Cu | 0,75 |
| -Ni-Cu | 0,13 | -Fe-Cu-Ag | 0,75 |
| -Cr-Fe-Cu | 0,13 | -Al-Cr-Fe-Cu-Ag | 0,5 |
| -Ni-Fe-Cu | 0,09 | -Ni-Fe | 0,5 |
| -Cu-Mn | 0,09 | -Al-Cr-Fe-Cu | 0,5 |
| -Cr-Cu | 0,09 | -Ni-Fe-Cu | 0,25 |
| -Fe-Mo | 0,06 | -Fe-Ag | 0,25 |

В табл. 3 приведены сравнительные данные по параметрам частиц изнашивания для исследованных дизелей тепловозов 2ТЭ10М №3152Б (10Д100), 2ТЭ10М №0441 (10Д100) и 2ТЭ10МК №0096 (Д49). Результаты, приведенные в табл. 3, свидетельствуют, что с большой вероятностью в обоих дизелях 10Д100 имеются проблемы с поршневой частью. На это указывают составы Fe-Mn, Ni-Fe, Cr-Fe, а в дизеле №3152Б, кроме поршневой группы, дополнительно велика вероятность повреждения вкладышей коленвала (состав Fe-Cu).

В работе [5] отмечалось, чем большее число зарегистрированных составов «сложных» частиц, тем хуже состояние двигателя. Наибольшее количество составов «сложных» частиц показал дизель тепловоза №0096, G=31 состав.

Дизель Д49 конструктивно принципиально отличается от 10Д100, как более ресурсный. Тем не менее, параметры частиц изнашивания Д49 по сравнению с дизелями 10Д100 отличаются в большую сторону. Больше

зарегистрировано и количество составов «сложных» частиц, G = 31. Отсюда следует, что износ сопряженных деталей, омываемых смазочным маслом Д49 больше, чем у дизелей 10Д100, а состав «сложных» частиц указывает на повышенный износ цилиндропоршневой группы дизеля. По сведениям, полученным из СЛД, в дизеле тепловоза №0096 была произведена замена двух комплектов цилиндропоршневой группы.

Табл. 3. Сравнение параметров «сложных» частиц изнашивания для исследованных дизелей тепловозов №3152Б-10Д100, №0441 -10Д100 и №0096- Д49

| 3152Б - 10Д100 | | 0441 - 10Д100 | | 0096 - Д49 | |
|---|---|---|---|---|---|
| Состав | Рейтинг | Состав | Рейтинг | Состав | Рейтинг |
| -Fe-Cu | 19,49 | -Fe-Cu | 6,87 | -Cr-Ni | 11,09 |
| -Cr-Fe | 2,78 | -Fe-Mn | 3,12 | -Cr-Fe | 9,29 |
| -Fe-Mn | 2,66 | -Ni-Fe | 1,28 | -Fe-Mn | 5,48 |
| -Ni-Fe | 1,04 | -Cr-Fe | 0,35 | -Cr-Ni-Fe | 3,43 |
| -Al-Fe | 0,63 | -Al-Cu | 0,28 | -Fe-Cu | 2,91 |
| -Al-Cu | 0,54 | -Fe-Cu-Mn | 0,21 | -Ni-Fe | 1,28 |
| -Fe-Cu-Mn | 0,38 | -Cr-Ni-Mo | 0,07 | -Cr-Fe-Mn | 0,9 |
| -Ni-Cu | 0,13 | -Fe-Mo | 0,07 | -Al-Fe | 0,34 |
| -Cr-Fe-Cu | 0,13 | -Cr-Ni | 0,07 | -Cr-Ni-Mo | 0,3 |
| -Ni-Fe-Cu | 0,09 | -Cr-Fe-Mn | 0,07 | -Al-Cu | 0,26 |
| -Cu-Mn | 0,09 | -Cu-Ag | 0,07 | -Fe-Mo | 0,21 |
| -Cr-Cu | 0,09 | -Al-Mn | 0,07 | -Cr-Ni-Fe-Mn | 0,21 |
| -Fe-Mo | 0,06 | | | -Ni-Mo | 0,13 |
| G = 22 | | G = 12 | | G = 31 | |

Таким образом, предложена точка отбора пробы с центробежного фильтра тепловоза на СВЧ плазменный анализ для оценки состояния узлов маслосистемы. Данная точка позволяет исключить (снизить) влияния, связанные недостаточной представительностью анализируемой пробы. Разработана конструкция пробоотборника, методика отбора с ротора ЦФ и методика пробоподготовки для проведения анализа на СВЧ плазменном анализаторе. Показано, что частицы по высоте ротора распределены достаточно равномерно и отбор пробы на анализ можно производить из любой области ротора. Показано, что параметры частиц в пробе масла, в пределах погрешности измерений, соответствуют параметрам частиц в пробе с центрифуги. Это означает, что проба, отобранная с ЦФ является эффективной альтернативой пробе масле, слитой с картера дизеля. Предложено использовать значение рейтинга «сложных» частиц в качестве количественной

оценки степени повреждения узла и продемонстрировано, что «сложные» частицы позволяют идентифицировать поврежденный узел дизеля.

**Список литературы**


1. Минаков, В. А. Совершенствование технологии диагностирования тепловозного дизеля по результатам контроля содержания продуктов износа в моторном масле : автореф. дис. … канд. техн. наук : 05.22.07 / Минаков Виталий Анатольевич ; Омский техн. ун-т путей сообщения (ОмГУПС (ОмИИТ). – Омск, 2019. – 19 с.
2. СВЧ плазменный атомно-эмиссионный спектральный способ диагностирования тепловозных дизелей по параметрам частиц изнашивания / В. Г. Дроков, В. В. Дроков, В. В. Мурыщенко, А. А. Кузнецов, Л. И. Докалов // Приборы и методы измерений, контроля качества и диагностики в промышленности и на транспорте: материалы VI всероссийской научно-технической конференции с международным участием / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2025. – С. 31-37
3. Атомно-эмиссионный сцинтилляционный анализатор для комплексного измерения параметров металлических частиц в смазочном масле двигателей внутреннего сгорания (ДВС) /Дроков В.Г., Дроков В.Вл., Мурыщенко В.В., Скудаев Ю.Д. // Современные методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов: метериалы 6-й Международной научно-технической конференции / Иркутский нац. исслед. техн. ун-т. – Иркутск, 2017. – С. 222-230.
4. Техническая справка №44-517141. Двигатели Д-30КП/КУ/КУ154, имевшие неисправности узлов и агрегатов, омываемых маслом, при контроле сцинтилляционным методом за период 2000–2007. – Рыбинск, ПАО "НПО "САТУРН", 2008. – 15 с.
5. Дроков, В. Г. Повышение достоверности диагностирования ГТД сцинтилляционным методом с целью снижения рисков возникновения чрезвычайных ситуаций при эксплуатации воздушных судов : автореф. дис. … д-ра техн. наук : 05.22.14, 05.26.02 / Дроков Виктор Григорьевич ; ГосНИИГА. – М., 2009. – 42 с.



**Контакты:**
spectrosib@gmail.com (Дроков Виктор Григорьевич)
drokovviktor@yandex.ru (Дроков Виктор Владиславович)
kadm0909@gmail.com (Казмиров Александр Дмитриевич)
kuznetsovaa.omgups@gmail.com (Кузнецов Андрей Альбертович)
spectrosib@gmail.com (Мурыщенко Владимир Валерьевич)

УДК 629.424:543.42

***В.Г. ДРОКОВ***[1]*, д-р техн. наук*
***В.В. ДРОКОВ***[2]*, канд. техн. наук*
***А.Д. КАЗМИРОВ***[1]*, канд. физ-мат. наук*
***В.В. МУРЫЩЕНКО***[3]*, канд. техн. наук*
[1]Иркутский государственный университет (Иркутск, Россия)
[2]Байкало-Амурский институт железнодорожного транспорта (Тында, Россия)
[3]ООО «ЦСД-ТМХ» (Москва, Россия)

# МОДЕЛИРОВАНИЕ НАКОПЛЕНИЯ ЧАСТИЦ ИЗНАШИВАНИЯ В МАСЛОСИСТЕМЕ ТЕПЛОВОЗНЫХ ДИЗЕЛЕЙ МЕТОДОМ МОНТЕ-КАРЛО

**Аннотация:** в работе рассматривается имитационное моделирование процесса накопления частиц износа в маслосистеме тепловозного дизеля с учетом источников, стоков и параметров фильтрующей системы. Показано, что при типичных значениях параметров модели, характерных для реальных тепловозных дизелей отсутствуют стационарные решения для значений массовой доли металлической примеси. Основная масса частиц износа оседает на маслофильтре (ах) и для корректного диагностирования технического состояния необходимо анализировать частицы износа, накопленные на масляном фильтре.

**Ключевые слова:** математическое моделирование, частицы изнашивания. накопление частиц изнашивания на маслофильтре, массовая доля, тепловозный дизель, распределение частиц по размерам, маслофильтр, метод Монте-Карло.

При диагностировании технического состояния тепловозных дизелей используют результаты спектрального анализа масла на наличие металлической примеси согласно ГОСТ № 20759-90. Данным стандартом определены предельные значения массовой доли основных элементов, когда считается, что дизель имеет повреждение или неисправен и необходимо проводить его техническое обслуживание. Например, предельными значениями являются содержания железа Fe 300 г/т и меди Cu 100 г/т. С учетом того, что объем маслосистемы дизеля может составлять порядка 1000 л, то масса частиц изнашивания накопленных во всем объеме масла будет около 300 г. Принимая во внимание, что основная масса крупных частиц будет улавливаться системами очистки масла, то накопленная на фильтре масса частиц износа будет еще больше. При таких содержаниях это будет эквивалентно катастрофическому износу деталей дизеля. Для оценки достоверности диагностирования технического состояния по параметру массовой доли металлов в масле, проведено имитационное моделирование методом Монте-Карло процесса накопления частиц износа в маслосистеме тепловозных дизелей. Такое моделирование ранее было успешно применено для авиационных газотурбинных двигателей [1].

Краткая постановка задачи. Рассматривается упрощенная маслосистема дизеля, состоящая из картера, маслонасоса и фильтра. Маслонасос прокачивает масло через трущиеся детали, которые генерируют частицы изнашивания

(источник), которые в свою очередь, попадают на фильтр и с некоторой вероятностью проходят сквозь него или оседают на нем. В процессе работы дизеля происходит уменьшение объема масла за счет выгорания и выдавливание через уплотнительные элементы, что приводит к удалению частиц износа из маслосистемы (сток). При достижении объема масла минимального значения, происходит долив чистого масла, не содержащего частиц износа, что приводит к уменьшению массовой доли.

Частицы изнашивания генерируются случайным образом по заданной функции распределения по размерам до достижения определенной суммарной массы определяемой из скорости износа деталей и скорости прокачки масла и описываются выражением (1)

$$P(D,\mu,\sigma)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma D}e^{-\left(\frac{(\ln(D)-\mu)^2}{2\sigma^2}\right)} \quad (1)$$

где: $D$ – размер частиц, $\mu=\ln\left(D_{\mu}\right)$ и $\sigma=\ln\left(D_{\sigma}\right)$.

Процесс генерации частиц износа описывался функцией распределения по размерам, имеющий логнормальный вид. Данный статистический закон распределения дискретной примеси подтверждается многочисленными исследователями и экспериментальными данными [2].

Фильтрация частиц описывается вероятностным процессом (Гауссовым фильтром), который задает вероятность прохождения фильтра частицами определенного размера:

$$F(D,D_{\mu}^{\phi},D_{\sigma}^{\phi})=1-\int_{-\infty}^{D}\frac{1}{\sqrt{2\pi}D_{\sigma}^{\phi}}e^{-\left(\frac{\left(x-D_{\mu}^{\phi}\right)^2}{2(D_{\sigma}^{\phi})^2}\right)}dx, \quad (2)$$

где $D_{\mu}^{\phi}$ - средний диаметр ячеек фильтра, а $(D_{\sigma}^{\phi})^2$ - их дисперсия.

Для проведения имитационного моделирования были заданы входные параметры, разделенные на две группы – известные и неизвестные.

К известным параметрам модели относятся:

Объем масла в маслосистеме дизеля V, значение этого параметра задавали равным 1000 л. Скорость прокачки масла W, согласно [3] скорость прокачки составляет порядка 500 л/мин, т.е. за 2 минуты все масло в маслосистеме пройдет через систему фильтрации. Скорость выдавливания и выгорания масла WO, его значение можно рассчитать по объему доливаемого масла и времени проведение ТО. Типично доливают 50-100 литров масла через 72 часа работы дизеля, соответственно WO будет в диапазоне 10-25 мл/мин [3]. Время накопления частиц износа Т задавали равным 4000 минут работы дизеля.

К неизвестным параметрам относятся:

Параметры логнормального распределения генерируемых износных частиц $D_{\mu}$ и $D_{\sigma}$. Из анализа распределения частиц изнашивания в пробах масла и на фильтре, проведенного на электронном микроскопе, приблизительно значения будут в диапазонах $D_{\mu}$- 20-100 мкм, $D_{\sigma}$. 2-5 мкм. Параметры фильтрующей

системы $D_{\mu}^{\phi}$ - средний диаметр ячеек фильтра, и $(D_{\sigma}^{\phi})^2$- их дисперсия. Из тех же данных, полученных на электронном микроскопе, их величины находятся в диапазонах $D_{\mu}^{\phi}$ 40-100 мкм, $D_{\sigma}^{\phi}$ 2-5 мкм. Скорость генерации частиц износа VM. Значение скорости можно, оценить, очень грубо, по предельному содержанию железа 300 г/т, накопленному за время между ТО 72 часа в объеме маслосистемы 1000 л. Получается скорость поступления примеси VM~ 10-100 мг/мин.

Моделирование проведено в несколько этапов. На первом этапе была оценена скорость уменьшения массовой доли железа за счет оседания частиц на фильтре с исходной 300 г/т при отсутствии источника и стока частиц со следующими параметрами $D_{\mu}$ = 80 мкм, $D_{\sigma}$ = 5 мкм, $D_{\mu}^{\phi}$ = 80 мкм, $D_{\sigma}^{\phi}$ = 5 мкм (рис.1). Меньше чем за один час исходное содержание уменьшается на порядок, а за 100 мин уменьшается с 300 г/т до 12 г/т. Это говорит о том, что система фильтрации эффективно удаляет крупные частицы, оставляя в системе только мелкие частицы до 20 мкм. Для объяснения большей концентрации необходимо задавать источник частиц.

На втором этапе проведен учет источника за счет износа и стока частиц за счет выдавливания и выгорания масла (рис. 2). Заданы следующие значения источника и стока: WO 25 мл/мин, VM 100 мг/мин, T 4000м.

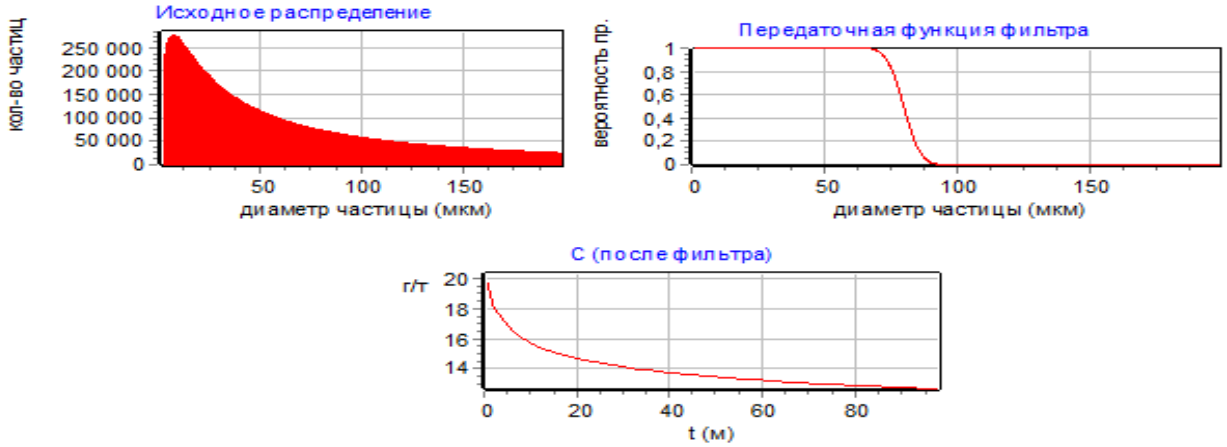



Рис.1. Скорость уменьшения массовой доли железа за счет оседания частиц на фильтре

За 72 часа, при максимальной скорости поступлении примеси, итоговая массовая доля в масле составила всего 23 г/т. Все время происходило только увеличение массовой доли без достижения стационарного значения, кроме момента времени 2000 мин, когда в систему было долито 50 литров чистого масла, и массовая доля упала с 17,5 г/т до 16,6 г/т. За 4000 мин на фильтре накопилось 670 г частиц износа со средним размером около 100 мкм и выдавлено или выгорело 16 г. В результате основная масса частиц износа осела на фильтре, а в масле накопилось всего 23 г со средним размером 20 мкм.

Из этого результата следует вывод, что по массовой доле металлической примеси в пробе масла невозможно провести корректный учет износа деталей. Основная диагностическая информация находится в частицах износа на

фильтре. Похожие результаты получились и для других значения параметров модели. Предельное содержание 300 г/т не достижимо, что не раз показано в результатах ХТЛ, впрочем, как и в самом ГОСТе, при адекватных значениях источника и стока части износа.

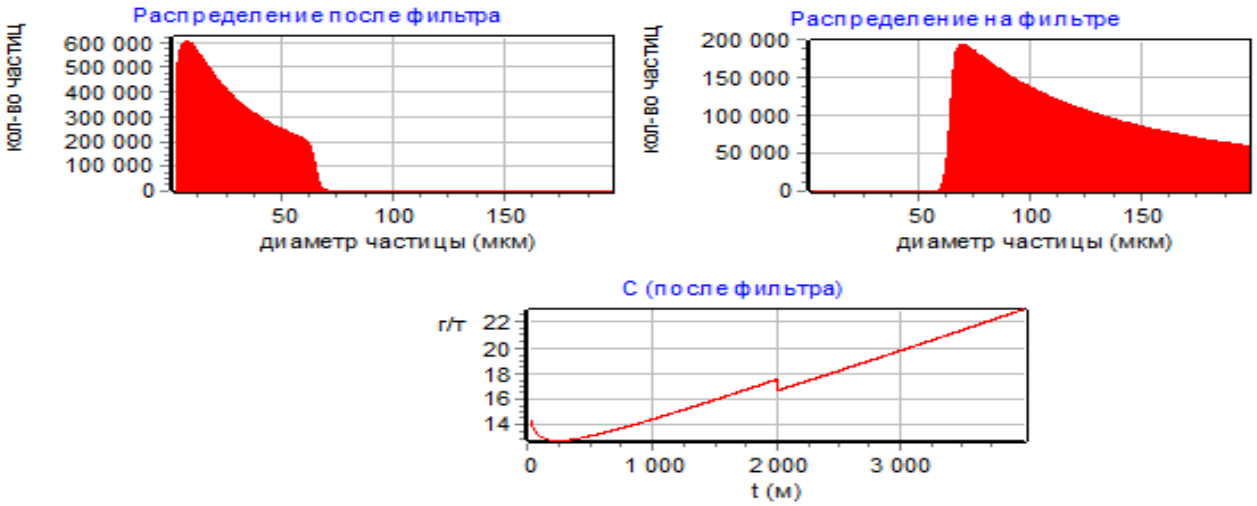



Рис.2. Распределение частиц по размерам после фильтрации, уловленных фильтром и изменение массовой доли в картере дизеля.

Таким образом, результаты моделирования показали, что величина массовой доли металлической примеси в маслосистеме тепловозных дизелей не может быть использована для корректной оценки технического состояния тепловозного дизеля. Равновесное содержание примеси, особенно ее предельное значение не достижимо в реальных условиях эксплуатации. Основная масса частиц износа оседает на фильтре и для оценки технического состояния дизеля необходимо анализировать пробу, отобранную с маслофильтра.

**Список литературы**

1. Моделирование процессов фильтрации металлической дискретной примеси в маслосистеме ГТД методом Монте-Карло / В.Г. Дроков, В.В. Дроков, А.Д. Казмиров, А.Ю. Ходунаев // Научный вестник ГосНИИ ГА. – 2019. – № 27. – С. 96-107.

2. Дроков, В.В. Метод диагностирования технического состояния узлов трения на всех этапах жизненного цикла авиационных ГТД по параметрам частиц изнашивания : автореф. дис. канд. техн. наук : 2.9.6 / Дроков Виктор Владиславович ; Моск. техн. ун-т гражданской авиации (МГТУГА). – М., 2026. – 18 с.

3. Минаков, В. А. Совершенствование технологии диагностирования тепловозного дизеля по результатам контроля содержания продуктов износа в моторном масле : автореф. дис. канд. техн. наук : 05.22.07 / Минаков Виталий Анатольевич ; Омский техн. ун-т путей сообщения (ОмГУПС (ОмИИТ). – Омск, 2019. – 19 с.

Контакты:
spectrosib@gmail.com (Дроков Виктор Григорьевич)
drokovviktor@yandex.ru (Дроков Виктор Владиславович)
kadm0909@gmail.com (Казмиров Александр Дмитриевич)
dl-lr@yandex.ru (Мурыщенко Владимир Валерьевич)

УДК 620.1:678.067

***Ю. С. ДУБИНОВ**, канд. техн. наук, доц.*
***Р. Р. СЕЛЕЗНЕВА***
***В. А. ЯСАШИН**, д-р техн. наук, проф.*
Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) им. И.М. Губкина (Москва, Россия)

# ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ФАКТОРОВ НА ПРОЧНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

**Аннотация.** В данной работе рассмотрено влияние эксплуатационных и структурных факторов на прочностные характеристики неметаллических композиционных материалов, применяемых для изготовления труб в нефтегазовом секторе. В качестве исследуемого материала выбраны углепластик и стеклопластик. Проанализированы факторы, связанные с типом материала, количеством армирующих слоев, углом ориентации волокон и кислотностью эксплуатационной среды. Для оценки совместного влияния факторов использован смешанный факторный эксперимент $2x3^3$. По результатам обработки данных построена регрессионная модель второго порядка, проведена проверка значимости коэффициентов по критерию Стьюдента и проверка адекватности модели по критерию Фишера. Полученная модель позволяет прогнозировать качественные характеристики материалов и является инструментом управления качеством.

**Ключевые слова:** неметаллические композиционные материалы, стеклопластик, углепластик, прочность, факторный эксперимент, управление качеством.

В нефтегазовой отрасли интерес к неметаллическим композиционным материалам связан с необходимостью повышения надежности трубопроводных систем, работающих в агрессивных средах. Для промысловых трубопроводов характерно взаимодействие не только с нефтью, но и пластовыми водами, растворами солей и средами с различной кислотностью. В таких условиях традиционные металлические трубы подвержены коррозионному разрушению, тогда как композиционные материалы обладают более высокой химической стойкостью.

Однако применение неметаллических композитов имеет свои особенности. Прочность таких материалов зависит не только от типа армирующего наполнителя и полимерной матрицы, но и от структуры армирования. На качественные характеристики могут заметно влиять количество слоев, угол ориентации волокон, качество пропитки и условия эксплуатации.

В данной работе прочностные характеристики стеклопластика и углепластика исследовались с применением смешанного полного факторного эксперимента. Данный план эксперимента позволяет оценить влияние не только каждого фактора, но и выявить их взаимодействия. В качестве факторов рассматривались тип материала, количество армирующих слоев, угол ориентации волокон и кислотность среды. Основным выходным параметром является предел прочности при растяжении.

## Материалы и методика исследования

В качестве объектов исследования были выбраны два типа неметаллических композитных материалов – стеклопластик (С) и углепластик (У). Данный выбор связан с тем, что оба материала рассматриваются как перспективные для изготовления труб и элементов трубопроводных систем, работающих в условиях агрессивных сред. Основным контролируемым параметром является предел прочности при растяжении. Все образцы после выдержки с различной комбинацией факторов испытывались на универсальной разрывной машине *Shimadzu AG-Xplus*.

$$\sigma_к = \frac{F}{A}, \quad (1)$$

где: $\sigma_к$ – предел прочности при растяжении, МПа; $F$ – максимальная нагрузка, зарегистрированная в момент разрушения образца, $H$; $A$ – площадь поперечного сечения рабочей части образца, мм².

Для оценки влияния на прочность были выбраны следующие факторы (табл. 1).

Табл. 1. Уровни факторов эксперимента

| **Фактор/ Уровень фактора** | **Материал (*X*1)** | **Количество слоев (*X*2)** | **Угол поворота волокна (*X*3)** | **Кислотность среды *CH3COOH* (*X*4)** |
|---|---|---|---|---|
| -1 | С | 10 | 0 | pH3 |
| 0 | - | 15 | 45 | pH5 |
| +1 | У | 20 | 90 | pH7 |

Для обработки результатов использовался смешанный полный факторный эксперимент $2x3^3$. Такой план включает 54 сочетания уровней факторов. Для каждого сочетания было выполнено три повторных испытания, что составило 162 результата. Полученные данные представлены в таблице 2.

После проведения полного комплекса испытаний была выполнена обработка полученных данных и построена регрессионная модель, описывающая изменение предела прочности в зависимости от исследуемых факторов. Коэффициенты регрессии определялись методом наименьших квадратов

$$\begin{aligned}\sigma = {} & 277{,}72 + 67{,}62x_1 + 15{,}95x_2 - 17{,}32x_3 + 31{,}69x_4 + 6{,}19x_1x_2 \\ & - 4{,}77x_1x_3 - 23{,}42x_1x_4 - 1{,}21x_2x_3 + 1{,}39x_2x_4 - 1{,}70x_3x_4 \\ & + 2{,}18x_2^2 - 3{,}51x_3^2 + 6{,}44x_4^2 - 0{,}33x_1x_2x_3 - 1{,}60x_1x_2x_4 \\ & + 1{,}23x_1x_3x_4 - 3{,}65x_1x_2^2 - 69{,}10x_1x_3^2 + 26{,}32x_1x_4^2\end{aligned} \quad (2)$$

Для оценки устойчивости результатов эксперимента была определена дисперсия воспроизводимости.

Табл. 2. Результаты эксперимента

| **№ опыта** | ***X*1** | ***X*2** | ***X*3** | ***X*4** | **Предел прочности, *МПа* (1)** | **Предел прочности, *МПа* (2)** | **Предел прочности, *МПа* (3)** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | -1 | -1 | -1 | -1 | 193,6 | 208,12 | 194,57 |
| 2 | -1 | -1 | -1 | 0 | 273,06 | 293,54 | 274,43 |
| 3 | -1 | -1 | -1 | +1 | 310,39 | 333,67 | 311,94 |
| 4 | -1 | -1 | 0 | -1 | 129,71 | 119,33 | 139,44 |
| 5 | -1 | -1 | 0 | 0 | 182,95 | 168,31 | 196,67 |
| 6 | -1 | -1 | 0 | +1 | 207,96 | 191,32 | 223,56 |
| 7 | -1 | -1 | +1 | -1 | 176,18 | 177,06 | 189,39 |
| 8 | -1 | -1 | +1 | 0 | 248,48 | 249,72 | 267,12 |
| 9 | -1 | -1 | +1 | +1 | 282,45 | 283,86 | 303,63 |
| 10 | -1 | 0 | -1 | -1 | 209,09 | 192,36 | 224,77 |
| 11 | -1 | 0 | -1 | 0 | 294,90 | 271,31 | 317,02 |
| 12 | -1 | 0 | -1 | +1 | 335,22 | 308,40 | 360,36 |
| 13 | -1 | 0 | 0 | -1 | 140,09 | 140,79 | 150,60 |
| 14 | -1 | 0 | 0 | 0 | 197,59 | 198,58 | 212,41 |
| 15 | -1 | 0 | 0 | +1 | 224,60 | 225,72 | 241,45 |
| 16 | -1 | 0 | +1 | -1 | 190,27 | 192,17 | 202,64 |
| 17 | -1 | 0 | +1 | 0 | 268,36 | 271,04 | 285,80 |
| 18 | -1 | 0 | +1 | +1 | 305,05 | 308,10 | 324,88 |
| 19 | -1 | +1 | -1 | -1 | 222,64 | 239,34 | 223,75 |
| 20 | -1 | +1 | -1 | 0 | 314,02 | 337,57 | 315,59 |
| 21 | -1 | +1 | -1 | +1 | 356,95 | 383,72 | 358,73 |
| 22 | -1 | +1 | 0 | -1 | 149,17 | 137,24 | 160,36 |
| 23 | -1 | +1 | 0 | 0 | 210,39 | 193,56 | 226,17 |
| 24 | -1 | +1 | 0 | +1 | 239,16 | 220,03 | 257,10 |
| 25 | -1 | +1 | +1 | -1 | 202,60 | 204,63 | 215,77 |
| 26 | -1 | +1 | +1 | 0 | 285,76 | 288,62 | 304,33 |
| 27 | -1 | +1 | +1 | +1 | 324,82 | 328,07 | 345,93 |
| 28 | +1 | -1 | -1 | -1 | 295,66 | 297,14 | 317,83 |
| 29 | +1 | -1 | -1 | 0 | 273,06 | 274,43 | 293,54 |
| 30 | +1 | -1 | -1 | +1 | 310,9 | 312,45 | 334,22 |
| 31 | +1 | -1 | 0 | -1 | 342,97 | 368,69 | 344,68 |
| 32 | +1 | -1 | 0 | 0 | 316,75 | 340,51 | 318,33 |
| 33 | +1 | -1 | 0 | +1 | 360,64 | 387,69 | 362,44 |
| 34 | +1 | -1 | +1 | -1 | 254,27 | 255,54 | 273,34 |
| 35 | +1 | -1 | +1 | 0 | 234,83 | 236,00 | 252,44 |
| 36 | +1 | -1 | +1 | +1 | 267,37 | 268,71 | 287,42 |
| 37 | +1 | 0 | -1 | -1 | 319,31 | 322,50 | 340,07 |
| 38 | +1 | 0 | -1 | 0 | 294,90 | 297,85 | 314,07 |
| 39 | +1 | 0 | -1 | +1 | 335,77 | 339,13 | 357,60 |
| 40 | +1 | 0 | 0 | -1 | 370,40 | 340,77 | 398,18 |
| 41 | +1 | 0 | 0 | 0 | 342,09 | 314,72 | 367,75 |
| 42 | +1 | 0 | 0 | +1 | 389,50 | 358,34 | 418,71 |
| 43 | +1 | 0 | +1 | -1 | 274,61 | 295,21 | 275,98 |
| 44 | +1 | 0 | +1 | 0 | 253,62 | 272,64 | 254,89 |
| 45 | +1 | 0 | +1 | +1 | 288,76 | 310,42 | 290,20 |

Продолжение Табл. 2. Результаты эксперимента

| № опыта | *X*1 | *X*2 | *X*3 | *X*4 | Предел прочности, *МПа* (1) | Предел прочности, *МПа* (2) | Предел прочности, *МПа* (3) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 46 | +1 | +1 | -1 | -1 | 340,01 | 341,71 | 365,51 |
| 47 | +1 | +1 | -1 | 0 | 314,02 | 315,59 | 337,57 |
| 48 | +1 | +1 | -1 | +1 | 357,53 | 359,32 | 384,34 |
| 49 | +1 | +1 | 0 | -1 | 394,41 | 362,86 | 423,99 |
| 50 | +1 | +1 | 0 | 0 | 364,26 | 335,12 | 391,58 |
| 51 | +1 | +1 | 0 | +1 | 414,74 | 381,56 | 445,85 |
| 52 | +1 | +1 | +1 | -1 | 292,41 | 314,34 | 293,87 |
| 53 | +1 | +1 | +1 | 0 | 270,06 | 290,31 | 271,41 |
| 54 | +1 | +1 | +1 | +1 | 307,48 | 330,54 | 309,02 |

Дисперсия отдельного опыта вычислялась по выражению:

$$S_i^2 = \frac{\sum_{j=1}^{m}(y_{ij} - \bar{y}_i)^2}{m-1} \quad (3)$$

где: $y_{ij}$ – результат отдельного испытания; $\bar{y}_i$ – среднее значение по серии испытаний; $m$ – число повторений.

Средняя дисперсия воспроизводимости определялась как

$$S_y^2 = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} S_i^2 \quad (4)$$

В результате расчётов получено: $S_y$ = 28,05 МПа. Полученное значение свидетельствует о приемлемой воспроизводимости экспериментальных данных и позволяет использовать их для построения математической модели.

Проверка коэффициентов по критерию Стьюдента показала, что статистически значимыми являются коэффициенты, характеризующие влияние материала, количество армирующих слоёв, угол ориентации волокон, кислотность среды, взаимодействие материала и кислотности среды, взаимодействие материала с квадратичным эффектом ориентации волокон, взаимодействие материала с квадратичным эффектом кислотности среды (табл. 3). Критическое значение критерия определялось для уровня значимости α = 0,05: $t_{кр}$ = 2,03, число степеней свободы $f$ = 35. Наиболее сильный эффект оказывает выбор типа материла (11,3) и кислотность в выдерживаемой среде (7,1).

Табл. 3. Результаты проверки значимости коэффициентов

| $b_0$ | $b_1$ | $b_2$ | $b_3$ | $b_4$ | $b_{14}$ | $b_{133}$ | $b_{144}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 24,8 | 11,3 | 3,6 | 4,2 | 7,1 | 4,9 | 6,4 | 3,8 |

Для оценки пригодности модели была выполнена проверка ее адекватности по критерию Фишера. Дисперсия адекватности определялась по выражению

$$S^2_{\text{ад}} = \frac{m\sum(\hat{y}_i - \bar{y}_i)^2}{N - d} \quad (5)$$

где: m – число повторений эксперимента; $\hat{y}_i$ – значение отклика, рассчитанное по модели; $\bar{y}_i$ – среднее экспериментальное значение отклика; $N$ – количество опытов; $d$ – число коэффициентов регрессионной модели.

Расчётное значение критерия Фишера определялось по формуле:

$$F = \frac{S^2_{\text{адек}}}{S^2_y} \quad (6)$$

где: $S^2_y$ – дисперсия воспроизводимости эксперимента.

В результате расчётов получено $F_{расч}$ = 0,83. Для уровня значимости α = 0,05 и числа степеней свободы $f_1$ = 35, $f_2$ = 108 критическое значение составило $F_{кр}$ = 1,71. Так как $F_{расч} < F_{кр}$, то выполняется условие адекватности модели.

Дополнительно были проведены лабораторные испытания для оценки погрешности между математическими значениями и фактическими. Результаты представлены в таблице 4.

Табл. 4. Выдержка результатов испытаний и математических расчетов

| **№ опыта** | ***X*1** | ***X*2** | ***X*3** | ***X*4** | **Предел прочности, *МПа*** | **Результаты по формуле (2), *МПа*** | **Погрешность, %** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | -1 | -1 | 0 | -1 | 129,49 | 134,17 | 3,61 |
| 2 | -1 | 1 | 0 | -1 | 148,92 | 147,71 | 0,81 |
| 3 | 1 | 0 | 0 | 1 | 388,85 | 386,37 | 0,64 |
| 4 | 1 | 1 | 0 | -1 | 393,75 | 390,71 | 0,77 |
| 5 | 1 | 1 | 0 | 0 | 363,65 | 366,01 | 0,65 |
| 6 | 1 | 1 | 0 | 1 | 414,05 | 406,83 | 1,74 |
| 7 | 1 | 1 | 1 | -1 | 300,21 | 294,94 | 1,75 |
| 8 | 1 | 1 | 1 | 1 | 315,68 | 310,12 | 1,76 |

Сопоставление расчётных значений с экспериментальными показало, что расхождение между ними не превышает 5%.

Практическая ценность полученной модели заключается в возможности прогнозирования прочностных характеристик неметаллических композитных материалов и использования в качестве инструмента управления качеством.

Выводы

Выполненное исследование позволило оценить влияние эксплуатационных и структурных факторов на прочностные характеристики неметаллических композитных материалов, применяемых при изготовлении труб нефтегазового назначения. Наиболее значимыми факторами являются тип композиционного материала и кислотность среды. Проверка по критериям Стьюдента и Фишера подтвердила статистическую состоятельность и адекватность модели. Полученная математическая модель показывает результаты с погрешностью меньше, чем 5%. Данная зависимость может быть использована в качестве инструмента управления качеством при проектировании и производстве изделий из неметаллических композиционных материалов для нефтегазового сектора.

Контакты:
dubinov.y@gubkin.ru (Дубинов Юрий Сергеевич);
gabdullova.r@gubkin.ru (Селезнева Резеда Рафисовна);
yasashin.v@gubkin.ru (Ясашин Виталий Анатольевич).

УДК 331.108

***ЖИВКО А. А.***
***ВОБЛАЯ И. Н.*** *, канд. экон. наук, доцент*

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ ПЕРСОНАЛА В УСЛОВИЯХ ЦИФРОВОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ УПРАВЛЕНИЯ

**Аннотация**. В статье рассмотрены современные подходы к совершенствованию методов контроля персонала. Проанализирована эволюция контрольной функции, выявлены ключевые тенденции, связанные с цифровизацией процессов мониторинга и оценки труда. Особое внимание уделено балансу между технологическими возможностями и необходимостью сохранения доверительных отношений в коллективе. Обоснована важность перехода от контроля поведения к контролю по результатам как ключевого направления совершенствования управленческих подходов.

**Ключевые слова**: контроль персонала, контроллинг, цифровизация управления, оценка эффективности, мониторинг, управление человеческими ресурсами.

Функция контроля является одной из фундаментальных в системе управления любой организацией. Под контролем персонала понимается совокупность процедур, позволяющих руководителю отслеживать эффективность работы сотрудников, анализировать отклонения и на этой

основе корректировать бизнес-процессы [1]. В условиях нарастающей неопределённости, распространения гибридных форматов занятости и стремительного развития цифровых технологий традиционные методы контроля всё чаще обнаруживают свою ограниченность. Массовый переход на удалённую работу лишил руководителя возможности непосредственного наблюдения за трудовым процессом, а развитие средств мониторинга обострило этические дилеммы. Сегодня перед менеджментом стоит задача не просто усилить надзор, а найти такую модель контроля, которая обеспечит управляемость без разрушения доверия и мотивации персонала [2].

Дополнительную сложность создаёт психологический аспект контроля. Исследования в области организационной психологии показывают, что сам по себе факт внешнего оценивания способен менять поведение сотрудника — так называемый хоторнский эффект. В краткосрочной перспективе это может привести к ситуативному росту производительности, однако при длительном и жёстком контроле возникает обратный эффект: работник начинает демонстрировать имитацию бурной деятельности, а не реальную эффективность. В связи с этим при совершенствовании методов контроля необходимо учитывать не только экономическую, но и поведенческую составляющую, выстраивая систему таким образом, чтобы она стимулировала естественную самоорганизацию, а не защитные реакции персонала.

Исторически контроль персонала прошёл путь от прямого физического надзора до сложных социотехнических систем. Классическая школа управления рассматривала его как инструмент проверки соответствия результатов установленным стандартам. Позднее, с развитием школы человеческих отношений, акцент сместился на самоконтроль и вовлечение работников в оценочные процедуры. Сегодня формируется новая парадигма — контроллинг персонала, представляющий собой интегрированную систему информационно-аналитической поддержки кадровых решений. Контроллинг включает оперативное направление, ориентированное на текущие показатели производительности, и стратегическое, нацеленное на долгосрочное развитие кадрового потенциала [4].

Отдельного внимания заслуживает концепция управления по целям (Management by Objectives, MBO), которая органично встраивается в логику контроллинга. В отличие от директивного нормирования, MBO предполагает совместную постановку целей руководителем и подчинённым, что автоматически включает механизмы самоконтроля. Сотрудник, принимавший участие в определении целевых ориентиров, воспринимает последующий контроль не как внешнюю проверку, а как инструмент самопроверки. Практический опыт внедрения MBO в российских компаниях демонстрирует, что такой подход на 15–20% снижает сопротивление контрольным процедурам и одновременно повышает точность оценки вклада каждого работника в общий результат. Именно синтез контроллинга персонала и принципов управления по целям позволяет сформировать ту самую сбалансированную модель, в которой надзор не вступает в конфликт с мотивацией.

Современные методы контроля можно классифицировать по технологической оснащённости. Традиционные инструменты — планёрки, письменные отчёты, регулярные совещания — остаются востребованными, однако всё большую роль играют цифровые решения. Среди них: тайм-трекеры, фиксирующие затраты времени на задачи; DLP-системы, предотвращающие утечки конфиденциальной информации и анализирующие коммуникации сотрудников; видеонаблюдение, обеспечивающее визуальный мониторинг рабочих мест; автоматизированные системы оценки по ключевым показателям (KPI). Наиболее передовые компании внедряют алгоритмы на основе искусственного интеллекта, способные прогнозировать кадровые риски. Однако, по данным опросов, около 80 % организаций пока ограничиваются периодическими отчётами и видеонаблюдением, и лишь 17 % применяют специализированное программное обеспечение для мониторинга [3, 4].

Главный вызов цифровизации контроля связан не с дефицитом технологий, а с их адекватным применением. Избыточный мониторинг, направленный на отслеживание каждого шага работника, воспринимается персоналом как «электронный ошейник», провоцирует сопротивление и рост демотивации [2]. В то же время переход к контролю по результатам — когда оценивается не время пребывания в сети, а качество и своевременность выполнения задач — позволяет сохранить и производительность, и лояльность сотрудников. Таким образом, совершенствование методов должно идти по линии смещения фокуса с поведения на итоговые показатели.

Анализ практики российских компаний позволяет выделить несколько типичных проблем, снижающих эффективность контрольной функции.

Во-первых, во многих организациях контроль носит фрагментарный характер и не интегрирован в общую систему управления. Решение заключается во внедрении методологии контроллинга персонала, обеспечивающей непрерывность и взаимосвязь всех элементов — от сбора данных до принятия управленческих решений [4].

Во-вторых, доминирование субъективных оценок неизбежно порождает конфликты и искажения. Переход к количественно измеримым показателям (KPI) и разработка чётких критериев оценки позволяют сделать контроль более объективным и справедливым [1].

В-третьих, сохраняется перекос в сторону контроля поведения, а не результата. Сотрудники, за которыми установлен тотальный надзор, утрачивают инициативу и быстрее выгорают. Конструктивной альтернативой выступает фокус на итоговых метриках и предоставление персоналу разумной автономии в выборе способов достижения целей [2].

В-четвёртых, серьёзным препятствием является недостаточная информированность работников. Если персонал не понимает целей и механизмов контроля, система воспринимается исключительно как карательный инструмент. Прозрачность процедур, разъяснение того, какие параметры отслеживаются и для чего, существенно снижают сопротивление [1].

В-пятых, цифровые технологии мониторинга создают правовые и этические риски, связанные с защитой персональных данных. Применение DLP-систем и видеоаналитики требует строгого соблюдения законодательства и обязательного уведомления сотрудников [3].

Решение перечисленных проблем видится в поэтапном построении сбалансированной системы контроля. На первом этапе проводится аудит существующих процедур и пилотное тестирование минимального набора измеримых показателей (выработка, качество, дисциплина) на ограниченной группе работников. Уже на этой стадии результаты контроля должны увязываться с конкретными кадровыми решениями — обучением, корректировкой нагрузки, пересмотром мотивации. На втором этапе, по итогам пилота, внедряется специализированное программное обеспечение, соответствующее профилю организации. Принципиально важно, чтобы цифровые инструменты обеспечивали прозрачность именно результатов, а не тотальную слежку за процессом. Параллельно руководители обучаются навыкам конструктивной обратной связи. Третий этап предполагает институционализацию системы: вводятся регулярные циклы оценки — от еженедельного мониторинга ключевых метрик до ежегодного аудита системы в целом. Важным элементом становится вовлечение самих сотрудников в совершенствование контрольных механизмов через опросы и рабочие группы, что превращает контроль из внешнего давления в инструмент саморегуляции коллектива.

Оценка эффективности контроля должна базироваться на ряде критериев: соответствие характеру контролируемого процесса, экономичность, гибкость, ориентация на результат, прозрачность и вовлечённость персонала. Практика показывает, что компании, внедрившие системный подход, фиксируют снижение текучести кадров, рост производительности и сокращение издержек на рекрутинг.

Таким образом, совершенствование методов контроля персонала в современных условиях должно идти не по пути механического наращивания инструментов мониторинга, а в направлении создания прозрачной, объективной и ориентированной на результат системы, основанной на принципах контроллинга и разумного использования цифровых технологий. Дальнейшие исследования целесообразно сосредоточить на разработке отраслевых моделей, учитывающих специфику различных видов деятельности, а также на анализе долгосрочных социально-психологических эффектов цифрового мониторинга.

Наконец, нельзя обойти вниманием и такой аспект, как влияние корпоративной культуры на восприятие контроля. В организациях с высоким уровнем внутреннего доверия даже объективно строгие контрольные механизмы интерпретируются сотрудниками как проявление заботы о качестве общего продукта, тогда как в атмосфере недоверия любая, даже самая мягкая форма мониторинга будет воспринята враждебно. Поэтому внедрение любых технологических новаций - от дашбордов KPI до сложных DLP-систем —

должно сопровождаться параллельной работой с организационной культурой: разъяснением миссии контроля, демонстрацией его полезности для самих работников и последовательным соблюдением руководством заявленных этических принципов. Без этого человеческого измерения любые, даже самые совершенные алгоритмические решения, окажутся лишь дорогостоящей надстройкой, не дающей ожидаемого управленческого эффекта.

**Список литературы**

1. Exolve.ru: [Электронный ресурс]: Как организовать контроль за работой сотрудников: принципы и методы / — 2025. — Режим доступа: https://exolve.ru/blog/kak-organizovat-kontrol-za-rabotoy-sotrudnikov/ — Дата обращения: 02.05.2026.

2. РБК Компании : [Электронный ресурс] : Удалённые команды: как сохранить управляемость без тотального контроля / Автор не указан. — 2026. — Режим доступа: https://companies.rbc.ru/news/zVSiYDGEXG/udalennyie-komandyi-kak-sohranit-upravlyaemost-bez-totalnogo-kontrolya/ — Дата обращения: 02.05.2026.

3. РБК Компании : [Электронный ресурс] : Мониторинг действий сотрудников: защита или слежка / — 2025. — Режим доступа: https://companies.rbc.ru/news/Nra5C217V8/monitoring-dejstvij-sotrudnikov-zaschita-ili-slezhka/ — Дата обращения: 07.05.2026.

4. Коммерсантъ : [Электронный ресурс] : Компании настроились на мониторинг / Автор не указан. — 2025. — Режим доступа: https://www.kommersant.ru/doc/7941948 — Дата обращения: 07.05.2026.

Контакты:
alinazhivko@yandex.ru (Живко Алина Алексеевна)
savinvaav@mail.ru (Воблая Ирина Николаевна)

УДК 620.179.1

**В. О. ЗАПЛЕТНЮК**
***Т. Б. БРЫЛОВА****, канд. техн. наук, доц.*
***Е. В. КОНДРАТЕНКО****, канд. техн. наук, доц.*
Омский государственный университет путей сообщения (Омск, Россия)

## КОМПЛЕКСНЫЙ МАГНИТНЫЙ КОНТРОЛЬ КАК ОСНОВА ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА НАДРЕССОРНЫХ БАЛОК ГРУЗОВЫХ ВАГОНОВ

**Аннотация.** В статье рассмотрена актуальная задача повышения безопасности эксплуатации грузовых вагонов за счёт внедрения методов прогнозирования остаточного ресурса надрессорных балок. На основе анализа конструкции и условий эксплуатации балок типа 18-100 из стали 20ГЛ обоснован переход от констатирующей дефектоскопии к диагностике с элементами прогноза. Показано, что сочетание магнитопорошкового и вихретокового методов с оценкой изменения магнитных характеристик материала позволяет создать параметрическую основу для расчёта остаточного ресурса. Предложена эмпирическая модель прогнозирования, использующая диагностический параметр «тангенс износа», и приведены результаты её апробации в условиях вагонного депо.

**Ключевые слова:** надрессорная балка, грузовые вагоны, магнитопорошковый контроль, вихретоковый контроль, остаточный ресурс, тангенс износа, прогнозирование.

Надрессорная балка модели 18-100 – одна из наиболее ответственных литых деталей тележки грузового вагона. Она воспринимает нагрузки от кузова через подпятник и передаёт их на рессорные комплекты (рис.1.). В эксплуатации динамические нагрузки достигают 25 тс на ось [5]. В зонах концентрации напряжений (углы карманов, радиусы перехода, нижний пояс) возникают усталостные трещины, которые при критическом развитии могут привести к разрушению балки и сходу состава [6].

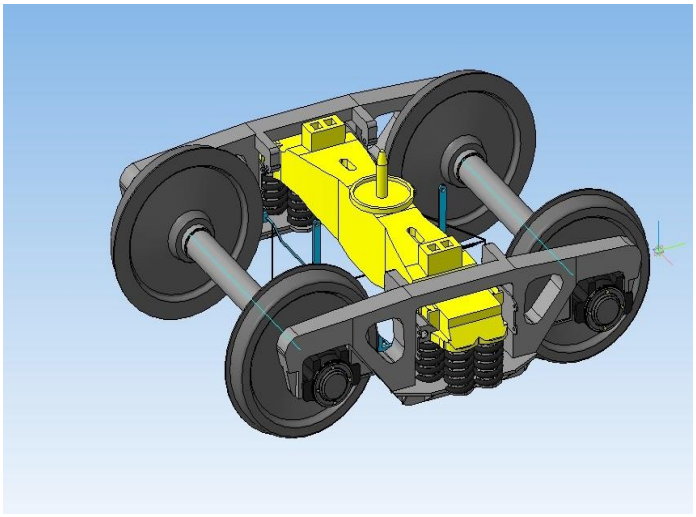


Рис. 1. Надрессорная балка

Существующий магнитный метод контроля выявляет уже возникшие дефекты, но не позволяет прогнозировать остаточный ресурс детали до появления явных трещин. Для перехода к ремонту по фактическому состоянию необходимы диагностические параметры, чувствительные к накоплению повреждений, включая состояние материала, структуру, уровень напряжений и скрытые дефекты.[4]

В работе обосновано применение комплексного магнитного контроля (магнитопорошковый + вихретоковый) для прогнозирования остаточного ресурса надрессорных балок. Сочетание методов повышает точность диагностики и полноту оценки состояния деталей.

– Оба метода требуют доступа к контролируемой поверхности для намагничивания, нанесения индикатора и осмотра.

– Порог чувствительности зависит от шероховатости, зазора и кривизны поверхности.

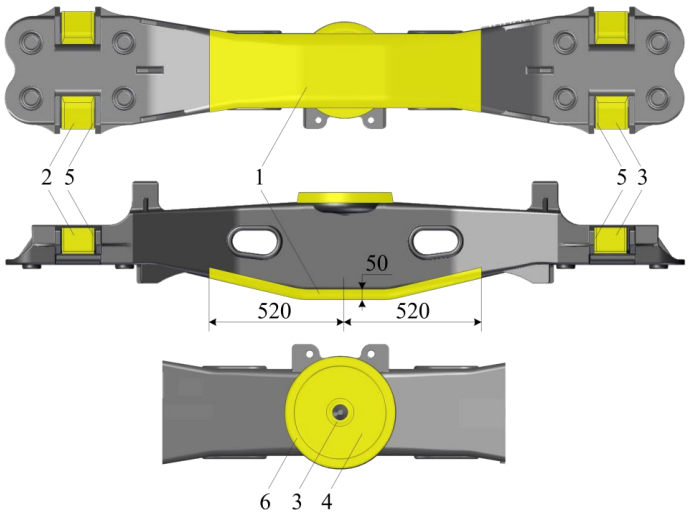
– Оценка остаточного ресурса требует не только выявления дефектов, но и анализа их влияния на прочность и долговечность с учётом условий эксплуатации.

Таким образом, сочетание магнитопорошкового и вихретокового методов позволяет получить более полную картину технического состояния

надрессорных балок и повысить точность прогнозирования их остаточного ресурса.

Рассматриваемая надрессорная балка типа 18-100 имеет длину 1800 мм, ширину 200 мм, высоту 150 мм, массу 120 кг. Материал – сталь 20ГЛ. Согласно требованиям ГОСТ 32400-2013 «Рама боковая и балка надрессорная литые тележек железнодорожных грузовых вагонов. Технические условия», изделия из стали этой марки должны иметь высокие значения прочностных и пластических характеристик: предел текучести не менее 245 МПа, предел прочности ≥500 МПа), относительные удлинение – не менее 20 % и сужение – не менее 30%, ударную вязкость KCU при +20°С не менее 0,50 МДж/м² и при – 60°С не менее 0, 25 МДж/м² , а KCV при – 60°С ( $А_{KCV}$) не менее 0,15 МДж/м². Такие свойства достигаются за счёт мелкодисперсной феррито-перлитной структуры и отсутствия грубых карбидных сеток и неметаллических включений [2].

Основные зоны контроля: нижний пояс, карманы для рессорных комплектов, радиусы перехода, подпятник (рис.2). Согласно ГОСТ 32699-2014 «Рама боковая и балка надрессорная литые трёхэлементных двухосных тележек грузовых вагонов железных дорог колеи 1520 мм. Методы неразрушающего контроля», ПР НК В.3-2013 «Правила неразрушающего контроля деталей тележек грузовых вагонов при ремонте. Специальные требования» Методы НК должны обеспечивать выявление дефектов, в том числе обязательным является визуально-измерительный и магнитопорошковый контроль поверхностных трещин [1, 3].




1 – нижний пояс и прилегающие участки боковых поясов; 2 – наклонная плоскость для клина; 3 – внутренний бурт подпятника; 4 – опорная поверхность подпятника; 5 – угол между ограничительным буртом и наклонной плоскостью; 6 – наружный бурт подпятника.

Рис. 2. Зоны обязательного НК надрессорной балки

Магнитопорошковый контроль выполняется в соответствии с требованиями ПР НК В1, ПР НК В.3, ТИ НК В.31-2-2023 способом приложенного поля с помощью переносных электромагнитов (портативный

приставной электромагнит типа МЭД-120 (ТУ 4276-012-01124336-2001), МЭМ-9 (ТУ 4276-003-30241810-2011), МСН 20.36 (МКИЯ.427631.050 ТУ), Magnaflux серии: Y1, Y2, Y6 или Y7) с использованием КМС ДИАГМА 1200 ТУ 2662-003-41086427-97 (30 ± 5) г до 1 л водопроводной воды [3].

Следует отметить, что действующая нормативно-техническая документация не предусматривает количественной оценки изменения магнитных характеристик стали в процессе эксплуатации и не содержат критериев прогнозирования остаточного ресурса [4].

Реальная деповская статистика наглядно иллюстрирует эту нормативную недоработку: как показывают отчетные показатели и собственные наблюдения в депо Омск-Сортировочный за 2025 год, из 2000 балок, прошедших неразрушающий контроль, 11% (220) забраковано, 24% (480) направлено в ремонт наплавкой (при глубине дефекта не более 30% толщины), 65% (1300) признаны годными (рис. 3). Следовательно, большинство деталей эксплуатируются до появления явных дефектов, а возможность раннего прогнозирования их остаточного ресурса остаётся нереализованной.

Для восполнения этого пробела в работе вводится параметр «тангенс износа». Физический смысл параметра связан со скоростью деградации магнитной структуры стали под циклическими нагрузками, служит важным инструментом в диагностике усталостного состояния сталей.

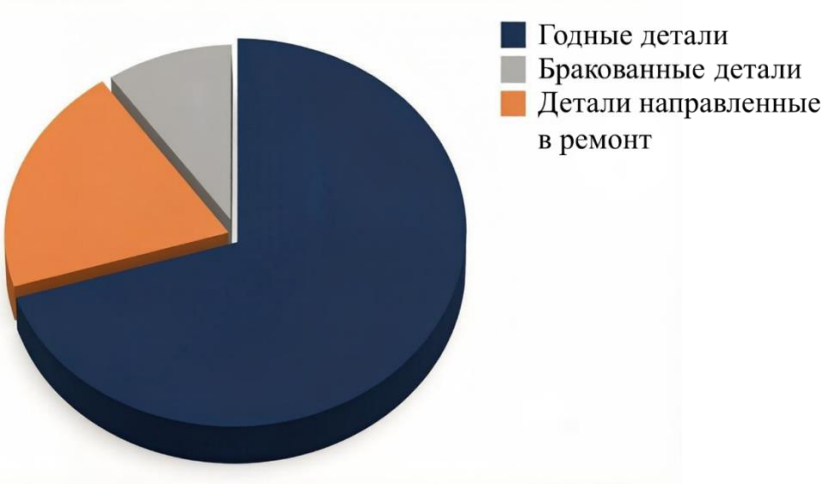



Рис. 3. Результаты контроля надрессорных балок

При циклическом нагружении ферромагнетика изменяются его коэрцитивная сила и магнитная проницаемость вследствие развития дислокационной структуры и микропластических деформаций в зонах, предшествующих образованию макротрещины. Предлагается следующее определение

$$\mathrm{tg}(\delta) = \frac{\Delta\mu}{\mu_0 \Delta\varepsilon}, \tag{1}$$

где $\Delta\mu/\mu$ – относительное изменение магнитной проницаемости;

$\Delta\varepsilon$ – накопленная пластическая деформация, оцениваемая по твёрдости или пробегу.

Комплексный метод контроля включает два этапа [7]. Первый этап – стандартный магнитопорошковый контроль по ГОСТ 56512-2015 и ГОСТ 32699-2014 с использованием намагничивающего устройства МЭМ-9. Цель – выявление имеющихся трещин и определение состояния «годен/ремонт/брак». Второй этап – измерение относительного изменения магнитной проницаемости вихретоковым дефектоскопом (например, ВД-12НФ) в контрольных точках, свободных от дефектов. Измерения проводят на нижнем поясе и в районе углов карманов на частотах 10 и 100 кГц. Сравнение с паспортными значениями (или результатами предыдущих контролей) позволяет оценить степень накопленной усталостной повреждаемости.

Апробация методики проведена в период 2026 года на базе вагонного ремонтного депо Омск-Сортировочный. Обследовано 24 надрессорные балки различных годов выпуска (1998–2023) с известной наработкой. Для каждой балки фиксировали год выпуска, пробег, результаты МПК, значения $\Delta\mu/\mu$ полученные вихретоковым методом, и дальнейшую судьбу (годна, ремонт, брак). Предварительный анализ показал корреляционную связь между изменением магнитной проницаемости и остаточным ресурсом: при увеличении $\Delta\mu/\mu$ более чем на 15 – 20% от исходного уровня вероятность образования усталостной трещины в ближайшие два года превышает 70%.

На основе измерений получены усреднённые значения тангенса износа на пробеге 200 тыс. км вихретоковым методом на частоте 10 кГц (табл. 1).

Табл.1. Результаты и модель прогнозирования остаточного ресурса

| Группа балок (год выпуска) | Средний $\mathrm{tg}(\delta)$ отн. ед. | Доля балок с трещинами, % |
|---|---|---|
| 1996–2000 | 0,11 | 2% |
| 2006–2010 | 0,17 | 8% |
| 2016–2020 | 0,23 | 15% |
| 2021–2025 | 0,27 | 22% |

Современные балки имеют повышенные значения $\mathrm{tg}(\delta)$ уже при малых пробегах, что объясняется оптимизацией массы и повышением рабочих напряжений до 25 тонн без адекватного увеличения усталостной прочности.

Критическое значение $\mathrm{tg}(\delta)$, при котором вероятность разрушения превышает 50%, принято равным 0,40 (определено по наблюдениям для забракованных балок). Начальное значение $\mathrm{tg}(\delta)$ для новой балки составляет 0,08. Остаточный ресурс по пробегу $L_{\text{ост}}$ (тыс. км) предлагается рассчитывать по формуле

$$L_{\text{ост}} = L_{\text{баз}} \cdot k_{\text{рем}} \left( 1 - \frac{\mathrm{tg}(\delta_{\text{тек}}) - \mathrm{tg}(\delta_0)}{\mathrm{tg}(\delta_{\text{кр}}) - \mathrm{tg}(\delta_0)} \right), \quad (2)$$

где $L_{баз}$ – средний ресурс при отсутствии повреждений (700 тыс. км для балок до 2005 г. и 500 тыс. км – после 2015 г., согласно данным завода-изготовителя и ГОСТ 34502-2018); $k_{рем}$ – коэффициент ремонта: без ремонта – 1,0, наплавка карманов – 0,85.

Рассмотрим ситуацию с надрессорной балкой 2021 года выпуска: после 250 тысяч километров пробега у неё замерили tg(δ) = 0,28. Ремонт не делали. Для таких современных балок (после 2015 года) базовый ресурс $L_{баз}$ принимаем 500 тыс. км. Рассчитаем остаточный ресурс по пробегу $L_{ост}$ по выражению (2), получаем 187,5 тыс. км. Следовательно, согласно расчетным данным по нашей модели надрессорная балка должна быть в эксплуатации ещё около 188 тыс. км до браковки. При среднем годовом пробеге 80 тыс. км это примерно 2,3 года безопасной работы [7].

**Заключение.** В результате работы показано, что существующая система НК, регламентированная ГОСТ 32699-2014, надёжно выявляет дефекты, но не позволяет прогнозировать остаточный ресурс деталей без явных трещин. Обоснована возможность использования комплексного магнитного контроля (магнитопорошкового контроля + вихретоковые измерения) для оценки усталостной повреждаемости материала. Предложен диагностический параметр «тангенс износа» (относительное изменение магнитной проницаемости) и разработана эмпирическая модель прогнозирования остаточного ресурса надрессорной балки. Результаты апробации в деповских условиях подтвердили корреляцию магнитных свойств с наработкой до отказа. Методика может быть рекомендована для внедрения на предприятиях в рамках перехода к ремонту по фактическому состоянию.

**Список литературы**

1. ГОСТ 32699-2014. Рама боковая и балка надрессорная литые трёхэлементных двухосных тележек грузовых вагонов железных дорог колеи 1520 мм. Методы неразрушающего контроля. – Москва: Стандартинформ, 2015.

2. ГОСТ 32400-2013. Рама боковая и балка надрессорная литые тележек железнодорожных грузовых вагонов. Техн. условия. – Москва: Стандартинформ, 2015.

3. ПР НК В.3-2013. Правила неразрушающего контроля деталей тележек грузовых вагонов при ремонте. Специальные требования. – Москва: Изд-во стандартов, 2013.

4. ГОСТ 56512-2015. Контроль неразрушающий. Магнитопорошковый метод. – Москва: Стандартинформ, 2015.

5. ГОСТ 34502-2018. Детали литые тележек железнодорожных грузовых вагонов. Методы ресурсных испытаний. Ч. 2. Балка надрессорная. – Москва: Стандартинформ, 2018.

6. РД 32 ЦВ 052-2009. Общее руководство по ремонту. Ремонт тележек грузовых вагонов тип 2 по ГОСТ 9246 с боковыми скользунами зазорного типа. – М.: Транспорт, 2010.

7. Мажидов, Ф. А. Оценка остаточного срока службы грузового вагона с учётом его технического состояния: дис. канд. техн. наук: 05.22.07 / Ф. А. Мажидов. – Москва: МИИТ, 2016. – 167 с.

Контакты:
zapletnyukv@mail.ru (Заплетнюк Валерия Олеговна);
brylovatata@mail.ru (Брылова Татьяна Борисовна);
kondratenkoev@list.ru (Кондратенко Евгений Владимирович).

УДК 620.179.147

***К. В. ЗОТОВ***
***В. П. ЛУНИН****, д-р техн. наук, проф.*
Национальный исследовательский университет «МЭИ» (Москва, Россия)

# ПРИМЕНЕНИЕ АДАПТИВНОГО МЕТОДА ПОЛНОГО ФОКУСИРОВАНИЯ ПРИ УЛЬТРАЗВУКОВОМ КОНТРОЛЕ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

**Аннотация.** Рассмотрены вопросы применения адаптивного метода полного фокусирования (Adaptive Total Focusing Method, A-TFM) для ультразвукового неразрушающего контроля сварных соединений. Показано, что традиционный метод TFM, обеспечивающий теоретически предельное разрешение за счёт синтетической фокусировки в каждой точке области визуализации, имеет существенные ограничения при контроле сварных швов, обусловленные сложной геометрией, анизотропией и структурными неоднородностями материалов. Адаптивный TFM, в отличие от классического подхода, реализует динамическое взвешивание вкладов отдельных пар «излучатель-приёмник» на основе критериев качества сигнала, что позволяет эффективно подавлять структурные шумы, компенсировать геометрические искажения и повышать достоверность выявления дефектов. Представлены основные адаптивные стратегии, включая SNR-взвешивание, оптимизацию на основе фактора когерентности и F-числа, а также приведены примеры практической реализации метода для различных типов сварных соединений.

**Ключевые слова:** адаптивный метод полного фокусирования, ультразвуковой контроль, сварные соединения, полнозахватная матрица, структурный шум, неразрушающий контроль.

## Введение

Ультразвуковой контроль является одним из наиболее эффективных методов объёмной дефектоскопии сварных соединений, позволяющих выявлять такие плоскостные несплошности, как непровар, отсутствие сплавления по разделке шва и трещины. С развитием метода фазированных решёток и методов цифровой обработки сигналов особое место в практике неразрушающего контроля занял метод полного фокусирования (Total Focusing Method, TFM), реализуемый на основе полнозахватной матрицы (Full Matrix Capture, FMC).

Принцип TFM заключается в синтетической фокусировке в каждой точке области визуализации с использованием сигналов от всех возможных пар «излучатель-приёмник»

$$TFM(x,z) = \sum_i \sum_j s_{ij}(t_{ij}(x,z))$$

где *Sij* — сигнал от излучателя *i* к приёмнику *j*, а $t_{ij}$ — время распространения ультразвуковой волны до точки (*x*, *z*).

Несмотря на высокое разрешение и качество изображений, классический TFM имеет ряд ограничений, критичных при контроле сварных соединений:

- высокая вычислительная нагрузка при обработке всех возможных комбинаций элементов;

- усиление шумов за счёт суммирования неинформативных или зашумлённых пар;

- генерация артефактов от преобразованных волн и структурных шумов;

- чувствительность к неопределённости акустических свойств материала.

Адаптивный метод полного фокусирования (A-TFM) представляет собой эволюционное развитие TFM, вносящее «интеллектуальную составляющую» в процесс формирования изображения. Вместо простого суммирования всех пар «излучатель-приёмник» A-TFM динамически выбирает или взвешивает вклады каждой пары на основе критериев качества сигнала, что особенно актуально для сварных соединений со сложной геометрией и неоднородной структурой.

**Особенности ультразвукового контроля сварных соединений**

Контроль сварных соединений представляет собой одну из наиболее сложных задач ультразвуковой дефектоскопии по ряду причин:

*«Геометрические факторы»* Сварные швы характеризуются сложным профилем поверхности — наличие усиления шва создаёт значительные трудности при акустическом контакте и вносит искажения в распространение ультразвуковых волн. При контроле трубопроводов часто возникают ситуации, когда доступ к сварному соединению возможен только с одной стороны (например, для врезок, Y-образных соединений или сварных швов арматуры), что существенно снижает надёжность выявления дефектов на дальней стенке.

*«Структурная неоднородность»* Аустенитные нержавеющие стали, широко применяемые в энергетике и нефтехимии, характеризуются крупнозернистой структурой и микроструктурной неоднородностью, что приводит к генерации значительного структурного шума при ультразвуковом контроле. Это явление снижает отношение сигнал-шум и размывает контуры дефектов на изображениях, полученных классическим методом TFM.

*«Анизотропия свойств»* Сварные швы, особенно в разнородных металлах, могут обладать анизотропными упругими свойствами, что затрудняет точный расчёт времён распространения и приводит к искажению изображений.

*Требования к методу контроля.* Для эффективного контроля сварных соединений нужно обеспечивать:

- высокое пространственное разрешение для выявления мелких дефектов;

- подавление структурных шумов для крупнозернистых материалов;

- возможность адаптации к переменной геометрии поверхности;

- устойчивость к неопределённости акустических параметров материала;

- надёжное выявление дефектов при одностороннем доступе.

Именно эти требования делают адаптивный TFM особенно перспективным для контроля сварных соединений.

*Адаптивный TFM: принципы и алгоритмы*. Общая концепция. Адаптивный TFM можно представить как модификацию классического TFM с введением весовых коэффициентов, зависящих от качества сигнала в каждой точке фокусировки:

$$A\text{-}TFM(x,z) = \sum_i \sum_j w_{ij}(x,z) \cdot s_{ij}(t_{ij}(x,z))$$

где *Wij*(*x*,*z*) — адаптивный вес для пары «излучатель *i* — приёмник *j*» в точке (*x*,*z*). Ключевое новшество заключается в том, что веса вычисляются на основе данных, полученных в процессе конкретного контроля, а не задаются априорно.

Можно выделить следующие основные адаптивные стратегии.

*SNR-взвешивание.* Данная стратегия основана на том, что каждой паре «излучатель-приёмник» присваивается вес, пропорциональный отношению сигнал-шум (SNR) в окрестности фокальной точки

$$w_{ij}(x,z) = f(SNR_{ij}(x,z))$$

Вклады с низким SNR подавляются, тогда как сигналы с высоким SNR доминируют при суммировании. Это позволяет эффективно фильтровать шумовые составляющие, что особенно важно при контроле крупнозернистых материалов.

*Оптимизация на основе фактора когерентности*. Анализ фазовой согласованности принятых сигналов позволяет идентифицировать когерентные сигналы на приёмнике, соответствующие реальным отражателям:

$$CF(x,z) = \frac{|\sum s_{ij}|^2}{N \sum |s_{ij}|^2}$$

Низкая когерентность указывает на рассеяние или шум, что инициирует адаптивное подавление таких сигналов. Методы фазовой когерентной визуализации (Phase Coherence Imaging, PCI) особенно эффективны для подавления структурного шума в аустенитных сварных швах.

*Адаптация F-числа.* Одним из эффективных подходов для подавления структурного шума является адаптивная оптимизация на основе динамического F-числа, определяемого как отношение глубины визуализации к эффективной ширине апертуры. Алгоритм динамически регулирует эффективную апертуру для каждой синтезируемой точки:

- для ближней зоны или требований высокого разрешения в областях автоматически используется меньшее F-число для учета большего числа сигналов элементов и обеспечения оптимального латерального разрешения;

- для глубоких точек или областей, чувствительных к шуму, F-число увеличивается, что приводит к прогрессивному сужению эффективной синтетической апертуры и активной фильтрации сигналов краевых элементов с большими углами падения, склонных к шуму зернограничного рассеяния.

Экспериментальные результаты показывают, что по сравнению с классическим TFM данный подход увеличивает отношение сигнал-шум на 4%, снижает индекс эффективности решётки на 8,9% и сокращает время визуализации на 36,5%.

*Машинное обучение.* В более сложных реализациях для прогнозирования оптимальных весовых коэффициентов могут применяться методы машинного обучения. На этапе обучения нейросетевая модель распознаёт характерные паттерны дефектов и соответствующие им оптимальные весовые схемы, после

чего в режиме реального времени предсказывает веса для каждой фокальной точки.

*Компенсация геометрических неоднородностей*. Важнейшим аспектом применения A-TFM к сварным соединениям является способность метода компенсировать нерегулярности геометрии поверхности. Адаптивный подход позволяет в два этапа определить профиль поверхности компонента и профиль дальней стенки, что даёт возможность измерять остаточную толщину в любой позиции под сварным швом и вблизи.

При контроле трубопроводов сварные швы часто имеют нерегулярный профиль, и традиционные методы не обеспечивают надёжного акустического контакта. Адаптивная обработка данных FMC позволяет определить внешнюю поверхность трубы и скорректировать фокальные законы в соответствии с реальной геометрией. Используя скорректированные фокальные законы, становится возможным определить профиль внутренней поверхности и формировать изображения не только напрямую через внешнюю поверхность, но и на основе отражений от внутренней и внешней стенок.

**Применение A-TFM для различных типов сварных соединений**

*Контроль сварных швов трубопроводов*. Первоначальные подходы использовали ультразвуковые решётки на пластиковых призмах, размещаемых с обеих сторон продольного шва. Однако в зависимости от качества изготовления не всегда удавалось обеспечить хороший акустический контакт между поверхностью основного металла трубы и призмами, что сказывалось на качестве и достоверности контроля. Альтернативный подход с использованием локальной иммерсионной ванны и адаптивной обработки данных FMC позволил существенно повысить надёжность контроля. Комбинирование изображений, полученных по различным схемам, в единое поперечное сечение обеспечивает эффективную оценку дефектов в зоне сварного соединения и окружающей зоне.

*Контроль при одностороннем доступе*. Для многих объектов трубопроводного транспорта, таких как врезки, Y-образные соединения и сварные швы арматуры, доступ возможен только с одной стороны сварного соединения. При ультразвуковом контроле таких соединений надёжность выявления дефектов на дальней кромке разделки сварного соединения существенно снижается.

Применение адаптивного TFM с использованием сканирования по поверхности сварного валика позволяет визуализировать геометрические изменения, связанные с внешней формой шва. Сравнение результатов A-TFM с результатами контроля фазированными решётками (PAUT), выполненного в соответствии с требованиями ISO, подтверждает эффективность адаптивного подхода для контроля соединений с односторонним доступом.

*Преимущества A-TFM перед классическим TFM*. Адаптивный TFM обеспечивает ряд существенных преимуществ при контроле сварных соединений (Таблица 1).

Табл.1. Сравнение характеристик калассического и адаптивного методов

| Характеристика | Классический TFM | Адаптивный TFM |
|---|---|---|
| Подавление структурного шума | Ограниченное | Эффективное (до +10 дБ SNR) [3] |
| Точность позиционирования дефектов | Зависит от качества данных | < 1 мм для диаметра 2 мм [3] |
| Адаптация к геометрии поверхности | Отсутствует | Полная [7] |
| Время обработки | Базовое | Сокращение до 36,5% [11] |
| Устойчивость к анизотропии | Низкая | Высокая [3] |

*Практические результаты*. Экспериментальные исследования подтверждают высокую эффективность адаптивного TFM:

- при контроле анизотропных сталей с неизвестными свойствами достигнуто повышение отношения сигнал-шум на 10 дБ;
- для V-образных сварных швов обеспечено позиционирование дефектов с погрешностью менее 1 мм;
- для аустенитных сварных швов достигнуто снижение времени визуализации на 36,5%;
- для сварных швов с нерегулярным профилем обеспечено измерение остаточной толщины в любой позиции.

*Нормативная база*. Применение методов TFM и A-TFM для контроля сварных соединений регламентируется рядом международных стандартов. В частности, ISO 23864:2021 [10] устанавливает требования к применению FMC/TFM для ультразвукового контроля сварных соединений металлических материалов минимальной толщиной 3,2 мм. ISO 23865:2021 регламентирует общее применение технологии FMC/TFM и аналогичных технологий.

## Заключение

Адаптивный метод полного фокусирования представляет собой значительный шаг вперёд в области ультразвукового контроля сварных соединений. В отличие от классического TFM, использующего фиксированный алгоритм обработки всех пар «излучатель-приёмник», A-TFM реализует интеллектуальное взвешивание вкладов на основе критериев качества сигнала, что позволяет: эффективно подавлять структурные шумы, характерные для крупнозернистых аустенитных сталей, за счёт динамического регулирования апертуры и использования фазовой когерентности; компенсировать геометрические неоднородности поверхности сварных швов, обеспечивая надёжную визуализацию даже при нерегулярном профиле валика;

адаптироваться к анизотропным свойствам материалов, что критически важно для контроля V-образных сварных швов и плакированных компонентов; обеспечивать высокую точность позиционирования дефектов при одностороннем доступе к сварному соединению; сокращать время обработки данных, что повышает практическую применимость метода в промышленных условиях.

Разработка методик контроля сварных соединений с неудалённым усилением шва с использованием A-TFM открывает перспективы для замены радиографического контроля ультразвуковым в более широком круге применений, что обеспечивает повышение безопасности, снижение затрат и сокращение времени простоев оборудования.

Дальнейшее развитие адаптивных методов будет связано с интеграцией технологий машинного обучения для прогнозирования оптимальных весовых схем, созданием специализированных программно-аппаратных комплексов для реального времени и расширением нормативной базы. Адаптивный TFM представляет собой не просто эволюцию существующего метода, а смену парадигмы — переход от унифицированной обработки к интеллектуальному, контекстно-зависимому анализу, что определяет будущее развитие ультразвукового неразрушающего контроля сварных соединений.

**Список литературы**

1. J. Camacho, J. Cruza, J. Brizuela, and C. Fritsch, *Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, IEEE Transactions on 61, 673–684 (2014).

2. Application of Adaptive-TFM Technique to Inspection of One-side Accessible Welds, *KCI* (2025).

3. Adaptive TFM imaging for thickness meas. on pipe welds, *BINDT* (2018).

4. Adaptive ultrasonic imaging of electric resistance welded pipeline seams, *ECNDT* (2018).

5. Adaptive ultrasonic method for imaging in anisotropic steels, *HAL* (2021).

6. F-number adaptive full-focus optimization algorithm for suppressing grain noise, *Nondestructive Testing*, 2026, 48(3): 32-37.

7. Improvement of Ultrasonic Imaging Tools on Portable Instruments, *NDT.net*.

8. UT in lieu of RT: Guidance and Validation of Through Cap Inspection of Welds with Intact Caps, *TWI* (2025).

9. Robotic Laser Beam Reduced Pressure Welding, *TWI* (2025).

10. ISO 23864:2021. Неразрушающий контроль сварных соединений. Ультразвуковой контроль. Использование автоматизированной технологии общей фокусировки (TFM) и аналогичных технологий.

Контакты:
ZotovKonV@mpei.ru (Зотов Константин Владимирович)
LuninVP@mpei.ru (Лунин Валерий Павлович)

УДК 620.179.1: 621.7.019.2

***И. А. КОТЛЯРОВА,*** *канд. техн. наук, доц.*
***К. В. МАКАРЕНКО,*** *д-р техн. наук, доц.*
***А. В. КИРИЧЕК,*** *д-р техн. наук, проф.*
***Е. А. ЗЕНЦОВА***
***Д. А. ИЛЮШКИН,*** *канд. техн. наук, доц.*
***В. В. ЧИРКОВ***
Брянский государственный технический университет (Брянск, Россия)

# КОМПЛЕКСНЫЙ АНАЛИЗ ОЦЕНКИ ПОРИСТОЙ СТРУКТУРЫ ЗАГОТОВОК, СИНТЕЗИРОВАННЫХ ИЗ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА АМГ3 ПО WAAM-ТЕХНОЛОГИИ

**Аннотация.** Изучены особенности распределения пор в объеме синтезированной заготовки из сплава АМг3, произведенной по аддитивной WAAM-технологии. Представлены физико-химические основы формирования газовой пористости в процессе синтеза заготовок. Изучение пористости проводили тремя методами: ультразвуковой дефектоскопии, гидростатическим взвешиванием и металлографическим. Полученные результаты показали хорошую адекватность для всех трех методов. Анализ исследований выявил особенности распределения, формы и причин образования пор в заготовках. Даны рекомендации по выбору метода контроля и управлению пористостью.

**Ключевые слова:** пористость, дефектоскопия, синтез, алюминиевые сплавы, аддитивное производство, ультразвуковой контроль, металлография, гидростатическое взвешивание, плотность.

Современные аддитивные технологии позволяют производить изделия из различных металлов и сплавов путем их послойного синтеза, используя разные источники энергии. Одним из наиболее интенсивно развивающихся методов является аргонно-дуговая наплавка (*WAAM*). Однако синтезируемый материал часто имеет в структуре дефекты, присущие сварочному производству, в частности поры, имеющие различный генезис и морфологию [1,2]. В этой связи одной из важнейших задач на этапе становления и развития технологии аддитивного производства является разработка метода контроля пористости заготовок. Усовершенствование таких методов эффективно в совокупности с разработкой способов устранения выявленных дефектов или методик управления их распределением в объеме для обеспечения требуемых эксплуатационных показателей деталей.

Разные металлы и сплавы на их основе в разной степени склонны к образованию пористости в процессе *WAAM*-синтеза. К группе наиболее «проблемных» материалов относятся, в частности, алюминиевые сплавы. Синтез бездефектных заготовок с высокой сплошностью материала из алюминиевых сплавов, дополнительно легированных магнием, весьма затруднен спецификой физико-химического взаимодействия компонентов тройной системы «*Al*-*Mg*-*H*». Источником водорода в алюминиево-магниевых сплавах является атмосферная влага, адсорбированная на поверхности

сварочной проволоки. Из-за высокого сродства магния к кислороду, в процессе производства проволоки, на ее поверхности формируется гетерогенная оксидная пленка, состоящая из оксида магния $MgO$, оксида алюминия $Al_2O_3$ и шпинели $MgAl_2O_4$. Катионы $Mg^{2+}$ и $Al^{3+}$, выступающие в качестве кислотных центров Льюиса, активно адсорбируют и координируют диполи молекул воды из воздуха. Донорно-акцепторное взаимодействие обеспечивает быстрый переход физической адсорбции в хемсорбцию с формированием устойчивого полимолекулярного гидратного слоя, состоящего преимущественно из бёмита (γ-$AlOOH$) и байерита (α-$Al(OH)_3$).

В процессе *WAAM*-синтеза происходит ступенчатая дегидратация гидратного слоя. Выделяющаяся при этом вода термически диссоциирует под воздействием высоких температур дуги (свыше 2500 °С) ($H_2O \leftrightarrow 2H + O$) и вступает в гетерогенную окислительно-восстановительную реакцию (400…700 °$C$) с расплавленным металлом сварочной ванны (преобладающий механизм):

$$2Al + 3H_2O \rightarrow Al_2O_3 + 6H,\ Mg + H_2O \rightarrow MgO + 2H.$$

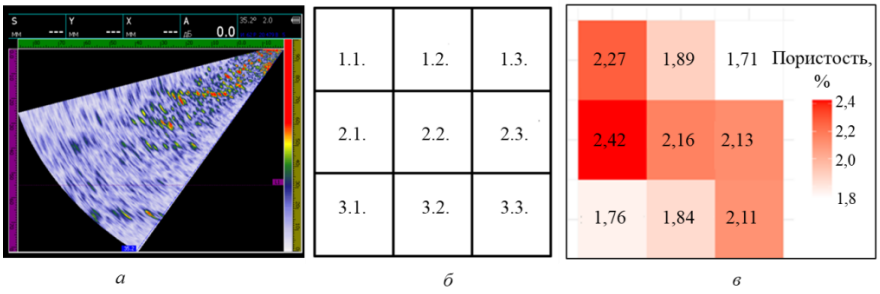
Образующийся атомарный водород диффундирует в сварочную ванну, формируя с расплавом проволоки гомогенный раствор, охлаждение которого сопровождается уменьшением растворимости водорода – монотонным до температуры ликвидуса и скачкообразным (в 20 раз) в интервале кристаллизации. «Избыточный» атомарный водород, объединяясь в молекулы ($2H \rightarrow H_2$), стремится покинуть расплав. Однако этот процесс осложняется реологическими и стерическими барьерами: двухфазный кристаллизующийся сплав обладает высокой эффективной вязкостью, а формирующийся в процессе затвердевания сварочной ванны дендритный каркас создает пространственные препятствия для перемещения пузырьков водорода к поверхности. Это приводит к фиксации газовой (водородной) пористости в объеме металла. При этом «первичная» пористость под воздействием температурных циклов, обусловленных особенностями реализации *WAAM*-технологии, подвержена изменениям, связанным с термодинамическим стремлением любой системы к уменьшению свободной энергии за счет сокращения межфазной поверхности. Межфазная поверхность «твердый сплав – газовые поры» уменьшается за счет направленной диффузии водорода от мелких пор к крупным по градиентам капиллярного давления и химических потенциалов. Таким образом, формирование и изменение пористой структуры по профилю алюминиевых *WAAM*-заготовок и изделий – закономерный процесс, требующий комплексного подхода ее контроля в процессе синтеза, позволяющего совместить практический аспект (контроль сплошности материала) с изучением теоретических основ распределения пористости и механизмов ее образования в зависимости от параметров *WAAM*-технологии. Цель работы – сравнительный анализ методов контроля пористости в синтезированной по *WAAM*-технологии заготовке на примере алюминиевого сплава *АМг*3 Комплексное исследование

пористой структуры проводили тремя методами дефектоскопического анализа: ультразвуковым контролем (УЗК), металлографическим анализом (МК) и методом гидростатического взвешивания (ГВ).

Для исследований *WAAM*-заготовку (300×240×70 мм) синтезировали на установке на базе сварочного полуавтомата *EVOSPARK EVOMIG* 500. Наплавку выполняли на подложку из алюминиевого сплава *Д*16*Т* размером 370×260×45 мм в защитной среде 100% *Ar* импульсным методом *DAC Pulse* с использованием сварочной проволоки *Св-АМг*3, диаметром 1,2 мм, тип осцилляции при наплавке – ступенька. Основные параметры *WAAM*-технологии: сварочный ток – 105 А, напряжение – 21,7 В, скорость подачи проволоки – 7 м/мин, скорость осцилляции – 1000 мм/мин, амплитуда – 210 мм, шаг осцилляции – 3 мм, высота подъёма сопла на первом слое – 9,5 мм, подъем исполнительного органа на слое – 2,5 мм. Для мониторинга температурных полей в процессе синтеза применяли инфракрасную камеру *FLuKe TiX*660.

Комплексный подход к анализу пористости *АМг*3-*WAAM*-заготовки был реализован в три этапа, как ранее было отмечено, тремя различными методами. На первом этапе сплошность материала оценивали методом ультразвукового контроля (дефектоскоп *УСД*-60*ФР*, фазированная решетка 5*L*16-1,0x10-*B*10, 16 эл., 5 МГц; призма *SB*10-*N*55S, 55°), позволяющим выявить зоны концентрации макропор размером более 300 мкм с точной пространственной локализацией: у подложки, в центральном объеме, в приповерхностной зоне, на границах наплавленных слоев (рис. 1, *а*). При этом количественная оценка пористости (определение объемной доли пор и их распределения по размерам) данным методом затруднена, а идентификация мелких пор с размером менее 100 мкм практически невозможна из-за высокого уровня структурного шума от крупных дендритов сплава *АМг*3. Тем не менее УЗК обеспечивает целенаправленный отбор проб для последующего анализа пористости, исключая случайный характер вырезки образцов и сокращая объем дальнейших исследований.

На втором этапе гидростатическим взвешиванием оценивали интегральную пористость заготовки. Для этого из ее верхней, средней и нижней зон (см. рис. 1, *б*) вырезали образцы, уделяя особое внимание зонам с повышенной пористостью, предварительно выявленным на предыдущем этапе УЗК.




*а* *б* *в*

Рис.1. Результаты исследования: S-скан УЗК (*а*), схема вырезки образцов (*б*), обобщенные данные пористости (метод ГВ) (*в*)

Образцы взвешивали на воздухе ($m_{воздух}$) и в дистиллированной воде ($m_{вода}$) (аналитические весы *ВЛК*-224*С*-*И* с дискретностью 0,0001 г с приспособлением *УОП*-301) и рассчитывали плотность (ρ) и интегральную пористость (φ):

$$\rho = \frac{m_{воздух}}{(m_{воздух} - m_{вода})}\rho_{вода}, \varphi = \left(1 - \frac{\rho}{\rho_{эт}}\right) * 100\%,$$

В качестве беспористого эталона использовали сварочную проволоку *Св*-*АМг*3*п* с $\rho_{эт} = 2{,}669$ г/см$^3$, определенной гидростатическим взвешиванием.

Метод позволяет оценить соответствие *WAAM*-заготовок нормативным требованиям по сплошности материала при заданных параметрах синтеза, а также обосновать целесообразность внедрения гибридных технологии (например, *WAAM* с волновым деформационным упрочнением) для регенерации сплошности. По результатам *ГВ* (рис. 2, *в*) средняя пористость составила 2,03%. Распределение пор по высоте заготовки неравномерное: более низкие значения φ в нижней и верхней зонах (1,91 и 1,96 %), более высокие – в средней (2,24 %). При получении удовлетворительных данных по интегральной пористости проведение металлографического анализа не обязательно. Однако в тех случаях, когда значения φ превышают допустимые пределы (как в данном эксперименте), он становится необходимым для установления причин возникновения пор, их преобладающего размера и пространственной топологии.

Металлографический анализ пористости выполняли на образцах после гидростатического взвешивания. Их запрессовывали в смолу и приготавливали шлифы по стандартным методикам. Пористость исследовали в десяти полях зрения при увеличении ×50 на микроскопе *Leica DM IRM* с использованием специального программного обеспечения для идентификации пор *SIAMS* 900.

Результаты анализа показывают, что в структуре синтезированного сплава численно преобладают микропоры до 100 мкм (99% от общего количества), из которых на долю фракции 0…25 мкм приходится 92…95 %. Интересно отметить, что во всех зонах заготовки прослеживается четкая закономерность: с увеличением размера микропор их количество снижается, причем наиболее резко – при переходе от фракции 0…25 мкм к фракции 25…50 мкм (~в 20 раз). Микропоры диапазона 75…100 мкм носят единичный характер: обнаружено 7 микропор – в верхней, 14 – в средней, 4 – в нижней зонах *АМг*-3 заготовки (рис.2)

Анализ генезиса выявил газовое и микроусадочное происхождение микропор. Газовые микропоры преобладают и распределены хаотически; немногочисленные скопления носят локальный характер (рис. 3 *а*, *б*). Микроусадочные поры встречаются значительно реже, они локализованы в нижней зоне заготовки в виде линейных скоплений (рис. 3, *в*). Мезопоры (100…500 мкм) и макропоры (более 500 мкм) – одиночные, исключительно газового происхождения. Их количество выше в средней зоне, что коррелирует

с результатами ГВ. Макропоры в нижней зоне отсутствуют, в средней и верхней зонах обнаружены в равных количествах (рис. 4*а*).

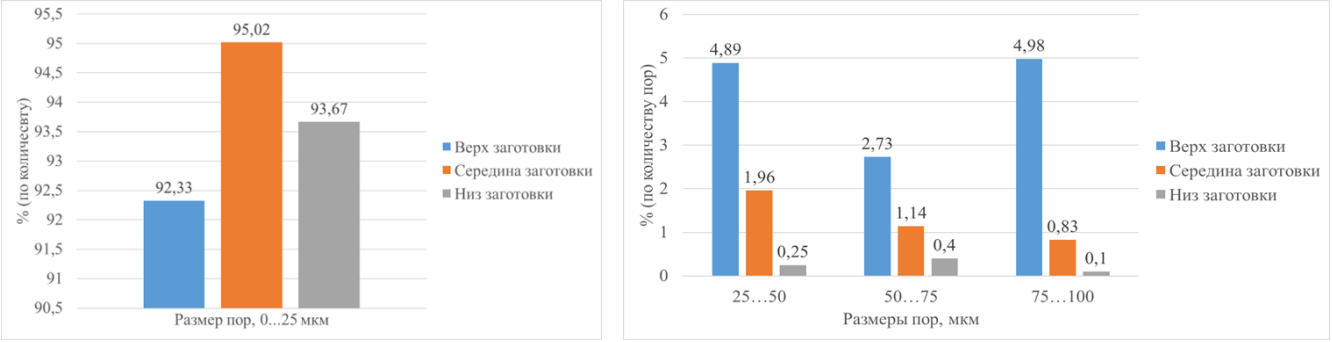
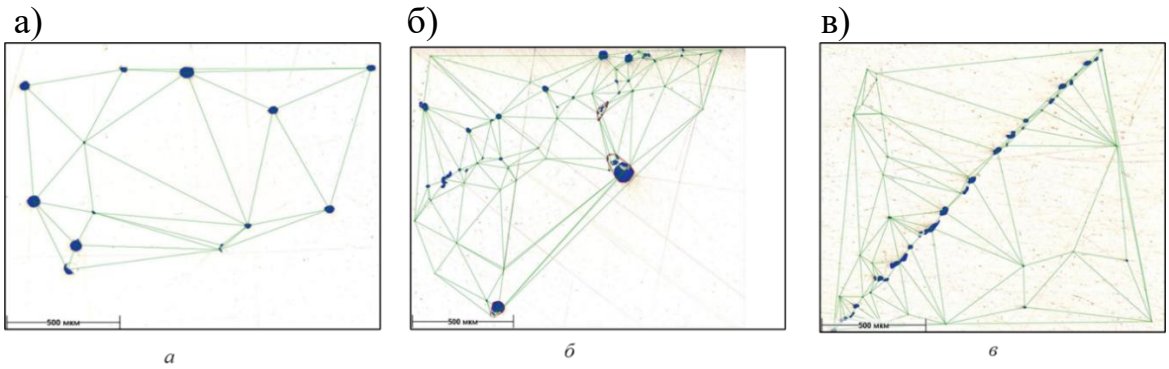



Рис. 2. Распределение микропор по размерам и зонам *WAAM*-заготовки




*а* – газовые микропоры, распределенные хаотично; *б* – локальные скопления газовых микропор, *в* – усадочные микропоры

Рис. 3. Топология микропористости

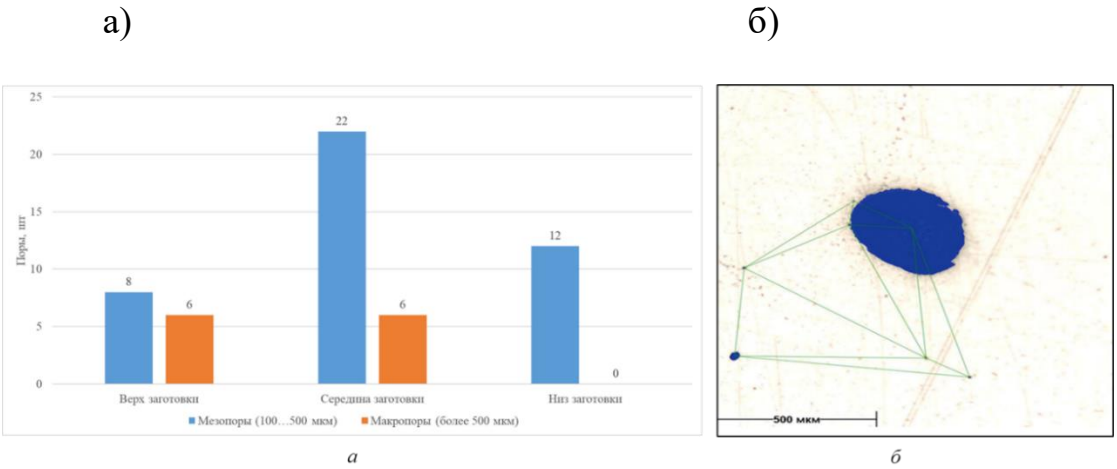



Рис. 4. Количество мезо- и макропор в синтезированной заготовки (*а*) и одиночная газовая мезопора (*б*)

Выявлено изменение газовой пористости по высоте заготовки. Микропористость (0…100 мкм) стабильна во всех зонах. Мезопористость распределена неравномерно; она преобладает в средней зоне, что объясняется слиянием микропор при повторных термических циклах *WAAM*-синтеза (в нижней и верхней зонах процесс лимитирован интенсивным теплоотводом в подложку и конвективным охлаждением). Это подтверждается характером

распределения мезопор внутри диапазона 100…500 мкм: их основное количество находится в интервале до 200 мкм, мезопоры крупнее 350 мкм отсутствуют. Таким образом, микро- и мезопористость представляют собой «классическую» газовую пористость, вызванную диссоциацией влаги на поверхности сварочной проволоки. Макропоры (более 500 мкм) формируются по иному механизму: их образование в средней и верхней зонах связано с нестабильностью *WAAM*-процесса при удалении от подложки (осцилляция дуги, сбои подачи защитного газа). Следовательно, пористость обусловлена совместным действием физико-химических и технологических факторов; их одновременная коррекция (подготовка поверхности проволоки, оптимизация режимов наплавки, применение гибридных технологий) позволит минимизировать микро- и мезопоры, полностью устранить макропоры и повысить сплошность материала.

Таким образом, для *WAAM*-заготовок (особенно из алюминиевых сплавов) необходим комплексный анализ пористости, позволяющий оценить распределение пор по объему (УЗК), проверить соответствие сплошности нормативным требованиям (ГВ), установить причины возникновения пор (МК) для обоснованной коррекции параметров *WAAM*-синтеза или внедрения гибридных технологий с целью получения материала с заданной пористостью.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, работа «Проведение фундаментальных научных исследований» в рамках базовой части государственного задания Минобрнауки РФ по проекту №*FZWR*-2024-0003 (№ 075-00150-24-03) «Разработка технологической стратегии и теоретико-экспериментальное исследование ключевых элементов технологии аддитивного синтеза из металлической проволоки деталей 3DMP-методом и волнового термодеформационного упрочнения синтезируемых деталей машин».

Список литературы

1. Орлов, В. К. Порообразование в алюминиевых сплавах при выращивании методом WAAM / В. К. Орлов // Мавлютовские чтения : Материалы XVII Всероссийской молодёжной научной конференции. В 9-ти томах, Уфа, 21–23 ноября 2023 года. Том 2. – Уфа: Уфимский университет науки и технологий, 2024. – С. 175-179.

2. Генезис, морфология и особенности распределения пор в стали, синтезированной по технологии WAAM / К.В. Макаренко, А.В. Киричек, И.А. Котлярова, Д.А. Илюшкин, Е.А. Зенцова // Технология металлов. – 2026. - № 8. – С. 39 – 46. – DOI: 10.31044/1684-2499-2026-0-8-39-46.

Контакты:
ikotlyarova@lis.ru (Котлярова Ирина Александровна);
makkon@yandex.ru (Макаренко Константин Васильевич);
avk@tu-bryansk.ru (Киричек Андрей Викторович);
kopilka.32@mail.ru (Зенцова Екатерина Александровна);
shirke@mail.ru (Илюшкин Дмитрий Алексеевич);
vadimc75@gmail.com (Чирков Вадим Владимирович).

УДК 620.179.1:629.7

***И. О. КОТОВЩИКОВ, канд. техн. наук***
ООО «Локус» (Санкт-Петербург, Россия)

# ОПЫТ РАЗРАБОТКИ И ВНЕДРЕНИЯ СОВРЕМЕННЫХ СИСТЕМ АКТИВНОГО ТЕПЛОВОГО КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА КОМПОЗИТНЫХ АВИАЦИОННЫХ ОБЪЕКТОВ

**Аннотация.** Обобщён опыт ООО «Локус» по разработке и внедрению систем активного теплового контроля авиационных изделий из композиционных материалов. Рассмотрены «Локотерм-В» для вертолётных лопастей, «Локотерм-А» для крупногабаритных изделий сложной формы, «Локотерм. Компакт» для обнаружения воды в сотовых конструкциях при техническом обслуживании и ремонте (ТОиР) и проект мобильной системы «Локотерм-М». Показана адаптация единой аппаратно-программной платформы к различным объектам и стадиям жизненного цикла. Результаты «Локотерм-В» подтверждены ультразвуковым контролем и контрольным разрезом; «Локотерм. Компакт» выявляла воду объёмом от 0,05 мл при длительности цикла контроля 7 с.

**Ключевые слова:** активный тепловой контроль, активная термография, композиционные материалы, авиационные конструкции, автоматизированный неразрушающий контроль, ТОиР.

## Введение

Композиционные материалы широко применяются в авиационной технике благодаря высокой удельной прочности и жёсткости, коррозионной стойкости и возможности формировать конструкцию с заданным сочетанием свойств. Таким образом, угле- и стеклопластики, сотовые заполнители и клеевые соединения позволяют снижать массу летающих конструкций без снижения эксплуатационных свойств. Однако, неоднородность, анизотропия свойств и высокие требования к соблюдению технологических процессов создают новые и высокие требования к контролю качества композитных авиационных объектов.

Неразрушающий контроль (НК) необходим на всех стадиях жизненного цикла. При изготовлении требуется выявлять расслоения, непроклеи, отслоения обшивки, поры, пустоты и включения; при эксплуатации — ударные повреждения, разрушение клеевых связей и воду в сотовых конструкциях. Большая площадь, криволинейность поверхности, малая толщина слоёв и односторонний доступ ограничивают применение распространённых локальных контактных методов НК и повышают актуальность площадных бесконтактных средств контроля [1–3].

При активном тепловом контроле (АТК) объект подвергается управляемому нагреву, а инфракрасная камера регистрирует нестационарное температурное поле поверхности. Дефект изменяет распространение тепла внутри объекта контроля (ОК) и формирует отличающийся по амплитуде и времени отклик. Диагностическая информация содержится во всей

последовательности термограмм, поэтому современная система АТК объединяет источник возбуждения, инфракрасную камеру, синхронный сбор данных, позиционирование и алгоритмы обработки [1, 3]. К общим свойствам всех рассматриваемых систем относятся бесконтактность, отсутствие контактной жидкости, односторонний контроль и цифровое документирование. Особенности отдельных кейсов определяются не этими свойствами, а способом адаптации метода к реальному объекту.

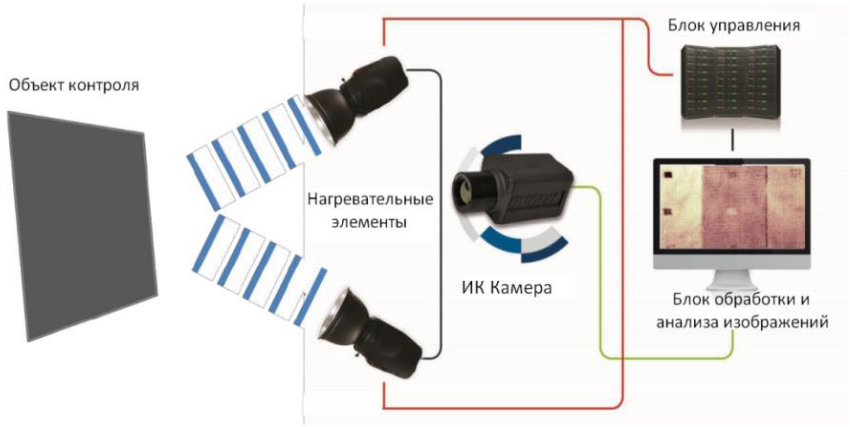



Рис. 1. Принцип активного теплового контроля и общая структура систем АТК

Целью работы является обобщение опыта ООО «Локус» по разработке и внедрению систем активного теплового контроля, адаптированных к различным авиационным композитным объектам и условиям проведения контроля.

## 1 Общая аппаратно-программная платформа

Все системы семейства «Локотерм» используют галогенные источники нагрева, камеру длинноволнового ИК-диапазона (LWIR камера) и общую программную платформу «Асессор Термо». Она управляет сбором данных, обрабатывает термограммы, выделяет индикации по заданным критериям и формирует отчёт; параметры повторяющихся процедур сохраняются как рецепты. Единое аппаратно-программное ядро позволяет адаптировать механику и компоновку к объекту.

## 2 «Локотерм-В»: производственный контроль вертолётных лопастей

Постановка задачи. Для длинномерных лопастей сложной внутренней структуры требовалось автоматизировать поиск расслоений, непроклеев, отслоений, пустот и дефектов нагревательной накладки как в стеклопластиковых, так и в углепластиковых конструкциях. Локальные методы зависели от шага сканирования и квалификации оператора.

Решение. «Локотерм-В» выполнена как установка с двумя моторизированными осями, перемещающими термограф над лопастью. Реализованы контроль выбранного участка, пошаговое сканирование всего

изделия, сшивка термограмм отдельных участков в общую термограмму лопасти и отдельный режим нагревательной накладки. Инженер создаёт рецепт и критерии оценки, оператор выполняет повторяемую процедуру, а результаты сохраняются в электронном протоколе [4].

Особенность и результат. В отличие от остальных кейсов система глубоко специализирована под повторяющуюся конструкцию лопасти и отдельные зоны её внутреннего строения. Выявленные отслоения и пустоты подтверждены ультразвуковым контролем и резом образца в координате индикации [5].

а б

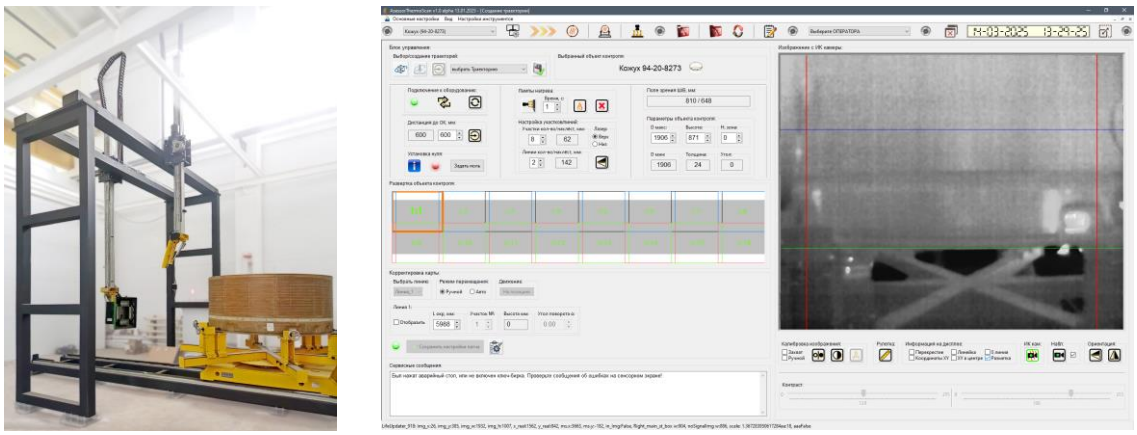
Рис. 2. Система АТК лопастей «Локотерм-В»: а – Общий вид; б – окно ПО «Асессор Термо» с выделением выявленных дефектов

### 3. «Локотерм-А»: крупногабаритные композитные изделия

Постановка задачи. Для цилиндрических и конических изделий диаметром до 2,5 м и высотой до 2 м требовалось контролировать всю поверхность при изменяющейся кривизне. Основными проблемами стали поддержание расстояния и угла наблюдения, координация нагрева и регистрации и объединение локальных термограмм.

Решение. Система включает рельсовый путь, поворотный стол, портал и два независимо перемещающихся манипулятора с термографом и внешним нагревателем. Шесть моторизированных осей позиционируют оборудование и объект; оптические датчики используются для коррекции положения относительно поверхности. Реализованы одно- и двусторонняя схемы АТК, построение и воспроизведение траекторий сканирования, сшивка термограмм и формирование отчёта.

Особенность и результат. Специфической особенностью является адаптивное пространственное согласование нескольких осей с криволинейной поверхностью крупногабаритного объекта. Система прошла испытания, отладку и вводится в эксплуатацию. Выполняется комплексное сопровождение заказчика в Перми, анализ обратной связи и регулярное обновление программного обеспечения.



а б

Рис. 3. Система АТК крупногабаритных тел вращения «Локотерм-А»: а – Общий вид; б – окно ПО «Асессор Термо» для построения траектории сканирования

## 4. «Локотерм. Компакт»: контроль сотовых конструкций при ТОиР

Постановка задачи. При техническом обслуживании и ремонте воздушных судов требуется оперативно искать воду в сотовых панелях рулей, закрылков, обтекателей и других элементов. Вода изменяет теплоёмкость локальной области, а при замерзании может повреждать заполнитель и клеевые связи. Контроль должен выполняться при одностороннем доступе в ангарных условиях [6, 7].

Решение. В переносном корпусе объединены LWIR камера, две кольцевые галогенные лампы и вычислительный модуль. Съёмные опоры воспроизводимо задают рабочее расстояние; масса дефектоскопа с вычислителем и опорами составляет около 5,5 кг. Экспериментальные исследования возможностей разработанной системы были проведены на трёх вариантах сотовых панелей с дозированным введением воды.

Контраст оценивали как

$$C(t) = \frac{I_{\text{д}}(t) - I_{\text{бд}}(t)}{I_{\text{бд}}(t)},$$

где $I_{\text{д}}$ и $I_{\text{бд}}$— сигналы дефектной и бездефектной областей.

Выявлялась вода объёмом от 0,05 мл. Рациональный режим включал нагрев в течение 2 с и общую регистрацию - 7 с; при области контроля (одной термограммы) 280 × 400 мм расчётная оперативность контроля превышает 30 м²/ч.

Особенность и результат. В отличие от автоматизированных установок современность решения выражена в полном измерительном цикле внутри лёгкого переносного прибора и стандартизации ручной установки опорами. Система прошла испытания, принята заказчиком и передана в эксплуатацию в июне 2026 г. На данный момент система «Локотерм. Компакт» осваивается персоналом и внедряется в практику ТОиР.

Рис. 4. Система оперативного эксплуатационного АТК воздушных судов «Локотерм. Компакт»

## 5. «Локотерм-М»: проект мобильного контроля лопастей

Постановка задачи. Сервисным центрам требуется контролировать лопасти воздушных и рулевых винтов непосредственно в месте эксплуатации, по возможности без снятия. Результаты должны быть сопоставимы с заводским контролем и доступны специалистам изготовителя.

Решение. Проект предусматривает термографический блок с четырьмя галогенными лампами на разборной ферменной оснастке с вертикальными направляющими. Оснастка должна обеспечивать последовательное позиционирование напротив вертикально установленной лопасти, разбираться после работы и перевозиться в кейсе; предусмотрена адаптация для не вертикальных ОК.

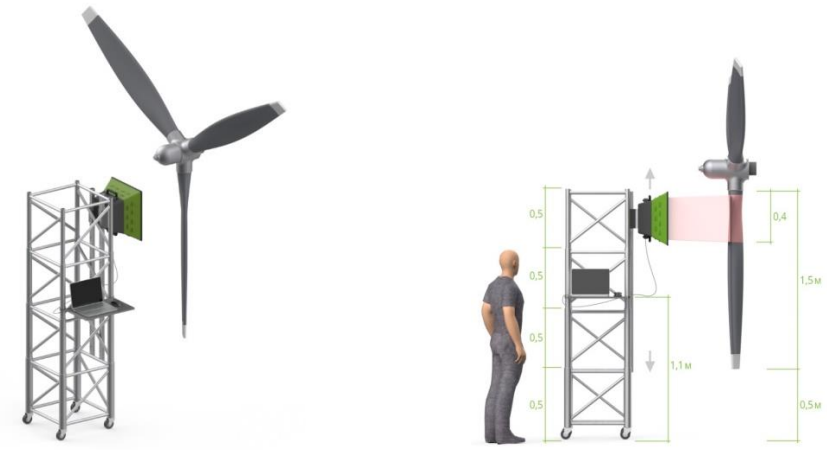



Рис. 5. Проект мобильной системы контроля лопастей «Локотерм-М»

Особенность и ожидаемый эффект. Главная особенность состоит в преемственности производственного и эксплуатационного контроля: совместимые рецепты, централизованное хранение и экспертный анализ

создают основу цифровой истории состояния лопасти. «Локотерм-М» является проектным решением и не рассматривается как изготовленная или испытанная система.

## Заключение

Компанией ООО «Локус» разработало семейство систем активного теплового контроля для производственного контроля лопастей и крупногабаритных композитных изделий, а также для задач ТОиР сотовых авиационных конструкций.

Выявляемость дефектов системой «Локотерм-В» подтверждена ультразвуковым контролем и контрольным разрезом; «Локотерм-А» сдана заказчику и вводится в эксплуатацию. «Локотерм. Компакт» выявляла воду объёмом от 0,05 мл при регистрации 7 с и передана заказчику.

Перспективное направление развития — объединение производственных и эксплуатационных данных в цифровую историю изделия, предусмотренное проектом «Локотерм-М».

### Список литературы


1. Kotovshchikov I. O. Active thermography as a contemporary method for ensuring the quality of composite material products // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 683. Art. 012076. DOI 10.1088/1757-899X/683/1/012076.
2. ГОСТ Р 56787–2015. Композиты полимерные. Неразрушающий контроль. Общие принципы. Москва: Стандартинформ, 2016.
3. Вавилов В. П. Инфракрасная термография и тепловой контроль. Москва: Спектр, 2009. 544 с.
4. Котовщиков И. О. Автоматизированный комплекс неразрушающего контроля лопастей из композитных материалов // Композитный мир. 2020. № 4(91). С. 46–50.
5. Федоров А. В., Котовщиков И. О. Экспериментальная апробация средств и методики активного теплового контроля вертолётных лопастей из композиционных материалов // Приборы. 2022. № 9(267). С. 1–7.
6. Vavilov V. P. et al. Detecting water ingress in aviation honeycomb panels: qualitative and quantitative aspects // Polymer Testing. 2016. Vol. 54. P. 270–280. DOI 10.1016/j.polymertesting.2016.07.023.
7. Чулков А. О. и др. Обнаружение и оценка количества воды в горизонтально ориентированных авиационных сотовых панелях с помощью автоматизированного теплового контроля // Дефектоскопия. 2023. № 12. С. 26–33. DOI 10.31857/S0130308223120035.



Контакты:
ilya@locus.spb.ru (Котовщиков Илья Олегович)

УДК 629.33

***Н. В. КОЧЕТОВ****, канд.техн.наук, доц.*
***О. Л. МИРАНОВИЧ****, канд.техн.наук, доц.*
***Д. А. ТИМОШУК***
ОАО «Приборостроительный завод Оптрон» (Минск, Беларусь)

# ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ИЗГОТОВЛЕНИЯ СПЕЦИАЛЬНОГО ИСПЫТАТЕЛЬНОГО СТЕНДА ДЛЯ ДВУХКОЛЁСНОГО ЭЛЕКТРОТРАНСПОРТА

**Аннотация.** Показан процесс создания измерительного оборудования, необходимого для тестирования опытных образцов двухколёсных электрических транспортных средств. В перспективе стенд будет использован для формирования цифровых двойников создаваемых объектов.

**Ключевые слова:** электрический транспорт, измерительный стенд, динамические нагрузки, вибрации

Программа развития электротранспорта в Республике Беларусь получила своё развитие после ввода в эксплуатацию Белорусской АЭС. В стране появились электромобили, началась разработка отечественного двухколёсного электротранспорта индивидуального пользования и электромобиля тоже.

ОАО «Приборостроительный завод Оптрон», с учётом положительной тенденции развития экологичного электротранспорта, приступил к работе по созданию электромотоцикла. Анализ задачи показал, что работа складывается из нескольких подзадач, куда входят проектирование и создание транспортных средств, разработка оборудования для исследований и испытаний, создание научного комплекса по формированию системы цифровых двойников с целью прогнозирования динамики характеристик транспортных средств в процессе эксплуатации для повышения надёжности.

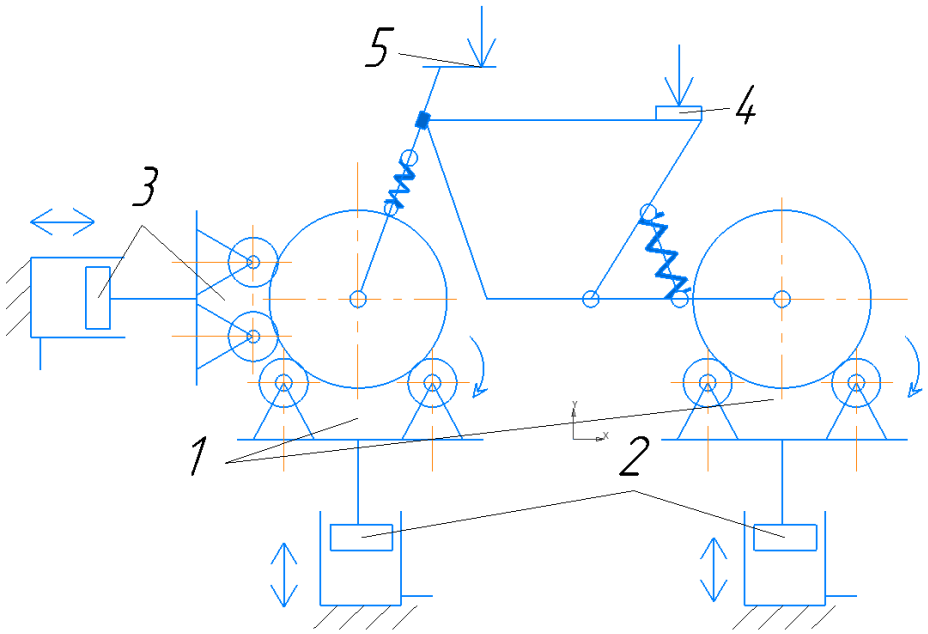
Введение многочисленных санкционных ограничений обострило проблему импортозамещения, заставив расширить собственное производство компонентов и даже технологического оснащения. Изучение вопроса показало, что зарубежные производители освещают характеристики своего оборудования, но особенности производства, используемые технологии и подходы не раскрывают.

Было решено создать собственный испытательный стенд для двухколёсного электротранспорта с учётом особенностей поставленной задачи. Характеристики проектируемого устройства приведены ниже:

скорость при испытаниях транспортного средства: 0-120 км/ч;
количество осей приложения нагрузки: 3 оси;
грузоподъемность: от 0 до не менее 250 кг;
масса стенда: не более 700 кг;
диапазон частоты вибраций и ударов: 0-300 Гц;
диапазон измерений датчика крутящего момента: 0-300 Н*м;

диапазон регулировки колесной базы: 800 - 1500 мм;
диапазон измерения СКЗ виброускорения: 0.5 - 300 м\с2;
диапазон измерения СКЗ виброскорости: 0.5 - 200 мм\с;
диапазон измерения размаха виброперемещения: 1 - 1000 мкм;
диапазон рабочих частот при измерении:
- виброускорения 2 - 10000 Гц;
- виброскорости 10 -2000 Гц;
- виброперемещения 10 – 1000 Гц.
количество аналоговых каналов измерения 4;
одновременное измерение шума и трехкомпонентной вибрации;
одновременное измерение спектров по 4 каналам в диапазоне частот до 10 кГц;
измерение вибрации одновременно в 4 точках в диапазоне частот до 10 кГц.

Компоновочное решение конструкции было выбрано на основании опыта эксплуатации зарубежных аналогов, рис. 1.




1 - система имитации динамической нагрузки; 2 - тензодатчики (платформенные весы) для калибровки и измерения нагрузок; 3 - устройство вертикальной динамической нагрузки с тензодатчиком на переднее колесо; 4 - точка нагрузки (вес имитации человека); 5- точка измерения усилия нажатия на тормоз (тензодатчик).

Рис. 1. Упрощённая эскизная схема стенда

Система имитации динамической нагрузки 1 представлена в виде системы валов, приводимыми в действие электродвигателями, а также пневмосистемой с пружинами управляемая программным обеспечением при помощи пульта управления стендом. Тензодатчики (платформенные весы) 2 для калибровки и измерения нагрузок на колёсную базу и раму подключены к регистрирующему устройству пульта управления, в котором производится запись и анализ показателей.

Устройство имитации препятствий 3 представлено в виде пневматических цилиндров и тензодатчика для снятия показаний динамической нагрузки на рулевое управление и переднее колесо. Управляется с пульта управления с одновременным проведением анализа динамической нагрузки.

Точка нагрузки 4 равна весу объекта имитирующего тело человека см. рис. 3, давящего на сиденье и раму сверху. В качестве веса используется равномерно-распределённый груз в виде блинов с определённой массой, заложенный в манекен. Точка управляемой нагрузки на тормоз 5, для валидации тормозной системы заявленным требованиям. Оценка работоспособности тормозной системы осуществляется посредствам анализа динамической нагрузки на нажатие тормоза.

Система управления позволяет осуществить весь комплекс динамических нагрузок и записать показания датчиков на накопитель памяти. После чего результаты измерений подвергаются тщательному анализу. Производится доработка и улучшение опытного образца, совершенствование технологичности.

В основе рамных элементов были выбраны отечественные профили. Для рамной конструкции было принято решение использовать алюминиевый конструкционный профиль AlMg0,7Si 6063 T6 по ГОСТ 22233-2025 так как он соответствует необходимой жёсткости, прочности и простоты сборки. Согласно заложенной при разработке конструкции, рассматривались два варианта сечения с выбором оптимального варианта для разработки: 40х40 мм и 50х50 мм, сечение профиля показано на рис. 2.

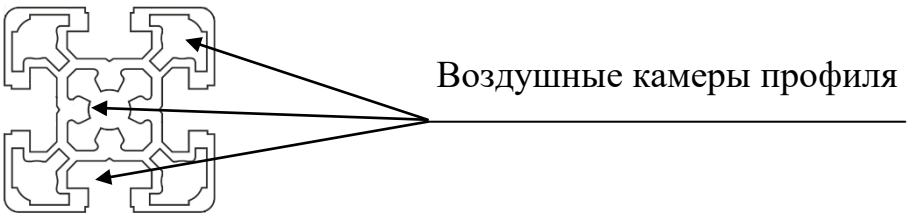



Рис. 2. Сечение профиля рамной конструкции

Преимущества алюминиевого конструкционного профиля:

- высокая прочность и несущая способность благодаря особому внутреннему строению с ребрами жесткости;
- минимальный вес благодаря материалу изготовления и пустотам, которые остаются внутри;
- уменьшенная теплопроводность благодаря воздушным камерам, расположенным внутри профиля;
- неподверженность коррозии и воздействию агрессивных веществ.

Наиболее важным преимуществом алюминиевого конструкционного профиля, является возможность оперативного внесения изменений в конструкцию. Это позволяет легко менять конструкцию оборудования на любой стадии разработки проекта, не затрагивая при этом конструкцию оборудования в целом.

Расчёты прочности алюминиевого конструкционного профиля произведены в программной среде SolidWorks, для рам с сечением профиля 40х40 мм без усиления конструкции и с использованием раскосов в качестве усиления конструкции при использовании профиля сечением 40х40 мм, а также с использованием профиля 50х50 мм без усиления конструкции. Впоследствии после изготовления рамная конструкция подвергалась испытанию под нагрузкой. Измерения показали близкие к расчётам результаты. Однако были внесены некоторые изменения, которые позволили гарантированно достигнуть требуемых параметров деформаций конструкции под нагрузкой.

Шкала отображения запаса прочности конструкции, смещения при воздействии вращающего момента и статической вертикальной нагрузки показана ниже на рисунках 3, 4, 5. Основные точки нагрузки и движения обозначены областями и представлены на рисунке стрелками.

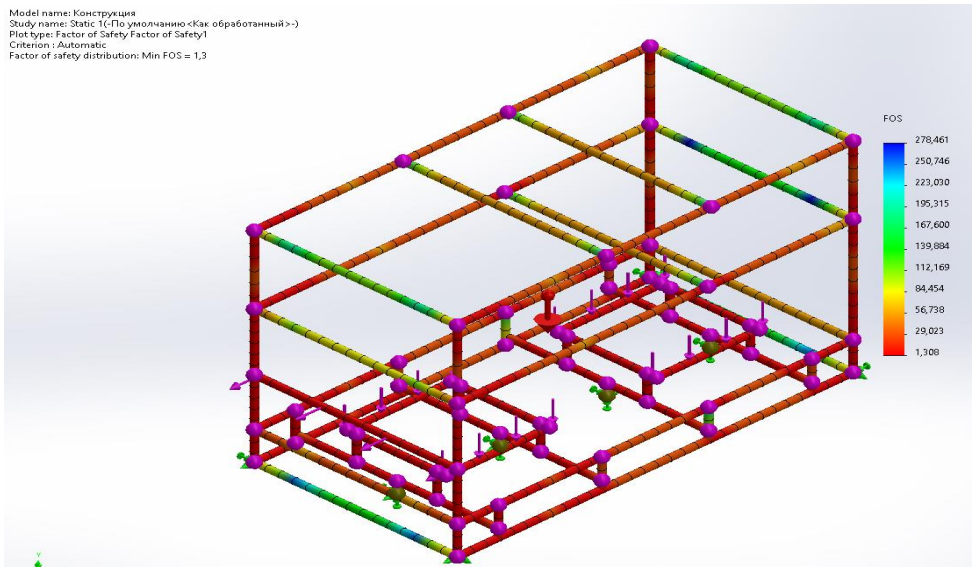



Рис. 3. Шкала отображения запаса прочности конструкции

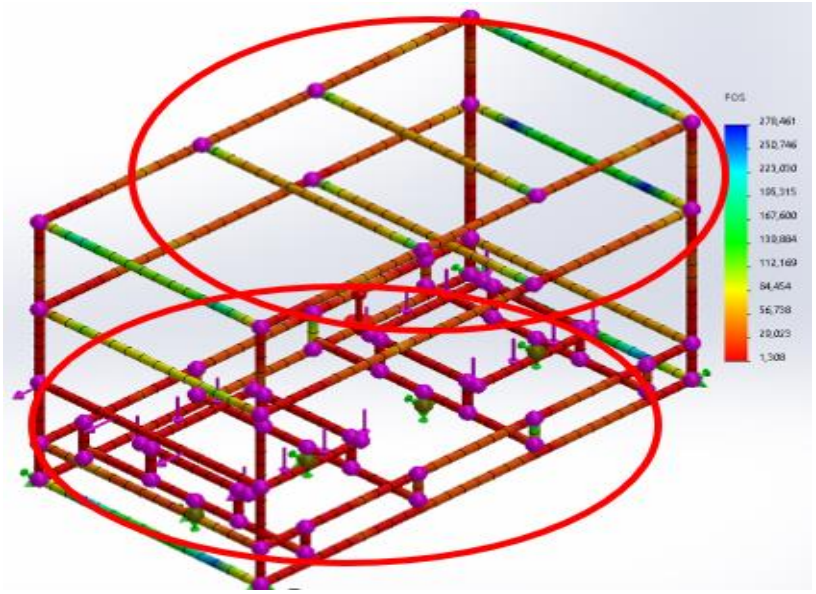



Рис. 4. Направления смещения при воздействии вращающего момента

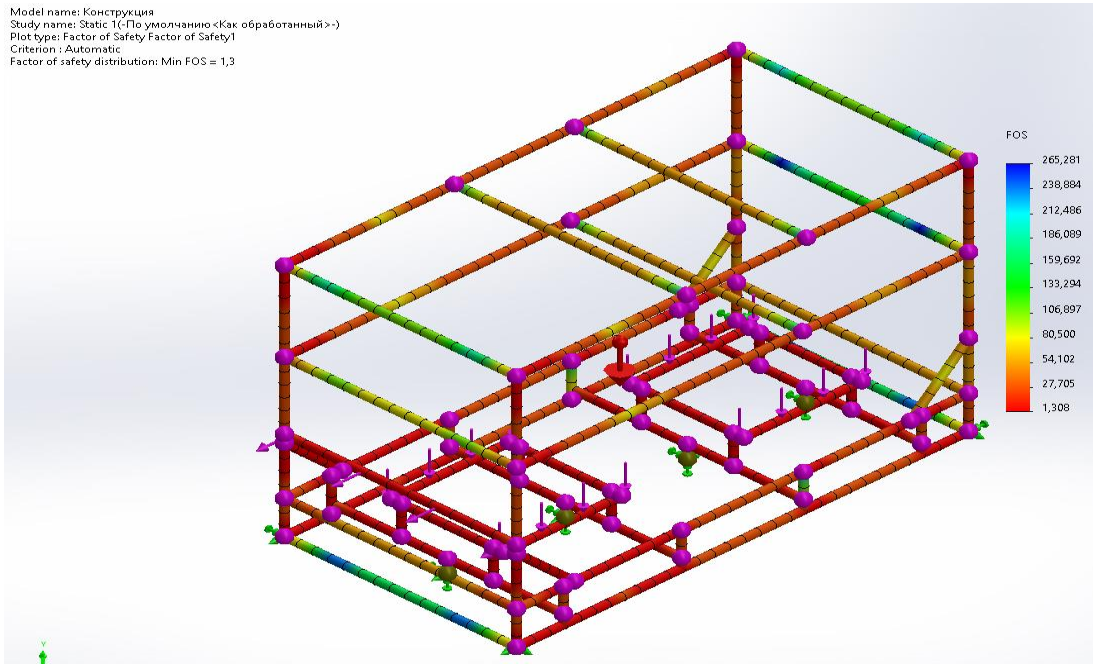



Рис. 5. Направление смещения рамной конструкции с использованием профиля сечением 50х50 мм в статическом режиме под воздействием вертикальной нагрузки.

Согласно приведённым расчётам, можно сделать вывод, использование алюминиевого конструкционного профиля сечением 50х50 мм отвечает всем необходимым требованиям, заложенным при разработке и проектировании, что будет намного эффективнее, чем использование профиля 40х40 мм без укрепления и с использованием раскосов в конструкции рамы.

Для разработки стенда использовались стандартизированные и унифицированные изделия, прошедшие сертификацию и/или декларирование на территории Республики Беларусь.

## Заключение

В результате работы будет разработан стенд для имитации динамической модели поведения двухколесных электрических транспортных средств как в условиях трассового покрытия, так и в условиях пересеченной местности с электронным управлением и возможностью воспроизведения трасс с соответствующими телеметрическими данными о модулях и углах приложения основных нагрузок на рамную конструкцию.

Стенд позволит ввести в эксплуатацию любой тип мотоцикла с электроприводом. Как показывает анализ предложений, на рынке отсутствуют стенды для имитации реальных комплексных условий эксплуатации внедорожной мототехники.

Контакты:
nick1252@vk.com (Кочетов Николай Владимирович);
nio@optron.by (Миранович Олег Леонидович, Тимошук Денис Александрович)

УДК 004.942:004.032.26:620.179.152

***В. С. КУВШИННИКОВ****, канд. техн. наук*
***Е. Е. КОВШОВ****, д-р техн. наук, проф.*
***А. В. СУДАРЕВ***
АО «Научно-исследовательский и конструкторский институт монтажной технологии — Атомстрой» (Москва, Россия)

# ГЕНЕРАЦИЯ СИНТЕТИЧЕСКИХ НАБОРОВ ДАННЫХ ДЛЯ ОБУЧЕНИЯ AI-МОДЕЛЕЙ В ЦИФРОВОЙ РАДИОГРАФИИ

**Аннотация:** В статье рассматривается проблема дефицита обучающих примеров для формирования наборов данных в задачах применения систем на основе искусственного интеллекта при анализе результатов радиационного вида неразрушающего контроля. Приведены предпосылки для разработки генератора примеров и рассмотрены альтернативные способы повышения качества обучения. Описан алгоритм применения математической модели цифрового двойника радиографического изображения при формировании размеченного набора данных. Предложена структура организации цифровых двойников при модификации условий экспонирования для повышения разнообразия примеров изображений. Представлены результаты автоматизированной генерации дефектов типа «продольная трещина».

**Ключевые слова:** цифровые и информационные технологии, искусственный интеллект, наборы данных, промышленная рентгенография, рентгеновское изображение

На сегодняшний день существует не одна архитектура искусственных нейронных сетей, практическое применение которых при решении прикладных производственных задач показывает обнадеживающие результаты. Особенную роль технологии искусственного интеллекта (ИИ) могут сыграть при замене человеческого труда в решении сложно формализуемых задач. К такому классу задач относятся задачи, связанные с распознаванием образов, например, при анализе результатов неразрушающего контроля.

Во многих отраслях производства, включая такие стратегически важные для государства, как машиностроение и энергетическая отрасль, незаменим радиационный вид неразрушающего контроля. По сравнению с визуальным и измерительным, а также ультразвуковым контролем, в радиационном виде используется ионизирующее излучение, крайне опасное для окружающих. Как действия рентгеновских и гамма-дефектоскопистов, так и отходы их производственной деятельности представляют более значимую угрозу для здоровья людей и окружающей среды, чем в других видах контроля.

В последние годы активно исследуются возможности применения сверточных нейронных сетей для решения задачи автоматической детекции дефектов на рентгенограммах, полученных при радиационном неразрушающем контроле сварных соединений металлических поверхностей деталей и конструкций. Многие из существующих решений используют однопроходные детекторы семейства YOLO (v5–v8), которые известны балансом точности и

скорости вывода. Баланс качества и стоимости вывода является важным показателем эффективности интеграции ИИ систем в производственные линии.

Уровень качества полученной ИИ системы во многом зависит от качества набора данных, использованных при обучении весов модели. Нередко используются разнородные датасеты, составленные из нескольких открытых источников. Такое решение вызвано дефицитом обучающих примеров, что, в свою очередь, объясняется сложностью и дороговизной организации процесса создания примеров размеченных изображений-результатов радиационного контроля. Анализ разнородных датасетов показал, что подобные данные нередко сопровождаются разметкой неудовлетворительного качества. Модели, обученные с применением разнородной выборки без учёта доменных смещений, обладают меньшей точностью. Исследователями предлагаются разные решения, позволяющие снизить негативный эффект от недостатков обучающих наборов. С одной стороны работа ведется в направлении развития архитектуры нейронных сетей, а с другой стороны совершенствуются средства обработки и аугментации изображений обучающих примеров. В рассматриваемой задаче применение многих стандартных аугментаций ограничено или исключено. Геометрические аугментации и аугментации цветового пространства, подходящие для фотоматериалов, некорректно модифицируют изображение швов и дефектов сварных соединений на рентгенограммах. Генеративный подход в создании обучающих примеров встречается реже. Среди способов генерации примеров наиболее перспективным направлением является симуляция изображений с применением математических моделей. Этот подход предусматривает применение приближенной к физически достоверной математической модели, формирующей нелинейную зависимость между уровнем яркости пикселей изображения и геометрически достоверными толщинами просвечиваемых материалов с учетом характеристик испускаемого источником проникающего излучения.

Одна из таких моделей была разработана при создании цифрового виртуального симулятора радиационного неразрушающего контроля. В его задачи входит снижение стоимости обучения специалистов по радиационному контролю, увеличение часов практических занятий с задействованием двигательной и зрительной памяти. Применение виртуальной среды производится при ознакомлении с оборудованием и в ходе развития навыков самостоятельной реализации этапов технологического процесса рентгеновского и гамма-контроля. Важной частью симулятора является комплексная система цифровых двойников объектов, позволяющая формировать симулированные радиографические изображения. При этом в интересах подготовки специалистов используемая модель позволяет отражать влияние параметров экспонирования на качество результатов. Моделируются изображения маркеров, индикаторов чувствительности, ограничительных меток и другого вспомогательного технологического оборудования. Соблюдается соответствие выполненных настроек и различимости изображений объектов.

Вышеперечисленные качества позволяют применять модель в качестве базы при генерации дополнительных примеров изображений. Реализация законченной системы генерации требует решения ряда дополнительных задач, среди которых можно выделить: разработка циклического алгоритма создания примеров, разработка алгоритма формирования разнообразных условий экспонирования, автоматизация генерации разнообразных объектов контроля с дефектами разных типов (ГОСТ Р ИСО 6520-1-2012), автоматизация процесса разметки сгенерированных изображений. Схема алгоритма автоматизированного формирования размеченных данных приведена на рис. 1.

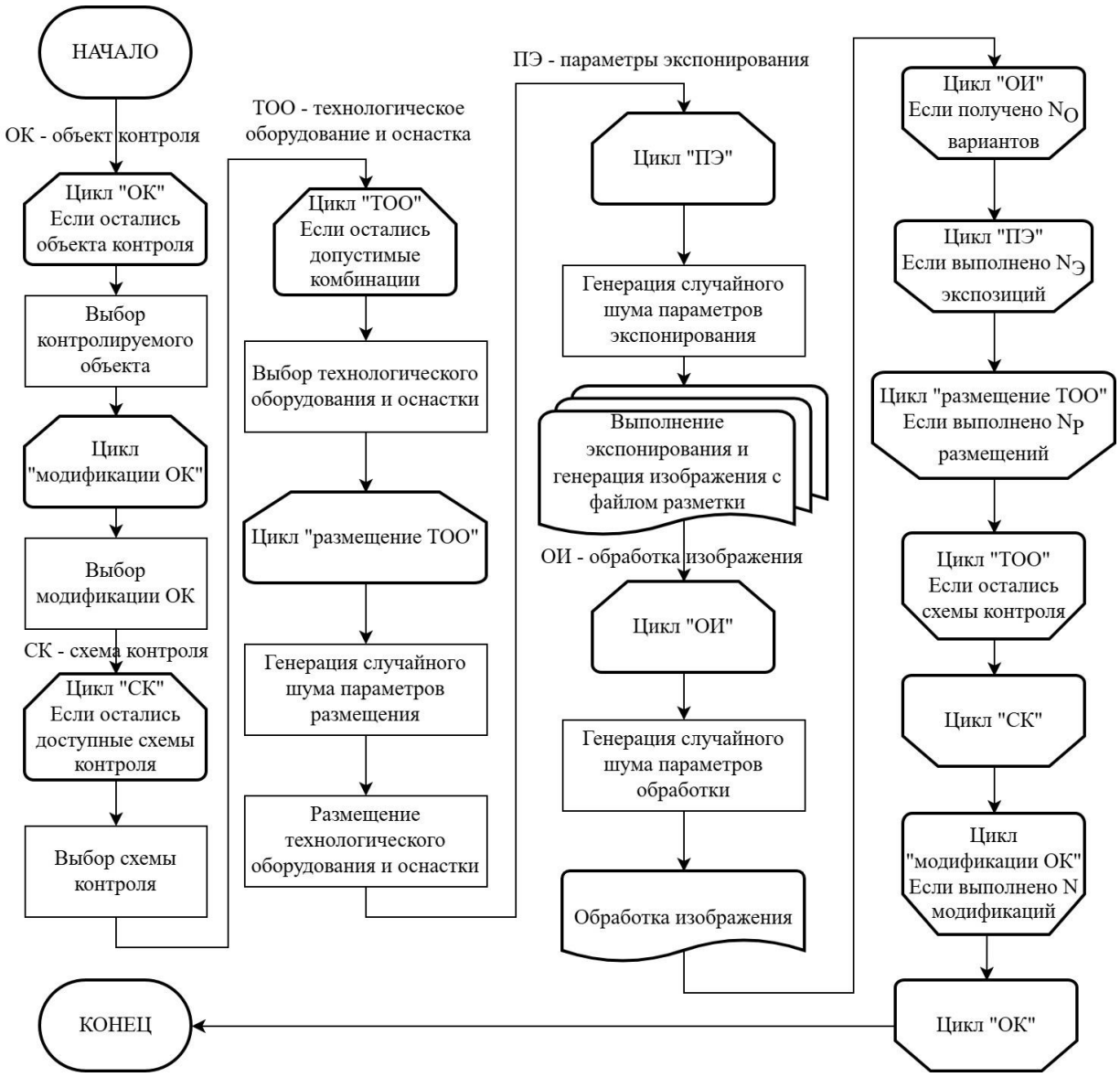



Рис. 1. Алгоритм автоматизированного формирования размеченных данных

При решении задачи реализации алгоритма формирования условий экспонирования предложен способ организации цифровых двойников по группам, позволяющий в удобной форме модифицировать примеры, получая высокую репрезентативность изображений, представленная на рис. 2. Для

решения задач формирования разнообразных примеров размеченных изображений введен дополнительный вид цифрового двойника – цифровой двойник дефектоскописта.

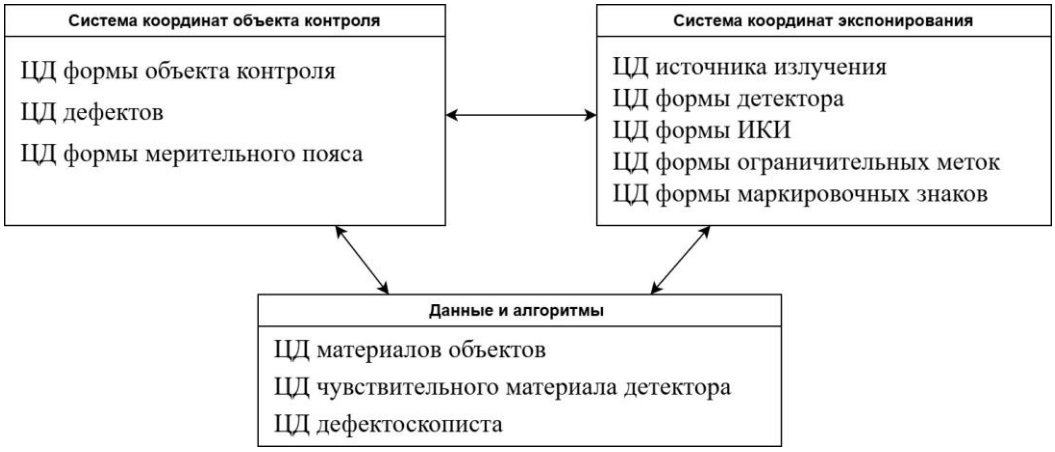



Рис. 2. Структура организации цифровых двойников при модификации условий экспонирования

Одной из важных составляющих задачи генерации объектов контроля является генерация разнообразных примеров дефектов заданного типа. Пример изображений автоматически сгенерированных продольных трещин представлен на рис. 3.

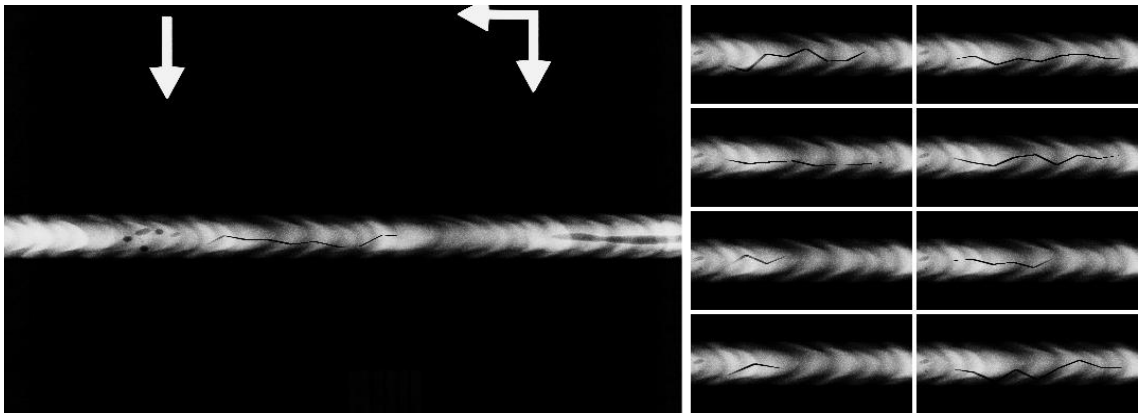


Рис. 3. Пример автоматически сгенерированных изображений трещин

Представленное решение позволяет создавать новые и балансировать имеющиеся наборы данных для решения узкоспециализированных задач. Достигнутых результатов достаточно для создания ранней версии ИИ системы поддержки принятия решений, что позволяет накапливать верифицированные результаты анализа реальных изображений для расширения обучающего набора.

Контакты:
KuvshinnikovVS@atomrus.ru (Кувшинников Владимир Сергеевич)
KovshovEE@atomrus.ru (Ковшов Евгений Евгеньевич)

УДК 69.05:004.925.8

***А. В. КУЛАН*[1]**
***Е. А. МОЙСЕЙЧИК*[1]**, *д-р. техн. наук, доц.*
***Е. Н. САВИНА*[1]**
***А. А. ЯКОВЛЕВ*[2]**
[1]Белорусский национальный технический университет (Минск, Беларусь)
[2]ООО «СимТех» (Минск, Беларусь)

# МЕТОДИКА КОНТРОЛЯ ГЕОМЕТРИИ СТАЛЬНЫХ И ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ НА ОСНОВЕ ОБЛАКОВ ТОЧЕК И BIM-МОДЕЛИРОВАНИЯ

**Аннотация.** В статье рассмотрена методика выявления геометрических дефектов конструктивных элементов зданий на основе сопоставления данных наземного лазерного сканирования с эталонной BIM-моделью методом Cloud-to-Mesh (C2M). Апробация выполнена на трёх типах реальных конструкций: стальной колонне двутаврового сечения, монолитной железобетонной колонне прямоугольного сечения (450×450 мм) и сборной железобетонной двухветвевой колонне (1300×500 мм). Получены цветовые карты и количественные оценки геометрических отклонений.

**Ключевые слова**: наземное лазерное сканирование; облако точек; BIM; Revit; информационное моделирование; дефекты; C2M; CloudCompare.

## Введение

Контроль геометрических параметров несущих конструкций является обязательным этапом как строительного контроля при возведении зданий, так и последующих обследований в процессе эксплуатации. Согласно ГОСТ 31937-2024 «Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния» [1] обследование технического состояния зданий и сооружений включает определение геометрических размеров конструкций и их отклонений от проектных значений, что напрямую влияет на оценку несущей способности и остаточного ресурса элемента.

Наряду с нормативной базой обследования эксплуатируемых конструкций существует отдельный, методологически самостоятельный объем требований – контроль геометрии конструкций непосредственно в процессе возведения и последующая приёмка. Эта область регулируется набором нормативных документов [2, 3] и формируется в виде последовательных действий: входной, операционный и приёмочный контроль качества. Результаты оформляются актами освидетельствования скрытых работ, актами промежуточной приёмки ответственных конструкций и исполнительной документацией.

В Республике Беларусь данная область регламентируется СН 1.03.01-2019 «Возведение строительных конструкций, зданий и сооружений» [2]. Аналогичную по назначению, но более детализированную в части числовых допусков структуру, на сегодняшний день, имеет и российский СП 70.13330.2012 «Несущие и ограждающие конструкции» [3].

Технология наземного лазерного сканирования позволяет [4] получать плотные облака точек с полным охватом видимой поверхности конструкции, что принципиально меняет подход к геометрическому контролю. При этом вместо выборочных измерений становится возможным сплошной анализ отклонений по всей площади элемента. Для количественной оценки отклонений между эталонной и фактической геометрией конструкции используются алгоритмы сравнения облаков точек: облако-облако (C2C), облако-меш (C2M) и многомасштабное сравнение модель-модель (M3C2) [5]. Алгоритм C2M, применённый в настоящей работе, вычисляет расстояние от каждой точки сравниваемого облака до ближайшей грани референтного меша.

Наземное лазерное сканирование за последнее десятилетие закрепилось как основной инструмент бесконтактного получения плотных и метрически точных геометрических данных о существующих конструкциях. В статье [6] отмечается, что использование данных облаков точек, полученных с помощью лазерного сканирования и фотограмметрии, является эффективным для оценки деформаций конструкций и последующего создания BIM-моделей, цифровых двойников сооружений.

В материалах [7-9] отмечается, что интеграция фотограмметрической съёмки и лазерного сканирования с BIM-технологией, позволяет создавать фактическую цифровую трехмерную модель объекта, а также выявлять места деформаций конструкций. В исследовании [10] на данных пяти последовательных сканирований реальной строительной площадки было продемонстрировано автоматическое извлечение 132 из 133 колонн с последующей проверкой соответствия геометрии проектной BIM-модели – результат, напрямую отражает применимость подхода для приёмочного контроля колонн в процессе строительства.

Цель исследования – апробация методики выявления геометрических дефектов конструктивных элементов на основе сопоставления данных наземного лазерного сканирования с эталонной BIM-моделью с использованием метода C2M.

## Основные положения

Последовательность рабочего процесса включает 4 основных этапа, представленных на рис. 1.

Рис. 1. Последовательного рабочего процесса

На первом этапе выполняется наземное лазерное сканирование (сканер FARO Focus) конструкций. с последующей регистрацией и обработкой полученных данных. На следующем этапе проводится обработка данных лазерного сканирования: регистрация и фильтрация облаков точек. Третий этап включает создание BIM-модели исследуемых объектов в программном комплексе Autodesk Revit. На четвертом этапе производится вычисление отклонений методом C2M, путем сравнения геометрии модели и данных облаков точек.

Метод C2M был выбран в качестве основного по следующим причинам:

– наличие эталонной BIM-модели, экспортированной из Autodesk Revit, позволяет вычислять знаковое расстояние от каждой точки облака до ближайшей грани модели с учётом нормали поверхности;

– знаковое расстояние (signed distance) позволяет однозначно интерпретировать направление отклонения.

Проверка методики выполнялась на несущих конструкциях реальных объектов: паркинг и производственные здания. Для анализа выбраны три типа колонн, различающихся материалом и поперечным сечением:

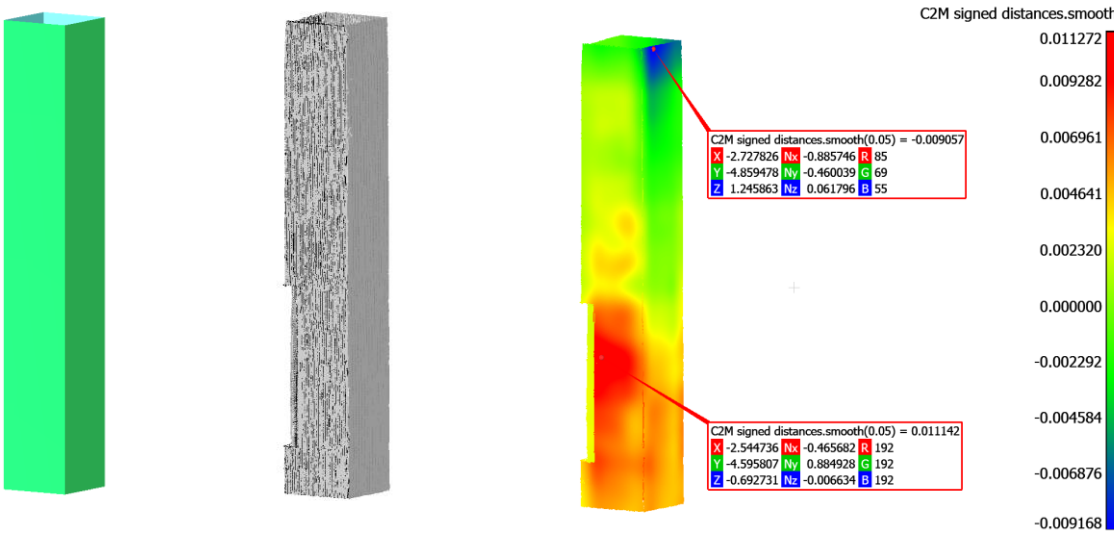
1. Монолитная железобетонная колонна с поперечным сечением 450х450 мм;
2. Сборная железобетонная двухветвевая колонна с поперечным сечением 1300х500 мм;
3. Стальной стержень (двутавр 40Ш2 ГОСТ Р 57837-2017).

Вычисление знаковых расстояний с помощью метода C2M выполнено в программном комплексе CloudCompare и изображены на рис. 2 – 4. Результаты представлены в форме карты цветов, на которых:

– зелёный цвет соответствует отклонениям, близким к нулю (геометрия факта совпадает с эталоном);

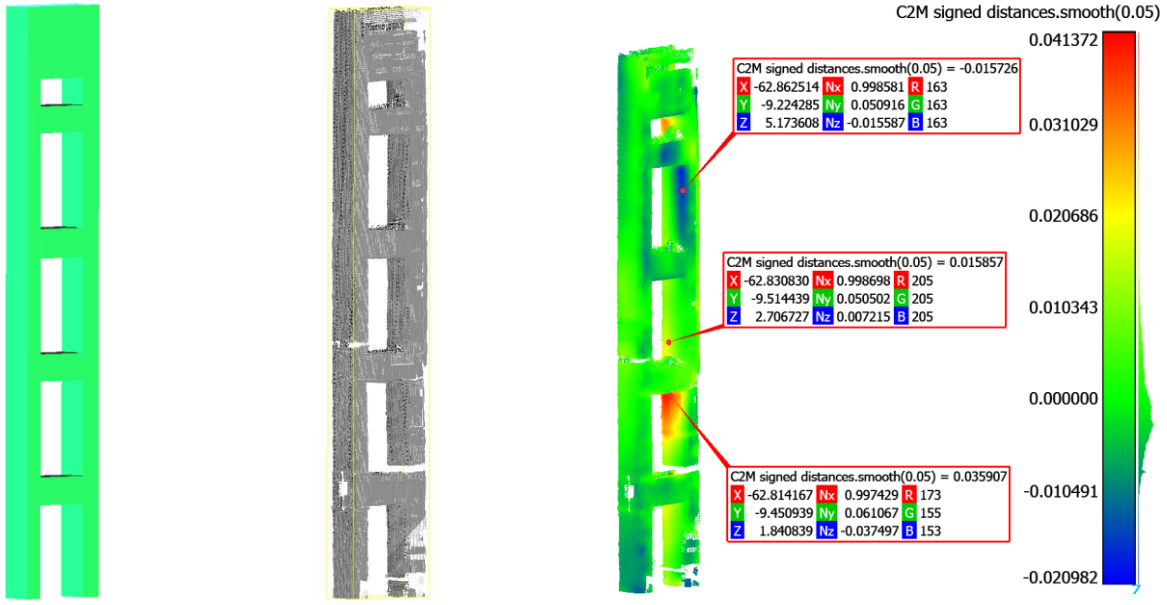
– красный – положительным отклонениям (выпуклость, утолщение);

– синий – отрицательным отклонениям (вогнутость, утончение, крен).



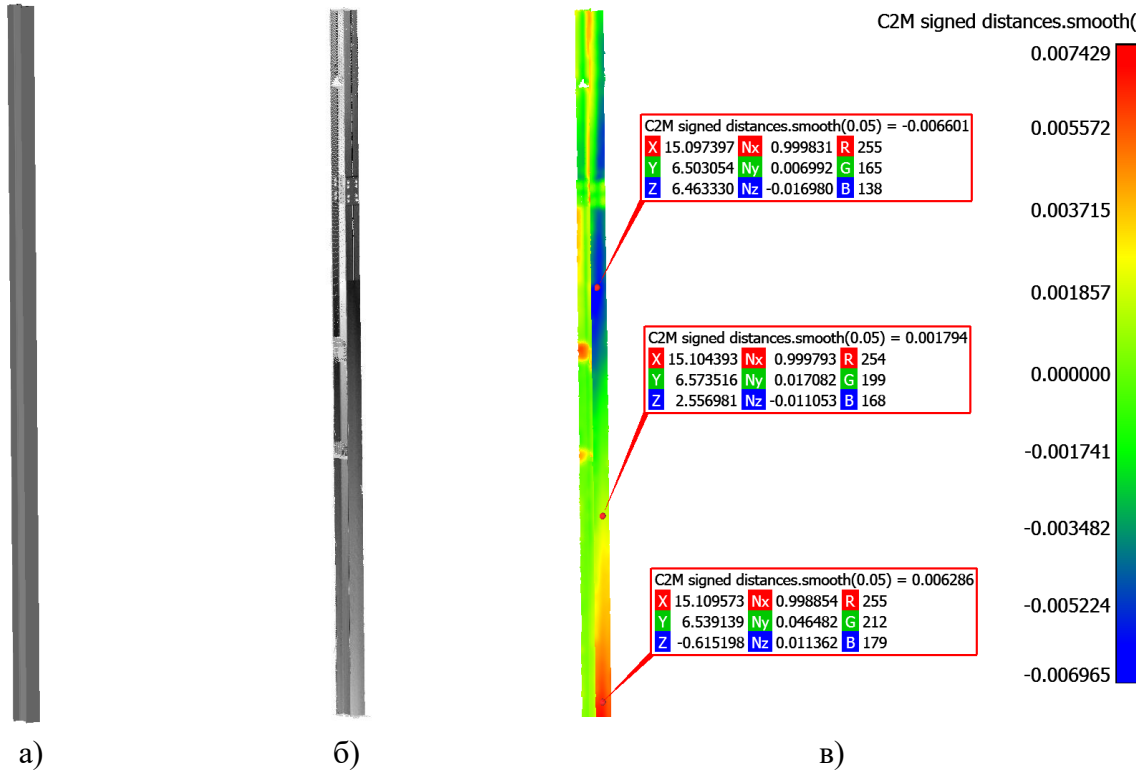

а) б) в)

Рис. 2. Монолитная железобетонная колонна
(а – эталонная модель; б – облако точек; в – карта отклонений)




а) б) в)

Рис. 3. Сборная железобетонная двухветвевая колонна
(а – эталонная модель; б – облако точек; в – карта отклонений)




а) б) в)

Рис. 4. Стальной стержень (двутавр 40Ш2 ГОСТ Р 57837-2017)
(а – эталонная модель; б – облако точек; в – карта отклонений)

Сопоставление результатов C2M-анализа с нормативными требованиями к геометрии конструкций выявило существенные различия в отклонениях исследуемых типов колонн (табл. 1).

Табл. 1. Статистические параметры C2M signed distances

| Колонна | Количество точек | Среднее откл., мм | Стандартное откл., мм | Мин., мм | Макс., мм | Размах, мм |
|---|---|---|---|---|---|---|
| ЖБ прямоугольная монолитная | 474 187 | 2,01 | 3,02 | −9,17 | +11,27 | 20,44 |
| ЖБ двухветвевая сборная | 137 158 | 0,45 | 7,45 | −20,98 | +41,37 | 62,35 |
| Стальной двутавр | 166 714 | 0,38 | 2,85 | −6,97 | +7,43 | 14,40 |

Стальной двутавр демонстрирует наименьший разброс отклонений (2,85 мм) и полностью укладывается в допуск на отклонение оси от вертикали (±12 мм) согласно СН 1.03.01-2019.

Железобетонная прямоугольная колонна (монолит) при сопоставимом со сталью стандартном отклонении (3,02 мм) показывает превышение нормативного допуска местных неровностей класса А6 по СП 70.13330 (5 мм) в 2,25 раза по максимальному значению (+11,27 мм). Существенно, что среднее значение отклонения (+2,01 мм) значимо отличается от нуля – это указывает на систематическое, а не случайное превышение фактических габаритов сечения над проектными.

Железобетонная двухветвевая колонна (сборная) показывает максимальное отклонение от эталонной модели среди всех трёх типов конструкций. Максимальное положительное отклонение (+41,37 мм) локализовано в средней по высоте зоне одной из ветвей колонны и визуально соответствует локальному сужению сечения. Проверка по необработанным данным отдельных сканов (до объединения в общее облако) подтвердила, что деформация фиксируется независимо на каждой станции сканирования, что исключает брак регистрации или сшивки сканов и указывает на реальный геометрический дефект элемента.

## Заключение

Предложенная методика контроля геометрии конструктивных элементов, основанная на сопоставлении данных наземного лазерного сканирования с эталонной BIM-моделью посредством метода (C2M) в CloudCompare, обеспечивает сплошной контроль геометрии поверхности элемента, на порядки превосходящий по плотности точечные измерения, предусмотренные действующими нормативными документами.

Апробация методики на трёх типах колонн выявила существенные различия в степени соответствия фактической геометрии проектной модели: от полного соответствия нормативным допускам (стальная колонна) до превышения допуска более чем в 13 раз (выявлены области на двухветвевой колонне).

Метод позволил выявить локальный геометрический дефект – сужение сечения ветви двухветвевой колонны величиной 41,37 мм, который не мог быть обнаружен традиционными методами точечного контроля и представляет

практическую значимость для последующей оценки несущей способности элемента.

Дальнейшие исследования направлены на интеграцию результатов C2M-анализа в BIM-модель посредством пользовательских параметров элементов Revit, что обеспечивает хранение данных геометрического контроля в едином информационном пространстве объекта и доступность результатов обследования для последующих этапов жизненного цикла конструкции.

**Список литературы**


1. Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния: ГОСТ 31937-2024. – Введ. 01.05.2024. – Минск : Госстандарт, 2024. – 82 с.

2. Возведение строительных конструкций, зданий и сооружений = Узвядзенне будаўнічых канструкцый, будынкаў і збудаванняў: СН 1.03.01-2019. – Введ. 29.11.2019. – Минск : Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь, 2019. – 127 с.

3. Несущие и ограждающие конструкции : СП 70.13330.2012 (актуализир. ред. СНиП 3.03.01-87, с изм. № 1, 3–7). – Введ 01.07.2012. – Москва : Госстрой, 2012. – 205 с.

4. Середович, В.А. Наземное лазерное сканирование: монография / В.А. Середович, А.В. Комиссаров, Д.В. Комиссаров, Т.А. Широкова. – Новосибирск: СГГА, 2009. – 261 с

5. Rani, A., Ortiz-Arroyo, D., Durdevic, P. Advancements in Point Cloud-Based 3D Defect Detection and Classification for Industrial Systems: A Comprehensive Survey / A. Rani, D. Ortiz-Arroyo, P. Durdevic // Information Fusion. – 2024. – Vol.122 – URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1566253524003531 (дата обращения: 01.07.2026).

6. Брусов, В.А. Лазерное сканирование и фотограмметрия в реконструкции с применением BIM технологий / В.А. Брусов // Вестник науки. – 2025. – №5(86). – С. 1030–1037.

7. Ковтун, И. Лазерное сканирование при строительстве и реконструкции зданий / И. Ковтун // Строительство и образование. – 2023. – № 5-6. – С. 84-91.

8. Савина, Е. Н. Социальные и технические аспекты применения БПЛА и облака точек на примере транспортного сооружения при создании BIM-модели / Е. Н. Савина, Е. А. Мойсейчик, А. А. Яковлев // Автомобильные дороги и мосты. – 2025. – № 1 (35). – С. 48–57.

9. Liu, Z., Liu, Z., Sun, Z., Zhang, Q., Zhao, L. Intelligent detection method for construction quality of building structures based on point cloud data and BIM models / Z. Liu, Z. Liu, Z. Sun, Q. Zhang, L. Zhao // Journal of Building Engineering. – 2025. – Vol. 112 – URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352710225017292 (дата обращения: 01.07.2026).

10. Maalek, R.; Lichti, D.D.; Ruwanpura, J.Y. Automatic Recognition of Common Structural Elements from Point Clouds for Automated Progress Monitoring and Dimensional Quality Control in Reinforced Concrete Construction // Remote Sensing. – 2019. – Vol. 11, iss. 9. – URL: https://www.mdpi.com/2220-9964/12/7/260 (дата обращения: 01.07.2026).



Контакты:
kulan.al@yandex.ru (Кулан Алексей Валерьевич);
emoisseitchik@mail.ru (Мойсейчик Евгений Алексеевич);
en713821@gmail.com (Савина Елена Николаевна);
ftkckp@mail.ru (Яковлев Александр Александрович).

УДК 621.313.2

***Г. С. ЛЕНЕВСКИЙ,*** *канд. техн. наук, доц.*
***А. П. КОРНЕЕВ***
Белорусско-Российский университет (Могилев, Беларусь)

# МЕТОД КОНТРОЛЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

**Аннотация**. В статье рассматривается метод контроля электромагнитного поля машин постоянного тока, который становится все более актуальным в условиях растущих требований к надежности и эффективности работы таких машин. Актуальность темы обусловлена необходимостью автоматизации процессов и внедрения современных технологий диагностики для снижения риска аварий и увеличения срока службы оборудования. Описываются основные принципы работы машин постоянного тока, влияние тока на электромагнитное поле и необходимость мониторинга ключевых параметров, таких как ток, напряжение и температура обмоток. Также представлена структура системы дистанционного контроля электромагнитного поля, включающая датчики, контроллеры, модули передачи данных и блоки визуализации. Разработка такой системы позволит повысить надежность и безопасность эксплуатации электрических машин в различных условиях.

**Ключевые слова:** электромагнитное поле, машина постоянного тока, дистанционный контроль.

В современном обществе электрические машины постоянного тока (МПТ) играют ключевую роль в различных секторах промышленности и в быту. С ростом требований к надежности и эффективности работы этих устройств, потребность в системах контроля и мониторинга становится все более актуальной. Дистанционный контроль электромагнитного поля (ЭМП), создаваемого такими машинами, не только улучшает их эксплуатационные характеристики, но и способствует обеспечению безопасности работы оборудования.

Актуальность данной темы обусловлена возрастающими требованиями к автоматизации процессов и внедрению современных методов диагностики. Согласно исследованиям [1], эффективный контроль ЭМП может значительно снизить вероятность аварий и продлить срок службы оборудования. Таким образом, разработка системы дистанционного контроля ЭМП представляет собой важную задачу для обеспечения надежной работы МПТ.

МПТ представляют собой устройства, которые преобразуют электрическую энергию в механическую и, наоборот, механическую энергию в электрическую. Основным принципом работы этих машин является взаимодействие ЭМП с электрическим током, что приводит к созданию вращающего момента.

Когда электрический ток проходит через обмотки якоря, он создает собственное ЭМП. Это поле взаимодействует с полем возбуждения, что вызывает появление силы, действующей на якорь. Интенсивность этой силы и,

соответственно, вращающий момент зависят от величины тока, проходящего через обмотки, а также от характеристик магнитного поля возбуждения. Чем больше ток, тем сильнее магнитное поле якоря, что увеличивает силу взаимодействия с полем возбуждения [2].

Влияние тока на ЭМП является важным аспектом функционирования МПТ. Увеличение тока ведет к усилению ЭМП, что, в свою очередь, способствует увеличению вращающего момента. Однако избыточный ток может привести к перегреву обмоток и другим нежелательным последствиям. Например, перегрев может повредить изоляцию проводников, что увеличивает риск короткого замыкания и других аварийных ситуаций. Также повышенный ток может негативно сказаться на эффективности работы машины, снижая ее КПД и увеличивая износ компонентов [2].

Для успешного контроля работы МПТ необходимо учитывать параметры, связанные с ЭМП. Это включает мониторинг величины тока, напряжения и температуры обмоток. Разработка системы дистанционного контроля ЭМП позволит быстро реагировать на изменения в работе машины и предотвращать потенциальные неисправности. Такие системы могут использовать различные датчики и устройства для сбора данных в реальном времени, что обеспечивает высокую степень надежности и безопасности работы оборудования.

Таким образом, понимание основных принципов работы МПТ и влияния тока на электромагнитное поле необходимо для создания эффективной системы мониторинга. Это позволит не только повысить надежность работы оборудования, но и обеспечить его безопасную эксплуатацию в различных условиях [3].

Создание системы дистанционного контроля ЭМП МПТ требует разработки структурной схемы. Функциональная схема описывает основные функции и процессы, которые выполняет система дистанционного контроля. Ключевые элементы функциональной схемы включают:

– Датчик тока: измеряет ток в обмотках якоря, что позволяет оценить нагрузку на МПТ.

– Контроллер (микроконтроллер или ПЛК): обрабатывает данные от датчика, выполняет вычисления и анализирует состояние МПТ.

– Модуль передачи данных: обеспечивает передачу информации на удаленный сервер или в систему управления, используя беспроводные технологии (например, Wi-Fi, Zigbee, LoRa) или проводные соединения (например, Ethernet).

– Блок визуализации и мониторинга: отображает информацию о состоянии ЭМП. Может быть реализован как веб-приложение, мобильное приложение или десктопное программное обеспечение.

Структурная схема (Рис. 1) показывает взаимосвязь между компонентами системы и их организацию. Описание структуры: датчик тока собирает данные о состоянии машины постоянного тока, контроллер обрабатывает данные и формирует результаты для передачи, модуль передачи передает данные на блок

визуализации и мониторинга, блок визуализации и мониторинга обеспечивает пользователю доступ к информации о состоянии ЭМП МПТ.

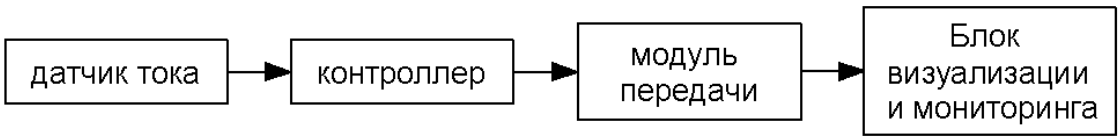



Рис. 1. Структурная схема дистанционного контроля ЭМП МПТ при использовании датчика тока

Система дистанционного контроля ЭМП МПТ включает в себя различные компоненты, которые работают совместно для обеспечения надежного мониторинга и анализа состояния машины. Функциональная схема описывает основные процессы и функции системы, в то время как структурная схема иллюстрирует взаимосвязь между компонентами и их организацию [4].

Создана экспериментальная установка упрощенного метода контроля ЭМП МПТ. Для нее реализации составлена структурная схема (Рис. 2).

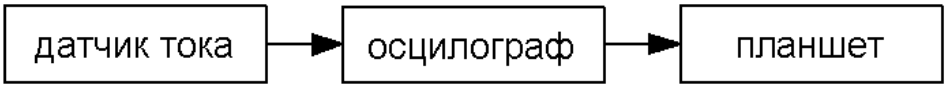



Рис. 2. Структурная схема упрощенного метода контроля ЭМП МПТ

Применяется машина постоянного тока (Рис. 3) на постоянных магнитах 7DC400W с номинальными параметрами:

– номинальная мощность 400 Вт;
– напряжение питания 24 В;
– номинальная частота вращения 1800 об/мин;
– номинальный крутящий момент 2,1 Н•м.

Рис. 3. Машина постоянного тока

Напряжение машины постоянного тока обеспечивается от регулируемого источника постоянного напряжения марки ВС-24м (рис. 4), выдающего напряжение в диапазоне от 0 до 30 В. Ввиду того, что напряжение известно, то датчик напряжения не использовался.

Рис. 4. Источник постоянного напряжения

В установке применяется датчик тока ACS758LCB-050B-PFF-T (AMC) (рис. 5)

Рис. 5. Датчик тока ACS758LCB-050B-PFF-T

Для получения графика тока использован осциллограф планшетный Micsig ATO1104 (Рис. 6, 7).

Рис. 6. Осциллограф Micsig ATO1104

Для машины постоянного тока связь между током в якоре и напряженностью магнитного поля можно описать с помощью уравнения, основанного на законе Ома и уравнении для электромагнитной индукции.

График напряженности магнитного поля машины постоянного тока можно построить по графикам тока и скорости.

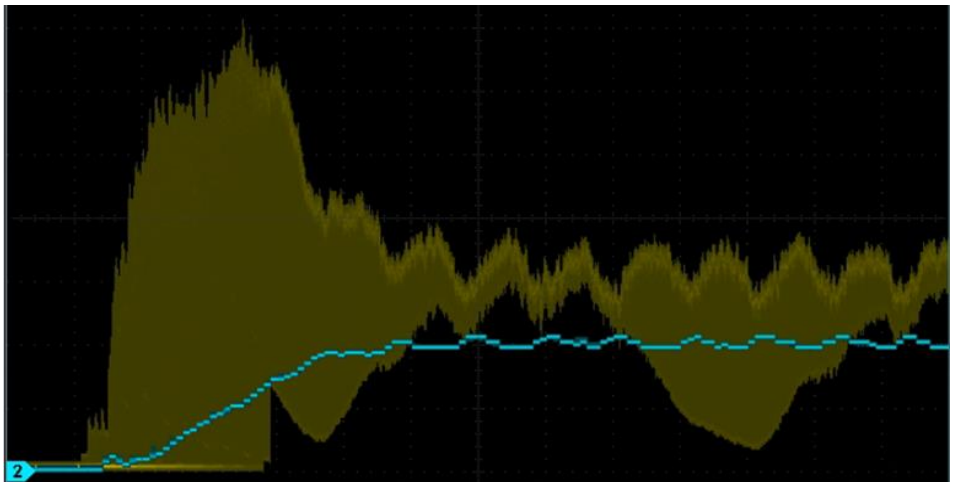


Рис. 7. Осциллограмма тока и скорости машины постоянного тока при пуске

## Выводы

Создана экспериментальная установка для упрощенного контроля электромагнитного поля машины постоянного тока. Для нее составлена структурная схема, описан состав установки и получены графики тока и скорости.

### Список литературы


1. Бессонов, Л.А. Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле: Учебник. — 10-е изд., стереотипное, М.: Гардарики, 2003. — 317с: ил. (в пер.)
2. Костенко, М.П. Электрические машины. В 2-х ч. Ч. 1 — Машины постоянного тока. Учебник для студентов высш. техн. учеб. заведений. Изд. 4-е, перераб. Л., «Энергия», 2016. - 544 с. с ил
3. Миловзоров В. П. Электромагнитные устройства автоматики. М.: Высш, школа, 2013. — 408 с., ил.
4. Федоров К. С. Современные методы диагностики и контроля состояния машин. – СПб.: Корона принт, 2022. – 457 с.



Контакты:
emos@rambler.ru (Леневский Геннадий Сергеевич)
ankorn79@mail.ru (Корнеев Андрей Петрович)

УДК 624.04

***ЛИ ЦИ***
***С. Н. САВИН****, д-р техн. наук, профессор*
Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (Санкт-Петербург, Российская Федерация)

# СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИССЛЕДОВАНИЙ В ОБЛАСТИ ДИНАМИЧЕСКОГО ДЕТЕКТИРОВАНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ И МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ КОНСТРУКЦИЙ

**Аннотация.** Методы обнаружения повреждений конструкций, основанные на динамических характеристиках, получили стремительное развитие в последние десятилетия. Основная идея данной технологии заключается в том, что вибрационные характеристики конструкций являются функциями их физических параметров (массы, демпфирования и жесткости). Повреждение конструкции вызывает изменение ее физических параметров, что неизбежно приводит к трансформации вибрационных характеристик.

Представлены сущность, текущее состояние применения и методы классификации мониторинга состояния конструкций (SHM) и методов динамического обнаружения повреждений. Особое внимание уделено методам обнаружения повреждений и алгоритмам идентификации на основе динамических характеристик, проанализированы достоинства и недостатки различных подходов. В заключении намечены направления для дальнейших исследований и тенденции развития методов обнаружения повреждений строительных конструкций.

**Ключевые слова:** мониторинг состояния; обнаружение повреждений; динамические характеристики; строительные конструкции.

Состояние ответственных объектов гражданского строительства, таких как мосты больших пролетов, плотины, сверхвысотные здания и морские платформы, напрямую связано с безопасностью жизни и имущества людей. В процессе длительной эксплуатации совместное воздействие таких неблагоприятных факторов, как агрессивная окружающая среда, старение материалов и эксплуатационные нагрузки, неизбежно приводит к накоплению повреждений и снижению несущей способности конструкций. Если накопление повреждений в критических элементах конструкции достигает определенного уровня и не обнаруживается своевременно, разрушение может распространяться лавинообразно, приводя к катастрофическим авариям (например, обрушение Серебряного моста в Западной Вирджинии [1] или моста Сонсу в Сеуле).

Своевременный мониторинг состояния конструкций и проведение ремонтных работ на ранних стадиях позволяют гарантировать эксплуатационные свойства сооружений, продлить срок их службы и кардинально снизить затраты на последующее содержание. В последние годы развитие компьютерных технологий, средств связи и различных типов датчиков

позволило перейти от визуального осмотра к комплексному использованию современных научно-технических достижений, что что сделало возможным всесторонний автоматизированный мониторинг и компьютерную оценку безопасности сооружений. В данном контексте особую актуальность приобретает интеграция сейсмоакустических методов и анализа свободных колебаний (включая исследование частот, декрементов и эпюр собственных колебаний), которые позволяют эффективно верифицировать расчетные модели и оценивать общую сейсмостойкость эксплуатируемых объектов [2, 3].

Housner и др. определили систему мониторинга состояния конструкций (Structural Health Monitoring, SHM) как эффективный метод, использующий натурные измерения для получения внутренней информации из эксплуатируемой конструкции и обработки данных с целью выявления и оценки изменений ключевых эксплуатационных показателей [4]. Современную систему мониторинга состояния конструкций можно разделить на пять основных взаимосвязанных компонентов: онлайн-тестирование, анализ в реальном времени, диагностика повреждений, оценка состояния и принятие решений по техническому обслуживанию.

За последние 20 лет, благодаря совершенствованию сенсорных технологий, беспроводной связи и методов сбора и обработки сигналов, технология динамического обнаружения структурных повреждений получила стремительное развитие. Использование собранной вибрационной информации для идентификации, локализации и количественной оценки повреждений превратилось в комплексную междисциплинарную науку, адаптированную к практическим инженерным нуждам гражданского строительства.

В зависимости от характера воздействия повреждения на конструкцию, его можно разделить на линейное (когда конструкция сохраняет линейно-упругие свойства) и нелинейное (например, появление усталостной трещины, которая открывается и закрывается под воздействием вибраций). Идентификация повреждений традиционно делится на четыре последовательных уровня согласно классификации Риттера [5]: определение наличия повреждения (Уровень I), локализация дефекта (Уровень II), количественная оценка степени тяжести (Уровень III) и прогнозирование остаточного срока службы (Уровень IV).

Существующие линейные методы дефектоскопии по наличию или отсутствию математической модели объекта подразделяются на два основных класса, представленных в Таблице 1.

При возникновении повреждения жесткость конструкции снижается, что влечет за собой падение собственных частот. Данный индикатор отличается высокой точностью и простотой измерения [6]. Однако частота является глобальным параметром и обладает слабой чувствительностью к локальным микротрещинам на ранних стадиях, а симметрия конструкций может приводить к идентичным изменениям частот при повреждениях в симметричных точках.

Табл. 1. Классификация методов идентификации линейных повреждений конструкций

| Категория | Основные подходы и алгоритмы |
|---|---|
| Методы на основе моделей (Model-based) | Метод сопоставления модальных шаблонов (Pattern Matching)<br>Метод модальных индикаторов повреждений (Damage Index Method)Метод корректировки и инверсии конечно-элементных моделей (Model Updating) |
| Методы без моделей (Non-model based) | Временная область: Модели ARMA, расширенный фильтр Калмана (EKF)<br>Частотная область: Спектральный анализ Фурье, кепстральный анализ сигналов<br>Временно-частотный анализ: Вейвлет-преобразование (Wavelet), преобразование Гильберта-Хуанга (HHT) |

Модальные векторы форм колебаний несут в себе пространственную информацию и более чувствительны к локальным дефектам. Для оценки изменений широко применяются критерий модальной уверенности MAC (Modal Assurance Criterion) [7] и его координатный аналог COMAC. MAC эффективен для фиксации самого факта возникновения повреждения, а а критерий COMAC позволяет приблизительно локализовать дефекты в зонах пучностей колебаний. Развитие данного направления показывает, что анализ экспериментальных эпюр собственных колебаний эксплуатируемых объектов является надежным базисом для интегральной оценки их пространственной жесткости и сейсмостойкости, что подтверждается многолетней практикой обследования уникальных сооружений и памятников архитектуры [2, 3]. Для балочных и плитных строительных элементов, работающих на изгиб, изменение кривизны форм колебаний является прямым индикатором дефекта, так как кривизна математически связана с локальной изгибной жесткостью сечения (EI) [8]. Точка, где разность кривизны до и после повреждения достигает максимума, четко указывает на положение дефекта.

Метод основывается на уравнении динамического равновесия. Ненулевые элементы вектора остаточных динамических сил, получаемые при подстановке параметров поврежденного состояния в исходную матрицу жесткости, позволяют локализовать дефектные узлы расчетной схемы без точного знания измененной матрицы жесткости всего сооружения [9]. Изменение глобальной матрицы податливости служит надежным базисом для дефектоскопии [10]. Поскольку элементы матрицы податливости обратно пропорциональны квадратам частот ($\omega_i^2$), низшие измеряемые формы колебаний вносят в нее определяющий вклад, сглаживая погрешности неотслеживаемых и зашумленных высоких частот. На основе допущения Стаббса о постоянстве отношения локальной энергии деформации элемента к полной энергии системы

выводится индекс повреждения, позволяющий проводить локализацию без точных исходных базовых модальных параметров [11]. Модификации метода, оценивающие скорость изменения модальной энергии деформации, доказали свою эффективность для ферменных и рамных несущих систем высотных зданий [12].

Для распознавания образов дефектов применяются сети обратного распространения (BP) и радиально-базисные сети (RBF), эффективно аппроксимирующие сложные многомерные отображения между сдвигами модальных параметров и деградацией жесткости [13].

Основанные на принципах естественного отбора ГА представляют собой мощный инструмент глобальной стохастической оптимизации [14]. Они незаменимы при поиске минимума сложных многоэкстремальных целевых функций идентификации повреждений в условиях зашумленности экспериментальных данных. Данная группа алгоритмов решает обратные математические задачи механики. Введение жестких физико-механических и регуляризирующих ограничений позволяет гарантировать единственность получаемого решения и его соответствие реальному состоянию объекта [15].

Использование серого реляционного анализа статических перемещений, деформаций или их кривизны позволяет с высокой точностью локализовать поврежденные зоны реальных конструкций по степени падения корреляции параметров соседних точек в условиях частично известной информации [16, 17].

Несмотря на значительный прогресс, сложность реальных строительных объектов и зашумленность среды сдерживают широкое промышленное внедрение динамического контроля. Для развития данной отрасли критически важно сосредоточить усилия на следующих направлениях.

Исследование микроповреждений: Разработка высокочувствительных локальных диагностических факторов для фиксации скрытых дефектов на этапе их зарождения.

Нелинейная идентификация: Переход к нелинейным моделям, учитывающим динамическое раскрытие и закрытие трещин при эксплуатационных вибрациях.

Междисциплинарный синтез: Объединение строительной механики, нейросетевых технологий, искусственного интеллекта и современных методов цифровой обработки сигналов.

Оптимизация сенсорных сетей: Математическое обоснование пространственного размещения ограниченного числа датчиков для извлечения максимума информации.

Системы непрерывного онлайн-мониторинга: Создание интеллектуальных систем экспресс-контроля состояния сооружений в режиме реального времени.

**Список литературы**

1. Lichtenstein, A. G. Silver bridge collapse recounted / A. G. Lichtenstein // Journal of

Performance of Constructed Facilities. — 1993. — Vol. 7, No. 4. — P. 249–261.

2. Савин, С. Н. Использование изгибных волн и свободных колебаний для формирования исходных данных при разработке расчетных моделей эксплуатируемых конструкций зданий и сооружений / С. Н. Савин // XV Российская национальная конференция по сейсмостойкому строительству и сейсмическому районированию, 9–13 октября 2023, Сочи. — Сочи, 2023. — С. 135–138.

3. Сейсмоакустические методы интегральной оценки физико-механических характеристик строительных конструкций зданий и сооружений / С. Н. Савин, В. М. Попов, Ю. В. Пухаренко [и др.] // Вестник евразийской науки. — 2023. — Т. 15, № 6.

4. Structural control: past, present, and future / G. W. Housner, L. A. Bergman, T. K. Caughey [et al.] // Journal of Engineering Mechanics. — 1997. — Vol. 123, No. 2. — P. 897–971.

5. Rytter, A. Vibration based inspection of civil engineering structures : dissertation / A. Rytter. — Denmark : Aalborg University, 1993.

6. Salawu, O. S. Detection of structural damage through changes in frequency: a review / O. S. Salawu // Engineering Structures. — 1997. — Vol. 19, No. 9. — P. 718–723.

7. Allemang, R. J. A correlation coefficient for modal vector analysis / R. J. Allemang, D. L. Brown // Proceedings of the First International Modal Analysis Conference. — 1982. — P. 110–116.

8. Pandey, A. K. Damage detection from changes in curvature mode shapes / A. K. Pandey, M. Biswas, M. M. Samman // Journal of Sound and Vibration. — 1991. — Vol. 145, No. 2. — P. 321–332.

9. Zimmerman, D. C. Structural damage detection using a minimum rank update theory / D. C. Zimmerman, M. Kaouk // Journal of Vibration and Acoustics, Transactions of ASME. — 1994. — Vol. 116, No. 2. — P. 222–231.

10. Pandey, A. K. Damage detection in structures using changes in flexibility / A. K. Pandey, M. Biswas // Journal of Sound and Vibration. — 1994. — Vol. 169, No. 1. — P. 3–17.

11. Stubbs, N. Damage localization in structures without baseline modal parameters / N. Stubbs, J. T. Kim // AIAA Journal. — 1993. — Vol. 34, No. 8. — P. 1644–1649.

12. Shi, Z. Y. Structural damage localization from modal strain energy change / Z. Y. Shi, S. S. Law, L. M. Zhang // Journal of Sound and Vibration. — 1998. — Vol. 218, No. 5. — P. 825–844.

13. Funahashi, K. On the approximate realization of continuous mappings by neural networks / K. Funahashi // Neural Networks. — 1989. — Vol. 2. — P. 183–192.

14. Holland, J. H. Outline for a logical theory of adaptive systems / J. H. Holland // Journal of the Association for Computing Machinery. — 1962. — Vol. 9, No. 3. — P. 297–314.

15. Dong Cong. Theory and method for structural intelligent health diagnosis / Dong Cong, Fan Lichu, Chen Zhaoyuan // China Railway Science. — 2002. — Vol. 23, No. 1. — P. 11–24. — (In Chinese).

16. Deng Julong. Control problems of grey systems / Deng Julong // Systems and Control Letters. — 1982. — Vol. 5, No. 1. — P. 288–294.

17. Chen Xiaozhen. The application of grey correlation analysis for the structural static damage detection / Chen Xiaozhen, Zhu Hongping, Chen Chuanyao // Mechanics and Engineering. — 2005. — Vol. 27, No. 3. — P. 60–64. — (In Chinese).

Контакты:
richey1997@qq.com (Ли Ци).
savinsn@gmail.com (Савин Сергей Николаевич).

УДК 621.331:629.423:519.216

***Б. В. МАЛОЗЁМОВ*[1]**, *канд. техн. наук, доц.*
***Н. В. МАРТЮШЕВ*[2]**, *канд. техн. наук, доц.*
***С. А. ВНУКОВ*[1]**
***Н. Д. ЕРЕЩЕНКО*[1]**
[1]Новосибирский государственный технический университет (Новосибирск, Россия)
[2]Томский политехнический университет (Томск, Россия)

# ДИАГНОСТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ И ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ГОРОДСКОГО ЭЛЕКТРОТРАНСПОРТА ПО ЭКСПЛУАТАЦИОННЫМ ПАРАМЕТРАМ

**Аннотация.** Рассмотрена методика диагностической оценки надежности городского электротранспорта по совокупности электрических, тепловых, кинематических и эксплуатационных признаков. Предложен интегральный деградационный показатель, связанный с вероятностью безотказной работы и остаточным ресурсом. Показано, что совместный учет тепловой реакции токоприемного узла, деградации батареи и маршрутной нагрузки позволяет перейти от порогового контроля к ранжированию технического обслуживания.

**Ключевые слова:** электротранспорт, диагностика, надежность, остаточный ресурс, стохастическая модель, тяговая батарея, техническое состояние

## Введение

Городской электротранспорт является технической системой с высокой плотностью энергетических, тепловых и информационных связей. Отказ тяговой батареи, преобразователя, токоприемного узла или тягового двигателя быстро приводит не только к техническому простою, но и к нарушению графика движения. Поэтому диагностика должна рассматриваться не как разовая проверка параметров, а как непрерывная процедура оценки надежности и остаточного ресурса [1].

Один измеряемый параметр редко дает достаточное основание для вывода о предельном состоянии. Повышенная температура может быть следствием дефекта контакта или высокой нагрузки; рост тока может отражать профиль маршрута, а не деградацию; увеличение разброса напряжений ячеек зависит от температуры, степени заряда и истории циклирования [2,3]. Вследствие этого требуется объединение признаков разной физической природы в единую вероятностную процедуру.

Цель работы состоит в построении диагностической схемы, позволяющей по текущим данным эксплуатации получить интегральный индекс деградации, оценку вероятности безотказной работы, прогноз остаточного ресурса и класс инженерного решения. В отличие от простого порогового контроля схема

учитывает накопленное повреждение, качество данных и статистическую неоднородность маршрутов.

## Материалы и методы

Для каждой единицы подвижного состава в момент времени $t$ формируется вектор диагностических признаков $z(t)$, включающий электрические параметры тягового контура, температурные показатели, кинематические характеристики и признаки эксплуатационного контекста:

$$z(t) = \left[ I(t),\ U(t),\ T(t),\ SOC(t),\ v(t),\ a(t),\ n_c(t),\ m(t),\ q_s(t) \right], \quad (1)$$

где $I$ и $U$ – ток и напряжение;

$T$ – температура контролируемого узла;

$SOC$ – степень заряда; $v$ и $a$ – скорость и ускорение;

$n_c$ – число эквивалентных циклов;

$m$ – эксплуатационная нагрузка;

$q_s$ – показатель качества синхронизации и полноты данных.

В Табл. 1 приведены данные, необходимые для интерпретации расчетов и сопоставления диагностических признаков.

Табл. 1. Группы диагностических признаков для оценки состояния электротранспорта

| Группа признаков | Пример параметра | Диагностический смысл | Реакция модели |
|---|---|---|---|
| Электрические | $I$, $U$, $\Delta U_{cell}$, $R_{int}$ | рост потерь, дисбаланс ячеек | рост батарейного или преобразовательного риска |
| Тепловые | $T_{max}$, $\Delta T$, скорость нагрева | контактные потери, ухудшение охлаждения | сокращение прогнозного ресурса |
| Кинематические | $v$, $a$, профиль торможения | отделение режима маршрута от дефекта | коррекция порога диагностики |
| Сервисные | ремонт, пробег, сезон | история обслуживания и внешняя среда | уточнение априорной вероятности отказа |

В таблице представлено разделение физического происхождения признаков. Это снижает риск ложной диагностики, когда эксплуатационная перегрузка ошибочно интерпретируется как дефект узла.

Интегральный индекс деградации $D(t)$ вычисляется как нормированная взвешенная сумма частных диагностических отклонений:

$$D(t) = \Sigma\, w_i \cdot \varphi_i\left(z_i(t)\right),\ \Sigma\, w_i = 1, \quad 0 \le D(t) \le 1, \quad (2)$$

где $w_i$ – вес $i$-го признака;

$\varphi_i$ – нормирующая функция, переводящая исходный параметр в безразмерный диагностический вклад.

Вероятность безотказной работы задается через модифицированную функцию интенсивности отказов

$$R(t) = \exp\left(-\int_0^t \lambda(\tau) d\tau\right), \quad \lambda(t) = \lambda_0 \exp\left(\alpha D(t) + \beta T_+(t) + \chi n_c(t)\right), \tag{3}$$

где $\lambda_0$ – базовая интенсивность отказов;

$T_+(t)$ – превышение температуры над допустимым уровнем;

$\alpha$, $\beta$, $\chi$ – коэффициенты чувствительности.

Такая постановка позволяет учитывать не только текущий уровень параметра, но и его накопленное действие.

На рис. 1 представлена общая логика обработки эксплуатационных данных от телеметрии до решения по обслуживанию.

Рис. 1. Последовательность диагностической обработки данных электротранспорта

Из рисунка видно, что расчет ресурса не отделен от контроля качества данных. Это принципиально: при плохой синхронизации телеметрии модель должна расширять неопределенность прогноза, а не выдавать жесткое аварийное заключение.

## Результаты диагностической обработки

Практическая интерпретация модели начинается с распределения индекса $D$. При малых значениях $D$ узел считается работоспособным с высоким запасом; промежуточная зона используется для планирования углубленной проверки; высокие значения требуют ограничения эксплуатации или приоритетного обслуживания.

На рис. 2 показано распределение диагностического индекса с выделением предупредительной и критической областей.

Гистограмма показывает не только долю объектов в зоне риска, но и ширину переходной области. Именно переходная область наиболее ценна для надежного управления, поскольку позволяет перенести ремонт из аварийного режима в планируемый.

Связь индекса *D* с надежностью иллюстрируется семейством кривых безотказной работы. При одинаковой календарной наработке нагруженный маршрут и тепловая перегрузка дают существенно более быстрое снижение *R(t)*, чем легкий маршрут.

На рис. 3 сопоставлены расчетные траектории *R*(*t*) для маршрутов с различной нагрузкой.

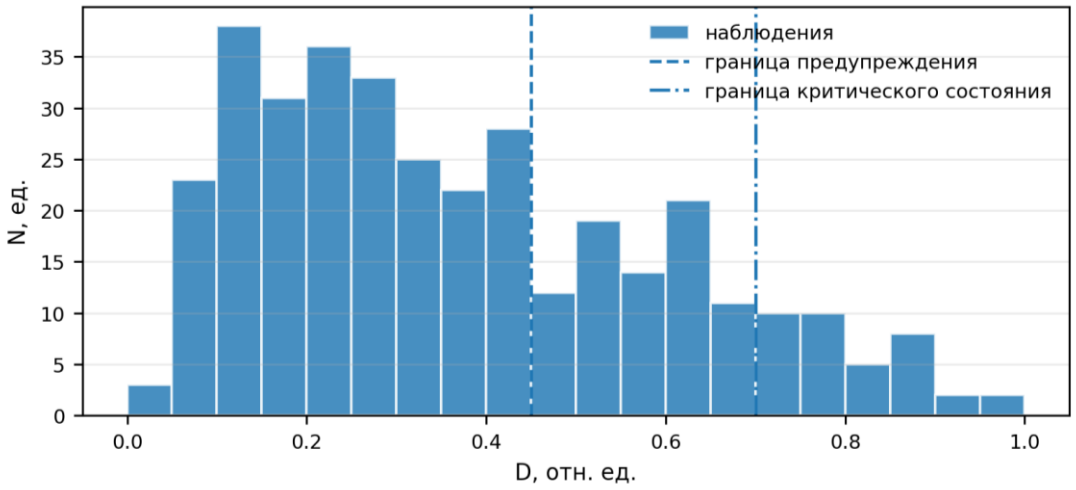



Рис. 2. Распределение интегрального индекса деградации в диагностической выборке

Главное наблюдение состоит в нелинейном расхождении кривых после накопления ресурса. Малое различие в начальный период эксплуатации трансформируется в значимое отличие по вероятности отказа на поздних стадиях.

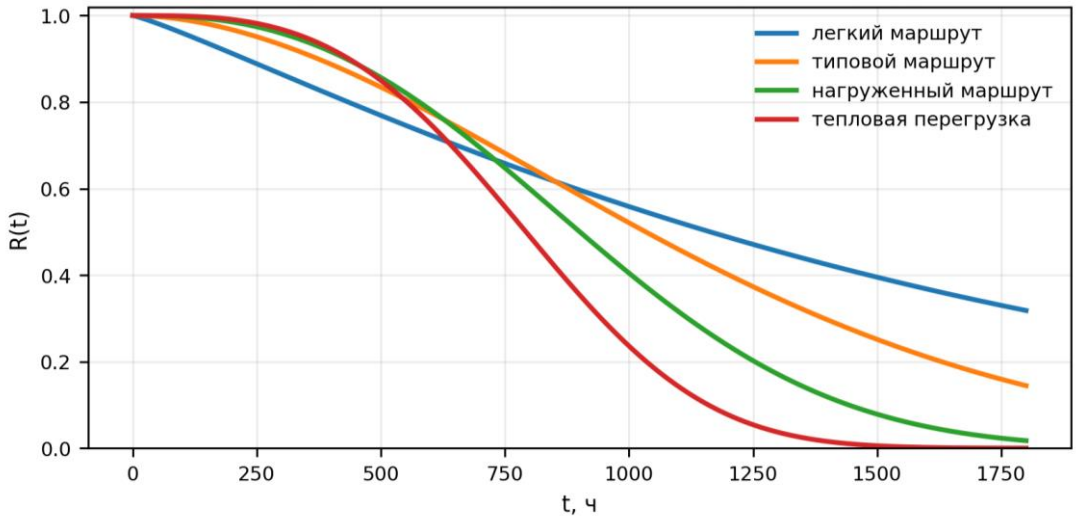



Рис. 3. Траектории вероятности безотказной работы для разных эксплуатационных групп

Отдельная проверка выполнена для токоприемного узла, поскольку его контактное состояние прямо влияет на тепловой режим и качество токосъема. На рис. 4 приведена зависимость температурного превышения от тока нагрузки.

На рис. 4 приведен дополнительный экспериментальный график: температурное превышение контактной зоны возрастает нелинейно при увеличении тока.

Значение графика состоит в том, что тепловое отклонение становится диагностически значимым не сразу, а после выхода в область повышенных токов. Поэтому фиксированный температурный порог следует применять вместе с информацией о нагрузочном режиме.

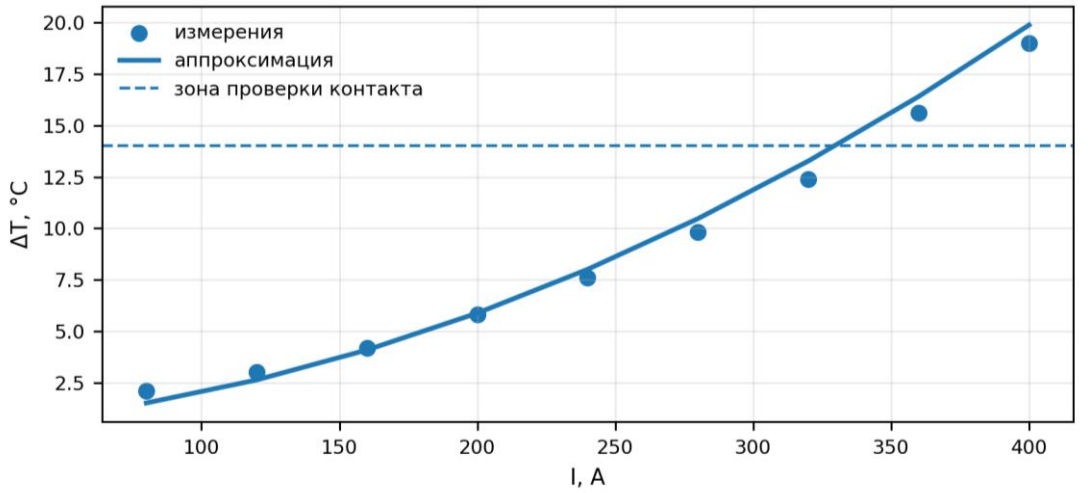



Рис. 4. Экспериментальная тепловая реакция токоприемного узла при росте тока

В Табл. 2 приведены данные, необходимые для интерпретации расчетов и сопоставления диагностических признаков.

Табл. 2. Пример статистической сводки по диагностическим состояниям

| Класс состояния | Диапазон D | Доля наблюдений, % | Рекомендуемое действие |
|---|---|---|---|
| Норма | 0,00–0,45 | 62,3 | регламентный контроль |
| Предупреждение | 0,45–0,70 | 26,8 | углубленная проверка узла |
| Критическое состояние | 0,70–1,00 | 10,9 | приоритетное обслуживание |

Сводка показывает, что большая часть наблюдений относится к нормальному режиму, однако почти треть требует не аварийного, а именно диагностически управляемого внимания. Это подтверждает смысл ранжирования парка по *D*.

Распределение риска по компонентам показывает, какие узлы формируют основной вклад в агрегированное состояние. При этом высокий вклад батареи не исключает локально опасных дефектов токоприемного или кабельного узла, поскольку последние имеют высокую скорость развития.

На рис. 5 отражено распределение относительного вклада узлов в суммарный риск.

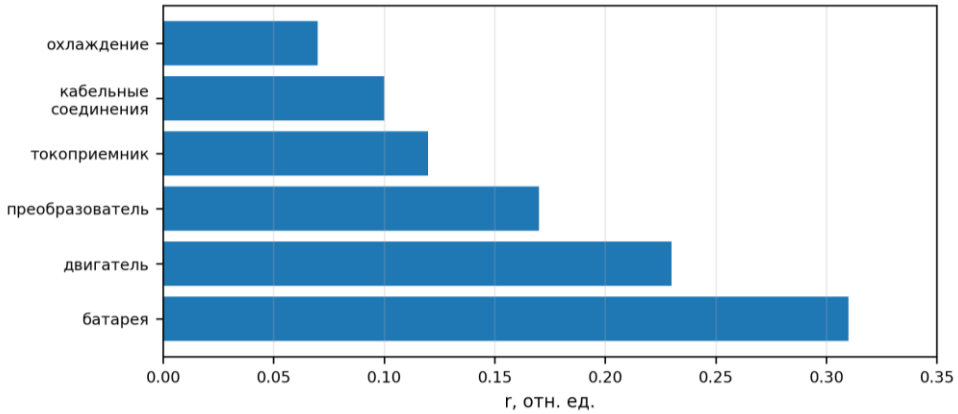



Рис. 5. Вклад основных узлов электротранспорта в агрегированный диагностический риск

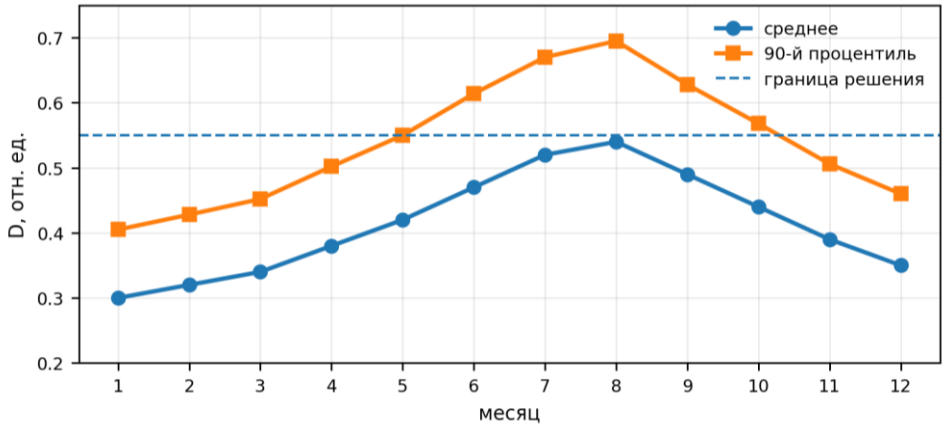



Рис. 6. Сезонная динамика диагностического индекса

Диаграмма показывает, что батарея и тяговый двигатель формируют более половины агрегированного риска. Однако кабельные соединения и охлаждение нельзя исключать из контроля: их вклад меньше по частоте, но выше по внезапности развития отказа. На рис. 6 показано изменение среднего значения и 90-го процентиля $D$ по месяцам.

Дополнительно оценена сезонная динамика диагностического индекса. В летний период средний уровень $D$ и 90-й процентиль возрастают, что отражает усиление теплового фактора и повышение нагрузки на охлаждение.

Особенность графика состоит в расхождении среднего уровня и верхнего процентиля летом. Это означает, что риск формируется не всем парком равномерно, а ограниченной группой машин с неблагоприятным сочетанием маршрута, температуры и технического состояния.

## Обсуждение

Полученные зависимости показывают, что диагностическая оценка надежности электротранспорта должна быть многофакторной. Наиболее существенный результат состоит в переходе от единичного порога к вероятностному ранжированию. Такой подход не заменяет регламентную

проверку, но позволяет определить, какие транспортные единицы должны быть проверены первыми.

Ограничением предложенной схемы является необходимость корректной калибровки весов $w_i$ и коэффициентов чувствительности. В условиях нового парка эти параметры следует задавать консервативно, а затем уточнять по мере накопления телеметрии и ремонтной статистики.

## Выводы

Предложена диагностическая процедура оценки надежности и остаточного ресурса городского электротранспорта по совокупности эксплуатационных признаков. Показано, что интегральный индекс $D$ позволяет объединить электрические, тепловые, кинематические и сервисные признаки в единую шкалу технического состояния.

Практическая ценность подхода состоит в выделении переходной зоны между нормой и критическим состоянием. Именно эта зона позволяет организовать профилактическое обслуживание до возникновения отказа и рационально распределить ресурсы диагностической службы.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-29-01565, https://rscf.ru/project/25-29-01565/

### Список литературы

1. Martyushev, N. V. Mathematical Modeling of the State of the Battery of Cargo Electric Vehicles / N. V. Martyushev, B. V. Malozyomov [et al.] // Mathematics. — 2023. — Vol. 11, No. 3. — Art. 536. — DOI: 10.3390/math11030536.

2. Martyushev, N. V. Review Models and Methods for Determining and Predicting Reliability of Technical Systems and Transport / N. V. Martyushev, B. V. Malozyomov [et al.] // Mathematics. — 2023. — Vol. 11, No. 15. — Art. 3317. — DOI: 10.3390/math11153317.

3. Martyushev, N. V. Reliability of Urban Electric Transport Running Autonomously through Diagnostic Parameters / N. V. Martyushev, B. V. Malozyomov [et al.] // World Electric Vehicle Journal. — 2023. — Vol. 14, No. 12. — Art. 334. — DOI: 10.3390/wevj14120334.

Контакты:
mbv5@mail.ru (Малозёмов Борис Витальевич)
nikita@ereschenko.ru (Мартюшев Никита Владимирович)
abakan.1998@mail.ru (Внуков Сергей Александрович)
nikita@ereschenko.ru (Ерещенко Никита Дмитриевич)

УДК 621.331:629.423:519.216

***Б. В. МАЛОЗЁМОВ*[1]**, *канд. тех. наук, доц.*
***Н. В. МАРТЮШЕВ*[2]**, *канд. тех. наук, доц.*
***С. А. ВНУКОВ*[1]**
***Н. Д. ЕРЕЩЕНКО*[1]**
[1]Новосибирский государственный технический университет (Новосибирск, Россия)
[2]Томский политехнический университет (Томск, Россия)

# МУЛЬТИМОДАЛЬНЫЙ НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ ЭЛЕМЕНТОВ ЭЛЕКТРОТРАНСПОРТА ПО ТЕПЛОВЫМ, ВИБРОАКУСТИЧЕСКИМ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ПРИЗНАКАМ

**Аннотация.** Представлен протокол мультимодального неразрушающего контроля элементов электротранспорта, основанный на совместном использовании тепловых, виброакустических, электромагнитных и геометрических признаков. Рассмотрены контактные зоны токоприемников, кабельные соединения, элементы тягового привода и изоляционные узлы. Предложен интегральный индекс дефектного риска, позволяющий объединить признаки разной физической природы и сформировать решение о повторном контроле, ремонте или продолжении эксплуатации.

**Ключевые слова:** неразрушающий контроль, электротранспорт, токоприемник, тепловизионный контроль, виброакустика, дефектный риск

Неразрушающий контроль электротранспорта имеет ряд особенностей. Контролируемые элементы одновременно испытывают электрическую нагрузку, механические вибрации, температурные перепады и воздействие окружающей среды [1]. Поэтому один метод контроля, как правило, фиксирует только часть дефектной картины.

В качестве объектов контроля рассматриваются токоприемные узлы, контактные соединения, кабельные наконечники, элементы тягового электропривода и зоны локального нагрева в силовых цепях. Для этих объектов характерны дефекты, которые сначала проявляются как малые изменения тепловой или виброакустической сигнатуры, а затем переходят в быстрый отказ [2,3].

В табл. 1 приведены данные, необходимые для интерпретации расчетов и сопоставления диагностических признаков. Представленные данные показывают, что каждому объекту соответствует не один, а несколько физических каналов контроля. Это повышает устойчивость диагностики, поскольку дефект должен подтверждаться согласованными признаками.

## Протокол измерений

Предлагаемый протокол строится как последовательность независимых каналов контроля с последующим объединением результатов. Сначала выполняется тепловая съемка под нагрузкой, затем регистрируется

виброакустический отклик, после чего проводится электромагнитная или электрическая проверка зоны риска. Геометрический или визуальный контроль используется как подтверждающий этап.

Табл. 1 – Объекты и методы мультимодального контроля

| Объект контроля | Основной дефект | Метод НК | Диагностический признак |
|---|---|---|---|
| Токоприемный узел | износ контактной поверхности | тепловизионный, виброакустический | ΔT, спектральная амплитуда |
| Кабельное соединение | ослабление контакта | тепловизионный, электрический | локальный перегрев, рост потерь |
| Тяговый двигатель | подшипниковый или щеточный дефект | виброакустический | полосовые признаки спектра |
| Изоляционный узел | увлажнение, загрязнение, старение | электромагнитный, электрический | изменение поля, ток утечки |

На рисунке 1 представлена последовательность контроля от теплового сканирования до объединения дефектного риска.

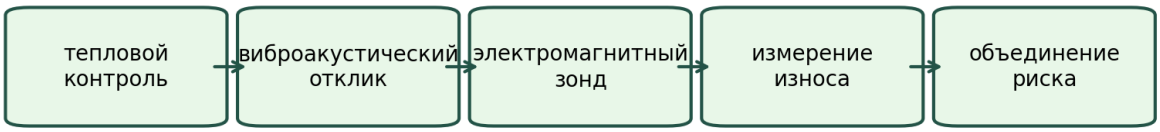



Рис. 1. Последовательность мультимодального неразрушающего контроля элементов электротранспорта

Из рисунка видно, что итоговое решение формируется не после первого превышения порога, а после объединения независимых физических признаков. Это снижает вероятность ложного брака и пропуска дефекта.

Для каждого канала вводится нормированный частный признак $K_j$. Он принимает малые значения при нормальном состоянии и растет при усилении дефектного проявления

$$K_j = \frac{s_j - s_{j,0}}{s_{j,\lim} - s_{j,0}}, \quad 0 \le K_j \le 1. \tag{1}$$

где $s_j$ – измеренный диагностический параметр; $s_{j,0}$ – уровень исправного состояния; $s_{j,lim}$ – предельное значение.

Интегральный индекс дефектного риска определяется как взвешенная сумма частных признаков

$$K_d = \sum \mu_j K_j + \mu_r K_{rep}, \quad \sum \mu_j + \mu_r = 1. \tag{2}$$

где $\mu_j$ – веса диагностических каналов; $K_{rep}$ – показатель повторяемости дефектного признака при повторном измерении.

Включение повторяемости важно, поскольку одиночная тепловая или вибрационная аномалия может быть вызвана режимом нагрузки, положением датчика или внешней помехой.

### Экспериментальные признаки дефектов

Тепловой канал наиболее чувствителен к контактным потерям. Для токоприемного узла диагностически важна не только максимальная температура, но и форма температурного профиля вдоль контактной зоны [4].

На рисунке 2 показан температурный профиль вдоль контактной зоны с локальной аномалией.

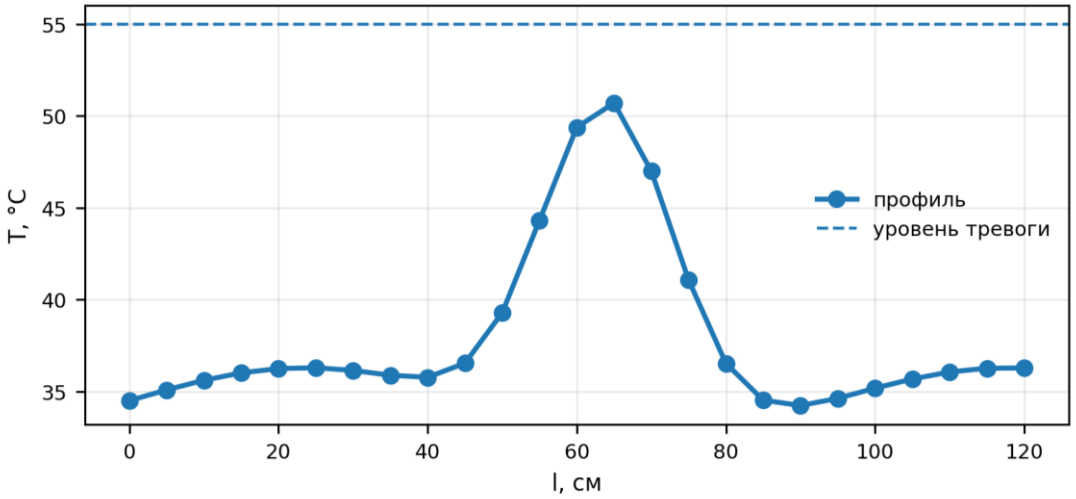



Рис. 2. Тепловая аномалия вдоль контактной зоны токоприемного узла

Главное в графике – локальность перегрева. Средняя температура узла может оставаться допустимой, но локальный максимум уже указывает на контактный дефект или неравномерный износ поверхности.

Виброакустический канал дополняет тепловой контроль, поскольку отражает механическую неравномерность контакта, износ и ударные компоненты. На рисунке 3 приведен дополнительный экспериментальный спектральный график для исправного и изношенного контактов.

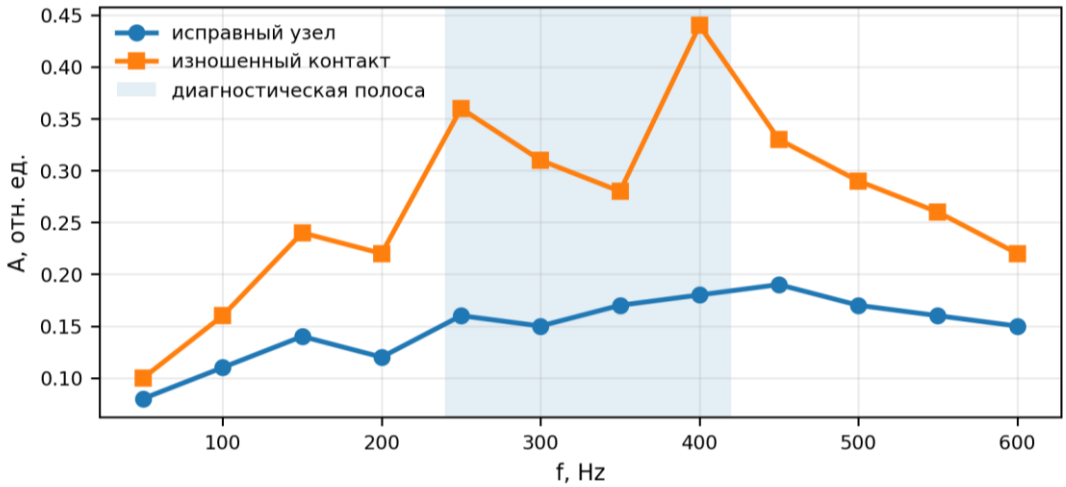



Рис. 3. Экспериментальный виброакустический спектр токоприемного узла

Основой спектра является появление диагностической полосы 240 – 420 Hz, где амплитуда изношенного контакта существенно выше нормы. Такой признак удобен для автоматизированного контроля, так как он менее зависит от абсолютного уровня сигнала. Для объединенной интерпретации удобно использовать пространство признаков. На рисунке 4 показано разделение нормального и дефектно-опасного состояний по двум нормированным признакам: тепловому $K_T$ и вибрационному $K_V$ и приведена двумерная диагностическая диаграмма с границей решения.

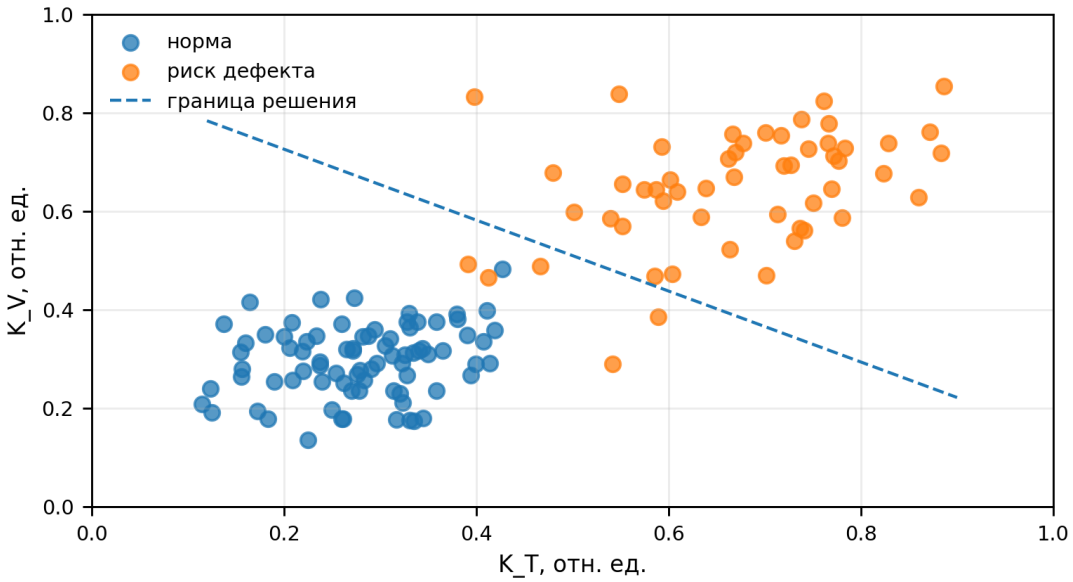



Рис. 4 – Разделение состояний в пространстве теплового и вибрационного признаков

Диаграмма показывает, что надежное решение возникает не из одного признака, а из их сочетания. Область риска формируется там, где одновременно растут тепловой и вибрационный отклики. В таблице 2 приведены данные, необходимые для интерпретации расчетов и сопоставления диагностических признаков.

Табл. 2. Правила интерпретации интегрального индекса дефектного риска

| Диапазон $K_d$ | Состояние | Решение | Комментарий |
|---|---|---|---|
| 0,00–0,35 | допустимое | эксплуатация без ограничения | повтор по регламенту |
| 0,35–0,55 | пограничное | повторный контроль | проверить режим нагрузки |
| 0,55–0,75 | дефектно-опасное | ремонт при ближайшем окне | подтвердить вторым каналом |
| 0,75–1,00 | критическое | вывод из эксплуатации | локализовать дефектный узел |

Правила в таблице 2 специально разделяют пограничную и дефектно-опасную зоны. Это важно для электротранспорта: часть аномалий связана с режимом движения и должна подтверждаться повторяемостью.

### Объединение каналов и принятие решения

Многоканальная сигнатура позволяет оценить, какой физический механизм доминирует в наблюдаемом отклонении. Если тепловой признак высок, а вибрационный и электромагнитный малы, вероятен контактный перегрев без развитого механического дефекта [5]. Если одновременно растут вибрационный и тепловой признаки, вероятность износа контактной пары существенно выше. На рисунке 5 показано сопоставление нормального состояния и дефектно-опасной сигнатуры по пяти признакам.

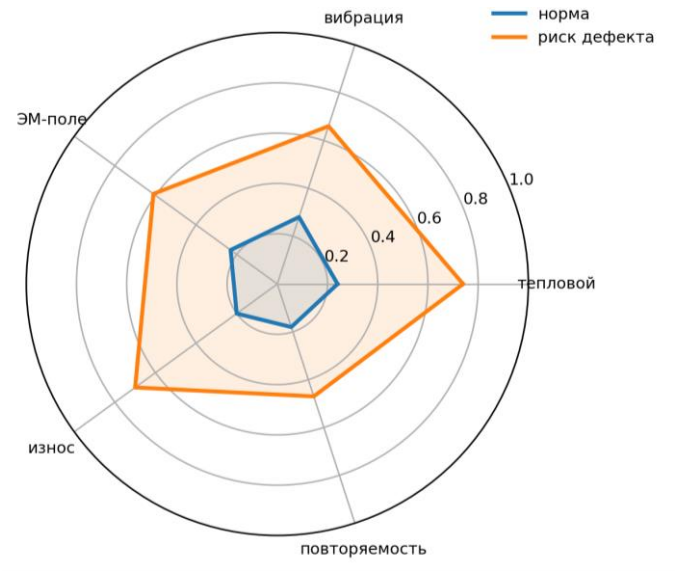



Рис. 5 – Многоканальная дефектная сигнатура контролируемого узла

Радарная диаграмма удобна для инженерной диагностики, потому что показывает не только величину риска, но и профиль его происхождения. Это позволяет выбрать метод уточняющего контроля. Статистическое распределение $K_d$ используется для оценки доли объектов в разных состояниях и для настройки порогов контроля. На рис. 6 приведено распределение интегрального индекса $K_d$ для нормальных и дефектно-опасных наблюдений.

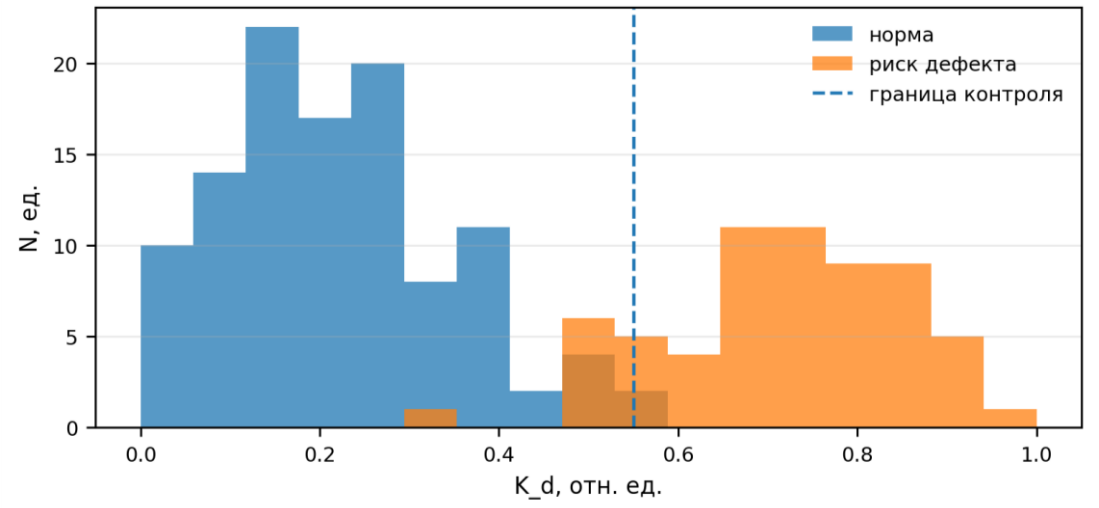



Рис. 6 – Распределение интегрального индекса дефектного риска.

Гистограмма показывает частичное перекрытие классов, что типично для реального НК. Главное здесь в том, что решение должно учитывать не только порог $K_d$, но и повторяемость признака, режим нагрузки и подтверждение другим каналом.

## Выводы

Предложен протокол мультимодального неразрушающего контроля элементов электротранспорта, объединяющий тепловые, виброакустические, электромагнитные и геометрические признаки. Показано, что локальная тепловая аномалия, спектральный виброакустический рост и повторяемость признака должны рассматриваться совместно.

Практическая значимость подхода состоит в снижении вероятности ложных решений. Мультимодальная схема позволяет не только обнаружить отклонение, но и определить его физическую природу, что повышает точность выбора ремонтного действия.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-29-01565, https://rscf.ru/project/25-29-01565/

### Список литературы

1 Filina O. A., Martyushev N. V., Malozyomov B. V. et al. Diagnostics in the Brush-Commutator Assembly of a DC Motor. Energies. 2024;17:17. DOI: 10.3390/en17010017.

2 Martyushev N. V., Malozyomov B. V. et al. Reliability of Urban Electric Transport Running Autonomously through Diagnostic Parameters. WEVJ. 2023;14:334. DOI: 10.3390/wevj14120334.

3 Martyushev N. V., Malozyomov B. V. et al. Review Models and Methods for Reliability of Technical Systems and Transport. Mathematics. 2023;11:3317. DOI: 10.3390/math11153317.

4 Malozyomov B. V., Martyushev N. V. et al. Modelling of Reliability Indicators of a Mining Plant. Mathematics. 2024;12:2842. DOI: 10.3390/math12182842.

5 Shishkin P. V., Malozyomov B. V. et al. Mathematical Logic Model for Controllability of Mining Equipment. Mathematics. 2024;12:1660. DOI: 10.3390/math12111660.

Контакты:
mbv5@mail.ru (Малозёмов Борис Витальевич)
nikita@ereschenko.ru (Мартюшев Никита Владимирович)
abakan.1998@mail.ru (Внуков Сергей Александрович)
nikita@ereschenko.ru (Ерещенко Никита Дмитриевич)

УДК 621.331:629.423:519.216

***Б. В. МАЛОЗЁМОВ*[1]**, *канд. тех. наук, доц.*
***Н. В. МАРТЮШЕВ*[2]**, *канд. тех. наук, доц.*
***С. А. ВНУКОВ*[1]**
***Н. Д. ЕРЕЩЕНКО*[1]**
[1]Новосибирский государственный технический университет (Новосибирск, Россия)
[2]Томский политехнический университет (Томск, Россия)

# ЦИФРОВОЙ ДВОЙНИК ЭЛЕКТРОТРАНСПОРТА ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РЕСУРСА И ПРИОРИТИЗАЦИИ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ

**Аннотация.** Предложена архитектура цифрового двойника электротранспортного объекта, объединяющая поток телеметрии, физико-ориентированную модель, апостериорное обновление параметров и сервисный контур принятия решений. Особое внимание уделено качеству данных, проверке теплового контура и формированию карты эксплуатационного риска. Показано, что цифровой двойник целесообразно использовать не как замену неразрушающего контроля, а как инструмент предварительного ранжирования узлов по вероятности дефекта и тяжести последствий.

**Ключевые слова:** цифровой двойник, электротранспорт, остаточный ресурс, телеметрия, качество данных, предиктивное обслуживание

## Введение

Цифровой двойник электротранспорта представляет собой не статическую расчетную модель, а обновляемую информационно-математическую копию объекта, которая связывает измерения, скрытое техническое состояние и сервисное решение. Для парка электротранспорта это особенно важно, поскольку одинаковые по типу машины работают в разных маршрутах, температурных условиях и режимах заряда [1, 2]. В работе цифровой двойник рассматривается как надстройка над диагностикой и неразрушающим контролем. Он не должен отменять тепловизионный, виброакустический или электрический контроль [3]. Его задача – заранее указать, где вероятность дефекта и цена отказа выше, а значит, куда следует направить диагностический ресурс в первую очередь.

На рис. 1 представлена архитектура цифрового двойника, в которой поток измерений замыкается на модель состояния и сервисное решение. Из рисунка видно, что цифровой двойник не ограничивается расчетом RUL. Его ценность возникает в замкнутом контуре: измерения уточняют параметры модели, а уточненная модель изменяет приоритет технического обслуживания.

*Архитектурные контуры.* Структура цифрового двойника разделена на четыре контура: информационный, модельный, прогностический и сервисный. Такое разделение позволяет не смешивать задачи очистки данных, идентификации состояния, прогнозирования и выбора инженерного действия.

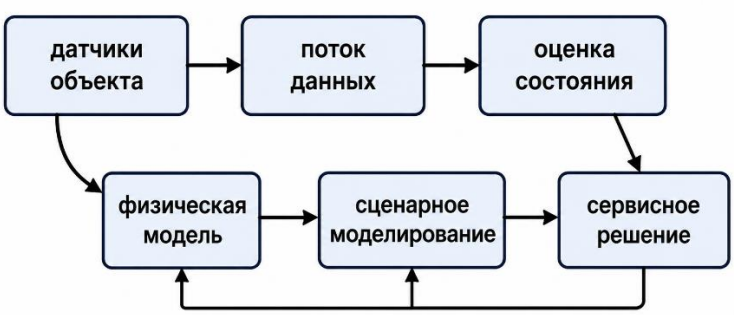



Рис. 1. Архитектура обновляемого цифрового двойника электротранспортного объекта

В Таблице 1 приведены данные, необходимые для интерпретации расчетов и сопоставления диагностических признаков.

Табл. 1. Контуры цифрового двойника и их функции

| Контур | Функция | Входные данные | Результат |
|---|---|---|---|
| Информационный | сбор и синхронизация | телеметрия, журналы ТО, события НК | согласованные признаки |
| Модельный | описание состояния | параметры батареи, двигателя, охлаждения | вектор скрытого состояния |
| Прогностический | расчет RUL и риска | траектории состояния, сценарии нагрузки | интервал ресурса |
| Сервисный | выбор действия | риск, стоимость отказа, доступность ремонта | приоритет обслуживания |

Данные приведенные в таблице показывают, что цифровой двойник является многоуровневой системой. Цель структуры – отделение прогноза ресурса от сервисного решения: одинаковый RUL может иметь разную практическую значимость для разных узлов.

**Математическое ядро и обновление параметров**

Скрытое состояние объекта в дискретные моменты времени задается вектором $x_k$. Для тяговой батареи он может включать остаточную емкость, внутреннее сопротивление, температурную инерцию и дисбаланс ячеек; для тягового двигателя – вибрационный уровень, температуру обмоток и диагностический показатель изоляции [4]

$$x_{k+1} = f(x_k, u_k, \theta_k) + w_k, \quad y_k = h(x_k) + v_k, \tag{1}$$

где $x_k$ – скрытый вектор состояния; $u_k$ – эксплуатационные воздействия; $y_k$ – наблюдаемые параметры; $\theta_k$ – параметры деградации; $w_k$ и $v_k$ – шумы модели и

измерений. Смысл цифрового двойника состоит в том, что $\theta_k$ уточняется по мере накопления наблюдений:

$$p(\theta|\, Y_k) = \frac{p(Y_k|\, \theta)\, p(\theta)}{p(Y_k)}, \tag{2}$$

где $p(\theta|\, Y_k)$ – апостериорная плотность вероятности, $p(Y_k|\, \theta)$ – функция правдоподобия, $p(\theta)$ – априорная плотность вероятности, $p(Y_k)$ – нормирующая константа.

Качество данных учитывается отдельным индексом $Q_k$, так как пропуски, выбросы и рассинхронизация могут имитировать ухудшение технического состояния

$$Q_k = 1 - (\gamma_1 p_{\text{miss},k} + \gamma_2 p_{\text{out},k} + \gamma_3 p_{\text{sync},k}). \tag{3}$$

На рис. 2 приведен график изменения качества данных Q в течение эксплуатационного дня.

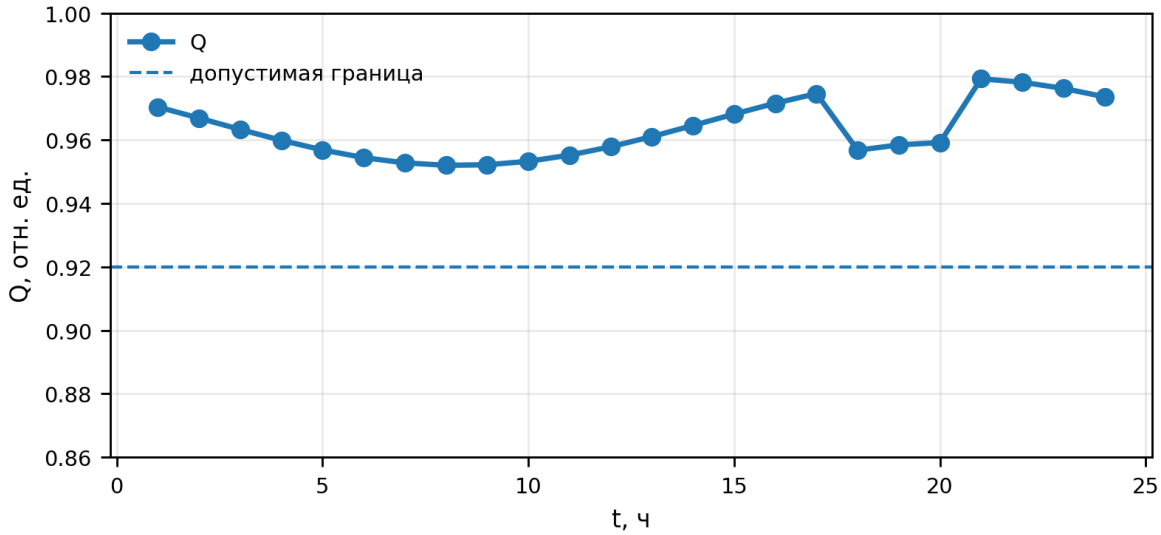



Рис. 2. Изменение индекса качества данных в течение смены

График показывает, что ухудшение качества данных имеет выраженную внутрисменную динамику. При этом модель должна отличать снижение достоверности наблюдений от реальной деградации узла.

Прогноз остаточного ресурса определяется как момент выхода прогнозной траектории за допустимую область состояний $\Omega_{safe}$

$$RUL_k = \min\{\tau : x_{k+\tau} \notin \Omega_{\text{safe}}\}. \tag{4}$$

На рис. 3 показана поверхность *RUL* в координатах температуры и глубины разряда.

Поверхность демонстрирует нелинейное влияние теплового режима. Одинаковая глубина разряда имеет разный ресурсный смысл при 25 °C и при 55 °C, что делает учет температуры обязательным.

**Проверка теплового контура и сходимость модели**

Верификация цифрового двойника выполняется не только по итоговой ошибке прогноза. Необходимо отдельно контролировать воспроизведение тепловой динамики, поскольку перегрев является одним из ранних признаков ухудшения контакта, охлаждения или режима нагрузки [5].

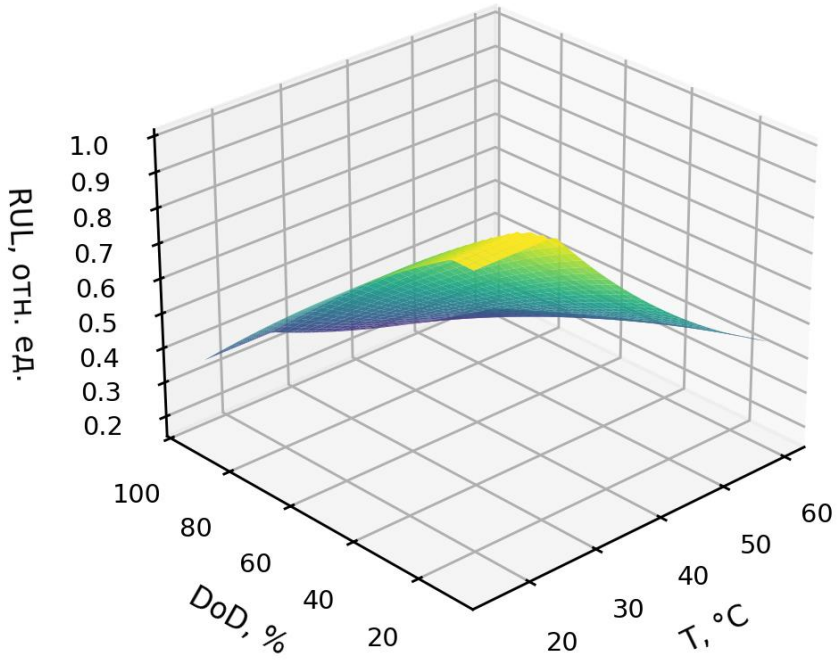



Рис. 3. Поверхность нормированного остаточного ресурса в цифровом двойнике

На рис. 4 добавлен экспериментальный график сопоставления измеренной и расчетной температуры при нагрузочном цикле.

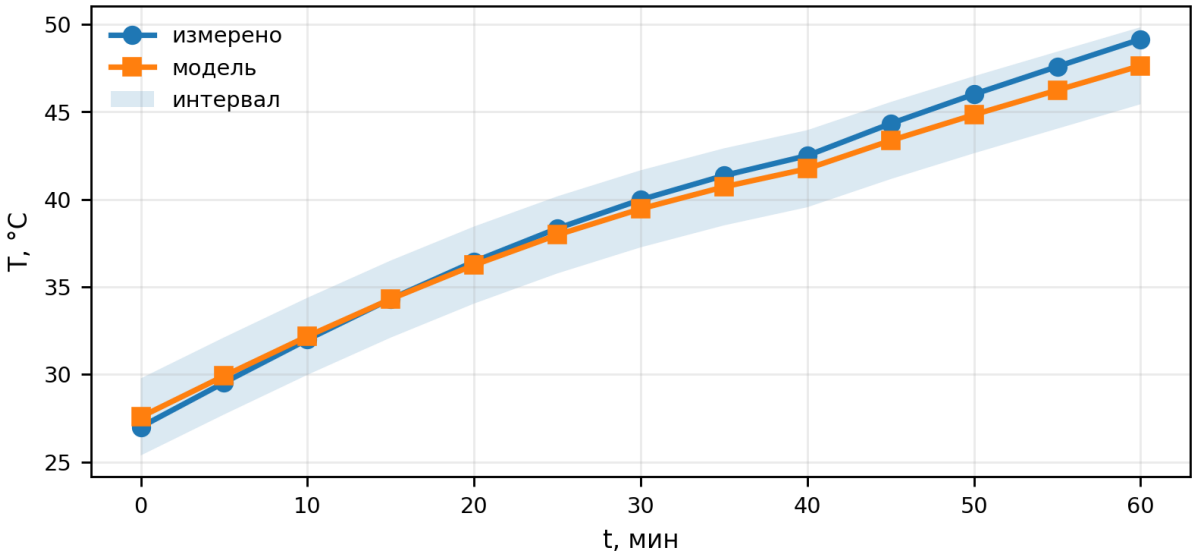



Рис. 4. Экспериментальная проверка теплового контура цифрового двойника

Из графика видно, что модель воспроизводит общий рост температуры и удерживает измерения внутри расчетного интервала. Основное назначение проверки – контроль не только среднего отклонения, но и способности модели уловить ускорение нагрева после 40-й минуты.

На этапе апостериорного обновления важна ширина интервала неопределенности. После нескольких циклов обновления снижается как ошибка, так и неопределенность параметров, что делает двойник более индивидуализированным для конкретной единицы транспорта. На рис. 5 показано изменение ошибки прогноза и ширины апостериорного интервала при последовательном обновлении параметров.

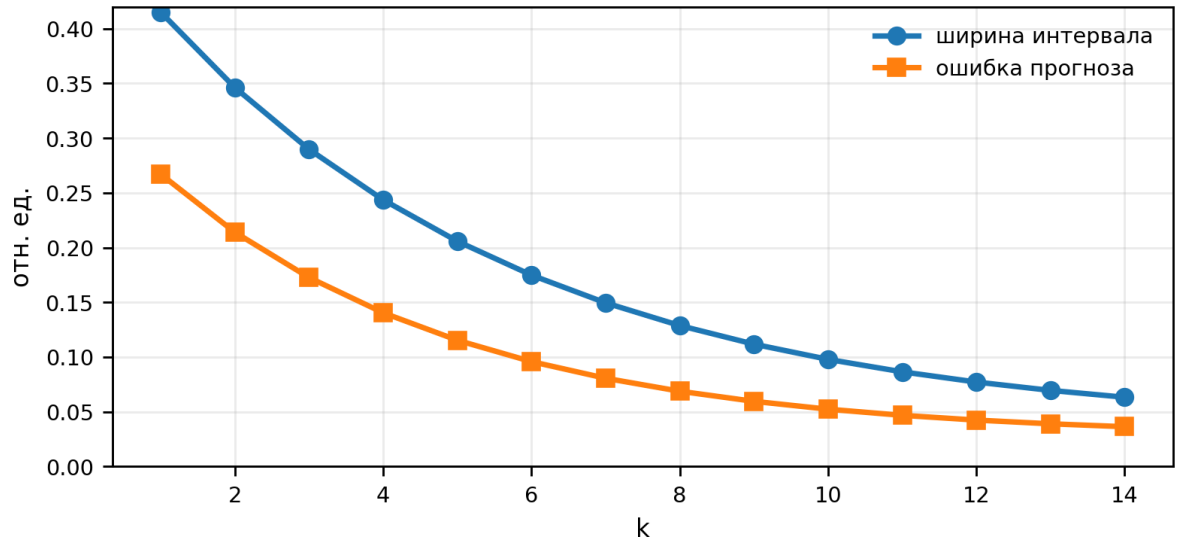



Рис. 5. Сходимость апостериорного обновления параметров цифрового двойника

Кривая сходимости показывает, что наибольший выигрыш достигается в первые циклы обновления. Это важно для практики: цифровой двойник становится полезным до накопления многолетней статистики отказов. В Табл. 2 приведены данные, необходимые для интерпретации расчетов и сопоставления диагностических признаков.

Табл. 2 – Сценарии эксплуатации и ожидаемая реакция цифрового двойника

| Сценарий | Температура | Нагрузка | Качество данных | Реакция модели |
|---|---|---|---|---|
| Равномерный маршрут | 25 – 35 °C | 0,45 – 0,60 | $Q > 0{,}95$ | сужение интервала ресурса |
| Пиковая нагрузка | 35 – 48 °C | 0,70 – 0,90 | $Q > 0{,}93$ | рост эксплуатационного риска |
| Неполные данные | 25 – 40 °C | 0,50 – 0,75 | $0{,}88 < Q < 0{,}92$ | расширение интервала прогноза |
| Тепловое отклонение | > 48 °C | 0,60 – 0,85 | $Q > 0{,}94$ | углубленный контроль |

Из анализа данных, приведенных в таблице 2, видна принципиальная разница между неблагоприятным режимом и плохими данными. В первом случае система повышает риск, во втором – расширяет неопределенность и требует проверки качества измерений.

### Сервисная карта риска

Сервисное решение формируется не только по величине *RUL*. Узел с умеренным ресурсным снижением, но высокой стоимостью отказа, может получить более высокий приоритет обслуживания, чем менее критичный узел с близким численным прогнозом

$$Risk_k = P(x_{k+\tau} \notin \Omega_{\text{safe}} \mid Y_k) \cdot \frac{C_f}{C_{\max}}. \tag{5}$$

На рис. 6 представлена карта риска в координатах относительной нагрузки и температуры.

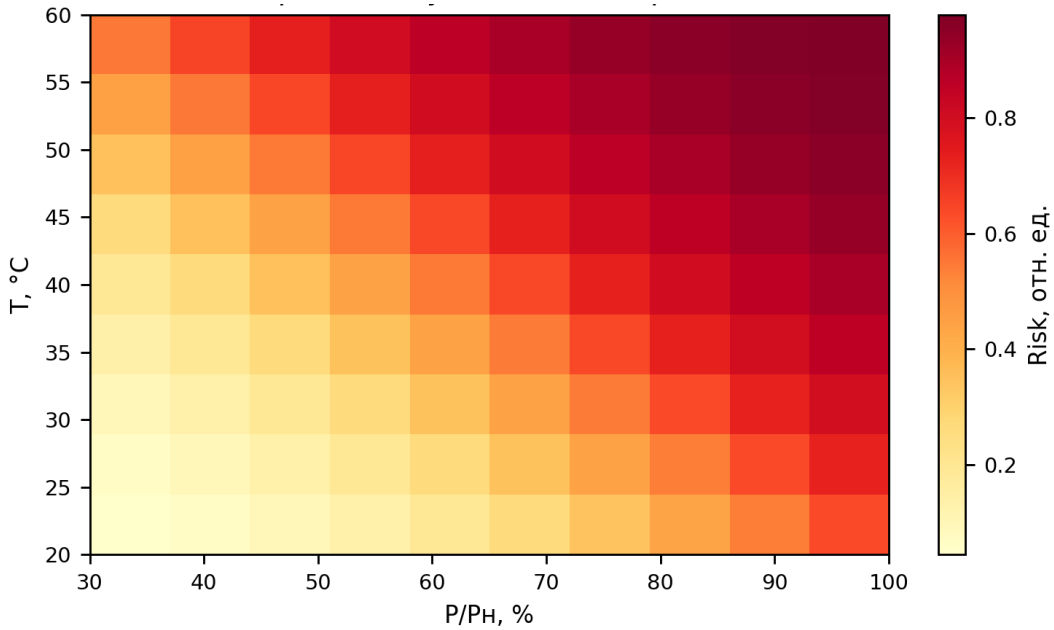



Рис. 6. Карта эксплуатационного риска для сервисной приоритизации

Карта переводит расчет цифрового двойника в область инженерного решения. Ее назначение – визуальное выделение сочетаний температуры и нагрузки, при которых плановый контроль должен быть заменен приоритетным обслуживанием.

### Заключение

Предложенная структура цифрового двойника обеспечивает связку между телеметрией, физико-ориентированной моделью, статистическим обновлением и сервисным решением. В отличие от статических диагностических правил

цифровой двойник уточняет параметры под конкретный объект и формирует ресурсный прогноз с учетом качества данных.

Наиболее значимый прикладной результат состоит в предварительном ранжировании объектов неразрушающего контроля. Цифровой двойник не заменяет контроль, а повышает его адресность: сначала проверяются те узлы, где расчетный риск и тяжесть последствий максимальны.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-29-01565, https://rscf.ru/project/25-29-01565.

**Список литературы**

1. Martyushev N.V., Malozyomov B.V. et al. Reliability of Urban Electric Transport Running Autonomously through Diagnostic Parameters. WEVJ. 2023;14:334. DOI: 10.3390/wevj14120334.

2. Martyushev N.V., Malozyomov B.V. et al. Review Models and Methods for Determining and Predicting Reliability of Technical Systems and Transport. Mathematics. 2023;11:3317. DOI: 10.3390/math11153317.

3. Martyushev N.V., Malozyomov B.V. et al. Mathematical Modeling of the State of the Battery of Cargo Electric Vehicles. Mathematics. 2023;11:536. DOI: 10.3390/math11030536.

4. Malozyomov B.V., Martyushev N.V. et al. Modelling of Reliability Indicators of a Mining Plant. Mathematics. 2024;12:2842. DOI: 10.3390/math12182842.

5. Pryalukhin A.F., Malozyomov B.V. et al. Energy Efficiency of Electric Dump Truck Use Depending on Operating Cycle. WEVJ. 2025;16:217. DOI: 10.3390/wevj16040217.

Контакты:
mbv5@mail.ru (Малозёмов Борис Витальевич)
nikita@ereschenko.ru (Мартюшев Никита Владимирович)
abakan.1998@mail.ru (Внуков Сергей Александрович)
nikita@ereschenko.ru (Ерещенко Никита Дмитриевич)

УДК 621.373.31

***А. Н. МАРКОВ*** [1], *канд. техн. наук, доц.*
***В. А. МАРКОВ*** [1], *канд. техн. наук, доц.*
***С. А. ВОЙНАШ*** [2]
***В. В. ЕРЫГИН*** [3]
***Г. К. ПАРФЕНОПУЛО*** [4]
[1] Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна (Санкт-Петербург, Россия)
[2] Российский университет дружбы народов им. Патриса Лумумбы (Москва, Россия)
[3] Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С.М. Буденного (Санкт-Петербург, Россия)
[4] Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет (Санкт-Петербург, Россия)

# ОЦЕНКА РАВНОПРОЧНОСТИ УЗЛОВ, АГРЕГАТОВ, МАШИН И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ДЛЯ ЕЕ ПОВЫШЕНИЯ

**Аннотация.** В статье представлена методика количественной оценки равнопрочности узлов, агрегатов и машин на основе теории надёжности и статистических данных. Рассмотрены варианты резервирования (без резервирования, частичное и полное) и их влияние на вероятность безотказной работы на примере двигателя ЗИЛ-130. Предложены технологические рекомендации по повышению равнопрочности: снижение металлоёмкости, замена материалов, применение электромеханического упрочнения, поверхностного пластического деформирования и композиционных материалов. Обоснована целесообразность плановой замены быстроизнашиваемых деталей для снижения простоев и затрат на ремонт.

**Ключевые слова:** равнопрочность, резервирование, безотказность, износ, ресурс, упрочнение, композиционные материалы, технологические рекомендации.

Проектирование сложных машин из равнопрочных деталей является трудной задачей. Что касается простейших механизмов, у которых первый отказ является и последним, они создаются из равнопрочных деталей, имеющих одинаковый срок службы.

Любая машина представляет собой техническую систему, состоящую из элементов – сборочных единиц (агрегатов, узлов) и деталей. При нарушении (отказе) работы одного из элементов произойдет нарушение (отказ) работы всей системы. Если представить отказ каждого элемента случайным событием, то тогда, по правилу умножения вероятностей безотказной работы системы:

$$P(l) = p_1(l)\,p_2(l)\ldots p_n(l) = \prod_{i=1}^{n} p_i(l), \qquad (1)$$

где $p_i(l)$ – вероятность безотказной работы $i$-го элемента системы;

$l$ (или $t$) – наработка $l$ (км пробега) или $t$ (мото-ч).

Вероятность безотказной работы элементов $p_i(l)$ и вероятность его отказа $q_i(l)$ в заданном промежутке времени (интервале пробега) связаны соотношением:

$$p_i(l) + q_i(l) = 1 \quad \text{или} \quad q_i(l) = 1 - p_i(l). \tag{2}$$

Предположим, что некоторый элемент, достигнув предельного состояния, допустим, по износу, может быть заменен резервным. Тогда вероятность отказа *i*-го элемента, с учетом ввода резервного,

$$Q_i(l) = q_i(l) \cdot q_i(l) = [1 - p_i(l)]^2, \tag{3}$$

а вероятность безотказной работы этого элемента:

$$P_i(l) = 1 - Q_i(l) = 1 - [1 - p_i(l)]^2. \tag{4}$$

Если имеется *m*–1 резервных элементов одного наименования, то безотказность работы резервируемого элемента:

$$P_i(l) = 1 - Q_i(l) = 1 - [1 - p_i(l)]^m. \tag{5}$$

Безотказность работы технической системы, состоящей из *n* элементов, каждый из которых зарезервирован в количестве $m_i - 1$, можно определить следующим образом:

$$P_i(l) = \prod_{i-1}^{n} \left\{ 1 - [1 - p_i(l)]^{m_i} \right\}. \tag{6}$$

Проанализируем, как изменится вероятность безотказной работы двигателя ЗИЛ-130 в зависимости от способа резервирования на основе данных о вероятности безотказной работы основных деталей двигателя ЗИЛ-130 в интервале 80–100 тыс. км пробега: цилиндропоршневая группа − 0,7 (гильза − 0,94; поршень − 0,88; поршневые кольца − 0,85); вкладыши коренных подшипников коленчатого вала − 0,70; вкладыши шатунных подшипников коленчатого вала − 0,42; головка блока цилиндров − 0,94; прокладка головки блока цилиндров − 0,70; клапаны − 0,91.

Вероятность безотказной работы нерезервируемого двигателя в интервале 80–100 тыс. км вычисляется по формуле

$$P_{\text{д}}^{o} = \prod_{i=1}^{6} p_i(l) = 0{,}70^3 \cdot 0{,}42 \cdot 0{,}94 \cdot 0{,}91 = 0{,}123. \tag{7}$$

Это означает, что при указанной надежности узлов и деталей только 12,3 % двигателей отработает этот пробег (80 – 100 тыс. км) безотказно.

В том случае, если в запасе будет комплект всех основных деталей и узлов, вероятность безотказной работы двигателя

$$P_{\text{д}}^{/}(l) = \prod_{i-1}^{6} \left\{1 - [1 - p_i(l)]^2\right\} = [1 - (1 - 0{,}7)^2]^3 \cdot [1 - (1 - 0{,}42)^2] \times \\ \times [1 - (1 - 0{,}94)^2] \cdot [1 - (1 - 0{,}91)^2] = 0{,}56, \tag{8}$$

т.е. она повысится в 4,6 раза по сравнению с двигателями, не имеющими запасного резерва узлов и деталей.

Если же вместо отдельных узлов и деталей будет двигатель в сборе, то вероятность безотказной работы двигателя, с учетом резервного,

$$P_{\text{Д}}(l) = 1 - [1 - p_{\text{Д}}^{o}(l)]^2 = 1 - (1 - 0{,}123)^2 = 0{,}23. \tag{9}$$

Следовательно, при резервировании отдельных узлов и деталей надежность работы двигателя возрастает примерно в 2,4 раза (0,56 : 0,23 = 2,4), по сравнению с общим резервированием. Надежность $P_{\text{Д}}^{/}(l) = 0{,}56$ может быть достигнута и при общем резервировании, но в этом случае потребуется значительное число запасных двигателей, а это резко увеличит стоимость резерва (запаса).

Каждый механизм состоит как из подвижных, так и неподвижных деталей, не принимающих непосредственного участия в передаче энергии (картеры, корпусы, кронштейны и пр.).

Очевидно, что износ неподвижных деталей всегда будет меньше, чем износ деталей подвижных, и поэтому значительно отличаться по сроку службы. Кроме того, детали сопряжений машин изготавливаются из разных материалов, и трудно ожидать одного и того же срока службы этих деталей. Поэтому детали с малым сроком службы, изнашивание которых непосредственно влияет на качество обрабатываемой продукции или работу механизмов, делают быстросменными, чтобы заменить их в межремонтные периоды и полностью использовать по сроку службы.

Одной из важных количественных оценок совершенства любой машины считается коэффициент равнопрочности ее деталей. Коэффициент равнопрочности $K_{\text{р}}$ можно определить из выражения:

$$K_{\text{р}} = \frac{\sum T_i}{\sum T_i + \sum T_i n_i}, \tag{10}$$

где $\sum T_i$ – суммарный срок службы отдельных агрегатов, узлов машин;

$n_i$ – число соответствующих деталей, износившихся и замененных за срок службы агрегата, узла машины.

При расчете коэффициента равнопрочности любой машины необходимо иметь данные по износу и срокам службы всех ее деталей, для того чтобы найти соответствующие значения $n_i$. Однако возможности для такого определения коэффициентов равнопрочности весьма ограниченны из-за отсутствия данных по сроку службы отдельных деталей, вследствие чего нельзя определить сроки их замены, а также из-за больших колебаний, показателей износа большинства деталей машин в условиях эксплуатации.

Для определения коэффициентов равнопрочности деталей машин, по мнению авторов настоящей работы, рекомендуется пользоваться средними нормами расхода запасных частей, которые обычно разрабатывают на основе статистических данных предприятий. При помощи этих норм вначале определяют частные коэффициенты равнопрочности всех деталей, а затем коэффициенты равнопрочности машины в целом.

Частный коэффициент равнопрочности $K_{\text{р}i}$ определяют по формуле

$$K_{\text{р}i} = \frac{a_i b_i}{a_i b_i + T_{\text{н}} \cdot N_{\text{ср}}}, \tag{11}$$

где $a_i$ – число одноименных деталей в машине; $b_i$ – число машин, на которые рассчитана норма (обычно на 100 машин); $T_{\text{н}}$ – средняя норма смены деталей в течение одного года при определенной среднегодовой наработке машины.

Эти нормы учитывают условия эксплуатации машины и несовершенство ее конструкции, средний уровень квалификации обслуживающего персонала и реализацию ремонтопригодности деталей.

Общий коэффициент равнопрочности машины $K_{\text{р}}$, при условии, что есть частные коэффициенты по указанным нормам всех деталей, можно определить по формуле

$$K_{\text{р}} = \frac{\sum Q_i}{\sum \frac{Q_i'}{K_{\text{р}i}}}, \tag{12}$$

где $\sum Q_i$ – суммарная стоимость деталей исходной машины; $Q_i'$ – стоимость соответствующей заменяемой детали; $K_{\text{р}_i}$ – частный коэффициент равнопрочности соответствующей детали.

Расчеты показывают, что данные значения равнопрочности довольно низкие для технологических машин и оборудования, применяемых в различных отраслях промышленности (0,33…0,45), при действующих сроках службы и среднегодовой наработке.

Машина, ее агрегаты или узлы конструктивно несовершенны по равнопрочности, если часть их деталей не выдерживает срока службы. Доказательства этого положения демонстрирует табл.1.

Табл. 1. Характеристика распределения ресурса основных деталей двигателя ЗИЛ-130

| Деталь | Среднее значение ресурса, тыс. км | Среднее квадратичное отклонение, тыс. км | Коэффициент вариации |
|---|---|---|---|
| Блок цилиндров | 304 | 58,3 | 0,19 |
| Гильза | 285 | 162,0 | 0,57 |
| Головка блока цилиндров | 380 | 380 | 1,00 |
| Прокладка головки блока цилиндров | 136 | 130 | 0,95 |
| Поршень | 166 | 86 | 0,52 |
| Поршневое кольцо | 150 | 66 | 0,44 |
| Поршень | 166 | 86 | 0,52 |
| Поршневое кольцо | 150 | 66 | 0,44 |
| Шатун | 285 | 214 | 0,75 |
| Коленчатый вал | 235 | 140 | 0,59 |
| Вкладыш коренных подшипников | 117 | 68 | 0,58 |
| Вкладыш шатунных подшипников | 98 | 81 | 0,83 |
| Клапан | 205 | 133 | 0,65 |

Из табл.1 видно, что при нормативном ресурсе до КР 300000 км пробега, детали (вкладыши, прокладки, поршневые кольца) можно отнести к быстро изнашивающимся.

Самым известным методом повышения равнопрочности деталей машин, узлов, а также полнокомплектных машин является снижение их металлоемкости, удельного веса. Так, при проектировании машин долгое время закладывался очень большой запас прочности, особенно на несущие конструкции рам, корпусное оборудование и так далее. В многочисленных научных трудах и технической литературе [4,8] доказано, что снижение массы несущих конструкций машин, а также узлов и механизмов значительно уменьшает удельные нагрузки на сопрягаемые детали, а как следствие снижается их износ и повышается соответственно ресурс.

Другим не менее известным способом увеличения равнопрочности машин, агрегатов, деталей является замена материалов наиболее подверженных износу деталей на другие материалы. Так, например, изделия, изготовленные из стали 30 (35) могут быть заменены на изделия, изготовленные из стали 45 и так далее. Однако такая замена материалов резко повышает себестоимость изделий, а также в целом и себестоимость технологической машины. По нашему мнению, для повышения ресурса быстроизнашиваемых сопрягаемых деталей необходимо совершенствовать технологию их изготовления. Так согласно исследованиям, представленным в работах [1, 3, 5, 6] повышение износостойкости сопряжений в 1,5…2 раза, а соответственно и их ресурс

достигается применением современных методов электромеханического упрочнения, поверхностного пластического упрочнения, вибрационного обкатывания на стадии финишной обработки деталей. Еще одним методом совершенствования технологии изготовления деталей является применение композиционных материалов. На основании [2, 7] применение композиционных материалов на основе железоникелевых порошков при изготовлении деталей может увеличить ресурс изделий до 2,5 раз.

**Выводы.** Основная задача при анализе равнопрочности – поднять ее значение до экономически целесообразного уровня. Равнопрочность деталей, узлов и агрегатов не должна снижаться. По возможности, необходимо восстанавливать детали и даже повышать их износостойкость, применяя перспективные технологические процессы. Повышение равнопрочности быстроизнашиваемых деталей, узлов и знание срока службы делают возможным плановую замену при техническом обслуживании и ремонте технологических машин; это уменьшает количество отказов и простоев оборудования, а также материальных и трудовых затрат на выполнение ремонтных операций.

**Список литературы**

1.Аскинази Б.М. Упрочнение и восстановление деталей электромеханической обработкой. – М. Машиностроение. 1989. – 200 с.

2. Дорожкин Н.Н. Упрочнение и восстановление деталей машин металлическими порошками; Под ред. чл.-кор. АН УССР Г. В. Самсонова; АН БССР. Ин-т проблем надежности и долговечности машин. – Минск: Наука и техника, 1975. – 151 с.

3. Ельцов В.В. Восстановление и упрочнение деталей машин: учебное пособие. – Тольятти: Изд-во ТГУ. 2015. – 335 с.

4.Иванов С.А. Проектирование и оптимизация конструкций машин и оборудования: учебник для вузов / С.А. Иванов, А. В. Нефедов, Н. А. Чиченев. – Новотроицк: НФ НИТУ «МИСиС», 2014. – 200 с.

5.Кряжков В.М. Баранов Ю.Н., Буйлов К.Н. и др. Восстановление деталей сельскохозяйственной техники механизированной наплавкой с применением упрочняющей технологии. – М: ГОСНПТИ. 2012. – 208 с.

6.Кряжков В.М. Научные основы восстановления работоспособности сопряжений деталей сельскохозяйственных тракторов применением металлопокрытий и упрочняющей технологии: Автореферат дис. на соискание ученой степени доктора технических наук. (05.20.03) / Ленингр. с.-х. ин-т. – Ленинград: [б. и.], 1973. – 50 с.

7. Марков А.Н. Повышение долговечности подшипниковых узлов лесных машин применением композиционных материалов: диссертация ... кандидата технических наук: 05.21.01. – Санкт-Петербург, 1996. – 207 с.

8. Соколов С.А., Яшонков А.А. Детали машин: учебник. – Керчь: Изд-во ФГБОУ ВО «КГМТУ», 2022. – 190 с.

Контакты:
markovan-63@mail.ru (Марков Александр Николаевич);
mactor85@mail.ru (Марков Виктор Александрович);
sergeyvoinash@yandex.ru (Войнаш Сергей Александрович);
vadim.erygin@yandex.ru (Ерыгин Вадим Викторович);
parfenon73@mail.ru (Парфенопуло Георгий Константинович).

УДК 621.9.047

***Д. Д. МАХОТИН***
***К. В. ЗОТОВ***
***В. П. ЛУНИН***, д-р техн. наук, проф.
Национальный исследовательский университет «МЭИ» (г. Москва, Россия)

# УЧЕТ ВЛИЯНИЯ АНИЗОТРОПИИ ПРИ ИЗМЕРЕНИИ КООРДИНАТ ДЕФЕКТОВ ПРИ УЛЬТРАЗВУКОВОМ КОНТРОЛЕ КОЛЬЦЕВЫХ СОЕДИНЕНИЙ МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗОПРОВОДОВ

**Аннотация.** В работе предложена методика коррекции систематических погрешностей ультразвукового контроля сварных соединений трубопроводов из высокопрочных анизотропных сталей класса К70. С помощью экспериментальных исследований на изотропных и анизотропных образцах, а также на реальном сварном соединении трубы большого диаметра установлена зависимость измеряемой глубины дефекта от угла ввода луча и рассчитаны поправочные коэффициенты для её компенсации. В заключении изложены рекомендации по настройке ПО, ультразвуковой аппаратуры и интерпретации результатов контроля анизотропных соединений.

**Ключевые слова.** ультразвуковой контроль, сварное соединение, анизотропия, высокопрочная трубная сталь, поправочный коэффициент.

## Введение

Обеспечение безопасной эксплуатации магистральных газопроводов остаётся приоритетной задачей нефтегазовой отрасли. В последние годы для строительства трубопроводов всё чаще используются высокопрочные трубные стали класса К70, изготавливаемые методом контролируемой прокатки с ускоренным охлаждением. Такая технология формирует вытянутую текстуру металла, из-за чего скорость и затухание ультразвуковых волн начинают зависеть от направления прозвучивания относительно оси проката. Стандартные методики ультразвукового контроля сварных соединений разрабатывались для изотропных сталей и не учитывают эту особенность, поэтому при контроле анизотропных труб луч дефектоскопа отклоняется от расчётной траектории, а измеренная глубина и координаты дефекта смещаются относительно истинных значений. Подобная погрешность способна привести либо к пропуску опасной несплошности сварного шва, либо к неоправданной браковке качественного металла, что делает задачу повышения достоверности контроля практически значимой.

Целью работы является исследование влияния анизотропии акустических свойств стали К70 на результаты ультразвукового контроля сварных соединений и разработка способа коррекции возникающих измерительных искажений. В качестве объекта исследования выбраны сварное соединение трубы большого диаметра из стали К70, контролируемые методом секторного сканирования на образцах и в производственных условиях.

**Методика коррекции измерений**

Для компенсации искажений, вызванных анизотропией, использован настроечный подход: сначала на образце из той же стали с известной глубиной отражателя [1] выполняется секторное сканирование в рабочем диапазоне углов, затем показания прибора сравниваются с истинной глубиной и для каждого угла рассчитывается поправочный коэффициент. При контроле реального сварного соединения измеренная глубина дефекта умножается на коэффициент, соответствующий углу, под которым получен эхосигнал, что даёт скорректированное значение, близкое к истинному.

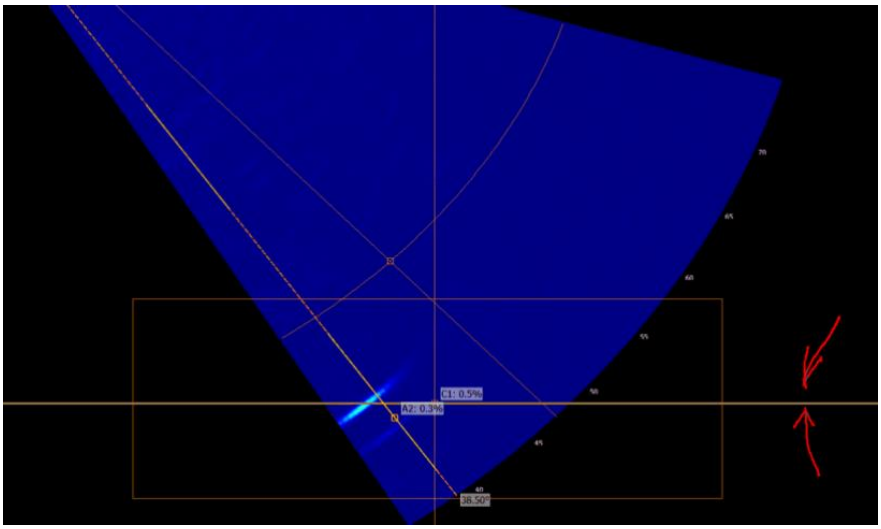


Рис. 1. Пример скана дефекта для изотропного образца (красные стрелки указывают на линию постоянной глубины)

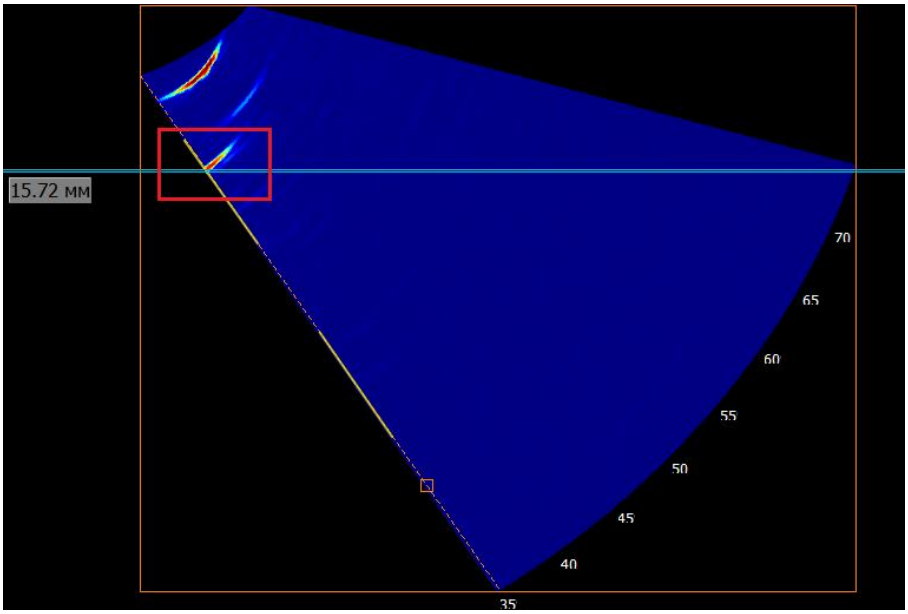



Рис. 2. Пример скана дефекта для анизотропного образца (красные стрелки указывают на линию постоянной глубины)

Измерения выполнялись ультразвуковым дефектоскопом с фазированной решёткой (32 элемента), установленной на наклонную призму. Сканирование

проводилось в диапазоне углов ввода от 35° до 65°, с фиксацией значений каждые 5°, начиная с 35°. Скорость ультразвука определялась однократно на изотропном образце из стали 20 (рис. 1) и в дальнейшем не изменялась, так в эксперименте удалось выявить именно влияние анизотропии (рис. 2), а не погрешность настройки прибора. Корректность настройки прибора проверялась на изотропном образце (рис. 3 и 4): глубина дефекта [2] при изменении угла ввода оставалась стабильной в пределах паспортной погрешности, что подтвердило отсутствие систематических ошибок оборудования.

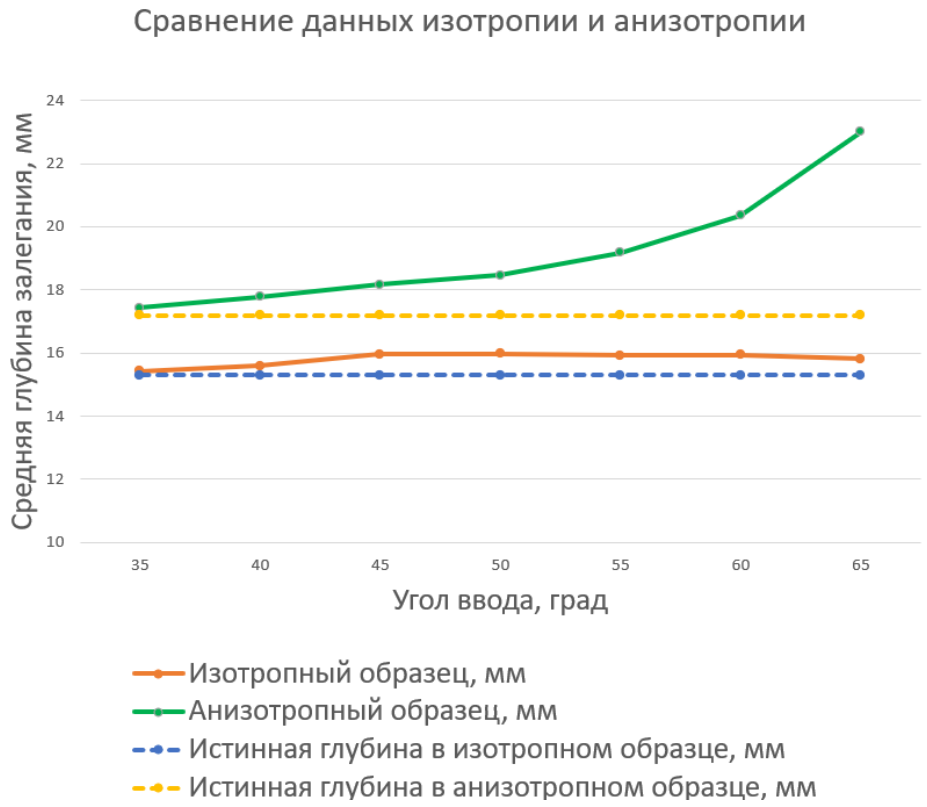



Рис. 3. Данные сравнения экспериментов настроечных образцов

| Угол ввода, град | Изотропный образец | | Анизотропный образец | |
|---|---|---|---|---|
| | Среднее, мм | Отклонение, % | Среднее, мм | Отклонение, % |
| Истинное значение глубины, мм | 15,3 | | 17,2 | |
| 35 | 15,43 | 0,85 | 17,44 | 1,04 |
| 40 | 15,6 | 1,96 | 17,78 | 3,37 |
| 45 | 15,96 | 4,31 | 18,17 | 5,64 |
| 50 | 15,97 | 4,38 | 18,46 | 7,33 |
| 55 | 15,93 | 4,12 | 19,18 | 11,51 |
| 60 | 15,94 | 4,18 | 20,36 | 18,37 |
| 65 | 15,82 | 3,4 | 23,01 | 33,78 |

Рис.4. Таблица с данными настроечных образцов

## Экспериментальные результаты

На анизотропном образце из стали К70 при тех же настройках прибора выявлено систематическое возрастание измеренной глубины дефекта с увеличением угла ввода − в отличие от изотропного образца, где отклонения носили случайный характер и не превышали 7%

$$К(\theta) = \frac{H_{ист}}{H_{изм}(\theta)}$$

На основе полученных данных рассчитаны поправочные коэффициенты К(θ) для каждого угла ввода на рисунках 5 и 6.

| Истинная глубина залегания дефекта 17,2 мм | | |
|---|---|---|
| Угол ввода, град | Средняя измеренная глубина, мм | Поправочный коэффициент |
| 35 | 17,44 | 0,986 |
| 40 | 17,78 | 0,967 |
| 45 | 18,17 | 0,946 |
| 50 | 18,46 | 0,932 |
| 55 | 19,18 | 0,897 |
| 60 | 20,36 | 0,845 |
| 65 | 23,01 | 0,747 |

Рис. 5. Расчет поправочного коэффициента

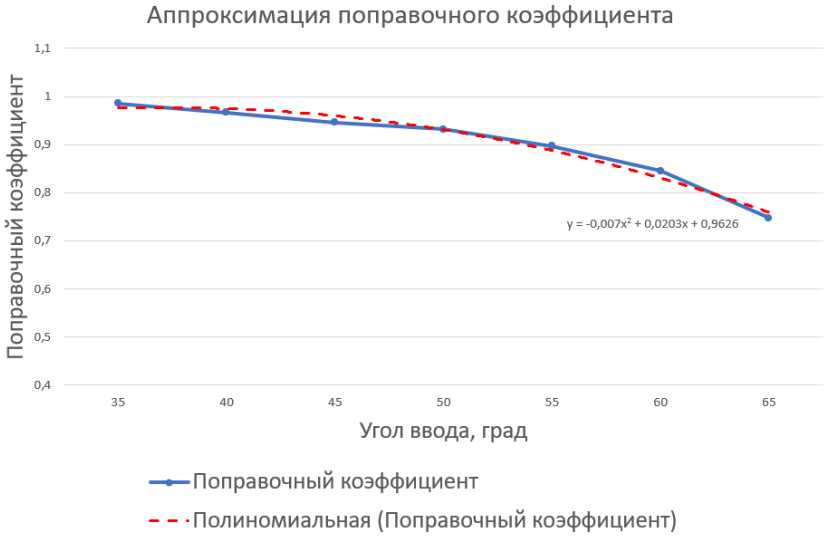



Рис. 6. График поправочного коэффициента и аппроксимации

Применение коэффициентов на реальном сварном соединении трубы большого диаметра из стали К70 позволило существенно снизить расхождение между отображением одного и того же дефекта на прямом и однократно отражённом лучах - как по глубине, так и по смещению (рис. 7).

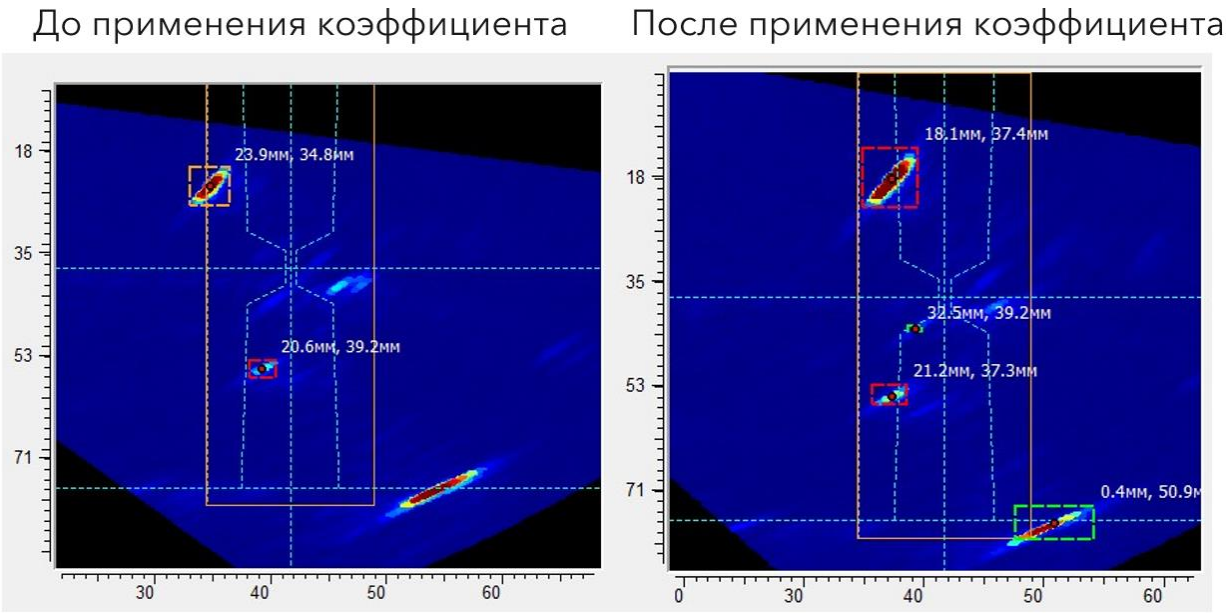



Рис. 7. Скан дефекта в реальном образце до и после применения поправочного коэффициента

## Заключение

Результаты проведённого исследования позволили выявить, что анизотропия акустических свойств стали К70 приводит к систематической, а не случайной погрешности измерения глубины дефектов при ультразвуковом контроле сварных соединений, причём величина искажения растёт с увеличением угла ввода луча. Предложенная методика настройки и расчёта поправочных коэффициентов позволяет скомпенсировать искажение без доработки оборудования и применима на любом дефектоскопе с функцией секторного сканирования. Дальнейшие исследования целесообразно направить на проверку устойчивости коэффициентов при изменении марки стали, партии проката и толщины стенки трубы.

### Список литературы

1 Ермолов, И.Н. Теория и практика ультразвукового контроля / И.Н. Ермолов. - М.: М ашиностроение, 1981. - 240 с.

2 Неразрушающий контроль: Справочник в 8 томах. Том 1: Визуальный и измерительный контроль / Под ред. В. В. Клюева. - М.: Машиностроение, 2003. - 560 с.

Контакты:
MakhotinDD@mpei.ru (Махотин Данила Дмитриевич),
ZotovKonV@mpei.ru (Зотов Константин Владимирович),
LuninVP@mpei.ru (Лунин Валерий Павлович).

УДК 681.5.08

***О. А. НИКИТИНА*** [1, 2]
***В. Л. КЛЕНИН*** [1], *канд. техн. наук.*
***И.О. КОТОВЩИКОВ*** [2], *канд. техн. наук.*
[1] Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, (Санкт-Петербург, Россия)
[2] ООО «АктивТестГруп», (Санкт-Петербург, Россия)

# АНАЛИЗ ПОДХОДОВ К АВТОМАТИЧЕСКОМУ ОПРЕДЕЛЕНИЮ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ДЕФЕКТОВ, ВЫЯВЛЕННЫХ ПРИ ФЛЮОРЕСЦЕНТНОМ КАПИЛЛЯРНОМ КОНТРОЛЕ

**Аннотация.** Рассмотрены существующие методы совместной калибровки цифровой камеры и лазерного сканера для совмещения цифровых изображений с данными лазерного сканирования. По результатам сравнительного анализа предложено перспективное направление разработки многоплоскостного калибровочного образца с круглыми отверстиями.

**Ключевые слова:** флуоресцентный капиллярный контроль, цифровая камера, 2D-лазерный сканер, совместная калибровка, совмещение данных, калибровочный образец.

## Введение

Капиллярный метод неразрушающего контроля широко применяется для обнаружения поверхностных дефектов изделий в авиационной промышленности, благодаря высокой чувствительности и относительной простоты реализации. Использование автоматизированных систем серии КАМА позволило обеспечить высокую повторяемость проведения контроля за счёт нанесения пенетранта под вакуумом методом распыления через систему форсунок [8]. Несмотря на значительный уровень автоматизации технологического процесса, принятие решения об отбраковке изделия по-прежнему во многом зависит от опыта оператора. В связи с этим актуальной является задача повышения достоверности, повторяемости и воспроизводимости результатов контроля, автоматизации анализа изображений, получаемых после флуоресцентного капиллярного контроля, в частности оценка геометрических параметров выявляемых дефектов.

Совместное применение камеры машинного зрения и лазерного 2D-сканера позволяет объединить взаимодополняющую информацию об исследуемом объекте. Цифровое изображение содержит сведения о границе объекта, его размерах в пикселях в проекции на плоскость матрицы, местоположении и границы составных элементов объекта контроля, цвете и визуальных особенностях поверхности. Это не позволяет в полной мере оценить метрологические параметры выявленных индикаций. Лазерный сканер, напротив, обеспечивает получение геометрических данных о поверхности в метрически системе, но не регистрирует её цветовые характеристики.

Совместный анализ результатов измерений позволит получать выявленные индикации и оценивать их геометрические характеристики, что будет основой, для установления метрологических характеристик при оценке контроля качества и дальнейшей эксплуатации.

Данный подход требует определения взаимного положения датчиков и установления соответствия между системами координат лазерного профиля и пиксельного изображения.

Решение этой задачи осложняется различиями полей зрения датчиков, а также возможными погрешностями калибровки. В связи с этим актуальной является систематизация существующих методов калибровки и совмещения данных лазерного сканирования с цифровыми изображениями, а также анализ их преимуществ, ограничений и применимости в измерительных задачах.

## 1. Постановка цели и задачи исследования

Целью исследования является систематизация и сравнительный анализ существующих методов калибровки и совмещения результатов 2D-лазерного сканирования с цифровыми изображениями.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- определить особенности и классифицировать существующие способы установления соответствия между элементами цифрового изображения и данными лазерного сканирования;
- выявить критерий сравнения рассматриваемых способов;
- сравнить рассмотренные методы, определить их преимущества, ограничения и применимость в измерительных задачах.

## 2. Общий подход к установлению соответствия данных цифровой камеры и лазерного сканера

При проведении аналитического этапа необходимо изучить совместную калибровку цифровой камеры и 2D-лазерного сканера или 3D- лазерного сканера, обеспечив приведение цифрового изображения и данных лазерного сканирования к единой системе координат.

Методы формирования соответствий можно классифицировать по виду применяемого калибровочного образца и геометрическим признакам, которые определяются на цифровом изображении и в данных лазерного сканирования. Наиболее распространёнными являются пластины с отверстиями, шахматные доски, многоплоскостные и сферические образцы. Отдельную группу составляют комбинированные конструкции, содержащие признаки нескольких типов.

Во-первых, на основании сравнительного анализа существующих методов требуется выбрать оптимальную геометрию калибровочного образца (КО).

Во-вторых, необходимо разработать экспериментальный макет, обеспечивающий размещение КО одновременно в поле зрения камеры и рабочей области 2D-лазерного сканера. Образец независимо регистрируется обоими устройствами, после чего на изображении и в данных сканирования выделяются его характерные точки, линии или поверхности. Далее устанавливается, какие из найденных признаков относятся к одним и тем же физическим элементам образца. На основании сформированных соответствий рассчитывается математическое преобразование, связывающее системы координат камеры и сканера.

## 3. Существующие способы установления соответствия

*Калибровка с применением ArUco-маркеров.*

В работах [1, 2] для установления соответствий применяются плоские калибровочные объекты с искусственными признаками. ArUco-маркеры используются для автоматического определения положения объекта и его характерных точек на цифровых изображениях. В данных лазерного сканирования положение объекта определяется по его геометрической форме, а в работе [2] дополнительно используются отдельные светоотражающие метки, выделяемые по высокой интенсивности отражённого лазерного сигнала. Положение визуальных и светоотражающих элементов относительно границ калибровочного объекта заранее известно, что позволяет сопоставить результаты, полученные камерой и лазерным сканером.

Связь между системами координат задаётся пространственным преобразованием, включающим поворот и смещение. В работе [1] положение калибровочного щита относительно камеры определяется с помощью алгоритма PnP. Границы щита в облаке точек аппроксимируются методом RANSAC, начальная оценка преобразования рассчитывается методом Кабша, а затем уточняется методом Нелдера – Мида [1]. После определения преобразования точки лазерного сканирования переводятся в систему координат камеры и могут быть спроецированы на цифровое изображение.

В [1] показано, что увеличение количества ArUco-маркеров, кадров и положений калибровочного щита уменьшает разброс ошибок. Авторы не приводят одного итогового численного значения погрешности калибровки на реальных данных, однако отмечают, что достигнутая точность сопоставима с погрешностью используемого сканера, равной ±2 см. Поэтому значение ±2 см характеризует прежде всего точность лазерных измерений [1]. В работе [2] начальное взаимное положение камеры и сканера определяется с помощью алгоритма P3P. Для реальных данных после уточнения параметров при использовании двенадцати положений калибровочного стенда ошибка смещения составила 0,006 м, а ошибка репроекции – 3,252 пикселя. При использовании восьми положений эти значения составили 0,017 м и 2,441 пикселя соответственно [2].

*Калибровка с использованием шахматных образцов.*

В работе [3] используется калибровочный образец, состоящий из двух перпендикулярных пластин с шахматным рисунком. Камера находит углы клеток и по ним определяет положение образца. Лазерный сканер не распознаёт шахматный рисунок, а регистрирует геометрическую форму пластин. По изломам лазерного профиля определяются три контрольные точки, каждая из которых сопоставляется с соответствующей линией калибровочного образца. Затем рассчитываются параметры поворота и смещения между системами координат камеры и сканера. Сначала получают начальное линейное решение, после чего уточняют его методом нелинейной оптимизации, уменьшая расстояние между точками сканера и соответствующими линиями. Среднее пространственное расстояние между контрольными точками, определёнными камерой и сканером на расстоянии 0,5 м для трех положений образца, после преобразования координат в среднем составило 11 мм [3].

В работе [4] применяется плоская шахматная доска, которую последовательно устанавливают в нескольких положениях. Камера распознаёт углы клеток и определяет положение плоскости доски в пространстве. Лазерный сканер регистрирует точки, расположенные на поверхности этой же доски. Таким образом, общим элементом для камеры и сканера является не отдельная характерная точка, а плоскость калибровочного образца. После преобразования координат точки лазерного сканирования должны располагаться на плоскости, положение которой определено по цифровому изображению. Связь между системами координат задаётся матрицей поворота и вектором смещения. На реальных данных средняя остаточная ошибка совмещения, определённая как перпендикулярное расстояние от преобразованных точек сканера до плоскости калибровочного образца, составила 20–30 мм [4].

*Калибровка с использованием сферического образца.*

В работе [5] для калибровки используются не менее четырёх сфер. В облаке точек определяется поверхность каждой сферы и рассчитывается координаты её центра, на изображении находится контур сферы в виде эллипса, по которому с учётом *известного радиуса* вычисляется положение её центра относительно камеры. Затем центры одних и тех же сфер сопоставляются, а между системами координат камеры и лазерного сканера рассчитываются поворот и смещение. В моделировании на расстоянии 15–20 м ошибка определения центра сферы по изображению составила около 32 мм [5].

*Калибровочные пластины с отверстиями.*

В работе [6] используется плоская калибровочная пластина с шахматным рисунком и четырьмя круглыми отверстиями. По углам шахматного рисунка определяются внутренние параметры камеры и положение пластины относительно неё. В облаке точек сначала выделяется плоскость калибровочного образца, после чего с ней сопоставляется геометрическая модель пластины и рассчитываются трёхмерные координаты центров отверстий, полученные центры проецируются на изображение. В реальном

эксперименте средняя ошибка проецирования центров отверстий составила 1,104 пикселя [6].

В работе [7] применяется плоская пластина с треугольным отверстием и шахматными элементами, используемыми для определения её положения относительно камеры. Плоскость лазерного сканирования направляется через треугольное отверстие, вследствие чего в лазерном профиле возникают характерные разрывы. По их расположению определяется положение линии сканирования на поверхности пластины. На найденной линии выбираются контрольные точки, координаты которых рассчитываются в системах координат камеры и лазерного сканера. На основании полученных соответствий «точка – точка» вычисляются поворот и смещение между устройствами. Для калибровки достаточно двух положений пластины. Среднее пространственное расстояние между контрольными точками, определёнными камерой и сканером после преобразования координат, составило 26,3 мм. Среднее перпендикулярное расстояние от преобразованных точек сканера до плоскости образца составило 8,8 мм [7].

**Выводы**

Проведённый анализ показал, что задача совместной калибровки цифровой камеры и лазерного сканера является актуальной и в настоящее время наиболее широко рассматривается в области робототехники и автономной навигации. При этом требования к точности совмещения данных в подобных системах, как правило, ниже, чем в измерительных задачах, связанных с определением геометрических параметров малоразмерных объектов. В исследование оценивались преимущественно абсолютные значения погрешности, поскольку именно в таком виде результаты представлены в рассматриваемых публикациях.

Наиболее близкими к рассматриваемой измерительной системе являются метод Kim J.-Y. и Ha J.-E., представленный в работе «Automatic Extrinsic Calibration of a Camera and a 2D LiDAR With Point-Line Correspondences» [3], и метод Ha J.-E., представленный в работе «Extrinsic Calibration of a Camera and Laser Range Finder Using a New Calibration Structure of a Plane with a Triangular Hole» [7], непосредственно использующие данные 2D-лазерного сканирования. В работе Kim J.-Y. и Ha J.-E. [3] на расстоянии 0,5 м средняя пространственная погрешность составила около 11 мм. В работе Ha J.-E. [7] среднее расстояние между соответствующими трёхмерными точками составило 26,3 мм, а среднее расстояние от преобразованных точек сканера до плоскости калибровочного образца – 8,8 мм. Расстояние до образца в работе Ha J.-E. [7] авторами не указано.

В качестве перспективного направления предложена разработка жёсткого многоплоскостного калибровочного образца с круглыми сквозными отверстиями, несимметрично расположенными на непараллельных поверхностях. Такая конструкция объединяет преимущества многоплоскостных

образцов [3], методов определения центров геометрических элементов [5, 6] и регистрации отверстий средствами 2D-лазерного сканирования [7]. Предполагается, что её применение позволит повысить устойчивость калибровки и обеспечить более точное совмещение цифровых изображений с данными лазерного сканирования. Эффективность предложенного решения должна быть подтверждена экспериментально.

**Список литературы**


1. Абраменко А. А. Калибровка взаимного расположения стереокамеры и трёхмерного сканирующего лазерного дальномера // Компьютерная оптика. – 2019. – Т. 43, № 2. – С. 220–230.

2. Блохинов Ю. Б., Андриенко Е. Э., Казахмедов К. К., Вишняков Б. В. Автоматическая калибровка системы видеокамер и лидаров для автономных мобильных комплексов // Компьютерная оптика. – 2021. – Т. 45, № 3. – С. 382–393.

3. Kim J.-Y., Ha J.-E. Automatic Extrinsic Calibration of a Camera and a 2D LiDAR With Point-Line Correspondences // IEEE Access. – 2023. – Vol. 11. – P. 76904–76912. – DOI 10.1109/ACCESS.2023.3298055.

4. Pless R., Zhang Q. Extrinsic Calibration of a Camera and Laser Range Finder. – St. Louis : Washington University in St. Louis, Department of Computer Science and Engineering, 2003. – Technical Report WUCSE-2003-58.

5. Tóth T., Pusztai Z., Hajder L. Automatic LiDAR-Camera Calibration of Extrinsic Parameters Using a Spherical Target // 2020 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). – 2020. – P. 8580–8586.

6. Yan G., He F., Shi C., Wei P., Cai X., Li Y. Joint Camera Intrinsic and LiDAR-Camera Extrinsic Calibration // arXiv. – 2023. – arXiv:2202.13708.

7. Ha J.-E. Extrinsic Calibration of a Camera and Laser Range Finder Using a New Calibration Structure of a Plane with a Triangular Hole // International Journal of Control, Automation, and Systems. – 2012. – Vol. 10, no. 6. – P. 1240–1244. – DOI 10.1007/s12555-012-0619-7.

8. Бабаева Л. Н. Проблемы и практический опыт оптимизации процессов капиллярного и магнитопорошкового контроля // International Conference on Aviation Motors – ICAM 2020: материалы Международной научно-технической конференции. – Москва, 2020.



Контакты:
s255040@pers.spmi.ru (Никитина Ольга Артемовна);
slavaklenin@mail.ru (Кленин Владислав Леонидович);
kio@activetest.ru (Котовщиков Илья Олегович).

УДК 620.179.14

***В. А. НОВИКОВ****, д-р техн. наук, проф.,*
***А. В. КУШНЕР****, канд. техн. наук, доц.*
***А. В. ШИЛОВ****, канд. техн. наук, доц.*
Белорусско-Российский университет (Могилев, Беларусь)

# МАГНИТОГРАФИЧЕСКИЙ МЕТОД КОНТРОЛЯ. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ

**Аннотация.** Проанализированы области применения магнитографического метода контроля, развитие и наиболее важные результаты исследований по его усовершенствованию, модернизации приборной базы и оборудования. Обоснована необходимость разработки универсальной методики проведения контроля с учетом различных факторов. Указаны перспективы применения метода, а также проблемы, связанные с отсутствием приборов.

**Ключевые слова:** магнитографический метод, ферромагнитные объекты, дефекты, перспективы применения, проблемы.

Метод магнитографический контроля (МГК) включает запись магнитного рельефа объекта на магнитную ленту, с последующим ее воспроизведением на дефектоскопе. Объекты контроля – сварные соединения с толщиной стенки от 2 до 25 мм, с коэффициентом формы выпуклости шва не менее 7 (ГОСТ 25225-82).

Остановимся на наиболее важных результатах исследований метода, а также перспективах его применения и проблемах.

Информация о возможности использования магнитной ленты для записи магнитных полей рассеяния дефектов ферромагнитных объектов впервые появилась в СССР в 1956 году [1]. С тех пор метод контроля претерпел существенные изменения.

В частности, установлено, что магнитная головка дефектоскопа не воспринимает остаточное поле магнитного отпечатка на ленте, обусловленного трещиной микроскопического раскрытия. Проблема решена путем получения широкого магнитного следа на ленте при ее перемещении по поверхности объекта [2]. Определено расстояние, на которое надо переместить магнитную ленту, чтобы размах сигнала был наибольший [3], а также выяснено, как следует находить координаты сопутствующих компактных дефектов в объекте [4, 5].

Обнаружено, что при увеличении глубины залегания дефекта в плоскости симметрии шва, происходит трансформация суперпозиции тангенциальных составляющих полей на поверхности шва из параболы, ветви которой направлены вниз, в двугорбую кривую [6]. Это может привести к недобраковке изделий. Построены номограммы, которые по известной ширине и высоте выпуклости шва позволяют определить толщину, в которой исключается недобраковка.

Чтобы обеспечить высокую чувствительность метода контроля нужно создать в контролируемой зоне объекта поле высокой напряженности. Этого отчасти удалось достичь за счет создания более рациональной магнитной цепи. Однако наиболее эффективным оказалось применение концентраторов магнитной индукции в виде пластин из магнитомягкой стали, которые крепились к полюсам намагничивающего устройства (НУ) [7, 8]. Их рабочие поверхности находились в зоне выпуклости шва и позволяли создать поле, напряженность которого до 3,5 раз превышала напряженность поля, создаваемого электромагнитом. Это позволило уверенно выявлять недопустимые дефекты даже при коэффициенте формы выпуклости шва меньше 5. Концентраторы магнитной индукции целесообразно применять при контроле узких швов с большой высотой выпуклости, т. е. при малых значениях коэффициента формы выпуклости шва.

Для уменьшения помех, обусловленных выпуклостью шва, предложено сварной шов с уложенной магнитной лентой намагнитить повторно импульсным полем противоположного направления соответствующей напряженности [9]. Чтобы уменьшить помехи от поверхностных неровностей, химических, структурных неоднородностей и т. д., рекомендовано предварительно намагнитить ленту полем заданной напряженности, которая равна сумме поля рабочей напряженности и поля от наибольшего допустимого дефекта. После помещения ленты на поверхность объекта – полем рабочей напряженности того же направления, что и поле заданной напряженности [10].

Чтобы расширить рабочий диапазон магнитной характеристики ленты предлагается использовать для контроля поляризованную ленту [11].

Для повышения разрешающей способности метода рекомендуют намагничивать объект контроля вдоль направления распространения цепочек несплошностей. В этом случае поля рассеяния компактных дефектов будут удлиняться поперек цепочки и станут обнаруживаться раздельно при меньшем расстоянии, чем в случае намагничивания поперек цепочки. Разрешающая способность метода возрастает от 10 до 40 раз. Запись с магнитной ленты всегда нужно считывать вдоль направления ее поляризации [12].

Повысить чувствительность контроля сварных швов на наличие одиночных компактных дефектов можно, если шов намагнитить вдоль его продольной оси. Это происходит вследствие полного исключения размагничивающего действия выпуклости шва. При этом чувствительность метода контроля возрастает от 4 до 5 раз по сравнению со случаем намагничивания поперек шва [12].

Под действием поля крупного протяженного дефекта, ориентированного вдоль шва, распределение тангенциальной составляющей магнитного поля на поверхности шва принимает вид выпуклой, а не вогнутой кривой.

Такой дефект вызывает смену полярности помех, создаваемых выпуклостью шва. Его также можно уверенно обнаружить, если объект вместе с уложенной на его поверхности лентой намагнитить полем, при котором

помехи, обусловленные выпуклостью шва, при считывании записи с ленты не обнаруживаются [13].

Чтобы выявить поверхностные дефекты в объекте, находящемся в труднодоступном месте, его намагничивают перемещаемым постоянным магнитом, обращенным к объекту одним полюсом или гранью с близкорасположенными полюсами, либо полюсом электромагнита непосредственно через ленту. Если для контроля применяется высококоэрцитивная лента, то опасные дефекты (трещины и стянутые непровары) будут обнаруживаться двуполярным сигналом, а неопасные (углубления от поверхностных неровностей, риски, широкие несквозные углубления) – незначительно искаженным однополярным сигналом [14].

Об отсутствии непровара в корне шва можно судить и косвенным методом МГК по наличию на сигналограмме сигналов, обусловленных обратной выпуклостью шва. Наличие кососимметрично расположенных на сигналограмме двуполярных сигналов свидетельствует о полном проплавлении соединения, то есть об отсутствии непровара [15]. Чтобы обнаружить места перехода от обратной выпуклости шва к основному металлу при намагничивании объекта нужно использовать концентраторы магнитной индукции.

Поверхностные дефекты, особенно протяженные большой глубины, при намагничивании объекта контроля параллельно его поверхности создают поля, тангенциальная составляющая которых имеет два ярко выраженных отрицательных экстремума значительной амплитуды. Чтобы не произошло уменьшение чувствительности метода контроля нужно, чтобы все поле дефекта, включая его отрицательные экстремумы, записывалось на крутом линейном участке магнитной характеристики ленты. Тогда рабочая точка магнитной характеристики ленты должна быть 20-70 А/см больше ее коэрцитивной силы. В этом случае запись отрицательных полуволн тангенциальной составляющей полей дефектов будет происходить на более крутом участке ее магнитной характеристики [16].

В настоящее время для настройки дефектоскопа на предельную чувствительность, согласно ГОСТ 25225-82, применяют испытательные образцы. Сварной шов испытательного образца имеет такие же размеры выпуклости шва, как и шов контролируемого объекта. В отдельных местах образца в корне шва содержатся дефекты, соответствующие минимальному браковочному уровню. Испытательные образцы применяют для получения эталонных магнитных лент, которые используют для получения контрольной магнитограммы. Обычно на экране дефектоскопа устанавливают размах сигнала около 20 мВ, соответствующий браковочному уровню. Если размах сигнала, обусловленного дефектом в контролируемом изделии, превышает браковочный уровень, то дефект считают недопустимым. Проблема в том, что в пределах стандарта размеры выпуклости шва могут значительно изменяться. Следовательно, на каждый шов нужно иметь свой испытательный образец и эталонную ленту, что экономически не выгодно.

Разработан универсальный контрольный образец, который позволяет учесть влияние всех возможных параметров выпуклости шва (ширины и высоты) на результат контроля. Он содержит один образец в виде двух пластин из материала контролируемого изделия, соединенных сварным швом с монотонно изменяющемся радиусом кривизны выпуклости, в корне которого выполнен дефект, соответствующий минимальному браковочному уровню. Второй образец такой же, но без дефекта в корне шва. Сначала на втором образце экспериментально с помощью проградуированного ленточного локального магнитоносителя подбирают режим намагничивания, при котором будут контролировать сварной шов объекта, в том месте шва образца, где его радиус кривизны в плоскости симметрии шва равен радиусу кривизны контролируемого шва изделия. При этом режиме контролируют первый образец, производят настройку дефектоскопа с такого же участка ленты. Если размах сигнала, обусловленного дефектом в контролируемом изделии, превышает браковочный уровень, то дефект считают недопустимым [3]. Сказанное справедливо для дефектов, расположенных в плоскости симметрии шва и ее окрестностях ± 3 мм.

Представленная выше информация говорит о том, что магнитографический метод контроля значительно усовершенствован благодаря разработке большого количества высокоэффективных способов намагничивания, магнитного и магнитографического контроля. Приведенные выше технические решения всесторонне изучены, обобщены, систематизированы. Они использованы при разработке универсальной методики магнитографического метода контроля применительно к различным условиям использования (способ сварки, тип сварного соединения, его конструктивные особенности, наличие подхода к обратной стороне шва, условия эксплуатации объекта и т. д.) [17].

Первые дефектоскопы для магнитографического контроля не были совершенными. Существенной модернизацией приборов стало применение в них закрепленных на вращающемся барабане считывающего узла индукционных магнитных головок. Был разработан также программно-аппаратный комплекс для магнитографического контроля, в котором считывающий узел серийного дефектоскопа совмещен с персональным компьютером. Последним усовершенствованием стали дефектоскопы, у которых отсутствовала электронно-лучевая трубка и производилась перезапись информации с магнитной ленты на электрохимическую, а затем и на электротермическую бумагу. К сожалению, в настоящее время, в связи с уходом разработчика, эти дефектоскопы не изготовляют.

**Список литературы**

1. Авторское свидетельство RU 102537, МПК G01N27/85. Способ магнитной дефектоскопии: заявлено 10.07.1952; опубликовано 01.01.1956 / Маховер Х. С., Усенко Ю. В.

2. Авторское свидетельство RU 242468, МПК2 G01N27/85. Способ магнитной дефектоскопии: заявлено 05.11.66; опубликовано 25.04.69 / Фещенко Ю. Б.

3 Новиков В.А. Магнитный контроль в вопросах и ответах: учебное пособие / В. А. Новиков.– Могилев: Белорус.-Рос. Ун-т, 2020–347с.: ил.

4. Авторское свидетельство RU 1229671, МПК4 G01N27/85. Способ магнитографического контроля изделий из ферромагнитных материалов: заявлено 16.01.85; опубликовано 07.05.86 / Шарова А. М., Новиков В. А., Юдчиц М. В.

5. Авторское свидетельство RU 1589193, МПК5 G01N27/85. Способ магнитографического контроля изделий из ферромагнитных материалов: заявлено 03.10.88; опубликовано 30.08.90/ Новиков В. А.

6. Новиков, В. А. Исследование магнитографического метода контроля стыковых сварных соединений с целью повышения его разрешающей способности: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук: специальность 01. 04.11 «Физика магнитных явлений» /Новиков Владимир Алексеевич; УО «ММИ»; науч. рук. А. М. Шарова. – Свердловск, 1985. – 22 с.

7. Авторское свидетельство RU 1672345, МПК5 G01N27/85. Способ магнитографического контроля: заявлено 21.01.87; опубликовано 23.08.91. / Новиков В. А.

8. Авторское свидетельство RU 1422125, МПК4 G01N27/85. Способ магнитографического контроля сварных соединений: заявлено 03.10.88; опубликовано 07.09.88. / Новиков В. А.

9. Авторское свидетельство RU 564583. МПК2 G01N27/85. Способ магнитографического контроля сварных соединений: заявлено 02.04.75; опубликовано 05.07.77 / Шарова А. М., Куликов В. П., Новиков В. А.

10. Авторское свидетельство RU 1422125. МПК4 G01N27/85. Способ магнитографического контроля сварных соединений: заявлено 21.01.87; опубликовано 07.09.88. / Новиков В. А., Кублицкая Л. В., Киселева Т. М.

11. Авторское свидетельство RU 174415. МПК2 G01N27/85. Способ магнитографической дефектоскопии: заявлено 26.09.1964; опубликовано 27.08.1956 / Акулов Н. С., Козлов В. С.

12. Авторское свидетельство RU 1677601, МПК5 G01N27/85. Способ магнитографического контроля: заявлено 02.01.89; опубликовано 15.09.91/ Новиков В.А.

13. Авторское свидетельство RU 1506346, МПК4 G01N27/85. Способ магнитографического контроля стыковых сварных соединений: заявлено 27.01.87; опубликовано 07.09.89 / Новиков В. А.

14. Авторское свидетельство RU 2154818, МПК7 G01N27/85. Способ магнитографического контроля ферромагнитных изделий: заявлено 03.06.1996; опубликовано 20.08.2000 / Новиков В. А.

15 Кушнер А. В. Обнаружение дефектов в стыковых сварных соединениях косвенным методом / А. В. Кушнер, А. В. Шилов, В. А. Новиков //8-я МНТК «Современные методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов», Могилев, 29-30 сентября 2022 г, с. 129-133.

16. Авторское свидетельство RU 2052802, МПК6 G01N27/85. Способ магнитографического контроля изделий из ферромагнитных материалов: заявлено 14.07.92 опубликовано 20.01.96/ Новиков В. А.

17 Новиков, В. А. Универсальная методика магнитографического контроля ферромагнитных объектов / В. А. Новиков, В. Г Пантюшина // Вестник БРУ.– 2026, № 2, с. 90-99.

Контакты:
novikov.bru@yandex.by (Новиков Владимир Алексеевич)
kushnerandrej@ gmail.com (Кушнер Андрей Валерьевич)
shilov.andrej@gmail.com (Шилов Андрей Владимирович)

УДК 620.179.18

***В. И. ПАНИН***[1]*, канд. техн. наук*
***Д. Д. ХОЛИЧЕВ***[2]
***ЧЬЕ ЕН УН***[2]*, д-р техн. наук, проф.*
[1]СП НОАП «ЭНТЕСТ» ООО «Аскотехэнерго диагностика» (Хабаровск, Россия)
[2]Тихоокеанский государственный университет (Хабаровск, Россия)

# ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ ПРИ НЕРАЗРУШАЮЩЕМ КОНТРОЛЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНО-АКУСТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

**Аннотация.**В статье рассматриваются особенности и реализация алгоритмического и программного обеспечения обработки сигналов, полученных, разработанной системой для акустического контроля общего коррозионного состояния трубопроводов. Приводятся схемы разработанного виртуального прибора в среде LabVIEW и результаты обработки сигналов при неразрушающем контроле коррозионного состояния труб электромагнитно-акустическим методом.

**Ключевые слова:** неразрушающий контроль, акустические сигналы, программное обеспечение, время релаксации, аппроксимация, построение огибающей

## Введение

Существует множество различных факторов, влияющих на надежность технологических трубопроводов. К ним относятся техническое состояние технологического оборудования, соблюдение норм по их эксплуатации, наличие средств обнаружения и оценки состояния трубопроводов [1 - 3]. В современной практике при эксплуатации трубопроводов для теплоэнергетики используют вихретоковый, ультразвуковой и акустико-эмиссионный методы неразрушающего контроля [4 - 6]. Из-за большой протяженности контролируемых трубопроводов перечисленные методы обладают недостатками, связанными с трудоемкостью и ограниченными возможностями по обнаружению дефектов и оценке коррозионного состояния объектов контроля. Так, бесконтактные способы контроля вихретоковым и магнитным методами позволяют обнаружить только приповерхностные и поверхностные дефекты. Ультразвуковые методы требуют использования контактной жидкости и предварительной обработки поверхности трубопроводов [7 - 9].

В соответствии с принятыми нормами технологические трубопроводы на различных производствах России должны подвергаться периодическому контролю, например, раз в 2 года для трубопроводов, транспортирующих чрезвычайно, высоко и умеренно опасные вещества 1-, 2- и 3-го классов ГОСТ 12.1.007 [10] и высокотемпературные органические теплоносители (среды групп А) со средней скоростью коррозии (0,1 – 0,5 мм / год) [11]. Поскольку большинство методов предназначены для контроля труб без теплоносителя внутри, требуется периодически выводить участки трубопроводов из эксплуатации, что влечет за собой существенные экономические потери.

Все вышеуказанное делает проблему создания эффективных методов и портативных средств неразрушающего контроля основного фактора износа трубопроводов (коррозионного состояния) с использованием новых подходов актуальной.

К настоящему моменту уже была разработана система электромагнитного возбуждения и пьезоэлектрического приема акустических сигналов [12, 13], с последующем выводом данных в среде Excel при помощи декодера сигналов осциллографа FNIRSI-1013D [14]. В данной статье приводятся результаты по разработке алгоритмического и программного обеспечения обработки акустических сигналов, полученных в результате электромагнитного возбуждения.

## Экспорт и подготовка данных в LabVIEW

Предварительно сохраненные .wav-файлы с приемника, открываемые в среде Excel, были преобразованы в удобный для чтения LabVIEW формат .txt. Для этих целей в среде программирования Visual Basic был переписан декодер осциллографа FNIRSI-1013D так, чтобы при открытии .wav-файла сохраненного сигнала создавалась его копия формата .txt.

Далее в среде LabVIEW была реализована функция чтения .txt-файла и запись полученных значений в двумерный массив, с последующим выводом результата в виде временной диаграммы, показанной на рис. 1.

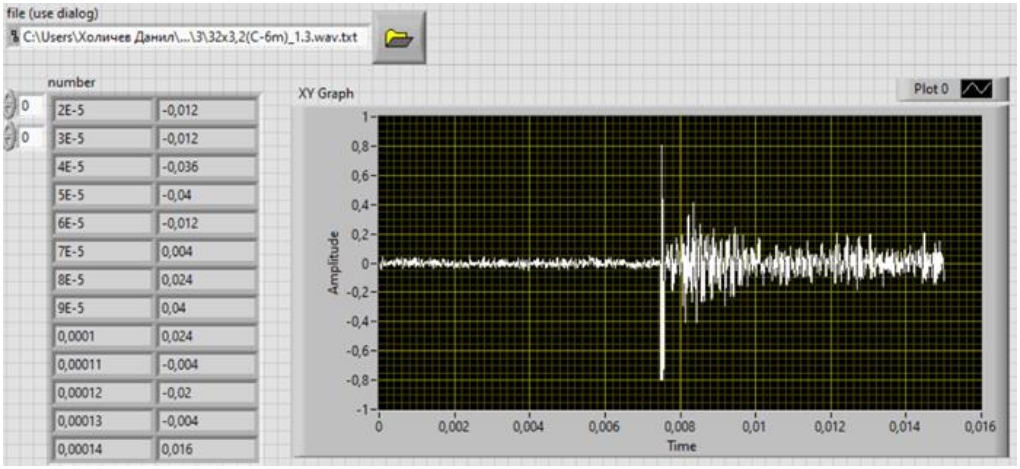



Рис. 1. Построенная в среде LabVIEW временная диаграмма сохраненного сигнала

Как следует из рис. 1, из-за особенностей работы осциллографа первая половина сигнала неинформативна, которую следует удалить. При этом, также следует отметить, что сохраненный сигнал центрируется не по первому акустическому колебанию, а по электромагнитной наводке от излучателя, форма которой показана на рис. 2. С целью корректно корректного удаления неинформативной части сигнала в условиях изменяющегося периода дискретизации реализована функция подбора соответствующей точки отсечки в

зависимости от величины периода дискретизации осциллографа в среде LabVIEW (рис. 3).

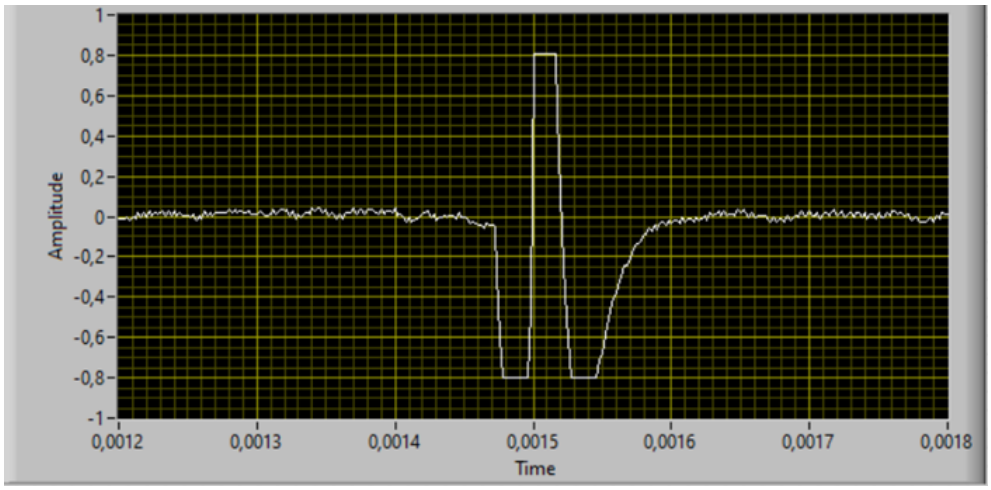



Рис. 2. Форма электромагнитной наводки в пьезоэлектрическом приемнике от излучателя акустических сигналов

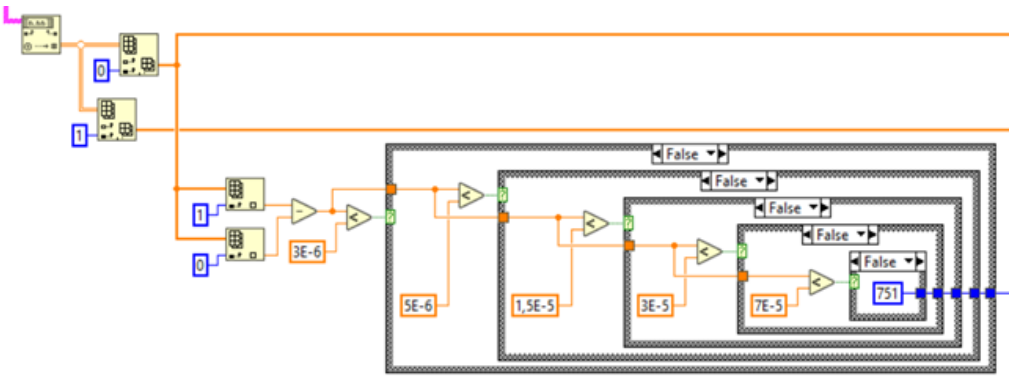



Рис. 3. Реализация функции подбора точки отсечки в зависимости от величины периода дискретизации в среде LabVIEW

### Построение и анализ огибающей

Для поиска информативного параметра контроля произведена аппроксимация для всего сигнала. В таком случае при построении огибающей задействуются все точки информативного сигнала и для пиковых значений выпрямленного сигнала. Для этого была реализована функция поиска пиков (рис. 4), с последующей аппроксимацией по отобранным значениям (рис. 5 и 6).

Используя построенные огибающие, появилась возможность рассчитать информативный параметр, определяющий степень коррозионного поражения трубопроводов – время релаксации (период, за который амплитуда колебания уменьшается в $e$ раз). Для этого использовалась функция расчета натурального логарифма отношения наибольшего значения аппроксимирующей функции к наименьшему

$$\tau = \frac{\Delta t}{\ln(A_{max}/A_{min})},$$

где $\tau$ – время релаксации, $A_{max}$ – максимум функции аппроксимации, $A_{min}$ – минимум функции аппроксимации, $\Delta t$ – временной промежуток, в котором строится аппроксимация.

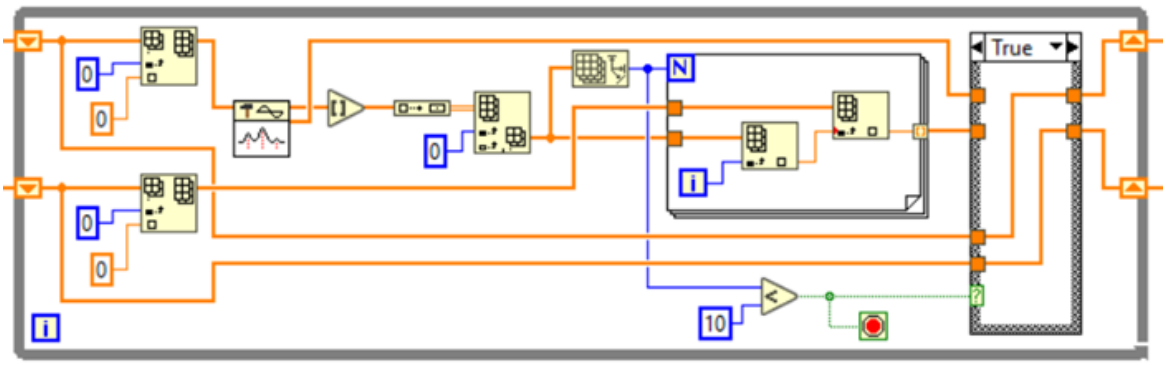



Рис. 4. Реализация поиска пиковых значений в среде LabVIEW

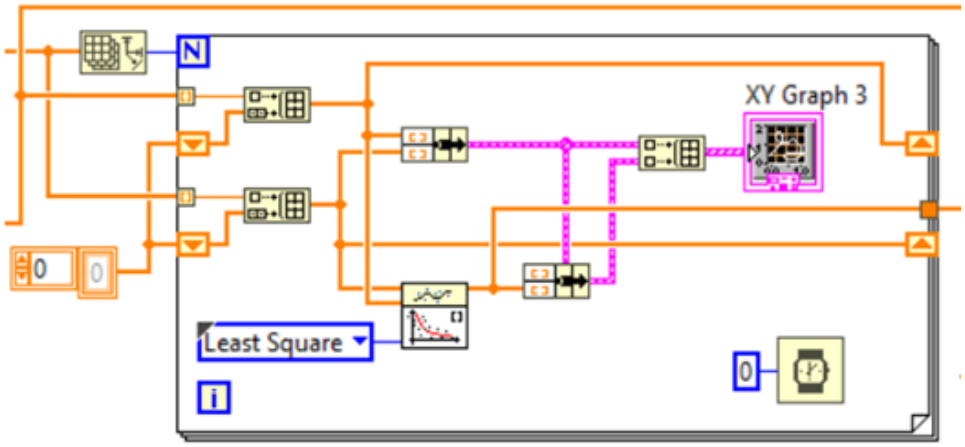



Рис. 5. Реализация построения огибающей через аппроксимацию по пикам в среде LabVIEW

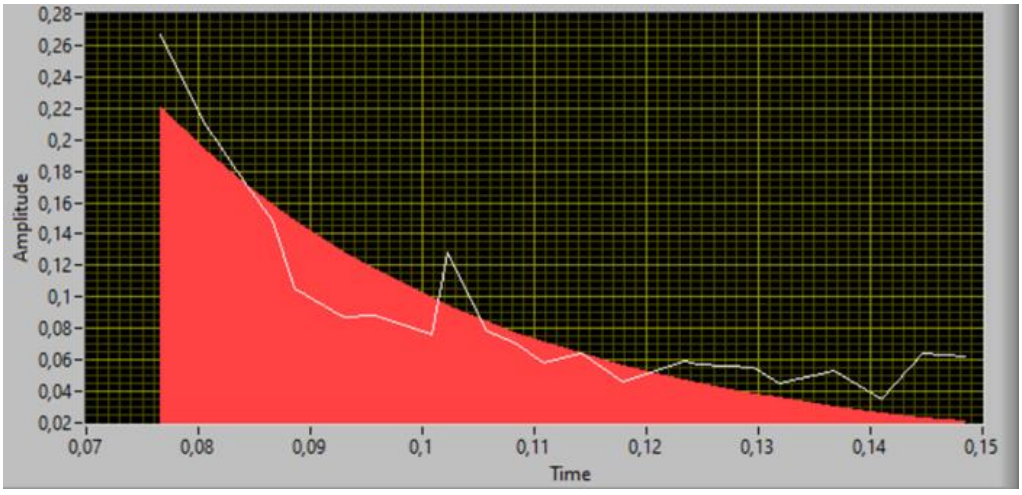



Рис. 6. Построенный в среде LabVIEW график огибающей функции через аппроксимацию по пикам

## Проверка работоспособности программного обеспечения

С целью подтверждения работоспособности разработанного алгоритмического и программного обеспечения для неразрушающего контроля была проведена обработка набора данных, полученных при контроле образцов труб (Сталь 20, диаметр 57 мм, длина 580 мм, толщина стенки 3 мм) с различной степенью коррозионного поражения, начиная от зачищенной трубы и заканчивая очень ржавой. Результаты измерения времени релаксации были обобщены в виде таблицы 1.

Таблица 1. Время релаксации труб с различной степенью коррозии

| **Состояние образцов труб** | **Время релаксации $\tau$,** мс | |
|---|---|---|
| | Аппроксимация всего сигнала | Аппроксимация по пикам |
| зачищенная | 50,2 | 39,6 |
| немного ржавая | 29,6 | 35,2 |
| ржавая | 10,5 | 9,6 |
| очень ржавая | 10,4 | 5,64 |

Как видно из данных в таблице, как и предполагалось, увеличение степени коррозионного поражения ведет к сокращению времени релаксации колебаний, т.е. сигнал затухает быстрее.

## Заключение

Результаты исследования позволяют осуществлять обработку результатов, полученных при помощи разработанной ранее системы контроля общего коррозионного состояния трубопроводов. Представлены различные способы реализации построения огибающей функции, что имеют свои преимущества и недостатки. Также реализован итоговый расчет информативного параметра, по которому осуществляется оценка коррозионного поражения трубопроводов, времени релаксации. Была экспериментально подтверждена работоспособность разработанных алгоритмических и программных средств.

### Список литературы

1. Критерии оценки технического состояния длительно работающего металла оборудования ТЭС на основе акустической структуроскопии / А. Н. Смирнов, Н. В. Абабков, В. В. Муравьев [и др.]. // Дефектоскопия. – 2016. – № 2. – С. 44–51.

2. Анализ применения энтропийных методов обработки вибродиагностических сигналов для оценки технического состояния трубопроводов / С. О. Гапоненко, А. Е. Кондратьев, М. В. Калинина [и др.]. // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2024. – № 2. – С. 128–137.

3. Оценка технического состояния и определение сроков безопасной эксплуатации трубопроводов / С. В. Алимов, Б. Н. Антипов, А. В. Захаров [и др.]. // Газовая промышленность. – 2009. – № 1 – С. 60–61.

4. Выявление поверхностных микротрещин в металлических изделиях с помощью возбуждения высокочастотными вихревыми токами и визуализации инфракрасной камерой / О. А. Булычев, С. А. Шлеенков, О. А. Гусев [и др.]. // Дефектоскопия. – 2016. – № 8. – С. 47–54.

5. Опыт контроля состояния труб магистральных газопроводов электромагнитно-акустическим методом / А. Ф. Матвиенко, Г. С. Корзунин, В. Е. Л. Лоскутов [и др.]. // Дефектоскопия. – 2016. – № 9. – С. 28–37.

6. Борейко, Д. А. Чувствительность метода акустической эмиссии при обнаружении дефектов в трубных изделиях / Д. А. Борейко, И. Ю. Быков, А. Л. Смирнов // Дефектоскопия. – 2015. – № 8. – С. 24–33.

7. Акустический волноводный контроль труб малого диаметра / В. В. Муравьев, О. В. Муравьева, В. А. Стрижак [и др.]. // Инновации в топливно-энергетическом комплексе и машиностроении. – 2017. – С. 292–298.

8. Злобин, Д. В. Разработка методики и аппаратуры волноводного электромагнитно-акустического контроля линейно-протяженных объектов с использованием многократных отражений : Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук : 05.11.13 / Злобин Денис Владимирович. – Ижевск, 2013. – 20 с.

9. Метод акустической эмиссии для контроля качества трубопровода / А. Ю. Давыдов, М. Я. Хабибуллин, Л. М. Зарипова [и др.]. // Современные технологии в нефтегазовом деле. – 2025. – С. 832–836.

10. ГОСТ 12.1.007-76. Система стандартов безопасности труда. Вредные вещества. Классификация и общие требования безопасности: дата введения 01-01-1977. – URL: https://internet-law.ru/gosts/gost/1048 (дата обращения: 01.07.2026). – Текст : электронный.

11. ГОСТ 32569-2013. Трубопроводы технологические стальные. Требования к устройству и эксплуатации на взрывопожароопасных и химически опасных производств: дата введения 2015-01-01. – URL: https://sptg.ru/upload/iblock/5e7/04mj23payp42 mxkrxwk84c7mj2bxz6o1.pdf (дата обращения: 01.07.2026). – Текст : электронный.

12. Панин, В. И. Экспериментальное исследование электромагнитного возбуждения акустических сигналов в трубопроводах для задач неразрушающего контроля / В.И. Панин, Д.Д. Холичев, Е.У. Чье // Вестник Тихоокеанского государственного университета. – 2025. – №2(77) – С. 23–30.

13. Panin V. I., Kholichev D. D. and Chye E. U., "Electromagnetic Excitation of Acoustic Signals in Pipelines For Non-destructive Testing Tasks," // 2025 7th International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA), Lipetsk, Russian Federation, 2025, pp. 20-23.

14. FNIRSI 1013D. Инструкция по эксплуатации осциллографа планшетного 2-канального 100МГц 1ГВыб/сек, модель 1013D. – URL: https://static.chipdip.ru/lib/780/ DOC035780167.pdf (дата обращения: 01.07.2026). – Текст : электронный.

Контакты:
noapentest@inbox.ru (Панин Владимир Иванович);
homatv389@gmail.com (Холичев Данил Дмитриевич);
chye.enun@mail.ru (Чье Ен Ун).

**УДК 620.179.14**

***А. М. ПОВОЛОЦКАЯ***[1,2], *канд. техн. наук*
***А. Н. МУШНИКОВ***[2], *канд. техн. наук*
***К. Д. МАЛЫГИНА***[2]
***Л. С. ГОРУЛЕВА***[2]
[1]Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН (Екатеринбург, Россия)
[2]Институт машиноведения им. Э.С. Горкунова УрО РАН (Екатеринбург, Россия)

# ЭВОЛЮЦИЯ МАГНИТНЫХ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МЕТАСТАБИЛЬНОЙ АУСТЕНИТНОЙ СТАЛИ ПРИ ДВУХОСНОМ РАСТЯЖЕНИИ

**Аннотация.** В работе представлены экспериментальные результаты эволюции гистерезисных магнитных характеристик, параметров магнитных шумов Баркгаузена и электромагнитных параметров метастабильной аустенитной стали AISI 304 при двухосном симметричном растяжении. Исследования проведены на оригинальной двухосной испытательной машине, предназначенной для определения физических свойств материалов в процессе упругопластического деформирования независимо по двум осям.

**Ключевые слова:** двухосное симметричное растяжение, метастабильная аустенитная сталь, магнитные и электромагнитные характеристики.

Одним из ключевых направлений неразрушающего контроля является разработка надежных методов оценки напряженно-деформированного состояния элементов металлоконструкций. При этом активное применение находят магнитные методы контроля, которые основаны на установлении взаимосвязи между магнитными свойствами материалов и параметрами их напряженного состояния. В конструкциях ответственного назначения, к которым предъявляются повышенные требования к эксплуатационным характеристикам, широко используются аустенитные стали. В результате механических нагрузок в аустенитных сталях с метастабильной структурой может формироваться мартенсит деформации. Это может значительно влиять на эксплуатационные характеристики конструкций и их остаточный ресурс. В литературе достаточно полно представлены экспериментальные результаты эволюции магнитных характеристик аустенитных сталей в условиях деформационных воздействий [1-5], однако работы, в которых внимание было бы сосредоточено на рассмотрении данного вопроса при двухосном растяжении, отсутствуют. В связи с этим представляет интерес изучение влияния упругопластического деформирования по схеме двухосного растяжения на магнитные и электромагнитные характеристики метастабильной аустенитной стали с целью определения связи магнитных характеристик с величиной пластической деформации, которой был подвергнут материал.

Объектом исследования были листы аустенитной стали AISI 304, толщиной 2 мм в состоянии поставки. В исходном состоянии сталь

парамагнитна. Для определения механических свойств материала был изготовлен разрывной образец. На нем были проведены испытания в соответствии с ГОСТ 1497-2023 на гидравлической испытательной машине Tinius Olsen Super L-60. Условный предел текучести исследованного материала равен 320 МПа, временное сопротивление – 730 МПа, относительное удлинение при разрыве – 56 %.

Для исследований по схеме двухосного растяжения были изготовлены крестообразные образцы. Испытания на двухосное деформирование проводили на оригинальной двухосной машине [6]. Фотография рабочей зоны испытательного стенда с установленным крестообразным образцом из стали AISI 304 представлена на рис. 1. При помощи видеоэкстензометра рассчитывали компоненты тензора деформаций в центральной зоне образца.

Для измерения петель магнитного гистерезиса и начальной кривой намагничивания использовали приставное магнитное устройство (ПМУ) в виде П-образного электромагнита с измерительными катушками напряженности магнитного поля и магнитной индукции. Полюса электромагнита имели сечение 16×4 мм, межполюсное расстояние составляло 8 мм. Указанные габариты позволяли устанавливать ПМУ в центральной части крестообразного образца и обеспечивали промагничивание по всей толщине. Намагничивающая и измерительные катушки ПМУ были подключены к источнику стабилизированного постоянного тока и флюксметрам EF-5 магнитноизмерительного комплекса REMAGRAPH C-500. Частота изменения магнитного поля составляла 0,03 Гц.

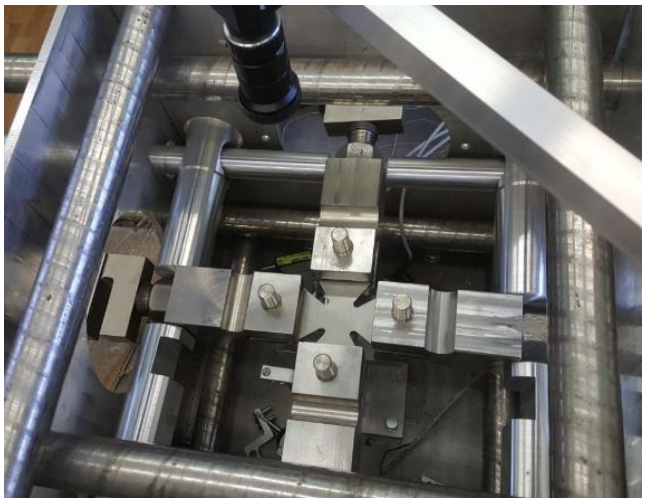


Рис. 1. Фотография рабочей зоны двухосной испытательной машины с установленным крестообразным образцом из стали AISI 304

Параметры МШБ: среднеквадратичное значение напряжений магнитных шумов Баркгаузена RMS и число скачков Баркгаузена $N$ за цикл перемагничивания в переменном магнитном поле определяли с использованием анализатора магнитных шумов Баркгаузена (МШБ) MICROSCAN 600. Первичным преобразователем служил накладной датчик с сечением полюсов

9×8 мм и расстоянием между полюсами 9 мм. Амплитуда напряжения питания первичных преобразователей анализатора составляла 5 В, частота перемагничивания – 95 Гц.

Амплитуду вихретокового сигнала $A$ определяли с помощью вихретокового дефектоскопа «Вектор». Измерения осуществляли при различных частотах возбуждения вихретокового преобразователя: 10, 25, 50 и 100 кГц. При каждой частоте параметр $A$ вихретокового сигнала определяли как среднее арифметическое значение результатов по пяти измерениям.

Измерения всех вышеперечисленных характеристик проводили в центральной зоне крестообразного образца после каждого этапа нагружения до определенной величины пластической деформации и последующей разгрузки. При этом измерения магнитных характеристик и параметров МШБ с применением приставных магнитных устройств осуществляли в двух направлениях, размещая преобразователь вдоль каждой из осей нагружения (осей $x$ и $y$).

Результаты исследований, проведенных с использованием ПМУ в условиях двухосного растяжения, при расположении накладного преобразователя как вдоль оси растяжения $x$, так и вдоль второй оси $y$, представлены на рис. 2.

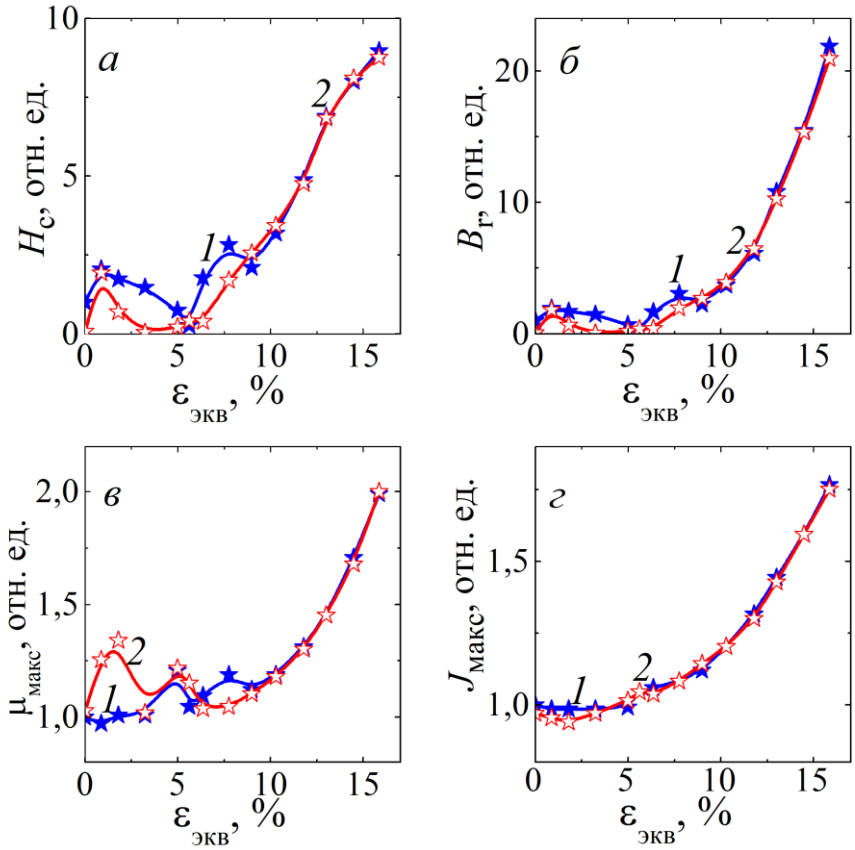



Рис. 2. Зависимости от степени деформации $\varepsilon_{экв}$ значений $H_с$ (*а*), $B_г$ (*б*), $\mu_{макс}$ (*в*) и $J_{макс}$ (*г*), приведенных к значениям, измеренным в исходном состоянии вдоль оси $x$. Кривые *1* – измерения вдоль оси $x$, *2* – вдоль оси $y$

Можно наблюдать проявление изотропии магнитных параметров, измеренных в разных направлениях. Все представленные на рис. 2 магнитные характеристики (коэрцитивная сила $H_c$, остаточная индукция $B_r$, максимальная магнитная проницаемость $\mu_{макс}$ и намагниченность в максимальном приложенном магнитном поле $J_{макс}$) демонстрируют монотонное увеличение при степени деформации, большей 7,5 %, что обусловлено увеличением объемной доли ферромагнитной фазы.

На рис. 3 приведены зависимости параметров МШБ от степени пластической деформации при двухосном деформировании растяжением. Как видно из рис. 3, кривые зависимостей среднеквадратичного значения напряжений RMS и числа скачков Баркгаузена $N$ имеют качественно одинаковый характер изменения при измерениях в двух различных направлениях. При степени деформации $\varepsilon_{экв} > 10$ %, наблюдается монотонное увеличение RMS, при этом зависимость $N(\varepsilon_{экв})$, наоборот, монотонно убывает. Такое поведение параметров МШБ обусловлено тем, что происходит увеличение объемной доли α′-мартенсита, сопровождающееся ростом линейных размеров доменов. Соответственно, число доменных границ уменьшается, это приводит к росту среднеквадратичного значения напряжений МШБ и уменьшению числа скачков Баркгаузена.

На рис. 4 представлены зависимости показателя вихретокового прибора (амплитуды $A$) от степени деформации при двухосном растяжении исследуемой стали. Видно, что при $\varepsilon_{экв} > 7{,}5$ % наблюдается однозначная корреляция между амплитудой вихретокового сигнала и степенью деформации: по мере увеличения содержания ферромагнитной фазы амплитуда $A$ монотонно растет. Можно отметить, что чувствительность амплитуды к степени деформации различна при изменении частоты возбуждения вихретокового преобразователя. Амплитуду сигнала вихретокового прибора можно использовать в качестве информативного параметра для оценки степени деформации, превышающей 7,5 %.

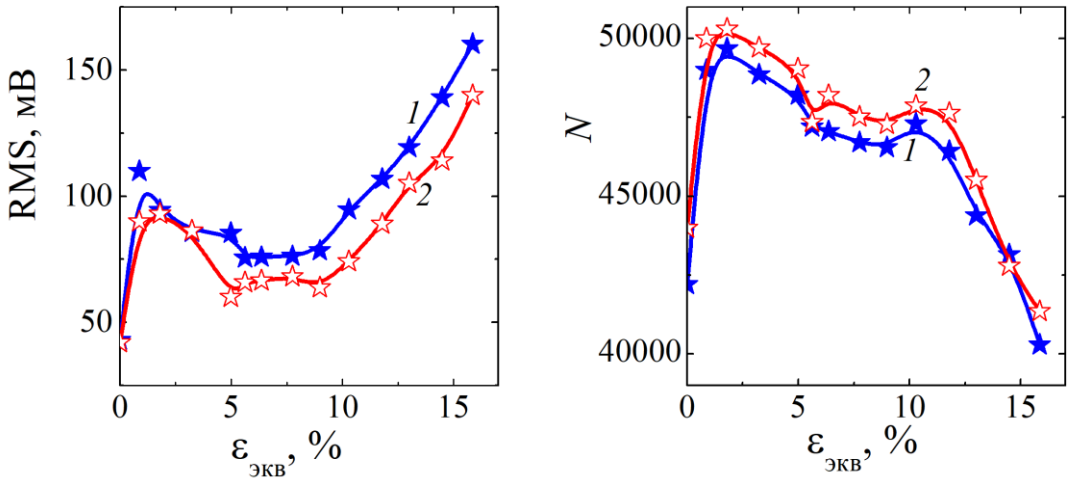



Рис. 3. Зависимости от степени деформации $\varepsilon_{экв}$ параметров магнитных шумов Баркгаузена (RMS (*а*) и число скачков Баркгаузена $N$ (*б*)). Кривые *1* – измерения вдоль оси *x*, *2* – вдоль оси *y*

Таким образом, результаты исследования магнитных характеристик и параметров шумов Баркгаузена метастабильной аустенитной стали AISI 304 при двухосном симметричном растяжении, измеренных в направлениях обеих осей приложения нагрузки, продемонстрировали качественно схожий характер их изменений с ростом степени эквивалентной деформации.

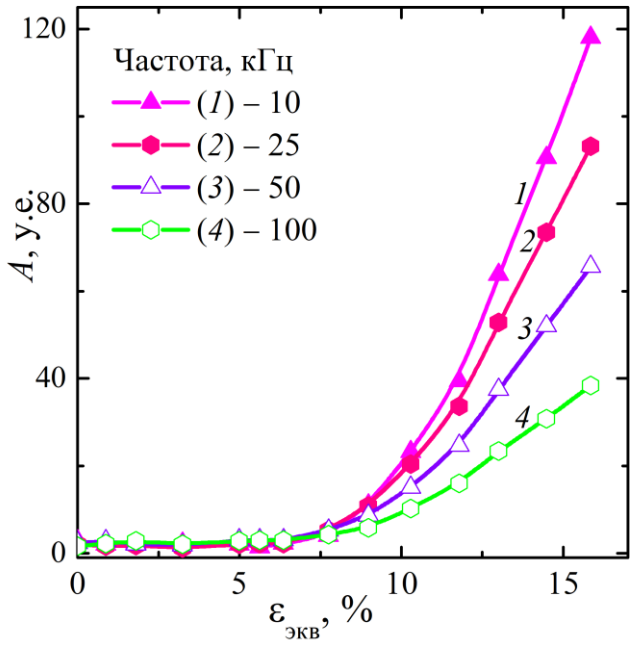



Рис. 4. Зависимости амплитуды $A$ вихретокового сигнала образца от степени деформации $\varepsilon_{экв}$ на различных частотах возбуждения электромагнитного поля

Установлено, что такие характеристики, как коэрцитивная сила, максимальная магнитная проницаемость, остаточная индукция, максимальная намагниченность, параметры магнитных шумов Баркгаузена, а также амплитуда вихретокового сигнала образцов исследованной стали монотонно увеличиваются при степени эквивалентной деформации, превышающей 7,5-10 %, что связано с образованием мартенсита деформации и увеличением количества этой фазы.

Показано, что амплитуда вихретокового сигнала в сравнении с другими исследованными характеристиками обладает наибольшей чувствительностью к деформациям, превышающим 7,5 %.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России для ИФМ УрО РАН и ИМАШ УрО РАН.

Список литературы

1. Determination of the phase composition of a carbon steel – austenitic stainless steel bimetallic joint based on magnetic properties / M.V. Lapin, A.N. Mushnikov, A.M. Povolotskaya, N.A. Davydova, L.S. Goruleva, N.N. Soboleva // Frontier Materials & Technologie. 2025. № 4. P. 39–49.

2. Martensitic transformation due to plastic deformation and magnetic properties in SUS 304 stainless steel / S. Takahashi, J. Echigoya, T. Ueda, X. Li, H. Hatafuku // Journal of Materials Processing Technology. 2001. V. 108. Iss. 2. P. 213–216.

3. Mishakin V.V., Klyushnikov V.A. Study of a welded joint of 12Kh18N10T steel using acoustic and magnetic methods // Inorganic Materials. 2018. V. 54. No. 15. P. 1498–1502.

4. Influence of Plastic Deformation and Fatigue Damage on Electromagnetic Properties of 304 Austenitic Stainless Steel / S. Xie, L. Wu, Z. Tong, H.-E. Chen, Z. Chen, T. Uchimoto, T. Takagi // IEEE Transactions on Magnetics. 2018. V. 54. Iss. 8. Art. no. 6201710.

5. Vértesy G. Nondestructive indication of plastic deformation of cold-rolled stainless steel by magnetic minor hysteresis loops measurement / G. Vértesy, I. Mészáros, I. Tomáš // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2005. V. 285. Iss. 3. P. 335–342.

6. Влияние двухосного симметричного растяжения на магнитные свойства составного образца из двух стальных пластин с различными механическими и магнитными свойствами / А.Н. Мушников, А.М. Поволоцкая, С.М. Задворкин, К.Д. Крючева // Дефектоскопия. 2024. Т. 60. № 9. С. 25–39.

Контакты:
povolotskaya@imp.uran.ru (Поволоцкая Анна Моисеевна);
mushnikov@imach.uran.ru (Мушников Александр Николаевич);
kristina.kryucheva@mail.ru (Малыгина Кристина Денисовна);
sherlarisa@mail.ru (Горулева Лариса Сергеевна)

УДК 621.372.8:535.8

***Д. В. ПОНКРАТОВ***[1]
***А. Б. СОТСКИЙ***[1], *д-р физ.-мат. наук, проф.*
***Л. И. СОТСКАЯ***[2], *канд. физ.-мат. наук, доц.*
[1]Могилевский государственный университет им. А.А. Кулешова (Могилев, Беларусь)
[2]Белорусско-Российский университет (Могилев, Беларусь)

# ИЗГИБНЫЕ ПОТЕРИ ЭНЕРГИИ МОД ОТКРЫТЫХ ВОЛНОВОДОВ КОАКСИАЛЬНОЙ ГЕОМЕТРИИ

**Аннотация.** Разработан метод расчета изгибных потерь энергии мод планарных диэлектрических волноводов коаксиальной геометрии. Сформулированы дисперсионные уравнения для мод *s*- и *p*-поляризации на участке изгиба волновода. Установлено, что потери *s*-поляризованной моды на изгибе коаксиального волновода в 28 раз ниже, чем у однослойного волновода. В частности, на рабочей частоте 0.3 *ТГц* коаксиальный волновод обеспечивает приемлемые изгибные потери энергии при радиусе его изгиба 20 мм, что для стандартных однослойных волноводов недостижимо.

**Ключевые слова:** коаксиальный диэлектрический волновод, терагерцовое излучение, дисперсионное уравнение, изгибные потери энергии, неразрушающий контроль.

**Введение.** Электромагнитное излучение терагерцового диапазона частот (0,1–10 ТГц) находит применение при обнаружении расслоений в полимерных и композитных изделиях, измерении толщины покрытий, эндоскопической диагностики труднодоступных полостей [1, 2]. Одним из ключевых элементов

аппаратуры такого контроля являются гибкие волноводные тракты, обеспечивающие малые потери энергии сигнала при радиусах изгиба порядка нескольких десятков миллиметров. Для стандартных полых и сплошных диэлектрических волноводов данное требование практически не выполнимо вследствие резкого роста излучательных потерь энергии мод при уменьшении радиусов их изгиба.

Более перспективными в этом отношении являются коаксиальные диэлектрические волноводы [3–5], которые сохраняют работоспособность при меньших радиусах изгиба $r_0$, чем у полых трубчатых ($r_0 \geq 100$–$150$ мм [6]) и пористых политетрафторэтиленовых волноводов ($r_0 \geq 210$ мм [7]). Минимальный радиус изгиба, достигнутый экспериментально в 2025 г., составляет $r_0 = 16$ мм при потерях 0,27 дБ/см [8]. Вместе с тем теория изгибов коаксиальных диэлектрических волноводов до настоящего времени не разработана. Такая теория позволит обоснованно выбирать параметры волновода при проектировании гибких *ТГц*-трактов. Потребность в ней имеется и со стороны разработки волноводных сенсоров движения в робототехнике [9].

Настоящая работа направлена на устранение указанного пробела. Здесь на основе метода степенного ряда для решения волнового уравнения и метода контурного интегрирования для вычисления функций Ханкеля больших комплексных порядков [10] разработана техника расчета комплексной постоянной распространения β основной моды изогнутого коаксиального волновода планарной геометрии. В исследовании использован известный факт подобия волноводных эффектов в трехмерных и планарных диэлектрических структурах [11], позволяющий строить аналитическую теорию изгиба открытого волновода в рамках планарной геометрии (рис. 1).

**Разделение переменных на участке изгиба волновода**

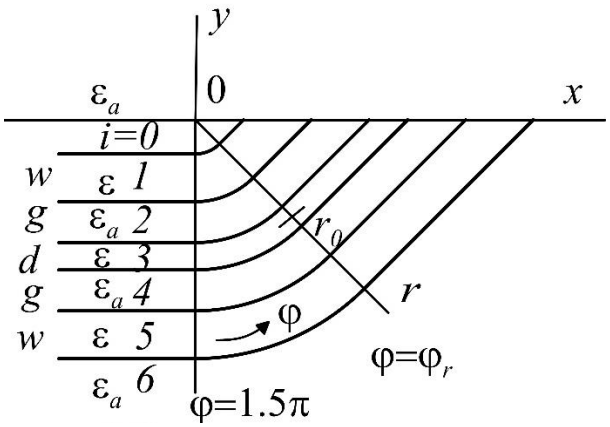



Рис.1 Схема изогнутого планарного коаксиального волновода.

Изгиб коаксиального планарного волновода моделируется сектором $1{,}5\pi < \varphi < \varphi_r$, где $r$, $\varphi$ – полярные координаты, а координата $r = r_0$ отождествляется с радиусом изгиба оси волновода. Электромагнитное поле не зависит от продольной координаты $z$, вследствие чего уравнения Максвелла расщепляются на независимые подсистемы для волн *s*- и *p*-поляризации.

Подробно рассмотрим волны p-поляризации (анализ волн *s*-поляризации аналогичен). Данные волны описываются уравнением

$$\Delta H_z - \frac{\nabla\varepsilon\cdot\nabla H_z}{\varepsilon} + k_0^2\varepsilon H_z = 0, \tag{1}$$

где $H_z$ – компонента магнитного поля, $\varepsilon$ – относительная диэлектрическая проницаемость среды, $k_0 = \omega\sqrt{\varepsilon_0\mu_0} = \omega / c = 2\pi / \lambda$ – волновое число вакуума. Подстановка $H_z = R(r)\Phi(\varphi)$, где $r$ и $\varphi$ – полярные координаты, приводит к уравнению для радиальной функции

$$\varepsilon\nabla_r\frac{1}{\varepsilon}\nabla_r R + \frac{1}{r}\nabla_r R + (k_0^2\varepsilon - \frac{\nu^2}{r^2})R = 0, \tag{2}$$

где $\nu$ – константа разделения переменных. Полагая $\nu = \beta r_0$, решение угловой части можно записать в виде бегущей вдоль изгиба волны

$$\Phi = A\exp(-i\beta l), \tag{3}$$

где $A$ – амплитуда падающей моды, $l = r_0\Delta\varphi$ – длина пути вдоль оси изогнутого участка. Постоянная $\beta$ имеет смысл (комплексной, ввиду излучательных потерь) постоянной распространения моды изогнутого волновода: мнимая часть $\beta$ определяет изгибные потери энергии.

Коаксиальный планарный волновод представлен семью однородными слоями. В пределах каждого слоя уравнение (2) сводится к уравнению Бесселя

$$\nabla_r^2 R + \frac{1}{r}\nabla_r R + (k_0^2\varepsilon - \frac{\nu^2}{r^2})R = 0, \tag{4}$$

решение которого строится численно с «сшивкой» на границах слоев по условиям непрерывности функций $R(r)$ и $\nabla_r R(r)/\varepsilon(r)$. В открытых (крайних) слоях решения выражаются через функцию Бесселя $J_\nu$ и функцию Ханкеля второго рода $H_\nu^{(2)}$ комплексного порядка $\nu$, что обеспечивает конечность поля в центре структуры и излучение моды на бесконечности.

**Дисперсионное уравнение и метод его решения.** Условия «сшивки» решений на границе последнего слоя приводят к дисперсионному уравнению относительно спектрального параметра $\nu$

$$\frac{\nabla_r R(r_6)}{R(r_6)} = k_0\sqrt{\varepsilon_a}\,\frac{H_\nu^{(2)\prime}(k_0\sqrt{\varepsilon_a}r_6)}{H_\nu^{(2)}(k_0\sqrt{\varepsilon_a}r_6)}. \tag{5}$$

Для интегрирования уравнения Бесселя (4) в пределах слоев использован предложенный ранее в [10] одношаговый метод степенного ряда четвертого порядка точности:

$$R(r+\Delta r) = \sum_{k=0}^{5}\frac{\nabla_r^k R(r)\Delta r^k}{k!}. \tag{6}$$

Отдельную проблему представляет вычисление отношений цилиндрических функций больших комплексных порядков, поскольку при технически приемлемых радиусах изгиба модуль параметра $\nu = \beta r_0$ может достигать нескольких сотен. Отношение функций Бесселя вычисляется с помощью аппарата цепных дробей, а отношения функций Ханкеля - по алгоритму, использующему контурное интегрирование в формуле Пуассона [12].

$$\frac{H_\nu^{(2)\prime}(z)}{H_\nu^{(2)}(z)} = \frac{\int_0^\infty d\tau(\frac{\nu}{z} - i - \tau)\exp(-z\tau)\tau^{\nu-0.5}(1-0.5i\tau)^{\nu-0.5}}{\int_0^\infty d\tau \exp(-z\tau)\tau^{\nu-0.5}(1-0.5i\tau)^{\nu-0.5}}. \qquad (7)$$

В нем исходный контур интегрирования (положительная вещественная полуось) деформируется в контур, проходящий через седловую точку, что устраняет быстрые осцилляции и обеспечивает устойчивый счёт при больших $|\nu|$.

**Результаты расчетов и обсуждение.** Разработанный метод реализован программно и применен к расчету изгибных характеристик планарных волноводов на основе полипропилена ($\varepsilon = 2.247 - i0.0036$, терагерцовый диапазон частот), окруженного воздухом, с параметрами $d/\lambda = 0.1$, $g/\lambda = 0.5$, $w/\lambda = 0.25$ для коаксиальных (coaxial) волноводов, $w/\lambda = 0$ для обычных (ordinary) волноводов. По мере уменьшения $r_0/\lambda$ распределение интенсивности основной моды претерпевает сдвиг от центра изгиба (рис. 2, 3).

Табл. 1. Изгибные потери энергии основной моды *s*-поляризации при разных нормированных радиусах изгиба $r_0/\lambda$

| $r_0/\lambda$ | Типы волн | | | |
|---|---|---|---|---|
| | *s*-поляризация | | *p*-поляризация | |
| | $\lvert Im(\beta)\rvert$ | | | |
| | ordinary | coaxial | ordinary | coaxial |
| ∞ | 3.3*E*-4 | 4.8*E*-4 | 4.4*E*-5 | - |
| 80 | 3.3*E*-4 | 5.8*E*-4 | 1.7*E*-3 | - |
| 60 | 3.3*E*-4 | 7.9*E*-4 | 3.0*E*-3 | - |
| 40 | 3.5*E*-4 | 1.3*E*-3 | 5.6*E*-3 | - |
| 20 | 7.6*E*-2 | 2.7*E*-3 | 1.4*E*-2 | - |

Для *s*-поляризованной моды однослойного волновода наблюдается резкая изгибная отсечка: при $r_0/\lambda = 20$ $|Im(\beta)| = 7{,}6\times10^{-2}$, что в 230 раз превышает соответствующее значение при $r_0/\lambda \geq 40$. Для *s*-поляризованной моды коаксиального волновода при том же $r_0/\lambda = 20$ получено $|Im(\beta)| = 2{,}7\times10^{-3}$, что в 28 раз меньше (табл. 1, рис. 2); мода p-поляризации в коаксиальном волноводе исчезает. При рабочей частоте $f = 0{,}3$ ТГц ($\lambda \approx 1$ мм) $r_0/\lambda = 20$ соответствует $r \approx 20$ мм. Значения $Im(\beta)$ из табл. 1 непосредственно применимы при проектировании: по ним определяется минимально допустимый радиус изгиба

тракта при заданном уровне дополнительных потерь и рабочей частоте. Отсутствие *p*-поляризованной моды исключает межполяризационные переходные помехи, что особенно существенно в задачах ТГц-спектроскопии и томографии материалов с поляризационно-зависимым откликом.

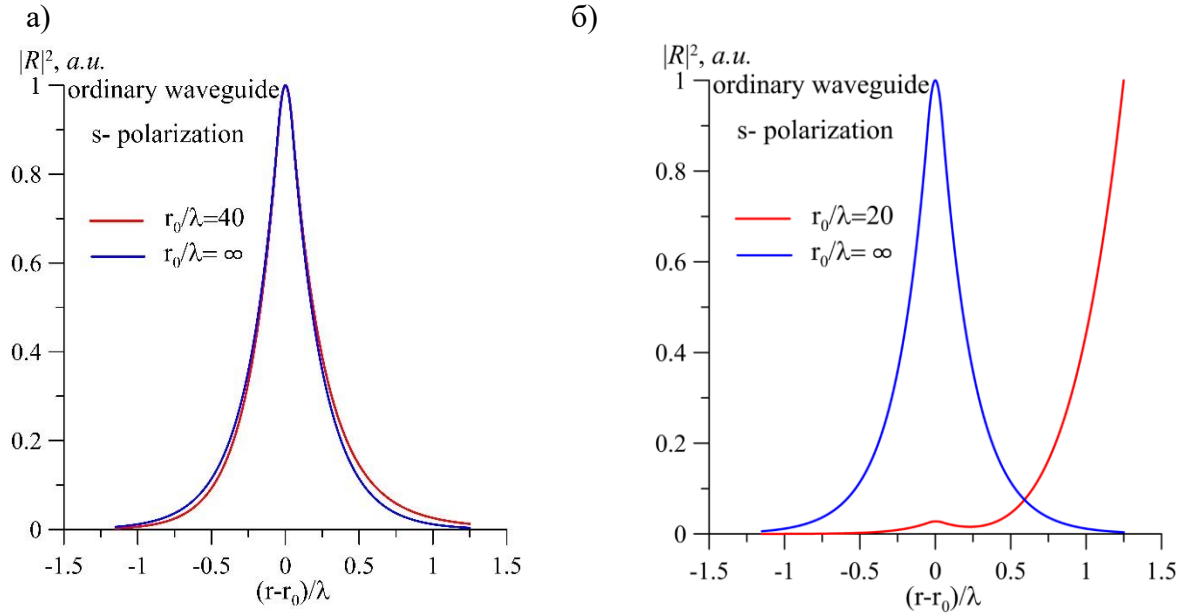



Рис. 2. Распределение интенсивности основной моды s-поляризации обычного планарного волновода при $r_0/\lambda = 40$ (слева) и при $r_0/\lambda = 20$ (справа).

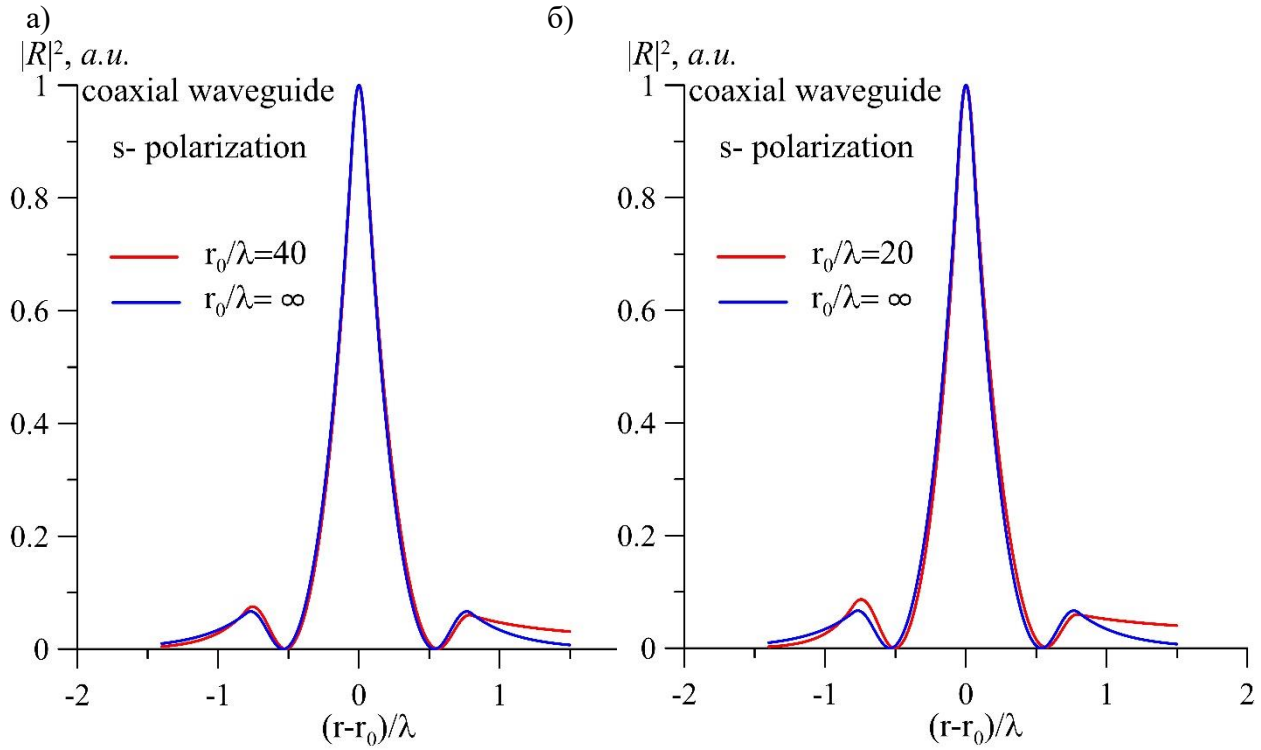



Рис. 3. Распределение интенсивности основной моды s-поляризации коаксиального волновода при $r_0/\lambda = 40$ (слева) и $r_0/\lambda = 20$ (справа).

**Заключение.** Разработан метод расчета изгибных потерь энергии мод открытого планарного волновода коаксиальной геометрии, основанный на разделении переменных. Численные исследования показали существенное

преимущество коаксиальной конфигурации по сравнению с однослойной: значительное снижение изгибных потерь и однополяризационный режим работы. Результаты обосновывают применение коаксиальных планарных диэлектрических волноводов в гибких *ТГц*-трактах систем неразрушающего контроля и диагностики в условиях ограниченного доступа к объекту.

Работа выполнена в рамках ГПНИ Республики Беларусь «5.1. Фотоника и лазерно-оптические технологии».

**Список литературы**

1. Tonouchi, M. Cutting-edge terahertz technology / M. Tonouchi // Nature Photonics. – 2007. – Vol. 1. – P. 97–105.
2. Terahertz dielectric waveguides / S. Atakaramians, S. Afshar, T. M. Monro, D. Abbott // Advances in Optics and Photonics. – 2013. – № 5. – P. 169–215.
3. Eight-capillary cladding THz waveguide with low propagation losses and dispersion / M. M. Nazarov, A. V. Shilov, K. F. Bzheumikhov [et al.] // IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology. – 2018. – Vol. 8, Issue 2. – P. 183–191.
4. Сотский, а. В. Коаксиальный диэлектрический волновод для ТГц диапазона / А. Б. Сотский, А. В. Шилов, С. С. Михеев, М. М. Назаров // Проблемы взаимодействия излучения с веществом : материалы V Междунар. науч. конф., посвящённой 90-летию со дня рождения Б. В. Бокутя, Гомель, 14– 16 ноября 2018 г. : в 2 ч. / ГГУ имени Ф. Скорины ; редкол.: С. А. Хахомов (гл. ред.) [и др.]. — Гомель, 2018. – Ч. 2. – С. 212–217.
5. Понкратов, А. В. Пропускание коаксиального диэлектрического волновода / Д. В. Понкратов, А. В. Шилов, А. Б. Сотский, М. М. Назаров // Технологии передачи и обработки информации: материалы конференции. – Минск, 2024. – С. 20–22.
6. Flexible terahertz fiber optics with low bend-induced losses / T. Ito [et al.] // J. Opt. Soc. Am. B. – 2007. – Vol. 24. – P. 1230–1235.
7. Low-loss polytetrafluoroethylene hexagonal porous fiber for terahertz pulse transmission / Y. S. Lee, H. Choi, B. Kim [et al.] // IEEE Trans. Microw. Theory Tech. – 2021. – Vol. 69. – P. 4623–4630.
8. THz-fiber waveguide composed of a biocompatible Vaseline core and Teflon holey cladding enabling a centimeter bending radius / Y. S. Lee, I. Maeng, M. Lee [et al.] // Photonics Research. – 2025. – Vol. 13, № 8. – P. 2306–2315.
9. Photonic Crystal fiber with two air-channel rings: fabricating and assessment to sense bending loss / V.P. Minkovich, A. V. Kir'yanov, M. S. Sicacha, S. Calixto // J. Lightwave Technol. – 2025. – Vol. 43, №12. – P.5850 – 5855.
10. Сотская, Л. И. Вычисление цилиндрических функций больших порядков в теории изгибов открытых волноводов / Л. И. Сотская, М. А. Матков, Д. Е. Прочуханов // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы Международной научно-технической конференции, Могилев, 23–24 апреля 2026 г. / М-во образования Респ. Беларусь, М-во науки и высшего образования Рос. Федерации, Бел.-Рос. ун-т ; редкол.: М. Е. Лустенков (гл. ред.) [и др.]. – Могилев, 2026. – С. 341–342.
11. Маркузе, Д. Оптические волноводы / Д. Маркузе. – М.: Мир, 1974. – 576 с.
12. Никифоров, А. Ф. Специальные функции математической физики: Учебное пособие / А. Ф. Никифоров, В. Б. Уваров. – 3-е изд. – Долгопрудный: «ИНТЕЛЛЕКТ», 2007. – 344с.

Контакты:
d.v.ponkratov@yandex.by (Понкратов Дмитрий Васильевич);
ab_sotsky@mail.ru (Сотский Александр Борисович);
li_sotskaya@tut.by (Сотская Людмила Ивановна).

УДК 621.313.333:621.3.07

***Д. И. ПОПОВ***, *д-р. техн. наук, доц.*
***Е. И. МИНЖАСОВ***
Омский государственный университет путей сообщения
«ОмГУПС» (Омск, Россия)

# ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НЕСУЩЕЙ ЧАСТОТЫ УПРАВЛЯЕМЫХ ИНВЕРТОРОВ НА РАБОТУ СИСТЕМЫ ИСПЫТАНИЯ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ МЕТОДОМ ВЗАИМНОЙ НАГРУЗКИ

**Аннотация.** Рассматривается влияние несущей частоты широтно-импульсной модуляции (ШИМ) в частотных преобразователях на эффективность работы нагрузочной машины в составе электротехнической системы испытания асинхронных двигателей. Исследования проведены с применением разработанной ранее имитационной модели системы испытания асинхронных двигателей методом взаимной нагрузки. Изучено влияние изменения несущей частоты ШИМ управляемых инверторов на энергоэффективность системы испытания и определения оптимальной несущей частоты.

**Ключевые слова:** асинхронная машина, потери мощности, взаимная нагрузка, несущая частота ШИМ.

В настоящее время лидирующую позицию в промышленности и на транспорте занимают асинхронные двигатели благодаря своей конструктивной простоте и высокой надежности. Их широкое применение предъявляет к ним высокие требования точности контроля параметров и энергоэффективности. Таким образом, массовое применение асинхронных двигателей обусловливает необходимость использования соответствующих систем испытания [1, 2].

Обеспечения высоких показателей энергоэффективности позволяют достичь существующие системы испытания, основанные на методе взаимной нагрузки. Для этого в системах такого типа необходимо обеспечить точное регулирование нагрузки и частоты вращения асинхронных двигателей [3, 4]. Для данной задачи в схемах испытания используют управляемые инверторы с ШИМ, входящие в состав преобразователей частоты (ПЧ). Однако, большинство типовых методик испытаний асинхронных двигателей осуществляют выбор несущей частоты ШИМ без учета энергоэффективности испытательной системы.

С целью изучения влияния изменения несущей частоты ШИМ управляемых инверторов на энергоэффективность системы испытания разработана имитационная модель в программе *SimInTech* [5], схема которой приведена на рис. 1. Представленная имитационная модель состоит из двух асинхронных машин, обозначенных на схеме, как АД1 (работает в двигательном режиме) и АД2 (нагрузочная). Питание всей схемы осуществляется от источника *E*, подключенного к трансформатору *T*. Первый ПЧ состоит из мостового выпрямителя *UZ*1, собранного из диодов, и инвертора напряжения *UZ*2,

управляемого сигналами от источника *К*1.

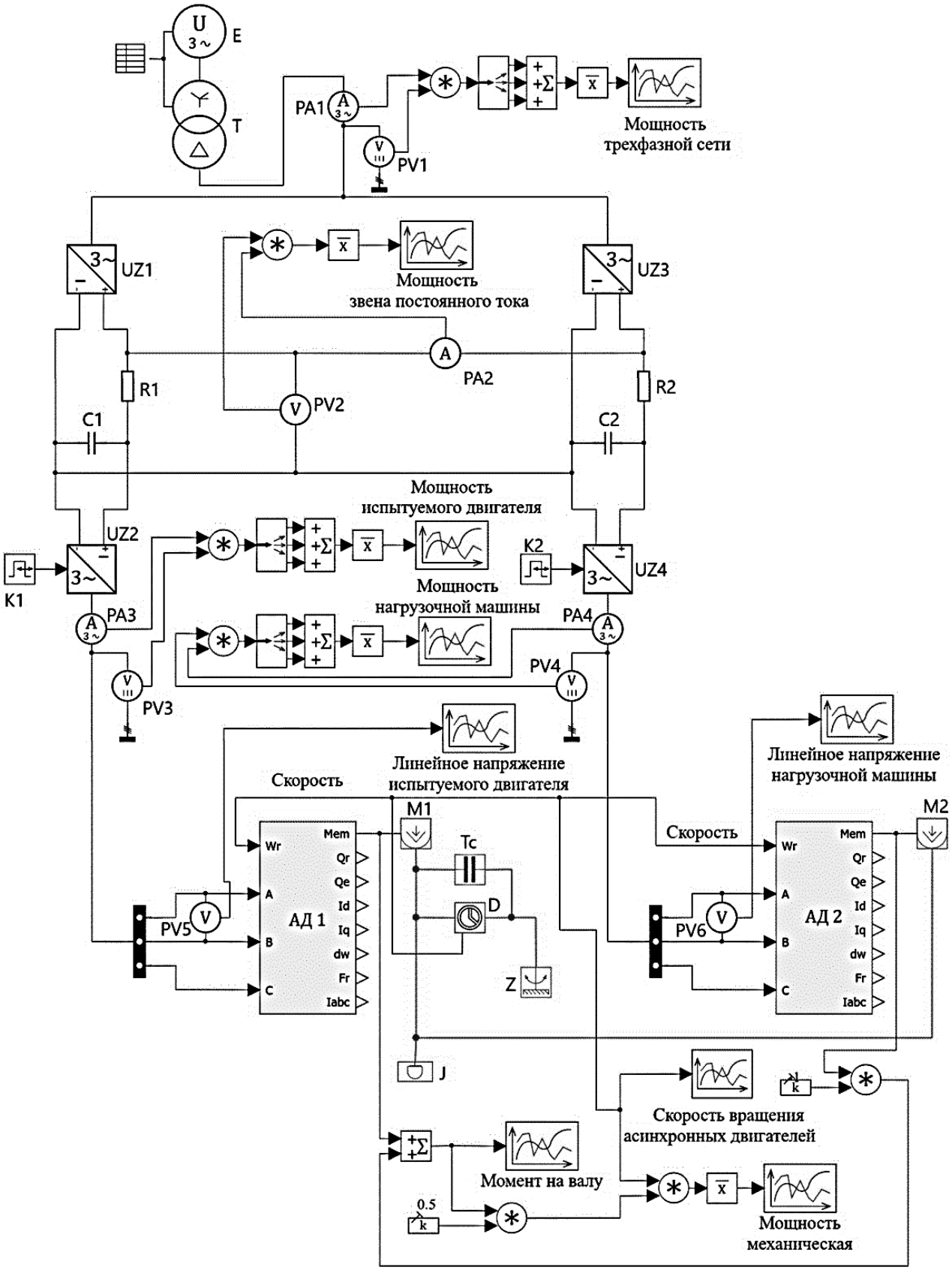



Рис. 1. Схема имитационной модели системы испытания АД в среде динамического моделирования *SimInTech*

Второй ПЧ, включает в себя соответственно элементы *UZ*3, *UZ*4 и *K*2. Также на схеме обозначены следующие элементы механической части: блок *J*, определяющий момент инерции вращающейся системы, датчик *D*, блок *T*c, задающий сухое трение. Блок *Z* (заделка) необходим для корректной работы программы *SimInTech* при выполнении расчетов схемы, содержащей механические части. Механическая связь электрических машин и других элементов модели, относящихся к ее механической части, обеспечивается блоками *M*1 и *M*2.

В качестве примера для имитационного моделирования использованы следующие паспортные параметры асинхронных двигателей типа рДМ180 LB40M5: $P_н$ = 30 кВт; $U_н$ = 380/660 В; $f_н$ = 50 Гц; $n_н$ = 1460 об/мин; $I1_{1н}$ = 66,8/38,6 А; $\cos\varphi_н$ = 0,77; КПД $\eta_н$ = 88,2%.

Имитационная модель в соответствии с приведенной схемой (см. рис.1) позволила определить электрическую мощность нагрузочной машины, характеризующую энергоэффективность рассматриваемой системы испытаний, при заданных значениях несущей частоты ШИМ управляемых инверторов, равных 1, 4 и 10 кГц. Временные диаграммы электрической мощности нагрузочной машины при различных несущих частотах ШИМ управляемых инверторов в процессе пуска асинхронных двигателей и вывода их на режим номинальной нагрузки приведены на рис. 2.

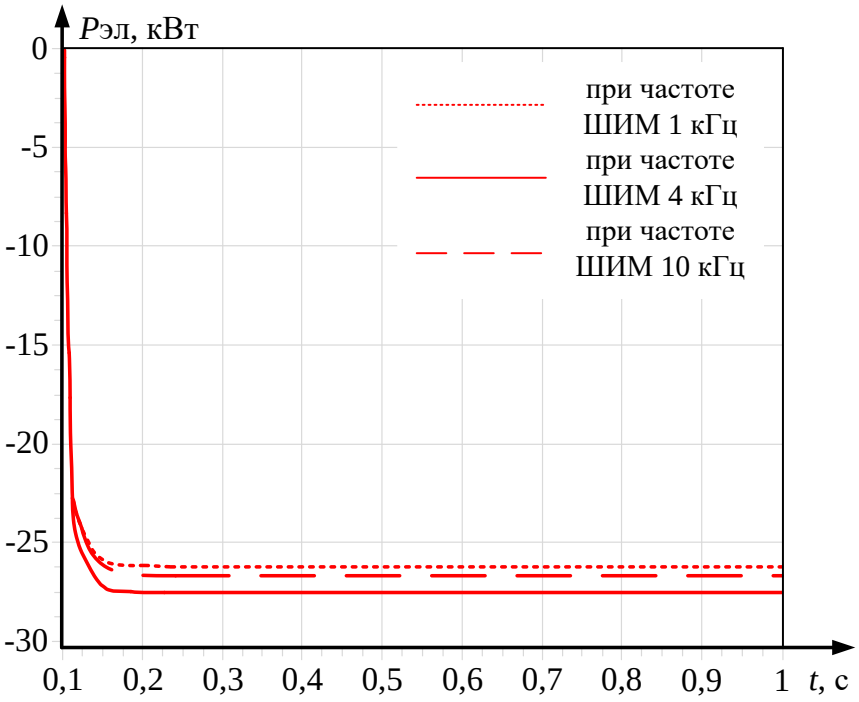



Рис. 2. Временные диаграммы электрической мощности нагрузочной машины при различных несущих частотах ШИМ

Анализ результатов имитационного моделирования с применением асинхронных двигателей типа рДМ180 LB40M5 показал, что при значениях несущей частоты ШИМ равных 1 кГц и 10 кГц нагрузочная машина вырабатывает мощность 26 кВт и 26,23 кВт соответственно (см. рис. 2). А при

значении несущей частоты ШИМ 4 кГц происходит увеличение мощности, вырабатываемой нагрузочной машиной, до 27 кВт. Это указывает на то, что вариант, при котором значение несущей частоты ШИМ равно 4 кГц, является лучшим для обеспечения высокой энергоэффективности системы испытания.

Учитывая вышеизложенное, можно сформулировать следующие выводы.

С целью повышения энергоэффективности работы системы испытаний необходимо выполнять ее моделирование или соответствующий расчет, позволяющий найти оптимальную частоту ШИМ.

Разработанная имитационная модель позволяет рассчитать влияние значения несущей частоты ШИМ на энергоэффективность системы испытания асинхронных двигателей методом взаимной нагрузки и выбрать частоту ШИМ, обеспечивающую лучшие энергетические показатели системы.

**Список литературы**

1. Омельченко, Е. Я. Энергоэффективные испытательные стенды для электродвигателей / Е. Я. Омельченко, А. В. Белый, С. С. Енин, Н. В. Фомин // Электротехнические системы и комплексы. – 2018. – № 3(40). – С. 12-19.

2. Коварский Е. М. Испытание электрических машин / Е. М. Коварский, Ю. И. Янко – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 320 с.

3. Дюмин, А. А. Регулирование мощности генератора при испытаниях методом взаимной нагрузки / А. А. Дюмин // Сборник научных трудов по материалам международной научно-практической конференции «Современные проблемы и пути их решения в науке, транспорте, производстве и образовании». – 2008. – Т. 4. № 4. – С. 48-49.

4. Кочин, А. Е. Система для испытания электрических машин по методу взаимной нагрузки / А. Е. Кочин, С. А. Васильченко // Сборник научных трудов Международной научно-практической конференции «Транспорт: наука, образование, производство», Ростов-на-Дону, 18-21 апреля 2017 г. – Ростов-на-Дону: Ростовский государственный университет путей сообщения, 2017. – С. 168-171.

5. Попов, Д. И. Исследование эффективности способа снижения потерь при испытаниях асинхронных машин с применением среды динамического моделирования SimInTech / Д. И. Попов, Е. И. Минжасов // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. – 2025. – Т. 18, № 8. – С. 1062-1071.

Контакты:
popovomsk@yandex.ru (Попов Денис Игоревич);
minzhasov2000@yandex.ru (Минжасов Ербол Исильбаевич).

УДК 621.785

***А. В. ПОПРУКАЙЛО*[1],**
***Г. А. КОСТЮКОВИЧ*[1]**, *канд. техн. наук, доц.*
***М. Е. КИПНИС*[1],**
***Е. В. ОВЧИННИКОВ*[2]**, *д-р техн. наук, доц.*
[1]ОАО «Белкард» (Гродно, Беларусь)
[2]Гродненский государственный университет им. Янки Купалы (Гродно, Беларусь)

# СВОЙСТВА И СТРУКТУРА СТАЛИ 60ПП В ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КРЕСТОВИН КАРДАННЫХ ПЕРЕДАЧ

**Аннотация.** Представлена технология изготовления крестовин шарниров карданных передач из стали пониженной прокаливаемости 60ПП с использованием поверхностной индукционной закалки при глубинном нагреве. Показаны свойства и структура стали 60ПП после объемно-поверхностной закалки при глубинном индукционном нагреве. По результатам исследований выполнено обоснование технологии термической обработки, позволяющей повысить статические и динамические нагрузки.

**Ключевые слова:** карданная передача, крестовина, износ, разрушение, нагрузка, контактные напряжения, цементация, индукционная закалка, структура, твердость, испытания.

**Введение.** Трансмиссия, передающая энергию от источника к исполнительным механизмам – неотъемлемая часть транспортных средств, обеспечивающая работу других машин в силовых установках. Карданные передачи, являющиеся составной частью трансмиссии, должны обеспечивать ее необходимую компоновку для передачи энергии, компенсируя при этом возможные линейные, угловые погрешности, возникающие при монтаже и сборке транспортных средств и других машин, а также при движении транспортных средств в эксплуатационных условиях [1-3]. Карданные передачи соединяют отдельные агрегаты трансмиссий, например, двигатель с коробкой передач, раздаточной коробкой или редуктором ведущего моста в автомобилях.

Конструкцию карданной передачи определяют элементы, позволяющие при надежной передаче энергии от источника обеспечивать им в трансмиссиях необходимые линейные и угловые перемещения, а также простоту и легкость монтажа и демонтажа передач с соединяемыми агрегатами и исполнительными механизмами. Основу этих элементов составляют шарниры, обеспечивающие угловые перемещения. В конструкциях, используемых в трансмиссионных карданных передачах, наиболее широко распространены шарниры, имеющие крестовину, соединенную с вилками ведущего и ведомого валов.

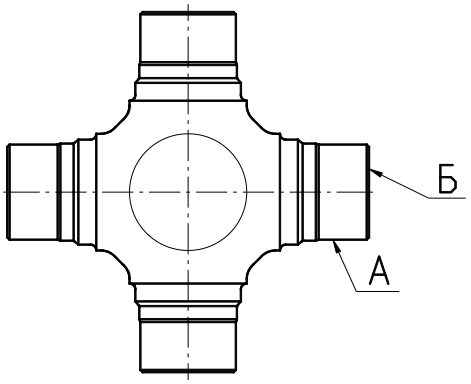
Увеличение грузоподъемности и скоростей современных автомобилей потребовало усложнения трансмиссий, в том числе карданных передач. В результате в трансмиссиях стали проявляться явления различных колебаний и вибраций. Повышение динамических нагрузок стало причиной преждевременных отказов шарниров и, в первую очередь, крестовин, как

наиболее нагруженных элемента карданной передачи. Поэтому возникает необходимость повышения прочности и надежности в эксплуатации крестовин шарниров на базе конструкторских решений, связанных с рациональным выбором применяемых материалов и технологиям изготовления [4-7].

Крестовина шарнира карданной передачи является высоконагруженной деталью и испытывает статические, динамические, в том числе циклические, нагрузки. Через нее передается весь крутящий момент двигателя, изменяющийся как по величине в процессе движения автомобиля, так и по скорости приложения при броске сцепления. Кроме того, шипы крестовины, являясь в большинстве конструкций внутренней опорой игольчатого подшипника, испытывают высокие контактные напряжения, приводящие к дефектам, называемым бринеллированием (вдавливание иголок в тело шипов) [8-10].

Практика показывает, что с целью достижения высокого сопротивления контактным напряжениям, твердость в зонах воздействия иголок должна превышать 61 HRC, а глубина слоя с высокой твердостью должна быть не менее 1,5 мм. У основания шипа для предотвращения хрупкого разрушения, свойственного стали с высокой твердостью, последнее может быть снижено до уровня 51-63 HRC. Такой уровень обеспечивает повышение сопротивления статическим и динамическим нагрузкам и достаточен для предотвращения износа от уплотнений, работающих у основания шипов. Глубина высокопрочного слоя у основания крестовины должна составлять 1,5-3,5 мм. При этом, если в вершине шипа глубина высокопрочного слоя может равняться радиусу шипа (т.е. быть сквозной), то у основания шипа глубина слоя выше 3,5 мм не допустима, так как при этом уменьшается характерный для поверхностной закалки высокий уровень остаточных напряжений сжатия, обеспечивающий достаточное сопротивление циклическим нагрузкам. При сквозном высокопрочном состоянии металла у основания шипа усталостная прочность крестовины снижается [11,12].

**Основная часть.** В настоящее время крестовины (рис.1) изготавливаются из легированных цементуемых сталей типа 20ХГНТР, 20ХГТ, 15ХГН2ТА, которые подвергаются цементации на глубину 1,5-2 мм., закалке и отпуску.




Цементировать: глубина слоя 1,6…1,9 мм;
На шипах А 60 HRCmin;
На торцах Б 58 HRCmin.

Рис. 1. Крестовина, изготовленная из стали 20ХГНТР

Решая проблемы повышения надежности, неизбежно приходится сталкиваться с задачей выбора материала крестовины, позволяющим добиться при оптимальном выборе вида термообработки значительного повышения прочностных характеристик и показателей износостойкости детали с одновременным снижением затрат в производстве.

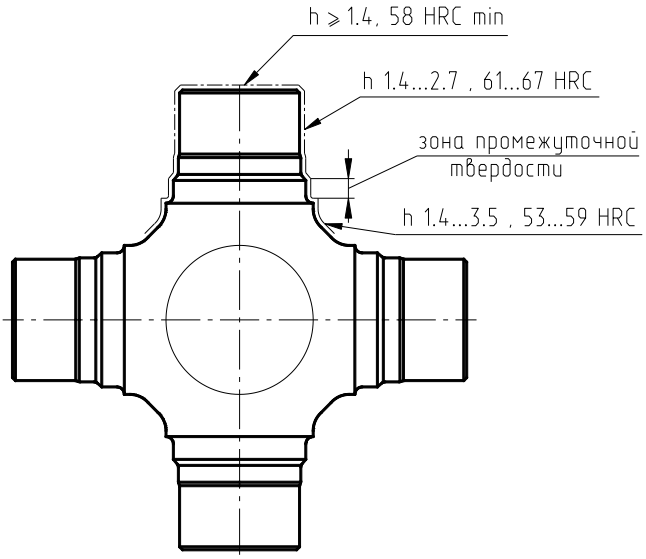
Примером такого подхода является разработанная в ОАО «Белкард» технология изготовления крестовин из стали пониженной прокаливаемости 60ПП (рис. 2), имеющей прокаливаемость более низкую, чем прокаливаемость стандартных конструкционных углеродистых сталей с равным содержанием углерода.

| C | Si | Mn | Cr | Cu | Ni | S | P |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | не более | | | | | |
| 0,57 – 0,65 | 0,10 – 0,30 | 0,20 | 0,15 | 0,30 | 0,30 | 0,040 | 0,035 |

Примечание. Суммарная массовая доля марганца, хрома, никеля и меди не должна превышать 0,50%; допускается массовая доля остаточного титана не более 0,10%.

Рис. 2. Химический состав стали 60ПП

Разработанная технология, заключается в том, что крестовины (рис. 3) изготавливают из стали пониженной прокаливаемости 60ПП, подвергают поверхностной индукционной закалке при глубинном нагреве, а затем производят прерывистый самоотпуск [9-10].




Поверхностная индукционная закалка всей крестовины при глубинном нагреве с прерывистым самоотпуском;
Твердость сердцевины 30…42 HRC.

Рис. 3. Крестовина, изготовленная из стали 60ПП

Сталь пониженной прокаливаемости применяется для объемно-поверхностной закалки (ОПЗ) деталей тонких сечений, требующих высокой поверхностной твердости, вязкой сердцевины и подвергаемых термической обработке с нагревом ТВЧ. Они имеют малую склонность к росту зерна аустенита при нагреве под закалку, что не только предопределяет их высокое

сопротивление хрупкому разрушению в закаленном состоянии, но также резко снижает вероятность появления закалочных трещин и упрощает требования к стабильности и точности работы устройств, дозирующих режим индукционного нагрева под закалку.

Для обеспечения высоких прочностных свойств упрочняемых изделий прокаливаемость должна быть согласована с размером их рабочего сечения, с тем, чтобы глубина закаленного слоя по полумартенситу составляла 15 – 20% от диаметра или толщины детали в наиболее нагруженной ее зоне.

Рассматриваемая технология ОПЗ была внедрена взамен технологии изготовления крестовин из легированных цементируемых сталей типа 20ХГНТР, при котором использовалась ступенчатая термообработка: предварительно механически обработанные крестовины подвергались цементации на глубину 1,5...2 мм, а затем закаливались в масле. Отпуск проводился при 200°С. Основным недостатком данного вида термической обработки применительно к крестовинам карданных передач, работающим на изгиб и кручение, является необходимость закалки на мартенсит на относительно большую глубину, достаточно высокие затраты и узкий диапазон применения крестовин по крутящему моменту.

По общим требованиям после окончательной обработки крестовины карданных шарниров должны иметь твердость поверхностного слоя на цилиндрической поверхности шипов (61...67) HRC, на торцах шипов (61...66) HRC. Эффективная глубина поверхностного слоя после окончательной обработки не должна быть менее 0,8 мм, 0,9 мм, 1,6 мм, 1,8 мм (в зависимости от типоразмера крестовины по крутящему моменту). При этом для получения высокой статической и усталостной прочности крестовин необходимо обеспечить наличие поверхностного высокопрочного закаленного слоя (глубина должна находиться в определенном соотношении с размерами упрочняемого сечения), упрочнение сердцевины, наличие остаточных сжимающих напряжений в поверхностных слоях деталей.

Указанные требования были оптимально достигнуты с применением стали 60ПП именно благодаря применению ОПЗ при глубинном индукционном нагреве Особенностями этого метода является то, что глубина нагрева до надкритических температур больше, чем требуемая толщина закаленного слоя (при этом упрочняемые элементы прогреваются насквозь), деталь прокаливается на меньшую глубину, чем толщина нагретого слоя и зона закалки на мартенсит определяется не глубиной нагрева, а прокаливаемостью стали. При этом участки детали, расположенные глубже мартенситной зоны, нагреваемые до надкритических температур, при охлаждении приобретают структуру троостита закалки и существенно упрочняются (рис.4). Необходимость нагрева детали на большую глубину, требует применения относительно низкой концентрации энергии в зоне нагрева: удельная мощность обычно составляет (0,05...0,2) кВт/см$^2$, скорость нагрева в области фазовых превращений находится в пределах (2...10) град/сек, а время нагрева деталей

(20...100) с. Это определяет относительно небольшие значения установленных мощностей индукционных установок, в среднем (0,1...0,2) кВт/см$^2$.

Термообработка ТВЧ крестовин проводится на полуавтоматических станках с поворотными столами. Поворотные столы имеют шпинделя, на которые устанавливаются крестовины.

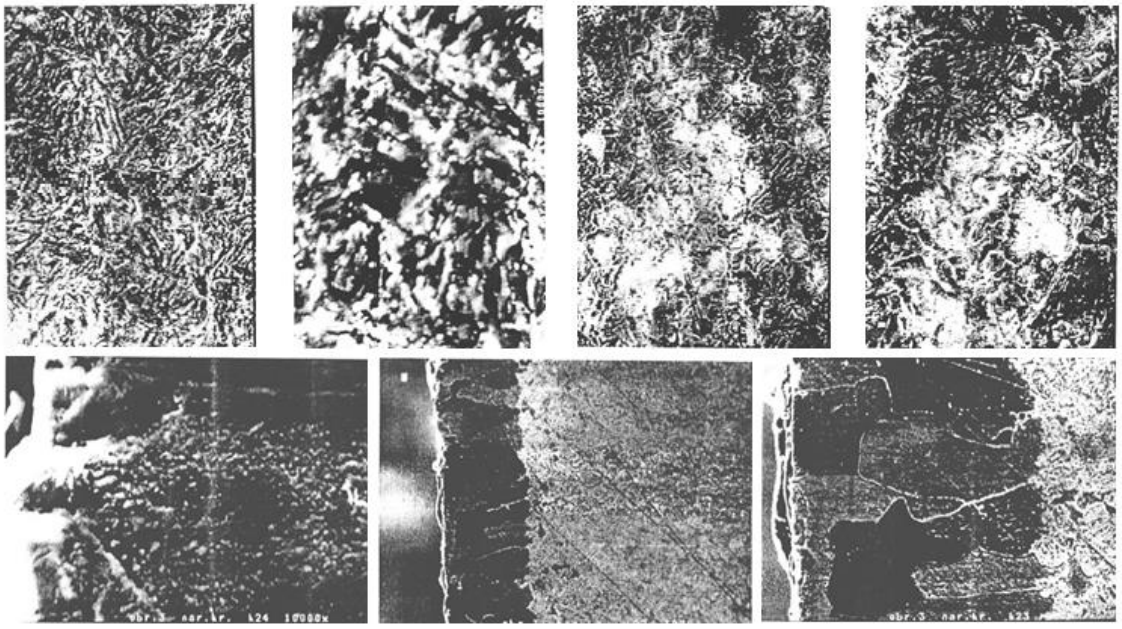


Рис. 4. Микроструктура крестовины из стали 60ПП после глубинного нагрева ТВЧ

Подача крестовин в индуктор, их нагрев и охлаждение осуществляется автоматически. Чтобы обеспечить равномерность нагрева деталей, предусмотрено их вращение в индукторе.

Равномерное охлаждение при закалке ТВЧ обеспечивается созданием избыточного давления порядка (0,8...1) кгс/см$^2$ в камере охлаждения крестовин. Это достигается механизмом для создания избыточного давления, установленного под основным спрейером. Такое повышение давления в полости спрейера устраняет разрыхление потока, повышает температуру кипения воды и уменьшает связанную с ним неравномерность охлаждения закаливаемой поверхности.

Специфическая особенность метода ОПЗ заключается в том, что наряду с уменьшением прокаливаемости создаются условия для сквозной объемной термической обработки рабочего сечения крестовины, что значительно повышает конструктивную прочность. Кроме того, метод позволяет получить высокий комплекс механических свойств крестовины, превышающий уровень, достигаемый при цементации.

Преимущества разработанной технологии заключаются в следующем:

- Прочность крестовин увеличивается на 15-20 %.
- Сталь 60ПП дешевле легируемых цементуемых марок стали.
- Установка для индукционной закалки в несколько раз дешевле печей для цементации той же производительности.

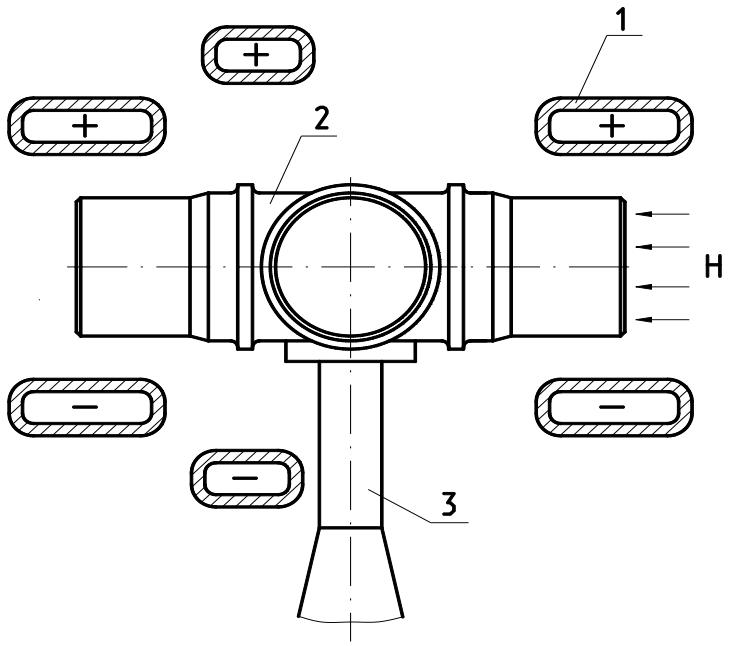
- Расходы, связанные с проведением термообработки, на газ, электроэнергию, жароупоры, амортизацию также меньше.
- Время термической обработки сокращается с 20 часов до 3 минут.

Кроме того, данный способ позволяет получить высокий комплекс механических свойств крестовин, превышающий уровень, достигаемый при цементации.

Индивидуальная обработка, характерная для индукционной закалки, дает возможность получить распределение свойств по длине шипов, в соответствии с действующими там нагрузками. Так, если при цементации твердость и глубина высокопрочного слоя постоянна по всей длине, то при индукционной закалке и прерывистом самоотпуске удается получить особо высокую твердость (до 67 HRC) и большую глубину высокопрочного слоя у вершины шипов, где действуют высокие контактные напряжения, и пониженную твердость 50-56 HRC при небольшой глубине этого слоя у основания шипа. Это обеспечивает высокое сопротивление максимальным на этом участке статическим, динамическим и циклическим нагрузкам, при сохранении достаточного уровня сопротивления износу [9-10].

Однако индивидуальная обработка при индукционной закалке требует разработки технологии упрочнения для каждого типоразмера крестовин с созданием индивидуального оборудования и оснастки.

В качестве индуктора применяется устройство с расположением витков, приведенном на рис. 5.




1 – витки индуктора; 2 – крестовина; 3 – опора

Рис. 5. Схема расположения крестовины в индукторе

Плюсом и минусом указано направление тока в витках 1. Крестовина 2 расположена на опоре 3. Нагрев в таком устройстве происходит с

одновременным вращением крестовины на опоре. При этом магнитные силовые линии Н пересекаются крестовиной в разных направлениях, что обеспечивает равномерный нагрев изделия такой сложной формы, как крестовина.

Результаты статистических испытаний крестовин на кручение, изготовленных из стали 60ПП и стали 20ХГНТР, приведены в табл. 1.

Табл.1. Результаты статических испытаний крестовин на кручение

| Материал крестовин | Крутящий момент без остаточной деформации и разрушения, Нм. | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 | 4 |
| 60ПП | 29000 | 30000 | 29500 | 31500 |
| 20ХГНТР | 25000 | 27500 | 22200 | 24000 |

Проведенные испытания крестовин, изготовленных по двум технологиям, показали, что крестовины из стали 60ПП при кручении почти на 20 % превосходят серийные из цементуемых марок стали по пределу прочности, а циклическая долговечность на всех уровнях нагружения у крестовин из стали 60ПП больше, чем у серийных из цементуемых марок стали в 5…10 раз.

## Выводы

Технология изготовления крестовин из стали 60ПП с нагревом ТВЧ обеспечивает более высокий комплекс свойств: большую твердость в местах работы иголок подшипника (большее сопротивление бринеллированию), повышенную статическую и циклическую прочность, чем при ее изготовлении из легированных марок сталей и цементации.

Изучено влияние режимов индукционного нагрева и низкотемпературного отпуска на прочность и другие свойства закаленной стали.

Разработана технология объемно-поверхностной закалки при глубинном индукционном нагреве, которая имеет определенные преимущества в получении более высокого комплекса прочностных свойств, возможности снижать степень легирования стали и применять высокочастотные генераторы относительно низкой мощности. Принципиальная особенность этой технологии заключается в рациональном сочетании положительных качеств технологии поверхностной закалки (слой высокой твердости и прочности заданной глубины, благоприятная эпюра остаточных напряжений) и технологических процессов обычной термической обработки, как например, улучшения или цементации.

### Список литературы

1. Кравченко, В. И. Карданные передачи: конструкции, материалы, применение / В. И. Кравченко, Г. А. Костюкович, В. А. Струк. – Минск: Тэхналогія, 2006. – 409 с.

2. Малаховский, Я. Э. Карданные передачи / Я. Э. Малаховский, А. А. Лапин, Н. К. Веденеев. – М., 1962. – 156 с.

3. Проектирование универсальных шарниров и ведущих валов / А. Х. Беркер [и др.]. Л.: Машиностроение, 1984, 463 с.

4. Карданные передачи ОАО «Белкард» и перспектива развития их конструкций / Г. А. Костюкович [и др.] // Труды НАМИ. – 2019. – Выпуск №3 (278). – С. 43-52.

5. Карданные передачи грузовых автомобилей. Проблемы и решения / С. Н Иванов [и др.]. // Автомобильная промышленность. 1992. № 11. С. 35-37.

6. Заславский, О. Я. Системный подход как метод исследования долговечности карданной передачи / О. Я. Заславский // Автомобильная промышленность. 1981. № 11. С. 21-24.

7. Методы создания конструкций карданных передач повышенного ресурса для неземных транспортных средств и сельскохозяйственной техники / Г. А. Костюкович [и др.] // Наука и техника. 2003. Т. 22, № 2. С. 119-126.

8. Иванов, С. Н. Карданные передачи ведущих валов трансмиссий машин и систем (конструкция, теория, расчет, испытания, эксплуатация, ремонт) / С. Н. Иванов, – Москва: НАМИ, 2014. – 232 с.

9. Fatigue resistance performance of universal cardan joint for automotive application / A. S. M/ Cardoso [et al.] // Engineering Failure Analysis. – 2022. – Vol. 135. – Article 106128.

10. Material study and weight optimization of universal joints through finite element analysis / A. Agarwal [et al.] // AIP Conference Proceedings. – 2024. – Vol. 3217. – Article 040008.

11. Шепеляковский, К. З. Самоотпуск при высокочастотной закалке / К. З. Шепеляковский. – М.: Машгиз. – 1955. – 108 с.

12. Костюкович, Г. А. Технология изготовления крестовин карданных валов из стали пониженной прокаливаемости 60ПП / Г. А. Костюкович // Веснік ГрДУ. – 2003. – №1. – С. 68-74.

Контакты:
ogt@belcard-grodno.by (Попрукайло Александр Витальевич);
gsktb@belcard-grodno.by (Костюкович Геннадий Александрович);
gsktb@belcard-grodno.by (Кипнис Марат Ефимович);
ovcin_1967@mail.ru (Овчинников Евгений Витальевич).

УДК 535.4:621.372.8:681.586.5

***И.У. ПРИМАК**, канд. физ.-мат. наук, доц.*
Белорусско-Российский университет (Могилев, Беларусь)

# ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ПРИЗМЕННЫХ ВОЛНОВОДНЫХ ДАТЧИКОВ АДСОРБЦИОННОГО ТИПА В УСЛОВИЯХ, БЛИЗКИХ К КРИТИЧЕСКИМ

**Аннотация**
Выполнен анализ чувствительности призменных волноводных датчиков адсорбционного типа вблизи критических условий. Получено решение задачи о максимизации чувствительности данных устройств за счет выбора параметров волноведущей структуры и возбуждающего пучка.

**Ключевые слова**: адсорбционный слой, призменный волноводный датчик, чувствительность датчика, волноводная мода, критические условия.

В работе исследуется чувствительность призменных волноводных датчиков, поддерживающих моды в условиях, близких к критическим, то есть при толщинах волноводов, близких к толщине отсечки моды, и углах падения возбуждающего пучка, близких к критическому углу. Интерес к этим устройствам обусловлен особенностями распределения поля и распространения моды в их волноведущей структуре. В них поле моды значительно глубже проникает в исследуемую среду и вследствие меньшего затухания имеет бóльшую длину распространения по сравнению с модами, далёкими от условия отсечки [1,2]. Это позволяет достигать высокой чувствительности к образованию адсорбционного слоя (адслоя) на поверхности волноведущей структуры, что особенно важно для соответствующих сенсоров и биосенсоров [3]. В [1] ранее анализировалась чувствительность призменных волноводных датчиков вблизи критических условий. Однако полученные там результаты в большей степени применимы к датчикам, регистрирующим изменение коэффициента поглощения (абсорбционным) или показателя преломления (рефрактометрическим) исследуемой среды. В то же время существует необходимость провести аналогичный анализ для адсорбционных датчиков, регистрирующих образование адслоя [3], что и является целью данной работы.

Рассматривается схема призменного датчика, представленная на рис. 1. Здесь призма, буферный слой, волновод и исследуемая среда имеют комплексные диэлектрические проницаемости соответственно

$$\varepsilon_p = \varepsilon'_p,\ \varepsilon_g = \varepsilon'_g + i\varepsilon''_g,\ \varepsilon_w = \varepsilon'_w + i\varepsilon''_w \text{ и } \varepsilon_c = \varepsilon'_c + i\varepsilon''_c.$$

Для реализации критических условий, с практической точки зрения, предполагается, что $\varepsilon'_g < \varepsilon'_c$. Этого можно достигнуть за счет использования металлического буферного слоя [1].

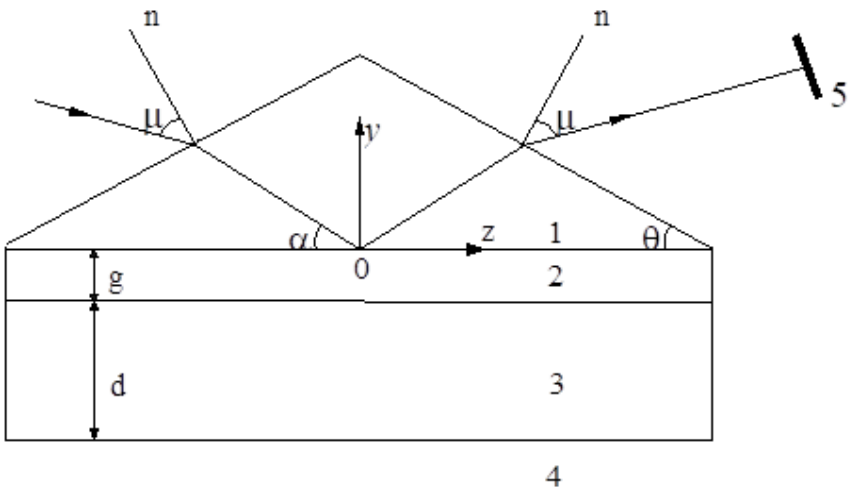



Рис. 1. Схема призменного волноводного датчика: 1−призма, 2−буферный слой, 3−диэлектрический волновод, 4−исследуемая среда, 5− фоторегистрирующее устройство

Полагаем, что волноводная мода возбуждается когерентным световым пучком. Пусть поле возбуждающего пучка на основании призмы распределено по закону $\psi = \psi_0(xw_0^{-1}, zw^{-1})\exp(-i\beta_0 z)$, где величина $\psi$ имеет смысл электрического поля $E_x$ для волн ТЕ- поляризации и магнитного поля $H_x$ для волн ТМ- поляризации, $w_0$ – радиус пучка в окружающей призму среде, $w = w_0 N$, $N$ – коэффициент учитывающий преломление пучка на боковой грани призмы, $\beta_0 = k_0\sqrt{\varepsilon_p}\cos\alpha$, $\alpha$ – угол между осью пучка и основанием призмы (рис.1), $k_0 = 2\pi/\lambda_0$ – волновое число вакуума. Энергетический коэффициент отражения пучка от призмы выражается через коэффициент отражения плоской волны $R(k_x,\beta)$ и фурье-образ поля падающего пучка $a(k_x,\beta)$ посредством соотношения

$$R^{(e)} = C_0\int_{-\infty}^{\infty}\int dk_x d\beta\left|Ra\right|^2\sqrt{k_0^2\varepsilon_p-\beta^2}\left(\int_{-\infty}^{\infty}\int dk_x d\beta\left|a\right|^2\sqrt{k_0^2\varepsilon_p-\beta^2}\right)^{-1}, \qquad (1)$$

где $C_0$ – коэффициент, учитывающий отражение пучка от боковых граней призмы,

$$a = \int_{-\infty}^{\infty}\int d\xi d\zeta\,\psi_0(\xi,\zeta)\exp\left[ik_x\xi w_0 + i(\beta-\beta_0)\zeta w\right],\ \xi = xw_0^{-1},\ \zeta = zw^{-1}.$$

Рассмотрим приближенное для коэффициента отражения $R$ выражение [1]

$$R = (1-\delta)(1+\delta)^{-1} - 4\delta\,\Delta\overline{v}_c[(1-\delta^2)(\vartheta-\overline{v}_c)]^{-1}, \qquad (2)$$

где

$$\delta = \frac{v_g}{v_p}\left(\frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_g}\right)^T,\ \Delta\bar{v}_c = \bar{v}_c - v_c = iv_g\left(\frac{1-\delta}{1+\delta}\right)\frac{\exp(-2iv_g g)\,A_0(-g+0)}{v_c\int\limits_{-\infty}^{\infty} A_0 dy}, \qquad (3)$$

$$\vartheta(k_x,\beta) = \sqrt{k_0^2\varepsilon_c - k_x^2 - \beta^2}\ \ (\vartheta' \geq 0),$$

$\bar{v}_c$ – поперечная постоянная распространения в исследуемой среде вытекающей моды волноведущей структуры нагруженной призмой, T=0 для волн ТЕ поляризации, T=1 для волн ТМ поляризации,

$$v_{p,g} = \sqrt{k_0^2(\varepsilon_{p,g} - \varepsilon_c) + v_c^2}\ \ (v_g < 0), \qquad A_0(y) = Y^2(y)\varepsilon^{-T},$$

$v_c$ и $Y(y)$ – собственное значение и собственная функция спектральной задачи

$$\varepsilon^T \frac{\partial}{\partial y}\left[\varepsilon^{-T}\frac{\partial}{\partial y}Y\right] + \left[k_0^2(\varepsilon - \varepsilon_c) + v_c^2\right]Y = 0. \qquad (4)$$

Здесь комплексная функция $\varepsilon = \varepsilon(y)$ описывает диэлектрическую проницаемость волноведущей структуры без призмы и принимает значения: $\varepsilon_g$ при $y > -g$, $\varepsilon_w$ при $-g-d < y < -g$ и $\varepsilon_c$ при $y < -g-d$.

Заметим, что, применяя метод возмущений к уравнению (4), можно получить важное для дальнейшего рассмотрения соотношение

$$v_c = v_{c0} - \left[k_0^2\int\limits_{-\infty}^{\infty}\left(\varepsilon_c'' A_1 - \varepsilon'' A_2\right)dy\right]\left(2\,\mathrm{i}\,v_{c0}\int\limits_{-\infty}^{\infty} A_1\,dy\right)^{-1}, \qquad (5)$$

где $A_1 = Y_0^2\varepsilon'$, $A_2 = \varepsilon'^{-1}\left(A_1[\varepsilon_c' - (v_{c0}k_0^{-1})^2] + (k_0^2\varepsilon')^{-1}[\nabla_y Y_0]^2\right)$, $v_{c0}$ и $Y_0(y)$ есть собственное значение и собственная функция задачи (3), взятой при $\varepsilon_g'' = 0$, $\varepsilon_w'' = 0$, $\varepsilon_c'' = 0$.

Чтобы применить полученные результаты к анализу чувствительности рассматриваемых датчиков учтем, что в этих устройствах регистрируется приращение коэффициента отражения $\Delta R^{(e)}$, обусловленное образованием на поверхности волновода 3 адслоя с толщиной $d_f$, которое определяет

$$\Delta R^{(e)} = R^{(e)}(d_f) - R^{(e)}(0). \qquad (6)$$

При этом, чувствительность $S$ определяется как производная

$$S = \partial R^{(e)} / \partial p, \qquad (7)$$

где $p$– параметр, характеризующий воздействие вызвавшее образование на поверхности волновода адслоя и изменение его толщины (например, это концентрация примеси в среде).

В общем случае с помощью выражений (1), (7), (2) и (5) можем получить выражение для чувствительности с точностью до величин порядка $(\Delta k_x/k_0)^4$ , $(\Delta\beta/k_0)^4$ с учетом проведенных ранее исследований :

$$S = C_0 K \left|\bar{L}\right| F \ , \qquad (8)$$

где

$$K = (\partial d_f / \partial \bar{p})\left[\left(v_c' - \vartheta_0'\right)\right]^{-1},$$

$$\bar{L} = -k_0^2\left(\varepsilon_f - \varepsilon_c\right) A_0\left(-d - g - 0\right)\left[(h^2/\varepsilon_f) - (v_c^2/\varepsilon_c)\right]^T \left[2v_c \int_{-\infty}^{\infty} A_0 dy\right]^{-1},$$

$$, \qquad F = \frac{4u_1(1+u_1)}{(1+u_2^2)^2}\left\{\bar{H}_1^2 G_0 - 2u_2(1+u_1)\right\},\ \bar{H}_1 = \frac{\beta_0}{wp_1\left|\vartheta_0\right|}, \qquad (9)$$

$$\vartheta_0 = \vartheta(0,\beta_0),\ u_1 = p_1^{-1}\,\mathrm{Re}[2\delta\Delta\bar{v}_c(1-\delta)^{-2}],\ u_2 = p_1^{-1}(\vartheta_0'' - \bar{v}_c''), \qquad (10)$$

$$G_0 = -P\left(1+u_2^2\right)^{-1}\mathrm{Im}\left\{4iu_1u_2\left[1+\left(\vartheta_0^*\left|\vartheta_0\right|^{-1}\right)^2\right] + \left(\vartheta_0^*\left|\vartheta_0\right|^{-1}\right)^2 \times \right.$$

$$\left. \times\left(1+u_2^2\right)^{-1}\left[\left(3u_2^4 + 3 - 18u_2^2 + 4u_1 - 20u_1u_2^2\right) + 12iu_2(1+u_1)\left(1-u_2^2\right)\right]\right\},$$

$$P = \int_{-\infty}^{\infty}\int\left|\frac{\partial\psi_0}{\partial\zeta}\right|^2 d\xi d\zeta \left(\int_{-\infty}^{\infty}\int\left|\psi_0\right|^2 d\xi d\zeta\right)^{-1}.$$

Рассмотрим задачу поиска максимумов функции $\left|S\left(w,\alpha,g,d\right)\right|$ при заданных диэлектрических проницаемостях $\varepsilon_p$, $\varepsilon_g$, $\varepsilon_w$ и $\varepsilon_c$. Максимизация чувствительности датчика в этом случае сводится к поиску максимумов функции $\left|F\left(\bar{H}_1,u_1,u_2\right)\right|$, которые достигаются при следующих оптимальных значениях

$$\bar{H}_{1opt} = 0,\ u_{1opt} = -1/3,\ u_{2opt}^{(l)} = l/\sqrt{3},\ F_{opt} = \pm 2/3\sqrt{1/3},\ l = \mathrm{sign}(F_{opt}). \qquad (11)$$

Из (11) следует, что величина $\vartheta_0''$ принимает два значения: $\vartheta_0'' = \vartheta_{0opt}''^{(-1)}$, и $\vartheta_0'' = \vartheta_{0opt}''^{(1)}$ , где

$$\vartheta_{0opt}''^{(l)} = v_c'' + \frac{v_c'}{1+u_{1opt}}\left(u_{2opt}^{(l)} + u_{1opt}q\right),\ q = \mathrm{Im}\left[0.5\delta^{-1}(1+\delta^2)\right]. \qquad (12)$$

Это означает существование двух оптимальных значений для угла падения $\alpha$

или двух оптимальных значений параметра $\beta_0 = \beta_{0opt}^{(l)}\ (l = \pm 1)$. Однако определение оптимальных значений угла предполагает задание толщины $d$ так как $v_c' = v_c'(d)$, $v_c'' = v_c''(d)$. Поэтому предварительно при решении уравнения

$$\partial\left(K\left|\bar{L}\right|\right)\Big/\partial d = 0 \tag{13}$$

находятся оптимальные значения толщины волновода $d = d_{opt}^{(l)}\ (l = \pm 1)$.

После определения значений $d_{opt}^{(l)}$ и $\vartheta_{0opt}''^{(l)}$, оптимальное значение толщины буферного слоя $g_{opt}^{(l)}$ находится с помощью выражения, получаемого из (3), (10) и (11):

$$g_{opt}^{(l)} = 0.5\left|v_g\right|^{-1} \ln\left|\frac{0.5(1-\delta^2)v_c u_{1opt}^{(l)}\left(v_c' - 0.5k_0^2\varepsilon_c''(\vartheta_{0opt}''^{(l)})^{-1}\right)\int\limits_{-\infty}^{\infty} A_0 dy}{v_g\delta(1+u_{1opt}^{(l)})A_0(-g+0)}\right|. \tag{14}$$

В работе выполнены расчеты зависимости чувствительности конкретного датчика от толщины волновода. Результаты этих расчетов для $\varepsilon_f = 2.03$ (усредненное для ряда протеинов значение), $\varepsilon_c = 1.774224 - i3.73\cdot 10^{-8}$, $\varepsilon_w = 2.295225 - \mathrm{i}3.03\cdot 10^{-5}$, $\varepsilon_g = -18 - i0.47004$ и $\varepsilon_p = 3.055154$, $m$=1 (здесь $m$–номер моды), $T = 0$ представлены на рисунке 2*а,б*.

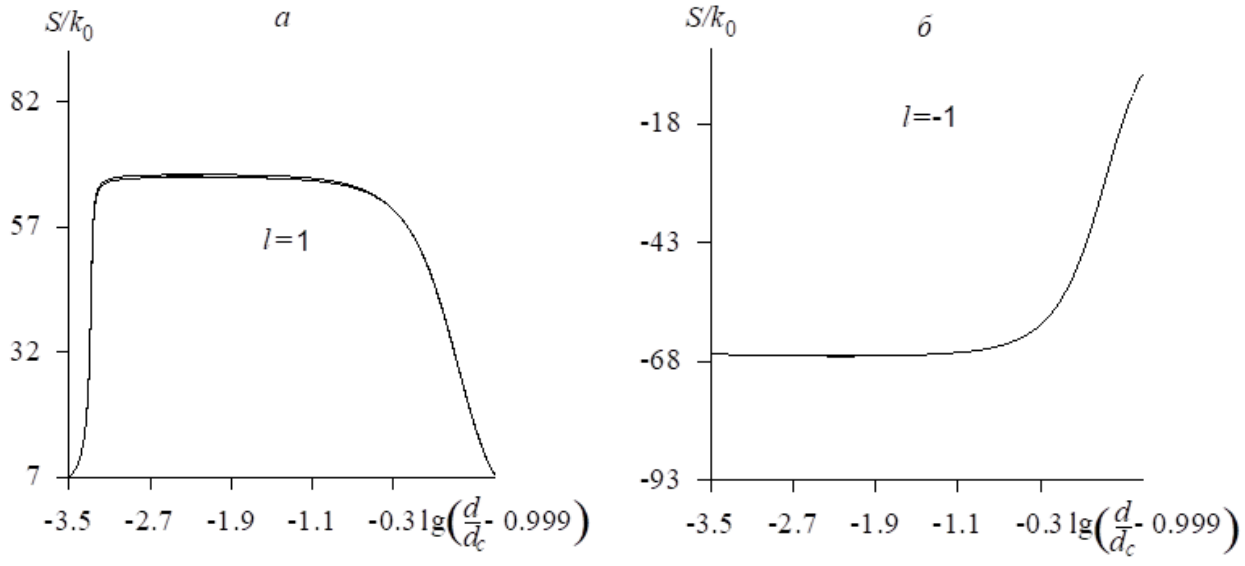



Рис. 2. Зависимости чувствительности датчика от толщины волновода

Из представленных результатов следует, что максимальные значения $\left|S/k_0\right| = 58.3$ $(l = 1)$ и $\left|S/k_0\right| = 67.34$ $(l = -1)$ достигаются соответственно при

$d_{opt}^{(1)} = d_{opt}^{(-1)} = 6.34k_0^{-1}$ (толщина отсечки моды $d_c = 6.308k_0^{-1}$), $g_{opt}^{(1)} = 0.564k_0^{-1}$, $g_{opt}^{(1)} = 0.562k_0^{-1}$, $\beta_{0opt}^{(1)} = 1.33214k_0$, $\beta_{0opt}^{(-1)} = 1.332106k_0$.

Выбор оптимальной поляризации возбуждающего пучка связан с максимизацией произведения величин $K$ и $\left|\bar{L}\right|$. Для этого рассмотрим отношение $(K\left|\bar{L}\right|)\Big|_{T=0}[(K\left|\bar{L}\right|)\Big|_{T=1}]^{-1}$, из анализа которого следует, что при $d \to d_c$ и выполнении условия

$$\left|\int_{-d-g}^{-g}\left(\varepsilon_c'' A_1 - \varepsilon_w'' A_2\right)dy\right| << \left|\varepsilon_g'' \int_{-g}^{\infty} A_2 dy\right|$$

имеет место соотношение $(K\left|\bar{L}\right|)\Big|_{T=0}[(K\left|\bar{L}\right|)\Big|_{T=1}]^{-1} \approx K\big|_{T=0}[K\big|_{T=1}]^{-1}$, где отношение $K\big|_{T=0}[K\big|_{T=1}]^{-1}$ определяется выражением

$$K\big|_{T=0}\left(K\big|_{T=1}\right)^{-1} = \varepsilon_c'(2\varepsilon_c' - \varepsilon_g')\ (\varepsilon_c'(\varepsilon_w' + \varepsilon_g') - \varepsilon_g'\varepsilon_w')^{-1}.$$

Отсюда следует, что предпочтительнее использование пучка ТЕ поляризации лишь в случаях выполнения условия $\varepsilon_c' > 0.5\varepsilon_w'$

Теперь оценим влияние ограниченности пучка на чувствительность. Зависимость чувствительности от размеров пучка описывается функцией $F = F(\bar{H}_1)$, где $\bar{H}_1 = \bar{H}_1(w)$. Согласно (11) максимум $\left|F(\bar{H}_1)\right|$ достигается в случае $\bar{H}_1 = 0$, т.е. в пределе при $w \to \infty$.

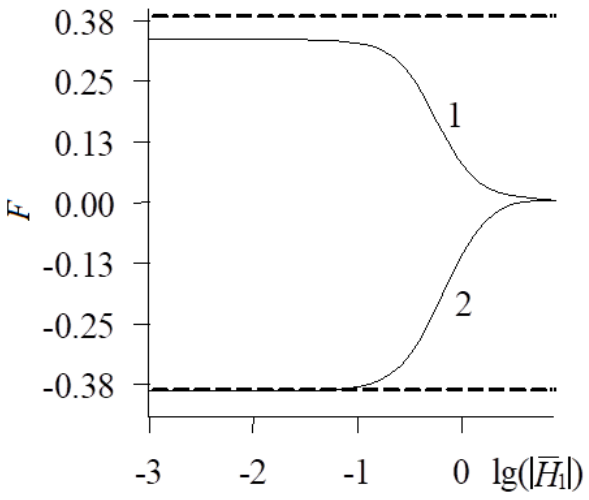



Рис. 3. Зависимость нормированной чувствительности датчика от параметра $\bar{H}_1$. Здесь кривая 1 соответствуют *l*=1, кривая 2–*l*=-1, штрих-пунктир соответствует предельным значениям параметра чувствительности при $\bar{H}_1 \to 0$

Данный факт подтвержден расчетами функции $F(\bar{H}_1)$ на примере конкретного датчика, параметры которого удовлетворяют выражениям (11) −

(14). Для гауссова пучка, приведенных ранее значений $\varepsilon_p$, $\varepsilon_g$, $\varepsilon_w$, $\varepsilon_c$, $\varepsilon_f$, $m$, $T$, и найденных значениях $d_{opt}^{(l)}$, $g_{opt}^{(l)}$, $\beta_{0opt}^{(l)}$ $(l=\pm 1)$ вычислялись значения нормированной чувствительности $F = S\left(C_0 K\left|\bar{L}\right|\right)^{-1}$, представленные на рис.3. Как видно из рис.3, при $\bar{H}_1 \to 0$ ($w \to \infty$) величины $F(\bar{H}_1)$ стремятся к постоянным значениям близким к $F(0)$, которым соответствуют два предельных значения $\lim\limits_{w\to\infty} S/k_0 = -58.3$ и $\lim\limits_{w\to\infty} S/k_0 = 67.34$. В то же время с ростом $\bar{H}_1$ (с уменьшением $w$) наблюдается отклонение чувствительности от предельных значений. Например, при $w = 10^4 k_0^{-1}$ она принимает соответственно значения $S/k_0 = -3.53$ и $S/k_0 = 1.72$, что ниже максимальной чувствительности датчика на основе поверхностного плазмонного резонанса при таких же значениях параметров $w$, $\varepsilon_p$, $\varepsilon_g$, $\varepsilon_c$, $\varepsilon_f$. В этом случае для увеличения чувствительности необходимо использовать более широкие пучки, либо рассмотреть задачу максимизации чувствительности при фиксированном значении параметра $w$, которая допускает численное решение. Так при $w = 10^4 k_0^{-1}$ и $d = 7.149 k_0^{-1}$ чувствительность рассматриваемого датчика в $2.4$ раза выше максимальной чувствительности датчика на основе поверхностного плазмонного резонанса.

Таким образом, получено аналитическое описание чувствительности призменных волноводных датчиков адсорбционного типа и решена задача её максимизации за счёт оптимального выбора параметров волноведущей структуры и возбуждающего пучка. Показано, что максимальная чувствительность достигается при возбуждении мод в условиях, близких к критическим. Продемонстрировано, что чувствительность датчиков существенно зависит от размера пучка $w$ и принимает максимальное значение при $w \to \infty$.

**Список литературы**

1. Примак, И. У. Чувствительность интегрально-оптических датчиков призменного типа вблизи критических условий / И. У. Примак // Журнал технической физики. – 2004. – Т. 74, № 10. – С. 75–79.

2. Long-range surface plasmons in asymmetric layered metal-dielectric structures / N. M. Lyndin, I. F. Salakhutdinov, V. A. Sychugov, B. A. Usievich, F. A. Pudonin, O. Parriaux // Sensors and Actuators B. – 1999. – Vol. 54. – P. 37–42.

3. Design and Development of Long Range Surface Plasmon Resonance Sensor Chip and System for High Sensitivity Detection / L. L. Zhang [et al.] // Advances in Biological Sciences Research : 2nd International Conference on Biomedical and Biological Engineering (BBE 2017). – 2017. – Vol. 4. – P. 270–275.

Контакты:
primak_igor@mail.ru (Примак Игорь Ульянович)

УДК 539.314:535.5

***И. У. ПРИМАК**, канд. физ.-мат. наук, доц.*
***А. В. ХОМЧЕНКО**, д-р физ.-мат. наук, доц.*
Белорусско-Российский университет (Могилев, Беларусь)

# ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТЕЙ И ОГРАНИЧЕНИЙ ПОЛЯРИЗАЦИОННО-ОПТИЧЕСКОГО МЕТОДА ПРИ НАКЛОННОМ ПРОСВЕЧИВАНИИ ЗАКАЛЁННОГО СТЕКЛА

**Аннотация.** Выполнено моделирование наклонного отражения и пропускания света закалённым стеклом с использованием матричного метода Берремана. На основе метода наименьших квадратов предложена процедура раздельного восстановления однородных напряжений. Получены оценки погрешностей их восстановления на основе обработки угловых распределений интенсивности отраженного и прошедшего света.

**Ключевые слова:** закалённое стекло, наклонное просвечивание, поляризационно-оптический метод, мембранные напряжения, матрица Берремана, параметр изоклины.

## Введение

Одной из важных задач при производстве и эксплуатации стекла являются анализ и контроль остаточных механических напряжений. Наиболее широко используемые для такого контроля методы строятся на поляризационно-оптических измерениях [1, 2]. При этом предложенный в [1] анализ регистрируемого распределения коэффициента пропускания нормально падающего света на закаленное стекло позволил существенно упростить достаточно сложную обработку интерференционной картины, основанную на подсчете порядков максимумов в ней. Однако этот подход имеет естественное ограничение. С его помощью можно определить лишь разность напряжений. А она не всегда позволяет оценивать качество закалки стекла. Полное представление о прочности стекла дает именно раздельная диагностика напряжений. В соответствии с [2] раздельная диагностика возможна при наклонном просвечивании. Поэтому данная работа посвящена оценке возможностей раздельного восстановления напряжений на основе регистрации коэффициентов пропускания (отражения) при наклонном просвечивании закаленного стекла.

## Оценка возможностей раздельного восстановления напряжений

Рассмотрим измерительную схему, представленную на рис. 1. Здесь поляризованный свет падает на закаленное стекло под углом $\theta$. Отражённый и прошедший свет регистрируются фотоприёмниками 9 и 7, их поляризация — анализаторами 8 и 6. В соответствии с [3] интенсивности отражённого и прошедшего света определим как:

$$I_R = I_0 \left|\cos A\left(R_{pp}\cos P + R_{ps}\sin P\right) + \sin A\left(R_{ss}\sin P + R_{sp}\cos P\right)\right|^2 \qquad (1)$$

$$I_T = I_0 \left|\cos A\left(T_{pp}\cos P + T_{ps}\sin P\right) + \sin A\left(T_{ss}\sin P + T_{sp}\cos P\right)\right|^2, \qquad (2)$$

где $R_{ss}$, $R_{sp}$, $R_{ps}$, $R_{pp}$ − элементы матрицы коэффициентов отражения, $T_{ss}$, $T_{sp}$, $T_{ps}$, $T_{pp}$ − элементы матрицы коэффициентов пропускания, $I_0$ − интенсивность света регистрируемого фотоприемником 4, $A$ и $P$ − углы анализатора 6,7 и поляризатора 2 (рис. 1).

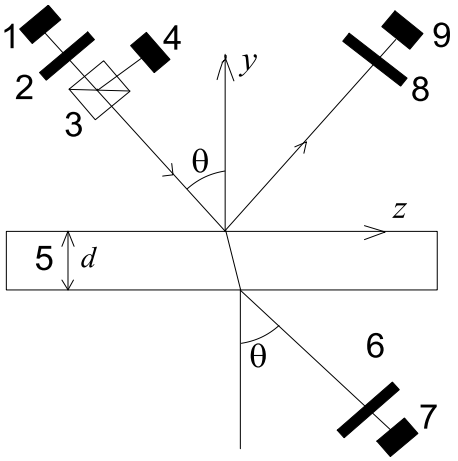



Рис. 1. Измерительная схема отражения и пропускания света закаленным стеклом:
1 − источник света; 2 − поляризатор; 3− светоделительный куб; 4, 7, 9 − фоторегистрирующие устройства; 5 − закаленное стекло; 6, 8 − анализаторы

Сформулируем процедуру расчета коэффициентов отражения и пропускания и, как в [1, 3], проанализируем их распределения в зависимости от $\alpha$ - угла поворота стекла вокруг оси $y$. Для этого воспользуемся матричным методом Берремана. В его рамках система дифференциальных уравнений с граничными условиями, описывающих тангенциальные компоненты $E_x$, $E_z$ и $H_x$, $H_z$ векторов напряженности электрического и магнитного полей в анизотропном стекле 5 (см. рис. 1) имеет следующий вид:

$$\frac{\partial\psi}{\partial y} = A\psi, \left(-d < y < 0\right), \quad \psi(+0) = \psi(-0),\ \psi(-d+0) = \psi(-d-0), \qquad (3)$$

где

$$\psi = \begin{pmatrix} E_x \\ H_z \\ H_x \\ E_z \end{pmatrix}, \quad A = \begin{pmatrix} 0 & ik_0 & 0 & 0 \\ ik_0\left(\varepsilon_{xx} - \beta^2\right) & 0 & -ik_0\beta\dfrac{\varepsilon_{xy}}{\varepsilon_{yy}} & ik_0\left(\varepsilon_{xz} - \dfrac{\varepsilon_{xy}\varepsilon_{yz}}{\varepsilon_{yy}}\right) \\ ik_0\left(\dfrac{\varepsilon_{xy}\varepsilon_{yz}}{\varepsilon_{yy}} - \varepsilon_{xz}\right) & 0 & ik_0\beta\dfrac{\varepsilon_{zy}}{\varepsilon_{yy}} & ik_0\left(\dfrac{\varepsilon_{zy}\varepsilon_{yz}}{\varepsilon_{yy}} - \varepsilon_{zz}\right) \\ ik_0\beta\dfrac{\varepsilon_{xy}}{\varepsilon_{yy}} & 0 & ik_0\left(\dfrac{\beta^2}{\varepsilon_{yy}} - 1\right) & ik_0\beta\dfrac{\varepsilon_{zy}}{\varepsilon_{yy}} \end{pmatrix}. \quad (4)$$

Здесь $k_0 = 2\pi / \lambda_0, \lambda_0$ — длина волны в вакууме, $d$ — толщина стекла 5, $\varepsilon_{ij}\ (i = x, y, z;\ j = x, y, z)$ — компоненты тензора диэлектрической проницаемости стекла, $\beta = \sin\theta$.

В случае закалённого стекла компоненты тензора диэлектрической проницаемости согласно [2] вычисляются по формулам:

$$\varepsilon_{xx} = \varepsilon_{yy} + C'_{11}(\sigma_1 \sin^2\varphi' + \sigma_2 \cos^2\varphi'),\ \varepsilon_{yy} = \varepsilon_{glass} + C_{12}(\sigma_1 + \sigma_2),$$

$$\varepsilon_{zz} = \varepsilon_{yy} + C'_{11}(\sigma_1 \cos^2\varphi' + \sigma_2 \sin^2\varphi'),\ \varepsilon_{zx} = \varepsilon_{xz} = C_{44}(\sigma_1 - \sigma_2)\sin\varphi'\cos\varphi', \quad (5)$$

$$\varphi' = \varphi + \alpha,\ \varepsilon_{zy} = \varepsilon_{yz} = \varepsilon_{xy} = \varepsilon_{yx} = 0,$$

где $\sigma_1$ и $\sigma_2$ — главные напряжения (характеризуются взаимно перпендикулярными направлениями), $\varphi$ — параметр изоклины [2], $\varepsilon_{glass}$ — диэлектрическая проницаемость стекла в ненапряженном состоянии, $C_{11}$, $C_{12}$ и $C_{44}$ — фотоупругие постоянные, $C'_{11} = C_{11} - C_{12}$.

В литературе [2], [4], [5] относительно главных напряжений $\sigma_1$ и $\sigma_2$ рассматриваются несколько моделей, описывающих распределение их по толщине пластины. Но всех их объединяет следующая функция [5]

$$\sigma_{1,2}(y) = \sigma_{m1,2} + \sigma_{1,2}(-d/2)\left(1 - 12\left(0{,}5 + \frac{y}{d}\right)^2\right), \quad (6)$$

где $\sigma_{m1,2}$ — так называемые мембранные напряжения, однородные по толщине, $\sigma_{1,2}(-d/2)$ — центральные растягивающие напряжения. В частности, положив центральные напряжения в (6) равными нулю получим ситуацию однородных напряжений [2]. В случае равенства нулю мембранных напряжений имеем классический параболический профиль напряжений [4].

Таким образом, в общем случае имеем анизотропную неоднородную по толщине среду. В соответствии с методом Берремана она может моделироваться множеством плоскопараллельных слоев (их число пусть будет

*N*), каждый из которых можно считать однородным. Тогда решение задачи (3), описывающее электромагнитное поле на верхней границе *n*-го слоя выражается через поле на верхней границе n -1-го слоя следующим образом

$$\psi_n = \bar{A}_n \psi_{n-1}, \quad \bar{A}_n = e^{ik_0 A_n d_n}, n = \overline{1,N}, \quad \psi_0 = \left(1, \cos\theta, 1, -\cos\theta\right)^T, \sum_{n=1}^{N} d_n = d, \quad (7)$$

где $d_n$ – толщина *n*-го слоя. Здесь переходная матрица $\bar{A}_n$ полностью описывает прохождение света сквозь *n*-й однородный слой. Вычисляется она так:

$$\bar{A}_n = \sum_{k=1}^{4} e^{\lambda_k d} A_k^n, \quad A_k^n = \prod_{s=1}^{4} \frac{1}{\lambda_{nk} - \lambda_{ns}} \left(A_n - \lambda_{ns} E\right), \quad k \neq s, \qquad (8)$$

где $\lambda_{nk}$ ($k = \overline{1,4}$) — собственные значения матрицы $A_n$ ($A_n$-матрица $A$ для *n*-го слоя), $E$ — единичная матрица.

Выражения для собственных значений в слое $n$ можно записать в аналитическом виде:

$$\begin{gathered}
\lambda_{n1,2} = \pm ik_0 \sqrt{|L_1|}, \quad L_1 = \frac{1}{2}\left\{-\left(k_{yx} + k_{yz}\right) - \sqrt{\left(k_{yx} - k_{yz}\right)^2 + 4k_{yz}\varepsilon_{xz}^2 \varepsilon_{zz}^{-1}}\right\}, \\
\lambda_{n3,4} = \pm ik_0 \sqrt{|L_2|}, \quad L_2 = \frac{1}{2}\left\{-\left(k_{yx} + k_{yz}\right) + \sqrt{\left(k_{yx} - k_{yz}\right)^2 + 4k_{yz}\varepsilon_{xz}^2 \varepsilon_{zz}^{-1}}\right\}, \\
k_{yx} = \varepsilon_{xx} - \beta^2, \quad k_{yz} = \varepsilon_{zz}\varepsilon_{yy}^{-1}\left(\varepsilon_{yy} - \beta^2\right).
\end{gathered} \qquad (9)$$

Здесь компоненты тензора диэлектрической проницаемости $\varepsilon_{ij}$ $(i = x, y, z;\ j = x, y, z)$ для каждого слоя вычисляются согласно формул (5),(6).

Учитывая, что $\psi_N = \bar{A}\psi_0$ ($\bar{A} = \prod_{n=1}^{N} \bar{A}_n$) и используя элементы матрицы $\bar{A} = \left(\bar{a}_{ij}\right)$ $\left(i, j = \overline{1,4}\right)$, можно определить коэффициенты матриц отражения и пропускания неоднородного стекла по следующим формулам:

$$T_{ss} = \frac{F_{22}^-}{\Delta}, \quad T_{sp} = \frac{F_{12}^+}{\Delta}, \quad T_{ps} = \frac{F_{21}^-}{\Delta}, \quad T_{pp} = \frac{F_{11}^+}{\Delta}, \qquad (10)$$

$$R_{ss} = F_{11}^- T_{ss} + F_{12}^- T_{ps}, \quad R_{sp} = -(F_{11}^- T_{sp} + F_{12}^- T_{pp}), \qquad (11)$$

$$R_{ps} = -(F_{21}^+ T_{ss} + F_{22}^+ T_{ps}), \quad R_{pp} = F_{21}^+ T_{sp} + F_{22}^+ T_{pp}, \quad \Delta = F_{11}^+ F_{22}^- - F_{21}^- F_{12}^+, \qquad (12)$$

$$F_{11}^{\pm} = 0,5\left[\bar{a}_{11} + \cos\theta\bar{a}_{12} \pm \left(\frac{\bar{a}_{21}}{\cos\theta} + \bar{a}_{22}\right)\right],\ F_{12}^{\pm} = 0,5\left[\bar{a}_{13} - \cos\theta\,\bar{a}_{14} \pm \left(\frac{\bar{a}_{23}}{\cos\theta} - \bar{a}_{24}\right)\right],$$

$$F_{21}^{\pm} = 0,5\left[\bar{a}_{31} + \cos\theta\bar{a}_{32} \pm \left(\frac{\bar{a}_{41}}{\cos\theta} + \bar{a}_{42}\right)\right],\ F_{22}^{\pm} = 0,5\left[\bar{a}_{33} - \cos\theta\,\bar{a}_{34} \pm \left(\frac{\bar{a}_{43}}{\cos\theta} - \bar{a}_{44}\right)\right].$$

Таким образом, на основе выражений (1), (2), (4) - (12) можно построить процедуру расчета коэффициентов отражения и пропускания, интенсивностей отраженного и прошедшего света.

**Результаты и их анализ**

Используя предложенный подход, мы провели моделирование просвечивания закаленного стекла при различных углах поворота стекла $\alpha$ ( $0^0 \le \alpha < 360^0$), результаты которого представлены на рис. 2, 3.

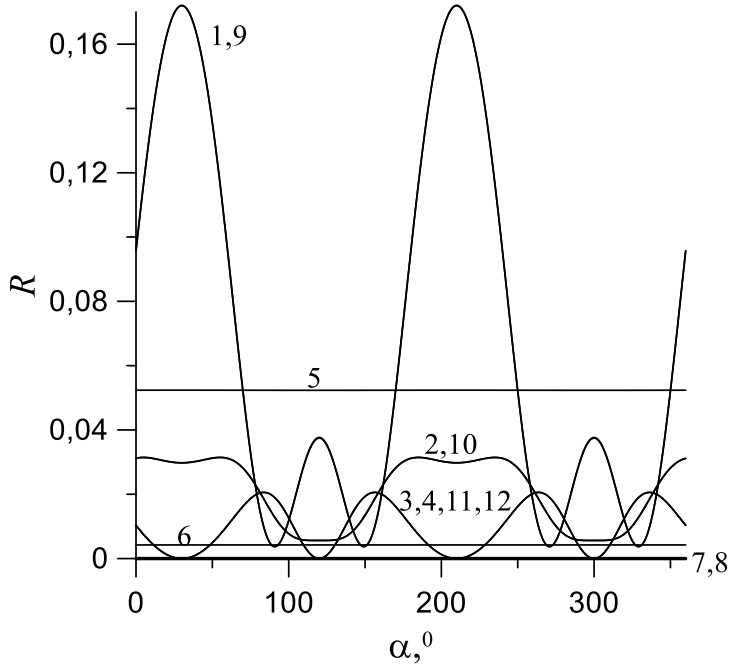



Рис.2. Зависимости коэффициентов отражения $R_{ss}$ (кривые 1,5,9), $R_{pp}$ (кривые 2,6,10), $R_{sp}$, (кривые 3,7,11), $R_{ps}$ (кривые 4, 8, 12) от угла $\alpha$

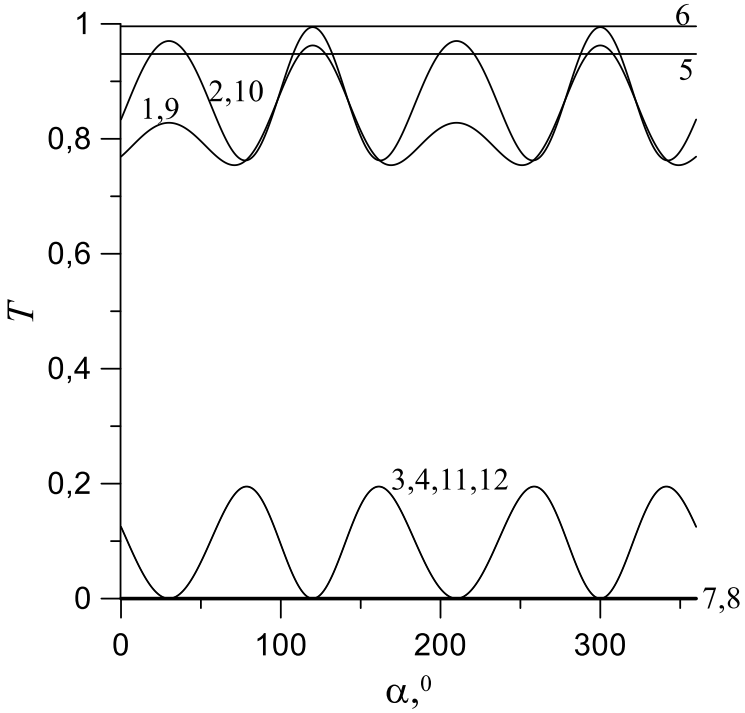



Рис.3. Зависимости коэффициентов пропускания $T_{ss}$ (кривые 1, 5, 9), $T_{pp}$ (кривые 2, 6, 10), $T_{sp}$ (кривые 3, 7, 11), $T_{ps}$ (кривые 4, 8, 12) от угла $\alpha$

В расчетах использовались следующие значения параметров стекла и падающего на него света:

$$\varepsilon_{glass} = 2.25,\ d\text{=5000 мкм},\ \varphi = 60^0,$$

$$C_{11} = -5\cdot 10^{-7}\ \text{МПа}^{-1},\ C_{12} = -3.3\cdot 10^{-6}\ \text{МПа}^{-1},\ C_{44} = 1.4\cdot 10^{-6}\ \text{МПа}^{-1}. \quad (13)$$

$$\lambda_0 = 0.6328\ \text{мкм},\ \theta = 45^0.$$

При этом рассматривались три варианта анизотропии стекла со следующими значениями параметров модели напряжений (6):

$$\sigma_{m1} = 100\ \text{МПа},\ \sigma_1(-d/2) = 0\ \text{МПа},\ \sigma_{m2} = 80\ \text{МПа},\ \sigma_2(-d/2) = 0\ \text{МПа}, \quad (14)$$

$$\sigma_{m1} = 0\ \text{МПа},\ \sigma_1(-d/2) = 100\ \text{МПа},\ \sigma_{m2} = 0\ \text{МПа},\ \sigma_2(-d/2) = 80\ \text{МПа}, \quad (15)$$

$$\sigma_{m1} = 100\ \text{МПа},\ \sigma_1(-d/2) = 100\ \text{МПа},\ \sigma_{m2} = 80\ \text{МПа},\ \sigma_2(-d/2) = 80\ \text{МПа}. \quad (16)$$

Значения параметров напряжений в (14) описывают ситуацию однородных по толщине стекла напряжений, соответствующие ей результаты расчетов коэффициентов отражения и пропускания света представлены на рисунках 2 и 3 кривыми 1, 2, 3, 4. Результаты расчетов для параболической модели напряжений (6), (15) демонстрируются кривыми 5, 6, 7, 8. Кривые 9, 10, 11, 12 соответствуют случаю профилю обобщающего оба типа напряжений (6), (16).

Анализируя полученные результаты расчетов можно сделать следующие выводы. В случае параболического профиля напряжений (6), (15) коэффициенты отражения и пропускания не зависят от угла поворота стекла $\alpha$. В то же время результаты расчетов для однородного стекла с напряжениями (14) совпадают с результатами расчетов неоднородного стекла с напряжениями (16). Это объясняется интерференцией обыкновенной и необыкновенной волн,

возникающих в анизотропном стекле. Как известно, результат интерференции волн определяется разностью фаз между ними, которая для рассматриваемой модели напряжений (6) пропорциональна интегралу $\int_{-d}^{0}(\sigma_2-\sigma_1)dy=(\sigma_{m2}-\sigma_{m1})d$, где $\sigma_{m1,2}$ мембранные однородные по толщине напряжения. Поэтому разность фаз между обыкновенной и необыкновенной волнами определяется только разностью мембранных (однородных) напряжений и в случае параболического профиля напряжений типа (15) она равна нулю при любых значениях угла $\alpha$ [4].

Все это означает, что просвечивание светом стекла не позволяет обнаруживать напряжения параболического типа (6), (15). Возможна регистрация только однородных напряжений. Поэтому в дальнейшем остановимся на рассмотрении однородных по толщине напряжений. Оценим возможности раздельного восстановления напряжений $\sigma_{m1,2}$ и параметра изоклины $\varphi$ на основе обработки угловых распределений интенсивностей $I_R(\alpha)$ или $I_T(\alpha)$. Процедуру такой обработки будем строить на основе метода наименьших квадратов, рассматривая минимизацию следующего функционала

$$F(\sigma_{m1},\sigma_{m2},\varphi)=\sum_{j=1}^{N_\alpha}\left(I_j-I(\alpha_j,\sigma_{m1},\sigma_{m2},\varphi)\right)^2, \qquad (17)$$

$\alpha_j$ — угол поворота подложки вокруг оси $y$; $N_\alpha$ – число угловых отсчётов, $I_j$ — регистрируемые значения интенсивности отраженного или прошедшего стекло света, полученные для угла $\alpha_j$, $I(\alpha_j,\sigma_{m1},\sigma_{m2},\varphi)$ — теоретическое значение интенсивности отраженного или прошедшего стекло света, рассчитанное с использованием выражений (1), (2), (4) - (12) для задаваемых значений напряжений и параметра изоклины для угла $\alpha_j$.

Выполнено численное моделирование регистрации отраженного и прошедшего стекло света (при значениях параметров стекла и света (13), напряжениях (14)) с учетом погрешностей регистрации ($\sigma_I / I_0 = 3\cdot10^{-3}$, $\sigma_I$ – среднеквадратическое отклонение регистрируемой интенсивности) при $N_\alpha = 3$, ($\alpha$: $0^0$, $45^0$, $90^0$). Минимизация получаемого в этом случае функционала (17) продемонстрировала возможность восстановить напряжения и параметр изоклины со следующими относительными погрешностями:

$$\left|\Delta\sigma_{m1}/\sigma_{m1}\right|=0.49\%,\ \left|\Delta\sigma_{m2}/\sigma_{m2}\right|=0.38\%,\ \left|\Delta\varphi/\varphi\right|=0.33\%$$

при регистрации отраженного стеклом света (P=$0^0$, A=$0^0$) и

$$\left|\Delta\sigma_{m1}/\sigma_{m1}\right|=2.99\%,\ \left|\Delta\sigma_{m2}/\sigma_{m2}\right|=4.28\%,\ \left|\Delta\varphi/\varphi\right|=0.23\%$$

при регистрации прошедшего стекло света (P = $90^0$, A = $90^0$).

**Заключение**

Таким образом, разработана процедура расчета коэффициентов отражения и пропускания, интенсивностей отраженного и прошедшего света. Выполнено численное моделирование регистрации отражённого и прошедшего стекло

света для различных моделей остаточных напряжений и параметров измерительной схемы с учётом погрешностей регистрации. Показано, что раздельное восстановление однородных напряжений в рассматриваемой схеме измерений возможно с достаточно высокой точностью. Дальнейшие исследования будут посвящены анализу возможностей снижения погрешностей восстановления напряжений за счет выбора числа углов отсчета в выбранном диапазоне углов.

**Список литературы**

1. Способ определения распределения величины двулучепреломления в плоскости протяженного прозрачного объекта : патент 21901 РБ, МПК G 01 N 21/23 / А. В. Хомченко [и др.]. – Опубл. 30.06.2018.

2. Александров, А.Я. Поляризационно-оптические методы механики деформи-руемого тела /А.Я. Александров, М.Х. Ахметзянов, − М.: Наука, 1973. −575 с.

3. Контроль ориентации оптической оси подложки при помощи эллипсометра с бинарной модуляцией состояния поляризации / И. В. Ивашкевич [и др.] // Веснік Магілеўскага дзярж. Ўніверс. імя А.А. Куляшова. – 2009. – № 2-3. – С. 196–200.

4. Scattered laser light fringe patterns for stress profile measurement in tempered glass plates / S. Hödemann [et al.]. – Glass Technol.: Eur. J. Glass Sci. Technol. A. – 2014. – Vol. 55, № 3. – P. 90–95.

5. A new method for tempering stress measurement in glass panels / H. Aben [et al.]. – Estonian Journal of Engineering. – 2013. – Vol. 19, № 4. – P. 292–297.

Контакты:
primak_igor@mail.ru (Примак Игорь Ульянович)
avkh@mogilev.by (Хомченко Александр Васильевич)

УДК 620.179.1

***В. Н. РЯБЦЕВ***
***В. Н. БУСЬКО****, канд. техн. наук, доц.*
Институт прикладной физики НАН Беларуси (Минск, Беларусь)

## ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ ДЛЯ ПОДБОРА ОПТИМАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ БАРКГАУЗЕНА К СПЕЦИФИКЕ РЕШАЕМЫХ ЗАДАЧ

**Аннотация.** Статья посвящена использованию методов цифровой обработки магнитошумового сигнала для создания цифровой сигнатуры преобразователей Баркгаузена различной конструкции из частотных, частотно-временных и энтропийных характеристик для их подбора к специфике решаемых задач.

**Ключевые слова**: магнитный шум и эффект Баркгаузена, цифровая обработка сигнала, спектр мощности, вейвлет-анализ, скейлограмма, цифровая сигнатура сигнала.

Магнитошумовой (МШ) метод, основанный на методе эффекта Баркгаузена (МЭБ) [1] относится к магнитным методом неразрушающего контроля (ГОСТ 18353 -79) и находит широкое применение для оценки структуры ферромагнитных материалов, деталей, изделий [2 – 4], выявления нарушения их сплошности (трещины) [5], а также оценки внутренних и приложенных напряжений [6 – 9]. Полученная с помощью МЭБ, благодаря тесной связи его параметров с доменной структурой ферромагнитного материала, информация может быть использована для разбраковки сталей по маркам при входном контроле, оценке напряжённо-деформированного состояния материала в различных точках поверхности изделия и степени повреждённости материала. Для каждого из видов исследования желательно использовать специализированные датчики [10] в наибольшей степени соответствующие целям конкретного исследования. Вместе с тем сигнал, полученный с использованием различных датчиков, должен в неизменном виде сохранять параметры, обладающие высокой чувствительностью к изменениям структурного состояния, внутренним напряжениям или другим контролируемым параметрам материала.

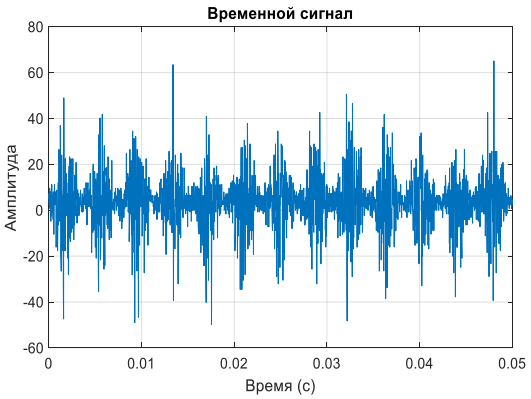
Целью настоящего исследования являлось изучение характера МШ сигнала, полученного с использованием датчиков различной конструкции, и оценка вариации его параметров, наиболее чувствительных к изменениям структуры материала в зависимости от типа датчика, являющегося важнейшим элементом.

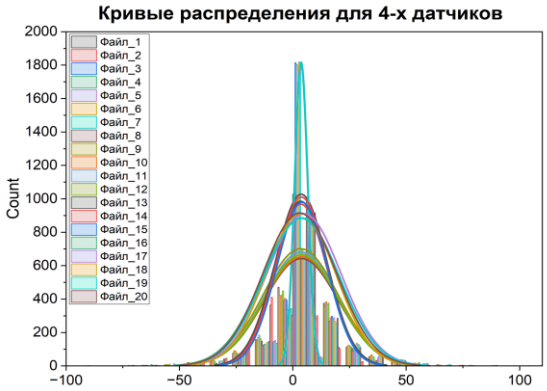
Для получения набора характеристик МШ сигнала, чувствительного к физико-механическим свойствам материала использовались 4 датчика или преобразователя Баркгаузена (ПБ), отличающиеся габаритами, конструкцией, характеристиками ярма и катушек и др.

На рисунке 1 а, б, в показаны лицевая панель прибора типа ИМШ (индикатора магнитного шума) для измерения в образце уровня магнитного шума, исследуемый образец в виде пластины размером 150 х 30 х 4 мм из стали 09Г2С и используемые датчики накладного типа. С целью снижения мешающих факторов на уровень магнитного шума и повышения достоверности измерений поверхность образца подвергалась полированию с помощью пасты ГОИ. Магнитошумовой сигнал снимался с выхода прибора ИМШ, оцифровывался с использованием осциллографа Aligent DSO-X 2012A и переносился на компьютер в виде файла размером в 2000 показаний, записанных с частотой дискретизации 40 кГц.

а б в

Рис. 1. Лицевая панель прибора ИМШ (а), испытуемый образец (б) и 4 используемых сменных датчиков (в)




В таблице 1 показан ряд конструкционных и технических характеристик рассматриваемых и используемых в работе датчиков.

Табл. 1. Номера и основные конструкционно-эксплуатационные характеристики представленных на рис 1в используемых датчиков

| Номер датчика | Габариты (длина, ширина, высота), мм | Расстояние между полюсами магнитопровода, мм | Площадь (S) измерительной катушки, мм$^2$ | Вес (с кабелем к прибору), г |
|---|---|---|---|---|
| Датчик 1 | ⌀21,5 x 22 | 5,5 | 15,2 | 50 |
| Датчик 2 | 30 x 17 x 30 | 8,4 | 30,2 | 88 |
| Датчик 3 | 36 x 18 x 50 | 4 | 18,8 | 126 |
| Датчик 4 | 40 x 30 x 36 | 9 | 32,2 | 162 |

Для каждого датчика измерения повторялись 5 раз, для каждого массива вычислялись их статистические, спектральные и энтропийные характеристики и полученные результаты усреднялись для каждого типа датчика.

Типичный для МШ характер сигнала, его частотная, статистическая и частотно-временная характеристики показаны на рисунке 2. На графике кривых распределения данные из файлов 1-5 получены с использованием датчика № 1, данные из файлов 6-10 – с использованием датчика № 2, данные из файлов 11-15 – с использованием датчика № 3, данные из файлов 16-20 – с использованием датчика № 4.

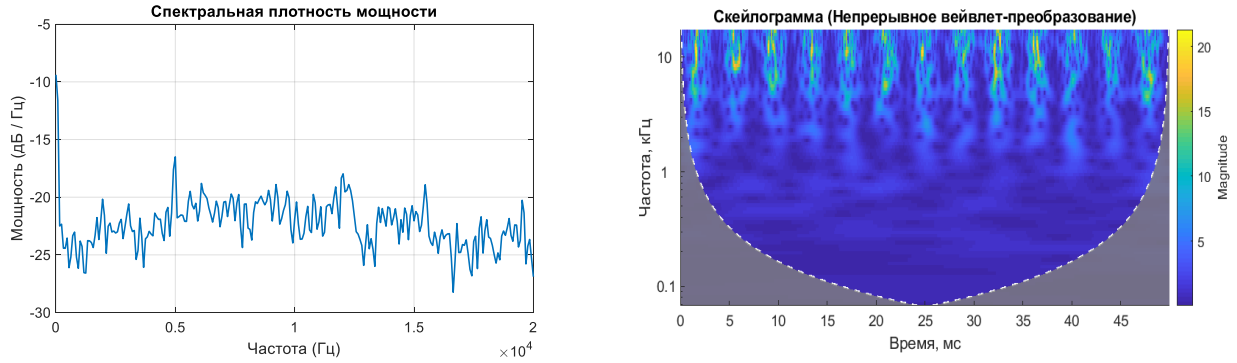



Рис. 2. Временно́й график сигнала, его спектральная плотность мощности, гистограммы и кривые распределения данных, а также скейлограмма для всех 4-х датчиков

Как следует из рисунка 2, сигнал МШ не имеет отдельных ярко выраженных частот, что подтверждается его спектральной плотностью мощности и скейлограммой. Также видно, что гистограммы сигналов и кривые распределения, полученные с использованием различных типов датчиков, отличаются, в основном, амплитудой и дисперсией.

Для количественной оценки различий в сигналах, полученных с использованием различных типов датчиков, были вычислены усреднённые значения дисперсии, средней энергии сигналов и средней энтропии для каждого из 4-х датчиков. Результаты вычислений приведены в таблице 2, где для примера представлены три наиболее важные характеристики случайного процесса, каковым и является магнитный шум (поток скачков намагниченности).

Табл. 2. Наиболее чувствительные к структуре материала характеристики магнитошумового сигнала в зависимости от типа датчика

| | Дисперсия | Средняя энергия | Средняя энтропия |
|---|---|---|---|
| Датчик 1 | 57,596 | 71,02 | 5,18 |
| Датчик 2 | 166,9399 | 180,57 | 6,34 |
| Датчик 3 | 181,6767 | 195,29 | 8,42 |
| Датчик 4 | 266,0385 | 280,62 | 8,50 |

Как видно из таблицы 2, характеристики сигналов, полученных от датчиков разного типа, имеют различные количественные значения параметров, которые могут отличаться между собой в несколько раз, и являются индивидуальными и характерными для каждого типа датчика. Так, наименьшая дисперсия (разброс показаний прибора ИМШ для датчика 1 в сравнении с другими датчиками) составляет меньше от 3,0 до 4,6 раз, средняя энергия – меньше от 1,23 до 3,95 раза, а средняя энтропия- меньше от 1,2 до1,6 раза. В итоге оптимальны датчиком оказался датчик 1.

Таким образом, набор характеристик сигнала, чувствительных к конструкции датчика может использоваться в качестве его цифровой сигнатуры и позволяет использовать её для выбора подходящего датчика в зависимости от специфики конкретного исследования.

## Заключение

Магнитошумовой метод, аппаратура, преобразователи, основанные на эффекте Баркгаузена, могут быть использованы для неразрушающего контроля физико-механических свойств в ферромагнитных образцах, материалах, готовых деталях и изделиях (включая полученные по аддитивным технологиям), разбраковки сталей по маркам, анализа доменной и кристаллической структуры, режимов термообработки, оценки внутренних и приложенных напряжений, усталостной долговечности и других задач.

В зависимости от целей и задач исследования, магнитошумовую аппаратуру целесообразно комплектовать датчиком с учетом его оптимальных габаритов, конструкции и селективности к контролируемому параметру, тем самым значительно снизив погрешность измерения и неопределенность уровня магнитного шума, что, например, особенно важным является при оценке степени неоднородности поверхностных свойств. Выбранный датчик необходимо предварительно протестировать и проанализировать полученные результаты, например, по таким параметрам, как дисперсия получаемых данных, селективность сигнала к контролируемому параметру, амплитудно-частотная характеристика, спектральная плотность мощности магнитного шума, пространственное распределение в зависимости от магнитного поля возбуждения и т.д.

Для количественной оценки выбранных характеристик регистрируемого скачкообразного процесса для каждого датчика могут эффективно применяться методы цифровой обработки сигнала при условии его представления в виде массива данных, записанных с заданной частотой дискретизации. Набор рассмотренных для МШ характеристик сигнала специфичен для каждого из датчиков и может служить для однозначной идентификации в качестве его цифровой сигнатуры, позволяющей производить обоснованный выбор для каждого из видов и задач исследований.

### Список литературы

1. Рудяк В.М. Эффект Баркгаузена // Успехи физических наук. - 1970. - Т. 101, № 3. - С. 429–462.

2. Nahak B. Material Characterization using Barkhausen Noise Analysis Technique - A Review // Indian J. Sci. Technol. - 2017. - Т. 10, № 14. - С. 1–10.

3. Maciusowicz M., Psuj G., Kochmański P. Identification of Grain Oriented SiFe Steels Based on Imaging the Instantaneous Dynamics of Magnetic Barkhausen Noise Using Short-Time Fourier Transform and Deep Convolutional Neural Network // Materials. - 2021. - Т. 15, № 1. - С. 118.

4. Горкунов Э.С., Драгошанский Ю.Н., Миховски М. Эффект Баркгаузена и его использовании в структуроскопии ферромагнитных материалов // Дефектоскопия. - 1999. - № 6. - С. 3–32.

5. Busko V. N., Nichipuruk A. P., Stashkov A. N. The method of mechanical testing and investigation of the possibility of fatigue strength control by the magneto-noise method of steel samples manufactured by additive technology // Kontrol'. Diagnostika. - 2024. - № 310. - С. 54–63.

6. Bahleda F. и др. Barkhausen Noise Emission as a Function of Tensile Stress in Low-Alloyed Steels: Influence of Corrosion and Steel Strength // Applied Sciences. - 2023. - Т. 13, № 11. - С. 6574.

7. Gur C. H. Review of Residual Stress Measurement by Magnetic Barkhausen Noise Technique // Mater. Perform. Charact. - 2018. - Т. 7, № 4. - С. 504–525.

8. Franco Grijalba F. A., Mello Galvão M., Barbosa Tuão L. Measurement of torsional stresses via Magnetic Barkhausen Noise // Nondestructive Testing and Evaluation. - 2025. - С. 1–21.

9. Зайдес. С.А., Хо Минь Куан. Использование шумов Баркгаузена для оценки остаточного напряженного состояния // Сборник трудов XIV Международной научно-практической конференции «Инновации в машиностроении». - 2023. - С. 153–158.

10. Santaaho S. и др. Barkhausen Noise Probes and Modelling: A Review // J. Nondestr. Eval. - 2019. - Т. 38, - № 4. - С. 94.

Контакты:
grieves@yandex.ru (Рябцев Владимир Николаевич)

УДК 624:004.946

***Е. Н. САВИНА*[1]**
***А. А. ЯКОВЛЕВ*[2]**
***А. В. КУЛАН*[1]**
***Е. А. МОЙСЕЙЧИК*[1], *докт. техн. наук, доцент***
[1]Белорусский национальный технический университет (Минск, Беларусь)
[2]ООО «СимТех» (Минск, Беларусь)

# ИНТЕГРАЦИЯ ЦИФРОВЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ ТРАНСПОРТНЫХ СООРУЖЕНИЙ, ПОСТРОЕННЫХ ПО ДАННЫМ ЛАЗЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ, С ТЕХНОЛОГИЯМИ ДОПОЛНЕННОЙ И ВИРТУАЛЬНОЙ РЕАЛЬНОСТИ ДЛЯ ЗАДАЧ ДИАГНОСТИКИ

**Аннотация.** В работе предложен комплексный метод формирования цифровых информационных моделей эксплуатируемых транспортных сооружений на основе облаков точек, получаемых наземным лазерным сканированием и фотограмметрией. Разработана методика интеграции полученных BIM-моделей в среду дополненной (AR) и виртуальной (VR) реальности, позволяющая визуализировать скрытые конструктивные элементы (арматуру, закладные детали) и сопоставлять фактическое состояние объекта с его цифровым двойником непосредственно на месте обследования. Экспериментальные исследования, выполненные на действующем мостовом сооружении, подтвердили высокую точность совмещения (до 99 %) и практическую эффективность предлагаемого подхода для оперативного выявления дефектов, контроля геометрических параметров и ведения цифрового технического паспорта. Применение AR-технологий позволяет снизить трудоемкость контрольных операций, повысить достоверность диагностики и обоснованность принимаемых решений по управлению техническим состоянием объектов инфраструктуры.

**Ключевые слова:** информационное моделирование (BIM), облака точек, дополненная реальность (AR) виртуальная реальность (VR), лазерное сканирование, диагностика транспортных сооружений, цифровой технический паспорт, неразрушающий контроль.

**Введение.** Современное развитие строительной отрасли и эксплуатации объектов транспортной инфраструктуры неразрывно связано с цифровизацией процессов сбора, обработки и анализа данных о техническом состоянии сооружений [1, 2]. Традиционные подходы к диагностике, основанные на визуальных осмотрах, выборочных инструментальных измерениях и ведении бумажной отчетности, не обеспечивают необходимой полноты и оперативности информации, что особенно критично для протяженных и конструктивно сложных объектов – мостов, путепроводов, тоннелей [3].

В последние годы активно развиваются технологии информационного моделирования (BIM), позволяющие интегрировать геометрические, атрибутивные и эксплуатационные данные в единую цифровую среду. Однако большинство существующих BIM-решений ориентированы на проектирование новых объектов и не учитывают фактических отклонений геометрии и дефектов, возникающих в процессе строительства и длительной эксплуатации. Устранить этот недостаток позволяет использование данных наземного лазерного сканирования, формирующих облака точек – высокоточные трехмерные слепки реального состояния сооружения [4, 5].

Вместе с тем, сама по себе BIM-модель, даже построенная по облаку точек, остается статичным цифровым продуктом, если она не интегрирована с современными средствами визуализации и взаимодействия. Наиболее перспективным направлением здесь является дополненная реальность (AR), которая обеспечивает наложение цифровой информации на реальный объект, создавая эффект «рентгеновского зрения» и позволяя специалисту

непосредственно на объекте сопоставлять проектное и фактическое исполнение, визуализировать скрытые элементы и фиксировать дефекты с привязкой к модели [6, 7].

Цель настоящей работы – разработка и экспериментальное обоснование методики создания цифровых информационных моделей транспортных сооружений на основе облаков точек и их последующей интеграции с технологией дополненной реальности для повышения эффективности диагностики и мониторинга технического состояния.

**Методология построения цифровой модели на основе облака точек.**

Предлагаемый метод включает несколько последовательных этапов, каждый из которых влияет на конечную точность и достоверность цифровой модели (рис. 1).

Рис. 1. Структура поэтапной разработки цифровой информационной модели на базе облака точек

На первом этапе используется комбинация наземного лазерного сканирования (сканер FARO Focus) и фотограмметрической съемки с беспилотных летательных аппаратов и мобильных устройств. Это позволяет обеспечить высокую детализацию конструктивных элементов и полноту покрытия даже в труднодоступных зонах. Плотность облака точек составляет не менее 5–10 мм на расстоянии 10 м, что соответствует требованиям для построения моделей с уровнем проработки LOD 300–400.

На втором этапе проводится фильтрация шумов, удаление нерелевантных объектов (транспорт, растительность), объединение отдельных сканов в единую систему координат с использованием итеративного алгоритма ближайших точек (ICP) и опорных маркеров. Контроль точности регистрации осуществляется по реперным точкам, измеренным тахеометром.

Третий этап включает сегментацию и классификацию элементов. Облако точек разделяется на логические группы, соответствующие конструктивным элементам сооружения: пролетные строения, опоры, балки, плиты проезжей части, ограждения. Используется комбинированный подход – геометрические методы (анализ нормалей, кривизны) в сочетании с ручной корректировкой для

сложных узлов. Это позволяет получить структурированный набор данных, готовый для параметрического моделирования (рис. 2).

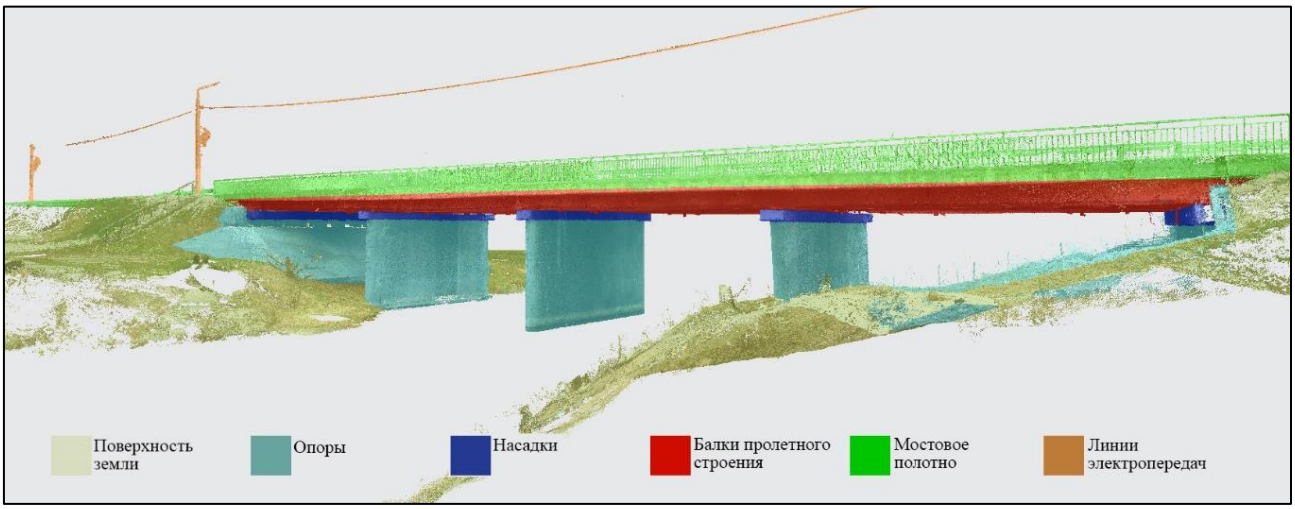



Рис.2. Классификация элементов мостового сооружения

На четвертом этапе создается параметрическая BIM-модель в среде Autodesk Revit. На основе сегментированных данных разрабатываются параметрические семейства элементов, при этом геометрические параметры (длины, сечения, уклоны) назначаются не по проекту, а по фактическим измерениям из облака точек. Для элементов регулярной геометрии применяется аппроксимация плоскостями и цилиндрическими поверхностями, для сложных форм – NURBS-поверхности. Важно отметить, что модель отражает фактические отклонения осей и поверхностей, что принципиально отличает ее от традиционных проектных моделей.

На пятом этапе модель наполняется атрибутивной информацией. Каждому BIM-объекту присваиваются данные о материале, классе бетона, армировании (по проекту и фактическому), а также результаты предыдущих обследований – дефекты, трещины, коррозия, с привязкой к конкретным элементам. Это превращает геометрическую модель в полноценный информационный банк данных о техническом состоянии сооружения.

**Интеграция BIM-модели с дополненной и виртуальной реальностью.**

Для практического использования созданной цифровой модели в задачах диагностики авторами статьи разработана методика ее интеграции с AR-технологией. В качестве программного инструмента выбрано специализированное приложение дополненной реальности «GAMMA AR», поддерживающее импорт IFC-форматов и обеспечивающее позиционирование модели в пространстве по визуальным маркерам или GPS-координатам.

Процесс интеграции включает следующие шаги:

1) Экспорт BIM-модели из Revit в формат IFC с сохранением всех атрибутов и уровней детализации.

2) Загрузка модели в AR-приложение на мобильное устройство (планшет или смартфон с поддержкой ARCore/ARKit).

3) Калибровка – совмещение цифровой модели с реальным объектом. Для этого используется либо система визуальных маркеров (QR-коды, специальные метки), либо привязка по характерным точкам сооружения. Обеспечивается точность наложения в пределах 5–10 мм, что достаточно для большинства диагностических задач.

4) Взаимодействие – пользователь, перемещая устройство, видит на экране совмещенное изображение реального объекта и его цифровой модели в заданном режиме отображения.

Особенностью разработанного подхода является возможность включать и выключать отображение отдельных слоев модели. Например, можно отобразить только несущие конструкции, или только арматурные каркасы (при уровне проработки LOD 400), или только инженерные сети. В режиме «рентген» визуализируются скрытые элементы, что крайне полезно при обследовании без вскрытия бетона.

Дополнительно реализована функция «информационного меню»: при нажатии на любой элемент модели на экране появляется таблица с его атрибутами – материал, размеры, дата последнего осмотра, перечень зафиксированных дефектов, ссылки на фотографии и протоколы испытаний. Это превращает AR-систему в интерактивный цифровой технический паспорт сооружения.

**Верификация методики.** Апробация разработанной методики проведена на реальном объекте – железобетонном балочном мосту через р. Титовка в г. Марьина Горка (Республика Беларусь). Сооружение представляет собой четырехпролетную конструкцию с разрезным пролетным строением общей длиной 56 м на свайных опорах.

Выполнено наземное лазерное сканирование объекта. Полученные облака точек объединены и обработаны по описанной в [7] методологии (рис. 3, а). По результатам сегментации построена BIM-модель (рис. 3, б) с уровнем детализации LOD 300, включающая все балки, опоры, ригели и плиту проезжей части.

а) б)

Рис. 3. Облако точек (а) и цифровая информационная модель (б) транспортного сооружения

В модель загружены атрибутивные данные: классы бетона (С20/25 для балок и свай, С16/20 для опор), диаметры и шаг арматуры по проекту, а также

данные о коррозионных повреждениях, выявленных в ходе предварительного обследования.

Далее модель экспортирована в формат IFC и загружена на планшет с установленным приложением GAMMA AR [6, 7]. Калибровка выполнена по трем контрольным точкам на опорах. Сходимость наложения модели с реальным объектом оценена визуально и инструментально – отклонения не превысили 5 %, что вполне допустимо для диагностических целей.

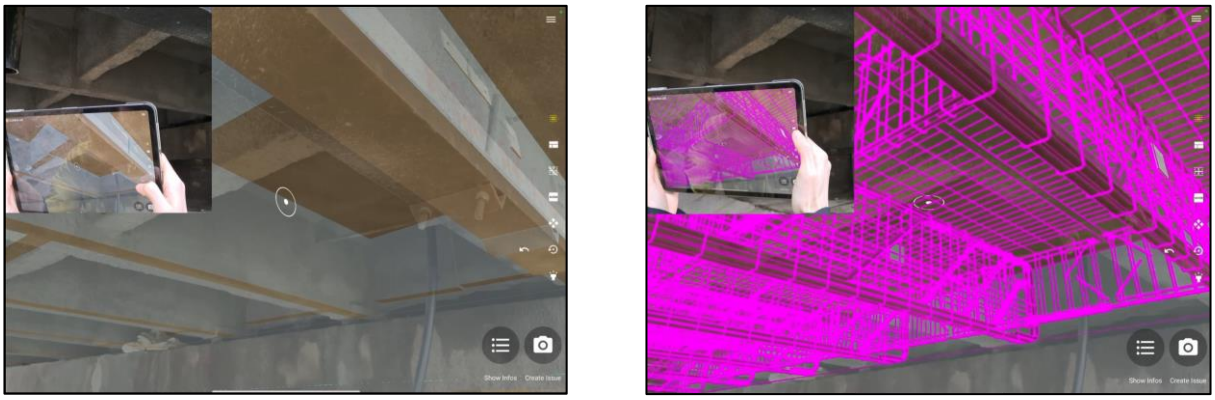
В ходе эксперимента специалист, перемещаясь вдоль моста, мог наблюдать на экране планшета:

– цифровой контур всех конструкций в реальном масштабе (рис. 4, а);

– при включении режима «армирование»;

– визуализацию арматурных стержней в балках (рис. 4, б).

Сопоставление с имеющейся проектной документацией показало, что геометрическое положение арматуры в модели (восстановленной по облаку точек) совпадает с фактическим расположением стержней (подтверждено контрольными вскрытиями) на 98–99 %, тогда как проектное расположение часто имеет отклонения из-за монтажных допусков и ошибок.



а) б)

Рис. 4. Отображение армирования железобетонных балок с использованием дополненной реальности

Также были апробированы следующие сценарии в среде виртуальной реальности (рис. 5, а):

– отображение дефектов (трещин, сколов) в виде цветных маркеров, привязанных к конкретным зонам (рис. 5, б);

– сравнение текущей модели с проектной (унаследованной от генерального плана) для выявления геометрических отклонений (например, вертикальные смещения опор, неперпендикулярность стоек). Это позволило оперативно обнаружить несколько мест с превышением допустимых отклонений, которые ранее не были зафиксированы в отчетах.

а) б)

Рис. 5. Общий вид (а) и цифровой технический паспорт (б) транспортного сооружения в среде виртуальной реальности

Полученные экспериментальные данные подтверждают, что разработанный метод позволяет:

– сократить время на обследование объекта в 1,5–2 раза за счет быстрого доступа к полной информации и возможности online контроля;

– повысить достоверность диагностики, поскольку специалист видит цифровую модель, построенную по фактической геометрии, а не по упрощенным чертежам;

– минимизировать количество контрольных вскрытий, так как AR-визуализация скрытой арматуры дает достаточно точное представление о ее расположении;

– вести актуализированный цифровой технический паспорт, в который можно добавлять новые данные непосредственно в поле, без последующего переоформления бумажных документов.

Предложенная методика не требует дорогостоящего специализированного оборудования – используются стандартные электронные устройства (планшет) или смартфоны, а лазерное сканирование выполняется один раз во время детального обследования. При этом полученная BIM-модель может служить основой для последующих расчетов напряженно-деформированного состояния сооружения, планирования ремонтов и прогнозирования остаточного ресурса.

**Заключение.** В работе предложен и экспериментально обоснован комплексный подход к созданию и использованию цифровых информационных моделей транспортных сооружений, интегрированных с технологией дополненной реальности.

Основные научные результаты:

Разработана методология построения BIM-моделей на основе облаков точек, обеспечивающая достоверное отражение фактической геометрии и дефектов сооружения. Предложена методика интеграции BIM-моделей с AR-средой, позволяющая визуализировать скрытые конструктивные элементы и сопоставлять цифровой двойник с реальным объектом непосредственно в процессе обследования. Экспериментально подтверждена высокая точность совмещения (до 99 % для арматуры) и практическая эффективность подхода для задач диагностики, контроля качества и ведения цифрового технического паспорта.

Дальнейшие исследования планируется направить на автоматизацию процесса сегментации облаков точек с использованием нейросетевых алгоритмов и на разработку универсальной платформы для AR-сопровождения всех этапов жизненного цикла инфраструктурных объектов.

**Список литературы**

1. Volk, R. Building Information Modeling (BIM) for existing buildings – Literature review and future needs / R. Volk, J. Stengel, F. Schultmann // Automation in Construction. – 2014. – Vol. 38. – P. 109–127. – DOI: 10.1016/j.autcon.2013.10.023.

2. Murphy, M. Historic Building Information Modelling – Adding intelligence to laser and image-based surveys / M. Murphy, E. McGovern, S. Pavia // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. – 2013. – Vol. 76. – P. 89–102. – DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2012.11.006.

3. Bosché, F. The value of integrating scan-to-BIM and scan-vs-BIM techniques / F. Bosché, M. Ahmed, Y. Turkan // Automation in Construction. – 2015. – Vol. 57. – P. 201–217. – DOI: 10.1016/j.autcon.2015.04.007.

4. Комиссаров, А. В. Методика использования BIM-технологий и лазерного сканирования для реконструкции и модернизации объектов / А. В. Комиссаров, А. В. Ремизов // Вестник СГУГиТ. – 2022. – № 2. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/metodika-ispolzovaniya-bim-tehnologiy-i-lazernogo-skanirovaniya-dlya-rekonstruktsii-i-modernizatsii-obektov (дата обращения: 11.06.2026).

5. Гасилов, А. В. Эвристический алгоритм сегментации облака точек / А. В. Гасилов, А. И. Фролов // Научный результат. Информационные технологии. – 2018. – № 4. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/evristicheskiy-algoritm-segmentatsii-oblaka-tochek (дата обращения: 03.06.2026).

6. Савина, Е. Н. Экспериментальное исследование применения BIM-технологий, технологий дополненной и виртуальной реальности для транспортных сооружений / Е. Н. Савина, Е. А. Мойсейчик, А. А. Яковлев, А. В. Кулан // Автомобильные дороги и мосты. – 2025. – № 2 (36). – С. 32–41.

7. Савина, Е. Н. Системы мониторинга напряженно-деформированного состояния конструкций в составе цифрового двойника зданий и транспортных сооружений с применением дополненной и виртуальной реальности / Е. Н. Савина, А. А. Яковлев, А. В. Кулан, Е. А. Мойсейчик // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F. Строительство. Прикладные науки. – 2026. – № 1. – С. 42–49. – DOI: 10.52928/2070-1683-2026-44-1-42-49.

Контакты:
en713821@gmail.com (Савина Елена Николаевна)
ftkckp@mail.ru (Яковлев Александр Александрович)
kulan.al@yandex.ru (Кулан Алексей Валерьевич)
emoisseitchik@mail.ru (Мойсейчик Евгений Алексеевич)

УДК 620.179.16

***М. П. САВИЧЕВ*** [1,2]
***В. В. АТРОЩЕНКО*** [1,2]***,*** *д-р техн. наук, проф.*
***Ю. В. ЛОГАЧЁВ*** [1]
***А. Н. ПАУТОВ*** [2]
[1]ООО «Головной аттестационно-сертификационный центр Республики Башкортостан» (Уфа, Россия)
[2]Уфимский университет науки и технологий (Уфа, Россия)

# УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КОНТРОЛЬ ТОЧЕЧНОЙ СВАРКИ, ВЫПОЛНЕННОЙ МЕТОДАМИ КОНТАКТНОЙ И ЛАЗЕРНОЙ СВАРКИ

**Аннотация.** Рассмотрены вопросы ультразвукового контроля сварных соединений, полученных методами контактной и лазерной точечной сварки, актуальные для производства автомобильных кузовов. Установлены характерные ультразвуковые сигнатуры для разных типов дефектов. Показано, что признаки дефектов при контроле лазерной и контактной точечной сварки схожи, а значит, для оценки качества соединений, выполненных обоими методами, могут применяться единые критерии.

**Ключевые слова:** ультразвуковой контроль, контактная точечная сварка, точечная лазерная сварка

Цель данной работы — выделить и систематизировать основные признаки эхо-сигналов, характеризующих некачественную сварную точку, при ультразвуковом контроле (УЗК) контактной точечной и лазерной сварки.

При производстве кузовов автомобиля выштампованные листы соединяются точечной контактной сваркой. А с недавнего времени – также лазерной точечной сваркой и лазерной пайкой. К примеру, на одном только «Тигуане» насчитывается 5166 сварных точек (рис. 1). Обычно при производстве кузовов автомобилей используются стальные листы (в том числе оцинкованные) из углеродистой стали по ГОСТ 9045 – 70, с содержанием углерода не более 0,08% (Сталь 08Ю, Сталь 08Фкп, Сталь 08 кп) [1, 2]. Толщины листов: 0,8 мм;  0,9 мм; 1,0 мм; 1,5 мм; 1,75 мм; 2 мм; 2,25 мм; 2,5 мм; 5 мм. Диаметр сварной точки определяется исходя из толщины самой тонкой пластины по следующей формуле:

$$D = 4\sqrt{d1},$$

где $d1$ – толщина тонкого листа.

Целостность соединений, выполненных методом точечной сварки, является определяющим фактором надежности автомобилей. Каждая сварная точка проходит контроль качества, который включает визуально-измерительный контроль (ВИК) (выполняемый чаще всего роботами, оборудованными фотоэлементами), а также выборочный УЗК. На настоящий момент нет нормативного документа, регламентирующего УЗК контактной точеной сварки и существует несколько вариантов применимого для этой задачи оборудования:

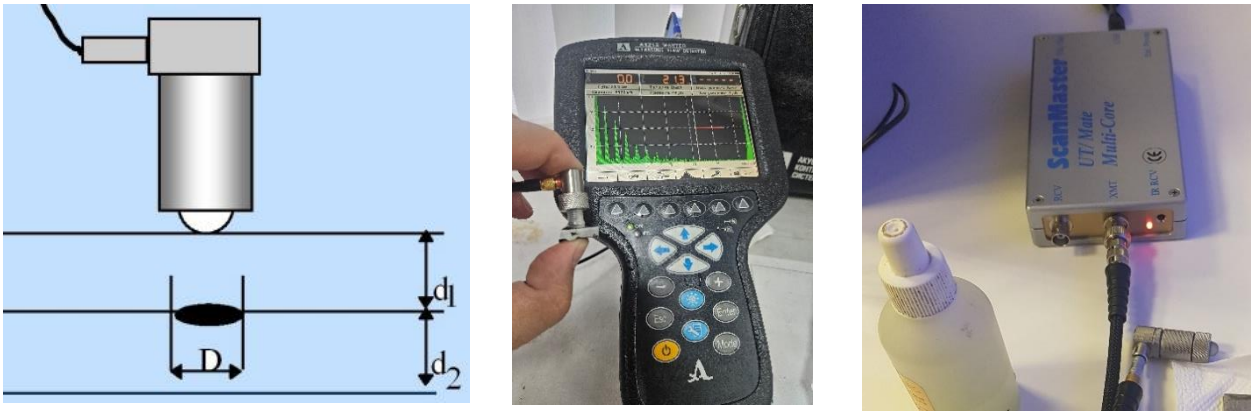
1) обычный дефектоскоп и датчик с линией задержки или с водяным столбом, при этом дефектоскопист на основе анализа А-скана [3] принимает решение о браке (рис. 2, б);

2) специализированное оборудование ScanMaster UT/mate, которое отличается автоматическим анализом и архивированием полученных А-сканов (рис.2, в) [4];

3) ультразвковая антенная решетка с линией задержки (С-скан), в том числе С-скан, полученный при перемещении датчика по спиральной траектории [4-7].

а) б)

Рис. 1. Пример сварных соединений кузова автомобиля: а) контактная точечная сварка; б) лазерная сварка на боковине кузова кроссовера «Tiguan»




а) б) в)

Рис. 2. УЗК контактной точечной сварки: а) схема контроля преобразователем с линией задержки: D- диаметр ядра: d1 – толщина наиболее тонкого листа; б) дефектоскоп А1212 «Мастер»; в) дефектоскоп «ScanMaster UT/mate»

Рабочая частота (F) датчика, необходимая для контроля пластины заданной толщины (d1) при скорости продольных ультразвуковых волн (c), приблизительно дается формулой:

$$F > 3 \times c/d1.$$

В ходе данной работы сваривались внахлест две пластины толщиной 1,5 мм из стали Ст3сп на машине контактной точечной сварки МТП-150-7 (рис. 3) и на ручном лазере Deonix Apollo LWD-2000 (рис. 4). Сварку производили на разных режимах для получения как качественных, так и дефектных точек. Качество сварной точки на каждом режиме оценивалось по макрошлифам. При толщине 1,5 мм + 1,5 мм диаметр сварной точки должен быть 5 мм, а частота необходимого ультразвукового датчика (ПЭП) свыше 11 МГц.

Рис. 3. Точечная контактная сварка пластин

Рис. 4. Точечная лазерная сварка пластин и полученные макрошлифы

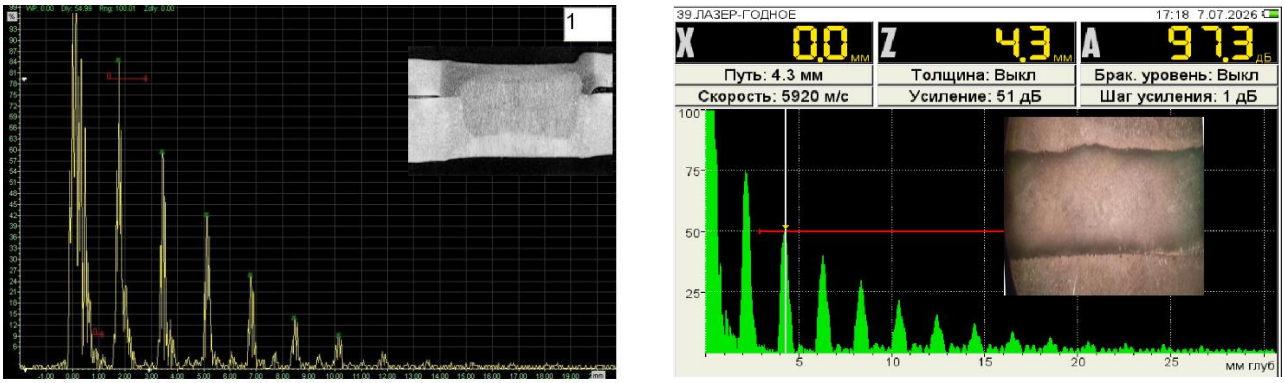
В ходе эксперимента ультразвуковой контроль сварных точек, полученных обоими способами сварки, производился на дефектоскопе А1212 «Мастер» с использованием преобразователя DL15P6 (15 МГц) со сменной линией задержки KL13-4R (h=13мм) (рис. 2, б). Также в работе приведены результаты УЗК, полученные ранее на дефектоскопе «ScanMaster UT/mate» для контактной точечной сварки (рис. 2, в).

В результате эксперимента были выделены основные признаки сигналов от качественных и дефектных сварных точек. Для обоих способов сварки (контактной и лазерной) данные признаки оказались схожими. Так, ультразвуковую сигнатуру качественного точечного сварного соединения можно описать следующим образом (рис. 5):

– отчетливо видны не менее 6 повторяющихся эхо-сигналов с амплитудой выше уровня шумов. При этом амплитуда первого эхо-сигнала в опытах установливалась равной 80% от высоты экрана, а уровень фонового шума составлял около 10% высоты экрана. Ослабление амплитуды (коэффициент

затухания) определяется структурой зерен металла сварной точки, коррелирует с качеством сварки и для лазерной сварки происходило быстрее;

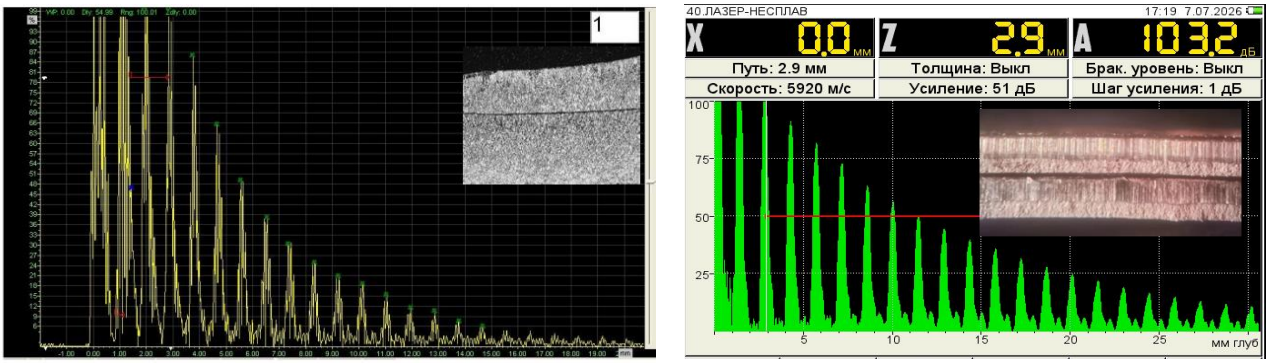
– расстояние между последовательно повторяющимися сигналами соответствует совокупной толщине двух сваренных пластин (3 мм).




а б

Рис. 5. Ультразвуковая сигнатура качественного сварного соединения: а) контактной точечной сварки; б) лазерной сварки

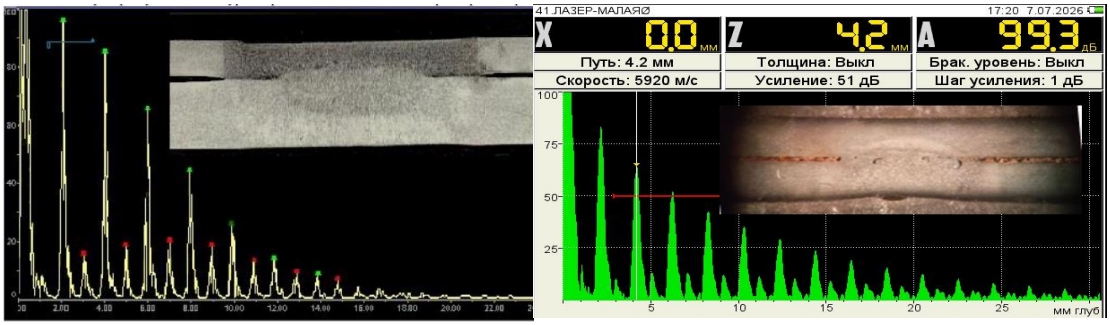
При наличии несплавления (рис. 6) характерен повторяющийся рисунок эхо-сигналов, расстояние между которыми соответствует толщине верхней пластины (1,5 мм). Ослабление амплитуды (коэффициент затухания) в данном случае отличается, т.к. определяется структурой основного металла верхней пластины (ввиду отсутствия сварной точки).




а б

Рис. 6. Ультразвуковая сигнатура несплавления (отсутствия соединения): а) контактной точечной сварки; б) лазерной сварки

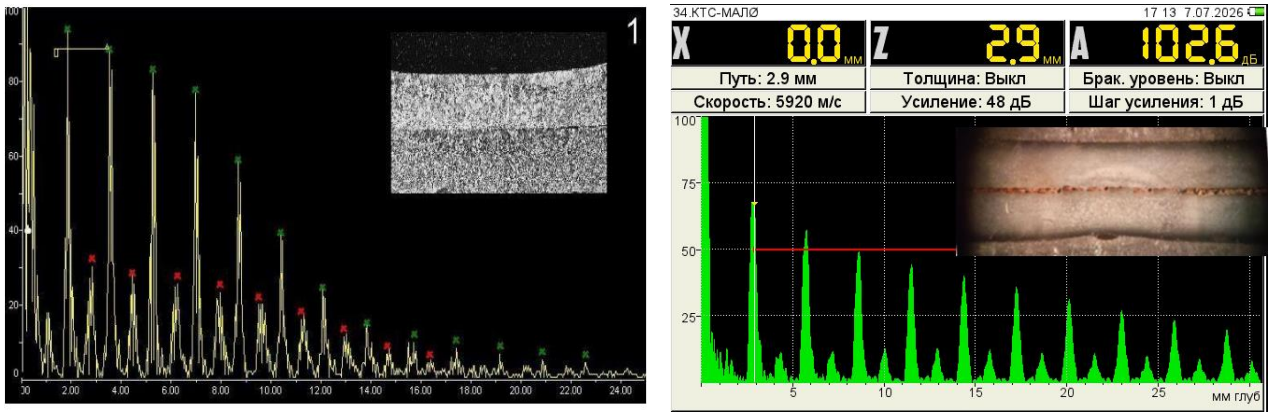
Для сварного соединения с малым размером сварной точки основная последовательность эхо-сигналов аналогична той, которая характерна для качественной сварки (рис.7). Но так как размер пьезоэлемента выбирается по диаметру сварной точки и в данном случае выходит за ее границы, то появляются эхо-сигналы от верхней пластины. Огибающая промежуточных эхо-сигналов при этом будет иметь максимум амплитуды в центре А-скана. По этому признаку можно отличить малый размер сварной точки от дефектов типа непровара (рис. 8) или дефектов в самой сварной точке (рис.9).




а б

Рис. 7. Ультразвуковая сигнатура сварного соединения с малым размером сварной точки: а) контактной точечной сварки; б) лазерной сварки

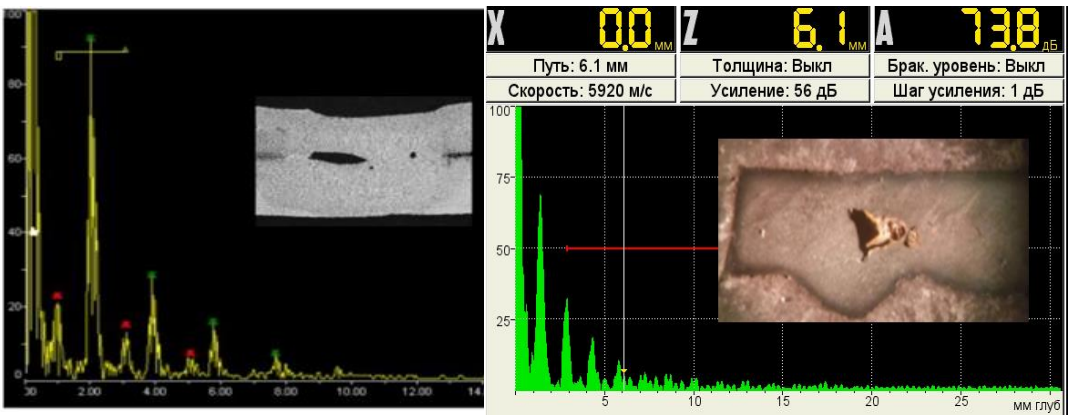
У непроваренного соединения (когда свариваемые поверхности сблизились, но сварная точка не образовалась) (рис. 8). характерно меньшее ослабление амплитуды (коэффициента затухания) по сравнению с качественной сваркой. А также наблюдается эхо-сигнал от задней стенки верхней пластины.




а б

Рис. 8. Ультразвуковая сигнатура сварного соединения с непроваром: а) контактной точечной сварки; б) лазерной сварки

Основной рисунок эхо-сигналов от сварного соединения с дефектами сварной точки аналогичен тому, который характерен для качественной сварки (рис. 9). С расстоянием между основными эхо-сигналами, равным удвоенной толщине. Однако, так как первый (зондирующий) ультразвуковой сигнал частично отражается от пор (дефектов) сварной точки, то это вызывает быстрое затухание последующих эхо-сигналов до уровня шумов (наблюдается менее 6 эхо-сигналов). При этом характерно присутствие промежуточных эхо-сигналов, соответствующих глубине расположения дефекта от поверхнгости.




а б

Рис. 9. Ультразвуковая сигнатура сварного соединения с дефектами сварной точки: а) контактной точечной сварки; б) лазерной сварки

**Выводы.** Основными признаками, позволяющими выявить дефектную сварную точку, являются: изменение коэффициента затухания и совокупной длины последовательности повторяющих эхо-сигналов; изменение расстояния между последовательно повторяющимися эхо-сигналами (не соответствие расстояния общей толщине конструкции); появление промежуточных эхо сигналов с амплитудой выше фонового шума.

При этом для оценки ультразвуковой сигнатуры точечной лазерной сварки могут быть применены те же критерии, что и для контактной точечной сварки.

**Список литературы**

1. Обзор способов сварки элементов кузовов автомобилей В.М. Мещеряков, Е.Е. Косенко, В.В. Косенко, В.С. Крымский. Электронный научный журнал «Инженерный вестник Дона», №1 (2018) ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2018/4702.

2. Что может лазер: сварка VW Polo в Калуге [Электронный ресурс] // 5 Колесо. — URL: (дата обращения: 01.07.2026).

3. Roberts D., Mason J., Lewis C. Ultrasonic spot weld testing with automatic classification // Science and Technology of Welding and Joining. 2002. Т. 7. № 1. С. 47-50.

4. Ambroziak A. Ultrasonic quality control methods for spot-welded joints // Welding International. 2011. Т. 25. № 12. С. 927-932.

5. Reverdy F. Inspection of Spot Welds Using an Ultrasonic Phased Array // AIP Conference Proceedings. : AIP, 2004. С. 801-808.

6. Liu J. и др. Ultrasonic C-scan Detection for Stainless Steel Spot Welds Based on Signal Analysis in Frequency Domain // ISIJ International. 2014. Т. 54. № 8. С. 1876-1882.

7. Takada H. и др. Ultrasonic Method for Testing Spot-Welds // Journal of the Japan Institute of Metals. 2012. Т. 76. № 9. С. 555-562.

Контакты:
savichevmax@mail.ru (Савичев Максим Павлович);
91250@mail.ru (Атрощенко Валерий Владимирович);
logachev.sts@mail.ru (Логачёв Юрий Владимирович);
njkzytrol@inbox.ru (Паутов Анатолий Николаевич).

УДК 620.179.14

***С. Г. САНДОМИРСКИЙ***, *д-р техн. наук, доц.*
Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси (Минск, Беларусь)

# АНАЛИЗ ПРИЧИН ПОЯВЛЕНИЯ В НАУЧНОЙ И СПРАВОЧНОЙ ЛИТЕРАТУРЕ НЕДОСТОВЕРНЫХ ДАННЫХ ОБ ОСТАТОЧНОЙ НАМАГНИЧЕННОСТИ И МАГНИТНОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ СТАЛЕЙ

**Аннотация.** Представлена информация об установленных несоответствиях ряда справочных данных магнитных параметрах сталей действительным значениям, причинах их возникновения и путях предотвращения использования на практике. Показано, почему справочные данные о результатах измерения остаточной индукции, начальной и максимальной магнитных проницаемостей сталей не всегда достоверны. Установлены особенности таких результатов и даны рекомендации, позволяющие предотвратить их использование в магнитном структурном анализе.

**Ключевые слова:** магнитный структурный анализ, магнитные свойства сталей, коэрцитивная сила, остаточная намагниченность, намагниченность технического насыщения. начальная и максимальная магнитные проницаемости.

Магнитный структурный анализ [1, 2] основан [3] на исследованиях влияния технологических факторов производства металлов на их магнитные свойства (коэрцитивную силу $H_c$, остаточную намагниченность $M_r$, намагниченность $M_s$ технического насыщения, максимальную $\mu_m$ и начальную $\mu_a$ магнитные проницаемости), которые представлены в научной и обобщены в справочной литературе [2, 4–8]. Это определяет важность данных о магнитных свойствах сталей после термических обработок. Исследователи и разработчики вправе рассчитывать на их достоверность. Но это не всегда так.

**Цель статьи** – информирование о недостоверности ряда справочных данных о магнитных свойствах сталей, причинах их возникновения и путях предотвращения использования в магнитном структурном анализе.

Сложность соблюдения стандартных требований к измерению магнитных свойств материалов предопределила использование рядом исследователей результатов измерения магнитных параметров образцов с малым размагничивающим фактором (коэффициентом размагничивания $N$) в разомкнутой магнитной цепи. Например, исследования влияния температуры отжига листового проката низко и среднеуглеродистых сталей на их магнитные свойства проведены на образцах в виде пластин длиной 200 мм, шириной 20 мм и толщиной 1÷2 мм в соленоиде баллистической установки БУ-3 [8–15]. Авторы считали, что малый $N$ обеспечит одинаковую зависимость магнитных параметров образцов и их материала от технологических факторов. Типичные результаты таких исследований приведены на рис.1.

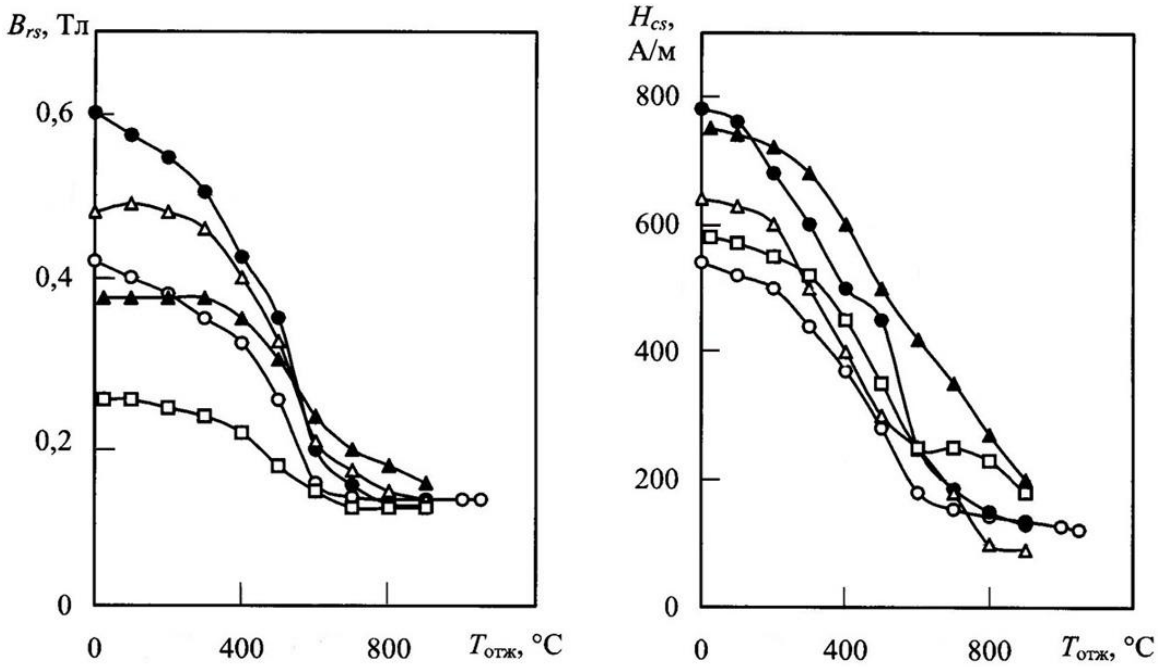



Рис. 1. Влияние температуры $T_{отж}$ отжига сталей 08КП (о), 08Ю (●), 10КП (Δ), 15СП (▲) и 20СП (□) на их $B_{rs}$ и $H_{cs}$ по [16, рис. 2 а, б].

Предпосылкой к этому служила возможность, при соблюдении определенных условий в соответствии с [17, 18], измерения $H_c$ материалов на образцах в разомкнутой магнитной цепи. Хотя обоснованность применения такого подхода при измерении других магнитных параметров не была исследована, полученные результаты измерений были включены в справочные издания как магнитные свойства материалов (например, на рис.12.1 в [7]). На основе их анализа определены оптимальные параметры магнитного контроля качества отжига холоднодеформированных углеродистых сталей.

Но использование такой методики для получения информации о $M_r$ сталей не может привести достоверным результатам по следующей причине. Проведенным в [19] анализом показано, что даже для «протяженных» стальных изделий (например, цилиндров с отношением λ длины к диаметру λ = 20), чувствительность остаточной намагниченности $M_d$ изделия к изменениям $M_r$ его материала не превышает 0,1 , а к изменениям $H_c$ и $N$ – по модулю близка к 1. Поэтому зависимости $B_r(T_{отж})$ повторяют зависимости $H_c(T_{отж})$ в [8–16].

В [20] определены условия, при которых намагниченность насыщения материала может быть измерена с заданной погрешностью на образце конечных размеров в открытой магнитной цепи. В [21] показано, почему остаточная намагниченность ферромагнитного материала не может быть определена по результату измерения остаточной намагниченности образца конечных размеров в открытой магнитной цепи ни при каких условиях.

Проведенный анализ показал, что разница в результатах измерения максимальной магнитной проницаемости $\mu_m$ в [20] и [6] с уменьшением $H_c$ сталей 30 и 45, отпущенных при разных температурах, возрастает с 32 до 97%. Это находится за пределами возможных в соответствии с [17, 18] погрешностей ±5% измерения $\mu_m$. Причина этого в том, что экспериментальные исследования

магнитных параметров углеродистых сталей в [22] (как и в [23–25]) проведены «баллистически, путем сбрасывания катушки с образца» в разомкнутой магнитной цепи на образцах размером 64x8x8 мм. Единственным магнитным параметром материала, измерение которого допускается в открытой магнитной цепи, является $H_c$ [17, 18]. При соблюдении определенных условий максимальная намагниченность $M_m$ ферромагнитного тела практически не отличается от $M_s$ материала [26]. Но результаты измерения $\mu_m$ образцов такого размера в разомкнутой магнитной цепи не соответствуют $\mu_m$ сталей [27]. Более того – расчет $\mu_m$ сталей по формулам [19] по результатам измерения $\mu_m$ образцов с $N = 0{,}025$ невозможен при достижимой [16, 17] точности измерения $\mu_m$ образцов. Примененная авторами [20–23] методика измерения $\mu_m$ («для уменьшения размагничивающего действия концов образца к нему приставлялись надставки из мягкого железа»), не позволила получить достоверные результаты при измерении $\mu_m$ углеродистых сталей. Использование «надставок», размеры и магнитные свойства которых не указаны, не позволяет использовать представленные в [20–23] результаты измерения $\mu_m$ образцов с «надставками» и для расчета $\mu_m$ углеродистых сталей. Тем не менее, полученные в [20–23] результаты измерения $\mu_m$ вплоть до настоящего времени представлены в научной, учебной и справочной литературе как магнитные свойства углеродистых сталей (см., например, [4, рис.10–12], [22, рис.12–14], [2, рис.2.5, 2.13а, 2.24а], [7, рис.12.5, 12.13.а, 12.24.а]). Проведенный с их использованием анализ характера и причин изменения магнитных параметров углеродистых сталей при закалке и отпуске не делает эти результаты (как и результаты их анализа) более достоверными. Разные аспекты этой проблемы рассмотрены автором так же в [26–31].

**Выводы**

1. Известные справочные данные о результатах измерения остаточной намагниченности $M_r$ (остаточной индукции $B_r$), начальной $\mu_a$ и максимальной $\mu_m$ магнитных проницаемостей сталей, не всегда достоверны. В ряде установленных случаев в справочниках, монографиях и научных статьях приведены результаты измерения этих параметров на образцах разных размеров в разомкнутой магнитной цепи (иногда – с «надставками» из магнитомягкого материала), которые не соответствуют значениям $M_r$, $\mu_a$ и $\mu_m$ материалов. Особенностями таких результатов являются:

– одинаковая или близкая функциональная зависимость параметров $B_r$ и $H_c$ от технологического режима получения материала и значения $M_r$, выходящие за пределы теоретически возможного диапазона их изменения;

– заниженные значения $\mu_m$ и относительно не большой диапазон ее изменения при изменении технологических факторов;

– нарушения требований ГОСТа [17] при измерениях $\mu_a$ ряда сталей привели к получению аномально высоких значений $\mu_a$, не свойственных материалам с измеренной величиной $H_c$.

2. Остаточная намагниченность $M_r$ ферромагнитных материалов не может быть рассчитана с необходимой точностью по остаточной намагниченности $M_d$ изделий в открытой магнитной цепи. Причина этого в низкой чувствительности $M_d$ изделий из таких материалов к $M_r$ их материала.

3. Перед использованием справочных данных о результатах измерения магнитных параметров сталей следует выяснить методику и погрешности измерения данных, сопоставить результаты измерения магнитных параметров стали и параметров сталей с близкими химическими свойствами и технологией получения. Необходимо проверить соответствие численного значения магнитного параметра возможному диапазону его изменения для сталей рассматриваемого класса, монотонность (отсутствие резких скачков) изменения свойств сталей при монотонном изменении параметров режимов их получения.

**Список литературы**


1. Вонсовский, С.В. Магнитный структурный анализ / С.В. Вонсовский, М.Н. Михеев // Заводская лаборатория. – 1957. – № 10. – С. 1221–1226.

2. Михеев, М.Н. Магнитные методы структурного анализа и неразрушающего контроля / М.Н. Михеев, Э.С. Горкунов. – М.: Наука, 1993. – 252 с.

3. Сандомирский, С.Г. Современные возможности магнитного контроля структуры изделий (обзор) / С.Г. Сандомирский // В мире неразрушающего контроля. – 2009. – №1. – С. 40–46.

4. Михеев, М.Н. Магнитные и электрические свойства стали после различных видов термообработки / М.Н. Михеев, В.М. Морозова. – М.: ОНТИ ЦНИИКА. 1964. – 46 с.

5. Магнитные и электрические свойства конструкционных и низколегированных сталей / Белов Н.Я. [и др.] – Л.: Ленинградский дом научно-технической пропаганды. 1969. – 36 с.

6. Бида, Г.В. Магнитные свойства термообработанных сталей / Г.В. Бида Г.В., А.П. Ничипурук. – Екатеринбург: УрО РАН, 2005. – 218 с.

7. Неразрушающий контроль. Справочник: В 8 т. / Под ред. В.В. Клюева. Т.6: В 3 кн. Кн.1. Магнитные методы контроля / В.В. Клюев [и др.]. М.: Машиностроение, 2006. – 848 с.

8. Мельгуй, М.А. Магнитный контроль механических свойств сталей / М.А. Мельгуй. – Мн.: «Наука и техника», 1980. – 183 с.

9. Мельгуй, М.А., Контроль механических свойств листового проката сталей магнитным методом / М.А. Мельгуй, А.А. Востриков, А.А. Збровский // Дефектоскопия. – 1971. – № 3. – С. 10–15.

10. Исследование возможности магнитного контроля качества отжига холоднокатаных листовых сталей 08Ю и 10 КП / М.А. Мельгуй [и др.] – // В кн. «Неразрушающие методы и средства контроля и их применение в промышленности» (Материалы первой Белорусской респ. научно – технической конференции). – Минск, 12–14 сентября 1973 г. – С. 91–97.

11. Неразрушающий контроль механических свойств сталей для глубокой штамповки / М.А. Мельгуй [и др.] – // Сталь. – 1977. – № 2. – С. 167–170.

12. Неразрушающий магнитный контроль малоуглеродистой холоднокатаной полосы и ленты / М.А. Мельгуй [и др.]. // Заводская лаборатория. – 1977. – № 5. – С. 581–583.

13. Мельгуй, М.А. Неразрушающий контроль качества отжига тонколистовой стали 65Г / М.А. Мельгуй, Э.А. Шидловская // В кн. «Новые физические методы и средства контроля промышленных изделий» (Тез. докл. второй Белорусской респ. научно – технической конференции). – Минск, 27–28 сентября 1978 г. – С. 30–35.

14. Шидловская, Э.А. Контроль отжига холоднодеформированных листовых сталей / Э.А. Шидловская // В кн. «Физические свойства металлов и проблемы неразрушающего контроля». – Мн.: Наука и техника, 1978. – С. 89–93.

15. Мельгуй, М.А. Контроль механических свойств среднеуглеродистых листовых сталей в состоянии поставки / М.А. Мельгуй, Э.А. Шидловская, Т.В. Оленович // Дефектоскопия. – 1980. – № 5. – С. 60–64.

16. Матюк, В.Ф. Влияние технологии производства листового проката низкоуглеродистых качественных сталей на их структурное состояние и взаимосвязь между механическими и магнитными свойствами (обзор) / В.Ф. Матюк // Неразрушающий контроль и техническая диагностика. – 2011. – № 1. – С. 3–29.

17. ГОСТ 8.377–80 Материалы магнитомягкие. Методика выполнения измерений при определении статических магнитных характеристик. М.: Изд. стандартов, 1986. – 21 с.

18. Магнитные измерения / Е.Т. Чернышев – М.: Изд. стандартов, 1969. – 248 с.

19. Сандомирский, С.Г. Чувствительность остаточной намагниченности ферромагнитных изделий к магнитным характеристикам их материалов и геометрическим параметрам / С.Г. Сандомирский // Дефектоскопия. – 1990. – № 12. – С.53–59.

20. Сандомирский, С.Г. Выбор величины намагничивающего поля при магнитоструктурном анализе ферромагнитных изделий / С.Г. Сандомирский // Дефектоскопия. – 1991. – № 7. – С. 42–48.

21. Сандомирский, С.Г. Анализ возможностей измерения остаточной намагниченности ферромагнитного материала в открытой магнитной цепи / С.Г. Сандомирский // Метрология. – 2010. – № 3. – С. 33–41.

22. Морозова, В.М. Магнитные и электрические свойства закаленных и отпущенных углеродистых сталей / В.М. Морозова, М.Н. Михеев // Сб. «Об электромагнитных методах контроля качества изделий». Труды ИФМ АН СССР. – Вып. 24. – 1965. – С. 26–35.

23. Михеев, М.Н. Магнитные и электрические свойства стали после различных видов термообработки / М.Н. Михеев, В.М. Морозова. – М.: ОНТИ ЦНИИКА. 1964. – 46 с.

24. Морозова, В.М. Магнитные и электрические свойства сталей после различных термических обработок / В.М. Морозова, М.Н. Михеев // Сб. «Об электромагнитных методах контроля качества изделий». Труды ИФМ АН СССР. – Вып. 24. – 1965. – С. 3–25.

25. Морозова, В.М. Магнитные и электрические свойства закаленных и отпущенных углеродистых сталей / В.М. Морозова, М.Н. Михеев // Сб. «Об электромагнитных методах контроля качества изделий». Труды ИФМ АН СССР. – Вып. 24. – 1965. – С. 26–35.

26. Сандомирский, С.Г. Анализ погрешности измерения магнитной проницаемости ферромагнитного материала в открытой магнитной цепи / С.Г. Сандомирский // Измерительная техника. – 2010. – № 9. – С. 57–61.

27. Сандомирский, С.Г. Анализ возможности измерения остаточной намагниченности ферромагнитного материала в открытой магнитной цепи / С.Г. Сандомирский // Метрология. – 2010. – № 3. – С. 33–41.

28. Сандомирский, С.Г. О необходимости корректировки некоторых справочных данных о магнитных свойствах сталей / С.Г. Сандомирский // Сталь. – 2011. – № 5. – С. 78–82.

29. Сандомирский, С.Г. О результатах исследования влияния температуры отжига на остаточную намагниченность сталей / С.Г. Сандомирский // Неразрушающий контроль и диагностика. – 2016. – № 3. – С. 14–37.

30. Клюев, В.В. Анализ и синтез структурочувствительных магнитных параметров сталей / Клюев В.В., С.Г. Сандомирский – М.: Изд. дом «СПЕКТР», 2017. – 248 с.

31. Сандомирский, С.Г. О причинах возникновения и предотвращении использования в магнитном структурном анализе неверных данных о магнитных свойствах сталей / С.Г. Сандомирский // Доклад XXXVII Уральской конференции с международным участием «Физические методы неразрушающего контроля (Янусовские чтения)», 18–19 марта 2026 г., Екатеринбург. Эл. рес.: https://https://conf.defectoskopiya.ru/event/6/page/64-7

Контакты:
sand@oim.by (Сандомирский Сергей Григорьевич)

УДК 620.179.14

***С. Г. САНДОМИРСКИЙ**, д-р техн.наук, доц.*
Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси (Минск, Беларусь*)*

# МЕТОДИКИ КОНТРОЛЯ РЕЖИМА ОТПУСКА ИЗДЕЛИЙ ИЗ СРЕДНЕУГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИЗМЕРЕНИЯ ИХ МАГНИТНЫХ ПАРАМЕТРОВ В ЗАМКНУТОЙ МАГНИТНОЙ ЦЕПИ

**Аннотация.** Доклад посвящен магнитному структурному анализу сталей. Коэрцитивная сила $H_c$ сталей с содержанием углерода более 0,3% неоднозначно зависит от их температуры $T_o$ отпуска после закалки. Поэтому важна разработка достоверного метода неразрушающего контроля качества термической обработки изделий из таких сталей. В докладе проведен расчёт и анализ относительных погрешностей определения магнитных параметров сталей, сформированных из их коэрцитивной силы $H_c$ и отношения $K_r$ остаточной намагниченности $M_r$ к намагниченности $M_s$ технического насыщения, с учетом погрешностей измерения $H_c$ и $K_r$ при измерении по стандартным методикам в замкнутой магнитной цепи и погрешностей, вносимых математическими операциями расчета. Сопоставлены возможности сформированных параметров при контроле температуры $T_t$ отпуска среднеуглеродистых сталей в важном диапазоне ее изменения.

**Ключевые слова:** магнитный структурный анализ, среднеуглеродистые стали, магнитные свойства, коэрцитивная сила, остаточная намагниченность, намагниченность технического насыщения.

Магнитные свойства сталей связаны с их структурным состоянием ($H_c$, $M_r$) и фазовым составом ($M_s$) [1]. Относительные погрешности $\delta_{Hc}$ и $\delta_{Mr}$, $\delta_{Ms}$ измерения $H_c$ и $M_r$, $M_s$ составляют ±2% и ±3%, а относительная погрешность $\delta_{Kr}$ определения отношения $K_r = M_r/M_s$ при измерении $M_r$ и $M_s$ одной и той же аппаратурой не превышает ±1% [2]. Для многих сталей $H_c$ наиболее чувствительна к изменениям их структуры [3]. Но $H_c$ оказалась не пригодна для контроля температуры $T_t$ отпуска и твердости HRC закаленных изделий из сталей с содержанием углерода более 0,3% (табл. 1) из-за ее слабой и неоднозначной зависимости от $T_t$ в области 350÷550°C [3].

Табл. 1. Магнитные свойства сталей 30 и 40Х, отпущенных при $350^oC \le T_t \le 550^oC$ по [3]

| $T_t$, °C | Сталь 30, Табл.1.1 в [3] | | | | Сталь 40Х, Табл.26.2 в [3] | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | HRC | $H_c$, А/м | $M_r$, кА/м | $M_s$, кА/м | HRC | $H_c$, А/м | $M_r$, кА/м | $M_s$, кА/м |
| 350 | 41 | 1130 | 1070 | 1650 | 48 | 1440 | 852 | 1651 |
| 400 | 38 | 995 | 1145 | 1643 | 46.5 | 1320 | 915 | 1650 |
| 450 | 34 | 873 | 1248 | 1645 | 43 | 1220 | 1050 | 1648 |
| 500 | 32 | 876 | 1265 | 1648 | 40 | 1150 | 1186 | 1643 |
| 550 | 26 | 866 | 1277 | 1639 | 37 | 1200 | 1214 | 1638 |

Но многие ответственные изделия изготавливают из таких сталей, изделия подвергают отпуску в этом интервале температур. Поэтому разработка достоверного метода неразрушающего контроля термической обработки

изделий из таких материалов стала важной задачей магнитного структурного анализа.

Предложенные для ее решения «релаксационные» параметры сталей [3], их «критическое поле» [4, 5], поле, при котором магнитная проницаемость материала максимальна, приводят к большой погрешности и сложности измерений [6]. Автором предложено формировать параметры сталей, чувствительные к изменениям их структуры и физико-механических свойств, из параметров предельной петли магнитного гистерезиса [7–9].

**Цель статьи** – расчёт и анализ относительных погрешностей определения магнитных параметров, сформированных из параметров $H_c$ и $K_r$ предельной петли гистерезиса сталей, с учетом погрешностей, вносимых математическими операциями расчета. Сопоставление возможностей сформированных параметров для контроля температуры отпуска среднеуглеродистых сталей.

Рассмотрим параметры, сформированные в [7–9] из результатов измерения параметров $H_c$ и $K_r$ (которые могут быть измерены с минимальной относительной погрешностью $\delta$):

$$H_0 = H_c / tg(0{,}5\pi K_r), \tag{1}$$

$$H_{c1} = H_c (1 - K_r)^2, \tag{2}$$

$$H_k = H_c (1 - K_r) / K_r . \tag{3}$$

Для расчета погрешностей алгоритмов (1)–(3), вносимых математическими операциями обработки результатов измерения магнитных параметров, воспользуемся формулами [10]. С их использованием получены следующие формулы для расчета относительных погрешностей $\delta_{Ho}$ (4), $\delta_{Hc1}$ (5) и $\delta_{Hk}$ (6), вносимых алгебраическими операциями алгоритмов (1), (2) и (3):

$$\delta_{H_0} = \delta_{H_C} + \frac{\pi K_r}{\sin(\pi K_r)} \delta_{K_r} , \tag{4}$$

$$\delta_{H_{C1}} = \delta_{H_C} + \frac{2K_r}{1 - K_r} \delta_{K_r} , \tag{5}$$

$$\delta_{Hk} = \delta_{H_C} + \frac{1}{1 - K_r} \delta_{K_r} . \tag{6}$$

Их анализ показал (рис. 1), что в возможном диапазоне изменения $K_r$ относительные погрешности определения $H_0$, $H_{c1}$, $H_k$ изменяются от 3,5 % при $K_r$ = 0,4 до 7 % при $K_r$ = 0,8. Это в 2÷16 раз меньше погрешностей измерения релаксационной намагниченности и намагниченности коэрцитивного возврата сталей [9]. Наименьшую погрешность расчета при заданном $K_r$ вносит алгоритм $H_0$ . Результаты применения алгоритмов (1)–(3) для контроля температуры

отпуска $T_t$ сталей 30 и 40Х в практически важном диапазоне ее изменения $350^oC \le T_t \le 550^oC$ приведены на рис. 2.

**Обсуждение результатов**

Однозначная монотонная связь с температурой $T_t$ отпуска и не высокая погрешность определения проанализированных параметров $H_0$, $H_{c1}$ и $H_{c1}$ – физическая основа их эффективного использования для магнитной структуроскопии среднеуглеродистых сталей.

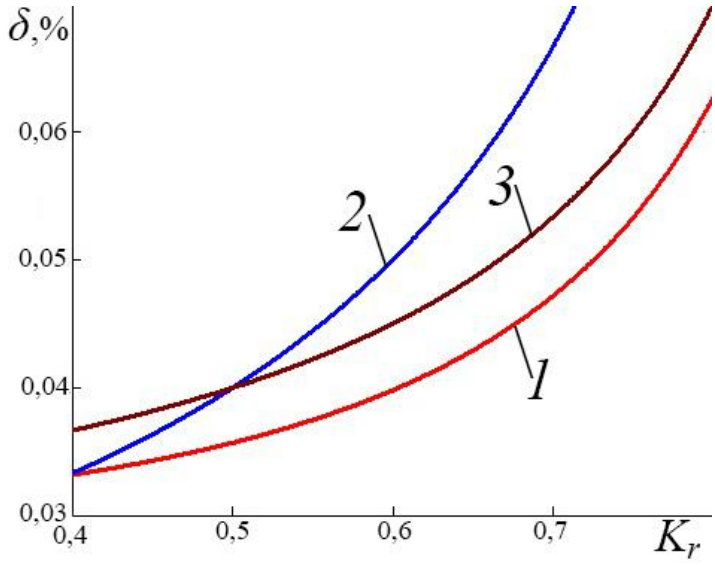
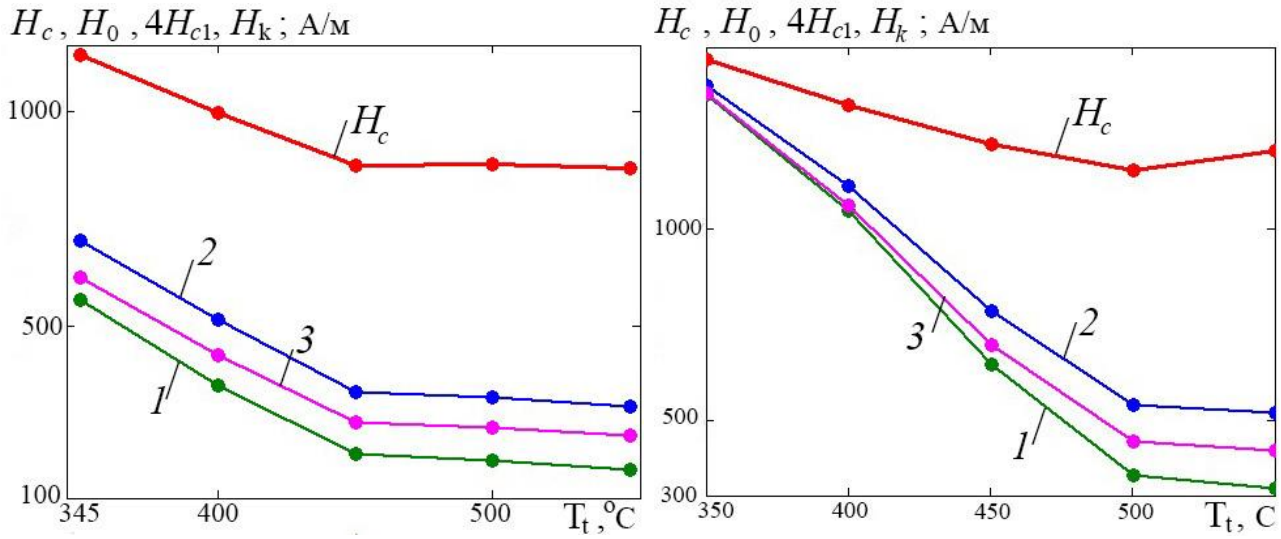



Рис. 1. Зависимость относительной погрешности δ расчета параметров $H_0$ (1), $H_{c1}$ (2) и $H_k$ (3) от $K_r = M_r/M_s$. Расчет соответственно по (4), (5) и (6) при $\delta_{Hc}$ = 2%, $\delta_{Kr}$ =1%




а) б)

Рис. 2. Зависимость коэрцитивной силы $H_c$ и алгоритмов $H_0$ (*1*), $H_{c1}$ (*2*) и $H_k$ (*3*) стали 30 (а) и 40Х (б) от температуры $T_t$ отпуска. Расчет по (1), (2) и (3) по данным табл. 1

**Выводы:** Предложенные для контроля температуры $T_t$ отпуска среднеуглеродистых сталей параметры $H_0$, $H_{c1}$ и $H_k$ , сформированные из $H_c$ и отношения $K_r$ их материала, в практически важном диапазоне изменения магнитных свойств сталей могут быть определены по разработанным алгоритмам с относительной погрешностью δ от 3 % до 8%. Это в 2,34 ÷ 16,2 раз меньше, чем δ измерения релаксационных магнитных параметров сталей. Параметры $H_0$, $H_{c1}$ и $H_k$ однозначно зависят от температуры $T_t$ отпуска сталей 30 и 40Х и обладают высокой чувствительностью к ее изменениям. Результаты позволяют при разработке методов и приборов магнитной структуроскопии изделий из среднеуглеродистых сталей сосредоточить внимание на повышении точности измерения $H_c$ и $K_r$ материала изделий и отказаться от сложных и неточных измерений релаксационных магнитных параметров.

**Список литературы**


1. Неразрушающий контроль. Справочник: В 8 т. / Под общ. ред. В.В. Клюева. Т.6: В 3 кн. Кн.1. В.В. Клюев [и др.]. Магнитные методы контроля. М.: Машиностроение, 2006. 848 с.
2. Магнитные измерения / Чернышев Е.Т. [и др.]. – М.: Изд. стандартов, 1969. 248 с.
3. Бида, Г.В. Магнитные свойства термообработанных сталей / Г.В. Бида, А.П. Ничипурук. – Екатеринбург: УрО РАН, 2005. 218 с.
4. Сербин, Е.Д. О возможности оценки магнитострикционных характеристик объемных ферромагнетиков по их магнитным свойствам / Е.Д. Сербин, В.Н. Костин // Дефектоскопия. – 2019. – № 5. – С. 31–36.
5. Сербин, Е.Д. Определяемые формой петли гистерезиса критические поля, как перспективные параметры структуроскопии стальных изделий / Е.Д. Сербин, В.Н. Костин // XXIII Всероссийская конференция по неразрушающему контролю и технической диагностике. Сборник трудов. 23–25 октября 2023 г. М.: Изд. дом «Спектр», 2023. – С. 68–72.
6. Сандомирский, С.Г. Анализ структурной чувствительности магнитных параметров сталей, имеющих размерность напряженности магнитного поля / С.Г. Сандомирский // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы межд. науч.-техн. конф. / М-во образования Респ. Беларусь, М-во науки и высшего образования Рос. Федерации, Бел.-Рос. ун-т; редкол.: М.Е. Лустенков (гл. ред.) [и др.]. – Могилев: Бел.-Рос. ун-т, 2024. – 507 с.: ил. ISBN 978-985-492-306-2. – С. 310–311.
7. Сандомирский, С.Г. Сравнение результата применения математических алгоритмов для магнитной структуроскопии сталей / С.Г. Сандомирский // Сборник трудов XXIV Всероссийской конференции по неразрушающему контролю и технической диагностике «Неразрушающий контроль 21 века: стратегия технологий и разума», 13-15 мая 2026 г., г. Москва. – ООО «Издательский дом «Спектр». – С. 325–329.
8. Сандомирский, С.Г. Использование параметров предельной петли гистерезиса для синтеза структурочувствительных магнитных параметров сталей / С.Г. Сандомирский // Контроль. Диагностика. – 2017. – № 11. – С. 26–31.
9. Клюев, В.В. Анализ и синтез структурочувствительных магнитных параметров сталей / В.В. Клюев, С.Г. Сандомирский. – М.: Изд. дом «СПЕКТР», 2017. 248 с.
10. Мастяева, И.Н. Численные методы: Учебное пособие / И.Н. Мастяева, О.Н. Семенихина. – М.: Московский международный институт эконометрики, информатики, финансов и права, 2004. 103 с.



Контакты:
sand_work@mail.ru (Сандомирский Сергей Григорьевич)

УДК 620

*Д. А. **СЛЕСАРЕВ**[1], д-р техн. наук, доц.*
***Н. А. СЛЕСАРЕВА**[2]*
[1] ООО «ИНТРОН ПЛЮС» (Москва, Россия),
[2] ООО «ИНТРОН-ВТД», Москва

# ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ КРИТИЧНОСТИ ДЕФЕКТОВ СТАЛЬНЫХ КАНАТОВ ПРИ ИХ МАГНИТНОЙ ДЕФЕКТОСКОПИИ

**Аннотация.** Стальные канаты применяются в различных сферах промышленности и в том числе на опасных промышленных объектах. Одним из главных критериев браковки канатов является число оборванных проволок на заданную длину, как правило, 6D и 30D (D — диаметр каната). При этом особенно сложным является определение числа оборванных проволок в локальном скоплении. В настоящем докладе рассматривается возможность применения искусственных нейронных сетей для анализа дефектограмм магнитного дефектоскопа с целью оценки числа обрывов в скоплении. Исследуются различные типы и архитектура нейронной сети, а также особенности выбора первичных признаков и процесса обучения сети.

**Ключевые слова:** нейронные сети, машинное обучение, стальные канаты.

## Введение

Стальные канаты широко используются в различных отраслях промышленности как несущий элемент подъемных и транспортных установок или строительных конструкций. Срок службы и надёжность стального каната зависит от его технического состояния, поэтому регулярное обследование каната является ключевым фактором обеспечения безопасности таких установок и сооружений, и обеспечения экономически эффективной их эксплуатации за счёт планирования операций по замене канатов. В соответствии с российскими и международными техническими нормативами, например, ISO 4309 [1] и РД 03-348-00 [2], основными критериями браковки стальных канатов являются: величина потери металлического сечения каната и количество обрывов проволок на заданную длину каната, как правило, 6D и 30D, где D — диаметр каната. Наиболее распространенным и хорошо зарекомендовавшим себя методом диагностики канатов является магнитная дефектоскопия [3], позволяющая измерять величину потери сечения (ПС) и обнаруживать локальные дефекты (ЛД), такие как одиночные и скопления обрывов проволок. При оценке состояния каната наиболее сложным оказывается оценка числа обрывов проволок в скоплениях (Рис. 1), при том что такие участки каната представляют наибольшую опасность, поскольку являются наиболее вероятном местом потенциального обрыва каната. Правильная оценка числа дефектов требует совместного анализа различных измерительных канатов дефектоскопа (ПС, ЛД, отдельных датчиков), знания конструкции и режима нагрузки каната и выполняется, как правило, опытным экспертом. В настоящем докладе описывается возможное решение этой задачи

с применением искусственных нейронных сетей (далее — нейросетей) и оценивается результат этого решения.

Рис. 1. Участок каната с множественными обрывами проволок

## 1. Анализ поставленной задачи

При магнитной дефектоскопии стальных канатов основную информацию об обрывах проволок несёт измерительный канал ЛД, с его помощью отдельные обрывы чётко идентифицируются и имеют характерную форму сигнала, однако при наличии нескольких близлежащих дефектов форма сигнала существенно усложняется, не позволяя идентифицировать каждый обрыв в отдельности. Так на рис. 2 приведены дефектограммы каналов ЛД и ПС, где на дистанции 72,6 — 72,85 м имеется сигнал от скопления (более 5) дефектов, на дистанции 73,25 м - сигнал от одиночного обрыва.

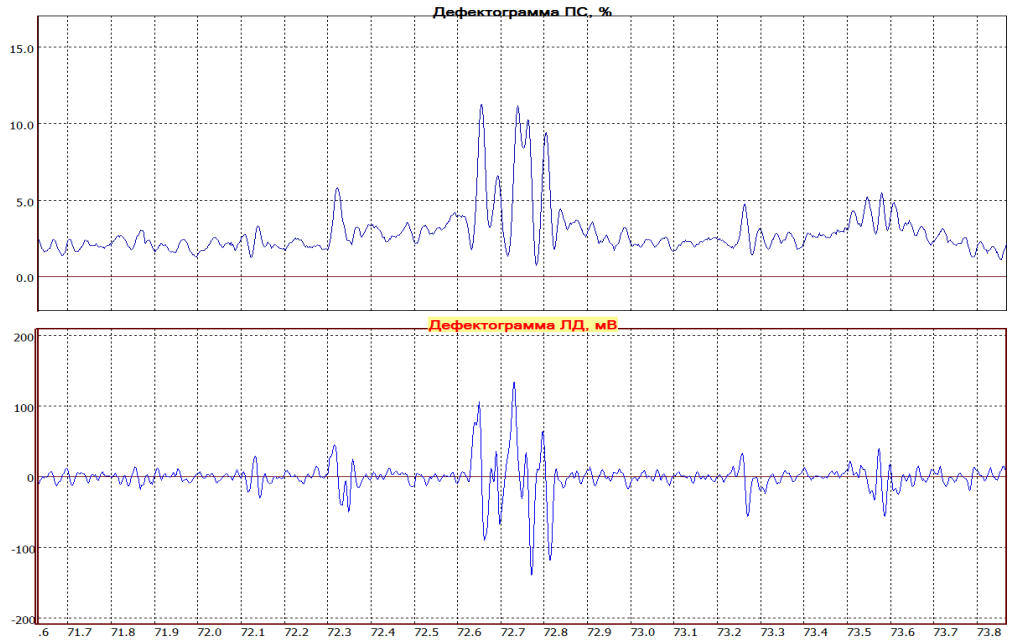
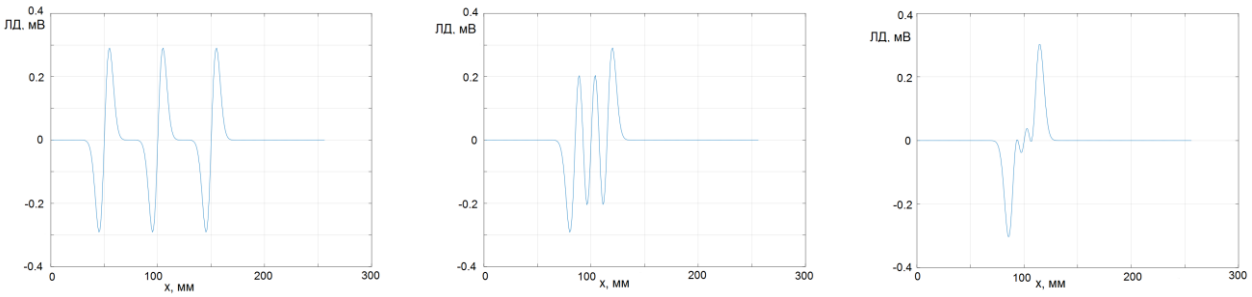



Рис. 2. Дефектограммы ЛД и ПС участка каната с множественными обрывами проволок (получены дефектоскопом Интрос МГ 6-24)

При намагничивании каната до насыщения поток магнитной индукции поля рассеяния над дефектом является пропорциональным эквивалентному суммарному сечению оборванных проволок и, соответственно, величина сигнала по каналу ПС также будет зависеть от их суммарного сечения. В связи с этим сигнал по ПС можно дополнительно использовать для оценки числа оборванных проволок.

Следует также учитывать, что форма и амплитуда сигнала от близлежащих обрывов по каналу ЛД зависит от расстояния между отдельными обрывами, а также от расстояния между концами оборванных проволок. Было проведено аналитическое моделирование сигналов ЛД (LF) от трёх близлежащих одинаковых обрывов с фиксированным зазором между концами проволок (3 мм) на канате диаметром 16 мм для измерительной системы дефектоскопа Интрос при различном расстоянии между обрывами: 50 мм, 20 мм и 15 мм. Результаты моделирования показаны на рис. 3. Как видно из графиков, сигнал от обрывов на расстоянии 50 мм друг от друга четко разделены (см. рис. 3,а) и могут быть точно оценены (по амплитуде). При снижении расстояния между обрывами до 20 мм амплитуда импульса от среднего обрыва примерно на 30 % ниже, чем амплитуда импульсов соседних обрывов (см. рис. 3,б). При уменьшении расстояния между обрывами до 15 мм сигнал от серединного обрыва практически исчезает, а сигналы от первого и последнего становятся однополярными (см. рис. 3,в), что может привести к ошибочной их интерпретации, в частности такой вид может иметь сигнал от обрыва с большим расстоянием между концами проволок (в данном случае - 30 мм).



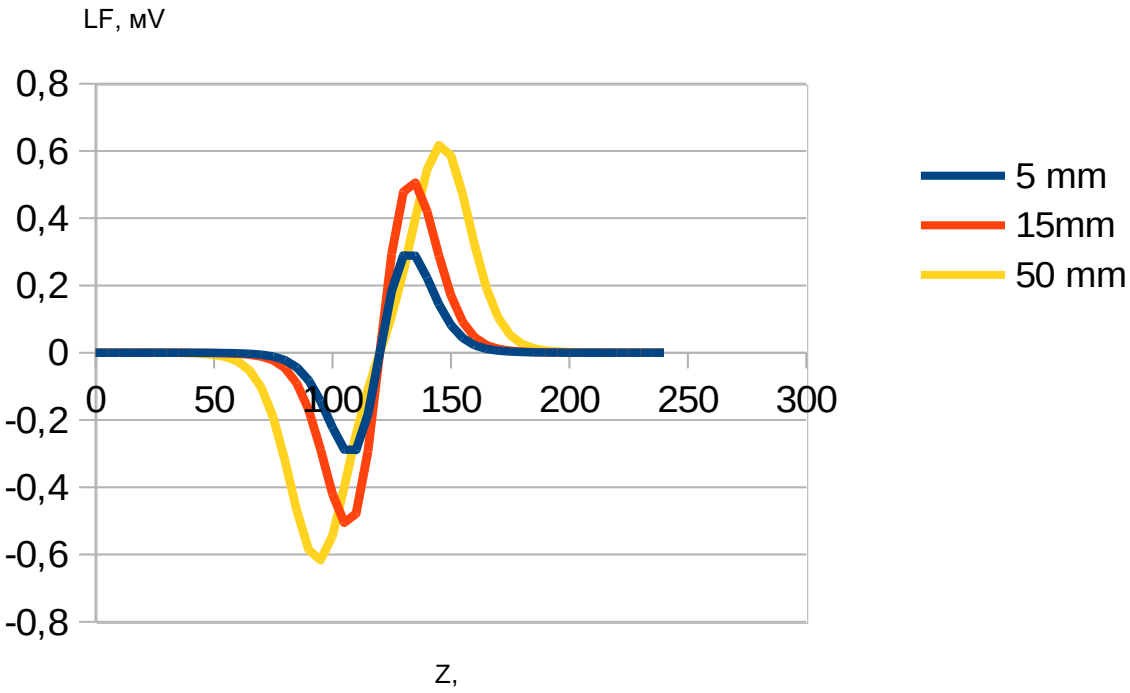

а б в

Рис. 3. Сигнал канала ЛД от двух близлежащих дефектов при расстоянии между ними: 50 мм (а), 20 мм (б), 15 мм (в)

В то же время обрывы проволок обуславливают небольшие сигналы по каналу ПС, амплитуда и вид которых зависит как от характеристик самих обрывов, так и от измерительной системы дефектоскопа. Было проведено численное моделирование сигналов по каналам ЛД (LF) и ПС (LMA) для обрывов проволок одинакового поперечного сечения и различным зазором между концами. На рис. 4 показаны графики, построенные по результату проведенного моделирования для обрыва проволоки эквивалентного поперечного сечения 0,5 %, расположенного по центру каната диаметром 40 мм. Зазоры между концами проволоки: 5 мм, 15 мм и 50 мм. Как следует из

графиков, амплитуда сигналов ЛД в зависимости от зазора изменяется более, чем в 2 раза.

Амплитуда сигнала по каналу ПС также зависит от величины зазора, для 50 мм она почти в 2 раза больше, чем для 5 мм, при этом для 50 мм максимальное значение ПС практически соответствует реальной величине относительного сечения оборванной проволоки. При обрыве двух проволок в одном сечении сигнал по каналам ЛД и ПС пропорционально возрастёт. Следует отметить, что зависимость амплитуды сигнала от зазора для разных магнитных головок (МГ) различная. Тем не менее, для конкретной МГ совместный анализ сигналов по каналам ЛД и ПС позволяет сделать оценку числа оборванных проволок.



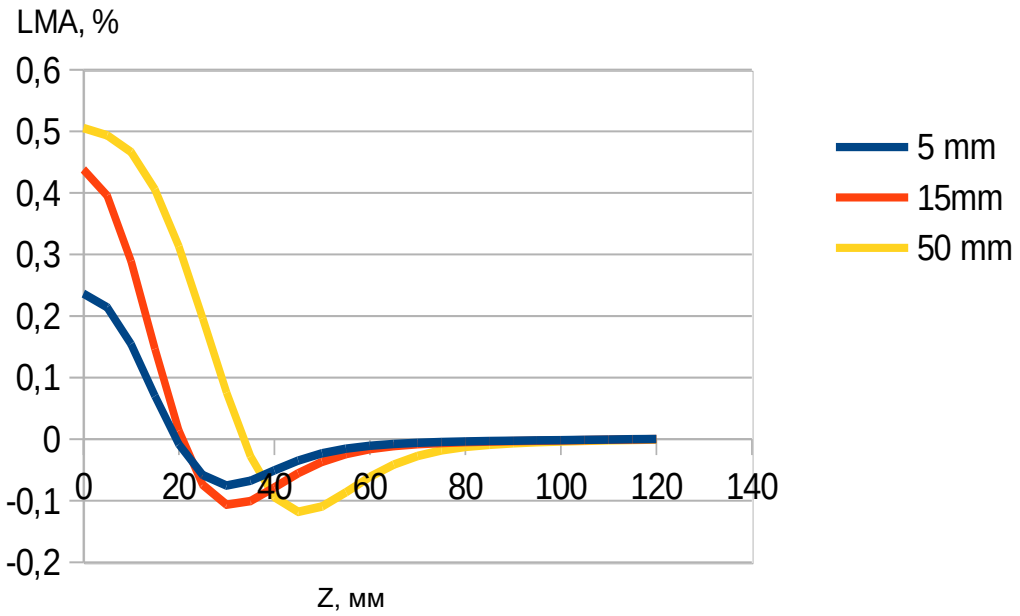



Рис. 4. Моделирование сигналов каналов ЛД и ПС от обрыва проволоки с зазорами между концами 5 мм, 15 мм, 50 мм

В реальном скоплении обрывов проволок зазоры между концами проволок, их ориентация и расстояние между отдельными обрывами неизвестны, поэтому точная оценка числа обрывов в скоплении невозможна, возможна только вероятностная оценка на основании магнитной дефектоскопии и с учётом конструкции и условий эксплуатации каната. Для осуществления такой оценки предлагается использовать искусственную нейронную сеть.

## 2. Применение нейросетей для оценки числа обрывов в скоплении

Искусственные нейронные сети хорошо зарекомендовали себя в задачах обработки гетерогенных данных, в частности при решении задачи регрессии, в связи с этим они представляются хорошим кандидатом для оценки числа обрывов в скоплениях на основе комбинации дефектограмм ЛД и ПС и учёта дополнительных параметров каната. Известные публикации по применению нейронных сетей для анализа результатов магнитной дефектоскопии были посвящены решению задачи классификации и обнаружения дефектов с применением дополнительно вейвлет-анализа [4]. Дефектограммы при этом преобразовывались в двумерные вейвлет-образы и нейронная сеть использовалась для обработки изображений. Такого рода обработка является весьма ресурсоёмкой, что ограничивает возможность ее широкого применения в рамках ПО на обычном локальном ПК клиента. При этом обрабатывались лишь сигналы отдельных дефектов, но не их скоплений.

При выборе подхода к решению поставленной задачи необходимо учитывать, что использование непосредственно исходных сигналов в качестве входных данных приводит к низкой робастности нейросети [5], небольшие возмущения входных данных могут приводить к значительным отклонениям результата. Поэтому было принято решение проводить предварительную обработку сигналов по каналам ЛД и ПС с целью выделения первичных признаков, а затем уже вектор первичных признаков использовать в качестве входного для нейросети. Всего было выделено 12 первичных признаков, в числе которых: абсолютный максимум ЛД, абсолютный минимум ЛД, абсолютный максимум ПС, число локальных максимумов по ЛД, число локальных максимумов по ПС, протяженность области сигнала и другие. На основании дисперсионного анализа на обучающей выюборке было отобрано 8 наиболее независимых признаков. Для решения поставленной задачи оценки числа обрывов в скоплении быои рассмотрены два типа нейросети: многослойный персептрон (MLP) и радиально-базисная сеть (RBF) [5]. Оба типа нейросети широко применяются для решения задачи регрессии.

Исследуемая выборка была сформирована по результатам обследования 16 различных объектов (канатов канатных дорог, подъемных кранов, талевых канатов буровых установок), контроль выполнялся 7 различными дефектоскопами (в зависимости от диаметра каната), всего было выявлено и

классифицировано 130 дефектов в виде скоплений обрывов проволок. Вся выборка была разделена на три части: обучающую, тестирующую и валидационную. Авторами были исследованы различные архитектуры выбранных нейросетей. Число входных нейронов варьировалось от 6 до 8, число нейронов в скрытом слое - от 5 до 12.

Также использовались различные функции активации. Приведенные результаты для MLP сети соответствуют функции активации в виде гиперболического синуса для скрытого слоя и ReLU – для выходного слоя. Для обучения сети использовался квази-ньютеновский алгоритм (BFGS). Качество получившейся сети оценивалось по средней ошибке предсказания и максимальной относительной ошибке предсказания. Кроме этого для оценки робастности сети использовалась вариация ошибки, определяемая путем случайного возмущения начальных условий обучения. Результаты обучения представлены в Таблице 1. Число входных нейронов изменялось путем удаления признаков, дающих наименьший вклад в финальный результат на обученной нейросети. Обучение проводилось как на полной исходной выборке, так и на усечённой выборке, из которой были удалены экстремальные значения, встречающиеся на практике крайне редко (например, 40 обрывов в скоплении). Как видно из таблицы, наилучший результат был получен для сети с 6 входными нейронами, дальнейшее сокращение числа входных признаком приводит к росту средней ошибки. Число скрытых нейронов 5 и 8 дают примерно одинаковый результат, при этом сеть с 8 скрытыми нейронами оказывается менее робастной, вероятно, из-за ограниченности обучающей выборки. По мере дообучения сети с ростом объема выборки можно ожидать повышения робастности.

Таблица 1 Сравнения результат обучения многослойного персептрона

| Архитектура сети | Средняя ошибка оценки | Максимальная относительная ошибка оценки | Вариация ошибки |
|---|---|---|---|
| MLP 8-8-1 | 1,0 | 20% | 20% |
| MLP 8-5-1 | 1,1 | 25% | 15% |
| MLP 8-8-1 (усечённая выборка) | 0,5 | 40% | 15% |
| MLP 7-8-1 (усечённая выборка) | 0,38 | 40% | 25% |
| MLP 6-5-1 (усечённая выборка) | 0,3 | 55% | 40% |
| MLP 6-8-1 (усечённая выборка) | 0,32 | 60% | 60% |
| MLP 6-12-1 (усечённая выборка) | 0,35 | 70% | 50% |
| MLP 5-8-1 (усечённая выборка) | 1,3 | 50% | 40% |

В Таблице 2 прведены результаты обучения радиально-базисной сети с разной архитектурой. Было проведено обучение нейросети с 8 и 12 скрытыми нейронами. Увеличение числа скрытых нейронов приводит к снижению

ошибки сети, но робастность остается очень низкой. Таким образом, радиально-базисная сеть значительно уступает многослойному персептрону при оценке числа обрывов на основе выделенных информационных признаков сигналов.

Таблица 2 Сравнения результат обучения радиально-базисной сети

| Архитектура сети | Средняя ошибка оценки | Максимальная относительная ошибка оценки | Вариация ошибки |
|---|---|---|---|
| RBF 8-8-1 | 3,5 | 50% | > 100% |
| RBF 8-12-1 | 2,1 | 50% | > 100% |
| RBF 8-12-1 (усечённая выборка) | 0,6 | 40% | > 100% |

Обученная нейронная сеть - многослойный персептрон, была реализована в рамках стандартного программного обеспечения Wintros для обработки данных дефектоскопов Интрос. На рис. 5 показан пример результата обработки дефектограммы каната с множественными обрывами проволок.

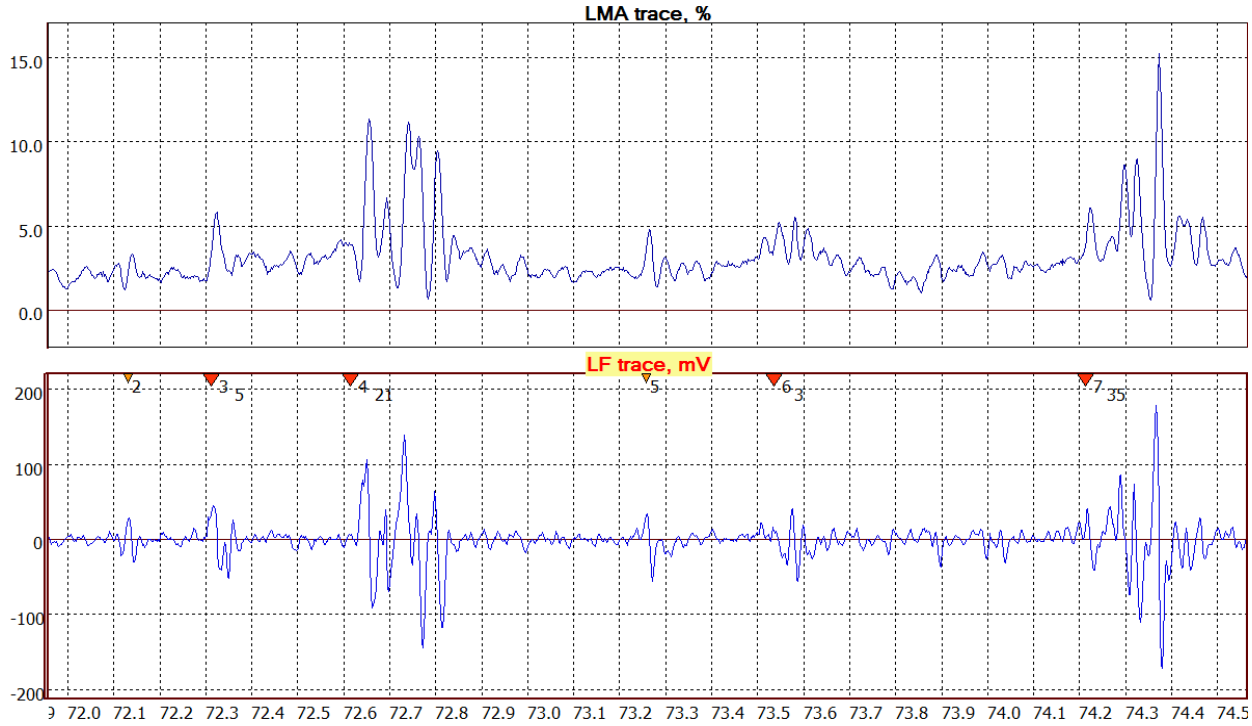



Рис. 5. Результат обработки дефектограммы каната с множественными обрывами проволок

Перевёрнутыми треугольниками по верхнему краю дефектограммы ЛД (LF trace) показаны обнаруженные дефекты, красные большие треугольники соответствуют скоплениям обрывов. Число обрывов указано чуть ниже номера дефекта справа. В частности, для дефекта с координатой 72,6 м нейросеть дала оценку - 21 оборванная проволока (экспертная оценка была - 24 проволоки). Следует отметить, что созданный алгоритм автоматической обработки

дефектограмм не требует больших вычислительных ресурсов. Так на стандартном ноутбуке с архитектурой Core i3 анализ дефектограммы каната длиной 1 км с примерно 100 дефектами занимает 2 - 4 секунды.

Использованная обучающая выборка была весьма ограниченной, что связано с тем, что дефектограммы предварительно должны быть обработаны опытным экспертом. По мере дополнения выборки будет проводиться дообучение сети, что приведет к необходимости актуализации параметров расчётного алгоритма. Поэтому параметры нейросети сохраняются в отдельном файле, который может обновляться при подключении приложения Wintros к серверу разработчика.

## 3. Заключение

Представленные в докладе результаты показывают возможности эффективного применения искусственной нейронной сети для решения задачи оценки числа обрывов в скоплениях при магнитной дефектоскопии стальных канатов. Сигналы измерительных каналов ЛД и ПС предварительно должны быть обработаны с целью вычисления первичных вектора признаков. Наилучший результат был получен с помощью многослойного персептрона при предварительной обработке обучающей выборки с целью устранения экстремальных значений. В итоге средняя ошибка оценки составила 1 проволоку. По мере накопления данных для улучшения качества оценки необходимо увеличивать число нейронов в скрытых слоях.

**Список литературы**

1. ISO 4309:2017 International standard. Cranes – Wire ropes – Care and maintenance, inspection and discard.

2. РД 03-348-00. Методические указания по магнитной дефектоскопии стальных канатов. Основные положения. - М.: Госгортехнадзор России, 2000.

3. Sukhorukov V., Slesarev D., Vorontsov A. Electromagnetic Inspection and Diagnostics of Steel Ropes: Technology, Cost-Effectiveness, Problems. – Materials Evaluation, 2014, No8, pp. 1019-1027.

4. S.Pernot, O.Reinelt, M.Hanimann. Wirelet 3: Deep leaning models for the automatic analysis of rope surface defects. - Proceedings of the OIPEEC Conference 2022, Stuttgart, Germany 2022, pp. 395-414

5. Haykin S. Neural networks: a comprehensive foundation. – N. Y., 1994.

Контакты:
slesarevda@mpei.ru (Слесарев Дмитрий Александрович);
nadja.slesareva@yandex.ru (Слесарева Надежда Александровна).

УДК 535.51

***Н. И. СТАСЬКОВ*[1]**, *канд. физ.-мат. наук, в. н. с.*
***С. О. ПАРАШКОВ*[2]**, *канд. физ.-мат. наук*
[1]БГУИР (Минск, Беларусь)
[2]Белорусско-Российский университет (Могилев, Беларусь)

# ОБОБЩЕННЫЙ ЭФФЕКТ БРЮСТЕРА В СПЕКТРАЛЬНОЙ ЭЛЛИПСОМЕТРИИ СЛОЯ ДИЭЛЕКТРИКА НА ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ ПОДЛОЖКЕ

**Аннотация:** Статья посвящена разработке и экспериментальной апробации резонансного метода определения толщины микронного слоя диэлектрика на полупроводниковой подложке с использованием спектральной эллипсометрии. В основе метода лежит явление обобщённого эффекта Брюстера. Показано, что из-за дисперсии показателей преломления слоя и подложки деструктивные интерференционные резонансы s и p-поляризованного света наблюдаются на двух длинах волн при одном угле падения. При этом только для p-поляризованного света выполняется обобщенный эффект Брюстера $(\theta_0 + \theta_t = 90)$. На точность определения толщины слоя влияет точность определения резонансных длин волн, которая зависит от шага изменения длины волны спектрального эллипсометра при измерении углов $\Delta(\theta,\lambda)$ и $\psi(\theta,\lambda)$.

**Ключевые слова:** спектральная эллипсометрия, обобщённый эффект Брюстера, оптический резонанс, тонкие диэлектрические плёнки, кремниевая подложка, деструктивная интерференция, толщина слоя.

**Введение.** Для моделирования структур фотоники с заданными характеристиками необходимо знать толщины $(d)$, спектры показателей преломления $n(\lambda)$ и поглощения $k(\lambda)$, ширину запрещенной зоны $E_g$ и энергию Урбаха каждого элемента. В настоящее время большое внимание уделяется созданию приборов и разработке экспресс-методик аналитического определения параметров ультратонких $(d \sim \lambda_0)$ планарных структур по угловым зависимостям эллипсометрических $(\Delta(\theta), \psi(\theta))$ и спектрофотометрических $(R_s(\theta),\ R_p(\theta))$ параметров монохроматического s и p-поляризованного света в области углов Брюстера [1]. Это направление в оптике называют монохроматической рефлектометрией (МР) из-за аналогии с известным методом монохроматической эллипсометрии (МЭ). При исследовании интерференционных слоев $(d \sim \lambda)$ эти методы сталкиваются с трудностями при определении толщины слоя.

В [2] теоретически и экспериментально метолами МР и МЭ доказано существование углов падения, при которых планарная структура не отражает s и p-поляризованный свет. По аналогии с явлением, открытым Брюстером $(R_p \to 0)$ для границы раздела двух сред с $\mu = 1$, это явление назвали обобщенным эффектом Брюстера (generalized Brewster angle GBA).

Цель данного сообщения – обсудить метод определения толщины слоя диэлектрика на полупроводниковой подложке по экспериментальным данным, полученных методом спектральной эллипсометрии (СЭ) при углах падения, которые задаются условиями деструктивного интерференционного резонанса в слое на двух длинах волн. Существование такого резонанса заложено в теории [3] интерференционных устройств планарного типа, которые работают на когерентном отражении или пропускании света. Новый резонансный метод, формально похожий на метод резонансного возбуждения волноводных мод, должен обеспечить повышение точности определения спектральных характеристик структуры диэлектрик-полупроводник.

**Теория.** Будем считать, что s и p-поляризованный свет под углом $\theta > 45°$ падает из воздуха $(n_0 = 1)$ на слой $(d_1, N_1(\lambda) = n_1(\lambda) - ik_1(\lambda))$, под которым находится миллиметровая полупроводниковая пластина $(h, N_2(\lambda) = n_2(\lambda) - ik_2(\lambda))$. В видимой и ближней ИК области такая случае пластина эквивалентна полу-бесконечной среде $(h \to \infty)$.

В приближении плоско-волновой когерентной оптики, когда можно не учитывать аппаратную функцию прибора, основные уравнение СЭ для слоя на подложке $(h \to \infty)$ имеет вид [3]

$$\rho(\theta,\lambda) = \frac{r_p(\theta,\lambda)}{r_s(\theta,\lambda)} = \tan(\psi(\theta,\lambda))e^{i\Delta(\theta,\lambda)}, \qquad \textbf{(1)}$$

где $r_{p,s}(\theta,\lambda) = \dfrac{r_{01,p,s}(\theta,\lambda) + r_{12,p,s}(\theta,\lambda)\exp(-i2\beta(\theta,\lambda))}{1 + r_{01,p,s}(\theta,\lambda)r_{12,p,s}(\theta,\lambda)\exp(-i2\beta(\theta,\lambda))}$, $\beta(\theta,\lambda)$ – фазовая толщина слоя, $r_{01,p,s}(\theta,\lambda)$, $r_{12,p,s}(\theta,\lambda)$ – френелевские коэффициенты отражения для границ раздела воздух-слой (01), слой подложка (12).

Так как в (1) входит $\tan(\psi(\theta,\lambda))$, то для угла $\Delta(\theta,\lambda)$ используют функцию $\cos(\Delta(\theta,\lambda))$. Уравнение (1) является уравнением комплексных чисел. Поэтому, его решения $d_1$, $N_1$, $N_2$ являются комплексными числами. Считается, что на величину мнимой части $d_1$ влияет точность численного решения обратной задачи эллипсометрии.

Обычно, параметр $\beta(\theta,\lambda)$ в (1) представляют [3] зависящим от оптической толщины слоя, которая рассчитывается как произведение геометрического пути света в слое на его показатель преломления. Для интерференционных минимумов такая толщина должна быть кратна $\lambda/4$.

Условия деструктивного интерференционного резонанса и обобщенного эффекта Брюстера $(\theta_i + \theta_t = 90)$ для p-поляризованного света получим из (1)

$$r_p(\lambda_{m1}) \to 0 \wedge \tan(\psi(\lambda_{m1})) \to 0 :\ d_1 = m1D(\lambda_{m1});$$

$$m1 = 1, 2, 3, \ldots,\ \exp(-i2\pi m1) = 1,\ r_{01,p}(\lambda_m) + r_{12,p}(\lambda_m) = 0; \qquad (2)$$

$$D(\lambda_{m1}) = 0.5\lambda_{m1}(n_1^2(\lambda_{m1}) - \sin^2(\theta_p(\lambda_{m1})))^{-0.5},$$

$$\theta_p(\lambda_{m1}) = \arctan(n_2(\lambda_{m1})).$$

Из (1) следуют условия деструктивного интерференционного резонанса для s-поляризованного света

$$r_s(\theta_s(\lambda_{m2})) \to 0 \wedge \tan(\psi(\lambda_{m2})) \to \infty:\ d_1 = m2D(\lambda_{m2}),$$

$$m2 = l + 0.5,\ l = 0, 1, 2, \ldots,\ \exp(-i2\pi m2) = -1,\ r_{01,s}(\lambda_{m2}) - r_{12,s}(\lambda_{m2}) = 0, \qquad (3)$$

$$D(\lambda_{m2}) = 0.5\lambda_{m2}(n_1^2(\lambda_{m2}) - \sin^2(\theta_s(\lambda_{m2})))^{-0.5},$$

$$\theta_s(\lambda_{m2}) = \arctan(\mathrm{Re}(N_2^2(\lambda_{m2}) - N_1^4(\lambda_{m2})) / (1 - N_1^2(\lambda_{m2})))^{0.5}.$$

Из (2) и (3) следует условие деструктивного резонанса на длинах волн $\lambda_{m2}$ и $\lambda_{m1}$

$$\theta_0 = \theta_s(\lambda_{m2}) = \theta_p(\lambda_{m1}) \qquad (4)$$

и формула для расчета толщины слоя

$$d_1 = (m2 - m1)\lambda_{m1}\lambda_{m2} \Big/ \left[ 2(\lambda_{m1}\sqrt{N_1^2(\lambda_{m2}) - \sin^2(\theta_0)} - \lambda_{m1}\sqrt{N_1^2(\lambda_{m2}) - \sin^2(\theta_0)}) \right]. \qquad (5)$$

Существование двух резонансных длин волн $\lambda_m$ и $\lambda_l$ при одном угле падения можно объяснить наличием дисперсионной зависимости $n_1(\lambda)$, $n_2(\lambda)$ и тем, что фаза p-поляризованной световой волны, отраженной на границе раздела 01 при угле Брюстера ($\theta_{01} = \arctan(n_1)$) для слоя, изменяется на 180°. Это приводит к изменению знака $r_{01,p}(\theta)$. При $\theta < \theta_{01}$ $r_{01,p}(\theta) > 0$, а при $\theta > \theta_{01}$ $r_{01,p}(\theta) < 0$. Знак $r_{12,p}(\theta)$ при этом не изменяется.

Таким образом, при использовании метода СЭ для определения толщины слоя по (5) должны наблюдаться резонансы s и p-поляризованного света в слое на длинах волн $\lambda_{m1}$ и $\lambda_{m2}$ при толщинах слоя, кратных интерференционному периоду, и таком угле падения $\theta_0$, для которого выполняется условие (4).

**Экспериментальные результаты.** Слой диоксида кремния ($SiO_2$) на кремниевой подложке КДБ-12 получен на промышленной установке при термическом окислении кремниевой пластины диаметром 150 мм в течении 90 минут. Поверхность образца контролировалась на профилометре Talystep (фирма Taylor-Hobson, игла с радиусом закругления 2мкм). Измерения угловых спектральных характеристик $\tan(\psi(\theta,\lambda))$ и $\cos(\Delta(\theta,\lambda))$ подложки и слоя на подложке выполнены на СЭ HORIBA UVISEL2 при углах падения (таблица 1), удовлетворяющих условиям (2 – 4), в области прозрачности $SiO_2$ $(260\text{нм} \le \lambda \le 1495\text{нм})$.

На рисунке 1а представлены измеренный $\rho e(\lambda) = \tan(\psi e(\lambda))$, рассчитанный $\rho t(\lambda)$ по (1) с использованием параметров из таблицы 1 (вторая строка), $\rho 02(\lambda) = \tan(\psi_{02}(\lambda))$ подложки, огибающая $Om(\lambda)$ максимумов $\rho t(\lambda)$ и спектрофотометрические характеристики слоя $Rs(\lambda)$, $Rp(\lambda)$.

Таблица 1. Характеристики оптического резонанса в слое $SiO_2$ на КДБ12.

| Резонанс | $m$ | $\lambda_m$, нм | $\theta_0$, ° | $d_1$, нм |
|---|---|---|---|---|
| P | 2 | 1015.1 | 74.35 | 933.44 |
| S | 4.5 | 457.2 | | |
| S | 5 | 410.0 | 76.76 | 929.64 |
| P | 4 | 509.2 | | |
| DeltaPsi2 HORIBA UVISEL2 | | | 70 | 933.4±2.6 |

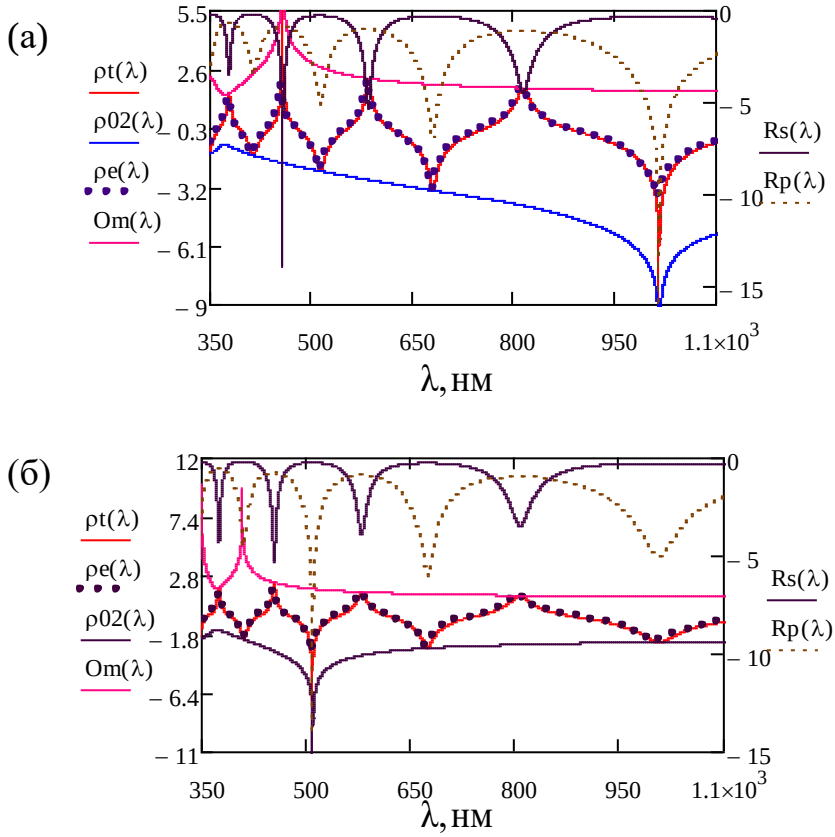



Рисунок 1 а, б. Измеренные и рассчитанные дисперсионные функции слоя $SiO_2$ на подложке КДБ-12

Деструктивные интерференционные резонансы наблюдаются в области второго ($m_1 = 2$, p-поляризованный свет) минимума на длине волны $\lambda_1 = 1015.1$нм и в области четвертого ($m_2 = 4.5$, s-поляризованный свет) минимума на длине волны $\lambda_2 = 457.2$нм при угле Брюстера для подложки 74.35°. Из-за этого эффекта $Rp(\lambda_{m1}) \to 0$, $\rho e(\lambda_{m1}) \to 0$ и $r_s(\theta_s(\lambda_{m2})) \to 0$, $\tan(\psi(\lambda_{m2})) \to \infty$. На точность определения $d_1$ по (5) влияет точность

определения $\lambda_1$ и $\lambda_2$, которая зависит от шага изменения длины волны ( $\delta\lambda \approx 0.35$нм ) при измерении $\rho e(\lambda)$. Расчеты спектральных характеристик слоя выполнены при $\delta\lambda = 0.1$нм. Функции $\cos(\Delta e(\lambda))$ и $\cos(\Delta t(\lambda))$ на длинах волн интерференционных максимумов и минимумов скачком изменяются от – 1 до 1.

На рисунке 1б представлены измеренный $\rho e(\lambda) = \tan(\psi e(\lambda))$, рассчитанные по (1) с использованием параметров из табл. 1 (четвертая строка) $\rho t(\lambda)$, $\rho 02(\lambda)$, огибающая $Om(\lambda)$ максимумов $\rho t(\lambda)$ и спектрофотометрические характеристики слоя $Rs(\lambda)$, $Rp(\lambda)$ при угле падения 76.76°. Деструктивный интерференционный резонанс наблюдается в области четвертого ($m_1 = 4$, p-поляризованный свет) минимума на длине волны $\lambda_1 = 509.2$нм. Конструктивный интерференционный резонанс наблюдается в области пятого ($m_2 = 4.5$, s-поляризованный свет) максимума на длине волны $\lambda_2 = 410.0$нм. Расчет толщины слоя по длинам волн, которые характеризует положение конструктивного и деструктивного интерференционных минимума и максимума, позволяет определить (табл. 1, четвертая строка) толщину слоя с невысокой точностью (±5нм). В шестой строке таблицы приведена толщина слоя, рассчитанная с помощь лицензионной программы DeltaPsi2 к эллипсометру HORIBA UVISEL2.

**Заключение.** Из-за дисперсии показателей преломления микронного слоя и подложки оптические резонансы в методе СЭ наблюдаются на двух длинах волн при одном угле падения. Причиной этого явления являются резонансы s и p-поляризованного света, коэффициенты отражения которого входят в основное уравнение эллипсометрии. Углы Брюстера для подложки на указанных длинах волн разные. На точность определения $d_1$ влияет точность определения резонансных длин волн, которая зависит от шага изменения длины волны ($\delta\lambda$ = 0,35 нм) спектрального эллипсометра при измерении $\rho e(\lambda)$. Определенная толщина слоя (934,44 ± 0,02) нм удовлетворительно коррелирует с литературными данными [4].

**Список литературы**


1. Aliev I. M. и др. Method to control the optical parameters of thin transparent films using angle optical reflectometry // Technical Physics. 2015. Т. 60. № 10. С. 1560-1562.
2. Sreekanth K. V. и др. Generalized Brewster Angle Effect in Thin-Film Optical Absorbers and Its Application for Graphene Hydrogen Sensing // ACS Photonics. 2019. Т. 6. № 7. С. 1610-1617.
3. Борн, М. Основы оптики / М. Борн, Э. Вольф. – 2-е изд., испр. – М. : Наука, 1973. – 720 с.
4. Стаськов, Н. И. Трехкомпонентная модель эффективной среды для определения состава слоев на кремниевых пластинах / Н. И. Стаськов, Л. И. Сотская // Журнал прикладной спектроскопии. – 2017. – № 5. Т. 84. – С. 703–709.



Контакты:
ni_staskov@mail.ru (Стаськов Николай Иванович).

УДК 629.05

***А. О. ТИМОФЕЕВА***
***О. В. УШАКОВА****, канд. физ.- мат. наук, доц.*
Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А. (Саратов, Россия)

# ПРОЕКТИРОВАНИЕ БЛОКА СПУТНИКОВОЙ НАВИГАЦИИ ДЛЯ СИСТЕМ МОНИТОРИНГА И ДИАГНОСТИКИ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

**Аннотация.** Настоящая статья посвящена разработке блока спутниковой навигации, предназначенного для использования в системах мониторинга и диагностики технических объектов. Основная цель — создание компактного, высокоточного и надежного устройства, способного функционировать в реальных условиях эксплуатации, обеспечивая точное определение местоположения, контроль параметров и своевременное обнаружение неисправностей. В статье описывается архитектура блока, включающая мультичастотный GNSS-модуль, микроконтроллер серии STM32F429, антенны и интерфейсы связи (UART, CAN, Ethernet), что обеспечивает точное позиционирование и интеграцию с внешними системами. Предложенное решение позволяет повысить эффективность технического обслуживания, ускорить обнаружение аварийных ситуаций и обеспечить безопасность эксплуатации оборудования за счет сбора и передачи данных

**Ключевые слова:** навигационный блок, ГНСС, инерциальные навигационные системы, мультичастотные GNSS-модули, автоматизация, мониторинг технических объектов, робототехника, позиционирование, высокоточные навигационные системы, интеграция данных.

Современные системы мониторинга и диагностики технических объектов требуют высокоточных и надежных навигационных решений для своевременного обнаружения неисправностей и обеспечения безопасной эксплуатации. В условиях быстроразвивающихся технологий и усложнения инфраструктурных объектов необходимость в точном и стабильном определении положения объектов становится особенно актуальной. Особенно важным аспектом является возможность функционирования систем в сложных условиях эксплуатации, с высоким уровнем электромагнитных помех, а также в условиях плохой видимости [1-3].

В связи с этим, актуальной задачей является создание универсального навигационного блока, способного работать в разнообразных условиях, обеспечивая не только высокоточное позиционирование, но и сбор комплексных данных о состоянии объектов и окружающей среды. Такой блок должен обладать устойчивостью к внешним помехам, иметь расширяемый функционал для интеграции с различными датчиками и системами автоматизации, а также быть энергоэффективным и компактным для удобства монтажа и эксплуатации [4-6].

Основные направления применения блока включают:

– Точное позиционирование объектов и перемещений в реальном времени, что важно для контроля маршрутов и логистики.

– Диагностику вибраций, нагрузок и других параметров, связанных с неисправностями, позволяющую раннее выявление потенциальных проблем.

– Автоматическую регистрацию времени и места возникновения аварийных ситуаций, что важно для быстрого реагирования и последующего анализа.

– Контроль выполнения работ и соблюдения маршрутов, что способствует повышению эффективности использования техники и ресурсов.

Табл.1. Использование блока спутниковой навигации для систем мониторинга и диагностики технических объектов

| Область применения | Примеры использования | Описание |
|---|---|---|
| Техническое обслуживание объектов | Автоматическая регистрация времени и места обслуживания оборудования | Фиксирует точное время проведения работ и их местоположения |
| Мониторинг перемещений и состояния | Отслеживание перемещений тяжелой техники или оборудования в реальном времени | Позволяет выявлять отклонения от допустимых маршрутов или позиций |
| Диагностика вибраций и нагрузок | Координатное отслеживание вибраций, связанных с неисправностями | Анализ перемещений и вибрационных характеристик для раннего выявления проблем |
| Обнаружение неисправностей | Автоматическая фиксация аварийных ситуаций и их координат | Ускоряет реагирование и локализацию аварийных ситуаций |
| Контроль выполнения работ | Проверка соответствия маршрутов и сроков выполнения задач | Обеспечивает контроль соблюдения графиков и маршрутов работы |

Одной из задач проекта является разработка 3D-модели корпуса блока в программном комплексе SolidWorks. Эта модель должна учитывать все технические требования и обеспечить оптимальные условия эксплуатации устройства. Внешний корпус будет выполнен в виде универсальной компактной коробки, специально спроектированной для удобной установки навигационного модуля и микроконтроллера внутри. Такой дизайн предполагает использование прочных и легких материалов, что обеспечит долговечность и надежность конструкции. Корпус будет иметь оптимальные размеры для удобства монтажа и транспортировки, а также обеспечит легкий доступ к внутренним компонентам для сборки, обслуживания и ремонта [7].

Архитектура и состав блока навигации представлена на рис. 1:

– Спутниковый модуль (GNSS) – использование многочастотных приемников, таких как ATGM336H-5N, которые поддерживают сигналы GPS, GLONASS, GALILEO, BeiDou, QZSS и SBAS, обеспечивает высокую точность и надежность позиционирования.

– Микроконтроллер – выбор микроконтроллера серии STM32F429 обусловлен необходимостью обработки больших объемов данных и поддержкой интерфейсов UART, CAN и Ethernet для связи и интеграции.

– Антенна - специальная GNSS-антенна, совместимая с модулем ATGM336H-5N, обеспечивает качественный прием спутниковых сигналов.

– Источник питания - стабилизированный блок питания с понижением и стабилизацией напряжения (3.3V или 5V), что гарантирует надежную работу всех компонентов.

– Интерфейсы связи – UART необходим для обмена с навигационным модулем и периферией, CAN-для интеграции с промышленными и автомобильными системами, Ethernet-для высокоскоростной передачи данных в реальном времени.

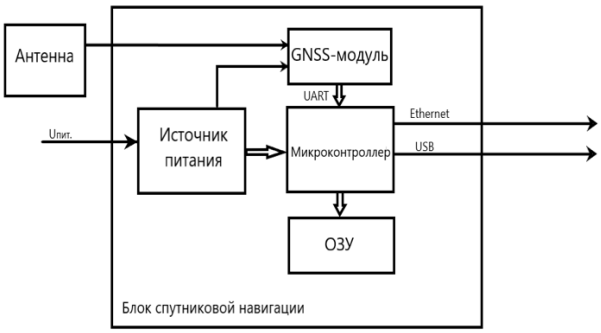



Рис. 1. Структурная схема блока спутниковой навигации [7]

Принцип работы блока основан на следующих этапах:

– Спутниковый модуль принимает навигационные сигналы от спутниковых систем (GPS, GLONASS, GALILEO, BeiDou) через специальную антенну. Эти сигналы содержат информацию о текущем положении, скорости и точном времени, которая передается на микроконтроллер.

– В микроконтроллере реализуются алгоритмы определения положения, основанные на многократном получении сигналов от нескольких спутников, что обеспечивает высокую точность и устойчивость позиционирования.

– Обработанные данные о координатах сохраняются во встроенной памяти блока для архивации и дальнейшего анализа. Кроме того, микроконтроллер обеспечивает передачу навигационной информации через интерфейсы связи – UART, CAN или Ethernet – что позволяет интегрировать устройство с системами мониторинга, диагностики и автоматизации.

Также реализована возможность расширения функциональности блока за счет поддержки дополнительных интерфейсов, внешних датчиков и модулей, например, датчиков вибрации, температуры или давления. Это делает устройство универсальным решением для различных отраслей промышленности и транспортных систем.

Благодаря модульной и гибкой архитектуре, устройство легко адаптируется под конкретные задачи, что повышает его универсальность и применимость в самых различных сценариях. В частности, оно может использоваться в автономных транспортных средствах, робототехнических

платформах, системах контроля инфраструктуры, а также в системах автоматического мониторинга промышленных объектов.

Разработанный навигационный блок представляет собой перспективное решение для повышения точности и надежности систем мониторинга и диагностики технических объектов. Интеграция мультичастотных GNSS-модулей с инерциальными системами, а также использование современных методов обработки данных позволяют значительно снизить влияние внешних помех и обеспечить высокоточное позиционирование в различных условиях эксплуатации. Компактный и универсальный дизайн корпуса обеспечивает удобство установки и эксплуатации, а широкие возможности подключения делают устройство универсальным инструментом для автоматизации процессов контроля и обслуживания.

**Список литературы**


1. Глотов, М.С. Основные направления развития бортовых информационно-управляющих систем перспективных транспортных средств специального назначения / М.С. Глотов, С.И. Князев, И.И. Корнев, К.Ю. Чекризов // Наука, образование и инновации в современном мире: матер. Междунар. науч.-практ. конф. – Воронеж, 2018. – С. 225–229.

2. Челышев, Л. С. Исследование методов решения логистических проблем в области отслеживания грузов. Разработка многофункционального сенсорного модуля со спутниковой навигацией (GPS/ГЛОНАСС) / Л. С. Челышев, С. П. Тимошенков // Интеллектуальные системы и микросистемная техника: сборник трудов Научно-практической конференции, поселок Эльбрус, 01–07 февраля 2022 года. – Москва: Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники», 2022. – С. 333-340.

3. Чебыкин, А. Г. Маршрут автоматизированного проектирования устройств формирования и обработки сигналов для спутниковых навигационных систем / А. Г. Чебыкин, А. С. Меркутов // Известия высших учебных заведений. Электроника. – 2015. – Т. 20, № 2. – С. 145-153.

4. Многофункциональный сенсорный модуль повышенной защищенности со спутниковой навигацией / Л. С. Челышев, С. П. Тимошенков, Н. И. Плис, В. О. Орлов // Известия высших учебных заведений. Электроника. – 2024. – Т. 29, № 2. – С. 194-202.

5. Чебыкин А.Г., Меркутов А.С. Построение моделей для исследования методов обработки сигналов в мобильных приемниках системы ГЛОНАСС // Инновационные подходы к применению информационных технологий в профессиональной деятельности: сб. тр. 2-й Междунар. науч.-практ. интернетконф. Белгородского филиала НАЧОУ ВПО СГА / Под ред. Н.В. Сокольской. – Белгород: ГиК, 2010. – С. 415–516

6. Патент № 2713571 C1 Российская Федерация, МПК G01C 21/26, G01S 19/41. Система высокоточной дифференциальной коррекции для контроля подвижных объектов : № 2019108236: заявл. 22.03.2019: опубл. 05.02.2020 / А.Е. Тюлин, В.В. Бетанов, В.Е. Вовасов.

7. Тимофеева, А. О. Разработка блока спутниковой навигации для автоматизированных систем позиционирования / А. О. Тимофеева, О. В. Ушакова // Актуальные проблемы информатики, радиотехники и связи: Материалы XXXIII Российской научно-техн. конф. Самара, 24–27 февраля 2026 года. – Самара: Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, 2026. – С. 251-252.



Контакты:
nastya.tim365@mail.ru (Тимофеева Анастасия Олеговна);
s_sov@rambler.ru (Ушакова Ольга Валерьевна).

УДК 620.179.1:004.9

***А. В. ТУМАНОВ****, канд. техн. наук, доц.*
Херсонский аграрный университет (Антоновка, Россия)

# КОМПЬЮТЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В НЕРАЗРУШАЮЩЕМ КОНТРОЛЕ: МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА СОСТОЯНИЯ ОБЪЕКТОВ

**Аннотация.** Рассмотрены эволюция и современные тенденции применения компьютерных технологий в области неразрушающего контроля (НК). Анализируются ключевые методы НК, интегрированные с цифровыми системами, особенности компьютерного анализа данных, а также инновационные приборы контроля качества состояния объектов, основанные на вычислительных мощностях. Обсуждаются преимущества, перспективы и вызовы, связанные с цифровизацией НК.

**Ключевые слова:** неразрушающий контроль, компьютерные технологии, методы контроля, приборы контроля, качество объектов, цифровое моделирование, анализ данных, машинное зрение, искусственный интеллект.

Контроль качества и оценка технического состояния объектов различного назначения – от промышленных изделий и сооружений до медицинских структур и произведений искусства – являются критически важными задачами для обеспечения безопасности, надежности и долговечности. Традиционные методы неразрушающего контроля (НК), такие как ультразвуковая дефектоскопия, радиография, магнитопорошковый и капиллярный контроль, на протяжении десятилетий служили основой диагностики. Однако экспоненциальный рост вычислительных мощностей, развитие алгоритмов обработки и анализа данных, а также повсеместное внедрение цифровых технологий кардинально трансформировали эту область. Компьютерные технологии не просто автоматизируют рутинные процессы, но и открывают новые горизонты для более точной, быстрой и комплексной оценки состояния объектов, позволяя выявлять дефекты, ранее недоступные для обнаружения. Данная статья посвящена изучению интеграции компьютерных технологий в методы и приборы неразрушающего контроля, а также их роли в повышении качества контроля.

*Эволюция неразрушающего контроля под влиянием компьютерных технологий.* Исторически, неразрушающий контроль базировался на визуальном анализе оператором показаний приборов (например, экрана осциллографа, шкалы прибора). Этот подход был подвержен субъективизму, ограничен скоростью человеческого восприятия и вычислительными возможностями. Компьютерные технологии начали активно проникать в НК с появлением:

- Цифровых преобразователей сигналов: Замена аналоговых индикаторов на цифровые дисплеи позволила оцифровывать получаемые данные.

• Микропроцессорной техники: Интеграция микропроцессоров в приборы НК дала возможность выполнять первичную обработку сигналов “на лету”, фильтрацию шумов и базовую автоматизацию.

• Персональных компьютеров: Позволили проводить более глубокий анализ полученных данных, хранить результаты, создавать базы данных и генерировать отчеты.

• Современных вычислительных платформ: Высокопроизводительные компьютеры, облачные технологии и специализированное ПО открыли путь к сложным алгоритмам анализа, искусственному интеллекту и машинному обучению.

Ключевые методы неразрушающего контроля и их компьютерная интеграция

Современные методы НК в значительной степени опираются на компьютерную обработку и анализ данных.

1. Ультразвуковой контроль (УЗК): Традиционные методы: Основаны на анализе эхо-сигналов или проходящих волн. Компьютерная интеграция: Цифровые ультразвуковые дефектоскопы: Обрабатывают сигналы в цифровом виде, позволяя проводить сложные фильтрации, работать с A- и B-сканами. 3D-визуализация: Создание объемных моделей внутренней структуры объекта на основе множества сканов (например, при УЗК-томографии). Алгоритмы определения размера и локализации дефектов: Автоматический расчет характеристик дефектов на основе анализа амплитуды и времени прихода эхо-сигналов. Фазные решетки (Phased Array Ultrasonic Testing - PAUT): Компьютерное управление элементами преобразователя позволяет формировать электронно-управляемые ультразвуковые пучки, проводить фокусировку и механизировать сканирование. Это значительно повышает скорость и точность контроля.

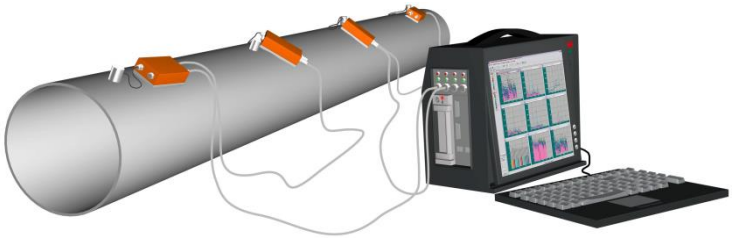
2. Радиографический контроль (РК). Традиционные методы: Использование рентгеновских или гамма-излучений с пленкой. Компьютерная интеграция: Цифровая радиография (DR) и компьютерная радиография (CR): Замена рентгеновской пленки на цифровые детекторы (пластины CR, цифровые камеры DR). Постобработка изображений: Программное усиление контрастности, фильтрация, увеличение, измерение размеров дефектов непосредственно на цифровом изображении. Автоматизированный анализ

изображений (AI/Machine Learning): Разработка алгоритмов, способных автоматически выявлять и классифицировать дефекты (поры, трещины, включения) на радиографических снимках, снижая нагрузку на оператора и повышая скорость анализа. 3D-рентгеновская томография: Создание объемных моделей внутренней структуры объекта.

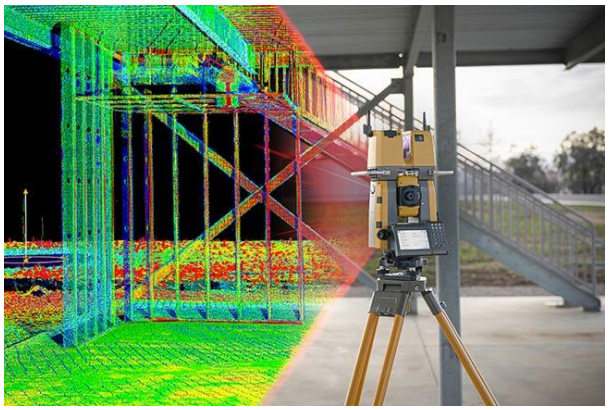
3. Вихретоковый контроль (ВТК): Традиционные методы: Основаны на регистрации изменения импеданса вихретокового преобразователя при его перемещении над поверхностью объекта. Компьютерная интеграция: Цифровые вихретоковые дефектоскопы: Обработка и анализ сигналов в цифровом виде. Многочастотный ВТК: Использование нескольких частот для раздельной оценки различных параметров (толщина покрытия, наличие поверхностных дефектов). Сканирование и картирование поверхности: Создание карт распределения дефектов или изменений свойств материала. Компьютерное моделирование: Прогнозирование поведения вихревых токов в сложных геометрических объектах.

4. Магнитный и капиллярный контроль (МПК, УК): Компьютерная интеграция: Автоматизированные системы: Сканирование поверхности после нанесения магнитного порошка или проникающей жидкости. Системы машинного зрения: Фотографирование поверхности и последующий автоматический анализ изображений для выявления индикаций (следов дефектов). Алгоритмы распознавания образов: Обучение нейронных сетей для идентификации и классификации различных типов дефектов.

5. Методы акустической эмиссии (АЭ): Компьютерная интеграция: Многоканальные системы регистрации: Одновременный сбор данных с нескольких датчиков. Анализ параметров сигналов: Компьютерная обработка сигналов АЭ для определения местоположения источника (триангуляция), анализа характеристик дефекта (скорость роста трещины, тип разрушения). 3D-визуализация: Отображение зон генерации акустической эмиссии на 3D-модели объекта.



6. Оптические методы (лазерное сканирование, интерферометрия, видеонаблюдение): Компьютерная интеграция: Лазерное сканирование: Создание высокоточных 3D-моделей объектов для сравнения с проектными данными, выявления деформаций. Цифровая интерферометрия: Компьютерный анализ интерференционных картин для измерения малейших смещений и деформаций. Машинное зрение: Автоматизированный мониторинг состояния поверхностей, выявление трещин, коррозии, деформаций с помощью камер и специализированного ПО.



Приборы контроля качества состояния объектов на основе компьютерных технологий

Современные приборы НК характеризуются высокой степенью интеграции компьютерных систем, что проявляется в следующем:

- Интеллектуальные преобразователи: Преобразователи (например, фазированные решетки, комплексные вихретоковые зонды) с встроенными микропроцессорами, выполняющими предварительную обработку данных.
- Портативные компьютеры и планшеты: Интеграция с мобильными устройствами для управления приборами, визуализации данных, ведения отчетности и GPS-привязки результатов.
- Программное обеспечение для анализа: Специализированное ПО, включающее:
  - Алгоритмы постобработки изображений: Усиление, фильтрация, измерение.
  - Инструменты 3D-моделирования: Визуализация внутренней структуры, сравнение с CAD-моделями.
  - Системы машинного обучения и искусственного интеллекта (AI): Автоматическое детектирование и классификация дефектов, прогноз остаточного ресурса.
  - Базы данных: Хранение истории контроля, сравнение результатов разных периодов.
- Системы дистанционного контроля: Беспилотные летательные аппараты (дроны) с интегрированными датчиками (камеры, тепловизоры, ультразвуковые сканеры) и системами автоматического анализа данных.
- Интегрированные системы мониторинга: Комплексные системы, объединяющие данные с множества датчиков (АЭ, тензодатчики, датчики температуры, смещения) и анализирующие их в реальном времени.

Преимущества компьютерных технологий в неразрушающем контроле

- Повышение точности и достоверности: Минимизация субъективного фактора, применение точных алгоритмов анализа.
- Увеличение скорости контроля: Автоматизация процессов сканирования, анализа и отчетности.
- Выявление скрытых дефектов: Возможность анализа сложных сигналов и изображений, недоступных для визуального восприятия.
- Объективность результатов: Создание цифровых протоколов, исключающих двоякое толкование.
- Хранение и анализ больших объемов данных: Возможность создания истории контроля, сравнения данных, прогнозирования.
- Автоматизация и снижение трудоемкости: Снижение нагрузки на персонал, повышение производительности.
- Возможность дистанционного контроля: Применение беспилотных аппаратов и удаленных систем мониторинга.
- Предиктивное обслуживание: Основанное на анализе данных НК, позволяет прогнозировать выход из строя и планировать ремонт.

Вызовы и перспективы

Несмотря на очевидные преимущества, внедрение компьютерных технологий в НК сталкивается с рядом вызовов:

- Необходимость высококвалифицированных специалистов: Требуются кадры, сочетающие знания в области НК с навыками работы с программным обеспечением, анализом данных и AI.
- Стоимость оборудования и ПО: Высокотехнологичные приборы и специализированное программное обеспечение могут быть дорогостоящими.
- Стандартизация алгоритмов: Отсутствие единых стандартов для алгоритмов автоматического анализа изображений и сигналов.
- Интерпретация результатов AI: Необходимость валидации решений, принятых искусственным интеллектом.
- Кибербезопасность: Защита конфиденциальных данных, полученных в ходе контроля.

Перспективы развития:

- Дальнейшее развитие AI и машинного обучения: Создание более совершенных систем автоматического детектирования и классификации дефектов.
- Интеграция с BIM: Использование данных НК для создания и актуализации цифровых двойников зданий и сооружений.
- Развитие роботизированных систем контроля: Автономные роботы, способные выполнять сложные задачи НК.
- “Интернет вещей” (IoT) для НК: Создание сетей умных датчиков для непрерывного мониторинга состояния объектов.
- Облачные платформы для анализа данных: Удаленная обработка и анализ больших объемов информации.

Компьютерные технологии не просто трансформировали, но и революционизировали область неразрушающего контроля. Интеграция цифровых методов обработки и анализа данных в традиционные и новые методы НК позволила значительно повысить точность, скорость и объективность контроля качества состояния объектов. Применение интеллектуальных приборов, алгоритмов машинного обучения и систем автоматического анализа открывает новые возможности для раннего выявления дефектов, прогнозирования остаточного ресурса и обеспечения безопасности конструкций. Несмотря на существующие вызовы, связанные с внедрением и подготовкой кадров, перспективы развития компьютерных технологий в НК обещают дальнейшее повышение эффективности и надежности диагностики, что критически важно для современного индустриального и инфраструктурного развития.

Контакты
tumanovpguas@list.ru (Туманов Антон Вячеславович

УДК 531.717

***Е. А. ФИЛОНИНА***
***А. А. ВЕРЕТЕНОВА***
Уфимский университет науки и технологий (Уфа, Россия)

# СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ДЕТАЛИ

**Аннотация.** Проводится сравнительный анализ точности измерения геометрических параметров детали на координатно-измерительной машине и измерительном микроскопе для определения оптимального способа контроля.

**Ключевые слова:** способ контроля, координатно-измерительная машина, измерительный микроскоп, точность измерения, геометрические параметры детали.

**Введение.** Современные производственные процессы требуют высокоточного контроля геометрических параметров деталей, что обеспечивается применением специализированного измерительного оборудования. Целью данной работы является проведение сравнительного анализа точности измерений геометрических параметров детали на координатно-измерительной машине и измерительном микроскопе для определения оптимального способа контроля.

Объектом исследования является процесс измерения геометрических параметров детали.

Координатно-измерительные машины (КИМ) представляют собой стационарные устройства портального типа, которые измеряют габариты, форму и расположение элементов деталей со сложной геометрией. Управлять КИМ оператор может в двух режимах: ручном и автоматизированном. В ручном режиме оператор использует специальный пульт, который позволяет перемещать щуп по поверхности гранитного стола. При автоматизированном режиме измерение проводится по установленной программе, а оператор производит визуальный контроль и не участвует непосредственно в выполнении измерений.

Стандарт ГОСТ Р 10360-1-2017 устанавливает классификацию контрольно-измерительных машин, которая включает десять различных типов (портальная КИМ, КИМ стоечного типа, КИМ с подвижным столом и др.). В данной работе измерения выполнены на КИМ портального типа.

Видеоизмерительные установки консольной конструкции (измерительный микроскоп) представляют собой специализированные измерительные микроскопы, которые используются для точного контроля геометрических параметров деталей. В видеоизмерительной системе используется видеокамера и зум-объектив для проведения бесконтактных измерений оптическим способом. При этом увеличенное изображение детали оператор видит на экране, а не в окуляре. Основными преимуществами таких систем являются: точное определение пространственного положения элементов за счет

автоматической фокусировки и возможность работы с объектами различной контрастности.

В работе выполняется сравнительный анализ систем контроля на примере координатно-измерительной машины UNIVERSAL X.7.7 и измерительного микроскопа Sprint MVP 300. Для проведения измерений была взята деталь «Гнездо подшипника», функционирующая в составе узла газотурбинного двигателя. Перед выполнением измерений была составлена программа, которая разрабатывается индивидуально в соответствии с процедурой контроля определенных параметров детали. Были проведены измерения основных геометрических параметров детали, включая радиус, два угловых размера, позиционное отклонение отверстия и линейные размеры.

После выполнения измерительных операций на координатно-измерительной машине и измерительном микроскопе были сформированы протоколы измерений, представленные на рис. 1 и рис. 2. Протоколы измерений включают следующие параметры:

- название проверяемого элемента;
- номинальный размер;
- фактическое измеренное значение;
- технические допуски;
- вычисленное отклонение от номинального значения.

RESULTS

| Раз/Поз | Номинал | Текущее | Доп- | Доп+ | Откл. | Тенд. | Состояние |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ДИСТ1 | | | | | | | |
| D | 77.500 | 77.515 | -0.150 | 0.150 | 0.015 | | ✓ |
| ДИСТ2 | | | | | | | |
| D | 77.500 | 77.496 | -0.150 | 0.150 | -0.004 | | ✓ |
| ДИСТ3 | | | | | | | |
| D | 77.500 | 77.505 | -0.150 | 0.150 | 0.005 | | ✓ |
| ДИСТ4 | | | | | | | |
| D | 77.500 | 77.481 | -0.150 | 0.150 | -0.019 | | ✓ |
| ДИСТ5 | | | | | | | |
| D | 77.500 | 77.511 | -0.150 | 0.150 | 0.011 | | ✓ |
| ДИСТ6 | | | | | | | |
| D | 77.500 | 77.482 | -0.150 | 0.150 | -0.018 | | ✓ |
| ДИСТ7 | | | | | | | |
| D | 77.500 | 77.478 | -0.150 | 0.150 | -0.022 | | ✓ |
| ДИСТ8 | | | | | | | |
| D | 77.500 | 77.478 | -0.150 | 0.150 | -0.022 | | ✓ |
| ДИСТ9 | | | | | | | |
| D | 77.500 | 77.510 | -0.150 | 0.150 | 0.010 | | ✓ |
| ДИСТ10 | | | | | | | |
| D | 77.500 | 77.505 | -0.150 | 0.150 | 0.005 | | ✓ |

Рис. 1. Фрагмент протокола измерений

С целью анализа точности измерений выполнено сравнение отклонений, зафиксированных координатно-измерительной машиной и измерительным микроскопом. Сравнительный анализ графиков измерений подтвердил более высокую точность показаний координатно-измерительной машины в сравнении с результатами, полученными при помощи измерительного микроскопа.

| Имя программы | | | № запуска | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| гнездо подшипника 0780239050.mxi | | | | | | |
| **Элемент** | **Ед. изм.** | **Номинал** | **Факт** | **Допуски** | **Отклонение** | **Превышение** |
| Шаг 99 | | | | | | |
| Диаметр | мм | +155,000 | +154,993 | +0,300 | -0,300 | -0,007 | - |
| Шаг 100 | | | | | | |
| Дистанция по Y | мм | +77,500 | +77,519 | +0,150 | -0,150 | +0,019 | + |
| Шаг 101 | | | | | | |
| Линейный размер | мм | +77,500 | +77,495 | +0,150 | -0,150 | -0,005 | - |
| Шаг 102 | | | | | | |
| Линейный размер | мм | +77,500 | +77,494 | +0,150 | -0,150 | -0,006 | - |
| Шаг 103 | | | | | | |
| Линейный размер | мм | +77,500 | +77,539 | +0,150 | -0,150 | +0,039 | ++ |
| Шаг 104 | | | | | | |
| Линейный размер | мм | +77,500 | +77,556 | +0,150 | -0,150 | +0,056 | ++ |

Рис. 2. Фрагмент протокола измерений

Для каждой машины в ходе анализа были построены точечные диаграммы, представленные на рис. 3 и рис. 4, которые показывают степень соответствия измеренных параметров установленным допускам. Данные диаграммы демонстрируют существенные различия в точности измерений. Также построен точечный график, который сопоставляет измеренные и номинальные значения для каждой измерительной машины. Данные, полученные на координатно-измерительной машине, показывают большую близость к номинальным значениям, следовательно, в данном исследовании КИМ является более точным измерительным инструментом для заданной детали.

**Выводы.** Проведенные измерения позволяют выявить следующие преимущества КИМ по сравнению с измерительным микроскопом при измерении данной детали:

- контроль детали с помощью КИМ потребовал меньше времени по сравнению с применением измерительного микроскопа;
- измерение объемных деталей сложной конструкции на измерительном микроскопе существенно затруднено;
- во время проведения измерений на микроскопе на результаты оказывают влияние вариации светопропускания, коэффициенты преломления и отражающие свойства материала, а также существует вероятность возникновения субъективной погрешности измерений.

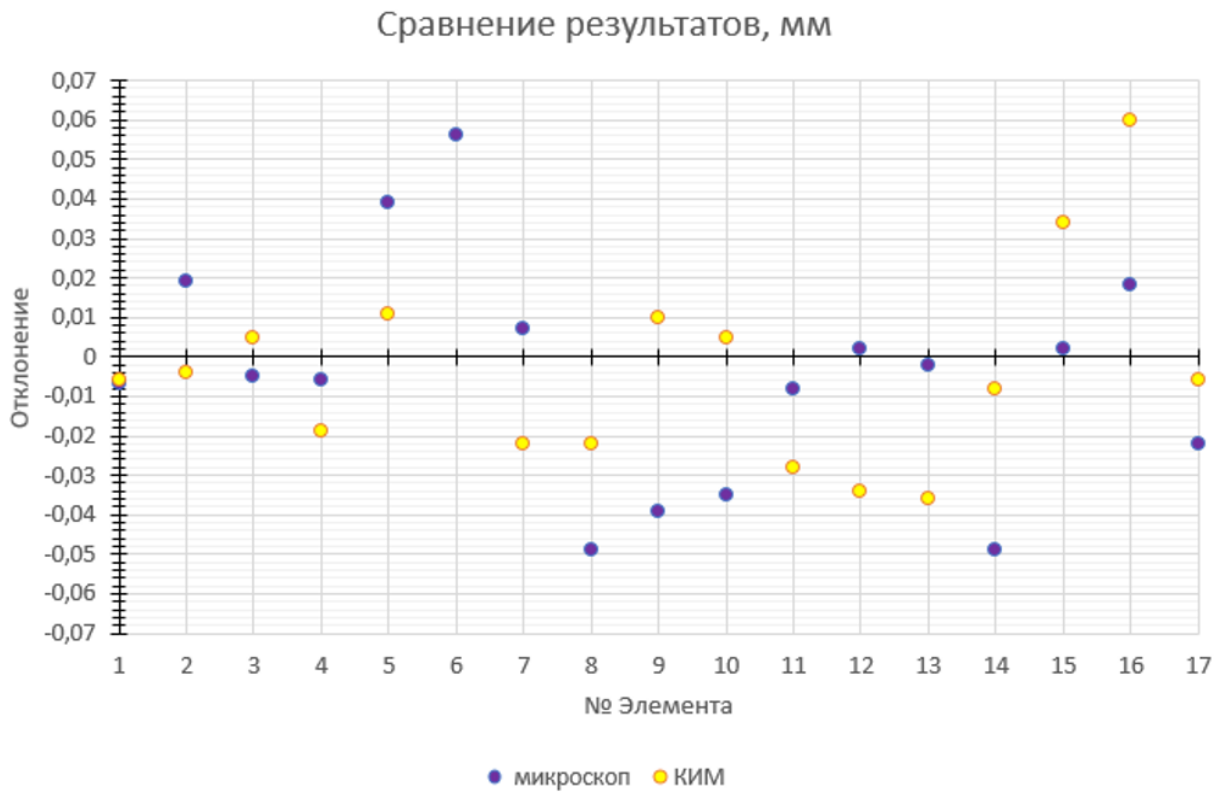



Рис. 3. Точечная диаграмма отклонений для линейных размеров

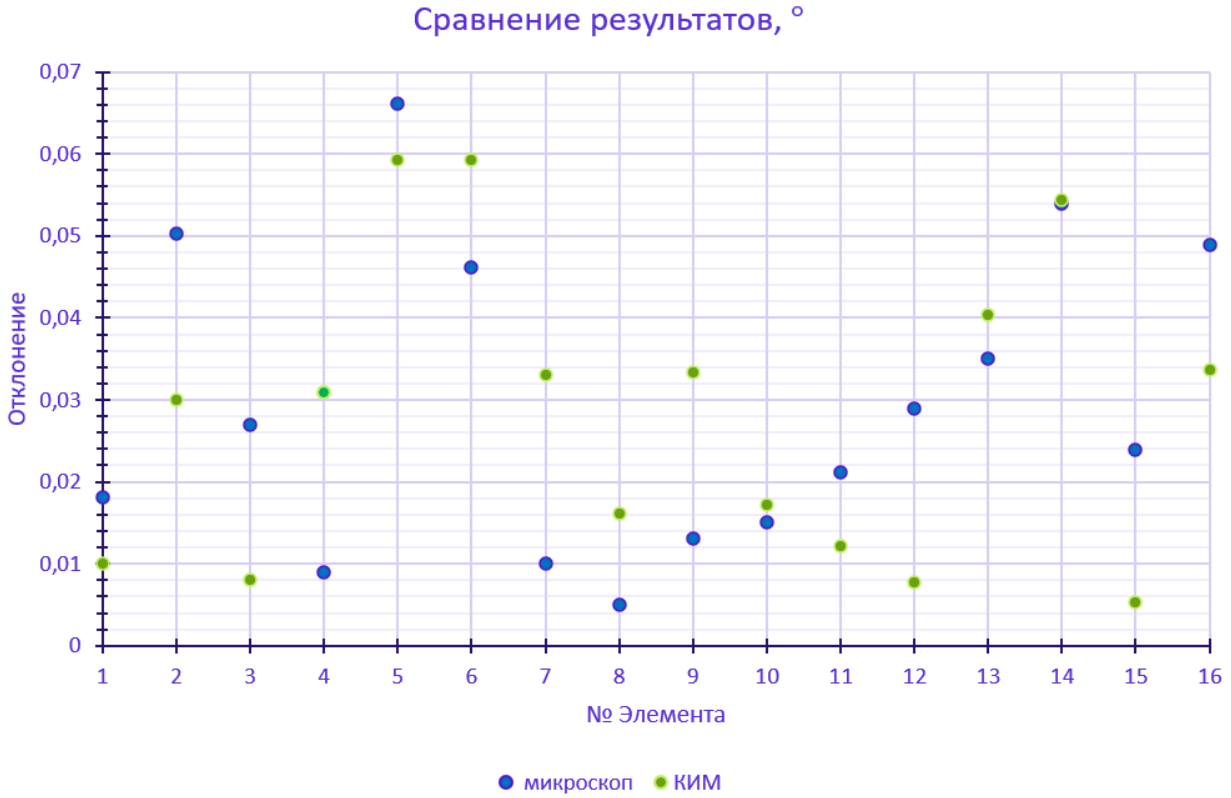



Рис. 4. Точечная диаграмма отклонений для угловых размеров

Контакты:
filonina.ea@gmail.com (Филонина Евгения Александровна);
aa.veretenova@mail.ru (Веретенова Анастасия Алексеевна).

УДК 535.417.2; 004.94

***П. Я. ЧУДАКОВСКИЙ*** [1], канд. физ.-мат. наук.
[1]Белорусско-Российский университет (Могилев, Беларусь)

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МНОГОСЛОЙНОЙ ПЛАЗМОННОЙ СТРУКТУРЫ ДЛЯ СЕНСОРНЫХ ПРИЛОЖЕНИЙ

**Аннотация.** Численно исследуется влияние параметров многослойной структуры, содержащей полимерный слой, на энергетический коэффициент отражения света в схеме возбуждения плазмонного резонанса. Используется модель Максвелла – Гарнетта для расчета эффективной диэлектрической проницаемости полимера с наноразмерными включениями. Анализируется возможность применения такой структуры в сенсорных системах неразрушающего контроля.

**Ключевые слова:** поверхностный плазмонный резонанс, коэффициент отражения, сенсор, тонкопленочная структура, неразрушающий контроль

Разработка сенсоров является одним из наиболее актуальных и быстроразвивающихся направлений современного приборостроения. Достижения материаловедения, нанотехнологий и микроэлектроники позволяют создавать сложные сенсорные системы. Особое место среди сенсоров занимают оптические, в частности, плазмонные сенсоры [1]. В основе принципа действия таких сенсоров лежит резонанс электромагнитных волн с коллективными колебаниями свободных электронов в металлах. Плазмонные сенсоры подразделяются на два класса: сенсоры поверхностного плазмонного резонанса и сенсоры локального поверхностного плазмонного резонанса. В сенсорах первого типа применяют тонкие металлические пленки, тогда как сенсоры локального поверхностного резонанса основаны на отдельных плазмонных резонансных наноструктурах (металлических наночастицах), что обеспечивает большую чувствительность и возможность осуществлять исследования одиночных молекул.

В настоящей работе проведено численное исследование отражательной способности слоистой структуры, содержащей тонкий металлический слой, на одной из границ которого расположен слой диэлектрика, а на другой – полимер. Проанализирован резонансный отклик в схеме возбуждения плазмонных мод, возникающий при различных значениях оптических параметров слоев исследуемой структуры, для выявления оптимальной конфигурации плазмонного сенсора.

Известно, что возбуждение поверхностного плазмона на плоской границе раздела возможно только в условиях полного внутреннего отражения. Поэтому для возбуждения плазмонов используют классические призменные схемы (схема Отто и Кречмана) или их модификации [2-5]. В нашем исследовании численное моделирование проведено для схемы Кречмана с использованием ТМ-поляризованного излучения. На рис. 1 представлена слоистая структура в схеме возбуждения плазмонного резонанса.

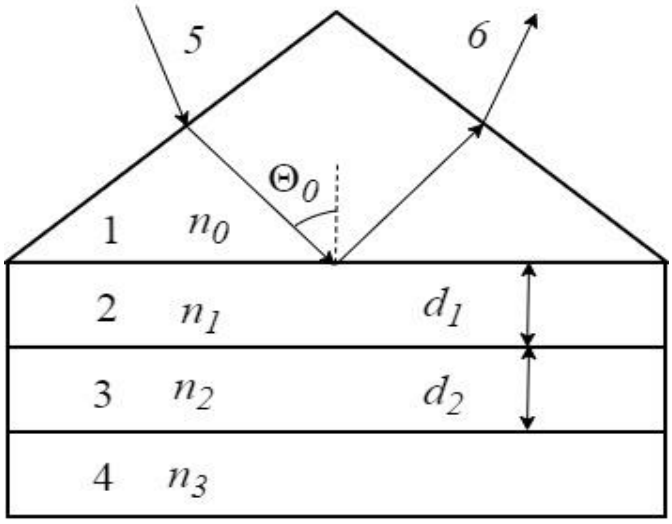



Рис. 1. Слоистая структура в схеме возбуждения плазмонного резонанса: 1 – призма с показателем преломления $n_0$; – диэлектрический слой с показателем преломления $n_1$ толщиной $d_1$; 3 – металлическая пленка с показателем преломления $n_2$ толщиной $d_2$; 4 – полимерный слой с показателем преломления $n_3$; 5, 6 – падающий и отраженный световые лучи

Расчет энергетического коэффициента отражения $R$ выполнен на основании формул Френеля в предположении, что призма и полимер являются полубесконечными средами по отношению к диэлектрическому и металлическому слоям [6]. В соответствии с формулами Френеля энергетический коэффициент отражения $R$ имеет вид

$$R = \left| \frac{r_{01} + r_1 \exp(2id_1 k_{x1})}{1 + r_{01} r_1 \exp(2id_1 k_{x1})} \right|^2, \qquad (1)$$

где $r_1 = \dfrac{r_{12} + r_{23} \exp(2id_2 k_{x2})}{1 + r_{12} r_{23} \exp(2id_2 k_{x2})}$ – коэффициент отражения от трехслойной структуры (диэлектрик-металл-полимер). В свою очередь коэффициент отражения $r_{j(j+1)}$ на границе раздела между $j$ и $j+1$ средами определяется по формуле (2)

$$r_{j(j+1)} = \frac{n_j^2 k_{x(j+1)} - n_{j+1}^2 k_{xj}}{n_j^2 k_{x(j+1)} + n_{j+1}^2 k_{xj}}, \qquad (2)$$

где $k_{xj} = \dfrac{2\pi}{\lambda} \sqrt{n_j^2 - n_0^2 \sin^2 \Theta_0}$ – нормальная составляющая волнового вектора в $j$-й среде ($j$=0, 1, 2, 3), $n_j$ – показатель преломления $j$-й среды ($j$ = 0 соответствует призме, $j$ = 1 – диэлектрику, $j$ = 2 – металлической пленке,

$j = 3$ – полимеру), $d_1$ и $d_2$ – толщины диэлектрического и металлического слоев, $\Theta_0$ – угол падения излучения на основание призмы, $\lambda$ – длина волны в вакууме.

В модельных экспериментах длина волны принималась равной 0,550 мкм. Показатель преломления призмы составлял $n_0 = 1{,}7617$. В качестве металлического слоя выступала тонкая пленка серебра с комплексным показателем преломления $n_2 = 0{,}06 + i\ 3{,}586$ (диэлектрическая проницаемость $\varepsilon_2 = -12{,}86 + i\ 0{,}430$). Для диэлектрического слоя показатель преломления $n_1 = 1{,}517$, для полимерного слоя $n_3 = 1{,}5$. Основными варьируемыми параметрами выступают толщины слоев и показатели преломления. В моделировании показатель преломления полимера изменялся за счет наличия наноразмерных включений в его матрице, в частности, частиц золота. В комплексных оптических величинах мнимая часть имеет положительный знак и характеризует поглощение, что обусловлено временной зависимостью поля плоской волны в виде $\exp(-\omega t)$.

На рис. 2 представлена угловая зависимость коэффициента отражения для волн ТМ-поляризации для серебряного слоя толщиной $d_2 = 35$ нм и диэлектрического слоя толщиной $d_1 = 450$ нм.

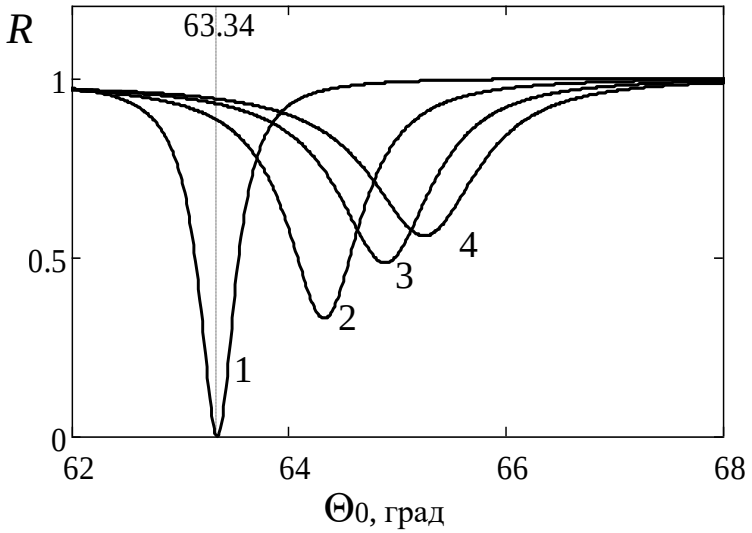



Рис. 2. Угловая зависимость коэффициента отражения для волн ТМ-поляризации от объемной доли *f* сферических частиц золота (радиуса 10 нм) в матрице полимера для слоистой структуры с толщинами: диэлектрик – $d_1$ = 450 нм, серебро – $d_2$ = 35 нм: 1 – плазмонный резонанс в отсутствие частиц золота ($f$ = 0); 2 – 4 смещение резонансного минимума при увеличении *f* частиц золота: 2 – $f$ = 0,5 %; 3 – $f$ = 0,8 %; 4 – $f$ = 1 %

Кривая *1* на рис. 2 характеризуется глубоким минимумом, расположенным за критическим углом ($\Theta_c = 59{,}44$ град), что свидетельствует о возбуждении поверхностного плазмона для слоистой структуры, в которой полимерный слой не содержал наноразмерных включений. Зависимости 2 – 4 демонстрируют чувствительность к малым изменениям объемной доли $f$ частиц золота в

полимерной матрице, что проявляется в смещении резонансного минимума в сторону больших углов. Для моделирования этого эффекта показатель преломления полимера рассчитывался через эффективную диэлектрическую проницаемость $\varepsilon_{eff}$ в рамках модели Максвелла – Гарнетта [7]

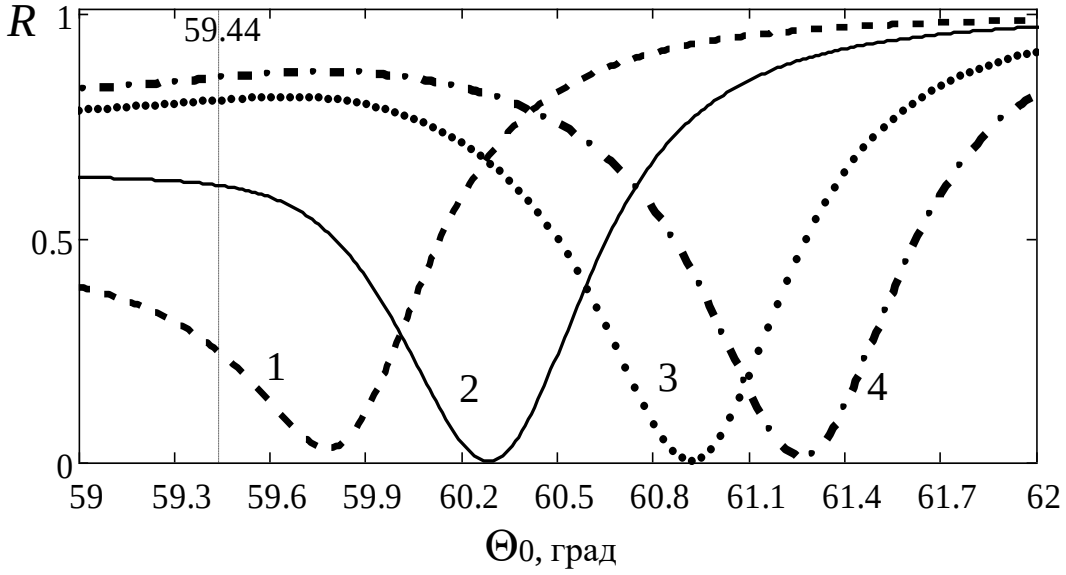
$$\varepsilon_{eff} = \varepsilon_m + 3f\varepsilon_m \frac{\varepsilon_{incl} - \varepsilon_m}{\varepsilon_{incl} + 2\varepsilon_m - f(\varepsilon_{incl} - \varepsilon_m)}. \quad (3)$$

В формуле (3) $\varepsilon_m$, $\varepsilon_{incl}$ – диэлектрические проницаемости чистого полимера и наноразмерных включений, соответственно. Диэлектрическая проницаемость включений рассчитывалась по формуле

$$\varepsilon_{incl} = \varepsilon_{bulk} - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + i\omega\left(\gamma + A\frac{\vartheta_F}{R}\right)} + \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + i\omega\gamma}, \quad (4)$$

где $\varepsilon_{bulk}$ – диэлектрическая проницаемость объемного золота, $\omega_p$ – плазменная частота, $\omega$ – циклическая частота электромагнитного излучения, $\gamma$ – коэффициент затухания, $\vartheta_F$ – скорость Ферми, $A=1$ (для сферических частиц), $R$ – радиус частиц, $i$ – мнимая единица. Приведем справочно значения этих параметров для золота, используемые нами при моделировании: $\varepsilon_{bulk} = -5{,}84 + i\,2{,}111$, $\omega_p = 9{,}01$ эВ, $\gamma = 0{,}072$ эВ, $\vartheta_F = 1{,}4 \cdot 10^6$ м/с, $R = 10$ нм.

Введение частиц золота в полимер позволило уменьшить толщину слоя серебра с 35 нм до 14 нм, что соответствует кривой *2*, представленной на рис. 3.




- толщина серебряного слоя: 1 – 10 нм; 2 – 14 нм, 3 – 18 нм, 4 – 20 нм;

Рис. 3. Угловая зависимость коэффициента отражения для волн ТМ-поляризации для структуры с различной толщиной серебряного слоя при фиксированной объемной доле ($f$ = 0,45%) частиц золота в полимерной матрице

Кроме того, на рис. 3 видны еще несколько глубоких резонансных минимумов при толщинах серебра 18 и 20 нм, но смещенных в сторону больших углов.

Если увеличить толщину диэлектрического слоя до 845 нм, а толщину серебряного слоя принять равной 14 нм, то можно заметить два минимума в угловой зависимости коэффициента отражения, что представлено на рис. 4.

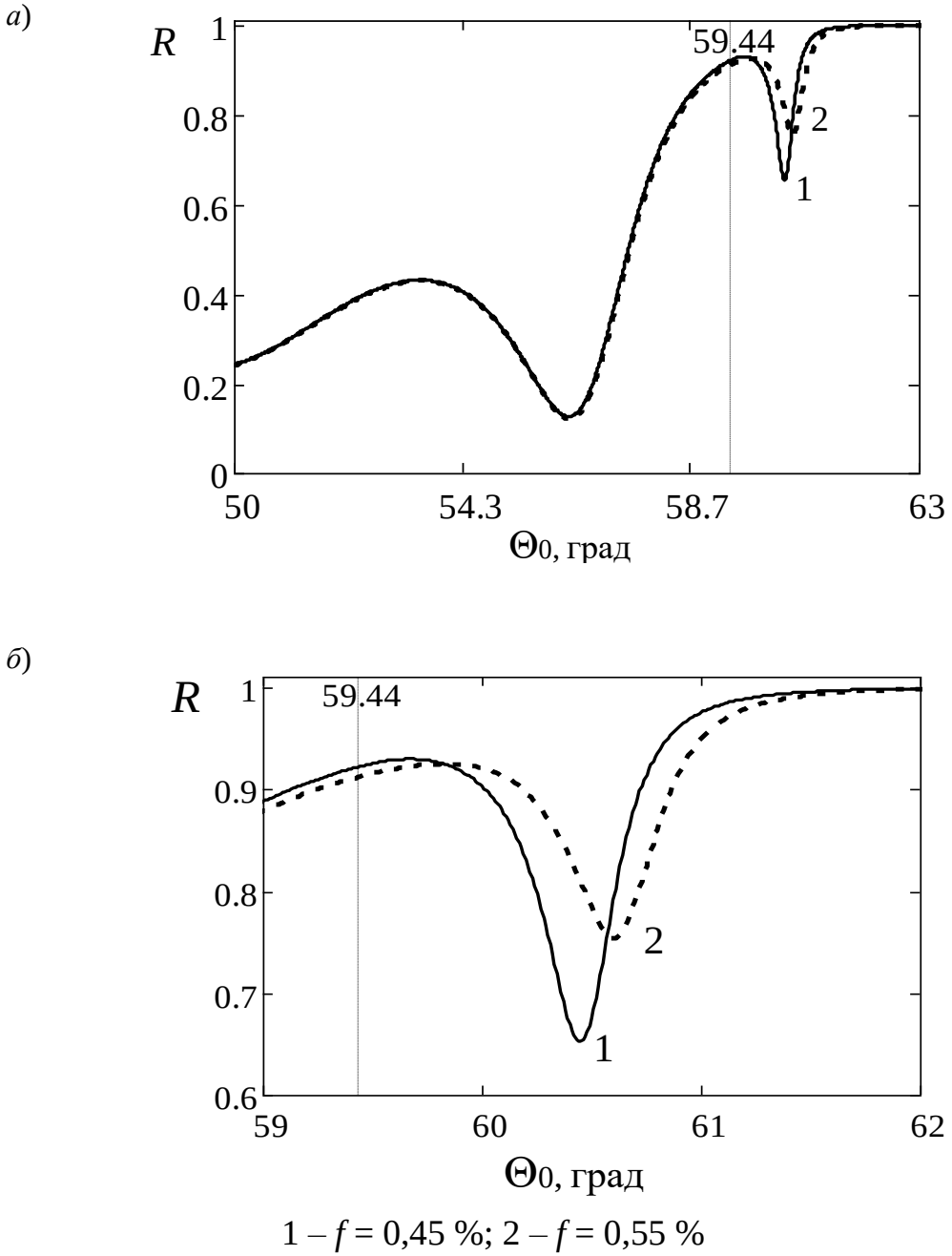



Рис. 4. Угловая зависимость коэффициента отражения для волн ТМ- поляризации от объемной доли $f$ сферических частиц золота (радиуса 10 нм) в матрице полимера для слоистой структуры с толщинами: диэлектрик – $d_1$ = 845 нм, серебро – $d_2$ = 14 нм (*а*) и увеличенный фрагмент этой зависимости (*б*)

Один из них расположен до критического угла $\Theta_c = 59{,}44$ град, второй после. Оба минимума не достигают нуля. Однако если создать разную объемную долю частиц золота в полимере, то минимум за критическим углом $\Theta_c$ испытывает смещение в область больших углов и становится менее глубоким. Эта особенность заметна на кривых *1* и *2*. Минимум до критического угла не изменяет своего положения, что указывает на то, что этот минимум соответствует вытекающей моде диэлектрического слоя, а минимум после критического угла поверхностному плазмону. При этом минимум плазмонного резонанса можно сделать более глубоким, если исключить частицы золота из матрицы полимера, или приблизить к нулю, добавив частицы с объемной долей около 0,065%. Структура с такими параметрами имеет перспективы для создания двуканального сенсора. Минимум коэффициента отражения для вытекающей моды может быть использован как опорный канал, нечувствительный к процессам в полимерной среде, а минимум плазмонного резонанса – в качестве измерительного канала. Одновременное смещение двух минимумов укажет на наличие паразитных эффектов (например, температурных, несовершенства измерительной системы).

Таким образом, полученные результаты представляют интерес для сенсорных систем неразрушающего контроля.

**Список литературы**


1. **Ziai, Y.** Smart plasmonic hydrogels based on gold and silver nanoparticles for biosensing application / Y. Ziai, C. Rinoldi, P. Nakielski, L. De Sio, F. Pierini // Current Opinion in Biomedical Engineering. – 2022. – Vol. 24. – Art. ID 100413.
2. **Otto, A.** Excitation of Nonradiative Surface Plasma Waves in Silver by the Method of Frustrated Total Reflection/ A. Otto// Zeitschrift fur Physik. – 1968. – Vol. 216. – P. 398 – 410.
3. **Horn, N.** Plasmon Spectroscopy: Methods, Pitfalls and How to Avoid Them / N. Horn, M. Kreiter // Plasmonics. – 2010. – Vol. 5. – P. 331 – 345.
4. **Petrin, A. B.** On the Electron Emission from the Focal Region of a Symmetrically Convergent Surface Plasmonic Wave on the Free Surface of a Metal Film / A. B. Petrin // Optics and Spectroscopy. – 2020. – Vol. 128, № 8. – P. 1211 – 1220.
5. **Хило, Н. А.** Модифицированная схема Отто возбуждения поверхностных плазмонов / Н. А. Хило // Доклады НАН Беларуси. – 2016. – Т. 60. – № 4. – С. 56 – 60.
6. **Shi, X.** All-optical modulator with long range surface plasmon resonance / X. Shi [et.al] // Optics & Laser Technology. – 2013. – Vol. 49. – P. 316 – 319
7. **Nadal, E.** Gold nanocomposites: fabrication and optical properties modeling / E. Nadal, N. Barros, H. Glénat, H. Kachkachi // Materials. – 2018. – Vol. 11, №. 3. – P. 1– 13.



Контакты:
pawel206265@mail.ru (Чудаковский Павел Яковлевич)

УДК 699.842

***Ч. ЧЭНЬ***,
***С. Н. САВИН***, *д-р техн. наук, проф*
Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (Санкт-Петербург, Россия)

# ОЦЕНКА РАБОТЫ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ШВОВ В ЗДАНИЯХ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ НА ОСНОВЕ МЕТОДА СВОБОДНЫХ КОЛЕБАНИЙ

**Аннотация.** В статье рассматривается применение метода свободных колебаний для диагностики фактической работы деформационных швов в зданиях сложной конфигурации. Представлены результаты натурных динамических испытаний двух школьных зданий, выполненных по сборному железобетонному каркасу. Показано, что метод свободных колебаний позволяет выявить фактическое разделение здания на отдельные блоки, оценить степень их взаимного влияния и диагностировать наличие «естественных» деформационных швов, образовавшихся в процессе эксплуатации. Предложены критерии оценки эффективности работы деформационных швов на основе анализа собственных частот колебаний смежных блоков.

**Ключевые слова:** сейсмостойкость, метод свободных колебаний, деформационный шов, динамические характеристики, собственная частота колебаний, блочная структура здания, неразрушающий контроль.

**Введение.** Здания сложной формы в плане, включающие разноэтажные блоки, пристройки и вставки, требуют особого внимания к вопросам обеспечения совместной работы отдельных частей. Согласно нормативным требованиям, такие здания должны разделяться деформационными швами на отсеки простой формы. Однако практика эксплуатации показывает, что проектные решения не всегда учитывают все факторы, влияющие на работу деформационных швов, а в процессе эксплуатации возможно образование «естественных» деформационных швов в местах концентрации напряжений. Проблема диагностики фактической работы деформационных швов и оценки взаимодействия отдельных блоков здания остается актуальной [1-3].

В последние годы для оценки динамических характеристик зданий все шире применяются методы неразрушающего контроля, основанные на анализе собственных колебаний конструкций. Метод свободных колебаний позволяет определить фактические динамические параметры зданий и выявить особенности их конструктивной схемы [4]. Цель настоящей работы – обоснование возможности использования метода свободных колебаний для диагностики фактической работы деформационных швов в зданиях сложной формы и разработка критериев оценки их эффективности на основе анализа собственных частот колебаний смежных блоков.

**Метод свободных колебаний.** Метод свободных колебаний относится к динамическим методам неразрушающего контроля и основан на регистрации

и анализе собственных колебаний конструкций, возбуждаемых внешним импульсным воздействием. В соответствии с ГОСТ 18353-79 данный метод классифицируется как вибрационный метод контроля.

Динамические характеристики конструкций, получаемые при анализе их свободных колебаний, включают периоды и формы колебаний, а также логарифмические декременты затухания [4]. Для зданий сложных конструктивных схем с неравномерно распределенными жесткостными характеристиками возможно существование различных форм колебаний для разных частей здания. Основные формы свободных колебаний зданий схематично представлены на рис. 1.

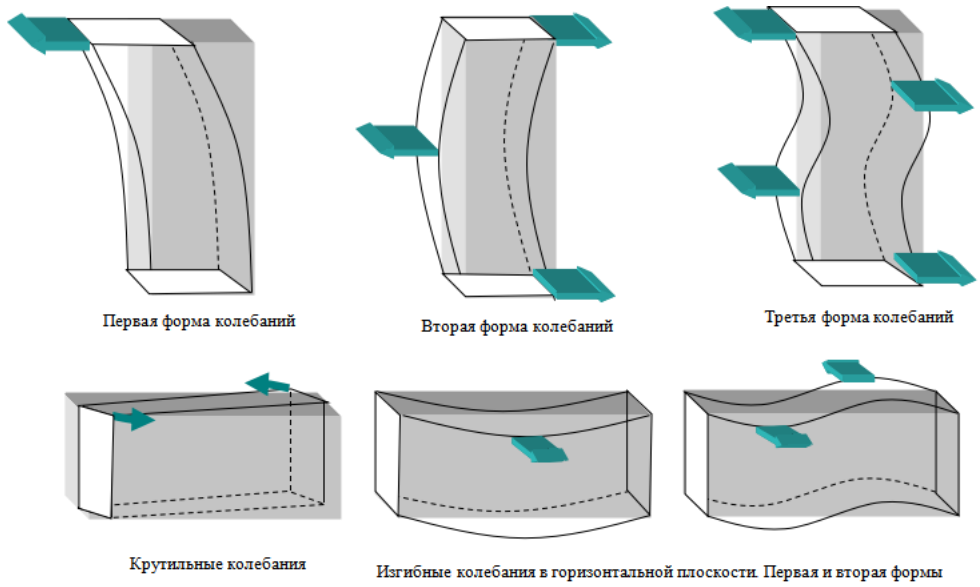



Рис. 1. Основные формы колебаний зданий и сооружений

Методика определения динамических характеристик включает следующие операции: возбуждение и регистрацию колебаний; вычисление спектров Фурье; анализ спектров с целью выделения резонансных пиков; получение импульсных реализаций по каждой форме колебаний; идентификацию и графическое представление форм колебаний.

Исследования проводятся в «пассивном» и «активном» режимах. При «пассивной» регистрации производится запись отклика конструкций на фоновое микросейсмическое воздействие. При «активном» – на специально организованный удар по конструкции грузом до 50 кг.

Для диагностики работы деформационных швов используются следующие признаки [5,6]: различие собственных частот колебаний смежных блоков (чем больше различие, тем менее жесткая связь между блоками); наличие изолированных резонансных пиков в спектрах каждого блока; независимость форм колебаний смежных блоков.

На основе накопленного опыта предложены следующие критерии оценки эффективности деформационных швов (табл. 1).

Табл. 1. Критерии оценки эффективности деформационных швов

| Состояние шва | Различие частот смежных блоков, % | Признаки в спектрах |
|---|---|---|
| Эффективный | $>$ 5% | Изолированные пики |
| Частично работающий | 5-15% | Частичное разделение |
| Неэффективный | $<$ 5% | Общие пики |

**Результаты инструментального обследования.** Объекты исследования. Инструментальное обследование проводилось на двух зданиях средних школ в Московской области: школа № 3 в г. Можайск (1978 г. постройки) и школа № 25 в г. Балашиха (1986 г. постройки). Оба здания выполнены по сборному железобетонному каркасу с навесными панелями. Характерной особенностью обоих объектов является сложная форма в плане и наличие разноэтажных блоков [5,6]. План здания школы № 3 представлен на рис. 2.

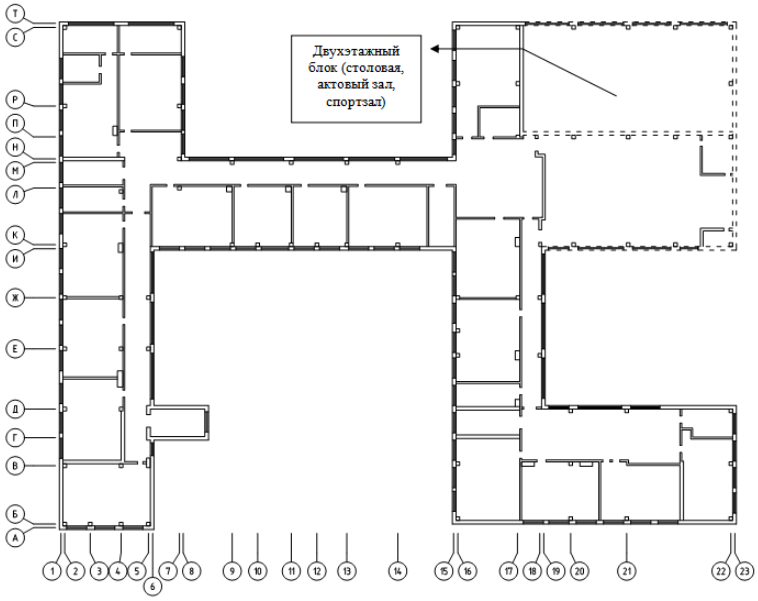



Рис. 2. План здания школы № 3 в г. Можайск

**Школа № 3, г. Можайск.** В ходе динамических испытаний получены следующие значения частот собственных колебаний: 3,54 Гц — первый тон блока в осях «А-К/15-23»; 4,35 Гц — первый тон блока в осях «А-Т/1-8»; 3,63 Гц — крутильные колебания блока в осях «А-Т/15-23»; 9,73 Гц — встречные колебания блока в осях «А-Т/1-8». Анализ спектров и эпюр перемещений показал, что здание фактически разделено на четыре самостоятельных блока. Главной причиной изменения расчетной схемы явилось отсутствие в проекте деформационных швов в местах сопряжения разножестких конструкций. В процессе эксплуатации такие швы образовались самопроизвольно и послужили причиной возникновения трещин в перекрытиях.

**Школа № 25, г. Балашиха.** Динамические испытания показали наличие блочной структуры, которая определяется как проектными деформационными швами, так и их фактическим состоянием. Получены следующие частоты: 4,4 Гц - блок в осях «Н-Д/6-12»; 4,83 Гц - блок в осях «А-Г(Е)/1-10»; 4,86 Гц - блок в осях «К-Ц/13-21»; 5,61 Гц и 5,7 Гц - «новый» блок в осях «Н-Ц/1-12».

Причина образования трещин в осях «Н/5-7» связана с ошибкой проектировщиков, не предусмотревших деформационный шов вдоль оси «Н». Этот шов образовался «по факту» из-за различной высотности смежных блоков, температурных деформаций и внешних динамических нагрузок. В то время как в здании школы № 3 деформационные швы отсутствовали в проекте и образовались самопроизвольно, в школе № 25 проектные швы имеются, однако их работа оказалась неэффективной в направлении, перпендикулярном осям парных элементов, что привело к формированию дополнительного «естественного» шва.

Сравнительный анализ результатов испытаний двух зданий представлен в таблице 2.

Табл. 2. Сравнительный анализ динамических характеристик зданий

| Параметр | Школа № 3, Можайск | Школа № 25, Балашиха |
|---|---|---|
| Год постройки | 1978 | 1986 |
| Конструктивная схема | Сборный ЖБ каркас с панелями | Сборный ЖБ каркас |
| Количество выявленных блоков | 4 | 4 |
| Диапазон частот по 1-й форме, Гц | 3,54 – 4,35 | 4,4 – 5,7 |
| Наличие проектных швов | Отсутствуют | Имеются |
| Наличие «естественных» швов | Имеются | Имеются |

**Анализ и обсуждение результатов.** Проведенные исследования показали, что метод свободных колебаний является эффективным инструментом для диагностики фактической работы деформационных швов. В обоих случаях удалось выявить блочную структуру и оценить степень взаимодействия между отдельными блоками. В здании *школы № 3* деформационные швы изначально отсутствовали в проекте, что привело к образованию «естественных» швов. Частоты смежных блоков различаются на 15–20%, что свидетельствует об их фактической независимости. Однако отсутствие проектных швов стало причиной образования трещин в перекрытиях. В здании *школы № 25* проектные швы имеются, но их работа оказалась неэффективной в направлении, перпендикулярном осям парных элементов. Дополнительный «естественный» шов образовался вдоль оси «Н». Частоты блоков в этом направлении практически совпадают, что указывает на сохранение жесткой связи. Установлена корреляция между разностью частот собственных колебаний смежных блоков и эффективностью деформационного шва: при разности > 15% шов работает эффективно; при 5–15% – частично; при < 5% – не работает. Полученные результаты согласуются с данными других исследователей,

подтверждающих чувствительность динамических методов к изменению жесткостных характеристик конструкций.

**Заключение.** Проведённые исследования подтверждают, что метод свободных колебаний является эффективным инструментом для диагностики фактической работы деформационных швов в зданиях сложной формы, позволяя выявить разделение здания на блоки, оценить степень их взаимного влияния и диагностировать наличие как проектных, так и «естественных» деформационных швов. В обоих обследованных зданиях выявлена блочная структура, не полностью соответствующая проектным решениям. Установлена корреляция между разностью собственных частот колебаний смежных блоков и эффективностью деформационного шва, на основе которой предложены критерии оценки: при разности частот более 15 % шов работает эффективно, при разности менее 5 % шов не работает. Полученные результаты могут быть использованы при обследовании и мониторинге технического состояния зданий сложной формы, а также при разработке рекомендаций по усилению конструкций.

**Список литературы**


1. Савин С. Н., Демишин С. В., Ситников И. В. Мониторинг уникальных объектов с использованием динамических параметров по ГОСТ Р 53778–2010 // Инженерно-строительный журнал. 2011. № 7. С. 33–39.
2. Сущев С. Л., Ларионов В. А., Галиуллин Р. Р., Нигметов Г. М., Савин С. Н., Самарин В. В. О практическом применении метода динамических испытаний для оценки категории технического состояния и сейсмостойкости зданий и сооружений при слабых и сильных импульсных воздействиях // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2014. № 3. С. 52.
3. Савин С.Н. Техническая диагностика прочностных характеристик зданий и сооружений на основе анализа форм их собственных колебаний. – МО РФ, 2006. – 141с.
4. Савин С.Н., Данилов И.Л. Сейсмобезопасность зданий и территорий. МЧС России, СПб, 2014 г., 216 с.
5. Чэнь Ч. Об использовании метода свободных колебаний для диагностики деформационных швов на сложных в плане сооружениях // В сб.Инженерное дело на Дальнем Востоке России. Материалы конференции, Владивосток, 2024 . – С.405-411.
6. Чэнь, Ч. Об использовании метода свободных колебаний для диагностики деформационных швов на сложном в плане здании по адресу: Г. Можайск, Московская область // В сб.Перспективы современного строительства. Материалы конференции, Санкт-Петербург, 2024. – С. 432-440.



Контакты:
chenki2c@gmail.com (Чэнь Чуан);
savinsn@gmail.com (Савин Сергей Николаевич).

УДК 620.179.14

***В. И. ШАРАНДО,*** *канд. техн. наук*
***А. П. ГУСЕВ,*** *д-р техн. наук*
***И. Е. ЗАГОРСКИЙ,***
***А. А. ПОЛОНЕВИЧ***
Институт прикладной физики НАН Беларуси (Минск, Беларусь)

# ПРИМЕНЕНИЕ МАГНИТОДИНАМИЧЕСКОГО МЕТОДА ДЛЯ КОНТРОЛЯ ФЕРРОМАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

**Аннотация.** Исследовано влияние степени пластической деформации образцов из сталей Ст.20 и 13Х, 12Х18Н10Т, пермаллоя 79НМ и электролитического никеля на интенсивность магнитного потока, формируемого при их контакте с магнитодинамическим толщиномером МТЦ-3-2, и на величину оставленной этим толщиномером остаточной намагниченности, измеряемой прибором ИОН-4. Показано, что контроль структуры данных материалов возможен с использованием указанных средств неразрушающего контроля.

**Ключевые слова:** магнитодинамический контроль, ферромагнитные материалы, структурное состояние, пластическая деформация.

**Введение.** В Институте прикладной физики НАН Беларуси разработан магнитодинамический метод контроля, основанный на регистрации изменения магнитного потока в индукционной катушке, охватывающей сопряженный со стержневым магнитом стальной наконечник, который приводится в соприкосновение с контролируемым изделием и удаляется с фиксацией возникшего в катушке электрического импульса. Снимаемый с катушки сигнал зависит от количества ферромагнитного материала в информативной зоне и может характеризовать геометрические параметры изделия или слоёв на его поверхности [1]. С использованием данного метода разработаны и нашли широкое применение в промышленности магнитные толщиномеры типа МТЦ [2] для контроля немагнитных и слабомагнитных покрытий на ферромагнетиках, а также никелевых покрытий на немагнитных основаниях. Такой же принцип измерений осуществлён в измерителях остаточных магнитных полей типа ИОН [2], в которых используется устанавливаемая на намагниченное изделие индукционная катушка без магнита и при её подъеме регистрируется возникающий импульсный электрический сигнал. В работах [3, 4] показано, что магнитодинамический метод контроля обладает чувствительностью к вызванным технологическими факторами либо пластической деформацией структурным напряжениям в материалах ферромагнитных слоёв и покрытий при их толщинометрии. Одновременное применение указанных приборов позволяет корректировать результаты измерений и уменьшать погрешности контроля.

В настоящей работе показана возможность магнитодинамического контроля структурного состояния ряда достаточно массивных ферромагнитных

материалов на основе железа и никеля после их пластического деформирования. Контроль осуществляется по двум параметрам: интенсивности магнитного потока при контакте намагничивающей системы с поверхностью изделия и напряжённости поля остаточной намагниченности.

**Использованная аппаратура и образцы.** В магнитодинамических исследованиях использован толщиномер МТЦ-3-2 [2], преобразователь которого содержит магнит из *NdFeB* с энергией 45 мДж, диаметр магнита и стального наконечника со сферическим окончанием составляет 5 мм. С помощью измерителя остаточной намагниченности ИОН-4 [2] определялся поток остаточной индукции от локального магнитного пятна, созданного в образце преобразователем толщиномера МТЦ-3-2. Для попадания центров преобразователей обоих приборов в одну точку они устанавливались в единый цилиндрический кондуктор. Измерения сигналов осуществлялись в безразмерных единицах – условных величинах.

Исследования выполнены на образцах различающихся по содержанию углерода сталей Ст.20 и 13Х в исходно нормализованном состоянии, нержавеющей стали 12Х18Н10Т в состоянии поставки, отожжённого пермаллоя 79НМ, а также отожжённого электролитического никеля высокой чистоты Н-1у производства комбината «Североникель». Пластинки указанных материалов толщинами от 0,1 до 1 мм прокатывались при комнатной температуре и затем складывались в стопки с разной степенью деформации площадью 4 см$^2$ и высотой порядка 4 мм, гарантировавшими отсутствие влияния на результат измерений краевого эффекта и толщины образца.

**Результаты исследований.** На рис. 1 представлены зависимости сигналов приборов МТЦ-3-2 и ИОН-4 от степени деформации образцов из стали Ст.20.

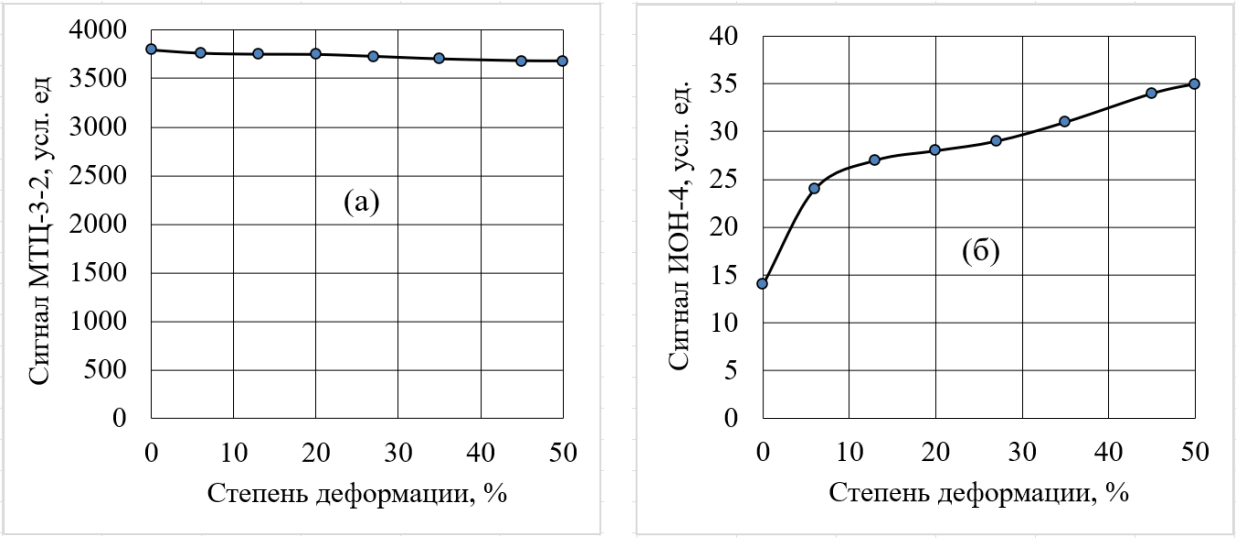



Рис. 1. Зависимости сигналов приборов МТЦ-3-2 (а) и ИОН-4 (б) от степени деформации образцов из стали Ст.20

Из рис. 1(а) следует, что с возрастанием степени деформации происходит слабое уменьшение сигналов толщиномера МТЦ-3-2, что связано с ростом искажений кристаллической решётки рассматриваемой стали и некоторым

уменьшением в намагничивающе-измерительной системе магнитного потока. Рис. 1(б) показывает возрастание остаточной намагниченности с ростом степени деформации, что также отражает увеличение несовершенств решётки и уменьшение подвижности доменной структуры.

На рис. 2 представлены зависимости сигналов приборов МТЦ-3-2 и ИОН-4 от степени деформации образцов из стали 13Х.

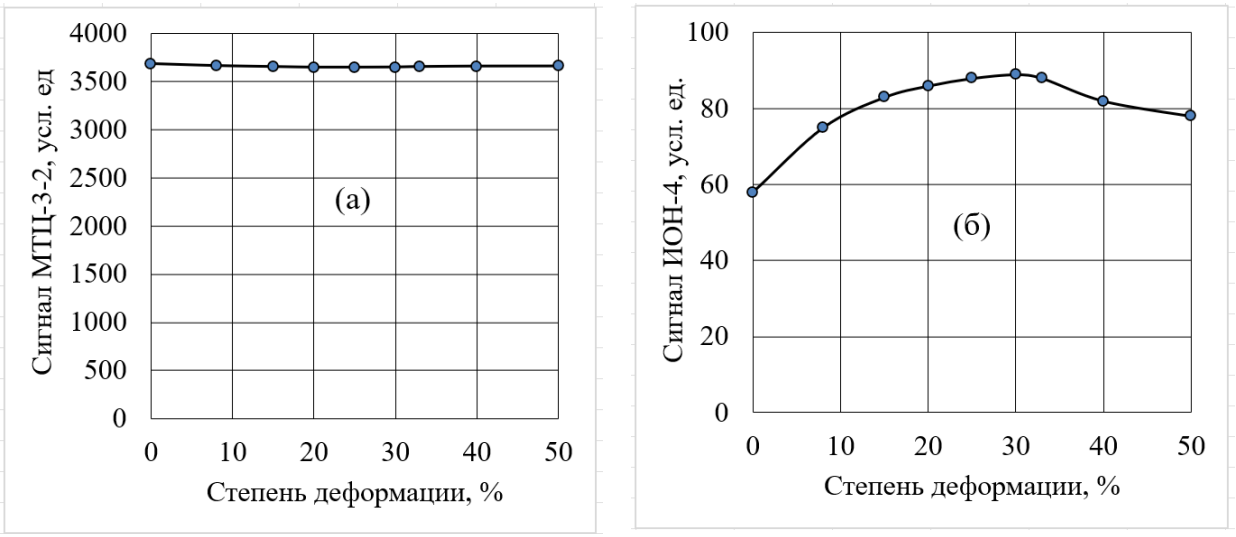



Рис. 2. Зависимости сигналов приборов МТЦ-3-2 (а) и ИОН-4 (б) от степени деформации образцов из стали 13Х

Зависимости аналогичны показанным на рис. 1, но изменения сигналов толщиномера МТЦ-3-2 с ростом деформации оказываются меньшими в связи с более высоким содержанием в стали углерода и, соответственно, присутствием в её структуре уже в исходном состоянии более выраженных структурных искажений. По этой же причине сигналы приборов ИОН-4 для исходной и деформированной стали 13Х оказываются значительно выше, чем для стали Ст.20.

В практическом плане применения прибора МТЦ-3-2 для толщинометрии покрытий на этих или аналогичных им углеродистых конструкционных сталях из близости по величинам сигналов кривых на рис. 1(а) и рис. 2(а) следует, что контроль может вестись с использованием единой для всех их градуировки. При переходе к другой марке стали или наличии в материале основания структурных напряжений обеспечение высокой точности измерений достигается произведением начальной настройки нуля на поверхности изделия с отсутствующим покрытием.

Характер кривых рис. 1(б) и рис. 2(б) показывает возможность их использования для определения материала, на который нанесено покрытие. При исследованиях, не связанных с толщинометрией, одновременное использование обеих методик магнитодинамического контроля позволяет получать расширенную информацию об изучаемых материалах.

На рис. 3 представлены зависимости сигналов приборов МТЦ-3-2 и ИОН-4 от степени деформации образцов из стали 12Х18Н10Т.

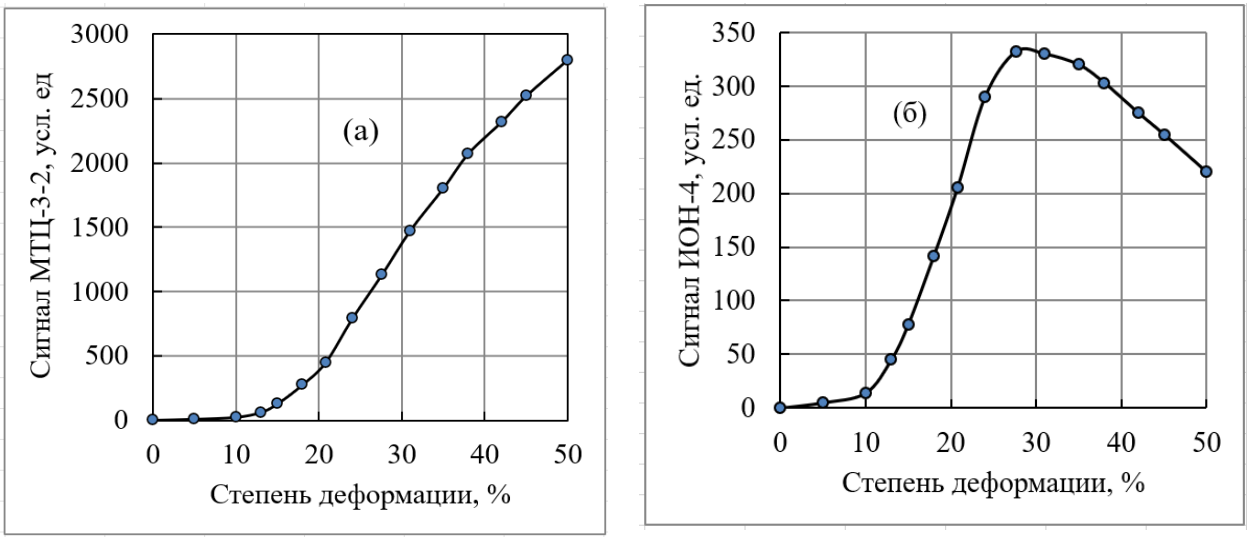



Рис. 3. Зависимости сигналов приборов МТЦ-3-2 (а) и ИОН-4 (б) от степени деформации образцов из стали 12Х18Н10Т

Высоколегированная нержавеющая аустенитная сталь 12Х18Н10Т поставляется потребителям в состоянии после закалки от температур 1000÷1050ºС и имеет превалирующую парамагнитную γ-структуру. Механическое воздействие на эту сталь приводит к формированию в структуре новой ферромагнитной α-фазы – мартенсита. Согласно рис. 3(а), сигналы прибора МТЦ-3-2, при практически нулевом их значении на исходном материале, возрастают с увеличением степени деформации образцов, что связано с увеличением участвующего в создании магнитного потока количества ферромагнитной фазы. Из рис. 3(б) следует, что величины сигналов прибора ИОН-4 образуют максимум в области деформаций 30%. Наличие перегиба на кривой остаточной намагниченности отражает характер выполнения измерений при магнитодинамическом контроле: намагничивание внешним источником поля локальной зоны на поверхности изделия и съём с неё информации с помощью внешнего датчика. Появление максимума может быть связано с двумя разнонаправленными процессами: при начальных деформациях превалирует эффект увеличения, в том числе в информационном слое у поверхности, количества ферромагнитной фазы, а далее всё большую роль играет внутреннее замыкание локально намагниченной зоны на глубинные слои образца.

Из анализа кривых на рис. 3 следует, что для толщинометрии покрытий на рассмотренных материалах необходимо создавать ряд градуировок для прибора МТЦ-3-2, практический выбор которых применительно к конкретному структурному состоянию материала основания можно осуществлять по показаниям прибора ИОН-4.

Широкий диапазон изменения как интенсивности магнитного потока, так и напряжённости поля остаточной намагниченности при деформации данной стали указывает на хорошие перспективы применения магнитодинамического метода в её исследованиях.

На рис. 4 представлены зависимости сигналов приборов МТЦ-3-2 и ИОН-4 от степени деформации образцов из пермаллоя 79НМ.

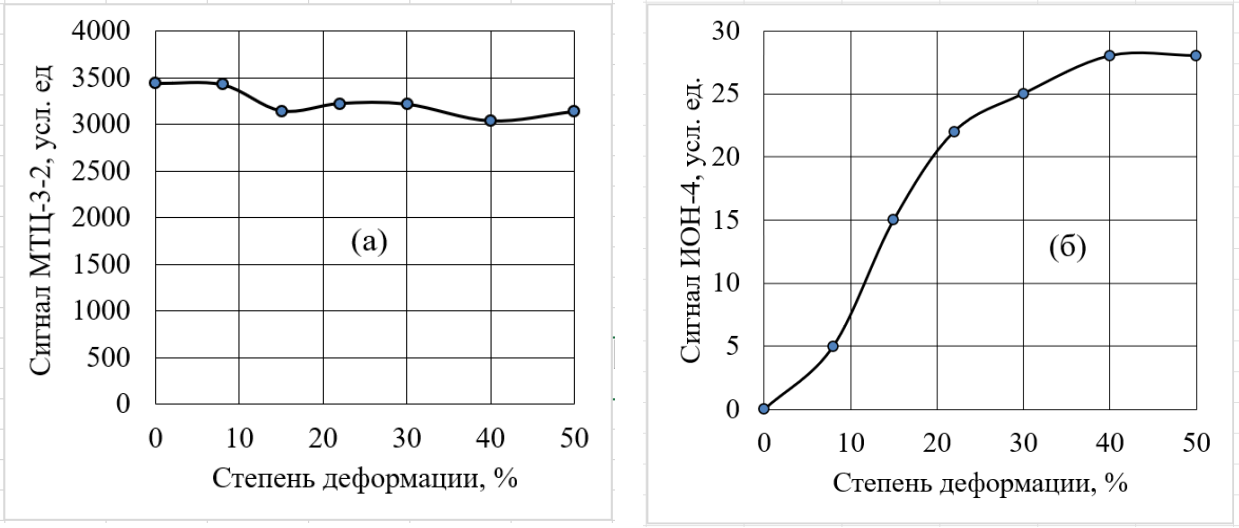



Рис. 4. Зависимости сигналов приборов МТЦ-3-2 (а) и ИОН-4 (б) от степени деформации образцов из пермаллоя 79НМ

Из рис. 4 видно, что магнитодинамический метод может быть использован для исследования пермаллоевых сплавов. Сигналы обоих приборов по порядку величин близки представленным на рис. 1 и рис. 2. Требуемый по многим производственным технологиям контроль степени структурных напряжений в данном материале наиболее эффективно можно вести по величине остаточной намагниченности. Зависимость этой характеристики на рис. 4(б) плавно нарастает от нулевого показания в отожжённом состоянии до определённых, близких к насыщению значений при степени деформации 50%.

Толщинометрия покрытий с применением прибора МТЦ-3-2 на данном материале может давать приблизительные результаты, корректировка которых с помощью прибора ИОН-4 требует дополнительных исследований.

На рис. 5 представлены зависимости сигналов приборов МТЦ-3-2 и ИОН-4 от степени деформации образцов из электролитического никеля.

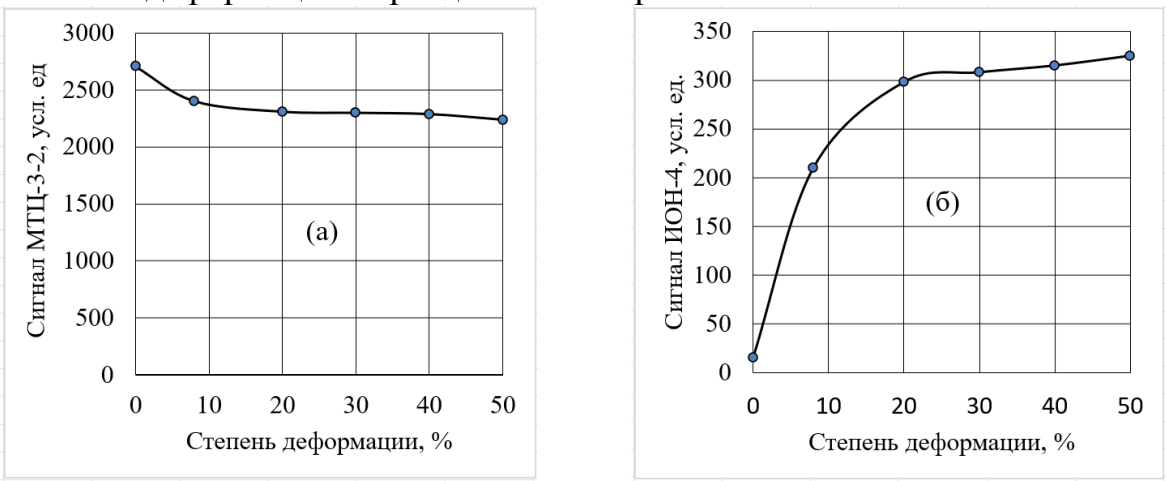



Рис. 5. Зависимости сигналов приборов МТЦ-3-2 (а) и ИОН-4 (б) от степени деформации образцов из электролитического никеля

Из рис. 5(а) следует, что с увеличением степени деформации никелевых образцов происходит уменьшение величин сигналов прибора МТЦ-3-2. При деформациях 20÷50% их изменение практически прекращается. Приведённые на рис. 5(б) показания прибора ИОН-4 на начальных этапах деформирования резко возрастают и также практически стабилизируются при прокатке образцов до 50%. Данные эффекты отражают процесс насыщения никеля дефектами решётки и создания в нём структурных напряжений.

Толщинометрия покрытий на никелевых основаниях при высоких требованиях к погрешностям может вызвать необходимость создания ряда градуировок, выбор которых возможен по измерениям остаточной намагниченности.

**Выводы.** Полученные результаты показывают, что магнитодинамический метод неразрушающего контроля и разработанные на его основе толщиномер покрытий МТЦ-3-2 и измеритель напряжённости остаточных магнитных полей ИОН-4 обладают высокой чувствительностью к содержанию ферромагнитной фазы в различных металлических материалах и могут применяться для определения состояния структур, образующихся в процессах их пластического деформирования. Совместное применение этих двух методик магнитодинамических измерений позволяет с повышенной достоверностью вести контроль состояния ферромагнитных изделий после их термомеханической обработки, а также уменьшать погрешности при проведении толщинометрии покрытий на данных и схожих с ними материалах. При контроле толщин покрытий на одних основаниях можно осуществлять только подстройку нуля регистрирующего прибора, на других – создавать несколько градуировок и использовать их исходя из результатов измерения остаточной намагниченности.

**Список литературы**

1. Лухвич, А.А. Магнитные толщиномеры нового поколения / А.А. Лухвич // Неразрушающий контроль и диагностика. – 2010. – №4. – С. 3-15.

2. Разработки лаборатории металлофизики ИПФ НАН Беларуси в области неразрушающего контроля [Электронный ресурс] // Режим доступа: http://iaph.bas-net.by/lab1/products/ – Дата доступа: 10.07.2026.

3. Шарандо, В.И. Применение магнитодинамического метода контроля при изучении процессов деформации разнотолщинных листов стали 12Х18Н10Т / В.И. Шарандо, А.В. Чернышев, Н.В. Кременькова, В.Д. Пиунов, А.А. Полоневич // Неразрушающий контроль и диагностика. – 2023. - № 3. – С. 19–25.

4. Шарандо, В.И. Магнитодинамическая толщинометрия деформированных и отожжённых никелевых слоёв и покрытий / В.И. Шарандо, И.Е. Загорский, А.А. Полоневич // Неразрушающий контроль и диагностика. – 2025. - № 1. – С. 19-25.

Контакты:
sharando@iaph.bas-net.by (Шарандо Владимир Иванович);
lab1@iaph.bas-net.by (Гусев Александр Петрович);
lab1@iaph.bas-net.by (Загорский Иван Евгеньевич);
lab1@iaph.bas-net.by (Полоневич Александр Антонович).

УДК 621.9.047

***А.К. ШЕПЕЛЕВ***
***А.М. ДОБРЕНКО***
***В.П. ЛУНИН****, д-р техн. наук, проф.*
***В.А. ГЛАДОВСКИЙ***
Национальный исследовательский университет «МЭИ» (Москва, Россия)

# ИСПЫТАНИЯ СПРОЕКТИРОВАННОГО ИМПУЛЬСНО-ВИХРЕТОКОВОГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ КОНТРОЛЯ КОРРОЗИИ ФЕРРОМАГНИТНЫХ ТРУБ

**Аннотация.** Оценка состояния ферромагнитных трубопроводных систем и металлических сооружений представляет собой одну из ключевых задач в области промышленной безопасности. Большинство известных методов неразрушающего контроля и диагностики нередко предполагают прямой контакт с объектом либо сопряжены со значительными финансовыми и энергетическими затратами. В работе изучена перспектива применимости импульсно-вихретокового метода для контроля коррозионных дефектов ферромагнитных труб под изоляцией. Разработана аппаратная реализация устройства и проведены его испытания. Показано, что характеристики спадающего участка импульсного вихретокового сигнала реагируют на присутствие дефектов в исследуемом объекте. Результаты исследования свидетельствуют о работоспособности разработанного устройства и открывают возможность для его применения в современных системах неразрушающей диагностики в нефтяной и газовой промышленности.

**Ключевые слова**: неразрушающий контроль, ферромагнитные трубопроводы, вихретоковый преобразователь, обнаружение дефектов, анализ импульсного отклика

## Введение

Сталь и ферромагнитные материалы служат основой современной промышленности, находя применение в строительстве, энергетике, нефтегазовом секторе, транспортном и авиационном машиностроении. По оценкам World Steel Association, мировое потребление стали в 2024 году достигло порядка 1,79 млрд. тонн, что отражает устойчивый спрос на металлоконструкции во всех ключевых отраслях [1].

Особую роль среди отраслей-потребителей металла занимает нефтегазовый комплекс, где трубопроводный транспорт является наиболее экономически эффективным способом доставки углеводородного сырья на большие расстояния.

Расширение мировой экономики сопровождается ростом трубопроводных сетей. По данным Global Energy Monitor [2], в 2025 году в эксплуатации находится свыше 504 тыс. км магистральных нефтепроводов, ещё около 42 тыс. км – на стадии строительства или проектирования, что на 16% больше, чем годом ранее. Это наглядно демонстрирует актуальность задачи поддержания надёжности трубопроводной инфраструктуры.

Совокупное воздействие агрессивных сред, перепадов давления и механических напряжений в теле трубопровода со временем формируют очаги равномерной и питтинговой коррозии, зоны эрозионного износа и

коррозионного растрескивания. Наибольшую угрозу представляют скрытые повреждения, которые на начальном этапе не сказываются на функциональности системы и потому долгое время не выявляются.

Утонение стенки вследствие коррозии ведёт к снижению прочности трубопровода и может стать причиной его разгерметизации, сопровождающейся утечкой транспортируемого продукта, возгоранием и загрязнением окружающей среды. Это определяет первостепенную важность раннего выявления коррозионных дефектов и контроля остаточной толщины стенки в системе технической диагностики.

Регулярный мониторинг технического состояния металлических конструкций на протяжении всего срока эксплуатации является необходимым условием предотвращения аварийных ситуаций. Наиболее эффективным инструментом в этом отношении служат методы неразрушающего контроля (НК), позволяющие выявлять дефекты без вывода объекта из эксплуатации [3].

Настоящая работа направлена на исследование применимости импульсного вихретокового метода для выявления и количественной оценки коррозионных повреждений в ферромагнитных материалах с изоляционным покрытием.

В рамках исследования были поставлены следующие задачи:

- создание лабораторного стенда для испытания преобразователя;
- формирование методологии проведения экспериментальных измерений;
- построение градуировочной характеристики и оценка чувствительности устройства.

**Описание лабораторной установки**

Измерения проводились на лабораторном стенде, включающем генератор импульсных сигналов, приёмник-усилитель, микроконтроллер и два индикаторных устройства для визуального контроля формы, скважности и амплитуды импульсов. Измерения выполнялись с использованием двух преобразователей на выбор, содержащих возбуждающую и приёмную катушки; их конструкция приведена на рисунке 1 а, г.

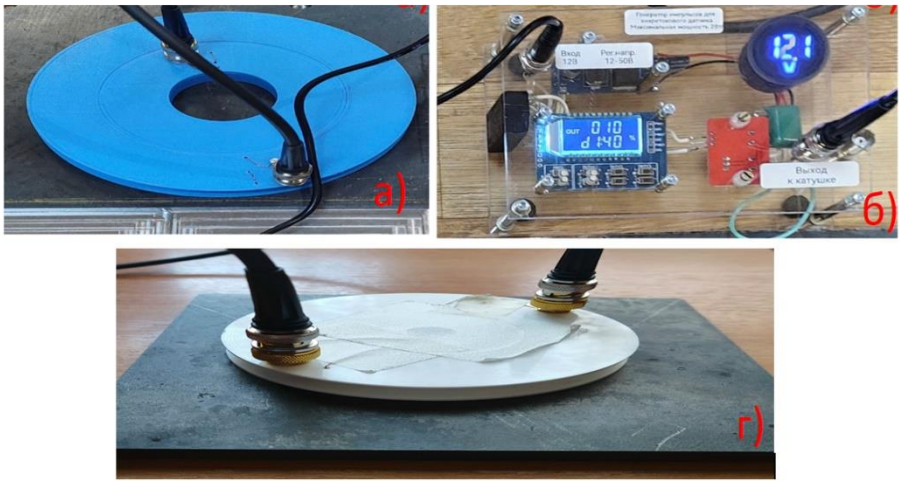



Рис. 1. Схема экспериментальной установки: а) преобразователь №1; б) генератор импульсов; г) преобразователь №2

Сигнал с измерительной катушки усиливается и логарифмируется в блоке приёмника-усилителя, что повышает чувствительность системы в области слабых сигналов. Для оцифровки и передачи данных на персональный компьютер использовалась платформа Arduino Uno.

**Объекты исследования**

Для экспериментов были изготовлены образцы из магнитной стали с искусственными дефектами, имитирующими питтинговую коррозию. Образец первого типа толщиной 10 мм имел четыре участка с питтинговыми дефектами в виде сквозных отверстий диаметром 10 мм, соответствующих остаточной толщине стенки 100, 80, 50 и 20% от номинала (Рис. 2, а). Второй вид представлен пятью образцами толщиной 12 мм с питтинговыми дефектами переменной глубины согласно тем же процентным уровням (Рис. 2, б).

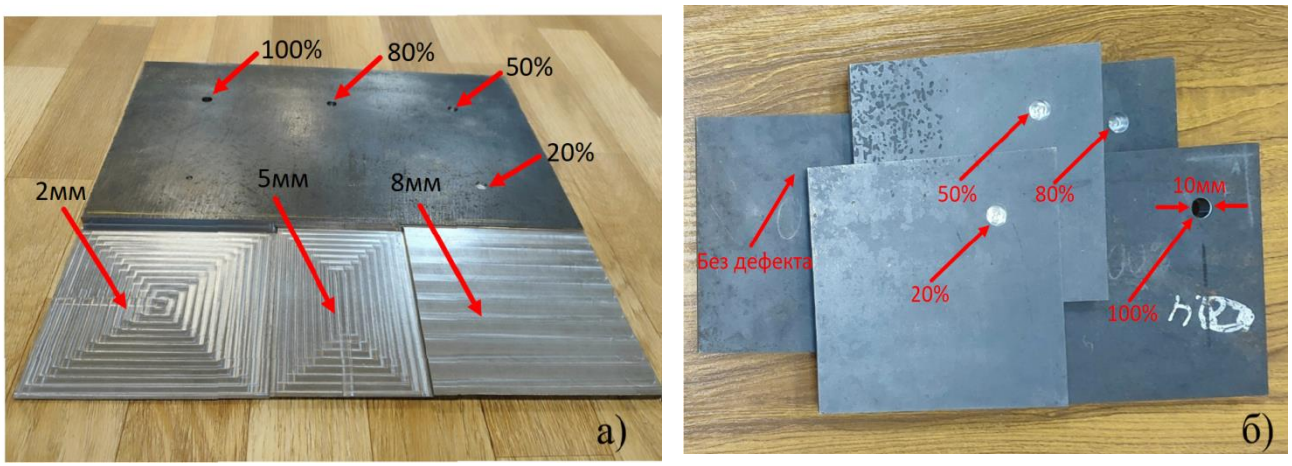



Рис. 2. Образцы для контроля: а) толщиной 10 мм; б) толщиной 12 мм

**Воспроизводимость измерений при выявлении питтингов разной глубины на образцах №1 и №2**

В качестве диагностического параметра использовался тангенс угла наклона линейного участка затухающего сигнала. Преобразователь №1 располагался на поверхности образца №1 таким образом, чтобы дефект находился в зоне максимальной чувствительности приёмной катушки. На каждом дефекте выполнялось пять измерений с усреднением по 10 отсчётам, после чего преобразователь переносился к следующему дефекту. Результаты обработки сигналов показаны на рисунке 3. Из рисунка 3 следует, что доверительные интервалы для ряда глубин дефектов существенно накладываются друг на друга. Дефекты глубиной 80% и 100%, а также 20% и 50% практически неразличимы по разбросу градиента.

Для улучшения характеристик измерительного тракта схема платы была доработана. Новая плата отличалась применением усилителя с более широким динамическим диапазоном и стабильными линейными характеристиками, что позволило повысить точность и достоверность получаемых результатов.

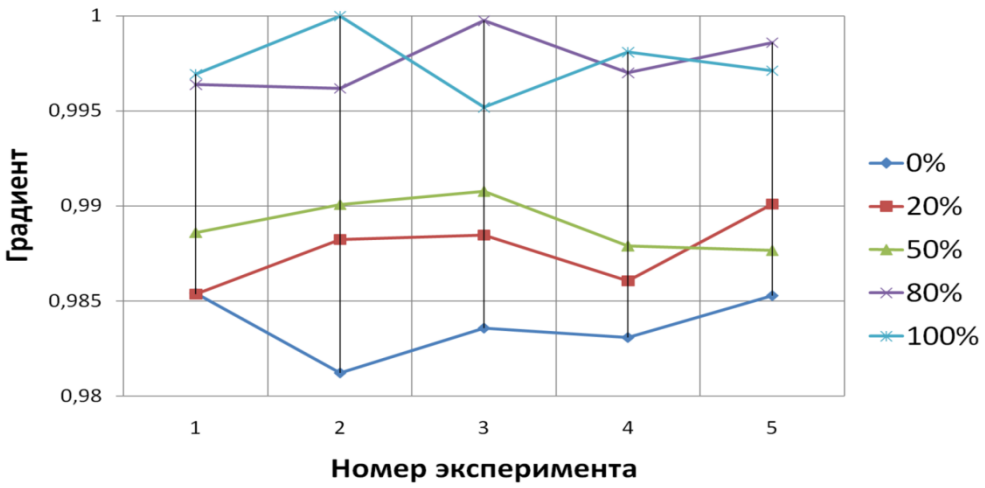



Рис. 3. Разброс диагностического параметра в зависимости от глубины дефекта (значения нормированы относительно сквозного дефекта)

Анализ средних значений градиента и доверительных интервалов, приведённых в таблице 1, свидетельствует об улучшении качества измерений после модернизации платы.

Табл. 1. Сравнение доверительных интервалов градиента для разных глубин дефекта после модернизации усилителя

| Уровень дефекта | Средний градиент (10 усреднений) | Диапазон градиентов (нормированный относительно сквозного дефекта) |
|---|---|---|
| 0% | ~0,934 | 0,930–0,936 |
| 20% | ~0,954 | 0,942–0,959 |
| 50% | ~0,982 | 0,973–0,988 |
| 80% | ~0,980 | 0,986–0,972 |
| 100% | ~0,994 | 0,987–1 |

Однако достигнутое улучшение не позволяет в полной мере решить проблему разграничения дефектов с близкими значениями глубины. С целью проверки предположения о необходимости уменьшения размеров преобразователя для контроля малых дефектов был проведён дополнительный эксперимент с применением катушки меньшего размера (рис. 4).

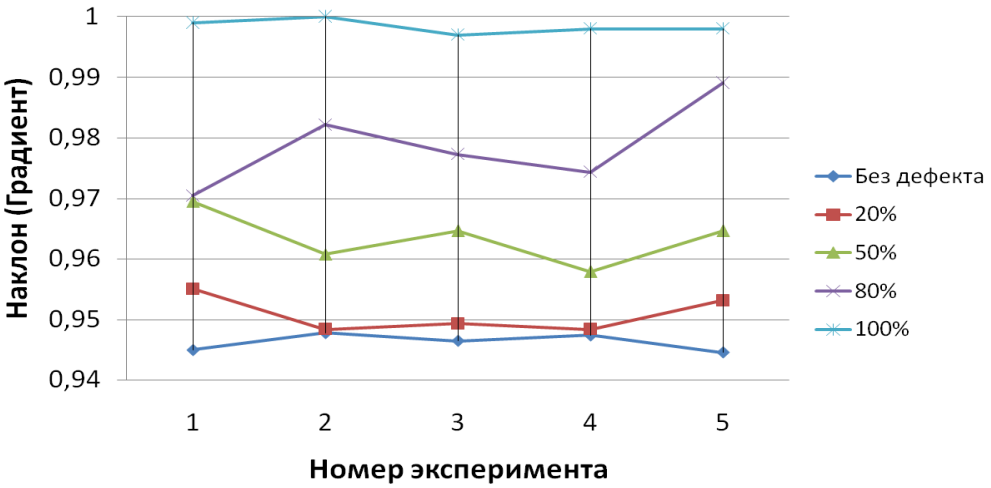



Рис. 4. Результаты измерений преобразователя №2 для дефектов различной глубины (нормированные значения по сигналу от сквозного дефекта)

Использование уменьшенной катушки позволило полностью устранить перекрытие доверительных интервалов. Повышение точности определения диагностического параметра и исключение перекрытия доверительных интервалов было достигнуто за счёт исследования новых функций аппроксимации сигналов, полученных на образцах №1 и №2 (табл. 2).

Табл. 2. Сравнительный анализ разброса диагностического параметра для различных методов аппроксимации

| Образец / Способы | Без дефекта (образец №1), $10^{-5}$ | Сквозной дефект (образец №2), $10^{-5}$ | Без дефекта, (образец №2) $10^{-5}$ |
|---|---|---|---|
| Аппроксимация с помощью суммирования функций | 7,31 | 5,551 | 4,659 |
| Аппроксимация, включающая сигмоиду на основе гиперболического тангенса | 5,79 | 4,375 | 3,912 |
| Аппроксимация, включающая логистическую сигмоиду | 3,02 | 2,753 | 3,526 |
| Аппроксимация, включающая двойную сигмоиду | 1,85 | 8,595 | 3,74 |

Работоспособность нового способа аппроксимации применительно к локальным дефектам исследовалась на образце №1. Преобразователь последовательно устанавливался в фиксированные положения от бездефектного участка до зоны сквозного дефекта, в каждой точке выполнялось по три измерения. Полученная калибровочная характеристика представлена на рисунке 5.

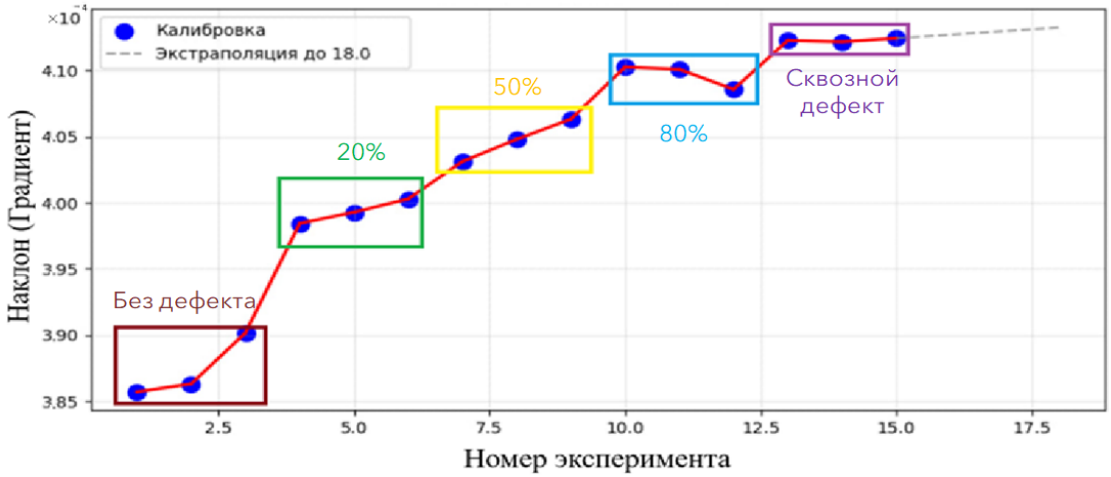



Рис. 5. Различение локальных дефектов на образце №1 с использованием улучшенного метода

Полученные значения диагностического параметра для бездефектной зоны и дефектов различной глубины имеет статистически значимые различия, что обеспечивает надёжное определение степени коррозионного поражения.

**Заключение**

Проведённое исследование подтвердило принципиальную возможность использования импульсного вихретокового метода для обнаружения и количественной оценки питтинговых дефектов в ферромагнитных трубопроводах. Экспериментальные испытания на образцах толщиной 10 и 12 мм показали, что тангенс угла наклона затухающего сигнала является информативным диагностическим параметром.

Полученные результаты подтверждают работоспособность разработанного устройства и его перспективность для применения в системах неразрушающего контроля ферромагнитных нефтегазовых трубопроводов.

**Список литературы**

1. Steelonthenet. Steel consumption statistics [Электронныйресурс]. URL: https://www.steelonthenet.com/resources/market-data/consumption.html

2. Global Energy Monitor. Global Oil Infrastructure Tracker [Электронныйресурс]. URL: https://globalenergymonitor.org/projects/global-oil-infrastructure-tracker

3. Неразрушающий контроль: Справочник: в 7 т. / под общ.ред. В.В. Клюева. Т. 2: в 2 кн. – М.: Машиностроение, 2003.

Контакты:
sashashep17ru@gmail.com (Шепелев Александр Константинович)
DobrenkoAM@mpei.ru (Добренко Алексей Михайлович)
LuninVP@mpei.ru (Лунин Валерий Павлович)
GladovskyVA@mpei.ru (Гладовский Вадим Александрович)

УДК **620.179.16:681.7**

***А. В. ШИЛОВ***[1]*, канд. физ.-мат. наук*
***А. Б. СОТСКИЙ***[1]*, д-р физ.-мат. наук, проф.*
***Е. А. ЧУДАКОВ***[1]*, канд. физ.-мат. наук*
***Д. В. ПОНКРАТОВ***[1]
***М. Э. ПОДЫМАКО***[2]
[1]Могилевский государственный университет имени А. А. Кулешова (Могилев, Беларусь)
[2]ОАО «Могилевлифтмаш» (Могилев, Беларусь)

## ОПТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ ОРИЕНТАЦИИ ПРЯМОУГОЛЬНЫХ БАЛОК

**Аннотация.** Предложен и апробирован экспериментально метод оптического контроля ориентации и размеров параллельных вертикальных балок, основанный на модели прямоугольного поперечного сечения балки. Метод предполагает использование лазерного уровня и оптического теодолита, имеет субмиллиметровую точность и прост в реализации.

**Ключевые слова:** дистанционный контроль конструкций, лазерный уровень, оптический теодолит, обратная оптическая задача.

**Введение.** Дистанционный оптический контроль конструкций, содержащих прямоугольные параллельные балки, востребован в шахтах и в

строительстве. Известные методы такого контроля предполагают использование лидарных систем [1], либо систем с лазерами непрерывного действия, калибруемых с использованием нейронных сетей [2, 3]. В этих методах имеются ограничивающие факторы включая высокую стоимость оборудования и ограниченную (миллиметровую) точность получаемых результатов. Актуальна разработка альтернативных подходов к проблеме. Метод такого рода представлен в настоящем докладе. Его реализация предполагает использование лазерного уровня и оптического теодолита.

**Схема измерений**. Ее иллюстрирует рис.1*а*. Балки освещаются двумя горизонтальными линиями лазерного уровня, разделенными промежутком $d$. Рассеянное излучение регистрируется теодолитом. Расстояние по вертикали от центра теодолита до рабочей плоскости лазерного уровня равно $|z_0|$. Фрагмент рабочей линии лазерного уровня на балке 3, наблюдаемый через окуляр теодолита, приведен на рис.1*б*.

Измеряемые угловые координаты видимых точек линий лазерного уровня на балках равны $\theta$ и $\varphi$. Тогда $z$ – координата рабочей плоскости лазерного уровня

$$z_0 = \frac{d\tan(\theta - \delta\theta)}{|\tan(\theta - \delta\theta) - \tan(\theta)|}. \qquad (1)$$

Координаты точек рабочей линии лазерного уровня на балках в системе координат теодолита определяются по формулам

$$x_i = -z_0 \tan(\theta_i)\cos(\varphi_i),\ y_i = z_0 \tan(\theta_i)\sin(\varphi_i), \qquad (2)$$

где $i = \overline{1, N}$ – номера точек. Контуры сечения балок 3 и 4 плоскостью $z = z_0$ представлены на рис.2.

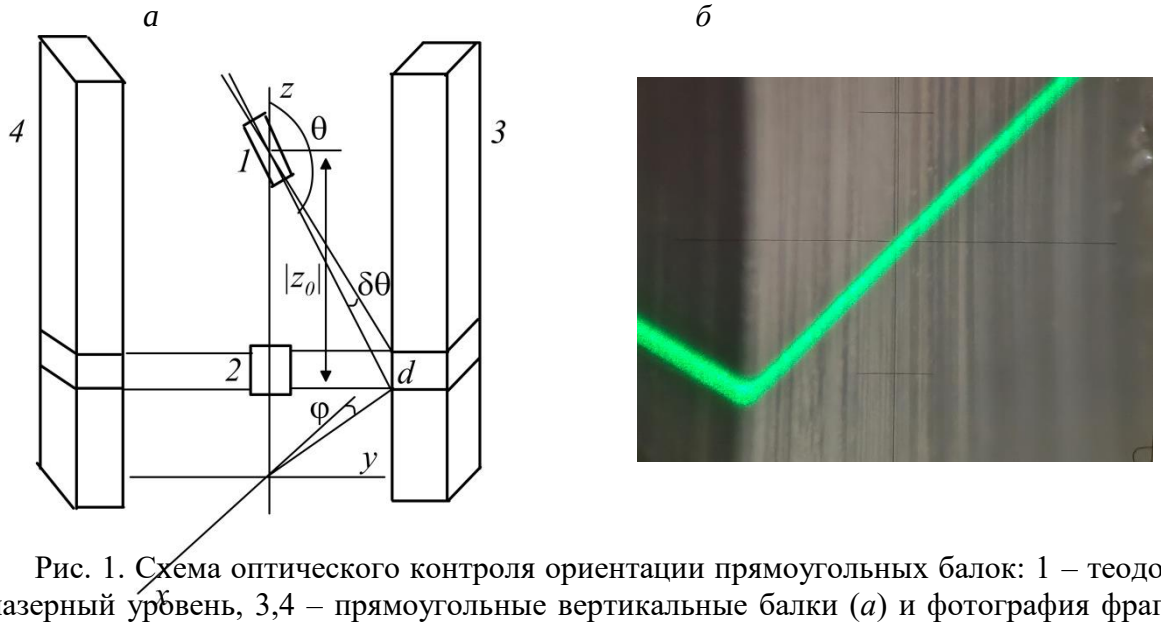



Рис. 1. Схема оптического контроля ориентации прямоугольных балок: 1 – теодолит, 2 – лазерный уровень, 3,4 – прямоугольные вертикальные балки (*а*) и фотография фрагмента рабочей линии лазерного уровня на балке 3 в поле зрения теодолита (б)

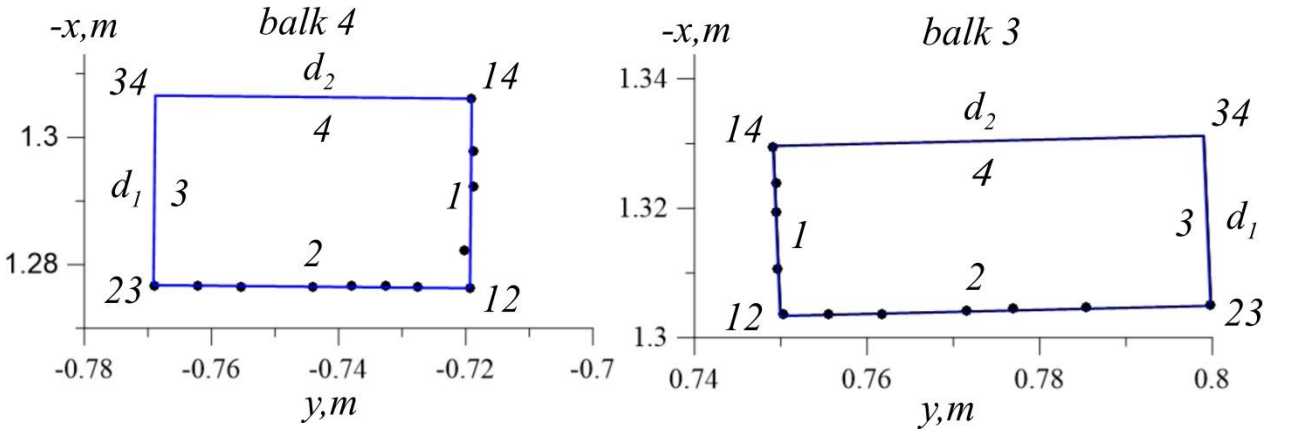



Рис. 2. Контуры сечения балок плоскостью лазерного уровня $z = z_0$. Дискретные точки – экспериментальные данные

Здесь лазерным уровнем освещены стороны сечений 1 и 2, а стороны 3 и 4 находятся в тени и поэтому в зрительную трубу теодолита не наблюдаются. Двузначными номерами помечены ребра сечений. Эти номера соответствуют номерам пересекающихся линий (сторон сечений).

В согласии с прямоугольной моделью сечений балок точки, относящиеся к линиям 1 и 2 на рис.2 лежат на прямых, описываемых уравнениями

$$y = ax + b_1 \text{ (линия 1)}, \tag{2}$$

$$y = -x / a + b_2 \text{ (линия 2)}, \tag{3}$$

где $a$, $b_1$, $b_2$ – константы, подлежащие определению методом наименьших квадратов. Целевой функцией является

$$F(a, N_1) = \sum_{i=1}^{N_1} [l_i^{(1)}]^2 + \sum_{N_1+1}^{N} [l_i^{(2)}]^2, \tag{4}$$

где

$$[l_i^{(1)}]^2 = (ax_i + b_1 - y_i)^2 / (a^2 + 1)$$

– квадрат расстояния $i$ - й точки от линии 1,

$$[l_i^{(2)}]^2 = a^2(-x_i / a + b_2 - y_i)^2 / (a^2 + 1)$$

– квадрат расстояния $i$ - й точки от линии 2,

$$b_1 = -(a\sum_{i=1}^{N_1} x_i - \sum_{i=1}^{N_1} y_i) / N_1, \tag{5}$$

$$b_2 = (a^{-1} \sum_{i=N_1+1}^{N} x_i + \sum_{i=N_1+1}^{N_1} y_i) / (N - N_1), \tag{6}$$

и предполагается, что точки с номерами $i = \overline{1, N_1}$ соответствуют линии 1, а точки с номерами $i = \overline{N_1 + 1, N}$ – линии 2.

В согласии с (2), (3), (5), (6), после отыскания минимума функции (4) пространственная ориентация рассматриваемой балки становится известной. В частности, для координат ребра 12 имеем

$$x_{12} = a(b_2 - b_1) / (a^2 + 1), \quad y_{12} = (b_1 + a^2 b_2) / (a^2 + 1).$$

Однако координаты ребер 23, 34, 14, а значит и длины сторон сечения балок $d_1$, $d_2$ на рис.2 остаются неопределенными. Для их нахождения надо измерить углы $\theta_i$, $\varphi_i$ при номерах $i=1$ и $i=N$, соответствующих крайним точкам линий 1 и 2. После подстановки этих значений в (2) найдем $x_{14}$, $y_{14}$, $x_{23}$, $y_{23}$,

$$d_1=\sqrt{(x_{14}-x_{12})^2+(y_{14}-y_{12})^2}, \quad d_2=\sqrt{(x_{23}-x_{12})^2+(y_{23}-y_{12})^2},$$

$$x_{34}=x_{14}-ad_2/\sqrt{1+a^2}, \quad y_{34}=y_{14}+d_2/\sqrt{1+a^2}.$$

Представленные соотношения дают полное решение обратной оптической задачи об определении ориентации и периметре прямоугольной балки в выбранной плоскости $z=z_0$.

**Пример.** Для тестирования подхода мы исследовали структуру, состоящую из двух стальных балок прямоугольного сечения, подобную представленной на рис. 1*а*. К этой же структуре непосредственно относятся рис.1б, 2. В экспериментах использован оптический теодолит 3Т5КМ с разрешающей способностью $5''$ и лазерный уровень INSPIRITECH G4F16. Значение $z_0$, определенное по формуле (1), составляло $-0.776m$. В таблице 1 приведены результаты измерения углов $\theta_i$ и $\varphi_i$. Соответствующие табличным углам декартовы координаты точек на сторонах 1 и 2 балок отмечены на рис.2 дискретными точками. Сплошные прямые на рис.2 – результат решения обратных оптических задач по определению координат угловых точек сечения балок $x_{12}$, $y_{12}$, $x_{23}$, $y_{23}$, $x_{14}$, $y_{14}$, $x_{34}$, $y_{34}$. Эти результаты относятся к значению $N_1=4$, найденному методом наименьших квадратов для обеих балок.

Таблица 1. Измеренные значения углов $\theta_i$ и $\varphi_i$

| balk 3 | | | balk 4 | | |
|---|---|---|---|---|---|
| $i$ | $\theta_i$ ,deg | $\varphi_i$ ,deg | $i$ | $\theta_i$ ,deg | $\varphi_i$ ,deg |
| 1 | 116.97 | 29.40 | 1 | 117.51 | -28.84 |
| 2 | 117.04 | 29.52 | 2 | 117.63 | -28.97 |
| 3 | 117.10 | 29.60 | 3 | 117.70 | -29.08 |
| 4 | 117.22 | 29.77 | 4 | 117.83 | -29.32 |
| 5 | 117.30 | 29.92 | 5 | 117.92 | -29.40 |
| 6 | 117.26 | 30.10 | 6 | 117.85 | -29.68 |
| 7 | 117.21 | 30.30 | 7 | 117.81 | -29.85 |
| 8 | 117.13 | 30.61 | 8 | 117.77 | -30.03 |
| 9 | 117.08 | 30.78 | 9 | 117.72 | -30.23 |
| 10 | 117.01 | 31.05 | 10 | 117.63 | -30.61 |
| 11 | 115.90 | 31.51 | 11 | 117.57 | -30.83 |
| = | = | = | 12 | 117.52 | -31.06 |

В табл. 2 сопоставлены результаты прямого измерения длин сторон балок $d_1$, $d_2$ штангенциркулем (строка mec) и восстановления $d_1$, $d_2$ по описанному алгоритму (строка opt)

Таблица 2. Восстановление длин сторон сечения балок

| | balk 3 | | balk 4 | |
|---|---|---|---|---|
| метод | $d_1$ ,mm | $d_2$ ,mm | $d_1$ ,mm | $d_2$ ,mm |
| mec | 26,3 | 49,9 | 29,9 | 49,8 |
| opt | 25,9 | 49,9 | 29,9 | 49,5 |

Видимое из табл.2 расхождение результатов разных методов находится в пределах 0.4mm. Это расхождение можно отнести в счет как погрешности принятой прямоугольной модели сечения балок, так и конечной толщины линии лазерного уровня. Отметим также, что расстояние между центрами балок 3 и 4 (под координатами центров балок понимаются $\bar{x} = 0.25(x_{12} + x_{14} + x_{23} + x_{34})$, $\bar{y} = 0.25(y_{12} + y_{14} + y_{23} + y_{34})$), измеренное рулеткой и рассчитанное через найденные координаты угловых точек сечений балок равны соответственно 1,469 m и 1,4595 m, их расхождение находится в пределах погрешности рулетки.

**Заключение.** Оценки показали, что при использовании лазерного уровня с толщиной линии менее 1 mm и теодолита с угловым разрешением секундного порядка предложенный метод позволяет определить координаты угловых точек сечения прямоугольных балок с погрешностью, не превосходящей 0.1 mm. Но ценой столь высокой точности являются заметные временные затраты и жесткие требования к стабильности элементов установки. Ускорение измерений возможно за счет перехода к обработке фотографических изображений линий лазерного уровня на балках. Корректность получаемых при этом результатов может контролироваться с помощью разработанного метода, который принципиально более точен.

Работа выполнена в рамках ГПНИ РБ «5.1. Фотоника и лазерно-оптические технологии».

**Список литературы**

1. Zhu, X. Development of multi-sensors fusion monitoring system for shaft wall deformation / X. Zhu [et al.] // Measurement Science and Technology. – 2024. – Vol. 35, No. 8. – P. 086203-1–086203-16. – DOI: 10.1088/1361-6501/ad4622

2. Давыденко, Е.В. Калибровка положения видеокамеры в задаче оптической лазерной триангуляции / Е.В. Давыденко, А.Л. Приоров // Цифровая обработка сигналов. – 2009. - №3. С. 16 – 20.

3. Li, B. Research on a Lightweight Vision-based Monitoring Method for Rigid Guide Rail Joint Defects in Coal Mine Shafts / B. Li // International Journal of Advanced Engineering and Technology Research. – 2026. – Vol. 2, № 1. – P. 50–55.

Контакты:
undersv@yandex.ru (Шилов Артур Владимирович)
d.v.ponkratov@yandex.by (Понкратов Дмитрий Васильевич);
ab_sotsky@mail.ru (Сотский Александр Борисович);
kenni_mark@bk.ru (Чудаков Евгений Александрович);
podymako_m@mail.ru (Подымако Максим Эдуардович)

УДК 624.011.1; 539.4

***А. Д. ЩЕРБО*[1],**
***Е. А. МОЙСЕЙЧИК*[1]**, *д-р техн. наук, проф.*
***А. А. ЯКОВЛЕВ*[2],**
***Д. И. КРАВЧЕНКО*[2],**
[1]Белорусский национальный технический университет (Минск, Беларусь)
[2]ООО «СИМТЕХ» (Минск, Беларусь)

# АЛГОРИТМ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ОЦИФРОВКИ И СТАДИЙНОГО АНАЛИЗА ДИАГРАММ КРАТКОВРЕМЕННОГО СЖАТИЯ ДРЕВЕСИНЫ СОСНЫ ВДОЛЬ ВОЛОКОН

**Аннотация.** Разработан алгоритм автоматической обработки экспериментальных данных, позволяющий извлекать и анализировать диаграммы деформирования, выполнять их сегментацию с учетом фактических характеристик испытываемых деревянных образцов (два типоразмера 60 и 120 мм). Установлено, что модуль Юнга сосны вдоль волокон составляет 12,8 ГПа, предел прочности при сжатии – 40,6±4,7 МПа, а полная удельная работа деформации достигает 6,0 МДж/м³. Автоматизация сокращает трудоёмкость обработки данных, позволяя получать достоверные результаты.

**Ключевые слова:** сосна обыкновенная, сжатие вдоль волокон, диаграмма деформирования, модуль упругости, предел пропорциональности, касательный модуль упругости, удельная работа деформации, автоматизация.

**Введение.** Древесина как конструкционный анизотропный материал широко применяется в строительстве, особенно в регионах с развитой лесоперерабатывающей промышленностью. При проектировании несущих деревянных конструкций (колонн, балок, арок) важное значение имеют прочностные и деформативные характеристики материалов при сжатии вдоль волокон. Согласно ГОСТ 16483.10–73 [1] оценка качества древесины при этом ограничивается фиксацией разрушающей нагрузки. Однако такой подход не позволяет получить достаточную информацию о поведении анизотропного материала вплоть до его разрушения [2, 3].

Современные испытательные машины, например Zwick с ПО «TestXpert II», регистрируют точки диаграммы с высокой частотой. Экспериментальные данные фиксируются и сохраняются в проприетарном (скрытом от пользователя) формате. В инженерную практику, как правило, переносятся лишь итоговые значения разрушающей силы. Кроме того, измеряемое перемещение траверсы состоит из перемещения образца и дополнительных перемещений силовой рамы, захватов и обмятия торцов. При этом, дополнительные перемещения могут быть сопоставимы с упругими деформациями образца, что приводит к существенному занижению истинного модуля упругости (в 3–4 раза) [4]. Для устранения этого эффекта применяют либо прямые экстензометрические измерения, либо косвенные методы, в частности, испытания образцов разной длины с последующей экстраполяцией податливости [3, 5].

Авторами статьи [6] предложен алгоритм сбалансированной оценки параметров с целью фильтрации инструментальных и методических ошибок, обусловленных дополнительными смещениями в ходе натурных испытаний древесины. Работа базируются на оптимизации функции потерь с регуляризацией, а именно: минимизируя невязку с опытными точками при одновременном ограничении вариативности модели. Автор добивается устойчивых результатов даже в условиях измерений, имеющих шумы.

В отличие от этого подхода, авторами настоящей статьи разработан алгоритм, ориентированный не на выбор модели из параметрического семейства, а на структурный анализ экспериментальной диаграммы деформирования. Вместо поиска неизвестных параметров модели предлагается выполнять постадийно сегментацию кривой на основе касательного модуля упругости, что допускает количественно оценивать границы перехода материала от упругого поведения к разрушению.

Целью настоящей статьи является разработка и апробирование алгоритма автоматической оцифровки и стадийного анализа диаграмм сжатия сосны вдоль волокон с поправкой на податливость испытательной машины.

**Материалы и методика исследования.** Объектом исследования служила древесина сосны обыкновенной из лесного массива Минской области. Отбирали прямослойные заготовки без видимых пороков (сучки, трещины, косослой). Изготовлены образцы квадратного сечения 30×30 мм: три длиной 60 мм и три образца длиной 120 мм. Влажность материала составвляет (12–15 %). Образцы кондиционировались при 20±2 °C в течение 14 суток. Испытания проводили на универсальной машине «Zwick Z100» с номинальным усилием 100 кН, оснащённой системой автоматической записи данных «TestXpert II». Нагружение выполняли с постоянной скоростью перемещения траверсы 5 мм/мин до разрушения.

Экспериментальные результаты сохранялись в формате «.zs2». Для доступа к временным рядам разработана программа на языке Python с использованием модуля «struct» для побайтового декодирования. Идентификация измерительных каналов (сила, перемещение траверсы, время) проведена на основе анализа заголовков и сверки с текстовым протоколом (.ERG). После обработки формировался массив с дискретностью около 0,1 с (6–9 тыс. точек на образец). Корректность извлечения подтверждена сравнением максимального усилия с протокольным – расхождение не превысило 0,1 %. Напряжения вычислялись как $\sigma = F / A$, где $A = 900$ мм² – площадь поперечного сечения.

Для учёта податливости испытательной машины использован стандартный подход, согласно которому деформация силовой рамы линейно зависит от нагрузки [7]. С учётом этого полное перемещение траверсы складывается из деформации машины и деформации образца:

$$\delta_{\text{изм}} = C_m \cdot F + (L_0/(E \cdot A)) \cdot F, \qquad (1)$$

где $C_m$ – податливость силовой рамы (мкм/кН); $L_0$ – начальная длина образца; $E$ – истинный модуль упругости материала (модуль Юнга).

Суммарная податливость системы $c = \delta_{изм} / F$ является линейной функцией длины: $c = C_m + L_0 / (E \cdot A)$. Для двух типоразмеров проведена линейная регрессия, по угловому коэффициенту которой определён E, а по свободному члену – $C_m$. Вычисления реализованы в Python с использованием пакетов NumPy и SciPy.

Обработанную диаграмму σ–ε (с поправкой) анализировали с использованием касательного модуля $E_t = d_\sigma/d_\varepsilon$, вычисляемого методом скользящего окна. Критерии стадий (в соответствии с классификацией, принятой в механике разрушения [2]): 0 (обмятие) – до $F = 0{,}05 \cdot F_{max}$; I (линейно-упругая работа) – $E_t \approx$ const, $R^2 > 0{,}99$; II (зарождение разрушения) – $E_t$ снижается до $0{,}5 \cdot E$; III (несущая способность) – $E_t = 0$, $d_\sigma/d_\varepsilon = 0$; IV (смятие и разупрочнение): ниспадающая ветвь с локальными сбросами силы более 2 % от $F_{max}$.

Удельная работа деформации (энергоёмкость) вычислялась численным интегрированием диаграммы методом трапеций как площадь под кривой σ(ε).

**Результаты экспериментальных исследований.** Все образцы разрушились по механизму смятия, без потери устойчивости, что подтверждается слабой корреляцией между $\sigma_{max}$ и длиной ($r = 0{,}07$). В табл. 1 приведены индивидуальные показатели.

Табл. 1 Механические характеристики образцов сосны при сжатии вдоль волокон

| № | Метка | $L_0$, мм | $\sigma_{пц}$, МПа | $\varepsilon_{пц}$, % | $\sigma_{max}$, МПа | $\varepsilon_{пик}$, % | $\sigma_{пц}/\sigma_{max}$ | $W_{пик}$, кДж/м³ | $W_{полн}$, МДж/м³ | Остаточная прочность, % |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 4.4 | 60 | 28,8 | 1,17 | 32,6 | 2,45 | 0,88 | 510 | 6,0 | 75 |
| 2 | 4.8 | 60 | 45,2 | 0,76 | 47,5 | 1,14 | 0,95 | 230 | 4,7 | 82 |
| 3 | 4.12 | 60 | 38,5 | 0,85 | 40,7 | 1,26 | 0,94 | 245 | 4,2 | 86 |
| 4 | 6.1 | 120 | 36,0 | 0,84 | 39,7 | 1,37 | 0,91 | 310 | 3,1 | 80 |
| 5 | 6.2 | 120 | 39,9 | 0,75 | 42,1 | 0,99 | 0,95 | 191 | 3,2 | 80 |
| 6 | 6.4 | 120 | 38,5 | 0,73 | 40,9 | 0,96 | 0,94 | 172 | 3,3 | 81 |

Средние значения: $\sigma_{max} = 40{,}6 \pm 4{,}7$ МПа (коэффициент вариации 11,5 %). Предел пропорциональности $\sigma_{пц}$ составил $(0{,}88–0{,}95) \cdot \sigma_{max}$, что указывает на весьма узкий диапазон линейно-упругой работы и раннее начало микропластических деформаций, обусловленных гетерогенностью структуры древесины [3]. Деформации при пике – от 0,96 до 2,45 %. Полная удельная работа деформации до разрушения (энергоёмкость) варьировалась от 3,1 до 6,0 МДж/м³.

На рис. 2 представлены наложенные диаграммы σ–ε для всех образцов. Их форма хорошо воспроизводится, особенно на начальном линейном участке. Применение коррекции по формуле (1) дало истинный модуль упругости $E$ = 12,8 ГПа (рис. 3), тогда как без поправки по перемещению траверсы получались «кажущиеся» значения 1,5–3,2 ГПа, что кратно занижает реальную жёсткость материала. Податливость машины составила $C_m$ = 32,7 мкм / кН, что

эквивалентно дополнительному перемещению около 1 мм при нагрузке 30 кН – этот эффект нельзя игнорировать при определении упругих констант.

Автоматическая сегментация диаграммы на рис. 4 показывает, что упругая стадия плавно переходит в несущую способность – касательный модуль снижается монотонно, а предел пропорциональности лежит почти под самым пиком. За максимумом идет пологая нисходящая ветвь, на которой видны локальные скачки, порядка 5–8% от максимума, – это как результат накопления повреждений. Остаточная прочность при этом держится на уровне 75–86%, что вполне подтверждает известное: древесина ведет себя как вязкий материал и имеет хороший запас по деформациям [5, 8].

Рис. 1 Испытание образцов

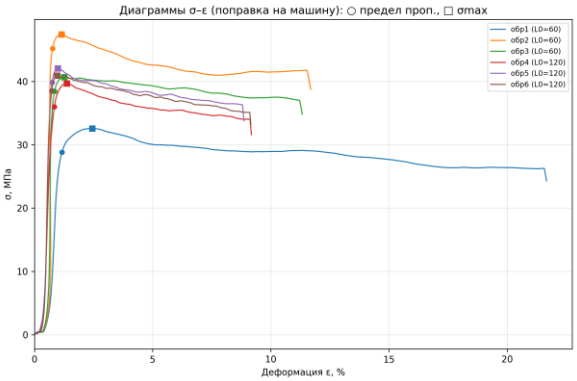



Рис. 2. Диаграммы σ–ε шести образцов: ○ – предел пропорциональности, □ – несущая способность

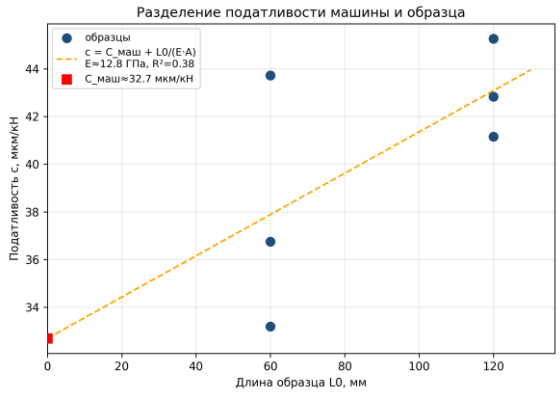



Рис. 3. Разделение податливости машины и образца по двум типоразмерам

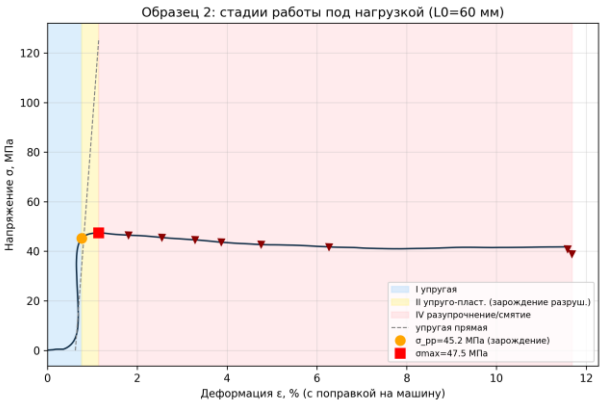



Рис. 4. Стадии работы образца под нагрузкой (образец 4.8, $L_0$=60 мм)

Сравнительный анализ полученных данных со справочными [5, 8, 9] показывает хорошую согласованность: для сосны вдоль волокон модуль упругости находится в диапазоне 10–14 ГПа, а прочность – 35–50 МПа. Полученные значения согласуются с данными других исследователей [10, 11]. Как отмечается в работе [12], учёт нелинейных эффектов при деформировании анизотропных материалов позволяет более точно описывать постпиковое поведение, что подтверждается полученными в настоящем исследовании результатами на стадии разупрочнения. Использованный метод разделения податливости не требует дополнительных измерительных приборов и легко

реализуется на испытательной машине, что повышает его инженерную ценность.

С позиций механики деформируемого твёрдого тела, полученные результаты позволяют корректно интерпретировать стадийность процесса. Как отмечает Ю.Н. Работнов [2], диаграмма σ–ε отражает эволюцию дефектной структуры материала. На начальном этапе (стадия I) материал деформируется упруго, затем (стадия II) начинается накопление необратимых повреждений, что сопровождается снижением касательного модуля. Стадия III соответствует образованию макроскладки – локализованной зоны сдвиговых деформаций, характерной для сжатия анизотропных волокнистых материалов. На стадии IV происходит разупрочнение и смятие, при этом остаточная прочность остаётся высокой, что объясняется перераспределением напряжений и вовлечением в деформирование всё новых объёмов материала.

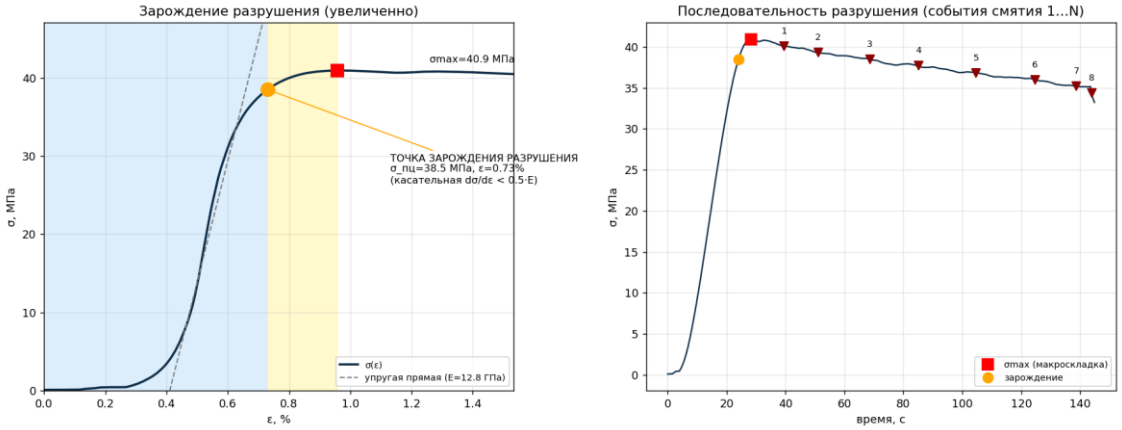



Рис. 5. Точка зарождения разрушения (слева) и последовательность смятия (справа)

Автоматизация сокращает время обработки одного испытания с 20–30 мин (при ручной оцифровке) до нескольких секунд, из процесса исключается субъективизм при определении границ стадии и вычислении производных – для серийных испытаний пиломатериалов в Республике Беларусь это особенно важно.

**Заключение.** Разработан программный модуль, который извлекает полные определяющие соотношения из бинарных файлов машины Zwick. Расхождение по пиковым усилиям с протокольными данными меньше 0,1%, точность можно считать подтвержденной.

Испытания на образцах двух длин (60 и 120 мм) и линейная регрессия позволили разделить податливость машины и образца. В итоге получили истинный модуль упругости вдоль волокон E=12,8 ГПа. Это значение близко к справочным данным и, что характерно, в 4–8 раз выше кажущихся величин, если не вводить поправку на жесткость установки.

Для автоматической сегментации диаграммы на пять стадий деформирования мы задали количественные критерии, опирающиеся на касательный модуль. Предел пропорциональности оказался в диапазоне

(0,88–0,95) $\sigma_{max}$, а удельная работа разрушения достигает 6,0 МДж/м$^3$ – сосна проявляет себя как неплохой энергопоглотитель.

Предложенная методика рекомендуется для обработки данных испытаний строительных лабораторий и при сертификационных испытаниях.

**Список литературы**


1. ГОСТ 16483.10–73. Древесина. Методы определения предела прочности при сжатии вдоль волокон. – М. : Изд-во стандартов, 1974. – 6 с.

2. Работнов, Ю. Н. Механика деформируемого твердого тела : учеб. пособие для мех.-мат. и физ. спец. ун-тов / Ю.Н. Работнов. – 2-е изд., испр. – М. : Наука, 1988. – 712 с.

3. Александров, А. В. Сопротивление материалов : учебник для вузов / А. В. Александров, В. Д. Потапов, Б. П. Державин ; под ред. А. В. Александрова. – М. : Высшая школа, 2009. – 559 с.

4. Ландау, Л. Д. Теория упругости / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. – 4-е изд., испр. и доп. – М. : Наука, 1987. – 248 с. – (Теоретическая физика ; т. 7).

5. Wood handbook : wood as an engineering material / Forest Products Laboratory. – General Technical Report FPL-GTR-282. – Madison : U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 2021. – 543 p.

6. Соколов, А.В. Выбор математической модели: баланс между сложностью и близостью к измерениям / А.В. Соколов, В.В. Волошинов // Международный журнал открытых информационных технологий – 2018. – Том 6, № 9. – С. 33–41.

7. ГОСТ 4651-2014 (ISO 604:2002). Пластмассы. Метод испытания на сжатие.– М. : Стандартинформ, 2014. – 24 с.

8. Senalik, C. A. Chapter 5: Mechanical properties of wood / C. A. Senalik, B. Farber // Wood handbook : wood as an engineering material. – General technical report FPL-GTR-282. – Madison : U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 2021. – P. 5-1–5-46.

9. Gibson, L. J. Cellular Solids: Structure and Properties / L. J. Gibson, M. F. Ashby. – 2nd ed. – Cambridge : Cambridge University Press, 1997. – 510 p.

10. Mankowski, P. Influence of pine (Pinus sylvestris L.) growth rings width on the strength properties of structural sawn timber / P. Mankowski, I. Burawska-Kupniewska, S. Krzosek, M. Grzeskiewicz // BioResources. – 2020. – Vol. 15, No. 3. – P. 5402–5416.

11. Zhao, S. Advances in the study of mechanical properties and constitutive law in the field of wood research / S. Zhao, J. X. Zhao, G. Z. Han // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2016. – Vol. 137, No. 1. – P. 1–9.

12. Пальмов, В. А. Нелинейная механика деформируемых тел. Термодинамический и энергетический подходы / В. А. Пальмов. – Санкт-Петербург : Изд-во Политехнического университета, 2007. – 198 с.



Контакты:
a.cherbo@bntu.by (Щербо Алексей Денисович)
emoisseitchik@mail.ru (Мойсейчик Евгений Алексеевич)
ftkckp@mail.ru (Яковлев Александр Александрович)
ftkckp@mail.ru (Кравченко Дмитрий Игоревич)

УДК 677.017.57

***Д. А. ЯСНЕВ***,
***Д. Б. РЫКЛИН****, д-р техн. наук, проф.*
Витебский государственный технологический университет (Витебск, Беларусь)

# ВЛИЯНИЕ КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ ПРОБЫ ИЗ СМЕШАННЫХ ТЕКСТИЛЬНЫХ ВОЛОКОН НА ЕЕ ВЛАЖНОСТЬ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ ЕМКОСТНЫМ МЕТОДОМ

**Аннотация.** Работа посвящена исследованиям по оценке влияния состава и влажности текстильных волокон на результаты испытаний емкостным методом. Эксперимент проводился на измерительном стенде при частотах электрического поля 10, 320 и 640 кГц. В качестве объектов исследований были использованы пробы из различных сочетаний хлопковых и полиэфирных волокон. В результате проведения исследований доказана необходимость кондиционирования проб перед проведением испытаний. Подтверждено, что различия значений емкости конденсатора, определенных для разных видов исходного сырья, существенно зависят от частоты электрического поля, создаваемого между пластинами конденсатора, а также от параметров процесса испытания.

**Ключевые слова:** показатель гигроскопичности; кондиционнные условия; неровнота смешивания; ёмкостной метод; частота электрического поля конденсатора.

В настоящее время неоднородные волокнистые материалы занимают существенную долю рынка. Смешиванию подвергаются компоненты разного состава, длины, диаметра и цвета для создания неоднородных волокнистых материалов. Смешивание компонентов нескольких видов позволяет получить неоднородные волокнистые материалы, обладающие сочетанием лучших свойств обоих компонентов, характерных ее отдельным составляющим, но только при качественном смешивании составляющих. Плохое качество смешивания приводит к неоднородности вырабатываемого материала, что сказывается на всех его свойствах, снижению стабильности технологических процессов производства и переработки. Наибольшее применение для определения неравномерности смешивания компонентов в текстильных материалах находят оптические и химические способы, которые являются весьма трудоёмкими, а также требуют дополнительных затрат.

На сегодняшний момент отсутствует методика и оборудование, позволяющее в режиме реального времени отслеживать качество смешивания. Применение емкостного метода измерения позволит оперативно фиксировать значение неровноты смешивания, и соответственно осуществлять оценку эффективности процесса смешивания компонентов и их совместной переработки при производстве неоднородных волокнистых материалов, а в случае возникновения дефектов вносить изменения в ход технологического процесса, направленного на повышение качества выпускаемой продукции [1-4]. Емкостной метод не требует применения дополнительных реактивов, микроскопов и прочего, ручные операции сводятся к минимуму.

В результате проведенных ранее исследований [5] было уточнено и доказано, что диэлектрические и гигроскопические свойства материала значительно влияют на получаемый сигнал. Однако анализ графических зависимостей показал, что увеличение массы проб более 3 грамм при частоте 8 МГц не оказывает существенного влияния на получаемые значения емкости при использовании разработанного конденсатора.

В связи с этим на следующих этапах работы было принято решение в качестве объектов исследования использовать пробы волокнистых материалов, массы которых не превышают 3 грамма.

Для оценки влияния состава образца при постоянной массе было сформировано 10 проб из хлопковых и полиэфирных волокон с суммарной номинальной массой 3 г. В данных пробах процентное содержание хлопкового волокна варьировалось в диапазоне от 17 до 76 %.

Эксперимент проводился с использованием измерителя иммитанса на частотах 10, 320 и 640 кГц. На данном этапе пробы предварительно кондиционировались (в климатической камере, испытания проводились в лаборатории, влажность воздуха в которой была существенно ниже нормальных условий. При проведении испытаний на всех частотах был отмечен дрейф данных, а их воспроизводимость оказалась крайне низкой. Данный факт объясняется снижением влажности проб, как непосредственно при проведении испытаний, так и между повторностями. Таким образом подтверждено существенное влияние не только влажности испытуемых проб, но и температурно-влажностные условиях в лаборатории.

С учётом отрицательного результата эксперимента для минимизации влияния окружающей среды на следующем этапе исследований были внесены корректировки в порядок их проведения. Пробы кондиционировались, выдерживались в испытательной лаборатории с нормальными условиями в течение суток, взвешивались на лабораторных электронных весах PA 214C и упаковывались в зип-пакеты для предотвращения изменения массы в процессе испытаний.

Испытания проводились в рандомизированном порядке. Результаты эксперимента представлены на рис. 1-3. Выявлена высокая воспроизводимость результатов, так как различия значений емкости конденсатора, определенных в двух повторностях, не превышали 1% при частоте электрического поля 640 кГц, а при испытаниях на частотах 10 и 320 кГц различий не зафиксировано.

На основании анализа экспериментальных данных было выявлено, что увеличение частоты электрического поля сопровождается повышением коэффициента корреляции между массой каждого из компонентов и емкостью конденсатора, а коэффициент корреляции между влажностью образцов и емкостью конденсатора при этом снижался. Коэффициент корреляции между получаемым сигналом и массой хлопковой составляющей при частоте 10 кГц оказался равен 0,88 и, а при частоте 640 кГц 0,91. С учетом одинаковой массы всех проб коэффициенты корреляции для полиэфирной составляющей оказались аналогичными по абсолютному значению, но противоположны по

знаку. Данный результат соответствует теоретическим предпосылкам разрабатываемого метода оценки неравномерности смешивания.

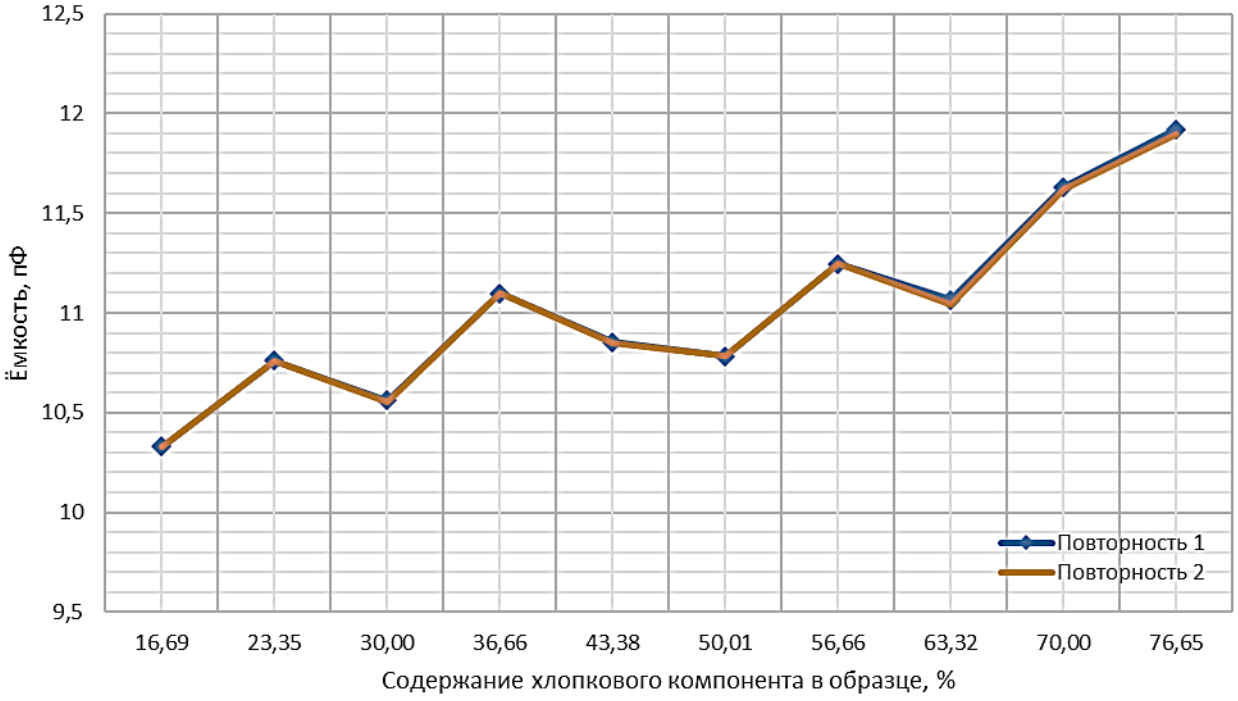



Рис. 1. Зависимость ёмкости образца при различном содержании хлопкового компонента на частоте 10 кГц

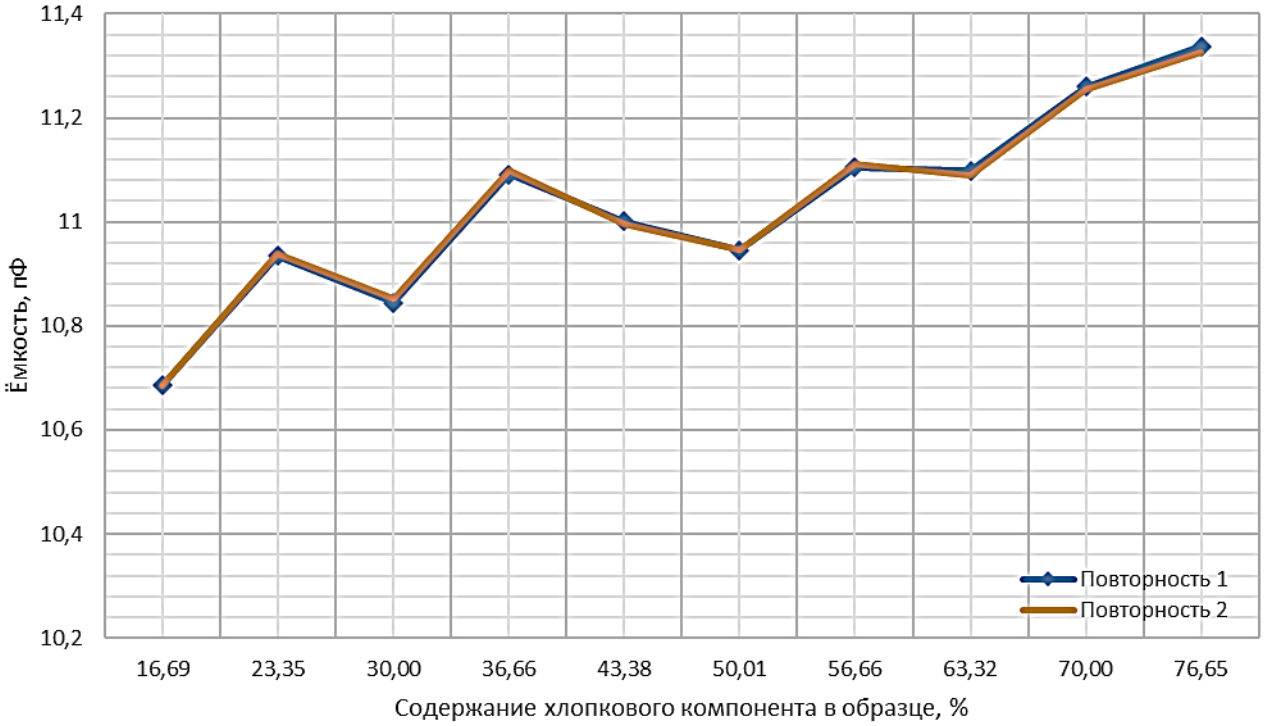



Рис. 2. Зависимость ёмкости образца при различном содержании хлопкового компонента на частоте 320 кГц

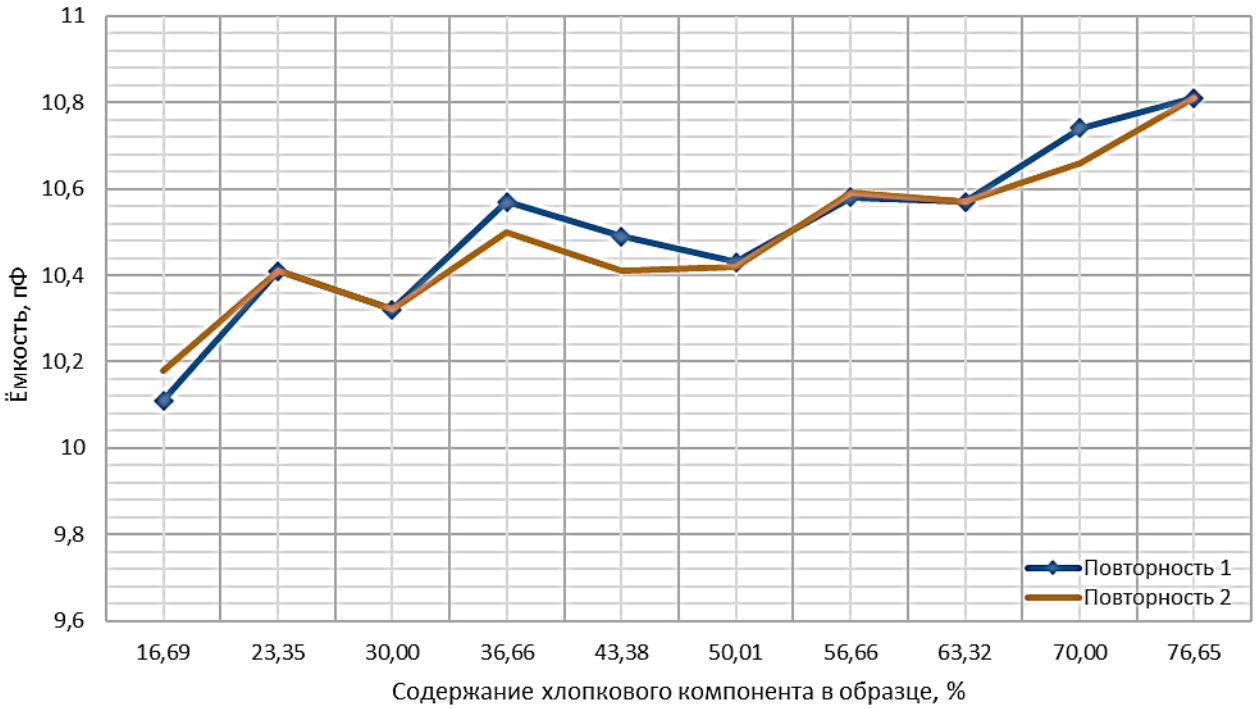



Рис. 3. Зависимость ёмкости образца при различном содержании хлопкового компонента на частоте 640 кГц

После проведения испытаний образцы высушивались для определения фактического содержания влаги. Данные по содержанию влаги в пробе приведены на рис. 4. Можно наблюдать равномерное распределение влаги, как в массе компонентов пробы, так и в пробе в целом, что указывает на корректность поставленных условий при взаимодействии с ней (кондиционирование и последующее выдерживание в испытательной лаборатории, использование зип-пакетов, нитриловых перчаток).

На рис. 5 представлены значения ёмкости конденсатора при испытании различных проб на частотах 10, 320 и 640 кГц, а также суммарное содержание влаги в соответствующем образце. Исходя из анализа графика, можно утверждать, что влияние влажности пробы оказывает значительное воздействие при низкой частоте (10 кГц), и минимизируется с её повышением (320 и 640 кГц). В то же время общая тенденция чувствительности системы к изменению влажности сохраняется.

Однако в ходе испытаний выявлена проблема, заключающаяся в том, что при сохранении общей тенденции увеличения влажности пробы с повышением содержания хлопкового волокна полученная зависимость не была монотонной, что свидетельствует о недостаточности кондиционирования проб. В связи с этим, для повышения точности получаемых зависимостей на следующем этапе работы необходимо разработать рекомендации по их кондиционированию.

В результате проведенных исследований было доказано, что гигроскопические свойства материала значительно влияют на получаемый сигнал.

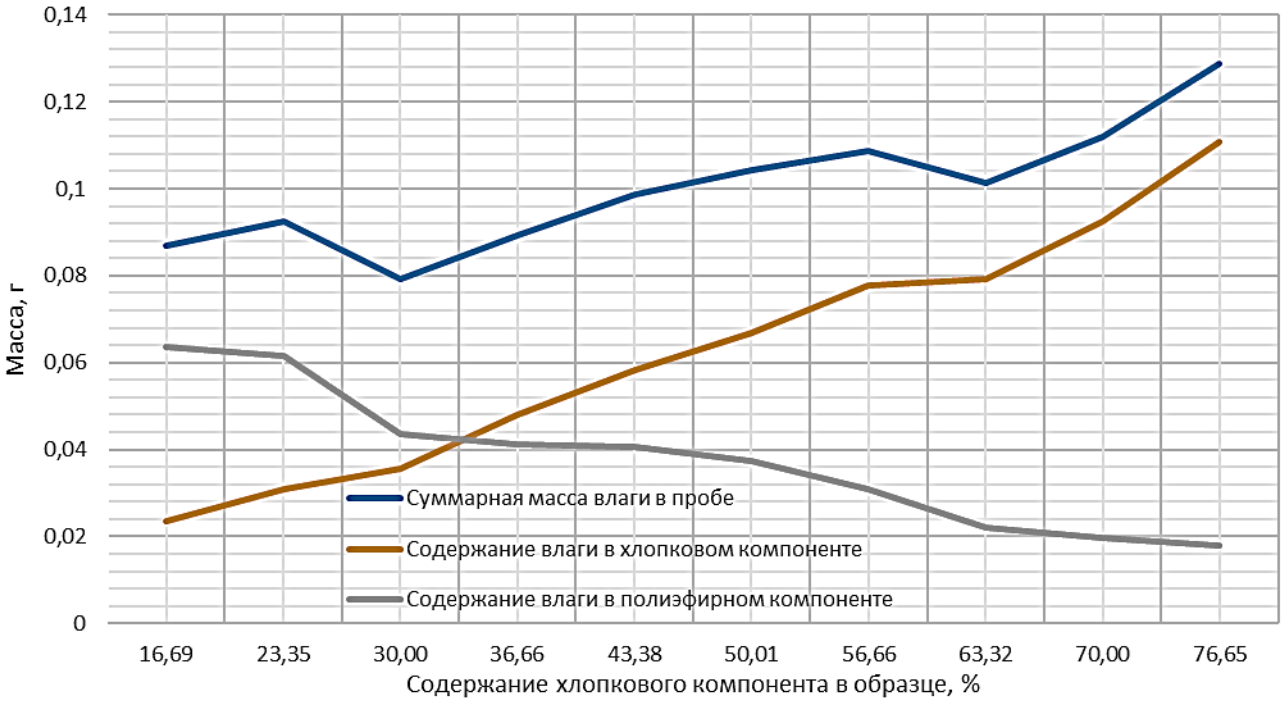



Рис. 4. Содержание влаги в пробе

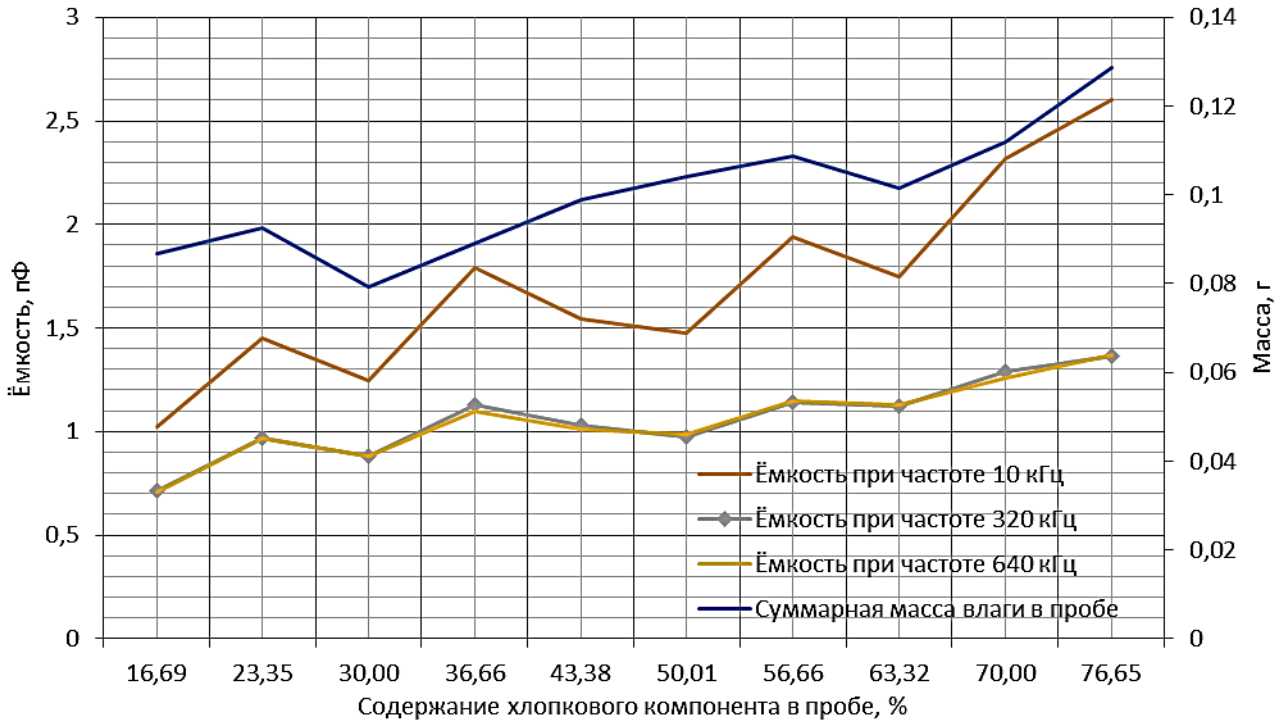



Рис. 5. Отклик системы (измеренная ёмкость) на различных частотах к изменению влажности пробы

Использование измерительного стенда в комплектации с измерителем иммитанса, имеет хорошую воспроизводимостью и адекватность данных, что подтверждается результатами их статистической обработки. Кондиционные условия в лаборатории и образцов имеют ключевое влияние на

воспроизводимость данных. Подтверждено, что различия значений емкости конденсатора, определенных для разных видов исходного сырья, существенно зависят от частоты электрического поля, создаваемого между пластинами конденсатора.

Различная степень влияния вида компонента на получаемые зависимости может быть использована в качестве основы разработки емкостного метода оценки неравномерности распределения натуральных и химических волокон в текстильных материалах.

Работа выполнена в рамках гранта Министерства образования на выполнение научно-исследовательских работ докторантами, аспирантами, соискателями и студентами на 2026 год на тему «Разработка метода оценки неравномерности распределения натуральных и химических волокон в текстильных материалах».

**Список литературы**

1. A vision-based method for analyzing yarn evenness / S. N. Niles, W. P. P. Dias, T. K. M. Perera [et al.]. // International journal of scientific & technology. – 2017. – Vol. 6:2. – P. 254-256.

2. Almetwally, A. A. Electric and dielectric properties of cotton and regenerated cellulose fibers in comparison with polyethylene terephthalate fiber / A. A. Almetwally, H. M. Elfowaty. – DOI 10.1080/15440478.2025.2537062. – Текст : электронный // Journal of Natural Fibers. – 2025. – Vol. 22, iss. 1. – URL: https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/15440478.2025.2537062#abstract (дата обращения: 12.04.2026).

3. Multipurpose nonwoven viscose/polypropylene fabrics: effect of fabric characteristics and humidity conditions on the volume electrical resistivity and dielectric loss tangent / K. A. Asanovic, D. D. Cerovic, M. M. Kostic [et al.]. – DOI 10.1007/s12221-020-1340-4 // Fibers and Polymers. – 2020. – Vol. 21, № 10. – P. 2407–2416.

4. Antibacterial and dielectric properties of textile materials modified with herbal extract of Picea omorika and the copper ferrite nanoparticles / D. Grujić, B. Škipina, D. Cerović [et al.]. – DOI 10.7251/comen2101080g // Contemporary Materials. – 2021. – Vol. 12, № 1. – P. 80–90.

5. Яснев, Д. А. Обоснование применения емкостного метода для оценки неровноты смешивания волокон в неоднородных текстильных материалах / Д. А. Яснев, Д. Б. Рыклин // Вестник Витебского государственного технологического университета. – 2024. – № 3 (49). – С. 51–60.

Контакты:
yasnevdanila@mail.ru (Яснев Данила Андреевич);
ryklin-db@mail.ru (Рыклин Дмитрий Борисович).

Научное издание

# СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА И ДИАГНОСТИКИ СОСТОЯНИЯ ОБЪЕКТОВ

Сборник статей 10-й Международной
научно-технической конференции
(Могилев, 24–25 сентября 2026 года)

**Авторы несут персональную ответственность
за содержание публикуемых материалов**

Корректор *Н. С. Манкевич*
Компьютерный дизайн *Е. Д. Палькович*

Подписано в печать 23.09.2026. Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.
Печать трафаретная. Усл. печ. л. 21,16. Уч.-изд. л. 22,69. Тираж 30 экз. Заказ № 3049.

Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования
«Белорусско-Российский университет».
Свидетельство о государственной регистрации издателя,
изготовителя, распространителя печатных изданий
№ 1/156 от 07.03.2019.
Пр-т Мира, 43, 212022, г. Могилев.

УПКП «Могилевская областная укрупненная типография
имени Спиридона Соболя».
Свидетельство о государственной регистрации издателя,
изготовителя, распространителя печатных изданий
№ 2/24 от 12.12.2013.
Ул. Первомайская, 70, 212030, г. Могилев, Республика Беларусь.

**ISBN 978-985-492-329-1**