

УДК 629.42-192(075)

Исследование неразрушающего контроля осей колесных пар подвижного состава на основе модели

Цзеи Шэнь, А. Е. Цаплин

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Россия, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Шэнь Цзеи, Цаплин А. Е. Исследование неразрушающего контроля осей колесных пар подвижного состава на основе модели // Бюллетень результатов научных исследований. 2026. Вып. 1. С. 67–80. DOI: 10.20295/2223-9987-2026-1-67-80

Аннотация

Цель: исследование физических механизмов формирования изображений дефектов при магнитопорошковом контроле осей колесных пар. Исследование выполнено в рамках магнитостатической теории с ориентацией на применение методов машинного зрения для автоматизированной интерпретации результатов контроля. Работа направлена на систематический анализ влияния приповерхностных дефектов и условий намагничивания на распределение полей рассеяния магнитного потока (ПРМП), а также на установление аналитических связей между геометрией дефекта и параметрами магнитного отклика.

Методы: в условиях магнитостатического приближения на основе уравнений Максвелла и конститутивных соотношений ферромагнитных материалов построена трехмерная параметризованная физическая модель зоны контроля оси колесной пары подвижного состава. Модель учитывает геометрию объекта согласно техническим стандартам и описывает дефект как эквивалентный воздушный паз. Численное моделирование реализовано в среде MATLAB методом конечных элементов (МКЭ). Для минимизации влияния граничных условий предусмотрено расширение расчетной области за счет внешней воздушной среды. Оценка характеристик ПРМП проводилась на основе карт магнитной индукции и анализа поверхностных сканирующих кривых. **Результаты:** выявлены количественные зависимости характеристик локальных возмущений поля от глубины, ширины и ориентации дефектов. Установлено, что рост глубины дефекта вызывает монотонное увеличение пиковых значений магнитной индукции при сохранении стабильной локализации максимума. Изменение ширины дефекта преимущественно влияет на пространственную протяженность зоны рассеяния, в то время как варьирование ориентации приводит к возникновению выраженной асимметрии и перераспределению плотности магнитного потока. **Практическая значимость:** полученные закономерности формируют физическую базу для формализации признаков магнитопорошковых изображений (яркость, геометрические параметры индикаций). Результаты исследования могут быть использованы в качестве теоретического обоснования при проектировании интеллектуальных систем машинного зрения и разработке алгоритмов автоматического распознавания дефектов при техническом обслуживании подвижного состава.

Ключевые слова: неразрушающий контроль, магнитопорошковый контроль, ось колесной пары, магнитостатическое моделирование, поле рассеяния магнитного потока, приповерхностные дефекты, метод конечных элементов, магнитная индукция, машинное зрение

Введение

Оси колесных пар относятся к числу наиболее ответственных несущих элементов подвижного состава, отказ которых непосредственно связан с риском тяжелых последствий для безопасности движения. В процессе эксплуатации оси

подвергаются многократным циклическим нагрузкам, что приводит к формированию приповерхностных усталостных дефектов в зонах концентрации напряжений. В связи с этим в системе технического обслуживания железнодорожного транспорта широко применяются методы неразрушающего контроля, регламентированные действующими нормативными документами, в том числе ГОСТ 34656-2020, где магнитопорошковый контроль (МПК) определен как арбитражный метод выявления поверхностных и приповерхностных дефектов ферромагнитных осей [1].

Высокая чувствительность магнитопорошкового контроля к дефектам с малой шириной раскрытия обусловила его широкое практическое применение при контроле новых и эксплуатируемых осей по ГОСТ 21105-87. Вместе с тем интерпретация результатов МПК в настоящее время в значительной степени основывается на визуальной оценке магнитопорошковых индикаций оператором [2]. Такой подход носит субъективный характер и ограничивает возможности формализации диагностических признаков, а также внедрения автоматизированных систем анализа результатов контроля.

В последние годы методы машинного зрения активно применяются для анализа магнитопорошковых изображений, включая задачи извлечения признаков и автоматизированного распознавания дефектов [3]. Однако магнитопорошковое изображение определяется распределением поля рассеяния магнитного потока, формируемого в области дефекта вследствие локального нарушения магнитной проницаемости материала. Без физически обоснованного анализа магнитного отклика дефектов выбор признаков изображения и построение алгоритмов распознавания часто носят эмпирический характер, что ограничивает надежность и интерпретируемость интеллектуальных методов [4].

В настоящей работе на основе магнитостатической теории разработана трехмерная параметризованная физическая модель МПК оси колесной пары с использованием численного моделирования в среде MATLAB, исследовано влияние геометрических параметров дефектов и режимов намагничивания на распределение полей рассеяния магнитного потока. Полученные результаты формируют теоретическую базу для создания систем интеллектуального НК и автоматизированного распознавания дефектов на основе методов машинного зрения.

Физические основы формирования магнитопорошкового изображения и характеристики поля рассеяния

Магнитопорошковый контроль применяется для обнаружения поверхностных и приповерхностных дефектов в ферромагнитных материалах; формирование изображения при этом обусловлено наличием поля рассеяния магнитного потока (ПРМП) в области дефекта. При намагничивании тела оси внешним магнитным полем в материале устанавливается магнитный поток. При наличии приповерхностных дефектов, таких как трещины, складки или задиры, последние могут

быть эквивалентно представлены как локальные области с пониженной магнитной проницаемостью [5]. Это приводит к нарушению непрерывности магнитной цепи и локальному увеличению магнитного сопротивления, вследствие чего магнитный поток вблизи дефекта отклоняется от основного направления и частично выходит за пределы материала, формируя на поверхности изделия и в ближней воздушной зоне неоднородное поле рассеяния.

Пространственный градиент поля рассеяния вызывает перемещение частиц магнитного порошка вдоль силовых линий магнитного поля и их накопление в области дефекта, что в конечном итоге приводит к образованию наблюдаемой магнитопорошковой индикации в виде характерных полос или скоплений.

В типичных условиях магнитопорошкового контроля осей колесных пар процесс намагничивания протекает достаточно медленно, что позволяет рассматривать магнитное поле в магнитоэстатическом приближении с пренебрежением вкладом токов смещения. В этом случае магнитное поле описывается уравнениями магнитоэстатики:

$$\nabla \cdot B = 0, \nabla \times H = J$$

и линейными конститутивными соотношениями:

$$B = \mu H, \mu = \mu_0 \mu_r,$$

где B — магнитная индукция (Тл),

H — напряженность магнитного поля (А/м),

J — плотность возбуждающего тока (А/м²),

μ_0 — магнитная проницаемость вакуума,

μ_r — относительная магнитная проницаемость материала.

Материал оси является ферромагнитным и характеризуется значением $\mu_r \gg 1$, тогда как для дефектной полости и внешней воздушной среды можно принять $\mu_r \approx 1$. Таким образом, резкий контраст магнитной проницаемости на границе «материал — воздух» является ключевым физическим условием возникновения поля рассеяния и формирования магнитопорошкового изображения.

Трещины выбраны в качестве базового объекта моделирования ввиду их критической значимости для безопасности эксплуатации и возможности точной геометрической параметризации. Физический механизм формирования ПРМП в зоне трещины обусловлен локальным нарушением непрерывности магнитного потока в области с низкой магнитной проницаемостью ($\mu \approx 1$).

Глубина дефекта является ключевым фактором, определяющим интенсивность магнитного отклика. Рост глубины увеличивает магнитное сопротивление участка и объем вытесняемого в воздушную среду потока, что ведет к монотонному росту пиковых значений магнитной индукции над зоной повреждения.

Ориентация дефекта относительно вектора намагничивания детерминирует топологию и симметрию распределения ПРМП. Максимальный магнитный отклик и симметрия поля достигаются при расположении дефекта перпендикулярно линиям индукции. Отклонение от нормали вызывает выраженную асимметрию поля рассеяния, что является важным классификационным признаком при визуальном анализе.

Ширина раскрытия дефекта преимущественно коррелирует с пространственной протяженностью зоны возмущения магнитного поля. Увеличение ширины ведет к расширению области ПРМП при вторичном влиянии на амплитудные значения индукции.

Таким образом, геометрические характеристики дефектов непосредственно определяют как интенсивность, так и пространственную структуру магнитного отклика. Количественная оценка этих взаимосвязей требует разработки параметрической магнитостатической модели для систематического численного анализа типовых дефектных состояний.

Магнитостатическое моделирование и численное исследование дефектных магнитных полей при магнитопорошковом контроле осей

Для перехода к автоматизированной интерпретации результатов магнитопорошкового контроля на базе искусственного интеллекта разработана параметризованная магнитостатическая модель зоны контроля оси колесной пары подвижного состава. Целью моделирования является установление количественных зависимостей между геометрией дефектов и характеристиками полей рассеяния для формирования информативного признакового пространства нейронных сетей.

Трехмерная модель, реализованная в среде MATLAB, включает фрагмент тела оси, воздушный домен и эквивалентный объем дефекта. Исследование сфокусировано на наиболее критичных приповерхностных протяженных несплошностях (усталостных трещинах и задирах), к которым метод МПК обладает максимальной чувствительностью. Дефекты типа пористости или неметаллических включений в рамках данной модели не рассматриваются.

Для обеспечения воспроизводимости и управляемости численного анализа дефект описывается вектором геометрических параметров:

$$P = [h, w, l, \theta, z_0],$$

где $h \in [0, 2; 2, 0]$ мм — варьируемая глубина несплошности, охватывающая диапазон мелких и средних приповерхностных дефектов;

$w = 0,1$ мм — эквивалентная ширина раскрытия;

$l = 10$ мм — осевая протяженность дефекта;

θ и z_0 — угол ориентации и положение дефекта относительно оси изделия соответственно.

Параметрическое пространство сформировано с учетом минимизации краевых эффектов: размеры дефекта значительно меньше области контроля, а его локализация исключает влияние граничных условий расчетной сетки. Уровни намагничивания заданы значениями магнитодвижущей силы $NI \in \{200, 400, 600\}$ А·витков, что соответствует режимам, принятым в промышленной дефектоскопии железнодорожного транспорта.

Основной расчетной величиной для формирования признаков машинного зрения является распределение магнитной индукции B на поверхности оси и в прилегающей воздушной области. Ключевое значение имеет нормальная компонента B_n (далее B_z , где ось z совпадает с внешней нормалью к поверхности), так как именно она определяет условия осаждения магнитного порошка.

На основе анализа распределения B_z выделяются следующие количественные дескрипторы:

- пиковая амплитуда ($B_z \text{ max}$): максимальное значение нормальной компоненты индукции;
- пространственные характеристики: ширина распределения на полувысоте (FWHM) или площадь области, ограниченной изолиниями заданного уровня;
- градиентные и симметричные показатели: коэффициенты асимметрии профиля, отражающие наклон или глубину залегания дефекта.

Для установления количественных корреляций «дефект — отклик» анализируются одномерные профили B_z вдоль сканирующих траекторий. Полученные зависимости формируют физический базис для векторизации признаков и подготовки синтетических наборов данных для обучения алгоритмов машинного зрения.

Геометрической основой исследования служит ось колесной пары типа RF₂ (стандарт ТВ/Т 1010-2016) [6]. Локальная трехмерная модель включает расчетный участок оси, прилегающий воздушный домен и область дефекта. Для минимизации краевых эффектов дефект располагается на значительном удалении от осевых границ модели. Размеры воздушной области выбраны из условия аппроксимации бесконечного пространства (условия дальнего поля).

Физические допущения и свойства материалов

Материал оси принят как однородная ферромагнитная среда с постоянной магнитной проницаемостью ($\mu = \text{const}$), что позволяет сфокусироваться на топологии полей рассеяния.

Область дефекта моделируется как полость с магнитной проницаемостью, равной проницаемости вакуума (μ_0).

Параметризация: дефекты представлены в виде эквивалентных геометрических примитивов. Варьируемыми параметрами являются глубина, протяженность

и ориентация, что позволяет описывать широкий спектр линейных несплошностей (трещины, задиры, складки).

Построенная модель (рис. 1) обеспечивает инвариантность структуры расчетной сетки при параметрическом анализе, что гарантирует сопоставимость результатов при различных конфигурациях дефектов.

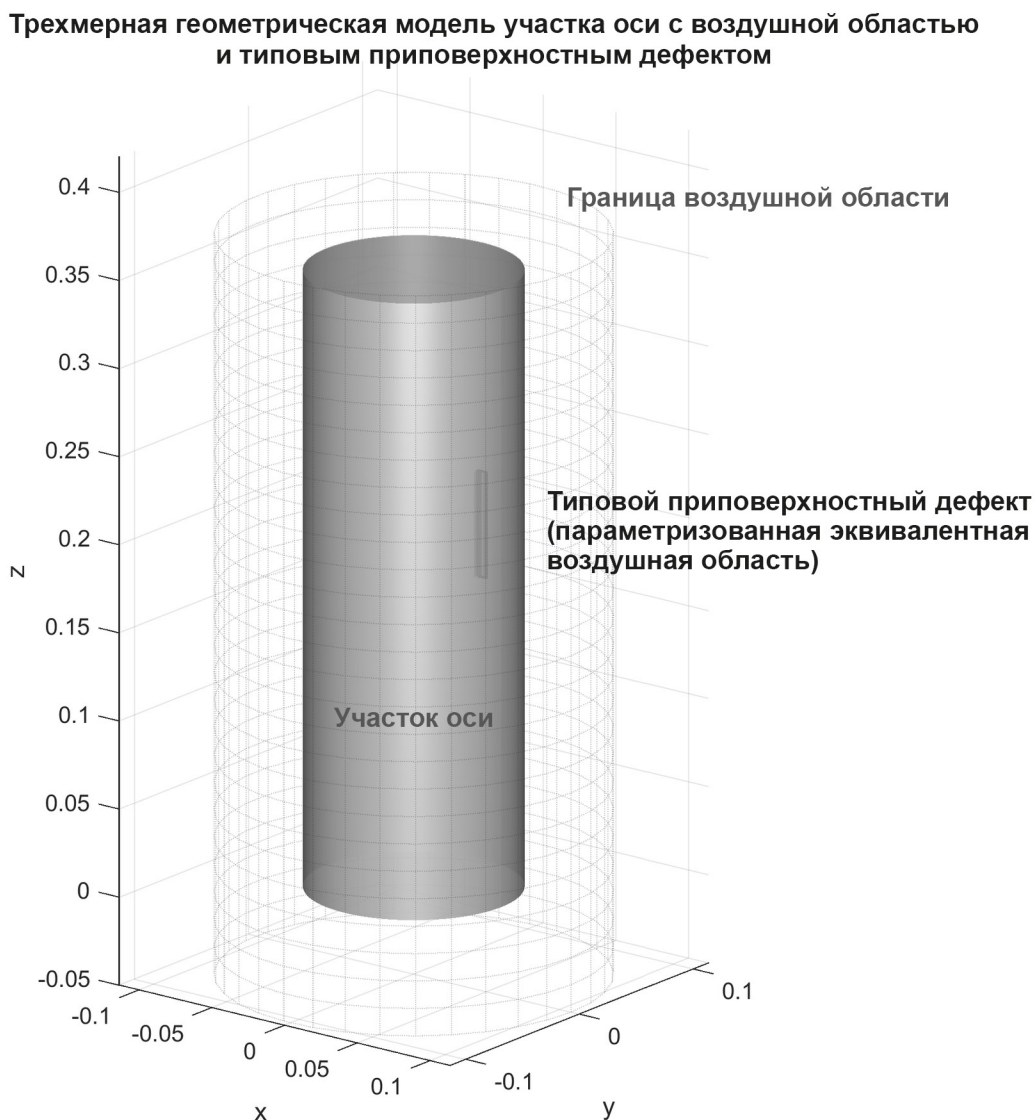


Рис. 1. Трехмерная геометрическая модель участка оси с воздушной областью и типовым приповерхностным дефектом

Для обоснования выбора признаков в системах машинного зрения проведен параметрический анализ магнитоэстатической модели оси серии RF. Исследовано влияние глубины дефекта d (от 0,2 до 2,0 мм) и величины магнитодвижущей силы (МДС) (200, 400 и 600 А·витков) на нормальную компоненту магнитной индукции B_z .

Анализ пространственной стабильности

Распределения B_z вдоль осевой траектории (рис. 2) характеризуются выраженным одиночным максимумом, локализация которого инвариантна относительно глубины дефекта и уровня намагничивания. Точное совпадение пика B_z max с геометрическим центром дефекта позволяет использовать данную координату как стабильный дескриптор положения несплошности для алгоритмов локализации.

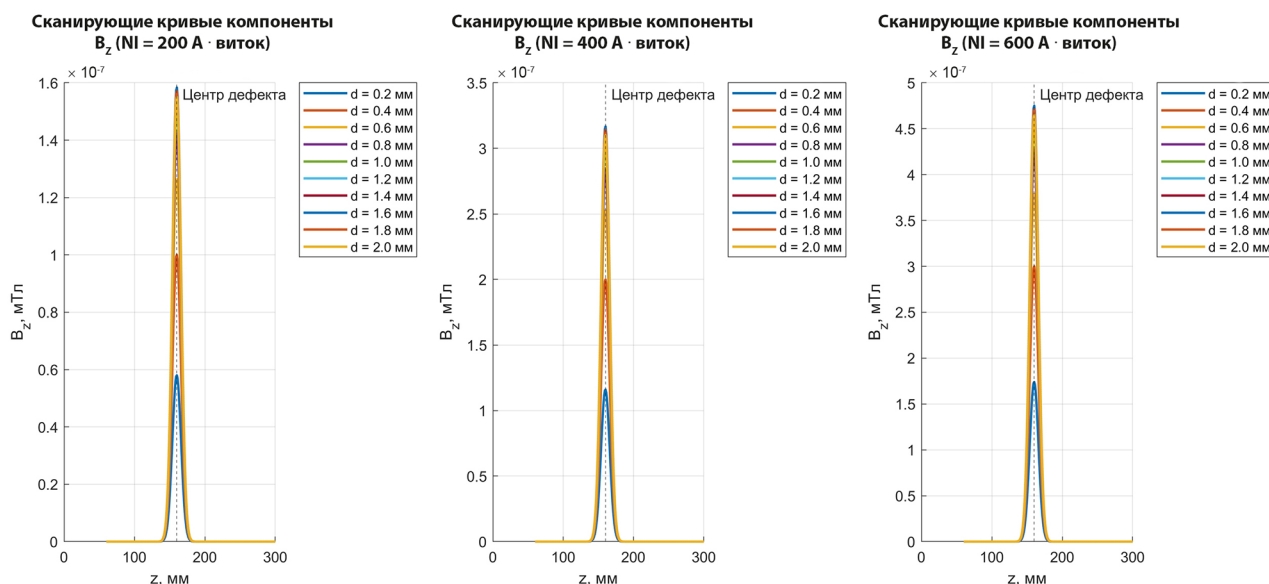


Рис. 2. Распределение нормальной компоненты магнитной индукции B_z вдоль поверхности оси при различных глубинах дефекта и уровнях намагничивания

Зависимость амплитудных характеристик

На основе анализа зависимостей $B_{\max} = f(d)$ (рис. 3) установлены следующие закономерности:

- влияние глубины: при всех уровнях намагничивания наблюдается монотонный рост B_z max при увеличении d (например, при МДС 200 А·витков амплитуда возрастает с $0,58 \cdot 10^{-7}$ Тл до $0,55 \cdot 10^{-7}$ Тл);
- характер роста: при малых глубинах ($d < 1,0$ мм) зависимость близка к линейной, тогда как при $d > 1,2$ мм темп роста снижается из-за перераспределения магнитных потоков в обход дефекта;
- влияние МДС: увеличение магнитодвижущей силы приводит к пропорциональному росту пиковых значений (до $4,65 \cdot 10^{-7}$ Тл при 600 А·витков и $d = 2,0$ мм) без изменения морфологии сигнала.

Стабильность пространственной формы отклика и прогнозируемая зависимость амплитуды от геометрических параметров дефекта подтверждают репрезентативность выбранных магнитных признаков. Эти данные формируют физический базис для векторизации дескрипторов и обучения нейросетевых классификаторов в задачах автоматизированного дефектоскопического контроля.

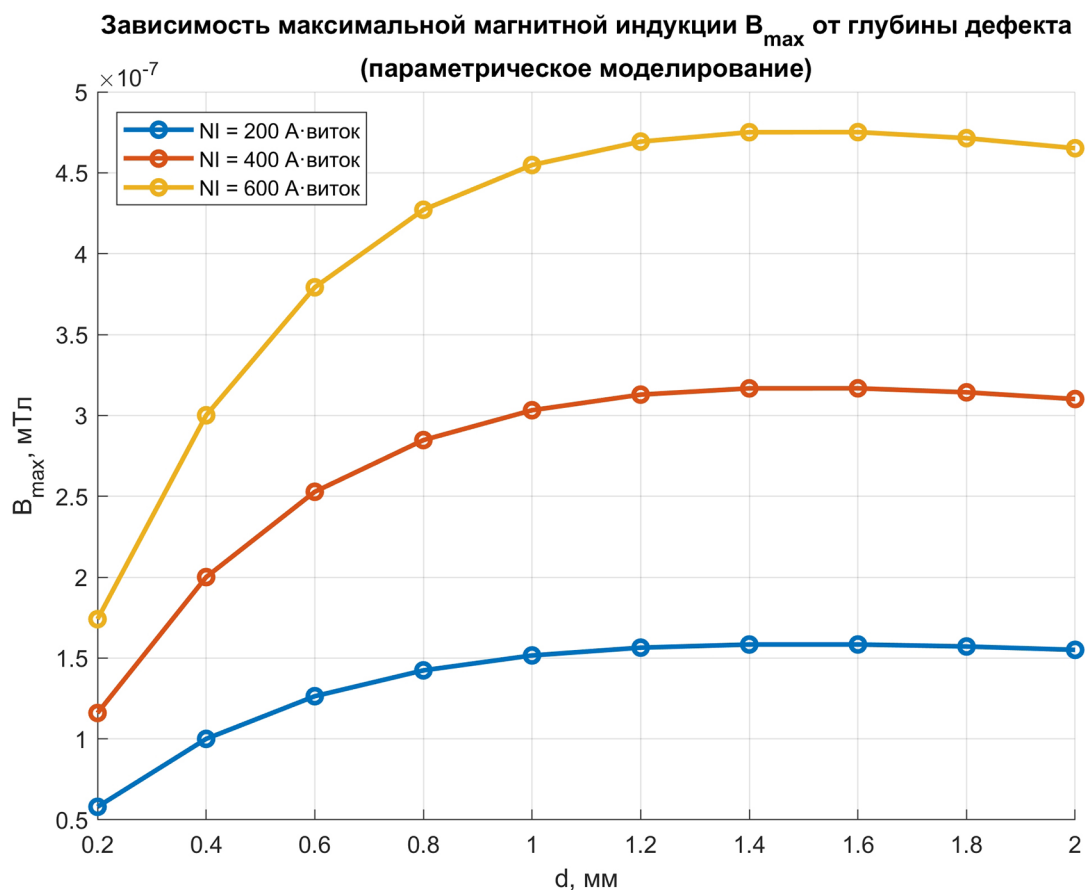


Рис. 3. Характеристика чувствительности амплитудного признака B_{\max} к изменению глубины дефекта

Алгоритмическое обеспечение системы машинного зрения для автоматизации МПК

Для реализации автоматизированного контроля осей колесных пар разработана система на базе алгоритмов глубокого обучения, адаптированная к специфике магнитопорошковых индикаций [7]. В отличие от традиционных методов визуального контроля, требующих высокой квалификации оператора, предлагаемый подход обеспечивает объективность и воспроизводимость результатов.

Процесс обработки данных включает следующие этапы:

- сбор данных: захват изображений зоны контроля при ультрафиолетовом освещении (для люминесцентного МПК);
- предобработка: нормализация яркости, подавление фоновых шумов и фильтрация бликов, характерных для металлических поверхностей осей;
- сегментация: выделение потенциальных зон дефектов на основе морфологических признаков и физических параметров поля рассеяния.

Ключевым этапом является векторизация признаков, базирующаяся на физической интерпретации магнитных полей. В качестве входных дескрипторов для нейронной сети используются как визуальные характеристики (геометрия

индикаторного следа, контрастность), так и параметры, полученные в ходе моделирования (амплитуда и пространственный масштаб B_z).

Использование комбинированных признаков — визуальных и физических — позволяет повысить устойчивость алгоритмов распознавания и эффективно различать реальные дефекты и ложные индикации, обусловленные геометрией детали, неоднородностью поверхности или неравномерностью нанесения магнитопорошковой суспензии [8]. Для решения задач классификации и локализации дефектов применяются методы машинного обучения, в частности архитектуры сверточных нейронных сетей, широко используемые в системах автоматизированного анализа изображений и продемонстрировавшие высокую эффективность в аналогичных задачах дефектоскопии.

Эффективность алгоритмов машинного зрения в задачах МПК напрямую зависит от репрезентативности обучающих выборок, формирование которых в натурных условиях сопряжено с высокими эксплуатационными затратами. Магнитостатическое моделирование используется как источник систематизированных данных и физически интерпретируемых дескрипторов. Это позволяет реализовать синтетическое расширение выборок и задать априорные ограничения при обучении нейросетей. Таким образом, моделирование выступает связующим звеном между физикой процесса и методами глубокого обучения, обеспечивая высокую устойчивость и интерпретируемость интеллектуальных систем диагностики.

В процессе магнитопорошкового контроля степень накопления магнитного порошка в зоне дефекта определяется распределением магнитного поля в приповерхностной области. В качестве базовой физической величины анализа используется нормальная к поверхности компонента магнитной индукции B_z (Тл), параметры которой позволяют установить физически обоснованное соответствие между характеристиками поля рассеяния и признаками магнитопорошкового изображения по интенсивности, пространственному масштабу и форме распределения.

В области над дефектом нормальная компонента магнитной индукции принимает локальные максимальные значения. Максимальное значение магнитной индукции определяется как

$$B_{\max} = \max_s B_z(s), [\text{Тл}],$$

где s — координата вдоль осевого направления оси (м).

На уровне магнитопорошкового изображения область повышенной концентрации магнитного порошка соответствует участкам увеличенной яркости. Для предварительно обработанного изображения с распределением интенсивности $I(x, y)$ и областью-кандидатом дефекта Ω максимальное значение яркости определяется как

$$I_{\max} = \max_{(x,y) \in \Omega} I(x, y).$$

Результаты численного моделирования показывают, что при увеличении глубины дефекта или уровня намагничивания величина B_{\max} демонстрирует устойчивый монотонный рост, которому соответствует увеличение I_{\max} на уровне изображения. Это позволяет рассматривать B_{\max} как физическую основу формирования яркостных признаков магнитопорошкового изображения и использовать его при выборе пороговых критериев в алгоритмах машинного зрения.

Пространственная протяженность поля рассеяния определяет масштабные характеристики магнитопорошковой индикации. На основе осевой зависимости $B_z(s)$ вводится показатель полуширины на уровне половины максимума (FWHM), определяемый как

$$W_B = s_2 - s_1, [\text{м}],$$

где координаты s_1 и s_2 удовлетворяют условию

$$B_z(s_1) = B_z(s_2) = \frac{1}{2} B_{\max}, s_1 < s_2.$$

Аналогичным образом для магнитопорошкового изображения по одномерному профилю яркости $g(s)$ вводится масштабный признак

$$W_I = s'_2 - s'_1, [\text{пиксели или м}],$$

где

$$g(s'_1) = g(s'_2) = \frac{1}{2} I_{\max}.$$

Численные результаты показывают, что изменение W_B отражает степень пространственного распространения поля рассеяния и на уровне изображения проявляется в изменении ширины магнитопорошковой полосы или площади связанной области индикации. Тем самым устанавливается физическая связь между величинами W_B и W_I , используемая при формировании масштабных признаков изображения.

Ориентация дефекта относительно направления намагничивания влияет на симметрию распределения поля рассеяния. Для количественного описания данного эффекта вводится показатель симметрии распределения нормальной компоненты магнитной индукции

$$S_B = \frac{\int_{s_0-\Delta}^{s_0} B_z(s) ds}{\int_{s_0}^{s_0+\Delta} B_z(s) ds},$$

где s_0 — координата максимального значения B_{\max} ,
 Δ — длина интервала интегрирования (м).

Аналогично для магнитопорошкового изображения показатель симметрии яркости определяется как

$$S_I = \frac{\int_{s_0-\Delta}^{s_0} g(s) ds}{\int_{s_0}^{s_0+\Delta} g(s) ds},$$

где $g(s)$ — одномерный профиль яркости изображения.

При совпадении ориентации дефекта с направлением намагничивания величины S_B и S_I близки к единице, что соответствует симметричной форме магнитопорошковой индикации. При изменении ориентации дефекта наблюдается отклонение показателей симметрии от единицы и формирование асимметричных распределений магнитного порошка. Это позволяет использовать показатели симметрии как физически интерпретируемые морфологические признаки при автоматизированном анализе магнитопорошковых изображений.

На основе результатов магнитостатического моделирования и установленных соответствий между физическими характеристиками поля рассеяния и признаками магнитопорошкового изображения процесс магнитопорошкового контроля, ориентированный на применение методов машинного зрения, может быть представлен в виде последовательности этапов:

- физическое и численное моделирование;
- получение и предварительная обработка изображений;
- извлечение физически обусловленных признаков;
- автоматизированная интерпретация результатов [9].

В рамках данного подхода результаты магнитостатического моделирования используются как источник априорных физических знаний для обоснованного отбора и интерпретации признаков изображения, а не как замена реальных процедур магнитопорошкового контроля. Это позволяет сократить долю эмпирических решений при разработке алгоритмов анализа изображений и повысить интерпретируемость и устойчивость автоматизированного распознавания дефектов.

Дополнительно информация о положении дефекта, его характерном масштабе и интенсивности магнитопорошковой индикации может быть интегрирована с системами визуальной поддержки, включая носимые средства отображения информации, что обеспечивает оперативное представление диагностических результатов и способствует повышению эффективности принятия инженерных решений при техническом обслуживании и контроле [10].

Заключение

В данной статье разработана параметризованная трехмерная магнитостатическая модель участка оси колесной пары, позволившая установить количественные закономерности формирования полей рассеяния в зависимости от геометрии дефектов и режимов намагничивания.

Основные результаты исследования:

1. Доказано, что приповерхностные несплошности генерируют воспроизводимые поля рассеяния, пиковая амплитуда которых монотонно возрастает с увеличением глубины дефекта и уровня намагничивающей силы. Инвариантность пространственной локализации магнитного отклика относительно параметров контроля обеспечивает высокую надежность обнаружения дефектов.

2. Анализ значений нормальной компоненты магнитной индукции B_z подтвердил наличие устойчивого экстремума в центре дефекта. Установленные корреляции между топологией поля и морфологией индикаторного следа позволяют заменить эмпирический выбор признаков физически обоснованной экстракцией дескрипторов для алгоритмов машинного зрения.

3. Результаты моделирования создают теоретический базис для синтетического расширения обучающих выборок и внедрения априорных физических ограничений в модели глубокого обучения. Это повышает устойчивость систем автоматизированного распознавания и способствует их интеграции в промышленные циклы контроля по аналогии с современными комплексами типа PARADES.

Список источников

1. ГОСТ 34656-2020. Оси колесных пар железнодорожного подвижного состава. Методы неразрушающего контроля.
2. ГОСТ Р ИСО 9934-1-2011. Контроль неразрушающий. Магнитопорошковый метод.
3. Шэнь Цзеи, Цаплин А. Е. Применение технологии неразрушающего контроля на подвижном составе и перспективы ее развития // Бюллетень результатов научных исследований. 2025. Вып. 1. С. 31–44.
4. Peng J., Zhang Q., Zhao B. Wheel and axle defect detection based on deep learning // Research and Review Journal of Nondestructive Testing. 2023. Vol. 1, no. 1.5.
5. Расширение области применения магнитопорошкового метода неразрушающего контроля / А. А. Белов [и др.] // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. 2015. № 10–1.
6. TB/T 1010-2016. Railway rolling stock. Wheelsets and bearings. Types and basic dimensions: industry standard of the People's Republic of China. Beijing, 2016.
7. Automatic defect identification method for magnetic particle inspection of bearing rings based on visual characteristics and high-level features / Y. Yang [et al.] // Applied Sciences. 2022. Vol. 12, no. 3. P. 1293.
8. Михалев О. Н., Янюшкин А. С. Машинное зрение и распознавание объектов с помощью нейронных сетей // Робототехника и техническая кибернетика. 2022. Т. 10, № 2. С. 113–120.

9. A machine vision assisted system for fluorescent magnetic particle inspection of railway wheelsets / T. Ma [et al.] // AIP Conference Proceedings. 2016. Vol. 1706, no. 1. P. 150003.

10. Industrial application of ai-based assistive magnetic particle inspection / J. Baumeyer [et al.] // Applied Sciences. 2024. Vol. 14, no. 4. P. 1499.

Дата поступления: 14.01.2026

Решение о публикации: 28.02.2026

Контактная информация:

ШЭНЬ Цзеи — аспирант; 787612109@qq.com

ЦАПЛИН Алексей Евгеньевич — канд. техн. наук, доцент; tsaplin.alexey@mail.ru

Model-based study of non-destructive testing for rolling stock wheelset axles

Jieyi Shen, A. E. Tsaplin

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9 Moskovsky pr., 190031, Saint Petersburg, Russia.

For citation: Shen Jieyi, Tsaplin A. E. Model-based study of non-destructive testing for rolling stock wheelset axles // Bulletin of scientific research results, 2026, iss. 1, pp. 67–80. DOI: 10.20295/2223-9987-2026-1-67-80 (In Russian)

Abstract

Objective: this paper aims to investigate mechanisms that generate defect signatures in magnetic particles inspection of wheelset axles. Framed within magnetostatic theory, the paper emphasizes the application of machine-vision techniques for automated interpretation of inspection results. It presents a systematic analysis of how surface defects and magnetization conditions influence the spatial distribution of magnetic flux leakage (MFL) and establishes analytical relationships between defect geometry and magnetic response metrics.

Methods: under the magnetostatic approximation, a three-dimensional parameterized physical model of the wheelset-axle inspection zone was developed based on Maxwell's equations and the constitutive relations of ferromagnetic materials. The model accounts for the object's geometry in accordance with relevant technical standards and represents defects as equivalent air gaps. Numerical simulations were performed in the MATLAB environment using the finite element method (FEM). To mitigate boundary condition effects, the computational domain was expanded to include the surrounding air. Characteristics of local magnetic-field disturbances were evaluated via magnetic induction maps and analysis of surface scanning profiles. **Results:** the findings have demonstrated quantitative relationships between the magnetic field disturbance characteristics and defect parameters, notably depth, width, and orientation of defects. The results indicate that a monotonic increase in the peak magnetic flux density with growing defect depth, while the position of the maximum remains stable. Variations in defect width primarily affect the spatial extent of the leakage-field region, whereas changes in defect orientation induce pronounced asymmetry and a redistribution of magnetic flux density. **Practical significance:** these observed regularities provide a physical basis for formalizing characteristics of magnetic particle indications (e.g. brightness and geometric parameters). The findings can serve as a theoretical foundation for the design of intelligent machine-vision systems and for the development of automated defect-recognition algorithms for rolling stock maintenance and inspection.

Keywords: non-destructive testing, magnetic particle inspection, railway axle, magnetostatic modelling, magnetic flux leakage field, surface defects, finite element method, magnetic induction, machine vision

References

1. GOST 34656-2020. Osi kolesnykh par zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava. Metody nerazrushayushchego kontrolya. (In Russian)
2. GOST R ISO 9934-1-2011. Kontrol' nerazrushayushchij. Magnitoporoshkovyj metod. (In Russian)
3. Shen' Tszei, Tsaplin A. E. Primenenie tekhnologii nerazrushayushchego kontrolya na podvizhnom sostave i perspektivy ee razvitiya // Byulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovanij. 2025. Vyp. 1. S. 31–44. (In Russian)
4. Peng J., Zhang Q., Zhao B. Wheel and axle defect detection based on deep learning // Research and Review Journal of Nondestructive Testin. 2023. Vol. 1, no. 1.
5. Rasshirenie oblasti primeneniya magnitoporoshkovogo metoda nerazrushayushchego kontrolya / A. A. Belov [i dr.] // Aktual'nye problemy gumanitarnykh i estestvennykh nauk. 2015. No. 10–1. (In Russian)
6. TB/T 1010–2016. Railway rolling stock. Wheelsets and bearings. Types and basic dimensions: industry standard of the People's Republic of China. Beijing, 2016.
7. Automatic Defect Identification Method for Magnetic Particle Inspection of Bearing Rings Based on Visual Characteristics and High-Level Features / Y. Yang [et al.] // Applied Sciences. 2022. Vol. 12, no. 3. P. 1293.
8. Mikhalev O. N., Yanyushkin A. S. Mashinnoe zrenie i raspoznavanie ob"ektov s pomoshch'yu nejronnykh setej // Robototekhnika i tekhnicheskaya kibernetika. 2022. T. 10, no. 2. S. 113–120. (In Russian)
9. A machine vision assisted system for fluorescent magnetic particle inspection of railway wheelsets / T. Ma [et al.] // AIP Conference Proceedings. 2016. Vol. 1706, no. 1. P. 150003.
10. Industrial application of ai-based assistive magnetic particle inspection / J. Baumeyer [et al.] // Applied Sciences. 2024. Vol. 14, no. 4. P. 1499.

Received: 14.01.2026

Accepted: 28.02.2026

Author's information:

Jieyi SHEN — Postgraduate Student; 787612109@qq.com

Alexey E. TSAPLIN — PhD in Engineering, Associate Professor; tsaplin.alexey@mail.ru