

УДК 620.179.141:629.4.027.4:004.94

А. Г. ОТОКА, О. В. ХОЛОДИЛОВ

Белорусский государственный университет транспорта, Гомель, Беларусь

ОБНАРУЖЕНИЕ ТРЕЩИН В ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ КОЛЕСАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ИХ НАМАГНИЧИВАНИЯ

Представлены результаты анализа картин распределения тангенциальной составляющей напряженности магнитного поля на поверхности цельнокатаных колес колесных пар, полученные путем моделирования с помощью программы ANSYS Maxwell 3D с учетом магнитной проницаемости сталей и формы кривизны дисков. Получены номограммы по выбору тока намагничивания при магнитопорошковом контроле в зависимости от относительной μ (в интервале от 50 до 300) и абсолютной μ_a (в интервале от 62,85 до 377,10 мкГн/м) магнитной проницаемости применяемых колесных сталей.

Ключевые слова: цельнокатаное колесо, магнитопорошковый контроль, расчетный ток намагничивания, напряженность магнитного поля, соленоид, магнитная индукция.

Введение. Несмотря на широкое практическое применение магнитопорошкового контроля (МПК), его теоретическая и численная база остается недостаточно разработанной. Обзор литературных источников показывает недостаток исследований, посвященных двум ключевым аспектам: расчету полей рассеяния для целей проведения МПК и разработке вычислительных методик для решения обратных задач дефектоскопии, включая оптимизацию технологий намагничивания.

Из ключевых публикаций в данной области можно выделить несколько. Так, в работе [1] методом конечных элементов (КЭ) исследована зависимость локальной плотности магнитного потока от геометрических параметров искусственной щели, что позволяет оценить порог обнаружения трещин в зависимости от их размеров.

Авторы публикации [2] представили трехмерную КЭ-модель для расчета распределения поля в ферромагнитной трубе с отверстием, намагничиваемой соленоидом конечной длины.

В статье [3] авторами определялась магнитная проницаемость магнито-реологических эластомеров посредством метода обратного моделирования с помощью программного обеспечения для конечно-элементного анализа. Метод заключался в измерении плотности магнитного потока и силы притяжения, возникающих между магнитами, когда образцы эластомеров помещались между магнитами.

Проведенный анализ научных публикаций и регламентирующей нормативно-технической документации (НТД) по МПК элементов ходовой части железнодорожного подвижного состава (в частности, железнодорожных колес колесных пар) позволяет сделать следующий вывод: методика определения силы тока для намагничивания, обеспечивающая высокую достоверность обнаружения дефектов с установленными предельными размерами, является полностью стандартизированной на уровне расчетных формул.

Данное положение находит прямое подтверждение в действующих стандартах. Например, если обратиться к государственному стандарту [4], то для достижения требуемого намагничивания с использованием соленоида, образованного витками гибкого кабеля, среднеквадратичное значение тока, протекающего по кабелю, определяется по формуле

$$I_{\text{расч1}} = 3H \cdot [10 + (Y^2/40)], \quad (1)$$

где H – тангенциальная составляющая напряженности магнитного поля на поверхности цельнокатаного колеса, кА/м; Y – расстояние между соседними витками в обмотке, мм.

При этом в государственном стандарте [5] намагничивающий ток при продольном намагничивании с помощью соленоида или обмотки гибким кабелем определяют по формуле

$$I_{\text{расч2}} = m (L/N) H; \quad (2)$$

$$I_{\text{расч3}} = H/K_c, \quad (3)$$

где m – коэффициент, определяемый в зависимости от соотношения радиуса и длины соленоида или обмотки; L – длина соленоида или максимальная длина обмотки, см; N – число витков соленоида ($N = 10$); H – требуемая напряженность магнитного поля, А/см; K_c – постоянная соленоида.

Однако, если подставить в формулы (1)–(3) показатели требуемого нам соленоида, мы получим значения, отличающиеся друг от друга.

Таким образом, проблема обеспечения необходимого уровня намагниченности сводится не к разработке новых расчетных методов, а к корректному определению и применению указанных выше параметров для конкретной контрольно-технологической конфигурации, что решается в рамках типовых инженерных расчетов и технологической отладки процесса.

Интересным является и то, что в стандарте [5] утверждается, что при включении соленоида с находящимся в нем объектом контроля напряженность магнитного поля будет несколько отличаться от расчетной, но это отличие для МПК будет не существенно.

Существующая нормативная методика расчета намагничивающего тока может давать заниженные значения, что на практике приводит к недостаточному уровню напряженности магнитного поля на поверхности объекта контроля в контролируемом сечении и, как следствие, к снижению достоверности

выявления дефектов (трещин). В связи с этим задача определения эффективного (достаточного) значения тока намагничивания для обеспечения гарантированной обнаруживающей способности МПК представляется актуальной.

Одной из ключевых причин данного расхождения является недостаточный учет магнитных свойств материала колеса. Известно, что абсолютная магнитная проницаемость μ ферромагнитной стали является функцией двух основных факторов:

- химического состава и режимов обработки (термической, химико-термической);
- режима намагничивания (величина μ нелинейно зависит от напряженности приложенного поля H (пропорциональной току)).

Их неучет приводит к ошибке в расчете требуемой напряженности магнитного поля и, соответственно, к занижению значения намагничивающего тока. Результатом является формирование магнитного потока недостаточной плотности для индикации дефектов, что повышает риск их пропуска при контроле.

Целью работы является оценка влияния магнитной проницаемости стали и формы профиля диска на тангенциальную составляющую магнитного поля на поверхности железнодорожных колес с помощью КЭ-анализа.

Методика исследований. Рассмотрим железнодорожное колесо как ферромагнитный материал в вакууме (рисунок 1) [6]. При этом вблизи точки A , находящейся на границе раздела сред, вектор магнитной индукции равен B_0 и направлен под углом α к поверхности, а относительная магнитная проницаемость колесной стали равна μ_r . Найдем значение магнитной индукции на поверхности объекта контроля вблизи точки A .

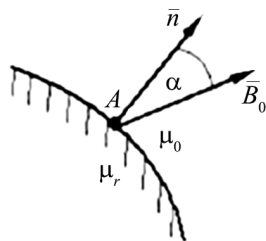


Рисунок 1 – Схема для расчета магнитной индукции на поверхности железнодорожного колеса

Известно, что значение индукции определяется по формуле

$$B = \sqrt{B_n^2 + B_\tau^2},$$

где B_n и B_τ – нормальная и тангенциальная составляющие магнитной индукции на поверхности колеса.

Если воспользоваться граничными условиями $B_{n1} = B_{n2}$, $H_{\tau1} = H_{\tau2}$ (индексы 1 и 2 относятся к вакууму и ферромагнетику соответственно), то

$$B_n = B_0 \sin \alpha; B_\tau = \mu_r \mu_0 H_\tau = \mu_r B_0 \sin \alpha_0;$$

$$B = B_0 \sqrt{\cos^2 \alpha + \mu_r \sin^2 \alpha}.$$

Из последнего соотношения следует, что чем больше относительная магнитная проницаемость μ_r колесной стали, тем больше магнитная индукция B в материале.

Из формулы

$$H = I \frac{w}{l},$$

где I – значение тока, соответствующее напряженности магнитного поля на поверхности колеса; w – число витков гибкого кабеля; l – длина катушки, следует, что повышение тока в намагничивающей обмотке приводит к увеличению напряженности магнитного поля.

Отметим, что государственные стандарты не учитывают не только магнитные характеристики применяемых колесных сталей, но и форму (кривизну) дисков. С вводом изменений в руководящий документ [7] цельнокатаные колеса с криволинейным диском производства ТОО «Проммашкомплект» (рисунки 2, 3) вызывают особый интерес, ввиду значительного выхода профиля диска за ширину обода колеса по чертежу ПМК 1.2.17-КП (ПМК).

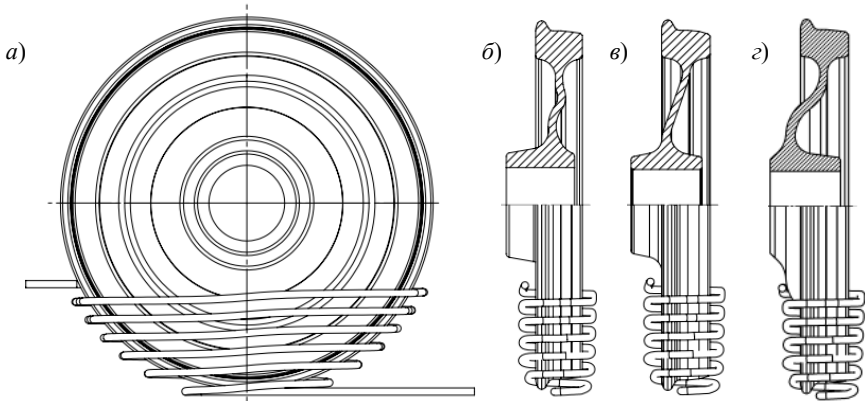


Рисунок 2 – Схема намагничивания железнодорожных колес (а) с помощью соленоида, образованного витками гибкого кабеля при криволинейной (б), плоскостной (в) и криволинейной по чертежу ПМК (г) формах дисков

В связи с тем, что увеличивается расстояние от последнего верхнего витка соленоида до поверхности диска, величина тока намагничивания будет значительно выше, чем для традиционного плоскостного и криволинейного с плечом, не выходящим за ширину обода.

Для количественной оценки необходимых параметров тока выбран метод КЭ-моделирования электромагнитных полей. В качестве базового программного комплекса использовался пакет ANSYS Electronics, модуль ANSYS Maxwell, предназначенный для решения 3-мерных квазистатических электромагнитных задач. В рамках предварительного исследования [10] нами была разработана и верифицирована конечно-элементная модель, описывающая процесс намагничивания железнодорожного колеса (с плоскостной конфигурацией диска) соленоидом, сформированным витками гибкого кабе-

ля. Были получены и проанализированы распределения напряженности магнитного поля в свободном пространстве (воздушной среде) вокруг изолированного соленоида.

Продолжением работ стало создание уточненных моделей, учитывающих геометрию реальных цельнокатаных железнодорожных колес. Их трехмерные модели для различных конфигураций диска (включая профиль, конусность и геометрию обода) были разработаны на основе конструкторской документации, регламентированной действующими руководящими документами и отраслевыми стандартами [7–9]. Моделирование механической части (колесо и положение соленоида) было выполнено в среде CAD-проектирования SolidWorks 2022 (рисунок 3). Это обеспечивает соответствие виртуальных моделей реальным эксплуатационным объектам.

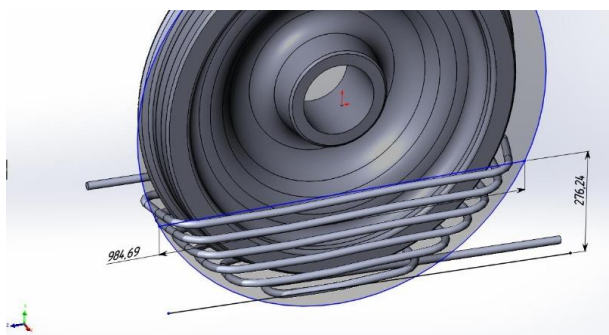


Рисунок 3 – Модель в Solidworks колеса по чертежу ПМК совместно с соленоидом

Итоговые сборки были импортированы в ANSYS Maxwell 3D для проведения полного электромагнитного анализа, целью которого является расчет распределения магнитной индукции в материале колеса при заданных значениях намагничивающего тока и оценка его достаточности для выявления дефектов.

В колесных центрах, бандажах и цельнокатаных колесах применяются низкоуглеродистые стали (менее 25 % мас. С, считаются мягкими), среднеуглеродистые 0,25–0,6 % С (средней твёрдости) и высокоуглеродистые – свыше 0,6 % С (твёрдые).

Распространенными сталями в зависимости от типа подвижного состава являются сталь 2, Т, М, Л и др.

В качестве базового материала для моделирования магнитных свойств была принята низкоуглеродистая сталь марки 1010 (аналог сталей 10 и 08 по отечественным стандартам). Данный выбор обусловлен тем, что ее химический состав, в частности содержание углерода, соответствует марке М колесного центра, указанной в государственном стандарте [11]. Это позволяет рассматривать данную сталь в качестве репрезентативного материала для анализа базового сценария намагничивания.

Результаты КЭ-моделирования, приведенные в таблице 1, свидетельствуют о принципиальном различии в характере намагничивания колес с плоскостным и криволинейным профилем диска. Количественный анализ напряженности магнитного поля подтверждает, что для обеих конфигураций внутренняя сторона диска намагничивается более интенсивно. Ключевым отличием является превышение значения тангенциальной составляющей напряженности поля H_t на внешней стороне криволинейного диска по сравнению с плоскостным аналогом.

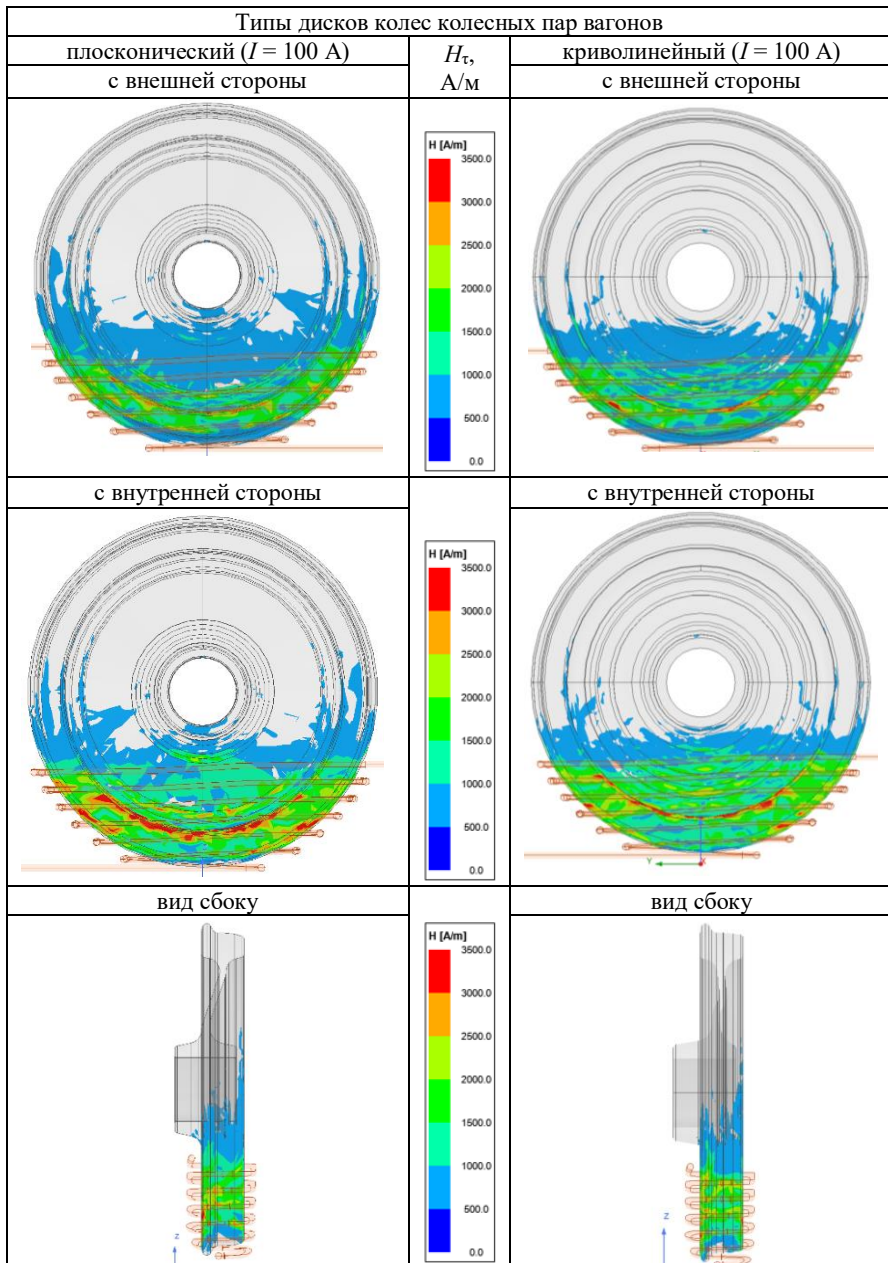
Экспериментально установлено, что для обеспечения минимально требуемого уровня чувствительности контроля – заданного порогового значения H_t на поверхности диска в рабочей зоне (участок до перехода в ступицу) – для обоих типов геометрии достаточно значения намагничивающего тока $I = 500$ А. Стабильность данного параметра в указанной зоне объясняется тем, что ее профиль не выходит за проекцию ширины обода. На основании этого указанный ток и соответствующее ему стационарное распределение H_t были определены в качестве реперного режима для последующего параметрического анализа с учетом реальных магнитных свойств материала.

Для типичных ферритных сталей, используемых в колесных парах, относительная магнитная проницаемость μ находится в диапазоне 50–300. На втором этапе исследований было проведено многовариантное моделирование с вариацией ключевых параметров материала в КЭ-модели (изменялась магнитная проницаемость μ от 50 до 300 с интервалом 25 и электропроводность σ (от 10,3 до 13,7 МСм/м)).

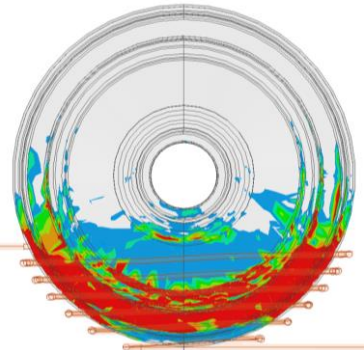
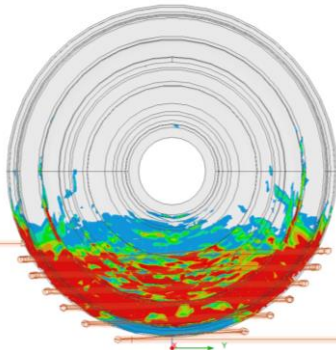
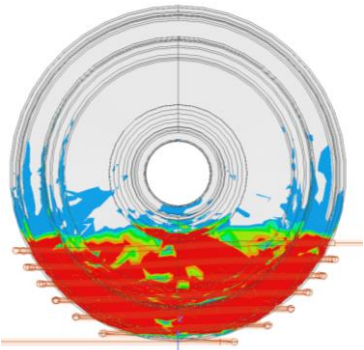
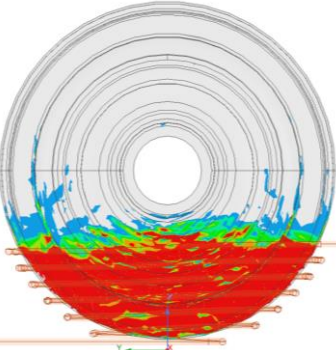
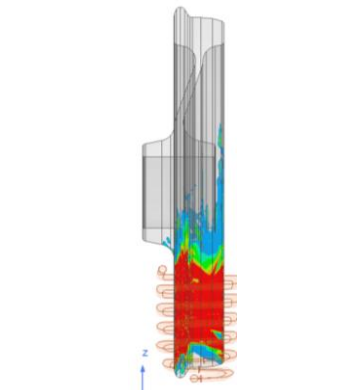
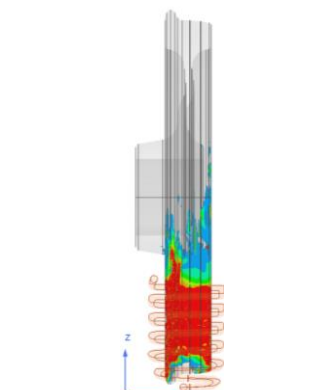
Моделирование для всех исследуемых конфигураций выявило систематическое наличие локализованных областей, в которых значение H_t существенно отклоняется от среднестатистического фона в предположительно однородных зонах. Этот факт однозначно указывает на неоднородный характер намагничивания при использовании соленоида, что полностью соответствует данным инструментального контроля на практике. Физической причиной данной неоднородности является пространственная вариация воздушного зазора между соленоидом и поверхностью диска, обусловленная его сложным немонотонным профилем.

На картинах распределения, где цветовая шкала поставлена в соответствие с дискретными диапазонами значений H_t , области, соответствующие граничным условиям шкалы, являются наиболее информативными. Минимальная локальная аномалия H_t в такой «приграничной» зоне приводит к ее переходу в соседний интервал квантования. Визуально это регистрируется, как возникновение контрастной субзоны с иным цветовым кодом. Следовательно, наблюдаемая дискретная цветовая мозаика на колесе является не артефактом визуализации, а прямым количественным отображением градиентов и микровариаций тангенциальной компоненты напряженности магнитного поля в приповерхностном слое объекта контроля.

Таблица 1 – Распределение H_t на поверхности колеса



Окончание таблицы 1

Типы дисков колес колесных пар вагонов		
плосконический ($I = 500 \text{ A}$)	H_r , А/м	криволинейный ($I = 500 \text{ A}$)
с внешней стороны		с внешней стороны
		
с внутренней стороны		с внутренней стороны
		
вид сбоку		вид сбоку
		

Результаты параметрического моделирования демонстрируют значительное влияние относительной магнитной проницаемости μ материала колеса на распределение тангенциальной составляющей напряженности магнитного поля H_t в его приповерхностном слое. Установлена обратная зависимость между величиной μ и эффективностью намагничивания: с ростом магнитной проницаемости наблюдается выраженное снижение уровня индуцированной напряженности поля H_t при неизменной силе тока (таблица 2).

Для иллюстрации данного эффекта рассмотрим результаты для колеса с плоскостным диском при намагничивающем токе $I = 500$ А. При значении $\mu = 100$, тангенциальная составляющая H_t на внешней поверхности в характерных зонах (обод, приободная зона, гребень, за исключением участка гребня, находящегося вне проекции соленоида) достигает значения до 55 А/см. При увеличении проницаемости до $\mu = 200$, величина H_t в тех же зонах снижается примерно в 1,8 раза, не превышая 30 А/см.

Дальнейшее увеличение μ (в исследуемом диапазоне) приводит к качественному изменению картины намагничивания. Его пороговый уровень при сохранении тока $I = 500$ А перестает достигаться в приободной зоне и основной части диска. Намагничивание происходит лишь в области обода, причем локально, в участках с минимальным расстоянием до витков соленоида, где градиент поля максимален.

В отличие от магнитной проницаемости вариация значений удельной электрической проводимости σ в характерном для сталей в диапазоне от 10,3 до 13,7 МСм/м не оказывает статистически значимого влияния на установившиеся значения H_t в рамках примененной квазистатической модели.

Представлял интерес также сравнительный анализ картины распределения магнитного поля, получаемой при изменении силы тока, относительной магнитной проницаемости, электропроводности по сравнению с картиной распределения магнитного поля при силе тока 500 А.

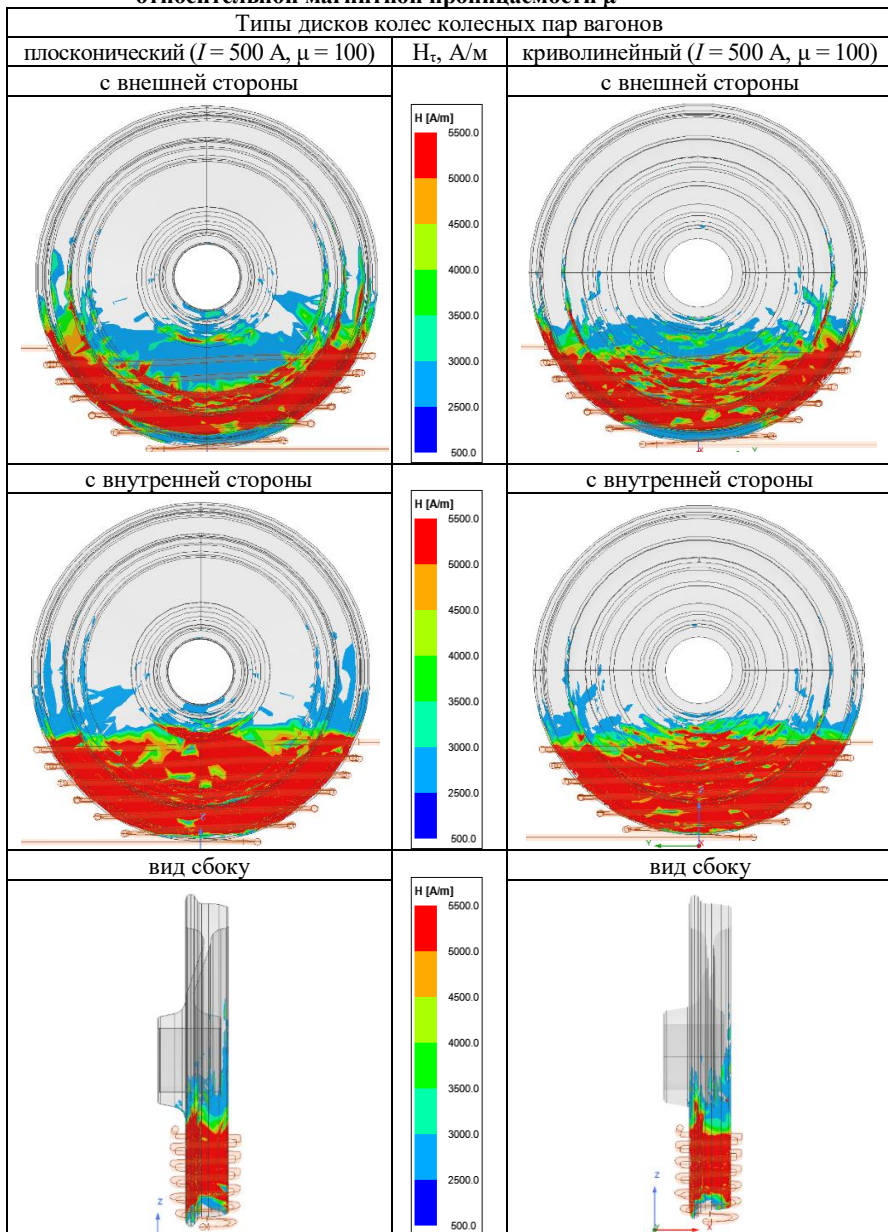
Задавая значение относительной магнитной проницаемости колесной стали и сопоставляя картину распределения тангенциальной составляющей магнитного поля с исходной для стали 1010 при 500 А, на выходе получали требуемый расчетный ток для намагничивания железнодорожного колеса (таблица 3).

На следующем этапе исследований был изучен процесс намагничивания колес, соответствующих чертежу ПМК.

Априорно предполагалось снижение эффективности намагничивания из-за увеличения воздушного зазора между активной частью соленоида и поверхностью диска в зоне перехода.

Картины распределения H_t для разных колес при токе $I = 500$ А приведены в таблице 4.

Таблица 2 – Распределение H_t на поверхности колеса при различной относительной магнитной проницаемости μ



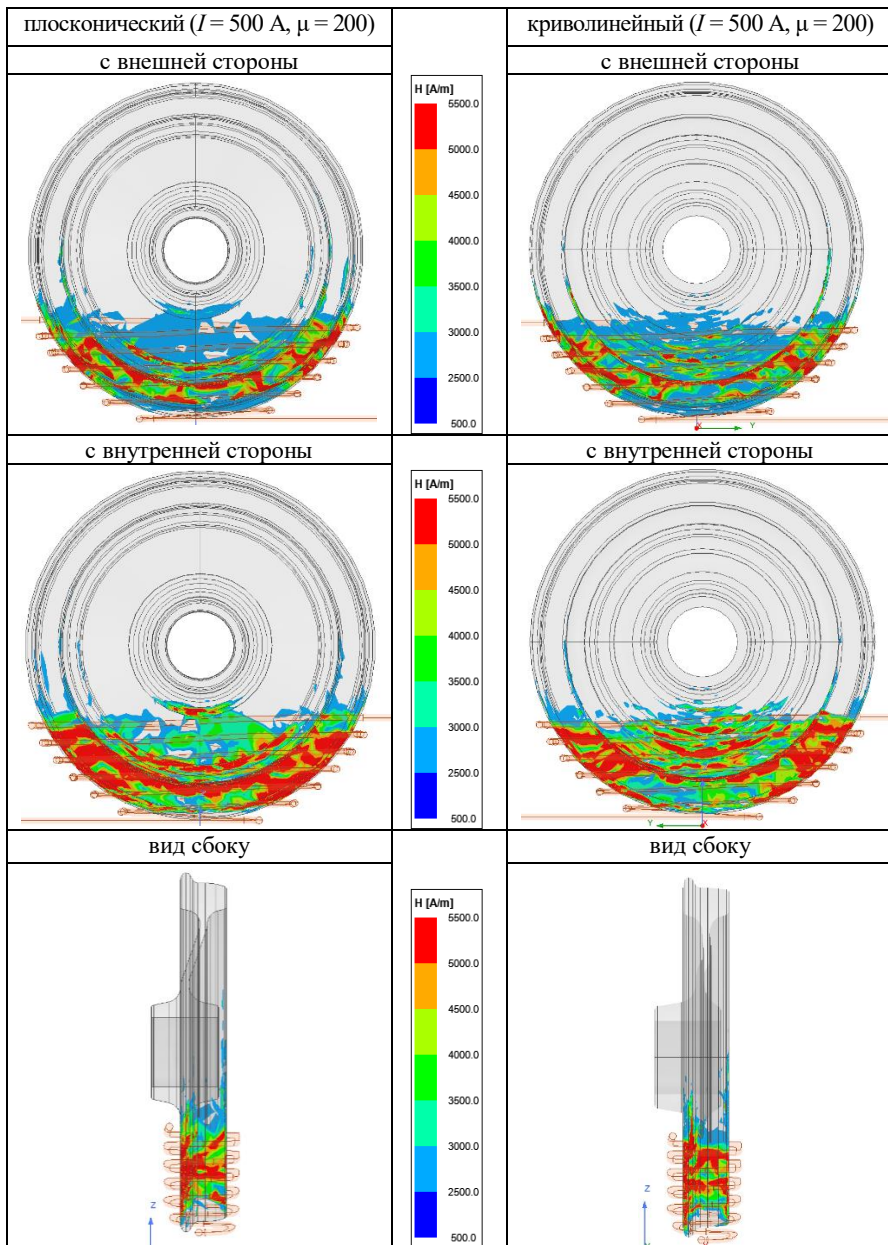
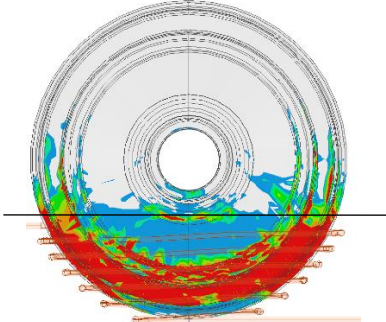
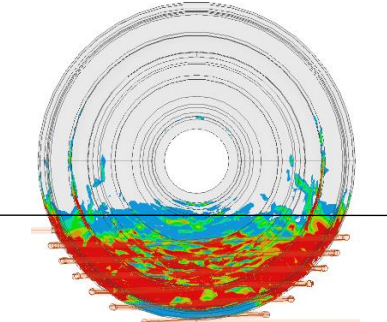
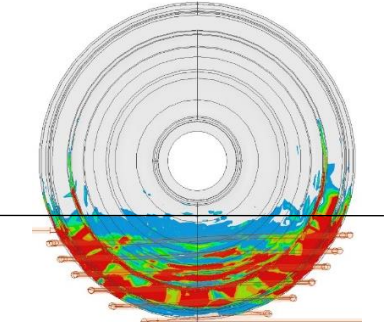
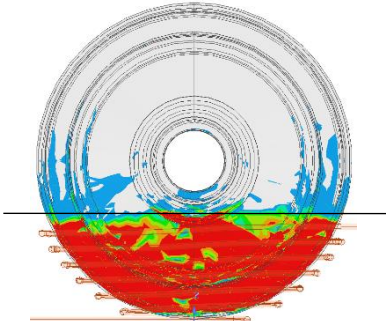
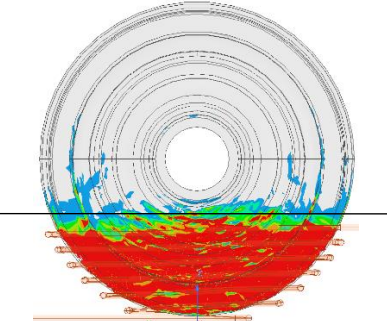
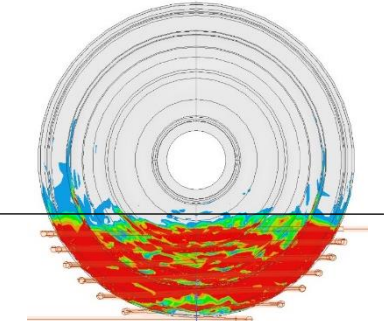


Таблица 3 – Результаты получения картины распределения H_z , аналогичной картине при $I = 500$ А, $\mu = 100$

Типы дисков колес колесных пар вагонов		
плосконический ($I = 303$ А, $\mu = 50$)		
с внешней стороны	сбоку	с внутренней стороны
плосконический ($I = 500$ А, $\mu = 100$)		
с внешней стороны	сбоку	с внутренней стороны
плосконический ($I = 874$ А, $\mu = 200$)		
с внешней стороны	сбоку	с внутренней стороны

Таблица 4 – Сравнение картины распределения H_r в различных по исполнению колесах

плоскони́ческий с внешней стороны ($I = 500 \text{ A}$, $\mu = 100$)	криволинейный с внешней стороны ($I = 500 \text{ A}$, $\mu = 100$)	криволинейный по чертежу ПМК с внешней стороны ($I = 500 \text{ A}$, $\mu = 100$)
		
плоскони́ческий с внутренней стороны ($I = 500 \text{ A}$, $\mu = 100$)	криволинейный с внутренней стороны ($I = 500 \text{ A}$, $\mu = 100$)	криволинейный по чертежу ПМК с внутренней стороны ($I = 500 \text{ A}$, $\mu = 100$)
		

Сравнительный анализ результатов намагничивания нового диска колеса с традиционными плоскочисечным и криволинейным (профиль которых не выходит за ширину обода) показывает, что диск намагничивается недостаточно (имеется неокрашенная зона ниже ограничительной линии, и, следовательно, места с тангенциальной составляющей $H_t < 25$ А/см). Что и подтвердило предположение о снижении чувствительности к выявлению трещин.

Следовательно, намагничивание током 500 А не обеспечивает условий требуемой чувствительности в зоне диска нового колеса (до зоны перехода диска в ступицу колеса). Поэтому задачей было получить такое значение тока, при котором это условие будет выполнено.

В нашем случае сила тока намагничивания для нового диска, при которой $H_t \geq 25$ А/см, составила $I = 800$ А.

В дальнейшем сравнивались полученные картины распределения тангенциальной составляющей H_t на поверхности колеса с разной относительной магнитной проницаемостью с картиной, полученной при $\mu = 100$ и токе $I = 800$ А.

В результате анализа полученных данных установлена функциональная зависимость между относительной магнитной проницаемостью материала колеса и силой тока, необходимой для достижения минимально достаточной напряженности магнитного поля ($H_t \geq 25$ А/см) в ключевых контрольных зонах: внутренней и внешней сторонах обода, поверхности катания, приободной зоне и диске (исключая зону перехода в ступицу). Эта зависимость позволяет построить рабочие номограммы (рисунок 4) для оперативного определения тока намагничивания при использовании соленоида в зависимости от магнитных свойств контролируемой стали.

Учитывая магнитную проницаемость воздуха, можно получить номограмму для тока намагничивания I от абсолютной магнитной проницаемости стали μ_a железнодорожного колеса (рисунок 5).

Заключение. На основе результатов параметрического КЭ-моделирования построены номограммы для определения силы намагничивающего тока I в зависимости от относительной μ и абсолютной μ_a магнитной проницаемости материала колеса – характеристик, влияние которых на необходимую величину тока не регламентировано в действующих государственных стандартах.

Последующий сравнительный анализ распределений напряженности магнитного поля для колес с различной геометрией диска подтвердил, что расчетное значение тока намагничивания зависит непосредственно и от формы диска. Таким образом, для корректного определения параметров намагничивания в практике МПК требуется одновременный учет как магнитных характеристик объекта, так и его пространственной конфигурации.

Работа выполнена в рамках задания 3.13 Государственной программы научных исследований «Механика, металлургия, диагностика в машиностроении».

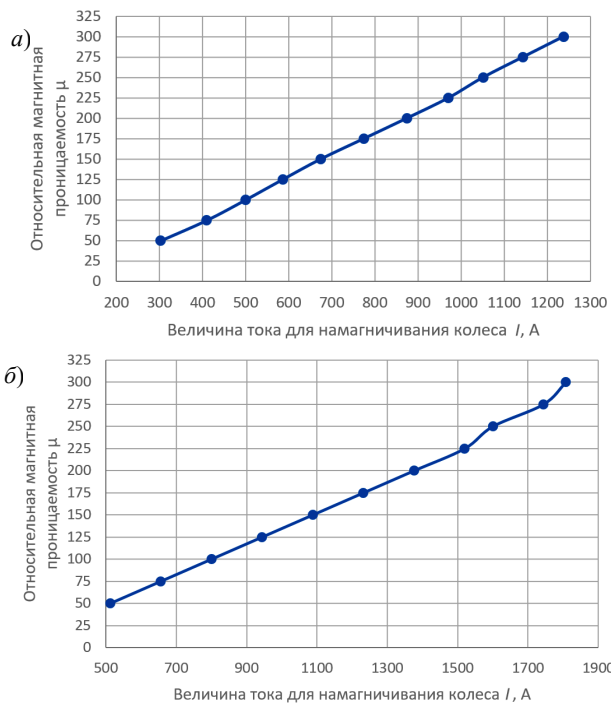


Рисунок 4 – Номограммы для выбора тока намагничивания I в зависимости от μ при проведении МПК ж.-д. колеса с плосконическим и криволинейным дисками (а) и криволинейным по чертежу ПМК (б)

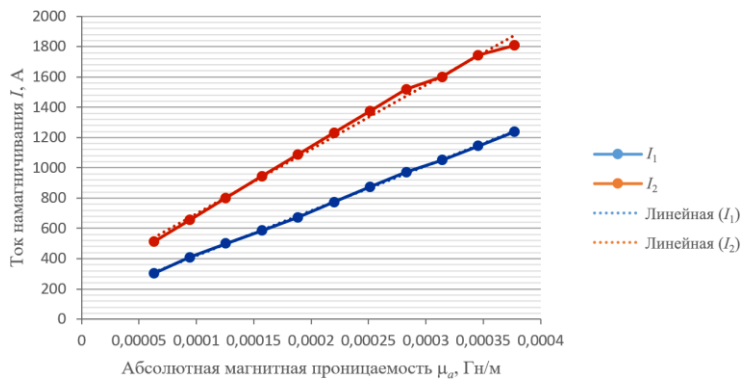


Рисунок 5 – Номограмма выбора тока намагничивания I в зависимости от абсолютной магнитной проницаемости стали μ_a :

I_1 – для колес с плосконическим и криволинейным диском;

I_2 – для колес с криволинейным диском в соответствии с чертежом ПМК

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 3D finite element simulation of magnetic particle inspection / B. S. Wong, Y. G. Low, X. Wang [et al.] // Proceedings of the 2010 IEEE Conference on Sustainable Utilization and Development in Engineering and Technology. – Petaling Jaya, 2010. – P. 50–55.
- 2 **Goldshtein, A. E.** Modeling of magnetic fields and signals of a ferromagnetic pipe flaw detector induced by a through hole defect / A. E. Goldshtein, V. Yu. Belyankov // Bulletin of the Karaganda university. Physics series. – 2020. – Vol. 100, is. 4 (100). – P. 49–56.
- 3 **Schubert, G.** Magnetic induction measurements and identification of the permeability of Magneto-Rheological Elastomers using finite element simulations / G. Schubert, P. Harrison // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2016. – Vol. 404. – P. 205–214.
- 4 ГОСТ Р ИСО 9934–2011. Контроль неразрушающий. Магнитопорошковый метод. Часть 1. Основные требования. – Введ. 13.12.2011. – М. : Стандартинформ, 2013. – 20 с.
- 5 ГОСТ Р 56512–2015. Контроль неразрушающий. Магнитопорошковый метод. Типовые технологические процессы. – Введ. 01.06.2016. – М. : Стандартинформ, 2016. – 56 с.
- 6 **Новиков, В. А.** Магнитный контроль в вопросах и ответах : учеб. пособие / В. А. Новиков. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2020. – 347 с.
- 7 РД ВНИИЖТ 27.05.01–2017. Руководящий документ по ремонту и техническому обслуживанию колесных пар с буксовыми узлами грузовых вагонов магистральных железных дорог колеи 1520 (1524) мм (утв. Советом по ж.-д. трансп. государств – участников Содружества; протокол от «19–20» октября 2017 г. № 67), 2017. – 242 с.
- 8 Руководящий документ по ремонту и техническому обслуживанию колесных пар с буксовыми узлами пассажирских вагонов магистральных железных дорог колеи 1520 (1524) мм (утв. Советом по ж.-д. трансп. государств – участников Содружества, протокол от «4–5» ноября 2015 г. № 63), 2015. – 281 с.
- 9 ГОСТ 10791–2011. Колеса цельнокатаные. Технические условия. – Введ. 15.03.2011. – М. : Стандартинформ, 2011. – 28 с.
- 10 **Отока, А. Г.** Определение размера зоны эффективной намагниченности при магнитопорошковом контроле цельнокатаного колеса с помощью моделирования / А. Г. Отока, М. В. Быков, О. В. Холодилов // Проблемы безопасности на транспорте : материалы XIII Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. Году качества. Ч. 1, Гомель, 21–22 ноября 2024 г. – Гомель : БелГУТ, 2024. – С. 117–119.
- 11 ГОСТ Р 55498–2013. Центры колесные катаные для железнодорожного подвижного состава. Технические условия. – Введ. 29.07.2013. – М. : Стандартинформ, 2014. – 16 с.

A. G. OTOKA, O. V. KHOLODILOV
Belarusian State University of Transport, Gomel, Belarus

RAILWAY WHEELS CRACK DETECTION ON THE BASE OF FINITE ELEMENT MODELING OF THEIR MAGNETIZATION

The paper presents the analysis results for the distribution patterns of the magnetic field strength tangential component on the surface of solid-rolled wheelsets. The results are obtained by modeling using ANSYS Maxwell 3D, taking into account the magnetic permeability of the steels and the wheels curvature. There are obtained the nomograms for selecting the magnetization current for magnetic particle testing depending on the relative μ (in the range from 50 to 300) and absolute μ_a (in the range from $6,285 \cdot 10^{-5}$ to $3,771 \cdot 10^{-4}$ H/m) magnetic permeability of the wheel steels used.

Keywords: solid-rolled wheel, magnetic particle inspection, estimated magnetization current, tangential component of magnetic field strength, solenoid, magnetic induction.

Получено 25.10.2025