

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЗМЕРА ЗОНЫ ЭФФЕКТИВНОЙ НАМАГНИЧЕННОСТИ ПРИ МАГНИТОПОРОШКОВОМ КОНТРОЛЕ ЦЕЛЬНОКАТАНОГО КОЛЕСА С ПОМОЩЬЮ МОДЕЛИРОВАНИЯ

А. Г. ОТОКА, М. В. БЫКОВ
Белорусская железная дорога, г. Гомель

О. В. ХОЛОДИЛОВ
Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

В работе [1] нами было показано, как на практике определяется зона достаточной (эффективной) намагниченности при магнитопорошковом контроле (МПК) цельнокатаного колеса колесной пары подвижного состава с использованием намагничивающего устройства в виде электромагнита. Отмечается, что обязательным элементом контроля является необходимость определения измерителем магнитного поля остаточной намагниченности. При этом необходимо определять:

- ширину c неконтролируемой зоны на поверхности детали вблизи полюсных наконечников электромагнита, измеряя при этом тангенциальную H_t и нормальную H_n , составляющие напряженности магнитного поля (выполнение условия $H_n / H_t \leq 3$);
- ширину b зоны достаточной намагниченности, измеряя тангенциальную составляющую напряженности магнитного поля в обе стороны от электромагнита и фиксируя крайние точки, в которых $H_t = 25$ А/см;
- длину a зоны достаточной намагниченности вблизи середины между полюсными наконечниками с учетом выставления межполюсного расстояния, при котором соблюдается выполнение условия $H_t \geq 25$ А/см и ширины c неконтролируемой зоны (выполнение условия $c + 1$).

В работах [2, 3] описывается автоматизированный МПК колесных пар вагонов с использованием стенда, где намагничивание цельнокатаных колес происходит за счет кабеля, намотанного в продольном и поперечном направлениях по отношению к объекту контроля. Расчет тока по соотношениям, приведенным в государственном стандарте [4, 5], дает неоднозначные значения, которые не позволяют (в том случае, когда отсутствуют натурные испытания) подтвердить выполнение всех условий по достаточной (эффективной) намагниченности поверхности колеса, задействованной при МПК.

Для достижения требуемого намагничивания с использованием соленоида (рисунок 1), образованного витками гибкого кабеля при помощи переменного тока, среднеквадратичное значение силы тока I , который протекает по кабелю, должно иметь минимальную величину

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

где Y – расстояние между соседними витками в обмотке, мм ($d = 30$ мм); H_t – тангенциальная составляющая напряженности магнитного поля на поверхности цельнокатаного колеса, кА/м ($H_t = 25$ А/см = $= 2,5$ кА/м).

Таким образом,

$$I_{\text{расч1}} = 3 \cdot 2,5 [10 + (30^2 / 40)] = 243,8 \text{ А.}$$

Однако рассчитанная сила тока мала для получения намагниченности, достаточной для выявления дефектов.

Поэтому воспользуемся соотношениями, приведенными в государственном стандарте [5], в котором силу намагничивающего тока I при продольном намагничивании с помощью соленоида определяют по формуле

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

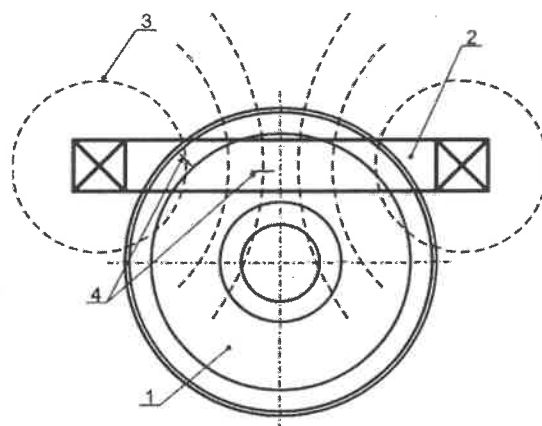


Рисунок 1 – Схема намагничивания колеса цельнокатаного при помощи соленоида:
1 – колесо цельнокатаное; 2 – соленоид;
3 – магнитный поток; 4 – дефекты

где m – коэффициент, определяемый в зависимости от следующих соотношений радиуса и длины соленоида или обмотки (согласно [5] при $R = (1/5)L$ коэффициент $m = 2,04$; в нашем случае $R_{\max} = 20$ см, $L = 100$ см т. е. $R = (1/5)L$; L – длина соленоида или максимальная длина обмотки, см (в расчетах принимаем $L = 100$ см); N – число витков соленоида ($N = 8$); H – требуемая напряженность магнитного поля, А/см ($H = 25$ А/см);

$$I_{\text{расч2}} = 2,04 (100 / 8) \cdot 25 = 637,5 \text{ А.}$$

В данной работе оценивается возможность определения области эффективной намагниченности колеса путем моделирования. Для этой цели была использована прикладная программа *Ansys Electronics*. Процесс моделирования состоял из нескольких этапов.

На первом этапе строилась 3D-модель колеса в программе *Inventor*, после чего полученный результат переводился в формат «.stl» для дальнейшей обработки и импорта в программу *Ansys Electronics* (рисунок 2), в которой задавались параметры соленоида (радиус сечения кабеля, количество витков, материал проводника) и объекта контроля, а также регион, в котором будет проходить непосредственно расчет тангенциальной составляющей магнитного поля H_t , значение тока, род тока и другие параметры.

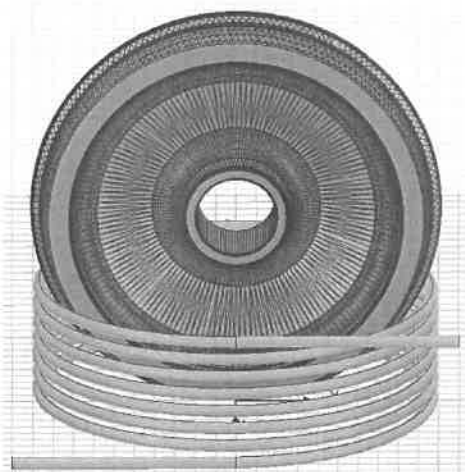


Рисунок 2 – Схема намагничивания колеса при помощи соленоида

Далее модель проверялась на возможные ошибки при проектировании и выполнялся анализ, в результате которого получали картину распределения магнитного поля с учетом материала цельнокатаного колеса при различных значениях силы тока в обмотке (рисунки 3, 4).

Как видно из рисунка 3, при минимальном значении силы тока $I = 100$ А напряженность магнитного поля даже внутри соленоида не достигает минимально допустимой 25 А/см, а при $I = 200$ А требуемая чувствительность* метода обеспечивается только непосредственно в центральной части намагничивающего устройства (ближе к оси обмотки). При

этом в зоне цельнокатаного колеса выше соленоида напряженность магнитного поля резко убывает.

Исходя из расчетных значений силы тока при намагничивании объекта контроля соленоидом при $I_{\text{расч1}} = 243,8$ А по государственному стандарту [4] можно с уверенностью говорить о малых размерах эффективной зоны намагниченности (площади колеса). Этого нельзя сказать про расчетные значения тока $I_{\text{расч2}} = 637,5$ А (рисунок 4), соответствующие стандарту [5].

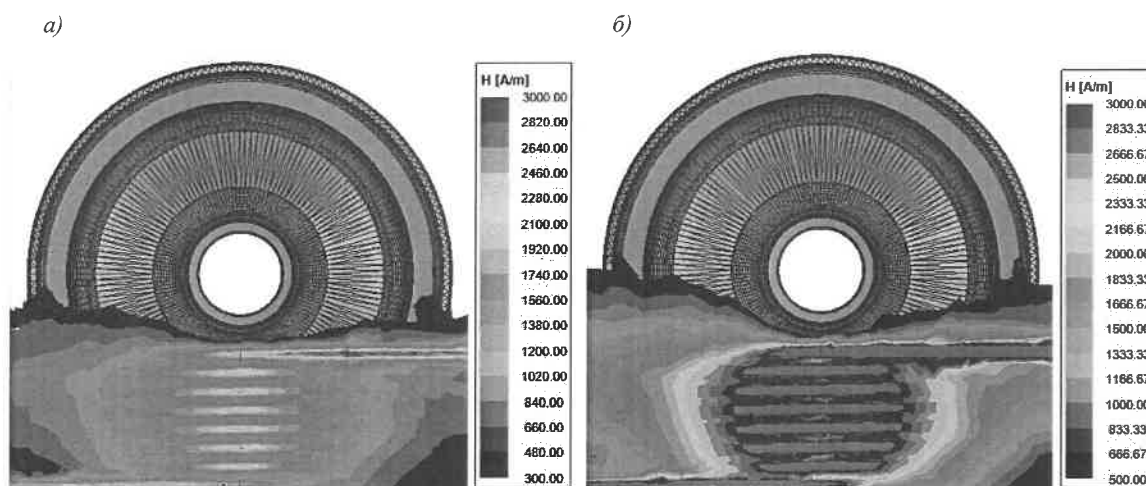


Рисунок 3 – Картина распределения магнитного поля при силе тока $I = 100$ А (а) и 200 А (б)

* Под требуемой чувствительностью подразумевается способность выявления дефектов с шириной раскрытия от 20 до 28 мкм на цельнокатаном колесе при значении H_t на поверхности не менее 25 А/см [6].

На рисунке 4 хорошо видно, что требуемая чувствительность метода обеспечивается как по всему объему соленоида, так и выше соленоида.

На основании результатов моделирования процесса намагничивания можно утверждать, что ток $I = 243,8$ А, рассчитанный по государственному стандарту [4], не обеспечивает требований по значению тангенциальной составляющей магнитного поля на поверхности участка колеса в пределах ≥ 25 А/см. В то же время при токе $I = 637,5$ А, рассчитанном по государственному стандарту [5], соблюдаются все требования по значению тангенциальной составляющей вектора магнитного поля на поверхности участка колеса в пределах ≥ 25 А/см.

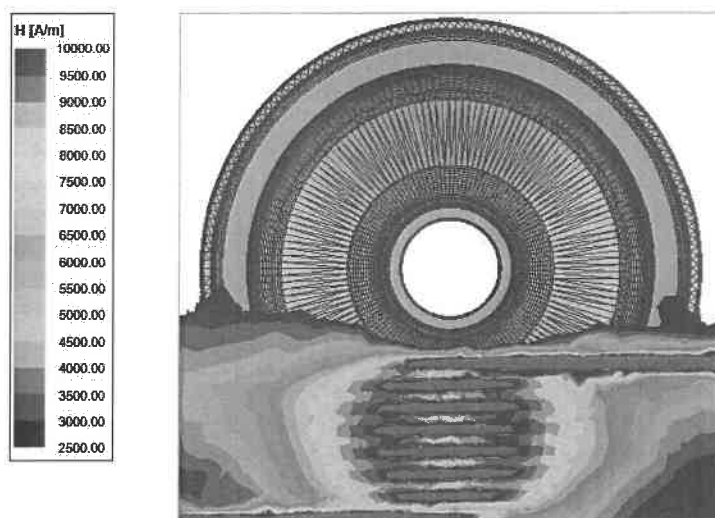


Рисунок 4 – Картина распределения магнитного поля при силе тока $I = 650$ А

Вблизи зоны ступицы колеса по мере удаления от обмотки значение H_t падает, но всё также остается в пределах ≈ 25 А/см. Исключение будет составлять зона перехода от диска к ступице, ступица и ее торцевые поверхности. Поэтому при намагничивании колес, напрессованных на ось, условия требуемой чувствительности контроля на предмет выявления дефектов с минимальной шириной раскрытия по нормативному документу [6] в этих зонах не будут выполняться и ток на практике необходимо увеличивать.

Таким образом, можно с уверенностью утверждать, что существующие расчетные соотношения для определения силы тока для намагничивания цельнокатаного колеса, ввиду сложной геометрии объекта контроля, не гарантируют требуемую чувствительность МПК. Поэтому моделирование процесса намагничивания объектов контроля с помощью программы, подобной *Ansys Electronics*, позволяет обойтись без дорогих натуральных испытаний, которые требуют больших трудозатрат и наличия разнообразной номенклатуры оборудования.

Список литературы

- 1 **Отока, А. Г.** Определение зоны достаточной намагниченности при традиционном магнитопорошковом контроле цельнокатаного колеса с помощью электромагнита МЭД-120 / А. Г. Отока, Р. В. Траяков, О. В. Холодилов // Инновационное развитие транспортного и строительного комплексов : материалы Международ. науч.-практ. конф., посвящ. 70-летию БелИИЖТа – БелГУТа : в 2 ч. Ч. 1 ; под общ. ред. Ю. И. Кулаженко. – Гомель : БелГУТ, 2023. – С. 64–66.
- 2 Технология магнитопорошкового контроля цельнокатаных колес на автоматизированном стенде / А. Г. Отока [и др.] // Механика. Исследования и инновации. – Гомель : БелГУТ, 2022. – Вып. 15. – С. 160–168.
- 3 **Отока, А. Г.** Автоматизированный магнитопорошковый контроль колесных пар с использованием систем видеонаблюдения и нейросетевых технологий / А. Г. Отока, О. В. Холодилов, П. А. Дашук // Механика. Исследования и инновации. – Гомель : БелГУТ, 2023. – Вып. 16. – С. 153–158.
- 4 **ГОСТ Р ИСО 9934–2011.** Контроль неразрушающий. Магнитопорошковый метод. Часть 1. Основные требования. – Введ. 2011.13.12. – М. : Стандартинформ, 2013. – 20 с.
- 5 **ГОСТ Р 56512–2015.** Контроль неразрушающий. Магнитопорошковый метод. Типовые технологические процессы. – Введ. 2016.01.06. – М. : Стандартинформ, 2016. – 56 с.
- 6 **ПР НК В.2–2013.** Правила неразрушающего контроля деталей и составных частей колесных пар вагонов при ремонте. Специальные требования. – М. : Кодекс, 2013. – 88 с.