

службы, что делает его отличным выбором для применения в имитаторах ультрафиолетового излучения.

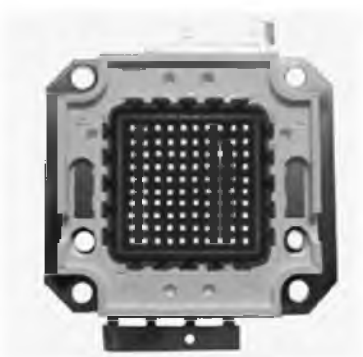


Рисунок 3 – светодиод BLD-HP100UV5-E45

Список использованных источников

1. Ультрафиолет GTL-3 / [Электронный ресурс] // РадиоКот : [сайт]. — URL: <https://www.radiokot.ru/artfiles/6467/>
2. Ультрафиолетовое излучение / [Электронный ресурс] // БОЛЬШАЯ РОССИЙСКАЯ ЭНЦИКЛОПЕДИЯ: [сайт]. — URL: <https://bigenc.ru/c/ultrafiolotovoe-izluchenie-227754>
3. Ультрафиолетовые светодиоды / [Электронный ресурс] // elec.ru: [сайт]. — URL: <https://www.elec.ru/publications/osveschenie/5884/>

Крыжин Евгений Дмитриевич, студент группы 3231-110403D, 2023-02673@students.ssau.ru.

Пияков Алексей Владимирович, к.т.н., доцент каф. РЭС, piyakov.av@ssau.ru.

УДК 629.423.2

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СКРЫТЫХ ДЕФЕКТОВ БАНДАЖЕЙ И ОБОДЬЕВ КОЛЕСНЫХ ПАР ПОДВИЖНОГО СОСТАВА НА ОСНОВЕ ВИХРЕТОКОВОГО КОНТРОЛЯ

Волков А.В., Семяхина Е.Д.

Национальный исследовательский Мордовский государственный университет; МГУ им. Н.П. Огарева; ФГБОУ ВО «МГУ им. Н.П. Огарёва»

Современные железнодорожные перевозки предъявляют высокие требования к безопасности и надежности подвижного состава. Одним из критически важных элементов колесных пар являются бандажи и ободья, подверженные значительным механическим и термическим нагрузкам в

процессе эксплуатации. Скрытые дефекты, такие как трещины, коррозия и усталостные повреждения, могут привести к катастрофическим последствиям, включая разрушение колеса и сход вагона с рельсов. В этой связи разработка эффективных методов неразрушающего контроля (НК) для своевременного выявления скрытых дефектов приобретает особую актуальность.

Вихретоковый контроль (ВТК) зарекомендовал себя как один из наиболее перспективных методов НК благодаря высокой чувствительности к поверхностным и подповерхностным дефектам, возможности автоматизации и отсутствию необходимости контактирования с объектом контроля. Однако интерпретация результатов ВТК остается сложной задачей, требующей разработки точных математических моделей, учитывающих физические процессы взаимодействия электромагнитного поля с проводящим материалом [1,4].

В данной работе представлено математическое моделирование скрытых дефектов бандажей и ободьев колесных пар на основе вихретокового контроля. Разработана трехмерная конечно-элементная модель, позволяющая анализировать распределение вихревых токов в зависимости от геометрических и физических параметров дефектов. Проведена верификация модели на экспериментальных данных, а также исследовано влияние частоты возбуждения, глубины дефекта и электромагнитных свойств материала на сигнал вихретокового датчика.

Результаты работы могут быть использованы для оптимизации параметров вихретокового контроля, разработки алгоритмов автоматизированной дефектоскопии и повышения точности диагностики колесных пар подвижного состава.

Вихретоковый метод базируется на квазистационарном приближении уравнений Максвелла, в которых мы пренебрегаем током смещения (1):

$$\begin{aligned}\nabla \times E &= -\frac{\partial B}{\partial t} \\ \nabla \times H &= J \\ B &= \mu H, J = \sigma E\end{aligned}\quad , \quad (1)$$

где: E – напряженность электрического поля, H – напряженность магнитного поля, B – магнитная индукция, J – плотность вихревых токов, μ – магнитная проницаемость, σ – удельная электропроводность.

Уравнение диффузии электромагнитного поля [2], в проводящей среде в нашем случае это бандаж колесной пары, тогда с учётом (1) уравнение принимает вид:

$$\nabla^2 H = \mu \sigma \frac{\partial H}{\partial t} \quad (2)$$

Для гармонического возбуждения напряженность магнитного поля

примет следующий вид:

$$H = H_0 \cdot e^{j\omega t} \quad (3)$$

Учитывая выражение (3) выражение (2) примет следующий вид:

$$\nabla^2 H = j\omega\mu\sigma H \quad (4)$$

Определение глубины проникновения вихревых токов определяется выражением (5) и показывает нам, что при удалении от поверхности плотность тока убывает экспоненциально и на глубине δ становится меньше в $e \approx 2,718$ раз [3].

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}} \quad (5)$$

где: δ – глубина скин-слоя, μ – магнитная проницаемость, σ – удельная электропроводность, ω – циклическая частота.

Изменение импеданса приемной катушки из-за изменения вихревых токов в материале определяется выражением (6).

$$\Delta Z = \frac{U}{I} = R + j\omega L \quad (6)$$

где: R – активное сопротивление, L – индуктивность, U – наведенное напряжение, I – ток в катушке.

Результат моделирования дефекта в бандаже колесной пары представлен на рисунке 1.

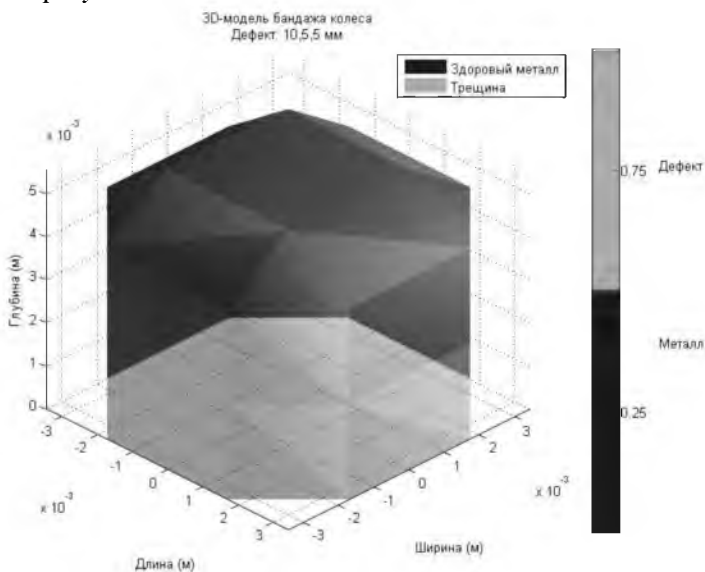


Рисунок 1 – 3D модель бандажа колесной пары с дефектом

Из рисунка 1 видно, что на 3D-визуализации области бандажа колеса моторвагонного подвижного состава с искусственно смоделированным дефектом присутствует область здорового металла (синий цвет) с градиентом по глубине, а также трещина (красный цвет) размерами 10×5×5 мм.

Предложенный подход существенно повышает точность выявления скрытых дефектов на ранних стадиях их развития, что способствует увеличению межремонтных интервалов и предотвращению аварийных ситуаций. Дальнейшие исследования будут направлены на создание 3D-модели с учетом реальной геометрии бандажей и разработку портативных вихретоковых сканеров для полевых условий.

Список использованных источников

1. Федосенко, Ю. К. Вихретоковый контроль: учебное пособие для подготовки специалистов по неразрушающему контролю и технической диагностике / Ю. К. Федосенко, П. Н. Шкатов, А. Г. Ефимов ; Российское общество по неразрушающему контролю и технической диагностике. – Москва: Издательский дом "Спектр", 2011. – 224 с. – (Диагностика безопасности). – ISBN 978-5-904270-64-3. – EDN QMHEEL.

2. Захлевных, А. Н. Переход Фредерикса в ферронематиках: трикритическое поведение / А. Н. Захлевных, Д. В. Макаров // Вестник Пермского университета. – 2009. – № 1(27). – С. 62-68. – EDN KNNWLF.

3. О чувствительности вихретокового контроля деталей железнодорожного подвижного состава / Г. Я. Дымкин, А. В. Курков, Я. Г. Смородинский, А. В. Шевелев // Дефектоскопия. – 2019. – № 8. – С. 47-53. – DOI 10.1134/S0130308219080062. – EDN QTUMEC.

4. Мрыхина, Д. А. Вихретоковый метод как вид неразрушающего контроля / Д. А. Мрыхина, М. Н. Белая // Современные технологии: проблемы и перспективы: сборник статей всероссийской научно-практической конференции для аспирантов, студентов и молодых учёных, Севастополь, 19–22 мая 2020 года. – Севастополь: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Севастопольский государственный университет", 2020. – С. 181-184. – EDN ZBMECH.

Волков Антон Владимирович – к.т.н., доцент каф. информационной безопасности и сервиса института электроники и светотехники ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва». elsoldador@rambler.ru

Семяхина Елена Дмитриевна – аспирант каф. информационной безопасности и сервиса института электроники и светотехники ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва», elenasemyakhina2016@yandex.ru