

А. Г. Верхогляд, А. Н. Исаев, И. Н. Куропятник,  
П. Г. Мамонтов, В. А. Моисеев  
(Новосибирск)

### МЕТОДЫ ИНФРАКРАСНОЙ ДИАГНОСТИКИ ДЕФЕКТОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ КОЛЕС

Рассматривается возможность применения инфракрасных детекторов для обнаружения в диске железнодорожных колес дефектов в виде сквозных трещин. Предложенный метод основан на наблюдении эволюции распределения температуры в процессе нагрева металла при помощи инфракрасной микроболометрической камеры. Проведены эксперименты по наблюдению сквозной трещины в инфракрасном диапазоне длин волн при распространении теплового потока в колесе, инициируемого внешним источником тепла. Результаты математического моделирования этого процесса качественно совпадают с результатами экспериментов. Показана возможность разработки метода для определения дефекта колеса в статическом состоянии.

Введение. В неразрушающем контроле материалов с использованием тепловизионных приборов различают два метода исследований: активный [1] и пассивный [2–6]. Пассивный метод, как правило, применяется в тех случаях, когда исследуемый объект имеет температуру, отличную от температуры окружающей среды. Этот метод нашел широкое применение в таких областях, как медицина, оборона, сельское хозяйство, астрономия [7]. Активный же метод требует использования внешнего теплового источника для воздействия на материал. Такими источниками могут выступать мощные галогенные лампы и лазеры, нагревательные элементы или конвективные потоки [1].

Активные методы могут применяться для исследования материалов и выявления дефектов как подповерхностных, так и непосредственно на поверхности металлов [8]. Особый интерес вызывают дефекты сквозного вида в движущихся частях механизмов железнодорожного подвижного состава. Появление сквозных трещин в диске колеса вагона приводит в большинстве случаев к сходам составов с рельсов. Проведение диагностики таких дефектов имеет важное практическое значение, поскольку позволяет предотвращать аварии. Методы теплового контроля являются бесконтактными и способствуют созданию автоматизированных систем поточного контроля.

Следует отметить, что тепловизионные методы контроля состояния железнодорожного подвижного состава в настоящее время практически не

распространены. Выявление таких дефектов колес, как сквозные трещины, достаточно затруднено и требует больших затрат времени и ручного труда.

Целью данной работы является численное моделирование процессов распространения тепловых потоков в вагонном колесе и проведение экспериментов по определению возможности применения инфракрасной (ИК) диагностики в системах обнаружения трещин в его диске.

Численное моделирование процесса распространения теплового потока. Для численного моделирования этого процесса использовалась упрощенная геометрия фрагмента колеса размером 350 мм вдоль оси X и 300 мм вдоль оси Y (рис. 1). Эквивалент фрагмента обода колеса на рисунке – толстый брусок размером 92 × 130 мм вдоль осей X и Z соответственно, фрагмент диска – плоскость толщиной 20 мм. Как показала практика, сквозные трещины в диске длиной до 200 мм располагаются на расстоянии 90–150 мм от поверхности катания. В данной модели было принято, что сквозная трещина длиной 100 мм расположена на расстоянии 120 мм от поверхности катания (нагреваемой поверхности).

В процессе торможения вагона тормозная колодка прикладывается к поверхности катания колеса. В результате трения выделяется тепло, которое распространяется от поверхности катания к оси колеса. Если в диске колеса имеется трещина, то тепловой поток должен пройти через нее.

Распространение тепла в твердом теле, как известно [9], описывается уравнением теплопроводности

$$\rho \frac{\partial T}{\partial t} = k \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right), \quad (1)$$

где  $\rho$  – плотность вещества;  $c$  – удельная теплоемкость;  $k$  – теплопроводность;  $T$  – температура;  $t$  – время;  $x, y, z$  – координаты. Плотность стали, из которой изготавливаются вагонные колеса, составляет  $7800 \text{ кг/м}^3$ , теплоемкость –  $460 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}$ , теплопроводность –  $50 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$ . Трещина рассматривалась как воздушный зазор с параметрами:  $\rho = 1,2 \text{ кг/м}^3$ ,  $c = 700 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}$ ,  $k = 0,024 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$ .

В рамках модели это уравнение решалось при следующих граничных условиях. На нагреваемой поверхности задавался тепловой поток  $q$ . На боко-

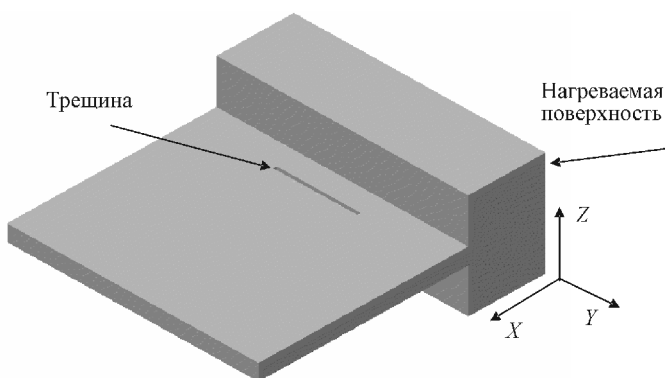


Рис. 1. Геометрическая модель фрагмента колеса

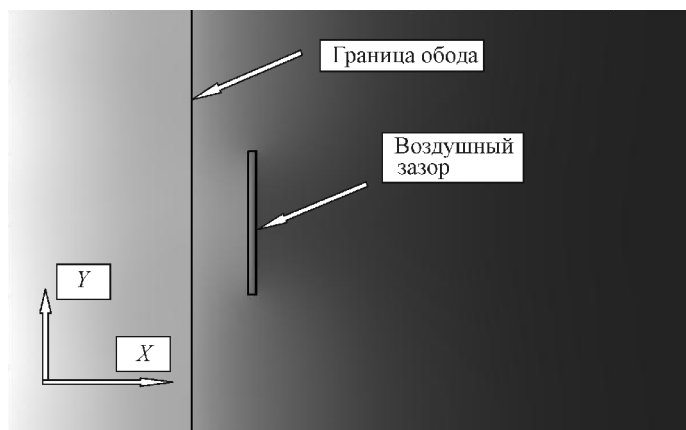


Рис. 2. Расчетное распределение температуры на поверхности модельного фрагмента колеса

вых поверхностях фрагмента диска колеса и сопряженных с ними поверхностях обода граничным условием является  $n(k \nabla T) = 0$ . На остальных поверхностях фрагмента колеса использовалось граничное условие

$$n(k \nabla T) = (T_0 - T) + (T_0^4 - T^4), \quad (2)$$

где  $n$  – единичный вектор, нормальный к поверхности;  $\nabla T$  – градиент температуры;  $k$  – коэффициент теплоотдачи;  $T_0$  – температура окружающей среды;  $\epsilon$  – коэффициент черноты;  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}^4$ . В модели значение  $\epsilon$  выбиралось равным  $11 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$ . Первый член в правой части уравнения (2) описывает теплоотдачу с поверхности за счет конвекции, второй – за счет излучения. Между воздушным зазором и материалом колеса граничным условием является равенство тепловых потоков и температур. В качестве начального условия задавалась температура  $282 \text{ К}$  для всех участков объекта.

В процессе численных расчетов выяснилось, что при ширине зазора трещины  $0,05\text{--}0,10 \text{ мм}$  необходимо использовать расчетную сетку с большим количеством элементов, для чего требуется высокопроизводительный компьютер. Исходя из выражения для теплового потока  $q = \frac{k}{l}(T_1 - T_2)$  ( $l$  – ширина зазора,  $T_1$  и  $T_2$  – температуры на краях зазора) в модели были увеличены ширина зазора и пропорционально коэффициент теплопроводности так, чтобы значение теплового потока, проходящего через зазор, осталось прежним. Это позволило уменьшить количество элементов в расчетной сетке, что, в свою очередь, существенно уменьшило время расчетов.

На рис. 2 приведено распределение температуры по поверхности модельного объекта (на нагреваемой поверхности обода колеса (на рисунке слева)) через  $800 \text{ с}$  после включения теплового потока  $15000 \text{ Вт/м}^2$ . Самым светлым участком изображения соответствует температура  $327 \text{ К}$ , самым темным –  $288 \text{ К}$ .

На рис. 3 показано распределение температуры вдоль линии, проходящей через центр зазора. Зависимости получены после начала нагрева тепло-

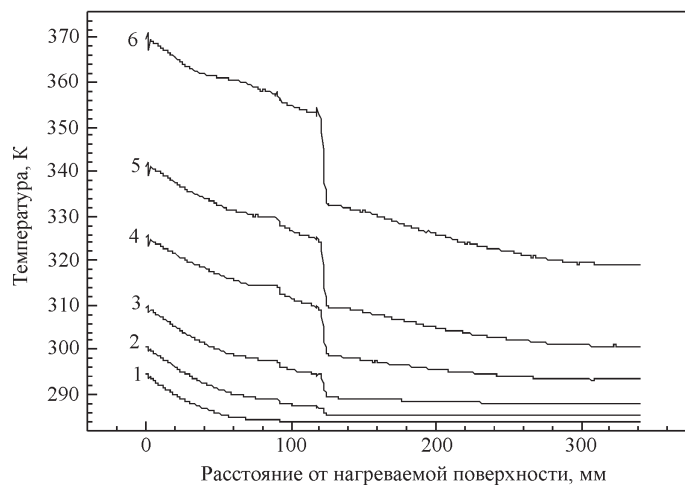


Рис. 3. Распределение температуры вдоль линии, проходящей через центр воздушного зазора, при разных временах: кривая 1 – 100, 2 – 200, 3 – 400, 4 – 800, 5 – 1200, 6 – 2000 с

вым потоком  $15000 \text{ Вт/м}^2$ . Кривая 2 отражает распределение температуры через 200 с после включения нагрева. Наблюдается резкое изменение температуры на  $1,5 \text{ К}$  в области зазора. С увеличением времени нагрева этот перепад температур возрастает, достигая  $20 \text{ К}$  при  $2000 \text{ с}$  (кривая 6), и становится заметным при продолжительности нагрева приблизительно  $140 \text{ с}$ . Его появление объясняется низким значением коэффициента теплопроводности воздушного зазора по сравнению с окружающим материалом. Щель ведет себя как тепловое сопротивление, и тепловой поток обходит ее. В результате на границах щели происходит большее падение температуры. Следует отме-

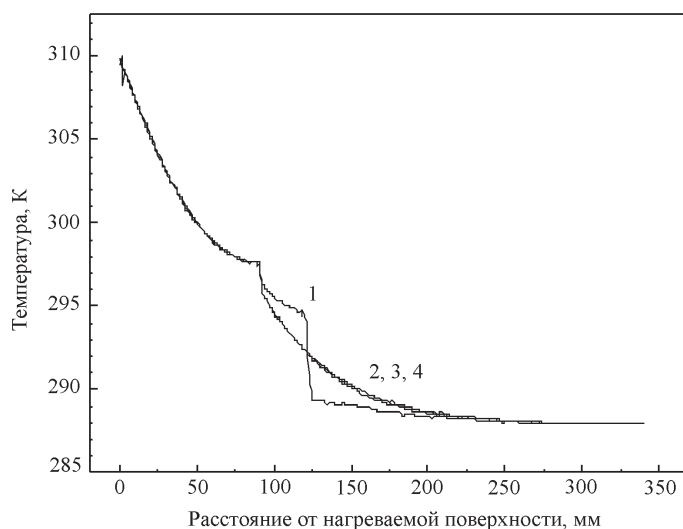


Рис. 4. Распределение температуры вдоль линий, отстоящих на различных расстояниях от нагреваемой поверхности. Зависимости взяты вдоль линий по оси X с различными значениями Y:

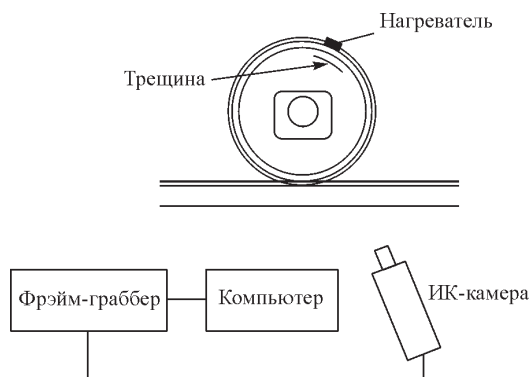


Рис. 5. Схема экспериментальной установки

туть, что тепловой поток от нагреваемой поверхности за 100 с не успевает дойти до щели, и скачка температуры на ней не происходит.

На рис. 4 показано распределение температуры вдоль линий, отстоящих на различных расстояниях от боковой поверхности фрагмента колеса в диапазоне 20–150 мм. Время после включения нагрева составило 400 с. Зависимости (кривые 2–4), взятые вдоль линий, не проходящих через щель, не имеют скачка температуры в области щели. Эти графики практически полностью совпадают. Распределение температуры вдоль линии, проходящей через щель (кривая 1), имеет скачок температуры. На всех кривых наблюдается аномалия при 92 мм, что соответствует границе между ободом и диском колеса.

Экспериментальная методика. Схема экспериментальной установки для выявления трещины изображена на рис. 5. Вагонное железнодорожное колесо диаметром 950 мм со сквозной трещиной в диске (рис. 6), расположенной на расстоянии 120 мм от поверхности катания, нагревалось электрическим нагревателем мощностью 270 Вт, который выполнен из нихромовой спирали, заключенной в термостойкую оболочку. Трещина имеет длину 150 мм и толщину порядка 100 мкм. Геометрия сквозной трещины носит случайный характер, поэтому обнаружение данного дефекта на просвет не представля-

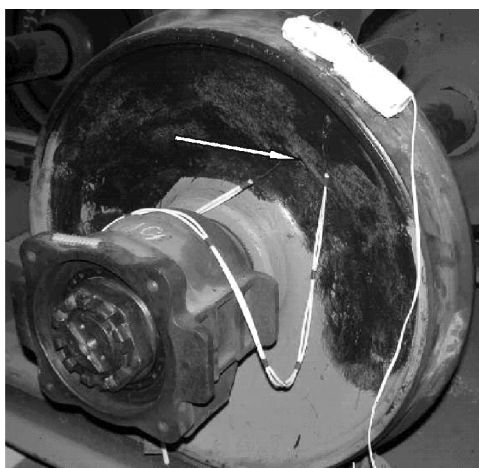


Рис. 6. Общий вид железнодорожного колеса со сквозным дефектом

ется возможным. Нагреватель монтировался непосредственно напротив трещины на поверхности катания колеса. Для получения изображения распределения температуры в районе дефекта в диапазоне длин волн 8–14 мкм использовалась ИК-камера. Она устанавливалась на расстоянии 1 м от наблюдаемого объекта. В качестве детектора в камере использовалась микроболометрическая матрица размера 164 × 128 пикселей по осям X и Y. Размер одного пикселя 51 × 51 мкм. Разрешение камеры по температуре составляло 0,08 °С при температуре объекта менее 150 °С. Для съемки использовался объектив с фокусным расстоянием 30 мм. Полученное при помощи камеры изображение поступало на фрейм-граббер со скоростью 30 кадр./с и сохранялось на компьютере.

Рабочий диапазон длин волн 8–14 мкм выбирался для получения качественного изображения при солнечном свете. Кроме того, в соответствии с законом Планка поверхностная плотность излучения при заданной температуре тела имела максимум в зависимости от длины волны. С увеличением температуры максимум плотности излучения смещался в область малых длин волн [1]. При интересующих нас температурах 0–50 °С максимум плотности излучения располагался в диапазоне длин волн 8–14 мкм. Помимо этого данный диапазон длин волн находился в области одного из окон прозрачности атмосферы 8–12 мкм [1], что снижало влияние атмосферы на получение изображения объекта.

Для контроля температуры на поверхности диска колеса располагались термопары хромель–алюмель. Одна термопара была закреплена выше трещины, другая – ниже, как показано на рис. 7. Для устранения возможных проблем, связанных с неоднородностью коэффициента черноты по поверхности диска колеса, участок поверхности вокруг трещины покрывался матовой черной краской в несколько слоев.

Результаты экспериментов и их сравнение с результатами численного моделирования. Проведена обработка ИК-изображений колеса с трещиной при вариациях температуры нагревателя и времени нагрева.

На рис. 7 приведено изображение в видимом свете участка колеса с трещиной до нанесения черной краски на его поверхность.

При выполнении экспериментов температура окружающей среды была 10 °С. Съемка проводилась сразу после подачи напряжения на нагрева-

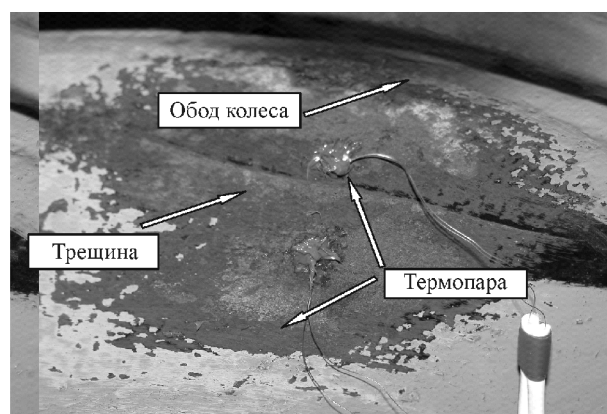


Рис. 7. Изображение участка поверхности диска колеса с трещиной в видимом свете

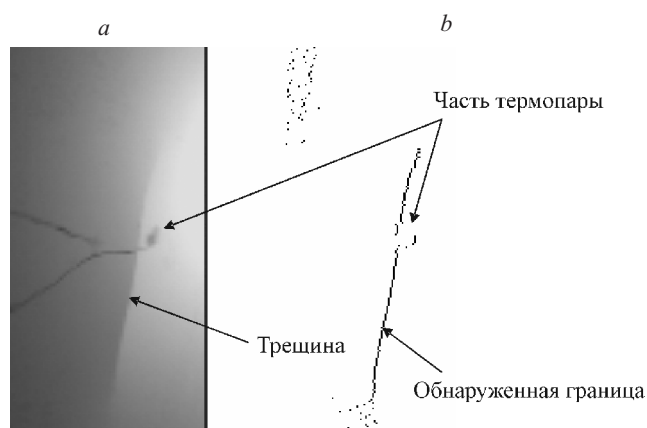


Рис. 8. Изображение трещины: исходное (а), после процедуры выделения трещины (b)

тельный элемент. Приблизительно через 3 мин после включения нагревателя тепловой поток достигал трещины, которая проявлялась на изображении как граница между светлой и темной областями (рис. 8, а). Появление такой резкой границы в распределении температуры по поверхности обусловлено тем, что теплопроводность стали, из которой сделано колесо, и теплопроводность воздушной прослойки в трещине сильно различаются (коэффициент теплопроводности стали  $40 \text{ Вт м}^{-1} \text{ С}^{-1}$ , воздуха  $0,024 \text{ Вт м}^{-1} \text{ С}^{-1}$ ). Как видно из рис. 8, а, трещина, несмотря на малую ширину, обладает достаточно большим тепловым сопротивлением. По мере увеличения времени нагрева колеса трещина на ИК-изображениях проявлялась все отчетливее (т. е. контраст изображения увеличивался).

Во время съемки колеса ИК-камерой параллельно в процессе нагрева измерялась температура выше и ниже трещины с помощью термопар. Температура в обеих точках возрастала линейно в пределах погрешности измерений, достигая через 40 мин прогрева значений  $39 \text{ С}$  в точке выше трещины и  $27 \text{ С}$  в точке ниже трещины.

Для более четкого определения геометрии трещины изображение обрабатывалось с помощью различных фильтров повышения контрастности, а также методов выделения границ, таких как методы Лапласа, Собеля и др. Однако лучшие результаты показал разработанный метод, основанный на определении положения максимума градиента температуры в каждой строке кадра (рис. 8, b).

Полученные экспериментальные данные качественно согласуются с результатами расчетов. Минимальное время нагрева, необходимое для проявления трещины на изображении, составило 2,5–3 мин в обоих случаях. В то же время перепад температур на трещине растет с увеличением времени прогрева. Величина перепада, полученная в эксперименте, меньше величины, полученной при расчетах. Это можно объяснить тем, что трещина в колесе имеет сложную геометрию, и ее, по-видимому, нельзя отождествлять с воздушным зазором.

**Заключение.** В данной работе построена имитационная модель железнодорожного колеса с дефектом в виде трещины. Методом численного модели-

рования решена задача радиального распространения тепла по колесу со сквозной трещиной. Показана теоретическая возможность обнаружения трещин в железнодорожном колесе методом активной термографии.

В ходе проведенных экспериментов по использованию ИК-детекторов для визуализации сквозных дефектов в диске железнодорожного колеса показано, что тепловые методы позволяют обнаружить дефект даже при небольших температурах нагрева металла, что, в свою очередь, позволяет разработать методы определения дефектов и контроля состояния железнодорожных колес.

Достигнуто совпадение на качественном уровне расчетных и экспериментальных данных.

Дальнейшие исследования в этом направлении предполагают проведение экспериментов по обнаружению трещин в процессе движения колеса.

Предварительные натурные испытания метода показали, что в процессе торможения железнодорожного состава происходит существенный нагрев обода колеса, что может быть использовано для обнаружения внутренних дефектов колеса на ходу поезда на подходах к пунктам технического обслуживания.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Maldague X. *Nondestructive Evaluation of Materials by Infrared Thermography*. Berlin: Springer-Verlag, 1993.
2. Predmesky R. L., Zaluzec M. J. Infrared in automotive applications // *Proc. SPIE*. 1997. 3056. P. 110.
3. Ay H., Jang J. Y., Yeh J.-N. Local heat transfer measurements of plate finned-tube heat exchangers by infrared thermography // *Intern. Journ. Heat and Mass Transfer*. 2002. 45. P. 4069.
4. Kaminski A., Jouglar J., Volle C. et al. Non-destructive characterization of defects in devices using infrared thermography // *Microelectronics Journ.* 1999. 30. P. 1137.
5. Kong L. X. Industrial application of thermal image processing and thermal control // *Proc. SPIE*. 2001. 4556. P. 139.
6. Feng C. On-line measurement of hot rolling steel bar // *Proc. SPIE*. 1989. 1094. P. 103.
7. Белозеров А. Ф., Иванов В. М. Современные зарубежные тепловизионные приборы // *Оптический журнал*. 2003. 70, № 10. С. 62.
8. Вавилов В. П. Тепловые методы неразрушающего контроля: Справочник. М.: Машиностроение, 1991.
9. Физическая энциклопедия. Т. 5. Стробоскопические приборы – яркость. М.: Изд-во Большая Российская энциклопедия, 1998. С. 79.

Конструкторско-технологический институт  
научного приборостроения СО РАН,  
Конструкторско-технологический институт  
прикладной микроэлектроники СО РАН,  
E-mail: kuropyat@tdisie.nsc.ru

Поступила в редакцию  
23 октября 2005 г.