

Использование фрактальных характеристик для анализа развития разрушения цельнокатаных колес



И. А. Иванов,
д. т. н., профессор кафедры
«Технология металлов»
петербургского государственного университета
путей сообщения
(ФГБОУ ВО ПГУПС)



Д. П. Кононов,
к. т. н., доцент кафедры
«Технология металлов»
ФГБОУ ВО ПГУПС



С. В. Урушев,
д. т. н., заведующий
кафедрой «Технология
металлов» ФГБОУ
ВО ПГУПС



С. В. Кротов,
к. т. н., доцент кафедры
«Строительная
механика» ФГБОУ
ВО РГУПС

С помощью разработанной методики фрактальной параметризации рельефа излома колесной стали можно получить значение фрактальной размерности в различных направлениях роста трещины. В случае использования фрактальной параметризации излома нет необходимости проводить трудоемкие испытания для определения механических характеристик колесной стали. Кроме того, появляется возможность установить механические свойства стали, когда другие способы не применимы (небольшие размеры образцов).

Цельнокатаное колесо, представляющее собой элемент конструкции, в процессе эксплуатации испытывает сложный комплекс изменяющихся по уровню, периодичности и длительности приложения циклических нагрузок [1–8]. Выяснение природы происхождения повреждений цельнокатаных колес — одна из основных задач при решении вопросов их надежности и долговечности.

В стали, идущей на изготовление железнодорожных колес, наблюдается самоподобие изменения структурных параметров в определенных масштабных интервалах. В тех или иных интервалах масштабных уровней самоподобие мо-

жет быть различным. Для интегральной оценки всего многообразия размерностей по всем масштабам используют мультифрактальное описание структуры. Мультифрактальность возникает в результате многомасштабности и разнонаправленности анализируемых процессов эволюции металла в различных условиях формирования его структуры или поверхности разрушения.

Г. В. Встовским в Институте металлургии и металловедения им. А. А. Байкова РАН разработана методика получения мультифрактальных характеристик структуры объекта [9, 10].

Ключевой вопрос использования фрактальной параметризации поверхностей раз-



ФОТО: СЕРГЕЙ ПОРИН

Таблица 1

Параметр	Фрактальная размерность D-образца					
	1	2	3	4	5	6
Среднее значение	1,1209	1,1641	1,237612	1,224782	1,324859	1,254956
Среднее квадратичное отклонение σ	0,069334	0,098627	0,091028	0,068792	0,113785	0,122960

рушения связан с установлением взаимосвязи между характеристиками энергоемкости материала, например, вязкостью разрушения K_{1c} , и измеренной тем или иным способом фрактальной размерностью. Трудности установления такой корреляции связаны в первую очередь с тем, что фрактальные характеристики поверхности разрушения зависят от масштаба измерений [11].

Стандартные характеристики материала на растяжение (предел прочности материала σ_b , относительное сужение ψ , относительное удлинение δ) также зависят от фрактальной размерности контура поверхности разрушения, поскольку они связаны с K_{1c} различными корреляционными зависимостями [12, 13].

Таким образом, на практике при выявлении причин разрушения вагонных колес можно получить более полную информацию о процессах разрушения на основе существующих методов определения фрактальных характеристик поверхностей. В работе [14] рассмотрена методика фрактальной параметризации излома колесной стали. Согласно этой методике была определена зависимость трещиностойкости колесной стали от величины фрактальной размерности.

Испытания цельнокатаных колес на трещиностойкость

Оценку трещиностойкости колесной стали марки 2 (ГОСТ 10791–2011) с целью дальнейшей фрактальной параметризации рельефа излома выполняли, определяя критический коэффициент интенсивности напряжений K_{1c} . Испытания проводили в соответствии с требованиями ГОСТ 25.506–85.

Были изготовлены шесть образцов по ГОСТ 25.506–85, тип 3 — прямоугольные компактные образцы с краевой трещиной (рис. 1) для испытаний на внецентренное растяжение. Иницирующий надрез выполнен с помощью электроэрозионной пилы с радиусом надреза 0,2 мм.

Усталостные трещины наносились таким образом, чтобы контур надреза находился между прямыми, пересекающимися под углом 20–30° в вершине тре-

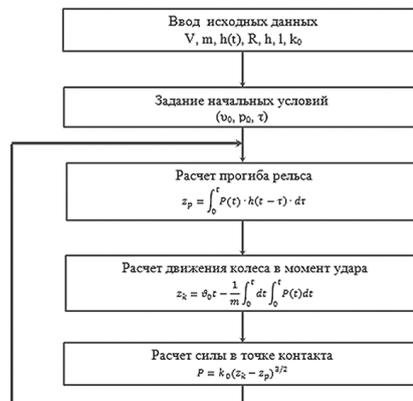


Рис. 1. Образец для испытаний на трещиностойкость

шины, глубина ее была не менее 1,5 мм. Испытания проводили на испытательной машине НВ-250 при переменном растяжении с коэффициентом асимметрии цикла 0,1. В процессе испытаний строили диаграммы «нагрузка — смещение», по которым определяли расчетную нагрузку на образец P_Q .

Затем, используя полученные значения P_Q , находили величины коэффициента интенсивности напряжений K_{1c} :

$$K_{1c} = \frac{P_Q}{t\sqrt{b}} Y_3,$$

где t, b — геометрические размеры образца, мм; Y_3 — поправочная функция, значения которой получают по формуле

$$Y_3 = 13,74 \left[1 - 3,380 \frac{l}{b} + 5,572 \left(\frac{l}{b} \right)^2 \right],$$

здесь l — длина исходной усталостной трещины, мм. Она определяется по трем точкам, расположенным через равные промежутки по толщине образца, исключая боковые поверхности.

Результаты расчета приведены в таблице.

Фрактальная параметризация изломов колесной стали

После определения значений показателей трещиностойкости исследовали полученные изломы, чтобы установить фрактальную размерность по методике, описанной в [14], с помощью R/S-анализа [15].

Каждый из рядов данных, полученных с помощью обработки фотографии излома, вводили в программу для расчета фрактальной размерности. На рис. 2 представлен

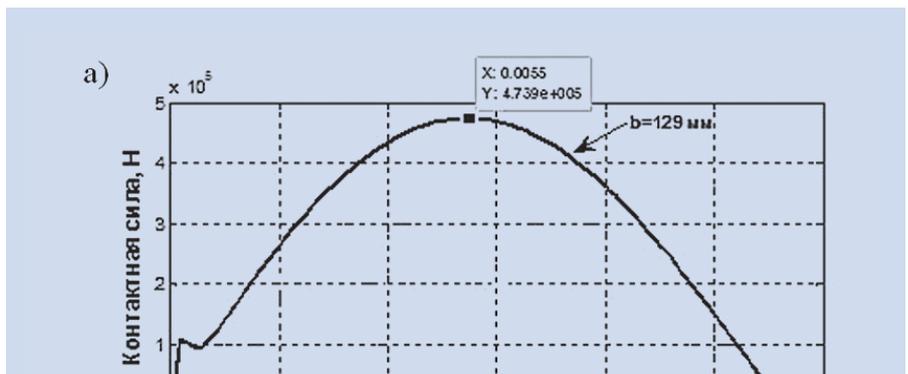


Рис. 2. График общего вида ряда данных

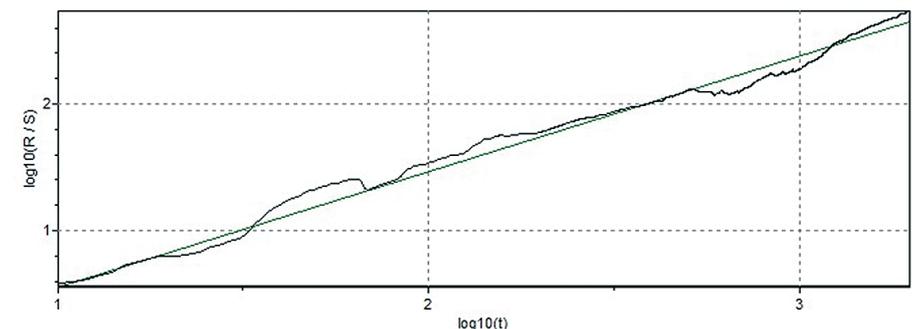


Рис. 3. Вид графика после расчета показателя Херста

Таблица 2. Параметры трещиностойкости колесной стали

Номер образца	Расчетная нагрузка P_q , кН	Длина исходной усталостной трещины l , мм	Коэффициент интенсивности напряжений K_{Ic} , МПа·м ^{1/2}
1	41,210	28,76	48,0
2	36,707	30,08	48,8
3	42,599	28,50	52,3
4	38,683	30,05	51,8
5	44,786	29,94	52,9
6	40,008	29,85	52,4

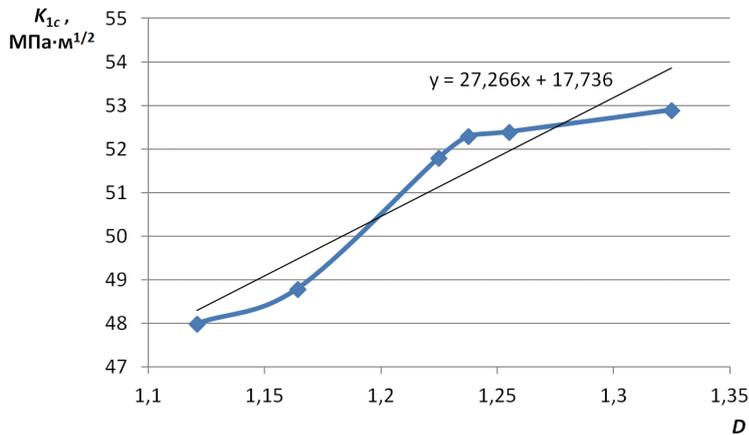


Рис. 4. Зависимость коэффициента интенсивности напряжений от фрактальной размерности

общий вид ряда данных. По оси абсцисс приведена ширина образца (пиксели), по оси ординат – величина уровня оттенка серого. По сути, представлена профилограмма поверхности излома в заданном направлении.

После расчета показателя Херста строится график зависимости (рис. 3). Тангенс угла наклона аппроксимирующей прямой показывает фрактальную размерность.

Расчеты фрактальной размерности проводили по сечениям, взятым с интервалом 100 пикселей. Средние значения фрактальной размерности следующие: разница между полученными значениями коэффициента интенсивности напряжений K_{Ic} не превышает 9 %, поэтому достаточно сложно установить четкую зависимость между ними и фрактальной размерностью. Между тем зависимость прослеживается (рис. 4): с увеличением фрактальной размерности K_{Ic} возрастает.

На графике приведено уравнение аппроксимирующей прямой, которое позволяет прогнозировать трещиностойкость колесной стали в зависимости от фрактальной размерности излома, а также судить о том, какой характер разрушения: хрупкий, вязкий или усталостный.

Таким образом, выявлена зависимость фрактальной размерности от характеристик пластичности колесной стали ($1 < Df < 2$). Чем меньше величины характеристик пластичности (относительного удлинения, относительного сужения)

и, соответственно, выше твердость, тем ниже значение фрактальной размерности: $Df \rightarrow 1$. При высокой пластичности $Df \rightarrow 2$. Поэтому использование фрактальной параметризации излома позволяет избежать трудоемких испытаний при определении механических характеристик стали, а также установить механические свойства в том случае, когда другие способы не применимы (небольшие размеры образцов).

Литература

- Иванов И. А., Урушев С. В. О повышении ресурса цельнокатаных колес // Железнодорож. транспорт. 2000. № 3. С. 25.
- Кононов Д. П. Увеличение долговечности вагонных колес методом локальной термообработки // Наука и техн. транспорта. 2014. № 2. С. 37–40.
- Губенко С. И., Иванов И. А., Соболев А. А. Особенности износа поверхности катания цельнокатаных колес // Изв. Петерб. ун-та путей сообщения. 2013. № 1 (34). С. 73–84.
- Кротов С. В., Кононов Д. П. Контактная усталостная долговечность рельсовой и колесной стали // Там же. 2018. № 1. С. 54–61.
- Кононов Д. П. Повышение усталостной прочности цельнокатаных колес при изготовлении с помощью обточки диска // Бюл. результатов научн. исслед. 2018. № 1. С. 49–58.

- Губенко С. И., Иванов И. А., Кононов Д. П. Влияние качества стали на усталостную прочность цельнокатаных колес // Завод. лабор. Диагн.матер. 2018. № 3. С. 52–60.
- Кононов Д. П. Повышение надежности цельнокатаных колес. М.: Библио-Глобус, 2018. – 250 с.
- Воробьев А. А. Математическое моделирование параметров контакта колеса с рельсом для различных условий эксплуатации вагонов // Техн. железн. дорог. 2016. № 1 (33). С. 34–41.
- Встовский Г. В., Колмаков А. Г., Бунин И. Ж. Введение в мультифрактальную параметризацию структур материалов. М.; Ижевск, 2001. – 115 с.
- Встовский Г. В., Шаняевский А. А., Артамонов М. А. и др. Мультифрактальная селекция структур авиационных титановых дисков компрессоров, изготовленных по стандартной технологии, при различном сопротивлении усталостному разрушению // II Матем. модел. в синерг. системах. Улан-Удэ; Томск, 1999. С. 259–261
- Mu Z. Q., Lung C. W. Studies on the fractal dimension and fracture toughness of steel // Theor. and Appl. Fract. Mech. 1992. Vol. 17. P. 157–161.
- Романив О. Н. Вязкость разрушения конструкционных сталей. М.: Металлургия, 1979. – 176 с.
- Ишлинский А. Ю. Эйлерово описание деформирования одной изотропной среды // Прикладные задачи механики. В 2-х кн. Кн. 1: Механика вязкоупругих и не вполне упругих тел. М.: Наука, 1986. С. 333–336.
- Иванов И. А., Кононов Д. П., Шадрина Н. Ю. Математическое моделирование фрактально-кинетических процессов усталостного разрушения цельнокатаных колес // Подвижной состав XXI века: идеи, требования, проекты: Матер. XI между. науч.-техн. конф. СПб.: ФГБОУ ВО ПГУПС, 2016. С. 112–117.
- Херст Г. Э. Долгосрочная вместимость водохранилищ // Труды Америк. об-ва гражданских инженеров. Вып. 116. 1951. С. 770–808.