
**НАДЕЖНОСТЬ, ПРОЧНОСТЬ,
ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ МАШИН И КОНСТРУКЦИЙ**

УДК 531.395

**ТЕПЛОВОЙ КОНТРОЛЬ. МУЛЬТИФРАКТАЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ
ЛОКАЛЬНЫХ ПЛАСТИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ**

© 2023 г. Р. С. Ахметханов

*Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия**e-mail: mibsts@mail.ru*

Поступила в редакцию 16.04.2023 г.

После доработки 05.06.2023 г.

Принята к публикации 20.06.2023 г.

В статье представлены методы, которые позволяют оценить косвенно неоднородность распределения локальных деформаций и напряжений через значения распределения температуры в термограммах. При этом использованы методы фрактального анализа в виде мультифрактальных спектров, кластеризация изображений и кратно-масштабного анализ дискретного вейвлет-разложения изображений. Показано, что при увеличении поврежденности материала увеличивается ширина мультифрактального спектра и как локальные деформации по мере нагружения перераспределяются по длине пластины. А с помощью кратно-масштабного вейвлет-разложения находятся масштабные элементы, которые имеют наибольшие изменения в уровнях деформации.

Ключевые слова: термограмма, температура, деформация, напряжение, мультифрактальный спектр, статистические характеристики, кратно-масштабный анализ вейвлет-разложение

DOI: 10.31857/S0235711923050024, **EDN:** ZMGSJX

Цель статьи определить методы, которые позволят дать количественные оценки локальному распределению деформации при нагружении деталей для оценки их поврежденности.

Фундаментальной задачей анализа напряжений (деформаций) является определение их распределения по всему объекту исследования с учетом действующих на нее внешних сил. Для деталей из пластичных материалов при статическом нагружении локальная концентрация напряжений не снижает несущие способности, т.к. местные пластические деформации перераспределяются по мере их нагружения. При этом пластический материал имеет несколько стадий изменения кривой пластической деформации в зависимости от величины статической нагрузки. Для формализации стадийности этого процесса можно использовать уравнение Людвики

$$\sigma(\varepsilon) = \sigma_0 + \theta\varepsilon^n,$$

где σ_0 – предел текучести, θ – коэффициент деформационного упрочнения, n – показатель параболичности кривой пластической деформации. В зависимости от показателя параболичности на кривой деформирования выделяют следующие стадии процесса: 1) $n \approx 0$ – площадка текучести; 2) $n \approx 1$ – стадия линейного упрочнения; 3) $n \approx 1/2$ – стадия параболического упрочнения; 4) $0 \leq n \leq 1/2$ – стадия предразрушения.

Стадийный процесс усталостного разрушения связан с эволюцией структуры металла. При этом усталостное разрушение представляет собой многоуровневый и раз-

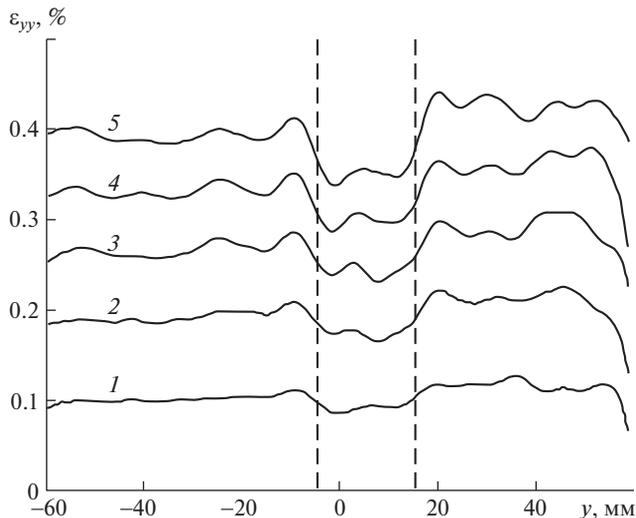


Рис. 1. Значения продольной деформации вдоль оси O_y при различном уровне нагружения образца: 1 – t_0 ; 2 – t_1 ; 3 – t_2 ; 4 – t_3 ; 5 – t_4 .

номасштабный кинетический процесс и характеризуется обязательным прохождением стадий образования полосовых субструктур, микротрещин, формированием коротких и макротрещин. Каждая стадия данного процесса отличается своими физическими механизмами, и процесс разрушения происходит в результате взаимодействия объектов, имеющих разный масштабный уровень – от атомного до мезо- и макроscopicого. Этот процесс является стохастическим [1].

В исследованиях, проведенных ранее, было показано, что в этих стадиях проявляются различные свойства локализации деформации. В виде примера приведем распределения локальной деформации по нагруженному объекту. Например, работа [2], где на основе полученных данных построены эпюры продольных деформаций (рис. 1) вдоль оси нагружения (ось O_{yy}), за начало координат принята средняя часть образца.

Кривые (рис. 1) были построены при контрольных значениях t_i , которые соответствуют значениям осевой нагрузки на уровнях: $P = 10, 20, 30, 40$ и 50 кН. Пунктирными линиями отмечены границы дефекта. Они показывают, что деформация по длине образца неравномерная.

Другой пример, в работе [3] приведены распределения продольной деформации образца сильвинита для различных моментов времени. Сильвинит – осадочная горная порода, состоящая из чередующихся слоев галита и сильвина и некоторых примесей (гематит и др.).

Неоднородность деформирования сильвинита проявляется в виде системы эквидистантно расположенных зон локализованной деформации, ориентированных к оси нагружения под углом около $\pm 54^\circ$. Эти зоны формируются с самого начала растяжения и остаются неподвижными в процессе нагружения. Показано, что области материала вне зон локализации находятся фактически в недеформированном состоянии. При этом внутри некоторых зон локализации деформация достигает уровня 0,5% при общей деформации образца 0,36%.

Большинство авторов описывали процесс неравномерности деформации как потерю стабильности пластического течения и образование геометрически выраженных

зон (областей) локализации деформации. Также многочисленные исследования показали, что в локально-деформированных зонах также наблюдаются существенные изменения структуры и физико-механических свойств материала. Это позволило создать новое направление по изучению пластического течения, в которых сформированы представления о пластическом течении как о самоорганизующемся процессе развития областей локализации со структурной неустойчивостью и поэтапной перестройкой структуры вещества.

В настоящее время считается, что размер структурных элементов деформируемого тела определяет размеры зон локализации деформации и состояние вещества в этих зонах. А фрактальная размерность зон локализации деформации определяется структурой материала и слабо зависит от граничных условий. На основании проведенного анализа экспериментальных и теоретических работ [4] сформулированы общие закономерности развития локализации деформации: 1) локализация деформации – основной структурно-энергетический организующий фрактальный элемент развития пластического течения твердых тел; 2) локализация деформации формируется на различных структурных уровнях деформируемых твердых тел и носит фрактальный характер; 3) деформационные неравновесные процессы – самоорганизующееся резонансное состояние материала, как реакция его на внешнее многофакторное воздействие.

Эти закономерности локального распределения деформаций в нагруженном объекте контроля проявляются при тепловом контроле за счет термоупругого и термопластического эффектов, когда превращение энергии механического деформирования металла в окрестности дефекта, трещины в тепловую энергию приводит к весьма существенному повышению температуры в данной области.

Как известно термоупругий эффект описан лордом Кельвином в уравнении, которое связывает изменение температуры ΔT с суммой изменений главных напряжений $\Delta \sigma$ [5]. То есть существует связь между тепловыми процессами и деформациями (напряжениями) в нагруженной детали. Чем выше деформация (пластическая) тем выше температура в области деформации. Таким образом, учитывая пропорциональную связь температуры и деформации, по распределению температуры можно косвенно оценить локализацию деформации. При этом нужно учитывать, что при нагружении образца в данном процессе имеются три стадии: 1 – охлаждение образца при упругом деформировании, 2 – нагрев при пластической деформации; 3 – нагрев и охлаждение в стадии разрушения (наибольшее изменение температуры образца) [6].

Приведем пример. В работе [7] исследовались термограммы нагружения тонких пластин с отверстиями и без отверстий. Показано, что пластины без отверстия нагреваются быстрее и до более высокой температуры. К моменту зарождения разрушения полосы без отверстий имеют температуру поверхности на 3–4°C превышающую температуру рабочей зоны полосы с отверстием. Разрушение зарождается в полосе, ослабленной отверстиями. А в момент зарождения и развития разрушения температура скачкообразно повышается примерно на 4°C и после разрыва за доли секунды падает на 10–11°C. То есть при деформировании выделенный объем материала проявляет свойство адаптивности к внешним условиям путем непрерывного активного приспособления за счет внутренней перестройки к постоянно меняющимся внешним факторам. При этом процесс адаптации протекает в соответствии с принципом Ле Шателье–Брауна, согласно которому реакция деформируемой системы сводится к такой приспособляемости, чтобы происходило ослабление внешнего воздействия. То есть, если на систему, находящуюся в устойчивом равновесии, воздействовать извне, изменяя какое-либо из условий равновесия, то в системе усиливаются процессы, направленные в сторону противодействия этим изменениям.

Приведем еще пример. На рис. 2 показаны термограммы, снятые в различные последовательные моменты нагружения образца [8]. Наибольшие области с повышен-

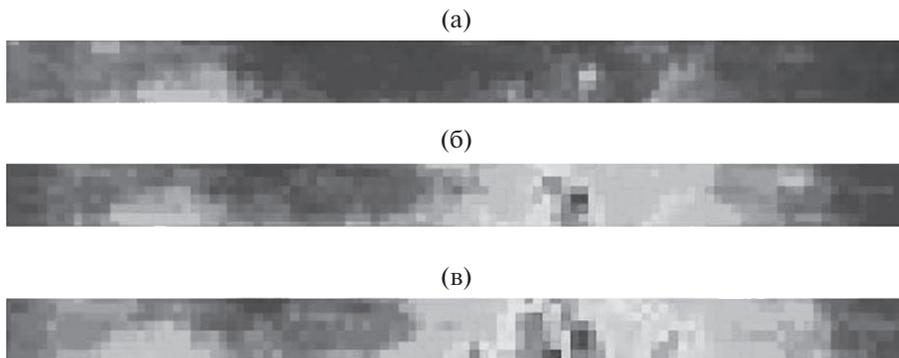


Рис. 2. Распределение температуры на поверхности образца при трех различных последовательных мгновениях нагружения (а)–(в).

ной температурой появляются прямо в средней части образца (более светлые зоны – это зоны с наибольшими температурами) после нескольких секунд удлинения (около 90-й секунды). Затем напряжение в образце увеличивается, температура повышается в данной области, охватывая всю ширину образца, и становится все более и более заметной за несколько секунд до разрушения. Грани излома отходят друг от друга, и образец начинает остывать.

На рис. 3 приведены термограммы образца под нагрузкой (пластина стальная с отверстиями, материал пластины СтЗсп) при различном уровне пластической деформации (стадии II и III). Они сильно различаются по температуре и распределению областей с повышенной температурой [7]. Минимальная температура термограмм 8.47°C , а максимальная температура 49.99°C . Минимальная температура менялась незначительно, а максимальная температура изменилась на величину 19.84°C , по мере нагружения пластины до ее разрушения.

В табл. 1 приведены статистические данные этих термограмм. Наиболее интересны данные по коэффициенту вариации, который возрастает по мере увеличения нагрузки. В момент разрушения коэффициент вариации становится минимальным. Такая же тенденция по среднеквадратическому отклонению. Повышение этих характеристик показывает, что неоднородность локальных деформаций повышается по мере нагружения пластины и уменьшается при ее разрушении.

На рис. 4 представлены эти термограммы в виде кластерного распределения локализации деформации (температуры) пластины с отверстиями. Более светлые зоны с наибольшими температурами, т.е. с наибольшими пластическими деформациями. В кластеры определяют зоны с одинаковым температурным интервалом. Общее количество кластеров было определено величиной 10. Они были вычислены

Таблица 1. Статистические данные термограмм в градациях серого пикселей изображения (0, ..., 255)

| Статистические данные | Уровень общей деформации, ϵ | | |
|---------------------------------|--------------------------------------|--------------|--------------|
| | ϵ_1 | ϵ_2 | ϵ_3 |
| Математическое ожидание | 87.823 | 89.295 | 85.363 |
| Среднеквадратическое отклонение | 17.579 | 22.155 | 6.902 |
| Мода | 86 | 86 | 84 |
| Коэффициент вариации, % | 20.01 | 24.81 | 8.08 |

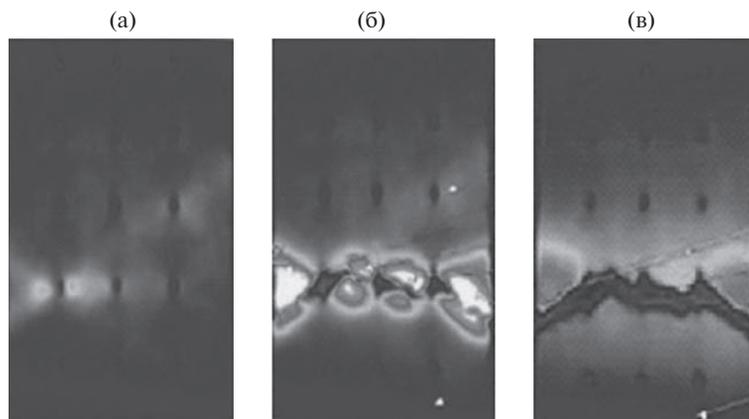


Рис. 3. Термограмма при общей деформации: (а) – ε_{ij}^1 (стадия I); (б) – ε_{ij}^2 (стадия II); (в) – ε_{ij}^3 (стадия III) ($\varepsilon_{ij}^3 > \varepsilon_{ij}^2 > \varepsilon_{ij}^1$).

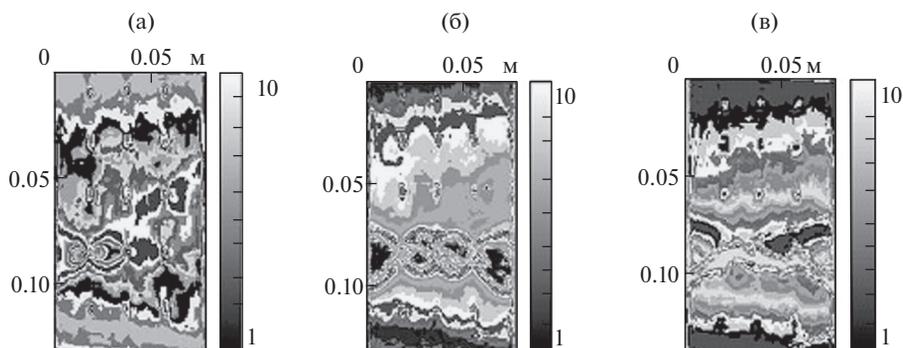


Рис. 4. Термограммы после кластеризации при общей деформации: (а) – ε_{1ij} ; (б) – ε_{2ij} ; (в) – ε_{3ij} ; ($\varepsilon_{ij}^3 > \varepsilon_{ij}^2 > \varepsilon_{ij}^1$).

методом К-средних значений (программа Gwiddion). Кластерное распределение (рис. 4) хорошо визуализирует, как перераспределяются локальные деформации по мере нагружения образца.

Напомним, что все изменения локализации деформации в пластическом материале носят фрактальный (масштабный) характер [4]. Поэтому рассмотрим неоднородность теплового поля (деформации) методами теории фракталов – исследуем мультифрактальные спектры $f(\alpha)$, полученные для этих тепловых полей. Мультифрактальные спектры отражают структуру теплового поля – его масштабную неоднородность [9, 10].

Мультифракталы – неоднородные фрактальные объекты (процессы), для описания которых, в отличие от монофракталов недостаточно введения всего лишь одной величины фрактальной размерности, а требуется спектр размерностей D_f . Мультифрактальность процесса обычно представляется мультифрактальным спектром $f(\alpha)$, который характеризуется шириной S , асимметрией, кривизной и т.д.

Приведем примеры использования мультифрактального формализма при изучении структурных характеристик изображений. В работе [11] представлен мультифрактальный подход к описанию структур пространственной самоорганизации сложных природных систем в рамках концепции самоорганизованной критичности. Проведена оценка выбросоопасности углей, которая зависит как от увеличения горного давления, повышенной газоносности угля и пород, а также их прочности и структурной неоднородности. В статье выбросоопасность анализируется посредством исследований ширины мультифрактального спектра S . То есть, проиллюстрирована связь между мультифрактальными характеристиками структуры углей и их предрасположенностью к внезапным выбросам угля и газа.

В работе [12] также показано, что структурную организацию элементов поверхности углей можно представить мультифракталом с соответствующим ему спектром фрактальных размерностей, позволяющим установить количественные отличия в микроструктуре углей из выбросоопасных пластов. Угли из выбросоопасных пластов имеют больший набор структурных элементов и, следовательно, в 1.5–2.0 раза более широкий спектр соответствующих им фрактальных размерностей, чем угли из невыбросоопасных пластов. В работе введен критерий для оценки выбросоопасности углей – увеличение ширины мультифрактального спектра S до значения 1.5. Считается, что ширина спектра S отражает степень масштабной упорядоченности и нарушения симметрии для исследуемой структуры в целом. Возрастание значения этого параметра означает, что система накачивается информацией, и в ней возрастает степень нарушенной симметрии (наличие большого количества повреждений).

В работе [12] используется мультифрактальный параметр скрытой периодичности структуры (упорядоченности) множества $\Delta q = D_1 - D_q$. Чем больше его значение (по модулю), тем больше структура углей содержит в себе масштабных элементов.

На рис. 5 представлены мультифрактальные спектры $f(\alpha)$ термограмм показанных на рис. 3. Они отличаются друг от друга по ширине спектра, асимметрии и значению максимального размера фрактальной размерности в спектре (1.511, 1.058 и 1.377), которые можно охарактеризовать как персистентные и антиперсистентные значения фрактальной размерности и определяемые значением показателя Херста $H = 2 - D_0$. Мультифрактальный спектр на рис. 5а показывает квазислучайное ($D_0 \sim 1.5$, показатель Херста $H \sim 0.5$) распределение локальных изменений в деформациях. Количество фрактальных размерностей D_i показывает число масштабных элементов участвующих в процессе локализации деформации.

Мультифрактальный спектр на рис. 5а асимметричный, это означает неравенство вкладов масштабных факторов (больших и малых) в деформационное поле.

Мультифрактальный спектр на рис. 5б показывает, что пластические деформации занимают большую область исследуемого объекта. Количество масштабных факторов увеличивается, и выравнивается их влияние на данный процесс (спектр симметричный). Расположение локальных зон условно “гладкое”, фрактальный размер $D_0 = 1.058$. Ширина спектра S увеличена.

При увеличении нагрузки происходит дальнейшее перераспределение местных локальных деформаций. В момент разрушения (рис. 5в) изменяется влияние мелких и больших масштабных элементов (асимметрия спектра), а ширина спектра S несколько увеличивается.

Основные характеристики мультифрактальных спектров приведены в табл. 2, которые показывают, что при увеличении нагружения в стадии упрочнения и разрушения мультифрактальные спектры имеют характерные отличия, изменяются все характерные значения (ширина спектра S , асимметрия, число фрактальных размерностей, входящих в ветви спектра, Δq). Перед разрушением образца ширина спектра S увеличива-

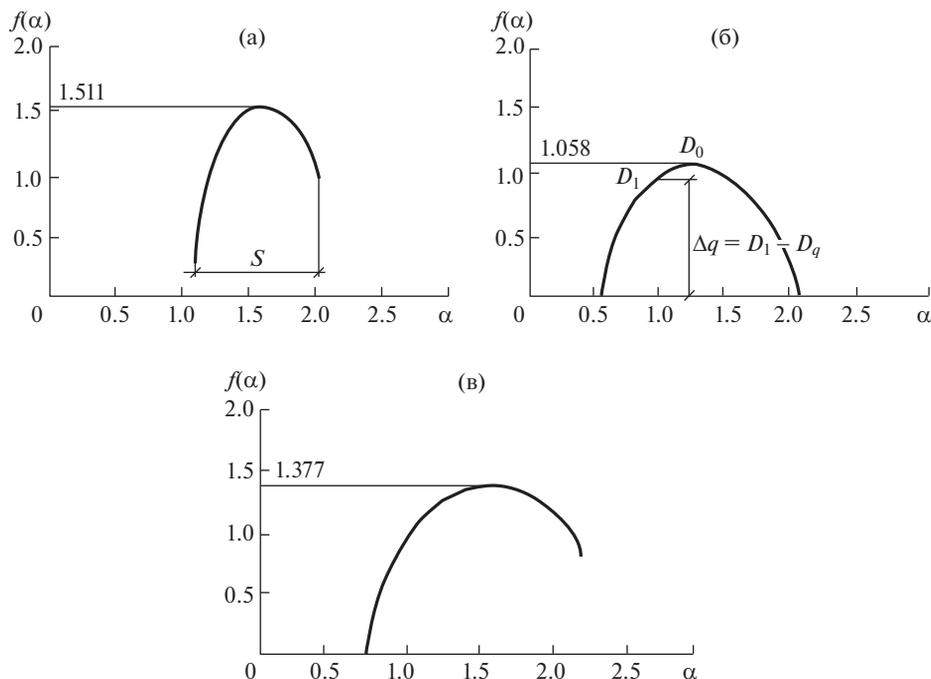


Рис. 5. Мультифрактальные спектры термограмм при общей деформации: (а) – ε_{1ij} ; (б) – ε_{2ij} ; (в) – ε_{3ij} .

ется выше значения 1.5 как и при изменении структуры углей при возникновении выбороопасности.

Для того чтобы определить в каких масштабных элементах происходят наибольшие изменения уровня локальных деформаций, рассмотрим кратно-масштабное дискретное вейвлет-разложение (КМА) выше указанных термограмм [13]. КМА позволяет разложить изображение в дерево с различными частотными изображениями (размер элементов изображения) и оценить их количественно по критерию энергии или энтропии.

Энергии составляющих можно определить исходя из существования для вейвлет-преобразования аналога теоремы Парсевала. Теорема Парсевала устанавливает равенство между энергией сигнала и энергией его спектра. Из теоремы следует, что в пространстве действительных функций полную энергию, например сигнала, можно запи-

Таблица 2. Характеристики мультифрактального спектра термограмм при различном уровне общей деформации

| Характеристики мультифрактального спектра | Уровень общей деформации, ε | | |
|--|---|-----------------|-----------------|
| | ε_1 | ε_2 | ε_3 |
| Фрактальный размер, D_0 | 1.511 | 1.058 | 1.377 |
| Ширина спектра, S | 1.05 | 1.48 | 1.55 |
| Показатель масштабной однородности распределения, Δq | 1.31 | 0.91 | 1.25 |

Таблица 3. Энергия составляющих КМА вейвлет-разложения

| Номер термограммы | Энергия составляющих КМА вейвлет-разложения, % | | | | | | |
|-------------------|--|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | D_{E11} | D_{E12} | D_{E13} | A_{E22} | D_{E21} | D_{E22} | D_{E23} |
| 1 | 0.01 | 0.02 | 0.0 | 99.87 | 0.02 | 0.08 | 0.0 |
| 2 | 0.06 | 0.09 | 0.0 | 99.17 | 0.26 | 0.37 | 0.4 |
| 3 | 0.05 | 0.08 | 0.0 | 99.35 | 0.23 | 0.24 | 0.4 |

сать через амплитуды (коэффициенты) вейвлет-преобразования, как представлено в работе [14].

В табл. 3 представлены результаты КМА-разложения (разложение 2-го порядка). КМА проводилась с помощью программы МАТЛАБ, использован ортогональный симлет. Использование других вейвлетов не привело к изменению результата распределений энергий по составляющим изображениям.

При КМА исходное изображение раскладывается на составляющие вейвлет-деревя: аппроксимирующее A_{E22} и детализирующие D_{Eij} . КМА показало, что наибольшие изменения в уровне энергии проявляются на малых масштабных элементах, которые образуют детализирующие изображения D_{Eij} . Если использовать частотную терминологию – высокочастотные составляющие. То есть это согласуется с появлением мелких масштабов при увеличении поврежденности материала (увеличении информации о структуре материала).

Вывод. Показана возможность применения теплового метода контроля для решения задачи анализа распределения локальных деформаций – упругих и пластических. Наличие термоупругого и термопластического эффекта позволяет контролировать конструкции в процессе эксплуатации и определить области с максимальными локальными деформациями (напряжениями), направление пластических деформаций.

Применение кластеризации термограмм позволяет визуально показать, как распределяется локальная деформация по нагруженному объекту контроля. При разном уровне нагружения возникают свои конфигурации локальных деформаций. По мере нагружения объекта контроля возникает новая конфигурация прочности образца по принципу Ле Шаталье–Брауна.

Мультифрактальные спектры отражают характерные особенности в распределении локальных деформаций, позволяют оценить интегральную характеристику масштабных факторов, влияющих на локальные изменения деформационного поля объекта контроля. А увеличение ширины мультифрактального спектра S можно трактовать как оценку поврежденности материала. А величина Δq показывает, сколько изучаемая структура поля локальных деформаций содержит масштабные зоны локализации деформации с индивидуальными фрактальными свойствами D_f .

КМА в дополнение к данным, полученным при анализе мультифрактальных спектров, показывает, что наибольшие энергетические изменения происходят на более мелких масштабах.

Использованные методы анализа локального распределения температуры, показывают, что можно получить косвенную информацию об особенностях распределения локальных деформаций и их изменений по мере нагружения объекта контроля. Точную оценку можно получить с помощью решения обратной задачи.

Полученные результаты можно использовать при создании методик оценки поврежденности деталей технических систем и вероятности достижения предельного состояния при неразрушающем тепловом контроле.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при финансовой поддержке по гранту РФФИ № 20-19-00769-П.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Гребеньков С.К., Скуднов В.А., Шацов А.А., Клейнер Л.М.* Деформационное упрочение низкоуглеродистых мартенситных сталей системы Cr–Mn–Ni–Mo–V–Nb // *Металлургия и материаловедение. Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева.* 2014. № 3. С. 228.
2. *Струнгарь Е.М.* Неупругое деформирование и разрушение слоисто-волоконистых полимерных композитов в зонах концентрации напряжений: Дисс. ... канд. техн. наук. Пермь: ПНИПУ, 2019. 172 с.
3. *Пантелеев И.А.* Деформирование горных пород и геосред: анализ развития анизотропной поврежденности и локализации деформации: Дисс. ... докт. физ.-мат. наук. Пермь: Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук, 2022. 365 с.
4. *Кенжалиев Б.К., Черноглазова Т.В., Мофа Н.Н., Дегтярева А.С., Курапов Г.Г., Сулейменов Э.Н.* Локализация пластической деформации и неравновесные структурно-деформационные превращения // *Избранные труды*, Алматы, 2004. 271 с.
5. *Robinson A.F., Dulieu-Barton J.M., Quinn S., Burguete R.L.* A Review of Residual Stress Analysis using Thermoelastic Techniques // *7th International Conference on Modern Practice in Stress and Vibration Analysis IOP Publishing. Journal of Physics: Conference Series.* 2009. V. 181 (1): 012029.
6. *Мойсейчик А.Е., Мойсейчик Е.А.* Основы теплового контроля несущих конструкций с использованием деформационного теплообразования // *Неразрушающий контроль и диагностика.* 2014. № 3. С. 3.
7. *Мойсейчик А.Е.* Исследование и разработка метода теплового неразрушающего контроля стальных конструкций на основе механизма деформационного теплообразования: Дисс. ... докт. техн. наук. Новосибирск: Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет, 2018. 377 с.
8. *Vanali M.* Algorithms for infrared image processing. Corso di Laurea in Ingegneria Meccanica. Facoltà di Ingegneria Industriale // *Politecnico Di Milano.* 2010–2011. 99 p.
9. *Поляркова Е.В.* Фрактальный анализ в диагностике структур материалов: методические указания. Оренбург: ОГУ, 2019. 47 с.
10. *Встовский Г.В.* Элементы информационной физики. М.: МГИУ, 2002. 260 с.
11. *Малинников В.А., Малинникова О.Н., Учаев Д.В. и др.* Мультифрактальный подход к обнаружению особенностей структуры углей выбросоопасных пластов по их цифровым изображениям // *Матеріали II міжнар. Конф. “Підземні катастрофи: моделі, прогноз, запобігання”*, 18–20 трав. 2011. Дніпропетровськ, 2011. С. 68.
12. <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-strukturnyh-osobennostey-ugley-vybrosopasnyh-plastov/viewer>
13. *Дьяконов В.П.* Вейвлеты. От теории к практике. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: СОЛОН-Пресс, 2010. 400 с.
14. *Астафьева Н.М.* Вейвлет-анализ: основы теории и примеры применения // *Успехи физических наук.* 1996. Т. 166. № 11. С. 1145.