

ФИЗИЧЕСКАЯ ПРИРОДА ПОВРЕЖДЕНИЙ МАТЕРИАЛОВ КОНСТРУКЦИЙ С ПОЗИЦИИ ФРАКТАЛЬНОГО ДЕТЕРМИНИЗМА

Пояркова Е.В.

Оренбургский государственный университет, г. Оренбург

В историческом аспекте еще в первой половине прошлого столетия изучением термофлуктуационного механизма зарождения разрушения занимались С.Н. Журков и созданная им научная школа, приверженцам которой удалось установить двухстадийность процесса разрушения гетерогенных тел. Доказано, что первая стадия характеризуется рассеянным множественным накоплением мелкомасштабных дефектов, а на второй формируются крупномасштабные очаги разрушения, обусловленные процессами кластеризации (коалесценция микропор, слияние первичных трещин и др.).

В дальнейшем к установлению закономерностей накопления дефектов (с позиции оценки поврежденности материалов) и изучению стадий предразрушения и разрушения разных типов хрупких и вязко-хрупких материалов стали привлекать теории скейлинга, вейвлетов и детерминированного хаоса, а также методы численного и конечно-элементного моделирования. Наиболее активно вейвлет-преобразования в своих научных исследованиях применяют такие ученые как М.М. Закирничная, Д.С. Солодовников, Д.В. Корнишин, М.И. Власов, П.В. Короленко, М.С. Маганова, А.В. Меснянкин. Моделированием процессов разрушения материалов, конструкций (в том числе и их сварных элементов) занимаются Р.Р. Балахонов, В.А. Романова, П.В. Макаров, С.В. Панин, Б.А. Люкшин, Н.Ю. Матолыгина, А.И. Савкин, С.С. Юцкевич и многие другие.

Наиболее обстоятельно проблеме понимания микроскопического образования трещин посвятили свои работы Н.А. Конева, Э.В. Козлов, В.А. Старенченко, Д.В. Лычагин, А.А. Шанявский, Л.И. Тришкина, В.С. Иванова, А.А. Батаев, Л.И. Тушинский, Е.Н. Миронов, А.И. Смирнов В.Е. Громов С.В. Коновалов, Ю.Ф. Иванов С.В. Воробьев, были вскрыты механизмы трещинообразования в различных материалах и их сварных соединениях. К примеру, Б.К. Броберг [1] предложил *«модель образования и распространения трещины по механизму раскрытия, роста и коалесценции микропор»*, ставшую базисом к построению объединенной структурной модели накопления повреждений и разрушения.

На современном этапе основательными, фундаментальными исследованиями эволюции структуры твердых тел, изучением деформационного рельефа поверхности материалов, конструкций и их сварных элементов в процессе деформирования и разрушения с привлечением новейших экспериментальных и расчетных средств диагностики и инструментария занимаются такие молодые российские ученые как Е.А. Ляпунова, Ю.Ф. Попкова, А.В. Чумаевский, О.А. Рудакова, Е.В. Маркова, Е.Ю. Приймак, Н.Ю. Трякина, Л.С. Диньмухаметова, С.В. Попова, А.А. и М.В. Демченко, Ю.С. Ковшова, А.С. Сильвестров, Ю.С.

Бахрачева и многие другие. При этом замечено смещение вектора науки в женскую его сторону.

К настоящему моменту наблюдается мировая тенденция активизации научных исследований, основанных на методах фрактальной диагностики и мультифрактальной параметризации (МФП), заключающихся «в разложении исследуемого множества со сложной статистикой на множества однородных фракталов с четко выраженной фрактальной размерностью» [2]. Вместе с тем, стало возможным получить нетривиальные результаты на самоподобных объектах, с выраженной фрактальной геометрией и не только, а для удобства обработки изображений разработаны программные продукты, самые известные из которых – это отечественные программы для ЭВМ MFRDrom (автор – Г.В. Встовский), FRACTAN 4.4 (автор – В.В. Сычев) и программный комплекс ImageJ, разработанный американским институтом National Institutes of Health при помощи плагина MapFractalCount, способный вычислять фракталы для 3-D топографии и по 2-D изображению рельефа в градациях серого. Созданы целые научные школы под руководством А.Г. Колмакова, И.Ж. Бунина, И.Р. Кузеева, Е.М. Гринберга, А.А. Оксогоева, И.В. Петраковой, О.Б. Бавыкина, А.А. Потапова, где метод МФП применяется не только на изображениях металлографических структур, но и на фрактограммах поверхностей разрушения и деформации реальных конструкционных материалов, а также двухоттенковых топографических карт распределения механических, физических свойств по поверхности исследуемого объекта.

В работе Марковой Е.В. [3] убедительно доказана информативность метода мультифрактальной параметризации применительно к оценке влияния термической обработки на процесс структурообразования литой коррозионно-стойкой стали 09X16H4БЛ. Метод МФП содействовал установлению количественной связи МФ-параметров однородности Δ_q и упорядоченности f_q структуры с управляющим параметром структурообразования Cr/Ni, размером аустенитного зерна и механическими характеристиками стали [3]. Полученные результаты имеют хорошую сходимость с экспериментальными данными Ю.С. Ковшовой [4-5], которая в своих трудах демонстрирует высокую взаимосвязь между МФ-характеристиками металла оболочковых конструкций и соотношением механических характеристик σ_T/σ_B , что дает возможность рассмотрения этой количественной взаимосвязи как фактора установления остаточного ресурса подобных металлических конструкций с заявленными геометрическими формами.

Также, в приложении к решениям производственных проблем особый интерес представляет работа А.С. Сильверстова [6], посвященная оценке ресурса безопасной эксплуатации технологических трубопроводов из стали 17Г1С с применением метода МФП. По МФ-параметрам однородности изображений структуры автору удалось показать возможность оценки критической температуры хрупкости исследуемого материала, как одного из определяющих критериев безопасной эксплуатации опасных производственных объектов. Вместе с тем, на основе метода мультифрактальной параметризации

автором предложен практический способ идентификации металла трубопровода, отработавшего расчетный ресурс.

Несколько ранее проблеме высокотемпературной эксплуатации паропроводов из стали 12Х1МФ (и ее аналогов), а также пароперегревателей из стали 12Х18Н10Т, имеющих сварные соединения, были посвящены работы Е.Ю. Приймак, Н.Ю. Трякиной, В.И. Грызунова, И.Р.Кузеева [7-10], в которых изложены результаты фрактального анализа адаптации структуры стали и поверхностных окислов к высокотемпературному окислению, а также дана комплексная оценка неоднородности сварных соединений разных структурных классов в состоянии эксплуатационного старения с позиции фрактального детерминизма.

Применительно к сварным соединениям фрактальная параметризация является одним из перспективных методов диагностики их материала (не только на поверхности, но и в локальном объеме), позволяющим устанавливать критические области накопленной повреждаемости и построить соответствующие структурно-статистические модели. В частности, в работе Е.А. Наумкина [11] установлена взаимосвязь между критическими значениями мультифрактальных параметров поверхности изломов стали со значениями градиента напряженности магнитного поля при накоплении усталостных повреждений. Также в указанной работе, автором определены значения степеней накопленной повреждаемости, демонстрирующих переходы металла из устойчивого состояния в неустойчивое. Показано, что для разных слоев металла возможно установить несколько периодов смены такого положения, т.е. каждый из слоев конкретного локального объема металла может иметь от одной до нескольких точек бифуркаций. Отмечено, что для приповерхностной зоны переход из устойчивого состояния в неустойчивое наступает при уровнях накопленных повреждений $N_i/N_p = 0,07; 0,56; 0,77$, для промежуточной зоны – при $N_i/N_p = 0,49$; а для центральной зоны – при $N_i/N_p = 0,28; 0,98$.

В продолжении направления исследований структурно-механической неоднородности неразъемных элементов конструкций, полученных сваркой, О.А. Рудакова в [12] разработала *«метод экспертной оценки свойств сварных соединений сталей феррито-перлитного класса на основе взаимосвязи между свойствами металла сварного шва и участка перегрева зоны термического влияния и фрактальными характеристиками структурного состава»* [12].

Статистически обработав массив данных, О.А. Рудакова смогла получить экспериментальные зависимости между критическими температурами хрупкости металлов сварных швов неразъемных соединений из стали Ст.3, а также из высокопрочной стали феррито-перлитного класса марки 10Г2ФБЮ и величинами фрактальной размерности их структур. При этом замечена аналогия в результатах ее научных разработок по сравнению с исследованием А.С. Сильверстова [6].

Установленные в [12] взаимосвязи между МФ-характеристиками структуры участка перегрева зоны термического влияния сварного соединения стали 10ГФБЮ представлены на диаграммах «фрактальная размерность – упорядоченность» и «однородность – упорядоченность» в виде «области

благоприятных структур», которым соответствует минимальный уровень ударной вязкости не ниже 130 Дж/см^2 , что является необходимым требованием для предупреждения протяженных вязких разрушений на трубопроводах, транспортирующих нефтегазовые среды.

В работе Л.М. Семеновой, Ю.С. Бахрачевой, С.В. Семенова [13] показана возможность установления методом фрактального формализма иерархии самоорганизованных структур, получаемых при термоциклической обработке стали 25ХГТ на различных масштабных уровнях. Установлено, что наблюдаемые на разных масштабах структуры, характеризующиеся наличием свойства инвариантности своего строения, представляют собой конструктивные элементы одного и того же фрактального объекта.

Согласно утверждениям В.С. Ивановой с ее учениками [14-16], изменения в системе определенных условий (управляющих факторов) провоцируют образование качественно новых структур в макроскопическом масштабе, способных пребывать в различных состояниях, устойчивость которых поддерживается непрерывным притоком вещества или энергии в систему. Эффекты таких состояний заключаются в развитии неустойчивости разных масштабов, обусловленной конкуренцией стабилизирующих и возмущающих вложений, вследствие чего система получает крупно-масштабные корреляции за счет возникающей самоорганизации и обретает неоднородное распределение свойств и структурно-чувствительных параметров. Таким образом, в работе [17] показано, что процессы обретения системами неоднородностей приводят к их самоподобию и могут распространяться на другие масштабы, обуславливающие появление у систем принципиально новых свойств.

Список литературы

1. Броберг, К. Б. Ударные волны в упругой и упругопластической среде / К. Б. Броберг. – М.: Мир. – 1959. – 115 с.
2. Лепов, В.В. Структурные модели процессов накопления повреждений и трещиностойкость конструкционных материалов / В.В. Лепов : Дисс. ...д-ра техн. наук. – Якутск : СИ ИФТПС. – 2006. – 312 с.
3. Маркова, Е.В. Совершенствование термической обработки прецизионных деталей на основе закономерностей структурообразования стали 09Х16Н4БЛ : автореферат дис. ... канд. техн. наук : 05.16.01 / Е.В. Маркова. – Москва : ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П. Бардина». – 2013. – 24 с.
4. Ковшова, Ю.С. Остаточный ресурс оболочковых конструкций/ Ю.С. Ковшова// Нефтегазовое дело: электрон. науч. журнал. – 2013. – №3. – С. 298-311. URL: http://ogbus.ru/authors/KovshovaJuS/KovshovaJuS_1.pdf
5. Ковшова, Ю.С. Влияние квазистатических режимов нагружения на прочность сосудов, работающих под давлением/ Ю.С. Ковшова, И.Р. Кузеев, Е.А. Наумкин, Н.А. Махутов, М.М. Гаденин // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2014. – Том 80. – № 9. – С. 50-55.
6. Сильверстов, А.С. Оценка ресурса безопасной эксплуатации технологических трубопроводов методом мультифрактальной параметризации : автореферат

дис. ... канд техн. наук : 05.26.03 / А.С. Сильверстов. – Казань : КНИТУ. – 2013. – 20 с.

7. Трякина, Н.Ю. Анализ деградации структуры и механических свойств стали 12Х18Н10Т в процессе длительной эксплуатации / Н.Ю. Трякина, Е.В. Пояркова, В.И. Грызунов // *Металловедение и термическая обработка металлов*. – 2009. – № 9 (651). – С. 11-15.

8. Tryakina, N.Yu. Analysis of degradation of structure and mechanical properties of chromium-nickel steel 12KH18N10T in long-term operation / N.Yu. Tryakina, E.V. Poyarkova, V.I.Gryzunov // *Metal Science and Heat Treatment*. – 2009. – Т. 51. – № 9-10. – С. 419-422.

9. Кузеев, И.Р. Анализ изменения структурно-фазового состава теплоустойчивых сталей системы легирования Cr-Mo-V высокотемпературного оборудования в процессе длительной эксплуатации / И.Р. Кузеев, Е.В. Пояркова, Н.Ю. Трякина // «Известия ВУЗов. Проблемы энергетики», Казань. Изд-во: КГЭУ, – 2011. – № 7-8. – С. 21-29

10. Грызунов, В.И. Комплексная оценка структурно-механического состояния металла высокотемпературных элементов теплоэнергетического оборудования из стали 12Х1МФ на стадии предразрушения / В.И. Грызунов, Е.В. Пояркова, Е.Ю. Приймак // «Известия ВУЗов. Проблемы энергетики» – Казань. Изд-во: КГЭУ, – 2011. – № 3-4. – С. 99-105.

11. Наумкин, Е.А. Методология прогнозирования ресурса нефтегазового оборудования, эксплуатируемого в условиях циклического нагружения, на стадии проектирования и эксплуатации / Е.А. Наумкин : Дисс. ... д-ра техн. наук : 05.02.13. – Уфа: УГНТУ. – 2011. – 210 с.

12. Рудакова, О.А. Методы экспертной оценки свойств сварных соединений сталей феррито-перлитного класса на основе фрактального анализа структурного состава / О.А. Рудакова : Автореферат дис...канд. техн. наук. – Пермь. – 2011. – 18 с.

13. Семенова, Л.М. О самоподобии структур, формирующихся при термоциклическом воздействии / Л.М. Семенова, Ю.С. Бахрачева, С.В. Семенов // *Вестник ВолГУ*. – 2011. – Серия 10. – Вып. 5. – С.90-95

14. Иванова, В.С. Синергетика и фракталы в материаловедении / В.С. Иванова, А.С. Баланкин, И.Ж. Бунин и др. – М.: Наука. – 1994. – 382 с.

15. Иванова, В.С. Фрактальная параметризация структур в радиационном материаловедении / В.С. Иванова, Г.В. Встовский, А.Г. Колмаков, В.Н. Пименов. – М.: «Интерконтакт Наука». – 1999. – 49 с.

16. Иванова, В.С. О связи стадийности процессов пластической деформации с фрактальной структурой, отвечающей смене масштабного уровня деформации / В.С. Иванова, А.А. Оксогоев // *Физическая мезомеханика*. – 2006. – Т.9. – № 6. – С. 17-27

17. Пояркова, Е.В. Эволюция структурно-механической неоднородности материалов сварных элементов конструкций в рамках концепции иерархического согласования масштабов / Е.В. Пояркова: Дисс. ... д-ра. техн. наук : 05.16.09 / Е.В. Пояркова. – Уфа : ФГБОУ ВПО УГНТУ. – 2015. – 392 с.