

КЛАСТЕРНЫЙ ПОДХОД К ИССЛЕДОВАНИЮ ИЕРАРХИЧНОСТИ СТРУКТУРЫ МАТЕРИАЛОВ КОНСТРУКЦИЙ

Пояркова Е.В.

Оренбургский государственный университет, г. Оренбург

Как известно, различные виды и типы неоднородности характерны практически для всех классических конструкционных материалов, применяемых в нефтегазовой отрасли; при этом наиболее неоднозначной, с позиции обеспечения в таких конструкциях технологической и экологической безопасности, выступает присущая сварным соединениям из углеродистых легированных сталей структурно-механическая неоднородность, вызванная, прежде всего, многокомпонентностью их химического состава, а также наличием дефектов в структуре различной этимологии и происхождения, максимальный размер которых может быть сравним с размерами исследуемого локального объема материала.

Согласно суждениям Ю.В. Баяндина, О.А. Плехова, И.А. Пантелеева, Т.А. Паламарчука, А.А. Яланского, Н.Т. Бобро, В.П. Куринного, разделяющим позицию М.А. Садовского, В.Ф. Писаренко, В.Н. Родионова, а также мнение С.А. Лисиной, Г.А. Уткина и А.И. Потапова, для всех твердых материалов (независимо от их принадлежности к группам металлов или неметаллов) характерен один «тождественный» признак, обуславливающий в отдельных фрагментах этих материалов наличие иерархической последовательности топографического распределения структурно-механической неоднородности на разных масштабных уровнях, которая, как правило, не связана с физико-химическими свойствами исследуемого материала при первом приближении.

Ретроспективно рассмотрением деформируемого твердого материала в рамках открытой системы элементов, находящихся в определенном энергетическом состоянии, способном к изменениям от стабильности до неустойчивости, занимались такие отечественные корифеи, как В.С. Иванова, В.Е. Панин, А.А. Батаев, Л.И. Тушинский, А.А. Шанявский, В.В. Лепов и многие их коллеги и последователи. Разделяя позицию перечисленных авторов в этом вопросе, можно констатировать, что при подведении извне к рассматриваемой системе энергии, возможно обнаружение взаимодействий отдельных её компонентов, приводящих к изменениям не только своих свойств, но и свойств всей системы в целом.

Предположительно, при сохранении подобия характера изменения свойств, приводящего систему в неустойчивое положение, на всех масштабных уровнях, возможно получение некоторого аргументированного объяснения возникновения дискретной иерархии размеров наличием такого подобия. В соответствии с [1, 2], в процессе деформирования твердых тел появляется иерархическая дискретность преимущественных размеров фрагментов, а их образование сопровождается возникновением дискретных промежутков времени, в течение которых при деформировании материала происходит переход системы из неустойчивого состояния в устойчивое [2].

На современном этапе в мезомеханике принято использовать некие математические модели (ММ), построение которых учитывает не только классические методы математического анализа, евклидову геометрию, но и механику сплошной среды. Использование подобных моделей позволяет описывать поведение материала и его сварных соединений при малых деформациях методами теорий пластичности, ползучести и/или методами наследственно-упругой среды. Вместе с тем, основные допущения, используемые в математических моделях, следующие:

- металл сварного соединения представляет собой сплошную среду;
- функции, описывающие поведение среды, являются «непрерывными и достаточно гладкими».

Учитывая абстрактную формализацию вышесказанного, возможно использование в ММ мощного математического аппарата – теории дифференциальных уравнений в частных производных. И тем не менее, в механике существуют тенденции, показывающие направление ее дальнейшего развития, связанное, по мнению [3], с введением таких нетрадиционных математических объектов как:

- фрактальные множества и детерминированный хаос;
- геометрические вероятности и стереологические структуры;
- недифференцируемые и сингулярные функции;
- полиэдры Вороного-Дирихле и самоподобные случайные мозаики.

В научной работе С.А. Лисиной [4] рассмотрены сформированные к настоящему времени подходы к построению ММ сред, отражающих внутреннее взаимодействие элементов структуры, описания которых представлены в таблице 1.

В материаловедении самоподобные структуры появляются вследствие протекания структурно-физических и механических процессов в металле сварного соединения, в результате которых возникают иерархии неоднородностей, изменчивости строения, трещинообразования и блочности материалов на различных масштабных уровнях. В зависимости от интенсивности напряжений воздействия на самоподобные по структуре материалы возникает избирательный механизм включения в работу соответствующих неоднородностей и дефектов.

Анализ ситуаций наличия у объекта исследования границ раздела, на которых свойства материала и его напряженное состояние претерпевают существенные изменения, показал, что применение в этих случаях для данного объема метода усреднения весьма нерационально. Ввиду возможного проявления дискретности материалов на разных структурно-масштабных уровнях, накладываются ограничения в применении метода структурно-неоднородных сред, тем самым затрудняя достоверно оценивать их напряженно-деформированное состояние (НДС). Тем не менее, наличие автомодельности (самоподобия) у металлических материалов (а также сварных соединений, полученных из этих материалов) доказывает подчинение их дискретного строения принципам иерархичности, а это, в свою очередь, делает возможным сопоставление между собой разнородных свойств и процессов,

нахождение методов их моделирования, особенно при смене масштабных уровней.

Таблица 1 – Основные типы подходов к построению математических моделей сред

Основы подхода	Подходы	
	Континуальный	Структурно-феноменологический (модельный)
Базис	Обобщение континуальной модели среды, принимая во внимание понятие представительного объема среды и учитывая внутренние степени свободы – микроповороты и аффинные деформации мезообъема	Теория кристаллической решетки и физика твердого тела
Отмеченные ученые	Е. и Ф. Коссер, Э.Л. Аэро, Е.В. Кувшинский, Р. Миндлин, К. Эринген, Л.И.Седов, В.А.Пальмов, В. Новацкий, А.И. Потапов, А.Н. Булыгин	И. Кунин, Е. Кренер, А.Аскара, Ж.Пуже, Ж.Можен, Л.И. Маневич, Э.Л.Аэро, А.Н. Булыгин, А.И. Потапов, И.С. Павлов, А.А. Васильев, А.Е. Мирошниченко
Достоинства	Универсальность построения как линейных, так и нелинейных моделей сред	Прозрачность связи структуры с макропараметрами среды и возможность целенаправленного проектирования сред с заданными свойствами
Недостатки	Большое число материальных констант, требующих экспериментального определения. Отсутствие связи указанных констант с внутренней структурой материала	Дефицит тотальной «многоохватности» в построении математических моделей. Затруднения учета нелинейности и нелокальности связей

В механике твердого тела важную роль играют понятия подобия механических явлений, самоподобия процессов деформирования и разрушения и масштабный фактор прочности, которые рассматриваются достаточно подробно в своем историческом развитии как составная часть приложения фрактальных представлений в науке о материалах.

Дискретные и самоподобные структуры характерны также для стальных сварных соединений. Явления статистического подобия распределений наблюдается не только при статическом, но и при динамическом разрушении материалов и являются также характерными при изучении размеров частиц на

микроструктурном масштабном уровне. Намеченные направления построения моделей трещинообразования в сварных металлических материалах должны базироваться на разработках А.Н. Колмогорова, учитывать фрактальное самоподобие их структур в локализованных участках на разных масштабах диагностики и иметь однозначную связь с многогранниками Вороного-Дирихле, построенными по узлам кристаллической решетки металла.

Однако, до сих пор не систематизированы и не упорядочены научные труды и публикации по тематике фрактальной геометрии, с помощью которой возможно описание всех существующих (или определенного количества) материалов и природных явлений. В рамках этой предметной области необходимо продолжение и активизация процесса накопления общих идей, концепций и подходов, особенно в отношении геометрии, так называемого порового пространства в материалах и их сварных соединениях. Авторы работ [3, 5, 6] экспериментально доказали, что фрактальные размерности порового пространства некоторых материалов и их сварных соединений, могут быть использованы для описания сложно организованных, т.е. сильно неоднородных элементов металлических материалов.

Представленный в [2] анализ фрактальных подходов в механике хрупкого разрушения показывает, что с помощью решеточных, связных и стержневых схем, основанных на простых физических представлениях, можно решить широкий круг практических задач без учета конкретной структуры материала [7, 8]. Описание системы в целом с помощью усложненных модельных представлений (накопления повреждений, кинетики структурных изменений и др.) не учитывает топологии разрушенной области, обусловленной распределением параметров системы различного масштабного уровня. Поэтому объединение классических постановок задач для материалов с развитой дефектной структурой и фрактальных подходов позволит учесть многоуровневый и масштабный характер деформирования и разрушения элементарных связей. В рамках фрактальных представлений процесс накопления рассеянной разномасштабной повреждаемости рассматривается как экспоненциальный процесс самоподобного фрактального кластера до такой границы, когда начинается его лавинообразное протекание – начало макроразрушения. Поверхность излома или трещины, сформированная в процессе разрушения материалов (в превалирующем большинстве – хрупких) обладает *«неровностями самых различных масштабов»* [9], что приводит к ряду механических эффектов, наблюдаемых экспериментально. Согласно [2], процесс разрушения с фрактальными трещинами сопровождается каскадным переносом высвобожденной упругой энергии с больших масштабов на меньшие и, наконец, на микромасштаб, где происходит диссипация энергии и расходование ее на образование новой поверхности разрыва. В общем случае представляется рассмотрение процесса разрушения как мультифрактального, т.к. при переходе с одного масштабного уровня дефектности на другой фрактальная размерность будет изменяться в связи с изменением микронапряжений в различных структурных областях [2].

Фрактальный подход позволяет с других позиций интерпретировать масштабный эффект механической неоднородности в сварных соединениях, причина которого связана с механизмом разрушения, структурно-масштабными характеристиками материала и геометрией дефектных множеств. Т.А. Паламарчук с коллегами сумели обнаружить [2, 6, 10] непосредственную связь между коэффициентом неоднородности материала, геометрико-вероятностными характеристиками дефектного множества и его фрактальной размерностью. В связи с этим, использование фрактальных идей оказывается перспективным при компьютерном моделировании роста трещинообразования в материале сварного соединения.

Весьма показательны представленные в работе [11] результаты моделирования напряженно-деформированного состояния (НДС) методом конечных элементов (использован коммерческий код ABAQUS) для поликристаллов Al1100, содержащего (концепция автора) не менее 280 зерен. Специально разработанный расчетно-графический комплекс для исследования механического поведения трехмерных структур в условиях динамического нагружения включал в себя 3 модуля: генерации 3D-структуры; задания граничных и начальных условий нагружения; визуализации и анализа результатов численного эксперимента [11].

Смена материала в модельном эксперименте показала слабое влияние размера зерна на топографию распределения напряжений и деформаций на мезоуровне. Однако, общие тенденции в результатах все же имелись:

- установлены идентичность зарождения и локализации первых пластических сдвигов независимо от уровня внешней нагрузки;
- показана зависимость зарождения пластических сдвигов вблизи межзеренных границ, выходящих на поверхность, а также в окрестности тройных стыков зерен от повышения уровня локальных напряжений в приграничных областях более чем на 10%;
- отмечено постоянство средних уровней напряжений и деформаций в поверхностных и внутренних сечениях модельных образцов на упругой стадии их нагружения;
- определена специфическая роль поверхности в начальной стадии пластического течения.

По мнению [12], самой сложной задачей при моделировании микропластических деформаций является подбор корректной структуризации нелинейных систем на основе принципа идентификации неразличимости состояния (принцип Лейбница). В рамках рассматриваемой проблемы этот принцип имеет следующую формулировку: *«деформационные дефекты, определяющие один структурный уровень, в своем развитии и взаимодействии должны обладать настолько похожими свойствами, чтобы быть неразличимыми при аналитической обработке»*. Согласно этому принципу, иерархическую структуру мезоуровня можно представить входящими в нее структурными уровнями.

В рамках концепции формализации модели деформируемого поликристаллического материала с позиции мезомеханики, можно допустить

представление материала в виде множеств U и R (его структурные уровни и связи (отношения) между ними). Авторы [12] предлагают в представительском объеме производить разделение пары множеств U и R на подсистемы низших уровней, с условием соподчинения мезодефектов каждого следующего уровня системе предыдущего уровня. Тогда распределить мезодефекты по уровням можно в виде системы вложенных множеств:

$$U_j(R_j) \rightarrow U_{j+1}(R_{j+1}) \rightarrow U_{j+2}(R_{j+2}) \rightarrow SS.$$

Априори, деформируемый поликристаллический материал может выступать в качестве диссипативной самоорганизующейся системы, в которой из-за поступающего в нее потока и распространяющегося в ней, активизируются новые структуры через диссипацию (рассеяние).

Также В.В. Рыбин [13] показывает, что деформируемый поликристаллический материал выступает в качестве «информационной системы», обладающей в результате различных взаимодействий следующими качествами:

- способностью к сохранению информации;
- возможностью образования новой сложной системы, способной к возникновению в ней новых информационных качеств, отсутствующих в исходных системах.

Поэтому В.В. Осташев с коллегами [12] назвали такое взаимодействие между деформационными дефектами «информационным», при котором у одного из «участников» происходит накопление информации, а у другого отсутствует ее потеря. Таким образом, информационные взаимодействия несимметричны, что вызывает необходимость выделить связанную и переданную информации.

Под *связанной (структурной) информацией* $C(S)$ на каждом структурном уровне понимается совокупность статистических данных о состоянии мезодефектов. Связанную информацию можно представить в виде меры структурной сложности материала при деформации [12]:

$$C(S) = -(f_1 \lg f_1 + f_2 \lg f_2 + f_n \lg f_n) = - \sum f_k \lg f_k,$$

где f_k – параметры частотного распределения моды деформации для мезодефектов расчетного структурного уровня.

Переданная деформация $I(S)$ является отображением структурной информации $C(S)$ на нижнем уровне на структуру более высокого иерархического уровня. $I(S)$ распознается в виде условной информации [418]:

$$I(S) = - [\sum f_k(\varepsilon) \lg f_k(\varepsilon) - \sum f_{k\omega}(\varepsilon) \lg f_{k\omega}(\varepsilon) - \sum f_{k\gamma}(\varepsilon) \lg f_{k\gamma}(\varepsilon)],$$

здесь $\sum f_k(\varepsilon) \lg f_k(\varepsilon)$ – связанная информация на расчетном структурном уровне;

$\sum f_{k\omega}(\varepsilon) \lg f_{k\omega}(\varepsilon), \sum f_{k\gamma}(\varepsilon) \times \lg f_{k\gamma}(\varepsilon)$ – условная информация,

определяемая линейной пластической деформацией, и зависящая от реализации сдвигового и поворотных механизмов деформации.

Заимствованное понятие диссипативной самоорганизующейся системы представляет собой отражение самих результатов самоорганизации, а универсальность этого синергетического понятия заключается в возможности замены геометрических характеристик системы их информационно-числовыми аналогами [14]. Поэтому на современном этапе термины мезомеханики, материаловедения и принципы синергетики позволяют создавать единые системы формализации моделей пластической деформации поликристаллов на различных масштабных уровнях [14-16].

Список литературы

1. Пантелеев, И.А. Масштабно-инвариантные закономерности разрушения горных пород и развитие сейсмических событий : автореферат дис. ... канд. физ.-мат. наук : 01.02.04 / И.А. Пантелеев. – Пермь : Институт механики сплошных сред УрО РАН. – 2010. – 18 с.
2. Паламарчук, Т.А. Кластерно-иерархическая структура, как проявление масштабного эффекта прочности геомеханических систем / Паламарчук Т.А., Яланский А.А., Бобро Н.Т., Куринной В.П. // Геотехническая механика. – Днепрпетровск: ИГТМ НАН Украины. – 2012. – Вып. 107. – С. 189 - 193.
3. Булат, А.Ф. Фракталы в геомеханике / А.Ф. Булат, В.И. Дырда. – К.: Наук. думка. – 2005. – 357 с.
4. Лисина, С.А. Континуальные и структурно-феноменологические модели в механике сред с микроструктурой : автореферат дис. ... канд. физ.-мат. наук : 01.02.04 / С.А. Лисина. – Н.Новгород : НГУ им. Н.И. Лобачевского. – 2009. – 18 с.
5. Дырда, В.И. Фрактальный анализ в механике разрушения твердых тел / В.И. Дырда, Г.Т. Рубец, Г.Н. Агальцов [и др.] // Геотехническая механика: межвед. сб. научн. тр. – Днепрпетровск : ИГТМ НАН Украины. – 2005. – Вып.58. – С. 132 – 136.
6. Паламарчук, Т.А. Кластерно-иерархические структуры в массиве горных пород как одна из форм самоорганизации породного массива / Т.А. Паламарчук, Б.М. Усаченко, С.И. Скипочка, А.А. Яланский // Геотехническая механика: межвед. сб. научн. тр. – Днепрпетровск : ИГТМ НАН Украины. – 2009. – Вып. 83. – С. 91–104.
7. Гаврилов, А.А. Прочность и жесткость тонкостенных стержней при изгибных колебаниях / А.А. Гаврилов, Н.А. Морозов // Вестник Оренбургского государственного университета. - 2012. - №4. - С. 253 - 257.
8. Гаврилов, А.А. Расчет прочности тонкостенных стержней при изгибных колебаниях с помощью фиктивных нагрузок / А.А. Гаврилов, Н.А. Морозов, Ю.Л.

- Власов // Вестник Оренбургского государственного университета. - 2014. - № 1. - С. 167 - 170.
9. Мосолов, А.Б. Фрактальный J-интеграл в разрушении / А.Б. Мосолов // Письма в ЖТФ. – 1991. – том 17. – вып. 19. – С. 45-50.
10. Скипочка, С.И. К вопросу определения критических уровней потери устойчивости композитных материалов / С.И. Скипочка, Т.А. Паламарчук, Н.Т. Бобро, В.П. Куринной // Геотехническая механика: Межвед. сб. науч. тр. – Днепропетровск: ИГТМ НАНУ. –2013. – Вып. 109. – С. 15-25.
11. Романова, В.А. Моделирование процессов деформации и разрушения в трехмерных структурно-неоднородных материалах : дис. ... док-ра физ. -мат. наук : 01.02.04 / В.А. Романова. – Томск: ИФПМ СО РАН, 2008. – 298 с.
12. Осташев, В.В. Формализация моделей деформируемого поликристаллического материала в терминах мезомеханики / В.В. Осташев, О.Д. Шевченко // Журнал технической физики. – 2002. – Том 72. – вып. 4. – С. 41-45.
13. Рыбин, В.В. Особенности строения разориентированных структур в бислойной пластине медь-медь, полученной сваркой взрывом / В.В. рыбин, Э.А. Ушановаа, Н.Ю. Золотаревский // Журнал технической физики. – 2013. – том 83. – вып. 9. – С 63-72
14. 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.
15. Пояркова, Е.В. Макромасштабные уровни диагностики механического состояния металла высокотемпературных трубопроводов / Е.В. Пояркова, И.Р. Кузеев // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». – 2015. – № 4. – С. 283-312.
16. Пояркова, Е.В. Структурно-масштабные закономерности накопления повреждений высокотемпературного оборудования : монография / Е.В. Пояркова. – М : Флинта, Наука. – 2015. – 120 с.