

ОЦЕНКА ДЕФЕКТНОСТИ МАТЕРИАЛА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ НА РАЗНЫХ МАСШТАБНЫХ УРОВНЯХ

Пояркова Е.В.

Оренбургский государственный университет, г. Оренбург

В работе [1] особенность образования несплошностей в материале связана со структурной неоднородностью материала, особенно с неоднородностью пространственного распределения дефектов, образующих кластеры, скопления, коалесценции микропор и другие комбинации несовершенств, называемую поврежденностью.

Априори, лингвистика понятия «поврежденности» устанавливает некие ассоциации *«с отклонениями от того, что было, в худшую сторону»*. Применяя указанную терминологию к материалам, поврежденность – есть мера снижения/увеличения их сопротивления (разупрочнение/упрочнение). Поэтому, в обобщении понятия поврежденности ко всем материалам, весьма затруднены предсказания влияния накопления повреждений на изменения их механических свойств.

Вместе с тем Ю.В. Петров, А.А. Груздков, В.А. Братов [2] устанавливают понятие максимального (критического) накопления поврежденности (разрушения) на конкретном масштабном уровне в виде образования дефекта с характерным линейным размером d , а стадию предразрушения в виде появления дефектов меньшего размера. Согласно [2], характерный линейный размер d может быть определен соотношением данных по квазистатическому разрыву «бездефектных» образцов и образцов с концентраторами напряжений (трещинами): $d \sim K_{Ic}^2 / \sigma_c^2$, однако авторы указывают на некорректность

соотношения прочности и трещиностойкости, взятых из испытаний на заведомо разных масштабах. Тем не менее, установлено соответствие характерного линейного размера разрушения d некоторому значению критического напряжения σ_c (статический предел прочности) и времени протекания подготовительных процессов τ (инкубационное время). Параметры (σ , K_{Ic} , τ) представляют собой характеристики прочности на данном масштабном уровне. При этом необходимо учитывать, что в процессе разрушения участвует упругая энергия, запасенная в локальные области, размеры которой не превосходят $D = \tau \cdot c$ (c – скорость упругой волны), а определение прочностных характеристик данного масштабного уровня корректно выполнять на образцах, размеры которых удовлетворяют неравенству $d \leq L \leq D$ [2].

Стало быть, масштабному уровню разрушения соответствует не один, а два линейных размера – верхний и нижний, т.е. проявляется иерархия масштабных уровней разрушения. Предполагается соответствие верхней границы масштабного уровня нижней границе следующего уровня, а уровневая иерархия представляется в виде:

$$\dots d_{i-1} < D_{i-1} = d_i < D_i = d_{i+1} < D_{i+1} < \dots$$

При этом для сварного соединения необходимо составить систему таких иерархических уравнений для каждой из всех характерных локальных зон. Таким образом, для однородных сварных соединений указанных выражений будет 3 (по числу характерных участков – основной металл, зона термического влияния и металл сварного шва), а для разнородных – 5 (здесь увеличение количества выражений происходит за счет учета второго основного металла и прилегающей к нему зоны). При необходимости количество подобных уравнений может быть увеличено на число исследуемых локальных участков сварного соединения, обладающих выраженной структурно-механической неоднородностью по отношению к соседним. При этом связь между различными масштабными уровнями сварного соединения осуществляется через инкубационное время, определяемое сопоставлением данных квазистатических испытаний, соответствующих различным масштабным уровням либо всего сварного элемента $\tau_i = \frac{D_i}{\epsilon} = \frac{d_{i+1}}{\epsilon}$, либо его локальным участкам, заключенным в систему уравнений.

Следовательно, *«по данным квазистатических испытаний, проведенных на различных масштабных уровнях, можно предсказывать результаты динамических испытаний и, наоборот, по данным динамических испытаний предсказывать прочностные характеристики следующего масштабного уровня»* [2].

Согласно [1], под мерой поврежденности принимается плотность объемных или поверхностных дефектов в локальном объеме металла (например, в конкретной характерной области сварного соединения):

$$\omega_V = n_V r^2 \quad \text{или} \quad \omega_F = n_F r^2,$$

где n_V (n_F) – численное значение объемных (поверхностных) дефектов, приходящихся на единицу объема (площади поверхности) тела;

r – средневзвешенное значение радиуса дефекта.

Обладая подобными количественными характеристиками локального объема, можно установить среднее расстояние между объемными дефектами l и среднюю близость дефектов a :

$$l = 1/\sqrt[3]{n_V} \quad \text{и} \quad a = 1/2r = 1/2\sqrt[3]{\omega_V}.$$

Учитывать влияние вида напряженного состояния в [1] предложено с помощью коэффициента пропорциональности:

$$\lambda = \eta \frac{1+\beta B}{1-B},$$

где η , β – постоянные, установленные из испытаний материалов конкретным видом нагружения;

B – отношение среднего нормального напряжения к наибольшему (по абсолютной величине при данном виде напряженного состояния) [1].

Таким образом, показана возможность установления влияния вида напряженного состояния на максимум плотности дефектов, обуславливающим неизбежность разрушения. При этом средствами физического анализа могут быть механические испытания, оптическая и электронная микроскопия, метод рассеяния рентгеновских лучей под малыми углами и другие [3]. В работе [1] обозначены различия в оценке степени поврежденности одного и того же материала, установленной различными способами ее индикации, в связи с чем необходимо физически обосновывать методы и инструментарий оценки поврежденности материала на разных структурно-масштабных уровнях.

В статье В.Е. и Л.Е. Паниных [4] показано, что *«все типы дефектов в кристаллах следует рассматривать как локальные метастабильные структуры, возникающие в зонах концентраторов напряжений различного масштаба»*. Авторами установлено, что *«деформируемый кристалл непрерывно испытывает изменение своей исходной кристаллической структуры, формируя на различных мезомасштабных уровнях диссипативные субструктуры»*, выполняющие функцию, адаптации пластического течения кристалла в вихревом механическом поле [5].

Как известно, все промышленные металлические материалы, в отличие от модельных материалов имеют достаточно сложную и неоднородную дефектную структуру. В рамках этого утверждения стали, используемые для сварных конструкций, а также материалы, применяемые в нефтегазовой отрасли, имеют реальную структуру, обладающую явными отличиями от идеальной по причине наличия разнообразных дефектов, неметаллических включений и/или упрочняющих частиц [3, 6, 7]. Все дефекты, так или иначе, влияют на свойства материалов, а иногда их влияние становится определяющим [6-8]. Поэтому остро встает вопрос теоретического объяснения и предсказания макроскопического поведения таких включений в объеме материала при нагружении. Детальное понимание механизмов деформации и разрушения на мезоуровне возможно только с учетом внутренней структуры таких включений и границ раздела. Тогда эффективным инструментом исследования в дополнение к традиционным экспериментальным методам становится численное моделирование.

В результате модельного эксперимента, суть которого изложена в работах [9, 10], выявлено существенное влияние на величину концентрации напряжений вблизи границы раздела геометрической формы частиц, *«чем сильнее неровность поверхности, тем выше величина напряжений»* [10]. То есть наличие незначительных неровностей обуславливает существенное возрастание

величины локальных напряжений. Наличие в локальном объеме материала частиц сферической формы провоцирует некоторое опережение пластического течения в матрице зарождению трещин, что в свою очередь приводит к несущественному изменению напряженно-деформированного состояния во включениях.

Релаксация напряжений, причем весьма незначительная, выявляется лишь в областях частиц, являющихся приграничными и прилегающими к пластически деформированному материалу матрицы. Тем не менее, данный факт указывает на видимое отсутствие изменений в качественном характере распределения экстремумов ($\max$, $\min$) напряжений.

Анализу сценариев разрушения, реализующихся в частицах различной формы при растяжении и сжатии, посвящена работа [9], в которой авторы наглядно показывают принципиальное их (сценариев) различие.

Включениям неправильной формы свойственно объемное растрескивание и разрушение по границе раздела, причем развитие этих двух процессов происходит практически одновременно. В отличие от включений сферической формы частицам неправильной формы свойственно так называемое отслаивание, затрагивающее центральную часть поверхности частицы, при этом становятся заметными сквозные трещины в плоскостях, перпендикулярных оси растяжения.

В сферических включениях с отсутствием выраженной неоднородности поверхности на начальной стадии разрушения, как правило, не возникают сквозные трещины при сжатии. В приповерхностных слоях происходит формирование целого ансамбля коротких трещин, являющихся источником появления новых локальных участков концентрации напряжений в объеме. При дальнейшем нагружении у верхних краев включений возможно образование сквозных трещин, берега которых имеют тенденцию к сдвиговой подвижности друг относительно друга, способствуя при этом разгрузке соседних областей материала.

В случае нагружения локального объема металла простым сжатием, приводящим к разрушению, возможно наблюдать образование системы трещин (ориентация которых имеет достаточно разные углы к оси сжатия), стремящихся к разделению включений на несколько частей. Согласно [9, 10], контуры трещин в сечениях включения имеют сложную форму: обнаруживаются как прямые линии поврежденного материала, так и искривленные контуры, свидетельствующие о повороте фрагментов частицы в процессе активного нагружения.

Таким образом, трехмерные расчеты, выполненные В.А. Романовой и Р.Р. Балахоновым [9, 10], показывают существование локальных областей материала вблизи границ раздела «матрица – включение» как при растяжении, так и при сжатии. Этими вторыми также доказано, что все компоненты тензоров напряжений и деформаций вносят соизмеримый вклад в напряженно-деформированное состояние локального объема материала с включениями различной формы. В результате ситуационного моделирования удалось

выявить два основных механизма разрушения частиц (включений) – отслаивание по границе раздела и объемное растрескивание.

Результаты исследовательских работ [6, 7, 10] свидетельствуют, что основным негативным фактором, определяющим роль неметаллических включений в иерархическом взаимодействии характеристик структурно-механического состояния сварных соединений, является наличие усадочных дефектов, приводящих к образованию между ними и металлической матрицей некоего зазора, способствующему перемещению в этой области неметаллических включений, которые могут оказывать изнутри на металл ударное воздействие. Возможность подобного «свободного» перемещения обнаруженного включения в образовавшихся зазорах провоцирует развитие так называемой «шахматной структуры» на поверхности материала, выявляемой методами микроскопического индентирования на микроуровне и дюрOMETрическим контролем на макроуровне.

Список литературы

1. 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.
2. Петров, Ю.В. Структурно-временная теория разрушения как процесса, протекающего на разных масштабных уровнях / Ю.В. Петров, А.А. Груздков, В.А. Братов // Физическая мезомеханика. – 2012. – Т. 15. – № 2. – С.15-21.
3. 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.
4. Панин, В.Е. Масштабные уровни гомеостаза в деформируемом твердом теле / В.Е. Панин, Л.Е. Панин // Физическая мезомеханика. – 2004. – Т. 7. – №4. – С. 5-23.
5. Ковшова, Ю.С. Остаточный ресурс оболочковых конструкций, работающих в условиях квазистатического нагружения : дис. ... канд. техн. наук : 05.26.03 и 05.16.09 / Ю.С. Ковшова. – Уфа: УГНТУ. – 2014. – 127 с.
6. 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.
7. Пояркова, Е.В. К вопросу о решении проблемы повышения надежности оборудования нефтегазовой отрасли на основании контроля качества сварных соединений / Е.В. Пояркова, И.Р. Кузеев // Нефтегазовое дело. – 2008. – Т.6. – №1. – С. 239-244.
8. Асабина, Е.А. Дефекты в твердых телах и их влияние на свойства функциональных материалов : Электронное учебно-методическое пособие / Е.А. Асабина. – Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет. – 2012. – 65 с.

9. Романова, В.А. Влияние формы включений и прочностных свойств интерфейсов на механизмы разрушения металлокерамического композита на мезоуровне / В.А. Романова, Р.Р. Балохонов // Физическая мезомеханика. – 2007. – Т.10. – №6. – С. 75-88.
10. Романова, В.А. Моделирование процессов деформации и разрушения в трехмерных структурно-неоднородных материалах : дисс. ... док-ра физ. - мат. наук : 01.02.04 / В.А. Романова. – Томск: ИФПМ СО РАН, 2008. – 298 с.