

ДОСТОЙНЫЙ ВКЛАД В МЕХАНИКУ РАЗРУШЕНИЯ (по материалам книг, выпущенных в свет за последние годы)

© Е. М. Морозов¹

Статья поступила 21 января 2009 г.

За последние десятилетия в практику расчетов на прочность уверенно внедрились методы, предполагающие наличие трещин в исходном состоянии материала конструкции. Одновременно изучаются и рассчитываются условия зарождения и последующего развития сначала малых, а затем и вполне макроскопических трещин. В силу комплексности и разномасштабности этой проблемы предлагаются и используются разные методы исследования, а также алгоритмы расчетов. Причем развитие микро- и макротрещин становится более интенсивным на завершающей стадии деформирования конструкции или перед исчерпанием ее несущей способности. Поэтому необходимы понимание происходящих явлений при проведении расчетов на этой стадии, а также уверенность в достоверности рассчитанных несущей способности конструкции и ее долговечности. Неудивительно, что этим проблемам посвящены многотомные энциклопедии и монографии. Остановим свое внимание на недавно изданных книгах Л. Р. Ботвиной «Разрушение. Кинетика, механизмы, общие закономерности», Ю. Г. Матвиенко «Модели и критерии механики разрушения» и Г. М. Хажинского «Механика мелких трещин в расчетах прочности оборудования и трубопроводов».

Общеизвестно, что разрушение приходится делить (в геометрических масштабах) на микро- и макроявления. В целом явления, происходящие в материале в микромасштабе, позволяют понять зарождение реакции материала на внешнее воздействие. В этом случае для изучения происходящего приходится применять в основном физические методы исследования в локальных областях концентрации деформаций и напряжений. Этим вопросам, главным образом, посвящена книга Л. Р. Ботвиной. В ней основное внимание уделено стадийности разрушения, развитию пластических зон, кинетике накопления и роста микротрещин в области вершины трещины в разных условиях нагружения. Представление о содержании книги можно получить из перечня названий ее глав: 1) Статическое разрушение; 2) Динамическое разрушение; 3) Усталостное разрушение; 4) Коррозионное разрушение; 5) Развитие радиационной поврежденности; 6) Физические свойства материала: влияние микроструктуры и поврежденности; 7) Кинетическое подо-

бие процессов разрушения на разных масштабных уровнях; 8) Общие закономерности кинематических процессов в разных средах.

Книга Ю. Г. Матвиенко демонстрирует академический подход к изучению проблемы разрушения в отличие от книги Г. М. Хажинского, которая в основном посвящена инженерным методам расчетов. Явления, происходящие в макромасштабе, позволяют использовать методы механики сплошной среды и инженерные приемы для расчета прочности и долговечности. При этом материал наделяется свойствами, полученными осреднением по объему образца локальных прочностей и деформируемости элементов структуры материала. На таком расчетном макроподходе держится вся мировая техническая индустрия. В то же время понимание процессов, происходящих с материалом в локальных микрообластях, необходимо для управления технологиями, создания новых материалов и их состояний и, в конечном счете, для совершенствования существующих и создания новых инженерных методов расчета прочности и долговечности. С этой точки зрения весьма перспективны исследования поведения материала между микро- и макросостоянием, на так называемом мезомасштабном уровне. Таким образом, макроскопическое механическое поведение материала складывается из суммы эффектов, происходящих на разных масштабных уровнях. Этот результат фактически следует из всех трех обсуждаемых книг.

Несмотря на внешнее различие в поведении материала образца (или детали) при разных условиях нагружения (статике, динамике и пр.) в происходящих явлениях есть и общее. Это — накопление со временем (числом циклов) необратимой повреждаемости материала. Рассмотрим, например, процесс усталости. При напряжении в области упругости деформация обратима, но через определенное число циклов образуется трещина и затем происходит полное разрушение. Значит, идет накопление чего-то, что назовем поврежденностью (повреждаемостью). Природа повреждаемости кроется в микроскопической неоднородности и анизотропности строения (структуры) материала. В силу этого возникает и микроскопическая неравномерность напряженно-деформированного состояния. В итоге в микромасштабе при относительно малых внешнеприложенных усилиях и деформациях возникают все виды необратимости, детальный учет которых вряд ли возможен. Поэтому во всех трех

¹ Московский инженерно-физический институт (государственный университет), Москва, Россия.

книгах проблема разрушения остается не закрытой. Естественно, учет повреждаемости материала строится с помощью моделей, позволяющих микроскопические эффекты перевести в разряд макроскопически измеряемых (и рассчитываемых). Например, повреждаемость можно оценить скаляром, который отражает как бы уменьшение площади сечения образца, эквивалентное деградации свойств материала. Поврежденность ноль — материал целый (не поврежден), поврежденность единица — материал разрушен. Физика явления при этом не уточняется, но определяющие уравнения можно записать и, решая их, получить пригодный для практических целей результат. Этот материал достаточно подробно рассмотрен в книге Ю. Г. Матвиенко. Приведем содержание этой книги по главам: 1) Физика и механика микроразрушений; 2) Механика трещин в упругих телах; 3) Механика трещин в упругопластических телах; 4) Специальные задачи механики трещин; 5) Эволюционные модели повреждений и разрушения твердых тел; 6) Безопасность и живучесть технических систем.

При усталости количественной мерой повреждаемости может служить текущее число циклов нагружения по отношению к предельному числу циклов при заданной нагрузке в цикле. При наличии нескольких циклических нагрузок используют линейный закон накопления повреждений. Наиболее очевидной и практически легко реализуемой количественной мерой повреждаемости может служить пластическая деформация. Необратимость этой деформации позволяет трактовать ее как итоговую поврежденность материала, интегрирующую в себе все виды микронеобратимостей материала в процессе его деформирования. Например, в расчетах прочности при ползучести (длительная статическая прочность) при наличии нескольких режимов нагружения опять же используют линейный закон накопления повреждений, в качестве которого принято время. Принятие циклов или времени в качестве параметра поврежденности материала не вызывает возражений, поскольку в условиях циклического или длительного статического воздействия нагрузки цикл и время, конечно же, отражают глобальное накопление повреждений. Техническая направленность книги Г. М. Хажинского видна из перечня глав: 1) Основные закономерности деформирования при одноосном нагружении; 2) Концентрация

напряжений; 3) Особенности разрушения при усталости; 4) Коэффициенты интенсивности напряжений в пластинах, оболочках и их сварных соединениях; 5) Соппротивление усталости сварных соединений пластин; 6) Исследование прочности элементов и соединений трубопроводов; 7) Коррозия оборудования и трубопроводов; 8) Анализ прочности труб с вмятинами.

Сама процедура расчета прочности и долговечности при усталости (много- и малоциклового) состоит в определении параметров прочности и долговечности, при которых накопленная поврежденность (так или иначе измеренная или рассчитанная) достигает предельных значений. При этом эффекты внешней среды принимают участие в ускорении (как правило) наступления предельных состояний из-за интенсификации процессов повреждения материала. В любом случае построенная расчетная модель деформирования и разрушения нуждается в четком установлении рамок ее справедливости, в экспериментальном подтверждении и определении нужных физико-механических характеристик материала.

Во всех обсуждаемых книгах подчеркивается, что состояние среды — определяющий фактор практически для всех видов предельных состояний. Состояние среды относится к условиям нагружения и, следовательно, механическое поведение детали или образца из данного материала во многом может определяться окружающей средой. Поэтому среда предопределяет реакцию материала на механические (термические) воздействия, создавая для явления разрушения как общие, так и частные эффекты.

Трудно указать на недостатки этих книг. Недоизученность, недоисследованность, недосказанность по отдельным аспектам изложения естественным образом вытекает из междисциплинарности, комплексности, многомасштабности и физической кардинальности явления разрушения. Все три книги вместе дают общее представление о методологии исследования с металловедческой стороны явления, о моделях и приемах практического применения теоретических положений в расчетах промышленных объектов.

Рассмотренные книги, несомненно, полезны как с научной, так и с практической точки зрения. А область знания «механика разрушения» получила достойное пополнение.