

УДК 539.3+539.4+519.6

МОДЕЛИ РАЗВИТИЯ ДЕФЕКТОВ, УЧИТЫВАЮЩИЕ ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЕ КОНЕЧНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ

© 2011 г.

В.А. Левин

Московский госуниверситет им. М.В. Ломоносова

v.a.levin@mail.ru

Поступила в редакцию 15.06.2011

Рассматриваются модели, описывающие в рамках механики деформируемого твердого тела возникновение и развитие в теле дефектов. Учитывается, что образование дефекта приводит к перераспределению в теле конечных деформаций. Кроме того, что возникновение и развитие дефекта может приводить к образованию в теле областей с другими механическими характеристиками материала.

Ключевые слова: теория многократного наложения больших деформаций, нелокальные критерии, зона предразрушения, программа нагружения.

Описание образования и развития дефекта в нагруженном теле в рамках механики деформируемого твердого тела описывается «принудительным» образованием и развитием полости (трещины ненулевого раскрытия) или включения [1–3]. Гипотеза сплошности требует предположить, что трещина либо существовала в теле до начала нагружения, либо была «принудительно» привнесена в тело в процессе нагружения [4]. Если трещина была привнесена в нагруженное тело, то это изменяет связность области, занимаемой телом, и приводит к перераспределению конечных деформаций и напряжений в теле. Перераспределение деформаций происходит и при «принудительном» (с точки зрения механики деформируемого твердого тела) росте трещины при выполнении некоторого критерия [5].

Общая механическая постановка задачи следующая [6]. Пусть в теле, находящемся в начальном состоянии под воздействием внешних нагрузок, возникли напряжения и соответствующие им большие деформации. Тело перешло в первое промежуточное состояние. В этом состоянии в теле мысленно намечается замкнутая, заранее заданная поверхность (будущая граница дефекта). Часть тела, ограниченная этой поверхностью, удаляется, а ее действие на оставшуюся часть заменяется по принципу освобожденности от связей силами, распределенными по этой поверхности. Эти силы, перешедшие в разряд внешних, «мгновенно» уменьшаются до нуля. В зависимости от модели предусматривается либо квазистатическое изменение усилий, либо изменение усилий с учетом динамических эффектов. В результате в окрестности граничной поверхности воз-

никают большие деформации, которые накладываются на большие начальные деформации, уже имеющиеся в теле. Меняется и форма образованной граничной поверхности. Тело переходит в следующее (второе промежуточное) состояние. Если при этом был выполнен критерий разрушения, то возможно начало роста трещины и «принудительный» переход тела в следующее состояние из-за «принудительного» изменения формы концентратора напряжений. Если же соответствующий критерий не был выполнен, то решение задачи позволяет выяснить, при каком уровне внешних нагрузок будет выполнен критерий разрушения, определяющий, например, возможность начала роста трещины. Далее данная постановка может быть дополнена в соответствии с используемой моделью, например, следующим образом:

1. Введение понятия «зона предразрушения». Зона предразрушения – это часть тела, где под воздействием внешних нагрузок, приложенных к телу, происходит изменение свойств материала [4, 7]. Граница зоны предразрушения определяется из условия выполнения критерия. По мнению автора, наиболее приемлемыми в этом случае являются нелокальные критерии, учитывающие, что разрушение, а значит, и изменение свойств зоны предразрушения происходит не в точке или на отрезке и не мгновенно (для вязкоупругих материалов). Отметим, что модель образования зоны предразрушения должна включать в себя не только критерий ее образования, но и параметр, характеризующий размер этой зоны [7, 8]. Зона предразрушения моделируется образованием в нагруженном теле включения. В этом случае считаем, что в вышеуказанной постанов-

ке полость, образованная удалением части тела, мгновенно заполняется материалом с другими свойствами (материалом включения). При этом считаем, что к границе включения приложены силы. Далее силы, приложенные как к границе тела, образованной удалением его части, так и к границе включения, уменьшаются до нуля [5, 7, 8]. Это вызывает возникновение больших (по крайней мере, в окрестности включения и во включении) деформаций и напряжений, которые «физическим» накладываются на большие уже имеющиеся (начальные) деформации и напряжения. Тело (матрица и включение) находится в текущем (конечном) состоянии. Возможны и другие варианты модели, например, когда включение полностью повторяет форму удаленной части тела, но только когда по поверхности включения действуют заранее выбранные (рассчитанные) силы. Или полость, образованная удалением части тела, заполняется упругим материалом с другими свойствами. При решении конкретных задач предполагается, что на границе матрицы (тела) и образованного включения заданы условия типа прилипания (равенство на границе матрицы и включения соответствующих перемещений и напряжений). При построения модели в качестве одного из вариантов рассматривается изменение структуры материала, например, образование микропор, микроповреждений, микровключений, последовательно или одновременно возникающих в зоне предразрушения. Далее материал зоны предразрушения на каждом этапе изменения ее свойств заменяется на эффективный. Это важно и для эластомеров, в которых при нагружении [5] происходит кристаллизация, вызванная растяжением. При этом следует понимать, что в случае конечных деформаций для определения свойств эффективного материала не подходит метод и математический аппарат, используемый для малых деформаций, в частности, из-за нелинейности кинематических соотношений. В [6, 9] предложен вариант метода расчета эффективных характеристик пористого материала при конечных деформациях и их наложении.

2. Модель вязкого роста трещины предполагает последовательное поглощение основной трещиной вторичных трещин (или микропор) как уже существующих в теле, так и раскрывающихся в процессе нагружения (деформирования). С помощью вышеописанной модели описываем изменение свойств перемычек между основной и вторичной трещинами, «принудительное» образование вторичных трещин и раскрытие микропор. Например, можно предполагать, что если в некоторой точке (или в области), находящейся между

двумя концентраторами напряжений, выполнен критерий разрушения, то происходит разрыв перемычки, и моделировать это как слияние большего концентратора напряжений с меньшим. Форма нового, «принудительно» возникшего концентратора напряжений определяется (задается) заранее в соответствии с формой области, где выполнен критерий разрушения.

3. Описание возникновения устойчивых наноструктур под действием механических напряжений (твердотельного фазового перехода) описывается добавлением в модель подхода теории Ландау–Гинзбурга [10]. Основным понятием в этой теории является понятие параметра порядка, который характеризует атомарную конфигурацию в материале в процессе фазового перехода. В общем случае для описания состояния среды может использоваться несколько параметров порядка [11]. На основе теории Ландау–Гинзбурга разработан ряд моделей, описывающих фазовые переходы в твердых телах [11, 12]. В модели [11, 12] учитываются собственные деформации фаз, скрытая энергия фазового перехода, зависимость модулей упругости от параметров порядка, зависимость свободной энергии от градиентов параметров порядка. Подход ориентирован на моделирование фазовых переходов в сталях и материалах с памятью формы. Механическая постановка задачи дополняется «принудительным» возникновением зародыша новой фазы (параметр порядка, соответствующий данной фазе, в некоторой части тела перестает быть равен нулю), причем возникновение зародыша подразумевает изменение напряженно-деформированного состояния как области зародыша, так и всего тела. Отметим, что после фазового перехода происходит непрерывное перераспределение конечных деформаций.

4. Используя модель образования слоистого включения (последовательное образование включений в нагруженном теле), отсечения и методику оценки эффективных характеристик материала при конечных деформациях и их перераспределении [6, 9], можно определить механические характеристики наноструктурированного материала.

Имитационное моделирование проводилось с использованием CAE Fidesys [13].

Список литературы

1. Разрушение. В 7 т. / Под ред. Г. Либовица. М.: Мир, 1973–1975.
2. Черепанов Г.П. Механика хрупкого разрушения. М.: Наука, 1974. 640 с.
3. Седов Л.И. Введение в механику сплошной

- среды. М.: Госфизматлит, 1962. 284 с.
4. Левин В.А. // ПММ. 2008. Т. 72. Вып. 3. С. 445–452.
5. Левин В.А., Калинин В.В., Зингерман К.М., Вершинин А.В. Развитие дефектов при конечных деформациях. Компьютерное и физическое моделирование. М.: Физматлит, 2007. 392 с.
6. Левин В.А. Многократное наложение больших деформаций в упругих и вязкоупругих телах. М.: Наука, Физматлит, 1999. 223 с.
7. Левин В.А., Морозов Е.М. // Докл. РАН. 2007. Т. 415, №1. С. 52–54.
8. Левин В.А., Морозов Е.М., Матвиенко Ю.Г. Избранные нелинейные задачи механики разрушения. М.: Наука, Физматлит, 2004. 407 с.
9. Levin V.A., Zingerman K.M. // Trans. ASME. Journal of Applied Mechanics. 2003. V. 70, No 6. P. 982–985.
10. Ландау Л.Д., Халатников И.М. // Докл. АН СССР. 1954. Т. XCVI, №3. С. 469–472.
11. Levitas V.I., Levin V.A., Zingerman K.M., Freiman E.I. // Physical Review Letters. 2009. V. 103. P. 025702.
12. Левин В.А. и др. // Докл. РАН. 2010. Т. 434, №4. С. 481–485.
13. www.cae-fidesys.ru

MODELS OF DEFECT GROWTH ACCOUNTING FOR REDISTRIBUTION OF FINITE STRAINS

V.A. Levin

The models that describe the nucleation and growth of defects in solids within the framework of solid body mechanics are proposed. It is taken into account that the nucleation of defects causes the redistribution of finite strains in the body. In addition, it is assumed that the nucleation and growth of defects may results in the origination of regions with other mechanical properties of the material in the body.

Keywords: theory of repeated superposition of large strains, non-local criteria, pre-fracture zone, loading program.