

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ УСТАЛОСТИ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ МНОГОЦИКЛОВЫХ КВАЗИСТАТИЧЕСКИХ ТЕРМОСИЛОВЫХ НАГРУЖЕНИЯХ

Горохов В.А., Капустин С.А., Чурилов Ю.А.

*НИИМ Нижегородского университета, Нижний Новгород, Россия,
vas-gor@rambler.ru*

В докладе обсуждается вариант модели, описывающей процессы многоциклового усталости конструкционных материалов с использованием соотношений механики поврежденной среды. Рассмотрены основные подходы к созданию моделей для описания процессов многоциклового усталости конструкционных материалов на основе энергетических критериев разрушения. Предложен вариант модели, учитывающей зависимость долговечности материала от параметров асимметрии цикла, влияющие на процесс разрушения развивающейся поврежденности и зависимости параметров разрушения от реализуемого в процессе нагружения вида напряженно-деформированного состояния. Рассмотрены вопросы построения материальных функций модели. Представлены алгоритмы реализации модели в составе программных средств решения нелинейных задач деформирования и разрушения конструкций на основе МКЭ.

Экспериментальные исследования процессов разрушения материалов в условиях многократного воздействия периодически изменяющейся во времени нагрузки позволяют выделить три характерные области разрушения [1, 2].

Первая область характеризуется разрушением, сопровождающимся односторонним накоплением пластических деформаций до величин, близких предельной пластической деформации при монотонном увеличении нагрузки. Такой вид разрушения называется квазистатическим разрушением.

В пределах второй и третьей областей разрушение представляет собой процесс постепенного накопления повреждений под действием переменных нагрузок, приводящих к зарождению и развитию дефектов в материале, приводящих к появлению трещины. При этом, если в пределах второй области предельное число циклов N_f сравнительно невелико и сопровождается значительными знакопеременными пластическими деформациями (малоцикловое разрушение), то на третьей – разрушение происходит без видимых следов пластической деформации после значительного количества циклов ($N_f > 10^4$) (многоцикловое разрушение).

В области многоциклового усталости уровень действующих напряжений не превышает предела текучести материала, поэтому макроскопические пластические деформации в пределах цикла достаточно малы и ими обычно пренебрегают.

Тем не менее, как показывают исследования, при напряжениях, меньших предела текучести при циклическом деформировании в координатах «напряжение-деформация» наблюдается петля гистерезиса, соответствующая рассеянию энергии, и связанная с микропластическими деформациями в локальных объемах материала. При этом в области многоциклового усталости форма петли гистерезиса не играет большого значения, важно лишь значение рассеянной энергии, которая связана с энергией формоизменения за цикл нагружения [1, 2].

В основу практически всех энергетических критериев многоциклового усталости положен выбор вида энергии, которая считается ответственной за разрушение материала. В простейших случаях в качестве такой энергии принимается полная энергия упругой деформации за цикл [1], или энергия формоизменения

При таком определении «опасной» энергии ее критическое значение будет зависеть от параметров процесса циклического нагружения (уровня напряжений, параметра асим-

метрии r). Поэтому в большинстве современных работ предлагается выделить в качестве «опасной энергии», ответственной за разрушение, некоторую долю рассеянной энергии, которая бы в наименьшей степени зависела от параметров циклического нагружения

В настоящем докладе для аналитического описания зависимости суммарной рассеянной энергии от числа циклов предлагается использовать известную зависимость [1], связывающую число циклов N_R и энергию D за цикл нагружения в виде

$$D(N_R)^k = C, \quad (1)$$

где N_R – разрушающее число циклов при данном уровне напряжений, k и C – экспериментально определяемые функции, зависящие от параметра асимметрии цикла r за цикл нагружения:

$$k = k(r), \quad C = C(r). \quad (2)$$

Эти функции могут быть получены на основе экспериментальных кривых многоциклового усталости для фиксированных значений $r = const$.

Очевидно, что при заданном уровне напряжений, определяющих предельное число циклов N_R и полученных на основе (1) значениях коэффициентов k и C может быть однозначно определена энергия D за цикл нагружения:

$$D = \frac{C}{(N_R)^k} \quad (3)$$

С другой стороны, меняя значения C и k можно получать различные значения энергии D . Поэтому для выбора зависимости D от параметров НДС в цикле можно использовать любое соотношение, однозначно определяющее некоторый конкретный вид энергии за цикл нагружения.

В связи с этим в качестве энергии, определяющей разрушение при многоциклового усталости, предлагается использовать энергию формоизменения, элементарное изменение которой представляется в виде:

$$\delta D = \sigma'_y \delta e'_y \text{ при } \delta D > 0 \quad (4)$$

$$\delta D = 0 \text{ при } \delta D \leq 0$$

В докладе показано, что для определения параметров k и C при фиксированном значении параметра r необходимо иметь две точки на кривой многоциклового усталости $\sigma \sim N$, соответствующие двум различным уровням напряжений.

Далее для этих уровней напряжений вычисляются энергии за цикл D_1 и D_2 , с кривой многоциклового усталости снимаются значения чисел циклов до разрушения N_R^1 и N_R^2 после чего вычисляются значения коэффициентов k и C

С целью повышения достоверности полученных значений k и C проверяется выполнение условий (1) для одного или нескольких уровней напряжений и, при необходимости, уточняются значения коэффициентов k и C .

При построении адекватной модели многоциклового усталости, наряду с полученными соотношениями для определения опасной энергии D за цикл нагружения, должны быть сформулированы кинетические уравнения накопления повреждений и влияния текущей поврежденности на характеристики процесса деформирования.

Для описания развития повреждений в материале при многоциклового нагружении вводится функция повреждений ψ , представляющая собой нормированный аналог опасной энергии, и скалярная мера поврежденности ω , используемая для описания влияния текущей поврежденности на характеристики процесса деформирования на основе гипотезу о наличии двух фаз накопления повреждений.

В пределах первой фазы происходит зарождение рассеянных по объему материала повреждений в виде микропор и микротрещин, не приводящее к заметному влиянию этих повреждений на физико-механические характеристики материала. Применительно к рас-

смотренной выше модели поврежденного материала для этой фазы можно считать изменение меры поврежденности $\Delta\omega = 0$

Вторая фаза характеризуется дальнейшим развитием и взаимодействием возникающих дефектов и сопровождается нарастающим влиянием повреждений на физико-механические характеристики материала и дестабилизацию процесса циклического деформирования при циклических нагружениях. Конец фазы соответствует появлению в материале макроскопической трещины.

Учет наличия названных фаз при описании накопления повреждений может быть осуществлен путем введения переменной, определяемой значением завершения первой фазы [3]. В качестве такой переменной в настоящем исследовании используется величина ψ_a ($\psi_a = \psi_a(\sigma_a)$), где σ_a – амплитуда напряжений цикла $\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2}$), определяемая значением упомянутой выше функции поврежденности, к концу первой фазы. При этом зависимость изменения меры поврежденности $\Delta\omega$ от изменения функции поврежденности за цикл нагружения $\Delta\psi$ принимается в виде [3]:

$$\Delta\omega = p\bar{\omega}^p \Delta\psi^0,$$
$$\Delta\psi^0 = \frac{\Delta\psi}{1 - \psi_a} \quad \text{при} \quad \psi > \psi_a,$$
$$\Delta\psi^0 = 0 \quad \text{при} \quad \psi \leq \psi_a,$$
(5)

где p – функция материала.

В пределах второй фазы вычисления действующих напряжений и деформаций конструкции необходимо осуществлять в рамках соотношений механики поврежденной среды, т.е. с учетом влияния текущей меры поврежденности на характеристики процесса деформирования.

В докладе рассмотрены алгоритмы реализации модели в составе программных средств численного решения нелинейных задач деформирования и разрушения конструкций, основанные на использовании созданных авторами схем моделирования процессов малоциклового усталости[4, 5].

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 12-08-31050).

Список литературы

1. Трощенко В.Т. Деформирование и разрушение металлов при многоцикловоом нагружении. – Киев: Наук. Думка, 1981 – 344с.
2. Голос, Эльин. Теория накопления усталостных повреждений, основанная на критерии удельной энергии полной деформации. Современное машиностроение, сер. Б, 1989, №1 – С. 64-71
3. Капустин, С.А. Метод конечных элементов в задачах механики деформируемых тел: Учеб. Пособие / С.А. Капустин. Н. Новгород: Изд-во ННГУ, 2002. – 150 с.
4. Капустин С.А., Чурилов Ю.А., Горохов В.А. Численное моделирование процессов деформирования и разрушения материалов и конструкций в условиях квазистатических термосиловых и терморрадиационных воздействий. // Тр. III школы семинара «Современные проблемы ресурса материалов и конструкций». Москва: МАМИ, 2009. – С. 90-104.
5. Капустин С.А., В.А. Горохов В.А, Чурилов Ю.А.. Алгоритмы прогнозирования малоциклового прочности конструкций на основе МКЭ // Проблемы прочности и пластичности: Межвузовский сборник / Н. Новгород.-2011. Вып. 73. – С. 13-24.