предшествует образованию трещин и может рассматриваться в качестве отличительного признака наступления предельного состояния для различных конструкционных материалов. При этом выделяющееся в зонах течения тепло сказывается на свойствах материала и кинетике зарождения и развития порообразных дефектов.

УДК 620.22-419.8:539.4

ВЛИЯНИЕ РАЗБРОСОВ СВОЙСТВ КОМПОНЕНТОВ ДЕГРАДИРУЮЩЕЙ КОМПОЗИЦИОННОЙ СРЕДЫ НА ЭФФЕКТИВНЫЕ УПРУГИЕ МОДУЛИ

Е. А. Белоус

Введение: Проблеме усталостного разрушения металлов, сплавов и композитов посвящены работы [1–6]. В работах [1–2] приведены экспериментальные зависимости время до разрушения от напряжения в условиях малоциклового (статического) нагружения. На основании которых в [1] получена модель накопления повреждений как наиболее удобная аппроксимация. В работах [3–4] приведены кинетические уравнения изменения концентрации повреждений в процессе эксплуатации: Качанова, Работнова, Шестерикова и др. Аналитический расчет физико-механических постоянных композиционных материалов имеет место в работе [5]. Там же приведены сравнительные данные расчета и экспериментов. Наблюдается хорошее согласование расчета с результатами экспериментов. Недостатками приведенных методик является то, что физико-механические постоянные рассчитаны для композитов с ограниченным числом компонентов. Известно, что разрушение является динамическим процессом и может произойти при разных уровнях напряжений. В процессе эксплуатации вследствие подвижности вакансий происходит образование дислокаций в кристаллической решетке, повышается пластичность твердого тела и как результат- изменение физико-механических свойств материала. Эти явления связаны с увеличением концентрации пор и микротрещин. Изучить данные явления на атомном уровне не представляется возможным, поэтому находят применение эмпирические формулы, выведенные на основании статистических данных.

В данной работе преложен расчет, позволяющий определить эффективные упругие модули трехкомпонентной, неоднородной среды с учетом деградации матрицы, при разных разбросах свойств компонентов.

Постановка задачи: В качестве объекта исследования рассмотрим композит, состоящий из трех компонентов: 1-стальная матрица, 2-графитовые включения , 3-поры (в дальнейших обозначениях характеристики каждого из вышеуказанных компонентов снабжены соответствующим индексом). Объект подвергался растяжению при s=315 МПа. Композит характеризуется эффективными упругими модулями: k-объемный модуль упругости, m-сдвиговый модуль упругости. Для пор принимаем k=0, m=0. В вычислениях полагалось:, E1=206 ГПа, E2=27 ГПа, n1=0.33,n2=0.3. В соответствии с формулами [6]:

$$k = \frac{E}{3\cdot(1-2\nu)} \tag{1}$$

$$\mu = \frac{E}{2\cdot(1+\nu)} \tag{2}$$

где E ,n — модуль Юнга и коэффициент Пуассона соответственно.

Для упрощения расчетов будем полагать, что поры распределены по объему равномерно. Изменение концентрации пор в зависимости от времени опишем кинетическим уравнением Качанова

$$\frac{d(1-c)}{dt} = -A\cdot\left(\frac{\sigma}{1-c}\right)^n \tag{3}$$

где σ — напряжение, A, N — параметры материала, определяемые из экспериментальных зависимостей согласно методике предложенной в работе [1]. Для стали $A = 3.26\cdot10^{-15}$, n=4. По данным работы [5] эффективные модули упругости композита определяются по уравнениям:

$$\Gamma^{\langle k\rangle} = \frac{1}{k_0 + \frac{4}{3}\cdot\mu_0} \tag{4}$$

$$\Gamma^{\langle \mu\rangle} = \frac{2\cdot(k_0 + 2\cdot\mu_0)}{5\cdot\mu_0\cdot(k_0 + \frac{4}{3}\cdot\mu_0)} \tag{5}$$

$$\Gamma^{\langle\lambda\rangle} = \sum_{i=1}^{N}\frac{2\cdot c_i}{\varepsilon_{i1}+\varepsilon_{i2}}\cdot\sum_{\beta=1}^{2}\left[\frac{A^{\langle\lambda\rangle}+(-1)^{\beta}\cdot\varepsilon_{i\beta}^{\langle\lambda\rangle}}{\varepsilon_{i\beta}^{\langle\lambda\rangle}}\right]\cdot\ln\left[\frac{A^{\langle\lambda\rangle}+(-1)^{\beta}\cdot\varepsilon_{i\beta}^{\langle\lambda\rangle}}{A^{\langle\lambda\rangle}}\right] \tag{6}$$

$$A^{\langle\lambda\rangle} = \lambda - \lambda_0 + \frac{1}{\Gamma^{\langle\lambda\rangle}}\ ,\ \lambda = \mathrm{k},\mu \tag{7}$$

Рассмотрим случай разброса свойств компонентов при: $\varepsilon_{11}^{(k)} = \varepsilon_{32}^{(k)} = 11\cdot 10^4$ МПа, $\varepsilon_{12}^{(k)} = \varepsilon_{21}^{(k)} = \varepsilon_{22}^{(k)} = \varepsilon_{31}^{(k)} = 0$, $\varepsilon_{12}^{(\mu)} = \varepsilon_{21}^{(\mu)} = \varepsilon_{22}^{(\mu)} = \varepsilon_{31}^{(\mu)} = 0$, $\varepsilon_{11}^{(\mu)} = \varepsilon_{32}^{(\mu)} = 3,7\cdot 10^4$ МПа, данный случай разброса свойств компонентов представлен на рис 1.

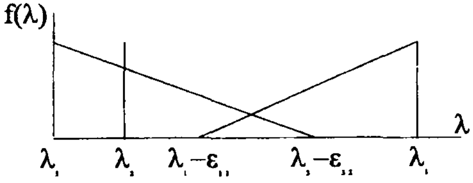

Рис.1.Распределение упругих модулей в гетерогенной n-компонентной среде.

Уравнение (6) имеет недостаток в том, что при $\varepsilon \to 0$ правая часть становится неопределенностью вида: 0/0. Разложив слагаемые правой части уравнения (6), которые дают неопределенность, в ряд Маклорена и подставив уравнения (4),(5) и (7), получим расчетные уравнения:

$$k_0 = \frac{1}{\frac{2c_1}{\varepsilon_{11}}\left(\frac{A_1-\varepsilon_{11}}{\varepsilon_{11}}\ln\frac{A_1-\varepsilon_{11}}{A_1}\right) + c_2\left(\frac{1}{A_2}\right) + \frac{2c_2}{\varepsilon_{32}}\left(\frac{A_3+\varepsilon_{32}}{\varepsilon_{32}}\ln\frac{A_3+\varepsilon_{32}}{A_3}\right)} - \frac{4}{3}\mu_0 \qquad (8)$$

где $A_i = k_i + \frac{4}{3}\mu_0 \;\; i = 1,\dots,3$

$$\mu_0 = \frac{2(k_0+2\mu_0)}{5\left(k_0+\frac{4}{3}\mu_0\right)\left(\frac{2c_1}{\varepsilon_{11}}\left(\frac{B_1-\varepsilon_{11}}{\varepsilon_{11}}\ln\frac{B_1-\varepsilon_{11}}{B_1}\right) + c_2\left(\frac{1}{B_1}\right) + \frac{2c_3}{\varepsilon_{32}}\left(\frac{B_3+\varepsilon_{32}}{\varepsilon_{32}}\ln\frac{B_3+\varepsilon_{32}}{B_3}\right)\right)} \qquad (9)$$

где $B_i = \mu_i - \mu_0 + \dfrac{5\mu_0(k_0+\frac{4}{3}\mu_0)}{2(k_0+2\mu_0)}$

По формулам (8),(9) проведен расчет для композита сталь-графит-поры, в котором концентрация пор увеличивается за счет уменьшения концентрации матрицы. Так как концентрация пор c(t), тогда концентрация стали определяется $c_1(t) = c_1 - c(t)$. Зададим начальные концентрации $c_1 = 0.8$ (сталь), $c_2 = 0.2$ (графит).Подставив значения разброса свойств компонентов $\varepsilon_{ij}^{(k)}$ и $\varepsilon_{ij}^{(\mu)}$ получим графики зависимости упругих модулей от времени испытаний результаты расчетов представлены на рис 2, 3.

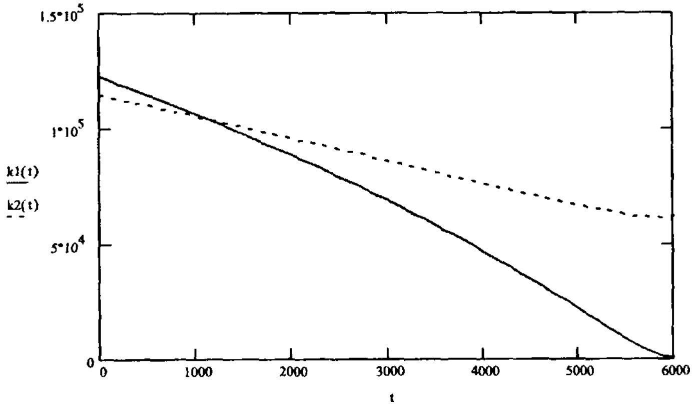

Рис.2. Зависимость объемного модуля упругости от времени эксплуатация для разных значений разбросов свойств. k1(t) — без разброса свойств компонентов, k2(2) — с разбросом свойств компонентов.

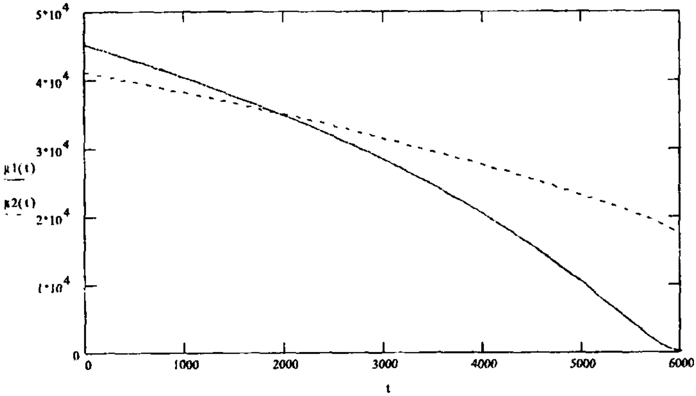

Рис.3. Зависимость сдвигового модуля упругости от времени эксплуатация для разных значений разбросов свойств. μ1(t) — без разброса свойств компонентов, μ2(t) — с разбросом свойств компонентов

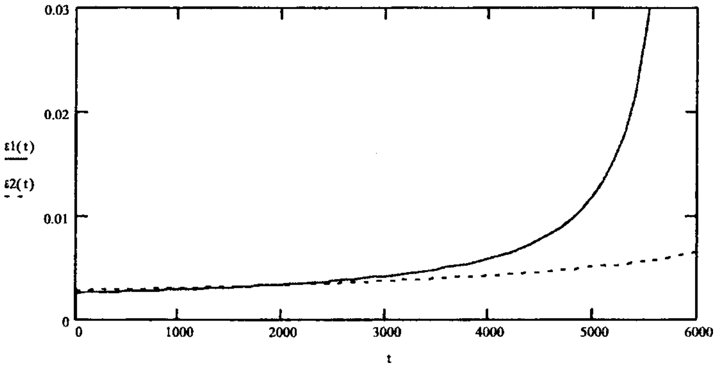

Рис.4. Графики ползучести: ε1(t) — без учета разброса свойств компонентов, ε2(t) — с учетом разброса свойств компонентов

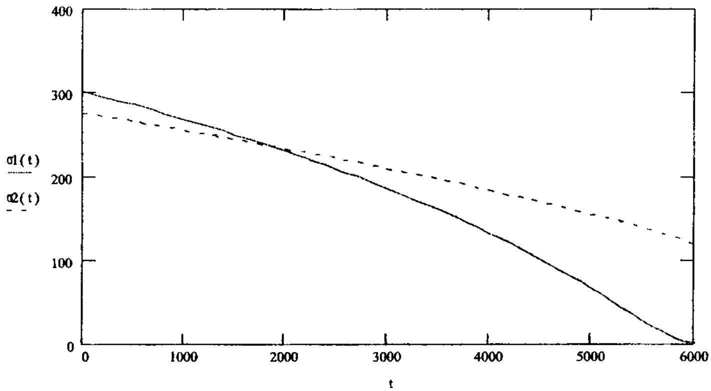

Рис.5. Графики релаксации: σ1(t) — без учета разброса свойств компонентов, σ2(t) — с учетом разброса свойств компонентов

На рис. 2–3 изображены графики зависимостей упругих модулей от времени испытания. Сплошная кривая соответствует идеальному случаю (без разброса свойств), прерывистая- случаю с разбросом свойств компонентов. Второй случай характерен при деградации матрицы и одновременном залечивании пор (например, в условиях ползучести или фазовых превращениях). В результате залечивания пор наблюдается повышение прочностных характеристик композита, о чем также свидетельствуют кривые ползучести и релаксации.

Выводы

1. В результате процесса деградации матрицы происходит уменьшение значений эффективных упругих модулей, при любых значениях разбросов свойств компонентов.

2. Наличие разброса ε_{32} позволяет получить зависимость эффективных упругих модулей от времени, для всех значений cI [0;1]. Для пористой среды без учета ε_{32} самосогласованный метод дает обращение λ_0 в нуль при c(t)=1/2

3. Полученные в работе формулы могут быть использованы для решения задачи по определению разброса ε_{ij} по измеренным и заданным значениям λ_i и с. Эту задачу можно рассматривать как обратную.

4. На основе уравнения типа (7) можно получить системы уравнений для эффективных упругих свойств, распределение материальных коэффициентов подчиняется любым упругим законам распределения, если в пределе взятое распределение переходит в комбинацию d-функций: $f(\lambda) = \sum c_i \delta(\lambda - \lambda_i)$ где, соответственно, расчетные уравнения переходят в известные уравнения n-компонентной среды, получаемые методом самосогласования.

Литература

1. Одинг И.А. Иванова В.С. Теория ползучести и длительной прочности металлов М:1959

2. Журков С.Н. Томашевский Э.Е. Некоторые проблемы прочности твердого тела. М.: АН СССР 1959

3. Качанов Л.М. Основы механики разрушения. М.: Наука 1974

4. Голуб В.П. Романов А.В. К задаче построения нелинейных моделей накопления повреждений при ползучести.//Проблемы прочности 1990, №6

5. Дрозд С.Г. Контактное взаимодействие сферических пар трения с учетом накопления повреждений и изменения физико-механических свойств в поверхностном слое.// Трение и износ,17(1996), № 2,163–169

6. Хорошун Л.П. Маслов Б.П Методы автоматизированного расчета физико-механических постоянных композиционных материалов М:1980