

ТЕХНОЛОГИЯ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

539.43:669.14.018.29

О ПРИМЕНИМОСТИ КИНЕТИЧЕСКОГО УРАВНЕНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ТИПА ДЛЯ РАСЧЕТА МОМЕНТА РАЗРУШЕНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Канд. техн. наук, доц. С.Я. КУРАНАКОВ, д-р техн. наук, проф. Т.П. РАИМБЕРДИЕВ,
канд. физ.-мат. наук С.Г. ЯКОВЧЕНКО

Приводятся результаты экспериментальной проверки кинетического уравнения повреждений энергетического типа, описывающего приближенный расчет на малоцикловую усталость при сложном термомеханическом нагружении. Дается сравнение теоретической и расчетной меры повреждений тонкостенных образцов из сталей 45, 12X18H10T, полученных в условиях одноосного и сложного напряженного состояния, а также нестационарного ступенчатого нагружения.

The results of the experimental checking of kinetic equation of the energy types damages, that present approximate account on the small-cyclic fatigue during compound thermomechanical loading, is given. There is the comparison of the theoretic and desing measure of damage of steel fine-wall specimens 45, 12Cr18Ni10Ti, that has been product in conditions of uniaxial and compound stressed states and unstationary step-by-step loading.

Некоторые элементы современных машин и установок в энергетическом и транспортном машиностроении, в авиационной и ряде других отраслей промышленности подвергаются повторно-переменному нагружениям, уровень которых вызывает их упругопластическое деформирование. Кроме того, они подвергаются термомеханическому и нестационарному нагружению, что значительно влияет на процессы деформирования и их долговечность. В условиях малоцикловой усталости долговечность элементов конструкций связана с возникновением и накоплением в них усталостных повреждений.

Процесс разрушения любого материала протекает в течение определенного времени и, как правило, разбивается на две стадии: стадию развития повреждений, рассеянных (диссеминированных) по множеству микроскопических объемов, и стадию роста одной или ряда магистральных трещин, приводящих к разрушению сплошности тела и в дальнейшем к его полному разрушению [1]. В зависимости от материала, условий термомеханического нагружения и характера напряженного состояния относительная продолжительность этих стадий и их общая продолжительность могут быть различными.

Феноменологическое описание стадии рассеянных повреждений основывается на представлении о поврежденности как особом механическом состоянии элемента сплошной среды, подобном, например, деформационному состоянию этого элемента. Аналитические зависимости для описания диссеминированных повреждений могут либо вытекать из физических соображений, либо должны строиться на некоторых механических моделях процесса длительного разрушения. В самом общем случае можно указать три основных типа таких моделей: силовые, деформационные и энергетические. Преимущество энергетической модели разрушения заключается в широких возможностях обобщения на сложное напряженное состояние и самые различные режимы нагружения.

Для описания процесса накопления усталостных повреждений материалов используются различные варианты кинетических уравнений, которые требуют проверки при сложных термомеханических нагружениях.

Теоретическую меру повреждения Π удобней нормировать в пределах $0 \leq \Pi \leq 1$, причем условие $\Pi = 0$ соответствует неповрежденному материалу, а $\Pi = 1$ — его разрушению.

В [1—4] используется энергетическое уравнение повреждений, позволяющее проводить расчеты как при линейном, так и при сложном напряженном состоянии. Полная мера повреждений Π определяется по уравнению

$$\Pi(N) = \frac{\sigma_{\max}}{\bar{\sigma}_p} + \sum_{k=1}^n \varphi \left(\frac{\omega_k}{\omega_p} \right) N_k + \sum_{k=1}^n f \left(\frac{\Omega_k}{\omega_p} \right) N_k, \quad (1)$$

где σ_{\max} — максимальное за период цикла напряжение; $\bar{\sigma}_p$ — истинное сопротивление разрыву; n — число ступеней (блоков) нагружения; N_k — число циклов в k -ом блоке; ω_k — площадь петли пластического гистерезиса; Ω_k — работа односторонне накопленной пластической деформации; ω_p — площадь под кривой статического разрушения.

Экспериментальной базой для определения функциональных параметров уравнения служат обычные кривые усталости, полученные в условиях линейного напряженного состояния (растяжение—сжатие).

Уравнение (1) основано на допущении, что повреждение малоциклового усталости зависит, с одной стороны, от необратимой работы циклического деформирования элемента материала, а с другой стороны, от работы односторонне накапливающейся пластической деформации, если такое накопление имеет место. Кроме того, в расчеты вводится третий вид обратимых повреждений, которые появляются с приложением растягивающих повреждений и снимаются при их удалении.

В ряде случаев при проведении экспериментов на образцах из некоторых материалов наблюдается интенсивное накопление пластической деформации, в особенности до периода стабилизации диаграмм деформирования. В связи с этим предлагается следующая модификация уравнения (1):

$$\Pi(N) = \frac{\sigma_{\max}}{\bar{\sigma}_p} + \sum_{k=1}^n \varphi \left(\frac{\omega_k}{\omega_p} \right) N_k + \sum_{k=1}^n f \left(\frac{(\sum \Omega)_k}{\omega_p} \right), \quad (2)$$

где $(\sum \Omega)_k$ — суммарная работа односторонне накопленной пластической деформации в k -ом блоке за все циклы N_k .

Учет начальной пластической деформации (смещение петли пластического гистерезиса) особенно важен при наличии постоянных составляющих компонентов напряжений.

Параметры уравнения (2) при нестационарных (блочных) изотермических режимах нагружения (в блоках нагружения температура $T = \text{const}$) зависят от температуры, поэтому (2) предлагается использовать в виде

$$\Pi(N) = \frac{\sigma_{\max}(N)}{\bar{\sigma}_p(T)} + \sum_{k=1}^n \varphi \left(\frac{\omega_k}{\omega_p}, T_k \right) N_k + \sum_{k=1}^n f \left(\frac{(\sum \Omega)_k}{\omega_p}, T_k \right). \quad (3)$$

Проведение опытов при заданных значениях истинных напряжений на образцах некоторых сталей, например на стали 12Х18Н10Т, показало, в отличие от распространенного мнения, отсутствие одностороннего накопления деформации, включая несимметричные циклы нагружения. Таким образом, при постоянстве максимальных и минимальных за период цикла истинных напряжений уравнение повреждений (3) упрощается

$$\Pi(N) = \frac{\bar{\sigma}_{\max}(N)}{\bar{\sigma}_p(T)} + \sum_{k=1}^n \varphi\left(\frac{\omega_k}{\omega_p}, R_k, T_k\right) N_k, \quad (4)$$

где $\varphi\left(\frac{\omega_k}{\omega_p}, R_k, T_k\right)$ — та же функция, что и (3), но относящаяся к различным коэффициентам асимметрии.

В условиях сложного термомеханического нагружения (4) принимает вид

$$\Pi(N) = \frac{\bar{\sigma}_{\max}(N)}{\bar{\sigma}_p(T)} + \sum_1^N \varphi\left(\frac{\omega(T)}{\omega_p(T)}, R_k, T_k\right) \quad (5)$$

Для нестационарного термомеханического нагружения имеем

$$\Pi(N) = \frac{\bar{\sigma}_{\max}(N)}{\bar{\sigma}_p(T)} + \sum_{k=1}^n \sum_1^N \varphi\left(\frac{\omega(T)}{\omega_p(T)}, R_k, T_k\right), \quad (6)$$

где n — число ступеней (блоков) нагружения; k — номер блока; N — число циклов в одном блоке.

Кинетическое уравнение повреждений (5) является результатом обобщения рассмотренных выше уравнений (3) и (4) и может описывать поврежденность в общих случаях термомеханического нагружения.

Для проверки предложенных кинетических уравнений повреждений (3), (5) и (6) было проведено несколько серий опытов на образцах из сталей 45, 12X18H10T в условиях линейного (растяжение-сжатие) и сложного (растяжение—сжатие с одновременным кручением) напряженного состояния, а также термомеханического нагружения. Используемое экспериментальное оборудование, методика проведения испытаний, применяемые образцы подробно описаны в [5].

Первая серия из четырех опытов на образцах из стали 45 заключалась в следующем. Трубчатые образцы испытывались в условиях растяжения—сжатия и нестационарного ступенчатого (от двух до пяти ступеней) нагружения, а также чередования нормальных (293 К) и повышенных (673 К) температур (внутри блока температура оставалась постоянной). Поврежденность, рассчитанная по (3), на момент фактического разрушения образцов (появление сквозной макротрещины) составила от 0,979 до 1,192.

Вторая серия, состоящая из шести опытов и проведенная на образцах из стали 12X18H10T, соответствовала следующим условиям. Образцы подвергались стационарному растяжению—сжатию, при этом температура плавно изменялась от 293 до 693 К и обратно. Один температурный цикл отвечал примерно 310 циклам механического нагружения. Поврежденность, рассчитанная по (5), составила от 0,776 до 0,986.

В третьей серии из восьми опытов испытывались образцы из стали 12X18H10T в условиях растяжения—сжатия с одновременным кручением. Температура изменялась таким же образом, как и при проведении второй серии опытов. Интенсивность максимального нормального напряжения $\sigma_{i \max}$ оставалась постоянной до момента разрушения образцов. Отношение касательного напряжения к нормальному составляло $k = \tau_{xy}/\sigma_{xx} = 0,77$. Режимы нагружения и результаты расчетов поврежденности представлены в табл. 1.

Четвертая серия из четырех опытов проводилась на образцах из стали 12X18H10T в условиях растяжения—сжатия с одновременным кручением. Температура изменялась

таким же образом, как и при проведении второй и третьей серий опытов. Интенсивность максимального нормального напряжения изменялась ступенчатым образом. Отношение напряжений составляло $k = 0,77$. Режимы нагружения и результаты расчетов поврежденности представлены в табл. 2.

Таблица 1

Результаты экспериментов и расчета меры повреждений при стационарном сложном термомеханическом нагружении (сталь 12Х18Н10Т)

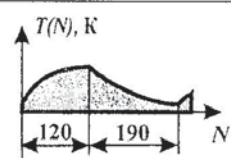
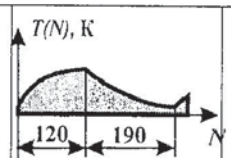
Номер опыта	σ_{xx} , МПа $R = -1$	$\tau_{x\theta(\theta x)}$, МПа $R = -1$		$\sigma_{i \max}$, МПа	N_p , цикл	Поврежденность по (5)
11	242	187	293↔673	405	81	0,816
12	224	173	293↔673	373	135	0,950
13	209	161	293↔673	348	156	0,868
14	190	147	293↔673	320	462	0,964
15	190	147	293↔673	320	493	0,966
16	183	141	293↔673	300	866	0,880
17	198	152	293↔673	330	340	0,832
18	211	162	293↔673	351	143	0,854

Таблица 2

Результаты опытов и расчета меры повреждений при нестационарном сложном термомеханическом нагружении (сталь 12Х18Н10Т)

Номер опыта	Номер ступени	σ_{xx} , МПа $R_\sigma = -1$	$\tau_{x\theta(\theta x)}$, МПа $R_\tau = -1$		$\sigma_{i \max}$, МПа	N_k , цикл	Поврежденность по (6)
19	I	183	141	293↔673	300	310	0,932
	II	198	152	293↔673	330	120	
20	I	190	147	293↔673	320	160	0,862
	II	190	147	673 (const)		74	
21	I	190	147	293↔673	320	120	0,902
	II	190	147	673 (const)		174	
22	I	183	141	293↔673	330	120	1,066
	II	183	141	673 (const)		300	
	III	183	141	293↔673		190	
	IV	183	141	293↔673		120	
	V	183	141	673(const)		17	

Расчетные значения меры повреждений при термомеханическом нагружении стали 12Х18Н10Т, в основном (кроме опыта № 22), получились меньше единицы, причем наибольшее расхождение достигало 22,4 % от единицы. Это расхождение можно объяснить тем, что функция φ в (5) или (6) определялись из опытов при заданных истин-

ных напряжениях. Между тем опыты при сложном термомеханическом нагружении из-за некоторой сложности постановки эксперимента проводились при заданных условных напряжениях. При этом режимы нагружения задавались таким образом, чтобы избежать сильного накопления пластической деформации в первых циклах нагружения.

На рис. 1 представлено рассеивание расчетной меры повреждений для случая термомеханического нагружения сталей 45 и 12Х18Н10Т.

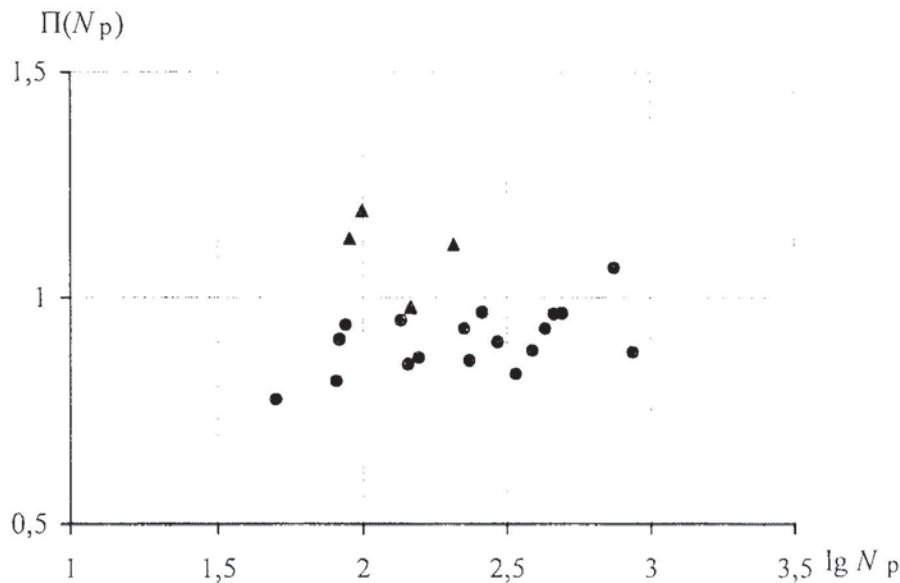


Рис. 1. Результаты расчета повреждений при неизотермических (сталь 45) и термомеханических (сталь 12Х18Н10Т) режимах нагружения: ▲ — опыты № 1—4 (сталь 45); ● — опыты № 5-22 (сталь 12Х18Н10Т)

Полученные результаты расчетов мер повреждений для условий сложного нагруженного состояния и термомеханического нагружения удовлетворительно согласуются с опытными данными. Отсюда следует, что кинетические уравнения (3), (5) и (6) вполне приемлемы для расчета повреждений в общем случае термомеханического нагружения, если только отсутствуют деформации высокотемпературной ползучести.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Павлов П. А. Основы инженерных расчетов элементов машин на усталость и длительную прочность. — Л.: Машиностроение, 1988. — 252 с.
2. Конев А. И., Павлов П. А., Павлова О. Н. Применение энергетической модели усталостного разрушения к расчетам при сложном циклическом напряженном состоянии // Прикладные проблемы прочности и пластичности. — Горький, 1983. — С. 10—17.
3. Пенкин А. Н. Энергетическое уравнение малоцикловых усталостных повреждений при сложном напряженном состоянии. — Л., 1984. — 13 с. — Деп. в ВИНТИ 09.07.84, № 4863-84.
4. Павлов П. А., Раимбердиев Т. П., Пенкин А. Н. Малоцикловая усталость при сложном напряженном состоянии и нестационарных циклических нагружениях // Малоцикловая усталость — критерии разрушения и структуры материалов / Тез. докл. 5 Всесоюз. симпозиума. — Волгоград, 1987. — Ч. 2. — С. 38—40.
5. Оборудование и методика проведения испытаний на малоцикловую усталость, ползучесть и длительную прочность при сложном напряженном состоянии / С.Я. Куранаков, Т.П. Раимбердиев, А.С. Белов и др. — Барнаул, 2005. — 31 с. — Деп. в ВИНТИ 16.12.2005, № 1692-В2005.