РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ДОЛГОВЕЧНОСТИ ЖАРОПРОЧНОГО СПЛАВА В УСЛОВИЯХ МАЛОЦИКЛОВОЙ УСТАЛОСТИ И ПОЛЗУЧЕСТИ

С.Я. Куранаков, Л.И. Огородов

Высокотемпературные детали энергетических установок в эксплуатационных условиях находятся под воздействием температуры, статических и циклических нагрузок, возникающих при пусках и остановках агрегатов. Материалы, используемые изготовления таких деталей, должны обеспечивать необходимый ресурс и надежность в эксплуатации. Особые требования предъявляются к материалам лопаточного аппарата газовых турбин. Для обеспечения надежной работы высоконагруженных деталей необходимо знать процессы деформирования и долговечность материалов, используемых для изготовления данных деталей.

Оценка долговечности в условиях малоцикловой усталости и одновременно протекающей ползучести связана с расчетом поврежденности на каждом этапе деформирования и определения числа циклов, а иногда и длины пути пластического деформирования до момента полного разрушения.

Процесс разрушения материалов принято разбивать на две основные стадии: стадию накопления повреждений, диссеминированных по множеству микроскопических объемов, и стадию роста одной или ряда магистральных трещин, приводящих к разрушению сплошности тела [1]. В зависимости от материала, условий термомеханического нагружения и характера напряженного состояния относительные продолжительности стадии развития диссеминированных повреждений и роста одной или ряда магистральных трещин, приводящих к разрушению элемента материала, и их общая продолжительность могут быть различными, причем разница между ними достаточно размыта. В условиях свободных деформаций и при отсутствии концентраторов напряжений стадия роста магистральной трещины непродолжительна по сравнению со стадией диссеминированных повреждений и можно считать, что начало развития магистральной трещины практически совпадает с полным разрушением. В противном случае необходимо рассматривать как стадию диссеминированных повреждений, так и стадию роста магистральной трещины.

Феноменологическое описание стадии диссеминированных повреждений основывается на представлении о поврежденности как особом механическом состоянии элемента сплошной среды в соответствии с некоторыми механическими моделями процесса разрушения.

Для описания процесса усталостного разрушения можно использовать три основных типа моделей. Силовая модель предполагает, что само пребывание элемента материала под напряжением со временем или с числом циклов нагружения приводит к накоплению повреждений независимо от характера протекающих при этом деформационных процессов. Кинетические уравнения силовой модели обладают большой гибкостью и могут отражать многообразие особенностей процесса разрушения. Однако при обобщении этих уравнений на сложное напряженное состояние, особенно в условиях циклического нагружения, возникает необходимость в различных, более или менее произвольных допущениях с введением значительного количества экспериментальных постоянных. Известно, что в случае многоцикловой усталости силовую модель разрушения удается, более или менее успешно, применять при двухпараметрическом напряженном состоянии (растяжение с кручением, изгиб с кручением и т.д.).

Деформационная модель разрушения, широко применяющаяся в условиях малоцикловой усталости, предполагает, что накопление повреждений связано с развитием пластических или вязкопластических деформаций. Для описания многоцикловой усталости кинетические уравнения деформационного типа практически не находят применения.

Энергетическая модель разрушения сводится к утверждению, что для разрушения необходима затрата некоторой определенной величины необратимой работы деформирования. Однако сама по себе данная модель еще недостаточна для прямых инженерных расчетов, так как на накопление повреждений расходуется не вся, а только лишь некоторая эффективная доля необратимой работы деформирования. Энергетическая модель разрушения привлекательна заложенными в нее широкими возможностями обобщений на сложное напряженное состояние и самые различные режимы нагружения.

В общем случае напряженного состояния мера повреждений Π, которая нормируется $0 \le \Pi \le 1$, причем равенство $\Pi = 1$ является условием разрушения, может быть выражена в форме некоторого инварианта тензора повреждений [2]

$$\Pi = \Pi_i + C\Pi_0 , \qquad (1)$$

где $\Pi_i = \sqrt{\frac{2}{3} \cdot \sum_{i,j} \Pi_{ij}^2}$ – интенсивность повреждений;

Π_{ij} – компоненты девиатора;

Π_0 – компоненты шарового тензора напряжений;

С – экспериментально определяемая постоянная (может быть задана на основе допущений).

К кинетическим уравнениям силовой модели относится уравнение, соответствующее принципу линейного суммирования повреждений

$$\Pi = \int_1^N \frac{dN}{N} . \qquad (2)$$

Соответствующее условие разрушения, обычно называемое формулой Бейли, имеет вид [3, 4]

$$\int_1^{N_p} \frac{dN}{N} = 1 . \qquad (3)$$

В работе [5] для расчета диссеминированных повреждений в жаропрочном сплаве на никелевой основе ХН65ВМТЮ (ЭИ893) при нестационарных режимах пропорционального мягкого циклического нагружения с частотами ν_1= 3…5 и ν_2 = 0,25…0,45 цикл/мин в условиях линейного и плоского напряженного состояния при рабочей температуре 800°С применялись феноменологические уравнения накопления повреждений энергетического и силового типов.

Для расчета повреждений малоцикловой усталости $\Pi_ц$ при нестационарных (блочных) режимах нагружения применяется следующее уравнение, разработанное на кафедре сопротивления материалов СПбГПУ, которое учитывает как накопление односторонних вязкопластических деформаций до и после стабилизации петли, так и изменение самой петли гистерезиса [1]:

$$\Pi(N) = \frac{\overline{\sigma}_{\max}(N)}{\overline{\sigma}_p} + \sum_{k=1}^{N} \varphi\left(\frac{\omega_k}{\omega_p}\right) + \sum_{k=1}^{N} f\left(\frac{\Omega_k}{\omega_p}\right) , \qquad (4)$$

где $\overline{\sigma}_{\max}$ – максимальное (главное) напряжение на момент определения повреждения;

$\overline{\sigma}_p$ – истинное сопротивление разрыву;

N – число циклов нагружения;

ω – площадь расчетной петли пластического гистерезиса за цикл;

Ω – работа односторонне накопленной пластической деформации в цикле;

ω_p –площадь под кривой статического разрушения.

Функциональные параметры $\varphi\left(\frac{\omega}{\omega_p}\right)$ и $f\left(\frac{\Omega}{\omega_p}\right)$ находятся из опытов на малоцикловую усталость при линейном напряженном состоянии с использованием кривых малоцикловой усталости, отвечающим 50 %-ной вероятности разрушения. Параметр $\varphi\left(\frac{\omega}{\omega_p}\right)$ определяется по кривой усталости при частоте нагружения 3…5 цикл/мин, когда отсутствует одностороннее накопление вязкопластических деформаций. Второй функциональный параметр $f\left(\frac{\Omega}{\omega_p}\right)$ определяется по кривой усталости при частоте нагружения 0,25…0,45 цикл/мин, когда функция $\varphi\left(\frac{\omega}{\omega_p}\right)$ считается уже известной.

Для описания процесса накопления повреждений при ползучести $\Pi_{пол}$ в условиях сложного напряженного состояния и стационарного нагружения используется известное кинетическое уравнение силового типа, отвечающее принципу линейного накопления повреждений [1, 6]

$$\Pi = \frac{1}{C_0} \exp \frac{\sigma_э}{A_0} \tau , \qquad (5)$$

где $\sigma_э$ – эквивалентное напряжение, которое подбирается из условия совпадения кривых длительной прочности при различных напряженных состояниях в координатах $\sigma_э - \lg \tau_p$;

A_0, C_0 – экспериментальные постоянные.

Анализ наиболее распространенных критериев разрушения показывает, что наиболее приемлемой формой выражения эквивалентного напряжения является та, которая соответствует критерию Г.С. Писаренко – А.А. Лебедева [7] и определяется из соотношения:

$$\sigma_э = \chi \sigma_i + (1-\chi)\sigma_1, \qquad (6)$$

где χ – величина, характеризующая степень участия в макроразрушении сдвиговой деформации, создающей благоприятные условия для разрыхления материала и образования трещин;

σ_1 – главное напряжение;

σ_i – интенсивность напряжений.

На основании (5) и (6) текущая поврежденность при стационарном нагружении и сложном напряженном состоянии определяется следующим образом:

$$\Pi = \frac{1}{C_0}\exp\left(\frac{\chi\sigma_i + (1-\chi)\sigma_1}{A_0}\right)\tau . \qquad (7)$$

В работах [8–10] для описания процесса диссеминированных повреждений в сталях и сплавах использовалось кинетическое уравнение наследственного типа в скалярной форме

$$\Pi = \int_0^\tau \tilde{\sigma}_э(\theta) K(\tau-\theta) d\theta , \qquad (8)$$

где $\tilde{\sigma}_э(\theta)$ – режим изменения приведенного эквивалентного напряжения [8];

$K(\tau-\theta)$ – функция влияния (ядро), определяемая по уравнению статической усталости материала.

В случае малоциклового нагружения появляется возможность использования комбинированного уравнения повреждений, учитывающего повреждения статической и циклической усталости [8],

$$\Pi = \Pi_{ст} + \Pi_{ц} , \qquad (9)$$

в котором полная поврежденность Π к моменту разрушения по-прежнему равна 1. Однако в ряде случаев уравнение (8) оказывается достаточным для проведения расчетов по [9]. При малоцикловом нагружении может быть использовано уравнение вида

$$\Pi = \int_0^\tau \tilde{\sigma}_{э\max}(\theta) L(\tau-\theta) d\theta , \qquad (10)$$

где Π – суммарная поврежденность статической и циклической усталости;

$L(\tau-\theta)$ – функция влияния, определяемая по кривой усталости при данном коэффициенте асимметрии цикла изменения всех компонентов напряжений, данных частоте нагружения и температуре [1, 8, 11].

В работе [12] предложено использовать в случае циклического нагружения полимерных материалов кинетическое уравнение, которое формально можно использовать и для других материалов

$$\Pi = \int_0^N \tilde{\sigma}_{\max}(n) M(N-n) dn , \qquad (11)$$

где в качестве независимой переменной используется число циклов нагружения (при постоянном коэффициенте асимметрии), которое обязательно является целым. Понятие производной условно применимо здесь лишь при достаточно большом числе циклов [1]. Числа циклов N и n должны быть достаточно большими, так как повреждающее действие переходных циклов при нестационарных режимах, разделяющих различные блоки регулярных циклов, как правило, неизвестно. При оценке общей поврежденности такие переходные циклы не принимаются во внимание, что допустимо, если их число мало по сравнению с числом одинаковых регулярных циклов в каждом блоке.

Для проверки эффективности рассмотренных уравнений были проведены две серии опытов на образцах жаропрочного сплава на никелевой основе ХН65ВМТЮ (ЭИ893), широко применяющегося в газотурбостроении, в частности, для изготовления рабочих и направляющих лопаток, а также крепежных деталей газовых турбин. Первая серия соответствовала нестационарному ступенчатому циклическому нагружению, а именно симметричному растяжению-сжатию. Вторая – симметричному растяжению-сжатию с кручением (отношение касательного напряжения к нормальному составляет $\kappa = \tau_{x\theta}/\sigma_{xx} = 0{,}77$), что соответствует плоскому напряженному состоянию.

Для проведения экспериментальных исследований использовалась усовершенствованная испытательная машина УМЭ–10ТМ. Опыты проводились на тонкостенных трубчатых образцах с длиной рабочей части 50 мм, внешним диаметром 18,45 мм и толщиной стенки 1 мм. Температура испытаний составляла 800°С. Все образцы доводились до разрушения, то есть до появления трещины.

Сопоставление полученных расчетных мер повреждений на момент фактического разрушения образцов сплава ХН65ВМТЮ при нестационарных режимах нагружения по кинетическим уравнениям линейного суммирования (2) и (7), энергетического типа (4) и наследственного типа (10) и (11) дает возможность оценить эффективность данных уравнений. Эффективность уравнений оценивается тем, насколько мера Π близка к теоретическому значению 1. Частоты нагружения (ν_1 = 3…5 и ν_2 = 0,25…0,45 цикл/мин) при нестационарных режимах либо чередовались на каждой ступени, либо частота оставалась постоянной, но при этом менялось напряжение $\overline{\sigma}_{\max}$. В случае циклического растяжения-сжатия (первая серия опытов) величины меры повреждений на момент фактического разрушения образцов для серии из восьми нестационарных режимов нагружения (от двух до пяти ступеней в каждом) составляют по уравнению:

(2) 0,626…1,106 со средним арифметическим значением – 0,832;
(4) 0,986…1,051 со средним – 0,998;
(7) 0,619…1,107 со средним – 0,831;
(10) 0,881…1,087 со средним – 0,996;
(11) 0,934…1,086 со средним –0,998.

Режимы нестационарного нагружения и результаты расчета поврежденности в случае сложного напряженного состояния (растяжение-сжатие с кручением) приведены в таблице.

Расчет меры повреждений производился при помощи составленной программы с окончательной выдачей меры повреждений $\Pi(N)$. Результаты расчетов приведены так же в таблице.

Анализ расчетных значений меры повреждений позволяет заключить, что уравнения (2) и (7) линейного суммирования повреждений менее точно, чем уравнения (4), (10), (11), предсказывает момент разрушения. Уравнения энергетического типа (4) и наследственного типа (10) и (11) могут использоваться в расчетной практике, в частности при оценке долговечности элементов конструкций, работающих в условиях сложного циклического нагружения сталей и сплавов при высоких температурах.

В настоящее время сложилось два пути инженерного расчета конструкционных элементов, обеспечивающих достаточно малую вероятность разрушения. В одном из них вводится коэффициент запаса по долговечности n_N. Предполагается, что момент разрушения наступит не в конце установленного срока службы детали, а в конце условного срока, увеличенного по сравнению с действительным в n раз.

Таблица

Результаты испытаний и расчета меры повреждений при плоском напряженном состоянии и симметричном нагружении

Номер		Напряжение, МПа			Частота нагружения*	Число циклов N_k	Расчетная поврежденность в момент разрушения по уравнениям			
режима	ступени	σ_{xx}	$\tau_{x\theta}$ ($\tau_{\theta x}$)	$\sigma_{i\max}$			(2)	(4)	(7)	(11)
9	I	378	291	576,4	ν_1	150	1,248	1,129	1,785	0,953
	II	378	291	576,4	ν_2	41				
10	I	342	263	521,4	ν_2	130	0,830	1,007	1,780	1,019
	II	360	277	548,9	ν_1	110				
	III	330	254	503,2	ν_2	104				
Среднее значение меры повреждений							1,039	1,068	1,783	0,986

Примечание. * ν_1 = 3…5 цикл/мин; ν_2 = 0,25…0,45 цикл/мин

В связи с этим предположением следует считать, что действительный нестационарный режим нагружения должен повториться n раз до момента полного разрушения. Во второй методике расчета, где вводится коэффициент запаса по мере поврежденности n_Π, предполагается, что допустимый срок эксплуатации исчерпывается не при $\Pi = 1$ (условие разрушения элемента конструкции), а при П≤1, равной $1/n$.

Используемые пути расчета не приведут к совпадению результатов. Это связано с тем, что при автоматической экстраполяции заданного эксплуатационного режима на большее число циклов такие явления как одностороннее накопление пластических деформаций, стабилизация петель и следующее за ней разупрочнение не будут повторяться. Однако вероятно при расчете на большие долговечности существенного расхождения результатов расчета в том и в другом случае наблюдаться не должно.

При расчете с введением коэффициентов n_N и n_Π исходные постоянные и функциональные параметры материалов обычно определяются по кривой малоцикловой усталости, отвечающей 50 %-ной вероятности разрушения.

Можно предложить и еще один, третий путь расчета элементов конструкций на заданный режим нагружения, при котором считается, что, как при втором пути расчета, допустимый срок эксплуатации исчерпывается при П≤1. Разница по сравнению со вторым методом состоит в том, что в последнем случае постоянные и функциональные параметры кинетического уравнения повреждений определяются не по кривым 50 %-ной вероятности разрушения, а по кривым усталости, отвечающим некоторой малой вероятности разрушения, например 5 %-ной вероятности разрушения.

Для демонстрации инженерного расчета воспользуемся энергетической моделью разрушения, так как она дает возможность обобщения результатов расчета с простого напряженного состояния на сложное, а также на самые различные режимы нагружения. К тому же меры повреждений, полученные благодаря уравнению (4), наиболее близки к единице.

Для получения таких кривых необходимо в первом приближении сдвинуть экспериментальные кривые 50 %-ной вероятности разрушения в сторону меньших долговечностей на величину, кратную величине основного отклонения корреляционного уравнения этой кривой. При этом желательно учитывать также и тот доверительный интервал на положение действительных кривых усталости (для генеральной совокупности образцов), в пределах которого положение этих кривых может быть достоверно установлено при данном объеме использованной выборки.

Методика расчета функциональных параметров по кривым малой вероятности разрушения не отличается от методики расчета по кривым 50 %-ной вероятности разрушения, хотя поврежденность на один цикл нагружения при использовании кривых малой вероятности разрушения оказывается значительно ниже, чем при расчете по обычным кривым усталости.

Используя заданные кривые малой вероятности разрушения для определения функциональных параметров кинетического уравнения (4), можно считать, что данная вероятность разрушения переходит и на сложные нестационарные режимы нагружения. Условие прочностного сопротивления выразится при этом в указанной выше форме П≤1. Никакого дополнительного коэффициента запаса в это уравнение вводить не требуется.

Если сравнить рассмотренные пути расчета, то практическое преимущество имеет расчет по кривым малой вероятности разрушения по сравнениями с расчетами, в которых задаются коэффициенты запаса по долговечности n_N и по мере поврежденности n_Π. Это связано с тем, что в последних случаях приходится находить расчетную меру повреждений для таких низких уровней напряжений (возможно близких к эксплуатационным), на которых наблюдаются очень большие долговечности.

Построение кривых усталости в области больших долговечностей, во много раз превышающих расчетный срок эксплуатации детали, является очень трудоемкой задачей. Подобные испытания во многих случаях едва ли выполнимы, и обработка их результатов очень затруднительна, так как некоторые образцы могут вообще не разрушиться. Вместе с тем построение кривых малой вероятности разрушения не требуют увеличения базы испытаний по отношению к сроку эксплуатации конструкционного элемента.

В отдельных случаях механический расчет деталей может ограничиваться не сопротивлением материалов разрушением, а недопустимыми деформациями ползучести. Соответствующее условие прочности составляется независимо от предыдущих, причем, как правило, приходится иметь дело не с нормой на относительную деформацию, а с нормой на перемещения, которые находятся по деформациям, в простейшем случае согласно формулам Коши.

В газотурбинных установках вышеуказанные расчеты приходится проводить во многом при оценке конструктивных элементов при пусковых режимах, вызывающих существенные перегрузки всей установки. В случае двигателей самолетов – это режим подъема и посадки тяжелой машины. При нормальных эксплуатационных режимах максимальные расчетные напряжения обычно не превышают предел текучести, в этих условиях мгновенно-пластические деформации отсутствуют, но возможны деформации ползучести, которые накапливаются односторонне и могут принципиально создавать петли гистерезиса из-за различных законов ползучести при растяжении и сжатии.

В общем случае нестационарного циклического термомеханического нагружения и одновременно протекающей ползучести рекомендуется учитывать не только усталостный, но и статический критерий разрушения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Павлов П.А. Основы инженерных расчетов элементов машин на усталость и длительную прочность. – Л.: Машиностроение, 1988. – 252 с.

2. Ильюшин А.А., Победря Б.Е. Основы математической теории термовязко-упругости. – М.: Наука, 1970. – 280 с.

3. Прочность при малоцикловом нагружении. Основы методов расчета и испытания / С.В. Серенсен, Р.М. Шнейдерович, А.П. Гусенков и др. – М.: Наука, 1975. – 286 с.

4. Дульнев Р.А., Котов П.И. Термическая усталость металлов. – М.: Машиностроение, 1980. – 200 с.

5. Куранаков С.Я. Исследование малоцикловой усталости жаропрочного сплава при нестационарном изотермомеханическом нагружении // Ползуновский вестник. – 2003. – № 1–2. – С. 154–157.

6. Павлов П.А., Курилович Н.Н. Длительное разрушение жаропрочных сталей при нестационарном нагружении // Проблемы прочности. – 1988. – № 2. – С. 44–47с.

7. Писаренко Г.С. Лебедев А.А. Деформирование и прочность материалов при сложном напряженном состоянии. – Киев: Наукова думка, 1976. – 416 с.

8. Павлов П.А., Огородов Л.И. Длительное сопротивление материалов с наследственными свойствами // Длительное сопротивление конструкционных материалов и вопросы расчета элементов конструкций: Межвуз. сб. – Вологда: ВоПИ, 1991. – С. 4–10.

9. Павлов П.А., Белов А.С., Огородов Л.И. Поврежденность сплава ХН65ВМТЮ при блочном режиме нагружения // Прогнозирование механического поведения материалов. – Новгород, 1991.– Т. 2. – С. 84–93.

10. Курилович Н.Н., Огородов Л.И., Павлов П.А. Оценка накопления повреждений в сталях с помощью силовых уравнений наследственного типа // Весці Акадэміі навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 1992. – №. 4. – С. 34–39.

11. Куранаков С.Я., Огородов Л.И. О применимости уравнения повреждений наследственного типа для расчета момента разрушения сплава ЭИ-893 // Прочность и живучесть конструкций: Тез. докл. всерос. науч.-техн. конф. – Вологда, 1993. – С. 146–147.

12. Щербаков В.И. Исследование закономерностей накопления повреждений в полимерных материалах на примере поливинилхлорида: Автореф. дис…канд. техн. наук. – Л., 1977. – 19 с.