

ИССЛЕДОВАНИЕ МАЛОЦИКЛОВОЙ УСТАЛОСТИ ЖАРОПРОЧНОГО СПЛАВА ПРИ НЕСТАЦИОНАРНОМ ИЗОТЕРМИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

С.Я. Куранаков

Надежность работы газовых турбин в значительной степени зависит от работоспособности их лопаточного аппарата. Лопатки энергетических установок работают в условиях малоциклового усталости (пуск-остановка) и высоких температур. Кроме того, они подвергаются нестационарному нагружению, что существенно влияет на процессы деформирования и их долговечность.

Оценка долговечности в условиях усталости при малом числе циклов нагружения связана с двумя задачами. Первая задача - построение зависимости между напряжениями и деформациями для идентификации петель макропластического гистерезиса и длины пути одностороннего пластического деформирования. Вторая задача - расчет поврежденности на каждом этапе деформирования и определение числа циклов, а иногда и длину пути пластического деформирования до момента полного разрушения. Обе задачи в настоящее время решаются достаточно удовлетворительно в случае линейного и сложного напряженных состояний при склерономном деформировании. Однако при наличии деформаций ползучести, сопровождающих склерономные пластические деформации, эти задачи в настоящее время полностью не решены.

В данной работе рассматривается построение рационального варианта инженерного расчета на малоцикловую усталость жаропрочного сплава при сложном напряженном состоянии и нестационарном изотермомеханическом нагружении с учетом влияния деформаций ползучести.

Для описания процесса накопления повреждений при ползучести в условиях линейного напряженного состояния и стационарного нагружения используется известное кинетическое уравнение силового типа, отвечающее принципу линейного накопления повреждений [1-3]

$$\frac{d\Pi}{d\tau} = f(\sigma), \quad (1)$$

где Π - текущая поврежденность ($0 \leq \Pi \leq 1$).

Функциональный параметр $f(\sigma)$ определяется по уравнению кривой длительной прочности при линейном растяжении, построенной в координатах: истинные напряжения – логарифм времени до разрушения. Функция, отражающая влияние напряжений, выражается в виде

$$f(\sigma) = \frac{1}{C_0} \exp \frac{\sigma}{A_0}, \quad (2)$$

где A_0, C_0 - экспериментальные данные.

Таким образом, текущая поврежденность вычисляется по формуле

$$\Pi = \int_0^{\tau} \frac{1}{C_0} \exp \frac{\sigma}{A_0} d\tau, \quad (3)$$

Предполагается, что при знакопеременном нагружении в полцикле сжатия повреждения не накапливаются.

В случае сложного напряженного состояния уравнение (1) обобщается в виде

$$\frac{d\Pi}{d\tau} = f(\sigma_s), \quad (4)$$

где σ_s - эквивалентное напряжение, которое подбирается из условия совпадения кривых длительной прочности при различных напряженных состояниях в координатах $\sigma_s - \lg \tau_p$.

Функция $f(\sigma_s)$ при этом имеет форму

$$f(\sigma) = \frac{1}{C_0} \exp \frac{\sigma_s}{A_0}, \quad (5)$$

Анализ наиболее распространенных критериев разрушения показывает, что наиболее приемлемой формой выражения эквивалентного напряжения является та, которая соответствует критерию Писаренко-Лебедева [4] и определяется из соотношения

$$\sigma_s = \chi \sigma_i + (1 - \chi) \sigma_1, \quad (6)$$

ИССЛЕДОВАНИЕ МАЛОЦИКЛОВОЙ УСТАЛОСТИ ЖАРОПРОЧНОГО СПЛАВА ПРИ НЕСТАЦИОНАРНОМ ИЗОТЕРМИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

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

На основании (5) и (6) условие разрушения при стационарном нагружении и сложном напряженном состоянии запишется следующим образом:

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

где σ_1 - главное напряжение, σ_i - интенсивность напряжений.

Для построения кривых ползучести в уравнение механических состояний вводится параметр поврежденности. Величиной Π характеризуется прогрессирующее разрыхление материала. Скорость деформации ползучести определяется их выражения

$$\dot{\varepsilon}(\tau) = f\left(\frac{\sigma(\tau)}{\sigma_*}\right) \cdot \varphi[\Pi(\tau)], \quad (8)$$

причем для определения функции $\varphi[\Pi(\tau)]$ необходимо задаться кинетическим уравнением повреждений. В нашем случае используется уравнение силового типа (3).

Уравнение (8) позволяет описывать в приемлемой форме процесс вязкопластического деформирования до момента полного разрушения.

В случае плоского напряженного состояния (растяжение с кручением) для описания кривых ползучести используется выражение для определения скорости интенсивности вязкопластической деформации

$$\dot{\varepsilon}_i = f\left(\frac{\sigma_i(\tau)}{\sigma_{i*}}\right) \cdot \varphi[\Pi(\tau)]. \quad (9)$$

При длительном циклическом нагружении относительная деформация при линейном напряженном состоянии равна сумме трех составляющих

$$\varepsilon = \varepsilon^{(my)} + \varepsilon^{(mn)} + \varepsilon^{(en)}, \quad (10)$$

где $\varepsilon^{(my)}$ - мгновенноупругая составляющая, $\varepsilon^{(mn)}$ - мгновеннопластическая (склерономная) составляющая, $\varepsilon^{(en)}$ - вязкопластическая (реономная) составляющая.

Уравнение (10) можно представить следующим образом

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + e^{\frac{\sigma - \sigma_m - K}{L}} + \int_0^\tau f\left(\frac{\sigma(\theta)}{\sigma}\right) \varphi[\Pi(\theta)] d\theta. \quad (11)$$

Вязкопластическая составляющая $\varepsilon^{(en)}$ не только влияет на петлю макропластического гистерезиса, но также приводит к одностороннему накоплению вязкопластических деформаций.

При сложном напряженном состоянии и пропорциональном нагружении уравнение (11) принципиально обобщается в виде

$$e_{ij} = \frac{1+\nu}{E} S_{ij} + \frac{3}{2} e^{\frac{\sigma - \sigma_m - K}{L}} \cdot \frac{S_{ij}}{\sigma_i} + \frac{3}{2} \int_0^\tau f\left(\frac{\sigma_i}{\sigma_{i*}}\right) \cdot \varphi[\Pi(\theta)] \frac{S_{ij}}{\sigma_i} d\theta, \quad (12)$$

где S_{ij} - компоненты девиатора напряжений, e_{ij} - компоненты девиатора деформаций, ν - коэффициент Пуассона.

Для расчета диаграмм циклического деформирования разработана программа, позволяющая строить диаграммы для каждой компоненты девиатора напряжений S_{ij} .

Для расчета повреждений малоциклового усталости (Π_{ycm}) при нестационарных (блочных) режимах нагружения применяется следующее уравнение, разработанное на кафедре сопротивления материалов СПбГТУ, которое учитывает как накопление односторонних вязкопластических деформаций до и после стабилизации петли, так и изменение самой петли гистерезиса [2]

$$\Pi(N) = \frac{\bar{\sigma}_{\max}(N)}{\bar{\sigma}_p} + \sum_{\kappa=1}^N \varphi\left(\frac{\omega_\kappa}{\omega_p}\right) + \sum_{\kappa=1}^N f\left(\frac{\Omega}{\omega_p}\right), \quad (13)$$

где $\bar{\sigma}_{\max}$ - максимальное (главное) напряжение на момент определения повреждения, $\bar{\sigma}_p$ - 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.

Функциональный 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.

В случае сложного напряженного состояния величины ω и Ω определяются как суммы их значений по всем компонентам девиатора напряжений за цикл, то есть

$$\omega = \sum_{i,j} \omega_{ij}, \quad \Omega = \sum_{i,j} \Omega_{ij}. \quad (14)$$

Для проверки кинетического уравнения повреждений (13) были проведены эксперименты на малоцикловую усталость сплава ХН65ВМТЮ (ЭИ893) при линейном и плоском напряженном состоянии в условиях стационарного и нестационарного пропорционального нагружения, а также рабочей для данного сплава температуре 800⁰ С (табл. 1 и 2).

Таблица 1
Результаты испытаний и расчета меры повреждений при ступенчатых режимах симметричного нагружения в условиях линейного напряженного состояния (партия образцов № 1)

№ опыта	№ ступени	$\bar{\sigma}_{\max}$, МПа	Частота нагружения*	N_k , цикл	Поврежденность			
					Π_1	$\Pi_2^{(k)}$	$\Pi_3^{(k)}$	$\Pi(N_p)$
1	I	600	ν_1	25	0,930	0,026	0,007	1,002
	II	600	ν_2	19		0,021	0,018	
2	I	600	ν_2	19	0,930	0,020	0,023	0,999
	II	600	ν_1	23		0,025	0,001	
3	I	550	ν_2	50	0,899	0,035	0,035	1,003
	II	580	ν_1	36		0,033	0,001	
4	I	580	ν_1	36	0,853	0,032	0,006	0,938
	II	550	ν_2	34		0,024	0,023	
5	I	570	ν_2	25	0,884	0,020	0,023	1,014
	II	570	ν_1	25		0,021	0,001	
	III	570	ν_2	25		0,021	0,017	
	IV	570	ν_1	25		0,021	0,001	
	V	570	ν_2	3		0,003	0,002	
6	I	550	ν_2	50	0,899	0,035	0,035	0,989
	II	580	ν_2	12		0,011	0,009	
7	I	580	ν_2	30	0,853	0,027	0,028	0,986
	II	550	ν_2	58		0,042	0,036	
8	I	500	ν_2	60	0,884	0,028	0,030	1,051
	II	540	ν_2	30		0,019	0,017	
	III	570	ν_2	46		0,039	0,034	

* $\nu_1 = 3-5$ цикл/мин; $\nu_2 = 0,25-0,45$ 5 цикл/мин

**ИССЛЕДОВАНИЕ МАЛОЦИКЛОВОЙ УСТАЛОСТИ ЖАРОПРОЧНОГО СПЛАВА
ПРИ НЕСТАЦИОНАРНОМ ИЗОТЕРМИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ**

Расчет производился при помощи составленной программы с окончательной задачей меры повреждений $P(N)$. Результаты расчетов приведены так же в таблицах 1 и 2.

В условиях линейного напряженного состояния и нестационарного нагружения (испытание на образцах первой партии менее пластичного состояния материала) преобладает малоцикловая усталость. Для этой партии образцов на момент фактического разрушения $P_{пол} = 0,171 \div 0,597$, а $P_{уст} = 0,938 \div 1,051$ (вместо теоретического значения 1) (табл. 1). В условиях плоского напряженного состояния и стационарного нагружения при частоте 0,25-0,45 цикл/мин (испытание на образцах второй партии более пластичного состояния материала) преобладает статическая усталость. На момент, когда $P_{пол} = 1$ согласно расчету получается $P_{уст} = 0,836 \div 0,959$ (табл. 2).

Таким образом, сравнение данных расчета с имеющимися экспериментальными

данными позволяет сделать вывод о том, что расчет по статической усталости является консервативным. В общем случае следует рекомендовать проведение расчета одновременно по обоим условиям длительного разрушения, причем определяющим будет то условие, которое предсказывает более раннее разрушение.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бронз В.Х. Высокотемпературная ползучесть и длительное разрушение конструкционного жаропрочного сплава при сложном термомеханическом нагружении: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Л., 1982. – 16 с.
2. Павлов П.А. Основы инженерных расчетов элементов машин на усталость и длительную прочность. – М: Машиностроение, 1988.–252 с.
3. Павлов П.А., Курилович Н.Н. Длительное разрушение жаропрочных сталей при нестационарном нагружении // Проблемы прочности. 1988. - № 2. – С. 44-47с.
4. Писаренко Г.С. Лебедев А.А. Деформирование и прочность материалов при сложном напряженном состоянии. – Киев: Наукова думка, 1976. – 416 с.

Таблица 2

Результаты испытаний и расчета меры повреждений при плоском напряженном состоянии и симметричном нагружении (партия образцов № 2)

№ опыта	№ ступени	σ_{xx} , МПа	$\tau_{x\theta}$ ($\tau_{\theta x}$), МПа	$\sigma_{i\max}$, МПа	Частота нагружения*	N_k , цикл	Поврежденность			
							P_1	$P_2^{(k)}$	$P_3^{(k)}$	$P(N_p)$
9	-	366	282	610	ν_1	423	0,701	0,630	0,013	1,344
10	-	342	263	570	ν_1	597	0,656	0,517	0,011	1,184
11	-	324	249	540	ν_1	684	0,621	0,400	0,009	1,030
12	-	324	249	540	ν_1	926	0,621	0,541	0,009	1,171
13	-	312	240	520	ν_1	911	0,598	0,405	0,007	1,010
14	-	300	231	500	ν_1	1397	0,575	0,480	0,006	1,061
15	-	378	291	630	ν_2	41	0,724	0,081	0,081	0,836
16	-	360	277	600	ν_2	111	0,690	0,147	0,026	0,863
17	-	342	263	570	ν_2	233	0,655	0,209	0,055	0,919
18	-	336	259	560	ν_2	296	0,644	0,234	0,052	0,930
19	-	324	249	540	ν_2	470	0,621	0,285	0,053	0,959
20	I	378	291	630	ν_1	150	0,724	0,290	0,020	1,129
	II	378	291	630	ν_2	41		0,083	0,012	
21	I	342	263	570	ν_2	130	0,633	0,116	0,032	1,007
	II	360	277	600	ν_1	110		0,143	0,001	
	III	330	254	550	ν_2	104		0,071	0,011	

* $\nu_1 = 3-5$ цикл/мин; $\nu_2 = 0,25-0,45$ 5 цикл/мин