

ИНЖЕНЕРНЫЕ РАСЧЕТЫ КОНСТРУКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ДОЛГОВЕЧНОСТЬ ПРИ МАЛОЦИКЛОВОЙ УСТАЛОСТИ С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ

Т.П.Раимбердиев, А.И.Айнабеков, А.А.Джумабаев,
Ш.Т.Ешимбетов, Р.А.Шупакова
МКТУ им.А.Яссави, г.Туркестан,
ЮКГУ им.М.Ауезова, г.Шымкент

Ряд деталей машин и механизмов работают в условиях высоких температур, что существенно влияет на их долговечность. В работе представлены инженерные расчеты по механическим свойствам элементов конструкции при высоких температурах, в том числе при циклических нагружениях и нагревах.

Опыты на малоцикловую усталость при повышенных температурах показали необходимость учета частотно-временных факторов, что было сделано Эккелем [1] в виде:

$$\nu^k t_p = f(\Delta \varepsilon_p) = \text{const}$$

или

$$\nu^k t_p = \nu^k p \frac{N}{\nu} = N_p^{k-1} \nu, \quad (1)$$

где ν - частота, цикл/мин, t_p - время до разрушения, k - константа, зависящая только от температуры.

Опираясь на уравнение (1), Коффин [2] предложил зависимость

$$(N_p \nu^{k-1})^m \Delta \varepsilon^{(p)} = C. \quad (2)$$

Последующие исследования привели к необходимости непосредственного учета не только циклического, но и статического повреждения в цикле, установлению закономерностей поциклового накопления и суммирования статического и циклического повреждений.

В своих работах Фрейденталь, Робинзон, Мэнсон и другие предложили уравнение простого суммирования в виде:

$$\frac{t}{t_p} + \frac{N_p^{II}}{N_p^I} = 1, \quad (3)$$

где t - время накопления статического повреждения, t_p - время до разрушения, возникающего только от статического повреждения, N_p^{II} - число циклов до разрушения при испытании с циклами заданной длительности, N_p^I - число циклов до разрушения при испытании с циклами пилообразной формы.

Д. Вуд [3], Т.Екобори [4] и другие авторы показали, что правильнее суммировать доли повреждения при изотермическом малоцикловом нагружении по степенному закону

$$\left(\frac{t}{t_p} \right)^\alpha + \left(\frac{N_p^{II}}{N_p^I} \right)^\beta = 1, \quad (4)$$

который выражает условие в циклах следующим образом:

$$\left[N_p \left(\frac{\Delta \varepsilon^{(p)}}{C} \right)^{1/m} + \frac{1}{\nu^{k-1}} \right]^\beta + \left[N_p \frac{(E \Delta \varepsilon_a)^\gamma}{C_i K_1 \nu} \right] = 1, \quad (5)$$

где m и C – постоянные кривой малоциклового усталости по Коффину, γ и C_1 – постоянные кривой длительной прочности, α, β, γ – постоянные, зависящие от материала и температуры испытания, K_1 – коэффициент приведения цикла.

В предыдущих расчетных уравнениях циклы разной длительности (с разными выдержками при максимальной температуре) создают различную статическую повреждаемость. Однако при разделении общей повреждаемости на циклическую и статическую (3) и (5) учет частоты нагружения в этом смысле уже не является необходимым. В связи с этим часто отдают предпочтение деформационно-кинетическому уравнению. Этот подход получил дальнейшее развитие в работах А.П.Гусенкова, Р.М.Шнейдеровича [5], когда влияние временного эффекта выражено сильно. Согласно этим работам,

$$\sum_{k=0}^{N_p} \frac{\delta_k}{\varepsilon_u(t)} + 2^{1/m} \int_1^{N_p} \left[\frac{\Delta \varepsilon^{(p)}}{\varepsilon_u(t)} \right]^{1/m} dN = 1. \quad (6)$$

На рисунке 1 приведены некоторые данные по экспериментальной проверке уравнения (6) для материалов 12X18H9T, 12X18H10T, ХН60ВТ при температурах 293, 823, 923, 973 К [5,6].

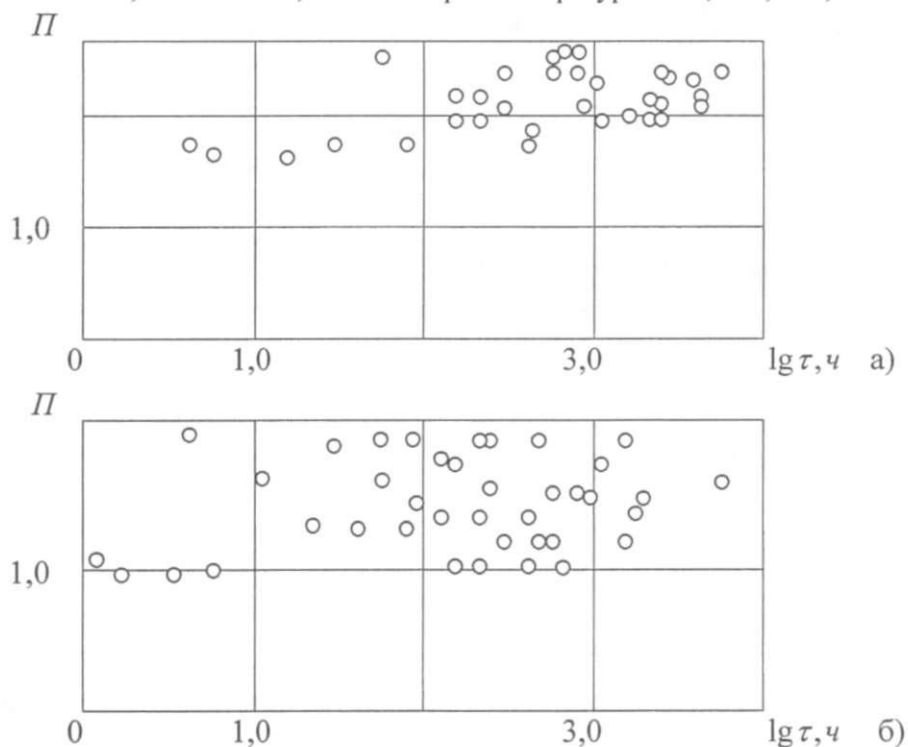


Рисунок 1 - Распределение повреждения по долговечности (а) и в зависимости от времени до разрушения (б) при различных режимах малоциклового изотермического нагружения

Разброс накопленного суммарного повреждения - Π для всех рассмотренных режимов нагружения находится в пределах 0,5–1,5, что соответствует разбросу экспериментальных данных. При неизотермических условиях критериальное уравнение может быть записано в виде [6]:

$$\int_0^{\delta_p} \frac{d\delta}{\varepsilon_u(t, T_{var})} + \int_1^{N_p} \frac{dN}{N_i(t, T_{var})} = 1, \quad (7)$$

где $N_i(t, T_{var})$ определяется из кривой усталости с учетом времени деформирования и формы цикла нагрева, δ_p – односторонне накопленная деформация в момент разрушения, $\varepsilon_u(t, T_{var})$ – располагаемая пластичность при монотонном нагружении в неизотермических условиях.

Вышеуказанные уравнения не позволяют дать достаточной оценки поврежденности, в связи с чем предлагается следующее кинетическое уравнение повреждений:

$$\Pi(N) = \frac{\bar{\sigma}_{\max}(N)}{\sigma_p(T)} + \sum_{\rho=1}^n \varphi\left(\frac{\omega_k}{\omega_\rho}, R_k, T_k\right) N_k \quad (8)$$

Здесь: $\varphi\left(\frac{\omega_k}{\omega_\rho}, R_k, T_k\right) N_k$ - функциональный параметр, определяемый из кривых усталос-

ти при линейном напряженном состоянии в условиях разных температур и коэффициентов асимметрии. Графики функции φ для стали 12X18H10T приведены на рисунке 2. $\bar{\sigma}_{\max}(N)$ - расчетное значение максимального главного напряжения, которое определяется в зависимости от вида напряженного состояния из условия постоянства объема, σ_p - истинное сопротивление статического разрыва.

Влияние температуры на второе слагаемое уравнения (8) не носит наследственного характера. Поэтому, разбивая график изменения температуры во времени на небольшие ступени, мы можем вычислить пластические деформации на каждой ступени в отдельности. При этом общая поврежденность будет равна сумме поврежденностей на отдельных температурных ступенях.

В результатах опытов, приведенных в таблице 1, на термомеханическое нагружение один температурный период отвечал приблизительно 310 циклам механического нагружения, то есть на каждом цикле механического нагружения $T = \text{const}$. Из кривых малоциклового усталости при разных постоянных температурах определялись соответствующие выражения функции φ . Эти функции аппроксимируются степенной зависимостью вида:

$$\varphi\left(\frac{\omega}{\omega_\rho}\right) = a\left(\frac{\omega}{\omega_\rho}\right)^b, \quad (9)$$

где a и b - коэффициенты, определяемые по методу наименьших квадратов.

Выражение φ при термомеханическом нагружении включает переменные коэффициенты, зависящие от числа циклов. В общем виде имеем:

$$\varphi\left(\frac{\omega}{\omega_\rho}, N\right) = a(N)\left(\frac{\omega}{\omega_\rho}\right)^{b(N)}. \quad (10)$$

Из опытов на растяжение при разных постоянных температурах получаем зависимости $\bar{\sigma}_p(T)$ и $\omega_p(T)$, которые для удобства расчета также выразим через число циклов N . Аппроксимирующие кривые описываются уравнениями вида:

$$\begin{aligned} \bar{\sigma}_p(N) &= 380-300\sin((N-1)\pi/310); \\ \omega_p(N) &= 1000-500\sin((N-1)\pi/310). \end{aligned} \quad (11)$$

Таким образом, усталостная поврежденность, накапливающаяся в материале при термомеханическом нагружении, определяется в виде суммы:

$$\Pi = \sum_1^N \varphi\left(\frac{\omega(T)}{\omega_p(T)}, T, R\right) \quad (12)$$

Окончательную полную меру повреждений представим в виде:

$$\Pi(N) = \frac{\bar{\sigma}_{\max}(N)}{\sigma_p(T)} + \sum_1^N \varphi\left(\frac{\omega(T)}{\omega_p(T)}, T, R\right) \quad (13)$$

Для нестационарного термомеханического нагружения имеем:

$$\Pi(N) = \frac{\bar{\sigma}_{\max}(N)}{\sigma_{\rho}(T)} + \sum_{k=1}^n \sum_1^N \varphi_k \left(\frac{\omega_k(T)}{\omega_{\rho}(T)}, T_k, R_k \right), \quad (14)$$

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

Для проверки предложенного уравнения (14) были проведены опыты при термомеханическом нагружении на образцах стали 12X18H10T как при линейном, так и при сложном напряженном состоянии. В этих условиях режимы термомеханического нагружения также были как стационарными, так и нестационарными.

Методика проведения опыта и соответствующая запись петель соответствовала ГОСТу-25.505-85, Параметры модели определялись из опытов на циклическое растяжение-сжатие и из статических диаграмм деформирования. Влияние температуры на эти параметры описывается зависимостями (10) и (11), которые приведены выше.

Результаты расчета поврежденности, произведенные по формулам (13) и (14), приведены в таблицах 1 и 2.

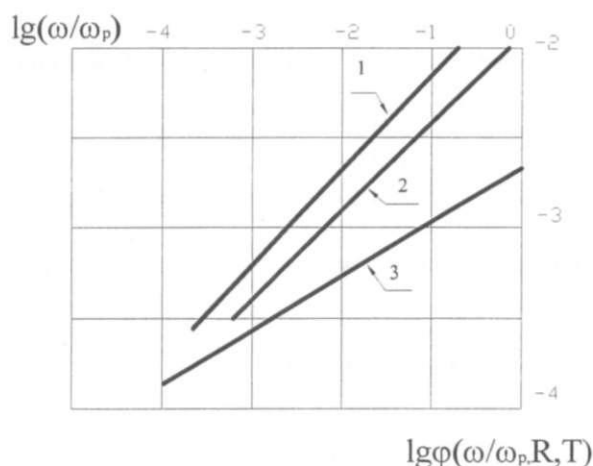
Таблица 1 - Результаты опытов и расчетов при сложном термомеханическом нагружении для стали 12X18H10T

№ опыта	σ_{xx} , МПа R= -1	τ_{xy} , МПа R= -1	T(N), К	$\sigma_{i \max}$, МПа	N_{ρ} , цикл	Поврежденность по (13)		
						Π_1	Π_2	$\Pi(N_{\rho})$
1	242	187	293-673	405	81	0,552	0,264	0,816
2	224	173	293-673	373	135	0,632	0,318	0,950
3	209	161	293-673	348	156	0,600	0,268	0,868
4	190	147	293-673	320	462	0,542	0,422	0,964
5	190	147	293-673	320	493	0,520	0,446	0,966
6	183	141	293-673	300	866	0,388	0,492	0,880
7	198	152	293-673	330	340	0,336	0,496	0,832
8	211	162	293-673	351	143	0,608	0,246	0,854

Таблица 2 - Результаты опытов и расчетов нестационарных режимов сложного термомеханического нагружения для стали 12X18H10T

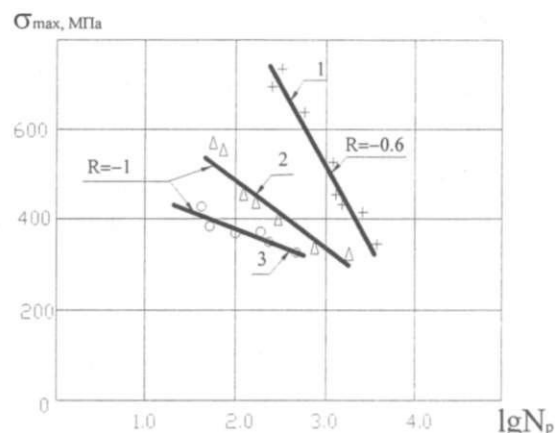
№ опыта	№ ступеней	σ_{xx} , МПа R= -1	τ_{xy} , МПа R= -1	T(N), К	$\sigma_{i \max}$, МПа	N_{ρ} , цикл	Поврежденность по (14)		
							Π_1	Π_2	$\Pi(N_{\rho})$
9	1	183	141	293-673	300	310	0,536	0,242	0,932
	2	198	152	293-673	330	120		0,154	
10	1	190	147	293-673	320	160	0,580	0,210	0,862
	2	190	147	673-const		74		0,072	
11	1	190	147	293-673	320	120	0,580	0,142	0,902
	2	190	147	673-const		174		0,180	
12	1	183	141	293-673		120	0,492	0,060	1,066
	2	183	141	673-const		300		0,252	
	3	183	141	const	300	190		0,192	
	4	183	141	293-673		120		0,060	
	5	183	141	293-673 673-const		17		0,010	

Расчетные повреждения при термомеханическом нагружении в основном получились меньше единицы, причем наибольшее расхождение достигло 22% от 1. Это расхождение можно объяснить тем, что функция φ в уравнении (13) и (14) определялась из опытов (рисунок 3) при заданных истинных напряжениях.



1,2 – при $R = -1,0$, 3 – при $R = -0,6$

Рисунок 2 - Графики функции $\varphi\left(\frac{\omega}{\omega_p}, R, T\right)$
для стали 12X18H10T



1,2 - при $T = -273K$, 3 - при $T = 673K$

Рисунок 3 - Кривые малоциклового усталости
(сталь 12X18H10T)

Полученные результаты расчетов для условий термомеханического нагружения удовлетворительно согласуются с опытными данными. Отсюда следует, что кинетическое уравнение (14) вполне приемлемо для расчета повреждений в общем случае термомеханического нагружения, если только отсутствуют деформации высокотемпературной ползучести.

Литература

- 1 Eckel J.F. The influence of frequency on the repeated bending life of acid // Proc. Am. Soc. Mater.-1951.-Vol.51.-P.745-756.
- 2 Coffin L.F. A note on low-cycle fatigue laws // J. Mater.- 1971.-Vol. 6.- P.388-402.
- 3 Wood D. The effect of creep on the high strain fatigue behaviour // Welding Journal .-1966.-Vol.45, N2.-P.92-96.
- 4 Екобори Т., Инхикава М. Подход к проблеме взаимодействия усталости и ползучести // Сб. Механика деформируемых тел и конструкций – М.: Машиностроение, 1975. - С. 178-182.
- 5 Шнейдерович Р.М., Гусенков А.П. Деформационно-кинетические критерии длительной циклической прочности // Сб. Исследование малоциклового разрушения при высоких температурах. – М.: Наука, 1975.-С.39-61.
- 6 Гусенков А.П., Казанцев А.Г. Метод исследования закономерностей деформирования и критериев разрушения при малоциклово не изотермическом нагружении // Заводская лаборатория. -1977. – №11. - С. 1384-1392.

Қорытынды

Бұл жұмыста изотермиялық жүктеу кезіндегі зақымдалыну есептеулеріне талдау келтірілген. Машиналар мен механизмдердің кейбір бөлшектері аз циклді қажу және жоғары температура

жағдайында жұмыс істейді. Сондықтан, зақымдалынуды есептегенде температураның әсері де ескерілген.

Summary

The work provides the analysis of account damages at isothermal loading, as some details of machines and mechanisms work in conditions low-cycle of weariness and heats. Therefore at accounts damages it is necessary to take into account influence of temperature.