Math-Net.Ru

Общероссийский математический портал

П. Е. Кичаев, Влияние предварительного неупругого деформирования на выносливость деталей с концентратором напряжений, *Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки*, 2003, выпуск 19, 173–176

DOI: <https://doi.org/10.14498/vsgtu163>

Использование Общероссийского математического портала Math-Net.Ru подразумевает, что вы прочитали и согласны с пользовательским соглашением

<http://www.mathnet.ru/rus/agreement>

Параметры загрузки:

IP: 3.85.7.115

26 апреля 2023 г., 08:28:17

ВЛИЯНИЕ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО НЕУПРУГОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ НА ВЫНОСЛИВОСТЬ ДЕТАЛЕЙ С КОНЦЕНТРАТОРОМ НАПРЯЖЕНИЙ

Проведена экспериментальная оценка влияния предварительного неупругого деформирования в режиме пластики и ползучести на последующую выносливость сплавов ЭП – 742 и ВТЗ-1.

Надежность и долговечность машин, как правило, зависит от выносливости их отдельных деталей и элементов. Значительный резерв прочности и долговечности заключен в предварительном неупругом деформировании различных концентраторов напряжений, имеющих на узлах и деталях (что создает благоприятное распределение остаточных напряжений в поверхностном слое материала). Существует несколько методов технологического повышения усталостной прочности, таких, как термомеханическое упрочнение, создание различного рода поверхностных покрытий, обкатка. Все названные методы затрагивают только поверхностные слои, меняя их структуру или создавая в них остаточные напряжения желаемого знака, обычно сжимающие. При этом «подкорковые слои» остаются или незатронутыми, или в них возникают нежелательные растягивающие напряжения. Кроме того, подобное деформирование ведет к накоплению повреждений в материале, что нежелательно. В силу сказанного температурно-силовой и скоростной режимы нагружения рекомендуется подбирать таким образом, чтобы величина накопленных повреждений была минимальной.

В последнее время предпринимаются попытки наведения остаточных напряжений в зонах их концентрации путем предварительного деформирования в режиме ползучести. В этом случае возможно получение эпюр остаточных напряжений желаемого знака, более приближенных к оптимальным [1].

Построение уравнений состояния и определение характеристик деформирования материалов. В настоящей работе развивается ранее предложенный энергетический подход к описанию деформирования и разрушения материалов [2, 3]. Определяющие уравнения построены при введении гипотезы, согласно которой параметр поврежденности в материале полагается пропорциональным линейной комбинации работ истинного напряжения на деформации пластичности и ползучести.

Основной вид определяющих соотношений имеет вид

$$\left. \begin{aligned} e &= e + e^p + p; \\ E &= E / E, \quad E = \partial S'(S) / \partial \epsilon; \\ p &= u + v + w; \\ u(t) &= \sum_{k=1}^s u_k(t), \quad \epsilon_k(t) = I_k [a_k (S / S_*)^n(t) - U_k(t)]; \\ v(t) &= \sum_{k=1}^s v_k(t), \quad \epsilon_k(t) = \begin{cases} I_k [b_k (S / S_*)^n(t) - V_k(t)], & b_k (S / S_*)^n(t) > V_k(t), \\ 0, & b_k (S / S_*)^n(t) \leq V_k(t); \end{cases} \\ \epsilon(t) &= C (S / S_*)^m(t); \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$$S = S_0 (1 + w); \quad (2)$$

$$\epsilon = \epsilon g s + \epsilon a s, \quad (3)$$

где e - полная деформация; e и e^p - упругая и пластическая деформации; p - деформация ползучести; u, v, w - соответственно вязкоупругая, вязкопластическая и вязкая составляющие p ; S_0 и S - номинальное и истинное напряжение соответственно; w - параметр поврежденности, который полагается пропорциональным линейной комбинации работ истинного напряжения на деформации ползучести и на пластической деформации; E - модуль Юнга; $I_k, a_k, d_k, C, m, n, S_*$ - реологические константы материала, при помощи которых описывается первая и вторая стадии ползучести и обратимая часть деформации ползучести; g и a - параметры материала, контролирующие процессы разупрочнения материала.

$$g = g_1 (e^p)^{m_2}, \quad a = a_1 (s_0)^{m_1}. \quad (4)$$

Для прогнозирования момента разрушения $t=t^*$ в качестве критерия предлагается соотношение

$$\int_0^{t^*} \frac{s(t) de^p(t)}{A_*^p} + \int_0^{t^*} \frac{s(t) dP(t)}{A_*^c} = 1, \quad (5)$$

где A_*^p и A_*^c - соответственно критические величины работ разрушения истинного напряжения на пластической деформации и деформации ползучести, которые при $T=\text{const}$ являются константами материала.

Таким образом, соотношения (1)-(5) позволяют вычислить необратимые деформации и поврежденность материала при квазистатическом нагружении.

В качестве испытуемых материалов выбраны: титановый сплав ВТ3-1, применяемый для изготовления проушин рычагов взлетно-посадочных устройств самолетов; сплав ЭП 742, из которого изготавливаются диски и лопатки газовых турбин. Температуры испытаний, соответствующие рабочим, составляли 20 и 450⁰С для сплава ВТ3-1 и 750⁰С для ЭП – 742. Испытывались круглые образцы с концентратором и без него. Геометрия захватов образцов унифицирована таким образом, чтобы обеспечить возможность их испытания при квазистатическом нагружении на установке Zst 3/3 и при циклическом нагружении на усталостной машине УВМ. Для определения параметров модели проведены следующие базовые испытания гладких, без концентратора, образцов по следующим программам.

1. Механические испытания при скорости активного захвата 20 мм/мин для получения кривой мгновенного растяжения. По кривой определяются механические характеристики и параметры пластичности материалов при выбранных температурах испытаний.

2. Испытания на ползучесть при трех уровнях начального напряжения, по результатам которых вычисляются параметры ползучести и длительной прочности.

3. Испытания на усталость при симметричном цикле для получения кривой Веллера и, соответственно, расчета параметров выносливости материалов. Каждое испытание повторялось, и при определении расчетных параметров опытные данные усреднялись. Кривые растяжения сплава ВТ3-1 и сплава ЭП – 742 представлены на рис. 1. Кривые ползучести изображены на рис. 2 и 3.

Кривые Веллера, вычисленные с вероятностью 0,9, показаны на рис. 4 и 5. Рассчитанные параметры разработанной модели приведены в табл. 1 и 2.

Кривая Веллера описывается уравнением $N=Qs_a^{-q}$, где для сплава ВТ3-1 получено: $Q=8,72 \cdot 10^{369}$, $q=133$; сплава ЭП -742 $Q=0,39 \cdot 10^{16}$, $q=13,6$; величина s_a - амплитудное значение циклической составляющей.

4. Экспериментальная оценка влияния предварительного неупругого деформирования на последующую выносливость образцов с концентраторами напряжений.

Р и с. 1 Кривые мгновенного деформирования сплавов ЭП –742 (Т=750⁰С) (1) и ВТ3-1 (Т=450⁰С) (2)

Р и с. 2. Расчетные (пунктиром) и экспериментальные (сплошные) кривые ползучести сплава ВТ3-1 (Т=450⁰С): 1 – 700 МПа; 2 – 600 МПа; 3 – 500 МПа

На втором этапе проводились испытания образцов с круглыми выкружками. При выбранной геометрии образцов максимальный коэффициент концентрации напряжений K равен 2,2 [4]. Под коэффициентом концентрации напряжений понимается отношение величины напряжения в точке при наличии концентратора к напряжению в этой точке при отсутствии концентратора. В испытуемых образцах наводилась остаточная деформация 0,25 и 0,5 ресурса пластичности материала P^* пластичностью и ползучестью, после чего они испытывались на выносливость при симметричном цикле для напряжений.

Результаты сравнивали с результатами испытания образцов в исходном состоянии. Экспериментальные данные приведены в табл. 3, а кривые Веллера для образцов с концентратором напряжений изображены на рис. 4 и 5. На основании полученных данных можно сделать следующие выводы.

1. Наведение остаточных деформаций в режиме ползучести и в режиме пластичности повышает предел выносливости.

2. Для сплава ВТЗ-1 повышение предела выносливости деформированием в режиме ползучести по отношению к пластическому деформированию незначительно, а для сплава ЭП – 742 повышение предела выносливости деформированием в режиме ползучести по отношению к пластическому деформированию превышает в 4 раза.

Р и с. 3. Расчетные (пунктиром) и экспериментальные (сплошные) кривые ползучести сплава ЭП 742 ($T=750^\circ C$):

1 – 480 МПа; 2 – 580 МПа; 3 – 700 МПа

Р и с. 4. Кривые выносливости сплава ВТЗ-1

($T=450^\circ C$):

1 — исходная; 2- пластическая деформация 0,25 P^* ; 3- пластическая деформация 0,5 P^* ; 4- деформация ползучести 2%

Р и с. 5. Кривые выносливости сплава ЭП – 742

($T=750^\circ C$):

1 — исходная; 2- пластическая деформация 0,25 P^* ; 3- пластическая деформация 0,5 P^* ; 4- деформация ползучести 2%

Т а б л и ц а 1

Значения параметров кривой мгновенного деформирования

Материал	$T, ^\circ C$	$\sigma_{пр}, МПа$	$E \cdot 10^{-6}, МПа$	$g МПа^{-h}$	h	$\gamma_1, МПа^{-1}$	m_2	A_p^* МДж/м ³
ЭП – 742	20	880	2,25	$1,311 \cdot 10^{-6}$	1,776	$1,88 \cdot 10^{-3}$	0	281,2
	750	620	1,943	$0,492 \cdot 10^{-6}$	1,943	$1,655 \cdot 10^{-3}$	0	183,3
ВТЗ-1	20	970	1,15	$0,54 \cdot 10^{-6}$	2,4	$5 \cdot 10^{-8}$	11	80,7
	450	773,2	0,669	$32,3 \cdot 10^{-6}$	1,524	11,0	2,95	66,7

Т а б л и ц а 2

Значения параметров ползучести

Материал	T, °C	σ^* МПа	S	λ_k	a_k	b_k	c	n	m	α_1 МПа ^(-m1+1)	m_1	A_c^* , МДж/ м ³
ЭП –742	750	500	1	0,2	$6,55 \cdot 10^{-4}$	$4,9 \cdot 10^{-3}$	$4,15 \cdot 10^{-4}$	3,76	8,9	$1,47 \cdot 10^5$	-3,3	88,77
ВТЗ-1	450	500	1	0,2	0	$4,6 \cdot 10^{-3}$	$2,07 \cdot 10^{-4}$	1,86	9,5	$7,42 \cdot 10^5$	-2,7	12,7

Т а б л и ц а 3

Результаты сравнительных испытаний на усталость образцов с концентратором

		Пластика $P=0,25P^*$	Пластика $P=0,5P^*$	Ползучесть $P=0,25^*$
Увеличение предела выносливости, %	ВТЗ-1	15,6	7,12	18,3
	ЭП742	19,4	8,69	4,92

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Методы расчета на прочность изделий машиностроения при их обработке давлением в режиме ползучести и сверхпластичности: Метод. рекомендации. Новосибирск: Госстандарт, 1989. 67 с.
2. Радченко В.П. Энергетический вариант одноосной теории ползучести и длительной прочности // ПМТФ. 1991. N4. С.172-179.
3. Радченко В.П., Кичаев Е.К. Энергетический вариант определяющих уравнений и критерий разрушения при виброползучести материалов // Актуальные проблемы прочности: Мат. XXVIII. респ. сем. Вологда, 1992. С.25-26.
4. Троценко В.Т. Усталость и неупругость металлов. Киев: Наукова думка, 1971. 420 с.

Поступила 20.02.2003 г.