

УДК 621.438:539.4

## ДЛИТЕЛЬНАЯ ПРОЧНОСТЬ ПРИ СЛОЖНОМ НАПРЯЖЕННОМ СОСТОЯНИИ СПЛАВА ЭИ437БУ

© 2011 г.

*Е.Р. Голубовский, А.Г. Демидов*

Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова, Москва

golubovskiy@ciam.ru

Поступила в редакцию 24.08.2011

Представлены результаты экспериментального исследования длительной прочности при сложном напряженном состоянии жаропрочного деформируемого никелевого сплава ЭИ437БУ-ВД, применяемого для дисков и валов газовых турбин. Экспериментальные данные получены в результате испытаний на длительную прочность при температуре 650 °С тонкостенных трубчатых образцов в условиях плоских напряженных состояний при различных соотношениях осевой растягивающей силы и крутящего момента. Результаты испытаний использованы для определения параметра  $\lambda$  в двухпараметрическом критерии эквивалентности напряженных состояний, предложенного авторами ранее. Показано, что полученные экспериментальные данные аппроксимируются кривой длительной прочности с переломом, который свидетельствует о возможном изменении характера разрушения в зависимости от долговечности. Определены значения параметра  $\lambda$  для каждого участка ломаной кривой длительной прочности ( $\lambda_1$  и  $\lambda_2$ ). Сравнительный анализ оценок дисперсии экспериментальных данных относительно расчетной кривой длительной прочности в эквивалентных напряжениях показал, что двухпараметрический критерий (1) с полученными значениями параметра  $\lambda$  ( $\lambda_1$  и  $\lambda_2$ ) более точно и адекватно описывает длительную прочность сплава при сложном напряженном состоянии, чем широко применяемый критерий Мизеса – Генки.

*Ключевые слова:* длительная прочность, никелевый сплав, трубчатые образцы, критерий эквивалентности напряженных состояний.

При расчетах напряженно-деформированного состояния (НДС) деталей газотурбинных двигателей в современных программных комплексах (ANSYS, NASTRAN и т.п.) в качестве критерия эквивалентности напряженных состояний (далее «критерий») при оценке длительной прочности используется критерий Мизеса – Генки ( $\sigma_{\text{экв}} = \sigma_i$ ). Недостаток критерия Мизеса – Генки состоит в том, что расчетные значения характеристик конструкционной длительной прочности любого материала при двухосном равном растяжении ( $\sigma_1 = \sigma_2$ ;  $\sigma_3 = 0$ ) оказываются равными длительной прочности при растяжении. Однако экспериментальные данные, полученные в области двухосных растяжений, свидетельствуют о снижении длительной прочности в сравнении с одноосным растяжением [1]. Это обстоятельство учитывает двухпараметрический критерий [1, 2]:

$$\sigma_{\text{экв}} = \lambda \sigma_i + 3(1 - \lambda) \sigma_0, \quad (1)$$

где  $\sigma_i$  – интенсивность главных нормальных напряжений;  $\sigma_0$  – среднее напряжение;  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  – главные нормальные напряжения;  $\sigma_{\text{экв}} = \sigma_p$  – предел длительной прочности при одноосном растяжении и долговечности  $\tau_p$ ;  $\lambda$  – параметр, зависящий от свойств материала.

Для деталей роторов газотурбинных двигателей и газотурбинных установок (диски и валы) широко применяется жаропрочный никелевый деформируемый сплав ЭИ437БУ-ВД [3], образцы из которого использованы в настоящем исследовании.

Испытания на длительную прочность при различных соотношениях растягивающей силы  $\mathbf{P}$  и крутящего момента  $\mathbf{M}$  при температуре  $T = 650$  °С, в соответствии с требованиями [5], были проведены на тонкостенных трубчатых образцах (рабочая часть  $L = 108$  мм,  $d_n = 18$  мм,  $d_b = 17$  мм). Заготовки образцов вырезались из штамповок дисков из сплава ЭИ437БУ-ВД, термообработанных по стандартному режиму. Испытания были проведены на установке УИМТ в соответствии с требованиями стандарта [5]. Напряжения в стенке образца рассчитывались по стандартным соотношениям [1, 2, 4], при этом учитывалось, что в данном эксперименте всегда  $\sigma_1 > 0$ ,  $\sigma_2 = 0$ ,  $\sigma_3 < 0$ . Для характеристики сложного напряженного состояния в стенке образца были использованы параметры напряженного состояния  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_0, \alpha_i$ :

$$\alpha_1 = \frac{\sigma_1}{\sigma_1} = 1, \quad \alpha_2 = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} = 0, \quad \alpha_3 = \frac{\sigma_3}{\sigma_1},$$

$$\alpha_0 = \frac{\sigma_0}{\sigma_1} = \frac{1 + \alpha_2 + \alpha_3}{3}, \quad \alpha_i = \frac{\sigma_i}{\sigma_1} = \sqrt{1 - \alpha_3 + \alpha_3^2}. \quad (2)$$

Результаты испытаний образцов были получены при следующих напряженных состояниях: 1)  $\alpha_1 = 1, \alpha_2 = 0, \alpha_3 = 0$  – 11 образцов; 2)  $\alpha_1 = 1, \alpha_2 = 0, \alpha_3 = -1$  – 5 образцов; 3)  $\alpha_1 = 1, \alpha_2 = 0, \alpha_3 = -0.32$  – 8 образцов; 4)  $\alpha_1 = 1, \alpha_2 = 0, \alpha_3 = -0.17$  – 10 образцов.

Экспериментальные данные были обработаны по степенной зависимости:

$$\tau_p = A \sigma_{\text{экв}}^{-n}. \quad (3)$$

Обработка результатов испытаний проведена для трех выборок экспериментальных данных: выборка 1 – результаты испытаний трубчатых образцов при растяжении; выборка 2 – результаты, полученные при сложном напряженном состоянии для различных соотношений растяжения и кручения; выборка 3 – результаты испытаний стандартных цилиндрических образцов ( $l = 5d, d = 5 \text{ мм}$ ) на длительную прочность при растяжении при температуре  $650^\circ\text{C}$ .

При этом на первом этапе обработки данных, в качестве  $\sigma_{\text{экв}}$  использован критерий Мизеса – Генки. Экспериментальные данные выборок 1, 2 и 3 удовлетворительно аппроксимируются уравнением (3), коэффициенты которого имеют следующие значения: выборка 1 –  $\log A = 39.062, n = 13.51$ ; выборка 2 –  $\log A = 39.960, n = 13.77$ ; выборка 3 –  $\log A = 25.13, n = 8.33$ .

Как следует из диаграммы длительной прочности (рис. 1а), кривые 1 и 2 практически совпадают. Кривая 3 – отличается от кривых 1 и 2 (номера кривой и выборки совпадают). Однако, следует отметить, что значительная часть экспериментальных данных с долговечностью  $\tau_p \geq 250 \text{ ч}$  лежит ниже расчетных кривых 1 и 2, т.е. на кривых длительной прочности трубчатых образцов возможен перелом, связанный с изменением характера разрушения. Поскольку изменение угла наклона кривой длительной прочности связывается с изменением характера длительного разрушения [2], то в качестве кривой в эквивалентных напряжениях до точки перелома ( $\tau_p = 250 \text{ ч}$ ) следует рассматривать кривую 1, а после точки перелома – кривую 3.

Определение значения параметра  $\lambda$  из критерия (1) для каждого образца осуществлялось для соответствующего участка кривой длительной прочности. Параметр  $\lambda$  имеет следующие средние значения:  $\lambda = 1.014$  – для  $\tau < 250 \text{ ч}$ ;  $\lambda = 0.953$  – для  $\lambda > 250 \text{ ч}$ .

С использованием этих значений параметра  $\lambda$  были рассчитаны по формуле (1) значения  $\sigma_{\text{экв}}$  для каждого трубчатого образца, испытанного при

сложном напряженном состоянии. Эти значения  $\sigma_{\text{экв}}$  показаны на рис. 1б, на котором представлена кривая длительной прочности в эквивалентных напряжениях (1) в виде ломаной.

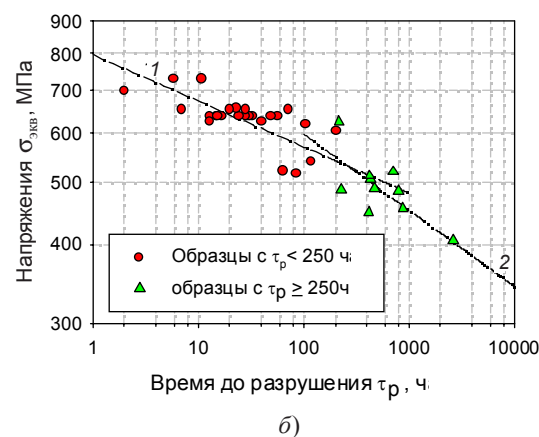
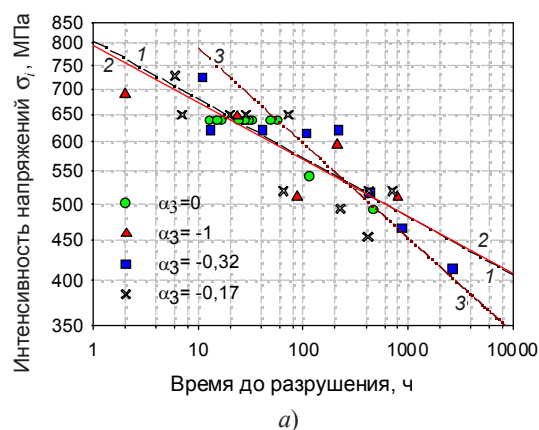


Рис. 1

Были получены оценки дисперсии экспериментальных данных относительно кривой 2 на рис. 1а и относительно ломаной на рис. 1б; оценки для рис. 1а имеют более высокие численные значения.

Таким образом, критерий (1) более точно и адекватно описывает длительную прочность сплава при сложном напряженном состоянии, чем широко применяемый критерий Мизеса – Генки.

*Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант №11-08-00008а.*

#### Список литературы

1. Каблов Е.Н., Голубовский Е.Р. Жаропрочность никелевых сплавов. М.: Машиностроение, 1998. 464 с.
2. Голубовский Е.Р. Длительная прочность и критерий разрушения при сложном напряженном состоянии сплава ЭИ698ВД // Проблемы прочности. 1984. №8. С. 11–17.
3. Машиностроение: Энциклопедия. Т. II-3. Цветные металлы и сплавы. Композиционные металличес-

кие материалы. М.: Машиностроение, 2001. 880 с.  
4. Лебедев А.А., Ковальчук Б.И., Гигиняк Ф.Ф.,  
Ламашевский В.П. Механические свойства конструк-  
ционных материалов при сложном напряженном состо-

янии / Под общ. ред. А.А. Лебедева. Киев: ИД «Ин  
Юре», 2003. 540 с.  
5. ГОСТ 10145-84. Металлы. Метод испытания на  
длительную прочность.

## LONG-TERM DURABILITY OF ALLOY EI437BU UNDER COMPLEX STRESS

*E.R. Golubovskiy, A.G. Demidov*

The results of an experimental research of the long-term combined strength of the EI437BU-VD heat resisting deformable nickel alloy used for disks and shafts of gas turbines are presented. The experimental data was obtained as a result of creep-rupture tests of thin-walled tubular samples under plane tension for various relationships between the axial tensile force and torque at 650 °C. The results of the tests are used to determine parameter  $\lambda$  in a two-parameter criterion of equivalence of the tensions, earlier introduced by the present authors. It is shown, that the obtained experimental data are approximated by a stress rupture curve with a breaking which testifies to a possible change of character of shattering depending on the longevity. Parameter values of  $\lambda$  for each section of the broken stress rupture curve ( $\lambda_1$  and  $\lambda_2$ ) are determined. The comparative assaying of estimations of a variance of experimental data concerning a calculated stress rupture curve in equivalent stresses has shown, that the two-parameter criterion with the obtained parameter values of  $\lambda$  ( $\lambda_1$  and  $\lambda_2$ ) more precisely and adequately represents long-term durability of the alloy under complex tension, than the widely used Mises – Hencky's criterion.

*Keywords:* long-term durability (stress rupture), nickel alloy, tubular samples, criterion of equivalence of stressed states.