

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ УСТАЛОСТИ МОНОКРИСТАЛЛОВ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ ДЛЯ ЛОПАТОК ТУРБИН АВИАЦИОННЫХ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

©2016 Е.Р. Голубовский, М.Е. Волков, Н.М. Эммаусский, С.А. Шибаяев

Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова, г. Москва

THE EXPERIMENTAL STUDY OF FATIGUE MONOCRYSTALS OF NICKEL ALLOYS FOR GTE TURBINE BLADES

Golubovskiy E.R., Volkov M.E., Emmausskiy N.M., Shibayev S.A. (CIAM, Moscow, Russian Federation)

The paper presents the experimental data and numerical models of curves of cycles to failure from deformation and stresses on the results of tests on the LCF [$R(\varepsilon) = 0; -1$] and HCF [$R(\sigma) = 0,1$] at temperatures of 850 and 1050 °C single-crystal samples ($\langle 001 \rangle$) alloy VZHM-5. Has been presented the comparison of curves LCF alloys VZHM-5 and VZHM-4 is show. The results of analysis of the fracture surfaces of samples of alloy VZHM-5 after testing LCF and HCF.

Работоспособность монокристаллических лопаток турбин авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) определяется в значительной мере сопротивлением усталости материала лопатки.

В настоящей работе представлены результаты исследования малоциклового (МЦУ) и многоциклового (МнЦУ) усталости монокристаллов никелевого литейного сплава ВЖМ-5 [1], легированного рением, при температурах 850 и 1050 °С. Приведена сравнительная оценка сопротивления МЦУ со сплавом ВЖМ-4, легированного рением и рутением [2,3].

Образцы и методика испытаний. Монокристаллические цилиндрические образцы для испытаний на МЦУ имели общую длину $l = 56$ мм, диаметр $\varnothing 4.37$ мм и расчётную длину рабочей части $L = 13$ мм. Для испытаний на МнЦУ корсетные образцы (тип I[4]) имели длину $l = 85$ мм с минимальным диаметром $\varnothing 5$ мм. Отклонение оси образца от КГО $\langle 001 \rangle$ не превышало 8°. Методика испытаний образцов на МЦУ и МнЦУ соответствовала требованиям стандартов [4-6].

Испытания на МЦУ были проведены на сервогидравлических машинах PEZ 4777 и LFV-100 при осевом нагружении - «жёсткий» цикл, коэффициент асимметрии цикла $R_\varepsilon = \varepsilon_{\min.} / \varepsilon_{\max.} = 0$ ($T = 850$ и 1050 °С) и $R_\varepsilon = -1$ ($T = 850$ °С). Параметры режима нагружения: синусоидальный цикл; частота $f = 0,5$ Гц. Регистровалась петля гистерезиса для каждого цикла. Образцы из сплава ВЖМ-4 моно- $\langle 001 \rangle$ были испытаны при $R_\varepsilon = 0$.

Испытания на МнЦУ образцов из сплава ВЖМ-5 были проведены на высокочастотных резонансных машинах AMSLER-100 и AMSLER-300 при осевом нагружении - $R_\sigma = \sigma_{\min.} / \sigma_{\max.} = 0.1$ ($T = 850$ и 1050 °С). Параметры режима нагружения: форма цикла – синусоидальная; частота $f = 60-85$ Гц.

Полученные результаты и их обсуждение.

Экспериментальные данные по МЦУ (рис. 1) аппроксимируются экспоненциальной зависимостью $N_f = B * \exp(-\beta * \Delta \varepsilon)$, а данные по МнЦУ (рис. 2) – степенной зависимостью $N_f = A * (\sigma_a)^{-n}$, где $\Delta \varepsilon$ – размах деформации в цикле (%), σ_a – амплитуда напряжения в цикле (МПа).

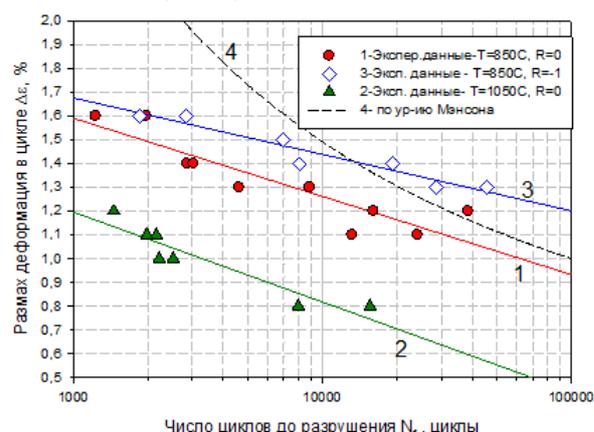


Рис.1. Кривые МЦУ сплава ВЖМ-5 $\langle 001 \rangle$
(1- 850 °С, $R(\varepsilon) = -1$; 2- 850 °С, $R_\varepsilon = 0$; 3- 1050 °С, $R_\varepsilon = 0$;
4- 850 °С, по уравнению Мэнсона)

Сравнение кривых МЦУ сплавов ВЖМ-5 и ВЖМ-4 показано на рис. 3, из которого следует, что сплав ВЖМ-4 обладает

более высоким сопротивлением МЦУ при обеих рассмотренных температурах.

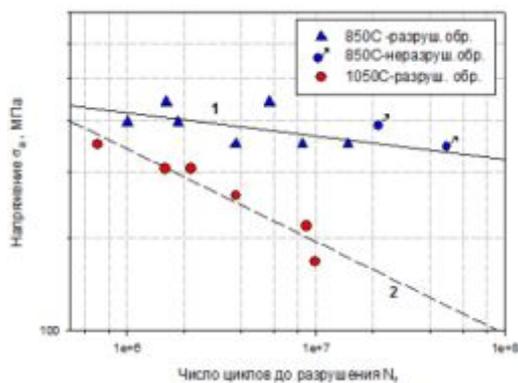


Рис.2. Кривые МЦУ ($R_\sigma=0,1$) сплава ВЖМ-5<001> (1 - 850°C, 2 - 1050°C)

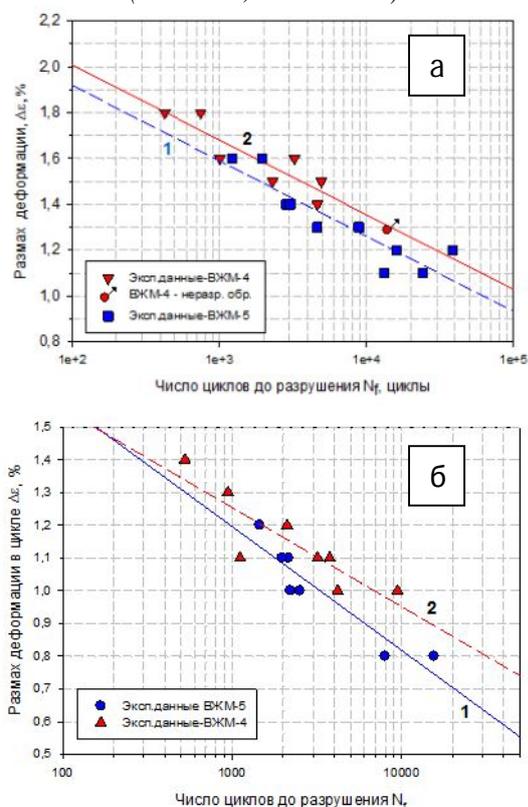


Рис.3. Кривые МЦУ [$R(\varepsilon)=0$] сплавов ВЖМ-4<001> и ВЖМ-5<001> а - 850°C (1-ВЖМ-5, 2-ВЖМ-4); б - 1050°C (1-ВЖМ-5, 2-ВЖМ-4)

На основании анализа петель гистерезиса при МЦУ сплава ВЖМ-5 было установлено, что при 850°C коэффициент асиммет-

рии по напряжениям сохраняется для значений $N=N_f/2$ во всём диапазоне долговечностей, а при 1050°C изменяется с долговечностью от значений $R_\sigma \approx -0,95$ до $R_\sigma \approx -0,47$.

Анализ изломов образцов после испытаний на МЦУ показал, что развитие разрушения в монокристаллах сплавов ВЖМ-4 и ВЖМ-5 имеет идентичный характер. Изломы при МЦУ и МнЦУ имеют общие и отличительные признаки.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 14-08-00570).

Библиографический список

1. Толорайя В.Н., Петухов А.Н., Колотников М.Е., Харьковский С.В., Остроухова Г.А. Некоторые особенности формирования монокристаллических отливок на примере безуглеродистого сплава ВЖМ5 // Вестник двигателестроения. 2011 №2. С.234-238 (Украина, на русск. яз).
2. Светлов И.Л., Петрушин Н.В., Голубовский Е.Р., Хвацкий К.К., Щёголев Д.В., Елютин Е.С. Механические свойства монокристаллов никелевого жаропрочного сплава, содержащего рений и рутений // Деформация и разрушение материалов. №11. 2008. С.26-35.
3. Голубовский Е.Р., Светлов И.Л., Петрушин Н.В., Черкасова С.А., Волков М.Е. Малоцикловая усталость монокристаллов жаропрочных никелевых сплавов при повышенных температурах // Деформация и разрушение материалов. 2009. №8. С.41-48.
4. ГОСТ 25.502 «Методы механических испытаний металлов. Методы испытаний на усталость».
5. ASTM E-606 “Standard Practice for Strain-Controlled Fatigue Testing”.
6. ASTM E-466 “Standard Practice for Conducting Force Controlled Constant Amplitude Axial Fatigue Tests of Metallic Materials”.