

УДК 004.65

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МАЛОЦИКЛОВОЙ УСТАЛОСТИ МОНОКРИСТАЛЛОВ ЖАРОПРОЧНОГО НИКЕЛЕВОГО СПЛАВА ВЖМ5 ПРИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Е. Р. ГОЛУБОВСКИЙ¹, М. Е. ВОЛКОВ², Н. М. ЭММАУССКИЙ³, С. А. ШИБАЕВ⁴

¹golubovskiy@ciam.ru

¹⁻⁴ ФГУП «Центральный институт авиационного моторостроения имени П. И. Баранова»
(ФГУП «ЦИАМ им. П. И. Баранова»)

Поступила в редакцию 1 июля 2015 г.

Аннотация. Представлены экспериментальные данные, полученные по результатам испытаний на малоцикловую усталость (МЦУ) монокристаллических образцов из перспективного жаропрочного никелевого сплава ВЖМ5. Режимы испытаний – температуры 850 и 1050 °С, «жесткий» цикл - при контролируемой деформации в цикле, $f=0,5$ Гц, коэффициент асимметрии цикла $R_\epsilon = -1$ (850°С) и $R_\epsilon = 0$ (850 и 1050°С). Получены численные модели и кривые МЦУ зависимости числа циклов до разрушения N_f от размаха деформации $\Delta\epsilon$ в цикле и аналогичные зависимости для $N = N_f/2$ от максимальных и минимальных напряжений σ_{\max} и σ_{\min} . Приведены результаты анализа характера разрушения образцов, на основании которого установлено различие разрушения при температурах 850 и 1050°С.

Ключевые слова: испытания на МЦУ; коэффициент асимметрии; численные модели; характер разрушения.

В перечень основных характеристик конструкционной прочности сплавов, которые используются при расчетах напряженно-деформированного состояния и определении ресурсных параметров монокристаллических лопаток турбин авиационных ГТД, входят характеристики МЦУ [1] в интервале рабочих температур замка и профильной части лопатки. Одним из перспективных сплавов, рекомендованных Всероссийским институтом авиационных материалов (ВИАМ) для монокристаллических лопаток турбин, является никелевый жаропрочный литейный сплав ВЖМ5 [2, 3].

В работе на основании результатов испытаний монокристаллических образцов из сплава ВЖМ5 исследованы закономерности сопротивления МЦУ при осевом «жестком» нагружении (с контролируемой деформацией в цикле) при температурах 850 и 1050 °С и циклической долговечностью до $N=5 \cdot 10^4$ циклов.

МЕТОДИКА ИСПЫТАНИЙ

Образцы для испытаний (рис. 1) имели общую длину $l=56$ мм с диаметром и расчетной длиной рабочей части соответственно $\varnothing 4,37$ мм и $l_0=13$ мм. Они были механически изготовлены

(с финишной операцией продольного полирования) из монокристаллических цилиндрических заготовок ($L \sim 200$ мм, $\varnothing \sim 15$ мм) из сплава ВЖМ5. Заготовки были получены методом направленной кристаллизации по директивной технологии отливки монокристаллических лопаток. Указанная технология обеспечивает получение монокристаллической отливки с кристаллографической ориентацией (КГО) оси отливки в направлении кристаллографического направления $\langle 001 \rangle$. Заготовки были термически обработаны по режиму лопаток.

На изготовленных образцах была определена КГО продольной оси каждого образца методом рентгеновской дифрактометрии на установке ДРОН-3 (Розанов М. А.). Результаты измерения отклонения оси образца от КГО $\langle 001 \rangle$ показали, что для всех исследованных образцов угол отклонения не превышал 8° (точность измерения $\sim 1^\circ$), что соответствует требованиям директивной технологии при отливке монокристаллических рабочих лопаток турбины.

Испытания на МЦУ были проведены в лаборатории ИЛ КПСД ЦИАМ, аттестованной и аккредитованной АВИАРЕГИСТРОМ Межгосударственного Авиационного Комитета и Фе-

деральным агентством по техническому регулированию и метрологии. Методика испытаний соответствовала требованиям стандартов [4, 5].

Монокристаллические образцы были испытаны на МЦУ при осевом нагружении («жесткий» цикл – с контролируемой деформацией в цикле) при температурах 850 °С (с коэффициентами асимметрии цикла $R_\varepsilon = \varepsilon_{\min}/\varepsilon_{\max} = -1$ и $R_\varepsilon = 0$) и 1050 °С ($R_\varepsilon = 0$) на сервогидравлических машинах PEZ 4777 («K.Schenk») и LFV-100 («Walter+bai») с компьютерной системой и пакетом программ управления процессом испытаний и регистрации параметров режима испытаний в режиме «on-line». Управление режимом нагружения образца и контроль деформации в цикле осуществлялся с применением штатных высокотемпературных экстензометров с базой 12,5 мм. Нагрев образца осуществлялся штатными печами электросопротивления. Режимы нагружения имели следующие параметры: форма цикла – синусоидальная; частота

$f=0,5$ Гц; контролируемые параметры цикла – минимальная ε_{\min} и максимальная ε_{\max} деформации в цикле. Разрушением при испытании на МЦУ считалось разделение образца на части, либо снижение нагрузки на 25 % по сравнению с величиной нагрузки в первом цикле. Такое снижение нагрузки свидетельствует о появлении макротрещины в образце, после чего компьютерная программа выдает команду о прекращении испытания.

В результате испытаний образца (при заданных значениях температуры T , коэффициента асимметрии цикла R_ε и размаха деформации в цикле $\Delta\varepsilon$) определялось число циклов до разрушения N_f и записывались диаграммы деформирования (петли гистерезиса) для каждого цикла нагружения, по которым затем определялись значения напряжений $\sigma(N)_{\max/}$ и $\sigma(N)_{\min/}$ в цикле с номером $N = N_f/2$ (рис. 1).

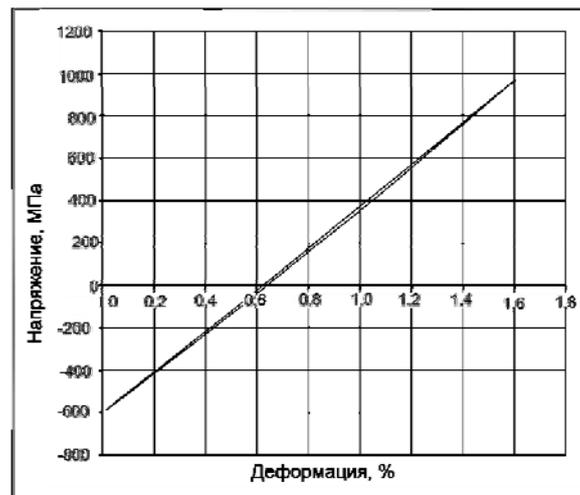


Рис. 1. ВЖМ5-моно-⟨001⟩. Петля гистерезиса – обр № 04, $T=850$ °С, $\Delta\varepsilon=1,6$ %, цикл с номером $N = N_f/2=984$ -й цикл ($N_f=1968$ ц), $\sigma_{\max.}=975$ МПа, $\sigma_{\min.}=-580$ МПа

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для построения кривых МЦУ (по размаху деформации $\Delta\varepsilon$ в цикле) обработка экспериментальных данных, в соответствии с рекомендациями [1, 6], осуществлялась по степенной и экспоненциальной моделям:

$$N_f = A(\Delta\varepsilon)^{-n}, \quad (1)$$

$$N_f = \text{Vexp}(-\beta\Delta\varepsilon). \quad (2)$$

Для определения зависимости числа циклов $N = N_f/2$ от напряжений $\sigma(N)_{\max.}$ и $\sigma(N)_{\min.}$ использованы аналогичные модели [1, 6]:

$$\left(N = \frac{N_f}{2}\right) = C\sigma^{-m} \quad (\text{только для } \sigma_{\max.}), \quad (3)$$

$$\left(N = \frac{N_f}{2}\right) = \text{Dexp}(-\gamma\sigma). \quad (4)$$

В результате обработки результатов испытаний по методике [6] было установлено, что оценка дисперсии, характеризующая разброс экспериментальных данных относительно уравнений регрессии (1) или (2), имеет более высо-

кие значения для уравнения (1). Поэтому для построения кривых МЦУ было использовано уравнение (2). Численные значения коэффициентов этого уравнения приведены в табл.

На рис. 2 показаны экспериментальные данные и кривые МЦУ, построенные по уравнению (2).

Таблица

Значения коэффициентов уравнений (2) и (4) кривых МЦУ монокристаллов сплава ВЖМ5 с аксиальной КГО <001>

| T, °C | R _ε | Коэффициенты уравнения (2) | | Коэффициенты уравнения (4) | | | |
|-------|----------------|----------------------------|-------|----------------------------|-------|-----------------------|--------|
| | | | | для σ _{макс.} | | для σ _{мин.} | |
| | | log B | β | log D | γ | log D | γ |
| 850 | -1 | 10,063 | 9,703 | 8,635 | 0,015 | 8,125 | -0,015 |
| | 0 | 7,837 | 7,003 | 8,182 | 0,012 | 8,062 | -0,022 |
| 1050 | 0 | 6,163 | 6,089 | 10,464 | 0,038 | 4,901 | -0,011 |

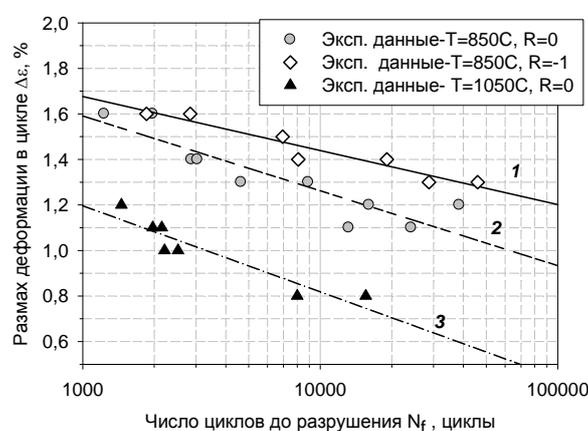


Рис. 2. ВЖМ5-моно-<001>.

Зависимость числа циклов до разрушения N_f от размаха деформации в цикле $\Delta\varepsilon$.
 $T=850^\circ\text{C}$ (1- $R_\varepsilon=-1$; 2- $R_\varepsilon=0$); $T=1050^\circ\text{C}$ (3- $R_\varepsilon=0$).

Как следует из рис. 2, разрушение при симметричном цикле ($R_\varepsilon = -1$) происходит при более высоких значениях размаха деформации $\Delta\varepsilon$ в цикле (а также при более высоких значениях амплитуды деформации в цикле $\varepsilon_a = \Delta\varepsilon/2$), чем при испытаниях с коэффициентом асимметрии $R_\varepsilon = 0$. Однако необходимо учитывать при этом, что в цикле с $R_\varepsilon = -1$ максимальное значение деформации $\varepsilon_{\text{макс.}}$ в два раза ниже аналогичных значений $\varepsilon_{\text{макс.}}$ в цикле с $R_\varepsilon = 0$.

На рис. 3 приведены экспериментальные значения максимальных $\sigma_{\text{макс}}$ и минимальных $\sigma_{\text{мин}}$ напряжений, которые были определены для каждого испытанного образца из петель гистерезиса, соответствующих циклу с номером $N = N_f/2$ (см. рис. 1). В результате обработки этих экспериментальных данных были получены численные значения коэффициентов уравнения (4) для максимальных $\sigma_{\text{макс}}$ и минимальных $\sigma_{\text{мин}}$ напряжений в цикле с номером $N = N_f/2$ (табл.),

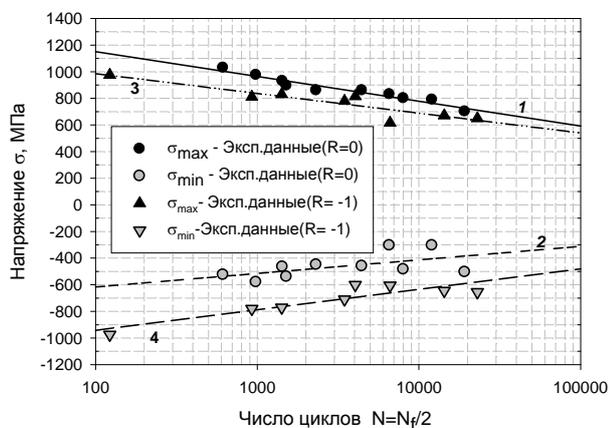
которые использованы для построения кривых 1–4 (рис. 3).

Как следует из рис. 3, а, при $T=850^\circ\text{C}$ кривые 3 и 4 свидетельствуют о том, что при «жестком» симметричном цикле по деформациям ($R_\varepsilon = -1$) в интервале значений $N_f/2$ от 10^2 до $5 \cdot 10^4$ ц сохраняется цикл по напряжениям, близкий к симметричному ($R_\sigma \sim -0,95 \dots -0,92$); анализ кривых 1 и 2 показывает, что при «жестком» отнулевом цикле по деформациям ($R_\varepsilon = 0$) цикл по напряжениям характеризуется коэффициентом асимметрии $R_\sigma \sim 0,53$. Кривые на рис. 3, б показывают, что при температуре 1050°C и отнулевом цикле по деформациям ($R_\varepsilon = 0$) цикл по напряжениям характеризуется коэффициентом асимметрии R_σ , который изменяется с долговечностью (на базах $N_f/2$ от 500 до 10^4 цикл) от значений $R_\sigma \sim -0,95$ до $R_\sigma \sim -0,47$.

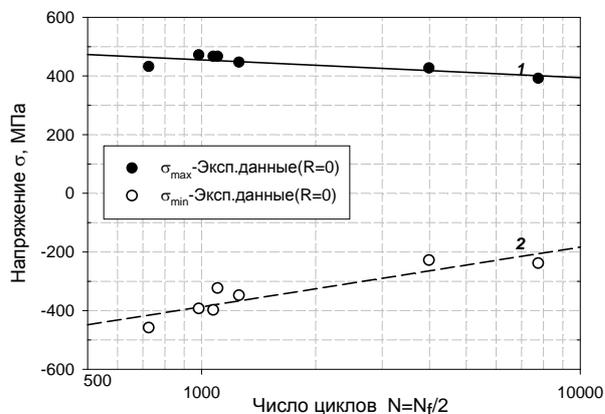
На рис. 4–6 показаны типичные изломы образцов после испытаний.

При температуре 850 °С и $R_\varepsilon=0$ (рис. 4) очагом зарождения усталостной трещины является наиболее крупная пора, из числа пор, которые имеются в объеме образца [3] после кристалли-

зации монокристаллической заготовки и ее термовакуумной обработки в комбинации с процессом горячего изостатического прессования (ГИП).



а



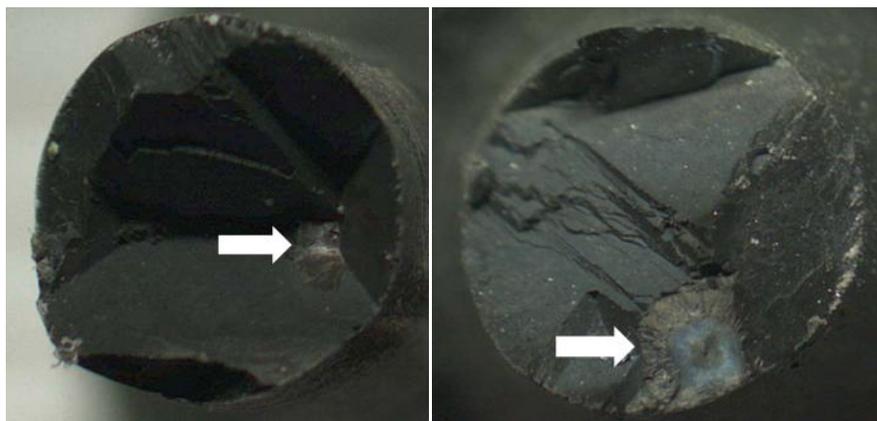
б

Рис. 3. ВЖМ5-моно- $\langle 001 \rangle$.

Кривые МЦУ – зависимость числа циклов $N=N_f/2$ от напряжений в цикле σ_{\max} и σ_{\min} :

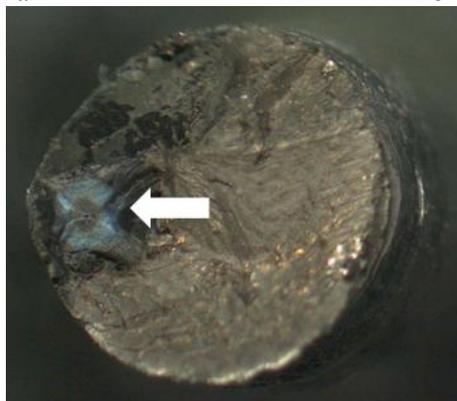
а – $T=850^\circ\text{C}$; $\varepsilon_r=0$ – кривая 1 по σ_{\max} , и кривая 2 по σ_{\min} ; $R_\varepsilon = -1$ – кривая 3 по σ_{\max} ,

и кривая 4 – по σ_{\min} ; б – $T=1050^\circ\text{C}$; $R_\varepsilon=0$ – кривая 1 – σ_{\max} , кривая 2 – σ_{\min} .



а

б



в

Рис. 4. Типичные изломы образцов после испытаний при $T=850^\circ\text{C}$ и $R_\varepsilon=0$ (стрелкой показана приочаговая зона):

а – Обр.1, $\Delta\varepsilon=1,4\%$, $N_f=2867$ ц; б – Обр. 4, $\Delta\varepsilon=1,3\%$, $N_f=8892$ ц;

в – Обр. 5, $\Delta\varepsilon=1,2\%$, $N_f=16034$ ц

Развитие трещины начинается от приочаговой зоны в виде квадратной фасетки в кристаллографической плоскости $\{001\}$ до значений \sim

$0,1-0,2$ площади сечения образца. После этого трещина развивается по кристаллографическим плоскостям $\{111\}$.

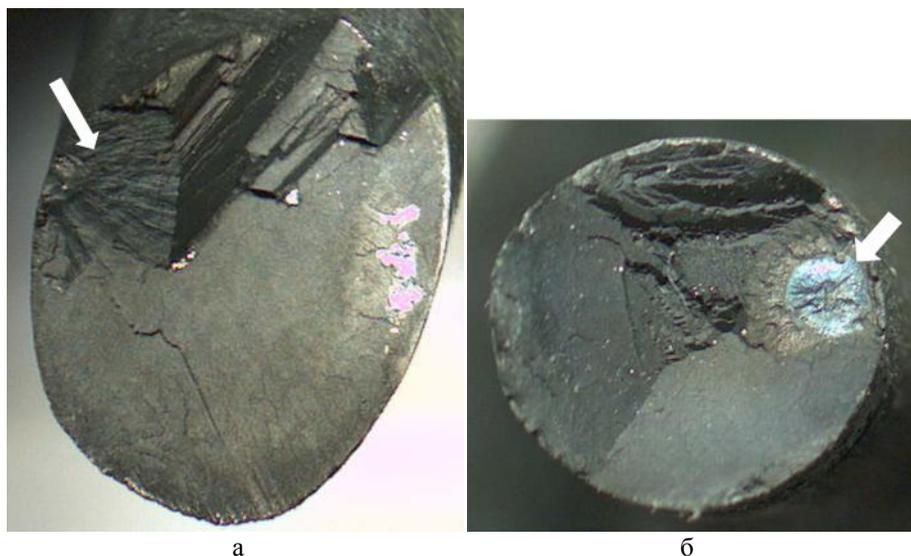


Рис. 5. Типичные изломы образцов, после испытаний при $T=850$ °С и $R_{\varepsilon}=-1$. (стрелкой показана приочаговая зона): а – Обр. 12, $\Delta\varepsilon=1,6$ %, $N_f=1853$ ц; б – Обр. 16, $\Delta\varepsilon=1,3$ %, $N_f=28671$ ц

При температуре 850 °С и $R_{\varepsilon}=-1$ (рис. 5) очагом зарождения усталостной трещины также является наиболее крупная пора. Начальное развитие трещины происходит также в плоскости поперечного сечения. Далее трещины развиваются по плоскостям октаэдра $\{111\}$.

При температуре 1050 °С наблюдается многоочаговое зарождение усталостных трещин на поверхности от микротрещин, обусловленных высокотемпературной коррозией; развитие трещины происходит, в основном, в плоскости, близкой к поперечному сечению образца (рис. 6).

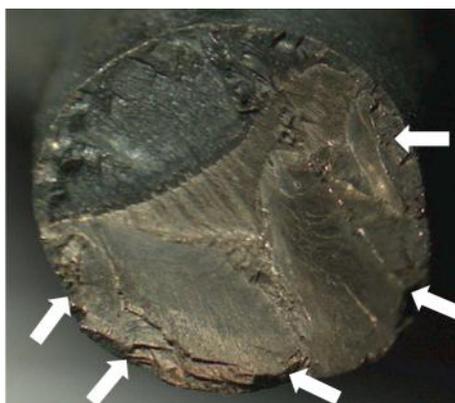


Рис. 6. Типичный излом образцов, после испытаний при $T=1050$ °С. (стрелками показаны очаги и приочаговые зоны). Обр. 21, $\Delta\varepsilon=1,0$ %, $N_f=2211$ ц

Необходимо отметить, что аналогичный характер разрушения при этих температурах наблюдался ранее на монокристаллических образцах с осевой КГО $\langle 001 \rangle$ из сплава ВЖМ4, легированного рением и рутением [7].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлены результаты испытаний на малоцикловую усталость в условиях осевого нагружения при температурах 850 °С (с коэффициентами асимметрии цикла $R_{\varepsilon}=0$ и $R_{\varepsilon}=-1$)

и 1050 °С (с коэффициентом $R_\varepsilon=0$) монокристаллических образцов из сплава ВЖМ5 с ориентацией оси образца в кристаллографическом направлении $\langle 001 \rangle$.

Для температур 850 и 1050 °С получены численные модели зависимости числа циклов до разрушения N_f (до $5 \cdot 10^4$ ц) от размаха деформации в цикле $\Delta\varepsilon$ и модели зависимости числа циклов $N = N_f/2$ от максимальных σ_{\max} и минимальных σ_{\min} напряжений в цикле. Из кривых МЦУ для максимальных и минимальных напряжений, построенных по этим моделям, следует:

- при $T=850$ °С и «жестком» симметричном цикле по деформациям ($R_\varepsilon = -1$) в интервале значений $N_f/2$ от 10^2 до $5 \cdot 10^4$ ц сохраняется цикл по напряжениям, близкий к симметричному; при «жестком» отнулевом цикле по деформациям ($R_\varepsilon = 0$) цикл по напряжениям характеризуется коэффициентом асимметрии $R_\sigma \sim 0,53$;

- при температуре 1050 °С и «жестком» отнулевом цикле по деформациям ($R_\varepsilon = 0$) цикл по напряжениям характеризуется коэффициентом асимметрии R_σ , который изменяется с долговечностью (на базах $N_f/2$ от 500 до 10^4 ц) от значений $R_\sigma \sim -0,95$ до $R_\sigma \sim -0,47$.

Эти результаты свидетельствуют о том, что с возрастанием температуры испытаний от 850 до 1050 °С и с увеличением циклической долговечности (т.е. с уменьшением размаха деформации $\Delta\varepsilon$) возрастает значение эффекта Баушингера при асимметричном цикле с коэффициентом асимметрии $R_\varepsilon=0$.

Анализ изломов образцов после испытаний показал, что характер разрушения монокристаллических образцов с аксиальной КГО $\langle 001 \rangle$ различен для температур 850 и 1050 °С и аналогичен характеру разрушения в таких же условиях монокристаллов сплава ВЖМ-4 [7].

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 14-08-00570.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Руководство** АВИАРЕГИСТРА МАК - 33-ВД-М «Порядок оценки соответствия материалов, используемых в конструкции авиационного двигателя, требованиям Авиационных правил». М.: Авиаиздат. 2013. 14 с. [Manual AVIAREGISTER IAC - 33-VD-M "Conformity assessment procedure for the materials used in the construction of an aircraft engine, the requirements of Aviation Regulations", (In Russian), М.: Aviaizdat, 2013, 14p.]

2. **Патент РФ** №2318030 «Жаропрочный сплав на основе никеля и изделия, выполненные из этого сплава», 2008 (по заявке 2006140213 от 15.11.2006г.) [Patent RF №2318030 "Superalloys based on nickel and products made

from this alloy", 2008 (on the application of 2,006,140,213 from 15.11.2006year) (In Russian)].

3. **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)

[V.N. Tolorayya, et al. "Some features of the formation of single crystal castings for example, carbon-free alloy VGM5" In Herald aeroenginebuilding (Ukraine, In Russian), 2011, №2, p.p. 234-238]

4. **ГОСТ 25.502** «Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Методы механических испытаний металлов. Методы испытаний на усталость». М.: Издательство стандартов. 1986. 34 с. [Strength analysis and testing in machine building. Methods of metals mechanical testing. Methods of fatigue testing. (in Russian), State Standard GOST 25.502, Moscow, 1986, 34p.]

5. **ASTM E606/E606M-12** "Standard Test Method for Strain-Controlled Fatigue Testing".

6. Рекомендательный циркуляр АВИАРЕГИСТРА МАК – № РЦ-АП-33.15-1 «Методические рекомендации по определению расчетных значений характеристик конструкционной прочности металлических материалов, М., Авиаиздат, 2013, 38с.[Advisory Circular AVIAREGISTER IAC - № RC-AP-33.15-1 "Guidelines for the definition of the calculated values of the characteristics of structural strength metallic materials" (In Russian), М.: Aviaizdat. 2013. 38p.]

7. **Голубовский Е. Р., Светлов И. Л., Петрушин Н. В., Черкасова С. А., Волков М. Е.** Малоцикловая усталость жаропрочных никелевых сплавов при повышенных температурах // Деформация и разрушение материалов. 2009. №8. С.41-48 [E.R. Golubovskiy et al. " Low-cycle fatigue of single crystals of high-temperature nickel alloys at elevated temperatures" (In Russian) in Deformation and fracture of Materials, 2009, No 8, p.p. 41-48].

ОБ АВТОРАХ

ГОЛУБОВСКИЙ Евгений Ростиславович, нач. отдела конструкционной прочности сплавов. Дипл. физик (Горьковский гос. ун-т им. Н. И. Лобачевского, 1966). Д-р техн. наук (1989), профессор (1999). Иссл. в обл. статич. и циклич. прочности металл. материалов.

ВОЛКОВ Михаил Евгеньевич, нач. испытательных комплексов. Дипл. инженер, динамика и прочность (МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002). Готовит дисс. в обл. статич. и циклич. прочности металл. материалов.

ЭММАУССКИЙ Николай Михайлович, инж. по испытаниям, Дипл. инженер, материаловедение (МАТИ – РГТУ им. К. Э. Циолковского, 2010).

ШИБАЕВ Сергей Александрович, инж. по испытаниям, аспирант. Дипл.инженер по газотурбинным установкам (МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2011). Готовит дисс. в обл. статической и циклической прочности металлических материалов.

METADATA

Title: The experimental study of low-cycle fatigue of single crystals of heat-resistant Ni-base alloy VGM5 at high temperatures.

Authors: E. R. Golubovskiy¹, M. E. Volkov², N. M. Emmausky³, S. A. Shibaev⁴.

Affiliation:

¹⁻⁴ Central Institute of Aviation Motors (CIAM), Russia.

Email: ¹golubovskiy@ciam.ru.

Language: Russian.

Source: Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 19, no. 3 (69), pp. 119-125, 2015. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

Abstract: The experimental data obtained by test results on low cycle fatigue (LCF) single-crystal samples of promising heat-resistant Ni-base alloy VGM5. Challenge mode – the temperature of 850 and 1050 °C, the "hard" cycle with controlled deformation in a cycle, $f=0.5$ Hz, the asymmetry factor cycle $R_\epsilon = -1$ (850 °C) and $R_\epsilon = 0$ (850 and 1050 °C). Numerical model and LCF curves according to the number of cycles to failure N_f the extent of the deformation $\Delta\epsilon$ in the cycle and a similar dependence for $N = N_{f/2}$ from the maximum and minimum stresses σ_{\max} and σ_{\min} . Shows the results of the analysis of the nature of fracture of samples on the basis of which the distinction destruction at temperatures of 850 and 1050 °C.

Key words: tests on the LCF; the asymmetry factor cycle; numerical models; the nature of destruction.

About authors:

GOLUBOVSKIY Evgeny Rostislavovich, Head of the Dept. of structural strength alloys. Dipl. physicist (Gorky state University, 1966). Cand. of Tech. Sci. (CNIITMASH, 1975), Dr. of Tech. Sci. (VIAM, 1989), Prof. (1999)

VOLKOV Mikhail Evgenyevich. Head of the test complexes. Dipl. engineer., dynamics and strength (Bauman MSTU, 2002)

EMMAUSKY Nikolay Mihajlovich. Testing engineer. Dipl. engineer, materials technology (MATI – RSTU, 2010)

SHIBAEV Sergey Aleksandrovich. Testing engineer. Post-grad. (PhD) student. Dipl. engineer for gas turbine units (Bauman MSTU, 2011).