

УДК 539.4; 629.7

Ю.А. НОЖНИЦКИЙ, Е.Р. ГОЛУБОВСКИЙ

*Центральный институт авиационного моторостроения им.П.И Баранова, Россия***МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ РАБОЧИЕ ЛОПАТКИ
ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ТУРБИН ПЕРСПЕКТИВНЫХ ГТД**

Изложены основные требования к рабочей охлаждаемой монокристаллической лопатке турбины высокого давления ГТД. Показаны особенности изменения анизотропии характеристик статической и циклической прочности и трещиностойкости монокристаллов жаропрочных никелевых сплавов в зависимости от температуры и долговечности. Сформулированы требования к перечню характеристик конструкционной прочности материалов с монокристаллической структурой, к объемам и режимам испытаний для определения этих характеристик, в соответствии с требованиями современных программных комплексов и методов расчета прочностных моделей монокристаллических лопаток.

монокристаллические лопатки, характеристики упругости, кратковременная и длительная прочность (ДП), ползучесть, многоцикловая (МнЦУ) и малоцикловая (МЦУ) усталость, объемы испытаний

Современные газотурбинные двигатели магистральной гражданской авиации работают при максимальной температуре газа перед турбиной до 1640 – 1940 К. Повышение эффективности двигателя связано с повышением максимальной температуры газа. Успех разработки такого высокотемпературного двигателя определяется возможностью создания более высокотемпературной рабочей охлаждаемой лопатки турбины высокого давления (ТВД), обладающей требуемым ресурсом и высокой надежностью при приемлемом расходе охлаждающего воздуха. Можно без преувеличения сказать, что рабочая лопатка ТВД является деталью, в значительной мере определяющей уровень авиационного двигателестроения.

Создание рабочей лопатки высокотемпературной турбины – сложная комплексная проблема, успешное разрешение которой зависит от решения большого количества материаловедческих, технологических и конструкторских задач. Наряду с газодинамическими требованиями к рабочим лопаткам турбины предъявляются жесткие требования по сопротивлению ползучести, статическому, мало- и многоциклового разрушению, стойкости к высокотемпе-

ратурному окислению. Применяемые при создании рабочих лопаток высокотемпературных турбин конструктивные решения во многом определяются современными материалами с необходимым уровнем характеристик конструкционной прочности и технологическими возможностями производства лопаток [1 – 3].

В соответствии с требованиями нормативных документов разрушение рабочей лопатки турбины не должно приводить к отказу с опасными последствиями (не локализованному разрушению или пожару). Однако в отдельных случаях, несмотря на положительные результаты сертификационных проверок, вторичные последствия при разрушении рабочих лопаток приводили к опасным отказам. Кроме того, разрушение лопаток в эксплуатации обычно приводит к выключению двигателя в полете, что может явиться предпосылкой летного происшествия. Разрушение лопатки обычно вызывает значительные повреждения и дорогостоящий ремонт двигателя. Назначенный ресурс лопаток турбин современных двигателей, как правило, не ограничивается. Эксплуатация осуществляется или с фиксированным временем между разборками горячей части

двигателя или по техническому состоянию с контролем лопаток (методами неразрушающего контроля).

Рабочие лопатки ТВД зарубежных двигателей обычно проектируются с учетом параметров «red line», т.е. предельно возможных в эксплуатации значений температуры газа перед турбиной. Так как фактически эксплуатация проходит, в основном, при более низкой температуре газа, то лопатки турбины в состоянии отработать ресурс, составляющий десятки тысяч часов. При определенной наработке (обычно выше 5 – 6 тысяч часов) возможен ремонт отдельных лопаток, однако имеются лопатки, отработывающие по 30 и более тысяч часов.

При ресурсном проектировании и прочностных расчетах [1 – 3] необходимо использовать значения характеристик конструкционной прочности материала монокристаллической лопатки для температурно-временного диапазона, соответствующего условиям эксплуатации.

Одним из основных направлений при проектировании рабочей лопатки для перспективных двигателей является разработка конструкции монокристаллической лопатки ТВД из высокожаропрочных никелевых сплавов с большим количеством полостей и развитой перфорацией, обеспечивающими высокоэффективное охлаждение (в т.ч. числе «проникающее» охлаждение). Лопатка такого типа показана на рис. 1.

Следует отметить, что монокристаллические лопатки обладают существенной анизотропией характеристик упругости, кратковременной и длительной прочности, пластичности, ползучести, многоцикло-вой и малоцикло-вой усталости и трещиностойкости, обусловленной кристаллографической анизотропией материала лопатки (сплавы на Ni-основе с монокристаллической структурой с ГЦК-решеткой).

Необходимо подчеркнуть, что зависимость анизотропии каждой характеристики от кристаллографической ориентации (КГО) сугубо индивидуальна. При этом характер этой анизотропии не является

величиной постоянной и изменяется с температурой и наработкой.



Рис. 1. Лопатка 4-х стенная с проникающим охлаждением для опробования на двигателе CF6-80E [4]

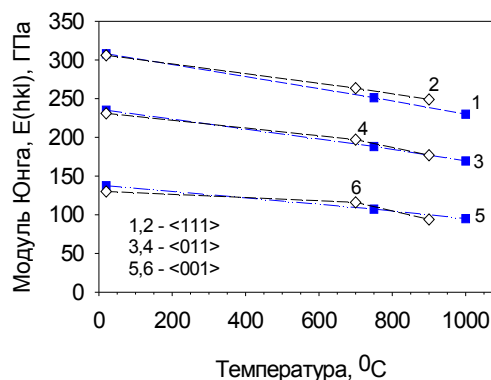


Рис. 2. Экспериментальная зависимость модулей Юнга сплавов ЖС6Ф-моно [5] и ЖС36-моно (кривые 1,3,5 – ЖС6Ф; 2,4,6 – ЖС36)

На рис. 2 показаны особенности изменения характеристик упругости [5], на рис. 3 – кратковременной прочности, на рис.4 - длительной прочности [6, 7], на рис.5 – МнЦУ, на рис.6, 7 – малоцикло-вой механической и термической усталости [8 – 11] и на рис.8 – циклической трещиностойкости [11] в зависимости от кристаллографической ориентации, полученных на монокристаллических образцах из никелевых жаропрочных сплавов. Облик монокристаллической лопатки в значительной степени уже сформирован. Монокристаллическая лопатка должна удовлетворять следующим условиям:

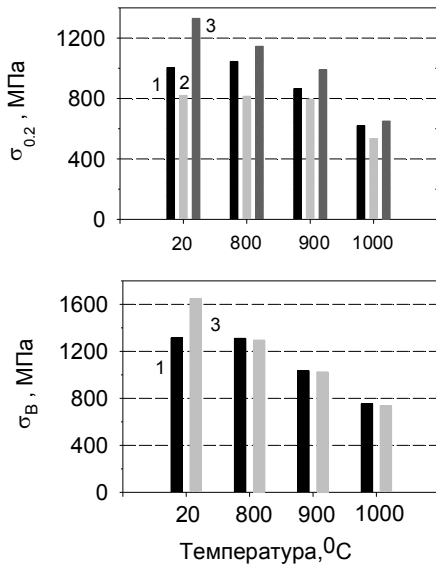


Рис. 3. Сплав ЖС32-моно. Зависимость предела текучести $\sigma_{0,2}$ и предела прочности σ_B от КГО и температуры (1 – $\langle 001 \rangle$, 2 – $\langle 011 \rangle$, 3 – $\langle 111 \rangle$)

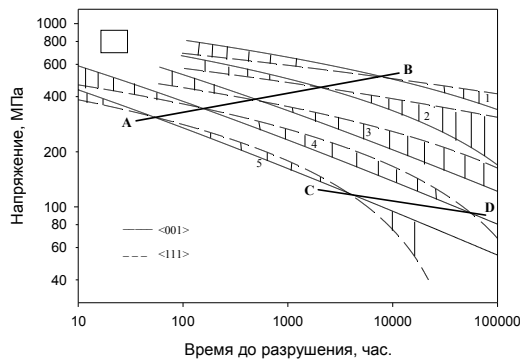


Рис. 4. Сплав CMSX-4. Кривые ДПС КГО $\langle 001 \rangle$ и $\langle 111 \rangle$ в интервале температур 1073-1273K (1 – 1073, 2 – 1123, 3 – 1173, 4 – 1223, 5 – 1273K) [6, 7]

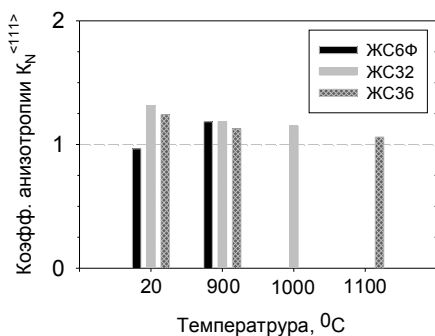


Рис. 5. Зависимость коэффициента кристаллографической анизотропии предела МнЦУ $(K_N^{\langle 111 \rangle} = \sigma_{-1}^{\langle 111 \rangle} / \sigma_{-1}^{\langle 001 \rangle})$ сплавов ЖС6Ф-моно, ЖС32-моно и ЖС36-моно от температуры на базе 2×10^7 циклов [8, 9]

- профилирование на основе 3D-газодинамического расчета с толщиной выходной кромки $\leq 1,5$ мм (для снижения кромочных потерь). ЦИАМ располагает необходимым комплексом программ для профилирования лопаток на основе трехмерных газодинамических расчетов;

- наличие относительно широкой хорды, относительно длинной ножки с двух – четырехзубым хвостовиком, эффективного демпфера и отсутствие бандажной (антивибрационной) полки;

- изготовление монокристаллической отливки из сплава на основе Ni со специальным легированием, с отклонением оси лопатки от заданного кристаллографического направления не более 5° и с отклонением от заданной азимутальной ориентации не более 10° ;

- оптимизированная для данной лопатки развитая система внутреннего охлаждения (в зарубежных двигателях – многополостные лопатки с большим числом несущих продольных ребер и интенсификацией внутреннего конвективного охлаждения, в отечественных двигателях — лопатки с вихревой матрицей) и развитую перфорацию на профиле для обеспечения пленочного охлаждения (отверстия диаметром 0,2 — 0,5 мм под углом до 30° к поверхности);

- ремонтпригодное защитное покрытие на пете (в т.ч. термобарьерное), обеспечивающее защиту от окисления до 1200°C , в зависимости от материала лопатки и условий ее работы; диффузионное защитное покрытие на внутренних полостях;

- ремонтпригодное высокотвердое покрытие на торце пера;

- с поверхностью упрочненным хвостовиком;
- Применение высокотемпературной газостатической обработки (ВГО) для снижения литейной пористости (уплотнения материала лопатки) и повышения его сопротивления много- и малоциклового усталости.

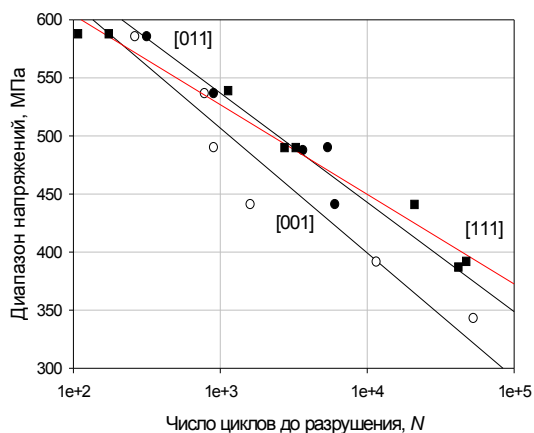


Рис. 6. Сплав ЖС6Ф-моно. Зависимость МЦУ при $T = 950\text{ }^{\circ}\text{C}$ от КГО [10, 11]

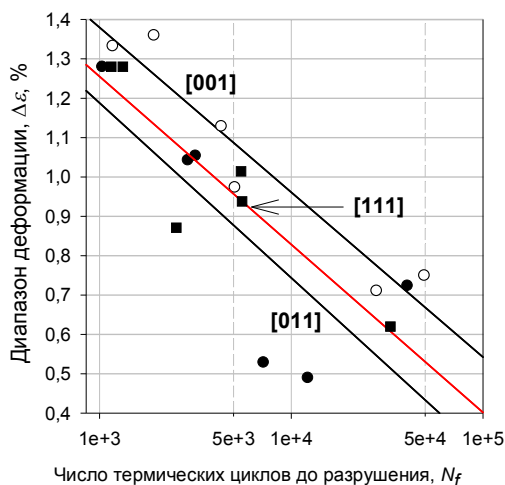


Рис. 7. Сплав ЖС6Ф-моно. Зависимость термической усталости при $T = 100 \leftrightarrow 950\text{ }^{\circ}\text{C}$ от КГО [10, 11]

В отечественной промышленности разработка новых высокожаропрочных сплавов, жаростойких покрытий и технологий получения литых монокристаллических лопаток сосредоточена в ВИАМ. Ниже представлены отечественные сплавы для монокристаллических лопаток, которые по характеристикам кратковременной и длительной прочности находятся на уровне аналогичных зарубежных сплавов для монокристаллических лопаток:

- сплавы второго поколения – безуглеродистый ренийсодержащий сплав ЖС36 – зарубежные сплавы CMSX-4, Rene N5, PWA1484 (США), TMS 71, TMS 82 (Япония);

- сплавы третьего поколения – безуглеродистые ренийсодержащие сплавы ЖС55, ВЖМ-1ВИ (до 9% Re) [12] – зарубежные сплавы CMSX-10, Rene N6, TMS 75, Alloy 5A;

- сплавы четвертого поколения – безуглеродистые рений-рутениевые сплавы типа ЖС52 (7%Re + 2%Ru) и ЖС71 (7%Re + 4%Ru) [12] – зарубежные сплавы MC-NG (4%Re + 4%Ru) Франция (Snecma, Turbomeca), EPM-102 (6%Re + 3%Ru + 0,03%C) и его модификации (США) [1], TMS 138 (5%Re + 2%Ru) и его модификации TMS 162 и TMS173 (Япония) [4, 12].

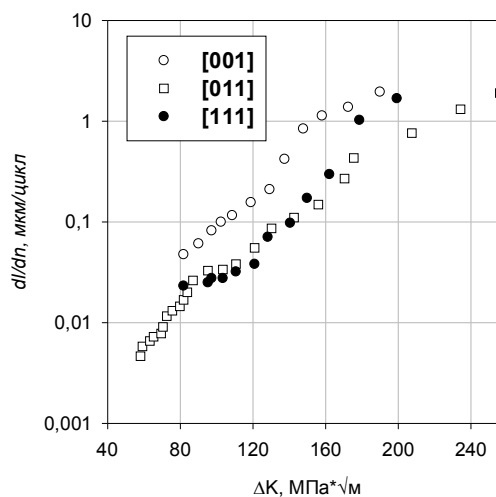


Рис. 8. Сплав ЖС6Ф-моно. Кинетика развития трещины при МЦУ ($T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$) в зависимости от КГО [11]

Вместе с тем следует отметить, что для разработки 3D-моделей прочности рабочих охлаждаемых монокристаллических лопаток при ресурсном проектировании, оптимизации конструктивных решений, использования вероятностных подходов к оценке прочности с учетом разброса как действующих нагрузок так и характеристик материалов, недостаточно информации, которая в настоящее время содержится в паспорте на сплав.

Необходим комплекс статистически достоверных значений характеристик конструкционной прочности материала лопатки с монокристаллической структурой. Минимально необходимый объем данных должен включать следующие характеристики:

- *характеристики упругости* – средние значения модулей Юнга $E(\langle 001 \rangle)$, $E(\langle 011 \rangle)$, $E(\langle 111 \rangle)$ и средние значения модулей упругости C_{11} , C_{12} , C_{44} (или постоянных податливости S_{11} , S_{12} , S_{44}). Необходимость в значениях модулей упругости C_{11} , C_{12} , C_{44} определяется соответствующими расчетными моделями для монокристаллических лопаток в программных комплексах типа ANSYS, которые могут учитывать кристаллографическую анизотропию монокристаллической структуры материала лопатки. На рис. 9 и 10 в качестве примера показаны результаты расчета формы и частот колебаний ($T = 20$ °С) для простой модели – плоского образца для усталостных испытаний из одного материала (сплав ЖС6Ф), но с разной структурой (а – образец с равноосной структурой; б – образец с монокристаллической структурой и аксиальной кристаллографической ориентацией в направлении $\langle 001 \rangle$). Как следует из полученных результатов, форма колебаний по первой гармонике одинакова (изгибная) для обоих образцов, но при этом различаются частоты колебаний (рис. 9). Вторая форма колебаний для этих образцов различна (рис. 10), хотя при этом их частоты практически одинаковы. Таким образом для корректной оценки форм и частот собственных колебаний лопатки необходимы значения упругих модулей C_{11} , C_{12} , C_{44} ;

- *характеристики кратковременной прочности при растяжении* – средние значения и дисперсия (или СКО) предела прочности – σ_B , условного предела текучести – $\sigma_{0,2}$, относительного удлинения δ и относительного сужения ψ , диаграмма растяжения для средних значений. Уровни температур – 20, 250, 450, 550, 650, 750, 850, 950, 1050, 1150 °С. Количество образцов – не менее 3-х от каждой плавки (количество плавок – 3) на каждую температуру;

- *характеристики ползучести и длительной прочности* – средние значения и дисперсия (или СКО) характеристик ползучести (по допуску на деформацию $\epsilon = 0,2, 0,5$ и 1%) и длительной прочно-

сти на временных базах (не менее) 100, 500 и 1000 часов определяются по результатам испытаний образцов при температурах – 550, 650, 750, 850, 950, 1050, 1150 °С. Количество образцов – не менее 3-х от каждой плавки (количество плавок – 3) на каждый режим испытаний;

- *характеристики МнЦУ* – средние значения и дисперсия (или СКО) определяются по результатам испытаний образцов (10 образцов от плавки №1 и 5 образцов от плавки № 2 на каждый температурный уровень) при температурах – 650, 750, 950, 1050 °С и значениях коэффициента асимметрии $R_\sigma = -1; 0; 0,5$. Испытания проводятся при осевом нагружении (растяжение – сжатие), с построением кривой МнЦУ до значений $N = 10^7$ или $N = 2 \cdot 10^7$ циклов;

- *характеристики МЦУ* – средние значения и дисперсия (или СКО) определяются по результатам испытаний образцов (по 10 образцов от двух различных плавок на один температурный уровень) при температурах 20, 650, 750, 850 °С и одном значении коэффициента асимметрии $R_\sigma = 0$ при осевом нагружении с построением кривой МЦУ до значений $N = 5 \cdot 10^4$ или $N = 10^5$ циклов;

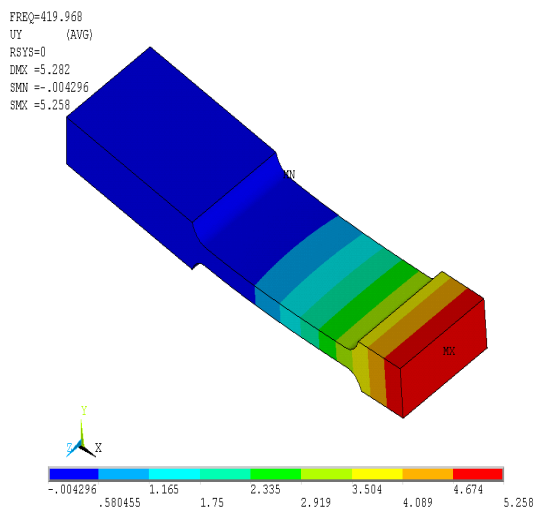
- *характеристики трещиностойкости (K_{1C} и $СРТУ$)* – средние значения определяются по результатам испытаний образцов (по 2 образца от плавки № 1, и по одному образцу от другой плавки на температуру) при температурах 20, 550, 650, 750 °С и значениях коэффициента асимметрии $R_\sigma = 0$.

Вышеперечисленные характеристики должны определяться на монокристаллических образцах с аксиальной кристаллографической ориентацией $\langle 001 \rangle$ в указанном объеме испытаний. Для аксиальных ориентацией $\langle 011 \rangle$ и $\langle 111 \rangle$ испытания должны проводиться в меньших объемах на образцах только одной плавки и при минимальной, средней и максимальной температуре из указанного выше диапазона температур. При необходимости, в дополнение к указанным характеристикам, определяются средние значения характеристик термической

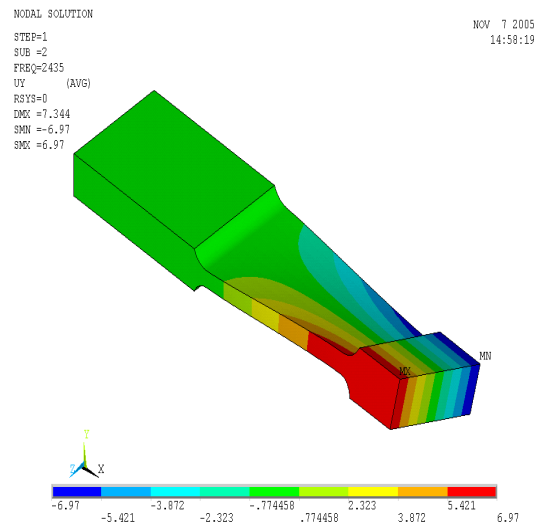
усталости и коэффициента Пуассона для каждой аксиальной ориентации $\langle 001 \rangle$, $\langle 011 \rangle$ и $\langle 111 \rangle$.

На основании анализа полученных характеристик с использованием прочностных расчетных моделей проводится оптимизация аксиальной и азимутальной ориентации проектируемой монокристаллической лопатки.

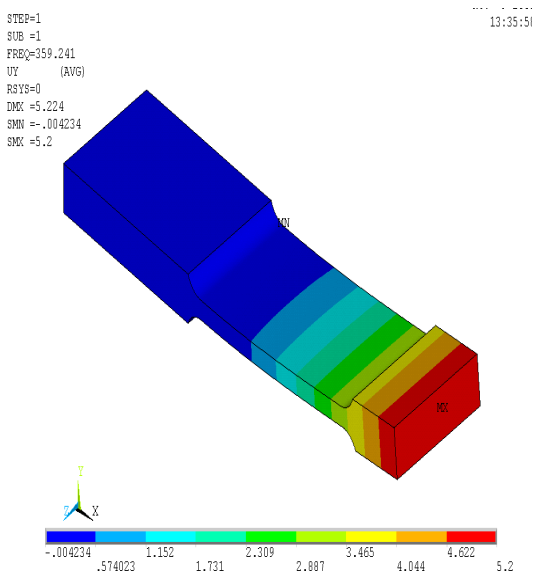
нологий монокристаллического литья рабочих лопаток ТВД [9], объем имеющихся в отечественной промышленности экспериментальных данных по характеристикам конструкционной прочности этих сплавов явно недостаточен для разработки современных моделей прочности и долговечности лопаток с монокристаллической структурой.



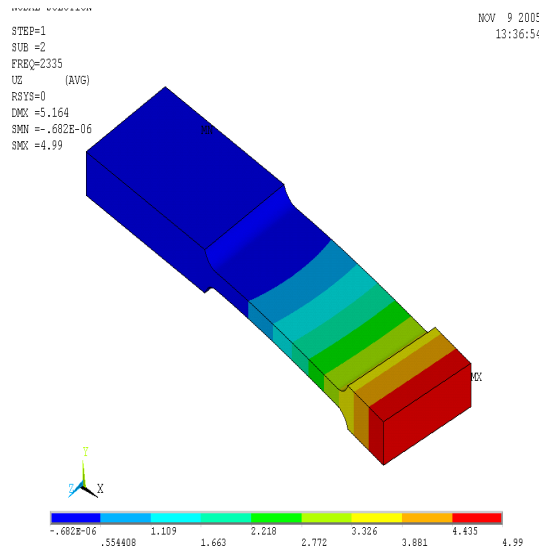
а



а



б



б

Рис. 9. Образец с равноосной (а) и монокристаллической (б) структурой:
а – изгибная форма колебаний, $f_1 = 420$ Гц;
б – изгибная форма колебаний, $f_1 = 359$ Гц

Рис. 10. Образец с равноосной (а) и монокристаллической (б) структурой:
а – вторая форма крутильная, $f_2 = 2435$ Гц;
б – изгибная форма в плоскости максимальной жесткости, $f_2 = 2335$ Гц

В заключение необходимо отметить, что, несмотря на определенные достижения в области разработки новых высокожаропрочных сплавов и тех-

Такие работы необходимо активно развивать, так как в современном мире постоянно совершенствуются расчетные модели монокристаллов с включением

в них характеристик процессов накопления деформации и разрушения на макро- и микроуровнях.

Литература

1. Nozhnitsky Y.A., Doulnev R.A., Soundyrin V.G. // Damage Mechanisms for Thermomechanical Fatigue of Aircraft Engines Materials // Proc. AGARG Conference 569 "Thermal Mechanical Fatigue of Aircraft Engines Materials, NATO, 1996, P. 14.1-14.12.

2. Ножницкий Ю.А., Ануров Ю.М., Федорченко Д.Г., Семенов А.П. Особенности проектирования и ресурса рабочих лопаток турбин с теплозащитным керамическим покрытием // Вестник СГАУ, сер. Проблемы и перспективы развития двигателестроения. – Самара, 1999. – Вып. 3, ч. 2. – С. 268-278.

3. Обеспечение прочностной надежности и ресурса газовых турбин, создаваемых на базе авиационных двигателей / Ю.А. Ножницкий, Н.Г. Бычков, Е.Р. Голубовский, Л.А. Магеррамова, А.А. Хориков // Теплоэнергетика. – 2005. – № 11. – С. 35-40.

4. Walston S., Cetel A., MacKay R., O'Hara K., Duhl D. and Dreshfield R. Joint Development of a Fourth Generation Single Crystal Superalloy // Superalloys-2004, Proceedings of the Tenth International Symposium on Superalloys, September 19-23, 2004, at the Seven Springs Mountain Resort in Champion, Pennsylvania, USA, P. 15-24.

5. Монокристаллы никелевых жаропрочных сплавов / Р.Е. Шалин, И.Л. Светлов, Е.Б. Качанов и др. – М.: Машиностроение, 1997. – 336 с.

6. Bullough C.K., Toullos M., Oehl M., Lukas P. The characterization of the single crystal superalloy CMSX-4 for industrial gas turbine blading applications // Mater. Adv. Power Eng., Liege, 1998, P. 861-878,

7. Голубовский Е.Р., Светлов И.Л. Температурно-временная зависимость анизотропии характе-

ристик длительной прочности монокристаллов никелевых жаропрочных сплавов // Проблемы прочности. – 2002. – № 2. – С. 5-19.

8. Голубовский Е.Р., Жуков Н.Д. Усталость жаропрочных никелевых сплавов для монокристаллических лопаток авиационных газотурбинных двигателей // XXVIII Межд. научно-техн. совещ. по проблемам прочности двигателей (26-28 ноября 2002г.), ИМАШ РАН. – М. – 2002. – С. 32-33.

9. Голубовский Е.Р., Жуков Н.Д. Сопротивление многоциклового усталости никелевых сплавов для лопаток ГТД с монокристаллической структурой // Межд. научно-техн. конф. «Проблемы и перспективы развития двигателестроения», часть 2. – Самара: СГАУ. – 26-27 июня 2003г. – С. 74-75.

10. Ориентационная зависимость термической усталости монокристаллов никелевого сплава / Р.А. Дульнев, И.Л. Светлов и др. // Проблемы прочности. – 1988. – № 11. – С. 3-9.

11. Kablov E.N., Golubovskiy E.R., Epishin A.I., Svetlov I.L. Anisotropy of low cycle and thermal fatigue of single-crystal as cast nickel-base superalloy GS6F // В кн. «Proceeding of the Fifth International Conference on Low Cycle Fatigue – LCF-5», Berlin, Germany, September 9-11, 2003, изд. DVM, 2004, Berlin, Germany, P.153-158.

12. Научно-технический сборник «Авиационные материалы и технологии». Вып. «Высокоренивые жаропрочные сплавы, технология и оборудование для производства сплавов и литья монокристаллических турбинных лопаток ГТД». – М.: ВИАМ, 2004. – 120 с.

Поступила в редакцию 4.05.2006

Рецензент: д-р техн. наук, проф. А.М. Мамонов, РГТУ – МАТИ им. К.Э. Циолковского, Москва.