

DOI: 10.15593/2224-9982/2015.40.07

УДК 621.452:620.191

Д.М. Узбяков

ОАО «Авиадвигатель», Пермь, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЦИКЛИЧЕСКОЙ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ ГРАНУЛЬНОГО СПЛАВА НА НИКЕЛЕВОЙ ОСНОВЕ С РАЗНОЙ ФРАКЦИЕЙ ГРАНУЛ

Проведены испытания по определению циклической трещиностойкости стандартных образцов, изготовленных из гранульного сплава с разной фракцией гранул. Рассмотрено несколько способов оценки циклической трещиностойкости. Выявлено влияние размера гранул гранульного сплава на основе никеля на характеристику скорости роста усталостной трещины. Экспериментально подтверждены более информативные по сравнению со стандартными методы обработки результатов испытаний. Кроме того, методом микрофрактографии изломов образцов подтверждены опытные данные, а также определены границы переходных участков кинетической диаграммы с целью определения коэффициентов уравнения Пэриса. Вычислена сходимость коэффициентов уравнения Пэриса путем перебора экспериментальных точек. Произведена качественная оценка характеристик циклической трещиностойкости гранульного сплава.

Ключевые слова: кинетическая диаграмма, скорость роста усталостной трещины, трещиностойкость, уравнение Пэриса, микроскопия поверхности разрушения, усталостные бороздки.

D.M. Uzbyakov

OJSC "Aviadvigatel", Perm, Russian Federation

RESEARCH OF CHARACTERISTICS OF CYCLIC CRACK RESISTANCE OF THE GRANULAR ALLOY ON THE NICKEL BASIS WITH DIFFERENT FRACTION OF GRANULES

Tests are conducted to determine the cyclic crack resistance of standard samples of granular alloy with different grain fraction. It is considered several ways to assess the cyclic crack resistance. The influence of grain size and the granular nickel-based alloy on the rate of the fatigue crack growth is determined. It is proved by experiment that considered methods of processing test results are more informative in comparison with conventional methods. The experimental data are confirmed by microfractography of the samples fractures. To determine the Paris coefficients the transition sections of the kinetic diagram is identified. The convergence of the Paris coefficients is determined by exhaustion of experimental points. The qualitative assessment of the characteristics of cyclic crack resistance of the granular alloy is made.

Keywords: the kinetic diagram, fatigue crack growth rate, fracture toughness, the equation of Paris, destruction surface microscopy, fatigue grooves.

Введение

Материалы силовых элементов авиационных конструкций работают в условиях воздействия сложного спектра статических и переменных нагрузок. Основной задачей при проектировании газотурбинных двигателей (ГТД) является улучшение эксплуатационных и технологических свойств материала, повышение технологического уровня и качества выпускаемой продукции.

С целью обеспечения надежной работы газотурбинного двигателя на всем сроке эксплуатации для наиболее нагруженных элементов двигателя производится расчет ресурса детали на стадии проектирования. Расчет ресурса деталей ГТД производится с учетом зарождения и развития в них дефектов, таких как трещины [1–6].

Ресурс основных деталей ГТД в соответствии с принятыми в российском авиадвигателестроении нормативными документами определяется с учетом скорости роста трещин от дефектов, не выявляемых применяемыми при изготовлении основных деталей методами неразрушающего контроля [7].

Зависимость скорости роста трещины от коэффициента интенсивности напряжений описывается кинетической диаграммой, первый и третий участок которой характеризуют процесс неустойчивого (ускоренного) роста трещины, второй – устойчивый, описываемый уравнением Пэриса. Микрофрактографическим признаком устойчивого роста являются усталостные бороздки на поверхности разрушения, расстояние между которыми определяет подрастание трещины в каждом цикле нагружения.

Для одного материала, изготовленного из разных фракций гранул сплава на никелевой основе, кинетические диаграммы могут быть отличны друг от друга, соответственно, необходимо учитывать данный фактор при проектировании и изготовлении деталей. С этой целью в настоящей работе проведено исследование кинетической диаграммы усталостного разрушения, полученной при испытании стандартных образцов, изготовленных из одного материала, но с разной фракцией гранул – 70 и 100 мкм.

Методика испытания образцов на циклическую трещиностойкость

Объектом испытания является компактный образец, изготовленный путем эрозионной вырезки из заготовки диска турбины ГТД с последующей механической обработкой (рис. 1). Вырезка образцов осуществлялась из заготовок, изготовленных изостатическим прессованием гранульного сплава на основе никеля с разной фракцией, одна из которых была изготовлена из гранул фракции не более 70 мкм, а вторая – не более 100 мкм.

Испытания компактных образцов на циклическую трещиностойкость проводились на установке LFV-100 (рис. 2). Испытательная установка предназначена для испытания образцов в широком диапазоне скоростей деформирования при статическом растяжении, а также при циклическом нагружении с заданным коэффициентом асимметрии в пределах грузоспособности машины (100 кН), для испытаний на циклическую трещиностойкость в соответствии с ASTM E-647.

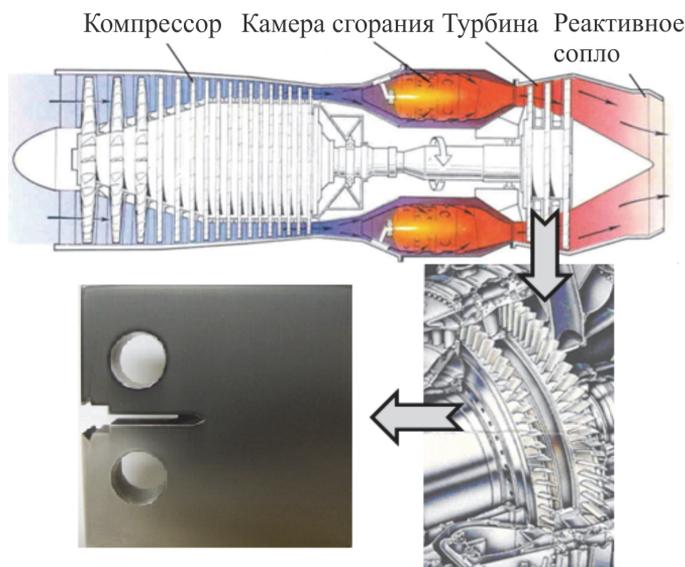


Рис. 1. Внешний вид компактного образца, изготовленного из заготовки диска турбины газотурбинного двигателя



Рис. 2. Внешний вид установки LFV-100

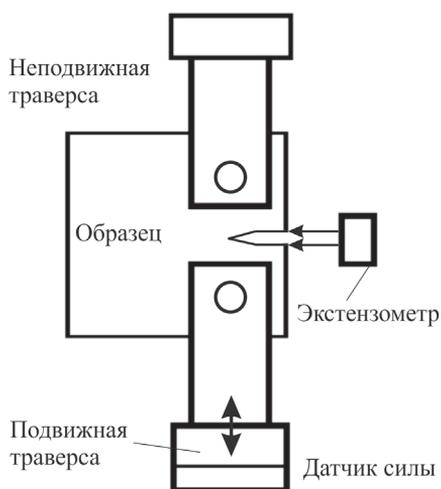


Рис. 3. Принципиальная схема испытания на циклическую трещиностойкость на установке LFV-100

Принципиальная схема испытания приведена на рис. 3. Нагружение при проведении испытаний происходило с коэффициентом асимметрии 0,1. Нагрев образцов до температур от 100 до 1000 °С и контроль уровня температуры осуществлялся по результатам ранее выполненного термометрирования образца.

Анализ результатов испытаний

Объем проведенных испытаний стандартных образцов на скорость роста трещины усталости (СРТУ) в температурном диапазоне, соответствующем рабочему температурному диапазону детали, позволил выявить особенности зависимостей коэффициентов уравнения Пэриса для гранульного сплава, изготовленного из гранул различных фракций. Поскольку согласно ОСТ¹ линейный участок кинетической диаграммы, представленной как зависимость $\lg(dL/dN)$ к $\lg(\Delta K)$ (рис. 4), соответствует диапазону скоростей 10^{-5} – 10^{-3} мм/цикл, а отбрасывание экспериментальных данных (при определении коэффициентов C и n в соответствии с ОСТ 1 92127–90) производится по формальному признаку, границы второго участка могут быть определены с большой погрешностью и попавшие в них экспериментальные данные могут существенно исказить угол наклона прямой. Согласно работе [8] скорости 10^{-5} и 10^{-3} мм/цикл лишь приблизительно характеризуют границы начала и конца второго участка кинетической диаграммы.

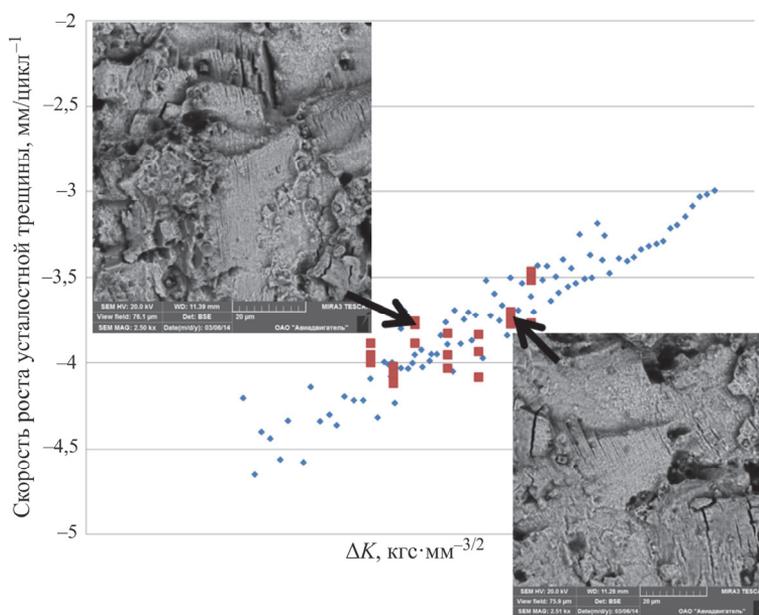


Рис. 4. Кинетическая диаграмма, полученная при испытаниях при температуре 750 °С, со снимками излома на разной длине трещины: ♦ – данные, полученные при помощи экстензометра; ■ – точки, полученные путем микрофрактографического исследования изломов образцов

¹ ОСТ 1 92127-90. Металлы. Метод определения скорости роста усталостной трещины при испытаниях с постоянной амплитудой нагрузки.

Для достоверного определения коэффициентов C и n необходимо наиболее точно определить границы линейного участка кинетической диаграммы. Таким образом, предпочтительным способом отбора экспериментальных данных является фрактографический метод [7].

Устойчивый рост трещины обеспечивается действием на ее фронте высокоэнергетического механизма периодического расслаивания-разрыва [9, 10]. В результате хрупкого поперечного расслаивания формируется трещина и на поверхностях разрушения образуются расслоения – усталостные бороздки.

Особо важным фактором для определения устойчивого участка кинетической диаграммы методом фрактографического исследования изломов стандартных образцов является наличие ярко выраженных бороздок, определение которых – не менее важный фактор в построении кинетической диаграммы.

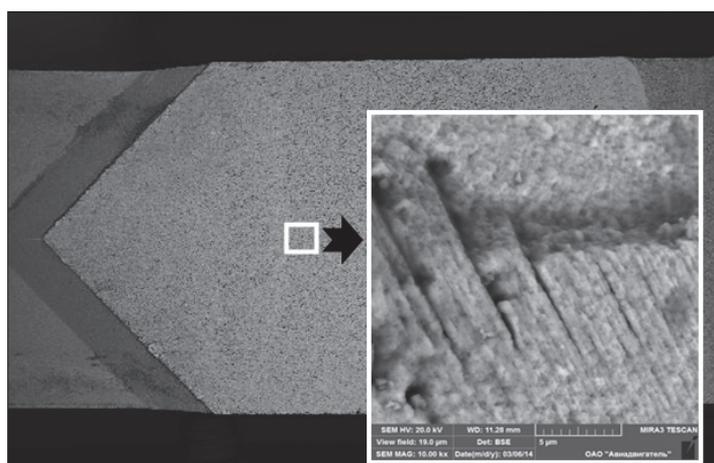


Рис. 5. Микрофрактограмма бороздчатой структуры

Схематизированное описание действия механизма периодического расслаивания-разрыва представлено в работе [11], рассмотренная модель позволяет объяснить основные закономерности устойчивого роста усталостных трещин. На этапе устойчивого роста трещины характерно выражены первичные хрупкие расслаивания вдоль направления роста трещины, при этом разрыв перемычки формирует поверхность разрушения в перпендикулярном направлении. На рис. 5 изображена микрофрактограмма бороздчатой структуры, расколовшейся в поперечном направлении к бороздкам. На участке неустойчивого

роста трещины формируется ямочный микрорельеф излома, вызванный механизмами роста и объединения микротрещин, которые зарождаются на границах микрофрагментов [12].

Однако сам метод фрактографических исследований требует специального оборудования и квалифицированного персонала, что делает такой метод оценки экспериментальных данных дорогостоящим и трудоемким. Также согласно работе [13] построение кинетической диаграммы по шагу бороздок невозможно из-за особенностей морфологии поверхности разрушения образцов. Учитывая вышеизложенное, в процессе проведения фрактографического исследования был выявлен один образец, в единичном варианте так и не удалось построить устойчивый участок кинетической диаграммы по шагу бороздок (рис. 6), что повлекло за собой использование иного способа обработки экспериментальных данных.

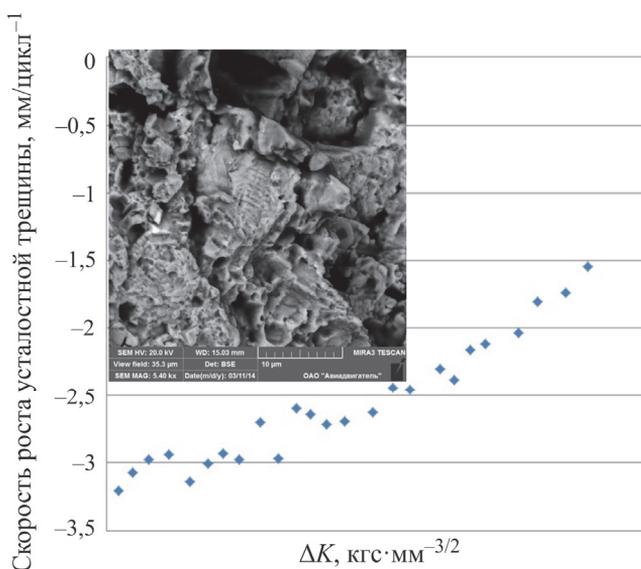


Рис. 6. Кинетическая диаграмма, полученная при испытаниях при температуре 650 °С, со снимками излома на разной длине трещины

Также результаты фрактографических исследований образцов показывают, что действительные границы второго участка могут соответствовать скоростям от 10^{-5} до 10^{-4} мм/цикл для начала и скоростям от 10^{-3} до 10^{-2} мм/цикл для конца участка [7].

Использование коэффициентов уравнения Пэриса, принятых по рекомендациям работы [8], позволяет обеспечить более хорошую сходимость расчетного определения СРТУ с экспериментальными данными.

Для подтверждения выбранных границ второго участка, на основе работ [7, 14] при обработке экспериментальных данных путем отброса всех точек, у которых скорость выше 10^{-3} мм/цикл, и последующего перебора экспериментальных точек для сравнения коэффициентов C и n , полученных путем аппроксимации методом наименьших квадратов, на рис. 7 приведены графики сходимости коэффициентов C и n .

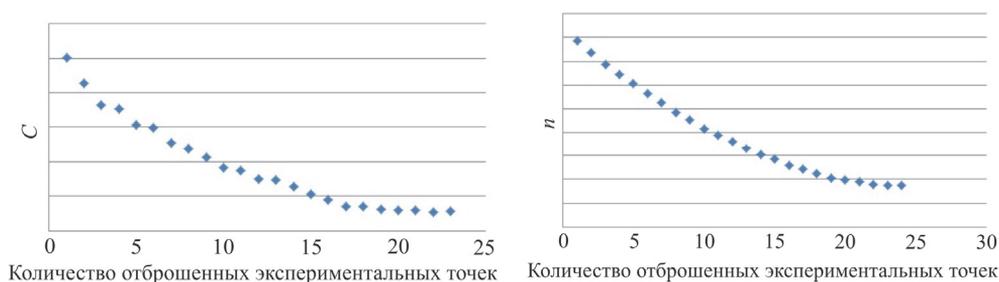


Рис. 7. Графики сходимости коэффициентов C и n уравнения Пэриса

Используемые способы обработки экспериментальных данных позволили наиболее точно определить коэффициенты кинетической диаграммы для каждого образца и построить кинетические диаграммы для каждой из температур (рис. 8). Преимуществом данного способа обработки результатов испытаний на СРТУ является отсутствие погрешности при определении коэффициентов C и n [14].

Полученные коэффициенты уравнения Пэриса позволили построить кинетические диаграммы для каждой из температур и качественно оценить характеристики СРТУ для данного материала, изготовленного из разных фракций гранул (рис. 9). Построены графики $L(N)$ при повышенных температурах, что наглядно позволило оценить устойчивость к развитию усталостной трещины гранульного сплава, изготовленного из гранул с фракцией менее 70 мкм, по сравнению с устойчивостью того же сплава на никелевой основе из гранул с фракцией менее 100 мкм.

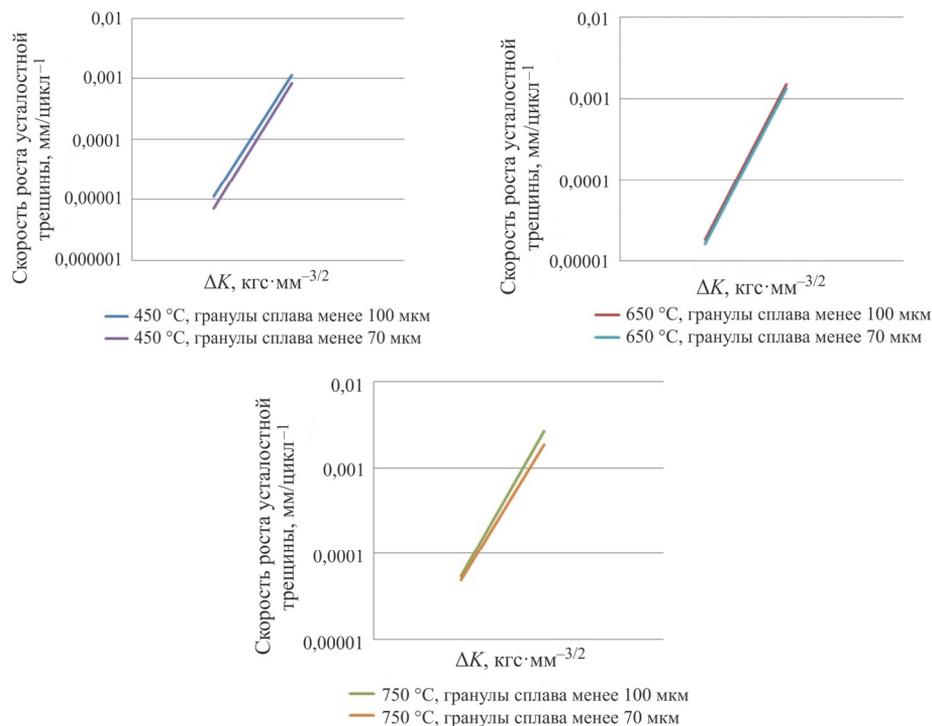


Рис. 8. Кинетическая диаграмма гранульного сплава при разных температурах

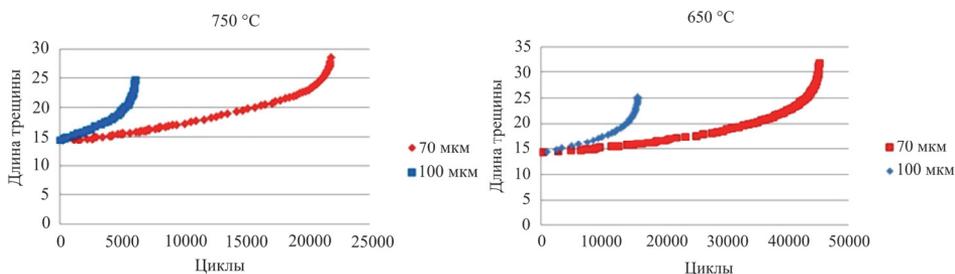


Рис. 9. Графики зависимости длины трещины от числа циклов нагружения, полученные в результате испытания при повышенных температурах

Заклучение

Проведены испытания стандартных образцов на определение характеристик СРТУ из гранульного сплава. Испытания проводились при повышенных температурах, равных рабочим температурам данного сплава. При обработке экспериментальных данных были применены два нестандартных метода для определения границ устойчивого участка кинетической диаграммы для каждого из образцов. Определены ко-

эффиценты C и n уравнения Пэриса кинетической диаграммы для каждого образца.

Установлено, что для гранульных сплавов, изготовленных на никелевой основе, характеристика циклической трещиностойкости зависит от фракции гранул, из которых изготовлена заготовка. Полученные результаты свидетельствуют о том, что гранульный сплав, изготовленный из гранул с фракцией менее 70 мкм, устойчивее к развитию трещины почти в 1,5 раза, чем гранульный сплав, изготовленный из гранул с фракцией менее 100 мкм.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (договор № 02.G25.31.0016) в рамках реализации Постановления Правительства РФ № 218 «О мерах государственной поддержки развития кооперации российских высших учебных заведений и организаций, реализующих комплексные проекты по созданию высокотехнологичного производства».

Библиографический список

1. Иноземцев А.А., Нихамкин М.Ш., Сандрацкий В.Л. Основы конструирования авиационных двигателей и энергетических установок. – М.: Машиностроение, 2008. – Т. 4. – 368 с.
2. Нихамкин М.Ш., Вятчанин Д.А. Вероятностная оценка циклической долговечности дисков ГТД из гранулируемых материалов // Известия вузов. Авиационная техника. – 2008. – № 1. – С. 70–71.
3. Малоцикловая усталость и циклическая трещиностойкость никелевого сплава при нагружении, характерном для дисков турбин / А.А. Иноземцев, А.М. Ратчиев, М.Ш. Нихамкин, А.В. Ильиных, В.Э. Вильдеман, М.А. Вятчанин // Тяжелое машиностроение. – 2011. – № 4. – С. 30–33.
4. Экспериментальная проверка модели суммирования повреждений при циклическом нагружении дисков турбин / А.А. Иноземцев, М.Ш. Нихамкин, А.В. Ильиных, А.М. Ратчиев // Известия Самар. науч. центра РАН. – 2012. – Т. 14, № 4–5. – С. 1372–1375.
5. Nikhamkin M., Ilinykh A. Low Cycle Fatigue and Crack Grow in Powder Nickel Alloy under Turbine Disk Wave Form Loading: Validation of Damage Accumulation Model // Applied Mechanics and Materials. – 2013. – Vol. 467. – P. 312–317, available at: <http://www.scientific.net/AMM.467/6> (дата обращения: 30.12.2014).

6. Швечков Е.И. Методы оценки характеристики трещиностойкости при выборе состава и режимов термообработки листов из конструкционных сплавов // Технология легких сплавов. – 2013. – № 4. – С. 84–93.

7. Потапов С.Д., Перепелица Д.Д. Способ обработки результатов испытаний образцов на трещиностойкость с целью определения коэффициентов уравнения Пэриса // Вестник МАИ. – 2010. – Т. 17, № 6. – С. 49–54.

8. Туманов Н.В., Лаврентьева М.А., Черкасова С.А. Реконструкция и прогнозирование развития усталостных трещин в дисках авиационных ГТД // Конверсия в машиностроении. – 2005. – № 4–5. – С. 98–106.

9. Туманов Н.В. Механизм устойчивого роста усталостных трещин // Механизмы деформации и разрушения перспективных материалов: тр. XXXV конф. «Актуальные проблемы прочности»: в 2 т. – Псков, 1999. – Т. 1. – С. 307–314.

10. Туманов Н.В. Стадийность кинетики усталостных трещин и механизм периодического расслаивания-разрыва // Деформация и разрушение материалов: тр. I междунар. конф.: в 2 т. / Ин-т металлургии и материаловедения РАН. – М., 2006. – Т. 1. – С. 85–87.

11. Моделирование устойчивого роста трещин в дисках турбины авиадвигателей при простом и сложном циклах нагружения / Н.В. Туманов, М.А. Лаврентьева, С.А. Черкасова, А.Н. Серветник // Вестник СГАУ. – 2009. – № 3(19). – С. 188–199.

12. Рыбин В.В. Большие пластические деформации и разрушение металлов. – М.: Металлургия, 1986. – 224 с.

13. Потапов С.Д., Перепелица Д.Д. Исследование циклической скорости роста трещин в материалах основных деталей авиационных ГТД // Технология легких сплавов. – 2013. – № 2. – С. 5–19.

14. Потапов С.Д., Перепелица Д.Д. Способ обработки результатов испытаний образцов на скорость роста трещины при постоянной амплитуде нагружения // Вестник МАИ. – 2012. – Т. 19, № 2. – С. 94–101.

References

1. Inozemtsev A.A., Nikhamkin M.Sh., Sandratskiy V.L. Osnovy konstruirovaniya aviatsionnykh dvigateley i energeticheskikh ustanovok [Design principles for aviation engines and power plants]. Moscow: Mashinostroenie, 2008, vol. 4. 368 p.

2. Nikhamkin M.Sh., Vyatchanin D.A. Veroyatnostnaya otsenka tsiklicheskoj dolgovechnosti diskov GTD iz granuliruemykh materialov [Probabilistic assessment of fatigue life of gas-turbine engine disk of granulated materials]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Aviatsionnaya tekhnika*, 2008, no. 1, pp. 70-71.

3. Inozemtsev A.A., Ratchiev A.M., Nikhamkin M.Sh., Ilinykh A.V., Vildeman V.E., Vyatchanin M.A. Malotsiklovaya ustalost i tsiklicheskaya treshchinostoykost nikelovogo splava pri nagruzhении, kharakternom dlya diskov turbin [Low-cycle fatigue and fatigue crack growth of nickel alloy at stressing gas-turbine engine disk]. *Tyazheloe mashinostroenie*, 2011, no. 4, pp. 30-33.

4. Inozemtsev A.A., Nikhamkin M.Sh., Ilinykh A.V., Ratchiev A.M. Eksperimentalnaya proverka modeli summirovaniya povrezhdeniy pri tsiklicheskom nagruzhении diskov turbin [Experimental validation of model of damage summation at stressing gas-turbine engine disk]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk*, 2012, vol. 14, no. 4-5, pp. 1372-1375.

5. Nikhamkin M., Ilinykh A. Low Cycle Fatigue and Crack Grow in Powder Nickel Alloy under Turbine Disk Wave Form Loading: Validation of Damage Accumulation Model. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, vol. 467, pp. 312-317, available at: <http://www.scientific.net/AMM.467/6> (accessed 30 December 2014).

6. Shvechikov E.I. Metody otsenki kharakteristiki treshchinostoykosti pri vybore sostava i rezhimov termoobrabotki listov iz konstruktsionnykh splavov [Valuation methods of crack growth resistance of constructional alloy plates]. *Tekhnologiya legkikh splavov*, 2013, no. 4, pp. 84-93.

7. Potapov S.D., Perepelitsa D.D. Sposob obrabotki rezultatov ispytaniy obraztsov na treshchinostoykost s tselyu opredeleniya koeffitsientov uravneniya Perisa [Processing technique for experimental data of crack growth resistance to determine the coefficients of Paris equation]. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2010, vol. 17, no. 6, pp. 49-54.

8. Tumanov N.V., Lavrenteva M.A., Cherkasova S.A. Rekonstruktsiya i prognozirovanie razvitiya ustalostnykh treshchin v diskakh aviatsionnykh GTD [Reconstruction and prediction of fatigue crack growth in disk of aviation gas-turbine engine]. *Konversiya v mashinostroenii*, 2005, no. 4-5, pp. 98-106.

9. Tumanov N.V. Mekhanizm ustoychivogo rosta ustalostnykh treshchin [Mechanisms of stable fatigue crack growth]. *Mekhanizmy deformatsii i razrusheniya perspektivnykh materialov*, 1999, vol. 1, pp. 307-314.

10. Tumanov N.V. Stadiynost kinetiki ustalostnykh treshchin i mekhanizm periodicheskogo rasslaivaniya-razryva [Staging fatigue crack kinetics and mechanisms of periodical delamination and rupture]. *Trudy I mezhdunarodnoy konferentsii "Deformatsiya i razrushenie materialov"*, 2006, vol. 1, pp. 85-87.

11. Tumanov N.V., Lavrenteva M.A., Cherkasova S.A., Servetnik A.N. Modelirovanie ustoychivogo rosta treshchin v diskakh turbiny aviadvigatelyey pri prostom i slozhnom tsiklakh nagruzheniya [Simulation of stable crack growth in disk of aviation engine turbine at simple and complex cycles of loading]. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2009, no. 3(19), pp. 188-199.

12. Rybin V.V. Bolshie plasticheskie deformatsii i razrushenie metallov [Large plastic deformation and failure of the metal]. Moscow: Metallurgiya, 1986. 224 p.

13. Potapov S.D., Perepelitsa D.D. Issledovanie tsiklicheskoj skorosti rosta treshchin v materialakh osnovnykh detaley aviatsionnykh GTD [Study of cyclic rate of crack growth in materials of basic parts of aviation gas-turbine engines]. *Tekhnologiya legkikh splavov*, 2013, no. 2, pp. 5-19.

14. Potapov S.D., Perepelitsa D.D. Sposob obrabotki rezultatov ispytaniy obraztsov na skorost rosta treshchiny pri postoyannoy amplitude nagruzheniya [Processing technique for experimental data of crack growth at stable amplitude of loading]. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2012, vol. 19, no. 2, pp. 94-101.

Об авторах

Узбяков Дмитрий Мубинович (Пермь, Россия) – инженер-исследователь ОАО «Авиадвигатель» (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., д. 93, e-mail: kpm05@rambler.ru).

About the authors

Dmitriy M. Uzbyakov (Perm, Russian Federation) – Research Engineer of OJSC „Aviadvigatel“ (93, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: kpm05@rambler.ru).

Получено 16.01.2015