

УДК 539.3

DOI: 10.32326/1814-9146-2022-84-1-62-81

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УСТАЛОСТНОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ДЕТАЛЕЙ АВИАЦИОННЫХ ГТД ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОМ ДВУХЧАСТОТНОМ НАГРУЖЕНИИ

© 2022 г.

Боев Е.В.

*Национальный исследовательский Нижегородский государственный
университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Российская Федерация*

e.boev87@mail.ru

Поступила в редакцию 16.12.2021

Обсуждается проблема оценки ресурсных характеристик ответственных инженерных объектов с учетом особенностей эксплуатационных режимов нагружения. Рассматриваются процессы усталостной долговечности поликристаллических конструкционных сплавов при циклическом двухчастотном нагружении (при совместном действии механизмов мало- и многоциклового усталости).

С современных позиций механики поврежденной среды и механики разрушения развита математическая модель, описывающая процессы циклического упругопластического деформирования и накопления усталостных повреждений в конструкционных сплавах при многоосных непропорциональных режимах комбинированного термомеханического нагружения. Модель состоит из трех взаимосвязанных частей: соотношений, определяющих циклическое упругопластическое поведение материала с учетом зависимости от процесса разрушения; эволюционных уравнений, описывающих кинетику накопления усталостных повреждений; критерия прочности поврежденного материала.

Вариант определяющих соотношений упругопластичности основан на представлении о поверхности текучести и принципе градиентальности вектора скорости пластических деформаций к поверхности текучести в точке нагружения; он отражает основные эффекты циклического упругопластического деформирования материала для произвольных сложных траекторий нагружения.

Вариант кинетических уравнений накопления усталостных повреждений основан на введении скалярного параметра поврежденности, базируется на энергетических принципах и учитывает основные эффекты образования, роста и слияния микродефектов при произвольных сложных режимах циклического нагружения. Предложена совместная форма эволюционного уравнения накопления усталостных повреждений в областях мало- и многоциклового усталости.

В качестве критерия прочности поврежденного материала используется условие достижения величиной поврежденности критического значения.

Представлены результаты численного моделирования усталостной долговечности компактного образца (модели дефлектора диска турбины высокого

*Экспериментальные исследования проводились при частичной финансовой поддержке РФФИ (грант №22-19-00138).

давления авиационного газотурбинного двигателя) при циклическом двухчастотном нагружении. Результаты сопоставления расчетных и экспериментальных данных показали, что предложенная модель механики поврежденной среды качественно и с необходимой для практических расчетов точностью количественно описывает усталостную долговечность элементов конструкций при циклическом двухчастотном нагружении.

Ключевые слова: механика поврежденной среды, деформация, напряжения, поврежденность, численное моделирование, малоцикловая усталость, усталостная долговечность, двухчастотное нагружение, численный и натурный эксперименты, лопатка авиационного газотурбинного двигателя, дефлектор диска турбины высокого давления.

Введение

Развитие конструкций и аппаратов современного энергомашиностроения, самолетостроения и других высокотехнологичных отраслей промышленности характеризуется увеличением рабочих параметров, снижением металлоемкости за счет рационального проектирования и применения новых конструкционных материалов, значительным ростом удельного веса нестационарных режимов нагружения, существенным расширением температурного диапазона работы конструкций. Подобные тенденции привели к тому, что в настоящее время одной из основных задач при разработке и проектировании конструкций и аппаратов новой техники является надежная расчетная оценка их прочности и ресурса [1]. Эта задача наиболее актуальна для конструкций, срок службы которых составляет несколько десятков лет (атомные энергетические установки, авиационные газотурбинные двигатели (ГТД) и газотурбинные установки нового поколения, нефтехимическое оборудование и др.).

Внезапные прочностные отказы конструктивных элементов являются следствием деградации начальных прочностных характеристик конструкционных материалов в результате накопления повреждений под воздействием физических полей различной природы. Ввиду локальности деградационных процессов работоспособность конструктивных элементов определяется ресурсом их опасных зон – зон с наибольшими темпами ухудшения физико-механических свойств. Параметры этих зон могут сильно отличаться вследствие различия свойств самих материалов, конструктивных особенностей, эксплуатационных условий, технологии изготовления и др.

На стадии проектирования обеспечение безопасности, зависящей от прочности, сводится к обоснованию ресурса (наработки) в течение заданного срока службы для исходной консервативной модели эксплуатации объекта (заложенной в проект истории нагружения конструктивного узла) с запасами на «незнание» истинных условий эксплуатации, реальных индивидуальных физико-механических и прочностных характеристик конструкционных материалов, предельных состояний, приближенности расчетных методик и др.

Наиболее эффективно для этих целей математическое моделирование процессов деградации с использованием современных моделей и методов механики поврежденной среды (МПС) и механики разрушения [2–6]. Полученные в результате моделирования расчетные значения поврежденности материала в доступных зонах должны корректироваться путем периодического неразрушающего контроля современными физическими методами состояния материала доступных зон при остановках или ремонтах объекта.

Расчеты элементов конструкций на усталость обычно основаны на результатах лабораторных испытаний образцов.

Многолетние экспериментальные исследования усталостной долговечности поликристаллических конструкционных сплавов позволяют сделать вывод, что усталость охватывает три области циклического нагружения (рис. 1), характеризующиеся особенностями протекающих процессов накопления усталостных повреждений, – область малоциклового усталости (МЦУ), область многоциклового усталости (МнЦУ) и область гигациклового усталости (ГЦУ) [1, 7–9].

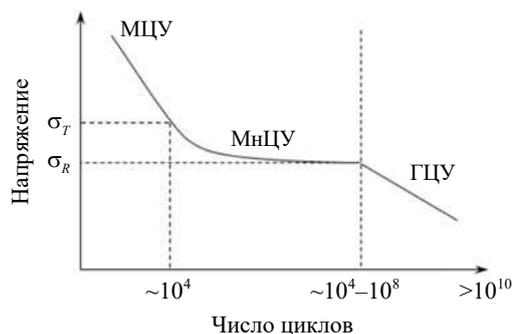


Рис. 1. Кривая усталости

Одна из этих областей – МЦУ – область циклического нагружения, при котором во время каждого цикла возникают знакопеременные макроскопические пластические деформации. Эта область характеризуется небольшим числом циклов N_f до усталостного разрушения ($N_f < 10^4$ в экспериментах на одноосное растяжение-сжатие лабораторных образцов) и реализуется в элементах конструкций в зонах высоких температур и конструктивной концентрации напряжений при номинальных допускаемых напряжениях $(0,5-0,8)\sigma_T$, σ_T – предел текучести материала. Процесс МЦУ сопровождается циклическим упрочнением (или разупрочнением) материала и нелинейной зависимостью напряжение–деформация при циклическом деформировании. Малоцикловая усталость в значительной мере зависит от циклических свойств конструкционного материала и истории нагружения [5, 6].

Две другие области – области циклического нагружения, при котором макроскопическая деформация во время каждого цикла принимается упругой, а пластическими деформациями пренебрегают.

Особое место при расчетах ресурсных характеристик машин и аппаратов новой техники, а также при продлении ресурса действующих инженерных объектов занимают виды нагружения, в условиях которых реализуется суммарное воздействие от низкочастотных и высокочастотных нагрузок [10–14]. Такой вид нагружения существенно влияет на пластические и ресурсные характеристики конструкционного материала. Достаточно большое количество публикаций, связанных с исследованиями процессов двухчастотного нагружения, посвящено разработке аналитических зависимостей для расчетной оценки ресурсных характеристик. Однако они в основном базируются на критериальных подходах и не учитывают всей истории нагружения при эксплуатационном воздействии [7, 15–22]. Необходимо отметить, что накопление повреждений при воздействии двухчастотного нагружения является существенно нелинейным процессом и зависит от кинетики напряженно-деформированного состояния (НДС) и температуры нагружения. Анализ имеющихся экспери-

ментальных данных при двухчастотном нагружении свидетельствует о существенном снижении циклической прочности по сравнению с одночастотным нагружением [11–15, 23]. Таким образом, анализ экспериментальных и теоретических работ позволяет сделать вывод, что требуется современный научно обоснованный подход к оценке ресурсных характеристик конструкционных сплавов в условиях действия двух и более нагрузок, отличающихся по частоте и амплитуде воздействия. Подход должен основываться на физически обоснованных закономерностях, связывающих упругопластическое поведение и ресурсные характеристики материала.

Один из таких подходов, позволяющих устранить этот недостаток, базируется на исследовании неупругих циклических деформаций как при одночастотном, так и при двухчастотном нагружении. Это важно, поскольку в ряде публикаций однозначно была показана взаимосвязь процессов неупругого деформирования и усталостного повреждения металлов [7, 12, 15, 23, 24].

Используемая математическая модель МПС [2–6] позволяет численно моделировать процессы кинетики НДС и накопления усталостных повреждений при мало- и многоциклового усталости. Оценка достоверности полученных расчетных данных осуществлялась путем сравнения их с результатами экспериментальных исследований.

1. Определяющие соотношения математической модели механики поврежденной среды

Основные постулаты и положения для рассматриваемой математической модели МПС заключаются в следующем:

- рассматривается начально изотропный материал; учитывается только анизотропия, связанная с процессами пластического деформирования; процесс поврежденности материала изотропный;
- тензоры деформаций e_{ij} и их скоростей \dot{e}_{ij} являются суммой упругих e_{ij}^e, \dot{e}_{ij}^e и пластических компонент e_{ij}^p, \dot{e}_{ij}^p ;
- поверхность пластического нагружения описывается уравнением Мизеса;
- процессы деформирования характеризуются малыми деформациями;
- рассматривается только упругое изменение элементарного объема материала (пластическая несжимаемость);
- вводится скалярная мера поврежденности конструкционного материала ω , изменяющаяся в диапазоне $\omega_0 \leq \omega \leq \omega_f$;
- учитывается влияние поврежденности материала на процессы деформирования через тензор эффективных напряжений.

Математическая модель МПС состоит из соотношений, описывающих упругопластическое поведение конструкционного материала, уравнений накопления повреждений и критерия прочности поврежденного материала.

Определяющие соотношения пластичности

Принимается, что при упругом поведении материала девиаторная и шаровая составляющие тензоров напряжений и деформаций, а также их скоростей связаны обобщенным законом Гука:

$$\begin{aligned} \sigma &= 3K[e - \alpha(T - T_0)], \quad \sigma_{ij} = 2Ge_{ij}^e, \quad \dot{\sigma} = 3K(\dot{e} - \dot{\alpha}T - \alpha\dot{T}) + \frac{\dot{K}}{K}\sigma, \\ \dot{\sigma}_{ij} &= 2G\dot{e}_{ij}^e + \frac{\dot{G}}{G}\sigma'_{ij}, \end{aligned} \quad (1)$$

где $\alpha(T)$ – коэффициент линейного температурного расширения материала, $K(T)$ – модуль объемной упругости, $G(T)$ – модуль сдвига, T_0 – базовая температура, T – текущая температура.

Поверхность пластического нагружения описывается в виде:

$$F_{pl.} = S_{ij}S_{ij} - C_{pl}^2 = 0, \quad S_{ij} = \sigma'_{ij} - \rho_{ij}. \quad (2)$$

В пространстве пластических деформаций вводится поверхность «памяти»:

$$a_e = (e_{ij}^p - \xi_{ij})(e_{ij}^p - \xi_{ij}) - a_{e_{max}}^2 = 0, \quad (3)$$

где $a_{e_{max}}$ – максимальное значение интенсивности тензора пластических деформаций e_{ij}^p в процессе нагружения, ξ_{ij} – тензор односторонне накопленных пластических деформаций.

При численном моделировании кинетики НДС при пластическом деформировании необходимо максимально точно описывать процессы упрочнения и разупрочнения конструкционных материалов, так как эти механизмы играют определяющую роль в точности оценок ресурсных характеристик. При усталостном нагружении реализуется конкуренция процессов упрочнения и разупрочнения, вызванных в материале механизмами изменения фазового состава, микроструктурного состояния, изменением плотности дислокаций, а также влиянием изменения температуры [25]. Физические механизмы, протекающие в поликристаллических металлах и сплавах и влияющие на процессы упрочнения и разупрочнения, зависят от действующей температуры, вида траектории деформирования, длины пути пластического деформирования, действующих амплитуд интенсивности пластической деформации и степени стабилизации процесса деформирования.

Для учета эффектов упрочнения и разупрочнения, проявляющихся вследствие протекания различных физических механизмов в поликристаллических металлах и их сплавах [25], скорость изменения радиуса поверхности пластического нагружения принимается в виде суммы скоростей изменений радиуса поверхности пластического нагружения при пластическом деформировании:

$$\dot{C}_{pl}(\chi, T) = \sum_{i=1}^h \dot{C}_{pl}^{(i)}(\chi) + \sum_{l=1}^k \dot{C}_{pl}^{(l)}(T), \quad (4)$$

где $\dot{C}_{pl}^{(i)}(\chi)$, $\dot{C}_{pl}^{(l)}(T)$ – скорости изменения радиуса поверхности пластического нагружения за счет вклада определенного физического механизма упрочнения либо разупрочнения конструкционного материала и изменения температуры; $\dot{C}_{pl}(\chi, T)$ – суммарная скорость изменения радиуса поверхности пластического нагружения, определяемая аналогично интегральным по объему материала механическим макрохарактеристикам (предел пропорциональности, предел упругости, предел текучести) с учетом вклада каждого физического механизма:

$$\dot{C}_{pl}(\chi, T) = \left[\sum_{i=1}^n q_{\chi}^{(i)} f_m^{(i)}(a_e) + \sum_{j=1}^m a_j (Q_s^{(j)} - C_{pl}^{(j)}) f_c^{(j)}(a_e) \right] \dot{\chi} + \left[\sum_{l=1}^k q_T^{(l)} \right] \dot{T}, \quad (5)$$

где $q_{\chi}^{(i)}$ – параметры монотонного упрочнения (разупрочнения) за счет вклада i -го физического механизма; a_j , $Q_s^{(j)}$ – параметры циклического упрочнения (разупрочнения) за счет вклада j -го физического механизма; $f_m^{(i)}(a_e)$ и $f_c^{(j)}(a_e)$ – функции, учитывающие характер пластического деформирования; $q_T^{(l)}$ – параметры скорости изменения радиуса поверхности пластического нагружения за счет вклада l -го физического механизма при изменении температуры.

Зависимость (5) описывает изотропное упрочнение (разупрочнение) при монотонном пластическом деформировании (первый член в скобке при $\dot{\chi}$), циклическом деформировании (второй член в скобке при $\dot{\chi}$) и от скорости изменения температуры T .

Экспериментальное определение параметров, входящих в зависимость (5), описывающих изменение радиуса поверхности пластического нагружения, должно проводиться на основе опытов, в которых возможно выделение физических механизмов процессов упрочнения либо разупрочнения, таких, как фазовые превращения, изменение микроструктуры и плотности дислокаций, и определения их вклада. Эти процессы можно исследовать с получением их количественных характеристик с использованием дополнительных средств неразрушающего контроля (акустический, вихре-токовый и др. [26]).

При пластическом деформировании конструкционного материала изменение фазового состава материала приводит к эффекту упрочнения либо разупрочнения, что аналогично изменению микроструктурного состояния и дислокационной картины, при которых также может возникать эффект упрочнения либо эффект разупрочнения конструкционного материала в зависимости от вида текущей траектории деформирования. При этом проявление эффекта существенно зависит от степени стабилизации процесса деформирования в пространстве пластических деформаций.

Результаты экспериментальных исследований в [7, 11, 15] показывают, что двухчастотное нагружение, в отличие от одночастотного, приводит к разупрочнению исследуемых материалов, а также в процессе нагружения отсутствует стабилизация петли пластического гистерезиса, что сопровождается постоянным изменением центра ξ_{ij} в уравнении (3), описывающего поверхность «памяти» a_e в пространстве пластических деформаций. Таким образом, в диапазоне температур T , при которых можно пренебречь эффектами отжига и конкретизировать параметры в зависимости (5), изотропное упрочнение (разупрочнение) можно записать как:

$$\dot{C}_{pl} = q_\chi \dot{\chi}_m + a_c (Q_{s\chi} - C_{pl}) \dot{\chi}_c + a_\xi (Q_{s\xi} - C_{pl}) \dot{\chi}_\xi + q_T \dot{T}, \quad (6)$$

$$C_{pl} = C_{pl}^0 + \int_0^t \dot{C}_{pl} dt, \quad (7)$$

$$\dot{\chi} = \left(\frac{2}{3} \dot{e}_{ij}^p \dot{e}_{ij}^p \right)^{1/2}, \quad \chi = \int_0^t \dot{\chi} dt, \quad \dot{\chi}_\xi = \left(\frac{2}{3} \dot{\xi}_{ij} \dot{\xi}_{ij} \right)^{1/2}, \quad \chi_\xi = \int_0^t \dot{\chi}_\xi dt, \quad (8)$$

$$\dot{\chi}_m = \begin{cases} 0 & \text{при } a_e < 0 \vee e_{ij}^p \dot{e}_{ij}^p \leq 0, \\ \dot{\chi} & \text{при } a_e = 0 \wedge e_{ij}^p \dot{e}_{ij}^p \geq 0, \end{cases} \quad \dot{\chi}_c = \begin{cases} \dot{\chi} & \text{при } a_e < 0 \vee e_{ij}^p \dot{e}_{ij}^p \leq 0, \\ 0 & \text{при } a_e = 0 \wedge e_{ij}^p \dot{e}_{ij}^p \geq 0, \end{cases} \quad (9)$$

$$q_\chi = q_2 A - (1 - A) q_1, \quad Q_{s\chi, \xi} = Q_{2\chi, \xi} A + (1 - A) Q_{1\chi, \xi},$$

$$A = 1 - \cos^2 \Theta, \quad \cos \Theta = n_{ij}^e n_{ij}^s, \quad n_{ij}^e = \frac{\dot{e}_{ij}'}{(\dot{e}_{ij}^p \dot{e}_{ij}^p)^{1/2}}, \quad n_{ij}^s = \frac{s_{ij}}{(s_{ij} s_{ij})^{1/2}}. \quad (10)$$

В зависимостях (6)–(10) введены обозначения: C_{pl}^0 – радиус поверхности пластического нагружения для конструкционного материала в исходном состоянии; q_1, q_2, q_T – модули монотонного изотропного упрочнения (разупрочнения) при монотонных нагружениях по лучевым путям, при изломе траектории деформирования на 90° и изменении температуры; $Q_{1\chi, \xi}, Q_{2\chi, \xi}$ – модули циклического изотропного упрочнения (разупрочнения) при пропорциональном нагружении и при изломе траектории де-

формирования на 90° соответственно; $a_{c,\xi}$ – постоянные, определяющие скорость процесса стабилизации формы петли гистерезиса при циклическом нагружении материала; $Q_{s\chi,\xi}$ – стационарные значения радиуса поверхности текучести в зависимости от a_e^{\max} и температуры T ; $\dot{\chi}_m$ – скорость изменения длины траектории пластического деформирования материала на монотонных участках; $\dot{\chi}_\xi$ – скорость изменения длины траектории пластического деформирования материала на участках стабилизированного циклического деформирования без смещения центра поверхности a_e ; $\dot{\chi}_\xi$ – скорость изменения длины траектории пластического деформирования материала на участках циклического деформирования со смещением центра поверхности a_e (нестабилизированные участки траектории циклического деформирования).

Первый член уравнения (6) описывает изотропное упрочнение в результате монотонного пластического деформирования, второй член – циклическое упрочнение (разупрочнение) материала на стабилизированных участках циклического деформирования, третий член – циклическое упрочнение (разупрочнение) материала при нестабилизированном циклическом деформировании, четвертый – изменение радиуса поверхности пластического нагружения при изменении температуры. Уравнение (7) описывает локальную анизотропию пластического упрочнения в зависимости от параметра непропорциональности нагружения A .

Эволюция тензора микронапряжений ρ_{ij} принимается в виде:

$$\dot{\rho}_{ij} = f(\chi)(\dot{\rho}_{ij}^m + \dot{\rho}_{ij}^p + \dot{\rho}_{ij}^r), \quad \rho_{ij} = \int_0^t \dot{\rho}_{ij} dt, \quad (11)$$

$$\dot{\rho}_{ij}^m = g_1^m \dot{e}_{ij}^p - g_2^m \rho_{ij}^m \dot{\chi} + g_T^m \rho_{ij}^m \langle \dot{T} \rangle, \quad (12)$$

$$\dot{\rho}_{ij}^p = g_1^p \dot{e}_{ij}^p - g_2^p \rho_{ij}^p \dot{\chi} + g_T^p \rho_{ij}^p \langle \dot{T} \rangle, \quad (13)$$

$$\dot{\rho}_{ij}^r = g_1^r \dot{e}_{ij}^p - g_2^r \left(\frac{\rho_{\min} - \rho_u^r}{\rho_u^r} \right) \rho_{ij}^r \dot{\chi} \cos \gamma + g_T^r \rho_{ij}^r \langle \dot{T} \rangle, \quad (14)$$

$$\cos \gamma = \begin{cases} \left| \frac{\dot{\rho}_{ij}^r \rho_{ij}^r}{(\dot{\rho}_{ij}^p \dot{\rho}_{ij}^p)^{1/2} (\dot{\rho}_{ij}^r \dot{\rho}_{ij}^r)^{1/2}} \right| & \text{при } \cos \gamma < 0, \\ 0 & \text{при } \cos \gamma > 0, \end{cases} \quad \rho_u^r = (\rho_{ij}^r \rho_{ij}^r)^{1/2}, \quad (15)$$

$$g_T^{m,p,r} = \frac{1}{g_1^{m,p,r}} \left[\frac{\partial g_1^{m,p,r}}{\partial T} \right], \quad (16)$$

$$f(\chi) = f(\chi_m) + f(\chi_c) + f(\chi_\xi), \quad (17)$$

$$f(\chi_{m,c,\xi}) = 1 + k_1^{m,c,\xi} (1 - \exp(-k_2^{m,c,\xi} \chi_{m,c,\xi})), \quad (18)$$

где $g_1^{m,p,r}$, $g_2^{m,p,r}$, $k_1^{m,c,\xi}$, $k_2^{m,c,\xi}$ – материальные параметры, определяющиеся экспериментальным путем.

В формуле (11) первый член, указанный в скобках, описывает эволюцию тензора ρ_{ij} связанного с образованием и эволюцией микропластических деформаций; второй – с образованием макроскопических пластических деформаций; третий – при односторонне накапливаемых пластических деформациях ξ_{ij} .

Зависимость (11) позволяет описывать основные эффекты анизотропии, вызванной неупругим деформированием при знакопеременном нагружении, а также эффекты, возникающие при реализации жестких («посадка» петли гистерезиса) и мягких режимов нагружения («вышагивание» петли гистерезиса).

Функция $f(\chi)$ описывает изменение ρ_{ij} в случае зависимости параметров $g_1^{m,p,r}$, $g_2^{m,p,r}$ от длины пути пластического деформирования χ при монотонном, циклическом стабилизированном и нестабилизированном деформировании и связана с физическими механизмами, протекающими в процессе пластического нагружения, изменяющими фазовый состав конструкционного материала, дислокационную плотность и др.

Тензор скоростей пластических деформаций \dot{e}_{ij}^p определяется на основе ассоциированного с поверхностью активного нагружения закона течения:

$$\dot{e}_{ij}^p = \lambda_p S_{ij}. \quad (19)$$

Влияние накопленной поврежденности учитывается через эффективные значения гидростатической и девиаторной частей тензора напряжений. Эффективные значения компонент тензора напряжений определяются через эффективные значения модулей упругости [4] с учетом влияния на них величины накопленной поврежденности ω :

$$\begin{aligned} \tilde{\sigma}'_{ij} &= F_1(\omega) \sigma'_{ij} = \frac{G}{\tilde{G}} \sigma'_{ij} = \frac{\sigma'_{ij}}{(1-\omega)[1-\omega(6K+12G)/(9K+8G)]}, \\ \tilde{\sigma} &= F_2(\omega) \sigma = \frac{K}{\tilde{K}} \sigma = \frac{\sigma}{4G(1-\omega)/(4G+3K\omega)}, \\ \tilde{\rho}_{ij}^{(i)} &= F_1(\omega) \rho_{ij}^{(i)}, \quad i = m, p, r, \end{aligned} \quad (20)$$

где $F_{1,2}(\omega)$ – функции Мак-Кензи [4].

Уравнения накопления повреждений при мало- и многоциклового усталости

Уравнения накопления повреждений базируются на связи величины поврежденности с макроскопическими параметрами, которые могут быть экспериментально определены. Наиболее физически обоснованным и апробированным является энергетический подход [4–6, 24] при определении ресурсных характеристик поликристаллических тел. В.В. Новожиловым установлена зависимость рассеянной энергии, затраченной на образование дефектов при малоцикловом нагружении, с работой тензора микронапряжений ρ_{ij} на пластических деформациях e_{ij}^p :

$$\dot{W}_p = \rho_{ij} \dot{e}_{ij}^p, \quad W_p = \int \rho_{ij} de_{ij}^p. \quad (21)$$

Ресурсные характеристики при МнЦУ определяются с использованием подхода [7], основанного на энергетическом критерии, который записывается выражением:

$$\sum_{i=1}^{N_p} \left[\Delta W_i - \Delta W_R \left(\frac{\Delta W_i}{\Delta W_R} \right)^\alpha \right] = \Delta W_o = \text{const}, \quad (22)$$

где ΔW_o – опасная часть рассеянной энергии за цикл нагружения, коррелирующая с энергией, затраченной на образование микродефектов; ΔW_i – полная рассеянная энергия за цикл нагружения; ΔW_R – рассеянная энергия за цикл нагружения при напряжении, равном пределу выносливости.

Рассмотрим выражение (22) для одного цикла нагружения в виде:

$$\Delta W_o = \Delta W_i - \Delta W_R \left(\frac{\Delta W_i}{\Delta W_R} \right)^\alpha = \Delta W_i - \Delta W_H, \quad (23)$$

где

$$\Delta W_H = \Delta W_R \left(\frac{\Delta W_i}{\Delta W_R} \right)^\alpha$$

– неопасная часть рассеянной энергии за цикл нагружения, связанной с фазовыми переходами, структурными изменениями и процессами тепловыделения.

Ю.Г. Коротких конкретизировал соотношение (23) на случай регулярного циклического нагружения в виде [2]:

$$\Delta W_e^{on} = \Delta W_e [1 - f(\gamma)], \quad \gamma = \frac{\sigma_u}{\sigma_u^R}, \quad (24)$$

где σ_u – интенсивность тензора напряжений; σ_u^R – интенсивность тензора напряжений, равная условному пределу выносливости материала σ_R ; $f(\gamma)$ – функция, характеризующая степень влияния механизма МнЦУ на кривую усталости.

На основе (22) и (24) выражение для опасной энергии за один цикл нагружения представим в виде:

$$\Delta W_o = \Delta W_i [1 - f(\gamma)], \quad (25)$$

$$f(\gamma) = \frac{\Delta W_H(\gamma)}{\Delta W_i(\gamma)}. \quad (26)$$

Функция $f(\gamma)$ учитывает относительную величину неопасной энергии в полной рассеянной энергии, затраченной на пластическое деформирование, зависит от параметра γ , характеризующего относительный уровень действующих максимальных напряжений в цикле нагружения:

$$\gamma = \frac{\tilde{\sigma}_u^*}{\tilde{\sigma}_h}, \quad \tilde{\sigma}_u^* = [(\sigma'_{ij} - \rho_{ij}^r)(\sigma'_{ij} - \rho_{ij}^r)]^{1/2}, \quad (27)$$

$$\tilde{\sigma}_h = \sqrt{\frac{2}{3}} \sigma_h + \int_0^t \dot{C}_{pl}^{cycle} dt, \quad \dot{C}_{pl}^{cycle} = a_c (Q_{s\chi} - C_{pl}) \dot{\chi}_c + a_\xi (Q_{s\xi} - C_{pl}) \dot{\chi}_\xi + q_T \dot{T}.$$

В выражении (27) $\tilde{\sigma}_u^*$ – нормированная интенсивность девиатора тензора напряжений; $\tilde{\sigma}_h$ – значение интенсивности напряжений, при котором происходит переход от механизма МЦУ к МнЦУ с учетом процессов упрочнения (разупрочнения) конструкционного материала (точка перегиба на полной кривой усталости), σ_h – константа материала.

Для определения ресурсных характеристик поликристаллических металлов и их сплавов при деградации материала по механизмам МЦУ и МнЦУ в качестве энергии повреждения принимается соотношение:

$$\Delta W_o = \sum_{i=1}^{N_f} \Delta W_i [1 - f(\gamma)]. \quad (28)$$

Функция $f(\gamma)$ зависит от параметра $\gamma = \sigma_u / C_{pl}$, характеризующего относительный уровень действующих напряжений в цикле нагружения:

$$f(\gamma) = \begin{cases} 0 & \text{при } \gamma > 1, \\ 1 - \left(\frac{\gamma - \gamma^*}{1 - \gamma^*} \right)^n & \text{при } \gamma^* \leq \gamma \leq 1, \\ 1 & \text{при } \gamma < \gamma^*. \end{cases} \quad (29)$$

На рис. 2 приведено графическое представление функции $f(\gamma)$.

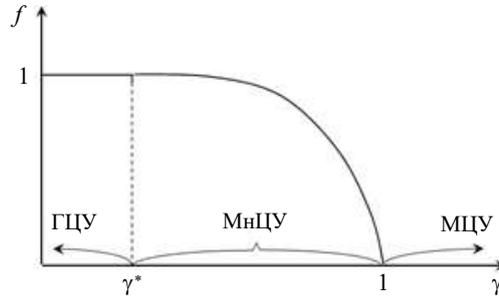


Рис. 2. Графическое представление функции $f(\gamma)$

В задачах оценки ресурсных характеристик необходимо учитывать влияние многоосности нагружения, наличие которой существенно снижает ресурс как за счет увеличения действующих компонент тензора деформаций и напряжений при пропорциональном нагружении, так и за счет вращения главных площадок тензоров напряжений и деформаций при непропорциональном нагружении.

Многочисленные исследования влияния многоосности нагружения при различных видах напряженных состояний, таких как двухосное растяжение-сжатие, трехосное растяжение и др., позволяют сделать вывод, что на ресурс оказывает существенное влияние «объемность» напряженного состояния $\beta = \sigma/\sigma_u$, где σ – гидростатическая компонента тензора напряжений, σ_u – интенсивность тензора напряжений.

Учет влияния «объемности» напряженного состояния на скорость роста поврежденности $\dot{\omega}$ производится за счет введения в уравнение скорости накопления повреждения функции $f_1(\beta)$, которая увеличивает скорость накопления повреждений при нагружениях с $\beta \rightarrow \infty$ и уменьшает скорость при $\beta \rightarrow -\infty$. При нагружениях с $\beta \rightarrow -\infty$ в некоторых поликристаллических металлах и сплавах возможно частичное уменьшение накопленной поврежденности (эффект «залечивания»). При нагружениях с $\beta = 0$ (чистый сдвиг) функция $f_1(\beta) = 1$.

В условиях непропорционального нагружения, при котором направляющие тензора напряжений и деформаций не соосны, реализуемая траектория деформирования существенно влияет на кинетику НДС и на ресурсные характеристики конструкционного материала.

Учитывая рассмотренные эффекты, влияющие на ресурсные характеристики, уравнение для скорости накопления усталостных повреждений в условиях малоциклового и многоциклового нагружения можно представить в виде:

$$\dot{\omega}_p = f_1(\beta)f_2(\omega_p)f_3(W_p)f_4(\Theta)\dot{W}_p. \quad (30)$$

В (30) введены следующие обозначения для функций: $f_1(\beta)$ – учет влияния «объемности» напряженного состояния; $f_2(\omega_p)$ – учет влияния накопленного уровня поврежденности на скорость накопления повреждений; $f_3(W_p)$ – учет текущего относительного уровня рассеянной энергии, идущей на образование микродефектов; $f_4(\Theta)$ – учет излома траектории нагружения;

$$f_1(\beta) = \exp(k_p\beta),$$

$$f_2(\omega_p) = \begin{cases} 0 & \text{при } W_p \leq W_{pa}, \\ c\omega_p^{-1/3}(1-\omega_p)^{-2/3} & \text{при } W_p > W_{pa}, \end{cases}$$

$$f_3(W_p) = \frac{W_p - W_{pa}}{W_{pf} - W_{pa}},$$

$$f_4(\Theta) = (1 - \cos^2 \Theta)\eta + \cos^2 \Theta, \quad (31)$$

где c – константа интегрирования ($c \cong 0,806$), η – параметр материала.

Принимается, что кинетика накопления повреждений состоит из двух последовательных стадий – зарождения микродефектов и их слияния. Эти стадии разграничиваются значением величины рассеянной энергии W_p^a . Образование макродефекта происходит при достижении величиной рассеянной энергии значения W_p^f .

Критерий прочности поврежденного материала

В качестве критерия прочности поврежденного материала принимается достижение накопленной поврежденностью ω критического значения ω_f .

$$\omega = \omega_f \leq 1. \quad (32)$$

2. Численные результаты

В современных газотурбинных двигателях эффективно применяются современные жаропрочные сплавы. Рациональное использование материалов позволяет увеличить циклическую долговечность. В [27] приведены результаты испытаний, циклического неупругого деформирования и закономерностей усталостного разрушения при действии двухчастотного нагружения для образцов, вырезанных из дефлектора диска турбины высокого давления (ТВД) одного из авиационных ГТД. Испытания проводились в конструкторском научно-исследовательском отделении ОАО СНТК им. Н.Д. Кузнецова под руководством д.т.н. Д.С. Еленевского.

Испытывались сплошные образцы в форме лопатки из жаропрочного сплава ЭП742 толщиной 8,25, длиной 202 мм с отверстием диаметром 13,75 мм. Модель образца показана на рис. 3.

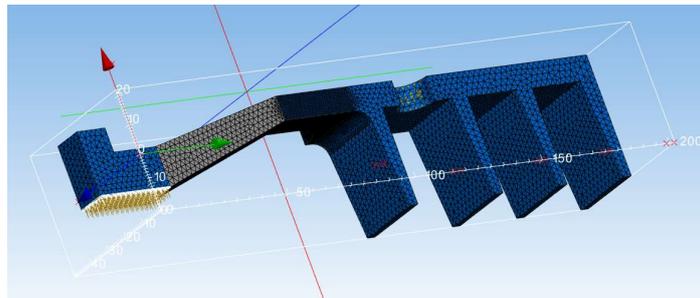


Рис. 3. Эскиз образца, вырезанного из дефлектора, и схема наклейки тензорезисторов

Установка для крепления образца размещалась на электродинамическом вибростенде. Вибростенд осуществлял жесткое высокочастотное низкоамплитудное нагружение. Повторно статическое нагружение имитировалось приложением изгибающей нагрузки с помощью гидроцилиндра. Частота приложения повторно статической нагрузки 0,16 Гц. Вибрационное нагружение имитировалось путем возбуждения резонансных колебаний системы испытательная установка–образец. Частота вибрационного нагружения 160 Гц. Отношение частот составляющих изменялось пределах от 1000 до 2500 от образца к образцу из-за неточности изготовления и за-

крепления образцов. Гидроцилиндр осуществлял жесткое низкочастотное высокоамплитудное нагружение. Схема закрепления и нагружения образца показана на рис. 4.

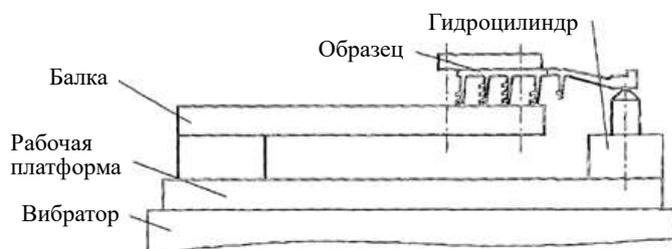


Рис. 4. Схема закрепления и нагружения образца, вырезанного из дефлектора

Уровень повторно-статического и вибрационного нагружения контролировался по показаниям тензодатчика №3. Испытания проводились при нулевом цикле изменения повторно статической нагрузки. Размах напряжений (по показаниям тензодатчика №3) составил 686,7 МПа. Высокочастотные низкоамплитудные напряжения, вызванные наложенной вибрационной нагрузкой, изменялись по симметричному закону с амплитудой напряжений (по показаниям тензодатчика №3): 235,4; 215,8; 196,2; 176,6 и 157 МПа. Амплитуда низкочастотного нагружения составляла 442,4 МПа. Результаты испытаний на МЦУ приведены в таблице 1.

Таблица 1

Результаты испытаний образцов, вырезанных из дефлектора диска ТВД

Амплитуда вибрационных напряжений, кг/мм ²	Количество циклов вибрационного нагружения $\times 10^{-6}$	Количество циклов повторно-статического нагружения (низкой частоты)
24	2	745
24	3,7	1600
22	1	440
22	2,2	1100
20	1,5	517
20	10,3	4250
18	15,2	5750
18	19,5	12370
16	20	21000
16	20	12600

В настоящей статье используется метод, который дает возможность решать сложную нелинейную задачу расчета долговечности конструктивного элемента, вырезанного из дефлектора диска ТВД, при двухчастотном нагружении путем последовательного решения двух задач. Метод заключается в следующем.

На первом этапе выбиралась расчетная схема образца и проводился расчет кинетики НДС методом конечных элементов, реализованным в программном комплексе ANSYS (рис. 5, 6), с целью определения опасной точки и истории ее нагружения за несколько циклов нагружения при каждом значении амплитуды напряжений.

На рис. 7 видна зависимость напряжений от длины отрезка в месте крепления тензорезистора №3. Показано, что построенная в ANSYS геометрия и модель образца соответствуют эксперименту.

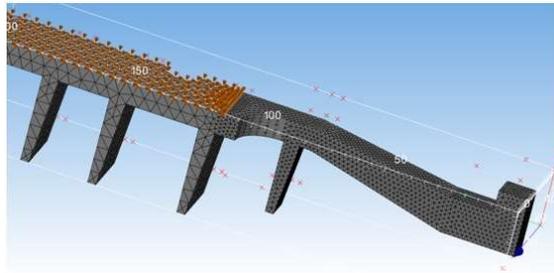


Рис. 5. Моделирование в ANSYS нагружения образца, вырезанного из дефлектора

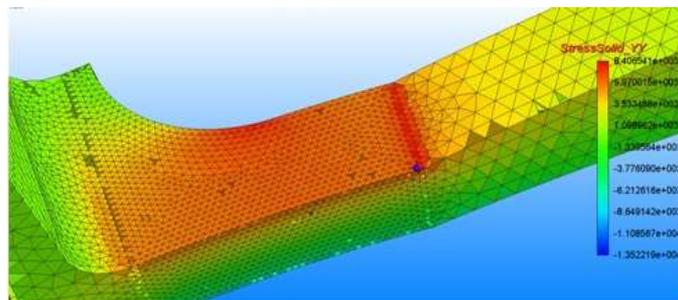


Рис. 6. Расчет кинетики НДС методом конечных элементов в ANSYS

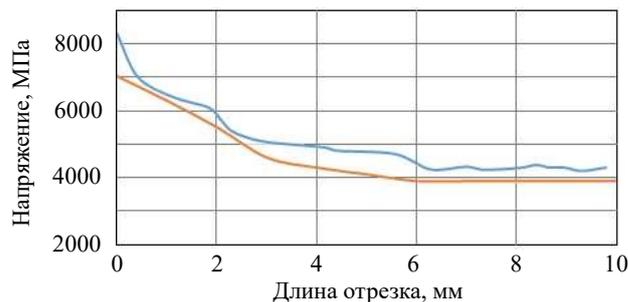


Рис. 7. Зависимость напряжений от длины отрезка в месте крепления тензорезистора №3 (красный цвет – эксперимент, синий – расчет)

История нагружения отражает зависимость между компонентами тензора напряжений и деформаций и позволяет построить режим двухчастотного нагружения. Один из режимов нагружения показан на рис. 8 в виде одного кванта нагружения, соответствующего одному циклу изменения повторно статической нагрузки. На втором этапе на базе определяющих соотношений механики поврежденной среды при двухчастотном нагружении по полученным историям нагружения проводился расчет долговечности для экспериментально реализованных режимов нагружения. Для анализа кинетики упругопластического деформирования конструктивного материала использовалась математическая модель, предложенная Ю.Г. Коротких и заложенная в программном комплексе EXPMODEL. Модель позволяет учитывать изотропное и кинематическое упрочнение материала, а также адекватно описывает процессы упругопластического деформирования при двухчастотном нагружении.

В таблицах 2, 3 для исследуемого сплава ЭП742-ИД приведены физико-механические характеристики и материальные параметры МПС.

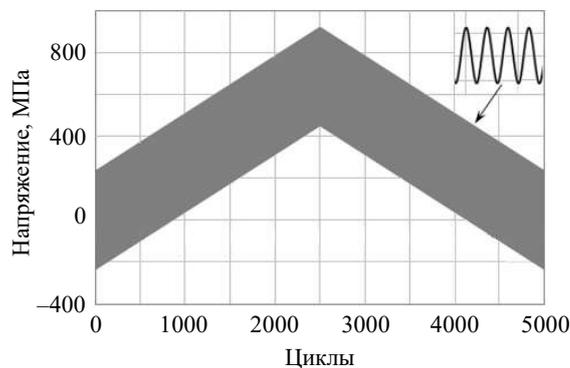


Рис. 8. Режим двухчастотного нагружения для одного кванта нагружения

Таблица 2

Физико-механические характеристики и параметры модели МПС конструкционного сплава ЭП742-ИД

K , МПа	G , МПа	g_1^m , МПа	g_2^m	g_1^p , МПа	g_2^p	g_1^r , МПа	g_2^r	$W_{p^p}^r$, МДж/м ³	$C_{p^p}^o$, МПа	γ_*	n
167530	77322	345000	830,6	13910	131,3	10000	0	169	204	0,486	1,5

Таблица 3

Значение модуля монотонного изотропного упрочнения q_1 в зависимости от длины траектории пластического деформирования χ_m для сплава ЭП742-ИД

χ_m	0	0,001	0,005	0,01	0,012	0,015	0,017	0,02
q_1 , МПа	-17513	-17500	-16684	-11954	-9561	-7276	-6621	-6943

На рис. 9 приведена диаграмма деформирования при двухчастотном нагружении с амплитудой высокой частоты 235,4 МПа для одного кванта нагружения.

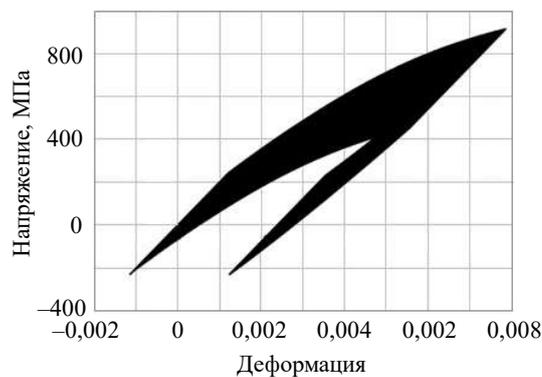


Рис. 9. Диаграмма деформирования при двухчастотном нагружении для первого кванта нагружения

На рис. 10 и 11 приведены кривые усталости в циклах низкой и высокой частот, где светлыми маркерами отмечены экспериментальные данные, а темными – численные результаты.

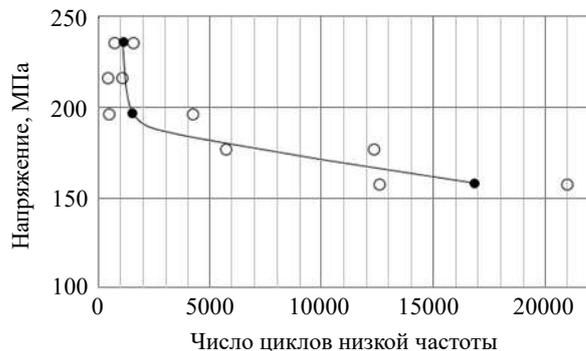


Рис. 10. Кривая усталости в цикле низкой частоты

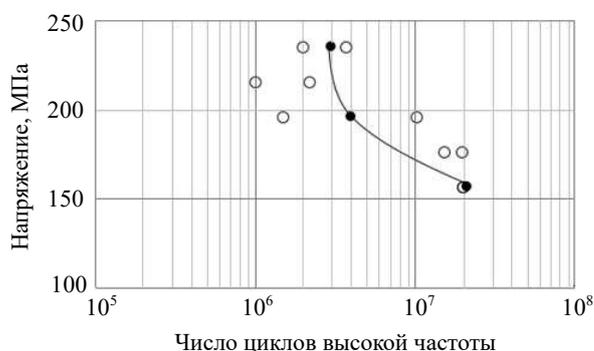


Рис. 11. Кривая усталости в цикле высокой частоты

Заключение

Развита математическая модель МПС, описывающая процессы деформирования и накопления повреждений при усталостном нагружении, основанная на энергетическом подходе и единой форме представления процесса накопления повреждений при двухчастотном нагружении.

Для математической модели определены параметры и скалярные функции, входящие в определяющие соотношения математической модели МПС.

В рамках оценки достоверности развитой математической модели МПС проведены численные исследования процессов усталостного разрушения образца из сплава ЭП742-ИД в условиях двухчастотного нагружения. Результаты оценки достоверности показали, что развитая модель с высокой степенью точности описывает процессы двухчастотного нагружения.

На основании проведенных расчетов можно сделать вывод о том, что разработанный метод расчета усталостной долговечности показывает удовлетворительное соответствие экспериментальным данным не только для лабораторных образцов, но и для натурных деталей.

Список литературы

1. Коллинз Дж. *Повреждение материалов в конструкциях. Анализ. Предсказание. Предотвращение.* М.: Мир, 1984. 624 с.
2. Волков И.А., Коротких Ю.Г. *Уравнения состояния вязкоупругопластических сред с повреждениями.* М.: Физматлит, 2008. 424 с.

3. Волков И.А., Игумнов Л.А. *Введение в континуальную механику поврежденной среды*. М.: Физматлит, 2017. 304 с.
4. Волков И.А., Игумнов Л.А., Тарасов И.С., Шишулин Д.Н., Пичков С.Н., Маркова М.Т. Моделирование пластического деформирования поликристаллических конструкционных сплавов при блочных несимметричных режимах мягкого малоциклового нагружения. *Проблемы прочности и пластичности*. 2019. Т. 81. №1. С. 63–76. DOI: 10.32326/1814-9146-2019-81-1-63-76.
5. Волков И.А., Игумнов Л.А., Коротких Ю.Г., Казаков Д.А., Емельянов А.А., Тарасов И.С., Гусева М.А. Программная реализация процессов вязкопластического деформирования и накопления повреждений в конструкционных сплавах при термомеханическом нагружении. *Проблемы прочности и пластичности*. 2016. Т. 78. № 2. С. 188–207. <https://doi.org/10.32326/1814-9146-2016-78-2-188-207>.
6. Шишулин Д.Н., Волков И.А., Казаков Д.А., Пичков С.Н. Моделирование основных закономерностей процесса деформирования и накопления повреждений в конструкционных материалах на базе концепции механики поврежденной среды *Проблемы прочности и пластичности*. 2012. №74. С. 16–27. <https://doi.org/10.32326/1814-9146-2012-74-1-16-27>.
7. Трощенко В.Т. *Деформирование и разрушение металлов при многоцикловом нагружении*. Киев: Наукова Думка, 1981. 343 с.
8. Наймарк О.Б., Банников М.В., Оборин В.А. Исследование стадийности разрушения титановых сплавов в режиме много- и гигацикловой усталости на основе морфологии поверхности разрушения. *Вестник ПНИПУ. Механика*. 2015. №3. С. 15–24. DOI: 10.15593/perm.mech/2015.3.02.
9. Chaboche J.-L., Kanouté P., Azzouz F. Cyclic inelastic constitutive equations and their impact on the fatigue life predictions. *International Journal of Plasticity*. 2012. Vol. 35. P. 44–66. DOI:10.1016/j.ijplas.2012.01.010.
10. Большухин М.А., Зверев Д.Л., Кайдалов В.Б., Коротких Ю.Г. Оценка долговечности конструкционных материалов при совместных процессах малоциклового и многоциклового усталости. *Проблемы прочности и пластичности*. 2010. Т. 72. С. 28–35. <https://doi.org/10.32326/1814-9146-2010-72-1-29-35>.
11. Гаденин М.М. Исследование повреждаемости и долговечности конструкций при одно- и двухчастотных режимах нагружения на основе деформационных и энергетических подходов. *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2017. Т. 83. №6. С. 44–51.
12. Гаденин М.М. Влияние формы цикла нагружения на сопротивление циклическому деформированию и разрушению конструкционных материалов. *Вестник научно-технического развития*. 2010. №9(37). С. 15–19.
13. Гаденин М.М. Расчетно-экспериментальная оценка роли соотношения частот в изменении долговечности при двухчастотных режимах деформирования. *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2019. Т. 85. №1. С. 64–71. <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2019-85-1-64-71>.
14. Гаденин М.М. Исследование влияния соотношения амплитуд деформаций при двухчастотном циклическом нагружении. *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2018. Т. 84. №12. С. 50–60. <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2018-84-12-50-60>.
15. Хамаза Л.А., Коваленко В.А. Сопротивление металлов усталостному разрушению и деформированию при двухчастотном нагружении. Сообщение 2. Методика оценки циклической долговечности при двухчастотном нагружении. *Проблемы прочности*. 1989. №10. С. 7–18.
16. Zalnezhad E., Sarhan A.A.D., Hamdi M. Investigating the fretting fatigue life of thin film titanium nitride coated aerospace Al7075-T6 alloy. *Materials Science and Engineering A*. 2013. Vol. 559. P. 436–446.
17. Zhu S.-P., Huang H.-Z. A generalized frequency separation-strain energy damage function model for low cycle fatigue-creep life prediction. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*. 2010. Vol. 33. No 4. P. 227–237. DOI: 10.1111/j.1460-2695.2009.01431.x.
18. Grammenoudis P., Reckwerth D., Tsakmakis C. Continuum damage models based on energy equivalence. Part I. Isotropic material response. *International Journal of Damage Mechanics*. 2009. Vol. 18. No 1. P. 31–63. DOI: 10.1177/1056789508090466.

19. Scott-Emuakpor O.E., Shen H., George T., Cross C. An energy-based uniaxial fatigue life prediction method for commonly used gas turbine engine materials. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*: 2008. Vol. 130. Iss 6. Article No 062504. DOI: 10.1115/1.2943152.
20. Lagoda T., Macha E. Generalization of energy-based multiaxial fatigue criteria to random loading. In: *Multiaxial Fatigue and Deformation: Testing and Prediction*. 2008. P. 173-1–173-18. DOI: 10.1520/stp13504s.
21. Chiou Y.-C., Yip M.-C. An energy-based damage parameter for the life prediction of AISI 304 stainless steel subjected to mean strain. *Journal of the Chinese Institute of Engineers*. 2006. Vol. 29. Iss. 3. P. 507–517. DOI: 10.1080/02533839.2006.9671145.
22. Payten W.M., Dean D.W., Snowden K.U. A strain energy density method for the prediction of creep-fatigue damage in high temperature components. *Materials Science and Engineering: A*. 2010. Vol. 527. Iss. 7-8. P. 1920–1925. DOI: 10.1016/J.MSEA.2009.11.028.
23. Порошин В.Б., Дружинин П.С., Шахова С.А. Методика оценки долговечности лопатки газовой турбины в условиях неупругого деформирования при двухчастотном нагружении. *Пром-Инжиниринг: Тр. II Междунар. науч.-техн. конф.* 19–20 мая 2016. Челябинск–Новочеркасск–Волгоград–Астана. 2016. С. 36–43.
24. Бондарь В.С., Даншин В.В., Алхимов Д.А. Анализ циклического деформирования и мало-многоциклового усталости в условиях одноосного напряженного состояния. *Вестник ПНИПУ. Механика*. 2016. №4. С. 52–71.
25. Pickering F.B. *Physical Metallurgy and the Design of Steels*. London: Applied Science Publishers, 1978. 275 p.
26. Хлыбов А.А., Углов А.Л. Исследование накопления усталостных повреждений в образцах из стали 08X18H10T при малоциклового усталости. *Изв. вузов. Черная металлургия*. 2016. Т. 59. №3. С. 185–190. DOI:10.17073/0368-0797-2016-3-185-190.
27. Цыпкайкин И.Н. Разработка методов оценки циклической долговечности деталей авиационных ГТД с учетом особенностей эксплуатационного цикла нагружения. *Дис ... канд. техн. наук*. Самара, 1999. 195 с.

References

1. Collins J. *Failure of Materials in Mechanical Design: Analysis, Prediction, Prevention*. New York. John Wiley & Sons. 1981. 672 p.
2. Volkov I.A., Korotkikh Yu.G. *Uravneniya sostoyaniya vyazkouprugoplasticheskikh sred s povrezhdeniyami [Equations of State of Viscoelastic Plastic Media with Damage]*. Moscow. Fizmatlit Publ. 2008. 424 p. (In Russian).
3. Volkov I.A., Igumnov L.A. *Vvedenie v kontinualnuyu mekhaniku povrezhdennoy sredy [Introduction to the continuum mechanics of a damaged medium]*. Moscow. Fizmatlit Publ. 2017. 304 p. (In Russian).
4. Volkov I.A., Igumnov L.A., Tarasov I.S., Shishulin D.N., Pichkov S.N., Markova M.T. Modelirovanie plasticheskogo deformirovaniya polikristallicheskikh konstruktsionnykh splavov pri blochnykh nesimmetrichnykh rezhimakh myagkogo malotsiklovogo nagruzheniya [Modeling of plastic deformation of polycrystalline structural alloys under block asymmetric modes of soft low-cycle loading]. *Problemy prochnosti i plastichnosti [Problems of Strength and Plasticity]*. 2019. Vol. 81. No 1. P. 63–76 (In Russian).
5. Volkov I.A., Igumnov L.A., Korotkikh Yu.G., Kazakov D.A., Emel'yanov A.A., Tarasov I.S., Guseva M.A. Programmaya realizatsiya protsessov vyazkoplasticheskogo deformirovaniya i nakopleniya povrezhdeniy v konstruktsionnykh splavakh pri termomekhanicheskom nagruzhenii [Software implementation of the processes of viscoplastic deformation and damage accumulation in structural alloys under thermomechanical loading]. *Problemy prochnosti i plastichnosti [Problems of Strength and Plasticity]*. 2016. Vol. 78. No 2. P. 188–207 (In Russian).
6. Shishulin D.N., Volkov I.A., Kazakov D.A., Pichkov S.N. Modelirovanie osnovnykh zakonomernostey protsessa deformirovaniya i nakopleniya povrezhdeniy v konstruktsionnykh materialakh na baze konseptsii mekhaniki povrezhdennoy sredy [Modeling the basic laws of the process of deformation and damage accumulation in structural materials based on the concept of the mechanics of damaged media]. *Problemy prochnosti i plastichnosti [Problems of Strength and Plasticity]*. 2012. Pt. 74. P. 16–27 (In Russian).

7. Troshchenko V.T. *Deformirovanie i razrushenie metallov pri mnogotsiklovom nagruzhenii* [Deformation and Destruction of Metals under Multi-Cycle Loading]. Kiev. Naukova Dumka Publ. 1981. 343 p. (In Russian).
8. Bannikov M.V., Oborin V.A., Naymark O.B. Issledovanie stadiynosti razrusheniya titanovykh splavov v rezhime mnogo- i gigatsiklovoy ustalosti na osnove morfologii poverkhnosti razrusheniya [Researching stages of destruction of titanium alloys during high and gigacycle fatigue by analyzing morphology of fracture surfaces]. *Vestnik PNIPU. Mekhanika* [PNRPU Mechanics Bulletin]. 2015. Vol. 3. P. 15–24. DOI: 10.15593/perm.mech/2015.3.02 (In Russian).
9. Chaboche J.-L., Kanouté P., Azzouz F. Cyclic inelastic constitutive equations and their impact on the fatigue life predictions. *Int. J. Plast.* 2012. Vol. 35. P. 44–66. DOI:10.1016/j.ijplas.2012.01.010.
10. Bolshukhin M.A., Zverev D.L., Kaydalov V.B., Korotkikh Yu.G. Otsenka dolgovechnosti konstruktsionnykh materialov pri sovместnykh protsessakh malotsiklovoy i mnogotsiklovoy ustalosti [Evaluation of the durability of structural materials in the joint processes of low-cycle and multi-cycle fatigue]. *Problemy prochnosti i plastichnosti* [Problems of Strength and Plasticity]. 2010. Vol. 72. P. 28–35 (In Russian).
11. Gadenin M.M. Issledovanie povrezhdaemosti i dolgovechnosti konstruktsiy pri odno- i dvukhchastotnykh rezhimakh nagruzheniya na osnove deformatsionnykh i energeticheskikh podkhodov [Investigation of damage and durability of structures under single- and two-frequency loading modes based on deformation and energy approaches]. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov* [Industrial laboratory. Diagnostics of Materials]. 2017. Vol. 83. No 6. P. 44–51 (In Russian).
12. Gadenin M.M. Vliyanie formy tsikla nagruzheniya na soprotivlenie tsiklicheskomu deformirovaniyu i razrusheniyu konstruktsionnykh materialov [Influence of the shape of the loading cycle on the resistance to cyclic deformation and destruction of structural materials]. *Vestnik nauchno-tehnicheskogo razvitiya* [Bulletin of Scientific and Technical Development]. 2010. No 9(37). P. 15–19 (In Russian).
13. Gadenin M.M. Raschetno-eksperimentalnaya otsenka roli sootnosheniya chastot v izmenenii dolgovechnosti pri dvukhchastotnykh rezhimakh deformirovaniya [Calculation-and-experimental estimation of the role of the frequency ratio in changing the endurance at two-frequency deformation modes]. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov* [Industrial Laboratory. Diagnostics of Materials]. 2019. Vol. 85(1). P. 64–71. <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2019-85-1-1-64-71> (In Russian).
14. Gadenin M.M. Issledovanie vliyaniya sootnosheniya amplitud deformatsiy pri dvukhchastotnom tsiklicheskom nagruzhenii [Study of the effect of strain amplitude ratio at two-frequency cyclic loading]. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov* [Industrial Laboratory. Diagnostics of Materials]. 2018. Vol. 84(12). P. 50–60 <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2018-84-12-50-60> (In Russian).
15. Khamaza L.A., Kovalenko V.A. Soprotivlenie metallov ustalostnomu razrusheniyu i deformirovaniyu pri dvukhchastotnom nagruzhenii. Soobshchenie 2. Metodika otsenki tsiklicheskoy dolgovechnosti pri dvukhchastotnom nagruzhenii [Resistance of metals to fatigue failure and deformation under two-frequency loading. Message 2. Methodology for evaluating cyclic durability under two-frequency loading]. *Problemy prochnosti* [Strength of Materials]. 1989. No 10. P. 7–18 (In Russian).
16. Zalnezhad E., Sarhan A.A.D., Hamdi M. Investigating the fretting fatigue life of thin film titanium nitride coated aerospace Al7075-T6 alloy. *Mater. Sci. Eng. A*. 2013. Vol. 559. P. 436–446.
17. Zhu S.-P., Huang H.-Z. A generalized frequency separation-strain energy damage function model for low cycle fatigue-creep life prediction. *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.* 2010. Vol. 33. No 4. P. 227–237. DOI: 10.1111/J.1460-2695.2009.01431.X.
18. Grammenoudis P., Reckwerth D., Tsakmakis C. Continuum damage models based on energy equivalence. Part I. Isotropic material response. *Int. J. Damage Mech.* 2009. Vol. 18. No 1. P. 31–63. DOI: 10.1177/1056789508090466.
19. Scott-Emuakpor O.E., Shen H., George T., Cross C. An energy-based uniaxial fatigue life prediction method for commonly used gas turbine engine materials. *J. Eng. Gas. Turbines Power*. 2008. Vol. 130. Iss 6. Article No 062504. DOI: 10.1115/1.2943152.

20. Lagoda T., Macha E. Generalization of energy-based multiaxial fatigue criteria to random loading. In: *Multiaxial Fatigue and Deformation: Testing and Prediction*. 2008. P. 173-1–173-18. DOI: 10.1520/stp13504s.
21. Chiou Y.-C., Yip M.-C. An energy-based damage parameter for the life prediction of AISI 304 stainless steel subjected to mean strain. *J. Chin. Inst. Eng.* 2006. Vol. 29. Iss. 3. P. 507–517. DOI: 10.1080/02533839.2006.9671145.
22. Payten W.M., Dean D.W., Snowden K.U. A strain energy density method for the prediction of creep-fatigue damage in high temperature components. *Mater. Sci. Eng. A*. 2010. Vol. 527. Iss. 7-8. P. 1920–1925. DOI:10.1016/J.MSEA.2009.11.028.
23. Poroshin V.B., Druzhinin P.S., Shakhova S.A. Metodika otsenki dolgovechnosti lopatki gazovoy turbiny v usloviyakh neuprugogo deformirovaniya pri dvukhchastotnom nagruzhenii [Fatigue-life prediction methodology for the case of low-cycle two-frequency loading of gas turbine blades]. *Prom-Inzhiniring: Trudy II Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii [Prom-Engineering: Proceedings of the International Scientific and Technical Conference]*. 19–20 May 2016. Chelyabinsk. Novocherkassk. Volgograd. Astana. 2016. P. 36–43 (In Russian).
24. Bondar V.S., Danshin V.V., Alkhimov D.A. Analiz tsiklicheskogo deformirovaniya i malomnogotsiklovoy ustalosti v usloviyakh odnoosnogo napryazhennogo sostoyaniya [Analysis on cyclic deformation and low-high-cycle fatigue in uniaxial stress state]. *Vestnik PNIPU. Mekhanika [PNRPU Mechanics Bulletin]*. 2016. No 4. P. 52–71 (In Russian).
25. Pickering F.B. *Physical Metallurgy and the Design of Steels*. London. Applied Science Publishers. 1978. 275 p.
26. Khlybov A.A., Uglov A.L. Issledovanie nakopleniya ustalostnykh povrezhdeniy v obraztsakh iz stali 08Kh18N10T pri malotsiklovoy ustalosti [Investigation of fatigue damage accumulation in 08X18N10T steel samples with low-cycle fatigue]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Chernaya metallurgiya [Izvestiya. Ferrous Metallurgy]*. 2016. Vol. 59. No 3. P. 185–190 (In Russian).
27. Tsyapkaykin I.N. Razrabotka metodov otsenki tsiklicheskoy dolgovechnosti detaley aviatsionnykh GTD s uchetom osobennostey ekspluatatsionnogo tsikla nagruzheniya [Development of methods for assessing the cyclic durability of parts of aviation gas turbine engines, taking into account the characteristics of the operational loading cycle]. *Dis ... kand. tekhn. nauk [Cand. Sci. (Engineering) Dissertation]*. Samara. 1999. 195 p. (In Russian).

NUMERICAL SIMULATION OF FATIGUE DURABILITY OF PARTS OF AVIATION GAS TURBINE ENGINES UNDER CYCLIC TWO-FREQUENCY LOADING

Boev E.V.

*National Research Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod,
Nizhny Novgorod, Russian Federation*

The problem of assessing the resource characteristics of responsible engineering facilities, taking into account the peculiarities of operational loading modes, is discussed. The processes of fatigue durability of polycrystalline structural alloys under cyclic two-frequency loading (with the combined action of mechanisms of low and multi-cycle fatigue) are considered.

A mathematical model describing the processes of cyclic elastoplastic deformation and accumulation of fatigue damage in structural alloys under multiaxial disproportionate modes of combined thermomechanical loading has been developed from the modern positions of damaged medium mechanics and fracture mechanics. The model consists of three interrelated parts: relations determining the cyclic elastic-plastic behavior of the material, taking into account the dependence on the destruction process; evolutionary equations describing the kinetics of fatigue damage accumulation; criteria for the strength of the damaged material.

The variant of the defining elastic-plasticity relations is based on the idea of the yield surface and

the principle of gradiency of the velocity vector of plastic deformations to the yield surface at the loading point. This version of the equations of state reflects the main effects of cyclic elastic-plastic deformation of the material for arbitrary folded loading trajectories.

The variant of kinetic equations of fatigue damage accumulation is based on the introduction of a scalar damage parameter, is based on energy principles and takes into account the main effects of formation, growth and fusion of microdefects under arbitrary complex cyclic loading regimes. A joint form of the evolutionary equation of fatigue damage accumulation in the areas of low- and multi-cycle fatigue is proposed.

As a criterion of the strength of the damaged material, the condition of reaching the critical value of the damage value is used.

The results of numerical simulation of fatigue durability of a compact sample (model of the disk deflector of the high pressure turbine of an aviation gas turbine engine) are presented with cyclic two-frequency loading. The results of the comparison of the calculated and experimental data showed that the proposed model qualitatively and with the accuracy necessary for practical calculations quantitatively describes the fatigue life of structural elements under cyclic two-frequency loading.

Keywords: mechanics of the damaged medium, deformation, stresses, damage, numerical modeling, low-cycle fatigue, fatigue durability, two-frequency loading, numerical and full-scale experiment, blade of an aviation gas turbine engine, disk deflector of the high pressure turbine.