

О запасах прочности деталей газотурбинных двигателей при термоциклическом нагружении

Гецов Л.Б., Семенов А.С.

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург

e-mail: semenov_as@spbstu.ru

Представлен обзор зарубежных и отечественных, современных и ретроспективных критериев прогнозирования термоциклической долговечности лопаток и дисков газовых турбин. Особое внимание уделено описанию предложенного и верифицированного авторами четырехчленного деформационного критерия термоусталостного разрушения. Рассмотрены примеры использования результатов испытаний на термическую усталость для расчетного определения запасов термоциклической прочности лопаток газовых турбин, изготовленных из поликристаллических и монокристаллических жаропрочных сплавов.

Ключевые слова: термическая усталость, газовая турбина, лопатка турбины, диск турбины, пластичность, ползучесть, коррозия, поврежденность

On the safety margins of gas turbine engine parts under thermal cyclic loading

Getsov L.B., Semenov A.S.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg

A review of the criteria for predicting the thermal cycle life of gas turbine blades and disks is presented. Particular attention is paid to the description of the four-term deformation criterion of thermal fatigue failure proposed by the authors. Examples of using the results of thermal fatigue tests for the calculation of the thermal cyclic safety margins of gas turbine blades made of polycrystalline and monocrystalline heat-resistant alloys are presented.

Keywords: thermal fatigue, gas turbine, turbine blade, turbine disc, ductility, creep, corrosion, damage

Введение

При эксплуатации газотурбинных двигателей (ГТД) наблюдаются случаи термоусталостного разрушения различных деталей и узлов ГТД (рабочих и направляющих лопаток, дисков, камер сгорания). Интенсивные нестационарные тепловые потоки, возникающие при эксплуатации ГТД, приводят к нагреву элементов горячего тракта до высоких температур и значительным температурным градиентам, вызывающим в комбинации с интенсивным механическим нагружением высокий уровень напряжений. Вследствие этого появляются зоны неупругого деформирования, возникают деформации пластичности и ползучести. Нестационарный (циклический) характер термомеханического воздействия приводит к появлению термоусталостных повреждений (усталостных разрушений при неизотермическом циклическом нагружении). Как правило, разрушение при термической усталости наступает в диапазоне 100...10 000 циклов.

Наличие переменных упругопластических деформаций позволяет рассматривать термическую усталость как разновидность малоциклового усталости. Неоднородность температурных полей, в том числе микронеоднородных полей температур в поликристаллах вследствие анизотропии упругих и тепловых свойств кристаллитов; высокотемпературная ползучесть, как на этапе выдержки при постоянной нагрузке, так и в пределах цикла, приводящая к дополнительному накоплению повреждений вследствие длительной нагрузки, – все это требует использования специализированных методов расчета деталей и узлов горячей части ГТД и разработки критериев термической усталости.

Для выполнения расчетов термической усталости требуется детальное определение нестационарных полей температур и напряженно-деформированного состояния с применением уточненных моделей неупругого деформирования (неизотермических моделей с учетом нелинейного изотропно-кинематического упрочнения).

При разработке критериев термической усталости следует учитывать взаимное влияние процессов накопления повреждений при пластичности и ползучести, при знакопеременном течении материала (с образованием петель гистерезиса) и прогрессирующем одностороннем циклическом накоплении необратимых деформаций (ретчетинге), анизотропию свойств материала (для монокристаллических сплавов), многоосность и непропорциональность путей деформирования. Все сказанное подтверждается многочисленными экспериментальными исследованиями повреждений материалов и деталей при термоциклическом нагружении [1–4].

Интенсивные исследования в области разработки критериев разрушения при нестационарном термомеханическом нагружении начались в середине 1960-х годов в ряде научных центров СССР: ЦКТИ, ЦНИИТМАШ, ЦИАМ, Институте проблем прочности АН УССР, Институте механики АН УССР, ЧПИ, Физико-механическом институте им. Г.В. Карпенко АН УССР и др. Интерес к этой проблеме был вызван ростом рабочих температур в высоконагруженных конструкциях энергетических машин. Рассматривались как конструкции кратковременного действия, так и конструкции, работающие при большом числе циклов (авиационные, стационарные энергетические установки (на газоперекачивающих станциях) и др.), эксплуатируемые как в условиях, при которых возможно проявление ползучести, так и в отсутствие этих условий. Результаты этих исследований широко обсуждали на съездах по теоретической и прикладной механике, конференциях, научных совещаниях и симпозиумах, организованных Российским национальным комитетом по теоретической и прикладной механике и Советом по проблемам прочности и пластичности АН СССР (РАН).

Предлагаемая читателям статья содержит обзор ряда отечественных и зарубежных критериев термической усталости. Основное внимание в работе уделяется детальному описанию предложенного авторами [5–9] подхода прогнозирования термоциклической долговечности лопаток и дисков газовых турбин на основе четырехчленного деформационного критерия накопления термоусталостных повреждений и его сравнению с альтернативными подходами. Рассматриваются примеры использования результатов испытаний на термическую усталость для расчетного определения запасов термоциклической прочности лопаток газовых турбин, изготовленных из поликристаллических и монокристаллических жаропрочных сплавов.

Обзор моделей термической усталости

Термическая усталость является кумулятивным и необратимым процессом, который обычно условно разделя-

ется на две стадии: *стадию до зарождения макротрещины* (инкубационный период, накопление поврежденной микроструктуры материала, ретчетинг) и *стадию развития макротрещины* (завершается разрушением элемента конструкции). В соответствии с этим полное число циклов до разрушения элемента конструкции (N_f) можно разделить на две составляющие (впервые это предложил сделать Б. Лэнджер в 1937 году [10]):

$$N_f = N_f^{initiation} + N_f^{propagation}, \quad (1)$$

где $N_f^{initiation}$ и $N_f^{propagation}$ – число циклов до зарождения макротрещины и от начала ее распространения. Соотношение продолжительности стадий варьируется в широких пределах (10...90%) в зависимости от уровня нагрузок, программы нагружения, геометрии детали и др.

Формулировки ряда современных моделей оценки термоусталостной долговечности основаны на предположении, что основными механизмами являются *усталость*, накопление повреждений при *ползучести* и *деградация свойств вследствие коррозии* (рис. 1). В соответствии с этим простейшие оценки долговечности на стадии зарождения трещины могут быть сделаны на основе соотношения [11]:

$$\frac{1}{N_f^{initiation}} = \frac{1}{N_f^{fatigue}} + \frac{1}{N_f^{creep}} + \frac{1}{N_f^{corrosion}}, \quad (2)$$

представляющего собой выражение принципа линейного суммирования повреждений:

$$D = D^{fatigue} + D^{creep} + D^{corrosion}, \quad (3)$$

где в качестве простейшего феноменологического определения скалярной меры повреждений (поврежденности: $0 \leq D \leq 1$) рассматривается отношение текущего числа циклов (n) к числу циклов до начала разрушения:

$$D = n / N_f^{initiation}.$$

При нерегулярном (блочном) нагружении принимается

$$D = \sum_{i=1}^n n_i / N_{fi}^{initiation}$$

(данная формулировка предложена в 1945 году М. Майнером [12] на основе выдвинутого в 1924 году А. Пальмгреном [13] принципа линейного суммирования повреждений).

Равенство (3) описывает общий случай комбинации механизмов термической усталости, соответствующий области DEF на рис. 1. На практике рассматривают различные частные варианты, например широкое распространение получила комбинация усталости и ползучести (область ADF на рис. 1), описываемая уравнением, предложенным Ш. Тайрой в 1962 году [14]:

$$D = D^{fatigue} + D^{creep}. \quad (4)$$



Рис. 1. Доминирующие механизмы накопления повреждений при термической усталости

На практике при проведении расчетов лопаток и дисков для определения запасов прочности при термоциклическом нагружении весьма широкое распространение получило уравнение универсальных наклонов Мэнсона 1964 года [15], учитывающее только первый из упомянутых выше механизмов термоусталостного разрушения:

$$\Delta \varepsilon = \frac{3,5\sigma_b}{E} N^{-0,12} + \varepsilon_f^{0,6} N^{-0,6}, \quad (5)$$

где параметрами, определяющими число циклов до зарождения макротрещины (N), являются: размах деформаций за цикл ($\Delta \varepsilon$), предел временного сопротивления (σ_b), модуль Юнга (E), предельная пластическая деформация при разрушении $\varepsilon_f = \ln[1/(1-\psi)]$. Позднее уравнение (5) было модифицировано С. Мэнсоном и Г. Халфордом [1; 16] на случай учета снижения долговечности при ползучести путем замены результирующего N на $N/10$ (правило 10%).

Известны модификации уравнения (5), предложенные разными авторами:

– Б. Лэнджером в 1962 году [17]:

$$\Delta \varepsilon = \frac{2\sigma_{-1}}{E} + \frac{\varepsilon_f}{2} N^{-0,5}; \quad (6)$$

– И.А. Биргером [2]:

$$\Delta \varepsilon = \frac{2\sigma_{-1}}{E} \left(\frac{N_0}{N} \right)^{1/m} + \varepsilon_f^{0,6} N^{-0,6}; \quad (7)$$

– К. Смитом, П. Ватсоном, Т. Топпером в 1970 году [18]:

$$\frac{\Delta \varepsilon}{2} \sigma_1 = \frac{\sigma_f^2}{E} (2N)^{2b} + \sigma_f \varepsilon_f (2N)^{b+c}; \quad (8)$$

– Л. Коффином в 1974 году [19]:

$$\frac{\Delta \varepsilon}{2} = \frac{\sigma_f}{E} (2N)^b v^{k_1} + \varepsilon_f (2N v^{k-1})^c; \quad (9)$$

– Д. Морроу в 1980 году [20], С. Мэнсоном и Г. Халфордом в 1981 году [21]:

$$\frac{\Delta \varepsilon}{2} = \frac{\sigma_f - \sigma_m}{E} (2N)^b + \varepsilon_f (2N)^c, \quad (10)$$

где σ_{-1} – предел выносливости; σ_m – среднее напряжение в цикле; σ_1 – максимальное главное напряжение; σ_f – предел усталостной прочности; N_0 – база определения предела выносливости; m – тангенс наклона кривой многоциклового усталости; v – частота; b, c, k_1, k – константы материала. Уравнение (10) учитывает влияние средних напряжений в цикле, (9) – частоты нагружения. Уравнение (8) представляет собой энергетический критерий, (6) – упрощенную интерпретацию вклада многоциклового усталости, позволяющую избежать необходимости решения нелинейного уравнения при нахождении N .

Анализ структуры формул (5)–(10) показывает, что они не учитывают следующие факторы, характерные для условий эксплуатации лопаток ГТД:

- влияние *односторонне накопленных пластических деформаций* (ретчетинга) на долговечность при термической усталости;
- влияние *деформаций ползучести* при описании процессов термической усталости;
- *непропорциональность нагружения* наиболее напряженных элементов лопаток и дисков при термоциклическом нагружении;
- влияние *периода цикла* на число циклов до образования трещины;
- изменение от цикла к циклу величины σ_m ;
- влияние коррозионной среды.

Основным преимуществом соотношений (5)–(10) является простота использования, не требующая вычисления размаха неупругих деформаций. Однако, как было показано в работах многих исследователей, ошибка в определении числа циклов до разрушения при использовании формулы (5) и ее модификаций может достигать нескольких порядков в том случае, если оценка ресурса выполняется для конструкций, детали которых работают при неизотермическом циклическом деформировании, приводящем к взаимовлиянию эффектов пластичности и ползучести при высоких температурах. Таким образом, для определения запасов прочности ответственных деталей ГТД такие оценки рекомендуется использовать с осторожностью.

Критерии смешанного типа. Данный класс критериев представляет собой конкретизацию или обобщение правила суммирования повреждений (4) (оцениваемых по двум параметрам – времени и числу циклов):

– А.Г. Костюк, А.Д. Трухний, Л.Б. Гецов, 1965 год [22]:

$$\mu N_p \int_0^{\tau_u} 1/\tau_p(\sigma(\tau)) d\tau + \int_0^{N_p} 1/N_0 (\Delta\sigma(N)/2) dN = 1; \quad (11)$$

– С. Мэнсон, 1966 год [23]:

$$N_p \int_0^{\tau_u} 1 / \tau_p(\sigma(\tau)) d\tau + \int_0^{N_p} 1 / N_0 (\Delta\sigma(N) / 2) dN = 1; \quad (12)$$

– Р.А. Дульнев, 1980 год [2]:

$$\left(\int_0^{\tau_p} 1 / \tau_p(\sigma(\tau)) d\tau \right)^a + \left(\int_0^{N_p} 1 / N_0 (\Delta\sigma(N) / 2) dN \right)^b = 1; \quad (13)$$

– Д. Вуд, 1966 год [24]:

$$\lg(\tau / \tau_p) + a_p \left[(N_p / N_0)^2 + b_p (N_p / N_0) \right] = 0; \quad (14)$$

– Ж.-Л. Шабош, Ф. Галлерно, 2001 год [25]:

$$D_c + D_p = \int_0^{\tau_p} F_c(\Sigma^{ox}, \Sigma^c, D_{ox}, D_c) d\tau + \int_0^{N_p} F_p(\Delta\Sigma, \Sigma_{max}, D_I, D_p) dN = 1, \quad (15)$$

где

$$dD_I = \frac{1}{C} \left\langle \frac{\Delta\Sigma - \sigma_u^I (1 - D_{ox})}{\sigma_u^I (1 - D_{ox}) - \Sigma_{max}} \right\rangle^b dN;$$

$$dD_p = \left[1 - (1 - D_p)^{\beta+1} \right]^{1-\alpha} \times \left\langle \frac{\Delta\Sigma - \sigma_u^p}{\sigma_u^p - \Sigma_{max}} \right\rangle \left\langle \frac{\Delta\Sigma / \sigma_u^p}{M^* (1 - D_p)} \right\rangle^\beta dN;$$

$$dD_{ox} = \frac{1}{2} D_{ox}^{-1} k_0 \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \left[1 + \frac{\langle \Sigma^{ox} - \sigma_u^{ox} \rangle}{B} \right]^{2m} d\tau;$$

$$dD_c = \left(\frac{\Sigma^c}{A(T)} \right)^{r(T)} [1 - D_c]^{-k(T)} d\tau. \quad (16)$$

В критериях (11)–(16): τ_u – период цикла; N_p и τ_p – число циклов и время до разрушения (здесь и далее под термином долговечность понимается время (или число циклов) до образования зародышевых макротрещин образцов или деталей, локальных или приводящих к разрушению на части); μ , a , b , a_p , b_p – коэффициенты, учитывающие взаимное влияние статических и циклических повреждений; N_0 – число циклов до разрушения в условиях отсутствия ползучести; D_I – описывает поврежденность вследствие зарождения поверхностных макротрещин (до 100 мкм); D_p – поврежденность вследствие распространения макротрещин (до 500 мкм); D_c и D_{ox} – поврежденности материала вследствие ползучести и коррозии; $\Delta\Sigma = [(\sigma_{max} - \sigma_{min}) \cdot M^{f1} \cdot (\sigma_{max} - \sigma_{min})]^{0.5}$ – эквивалентный размах напряжений в цикле; $\Sigma_{max} = [\sigma_{max} \cdot M^{f2} \cdot \sigma_{max}]^{0.5}$ – эквивалентные максимальные напряжения; $\Sigma^{ox} = [\sigma \cdot M^{ox} \cdot \sigma]^{0.5}$ и $\Sigma^c = [\sigma \cdot M^c \cdot \sigma]^{0.5}$ – эквивалентные напряжения для описания коррозии и ползучести;

σ – тензор напряжения; тензоры констант материала четвертого ранга M^{f1} , M^{f2} , M^{ox} и M^c введены для учета возможной начальной анизотропии свойств; σ_u^I , σ_u^p и σ_u^{ox} – пороговые напряжения для процессов зарождения, распространения макротрещин и коррозии; C , α , β , M^* , B , k_0 , m и Q – константы материала; A , r и k – функции от температуры.

Уравнения (11) и (12) соответствуют линейному суммированию повреждений, (13)–(16) – нелинейному. Модель (15)–(16), обобщающая модели (11)–(14), разработана в рамках механики континуальных повреждений, основанной на использовании в определяющих уравнениях эффективных напряжений $\sigma / (1 - D)$ вместо σ . В модели (15)–(16) учитываются четыре взаимодействующих механизма накопления повреждений. Для каждого типа поврежденности вводится уравнение эволюции (16). В этом случае для определения долговечности необходимо найти решение системы четырех нелинейных дифференциальных уравнений.

Энергетические критерии. В ряде работ в качестве параметра, определяющего накопление повреждений, рассматриваются различные составляющие энергии неупругого деформирования:

– А.Г. Костюк, 1967 год [26]:

$$MN_p \left(\int \sigma d\varepsilon^p + \int \sigma d\varepsilon^c \right)^{-\delta_0 / (1 - \delta_0)} \times \left(\int \sigma^{\gamma_k + 1} d\varepsilon^p + \int \sigma^{\gamma_k + 1} d\varepsilon^c \right)^{-1 / (1 - \delta_0)} = 1; \quad (17)$$

– Ш.-П. Чжу и др., 2012 год [27]:

$$\int_1^{N_p} (\Delta W_p / W_f)^m dN = 1; \quad (18)$$

– С. Мрозиньски, З. Лис, Г. Эгнер, 2021 год [28]:

$$\sum_{i=1}^k \frac{W_f(n_i)}{W_f(N_p)} + \sum_{i=1}^l \frac{W_c(\tau_i)}{W_c(\tau_p)} = 1, \quad (19)$$

где ε^p и ε^c – (одноосные) деформации пластичности и ползучести; M , δ_0 , γ_k и m – константы материала; ΔW_p – работа неупругого деформирования за цикл;

$W_f(n) = n \int_0^{\tau_u} \sigma \cdot \dot{\varepsilon}^p dt$ – работа пластической деформации,

совершаемая за n циклов испытания на усталость (суммарная площадь петель гистерезисов);

$W_c(\tau) = \int_0^{\tau} \sigma \cdot \dot{\varepsilon}^c dt$ – энергия, рассеиваемая за период ис-

пытания на ползучесть (τ). Преимуществом формулировок энергетических критериев является отсутствие необходимости модификации на случай многоосного напряженного состояния.

Деформационные критерии. В качестве параметров, определяющих накопление повреждений, рассматри-

ваются размахи и/или односторонне накопленные составляющие полной и неупругих деформаций:

– Р.М. Шнейдерович, А.П. Гусенков, Н.А. Махутов, 1979 год [29; 30]:

$$\int_1^{N_p} (\Delta \varepsilon^p / \varepsilon_r)^m dN + \int_0^{\varepsilon_r} (1 / \varepsilon_r) d\varepsilon = 1; \quad (20)$$

– Л.Б. Гецов, 1971 год [5–7]:

$$D_1 + D_2 + D_3 + D_4 = 1, \quad (21)$$

где

$$D_1 = \int_1^{N_p} \frac{(\Delta \varepsilon^p)^{k_0} dN}{C_1(D_2, D_3, D_4)}; \quad D_2 = \int_1^{N_p} \frac{(\Delta \varepsilon^c)^{n_0} dN}{C_2(D_1, D_3, D_4)};$$

$$D_3 = \int_0^{\varepsilon_r^p} \frac{d\varepsilon^p}{\varepsilon_r^p}; \quad D_4 = \int_0^{\varepsilon_r^c} \frac{d\varepsilon^c}{\varepsilon_r^c(D_1, D_2, D_3)}; \quad (22)$$

– С. Мэнсон, 1973 год [31]:

$$D_1 + D_2 + D_6 + D_7 = 1, \quad (23)$$

где

$$D_6 = \frac{(\Delta \varepsilon^{pc})^{\alpha_1} N}{C_6}; \quad D_7 = \frac{(\Delta \varepsilon^{cp})^{\alpha_2} N}{C_7}, \quad \alpha_1 = \alpha_2 = 1,25; \quad (24)$$

– Д.А. Гохфельд, К.М. Кононов, О.С. Садаков, В.Б. Порошин, 1983 год [32; 33]:

$$D_1 + D_2 + D_8 = 1, \quad (25)$$

где

$$D_8 = \int_0^{\varepsilon_r} \frac{d\varepsilon}{\varepsilon_r(T, \tau, \sigma_0)}. \quad (26)$$

В критериях (20)–(26): $\Delta \varepsilon^p$ и $\Delta \varepsilon^c$ – размахи деформаций пластичности и ползучести в пределах цикла (в общем случае зависящие от номера цикла); $\Delta \varepsilon^{pc}$ и $\Delta \varepsilon^{cp}$ – размахи деформаций в цикле с ползучестью при сжатии после

пластического течения при растяжении и ему обратном – с пластичностью при сжатии после ползучести при растяжении; ε_r – предельная деформация при растяжении (ε_r^p – при быстром нагружении в условиях пластичности; ε_r^c – при ползучести); m, k_0, n_0, α_1 и α_2 – константы материала; C_1, C_2, C_6 и C_7 – материальные функции; $\sigma_0 = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3$. Поврежденности D_6 и D_7 и сам критерий (23) относятся к условиям деформирования по схемам характерным для жесткого цикла нагружения. В критерии (25) полная деформация определяется с использованием структурной модели среды, что позволяет, воспользовавшись ее параметрами, лучше описывать процесс накопления повреждений внутри цикла. Такой возможности критерии (20), (21) и (23) не предоставляют. Критерий (25), так же как (21) и (23), позволяет описывать повреждения при циклическом нагружении, сопровождаемом односторонним накоплением деформаций (мягкий цикл циклического нагружения).

Ниже детально будет рассмотрен подход на основе деформационного критерия (21) [5] и его модификаций, позволяющих значительно повысить надежность оценок в расчетах запасов прочности деталей ГТД при их термоциклическом нагружении, включающем пуски, остановки и нестационарные режимы.

Четырехчленный деформационный критерий термической усталости

Многолетними исследованиями [5–9; 34–45] была установлена высокая точность прогноза долговечности образцов и деталей с помощью деформационного критерия (21), предложенного еще в 1971 году применительно к мягкому и жесткому циклическому нагружению материалов. Это подтверждает сравнение на рис. 2 результатов экспериментов и расчетов долговечности, выполненных в разные годы Л.Б. Гецовым с рядом соавторов. Экспери-

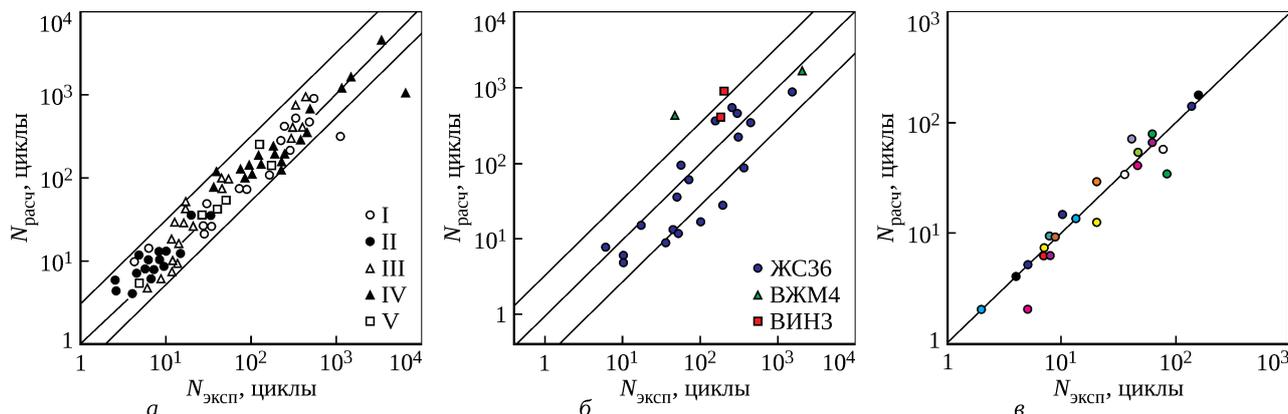


Рис. 2. Сравнение расчетного числа циклов до образования магистральной трещины с использованием деформационного критерия (21) [5–9] с результатами экспериментов при термоциклическом нагружении: а – образцы из поликристаллических сплавов [1]; б – образцы из монокристаллических сплавов [46]; в – модельные диски из различных материалов [20; 21]

менты проводились на образцах из конструкционных материалов и на модельных дисках газотурбинных установок (ГТУ). Результаты сравнительного анализа получены как для поликристаллических материалов (см. рис. 2,а), так и для монокристаллических материалов (см. рис. 2,б). Степень удаленности точек от диагонали ($N_{расч} = N_{эксп}$) указывает на отличие расчетной от экспериментальной долговечности. На графиках, обобщающих результаты многочисленных исследований, проведенных с разными материалами, температурой испытаний и числом циклов нагружения, видно очень хорошее совпадение эксперимента и расчета, с двухкратным максимальным разбросом.

В последней редакции четырехчленного деформационного критерия вводится условие достижения критической суммарной меры повреждений, описываемое следующим соотношением [9]:

$$D = D_1(\Delta\varepsilon_{eq}^p) + D_2(\Delta\varepsilon_{eq}^c) + D_3(\varepsilon_{eq}^p) + D_4(\varepsilon_{eq}^c) = 1, \quad (27)$$

которое основывается на линейном суммировании повреждений, вызванных:

– изменением пластической деформации в пределах цикла

$$D_1 = \sum_{i=1}^N \frac{(\Delta\varepsilon_{eqi}^p)^k}{C_1(T_i)}; \quad (28)$$

– изменением деформаций ползучести в пределах цикла

$$D_2 = \sum_{i=1}^N \frac{(\Delta\varepsilon_{eqi}^c)^m}{C_2(T_i)}; \quad (29)$$

– односторонне накопленной пластической деформацией

$$D_3 = \max_{0 \leq t \leq t_{max}} \frac{\varepsilon_{eq}^p}{\varepsilon_r^p(T)}; \quad (30)$$

– односторонне накопленной деформацией ползучести

$$D_4 = \max_{0 \leq t \leq t_{max}} \frac{\varepsilon_{eq}^c}{\varepsilon_r^c(T)}, \quad (31)$$

где C_1 , C_2 , k , m , ε_r^p и ε_r^c – параметры материала, зависящие от температуры. Обычно принимают соотношения $k=2$, $m=1,25$, $C_1 = (\varepsilon_r^p)^k$, $C_2 = (3\varepsilon_r^c/4)^m$ [1]. Наряду с простейшими оценками на основе предельных деформаций пластичности (ε_r^p) и ползучести (ε_r^c) при одноосном монотонном нагружении параметры C_1 и C_2 могут непосредственно определяться на основе данных опытов при термоциклическом нагружении с различными выдержками. Консервативная оценка обеспечивается при принятии в $C_1(T_i)$ минимальной температуры цикла.

В формулах (28)–(29) используется индекс i для номеров цикла, позволяющий учесть изменение величин

во время испытания (эксплуатации). В формулах (30)–(31) в знаменателе приведены являющиеся материальными функциями значения предельных деформаций при одноосном нагружении и при ползучести соответственно.

Выбор вида эквивалентной деформации (ε_{eq}) определяется механизмом неупругого деформирования и наличием или отсутствием анизотропии свойств материала. Для поликристаллических материалов в предположении об изотропии свойств эквивалентные деформации в (27)–(31) определяются выражением интенсивности деформаций по Мизесу (евклидова норма в пространстве девиаторов деформации):

$$\varepsilon_{eq} = \sqrt{\frac{2}{9}[(\varepsilon_{11} - \varepsilon_{22})^2 + (\varepsilon_{22} - \varepsilon_{33})^2 + (\varepsilon_{33} - \varepsilon_{11})^2] + \frac{1}{3}(\gamma_{12}^2 + \gamma_{23}^2 + \gamma_{31}^2)} \quad (32)$$

Для анизотропных материалов с кубической симметрией эквивалентная деформация определяется интенсивностью деформаций по Хиллу:

$$\varepsilon_{eq} = \sqrt{\frac{2}{9}[(\varepsilon_{11} - \varepsilon_{22})^2 + (\varepsilon_{22} - \varepsilon_{33})^2 + (\varepsilon_{33} - \varepsilon_{11})^2] + \frac{1}{K_N}(\gamma_{12}^2 + \gamma_{23}^2 + \gamma_{31}^2)} \quad (33)$$

где $K_N = 3(\varepsilon_{r(111)}/\varepsilon_{r(001)})^2$.

В общем случае при произвольной симметрии (включая ортотропные и трансверсально-изотропные материалы) эквивалентная деформация определяется обобщенным квадратичным критерием:

$$\varepsilon_{eq} = [\boldsymbol{\varepsilon} \cdot \mathbf{M} \cdot \boldsymbol{\varepsilon}]^{0,5}, \quad (34)$$

где \mathbf{M} – тензор четвертого ранга, удовлетворяющий преобразованиям соответствующей группы симметрии [47; 48]; $\boldsymbol{\varepsilon}$ – тензор деформации (полной, пластичности или ползучести).

Для монокристаллических материалов эквивалентная деформация определяется как максимальная сдвиговая деформация в системах скольжения, которая, например, для октаэдрической системы скольжения с нормалью к плоскости скольжения $\mathbf{n}_{\{111\}}$ и направлением скольжения $\mathbf{l}_{\langle 001 \rangle}$, вычисляется на основе выражения [9]:

$$\varepsilon_{eq} = \mathbf{n}_{\{111\}} \cdot \boldsymbol{\varepsilon} \cdot \mathbf{l}_{\langle 001 \rangle}. \quad (35)$$

Для кубической системы скольжения вместо (35) следует использовать выражение $\varepsilon_{eq} = \mathbf{n}_{\{001\}} \cdot \boldsymbol{\varepsilon} \cdot \mathbf{l}_{\langle 011 \rangle}$ [49], а для вторичной октаэдрической – $\varepsilon_{eq} = \mathbf{n}_{\{111\}} \cdot \boldsymbol{\varepsilon} \cdot \mathbf{l}_{\langle 112 \rangle}$. Консервативной оценкой для (35) является максимальная деформация сдвига $\varepsilon_{eq} = 0,5(\varepsilon_1 - \varepsilon_3)$.

Следует отметить, что поврежденность D_4 является деформационной трактовкой выражения для повреждений при длительном статическом нагружении, т.е. является оценкой запасов длительной прочности.

В 1973 году С. Мэнсоном был предложен критерий разделенных размахов [31], который в отличие от критерия (21) [1] пригоден для жесткого нагружения, но не пригоден для мягкого. В работе [37] проводилась верификация критерия (27) в условиях жесткого нагружения в сопоставлении с верификацией критерия разделенных размахов [31] по одним и тем же экспериментальным данным. Было установлено, что точность прогноза долговечности по обоим критериям примерно одинакова.

В течение 50 лет, прошедших с момента формулировки деформационного критерия в форме (21), проводилась его всесторонняя верификация и модификация. Для монокристаллических материалов оценку термоусталостной долговечности следует производить с использованием эквивалентных деформаций (34) в соответствии с подходом, описанным в [8; 9]. Также была произведена модификация (21) путем введения зависимости предельных деформаций материалов от жесткости (многоосности) напряженного состояния. В случаях сложного напряженного состояния было признано целесообразным проводить корректировку значений ε_r^p и ε_r^c по формулам А. Маккензи [50]

$$\varepsilon_r^{p*} = \varepsilon_r^p \exp\left(-\frac{3\sigma_0}{2\sigma_i}\right); \quad \varepsilon_r^{c*} = \varepsilon_r^c \exp\left(-\frac{3\sigma_0}{2\sigma_i}\right) \quad (36)$$

и Н.А. Махутова [29]:

$$\varepsilon_r^{p*} = \varepsilon_r^p \frac{K_e \sigma_i^2}{3\sigma_1 \sigma_0}; \quad \varepsilon_r^{c*} = \varepsilon_r^c \frac{K_e \sigma_i^2}{3\sigma_1 \sigma_0}, \quad (37)$$

где ε_r^{p*} и ε_r^{c*} – приведенные значения предельных деформаций пластичности и ползучести материала в условиях многоосного кратковременного и длительного нагружения; ε_r^p и ε_r^c – соответствующие предельные деформации, определяемые из опытов при одноосном растяжении до разрушения; $\sigma_i = [3/2(\text{dev}\sigma \cdot \text{dev}\sigma)]^{0,5}$ – интен-

сивность напряжений по Мизесу; $\sigma_0 = \text{tr}\sigma / 3$ – среднее (гидростатическое) напряжение; $\text{dev}\sigma = \sigma - \sigma_0 \mathbf{1}$ – девиатор напряжений; $\mathbf{1}$ – единичный тензор; K_e – характеристика состояния материала (при хрупком состоянии $K_e = 1$, при вязком – $K_e = 1,2$); σ_1 – максимальное главное напряжение.

Следует отметить, что в общем случае рассматриваемая модель при учете зависимостей $C_1(D_2, D_3, D_4, T)$, $C_2(D_1, D_3, D_4, T)$ и $\varepsilon_r^c(D_1, D_2, D_3, T)$ в (21) соответствует принципу нелинейного суммирования повреждений и позволяет описать эффекты взаимного влияния повреждений, в то время как упрощенная версия с $C_1(T)$, $C_2(T)$ и $\varepsilon_r^c(T)$ в (27)–(31) соответствует принципу линейного суммирования повреждений. В работе [1] представлен метод определения зависимостей $C_1(D_2, D_3, D_4, T)$, $C_2(D_1, D_3, D_4, T)$ и $\varepsilon_r^c(D_1, D_2, D_3, T)$ на основе экспериментов с различными программами двухэтапного нагружения (рис. 3).

Вопросы выбора адекватных моделей деформирования жаропрочных сплавов при нестационарном нагружении в настоящей статье не рассматриваются. Они подробно исследуются в целом ряде работ, в частности в [47–49; 51–57].

Оценку запасов прочности при термоциклическом нагружении деталей ГТД целесообразно проводить на основе результатов вязкоупругопластического расчета в зависимости от наличия и размеров зон неупругих деформаций. В СПбПУ разработан конечно-элементный программный комплекс PANTOCRATOR [58], позволяющий проводить расчеты конструктивных элементов с использованием различных моделей неупругого деформирования моно- и поликристаллических материалов. Ниже приведены результаты некоторых расчетных исследований.

Так, у дисков зоны неупругих деформаций обычно отсутствуют, если не рассматривать деформации в замко-

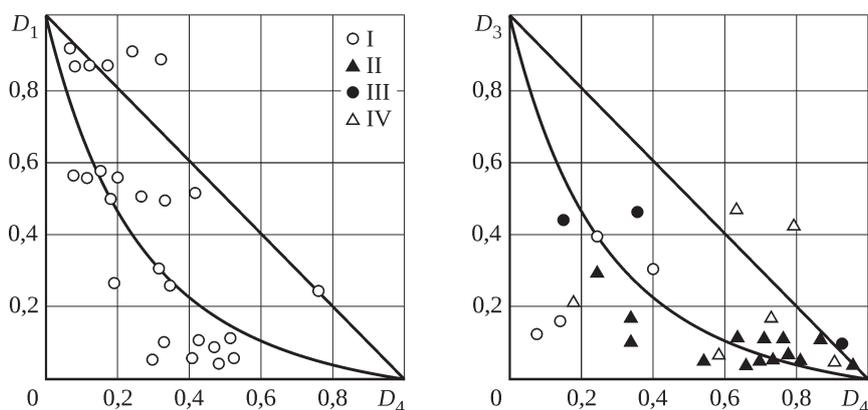


Рис. 3. Взаимное влияние повреждений жаропрочных сплавов от ползучести и кратковременной пластической деформации [1]:

- I – термоусталость в условиях циклической пластической деформации и ползучести;
- II – предварительная пластическая деформация;
- III – предварительная деформация ползучести;
- IV – циклическая пластическая деформация и ползучесть

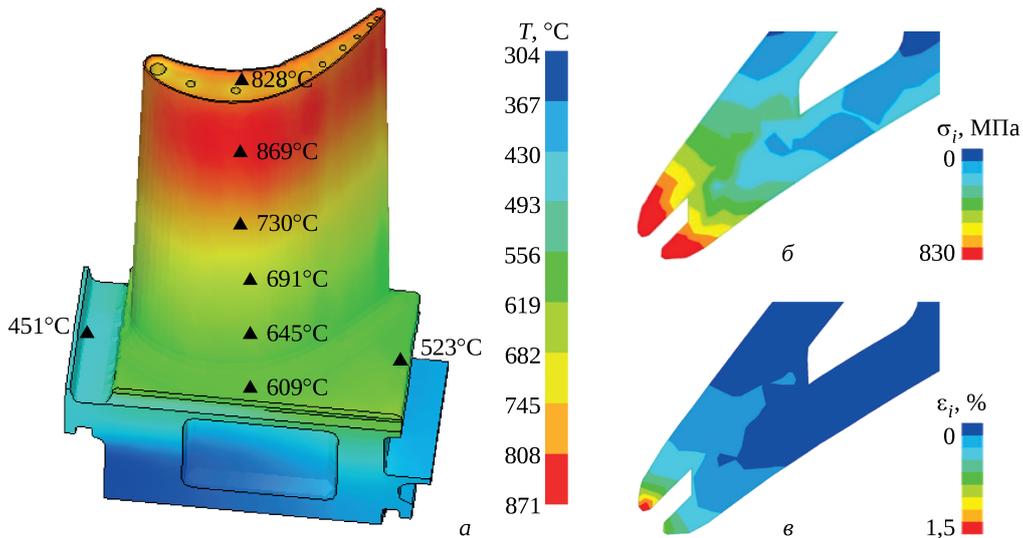


Рис. 4. Пример результатов расчета термонапряженного состояния лопатки ГТУ: а – распределение температур; б, в – интенсивности напряжений и деформаций по Мизесу в горизонтальном сечении лопатки

вом соединении, а у лопаток, как правило, в зоне охлаждающих каналов выявляются пластические деформации (рис. 4) [59].

При проведении расчетов (в предположении малости деформаций) используется аддитивное разложение тензора скоростей деформации на упругую, пластическую, вязкую и температурную составляющие [57]:

$$\dot{\boldsymbol{\varepsilon}} = \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^e + \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^p + \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^v + \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^T, \quad (38)$$

в отличие от получившей широкое распространение в расчетной практике модели вязкопластичности Шабоса [56], не учитывающей накопление вязких деформаций ниже предела текучести и использующей разложение $\dot{\boldsymbol{\varepsilon}} = \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^e + \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^{vp} + \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^T$. Раздельное вычисление деформаций пластичности и вязкости в первом подходе упрощает применение четырехчленного деформационного крите-

рия (27)–(31). В (38) тензор $\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^p$ вычисляется по формулам теории неизоотермического пластического течения с нелинейным комбинированным изотропно-кинематическим упрочнением; $\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^v = \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^c = A e^{-Q/RT} \sigma_i^{n-1} \varepsilon_i^m \text{dev} \boldsymbol{\sigma}$ – в соответствии с вязкоупругой моделью Нортона [47]; $\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^e = {}^4\mathbf{S} \cdot \dot{\boldsymbol{\sigma}} + (\partial {}^4\mathbf{S} / \partial T) \cdot \boldsymbol{\sigma} \dot{T}$ – по закону Гука в дифференциальной форме; $\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^T = (\alpha \dot{T} + (\partial \alpha / \partial T) \dot{T}) \mathbf{1} = \bar{\alpha} \dot{T} \mathbf{1}$, где A , Q , n и m – константы материала; ${}^4\mathbf{S}$ – тензор упругих податливостей; α – температурный коэффициент линейного расширения; $\bar{\alpha}$ – его мгновенное (касательное) значение при температуре T ; $\mathbf{1}$ – единичный тензор. При проведении расчетов пошаговым инкрементально-итерационным методом отслеживается вся поцикловая кинетика, вплоть до стабилизации циклов.

В случае анализа поведения анизотропных монокристаллических сплавов вопросы статического дефор-

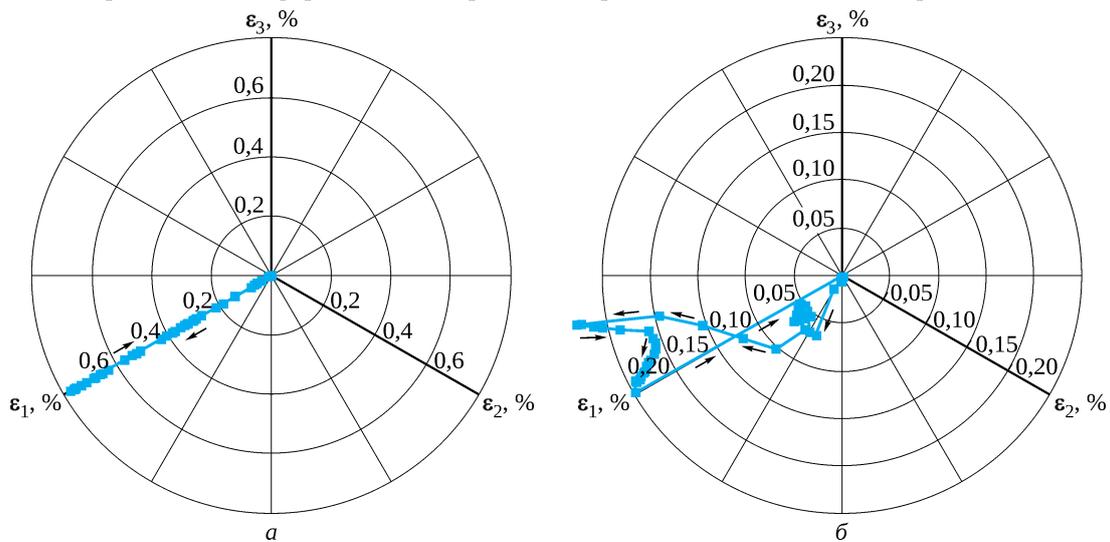


Рис. 5. Примеры траекторий деформирования на девиаторной плоскости для двух точек лопатки ГТУ: а – пропорциональное деформирование; б – непропорциональное деформирование

мирования решаются с использованием как феноменологического, так и физического подхода [60]. Подробно этот вопрос изложен в [47].

На рис. 5 приведены результаты расчетов напряженно-деформированного состояния лопаток ГТУ. На девиаторной плоскости показаны рассчитанные траектории деформирования при циклическом нагружении с несинхронным изменением температуры и частоты вращения. Отметим что траектории деформирования для различных точек одной лопатки могут быть как пропорциональными (см. рис. 5,а для нижней точки на выходной кромке), так и непропорциональными (см. рис. 5,б для средней точки входной кромки). Непропорциональность процессов деформирования (нагружения) требует отказаться от простейших (голономных) моделей пластичности (например, деформационной теории пластичности) и использовать специальные методики определения полуциклов и размахов деформации при многоосном нерегулярном деформировании (см., например, метод дождя и др. [61; 62]).

В России и за рубежом были проведены работы по изучению влияния коррозионных повреждений при высоких температурах на характеристики долговечности турбинных лопаток и дисков [11; 63–69]. Рассмотрим предложенный авторами подход к учету коррозионных повреждений в рамках излагаемого метода расчета термоциклической долговечности с использованием полученных в [63–66] результатов. В частности, было установлено, что в условиях коррозионной среды, какой является газовый поток в проточной части турбин, уменьшается энергия поверхностного натяжения, что вследствие эффекта Ребиндера делает возможным ускоренное распространение поверхностных и точечных дефектов.

Для учета коррозионных повреждений в предположении постоянства коэффициентов k и m в уравнении (27) и учета влияния коррозии как на материальные функции – параметры $C_1(h_{ox})$ и $C_2(h_{ox})$, – так и на снижение предельных деформаций при пластичности и ползучести приходим к следующему соотношению:

$$D = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\Delta \varepsilon_{eqi}^p}{C_1(h_{ox})} \right)^k + \sum_{i=1}^N \left(\frac{\Delta \varepsilon_{eqi}^c}{C_2(h_{ox})} \right)^m + \max_{0 \leq t \leq t_{max}} \frac{\varepsilon_{eq}^p}{\varepsilon_r^p(h_{ox})} + \max_{0 \leq t \leq t_{max}} \frac{\varepsilon_{eq}^c}{\varepsilon_r^c(h_{ox})} = 1, \quad (39)$$

где h_{ox} – толщина коррозионного слоя.

В случае малости коррозионных повреждений можно ограничиться первыми двумя членами разложения в ряд функций $C_1 = C_1(h_{ox})$ и $C_2 = C_2(h_{ox})$ по параметру h_{ox} :

$$C_1(h_{ox}) = C_{10} + S^p h_{ox}; \quad (40)$$

$$C_2(h_{ox}) = C_{20} + S^c h_{ox}, \quad (41)$$

где коэффициенты C_{10} , S^p , C_{20} и S^c определяются из испытаний на термическую усталость.

В качестве толщины коррозионного слоя (h_{ox}) может рассматриваться как толщина слоя окалины, так и толщина слоя обезлегирования. Отличие в подходах заключается в выборе коэффициентов S^p и S^c .

Как отмечалось выше (см. уравнение (1)), долговечность деталей определяется как накоплением повреждений, приводящих к образованию макротрещин, так и скоростью их роста вплоть до разрушения детали на части. Постановка задачи о коррозионных повреждениях также тесно примыкает к задачам образования трещин в защитных покрытиях и распространения трещин в зависимости от вида нагружения. Применительно к термоциклическому нагружению в настоящее время используется подход механики разрушения [67; 70–72] с использованием формулы, учитывающей как циклическую нагружения, так и влияние выдержек при высоких температурах на стационарных режимах во время цикла:

$$\frac{da}{dN} = A(\Delta K_{eff})^n + \int_0^{\tau_u} B(C^*(\tau))^q d\tau, \quad (42)$$

где a – длина трещины; C^* – инвариантный контурный интеграл; $\Delta K_{eff} = K_{max} - K_{op} \leq \Delta K = K_{max} - K_{min}$ – эффективный размах коэффициента интенсивности напряжений; τ_u – период цикла; значения параметров материала A , n , B и q определены по результатам испытаний на трещиностойкость материалов при усталости и при ползучести; интегрирование проведено в пределах одного цикла (от 0 до τ_u).

Следует отметить, что предложенное уравнение (42) близко по форме к используемому в рамках программы DARWIN (Design Assessment of Reliability With Inspection) [67] уравнению, описывающему скорость роста коррозионных повреждений:

$$\frac{da}{dN} = A(\Delta K_{eff})^n + D(K_{max})^m \frac{dt}{dN}. \quad (43)$$

Второе слагаемое в (43) представляет собой учет коррозионного воздействия на рост усталостной трещины. Объединение трех механизмов повреждений, связанных с циклическостью нагружения, выдержками на стационарных режимах и влиянием коррозионных повреждений, исходя из их аддитивности позволяет предложить единое уравнение для скорости роста термоусталостной трещины в коррозионных средах:

$$\frac{da}{dN} = A(\Delta K_{eff})^n + \int_0^{\tau_u} B(C^*(\tau))^q d\tau + D(K_{max})^m \frac{d\tau}{dN}. \quad (44)$$

Для определения *единого запаса* термоусталостной прочности лопаток и дисков ГТУ, функционирующих в условиях независимого рассогласованного изменения частоты вращения и максимальной температуры,

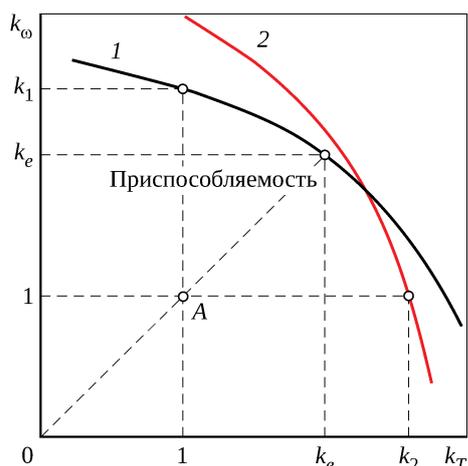


Рис. 6. Метод определения единого запаса прочности:

1 – кривая для оценок путем увеличения частоты вращения; 2 – кривая для оценок при увеличении T_{\max}

приводящих в наиболее нагруженных точках конструкций к знакопеременному циклическому деформированию и ретчетингу, был предложен подход, иллюстрируемый графиком на рис. 6.

Этот подход основан на представлениях теории приспособляемости о двух механизмах поведения материалов при термоциклировании: знакопеременном течении и прогрессирующем деформировании [73; 74].

Сравнив рабочую точку A на графике с координатами (1, 1), соответствующую реальному режиму нагружения детали, с предельной кривой, можно определить значение *единого запаса прочности* (k_e). В зависимости от характера предельной кривой (1 или 2) запас прочности равен k_1 или k_2 .

Для многорежимных условий работы запас прочности определяется по значениям запасов на всех режимах, исходя из принципа линейного суммирования повреждений во временной трактовке [45; 75]:

$$k = \left[\frac{1}{\sum (1/k_i)^{m_i}} \right]^{1/m} \quad (45)$$

где i – номер режима; k_i – соответствующий этому режиму запас прочности; m_i – наклоны для *нестационарных* режимов, кривых малоциклового усталости, и для *стационарных* режимов, кривых длительной прочности.

Следует заметить, что методы расчета запасов прочности лопаток и дисков различаются. Ниже рассмотрим эти вопросы более детально.

Термоциклическая прочность натуральных дисков

Запасы термоциклической прочности натуральных дисков могут рассчитываться как в рамках классического

подхода, предложенного И.А. Биргером [76], с помощью теории приспособляемости [73; 74; 77], так и на основе деформационного критерия описываемым ниже способом.

Проводится серия расчетов по вязкоупругопластической модели с увеличением в сравнении с эксплуатационными частоты вращения и максимальной температуры цикла (на 20, 30 и 40%), и методом интерполяции определяются условия, при которых согласно (27) или (39) сумма повреждений $D = 1$. Запасы термоциклической прочности определяются как отношения найденных экстраполяцией значений частоты вращения и T_{\max} к эксплуатационным значениям. Определение единого запаса проводится методом, описанным применительно к условиям приспособляемости [73].

Для определения запасов прочности по несущей способности в случае образования микро- или макротрещин определяется их расчетная глубина при термоциклическом нагружении, исходя из уравнения для скорости роста трещин (42), по методике, изложенной, например, в [70]. При этом в качестве критического может быть принято состояние, при котором размеры трещины достигают, согласно [78], длины 0,8 мм и глубины 0,4 мм.

Результаты расчетов долговечности дисков с использованием деформационного критерия накопления повреждений (27)–(31), проведенные ранее применительно к натурным дискам, испытанным в ЦНИИТМАШ, в целом показали удовлетворительную точность прогноза, однако в некоторых случаях отличие в вычислении долговечности превысило четырехкратное. Поэтому в рамках работ [79; 80] была сделана попытка повысить точность расчетов путем использования уточненных моделей вязкоупругопластического деформирования и современных программных средств.

Термоциклическая прочность натуральных лопаток

Подходы к определению запасов термоциклической прочности лопаток отличаются от таковых для дисков. Следует рассмотреть следующие случаи термоциклического нагружения лопаток из поликристаллических и монокристаллических сплавов:

- а) лопатки, работающие при максимальных температурах цикла, при которых экспериментально методами Коффина и/или [81; 82] определить число циклов до образования магистральных трещин затруднительно;
- б) лопатки, у которых расчетами выявляются зоны пластических деформаций глубиной не более 0,4 мм и поверхностным размером не более 0,8 мм;
- в) лопатки, у которых наблюдаются зоны ползучести значительных размеров;
- г) лопатки с покрытиями.

В [83] были разработаны экстраполяционные методы прогнозирования термоусталостной долговечности монокристаллических сплавов, позволяющие рассчитывать число циклов до образования магистральных трещин термической усталости для режимов термоциклирования, при которых экспериментально получать разрушение за реальные сроки проведения испытаний крайне затруднительно.

Конечно-элементными расчетами термонапряженного состояния [46; 83], проведенными (применительно к лопаткам типа а) для корсетных образцов из высокожаропрочных монокристаллических сплавов, испытанных на термическую усталость, установлено, что для режимов испытаний с $T_{\min} = 100^\circ\text{C}$ и $T_{\max} = 800, 850, 900, 950^\circ\text{C}$ наблюдаются отчетливые петли пластического гистерезиса, а при $T_{\max} = 600, 650, 700, 750^\circ\text{C}$ – только одностороннее накопление пластических деформаций при минимальных температурах цикла без образования заметных петель гистерезиса (разгрузка от T_{\max} до T_{\min} происходит упруго). Аналогичные расчетные исследования при фиксированной максимальной температуре $T_{\max} = 850^\circ\text{C}$ и температурах $T_{\min} = 20$ и 50°C показали появление петель пластического гистерезиса, а при $T_{\min} = 100, 150, 200^\circ\text{C}$ – его отсутствие. В последнем случае наблюдается только одностороннее накопление пластических деформаций при минимальных температурах цикла.

На основе анализа полученных результатов с использованием деформационного критерия (21) были получены кривые термоусталостной долговечности для корсетных образцов из сплавов ВВ751П и ВЖМ4-ВИ [83] при фиксированной минимальной температуре $T_{\min} = 100^\circ\text{C}$ и варьируемой максимальной температуре $T_{\max} = 600 \dots 950^\circ\text{C}$ (рис. 7,а) и при фиксируемой $T_{\max} = 850^\circ\text{C}$ и варьируемой $T_{\min} = 20 \dots 200^\circ\text{C}$ (рис. 7,б). Сравнение с экспериментом показывает хорошую точность прогнозов при использовании критерия (21).

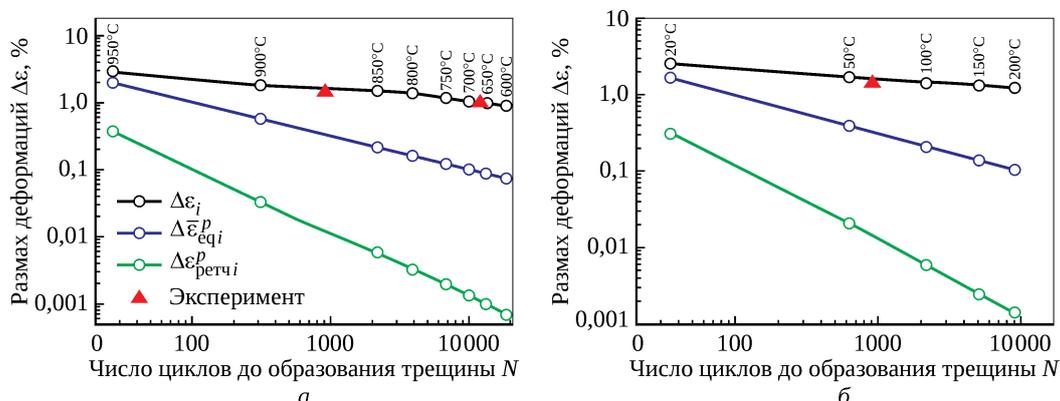


Рис. 7. Расчетные диаграммы усталостной долговечности в двойных логарифмических координатах для корсетного образца из монокристаллического сплава ВЖМ4-ВИ [001] при разных режимах нагружения:

- а – фиксированной $T_{\min} = 100^\circ\text{C}$ и варьируемых T_{\max} от 600 до 950°C ;
- б – фиксированной $T_{\max} = 850^\circ\text{C}$ и варьируемых T_{\min} от 20 до 200°C

Для удобства графического представления и интерпретации результатов расчетов был введен «приведенный единый эквивалентный размах пластических деформаций» – $\Delta\bar{\epsilon}_{eq}^p$ (синяя линия на рис. 7), одновременно учитывающий приращение как циклических, так и односторонне накопленных необратимых деформаций в цикле, вычисляемый по формуле

$$\Delta\bar{\epsilon}_{eq}^p = \sqrt{(\Delta\epsilon_{eq}^p)_{\text{цикл}}^2 + \epsilon_r^p(T)(\Delta\epsilon_{eq}^p)_{\text{ретч}}}$$

Запасы прочности (k) для лопаток второго вида (лопатки типа б) могут быть оценены сравнением поврежденности (D) с ее критическим значением $D = 1$ с учетом ползучести для этой зоны лопатки применительно к заданному числу циклов во время эксплуатации. Вторым способом определения запасов прочности таких лопаток является расчет живучести лопатки (до ее разрушения по сечению, в котором обнаружена зона пластичности) [70] исходя из характеристик трещиностойкости сплава при увеличенном размахе температур в k раз.

Для лопаток типа в, у которых повреждения определяются ползучестью (выдержками на стационарном режиме), запасы прочности также рассчитываются при увеличенных частотах вращения или увеличенных максимальных температурах до выполнения условия $D = 1$.

Учет влияния коррозии на запасы прочности при термоциклическом нагружении производится автоматически при использовании критерия разрушения в формулировке (39). Однако следует иметь в виду, что определение толщины поврежденного коррозией слоя ($h_{ок}$) экстраполяцией на большое число циклов является консервативным, так как в процессе эксплуатации происходит периодическое неравномерное отслаивание окалины.

Прежде чем рассмотреть запасы прочности лопаток с защитными покрытиями (лопатки типа г), следует остановиться на особенностях накопления повреждений

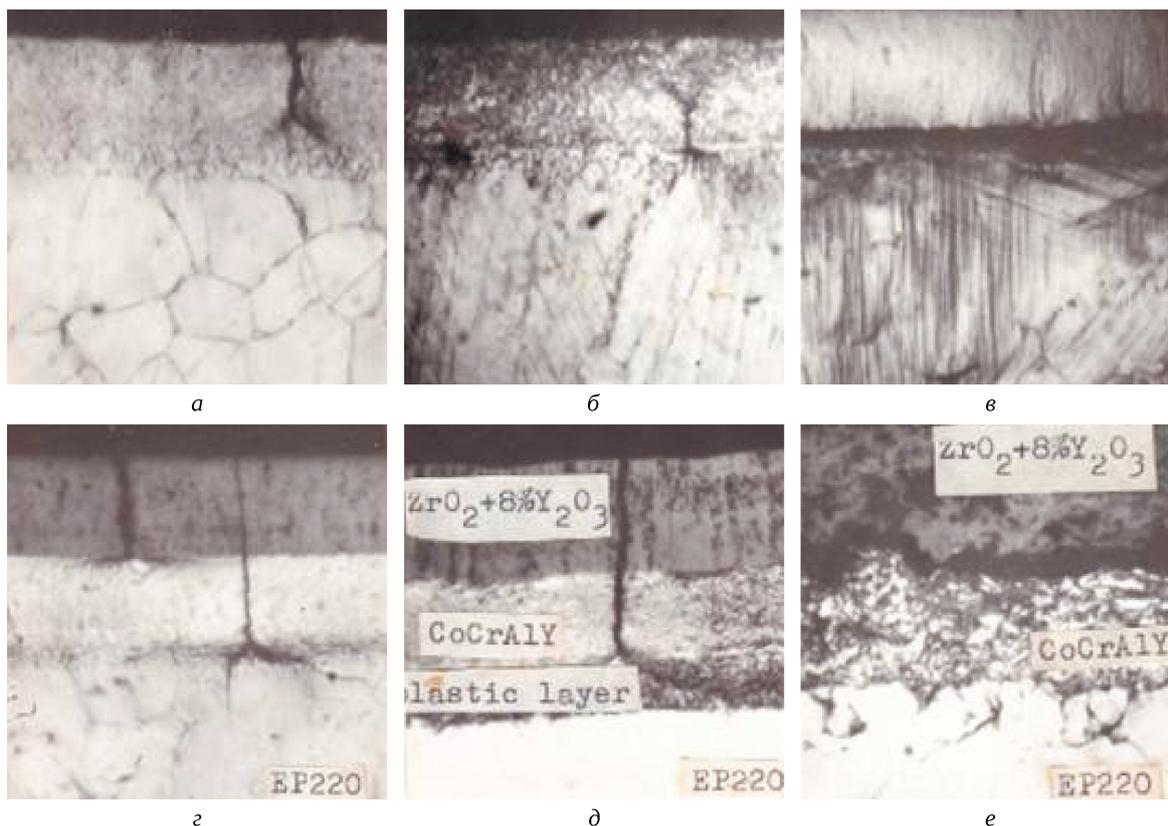


Рис. 8. Трещины термической усталости в образцах из сплавов ЭП539 (а–в) и ЭП220 (г–е) с защитными покрытиями, нанесенными электронно-лучевым способом (а – Co-21Cr-12Al-Y; б, в – Co-25Ni-20Cr-12Al-Y)

образцов с покрытиями. При проводимых по методике [81; 82] испытаниях корсетные образцы в первом полуцикле, $20^{\circ}\text{C} - T_{\text{max}}$, претерпевают большие деформации сжатия, которые в малопластичных слоях покрытий вызывают образование микротрещин уже в первом – втором циклах. При дальнейшем термоциклировании эти микротрещины обычно тормозятся в диффузионном слое или в высокопластичном слое покрытия (например, из сплава СДП-11) (рис. 8) [84].

В дальнейшем обычно образуются другие микротрещины – в основном металле. В этом случае термоциклическая долговечность металла с покрытием почти не отличается от таковой у металла без покрытия. Однако в случае толстых покрытий, для которых коэффициент интенсивности напряжений K_1 больше порогового значения (K_{th}), эти микротрещины распространяются в основной металл [84] и долговечность, а следовательно, и запасы прочности лопаток с такими покрытиями снижаются и могут быть рассчитаны с использованием математического аппарата механики разрушения.

Заключение

В статье предложены формулировки для оригинального четырехчленного деформационного критерия термоусталостного разрушения, приведены результаты вали-

дации и верификации, сравнения с альтернативными подходами и даны примеры применения. Указаны особенности применения критерия для моно- и поликристаллических материалов, при одноосном и многоосном напряженно-деформированном состоянии, для случаев линейного и нелинейного суммирования повреждений, при наличии коррозионных повреждений.

Представлены примеры использования результатов испытаний на термическую усталость плоских корсетных образцов для расчетного определения запасов термоциклической прочности лопаток газовых турбин, изготовленных из поликристаллических и монокристаллических жаропрочных сплавов. Проанализированы особенности расчетов лопаток с развитыми и малыми зонами пластичности и ползучести, а также лопаток с покрытиями.

Использование четырехчленного деформационного критерия термоусталостного разрушения для расчетного определения запасов термоциклической прочности деталей ГТД может быть реализовано на практике только при наличии найденных расчетом нестационарных температурных полей, а также требует применения в расчетах моделей вязкоупругопластического деформирования с нелинейным изотропно-кинематическим упрочнением.

Полувековой положительный опыт применения четырехчленного деформационного критерия термо-

усталостного разрушения для анализа долговечности высоконагруженных элементов, находящихся в условиях нестационарного неизотермического термомеханического воздействия, позволяет рекомендовать его для оценки на практике запасов прочности деталей газотурбинных двигателей.

Исследование частично финансируется Министерством науки и высшего образования Российской Федерации в рамках программы научного центра мирового уровня «Передовые цифровые технологии» (соглашение № 075-15-2020-311 от 20.04.2022).

Литература / References

1. Гецов Л.Б. Материалы и прочность деталей газовых турбин : в 2 кн. Кн. 1. Материалы, свойства, повреждения, модели деформирования и разрушения. Рыбинск : Газотурбинные технологии, 2010. 605 с.
Getsov L.B. Materialy i prochnost' detalei gazovykh turbin [Materials and strength of gas turbine parts]. In 2 books. Book 1: Materialy, svoistva, povrezhdeniia, modeli deformirovaniia i razrusheniia [Materials, properties, damages, models of deformation and fracture]. Rybinsk: Gazoturbiniye tekhnologii [Gas turbo technology], 2010. 605 p.
2. Дульнев Р.А., Котов П.И. Термическая усталость металлов. М. : Машиностроение, 1980. 200 с.
Dul'nev R.A., Kotov P.I. Termicheskaiia ustalost' metallov [Thermal fatigue of metals]. Moscow: Mashinostroenie [Mechanical engineering], 1980. 200 p.
3. Коффин Л.Ф. О термической усталости сталей // Жаропрочные сплавы при изменяющихся температурах и напряжениях : сб. ст. / под ред. Л.Б. Гецова и М.Г. Таубиной. М. ; Л. : Госэнергоиздат, 1960. С. 188–258.
Coffin L.F. O termicheskoi ustalosti stalei [On thermal fatigue of steels]. Zharoprochnye splavy pri izmeniaiushchikhsia temperaturakh i napriazheniakh [Heat-resistant alloys at varying temperatures and stresses]: collection of articles edited by L.B. Getsov and M.G. Taubina. Moscow; Leningrad: Gosenergoizdat, 1960. P. 188–258.
4. Manson S.S. Thermal stresses and low cycle fatigue. New York : McGraw-Hill, 1966. xi, 404 p.
5. Гецов Л.Б. О критерии разрушения при сложной программе нагружения // Всесоюзный рабочий симпозиум по вопросам малоциклового усталости : сообщ. и выступления. Каунас, 1971. С. 51–55.
Getsov L.B. O kriterii razrusheniia materialov pri slozhnoi programme nagruzheniia [On the criterion of materials failure under a complex loading program]. All-Union Symposium on low-cycle fatigue: reports and speeches. Kaunas, 1971. P. 51–55.
6. Гецов Л.Б. Деформационный критерий разрушения материалов при циклически изменяющихся напряжениях и температурах // Энергомашиностроение. 1972. № 10. С. 26–29.
Getsov L.B. Deformatsionnyi kriterii razrusheniia materialov pri tsiklicheski izmeniaiushchikhsia napriazheniakh i temperaturakh [Deformation criterion of material failure at cyclically varying stresses and temperatures]. Energomashinostroenie. 1972. No. 10. P. 26–29.
7. Гецов Л.Б. Кинетические уравнения разрушения при сложных программах нагружения // Проблемы прочности. 1978. № 7. С. 31–37.
Getsov L.B. Kinetic equations of failure in complex programs of cyclic loading // Strength of Materials. 1978. Vol. 10, no. 7. P. 767–775.
8. Гецов Л.Б., Семенов А.С. Критерии разрушения поликристаллических и монокристаллических материалов при термоциклическом нагружении // Прочность материалов и ресурс элементов энергооборудования : сб. науч. тр. / под общ. ред. Ю.К. Петрени, Л.Б. Гецова. СПб. : НПО ЦКТИ, 2009. (Труды ЦКТИ ; вып. 296). С. 83–91.
Getsov L.B., Semenov A.S. Kriterii razrusheniia polikristallicheskih i monokristallicheskih materialov pri termo-tsiklicheskom nagruzhenii [Failure criteria for polycrystalline and monocrystalline materials under thermocyclic loading]. Prochnost' materialov i resurs elementov energooborudovaniia [Strength of materials and life of power equipment elements]: collection of scientific papers under the general editorship of Yu.K. Petrenia, L.B. Getsov. St. Petersburg: NPO SKTI, 2009. (Proceedings of SKTI; issue 296). P. 83–91.
9. Семенов А.С., Гецов Л.Б. Критерии термоусталостного разрушения монокристаллических жаропрочных сплавов и методы определения их параметров // Проблемы прочности. 2014. № 1. С. 50–62.
Semenov A.S., Getsov L.B. Thermal fatigue fracture criteria of single crystal heat-resistant alloys and methods for identification of their parameters // Strength of Materials. 2014. Vol. 46, no. 1. P. 38–48.
10. Langer B.F. Fatigue failure from stress cycles of varying amplitude // Journal of Applied Mechanics. 1937. Vol. 4, no. 4. P. A160–A162.
11. Neu R.W., Sehitoglu H. Thermomechanical fatigue, oxidation, and creep. Part II. Life prediction // Metallurgical Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science. 1989. Vol. 20A, no. 9. P. 1769–1783.

-
12. Miner M.A. Cumulative damage in fatigue // *Journal of Applied Mechanics*. 1945. Vol. 12, no. 3. P. A159–A164.
 13. Palmgren A.G. Die Lebensdauer von Kugellagern // *Zeitschrift des Vereines Deutscher Ingenieure*. 1924. Vol. 68, no. 14. S. 339–341.
Palmgren A.G. The service life of ball bearings : translation of “Die Lebensdauer von Kugellagern”, *Zeitschrift des Vereines Deutscher Ingenieure*, vol. 68, no. 14, April 1924, p. 339–341 : NASA technical translation. 1971. 10, [1] p. NASA TT F-13460.
 14. Taira Sh. Lifetime of structures subjected to varying load and temperature // *Creep in Structures : colloquium held at Stanford University, California, July 11–15, 1960 / ed. by N.J. Hoff. Berlin etc. : Springer, 1962. (IUTAM Symposia)*. P. 96–124.
 15. Manson S.S. Fatigue: A complex subject – Some simple approximations // *Experimental Mechanics*. 1965. Vol. 5, no. 7. P. 193–226. DOI 10.1007/BF02321056.
 16. Rodriguez P., Mannan S.L. High temperature low cycle fatigue // *Sadhana*. 1995. Vol. 20, no. 1. P. 123–164. DOI 10.1007/BF02747287.
 17. Langer B.F. Design of pressure vessels for low-cycle fatigue // *Journal of Basic Engineering*. 1962. Vol. 84, no. 3. P. 389–399. DOI 10.1115/1.3657332.
 18. Smith K.N., Watson P., Topper T.H. A stress-strain functions for the fatigue on materials // *Journal of Materials*. 1970. Vol. 5, no. 4. P. 767–778.
 19. Coffin L.F. Fatigue at high temperature-prediction and interpretation // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*. 1974. Vol. 188, no. 1. P. 109–127. DOI 10.1243/PIME_PROC_1974_188_014_02.
 20. Socie D.F., Morrow J. Review of contemporary approaches to fatigue damage analysis // *Risk and Failure Analysis for Improved Performance and Reliability : proceedings of the 24th Sagamore Army Materials Research Conference, New York, August 21–26, 1977 / ed. by J.J. Burke and V. Weiss. New York and London, 1980. P. 141–194. DOI 10.1007/978-1-4684-7811-2_8*.
 21. Manson S.S., Halford G.R. Practical implementation of the double linear damage rule and damage curve approach for treating cumulative fatigue damage // *International Journal of Fracture*. 1981. Vol. 17, no. 2. P. 169–192. DOI 10.1007/BF00053519.
 22. Костюк А.Г., Трухний А.Д., Гецов Л.Б. О прочности деталей энергетических установок при нестационарных режимах // *Теплоэнергетика*. 1965. № 1. С. 48–53.
Kostiuk A.G., Trukhnii A.D., Getsov L.B. O prochnosti detalei energeticheskikh ustanovok pri nestatsionarnykh rezhimakh [On the strength of components of power plants in non-stationary modes]. *Teploenergetika [Thermal Engineering]*. 1965. No. 1. P. 48–53.
 23. Manson S.S. Interfaces between fatigue, creep, and fracture // *International Journal of Fracture Mechanics*. 1966. Vol. 2, no. 1. P. 327–363.
 24. Wood D.S. The effect of creep on the high strain fatigue behaviour of a pressure vessel steel // *Welding Journal. Welding Research Supplement*. 1966. Vol. 45, no. 2. P. 92–96.
 25. Chaboche J.-L., Gallierneau F. An overview of the damage approach of durability modelling at elevated temperature // *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*. 2001. Vol. 24, no. 6. P. 405–418. DOI 10.1046/j.1460-2695.2001.00415.x.
 26. Костюк А.Г. О деформации и разрушении кристаллического материала при сложной программе нагружения // *Прикладная механика и техническая физика*. 1967. № 3. С. 67–72.
Kostyuk A.G. Deformation and fracture of crystalline materials under complex loading-program conditions // *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 1967. Vol. 8, no. 3. P. 45–49.
 27. A generalized energy-based fatigue–creep damage parameter for life prediction of turbine disk alloys / Sh.-P. Zhu, H.-Zh. Huang, Li-P. He, Yu Liu, Zh. Wang // *Engineering Fracture Mechanics*. 2012. Vol. 90. P. 89–100. DOI 10.1016/j.engfracmech.2012.04.021.
 28. Mroziński S., Lis Z., Egner H. Energy dissipated in fatigue and creep conditions // *Materials*. 2021. Vol. 14, no. 16. Art. 4724. 13 p. DOI 10.3390/ma14164724.
 29. Махутов Н.А. Деформационные критерии разрушения и расчет элементов конструкций на прочность. М. : Машиностроение, 1981. 272 с.
Makhutov N.A. Deformatsionnye kriterii razrusheniia i raschet elementov konstruksii na prochnost' [Deformation criteria of failure and calculation of structural elements for strength]. Moscow: Mashinostroenie [Mechanical engineering], 1981. 272 p.
-

-
30. Гусенков А.П. Прочность при изотермическом и неизотермическом малоцикловом нагружении. М. : Наука, 1979. 295 с.
Gusenkov A.P. Prochnost' pri izotermicheskom i neizotermicheskom malotsiklovom nagruzhenii [Strength under isothermal and non-isothermal low-cycle loading]. Moscow: Nauka [Science], 1979. 295 p.
31. Manson S.S. The challenge to unify treatment of high temperature fatigue. A partisan proposal based on strain range partitioning // Fatigue at Elevated Temperatures : a symposium presented at The University of Connecticut Storrs, Conn., 18–23 June 1972 / A.E. Carden et al., editors. ASTM, 1973. (ASTM special technical publication ; 520). P. 744–782. STP38885S.
32. К оценке долговечности при неизотермическом малоцикловом нагружении с выдержками / Гохфельд Д.А., Кононов К.М., Садаков О.С., Порошин В.Б. // Машиноведение. 1983. № 4. С. 72–77.
Gokhfel'd D.A., Kononov K.M., Sadakov O.S., Poroshin V.B. K otsenke dolgovechnosti pri neizotermicheskom malotsiklovom nagruzhenii s vyderzhkami [On the assessment of durability under non-isothermal low-cycle loading with holding]. Mashinovedenie [Soviet Machine Science]. 1983. No. 4. P. 72–77.
33. Порошин В.Б. Влияние формы цикла деформирования на накопление повреждений при различных типах малоциклового нагружения с выдержками // Проблемы прочности. 1988. № 1. С. 38–43.
Poroshin V.B. Effect of the shape of strain cycles on damage cumulation in different types of low-cycle loading with holding // Strength of Materials. 1988. Vol. 20, no. 1. P. 45–52.
34. Гецов Л.Б. О накоплении повреждений и разрушении при сложной программе нагружения // Проблемы прочности. 1974. № 2. С. 32–38.
Getsov L.B. Damage accumulation and failure of metals under complex loading // Strength of Materials. Vol. 6, no. 2. P. 157–163.
35. Гецов Л.Б. Деформационный критерий разрушения и оценка циклической долговечности образцов и деталей при сложном нагружении // Прогнозирование прочности материалов и конструктивных элементов машин большого ресурса. Киев : Наукова думка, 1977. С. 122–128.
Getsov L.B. Deformatsionnyi kriterii razrusheniia i otsenka tsiklicheskoi dolgovechnosti obraztsov i detalei pri sloznom nagruzhenii [Deformation criterion of failure and evaluation of cyclic durability of samples and components under complex loading]. Prognozirovaniie prochnosti materialov i konstruktivnykh elementov mashin bol'shogo resursa [Forecasting the strength of materials and structural elements of machines of great resource]. Kiev: Naukova Dumka, 1977. P. 122–128.
36. Гецов Л.Б. Универсальный деформационно-кинетический критерий разрушения материалов и деталей при сложном напряженном состоянии // Малоцикловая усталость элементов конструкций : III Всесоюзный симпозиум, Паланга, 9–11 сентября 1979 г. : тез. докл. и сообщ. : в 3 вып. Вып. 1. Вильнюс, 1979. С. 120–121.
Getsov L.B. Universal'nyi deformatsionno-kineticheskii kriterii razrusheniia materialov i detalei pri sloznom napriazhennom sostoianii [Universal deformation-kinetic criterion of failure of materials and components under complex stress state]. Malotsiklovaia ustalost' elementov konstruksii [Low-cycle fatigue of structural elements]: III All-Union Symposium, Palanga, September 9–11, 1979: abstracts and reports in 3 volumes. Volume 1. Vilnius, 1979. P. 120–121.
37. Кононов К.М., Гецов Л.Б. Критерии разрушения при циклическом нагружении // Проблемы прочности. 1984. № 2. С. 81–86.
Kononov K.M., Getsov L.B. Failure criteria of materials in cyclic loading // Strength of Materials. 1984. Vol. 16, no. 2. P. 248–253.
38. Павлов П.А., Гецов Л.Б., Краснов Е.Г. Использование деформационного критерия для расчетной оценки условий разрушения материалов при циклическом нагружении в условиях сложного напряженного состояния // Проблемы прочности. 1989. № 3. С. 8–12.
Pavlov P.A., Getsov L.B., Krasnov E.G. Use of strain criterion for a computational evaluation of the failure conditions of materials under a cyclic load in a complex stressed state // Strength of Materials. 1989. Vol. 21, no. 3. P. 275–278.
39. Гецов Л.Б. К вопросу о деформационных критериях разрушения материалов при нестационарных режимах нагружения // Вопросы долговременной прочности энергетического оборудования сб. науч. тр. СПб. : НПО ЦКТИ, 1990. (Труды ЦКТИ ; вып. 260). С. 97–103.
Getsov L.B. K voprosu o deformatsionnykh kriteriiakh razrusheniia materialov pri nestatsionarnykh rezhimakh nagruzhenii [On the issue of deformation criteria for the failure of materials under non-stationary loading conditions]. Voprosy dolgovremennoi prochnosti energeticheskogo oborudovaniia [Issues of long-term durability of power equipment] collection of scientific papers. St. Petersburg: NPO SKTI, 1990. (Proceedings of SKTI; issue 260). P. 97–103.
-

-
40. Getsov L.B., Sadakov O.S., Poroshin W.B. Estimation criteria for low-cyclic strength under non-isothermic loadings with holdings // *Materials Engineering in Turbines and Compressors : 3rd International Charles Parsons Turbine Conference*, Newcastle upon Tyne, UK, 25–27 Apr. 1995 : proceedings. London, 1995. P. 429–436.
41. Гецов Л.Б. Прогнозирование остаточного ресурса высокотемпературных деталей ГТУ при нестационарных условиях эксплуатации // *Тяжелое машиностроение*. 1997. № 1. С. 12–16.
Getsov L.B. Prognozirovanie ostatochnogo resursa vysokotemperaturnykh detalei GTU pri nestatsionarnykh usloviiakh ekspluatatsii [Predicting the residual service lives of high-temperature parts of gas-turbine plants under non-stationary conditions of operation]. *Tiazheloe mashinostroenie* [Russian Journal of Heavy Machinery]. 1997. No. 1. P. 12–16.
42. Гецов Л.Б., Садаков О.С., Порошин В.Б. Критерии оценки малоциклового прочностии при неизотермическом нагружении с выдержками // *Проблемы машиностроения и надежности машин*. 1997. № 1. С. 52–58. [Машиноведение (с 1965 по 1989 год)]
Getsov L.B., Sadakov O.S., Poroshin V.B. Kriterii otsenki malotsiklovoi prochnosti pri neizotermicheskom nagruzhenii s vyderzhkami [Criteria for assessing low-cycle strength under non-isothermal loading with holding]. *Problemy mashinostroeniia i nadezhnosti mashin* [Journal of Machinery Manufacture and Reliability]. 1997. No. 1. P. 52–58.
43. Гецов Л.Б. Проблемы создания «универсальной» теории разрушения материалов // *Проблемы машиностроения и надежности машин*. 2001. № 5. С. 49–55.
Getsov L.B. Problemy sozdaniia “universal’noi” teorii razrusheniia materialov [Problems of creating a “universal” theory of material failure]. *Problemy mashinostroeniia i nadezhnosti mashin* [Journal of Machinery Manufacture and Reliability]. 2001. No. 5. P. 49–55.
44. Getsov L.B., Semenov A.S., Staroselsky A. A failure criterion for single-crystal superalloys during thermocyclic loading // *Materials and Technology*. 2008. Vol. 42, no. 1. P. 3–12.
45. Расчетное определение ресурса рабочих и направляющих лопаток ГТУ. Часть 2. Монокристаллические материалы / Л.Б. Гецов, В.Е. Михайлов, А.С. Семенов, В.В. Кривоносова, Ю.А. Ножницкий, Б.С. Блинник, Л.А. Магеррамова // *Газотурбинные технологии*. 2011. № 8 (99). С. 18–25.
Raschetnoe opredelenie resursa rabochikh i napravliaiushchikh lopatok GTU. Chast’ 2. Monokristallicheskie materialy [Computational determination of life of GTU rotor blades and guide vanes. Part 2. Monocrystalline materials]. Getsov L.B., Mikhailov V.E., Semenov A.S., Krivonosova V.V., Nozhnitskii Iu.A., Blinnik B.S., Magerramova L.A. *Gazoturbinnye tekhnologii* [Gas Turbo Technology]. 2011. No. 8 (99). P. 18–25.
46. Конечно-элементный анализ термоциклической прочностии лопаток газовых турбин. Часть 2. Результаты расчетов / А.С. Семенов, А.И. Грищенко, М.Е. Колотников, Л.Б. Гецов // *Вестник УГАТУ*. 2019. Т. 23, № 2 (84). С. 61–74.
Semenov A.S., Grishchenko A.I., Kolotnikov M.E., Getsov L.B. Konechno-elementnyi analiz termotsiklicheskoii prochnosti lopatok gazovykh turbin. Chast’ 2. Rezul’taty raschetov [Finite-element analysis of thermal fatigue of gas turbine blades. Part 2. Results of computations]. *Vestnik UGATU* [Scientific journal of Ufa State Aviation Technical University]. 2019. Vol. 23, no. 2 (84). P. 61–74.
47. Конечно-элементный анализ термоциклической прочностии лопаток газовых турбин. Часть 1. Модели материала, критерии разрушения, идентификация параметров / А.С. Семенов, А.И. Грищенко, М.Е. Колотников, Л.Б. Гецов // *Вестник УГАТУ*. 2019. Т. 23, № 1 (83). С. 70–81.
Semenov A.S., Grishchenko A.I., Kolotnikov M.E., Getsov L.B. Konechno-elementnyi analiz termotsiklicheskoii prochnosti lopatok gazovykh turbin. Chast’ 1. Modeli materiala, kriterii razrusheniia, identifikatsiia parametrov [Finite-element analysis of thermal fatigue of gas turbine blades. Part 1. Material models, fracture criteria, parameter identification]. *Vestnik UGATU* [Scientific journal of Ufa State Aviation Technical University]. 2019. Vol. 23, no. 1 (83). P. 70–81.
48. Семенов А.С. Идентификация параметров анизотропии феноменологического критерия пластичности для монокристаллов на основе микромеханической модели // *Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки*. 2014. № 2 (194). С. 15–29.
Semenov A.S. Identifikatsiia parametrov anizotropii fenomenologicheskogo kriteriia plastichnosti dlia monokristallov na osnove mikromekhanicheskoi modeli [The identification of anisotropy parameters of phenomenological plasticity criterion for single crystals worked out on the micromechanical model basis]. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU. Fiziko-matematicheskie nauki* [St. Petersburg Polytechnic University Journal – Physics and Mathematics]. 2014. No. 2 (194). P. 15–29.
49. Грищенко А.И., Семенов А.С. Моделирование процессов упругопластического деформирования монокристаллических сплавов // *Вестник ПНИПУ. Механика*. 2022. № 2. С. 58–72.
-

-
- Grishchenko A.I., Semenov A.S. Modelirovanie protsessov uprugoplasticheskogo deformirovaniia monokristallicheskih splavov [Modeling of the elastoplastic deformation process of single crystal superalloys]. Vestnik PNIPU. Mekhanika. [PNRPU Mechanics Bulletin]. 2022. No. 2. P. 58–72.
50. Hancock J.W., Mackenzie A.C. On the mechanisms of ductile failure in high-strength steels subjected to multi-axial stress-states // *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 1976. Vol. 24, no. 2/3. P. 147–160.
51. Бондарь В.С. Неупругость. Варианты теории. М. : Физматлит, 2004. 144 с.
Bondar V.S. Inelasticity. Variants of the theory. New York : Begell House, 2013. 194 p.
52. Бондарь В.С., Даншин В.В., Костин А.В. Математическое моделирование процессов термовязкопластического деформирования материалов // *Известия МГТУ «МАМИ»*. 2013. Т. 7, № 1–3. С. 54–60. DOI 10.17816/2074-0530-67788.
Bondar V.S., Danshin V.V., Kostin A.V. Matematicheskoe modelirovanie protsessov termoviazkoplasticheskogo deformirovaniia materialov [Mathematical modeling of the processes of thermo-viscous plastic deformation of materials]. Izvestiya MGTU MAMI [Proceedings of Moscow state university of mechanical engineering]. 2013. Vol. 7, no. 1–3. P. 54–60. DOI 10.17816/2074-0530-67788
53. Temis Yu.M. Mathematical simulation of low cycle fatigue of high-loaded engine parts // *Propulsion and Power Research*. 2018. Vol. 7, no. 4. P. 277–287.
54. Темис Ю.М., Худякова А.Д. Модель неизотермического упругоэластического деформирования конструкционных материалов при сложном нагружении // *Математическое моделирование и численные методы*. 2017. № 3 (15). С. 20–37.
Temis Y.M., Khudyakova A.D. Model' neizotermicheskogo uprugoplasticheskogo deformirovaniia konstruktsionnykh materialov pri slozhnom nagruzhenii [Model of non-isothermal elastoplastic deformation of structural materials under complex loading]. Matematicheskoe modelirovanie i chislennye metody [Mathematical Modeling and Computational Methods]. 2017. No. 3 (15). P. 20–37.
55. Cailletaud G. A micromechanical approach to inelastic behaviour of metals // *International Journal of Plasticity*. 1992. Vol. 8. no. 1. P. 55–73.
56. Нелинейная механика материалов / Ж. Бессон, Ж. Каето, Ж.-Л. Шабош, С. Форест ; под ред. Л.Б. Гецова ; пер. с фр. А.С. Кравчука. СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2010. 397 с.
Non-linear mechanics of materials / J. Besson, G. Cailletaud, J.-L. Chaboche, S. Forest ; in cooperation with Marc Blétry. Dordrecht : Springer, 2009. xviii, 433 p. (Solid mechanics and its applications ; vol. 167).
57. Semenov A.S., Melnikov B.E. Interactive rheological modeling in elasto-visco-plastic finite element analysis // *Procedia Engineering*. 2016. Vol. 165: 15th International scientific conference “Underground Urbanisation as a Prerequisite for Sustainable Development”, 12–15 September 2016, St. Petersburg, Russia. P. 1748–1756.
58. Семенов А.С. PANTOCRATOR – конечно-элементный программный комплекс, ориентированный на решение нелинейных задач механики // *Научно-технические проблемы прогнозирования надежности и долговечности конструкций и методы их решения : труды V Международной конференции, Санкт-Петербург, 14–17 октября 2003 г.* СПб. : Изд-во СПбГПУ, 2003. С. 466–480.
Semenov A.S. PANTOCRATOR – konechno-elementnyi programmnyi kompleks, orientirovannyi na reshenie nelineinykh zadach mekhaniki [PANTOCRATOR – finite element software package focused on solving nonlinear problems of mechanics]. Scientific and Technological Problems of Predicting the Reliability and Life of Structures and Methods to Solve Them: proceedings of the V International Conference, St. Petersburg, October 14–17, 2003. St. Petersburg: Publishing House of SPbPU, 2003. P. 466–480.
59. Напряженно-деформированное состояние и прочность рабочих лопаток турбины ГТЭ-150 / Л.Б. Гецов, А.И. Рыбников, В.В. Завгородний, А.С. Лебедев, В.В. Кривоносова, Ю.К. Петреня, О.В. Романова, А.А. Михайлов // *Газотурбинные технологии*. 2010. № 3. С. 34–41.
Napriazhenno-deformirovannoe sostoianie i prochnost' rabochikh lopatok turbiny GTE-150 [Stress-strain state and strength of GTU-150 turbine blades]. Getsov L.B., Rybnikov A.I., Zavgorodnii V.V., Lebedev A.S., Krivonosova V.V., Petrenia Iu.K., Romanova O.V., Mikhailov A.A. Gazoturbinnnye tekhnologii [Gas Turbo Technology]. 2010. No. 3. P. 34–41.
60. Методика определения длительной прочности охлаждаемых лопаток из монокристаллических жаропрочных сплавов / Гецов Л.Б., Семенов А.С., Семенов С.Г., Бессчетнов В.А., Грищенко А.И. // *Теплоэнергетика*. 2017. № 4. С. 48–56.
Long-term strength determination for cooled blades made of monocrystalline superalloys / L.B. Getsov, A.S. Semenov, V.A. Besschetnov, A.I. Grishchenko & S.G. Semenov // *Thermal Engineering*. 2017. Vol. 64, no. 4. P. 280–287.
-

-
61. Особенности расчетного определения статической и термоциклической прочности охлаждаемых лопаток ГТУ / Л.Б. Гецов, В.В. Кривоносова, Б.З. Марголин, О.В. Романова, А.С. Семенов // Тяжелое машиностроение. 2013. № 3. С. 11–21.
Getsov L.B., Krivonosova V.V., Margolin B.Z., Romanova O.V., Semenov A.S. Osobennosti raschetnogo opredeleniia staticheskoi i termotsiklicheskoj prochnosti okhlazhdaemykh lopatok GTU [Technique of design definition of strength of cooled blades]. Tiazheloe mashinostroenie [Russian Journal of Heavy Machinery]. 2013. No. 3. P. 11–21.
62. РД ЭО 1.1.2.09.0714-2007. Методика расчета прочности основных элементов реакторных установок на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем : руководящий документ эксплуатирующей организации / Концерн «Росэнергоатом». 2007.
RD EO 1.1.2.09.0714-2007. Metodika rascheta prochnosti osnovnykh elementov reaktornykh ustanovok na bystrykh neitronakh s natrievym teplonositelem : rukovodiashchii dokument ekspluatiruiushchei organizatsii [RD EO 1.1.2.09.0714-2007. Methodology for calculating the strength of main elements of fast neutron reactor installations with a sodium coolant: guidance document of the operating organization]. Rosenergoatom. 2007.
63. Сульфидно-оксидная коррозия современных жаропрочных сплавов / Гецов Л.Б., Лаптев А.Б., Пузанов А.И., Шеляпина Н.М. // Известия вузов. Авиационная техника. 2019. № 4. С. 150–155.
Sulfide oxide corrosion of modern heat-resistant alloys / L.B. Getsov, A.B. Laptev, A.I. Puzanov, N.M. Shelyapina // Russian Aeronautics. 2019. Vol. 62, no. 4. P. 689–695.
64. Исследование металлопорошкового сплава ХН56КВМТЮБ для дисков ГТД в условиях агрессивного действия смеси хлоридов и сульфатов натрия / Гецов Л.Б., Баландина М.Ю., Лаптев А.Б., Мовенко Д.А., Пузанов А.И., Пивоварова М.В. // Металловедение и термическая обработка металлов. 2021. № 7. С. 19–25.
Getsov L.B., Balandina M.Yu., Laptev A.B., Movenko D.A., Puzanov A.I., Pivovarova M.V. Issledovanie metalloporoshkovogo splava KhN56KVMTYuB dlia diskov GTD v usloviakh agressivnogo deistviia smesi khloridov i sul'fatov natriia [A study of metal-powder alloy KhN56KVMTYuB for GTE disks under aggressive impact of sodium chlorides and sulfates]. Metallovedenie i termicheskaja obrabotka metallov [Metallurgy and heat treatment of metals]. 2021. No. 7. P. 19–25.
65. Эффект Ребиндера при испытаниях жаропрочных сплавов в контакте с расплавами солей / Л.Б. Гецов, М.Ю. Баландина, А.И. Грищенко, А.Б. Лаптев, А.И. Пузанов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2021. Т. 87, № 10. С. 54–62.
Getsov L.B., Balandina M.Yu., Grishchenko A.I., Laptev A.B., Puzanov A.I. Effekt Rebindera pri ispytaniikh zharoprochnykh splavov v kontakte s rasplavami solei [The Rehbinder effect in tests of superalloys in contact with molten salts]. Zavodskaja laboratorija. Diagnostika materialov [Industrial Laboratory. Diagnostics of Materials]. 2021. Vol. 87, no. 10. P. 54–62.
66. Влияние коррозионных повреждений на сопротивление термической усталости жаропрочных сплавов / Гецов Л.Б., Грищенко А.И., Лаптев А.И., Можайская Н.В., Пузанов А.И., Семенов А.С. // Деформация и разрушение материалов. 2023. В печати.
Vliianie korrozionnykh povrezhdenii na soprotivlenie termicheskoi ustalosti zharoprochnykh splavov [The effect of corrosion damage on the thermal fatigue resistance of heat-resistant alloys]. Getsov L.B., Grishchenko A.I., Laptev A.I., Mozhaika N.V., Puzanov A.I., Semenov A.S. Deformatsiia i razrushenie materialov [Deformation and Fracture of Materials]. 2023. In print.
67. Chan K.S., Enright M.P., Moody J.P. Development of a probabilistic methodology for predicting hot corrosion fatigue crack growth life of gas turbine engine disks // Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. 2014. Vol. 136, no. 2. P. 022505-1–022505-8.
68. Gallermeau F., Nouailhas D., Chaboche J.-L. A fatigue damage model including interaction effects with oxidation and creep damages. Fatigue' 96 : proceedings of the Sixth International Fatigue Congress, 6–10 May 1996, Berlin, Germany / editors G. Lütjering and H. Nowack. Pergamon Press, 1996. P. 861–866.
69. Zhao L., Nikbin K.M. Characterizing high temperature crack growth behaviour under mixed environmental, creep and fatigue conditions // Materials Science and Engineering A. 2018. Vol. 728. P. 102–114.
70. Семенов А.С., Семенов С.Г., Гецов Л.Б. Методы расчетного определения скорости роста трещин усталости, ползучести и термоусталости в поли- и монокристаллических лопатках ГТУ // Проблемы прочности. 2015. № 2. С. 61–87.
Semenov A.S., Semenov S.G., Getsov L.B. Methods of computational determination of growth rates of fatigue, creep, and thermal fatigue cracks in poly- and monocrystalline blades of gas turbine units // Strength of Materials. 2015. Vol. 47, no. 2. P. 268–290.
-

-
71. A concise binomial model for nonlinear creep-fatigue crack growth behavior at elevated temperatures / J. Mao, Zh. Xiao, D. Hu, X. Guo and R. Wang // *Materials*. 2022. Vol. 15, no. 2. Art. 651. 16 p. DOI 10.3390/ma15020651.
72. A phenomenological model to predict the crack growth in single crystal superalloys at high temperature / J.L. Bouvard, F. Gallerneau, P. Paulmier, J.L. Chaboche // *International Journal of Fatigue*. 2012. Vol. 38. P. 130–143.
73. Гецов Л.Б. Использование теории приспособляемости для решения задач обеспечения надежности ГТД // *Теплоэнергетика*. 1991. № 10. С. 68–70.
Getsov L.B. Ispol'zovanie teorii prispособliaemosti dlia resheniia zadach obespecheniia nadezhnosti GTD [Using adaptability theory to solve the problems of ensuring reliability of GTE]. *Teploenergetika* [Thermal Engineering]. 1991. No. 10. P. 68–70.
74. Гохфельд Д.А., Чернявский О.Ф. Несущая способность конструкций при повторных нагружениях. М. : Машиностроение, 1979. 263 с.
Gokhfel'd D.A., Cherniavskii O.F. Nesushchaia sposobnost' konstruksii pri povtornykh nagruzheniiakh [Load-carrying capacity of structures under repeated loads]. Moscow: Mashinostroenie [Mechanical engineering], 1979. 263 p.
75. Кинашвили Р.С. Определение запасов прочности при нестационарной температуре и нестационарной напряженности // *Известия АН СССР. Отделение технических наук. Механика и машиностроение*. 1959. № 3. С. 126–128.
Kinashevili R.S. Opredelenie zapasov prochnosti pri nestatsionarnoi temperature i nestatsionarnoi napriazhennosti [Determination of strength margins at non-stationary temperature and non-stationary tension]. *Izvestiia AN SSSR. Otdelenie tekhnicheskikh nauk. Mekhanika i mashinostroenie* [Journal of the USSR Academy of Sciences. Department of Technical Sciences. Mechanics and mechanical engineering]. 1959. No. 3. P. 126–128.
76. Термопрочность деталей машин : Теория. Экспериментальные исследования. Расчет / И.А. Биргер, Б.Ф. Шорр, И.В. Демьянушко, Р.А. Дульнев, Р.Н. Сизова ; под общ. ред. И.А. Биргера и Б.Ф. Шорра. М. : Машиностроение, 1975. 455 с.
Birger I.A., Shorr B.F., Dem'ianushko I.V., Dul'nev R.A., Sizova R.N. Termoprochnost' detalei mashin: Teoriia. Eksperimental'nye issledovaniia. Raschet [Thermal strength of machine parts: Theory. Experimental studies. Calculation]. Under the general editorship of I.A. Birger and B.F. Shorr. Moscow: Mashinostroenie [Mechanical Engineering], 1975. 455 p.
77. К вопросу об использовании теории приспособляемости в расчетах на прочность дисков газовых турбин / Беляков А.Р., Гецов Л.Б., Дондошанский В.К., Шнеерсон Ю.Б. // *Проблемы прочности*. 1988. № 11. С. 100–106.
Use of the adaptability theory in calculations for the strength of gas turbine disks / A.R. Belyakov, L.B. Getsov, V.K. Dondoshanskii & Yu.B. Shneerson // *Strength of Materials*. 1988. Vol. 20, no. 11. P. 1527–1534.
78. Ножницкий Ю.А. Подтверждение ресурса авиационных ГТД и критических по последствиям разрушения деталей этих двигателей // *Современные проблемы ресурса материалов и конструкций : труды III школы-семинара, Москва, 9–10 апреля 2009 г.* / под ред. Бондаря В.С., Васина Р.А. и Кийко И.А. МАМИ, 2009. С. 74–89.
Nozhnitskii Yu.A. Podtverzhdenie resursa aviatsionnykh GTD i kriticheskikh po posledstviyam razrusheniia detalei etikh dvigatelei [Confirmation of life of aviation gas turbine engines and critical consequences of the component failure of these engines]. *Modern problems of material and structure life: proceedings of the III school-seminar, Moscow, April 9–10, 2009*. Ed. Bondar V.S., Vasin R.A. and Kiiko I.A. MAMI, 2009. P. 74–89.
79. Getsov L.B., Semenov A.S., Ignatovich I.A. Thermal fatigue analysis of turbine discs on the base of deformation criterion // *International Journal of Fatigue*. 2017. Vol. 97. P. 88–97.
80. Гецов Л.Б., Семенов А.С., Игнатович И.А. Новый метод расчетного определения термоциклической прочности дисков ГТУ // *Насосы. Турбины. Системы*. 2019. № 1 (30). С. 6–17.
Getsov L.B., Semenov A.S., Ignatovich I.A. Novyi metod raschetnogo opredeleniia termotsiklicheskoii prochnosti diskov GTU [A novel method for calculating the thermocyclic strength of GTU disks]. *Nasosy. Turbiny. Sistemy*. [Pumps. Turbines. Systems]. 2019. No. 1 (30). P. 6–17.
81. Гецов Л.Б., Рыбников А.И., Олышанская Э.Я. Использование методов вакуумной металлографии для оценки работоспособности материалов с защитными покрытиями // *Заводская лаборатория*. 1982. Т. 48, № 7. С. 74–77.
Getsov L.B., Rybnikov A.I., Ol'shanskaia E.Ia. Ispol'zovanie metodov vakuumnoi metallografii dlia otsenki rabotosposobnosti materialov s zashchitnymi pokrytiiami [Using of vacuum metallography methods for evaluating operability of materials with protective coatings]. *Zavodskaia laboratoriia* [Industrial Laboratory. Diagnostics of Materials]. 1982. Vol. 48, no. 7. P. 74–77.
82. Метод микроструктурного исследования повреждений в металлах при термической усталости / Гугелев Б.М., Гецов Л.Б., Новикова Е.Г., Журавлев Ю.Н. // *Заводская лаборатория*. 1976. Т. 53, № 1. С. 94–98.
-

-
- Gugelev B.M., Getsov L.B., Novikova E.G., Zhuravlev Iu.N. Metod mikrostrukturnogo issledovaniia povrezhdenii v metallakh pri termicheskoi ustalosti [Method of microstructural study of damage in metals under thermal fatigue]. Zavodskaia laboratoriiia [Industrial Laboratory. Diagnostics of Materials]. 1976. Vol. 53, no. 1. P. 94–98.
83. Семенов А.С., Гецов Л.Б. Экстраполяционные методы прогнозирования термоусталостной долговечности монокристаллических сплавов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Естественные и инженерные науки. 2019. Т. 25, № 4. С. 94–106.
- Semenov A.S., Getsov L.B. Ekstrapoliatsionnye metody prognozirovaniia termoustalostnoi dolgovechnosti monokristallicheskih spлавov [Extrapolation methods for predicting thermal fatigue life of single crystal superalloys]. Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU. Estestvennye i inzhenernye nauki [St. Petersburg Polytechnic University Journal – of Engineering and technology]. 2019. Vol. 25, no. 4. P. 94–106.
84. Термоусталостная прочность и жаростойкость защитных покрытий / Гецов Л.Б., Рыбников А.И., Добина Н.И., Ольшанская Э.Я. // Проблемы прочности. 1983. № 2. С. 69–72.
- Thermal fatigue strength and heat resistance of protective coatings / L.B. Getsov, A.I. Rybnikov, N.I. Dobina, A.A. Moroz & É.Ya. Ol'shanskaya // Strength of Materials. 1983. Vol. 15, no. 2. P. 234–238.

Материалы получены редакцией 01.12.2022