

DOI: 10.15593/2224-9982/2019.56.04

УДК 621.1:621.45

Н.А. Махутов, М.М. Гаденин

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия

ЗАКОНОМЕРНОСТИ НАКОПЛЕНИЯ МАЛОЦИКЛОВЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ С УЧЕТОМ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА НАГРУЖЕНИЯ

Показано, что характер эксплуатационных условий нагружения может существенным образом изменять закономерности накопления повреждений в процессе малоциклового нагружения критических элементов авиационных двигателей. Высокие уровни и сложные режимы рабочих нагрузок, действующих на их агрегаты в условиях повышенных и высоких значений температуры, обуславливают наличие локальных напряжений и деформаций, существенно превышающих уровни номинальной нагруженности. В этом случае существенное значение в формировании напряженно-деформированных состояний и в достижении предельных состояний для агрегатов современного авиационного моторостроения имеют эффекты локального нелинейного и неизотермического циклического деформирования и разрушения с учетом изменения в процессе эксплуатации характеристик механических свойств материалов, нестационарности механических и термомеханических нагрузок с выходом напряжений в локальных зонах в упругопластическую область. Эти обстоятельства порождают существенное перераспределение местных напряжений и деформаций и их кинетику в каждом из эксплуатационных циклов. При описании указанных процессов используют степенные зависимости для аппроксимации соответствующих диаграмм деформирования и оценки долговечности в этих условиях, а выражения для суммирования повреждений базируются на деформационно-кинетических критериях. При этом рассматриваемое суммирование усталостных и квазистатических повреждений как формально линейное фактически является существенно нелинейным, так как определяющие каждую из их составляющих деформационные характеристики (параметры диаграмм циклического деформирования) имеют в процессе нагружения сложную кинетику, нелинейным образом зависящую от числа циклов (циклическое упрочнение или разупрочнение материала в упругопластической области), а также от температуры, времени нагружения (температурно-временное изменение характеристик прочности и пластичности материала) и характера режимов приложения нагрузки (монотонное, с наложением вибрационной составляющей на базовый низкочастотный цикл).

Ключевые слова: накопление повреждений, предельные состояния, критерии разрушения, прочность, ресурс, малоцикловая усталость, диаграмма деформирования, модуль упрочнения, двухчастотные режимы, механические свойства.

N.A. Makhutov, M.M. Gadenin

Mechanical Engineering Research Institute of the RAS, Moscow, Russian Federation

BEHAVIOR OF LOW-CYCLE DAMAGES ACCUMULATION TAKING INTO ACCOUNT LOADING SERVICE PARAMETERS

It is noted that character of service loading conditions can change essentially behaviors of damages accumulation in process of a low cycle loading of critical parts of aircraft engines. High levels and the composite regimes of the service loads applied to their high-loaded parts in the conditions of heightened and high temperatures, stipulate presence of local stresses and the strains essentially exceeding levels of the nominal stress loading. In this case effects of a local nonlinear and nonisothermal cyclic deformation and fracture taking into account change while in service characteristics of mechanical properties of materials, nonstationary mechanical and thermo-mechanical loads with transition of stresses in local zones in elastoplastic field have essential importance at forming of stress-strain states and at reaching of the limiting states for parts up-to-date aircraft engines. This condition generates essential redistribution of localized stresses and strains and their kinetics in each of service cycles. At the description of such processes exponential functions for approximation of corresponding deformation diagrams and for life-time estimation in these conditions are used, and the equations for damages summation are founded on deformation-kinetic criteria. Thus considered summation of fatigue and quasistatic damages as formally linear, actually is essentially nonlinear as defining each of their components deformation characteristics (parameters of diagrams of a cyclic deformation) have the complicated kinetics in the course of a loading. This kinetics nonlinearly depends on number of cycles (cyclic hardening or softening of a material in elastoplastic area), and also from temperature, loading time (a temperature-time history strength and plasticity characteristics of a material) and from character of regimes of load application (monotone, with superimposition of a vibration component on a base low-frequency cycle).

Keywords: accumulation of damages, the limiting states, criteria of fracture, strength, life-time, low-cycle fatigue, deformation diagram, hardening module, two-frequency regimes, mechanical properties.

Высокие уровни и сложные режимы рабочих нагрузок, действующих на агрегаты высоконагруженных газотурбинных двигателей, в том числе и в условиях повышенных и высоких значений температуры, обуславливают уровень локальных напряжений и деформаций в их элементах, существенно превышающий уровни номинальной нагруженности [1–5]. Решению проблем прочности, ресурса, живучести и безопасности эксплуатации таких элементов способствовал значительный опыт специалистов ЦИАМ им. П.И. Баранова в области разработки расчетных и экспериментальных методов механики деформируемого тела, отработки вопросов прочности в условиях высоких значений температуры [1, 2, 6–9].

Действующие нормативные материалы по расчетам прочности базируются в основном на определении характеристик статической прочности и циклической долговечности (ресурса) преимущественно по интегральным (номинальным) параметрам напряженных и предельных состояний. Такие подходы были проверены многолетней практикой проектирования, изготовления, испытаний и эксплуатации. Они по-прежнему должны составлять основу расчетов и проектирования [1, 8–13]. Вместе с тем существенное значение в формировании экстремальных напряженно-деформированных состояний и в достижении предельных состояний для агрегатов современного авиационного моторостроения имеют эффекты локального нелинейного и неизотермического циклического деформирования и разрушения с учетом изменения в процессе эксплуатации характеристик механических свойств материалов, нестационарности механических и термомеханических нагрузок [1, 3–5, 14–18]. Выход напряжений в локальных зонах конструкции в упругопластическую область порождает существенное перераспределение местных напряжений и деформаций и их кинетику в каждом из эксплуатационных циклов.

Циклические процессы изменения нагрузок и значений температуры при изменении режимов нагруженности вызывают эффекты перераспределения напряжений и деформаций в зонах концентрации и, соответственно, закономерностей накопления повреждений в этих условиях [3–5, 11, 15, 16]. Указанные обстоятельства являются причиной и основанием для использования дополнительных расчетов прочности и ресурса по нелинейным критериям термоциклического деформирования и разрушения на основе критериев суммирования локальных повреждений, обладающих выраженной нелинейностью по истории эксплуатационного нагружения [11, 14, 15, 17].

Результаты исследований сопротивления деформированию и разрушению конструкционных материалов, положенные в основу анализа прочности и ресурса при комбинированных траекториях нагружения, показали, что в общем случае эти показатели зависят от статических, длительных статических и циклических свойств металла, режима нагружения, а также от концентрации напряжений и образования и развития трещин. Задача определения сопротивления циклическому деформированию и разрушению при значениях температуры, когда циклические пластические деформации сочетаются с деформациями ползучести, существенно усложняется. Приоритетность фундаментальных исследований закономерностей деформирования и разрушения при циклическом и длительном нагружении в области высоких значений температуры может быть сформулирована в виде двух базовых подходов [11]:

- использование степенных уравнений для построения кривых (диаграмм) деформирования и разрушения (в напряжениях, амплитудах пластических или упругопластических деформаций);
- использование линейных и нелинейных выражений для описания накопления статических, циклических и длительных статических повреждений в форме относительной долговечности или относительной деформации.

Первое из этих направлений получило развитие в виде использования степенного уравнения, связывающего амплитуду циклической деформации e_a с числом циклов до разрушения, [11, 19]

$$e_a = e_{ap} + e_{ae} = C_p N^{-m_p} + C_e N^{-m_e}, \quad (1)$$

где показатели степени m_p и m_e и константы C_p и C_e соответственно для осредненных амплитуд пластической e_{ap} и упругой e_{ae} составляющих полной циклической деформации e_a принимаются зависящими от типа материала, температуры t и времени цикла τ_c (или частоты нагружения) [11].

Второе направление в исследованиях сопротивления длительному статическому и циклическому нагружению основано на деформационно-кинетическом критерии разрушения [11]. При этом, как известно, простое линейное суммирование малоцикловых (усталостных) d_f и длительных статических d_s повреждений, выраженных в значениях относительной долговечности, на стадии разрушения в зависимости от доли каждого из повреждений дает существенное отличие от единицы:

$$d = d_f + d_s = \int_0^{N'_c} \frac{1}{N_c} dN + \int_0^{\tau'_c} \frac{1}{\tau_c} d\tau, \quad (2)$$

где N_c , τ_c – значения долговечности в числах циклов и часах соответственно, вычисленные по исходным кривым малоциклового усталости и длительной прочности N'_c , τ'_c .

При использовании осредненных данных по деформациям e_a , e_{ap} и e_{ae} в выражении (1) величина d по опытным данным может изменяться от 0,10 до 2,0. Меньшие из указанных величин получаются при значениях d_f и $d_s > 0,05$, а величины $d > 1$ – при $d_f < 0,02$ (когда проявляется упрочнение в 1-х циклах нагружения). Возможность получения величин d , приближающихся к единице, связывается с использованием деформационно-кинетического критерия разрушения по выражению типа (2), но учитывающего при этом кинетику накопления пластических деформаций и изменение предельной пластичности при увеличении времени цикла нагружения, т.е. с переходом к определению величин d_f и d_s не через величины относительной долговечности, а через относительные циклически e_a и односторонне накопленные e_p (вследствие циклической анизотропии и ползучести) деформации соответственно:

$$d = d_f + d_s = \int_0^{N'_c} \left(\frac{2e_a}{e_f(\tau'_c)} \right)^2 dN + \int_0^{\tau'_c} \frac{e'_f}{e_f(\tau'_c)} de, \quad (3)$$

где $e_f(\tau'_c)$ – разрушающаяся деформация для времени τ'_c .

Уравнение кривой малоциклового разрушения при жестком нагружении (асимметричный цикл деформирования для значений температуры t , при которых деформации ползучести существенно меньше циклических и пластических деформаций) имеет вид

$$\bar{e}_a = \frac{1}{e'_\tau \left(4N_0^{m_e} + \frac{1+r_e}{1-r_e} \right)} \ln \frac{100}{100 - \psi_{k0}^t} + \frac{k_{-1} \sigma_{B0}^t}{e'_1 E^t \left(1 + k_{-1} \frac{1+r_e}{1-r_e} \right)}, \quad (4)$$

где \bar{e}_a – амплитуда упругопластической деформации в относительных координатах ($\bar{e}_a = e_a / e'_\tau$, где e'_τ – деформация предела текучести); N_0 – число циклов до образования трещины; r_e – коэффициент асимметрии цикла деформаций, $r_e = \bar{e}_{\min} / \bar{e}_{\max}$; ψ_{k0}^t – относительное сужение образца в шейке при кратковременном статическом разрыве; σ_{B0}^t – предел прочности при кратковременном нагружении; k_{-1} – коэффициент, равный отношению предела выносливости σ_{-1}^t на базе $N_0 = 10^6$ к пределу прочности σ_B^t ; E^t – модуль упругости; m_e – показатель степени, зависящий от свойств материала.

Влияние высоких значений температуры и времени деформирования τ учитывается введением в выражение (4) характеристик σ_B^t и ψ_K^t , кинетически зависящих от времени. Эти зависимости в 1-м приближении (что идет в запас прочности) аппроксимируются степенными уравнениями в условных σ_B^t и истинных $\sigma_{вн}^t$ напряжениях:

$$\sigma_B^t = \sigma_{в0}^t (\tau_0 / \tau)^{m_{\sigma_B}} \text{ при } \sigma \leq \sigma_{0,2}^t; \quad \sigma_{вн}^t = \frac{\sigma_{в0}^t (\tau_0 / \tau)^{m_{\sigma_B}}}{1 - \psi} \text{ при } \sigma \leq \sigma_{0,2}^t; \quad (5)$$

$$\psi_K^t = \psi_{K0}^t (\tau_0 / \tau)^{m_{\psi_K}}, \quad (6)$$

где τ_0 – время испытаний до разрушения при кратковременном статическом нагружении ($\tau_0 = 0,02 \dots 0,12$ ч, для пластичных сталей $\tau_0 \approx 0,05$ ч); m_{σ_B} , m_{ψ_K} – параметры кривой длительной прочности и пластичности данной стали, зависящие от температуры.

Если для рассматриваемого ресурса τ_* известны предельные величины $\sigma_{в*}^t$ и ψ_{K*}^t , то

$$m_{\sigma_B} = \lg(\sigma_{в0}^t / \sigma_{в*}^t) / \lg(\tau_* / \tau_0), \quad (7)$$

$$m_{\psi_K} = \lg(\psi_{K0}^t / \psi_{K*}^t) / \lg(\tau_* / \tau_0). \quad (8)$$

При симметричном цикле деформаций (рис. 1) и температуре t , когда выдержки осуществляются при достижении максимальных и минимальных деформаций цикла, напряжения $\bar{\sigma}$ изменяются непропорционально деформациям $\bar{\epsilon}$. Для определения эквивалентного (по повреждаемости) времени цикла $\tau_{цэ}$ следует учитывать скорость деформирования и нагружения в полуциклах растяжения и сжатия, различную чувствительность материалов к выдержкам при растяжении и сжатии, а также соотношение времени выдержки в полуцикле растяжения и сжатия (обозначения соответствующего времени приведены на рис. 1):

$$\tau_{цэ} = (\tau_{вр} + k_c \tau_{вс}) + [a_{нр} \tau_{нр} + a_{рп} \tau_{рп} + k_c (a_{нс} \tau_{нс} + a_{рс} \tau_{рс})] = k_3 \tau_{ц}, \quad (9)$$

где k_c – характеристика материала и условий нагружения; $a_{нр}$, $a_{рп}$, $a_{нс}$, $a_{рс}$ – коэффициенты приведения времени нагружения и разгрузки ко времени выдержки; k_3 – коэффициент приведения времени цикла $\tau_{ц}$ к эквивалентному $\tau_{цэ}$.

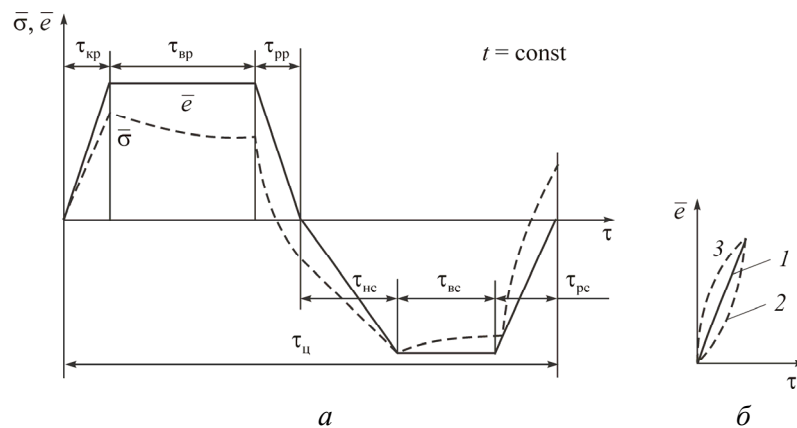


Рис. 1. Форма полного цикла изменения напряжений при изотермическом нагружении (а) и изменение вида его участков упругого нагружения и разгрузки (б) при увеличении (кривая 2) или уменьшении (кривая 3) скорости деформирования относительно равномерного нагружения (кривая 1)

Для аустенитной стали (например, типа X18H10T) при равномерном деформировании в полуциклах нагружения и разгрузки величина $a \approx 0,33$ (см. рис. 1, б, кривая 1). При деформировании с увеличивающейся скоростью, пропорциональной времени, можно принять величину a , равную 0,22 (см. рис. 1, б, кривая 2); при деформировании с уменьшающейся скоростью $a \approx 0,45$ (см. рис. 1, б, кривая 3).

Учитывая преимущественное влияние на накопление повреждений растягивающих напряжений и деформаций, можно считать, что коэффициент k_c изменяется в пределах от 0 до 1,0. На основе выражений (4)–(6) можно записать уравнение кривой малоциклового разрушения для высоких значений температуры

$$\bar{e}_a = \frac{1}{e_t^t \left(4N_0^{m_e} + \frac{1+r_e}{1-r_e} \right)} \ln \frac{100}{100 - \Psi_{k0}^t \left(\frac{\tau_0}{N_0 \tau_{цз}} \right)^{m_{\Psi_k}}} + \frac{k_{-1} \sigma_{в0} (\tau_0 N_0 \tau_{цз})^{m_{\sigma_b}}}{e_t^t E^t \left(1 + k_{-1} \frac{1+r_e}{1-r_e} \right)}. \quad (10)$$

При оценках циклической и длительной циклической прочности и долговечности используются различные методы аппроксимации диаграмм деформирования в неупругой области (линейная, дробно-линейная, степенная). Степенная аппроксимация диаграмм деформирования оказывается наиболее удобной и отвечающей результатам экспериментов. Диаграмма деформирования при исходном статическом нагружении в относительных координатах в упругопластической области в этом случае описывается уравнением

$$\bar{\sigma}^{(0)} = \bar{e}^{(0)m^t}, \quad (11)$$

где m^t – показатель степени, зависящий от материала, температуры и времени нагружения.

Величину m^t для изохронных кривых статического деформирования в 1-м приближении рассчитывают по характеристикам статических механических свойств $\sigma_{в*}^t$, $\sigma_{0,2}^t$, Ψ_k^t , E^t .

Показатель степени (модуль упрочнения) для изохронной кривой длительного циклического деформирования при температуре t вычисляют по уравнению

$$m^t(k) = \frac{\lg e^{-(0)m^t}}{\lg \left[e^{-(0)m^t} + \frac{A^t}{2} (e^{-(0)} - 1) F(k) \right]}, \quad (12)$$

где $F(k)$ – функция числа полуциклов нагружения k ($k = 2N$), зависящая от времени; A^t – параметр диаграммы циклического деформирования, равный $A^t = \bar{\delta}^{(1)} / (\bar{e}^{(0)} - 1)$.

Для циклически упрочняющихся материалов

$$F(k) = \frac{1}{k^{B^t (\bar{e}^{(0)m^t} - 1)}}, \quad (13)$$

где B^t – параметр диаграммы циклического деформирования, зависящий от материала, температуры и времени цикла.

Для циклически стабильного материала с установившейся на большей стадии нагружения шириной петли пластического гистерезиса функция $F(k)$ в выражении (12) принимается равной $F(k) = 1$.

Для циклически разупрочняющихся материалов с увеличивающейся шириной петли за счет кинетики циклических свойств и деформаций ползучести

$$F(k) = \exp C^t (e^{-(0)} - 1) (k - 1). \quad (14)$$

Для расчетной оценки значений параметров C^t и B^t можно воспользоваться зависимостями

$$C^t = 1,5 \cdot 10^{-3} \left(\frac{1}{1 - \sigma_{0,2}^t / \sigma_b^t} - 2 \right), \quad B^t = -\frac{1}{3} 10^3 C^t.$$

Для циклически стабильных материалов $C^t = B^t = 0$.

Уравнение изохронной кривой циклического деформирования в координатах размахов напряжений и деформаций $\bar{S} - \bar{\epsilon}$ записывается в форме

$$\bar{S}^{(k)} = \bar{\epsilon}^{(k)m^t(k)}. \quad (15)$$

Для расчетов в неупругой области деформирования циклический предел текучести $\bar{S}^{t(k)}$ может быть принят равным двум пределам текучести $\sigma_{\tau}^{(t)}$ при статическом деформировании, хотя условный предел текучести $\bar{S}_{0,4}^{t(k)} \geq \sigma_{0,2}^{(t)}$.

Уравнения (11)–(15) позволяют описать изохронные кривые статического и циклического деформирования, а также определить закономерности изменения петли пластического гистерезиса (размаха циклической пластической деформации) $\bar{\delta}^{(k)}$ и накопления пластических деформаций $e^{(k)}$ при мягком и жестком нагружении с установлением выражения для суммирования повреждений в этих условиях

$$D_{\Sigma} = \int_0^{N_{\tau}} \frac{1}{N[e_a(n), t, \tau]} dn + \int_0^{N_{\tau}} \frac{e_n}{\epsilon_{\tau}} dn. \quad (16)$$

Рассмотренные закономерности кинетики диаграмм деформирования по числу циклов и времени нагружения обуславливают изменение кинетики накопления повреждений согласно выражению (16) и нелинейность этого процесса по числу циклов и времени деформирования в соответствии с комплексом выражений (1)–(15).

При этом, как уже упоминалось выше, усталостные повреждения d_f обуславливаются амплитудой деформаций $e_a^{(k)}$, а квазистатические повреждения d_s – истощением пластичности вследствие одностороннего накопления деформаций $e_p^{(k)}$ при мягком нагружении. Иллюстрация этого обстоятельства приведена на рис. 2, на котором кривыми показано расчетное, а точками экспериментально определенное суммирование повреждений при малоцикловых испытаниях образцов из стали Х18Н10Т при температуре $t = 650 \text{ }^{\circ}\text{C}$ в диапазоне значений долговечности N от 10^1 до 10^4 циклов.

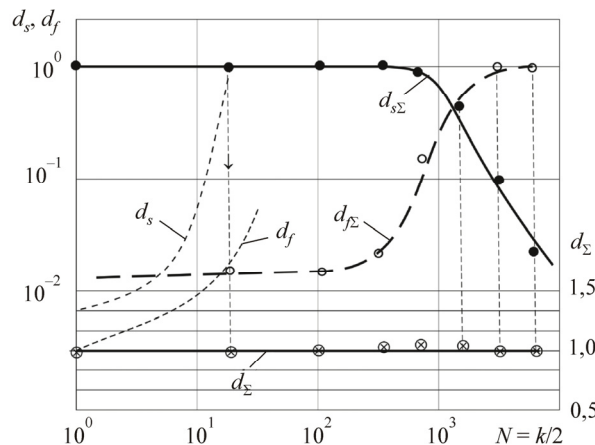


Рис. 2. Зависимости накопления повреждений d при монотонном одночастотном деформировании от числа циклов N (полуциклов k) нагружения

В области малого числа циклов ($N < 10^3$) преимущественное значение для циклически разупрочняющихся анизотропных материалов при мягком нагружении или при возникновении циклической ползучести имеют квазистатические повреждения $d_s \gg d_f$, когда предельная накопленная деформация $e_p^{(k)}$ достигает значений разрушающей деформации e_k при однократном нагружении для соответствующего эквивалентного времени. В этом случае циклическому разрушению предшествует образование ярко выраженной шейки без возникновения усталостных трещин.

В области более высокого числа циклов ($N > 10^4$) преобладающее значение имеют усталостные повреждения $d_f \gg d_s$ и циклическое разрушение происходит с возникновением и развитием трещин усталости без образования шейки. В промежуточной области значений долговечности обычно имеют место смешанные типы разрушения, когда в зоне разрушения образуются в различной степени и шейка, и трещины. С повышением значений температуры t и увеличением времени нагружения τ снижаются величины N_T и e_k за счет усиления влияния сочетания упругопластических деформаций и деформаций ползучести.

Особое значение при установлении закономерностей суммирования повреждений имеют исследования этих процессов при нестационарных эксплуатационных режимах нагружения, частным случаем которых являются двухчастотные режимы, когда на основной процесс циклического изменения напряжений (деформаций) накладываются динамически изменяющиеся напряжения с относительно малыми амплитудами, но более высокими частотами [4, 15, 20–23]. При таких двухчастотных режимах нагружения дополнительная составляющая усталостного повреждения от действия высокочастотной амплитуды наложенной деформации e_{a2} в каждом из основных циклов с учетом их переменной асимметрии $r(n_2)$ по числу высокочастотных циклов n_2 определится как $d_{f2} = 1/N_2 [e_{a2}, t, \tau, r(n_2)]$.

Тогда общее накопленное по числу основных низкочастотных циклов n повреждение D_Σ до момента разрушения (образования трещины) N_T по аналогии с выражением (16) составит интегральную (в связи с переменностью по числу циклов и времени нагружения деформационных параметров) сумму указанных выше поцикловых составляющих повреждения:

$$D_\Sigma = \int_0^{N_T} \frac{1}{N[e_a(n), t, \tau]} dn + \int_0^{N_{T2}} \frac{1}{N_2[e_{a2}, t, \tau, r(n_2)]} dn_2 + \int_0^{N_T} \frac{e_n}{\epsilon_{\tau n}} dn, \quad (17)$$

причем число циклов до разрушения по низкой N_T и высокой N_{T2} частотам соответственно f_1 и f_2 , а также текущие значения чисел циклов $n \equiv n_1$ и n_2 нагружения связаны между собой очевидными соотношениями $N_T = N_{T2} (f_1 / f_2)$ и $n = n_2 (f_1 / f_2)$. При обратном решении уравнения (17) разрушающее число циклов N_T в таких условиях нагружения может быть определено из условия достижения полным накопленным повреждением D_Σ предельного уровня $D_\Sigma = 1,0$.

Использование изложенного выше подхода к анализу результатов экспериментов при двухчастотном нагружении в условиях жесткого (с постоянной амплитудой суммарной деформации e_a) режима деформирования предполагает равенство нулю последнего в выражении (17) члена, характеризующего статическую составляющую повреждения вследствие отсутствия в этом случае одностороннего накопления деформаций. Тогда расчетная, исчисляемая в циклах основного низкочастотного нагружения долговечность N_T на основе критерия суммирования выраженных в деформационных параметрах повреждений при двухчастотном режиме нагружения может быть определена из решения уравнения

$$\int_0^{N_T} \frac{1}{N[e_a(n), t, \tau]} dn + \int_0^{N_{T2}} \frac{1}{N_2[e_{a2}, t, \tau, r(n_2)]} dn_2 = 1,0. \quad (18)$$

Результаты таких вычислений применительно к экспериментальным данным для жесткого двухчастотного нагружения образцов из стали X18H10T при $t = 650^\circ\text{C}$ и $f_2/f_1 = 1800$ с двумя уровнями амплитуд высокочастотных деформаций $e_{a2} = 0,045\%$ (темные треугольные точки) и $e_{a2} = 0,025\%$ (светлые треугольные точки) приведены на рис. 3, из которого видно, что вычисленные по уравнению (18) составляющие d_{f1} (пунктирные линии) и d_{f2} (штрихпунктирные линии) дают обозначенные круглыми точками значения суммарного повреждения D_Σ , близкие к единице.

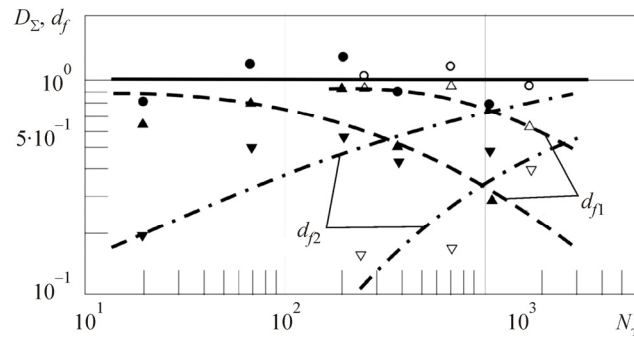


Рис. 3. Зависимости суммирования составляющих повреждения при двухчастотном режиме жесткого нагружения

Если более подробно проанализировать кинетику деформации при одночастотном и двухчастотном режимах нагружения с одинаковыми максимальными напряжениями (рис. 4), то можно видеть, что характер развития полной циклической пластической деформации $\delta^{(k)}$ существенно изменяется с переходом от одночастотного нагружения к двухчастотному.

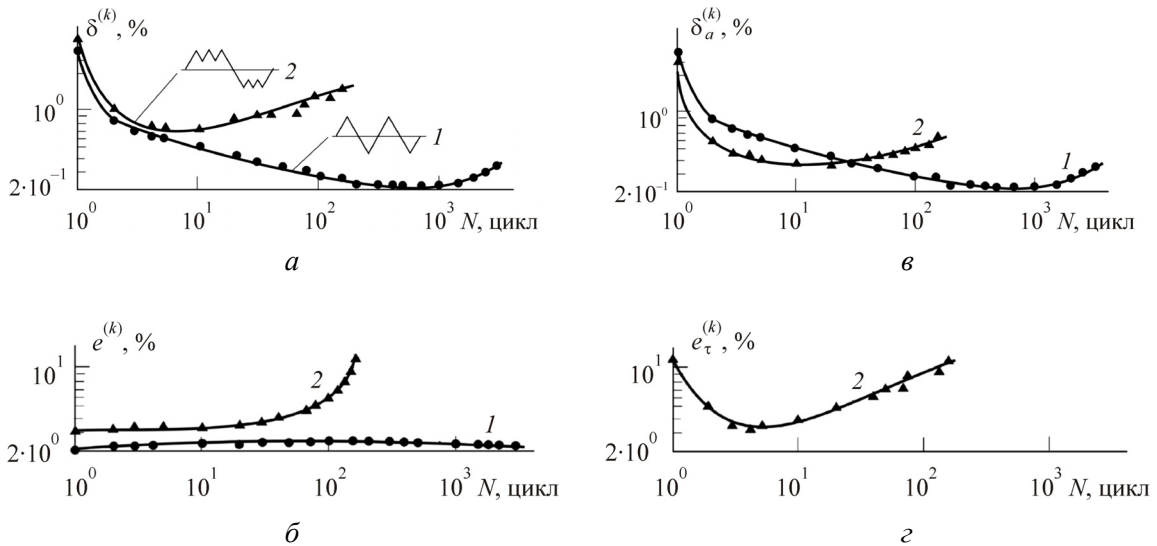


Рис. 4. Сопоставление развития деформаций (а – полной циклической деформации $\delta^{(k)}$; б – односторонне накопленной деформации $e^{(k)}$; в – активной составляющей $\delta_a^{(k)}$ полной циклической деформации; г – деформации ползучести в процессе выдержек $e_\tau^{(k)}$) по числу циклов N (полуциклов k) нагружения при мягком одночастотном (кривая 1) и двухчастотном (кривая 2) режимах нагружения стали X18H10T ($t = 650^\circ\text{C}$)

Однако при рассмотрении изменения активных составляющих циклической пластической деформации (достигаемых на начальной стадии цикла) $\delta_a^{(k)}$ видно (см. рис. 4, в), что разница

в их абсолютных значениях для обеих форм циклов сравнительно невелика, а существенное отличие величины и характера изменения общей циклической пластической деформации при двухчастотном режиме обусловлено в основном проявлением деформации циклической ползучести $e_{\tau}^{(k)}$ (см. рис. 4, з) в течение выдержки и наложения на нее высокочастотной составляющей, что отражается также и на односторонне накопленной деформации (см. рис. 4, б), т.е. наличие деформации ползучести и высокочастотных циклов в этих условиях порождает и увеличение односторонне накопленной пластической деформации $e^{(k)}$ при мягком режиме двухчастотного нагружения. Как следует из приведенных данных, изменение параметров диаграмм циклического деформирования при мягком ($\sigma_a = \text{const}$) двухчастотном нагружении существенным образом изменяет и закономерности накопления повреждений в этих условиях.

Изменение сопротивления деформированию при жестком нагружении ($e_a = \text{const}$) и наложении высокочастотной деформации, как показывают эксперименты (рис. 5), также имеет место.

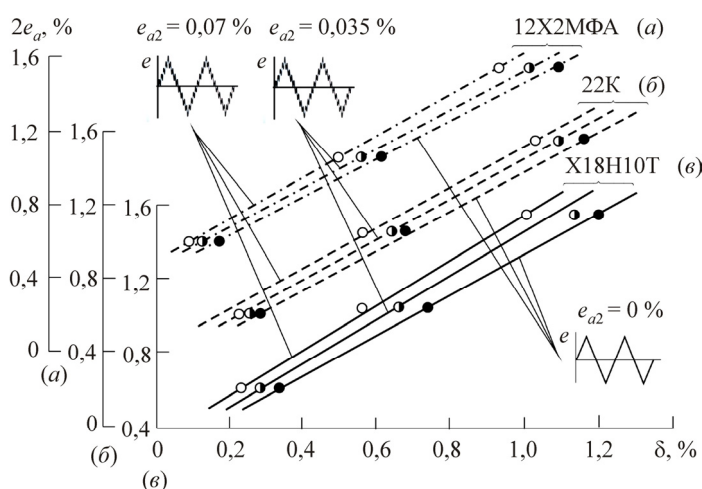


Рис. 5. Изменение размаха пластической деформации δ в зависимости от уровня высокочастотной деформации e_{a2} при жестком двухчастотном нагружении с равными размахами $2e_a$ суммарной деформации

Однако при сохранении общей тенденции циклического поведения все испытанные в этом режиме материалы (стали X18H10T, 12X2MΦA, 22K, $t = 300$ °C) проявляли свойство повышения значений амплитуды напряжений при действии высокочастотной деформации в сравнении с равным по размаху максимальной деформации одночастотным нагружением, т.е. под действием e_{a2} материал в этом случае повышал степень своего упрочнения, причем тем в большей степени, чем выше была величина амплитуды наложенной деформации.

Анализ изменения основного для диаграмм циклического упругопластического деформирования параметра – модуля циклического упрочнения m_k' – по выражению (12) показывает (рис. б), что его величина и поцикловая кинетика определяются как характеристиками исходного нагружения материала $\bar{e}^{(0)}$ и m_0 , так и названными выше параметрами диаграмм циклического деформирования A' , B' и C' , причем последние также зависят от параметров двухчастотного режима.

Из приведенных выше результатов экспериментальных исследований можно заключить, что характер эксплуатационных условий нагружения может существенным образом изменять закономерности накопления повреждений в процессе малоциклового нагружения. При этом следует иметь в виду, что рассматриваемое суммирование усталостных и квазистатических повреждений по выражению (17) как линейное при детальном рассмотрении является существенно нелинейным, так как определяющие каждую из этих составляющих повреждения деформационные характеристики (параметры диаграмм циклического деформирования) имеют в про-

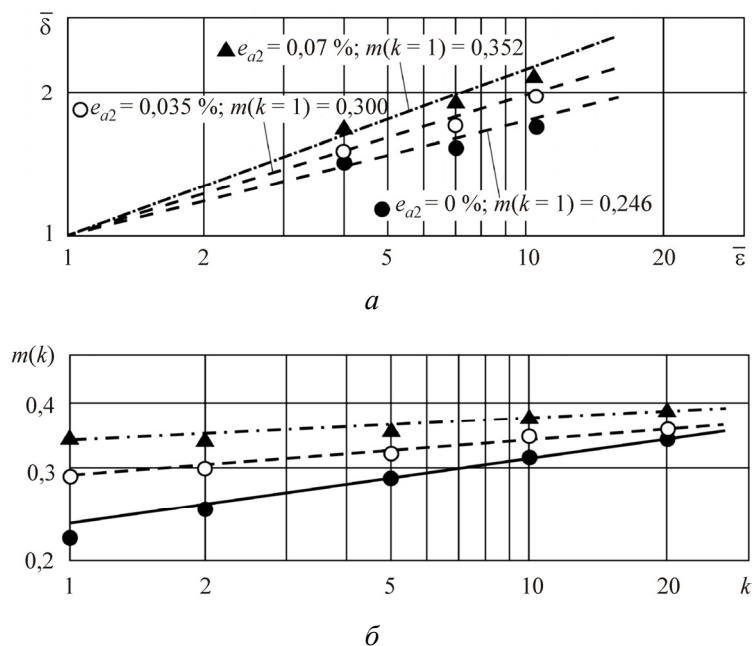


Рис. 6. Сопоставление расчетных (а) и экспериментальных (б) данных по кинетике $m(k)$ для одночастотного и двухчастотного режимов нагружения

пессе нагружения сложную кинетику, нелинейным образом зависящую от числа циклов (циклическое упрочнение или разупрочнение материала в упругопластической области), а также от температуры, времени нагружения (температурно-временное изменение характеристик прочности и пластичности материала) и характера режимов приложения нагрузки (монотонное, с наложением вибрационной на базовый низкочастотный цикл или случайное). Указанные обстоятельства в их взаимосвязи должны учитываться при осуществлении и регламентации уточненных расчетов прочности и ресурса и управлении этими параметрами при обеспечении безопасных условий эксплуатации аэрокосмической техники и снижении тем самым рисков возникновения аварийных ситуаций [11, 24, 25].

Библиографический список

1. Термопрочность деталей машин / под ред. И.А. Биргера и Б.Ф. Шора. – М.: Машиностроение, 1975. – 455 с.
2. Ножницкий Ю.А. Обеспечение прочностной надежности перспективных газотурбинных двигателей // Проблемы и перспективы развития двигателестроения: материалы докл. междунар. науч.-техн. конф., 22–24 июня 2016 г. – Самара, 2016. – С. 158–159.
3. Локальные критерии прочности, ресурса и живучести авиационных конструкций / Н.А. Махутов, М.М. Гаденин, В.В. Москвичев [и др.]. – Новосибирск: Наука, 2017. – 600 с.
4. Прочность и ресурс ЖРД / Н.А. Махутов, В.С. Рачук, М.М. Гаденин, М.А. Рудис, Н.Г. Паничкин. – М.: Наука, 2011. – 525 с.
5. Напряженно-деформированные состояния ЖРД / Н.А. Махутов, В.С. Рачук, М.М. Гаденин [и др.]. – М.: Наука, 2013. – 646 с.
6. К 100-летию со дня рождения Исаака Ароновича Биргера // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2018. – Т. 84, № 11. – С. 88.
7. Ножницкий Ю.А., Белоусов А.И. Инженер-механик, ученый, учитель. К 100-летию со дня рождения И.А. Биргера // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. – 2018. – Т. 17, № 3. – С. 7–15.
8. Серенсен С.В. Избранные труды: в 3 т. Т. 1. Прочность материалов и элементов конструкций при статическом нагружении. – 256 с. Т. 2. Усталость материалов и элементов конструкций. – 256 с. Т. 3. Квазистатическое и усталостное разрушение материалов и элементов конструкций. – 232 с. – Киев: Наукова думка, 1985.

9. Биргер И.А., Шорр Б.Ф., Иосилевич Г.Б. Расчет на прочность деталей машин: справ. – М.: Машиностроение, 1993. – 640 с.
10. Когаев В.П. Расчеты на прочность при напряжениях, переменных во времени. – М.: Машиностроение, 1993. – 364 с.
11. Махутов Н.А. Прочность и безопасность. Фундаментальные и прикладные исследования. – Новосибирск: Наука, 2008. – 528 с.
12. Степнов М.Н. Вероятностные методы оценки характеристик механических свойств материалов и несущей способности элементов конструкций. – Новосибирск: Наука, 2005. – 342 с.
13. Степнов М.Н., Зинин А.В. Прогнозирование характеристик сопротивления усталости материалов и элементов конструкций. – М.: Инновационное машиностроение, 2016. – 392 с.
14. Махутов Н.А., Гаденин М.М., Кондратьев А.Д. Исследование локальных напряженно-деформированных и предельных состояний высокоскоростных роторных конструкций // Роторы. Насосы. Турбины. – 2018. – № 3(28). – С. 5–19.
15. Гаденин М.М. Оценка влияния режимов нагружения на условия достижения предельных состояний и назначение запасов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2013. – Т. 79, № 10. – С. 65–70.
16. Механическое поведение материалов при различных видах нагружения / В.Т. Трощенко, А.А. Лебедев, В.А. Стрижало [и др.]. – Киев: Логос, 2000. – 571 с.
17. Проблемы прочности, техногенной безопасности и конструкционного материаловедения. – М.: ЛЕНАНД, 2018. – 720 с.
18. Прочность, ресурс, живучесть и безопасность машин. – М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2019. – 576 с.
19. Мэнсон С. Температурные напряжения и малоцикловая усталость. – М.: Машиностроение, 1974. – 344 с.
20. Экспериментальное исследование процесса накопления повреждений в жаропрочном сплаве при термоциклическом нагружении / В.В. Авруцкий, А.В. Зинин, Н.Г. Бычков, Л.Л. Смирнова // Авиация и космонавтика: 15-я Междунар. конф., 14–18 ноября 2016 г. – 2016. – С. 160–162.
21. Малоцикловая усталость жаропрочного сплава при термоциклическом нагружении с учетом вибрационных нагрузок / В.В. Авруцкий, А.В. Зинин, Н.Г. Бычков, Л.Л. Смирнова // Авиация и космонавтика – 2017 / Моск. авиац. ин-т. – М., 2017. – С. 430–431.
22. Термоциклическая прочность жаропрочного сплава и кинетика накопления повреждений при наложении вибрационных нагрузок / А.В. Зинин, Н.Г. Бычков, А.В. Першин, В.В. Авруцкий, Л.Л. Смирнова // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2017. – Т. 83, № 2. – С. 53–55.
23. Гаденин М.М. Исследование влияния соотношения амплитуд деформаций при двухчастотном циклическом нагружении // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2018. – Т. 84, № 10. – С. 50–60.
24. Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. Космические системы и технологии повышения безопасности и снижения рисков / под ред. Н.А. Махутова; МГОФ «Знание». – М., 2017. – 608 с.
25. Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. Управление ресурсом эксплуатации высокорисковых объектов / под ред. Н.А. Махутова; МГОФ «Знание». – М., 2015. – 600 с.

References

1. Termoprochnost detalei mashin. Ed. by I.A. Birger, B.F. Shor [Thermal strength of durability of machines parts. Ed. by I.A. Birger and B.F. Shor]. Moscow: Mashinostroenie, 1975, 455 p.
2. Nozhnitsky Yu.A. Obespechenie prochnostnoy nadezhnosti perspektivnykh gazoturbinnnykh dvigateley [Maintenance of strength reliability of perspective gas-turbine engines]. Proceedings of scientific and technical conference “Problemy i perspektivy dvigatelestroenia”, 2016, pp. 158-159.
3. Makhutov N.A., Gadenin M.M., Moskvichov V.V. at al. Lokalnye kriterii prochnosti, resursa i zhivuchesti aviatsionnykh konstruksiy [Local criteria of strength, resource and survivability of aviation structures]. Novosibirsk: Nauka, 2017, 600 p.
4. Makhutov N.A., Rachuk V.S., Gadenin M.M. at al. Prochnost i resurs ZHRD [Strength and resource of liquid-fuel rocket engines]. Moscow: Nauka, 2011, 525 p.
5. Makhutov N.A., Rachuk V.S., Gadenin M.M. at al. Napriazhenno-deformirovannye sostoiania ZHRD [Stress-strain states of liquid-fuel rocket engines]. Moscow: Nauka, 2013, 646 p.

6. К 100-letiyu so dnia rozhdenia Isaaka Aronovicha Birgera [To the 100 anniversary from the date of a birth of Isaak Aronovich Birger]. *Zavodskaya Laboratoriya. Diagnostika Materialov*, 2018, Vol. 84, no 11, p. 88.

7. Nozhnitsky Yu.A., Belousov A.I., Inzhener-mekhanik, uchony, uchitel. K 100-letiyu so dnia rozhdenia I.A. Birgera [The Mechanical engineer, scientific, the teacher. To the 100 anniversary from the date of a birth of I.A. Birger]. *VESTNIK of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*, 2018, Vol. 17, no. 3, pp. 7-15.

8. Serensen S.V. Izbrannye Trudy v 3 tomakh [The selected transactions. In 3 volumes]. Kiev: Naukova Dumka, 1985. Vol. 1: Prochnost materialov i elementov konstruksii [Vol. 1. Strength of materials and structures parts at static loading], 256 p. Vol. 2: Ustalost materialov i elementov konstruksii [Vol. 2. Fatigue of materials and structures parts], 256 p. Vol. 3. Kvizistaticheskoe I ustalostnoe razrushenie materialov i elementov konstruksii [Vol. 3. Quasistatic and fatigue fracture of materials and structures parts], 232 p.

9. Birger I.A., Shor B.F., Iosilevich G.B. Raschet na prochnost' detaley mashin: Spravochnik [Strength calculations of machines parts: Handbook]. Moscow: Mashinostroenie, 1993, 640 p.

10. Kogaev V.P. Raschety na prochnost' pri napryazheniyakh, peremennykh vo vremeni [Strength calculations at variable in time stresses]. Moscow: Mashinostroenie, 1993, 364 p.

11. Makhutov N.A. Prochnost i bezopasnost. Fundamentalnye i prikladnye issledovaniya [Strength and safety. Fundamental and applied researches]. Novosibirsk: Nauka, 2008, 528 p.

12. Stepnov M.N. Veroyatnostnye metody otsenki kharakteristik mekhanicheskikh svoystv materialov I nesutshey sposobnosti elementov konstruksiy [Probability methods of an estimation of materials mechanical properties characteristics and a carrying capacity of structures parts]. Novosibirsk: Nauka, 2005, 342 p.

13. Stepnov M.N., Zinin A.V. Prognozirovaniye kharakteristik soprotivleniya ustalosti materialov I elementov konstruksiy [Prediction of characteristics of a fatigue resistance of materials and structures parts]. Moscow: Innovatsionnoye mashinostroenie, 2016, 392 p.

14. Makhutov N.A., Gadenin M.M., Kondrat'ev A.D. Issledovanie lokal'nykh napryazhonno-deformirovannykh i predel'nykh sostoyanii vysokoskorostnykh rotornykh konstruksii [Research of local stress-strain and limiting states of high-speed rotor structures]. *Rotory. Nasosy. Turbiny*, 2018, no. 3 (28), pp. 5-19.

15. Gadenin M.M. Otsenka vlianiya rezhimov nagruzheniya na uslovia dostizheniya predel'nykh sostoyanii I naznachenie zapasov [Assessing the effect of loading on the terms of attaining the ultimate state of stocks and the assignment of the reserves]. *Zavodskaya Laboratoriya. Diagnostika Materialov*, 2013, Vol. 79, no. 10, pp. 65-70.

16. Trotshenko V.T., Lebedev A.A., Strizhalo V.A. et al. Mekhanicheskoe povedenie materialov pri razlichnykh vidakh nagruzheniya [Mechanical behaviour of materials at various types of a loading]. Kiev: Logos, 2000, 571 p.

17. Problemy prochnosti, tekhnogennoy bezopasnosti I konstruksionnogo materialovedeniya [Problems of strength, technogenic safety and structural materials technology]. Moscow: LENAND, 2018, 720 p.

18. Prochnost, resurs, zhivuchest i bezopasnost mashin [Strength and safety. Fundamental and applied researches]. Moscow: LIBROCOM, 2008, 576 p.

19. Manson S. Temperaturnye napryazheniya I malotsiklovaya ustalost [Thermal stress and low-cycle fatigue]. Moscow: Mashinostroenie, 1974, 344 p.

20. Avrutsky V.V., Zinin A.V., Bychkov N.G., Smirnova L.L. Eksperimental'noye issledovanie protsessa nakopleniya povrezhdenii v zharoprochnom splave pri termotsiklicheskom nagruzhenii [Experimental research of damages accumulation process in hot-strength alloy at a thermal-cyclic loading]. Proceedings of the 15th International Conference "Aviatsiya I kosmonavtika", 2016, pp. 160-162.

21. Avrutsky V.V., Zinin A.V., Bychkov N.G., Smirnova L.L. Malotsiklovaya ustalost zharoprochnogo splava pri termotsiklicheskom nagruzhenii s uchetom vibratsionnykh nagruzok [Low-cycle fatigue of hot-strength alloy at a thermal-cyclic loading taking into account vibration loads]. *Aviatsiya I kosmonavtika-2017*. Moscow: Moscow Aviation Institute, 2017, pp. 430-431.

22. Zinin A.V., Bychkov N.G., Pershin A.V., Avrutsky V.V., Smirnova L.L. Termotsiklicheskaya prochnost' zharoprochnogo splava I kinetika nakopleniya povrezhdenii pri nalozhenii vibratsionnykh nagruzok [Thermal-cyclic strength of hot-strength alloy and kinetics of damages accumulation at superimposition of vibration loads]. *Zavodskaya Laboratoriya. Diagnostika Materialov*, 2017, Vol. 83, no. 2, pp. 53-55.

23. Gadenin M.M. Issledovanie vlianiya sootnosheniya amplitud deformatsii pri dvukhchastotnom ziklicheskom nagruzhenii [Research of amplitudes strains ratio effect at two-frequency cyclic loading]. *Zavodskaya Laboratoriya. Diagnostika Materialov*. 2018, Vol. 84, no. 10, pp. 50-60.

24. Bezopasnost Rossii. Pravovye, sotsialno-ekonomicheskie i nauchno-tekhnicheskie aspekty. Kosmicheskie sistemy i tekhnologii povysheniya bezopasnosti i snizheniya riskov [Safety of Russia. Legal, social-economic and scientifically-engineering aspects. Space systems and technologies for increase of safety and decrease of risks]. Moscow: Znanie, 2017, 608 p.

25. Bezopasnost Rossii. Pravovye, sotsialno-ekonomicheskie i nauchno-tekhnicheskie aspekty. Upravlenie resursom ekspluatatsii visokoriskovykh ob'ektov [Safety of Russia. Legal, social-economic and scientifically-engineering aspects. Control of service resource for high risk objects]. Moscow: Znanie, 2015, 600 p.

Об авторах

Махутов Николай Андреевич (Москва, Россия) – член-корреспондент РАН, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Института машиноведения им. А.А. Благонравова РАН (101990, г. Москва, Малый Харитоньевский пер., д. 4; e-mail: kei51@mail.ru).

Гаденин Михаил Матвеевич (Москва, Россия) – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник Института машиноведения им. А.А. Благонравова РАН (101990, г. Москва, Малый Харитоньевский пер., д. 4; e-mail: safety@imash.ru).

About the authors

Nikolay A. Makhutov (Moscow, Russian Federation) – Corresponding Member of the RAS, Doctor in Technical Sciences, Chief Researcher, Mechanical Engineering Research Institute of the RAS (4, Maly Kharitonievsky Lane, Moscow, 101990, Russian Federation; e-mail: kei51@mail.ru).

Mikhail M. Gadenin (Moscow, Russian Federation) – CSc in Technical Sciences, Leading Researcher, Mechanical Engineering Research Institute of the RAS (4, Maly Kharitonievsky Lane, Moscow, 101990, Russian Federation; e-mail: safety@imash.ru).

Получено 01.03.2019