

## Механика материалов: прочность, ресурс, безопасность

УДК 620.169:621.4:539.4

### ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВРЕЖДАЕМОСТИ И ДОЛГОВЕЧНОСТИ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ ОДНО- И ДВУХЧАСТОТНЫХ РЕЖИМАХ НАГРУЖЕНИЯ НА ОСНОВЕ ДЕФОРМАЦИОННЫХ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОДХОДОВ

© М. М. Гаденин<sup>1</sup>

*Статья поступила 19 октября 2016 г.*

На основе деформационных и энергетических критериев разрушения при циклическом упруго-пластическом деформировании рассмотрены закономерности накопления повреждений в условиях одночастотных и двухчастотных режимов нагружения. Показано, что изменение долговечности при наложении на основной процесс малоциклового нагружения высокочастотной составляющей напряжений (деформаций) может быть установлено путем суммирования составляющих усталостного повреждения от основной и наложенной деформаций или экспериментального определения коэффициента снижения разрушающего числа циклов, зависящего от отношений частот и амплитуд взаимодействующих циклических процессов. С учетом этого составляющие повреждения от воздействующих циклических деформаций соотносятся с энергетическими характеристиками рассматриваемых процессов деформирования, включающими в себя затраченную на процесс деформирования механическую энергию, выделившуюся при этом и определенную путем регистрации изменения температуры саморазогрева материала тепловую энергию, а также энергию, поглощенную им до стадии разрушения.

**Ключевые слова:** циклическое упругопластическое деформирование; двухчастотные режимы; долговечность; повреждение; деформационные критерии; саморазогрев материала; механическая энергия; тепловая энергия; поглощенная энергия; критериальный энергетический баланс.

Ресурс работы современных машин и конструкций, эксплуатирующихся в энергомашиностроении, химическом и транспортном машиностроении, судостроении, авиационной технике, находится в пределах от десятков до сотен тысяч часов. При этом, как следует из анализа их эксплуатационной нагруженности, наработка ресурса для такого оборудования по параметру времени, как правило, сочетается с циклическим нагружением как малой повторяемости, обусловленной периодическими пусками и остановами, взлетами и посадками, изменением режимов работы, так и большим числом циклов от механических, термических, вибрационных и других видов нагрузок, а также от гидро-, аэродинамических и колебательных процессов. Общее число циклов нагружения при указанных выше временных ресурсах составляет от  $10^0$  до  $10^{10} - 10^{12}$ . Поэтому вопросы прогнозирования прочности и ресурса в этих условиях должны рассматриваться применительно к заданным режимам эксплуатации машин и конструкций, в большинстве случаев нестационарным.

Для деталей машин и их агрегатов, в том числе турбомашин, авиационных двигателей, внутрикорпус-

ных устройств энергетических реакторов, трубных пучков котлов и парогенераторов и т.п., испытывающих воздействие вибрационных и пульсационных нагрузок, в качестве критерия достижения предельного состояния для расчетов прочности и ресурса принимается сопротивление циклическому разрушению с учетом роли статической, циклической и вибрационной составляющих общей нагруженности [1, 2]. Для большинства указанных выше машин и конструкций длительные статическое и усталостное повреждение развиваются в связи с повторным нагружением с большими амплитудами напряжений и деформаций при ограниченном числе основных циклов (до  $10^3 - 10^4$ ) и наложением на них с более высокими частотами динамических напряжений существенно меньшей величины. Это делает задачу прогнозирования прочности и времени эксплуатации конструкций существенно более сложной в связи с необходимостью рассмотрения процессов развития циклических упруго-пластических деформаций в конструкционных материалах с анализом одновременного накопления как статических, так и много- и малоцикловых усталостных повреждений в их взаимодействии [1 - 9].

<sup>1</sup> Институт машиноведения им. А. А. Благодина РАН, Москва, Россия; e-mail: imash-ru@mail.ru

### Деформационный подход

Анализ изменения долговечности при двухчастотном нагружении по сравнению с равным по суммарным амплитудам циклической деформации одночастотным нагружением, выполненный на основе результатов экспериментальных исследований долговечности, показал следующее. Кривые малоциклового усталости для сталей 12Х2МФА и Х18Н10Т при температуре  $t = 300\text{ }^\circ\text{C}$ , построенные по значениям амплитуды суммарных деформаций  $e_a = e_{a1} + e_{a2}$  (низкочастотных  $e_{a1}$  и высокочастотных  $e_{a2}$ ) для жесткого режима двухчастотного нагружения (рис. 1) при двух уровнях наложенных деформаций  $e_{a2} = 0,035\text{ }\%$  (кривые 2) и  $e_{a2} = 0,07\text{ }\%$  (кривые 3) и соотношении частот  $f_2/f_1 = 1500$ , расположены значительно левее соответствующих равной суммарной деформации  $e_a$  одночастотных кривых малоциклового усталости (кривые 1). Это свидетельствует о значительном снижении долговечности материала в условиях воздействия (наложения на основной процесс деформирования) дополнительных циклических нагрузок (деформаций) повышенной по сравнению с основным нагружением частоты [7 – 10].

Выполненные по результатам большого числа экспериментальных данных фундаментальные исследования сопротивления малоциклового разрушению показали [1 – 3], что в общем случае для уточненных расчетов долговечности в этих условиях может быть использована гипотеза линейного суммирования в цикле усталостных  $d_f$  и статических  $d_s$  повреждений ( $d_\Sigma = d_f + d_s$ ), выраженных через деформационные характеристики этого процесса. В частности, усталостная составляющая повреждения за один цикл определяется по кривой стационарного малоциклового нагружения (типа кривых 1 на рис. 1) для текущего времени  $\tau$  и заданной температуры  $t$  как  $d_f = 1/N(e_a, t, \tau)$ , а статическая составляющая — как отношение односторонне накопленной в этом цикле необратимой пластической деформации  $e_n$  к располагаемой пластичности материала  $\epsilon_{\tau t} = 1/\{\ln[1/(1 - \psi_{\tau t})]\}$ , определенной в этих же условиях при длительном статическом нагружении ( $\psi_{\tau t}$  — относительное поперечное сужение).

При двухчастотном режиме нагружения дополнительная составляющая усталостного повреждения от действия высокочастотной амплитуды наложенной деформации  $e_{a2}$  в каждом из этих циклов с учетом их переменной асимметрии  $r(n_2)$  по числу высокочастотных циклов  $n_2$  находится [7 – 9] как  $d_{f2} = 1/N_2[e_{a2}, t, \tau, r(n_2)]$ .

Тогда общее накопленное по числу основных низкочастотных циклов  $n$  повреждение  $D_\Sigma$  до момента разрушения (образования трещины)  $N_T$  составит интегральную (в связи с переменностью по числу циклов и времени нагружения определяющих деформацион-

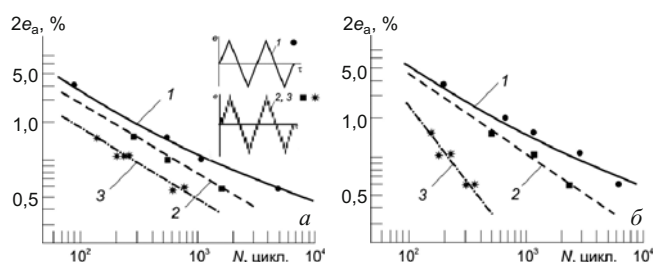


Рис. 1. Кривые малоциклового усталости для стали 12Х2МФА (а) и стали Х18Н10Т (б) при одночастотном (1) и двухчастотном (2 и 3) малоциклового нагружении

ных параметров) сумму указанных выше поцикловых составляющих повреждения:

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

Здесь 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 (1) разрушающее число циклов  $N_T$  в таких условиях нагружения может быть определено из условия достижения полным накопленным повреждением  $D_\Sigma$  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 (1) члена, характеризующего статическую составляющую повреждения вследствие отсутствия в этом случае одностороннего накопления деформаций. Тогда расчетная долговечность  $N_T$ , вычисляемая в циклах основного низкочастотного нагружения на основе критерия суммирования выраженных в деформационных параметрах повреждений при двухчастотном режиме нагружения может быть определена из решения уравнения

$$\int_0^{N_T} \frac{dn}{N[e_a(n), t, \tau]} + \int_0^{N_{T2}} \frac{dn_2}{N_2[e_{a2}, t, \tau, r(n_2)]} = 1,0. \quad (2)$$

На рис. 2, а приведены результаты таких вычислений применительно к экспериментальным данным для жесткого двухчастотного нагружения образцов из стали Х18Н10Т при  $t = 650\text{ }^\circ\text{C}$  и  $f_2/f_1 = 1800$  с двумя уровнями амплитуд высокочастотных деформаций —  $e_{a2} = 0,045\text{ }\%$  (темные треугольные точки) и  $e_{a2} = 0,025\text{ }\%$  (светлые треугольные точки). Видно, что вычисленные по уравнению (2) составляющие  $d_{f1}$

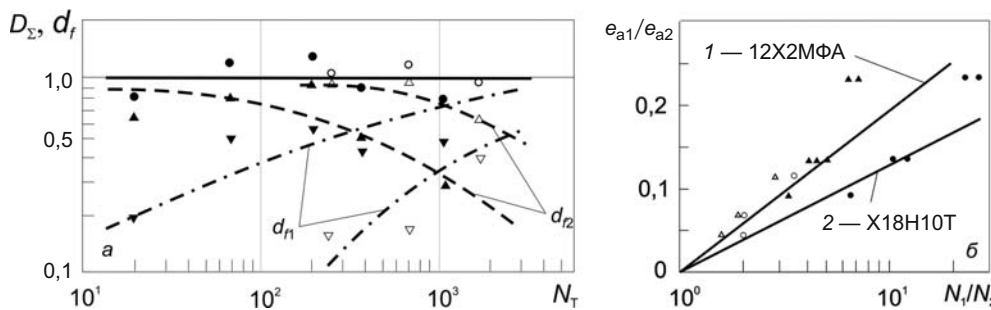


Рис. 2. Диаграммы суммирования составляющих повреждения (а) и изменения долговечности (б) при различных соотношениях низкочастотной и высокочастотной амплитуд деформаций двухчастотного режима нагружения

(пунктирные линии) и  $d_{f2}$  (штрихпунктирные линии) дают значения суммарного повреждения  $D_{\Sigma}$ , близкие к единице (круглые точки).

### Анализ снижения долговечности

В случае нагружения как с постоянными амплитудами напряжений (мягкое нагружение), так и с постоянными амплитудами деформаций (жесткое нагружение) критериальное выражение (1) учитывает, кроме повреждения от высокочастотных циклов, и кинетику амплитуды упругопластической деформации  $e_a$  по параметру числа циклов нагружения, описываемую соответствующими температурно-временными зависимостями [1, 2], а также ее особенности в связи с наложением высокочастотной составляющей напряжений (деформаций), стимулирующей развитие низкочастотной упругопластической деформации [9].

Наряду с изложенным методом расчета долговечности при двухчастотном нагружении на основе критерия суммирования повреждений, выраженных через деформационные характеристики, эффект снижения двухчастотной долговечности  $N_2$  по сравнению с эквивалентной по нагруженности одночастотной долговечностью  $N_1$  может быть определен по величинам соотношения частот и амплитуд высокочастотной и низкочастотной составляющих процесса нагружения [8, 10, 11]:

$$N_1 = N_2 \left( \frac{f_2}{f_1} \right)^{k_N} \left( \frac{e_{a2}}{e_a} \right)^{k_N} \quad \text{или} \quad N_1 = N_2 \left( \frac{f_2}{f_1} \right)^{k_N} \left( \frac{\sigma_{a2}^*}{\sigma_a^*} \right)^{k_N}, \quad (3)$$

где  $e_{a2}$  и  $\sigma_{a2}^*$ , а также  $e_a$  и  $\sigma_a^*$  амплитудные значения высокочастотных деформаций и соответствующих им условных упругих напряжений ( $\sigma_{a2}^* = e_{a2}E$ ,  $\sigma_a^* = e_aE$ ,  $E$  — модуль упругости), а также их суммарные (вместе с низкочастотными) величины соответственно.

Уравнения (3) предполагают наличие линейной (отображаемой прямой линией в полулогарифмических координатах) зависимости между логарифмом отношения  $N_2/N_1$  и отношением  $e_{a2}/e_a$  ( $\sigma_{a2}^*/\sigma_a^*$ ). На рис. 2, б приведены данные, полученные с использованием описанных выше и приведенных на рис. 1 долговечностей. Видно, что прямые линии, построенные для образцов из сталей 12X2MФА и X18H10T при жестком режиме двухчастотного нагружения с различ-

ным соотношением амплитуд высокочастотной и суммарной низкочастотной деформации, удовлетворительно соответствуют экспериментальным результатам. При этом для стали 12X2MФА величина коэффициента снижения долговечности в выражениях (3) составляет  $k_N = 1,6$  (кривая 1 и треугольные точки), а для стали X18H10T —  $k_N = 2,4$  (кривая 2 и круглые точки). Эмпирические выражения (3) удовлетворительно соответствуют экспериментальным данным лишь при относительно малых отношениях  $e_{a2}/e_a$ , не превышающих величину 0,2–0,3 (см. рис. 2, б), после чего расчетное значение снижения долговечности оказывается завышенным. При превышении показателем степени в выражениях (3)  $k_N(e_{a2}/e_a)$  определенного «критического» значения результаты вычислений могут оказаться противоречащими физическому смыслу процесса циклического деформирования, что требует введения соответствующих ограничений на использование этих выражений.

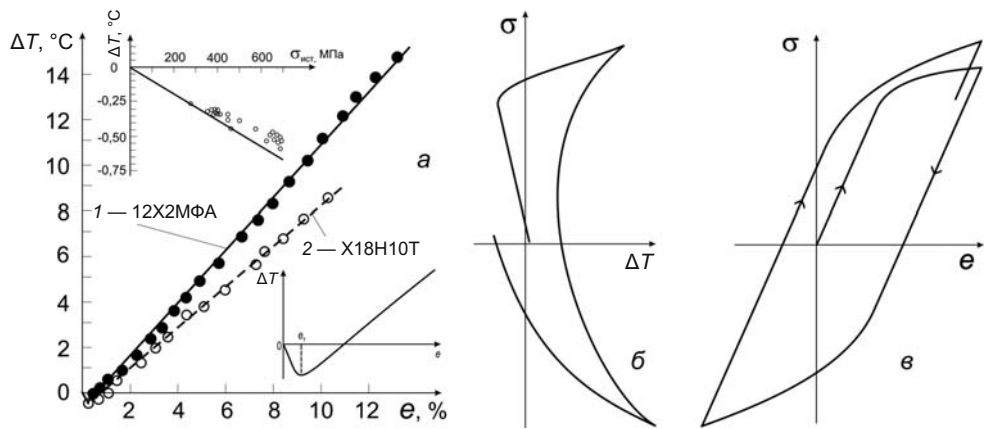
Из изложенного следует, что оценка прочности и долговечности элементов конструкций для одночастотного и двухчастотного режимов нагружения в общем случае может быть выполнена на основе анализа деформационных параметров процесса нагружения и диаграмм циклического упругопластического деформирования с привлечением соответствующих деформационных критериев суммирования повреждений и условий достижения предельных состояний [12].

### Энергетический подход

Анализ условий достижения предельных состояний для конструкционных материалов при их статическом и циклическом деформировании может быть выполнен и на основе использования соответствующих энергетических критериев и рассмотрения баланса критических уровней накопленной в материале повреждающей энергии, состоящей из приложенной механической энергии деформирования и выделяющейся при этом тепловой энергии [4, 6, 7, 13–19]:

$$\bar{A} = \bar{E} + \bar{Q}, \quad (4)$$

где  $\bar{A}$  — удельная (отнесенная к единице объема) механическая энергия деформирования;  $\bar{E}$  — удельная энергия, поглощенная материалом при его нагруже-



**Рис. 3.** Диаграммы саморазогрева образцов из сталей 12Х2МФА (1) и Х18Н10Т (2) при статическом (а) и циклическом (б) деформировании и диаграмма упругопластического гистерезиса (в)

нии;  $\bar{Q}$  — выделившаяся в этом процессе удельная тепловая энергия.

Экспериментальное определение входящих в выражение (4) составляющих энергии в общем случае возможно на основе рассмотрения процесса деформирования определенного объема материала и соответствующего ему термодинамического процесса [13] с измерением при этом температурных параметров. С этой целью проводили эксперименты по статическому и циклическому упругопластическому деформированию образцов из сталей 12Х2МФА и Х18Н10Т в условиях одноосного растяжения-сжатия в вакуумной камере, исключающих теплоотвод в захваты испытательной установки, при начальной комнатной температуре (20 °С). В ходе эксперимента измеряли изменения температуры образца и регистрировали по параметру времени в различных его зонах, а также определяли текущие значения напряжений и деформаций [15]. На рис. 3 приведены результаты измерения изменения температуры на рабочей базе образца при статическом нагружении в упругой области и за пределом текучести в области равномерного деформирования (рис. 3, а), а также диаграмма саморазогрева образца в процессе его циклического упругопластического деформирования (рис. 3, б) и соответствующая ей диаграмма (петля) упругопластического гистерезиса (рис. 3, в).

Известно [15, 20, 21], что упругое деформирование материала в условиях растяжения вызывает уменьшение его температуры, что с позиций термодинамики может быть показано при решении дифференциального уравнения энтальпий  $i$  при независимых параметрах температуры  $T$  и давления  $p$  [13]:

$$di = C_p dT + \left[ v - T \left( \frac{\partial v}{\partial T} \right)_p \right] dp, \quad (5)$$

где  $T$  — абсолютная температура;  $C_p$  — удельная теплоемкость материала при постоянном давлении;  $v$  — его удельный объем.

Примем, что процесс деформирования в рассматриваемых условиях (наличие вакуума и теплоизоляция

образца) наиболее близок к адиабатному [13, 20], т.е. протекает без внешнего подвода или отвода тепла. С учетом для этого случая ( $dq = 0$ ) первого закона термодинамики в форме  $di = v dp$  и равенства  $(\partial v / \partial T)_p = (T\beta dp) / (\rho C_p)$  ( $\beta$  — температурный коэффициент объемного расширения материала,  $\rho$  — его плотность), а также того факта, что величина  $p$  представляет собой среднее гидростатическое давление, которое для общего случая сложного напряженного состояния определяется через компоненты тензора напряжений как  $p = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) / 3$  (для одноосного нагружения величина  $dp = \Delta\sigma / 3$  и коэффициент температурного линейного расширения  $\alpha = \beta / 3$ ), можно получить выражение для определения изменения температуры образца при его деформировании в упругой области при действии напряжений  $\Delta\sigma$ :

$$\Delta T = \frac{T\alpha\Delta\sigma}{\rho C_p}. \quad (6)$$

Согласно выражению (6) при растяжении в упругой области, исходя из [13, 20], разность  $\Delta T$  имеет отрицательное значение, т.е. температура материала понижается. В верхней левой части рис. 3, а приведены результаты измерений изменения температуры  $\Delta T$ , выполненных на образце из стали 12Х2МФА в условиях растяжения в упругой области и в вакууме, которые удовлетворительно соответствуют расчетному линейному уменьшению температуры по выражению (6) с ростом растягивающих напряжений  $\Delta\sigma_{ист}$ .

При переходе в область упругопластического деформирования после достижения предела текучести  $\sigma_T$  ( $e_T$ ) наблюдается повышение температуры саморазогрева материала, схематично показанное в нижней правой части рис. 3, а. С ростом деформации при статическом растяжении температура (см. экспериментальные точки на рис. 3, а) после незначительного уменьшения в области упругой деформации с увеличением пластической деформации возрастает практически линейно как для стали 12Х2МФА (1 и темные точки), так и для стали Х18Н10Т (2 и светлые точки).



Зависимость роста температуры  $\Delta T$  от величины пластической деформации  $e_p$  можно представить в виде

$$\Delta T = k_T e_p, \quad (7)$$

где коэффициент саморазогрева  $k_T$  с учетом незначительного понижения температуры за счет продолжающегося роста составляющей упругой деформации для стали 12Х2МФА составляет  $k_T = 1,12 \cdot 10^2$  град · м/м, а для стали Х18Н10Т —  $k_T = 0,82 \cdot 10^2$  град · м/м.

На основе изложенных методических подходов к регистрации тепловых эффектов (см. рис. 3) при статическом и циклическом упругопластическом деформировании (с учетом отсутствия в рассматриваемых условиях эксперимента отвода тепла посредством теплопередачи, конвекции и излучения) можно оценить выделяющуюся в процессе деформирования тепловую энергию  $\bar{Q}$ , по диаграммам деформирования — затраченную механическую энергию  $\bar{A}$ , а по их разности согласно выражению (4) — поглощенную энергию  $\bar{E}$ .

При разогреве материала на  $\Delta T$  градусов тепловая энергия  $Q = C_p \rho V \Delta T$  [22]. Температура разогрева, как показано выше, связана с пластической деформацией выражением (7), тогда для элементарного  $i$ -го объема  $V_i$  с равномерной деформацией  $e_i$  можно записать

$$Q_i = C_p \rho V_i k_T e_i. \quad (8)$$

Суммируя объемы (малые  $n$  участки) по всей рабочей базе образца, получим суммарную тепловую энергию, выделившуюся в процессе пластического деформирования:

$$\sum_{i=1}^n Q_i = C_p \rho k_T \sum_{i=1}^n V_i e_i. \quad (9)$$

По выражениям (8) и (9) можно определить отношения, характеризующие коэффициент тепловыделения  $\eta$ :

$$\frac{\sum_{i=1}^n V_i e_i}{\sum_{i=1}^n Q_i} = \frac{1}{C_p \rho k_T} = \eta. \quad (10)$$

Для конкретных материалов и условий деформирования расчетная величина  $\eta$  может рассматриваться как постоянная. С учетом справочных данных об

удельной теплоемкости  $C_p$  и плотности  $\rho$  [23], а также приведенных выше значений коэффициента саморазогрева  $k_T$  расчетный коэффициент тепловыделения для стали 12Х2МФА составит  $\eta_p = 2,48 \cdot 10^{-9}$  м<sup>3</sup>/Дж, а для стали Х18Н10Т —  $\eta_p = 3,28 \cdot 10^{-9}$  м<sup>3</sup>/Дж.

Испытания образцов исследуемых сталей на статическое растяжение, выполненное за несколько последовательных этапов (1–17), вплоть до разрушения, позволили получить экспериментальные значения  $\eta_s$  на каждом из этапов (см. таблицу). Полученные экспериментальные значения  $\eta_s$ , а также их средние за весь цикл статического разрыва  $\eta_{cp}$  ( $2,33 \cdot 10^{-9}$  м<sup>3</sup>/Дж — для 12Х2МФА и  $3,15 \cdot 10^{-9}$  м<sup>3</sup>/Дж — для Х18Н10Т) близки к соответствующим расчетным величинам  $\eta_p$  ( $2,48 \cdot 10^{-9}$  м<sup>3</sup>/Дж и  $3,28 \cdot 10^{-9}$  м<sup>3</sup>/Дж соответственно).

Используя приведенные выше экспериментальные значения удельной механической энергии в зоне статического разрушения испытанных образцов (в зоне шейки)  $\bar{A}_{ш}^s$  и выделившейся при этом удельной тепловой энергии  $\bar{Q}_{ш}^s$  из выражения (4) можно определить удельную поглощенную энергию  $\bar{E}_{ш}^s$  в этих условиях в зоне разрушения. Для стали 12Х2МФА получена  $\bar{E}_{ш}^s = 75,3 \cdot 10^7$  и для стали Х18Н10Т —  $\bar{E}_{ш}^s = 19,1 \cdot 10^7$  Дж/м<sup>3</sup>.

Аналогичный подход использован для определения по выражению (4) удельных величин затраченной механической  $\bar{A}$ , выделившейся тепловой  $\bar{Q}$  и поглощенной  $\bar{E}$  энергий при циклическом упругопластическом деформировании. Их соответствующие значения определены для образцов из сталей 12Х2МФА и Х18Н10Т, подвергшихся малоциклового нагружению в диапазоне разрушающего (по образованию трещины) числа  $N_p = 3 \cdot 10^1 - 10^4$  циклов (рис. 4).

Как видно из на рис. 4, во всем исследованном диапазоне  $N_p$  при циклическом упругопластическом деформировании, а также при статическом разрыве происходит многократный рост затраченной механической  $\bar{A}$  и выделившейся тепловой  $\bar{Q}$  удельных энергий поглощенная, тогда как удельная энергия  $\bar{E}$  для обоих материалов с некоторым разбросом остается практически на постоянном уровне и ее среднее значение для стали 12Х2МФА составляет  $\bar{E}_{cp} = 98,4 \cdot 10^7$  Дж/м<sup>3</sup>, а для стали Х18Н10Т —  $\bar{E}_{cp} = 83,0 \cdot 10^7$  Дж/м<sup>3</sup>. При этом следует отметить, что в процессе статического и циклического упругопластического деформирования образцов указанных

Экспериментальные значения коэффициента тепловыделения  $\eta_s$  при поэтапном статическом растяжении образцов из сталей 12Х2МФА и Х18Н10Т ( $\times 10^9$  м<sup>3</sup>/Дж)

Сталь	$\eta_1$	$\eta_2$	$\eta_3$	$\eta_4$	$\eta_5$	$\eta_6$	$\eta_7$	$\eta_8$	$\eta_9$	$\eta_{10}$	$\eta_{11}$	$\eta_{12}$	$\eta_{13}$	$\eta_{14}$	$\eta_{15}$	$\eta_{16}$	$\eta_{17}$	$\eta_{cp}$
12Х2МФА	3,85	2,88	2,69	2,60	2,49	2,81	2,86	1,85	2,46	2,38	1,92	3,35	1,33	2,33	1,19	1,82	0,86	2,33
Х18Н10Т	4,09	4,47	3,73	3,43	3,87	2,50	3,40	2,74	3,05	2,66	2,65	1,20	—	—	—	—	—	3,15

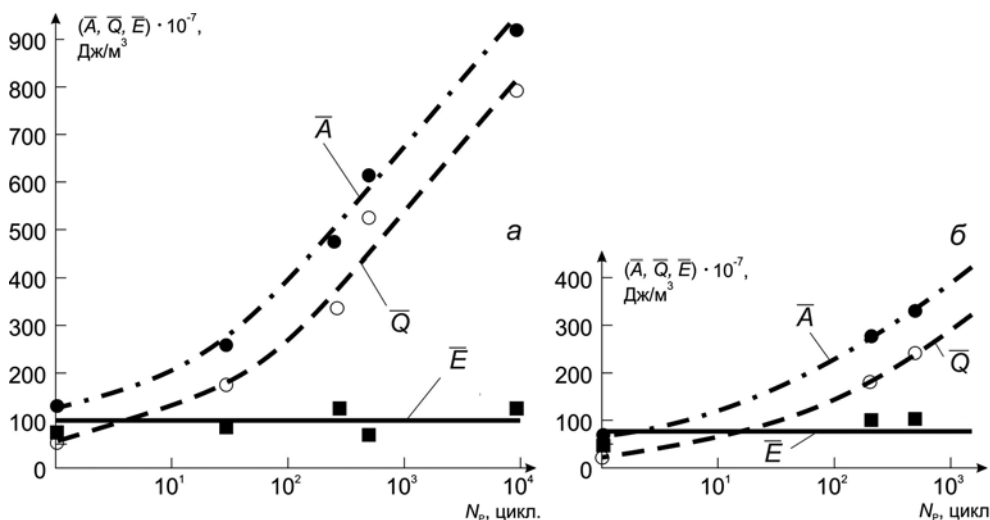


Рис. 4. Зависимости величин затраченной механической  $\bar{A}$ , выделившейся тепловой  $\bar{Q}$  и поглощенной  $\bar{E}$  удельных энергий от  $N_p$  при циклическом упругопластическом деформировании до разрушения образцов из сталей 12Х2МФА (а) и Х18Н10Т (б)

сталей энергии  $\bar{E}_{cp}$  достаточно близки к удельной энергии разрушения материалов, значение которой для железа [5] составляет  $\bar{W}_p = 101,5 \cdot 10^7 \text{ Дж/м}^3$ .

### Диаграммы высокочастотного циклического деформирования

Проведено высокочастотное ( $f = 25 \text{ Гц}$ ) циклическое упругопластическое деформирование образца из стали Х18Н10Т в комнатных условиях (без вакуума) с измерением деформации (при размахах циклической упругопластической  $2e_a = 0,61 \%$  и пластической  $e_p = 0,22 \%$  деформаций) и одновременной регистрацией температуры (на рабочей базе с помощью термопары и аппаратуры дистанционного тепловизора). За время нагружения  $\tau = 183 \text{ с}$  при  $N_p = 4575$  циклах саморазогрев образца составил  $610 \text{ }^\circ\text{C}$  (рис. 5, а). Из диаграммы саморазогрева следует, что на стабильной стадии нагружения скорость нарастания температуры за цикл  $v_t = 0,14 \text{ град/цикл}$ . С учетом этого при удвоенной амплитуде (размахе) пластической деформации в цикле  $e_p = 0,22 \%$   $= 0,0022 \text{ м/м}$  значение принятого в выражении (7) коэффициента саморазогрева  $k_T = 0,64 \cdot 10^2 \text{ град} \cdot \text{м/м}$ . В рассматриваемом случае образец нагружали в условиях отвода выделяющегося тепла за счет теплопроводности испытательной системы, а также конвективного и лучистого теплообмена с окружающей средой, поэтому это значение  $k_T$  следует считать приближенным. Оно удовлетворительно согласуется с определенным выше  $k_T = 0,82 \cdot 10^2 \text{ град} \cdot \text{м/м}$  для медленно протекающего статического процесса пластического деформирования образца стали Х18Н10Т в условиях отсутствия теплообмена (вакуума и теплоизоляции образца).

Режим нагружения в рассмотренном выше эксперименте при стационарном (высокочастотном) нагружении и регистрируемая диаграмма деформирования в координатах напряжение — деформация приведены на рис. 6, а. Характер изменения температуры самора-

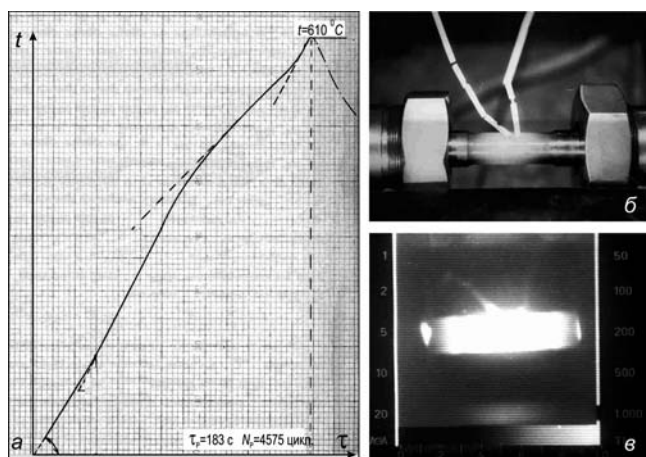


Рис. 5. Диаграмма регистрации саморазогрева (а) и методы измерения температуры образца термопарой (б) и тепловизором (в) в процессе высокочастотного циклического нагружения

зогрева образца  $\Delta T$  во времени  $\tau$  в процессе такого одночастотного нагружения (соответствующего приведенной на рис. 3, б петле) показан на рис. 6, а справа. При этом колебания температуры в промежутке между ее экстремальными значениями в цикле связаны с эффектом изменения знака температуры вследствие изменения знака упругой составляющей деформации при переходе от стадии растяжения к стадии сжатия, что следует из выражения (6).

Регистрируемые в этих же условиях диаграммы при двухчастотных режимах нагружения (рис. 6, б) иллюстрируют процесс наложения вибрационных деформаций (напряжений) на основной процесс низкочастотного циклического упругопластического деформирования с треугольной или трапецидальной формами основного цикла. Результаты экспериментов при таких двухчастотных режимах рассмотрены выше и приведены в виде соответствующих кривых усталости на рис. 1 и диаграмм суммирования повреждений, а также зависимости снижения долговечности от действия высокочастотной деформации — на

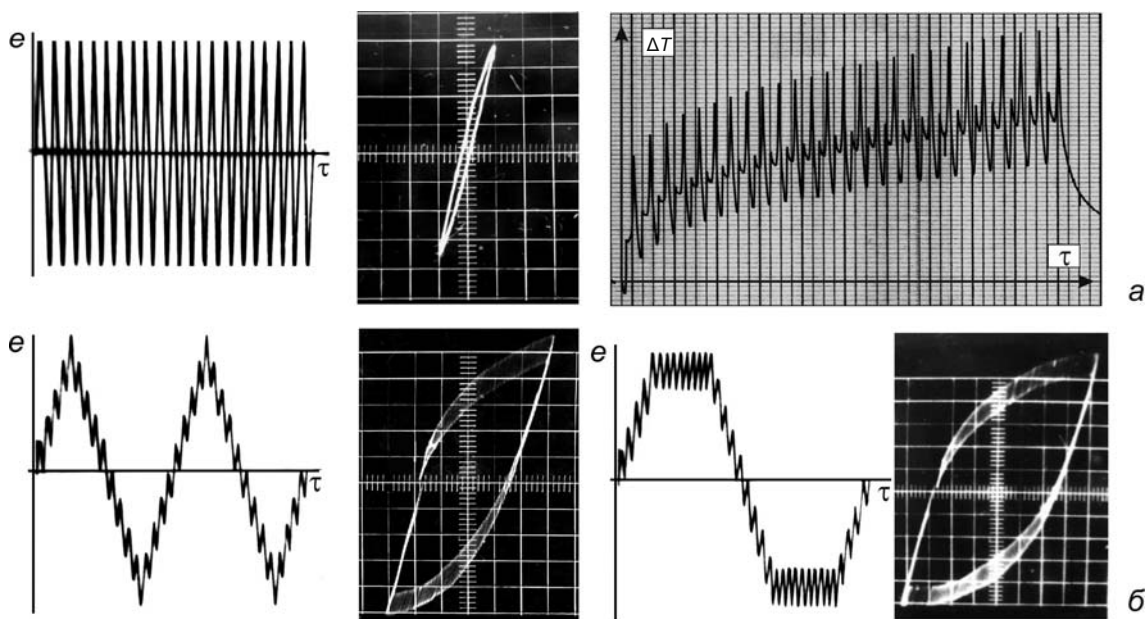


Рис. 6. Режимы нагружения, диаграммы деформирования и саморазогрева при одночастотном (а) и двухчастотном (б) нагружениях

рис. 2. При этом анализ эффекта снижения долговечности выполнен на основе деформационного критерия суммирования повреждений по выражениям (1) и (2), а также экспериментально определенной эмпирической зависимости между отношением долговечностей при одночастотном и двухчастотном режимах и отношением амплитуд высокочастотной наложенной и суммарной упругопластической деформаций по выражениям (3).

Приведенные на рис. 6, б диаграммы деформирования при двухчастотных режимах нагружения представляют собой (по огибающей линии) классическую петлю упругопластического гистерезиса, подобную соответствующей петле при одночастотном нагружении с суммарным размахом циклической деформации. Присутствующие внутри этой петли наложенные на низкочастотный процесс высокочастотные циклы деформирования реализуются в режиме нагрузка-разгрузка с переменным коэффициентом асимметрии.

Изложенные выше деформационные и энергетические подходы к оценке долговечности при циклическом упругопластическом деформировании в условиях двухчастотного нагружения могут быть реализованы на основе суммирования составляющих повреждения  $d_{j1}$  и  $d_{j2}$  соответственно от суммарной упругопластической низкочастотной ( $e_a = e_{a1} + e_{a2}$ ) и упругой высокочастотной  $e_2$  амплитуд деформаций (см. рис. 6, б) по выражению (2), а также на основе определения соответствующих им составляющих затраченной механической энергии  $\bar{A}_1$  и  $\bar{A}_2$ , выделенной тепловой энергии  $\bar{Q}_1$  и  $\bar{Q}_2$  и поглощенной материалом энергии  $\bar{E}_1$  и  $\bar{E}_2$  в выражении (4). Однако определение составляющих  $\bar{A}_2$ ,  $\bar{Q}_2$  и  $\bar{E}_2$  от действия высокочастотной деформации  $e_2$  требует дополнительного рассмотрения.

Как показывают углубленные исследования [4, 5, 14, 17 – 19], циклическое деформирование в упругой области также может сопровождаться наличием и сложной кинетикой петли гистерезиса, когда нагружение и разгрузка материала реализуются по разным траекториям, образуя указанную петлю [4]. Согласно обобщению известных данных возникновение такой петли может происходить из-за релаксации напряжений по границам зерен в металле, диффузии между зернами поликристалла, термоупругих эффектов и др.

В направлении развития энергетического критерия разрушения [4] для оценки повреждаемости материала при совместном действии механизмов мало- и многоциклового усталости предложена и реализована в виде соответствующих алгоритма и вычислительной программы [19, 24] математическая модель повреждаемости среды с учетом взаимодействия физических механизмов деформирования в этих условиях и особенностей перехода от области малоциклового усталости к многоцикловому нагружению.

Если в реальных экспериментах выделить и оценить составляющие механической  $\bar{A}_2$ , тепловой  $\bar{Q}_2$  и поглощаемой материалом  $\bar{E}_2$  энергии вследствие воздействия высокочастотной амплитуды деформации  $e_{a2}$  при двухчастотном режиме путем анализа образующихся при этом высокочастотных петель упругого гистерезиса (см. рис. 6, б) и сопоставить их с соответствующими  $\bar{A}_1$ ,  $\bar{E}_1$  и  $\bar{Q}_1$ , определяемыми по диаграммам упругопластического деформирования с полной (суммарной) низкочастотной деформацией  $e_a$ , то можно проанализировать изменение долговечности для двухчастотных режимов с позиций энергетического баланса.

Таким образом, оценка повреждаемости и долговечности конструкционных материалов при одно- и



двухчастотных режимах нагружения может быть выполнена на основе анализа диаграмм циклического упругопластического деформирования и их кинетики с ростом числа циклов нагружения по соответствующим деформационным критериям суммирования повреждений, а также с использованием энергетического подхода с выделением по указанным диаграммам деформирования составляющих затраченной на процесс деформирования механической энергии, выделившейся в этом процессе тепловой энергии и ответственной за разрушение поглощенной материалом энергии, которая может рассматриваться в качестве критерияльного энергетического параметра.

Учитывая научно-методическую важность определения энергетических характеристик как при одночастотном, так и при двухчастотном (или многочастотном) режимах циклического нагружения в настоящее время для решения этой задачи применяют [3, 7, 8, 11] соответствующие деформационные подходы в изотермической или неизотермической постановке.

## ЛИТЕРАТУРА

- Махутов Н. А. Конструкционная прочность, ресурс и техногенная безопасность. В 2-х частях. — Новосибирск: Наука, 2005. — Ч. 1. 494 с.; Ч. 2. 610 с.
- Махутов Н. А. Прочность и безопасность: фундаментальные и прикладные исследования. — Новосибирск: Наука, 2008. — 528 с.
- Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. Фундаментальные исследования проблем техногенной безопасности / Под общ. ред. Н. А. Махутова. — М.: МГОФ «Знание», 2013. — 576 с.
- Трошенко В. Т. Деформирование и разрушение металлов при многоцикловом нагружении. — Киев: Наукова думка, 1981. — 344 с.
- Иванова В. С., Терентьев В. Ф. Природа усталости металлов. — М.: Металлургия, 1975. — 456 с.
- Романов А. Н. Разрушение при малоцикловом нагружении. — М.: Наука, 1988. — 282 с.
- Махутов Н. А., Рачук В. С., Гаденин М. М. и др. Прочность и ресурс ЖРД. — М.: Наука, 2011. — 525 с.
- Махутов Н. А., Фролов К. В., Стекольников В. В. и др. Прочность и ресурс водо-водяных энергетических реакторов. — М.: Наука, 1988. — 312 с.
- Гаденин М. М. Особенности развития деформаций и накопления повреждений при двухчастотном малоцикловом нагружении и повышенных температурах / Машиноведение. 1976. № 1. С. 69 – 77.
- Гаденин М. М. Изменение сопротивления малоцикловому деформированию и разрушению в связи с двухчастотностью процесса нагружения / Тезисы докладов XIII научно-технической конференции «Проблемы надежности и долговечности элементов конструкций в машиностроении и стройиндустрии». — Свердловск: Свердловский областной Совет НТО, 1978. С. 5 – 6.
- ПНАЭ Г-7-002–86. Правила и нормы в атомной энергетике. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. — М.: Энергоатомиздат, 1989. — 525 с.
- 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.
- Ястржембский А. С. Техническая термодинамика. — М. – Л.: Госэнергоиздат, 1953. — 544 с.
- Трошенко В. Т., Фомичев П. А. Энергетический критерий усталостного разрушения / Проблемы прочности. 1993. № 1. С. 3 – 10.
- Гаденин М. М., Романов А. Н. Метод экспериментального определения энергии статического и циклического упругопластического деформирования и разрушения / Заводская лаборатория. 1978. Т. 44. № 8. С. 997 – 1002.
- Романов А. Н., Гаденин М. М. Экспериментальное определение энергии статического и циклического упругопластического деформирования и разрушения конструкционных материалов / Проблемы прочности. 1979. № 11. С. 89 – 94.
- Трошенко В. Т. Рассеянное усталостное повреждение металлов и сплавов. Сообщение 1. Неупругость, методы и результаты исследования / Проблемы прочности. 2005. № 4. С. 5 – 32.
- Трошенко В. Т. Рассеянное усталостное повреждение металлов и сплавов. Сообщение 2. Взаимосвязь между усталостью и неупругостью / Проблемы прочности. 2005. № 5. С. 5 – 29.
- Волков И. А., Ереев М. Н., Коротких Ю. Г., Тарасов И. С. Модель поврежденной среды для оценки долговечности конструкций при совместном действии механизмов мало- и многоциклового усталости / Вычислительная механика сплошных сред. 2012. Т. 5. № 1. С. 54 – 60.
- Гольденблат И. И. Нелинейные проблемы теории упругости. — М.: Наука, 1969. — 336 с.
- Гаф Дж. Г. Усталость металлов. — М.: ОНТИ-НКТП-СССР, 1935. — 304 с.
- Брдлик П. М., Кошмаров Ю. А., Леонтьев А. И. Теплопередача. — М.: Министерство высшего образования СССР, 1956. — 188 с.
- Физические свойства сталей и сплавов, применяемых в энергетике. Справочник / Под ред. Б. Е. Неймарка. — М.: Энергия, 1967. — 240 с.
- Большухин М. А., Зверев Д. Л., Кайдалов В. Б., Коротких Ю. Г., Панов В. А., Пахомов В. А. Оценка долговечности конструкционных материалов при совместных процессах малоциклового и многоциклового усталости / Проблемы прочности и пластичности. 2010. Вып. 72. С. 28 – 35.

## REFERENCES

- Makhtov N. A. Konstruktsionnaya prochnost', resurs i tekhnogennaya bezopasnost' [Structural strength, resource and engineering safety]. In 2 parts. — Novosibirsk: Nauka, 2005. — Part 1. 494 p. [in Russian]; Part 2. 610 p. [in Russian].
- Makhtov N. A. Prochnost' i bezopasnost': fundamental'nye i prikladnye issledovaniya [Strength and safety: fundamental and applied researches]. — Novosibirsk: Nauka, 2008. — 528 p. [in Russian].
- Makhtov N. A. (Ed.). Pravovye, sotsial'no-ekonomicheskie i nauchno tekhnicheskie aspekty. Fundamental'nye issledovaniya problem tekhnogennoi bezopasnosti [Safety of Russia. Legal, social-economic and scientifically-engineering aspects. Fundamental researches of engineering safety problems]. — Moscow: MGOF «Znanie», 2013. — 576 p. [in Russian].
- Troshchenko V. T. Deformirovanie i razrushenie metallov pri mnogotsiklovom nagruzhении [Deformation and fracture of metals at a high-cycle loading]. — Kiev: Naukova dumka, 1981. — 344 p. [in Russian].
- Ivanova V. S., Terent'ev V. F. Priroda ustalosti metallov [The nature of metals fatigue]. — Moscow: Metallurgiya, 1975. — 456 p. [in Russian].
- Romanov A. N. Razrushenie pri malotsiklovom nagruzhении [Fracture at a low cycle loading]. — Moscow: Nauka, 1988. — 282 p. [in Russian].
- Makhtov N. A., Rachuk V. S., Gadenin M. M., et al. Prochnost' i resurs ZHRD [Strength and resource of liquid-fuel rocket engines]. — Moscow: Nauka, 2011. — 525 p. [in Russian].
- Makhtov N. A., Frolov K. V., Stekol'nikov V. V., et al. Prochnost' i resurs vodo-vodyanykh énergeticheskikh reaktorov [Researches of stresses and strength of nuclear reactors]. — Moscow: Nauka, 1988. — 312 p. [in Russian].
- Gadenin M. M. Osobennosti razvitiya deformatsii i nakopleniya povrezhdenii pri dvukhchastotnom malotsiklovom nagruzhении i povyshennykh temperaturakh [Peculiarities of strains evolution and damages accumulation at two-frequency low-cycle loading and heightened temperatures] / Mashinovedenie. 1976. N 1. P. 69 – 77 [in Russian].
- Gadenin M. M. Izmenenie soprotivleniya malotsiklovomu deformirovaniyu i razrusheniyu v svyazi s dvukhchastotnost'yu protsessа nagruzheniya [Resistance change to low-cycle deformation and fracture for two-frequency process of a loading] / Tезисы докладов XIII nauchno-tekhnicheskoi konferentsii «Problemy nadezhnosti i dolgovechnosti élementov konstruksii v mashinostroenii i stroindustrii» [Abstracts of the XIII scientific conference “Problems of reliability and durability of structural elements in the engineering and construction industry”]. — Sverdlovsk: Sverdlovskii oblastnoi Sovet NTO, 1978. P. 5 – 6 [in Russian].



11. PNAÉ G-7-002–86. Pravila i normy v atomnoi énergetike. Normy rascheta na prochnost' oborudovaniya i truboprovodov atomnykh énergeticheskikh ustanovok [Rules and norms in nuclear energetics. Strength calculation norms for equipment and pipelines of nuclear engine installations]. — Moscow: Énergoatomizdat, 1989. — 525 p. [in Russian].
12. **Gadenin M. M.** Otsenka vliyaniya rezhimov nagruzheniya na usloviya dostizheniya predel'nykh sostoyanii i naznachenie zapasov [Assessing the effect of loading on the terms of attaining the ultimate stade of stocks and the assignment of the reserves] / Zavod. Lab. Diagn. Mater. 2013. Vol. 79. N 10. P. 65 – 70 [in Russian].
13. **Yastrzhembskii A. S.** Tekhnicheskaya termodinamika [Engineering thermodynamics]. — Moscow – Leningrad: Gosénergoizdat, 1953. — 544 p. [in Russian].
14. **Troshchenko V. T., Fomichev P. A.** Énergeticheskii kriterii ustalostno razrusheniya [Energy criteria of fatigue fracture] / Probl. Prochnosti. 1993. N 1. P. 3 – 10 [in Russian].
15. **Gadenin M. M., Romanov A. N.** Metod éksperimental'nogo opredeleniya énergii staticheskogo i tsiklicheskogo uprugoplasticheskogo deformirovaniya i razrusheniya [Method of the experimental determination of energy for a static and cyclic elastoplastic deformation and fracture] / Zavod. Lab. 1978. Vol. 44. N 8. P. 997 – 1002 [in Russian].
16. **Romanov A. N., Gadenin M. M.** Éksperimental'noe opredelenie énergii staticheskogo i tsiklicheskogo uprugoplasticheskogo deformirovaniya i razrusheniya konstruktsionnykh materialov [Experimental determination of energy for static and cyclic elastoplastic deformation and fracture of structural materials] / Probl. Prochnosti. 1979. N 11. P. 89 – 94 [in Russian].
17. **Troshchenko V. T.** Rasseyanoe ustalostnoe povrezhdenie metallov i splavov. Soobshchenie 1. Neuprugost', metody i rezul'taty issledovaniya [Dispersed fatigue damage of metals and alloys. Communication 1. An unelasticity, methods and results of research] / Probl. Prochnosti. 2005. N 4. P. 5 – 32 [in Russian].
18. **Troshchenko V. T.** Rasseyanoe ustalostnoe povrezhdenie metallov i splavov. Soobshchenie 2. Vzaimosvyaz' mezhdru ustalost'yu i neuprugost'yu [Dispersed fatigue damage of metals and alloys. Communication 2. Interrelate between a fatigue and an unelasticity] / Probl. Prochnosti. 2005. N 5. P. 5 – 29.
19. **Volkov I. A., Ereev M. N., Korotkikh Yu. G., Tarasov I. S.** Model' povrezhdennoi sredy dlya otsenki dolgovechnosti konstruktssii pri sovmeonom deistvii mekhanizmov malo- i mnogotsiklovoi ustalosti [The model of damaged medium for estimation of life-time of structures at joint impact of low- and high-cycle fatigue mechanisms] / Vychislit. Mekh. Sploshn. Sred. 2012. Vol. 5. N 1. P. 54 – 60 [in Russian].
20. **Gol'denblat I. I.** Nelineinye problemy teorii uprugosti [Nonlinear problems of the elasticity theory]. — Moscow: Nauka, 1969. — 336 p. [in Russian].
21. **Gaf Dzh. G.** Ustalost' metallov [Fatigue of metals]. — Moscow: ONTI-NKTP-SSSR, 1935. — 304 p. [in Russian].
22. **Brdlik P. M., Koshmarov Yu. A., Leont'ev A. I.** Teploperedacha [Heat transfer]. — Moscow: Izd. Ministerstvo vysshhego obrazovaniya SSSR, 1956. — 188 p. [in Russian].
23. **Neimark B. E.** (Ed.). Fizicheskie svoistva stali i splavov, primenyemykh v énergetike. Spravochnik [Physical properties of steels and alloys applied in power engineering. Reference book]. — Moscow: Énergiya, 1967. — 240 p. [in Russian].
24. **Bol'shukhin M. A., Zverev D. L., Kaidalov V. B., Korotkikh Yu. G., Panov V. A., Pakhomov V. A.** Otsenka dolgovechnosti konstruktsionnykh materialov pri sovmeestnykh protsessakh malotsiklovoi i mnogotsiklovoi ustalosti [Estimation of structural materials life-time at joint processes of a low-cycle and high-cycle fatigue] / Probl. Prochn. Plastichn. 2010. Issue 72. P. 28 – 35.