

Разработанные модели конструкции КРТ позволяют провести расчетные исследования для разных случаев теплового нагружения. В качестве основного выбран вариант ориентации, при котором Солнце освещает все лепестковые элементы отражателя с тыльной стороны. Вместе с тем были проведены расчеты и для другой ориентации КРТ относительно Солнца: в первую очередь, для случая, при котором аппарат ориентирован таким образом, что Солнце освещает только часть рабочей поверхности отражателя, а часть ее затеняется элементами конструкции.

Динамические свойства конструкции исследовались с помощью того же программного комплекса UAI/NASTRAN. Выполнены три вида расчетов:

1. Исследована динамика изолированного фрагмента отражателя-лепестка с поддерживающей балкой, для которого построен спектр частот и соответствующие формы колебаний. Низкая частота первого тона соответствует $\omega_1 = 3,7$ Гц, второго тона — $\omega_2 = 9,1$ Гц, третьего — $\omega_3 = 10,9$ Гц.

2. Обследованы вопросы динамики космического радиотелескопа в сложном состоянии на участке выведения конструкции на орбиту. Получены частоты и формы собственных колебаний, позволяющие оценить влияние КРТ на динамику ракеты-носителя, а также изучать возможность соударения лепестков. Проведены расчеты вынужденных колебаний конструкции при действии продольных и поперечных перегрузок.

3. Построена динамическая конечно-элементная модель всей конструкции телескопа, основанная на элементах, рассмотренных ранее для статических задач. Наличие низших частот определяется следующими величинами:

$$\omega_1 = 1,4 \text{ Гц}; \omega_2 = 1,9 \text{ Гц}; \omega_3 = 3,3 \text{ Гц}; \omega_4 = 3,7 \text{ Гц}.$$

Полученные результаты позволяют детально обследовать динамические свойства всего летательного аппарата и провести анализ его поведения в различных режимах работы.

620.178

УСТАЛОСТНАЯ ДОЛГОВЕЧНОСТЬ СТАЛИ С УЧЕТОМ РАЗЛИЧНЫХ МЕХАНИЗМОВ ПОВРЕЖДЕННОСТИ

*Д-р техн. наук В. П. БАГМУТОВ, канд. техн. наук А. Н. САВКИН, канд. техн. наук В. И. ВОДОПЬЯНОВ,
канд. техн. наук О. В. КОНДРАТЬЕВ*

На основании предложенного деформационно-энергетического критерия показана возможность оценки долговечности стали в переходной и многоцикловой области усталости при различных асимметриях цикла. Сравнение экспериментальных и расчетных данных показало удовлетворительные результаты.

The possibility of steel durability value in transitive and multi-cycle field of fatigue at different cycle asymmetries, is shown here, based on suggested deformational- power criterion. The comparison of experimental and calculational data showed the satisfactory results.

По уровню рассеяния энергии и его изменению можно судить о величине и кинетике накопления усталостных повреждений и, следовательно, прогнозировать долговечность [1–3]. Однако циклическая прочность в меньшей степени зависит также и от интенсивности накопления односторонней деформации (циклической ползучести) [4]. Имеется ряд работ [5, 6], где построение кривой усталостной прочности и оценка

долговечности при разных асимметриях цикла связаны с использованием различных долей квазистатического и усталостного характера. В частности, в [6] показана возможность построения полномасштабных кривых выносливости на основании функции эффективной пластичности ψ_{eff} , описывающей S-образный ход квазистатической доли от числа циклов. Переход этой кривой отвечает переходной области от малоциклового к многоциклового усталости.

Представляет интерес оценка взаимного влияния квазистатической и усталостной долей на оценку долговечности. Нами основное внимание уделено оценке долговечности материала в переходной и многоциклового областях усталости, при использовании линейной аппроксимации функции изменения переходного участка усталости в полулогарифмических координатах, описывающей квазистатическую долю поврежденности.

В переходной области усталости, где имеет место накопление односторонней пластической деформации и усталостной поврежденности, предлагается в [7] общую поврежденность описывать двухчленным уравнением

$$d_y + d_{ст} = 1, \quad (1)$$

где d_y , $d_{ст}$ — соответственно усталостная и статическая доля повреждения.

Испытания при циклических нагрузках осевым растяжением-сжатием проводили на цилиндрических образцах из нормализованной стали 45. Статическую составляющую повреждения оценивали относительным остаточным сужением после разрушения $\theta_{ст}$, усталостную — коэффициентом рассеяния энергии ψ_y , который определяли по формуле

$$\psi_y = k_\phi \frac{\Delta \epsilon}{\epsilon}, \quad (2)$$

где $\Delta \epsilon$ — ширина петли гистерезиса; ϵ — размах деформации; k_ϕ — коэффициент формы петли гистерезиса.

В качестве характеристики рассеяния энергии принималось значение ψ_y на стабилизированном участке кривой $\psi_y = \psi(n)$ или, в случае отсутствия такового, при числах циклов, соответствующих половине долговечности, $n = 0,5N$ [1].

Графики (рис. 1) изменения параметров неупругости ψ_y и $\theta_{ст}$, ответственных за усталостную и статическую составляющую для стали 45, представляют самостоятельные кривые для каждой асимметрии цикла, причем порядок их взаимного расположения на рис. 1, а и 1, б разный. Для одной и той же долговечности кривые $\psi_y - N$ при $R \rightarrow -1$ расположены выше и правее и, наоборот, кривые $\theta_{ст} - N$ — ниже и левее. Для симметричного цикла $R = -1$ характерно наиболее высокие значения уровня рассеяния энергии ψ_y , а величина односторонней деформации близка к нулю ($\theta_{ст} \rightarrow 0$), поэтому будет естественным считать, что повреждение при симметричном цикле нагружения соотносятся только с первым слагаемым уравнения (1), при разрушении $d_y = 1$. При асимметричном нагружении усталостную составляющую повреждения можно определить как отношение долговечности N_R для заданной характеристики цикла R к долговечности N_{-1} для симметричного цикла ($R = -1$), что соответствует одинаковому значению рассеяния энергии за вычетом «безопасной» доли рассеянной энергии, соотносимой с пределом выносливости σ_R с асимметрией цикла R . Как видно из рис. 1, «безопасные» доли рассеянной энергии ψ_{R0} могут быть значительными и увеличиваться при изменении коэффициента асимметрии ($R \rightarrow +1$). Усталостную долю повреждения можно представить в виде

$$d_y = \frac{N_R}{N_{-1}}. \quad (3)$$

Тогда при одном и том же ψ_y за вычетом «безопасной» доли рассеянной энергии увеличение асимметрии нагружения ($R \rightarrow +1$), т.е. наложение постоянной составляющей, снижает долговечность образцов (рис. 1, а).

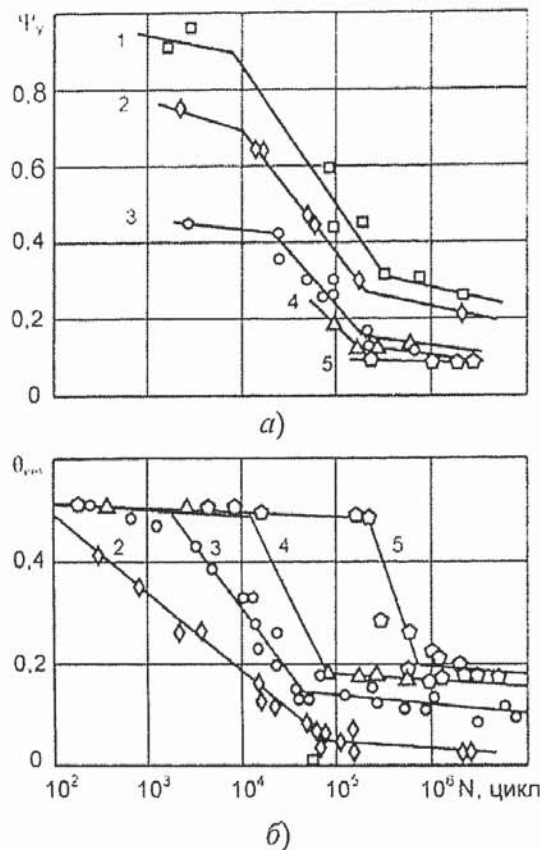


Рис. 1. Изменение рассеяния энергии ψ_c (а) и относительного остаточного сужения $\theta_{ст}$ (б) стали 45 в зависимости от числа цикла до разрушения N при различных асимметриях цикла R : 1 — -1 ; 2 — $-0,5$; 3 — 0 ; 4 — $0,25$; 5 — $0,5$

При однократном растяжении (частный случай циклического нагружения $\sigma_a = 0$, $R = +1$), когда отсутствует усталостная составляющая повреждения $d_y = 0$, его статическая доля принята за единицу ($d_{ст} = 1$) и оценивается относительным сужением разрывного образца θ_b . При асимметричном нагружении с характеристикой цикла R доля статического повреждения $d_{ст}$ оценивается отношением

$$d_{ст} = \frac{(\theta_{ст}) - (\theta_{сб})}{\theta_b} = \frac{\theta_{соп}}{\theta_b}, \quad (4)$$

где $\theta_{сб}$, $\theta_{соп}$ — «безопасная» и «опасная» доли статической деформации; «безопасная» доля статической деформации определяется на пределе выносливости при данной асимметрии цикла R .

На рис. 2 показана схема определения усталостной (рис. 2, а) d_y и квазистатической (рис. 2, б) $d_{ст}$ доли поврежденности при данной асимметрии цикла R . Базовая кривая — это кривая «опасной» доли рассеяния энергии ψ_{yon} при симметричном нагружении $R = -1$. При одинаковом значении «опасной» доли рассеянной энергии ψ_{yon1} определяют долго-

вечность N_{-1} при $R = -1$ и N_{R1} , соответствующую асимметрии R (доля усталостного повреждения показана на рис. 2, а). Одновременно при долговечности N_{R1} на кривой θ_{conl} определяют значение «опасной» доли статической составляющей поврежденности θ_{conl} (доля статического повреждения показана на рис. 2, б). Значения долговечностей N_{0R} , N_u , N_{cR} — соответствуют точкам излома при линейной аппроксимации зависимостей $\psi = \psi(N)$ и $\theta = \theta(N)$ на соответствующих пределах выносливости σ_R . Общее повреждение в этом случае оценивается как

$$\frac{N_{R1}}{N_{-1}} + \frac{\theta_{\text{conl}}}{\theta_b} = 1. \tag{5}$$

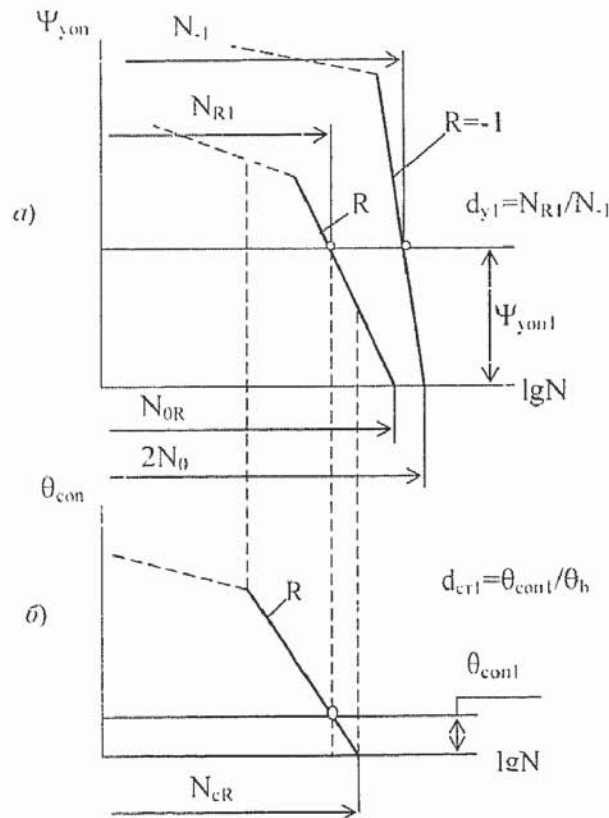


Рис. 2. Схема определения усталостной d_y (а) и квазистатической $d_{\text{ст}}$ (б) доли повреждению при данной асимметрии цикла R

Вычисленные таким образом значения составляющих повреждения для различных асимметрий цикла R отложим на графике $d_y - d_{\text{ст}}$ (рис. 3, а).

Если бы каждая из составляющих повреждения d_y и $d_{\text{ст}}$ являлись линейной функцией разрушающего числа циклов, то полное повреждение $d_y + d_{\text{ст}} = 1$ соответствовало бы диагонали графика. Но в действительности экспериментальные зависимости для стали 45, для различных асимметрий цикла, оказались нелинейными, причем $d_y + d_{\text{ст}} < 1$ и с увеличением R нелинейность накопления поврежденности увеличивается (темп повреждения замедляется). Уравнение (1) может быть удовлетворено, если его представить в виде

$$d_y^m + d_{\text{ст}}^n = 1. \tag{6}$$

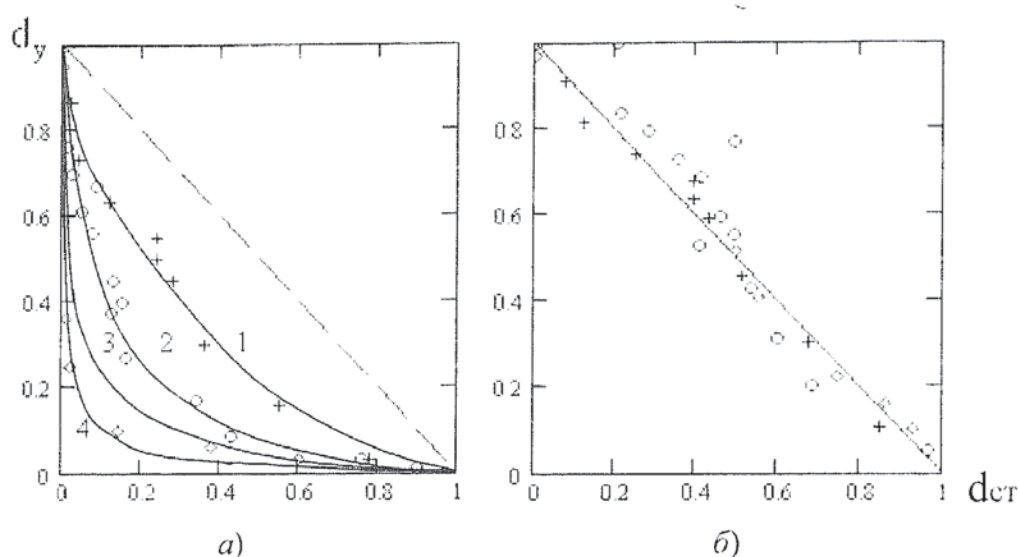


Рис. 3. Соотношения между усталостной d_f и квазистатической $d_{ст}$ долями повреждения при линейном (а) и нелинейном (б) их суммировании при различных асимметриях цикла нагружения: 1 — $-0,5$; 2 — 0 ; 3 — $0,25$; 4 — $0,5$

Показатели степени m и n являются структурно-чувствительными параметрами. В табл. 1 приведены значения энергетических и деформационных параметров стали 45 при различных асимметриях цикла нагружения $-1 \leq R \leq 1$.

Таблица 1

Кэф- фи- циент асим- мет- рии	Предел выно- сливо-сти	Рассеяние энергии и относительное сужение на пределе выносливости		Отношение рассея- ния энергии и отно- сительного сужения к их предельному значению		Отношение пре- дела выносли- вости к пределу прочности	Структурно- чувствитель- ные параметры	
		$\Psi_{R, \sigma, \%}$	$\theta_{\sigma b, \%}$	$\Psi_{R \sigma} / \Psi_{-1}$	$\theta_{\sigma \sigma} / \theta_b$		σ_R / σ_b	m
R	σ_R МПа							
-1	220	21	0,0	1,0	0	0,323	—	—
-0,5	285	20,5	3,0	0,976	0,06	0,419	0,65	0,65
0	350	12,0	11,5	0,571	0,23	0,514	0,65	0,34
0,25	450	10,0	16,0	0,476	0,32	0,706	0,65	0,25
0,5	580	8,5	17,5	0,404	0,35	0,85	0,65	0,15
1	680	0	50	0	1,0	1,0	—	—

При выборе структурно-чувствительных параметров m и n было принято, что параметр $m = 0,65$ остается постоянным и не зависит от асимметрии цикла, а параметр n переменным (значения n представлены в табл. 1). На рис. 3, б показаны результаты нелинейной оценки повреждения стали 45 по смешанному механизму разрушения, представленному уравнением (6). Сосредоточение экспериментальных точек при различной асимметрии цикла вокруг диагональной линии, вне зависимости от уровня действующих циклических напряжений, подтверждает выдвинутую ранее гипотезу о нелинейном (зату-

хающем) характере поврежденности стали 45 в условиях квазистатического и усталостного смешанного механизма повреждения материала. С другой стороны, представленные в табл. 1 параметры квазистатической и усталостной поврежденности свидетельствуют о взаимосвязи этих процессов и о том, что существенную роль в них играет асимметрия циклов нагружения.

Покажем, как можно оценить долговечность материала на основании предложенных деформационно-энергетических критериев. Уравнение (6) можно записать в следующем виде:

$$\frac{N_R}{N_{-1}} = \left[1 - \left(\frac{\theta_{\text{con}}}{\theta_b} \right)^n \right]^{\frac{1}{m}}. \quad (7)$$

Экспериментальные данные дают основание сократить число структурно-чувствительных параметров, описывающих нелинейный процесс повреждения стали до одного. Так, параметр n можно выразить через m следующей зависимостью:

$$n = (1 - m)(1 - R), \quad (8)$$

что указывает на существенную взаимосвязь усталостного и квазистатического повреждений металла в переходной области усталости. Это согласуется с результатом [6], где параметры кривой выносливости оцениваются только на основании деформационного критерия Ψ_{eff} . Примем за базовую кривую изменения рассеяния энергии $\Psi_y = \Psi(N)$ при симметричном цикле нагружения и представим ее уравнением

$$N_{-1} = 2N_0 \exp[-B_{-1}\Psi_{\text{yon}}], \quad (9)$$

где B_{-1} — коэффициент, характеризующий наклон кривой $\Psi_y = \Psi(N)$ при симметричном цикле нагружения в полулогарифмических координатах; N_0 — долговечность материала на пределе усталости при выходе кривой $\Psi_y = \Psi(N)$ на горизонтальный участок для отнулевого нагружения $R = 0$, Ψ_{yon} — уровень «опасной» доли рассеянной энергии, при которой определяется долговечность. Тогда уравнение (7) можно записать так

$$N_R = 2N_0 \exp[-B_{-1}\Psi_{\text{yon}}] \left[1 - \left(\frac{\theta_{\text{con}}}{\theta_b} \right)^{(1-m)(1-R)} \right]^{\frac{1}{m}}. \quad (10)$$

Учитывая взаимосвязь усталостной d_y и квазистатической $d_{\text{ст}}$ долей повреждений, что можно выразить уравнением

$$\theta_{\text{con}} = (1 - m)(1 + R)\Psi_{\text{yon}}, \quad (11)$$

долговечность металла при различной асимметрии цикла ($-1 \leq R \leq 1$) определяем так

$$N_R = 2N_0 \exp[-B_{-1}\Psi_{\text{yon}}] \xi, \quad (12)$$

$$\xi = \left\{ 1 - \left[\frac{(1 - m)(1 + R)\Psi_{\text{yon}}}{\theta_b} \right]^{(1-m)(1-R)} \right\}^{\frac{1}{m}} \quad (13)$$

ξ — коэффициент уменьшения долговечности материала в зависимости от квазистатической составляющей поврежденности и асимметрии цикла.

Рассматривая отдельно кривые рассеяния энергии $\Psi_y = \Psi(N)$, связанные с усталостной поврежденностью материала при различной асимметрии цикла, можно отметить,

что значение долговечности точки излома N_{oR} на пределе выносливости изменяется в зависимости от асимметрии цикла в виде следующей зависимости:

$$N_{oR} = N_o (1 - R), \quad (14)$$

где N_o , N_{oR} — точка излома кривой $\Psi_{\Sigma} = \Psi(N)$ в полулогарифмических координатах $\Psi_{\Sigma} - \lg N$ при отнулевом и асимметричном циклическом нагружении. Тогда долговечность материала от усталостной поврежденности будет

$$N_R = N_o (1 - R) \exp[-B_{-1} \Psi_{\Sigma} (1 + (1 - m)(1 + R))]. \quad (15)$$

Долговечность материала в зависимости от квазистатической поврежденности также подчиняется общим закономерностям. Однако процесс квазистатической поврежденности направлен противоположно процессу усталостного повреждения, т.е. увеличение одной доли повреждения приводит к уменьшению другой. Экспериментальные данные показывают, что процесс квазистатической поврежденности начинается и заканчивается раньше процесса усталостного повреждения, более того, выявлена существенная нелинейность этого процесса в зависимости от асимметрии цикла. Исходя из этого, уравнение для оценки долговечности N_{cR} для точки излома кривой $\theta_{cr} = \theta_{cr}(N)$ на пределе выносливости материала с соответствующей асимметрией цикла R может быть представлено следующим образом:

$$N_{cR} = N_{co} (1 + (\zeta)^{-R} R), \quad (16)$$

где N_{cR} , N_{co} — долговечность точки излома кривой $\theta_{cr} = \theta_{cr}(N)$ на пределе выносливости с асимметрией R и $R = 0$; ζ — коэффициент нелинейности для точки излома кривой $\theta_{cr} = \theta_{cr}(N)$ на пределе выносливости (для стали 45 $\zeta = 0,05$). Долговечность материала, исходя из его квазистатической поврежденности, будет

$$N_R = N_{co} (1 + (\zeta)^{-R} R) \exp[-B_{co} \theta_{c0} [1 - m(1 + R)]], \quad (17)$$

где B_{co} — коэффициент наклона кривой относительного сужения θ_{c0} в полулогарифмических координатах $\theta_{c0} - \lg N$ при отнулевом цикле нагружения $R = 0$.

На рис. 4 показаны экспериментальные кривые $\Psi_{\Sigma} = \Psi(N)$ и $\theta_{c0} = \theta(N)$ (сплошные линии), а также расчетные кривые по формулам (15), (17) (линии — +++) и по формуле (12) (точечные линии). Постоянные для расчета долговечности стали 45 при различных асимметриях цикла на основании деформационно-энергетических критериев поврежденности представлены в табл. 2.

Как видно из графиков, расчетные зависимости по оценке долговечности N_R на основании предложенных деформационно-энергетических критериев удовлетворительно описывают долговечность стали 45 при различных асимметриях цикла R .

Выводы

1. Предложен деформационно-энергетический критерий разрушения углеродистой стали по смешанному квазистатическому и усталостному механизму поврежденности при циклическом нагружении в переходной области усталости. Показана возможность оценки долговечности материала при различных асимметриях цикла только на основании одного критерия поврежденности (энергетического или деформационного) с учетом взаимозависимости между ними.

2. Расчетные зависимости, полученные на основании предложенного критерия, позволяют прогнозировать долговечность материала при различных асимметриях цикла в области $-1 \leq R \leq 1$. Сравнение расчетных и экспериментальных регрессионных кривых по долговечности материала при различных значениях «опасной» доли рассеянной энергии и разных величин асимметрии цикла показало удовлетворительные результаты.

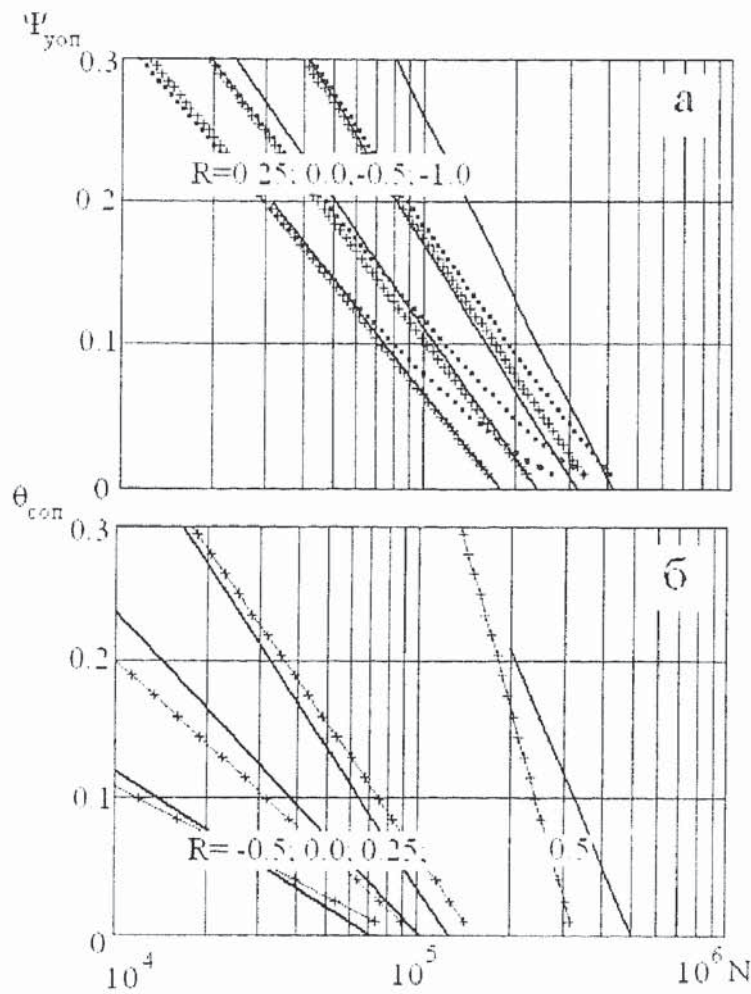


Рис. 4. Регрессионные кривые усталостной долговечности стали 45 в зависимости от «опасной» доли рассеянной энергии $\Psi_{уоп}$ (а) и накопленной односторонней деформации $\theta_{сop}$ (б) при различных асимметриях цикла: — — экспериментальные кривые; ++++ — расчет по (15) и (17); — расчет по формуле (12)

Таблица 2

Долговечность точки излома кривой рассеяния энергии Ψ и относительного сужения θ при $R = 0$		Коэффициент наклона кривых рассеяния энергии Ψ при $R = -1$ и относительного сужения θ при $R = 0$		Коэффициент нелинейности накопления усталостных повреждений m	Коэффициент нелинейности при определенной долговечности точки излома кривой относительного сужения ζ	Относительное сужение на растяжении разрывного образца θ_b
		$N_{0,-1}$, цикл	$N_{0,0}$, цикл			
$2,37 \cdot 10^5$	10^5	6,2	28,8	0,65	0,05	0,5

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Трощенко В. Т. Деформирование и разрушение металлов при многоцикловом нагружении. — Киев: Наукова думка, 1981. — 343 с.
2. Когаев В. П., Махутов Н. А., Гусенков А. П. Расчеты деталей машин и конструкций на прочность и долговечность: Справочник — М.: Машиностроение, 1985. — 224 с.
3. Гурьев А. В., Савкин А. Н. Об изменении демпфирующей способности конструкционных сталей в процессе циклического деформирования / Рассеяние энергии при колебаниях механических систем. — Киев: Наукова думка, 1976. — С.122—127.
4. Гурьев А. В., Кондрагьев О. В. Влияние асимметрии цикла на рассеяние энергии и усталостную прочность / Рассеяние энергии при колебаниях механических систем. — Киев: Наукова думка, 1982. С. 206—214.
5. Багмутов В. П., Кондратьев О. В. Формирование условий для моделирования полной кривой усталости лабораторных образцов при асимметричном нагружении растяжением-сжатием. // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. — № 3. 2004. — Т. 70. — С.1—9.
6. Багмутов В. П., Кондратьев О. В. Прогнозирование усталостной прочности на основе расчетной кривой усталости // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. — №4. 2004.— Т. 70. — С. 1—5.
7. Стрижало В.А. Циклическая прочность и ползучесть металлов при малоцикловом нагружении в условиях низких и высоких температур. — Киев: Наукова думка, 1978. — 238с.

539.3

СВЯЗАННАЯ НЕСТАЦИОНАРНАЯ ЗАДАЧА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ И ТЕРМОУПРУГОСТИ БАЛКИ-ПЛАСТИНКИ ИЗ ПОРИСТОГО МАТЕРИАЛА

Д-р физ.-мат. наук, проф. С. М. ШЛЯХОВ, асп. А. В. ЕФРЕМОВ, канд. техн. наук Э.Ф. КРИВУЛИНА

Получено решение конструктивно-связанной задачи теплопроводности и термоупругости для тел пористой структуры. Учтено влияние зависимости коэффициента теплопроводности от напряжений. В основу решения положены вариационные принципы, реализация которых осуществлена методом конечных элементов.

In article the solution of the constructional-connected problem of thermal conductivity and thermoelasticity for bodies of porous structure is receive. Influence of dependence of coefficient of thermal conductivity from voltages is considered. In a basis of a solution, the variational principles which implementation is realised by a finite element method are supposed.

Многие элементы конструкций теплоэнергетического оборудования выполнены из материалов, полученных методом порошкового спекания или порошковой металлургии. Речь идет о жаростойких и тугоплавких материалах, как металлических, так и неметаллических — это карбиды различных металлов, графит, пенокерамика и т.д.

Структура таких материалов изначально пористая, причем пористость может быть как кажущаяся (не сквозная), так и сквозная (капиллярная).

Изделия из пористого материала выполняются методами прессования, при этом плотность материала и, следовательно, пористость распределяется по массиву самого материала неравномерно. Возникает изначально нарушение гипотез сплошности и однородности материала, принимаемых в механике твердого деформируемого тела как основные.

Поскольку все чаще требуются решения задач механики деформируемого твердого тела именно для таких материалов, приходится возвращаться к гипотезе сплошности, но учитывать пористость введением поправок в исходные зависимости состояния материала, т.е. подходить к решению задач механики деформируемого твердого тела с позиции