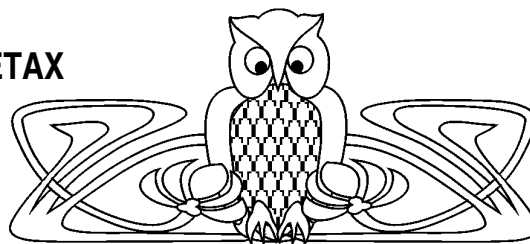




УДК 539.376

ЭКВИВАЛЕНТНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ В РАСЧЕТАХ ДЛИТЕЛЬНОЙ ПРОЧНОСТИ МЕТАЛЛОВ ПРИ СЛОЖНОМ НАПРЯЖЕННОМ СОСТОЯНИИ (обзор)



А.М. Локощенко

НИИ механики МГУ им. М.В. Ломоносова
E-mail: loko@imec.msu.ru

Критерии сопротивления металлов длительному разрушению при сложном напряженном состоянии основаны на концепции так называемого эквивалентного напряжения σ_e . При этом основное внимание уделяется установлению зависимости эквивалентного напряжения от главных напряжений $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ и зависимости времени до разрушения от величины σ_e .

Приведен детальный обзор основных зависимостей $\sigma_e(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3)$, предложенных различными отечественными и зарубежными учеными. Отдельно рассмотрены эквивалентные напряжения σ_e , зависящие только от главных напряжений, и σ_e , дополнительно зависящие от констант, характеризующих условия испытаний. С помощью статистических методов получены выражения σ_e для различных видов напряженных состояний.

Ключевые слова: длительная прочность, металлы, сложное напряженное состояние, критерии, эквивалентные напряжения, обзор, статистические методы.

The Equivalent Stresses at Calculation of Creep Rupture of Metals Under Complex Stress State (Review)

A.M. Lokoshchenko

Institute of Mechanics of Lomonosov Moscow State University
E-mail: loko@imec.msu.ru

The criteria of creep rupture of metals under complex stress state are based on conception of equivalent stress σ_e . The basic attention is given to determination of dependence of equivalent stress from the main stresses $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ and to determination of dependence of rupture time from value σ_e .

The detailed review of dependencies $\sigma_e(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3)$ is described, which were proposed by domestic and foreign scientists. The equivalent stresses σ_e , which are depended only on main stresses, and σ_e , which are depended also on the additional constants, are considered separately. By using of statistical methods the formulas for σ_e are obtained for various kinds of complex stress states.

Key words: creep rupture, metals, complex stress state, criteria, equivalent stresses, review, statistical methods.

ВВЕДЕНИЕ

Во многих практических случаях ответственные конструкции эксплуатируются в условиях высокотемпературной ползучести при сложном напряженном состоянии. Основной проблемой при расчетах работы таких конструкций является недопущение их разрушения, поэтому особое внимание приобретает проблема длительной прочности металлов, из которых изготовлены конструкции. При исследовании этой проблемы следует различать два подхода. Один из них — кинетический — основан на использовании введенного Л.М. Качановым и Ю.Н. Работновым параметра поврежденности и разработанной впоследствии Ю.Н. Работновым [1] кинетической теории ползучести и длительной прочности. Второй подход — критериальный — основан на установлении критериев сопротивления металлов длительному разрушению, основанных на концепции так называемого эквивалентного напряжения. При этом основное внимание уделяется установлению зависимости эквивалентного напряжения σ_e от главных напряжений $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ ($\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$) при различных видах сложного напряженного состояния и зависимости времени разрушения t^* от σ_e . В данной статье приведены разные виды эквивалентных напряжений $\sigma_e(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3)$, предложенные различными учеными, и обсуждается их эффективность при описании известных экспериментальных данных.

Большинство экспериментальных данных по длительной прочности металлов получено на основе результатов испытаний в условиях одноосного растяжения. Однако при оценке работоспособности элементов конструкций, находящихся в сложном напряженном состоянии, необходимы подходы, учитывающие неодноосность нагружения. Проведение высокотемпературных испытаний в условиях сложного напряженного состояния связано со значительными техническими трудностями, поэтому в настоящее время известно ограниченное количество надежных опытных данных. Типичными испытаниями металлов при сложном напряженном состоянии являются испытания трубчатых образцов



при комбинации растягивающей силы P с крутящим моментом M или внутренним давлением q . Анализ известных экспериментальных исследований длительной прочности металлов в рассматриваемых условиях можно найти в обзорах [2–5] и монографиях [6–8].

1. БАЗОВЫЕ ЭКВИВАЛЕНТНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ

Систематическое исследование длительной прочности металлов началось в 40-х годах XX века работами Джонсона (A.E. Johnson) и его учеников. В обзоре [2] Джонсон описал особенности немногочисленных к тому времени экспериментальных и теоретических исследований. При этом он обратил внимание на структурные изменения, происходящие в металлах в процессе их испытаний на ползучесть.

В обзоре [2] приводится анализ испытаний различных материалов при рабочих температурах. Эти испытания проводились на тонкостенных трубчатых образцах при комбинации растягивающей силы P и крутящего момента M . В качестве возможных видов эквивалентных напряжений σ_e рассматривались максимальное главное напряжение $\sigma_{\max} = \sigma_1$, интенсивность касательных напряжений σ_u , максимальная разность главных напряжений, гидростатическое давление и другие комбинации главных напряжений. В качестве зависимости времени до разрушения t^* от эквивалентного напряжения σ_e рассматривались степенная и экспоненциальная функции. Многие из анализируемых в [2] экспериментальных серий заключались в проведении всего 4–5 опытов на одном материале при сложном напряженном состоянии. В качестве истинного эквивалентного напряжения принималось то выражение $\sigma_e(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3)$, при котором экспериментальные точки приводили к визуально определяемому наименьшему суммарному разбросу относительно теоретической кривой длительной прочности или хотя бы они имели монотонный характер. Графический анализ экспериментальных данных в координатах $\lg \sigma_e - \lg t^*$ или $\sigma_e - \lg t^*$ привел Джонсона к выводу, что истинным эквивалентным напряжением σ_e для большинства исследованных металлов следует считать максимальное главное напряжение σ_1 .

Следует отметить систематическое исследование длительной прочности металлов при одновременном действии нормального σ и касательного τ напряжений в работах В.П. Сдобырева [9–10]. В работе [9] он представил анализ результатов проведенных им испытаний никелевого сплава ЭИ-437Б при 700°C. Этот анализ показал, что графики зависимости $\lg t^*$ от σ_1 имеют вид прямых линий, различных для одноосного растяжения, чистого кручения и их комбинаций. В.П. Сдобырев решил подобрать такое эквивалентное напряжение σ_e , чтобы можно было экспериментальные точки расположить в координатах $\sigma_e - \lg t^*$ вдоль одной прямой. Для описания всех трех видов нагрузок в результате рассмотрения 10 видов эквивалентного напряжения им предложена следующая эмпирическая зависимость:

$$\sigma_e = \sqrt{\sigma^2 + 1.366\tau^2}.$$

В работе [10] В.П. Сдобыревым предложен принципиально новый вид эквивалентного напряжения σ_e , который впоследствии использовали и в настоящее время используют многие ученые. Поскольку для разрушения с рассеянным распространением микротрещин в качестве эквивалентного напряжения часто принимается σ_1 , а для локализованного разрушения — σ_u , то В.П. Сдобырев в качестве σ_e принял их полусумму

$$\sigma_e = 0.5(\sigma_1 + \sigma_u).$$

С помощью этого σ_e им в работе [10] были обработаны результаты семи серий собственных экспериментов на различных металлах и сплавах. Обработка результатов испытаний с помощью этого эквивалентного напряжения σ_e привела к более точному соответствию с опытами, чем обработка с помощью выражений $\sigma_e = \sigma_1$ или $\sigma_e = \sigma_u$. Кроме того, В.П. Сдобырев в работе [10] обработал результаты опытов, проведенных другими учеными, и пришел к выводу, что предложенное им выра-



жение σ_e описывает опытные данные, полученные на различных материалах при различных видах напряженного состояния, лучше, чем $\sigma_e = \sigma_1$.

Ниже в качестве базовых рассматриваются четыре вида эквивалентных напряжений:

$$\sigma_{e1} = \sigma_1, \quad \sigma_{e2} = \sigma_u, \quad \sigma_{e3} = 0.5(\sigma_1 + \sigma_u), \quad \sigma_{e4} = \sigma_{\max} - \sigma_{\min}.$$

2. ЭКВИВАЛЕНТНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ С ОДНОЙ МАТЕРИАЛЬНОЙ КОНСТАНТОЙ

Если ни одно из рассмотренных известных простейших выражений эквивалентных напряжений σ_e , зависящих только от величин главных напряжений ($\sigma_e(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3)$), при описании испытаний на длительную прочность не приводит к удовлетворительному соответствию экспериментальных и теоретических значений времен до разрушения, то следует использовать усложненные выражения σ_e с константами, характеризующими условия испытаний данного материала.

Сначала рассмотрим усложненные выражения с одной константой материала.

Наиболее простым и естественным обобщением рассматриваемых соотношений является соотношение, предложенное А.А. Лебедевым [11], $\sigma_{e5} = \chi\sigma_u + (1-\chi)\sigma_1$ с одной константой материала χ . При присвоении χ значений 0, 0.5 и 1 из соотношения для σ_{e5} получаем соответственно σ_{e1} , σ_{e3} и σ_{e2} .

В монографии Г.С. Писаренко и А.А. Лебедева [6] описана методика определения искомого параметра (назовем его χ_0). Она основана на визуальной обработке результатов двух серий опытов, проведенных при разных напряженных состояниях. Там же приведены результаты обработки трех серий опытов, проведенных различными авторами, с целью определения значений χ_0 для соответствующих материалов при температурах испытаний.

В работах [12, 13] И.И. Трунин идет по пути усложнения выражения σ_{e3} для эквивалентного напряжения. В работе [12] им предложена следующая форма σ_e :

$$\sigma_e = 0.5(\sigma_1 + \sigma_u)a \left[1 - \frac{2(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)}{\sigma_1 + \sigma_u} \right],$$

где a — некоторая характеристика материала (константа), зависящая от соотношения свойств при растяжении и сжатии. Там же описана методика определения характеристики a по данным длительной прочности при одноосном растяжении и чистом кручении и приведены результаты обработки конкретных экспериментальных данных с помощью предложенного вида σ_e .

С.Т. Милейко [14] проверял на алюминиевом сплаве целый набор эквивалентных напряжений, он предложил оценивать длительную прочность материалов с помощью следующих выражений σ_e :

$$\sigma_e = \sigma_1^a (\sigma_1 - \sigma_3)^{(1-a)}, \quad \sigma_e = \sigma_1^b \sigma_u^{(1-b)}, \quad \sigma_e = \sigma_1 - \alpha\sigma_u,$$

где a, b, α — константы материала. Он отмечает, что при плоском напряженном состоянии эти выражения несущественно отличаются от известных выражений, разница выявляется только при трехосном растяжении.

Р.Дж. Браун с соавторами [5] подробно описали различные методы проведения испытаний и особенности разрушения образцов в ряде известных серий испытаний, при моделировании результатов этих испытаний они предложили использовать эквивалентное напряжение, совпадающее с σ_e [14], в виде $\sigma_e = \sigma_1^b \sigma_u^{(1-b)}$.

А.М. Локощенко и С.А. Шестериков [15] предложили следующее выражение для σ_e :

$$\sigma_{e6} = \sigma_{\max} - \xi(\sigma_{\min} - |\sigma_{\min}|),$$

выражение σ_{e6} имеет характер кусочно-линейной зависимости от главных напряжений. Эквивалентное напряжение σ_{e6} зависит от максимального и минимального напряжений и не зависит от среднего напряжения. Кусочно-линейная зависимость σ_{e6} от главных напряжений, в отличие от существенно нелинейной зависимости $\sigma_{e5}(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3)$, часто приводит к более простым решениям краевых задач.



Е.Р. Голубовский [16] предложил в качестве эквивалентного напряжения σ_e использовать линейную комбинацию среднего напряжения σ_{cp} и интенсивности касательных напряжений σ_u :

$$\sigma_e = \lambda \sigma_u + 3(1 - \lambda) \sigma_{cp}, \quad \sigma_{cp} = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3).$$

Это эквивалентное напряжение, в отличие от многих известных автору данной статьи других видов σ_e , позволяет учитывать различие времен до разрушения при одноосном и равноосном плоском напряженном состоянии в условиях ползучести.

В.П. Голуб [17] приводит подробный обзор критериев длительной прочности изотропных материалов при плоском напряженном состоянии. Сначала рассматриваются 6 различных видов эквивалентных напряжений σ_e , зависящих только от компонент тензора напряжений, и один вид σ_e , имеющий деформационную природу. Затем приведены некоторые эквивалентные напряжения с материальными константами.

Наибольшее внимание в [17] уделяется следующему выражению для σ_e :

$$\sigma_{e7} = \begin{cases} \gamma \sigma_{e4} + (1 - \gamma) \psi & \text{при } \sigma_1 > 0 \geq \sigma_2 = 0 \geq \sigma_3, \\ \alpha \sigma_{e1} + (1 - \alpha) \psi & \text{при } \sigma_1 > \sigma_2 \geq 0, \quad \sigma_3 = 0, \end{cases}$$

$$\psi = \begin{cases} \left(\frac{\sqrt{2}}{3}\right)^{\left(\frac{2\sigma_3}{\sigma_1}\right)} \cdot \sqrt{\sigma_1^2 - \sigma_1 \sigma_3 + \sigma_3^2} & \text{при } \sigma_3 \leq 0, \quad \sigma_2 = 0, \\ \left(\frac{1}{\sqrt{3}}\right)^{\left(\frac{2\sigma_2}{\sigma_1}\right)} \cdot \sqrt{\sigma_1^2 - \sigma_1 \sigma_2 + \sigma_2^2} & \text{при } \sigma_2 \geq 0, \quad \sigma_3 = 0. \end{cases}$$

Эквивалентное напряжение σ_{e7} представляет собой выражение, записанное только для случая плоского напряженного состояния. В связи с этим во всех расчетах пространственного напряженного состояния, существующего в относительно толстостенных трубах под внутренним давлением, эквивалентное напряжение σ_{e7} не рассматривается.

В работе [18] А.М. Коврижных с соавторами предложили критерий длительной прочности, основанный на критерии Кулона – Мора:

$$t^* = A \sigma_e^{-n}, \quad \sigma_e = \max_{\nu} [|\tau_{\nu}| + \sigma_{\nu} \operatorname{tg} \varphi],$$

здесь τ_{ν} и σ_{ν} – касательное и нормальное напряжения в плоскости с нормалью ν , дополнительная константа φ интерпретируется как угол внутреннего трения.

3. ЭКВИВАЛЕНТНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ С НЕСКОЛЬКИМИ МАТЕРИАЛЬНЫМИ КОНСТАНТАМИ

R.L. Huddleston [19] проводил испытания нержавеющей стали (стали типа 304) при необычно низкой температуре (320°С). В качестве σ_e предложено громоздкое выражение с двумя материальными константами:

$$\sigma_e = \frac{3}{2}(\sigma_1 - \sigma_{cp}) \left[\frac{2\sigma_u}{3(\sigma_1 - \sigma_{cp})} \right]^a \exp \left[b \left(\frac{3\sqrt{3}\sigma_{cp}}{\sqrt{2\sigma_u^2 + (3\sigma_{cp})^2}} - 1 \right) \right].$$

Показано, что описание представленных и других известных экспериментальных данных с помощью предложенного выражения для σ_e приводит к лучшему соответствию теоретических и экспериментальных значений t^* , чем использование выражений $\sigma_e = \sigma_{e2}$ и $\sigma_e = \sigma_{e4}$.

В.А. Маньковский [20, 21] предложил следующие варианты эквивалентного напряжения σ_e с двумя и тремя константами:

$$\sigma_e^{2n} = (\sigma_1^{2n} + \sigma_2^{2n} + \sigma_3^{2n}) - \lambda [(\sigma_1 \sigma_2)^n + (\sigma_2 \sigma_3)^n + (\sigma_3 \sigma_1)^n] \quad \text{при } \sigma_j \geq 0 \quad (j = 1, 2, 3),$$

$$\sigma_e^{2n} = \sigma_1^{2n} + \sigma_3^{2n} - \lambda \sigma_1^n \sigma_3^n, \quad \sigma_e^{2n} = \sigma_1^{2n} + \chi^{2n} |\sigma_3|^{2n} + \lambda \chi^n \sigma_1^n |\sigma_3|^n \quad \text{при } \sigma_1 \geq \sigma_2 = 0 \geq \sigma_3.$$

В работах [20, 21] приведено описание известных экспериментальных данных с помощью этих эквивалентных напряжений.



В работах [13, 22, 23, 24] И.И. Трунин, D.R. Hayhurst, G.W. Greenwood, О.Е. Ольховик и Е.О. Ольховик предложили эквивалентные напряжения с тремя константами.

В работе [13] И.И. Трунин предлагает обобщенное выражение для эквивалентного напряжения, содержащее три параметра, которые определяются при трех различных видах напряженного состояния:

$$\sigma_e = 0.5(\sigma_1 + |\sigma_1|)(1 - A)e^{\alpha(\eta-1)} + \sigma_u A e^{\beta(\eta-1)}, \quad \eta = \frac{(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)}{0.5(1 - A)(\sigma_1 + |\sigma_1|) + A\sigma_u}.$$

Параметры A , α и β , по мнению И.И. Трунина, отражают влияние микронеоднородности материала на его сопротивление макроскопическому разрушению. В работе [13] приведены также различные выражения введенного упрощения σ_e : 1) $\alpha = \beta$; 2) $\alpha = \beta$, $A = 0.5$; 3) $\beta = 0$.

С помощью этих трех упрощенных вариантов σ_e И.И. Трунин [13] обрабатывает результаты испытаний чугуна.

D.R. Hayhurst [22] в 1972 г. предложил эквивалентное напряжение с тремя константами материала:

$$\sigma_e = \alpha\sigma_1 + \beta\sigma_{cp} + \gamma\sigma_u.$$

G.W. Greenwood [23] исследовал влияние формы зерен на управляемую межзеренными границами диффузионную ползучесть. В выражении σ_e для рассмотренных им поликристаллов, по его мнению, должны фигурировать три независимых коэффициента, соответствующих размерам трех осей зерна материала.

В работе [24] О.Е. Ольховик и Е.О. Ольховик в качестве критерия длительной прочности рассмотрели формулу С.Н. Журкова:

$$t^* = t_0 \exp \left[\frac{U_0 - \gamma\sigma_e}{RT} \right],$$

в качестве σ_e они использовали предложенное ранее К.Н. Каном и Ю.С. Первушиным [25] для полимеров нелинейную комбинацию σ_{cp} и σ_u с тремя константами, в результате критерий длительной прочности принял следующую форму:

$$t^* = t_0 \exp \left[\frac{U_0 - \alpha\sigma_{cp} - \beta\sigma_{cp}^2 - \gamma\sigma_u}{RT} \right].$$

С помощью этого критерия в работе [24] проведено описание результатов известных испытаний трех марок сталей.

И.А. Биргер [26] предложил рассматривать в качестве σ_e линейную комбинацию интенсивности напряжений и главных напряжений с 4 константами:

$$\sigma_e = \lambda_0\sigma_u + \lambda_1\sigma_1 + \lambda_2\sigma_2 + \lambda_3\sigma_3.$$

W. Kissel и F. Blum [27] предложили использовать в качестве σ_e громоздкое линейное выражение с 6 константами:

$$\sigma_e = B_1\sigma_1 + B_2\sigma_2 + B_3\sigma_3 + B_4|\sigma_1| + B_5|\sigma_2| + B_6|\sigma_3|.$$

И.И. Трунин [28] рассматривает термосиловую зависимость долговечности жаропрочных материалов с помощью кинетической теории прочности твердых тел. Им предложена зависимость времени до разрушения t^* от компонент тензора напряжений и температуры, она имеет громоздкий характер и достаточно большое количество материальных констант:

$$t^* = AT^n \sigma_k^{-m/T} \exp \left\{ \frac{U_0 - m\lambda_1(\eta - 1) - \gamma\sigma_k \exp[\lambda_2(\eta - 1)]}{RT} \right\},$$

$\sigma_k = 0.5(\sigma_1 + |\sigma_1|)(1 - A_0) + \sigma_u A_0$, $\eta = \eta(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3)$, A , n , m , λ_1 , λ_2 , γ , A_0 — постоянные.

В работе [28] объяснен физический смысл вводимых констант и приведены результаты описания результатов испытаний сталей перлитного и аустенитного классов и ряда никелевых сплавов.



4. АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ЭКВИВАЛЕНТНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

В работе [29] впервые был предложен количественный метод выбора вида эквивалентного напряжения σ_e , в дальнейшем этот подход был продолжен в ряде работ А.М. Локощенко [30, 31, 8]. При этом экспериментальные данные располагались вдоль прямой в логарифмических $\lg t^*$, $\lg \sigma_e$ или полулогарифмических $\lg t^*$, σ_e координатах для каждого эквивалентного напряжения σ_e , за характеристику суммарного расхождения экспериментальных данных относительно этой прямой принималась дисперсия η расстояний опытных точек от этой прямой. Параметры этой прямой определялись из условия минимума дисперсии. В качестве истинного эквивалентного напряжения σ_e принималось то выражение $\sigma_e(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3)$, которому соответствует наименьшее значение дисперсии η . С помощью критерия Фишера анализировался вопрос о том, существенно ли различаются значения η , соответствующие различным видам σ_e . Получено условие, согласно которому для степенной или экспоненциальной зависимости $t^*(\sigma_e)$ в качестве эквивалентного напряжения для конкретной серии испытаний могут выступать один или несколько видов σ_e .

В дальнейшем был проведен анализ известных экспериментальных данных с помощью других мер суммарного расхождения экспериментальных $t_{\text{э}}^*$ и теоретических t^* значений времен разрушения [31, 32, 8]:

$$S = \sum_{k=1}^N \left[\frac{t_{\text{э}}^* - t^*(\sigma_e)}{t_{\text{э}}^* + t^*(\sigma_e)} \right]_k^2 \quad \text{и} \quad W = \sum_{k=1}^N [\lg(t^*/t_{\text{э}}^*)]_k^2,$$

N — количество испытаний в серии. Сравнительный выборочный анализ показал, что все три предложенных метода определения вида σ_e (с помощью η , S и W) приводят к одним и тем же результатам. Меры суммарного расхождения S и W имеют преимущество перед дисперсией η : применение этих мер позволяет определить не только наиболее подходящий для описания конкретной серии испытаний вид эквивалентного напряжения σ_e при заданной функции $t^*(\sigma_e)$, но и наиболее подходящий вид зависимости $t^*(\sigma_e)$ среди нескольких рассмотренных зависимостей $t^*(\sigma_e)$.

При анализе результатов испытаний в [8] в качестве эквивалентного напряжения σ_e рассматриваются четыре комбинации компонент тензора напряжений: максимальное главное напряжение σ_{e1} , интенсивность напряжений σ_{e2} , их полусумма σ_{e3} и разность максимального и минимального напряжений σ_{e4} . В качестве зависимости $t^*(\sigma_e)$ рассматривались степенная, экспоненциальная и четыре варианта дробно-степенной [33] модели длительной прочности.

Проведена статистическая обработка всех известных экспериментальных данных по длительной прочности при сложном напряженном состоянии с использованием различных эквивалентных напряжений σ_e [30–32, 8]. Показано, что условие минимального суммарного разброса с использованием статистических методов позволяет в случае плоского напряженного состояния выделить в качестве эквивалентного напряжения σ_{e3} для описания испытаний в случае $(P + M)$ и σ_{e4} для описания испытаний в случае $(P + q)$. В случае толстостенных труб, находящихся под действием внутреннего давления и дополнительной осевой силы (пространственное напряженное состояние), в качестве σ_e следует принимать осредненное значение σ_{e4} . В работе [32] показано, что в качестве критерия длительной прочности при описании известных экспериментальных данных следует отдавать предпочтение степенной модели и одному из вариантов дробно-степенной модели:

$$t^* = C\sigma_e^{-n} \quad \text{и} \quad t^* = D[(\sigma_b - \sigma_e)/\sigma_e]^m,$$

под σ_b здесь понимается предел кратковременной прочности материала при температуре испытаний.

Отмечено, что в ряде серий испытаний отдельные экспериментальные данные имеют характер случайных выбросов. Рассмотрен количественный метод исключения таких данных из рассмотрения [34]. Применение указанного метода при анализе известных серий испытаний после исключения этих данных не изменило основные выводы относительно выбора σ_e при различных видах сложных напряженных состояний.



При анализе экспериментальных данных с помощью эквивалентных напряжений, дополнительно зависящих от константы, А.М. Локощенко предложил определять значение этой константы с помощью статистического метода.

Было показано, что значения констант, фигурирующих в каждом из σ_{e5} , σ_{e6} и σ_{e7} , практически не зависят от выбора меры суммарного разброса η , S или W .

В работе [35] А.М. Локощенко и В.В. Назаров вместо критерия Фишера использовали другой способ определения предпочтительного эквивалентного напряжения среди четырех базовых видов σ_e . При этом сначала определяется σ_e , приводящее к минимальному значению W

$$W_0 = \min_{1 \leq i \leq 4} W_i,$$

а затем в качестве допустимых принимаются все виды σ_e , которым соответствуют значения W_i , удовлетворяющие неравенству

$$1.0 \leq \frac{W_i}{W_0} \leq 1.1, \quad i = 1, 2, 3, 4.$$

Этот метод отбраковки неподходящих видов σ_e и метод, основанный на использовании критерия Фишера, приводят практически к одним и тем же результатам относительно выбора эквивалентного напряжения для различных видов напряженного состояния.

Следует отметить, что все предложенные в разд. 2–3 виды эквивалентных напряжений характеризуются громоздкими выражениями. В связи с этим большинство этих видов редко используется для описания конкретных экспериментальных данных.

В [8] показано, что применение усложненных эквивалентных напряжений $\sigma_{e5} - \sigma_{e7}$ для обработки рассмотренных всех известных автору серий испытаний статистически не всегда оправданно: по сравнению с $\sigma_{e1} - \sigma_{e4}$ оно вносит дополнительные вычислительные сложности, которые, однако, не всегда приводят к значительному (с точки зрения критерия Фишера) уменьшению мер суммарного расхождения η , S и W . Поэтому следует рекомендовать при описании длительной прочности в условиях плоского напряженного состояния в качестве эквивалентного напряжения, как правило, использовать σ_{e3} при разных знаках ненулевых главных напряжений и σ_{e4} при одинаковых знаках этих напряжений.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 08-08-00407) и ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» (проект П1123).

Библиографический список

1. Работнов Ю.Н. Ползучесть элементов конструкций. М.: Наука, 1966. 752 с.
2. Johnson A.E. Complex-stress creep of metals // Metallurgical Reviews. 1960. V. 5, № 20. P. 447–506. (Джонсон. Ползучесть металлов при сложном напряжённом состоянии // Механика. Период. сб. перев. иностр. статей. 1962. № 4. С. 91–146.)
3. Локощенко А.М., Шестериков С.А. Ползучесть // Итоги науки. Сер. Механика. М.: ВИНТИ, 1965. С. 177–227.
4. Шестериков С.А., Локощенко А.М. Ползучесть и длительная прочность металлов // Итоги науки и техники. Сер. Механ. деформ. тверд. тела. М.: ВИНТИ, 1980. Т. 13. С. 3–104.
5. Браун Р.Дж., Лонсдейл Д., Флюитт П. Испытания на длительную прочность при многоосном напряжённом состоянии и анализ данных для жаропрочных сталей // Тр. Америк. о-ва инж.-механиков. Теорет. основы инж. расчетов. 1982. Т. 104, № 4. С. 56–65.
6. Писаренко Г.С., Лебедев А.А. Деформирование и прочность материалов при сложном напряжённом состоянии. Киев: Наук. думка, 1976. 415 с.
7. Лебедев А.А., Ковальчук Б.И., Гигиняк Ф.Ф., Ламашевский В.П. Механические свойства конструкционных материалов при сложном напряженном состоянии / Под общ. ред. А.А. Лебедева. Киев: Издат. дом «Ин Юре», 2003. 540 с.
8. Локощенко А.М. Моделирование процесса ползучести и длительной прочности металлов. М.: МГИУ, 2007. 264 с.



9. *Сдобырев В.П.* Длительная прочность сплава ЭИ437Б при сложном напряженном состоянии // Изв. АН СССР. Отдел. техн. наук. 1958. № 4. С. 92–97.
10. *Сдобырев В.П.* Критерий длительной прочности для некоторых жаропрочных сплавов при сложном напряженном состоянии // Изв. АН СССР. Отдел. технических наук. Механика и машиностроение. 1959. № 6. С. 93–99.
11. *Лебедев А.А.* Экспериментальное исследование длительной прочности хромоникелевой стали в условиях двухосного растяжения // Термопрочность материалов и конструкционных элементов. Киев: Наук. думка, 1965. С. 77–83.
12. *Трунин И.И.* Критерий прочности в условиях ползучести при сложном напряженном состоянии // Прикладная механика. 1965. Т. 1, вып. 7. С. 77–83.
13. *Трунин И.И.* Обобщенный критерий сопротивления разрушению материалов при сложном напряженном состоянии // Изв. вузов. Машиностроение. 1968. № 8. С. 50–55.
14. *Милейко С.Т.* Длительная прочность конструкционных материалов при сложном напряженном состоянии // Докл. АН СССР. 1976. Т. 228, № 3. С. 562–565.
15. *Локощенко А.М., Шестериков С.А.* Исследование длительной прочности металлов при сложном напряженном состоянии // Проблемы прочности. 1986. № 12. С. 3–8.
16. *Голубовский Е.Р.* Длительная прочность и критерий разрушения при сложном напряженном состоянии сплава ЭИ698ВД // Проблемы прочности. 1984. № 8. С. 11–17.
17. *Голуб В.П.* Критерии длительного разрушения изотропных материалов при плоском напряженном состоянии // Теоретическая и прикладная механика: Науч.-техн. сб. Харьков: Основа, 2002. Вып. 35. С. 3–19.
18. *Коврижных А.М., Барышников В.Д., Мананков А.В., Никитенко А.Ф.* Длительная прочность металлов и уравнения ползучести, основанные на критерии Кулона – Мора // Прикладная механика и техническая физика. 2007. Т. 48, № 6. С. 115–123.
19. *Huddleston R.L.* An improved multiaxial creep-rupture strength criterion // Trans. ASME. J. Pressure Vessel Technol. 1985. V. 107, № 4. P. 421–429.
20. *Маньковский В.А.* Длительная прочность сталей при различных напряженных состояниях // Проблемы прочности. 1984. № 1. С. 74–78.
21. *Маньковский В.А.* Критерии повреждаемости и длительной прочности конструкционных материалов // Машиноведение. 1985. № 1. С. 87–94.
22. *Hayhurst D.R.* Creep rupture under multi-axial states of stress // J. of the mechanics and physics of solids. 1972. V. 20, № 6. P. 381–390.
23. *Greenwood G.W.* Grain shape effects on interface-controlled diffusional creep under multiaxial stresses // Acta Met. Et. Mater. 1995. V. 43, № 5. P. 1811–1816.
24. *Ольховик О.Е., Ольховик Е.О.* Долговечность конструкционных материалов при объемном напряженном состоянии // Заводская лаборатория. 1997. Т. 63, № 7. С. 39–45.
25. *Кан К.Н., Первушин Ю.С.* Выбор критерия прочности для жестких термореактивных пластмасс // Механика полимеров. 1966. № 4. С. 543–549.
26. *Биргер И.А.* Об одном критерии разрушения и пластичности // Изв. РАН. Механика твердого тела. 1977. № 4. С. 143–150.
27. *Kissel W., Blum F.* Neue Festigkeitshypothese. Schweizerische Technische Zeitschrift. 1965. V. 62, № 32. P. 641–645.
28. *Трунин И.И.* Температурно-силовая зависимость сопротивления разрушению жаропрочных материалов с учетом вида напряженного состояния // Пробл. машиностр. и надежн. машин. 1995. № 3. С. 53–62.
29. *Локощенко А.М., Мякотин Е.А., Шестериков С.А.* Ползучесть и длительная прочность стали X18N10T в условиях сложного напряженного состояния // Изв. АН СССР. Механика твердого тела. 1979. № 4. С. 87–94.
30. *Локощенко А.М.* Длительная прочность металлов при сложном напряженном состоянии // Проблемы прочности. 1983. № 8. С. 55–59.
31. *Локощенко А.М.* К выбору критерия длительной прочности при сложном напряженном состоянии // Проблемы прочности. 1989. № 9. С. 3–6.
32. *Локощенко А.М., Назаров В.В., Платонов Д.О., Шестериков С.А.* Анализ критериев длительной прочности металлов при сложном напряженном состоянии // Изв. РАН. Механика твердого тела. 2003. № 2. С. 139–149.
33. *Шестериков С.А., Юмашева М.А.* Конкретизация уравнения состояния в теории ползучести // Изв. АН СССР. Механика твердого тела. 1984. № 1. С. 86–91.
34. *Локощенко А.М., Мартыненко А.И., Платонов Д.О.* Анализ критериев длительной прочности при сложном напряженном состоянии с учетом корректировки результатов испытаний // Проблемы динамики и прочности в газотурбостроении: Тез. докл. II Междунар. науч.-техн. конф. (25–27.05.2004, Киев). Киев: ИПП НАНУ, 2004. С. 119–121.
35. *Локощенко А.М., Назаров В.В.* Выбор критериев длительной прочности металлов при сложном напряженном состоянии // Авиационно-космическая техника и технология. Харьков: Изд-во Харьк. авиац. ин-та, 2004. № 7(15). С. 124–128.