

УДК 539.376

А.М. ЛОКОЩЕНКО, В.В. НАЗАРОВ

*Научный исследовательский институт механики московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, Россия*

## ВЫБОР КРИТЕРИЕВ ДЛИТЕЛЬНОЙ ПРОЧНОСТИ МЕТАЛЛОВ ПРИ СЛОЖНОМ НАПРЯЖЕННОМ СОСТОЯНИИ

Проведен детальный анализ исследований длительной прочности металлов при сложном напряженном состоянии. Выявлены особенности неоднородного напряженного состояния в толстостенных трубах, находящихся под действием внутреннего давления. Предложены способы замены возникающего в таких образцах неоднородного напряженного состояния однородным. Выбрана мера суммарного разброса экспериментальных и теоретических значений времен разрушения. Проведен количественный анализ результатов испытаний трубчатых образцов на длительную прочность. Получены критерии длительной прочности металлов для разных видов нагрузок.

**длительная прочность, сложное напряженное состояние, критерии, эквивалентное напряжение**

### Введение

В настоящее время накоплен значительный экспериментальный материал по длительной прочности металлов и сплавов при сложном напряженном состоянии [1 – 20]. Основная трудность при описании известных испытаний, полученных исследователями на разных материалах, заключается в выборе эквивалентного напряженного состояния  $\sigma_e$  и его связи с временем  $t^*$  разрушения. Решение этой проблемы имеет важное прикладное значение в расчетах на долговечность металлических конструкций, работающих при повышенных температурах.

Исследование длительной прочности металлов в условиях сложного напряженного состояния обычно проводится на трубчатых образцах, нагруженных осевой силой  $P$ , крутящим моментом  $M$  и внутренним давлением  $q$  в различных комбинациях.

В данной работе приводится анализ количественной обработки всех известных в литературе результатов испытаний на длительную прочность для металлов и сплавов.

### 1. Постановка задачи

При прогнозировании времени  $t^*$  в качестве  $\sigma_e$  используются различные скалярные характеристики

тензора напряжений и их линейные комбинации. Здесь рассматриваются шесть комбинаций главных напряжений  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  ( $\sigma_1 > \sigma_2, \sigma_3 \leq 0$ ): четыре базовых  $\sigma_e$  ( $\sigma_{e1} - \sigma_{e4}$ ) и два дополнительных вида  $\sigma_e$  ( $\sigma_{e5}$  и  $\sigma_{e6}$ ).

В качестве основных видов  $\sigma_e$  рассматриваются максимальное главное напряжение  $\sigma_{e1}$ , интенсивность напряжений  $\sigma_{e2}$ , их полусумма  $\sigma_{e3}$  (критерий В.П. Сдобырева [4]), разность максимального и минимального главных напряжений  $\sigma_{e4}$ .

В дополнительные виды  $\sigma_e$  входят константы  $\chi, \zeta$ : линейная комбинация  $\sigma_{e1}$  и  $\sigma_{e2}$  (критерий А.А. Лебедева [21]):

$$\sigma_{e5} = \chi \sigma_{e2} + (1 - \chi) \sigma_{e1}, \quad 0 \leq \chi \leq 1$$

и кусочно-линейная комбинация максимального и минимального главных напряжений (критерий А.М. Локощенко и С.А. Шестерикова [22]):

$$\sigma_{e6} = \sigma_{e1} - \zeta (\sigma_{\min} - |\sigma_{\min}|), \quad 0 \leq \zeta \leq 0,5.$$

При присвоении константе  $\chi$  значений 0, 0,5 и 1,  $\sigma_{e5}$  примет виды  $\sigma_{e1}$ ,  $\sigma_{e3}$  и  $\sigma_{e2}$ ; при  $\zeta = 0$  и  $\zeta = 0,5$ ,  $\sigma_{e6}$  совпадает соответственно с  $\sigma_{e1}$  и  $\sigma_{e4}$ .

Большинство рассматриваемых испытаний проводилось на тонкостенных образцах, у которых отношение  $\beta$  внешнего диаметра  $D$  к внутреннему  $d$  изменялось в диапазоне 1,05 – 1,10. В этом случае изменением значений тензора напряжений по сечению образца пренебрегают, т.е. считают такое на-

пряженное состояние однородным. При обработке результатов испытаний тонкостенных образцов полагается  $\sigma_3 = 0$ . В этом случае эквивалентные напряжения принимают следующий вид:

$$\sigma_{e1} = \sigma_1, \sigma_{e2} = \sqrt{\sigma_1^2 - \sigma_1\sigma_2 + \sigma_2^2};$$

$$\sigma_{e3} = \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_{e2}), \sigma_{e4} = \max(\sigma_1, \sigma_1 - \sigma_2).$$

В случаях, когда в качестве образцов использовались трубы достаточно большой толщины, при которой  $\beta$  достигает порядка 1,3, напряженное состояние в таких образцах является неоднородным. Существуют различные способы приведения неоднородного напряженного состояния к однородному:

1. В качестве величин, характеризующих неоднородное напряженное состояние в толстостенной трубе, рассмотрим интегральные средние значения тензора напряжений  $\sigma_{ij}$ . Пусть  $S$  – площадь поперечного сечения трубы,  $\mu$  – показатель ползучести и  $r$  – радиус произвольной точки сечения. По определению интегрального среднего значения имеем

$$\overline{\sigma_{ij}}(\mu, \beta) = \frac{1}{S} \int_S \sigma_{ij}(\mu, \beta, r) dS. \quad (1)$$

Подставляя решение [23] в (1), находим средние главные напряжения  $\overline{\sigma_{ij}}$  в сечении толстостенной трубы:

$$\overline{\sigma_r} = \frac{q}{\mu - 1} \left( \frac{\mu}{\beta^2 - 1} - \frac{1}{\frac{2}{\beta^\mu - 1}} \right);$$

$$\overline{\sigma_\theta} = \frac{q}{\mu - 1} \left( \frac{\mu - 2}{\beta^2 - 1} + \frac{1}{\frac{2}{\beta^\mu - 1}} \right); \quad \overline{\sigma_z} = \frac{q}{\beta^2 - 1}.$$

2. Рассмотрим максимальные главные напряжения  $(\sigma_\theta)_{\max}, (\sigma_z)_{\max}, (\sigma_r)_{\max}$ , в сечении толстостенной трубы. Исследование решения [21] с показателем установившейся ползучести  $\mu \geq 3$  показывает, что наибольшее значение тензор напряжений  $\sigma_{ij}(\mu, r)$  принимает на внешнем диаметре  $D$ :

$$(\sigma_z)_{\max} = \frac{q}{\mu \left( \frac{2}{\beta^\mu} - 1 \right)};$$

$$(\sigma_\theta)_{\max} = 2(\sigma_z)_{\max}; \quad (\sigma_r)_{\max} = 0.$$

В случае испытаний при комбинации внутреннего давления  $q$  и растягивающей силы  $P$ , в расчетах напряженного состояния к осевому напряжению  $\sigma_z$  добавляется величина

$$\frac{4P}{\pi d^2 (\beta^2 - 1)}.$$

Представляет интерес сравнить результаты количественной обработки экспериментальных данных на основе рассмотренных способов замены неоднородного напряженного состояния однородным.

## 2. Методика количественной обработки

В качестве связи эквивалентного напряжения  $\sigma_e$  и времени разрушения  $t^*$  были рассмотрены степенная и дробно-степенная зависимости:

$$t^* = C \sigma_e^{-n}; \quad t^* = D \left( \frac{\sigma_b - \sigma_e}{\sigma_e} \right)^m,$$

где  $C, n, D, m$  – параметры длительной прочности;  $\sigma_b$  – величина, аналогичная кратковременной прочности и зависящая от вида  $\sigma_e$ .

Параметры длительной прочности вычислялись итерационным методом Ньютона-Рафсона. За меру разброса экспериментальных данных относительно аналитической прямой (кривой) в логарифмических координатах  $\lg t^*, \lg \sigma_e$  была принята величина

$$\eta = \frac{\sum_{i=1}^N \left( \lg(t_{\text{теор}}^*)_i - \lg(t_{\text{экспер}}^*)_i \right)^2}{N - 1},$$

где  $N$  – количество опытов в серии.

Для каждого вида  $\sigma_e$  параметры длительной прочности вычисляются в результате минимизации величины разброса  $\eta$ . Пусть  $k$  – форма  $\sigma_e$ , тогда за критерий длительной прочности в каждой серии испытаний принимаем те  $\sigma_e$ , которые удовлетворяют следующему неравенству:

$$\frac{\eta_k}{\min \eta_k} \leq 1,1, \quad k = 1, \dots, 6.$$

### 3. Анализ результатов

В табл. 1 приведены характеристики испытаний. Указываются литературный источник, марка металла или сплава, температура испытаний  $T$ . При  $j = 1 - 16$  указаны характеристики испытаний тонкостенных трубчатых образцов при комбинации растяжения и кручения,  $j = 17 - 24$  и  $j = 26 - 28$  относятся к испытаниям труб при комбинации растяжения и внутреннего давления, в  $j = 25$  прямоугольные пластины подвергали одноосному и двухосному растяжению. В табл. 2 – 4 помещены эквивалентные напряжения  $\sigma_e$  в порядке увеличения меры разброса  $\eta$ . Анализ табл. 2 показывает, что при описании испытаний в случае растяжения кручения трубчатых образцов предпочтительно в качестве  $\sigma_e$  использовать выражения  $\sigma_{e3}$  и  $\sigma_{e5}$ . Сравнивая результаты количественной обработки в табл. 3 и 4 для толстостенных труб, находим, что почти во всех случаях оба указанных способа замены неоднородного напряженного состояния однородным при отыскании критерия длительной прочности приводят к одному и тому же результату. Анализ табл. 3 – 4 показывает, что при описании испытаний трубчатых

образцов на растяжение и внутреннее давление за критерий длительной прочности следует принять выражения  $\sigma_{e4}$  и  $\sigma_{e6}$ , а расчете толстостенных труб в максимальных главных напряжениях лучше использовать  $\sigma_{e1}$ .

Таблица 1

Характеристики испытаний

j	Материал	T °C	Ссылка на литературу
1	Медь	250	[1]
2	Сплав ЭИ437Б	700	[2]
3	Сталь ЭИ694	700	[3]
4	Сплав ЭИ437Б	700	[4]
5	Сплав RR59	200	[5]
6	Сталь 15X1M1Ф	570	[6]
7	Сталь 1X18H12T	610	[6]
8	Сплав ЭИ787	700	[7]
9	Сплав Д16Т	250	[8]
10	Сталь X18H10T	850	[9]
11	Сталь ЭП182	525	[10]
12	Сплав ЭИ698ВД	650	[11]
13	Сплав ЭИ698ИД	700	[11]
14	Сплав ЭИ698ВД	750	[11]
15	Сплав ЖС (Ni)	900	[12]
16	Сплав ЖС (Ni)	1000	[12]
17	Сталь SA 210	510	[13]
18	Сталь 20	500	[14]
19	Сталь 1X18H9T(A)	650	[15]
20	Сталь 1X18H9T(Б)	650	[15]
21	Сталь ЭИ694	700	[3]
22	Сталь 12ХМФ	590	[16]
23	Сталь 12МХФ	595	[17]
24	Сталь 1X18H9T	520	[18]
25	Сплав Al–Mg–Si	210	[19]
26	Сталь X18H10T	850	[9]
27	Сталь 12CMVW	575	[20]
28	Сталь 1СМ	575	[20]

Таблица 2

Выбор критерия длительной прочности при комбинации растяжения  $P$  и кручения  $M$ 

j	Критерии длительной прочности расположены в порядке возрастания величины $\eta$											
	степенная функция $t^*$						дробно-степенная функция $t^*$					
1	$\sigma_{e1}$	$\sigma_{e3}$	$\sigma_{e2}$	$\sigma_{e4}$			$\sigma_{e1}$	$\sigma_{e3}$	$\sigma_{e2}$	$\sigma_{e4}$		
2	$\sigma_{e5}$	$\sigma_{e6}$	$\sigma_{e1}$	$\sigma_{e3}$	$\sigma_{e2}$	$\sigma_{e4}$	$\sigma_{e5}$	$\sigma_{e6}$	$\sigma_{e3}$	$\sigma_{e1}$	$\sigma_{e2}$	$\sigma_{e4}$
3	$\sigma_{e6}$	$\sigma_{e5}$	$\sigma_{e3}$	$\sigma_{e2}$	$\sigma_{e4}$	$\sigma_{e1}$	$\sigma_{e6}$	$\sigma_{e5}$	$\sigma_{e3}$	$\sigma_{e2}$	$\sigma_{e4}$	$\sigma_{e1}$
4	$\sigma_{e5}$	$\sigma_{e3}$	$\sigma_{e6}$	$\sigma_{e2}$	$\sigma_{e1}$	$\sigma_{e4}$	$\sigma_{e3}$	$\sigma_{e6}$	$\sigma_{e2}$	$\sigma_{e4}$	$\sigma_{e1}$	
5	$\sigma_{e6}$	$\sigma_{e4}$	$\sigma_{e2}$	$\sigma_{e3}$	$\sigma_{e1}$		$\sigma_{e6}$	$\sigma_{e2}$	$\sigma_{e4}$	$\sigma_{e3}$	$\sigma_{e1}$	
6	$\sigma_{e5}$	$\sigma_{e3}$	$\sigma_{e6}$	$\sigma_{e2}$	$\sigma_{e4}$	$\sigma_{e1}$	$\sigma_{e5}$	$\sigma_{e6}$	$\sigma_{e3}$	$\sigma_{e1}$	$\sigma_{e2}$	$\sigma_{e4}$
7	$\sigma_{e5}$	$\sigma_{e3}$	$\sigma_{e6}$	$\sigma_{e2}$	$\sigma_{e4}$	$\sigma_{e1}$	$\sigma_{e5}$	$\sigma_{e6}$	$\sigma_{e3}$	$\sigma_{e2}$	$\sigma_{e1}$	$\sigma_{e4}$
8	$\sigma_{e5}$	$\sigma_{e6}$	$\sigma_{e3}$	$\sigma_{e1}$	$\sigma_{e2}$	$\sigma_{e4}$	$\sigma_{e3}$	$\sigma_{e6}$	$\sigma_{e1}$	$\sigma_{e2}$	$\sigma_{e4}$	
9	$\sigma_{e4}$	$\sigma_{e2}$	$\sigma_{e3}$	$\sigma_{e1}$			$\sigma_{e4}$	$\sigma_{e2}$	$\sigma_{e3}$	$\sigma_{e1}$		
10	$\sigma_{e6}$	$\sigma_{e5}$	$\sigma_{e3}$	$\sigma_{e1}$	$\sigma_{e2}$	$\sigma_{e4}$	$\sigma_{e1}$	$\sigma_{e3}$	$\sigma_{e2}$	$\sigma_{e4}$		
11	$\sigma_{e1}$	$\sigma_{e3}$	$\sigma_{e2}$	$\sigma_{e4}$			$\sigma_{e5}$	$\sigma_{e6}$	$\sigma_{e1}$	$\sigma_{e3}$	$\sigma_{e2}$	$\sigma_{e4}$
12	$\sigma_{e1}$	$\sigma_{e3}$	$\sigma_{e2}$	$\sigma_{e4}$			$\sigma_{e6}$	$\sigma_{e5}$	$\sigma_{e3}$	$\sigma_{e2}$	$\sigma_{e1}$	$\sigma_{e4}$
13	$\sigma_{e6}$	$\sigma_{e5}$	$\sigma_{e2}$	$\sigma_{e4}$	$\sigma_{e3}$	$\sigma_{e1}$	$\sigma_{e6}$	$\sigma_{e2}$	$\sigma_{e5}$	$\sigma_{e3}$	$\sigma_{e4}$	$\sigma_{e1}$
14	$\sigma_{e5}$	$\sigma_{e6}$	$\sigma_{e3}$	$\sigma_{e2}$	$\sigma_{e4}$	$\sigma_{e1}$	$\sigma_{e5}$	$\sigma_{e6}$	$\sigma_{e2}$	$\sigma_{e3}$	$\sigma_{e4}$	$\sigma_{e1}$
15	$\sigma_{e5}$	$\sigma_{e2}$	$\sigma_{e6}$	$\sigma_{e3}$	$\sigma_{e4}$	$\sigma_{e1}$	$\sigma_{e5}$	$\sigma_{e2}$	$\sigma_{e6}$	$\sigma_{e4}$	$\sigma_{e3}$	$\sigma_{e1}$
16	$\sigma_{e5}$	$\sigma_{e6}$	$\sigma_{e3}$	$\sigma_{e2}$	$\sigma_{e1}$	$\sigma_{e4}$	$\sigma_{e6}$	$\sigma_{e5}$	$\sigma_{e3}$	$\sigma_{e2}$	$\sigma_{e4}$	$\sigma_{e1}$

Таблица 3

Выбор критерия длительной прочности при комбинации растяжения Р и внутреннего давления q в средних главных напряжениях

j	Критерии длительной прочности расположены в порядке возрастания величины $\eta$											
	степенная функция $t^*$						дробно-степенная функция $t^*$					
17	$\sigma_{e6}$	$\sigma_{e4}$	$\sigma_{e1}$	$\sigma_{e3}$	$\sigma_{e2}$		$\sigma_{e1}$	$\sigma_{e4}$	$\sigma_{e3}$	$\sigma_{e2}$		
18	$\sigma_{e6}$	$\sigma_{e4}$	$\sigma_{e1}$	$\sigma_{e3}$	$\sigma_{e2}$		$\sigma_{e6}$	$\sigma_{e4}$	$\sigma_{e1}$	$\sigma_{e3}$	$\sigma_{e2}$	
19	$\sigma_{e4}$	$\sigma_{e1}$	$\sigma_{e3}$	$\sigma_{e2}$			$\sigma_{e4}$	$\sigma_{e1}$	$\sigma_{e3}$	$\sigma_{e2}$		
20	$\sigma_{e4}$	$\sigma_{e1}$	$\sigma_{e3}$	$\sigma_{e2}$			$\sigma_{e4}$	$\sigma_{e1}$	$\sigma_{e3}$	$\sigma_{e2}$		
21	$\sigma_{e4}$	$\sigma_{e1}$	$\sigma_{e3}$	$\sigma_{e2}$			$\sigma_{e4}$	$\sigma_{e1}$	$\sigma_{e3}$	$\sigma_{e2}$		
22	$\sigma_{e4}$	$\sigma_{e1}$	$\sigma_{e3}$	$\sigma_{e2}$			$\sigma_{e4}$	$\sigma_{e1}$	$\sigma_{e3}$	$\sigma_{e2}$		
23	$\sigma_{e2}$	$\sigma_{e4}$	$\sigma_{e3}$	$\sigma_{e1}$			$\sigma_{e5}$	$\sigma_{e2}$	$\sigma_{e3}$	$\sigma_{e6}$	$\sigma_{e4}$	$\sigma_{e1}$
24	$\sigma_{e5}$	$\sigma_{e3}$	$\sigma_{e2}$	$\sigma_{e1}$			$\sigma_{e5}$	$\sigma_{e3}$	$\sigma_{e2}$	$\sigma_{e1}$		
25	$\sigma_{e1}$	$\sigma_{e3}$	$\sigma_{e2}$				$\sigma_{e1}$	$\sigma_{e3}$	$\sigma_{e2}$			
26	$\sigma_{e1}$	$\sigma_{e3}$	$\sigma_{e2}$				$\sigma_{e1}$	$\sigma_{e3}$	$\sigma_{e2}$			
27	$\sigma_{e5}$	$\sigma_{e1}$	$\sigma_{e3}$	$\sigma_{e2}$	$\sigma_{e4}$		$\sigma_{e2}$	$\sigma_{e3}$	$\sigma_{e1}$	$\sigma_{e4}$		
28	$\sigma_{e4}$	$\sigma_{e1}$	$\sigma_{e3}$	$\sigma_{e4}$			$\sigma_{e6}$	$\sigma_{e5}$	$\sigma_{e1}$	$\sigma_{e3}$	$\sigma_{e2}$	$\sigma_{e4}$

Таблица 4

Выбор критерия длительной прочности при комбинации растяжения Р и внутреннего давления q в максимальных главных напряжениях

j	Критерии длительной прочности расположены в порядке возрастания величины $\eta$							
	степенная функция $t^*$				дробно-степенная функция $t^*$			
17	$\sigma_{e1}$	$\sigma_{e3}$	$\sigma_{e2}$		$\sigma_{e5}$	$\sigma_{e1}$	$\sigma_{e3}$	$\sigma_{e2}$
18	$\sigma_{e1}$	$\sigma_{e3}$	$\sigma_{e2}$		$\sigma_{e1}$	$\sigma_{e3}$	$\sigma_{e2}$	
19	$\sigma_{e1}$	$\sigma_{e3}$	$\sigma_{e2}$		$\sigma_{e1}$	$\sigma_{e3}$	$\sigma_{e2}$	
20	$\sigma_{e1}$	$\sigma_{e3}$	$\sigma_{e2}$		$\sigma_{e1}$	$\sigma_{e3}$	$\sigma_{e2}$	
21	$\sigma_{e1}$	$\sigma_{e3}$	$\sigma_{e2}$		$\sigma_{e1}$	$\sigma_{e3}$	$\sigma_{e2}$	
22	$\sigma_{e1}$	$\sigma_{e3}$	$\sigma_{e2}$		$\sigma_{e1}$	$\sigma_{e3}$	$\sigma_{e2}$	
23	$\sigma_{e2}$	$\sigma_{e3}$	$\sigma_{e1}$		$\sigma_{e2}$	$\sigma_{e3}$	$\sigma_{e1}$	
27	$\sigma_{e2}$	$\sigma_{e3}$	$\sigma_{e1}$		$\sigma_{e5}$	$\sigma_{e3}$	$\sigma_{e1}$	$\sigma_{e2}$
28	$\sigma_{e1}$	$\sigma_{e3}$	$\sigma_{e2}$		$\sigma_{e5}$	$\sigma_{e1}$	$\sigma_{e3}$	$\sigma_{e2}$

### Заключение

Приведенная методика может быть использована для нахождения параметров длительной прочности многих металлов и сплавов. Также можно отметить, что выражения  $\sigma_{e5}$  и  $\sigma_{e6}$  ненамного лучше  $\sigma_{e3}$  и  $\sigma_{e4}$  описывают эксперимент. Поэтому введение дополнительной константы в  $\sigma_e$  представляется нецелесообразным.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант №02-01-00257).

### Литература

1. Johnson A.E., Henderson J., Mathur V.D. Combined stress creep fracture of a commercial copper at 250 °C. Part 1 // The Engineer. – 1956. – V. 202, № 5248. – P. 261 – 265.
2. Сдобырев В.П. Длительная прочность сплава ЭИ437Б при сложном напряженном состоянии // Известия АН СССР. – 1958. – № 4. – С. 92 – 97.
3. Зверьков Б.В. Длительная прочность труб при сложных нагрузках // Теплоэнергетика. – 1958. – № 3. – С. 51 – 54.

4. Сдобырев В.П. Критерий длительной прочности для некоторых жаропрочных сплавов при сложном напряженном состоянии // Известия АН СССР ОТН 1959. – № 6. – С. 93 – 99.
5. Johnson A.E., Henderson J., Mathur V.D. Complex stresses creep fracture of an aluminium alloy // Aircraft Eng., – 1960. – V. 32, № 376. – P. 161 – 170.
6. Трунин И.И. Оценка сопротивления длительному разрушению и некоторые особенности деформирования при сложном напряженном состоянии // Журнал прикладной механики технической физики. – 1963. – № 1. – С. 110 – 114.
7. Сдобырев В.П. Ползучесть и длительная прочность при растяжении с кручением // Инженерный журнал АН СССР. – 1963. – Т. 3, № 2. – С. 413 – 416.
8. Соснин О.В., Горев Б.В., Никитенко А.Ф. К обоснованию энергетического варианта теории ползучести. Сообщение 1. Основные гипотезы и их экспериментальная проверка // Проблемы прочности. – 1976. – № 11. – С. 3 – 8.
9. Локощенко А.М., Мякотин Е.А., Шестериков С.А. Ползучесть и длительная прочность стали X18H10T в условиях сложного напряженного состояния // Изв. АН СССР МТТ. – 1979. – № 4. – С. 87 – 94.
10. Павлов П.А., Курилович Н.Н. Длительное разрушение жаропрочных сталей при нестационарном нагружении // Проблемы прочности. – 1982. – № 2. – С. 44 – 47.
11. Голубовский Е.Р. Длительная прочность и критерий разрушения при сложном напряженном состоянии сплава ЭИ698ВД // Проблемы прочности. – 1984. – № 8. – С. 11 – 17.
12. Голубовский Е.Р., Подъячев А.П. Оценка длительной прочности при сложном напряженном состоянии никелевых сплавов с поликристаллической и монокристаллической структурой // Проблемы прочности. – 1991. – № 6. – С. 17 – 22.
13. Kooistra L.F., Blaser R.U., Tucker J.T. High temperature stress rupture testing of tubular specimens // Trans. ASME. – 1952. – V. 74, № 5. – P. 783 – 792.
14. Кац Ш.Н. Исследование длительной прочности углеродистых труб // Теплоэнергетика. – 1955. – № 11. – С. 37 – 40.
15. Кац Ш.Н. Разрушение аустенитных труб под действием внутреннего давления в условиях ползучести // Энергомашиностроение. – 1957. – № 2. – С. 2 – 5.
16. Лагунцов И.Н., Святославов В.К. Испытание пароперегревательных труб из стали 12ХМФ на длительную прочность // Теплоэнергетика. – 1959. – № 7. – С. 55 – 59.
17. Кац Ш.Н. Влияние добавочных осевых усилий на длительную прочность котельных труб // Теплоэнергетика. – 1960. – № 5. – С. 12 – 16.
18. Лебедев А.А. Экспериментальное исследование длительной прочности хромоникелевой стали в условиях двухосного растяжения // Термопрочность материалов и конструкционных элементов. – К.: Наук. думка. – 1965. – С. 77 – 83.
19. Hayhurst D. R. Creep rupture under multi-axial states of stress // Journal of the mechanics and physics of solids. – 1972. – V. 20, № 6. – P. 381 – 390.
20. Brown R.J., Lonsdale, Flewitt The role of stress state on the creep rupture of 1% Cr 1/2% Mo and 12% Cr 1% Mo VW tube steels // Creep and fract. Eng. Mater. And struct. Proc. Int. conf. Swansea (24–27. 3.1981). – Swansea. – 1981. – P. 545 – 558.
21. Лебедев А.А. Обобщенный критерий длительной прочности // Термопрочность материалов и конструкций элементов. – К.: Наук. думка, 1965. – С. 69 – 76.
22. Локощенко А.М., Шестериков С.А. Исследование длительной прочности металлов при сложном напряженном состоянии // Проблемы прочности. – 1986. – № 12. – С. 3 – 8.
23. Работнов Ю.Н. Ползучесть элементов конструкций. – М.: Наука, 1966. – 752 с.

*Поступила в редакцию 26.05.2004*

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. Е.Р. Голубовский, ЦИАМ им. П.И. Баранова, Москва.