

ПОЛЗУЧЕСТЬ И ДЛИТЕЛЬНАЯ ПРОЧНОСТЬ СТАЛИ X18H10T В УСЛОВИЯХ СЛОЖНОГО НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ

А. М. ЛОКОЩЕНКО, Е. А. МЯКОТИН, С. А. ШЕСТЕРИКОВ

(Москва)

В настоящее время существует относительно небольшое количество надежных экспериментальных данных по ползучести и длительной прочности металлов в условиях сложного напряженного состояния. Это объясняется во многом тем, что постановка исследований такого рода представляет собой технически очень сложную задачу. Ряд данных имеется в [1-11] и других (см. библиографию в [10]). Чаще всего в качестве критериев длительной прочности (по аналогии с кратковременными испытаниями) выступают оценки по наибольшему нормальному напряжению σ_{\max} [2] и по интенсивности касательных напряжений σ_i [5]. В некоторых работах [6, 10] предлагаются критерии длительной прочности в виде комбинации σ_{\max} и σ_i .

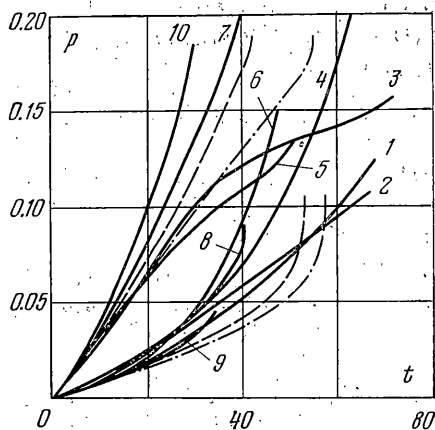
Ограниченность и разрозненность фактического материала приводят к тому, что вопрос о формулировке механического уравнения состояния и кинетических уравнений, позволяющих учитывать процесс разрушения в условиях сложного напряженного состояния, практически остается открытым. Если базироваться на существующих экспериментальных данных, то пока можно ставить вопрос только об оценке условия длительной прочности при неизменном во времени напряженном состоянии, так как даже при одноосном напряженном состоянии простейшие оценки типа [12], проведенные для описания всего процесса деформирования, приводят к очень сложным соотношениям.

С учетом изложенного выше в данной работе проведено сопоставление применимости некоторых известных критериев длительной прочности к экспериментальным данным, полученным в Институте механики МГУ. Были испытаны тонкостенные трубчатые образцы при осевом растяжении в сочетании либо с поперечным растяжением под действием внутреннего давления, либо с кручением. Кроме того, проводились испытания при чистом растяжении. Во всех случаях испытания проводились при постоянных нагрузках. Материал образцов — нержавеющей сталь X18H10T двух плавов. Образцами служили трубки с внутренним диаметром 11 мм, толщиной стенки 0,5 мм и рабочей длиной 70–100 мм. Температура во время испытаний была постоянной и равной 850°С.

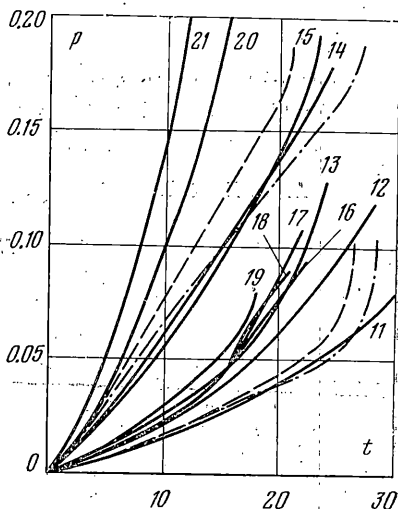
Эксперименты при чистом растяжении, а также при совместном действии растяжения с кручением проводились на созданных в МГУ установках, обеспечивающих независимое задание постоянных во времени растягивающей нагрузки и крутящего момента. Деформации растяжения и сдвига определяются при помощи тензодатчиков, которые наклеены на упругие элементы, механически связанные с образцом и вынесенные из печи. Исследование длительной прочности образцов при сочетании с внутренним давлением проводилось на установках, в которых осевое нагружение создавалось при помощи грузов, а поперечное — при помощи сжатого газа, подаваемого в полость образца. Испытания образцов проводились при постоянных нагрузках.

1. Рассмотрим результаты одноосных испытаний. На фиг. 1–4 сплошными линиями проведены кривые одноосной ползучести $p(t)$ при начальных напряжениях σ_0 , равных соответственно 40, 50, 60 и 80 МПа (всего на одноосную ползучесть испытано 29 образцов, в том числе 21 образец плавки (а) и восемь образцов плавки (б); около каждой кривой указан номер соответствующего образца; время t измерялось в часах). При $\sigma_0=40$ МПа испытано шесть образцов плавки (а) и четыре образца плавки (б), при

$\sigma_0 = 50$ МПа — соответственно семь и четыре образца. При $\sigma_0 = 60$ и 80 МПа испытывались только образцы плавки (а). Кривые ползучести на фиг. 1, 2 при малых значениях времени t разбиваются на два пучка, соответствующие образцам плавки (а) и (б). Образцы из плавки (а) характеризуются меньшими деформациями ползучести, чем образцы из плавки (б). Осредненные данные испытаний образцов каждой плавки при одинако-



Фиг. 1



Фиг. 2

вых напряжениях приведены ниже (g — вид плавки).

g	σ_0	p^*	t^*	t^{*0}	t^{**}
(а)	40	0.126	54	53	58
	50	0.100	23.5	26	28
	60	0.082	15.5	14.5	16
	80	0.124	6	5.8	6.3
(б)	40	0.175	48	43	56
	50	0.201	19	21	27

Под t^* понимается определенное экспериментально время до разрушения, а под p^* — деформация в момент t^* .

Если принять, что зависимость скорости \dot{p}^* установившейся ползучести от напряжения σ выражается степенной функцией $\dot{p}^* = D\sigma^n$ с константами материала D и n , и определить эти константы методом наименьших квадратов, то получим для них следующие значения: для плавки (а) $n = 3.2$, $D = 0.63 \cdot 10^{-8} \text{ ч}^{-1} \text{ МПа}^{-3.2}$; для плавки (б) $n = 3.2$, $D = 2.46 \cdot 10^{-8} \text{ ч}^{-1} \text{ МПа}^{-3.2}$.

Следуя [1-3], будем описывать процесс разрушения при ползучести введением параметра $\omega(t)$, характеризующего степень поврежденности материала. Как обычно, принимается $\omega(0) = 0$ и $\omega(t^*) = 1$. Тогда соотношения одноосной ползучести без упрочнения имеют вид

$$\dot{p}^* = F(\sigma, \omega), \quad \dot{\omega} = \Phi(\sigma, \omega) \quad (1.1)$$

Так как испытания проводились при постоянных нагрузках, то, вводя гипотезу о равномерном распределении деформаций по длине образца, при малых деформациях будем иметь

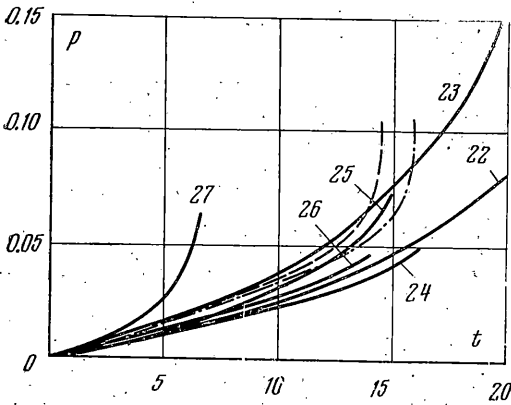
$$\sigma(t) = (1+p)\sigma_0 \quad (1.2)$$

Соотношения (1.1) с учетом (1.2) выберем в следующем виде:

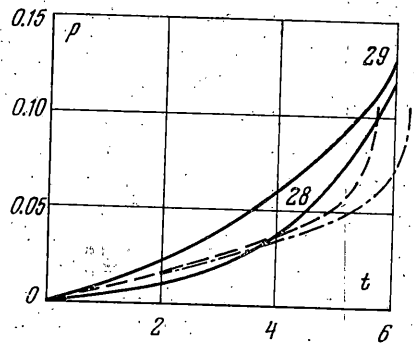
$$\begin{aligned} p^* &= A[(1+p)\sigma_0/(1-\omega^{r_1})]^n, \quad p(0)=0 \\ \omega^* &= B[(1+p)\sigma_0/(1-\omega^{r_2})]^k, \quad \omega(0)=0 \end{aligned} \quad (1.3)$$

Константы A и n определяются из данных по установившейся ползучести; константы B , k , r_1 и r_2 остаются пока свободными параметрами. Для простоты положим $r_1=r_2=r$.

В исследованном диапазоне напряжений ($\sigma_0=40-80$ МПа) скорость установившейся ползучести p^* изменяется на порядок, а деформация p^*



Фиг. 3



Фиг. 4

в момент разрушения меняется незначительно, причем немонотонно (см. приведенные выше данные). В связи с этим можно принять, что $p^*(\sigma_0) = \text{const}$. Если предположить, что $k=n$, то это условие выполняется. При этом интегрирование системы (1.3) приводит к тому, что зависимости $p(t)$ и $\omega(t)$ пропорциональны

$$p(t) = A\omega(t)/B, \quad p^* = p(t^*) = A/B \quad (1.4)$$

Для плавки (а) среднее значение $p^*=0.1$ и $B=0.6 \cdot 10^{-7} \text{ ч}^{-1} \text{ МПа}^{-3.2}$. Аналогично для плавки (б) имеем $p^*=0.19$, $B=1.3 \cdot 10^{-7} \text{ ч}^{-1} \text{ МПа}^{-3.2}$. Параметр r определяется из условия соответствия экспериментальных и теоретических значений времен разрушения t^* . Из (1.3) следует

$$B\sigma_0^n t^* = I(r) = \int_0^1 \left(\frac{1-\omega^r}{1+A\omega/B} \right)^n d\omega \quad (1.5)$$

Среднее для плавки (а) значение функции $I(r)$ равно 0.423, для плавки (б) — $I(r)=0.75$. Строим функцию $I(r)$ и находим, что для плавки (а) $r=2.1$, а для плавки (б) $r=73$. Кривые ползучести, соответствующие растяжению образца постоянной силой, определяются уравнением

$$t = (A\sigma_0^n)^{-1} \int_0^p \left[1 - \left(\frac{Bp}{A} \right)^r \right]^n (1+p)^{-n} dp \quad (1.6)$$

Эти кривые нанесены на фиг. 1–4 пунктиром. Значения t^{*0} , вычисленные по уравнению (1.6), приведены выше.

Для оценки влияния переменности напряжений в условиях постоянной нагрузки на фиг. 1–4 штрихпунктиром нанесены кривые ползучести, со-

β_1	σ_1	σ_2	σ_{\max}	σ_i	$2\tau_{\max}$	t^*	t_0^*	σ	τ
первая серия:									
1-10	40	0	40	40	40	68, 67, 67, 66, 50, 47, 43, 40, 36, 30, 5	51.3	-	-
11-21	50	0	50	50	50	30, 28, 24, 24, 23, 22.5, 21.5, 20.5, 18, 16, 12	21.8	-	-
22-27	60	0	60	60	60	20.5, 20, 16, 15, 14, 6, 7	15.4	-	-
28-29	80	0	80	80	80	6, 6	6	-	-
вторая серия:									
30-32	33.6	-3.6	33.6	35.5	37.2	77, 65, 43	61.8	30	10.9
33	35.5	-5.5	35.5	38.5	41	70	70	30	14.4
34	40	-20	40	52.9	60	50	50	20	28.3
35-37	40.5	-0.5	40.5	40.7	41	25, 24.5, 23	24.2	40	4.5
38-41	41.2	-1.2	41.2	41.8	42.4	30.5, 30, 27, 20	26.9	30	6.9
42	50	-20	50	62.4	70	24	24	30	31.6
43-44	52.8	-2.8	52.8	54.2	55.6	14.5, 11.5	13	50	12.2
45	56.2	-1.2	56.2	56.8	57.4	15	15	60	7.7
46-51	60.5	-0.5	60.5	60.7	61	15, 11, 10, 9, 6, 5	9.3	60	5.3
52-53	66.1	-1.1	66.1	66.7	67.2	5, 4	4.5	65	8
третья серия:									
54-55	20	10	20	17.3	20	238, 195	216.5	-	-
56-57	20	20	20	20	20	329, 316	322.5	-	-
58-59	50	20	50	43.6	50	17, 12.5	14.75	-	-
60-61	50	40	50	45.8	50	33.5, 20.5	27	-	-
62	50	50	50	50	50	8.3	8.3	-	-
63-64	56	28	56	48.5	56	10, 5.2	7.6	-	-
65-66	60	20	60	52.9	60	16, 10.6	13.3	-	-
67	60	40	60	52.9	60	27	27	-	-
68	60	60	60	60	60	5.1	5.1	-	-
69	64	55	64	60	64	7.6	7.6	-	-

ответствующие постоянным напряжениям. Величины t^{**} времен разрушения при этом условии также приведены выше. Очевидно, что учет переменности напряжений в рассматриваемом случае не имеет принципиального значения, а в количественном отношении практически укладывается в полосу разброса экспериментальных данных.

2. Проведем анализ результатов испытаний на длительную прочность в условиях сложного напряженного состояния для обеих плавов.

В таблице приведены результаты испытаний на длительную прочность трех серий (всего 69) образцов: в рассмотренной выше I серии испытывались 29 образцов при одноосном растяжении, во II серии — 24 образца при комбинации растяжения и кручения и в III серии — 16 образцов при комбинации осевого растяжения и внутреннего давления. Все приводимые в таблице напряжения относятся к начальному напряженному состоянию ($t=0$) и имеют размерность МПа, значения t^* указаны в часах, g_1 — номер образца.

Главные напряжения σ_1 и σ_2 по II серии испытаний выражаются через действующие на образец осевое σ и касательное τ напряжения по формуле: $\sigma_{1,2} = \sigma/2 \pm (\sigma^2/4 + \tau^2)^{1/2}$.

При совместном действии растяжения и кручения (II серия, образцы 30—53) главные напряжения имеют различные знаки, при двухосном растяжении (III серия, образцы 54—69) — одинаковые, положительные знаки. Под σ_{\max} понимается наибольшее из трех главных напряжений, под σ_i — интенсивность напряжений, $\sigma_i = (\sigma_1^2 - \sigma_1\sigma_2 + \sigma_2^2)^{1/2}$, под $2\tau_{\max}$ — разность наибольшего и наименьшего из напряжений $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$. Как видно из таблицы, при одноосных испытаниях в идентичных условиях испытывалось от двух до 11 образцов, в условиях сложного напряженного состояния — от одного до шести.

Проведем оценку, какая из характеристик $\sigma_{\max}, \sigma_i, 2\tau_{\max}$, будучи принята за эквивалентное напряжение σ_e , лучше соответствует представленным экспериментальным результатам. Рассмотрим два вида конкретных зависимостей между эквивалентным напряжением σ_e и временем до разрушения t^* . Сначала исследуем случай степенной связи $t^* = c\sigma_e^{-m}$, где m и c — константы материала при данной температуре, тогда в двойных логарифмических координатах получим линейную зависимость между $x = \lg t^*$ и $y = \lg \sigma_e$:

$$x = \lg c - my \quad (2.1)$$

Множество экспериментальных точек (x, y) для 69 испытаний, естественно, не находится на одной прямой (2.1). Вычислим Σ — сумму квадратов расстояний ξ_i (по нормали) от всех экспериментальных точек ($N=69$) до прямой (2.1):

$$\Sigma = \sum_{i=1}^N \xi_i^2 = \sum_{i=1}^N \frac{(x_i + my_i - \lg c)^2}{(m^2 + 1)}$$

Константы материала m и c находим из условия $\Sigma = \Sigma_{\min}$, т. е.

$$\partial \Sigma / \partial m = 0, \quad \partial \Sigma / \partial c = 0 \quad (2.2)$$

Из соотношений (2.2) для m получается уравнение

$$m^2 - \frac{([y]^2 - N[y^2] + N[x^2] - [x]^2)}{([x][y] - N[xy])} m - 1 = 0 \quad (2.3)$$

$$[x] = \sum_{i=1}^N x_i, [y] = \sum_{i=1}^N y_i, [xy] = \sum_{i=1}^N (x_i y_i), [x^2] = \sum_{i=1}^N (x_i^2), [y^2] = \sum_{i=1}^N (y_i^2)$$

и далее вычисляется $\lg c = ([x] + m[y])/N$.

Ниже приведены результаты статистической обработки экспериментальных данных при использовании степенной зависимости $t^* = c\sigma_e^{-m}$ (первые три столбца) [13-15].

m, β	3.5822	3.6334	3.7071	0.3075	0.3000	0.2958
$\lg c, \lg B$	7.3494	7.4228	7.5947	5.9350	5.8129	5.7924
η	0.00260	0.00377	0.00343	0.0329	0.0430	0.0430
A_0	-0.14	-1.28	1.57	-0.02	-0.71	1.53
E_0	-1.84	0.50	1.17	-1.01	-0.02	0.99
η^0	$1.69 \cdot 10^{-4}$	$2.45 \cdot 10^{-4}$	$2.23 \cdot 10^{-4}$	$3.47 \cdot 10^{-4}$	$4.53 \cdot 10^{-4}$	$4.53 \cdot 10^{-4}$

В качестве эквивалентного напряжения σ_e принимались последовательно величины σ_{\max} (первый столбец), σ_i (второй столбец), $2\tau_{\max}$ (третий столбец); для каждой из этих трех характеристик методом наименьших квадратов определялись константы материала m и c . Для каждой i -й точки в координатах $\lg t^* - \lg \sigma_e$ находится $\xi_i = (x_i + m y_i - \lg c) \cdot (m^2 + 1)^{-1/2}$ - расстояние от этой точки до определенной методом наименьших квадратов прямой (2.1).

За меру отклонения экспериментальных точек от прямой (2.1) в двойных логарифмических координатах примем дисперсию

$$\eta = \left(\sum_{i=1}^N \xi_i^2 \right) / (N-1)$$

Согласно приведенным выше данным, минимальное значение дисперсии η получается при $\sigma_e = \sigma_{\max}$. Поэтому можно считать, что наилучшее из трех сравниваемых критериев соответствие экспериментальным результатам дает использование в качестве σ_e максимального главного напряжения. О том же свидетельствует и ориентация трещин разрушения: образцы всегда разрушались так, что трещина была ориентирована практически перпендикулярно направлению наибольшего из главных напряжений.

Чтобы проверить, соответствует ли нормальному закону распределение расстояний экспериментальных точек от прямой (2.1), вычисляем $A_0 = m_3 / (s^3 m_A)$ - отношение коэффициента асимметрии m_3 / s^3 к его средней квадратичной ошибке m_A и $E_0 = (m_4 / s^4 - 3) / m_E$ - отношение величины эксцесса к его средней квадратичной ошибке m_E . Здесь m_3 и m_4 - третий и четвертый моменты; $s = \eta^{1/2}$, величины m_A и m_E определяются при помощи формул математической статистики и равны соответственно 0.284 и 0.545.

Основываясь на значениях A_0 и E_0 , можно сделать заключение, что асимметрия и эксцесс не имеют во всех трех рассмотренных случаях существенного значения, так что рассматриваемое распределение подчиняется нормальному закону.

Аналогично исследуем экспоненциальную зависимость времени разрушения $t^* = B e^{-\beta \sigma_e}$ от эквивалентного напряжения σ_e , которой в полулогарифмических координатах $\lg t^* - \sigma_e$ соответствует прямая

$$\lg t^* + \beta \sigma_e - \lg B = 0 \quad (2.4)$$

Так же, как и выше, методом наименьших квадратов находятся параметры β и $\lg B$ прямой (2.4) и проводятся статистическая обработка экспериментальных данных и анализ их соответствия нормальному закону распределения. Данные статистической обработки опытных данных, аппроксимируемых с помощью (2.4), приведены в четвертом ($\sigma_e = \sigma_{\max}$), пятом ($\sigma_e = \sigma_i$) и шестом ($\sigma_e = 2\tau_{\max}$) столбцах.

Оценка по величине дисперсии η позволяет сделать заключение о том, что и в случае экспоненциальной зависимости использование σ_{\max} в качестве σ_e дает наилучшие результаты.

Для выяснения вопроса о том, какая из зависимостей лучше описывает экспериментальные данные, можно сравнить относительные дисперсии η^0 , соответствующие одному и тому же σ_e . Для этого значения дисперсий η будем относить к квадрату длины отрезка прямой (2.1) или (2.4), отсеченного соответствующими осями координат. Относительная дисперсия при использовании степенной зависимости оказывается примерно в два раза меньше относительной дисперсии при использовании экспоненциальной зависимости; таким образом, степенная зависимость лучше описывает опытные данные, чем экспоненциальная.

3. Выше на примере одноосных испытаний была проведена количественная оценка влияния переменности напряжений при испытаниях в условиях постоянной нагрузки. Аналогичный анализ может быть проведен для оценки влияния изменения напряжений в процессе ползучести на выбор критерия длительной прочности, который вытекает из рассматриваемой статистической обработки результатов экспериментов.

Так как в испытаниях III серии (растяжение с внутренним давлением) деформации в процессе ползучести не замерялись, то можно провести такую оценку только для времени разрушения t^* . По значениям осевых и окружных деформаций в момент t^* можно вычислить напряжения σ^* , τ^* , σ_e^* , соответствующие этому моменту.

Была проведена статистическая обработка результатов 63 испытаний (все опыты I и II серий и 10 опытов III серии) в параметрах σ_1^* , σ_2^* , t^* . Данные этой обработки приведены ниже (обозначения прежние).

m, β	4.3185	4.7713	4.8040	0.2360	0.2284	0.2175
$\lg c, \lg B$	9.8855	9.6791	9.7895	5.0342	4.9412	4.7722
η	0.00196	0.00236	0.00262	0.02935	0.03811	0.04123
A_0	-0.10	0.53	0.20	-1.45	-0.8900	0.500
E_0	-0.017	-0.009	0.018	-0.004	-0.009	0.014
η^0	$0.89 \cdot 10^{-4}$	$0.94 \cdot 10^{-4}$	$1.01 \cdot 10^{-4}$	$2.16 \cdot 10^{-4}$	$2.74 \cdot 10^{-4}$	$2.76 \cdot 10^{-4}$

Они показывают опять, что использование в качестве критерия $\sigma_e^* = \sigma_{\max}$ приводит к наименьшему среднеквадратичному отклонению опытных данных от аппроксимируемого условия.

Проведенное исследование образцов стали X18H10T в условиях сложного напряженного состояния показывает, что, когда при определении условий длительной прочности в качестве базового принимается один из параметров, имеющих определенный физический смысл, наиболее «подходящим» является максимальное растягивающее напряжение, а степенная зависимость времени разрушения t^* от действующего напряжения σ_e предпочтительней экспоненциальной.

Конечно, вводя дополнительные параметры в виде линейных комбинаций σ_{\max} и σ_i или другие более сложные функции, имеющие неопределенные параметры, можно формально лучше аппроксимировать экспериментальные данные. Однако следует учитывать, что даже при самом тщательном соблюдении условий воспроизводимости эксперимента эксперимен-

тальные данные по длительной прочности характеризуются большим разбросом, и в целях обеспечения надежности конструкций в конкретных расчетах приходится принимать значительные запасы прочности. Это обстоятельство лишает практического смысла вводимые уточнения, тем более, что все они носят чисто феноменологический характер.

Поступила 28 IX 1978

ЛИТЕРАТУРА

1. Работнов Ю. Н. О механизме длительного разрушения. В сб.: Вопросы прочности материалов и конструкций. М., Изд-во АН СССР, 1959, стр. 5-7.
2. Работнов Ю. Н. О разрушении вследствие ползучести. ПМТФ, 1963, № 2.
3. Работнов Ю. Н. Ползучесть элементов конструкций. М., «Наука», 1966.
4. Johnson A. E. Complex-stress creep of metals. Metallurgical Revs., 1960, vol. 5, No. 20. (Рус. перев.: Механика. Сб. перев., 1962, № 4.)
5. Johnson A. E., Henderson J., Khan B. Complex-stress creep, relaxation and fracture of metallic alloys. Edinburgh, Great Britain Nat. Engng Laboratory, 1962.
6. Сдобырев В. П. Критерий длительной прочности для некоторых жаропрочных сплавов при сложном напряженном состоянии. Изв. АН СССР. ОТН. Механика и машиностроение, 1959, № 6.
7. Трунин И. И. Оценка сопротивления длительному разрушению и некоторые особенности деформирования при сложном напряженном состоянии. ПМТФ, 1963, № 1.
8. Трунин И. И. Критерии прочности в условиях ползучести при сложном напряженном состоянии. Прикл. механ., 1965, т. 1, вып. 7.
9. Лебедев А. А. Обобщенный критерий длительной прочности. В сб.: Термопрочность материалов и конструктивных элементов. Киев, «Наукова думка», 1965, стр. 69-76.
10. Писаренко Г. С., Лебедев А. А. Деформирование и прочность материалов при сложном напряженном состоянии. Киев, «Наукова думка», 1976.
11. Мельников Г. П. Некоторые особенности работы тонкостенных труб из стали Х18Н10Т в условиях высокотемпературной ползучести. М., Атомиздат, 1968.
12. Мельников Г. П., Шестериков С. А. Описание процесса ползучести и длительной прочности при простом растяжении. Вестн. МГУ. Сер. матем., механ., 1972, № 2.
13. Крамер Г. Математические методы статистики. М., «Мир», 1976.
14. Венгцель Е. С. Теория вероятностей. М., «Наука», 1969.
15. Налимов В. В. Применение математической статистики при анализе вещества. М., Физматгиз, 1960.