

**ПОЛЗУЧЕСТЬ СПЛАВА АК4-1 ПРИ СЛОЖНОМ НАГРУЖЕНИИ**

*А. И. Равикович*

(Новосибирск)

В работе рассматриваются некоторые подходы [1-3] к описанию ползучести при сложном нагружении, позволяющие учесть анизотропный характер упрочнения материала при неустановившейся ползучести. Делается попытка учесть различное поведение материала при возрастающих и при убывающих напряжениях.

Результаты предсказаний по различным теориям сопоставляются с данными экспериментальных исследований ползучести образцов из сплава АК4-1 при совместном действии растяжения и кручения в условиях непропорционального ступенчатого нагружения.

Сравнение с экспериментом показывает, что при сложном нагружении теория, базирующаяся на гипотезе изотропного упрочнения, неудовлетворительно описывает опытные данные. Значительно лучшие результаты дают теории, учитывающие анизотропный характер упрочнения материалов при неустановившейся ползучести.

1. Эксперименты проводились на трубчатых образцах при температуре 175° С и общей продолжительности 100 час. Методика испытаний приведена в [4], где помещены результаты исследования ползучести сплава АК4-1 при сложном напряженном состоянии при постоянных и пропорционально изменяющихся нагрузках.

В условиях непропорционального нагружения выполнялась программа испытаний, приведенная в таблице.

Номера экспериментов	Номера образцов	$\sigma$	$\tau$	$\sigma_i$	$t$	$\sigma$	$\tau$	$\sigma_i$	$t$
		первый этап				второй этап			
1	9, 10	6	7.94	15	50	10.5	9.14	19	50
2	22, 25, 29, 43	15	0	15	50	0	8.67	15	50
3	24, 30, 31, 42	0	10.4	18	50	18	0	18	50
4	19, 32, 33, 41	15	0	15	25	10	6.45	15	25
5	16, 36, 51, 53	0	10.4	18	25	9	9	18	25
		третий этап				четвертый этап			
4	19, 32, 33, 41	6	7.94	15	25	0	8.67	15	25
5	16, 36, 51, 53	13	7.18	18	25	18	0	18	25

В первом эксперименте нагружение осуществлялось в два этапа при возрастающей интенсивности напряжений. Во втором и третьем экспериментах ступенчато изменялся вид напряженного состояния от одноосного растяжения (кручения) на первом этапе до чистого кручения (растяжения) на втором. В четвертом и пятом экспериментах смена вида напряженного состояния производилась последовательно в четыре этапа от одноосного растяжения (кручения) на первом этапе до чистого кручения (растяжения) на четвертом. В последних четырех экспериментах интенсивность напряжений оставалась постоянной на всех этапах нагружения. В каждом эксперименте испытывалось от двух до четырех образцов.

На фиг. 1, 2, 3 линиями с кружками изображены в виде кривых ползучести осредненные результаты испытаний. Цифрами в правом верхнем углу обозначены номера экспериментов,  $\gamma$  — сдвиговая деформация ползучести,  $\varepsilon$  — осевая деформация ползучести.

В работе [4] было показано, что при постоянных и пропорционально изменяющихся нагрузках справедливы соотношения, базирующиеся на гипотезе изотропного упрочнения

$$p'_{kj} = \sqrt[3]{2} p'_i / \sigma_i^{-1} \sigma_{kj}^* \quad (1.1)$$

$$p'_i p_i^\alpha = k \sigma_i^n \quad (1.2)$$

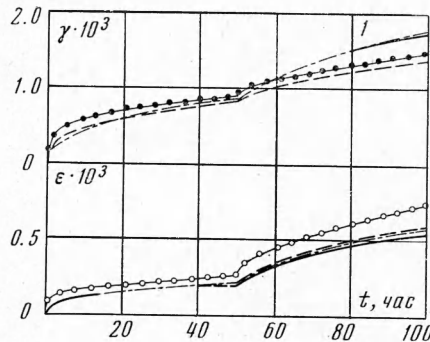
$$p_i' = (\sqrt[2]{3} p'_{kj} p'_{kj})^{1/2}, \quad p_i = \int_0^t p_i' dt, \quad \sigma_i = (\sqrt[3]{2} \sigma_{kj}^* \sigma_{kj}^*)^{1/2}$$

Здесь  $p'_{kj}$  — компоненты тензора скоростей деформаций ползучести,  $\sigma_{kj}^*$  — компоненты девиатора тензора напряжений,  $p_i'$  — интенсивность скоростей деформаций ползучести,  $p_i$  — параметр упрочнения,  $\sigma_i$  — интенсивность напряжений,  $\alpha, n, k$  — константы ползучести, для которых в [4] получены значения

$$\alpha = 1.5, \quad n = 7.5$$

$$k = 8.375 \cdot 10^{-20} \text{ (мм}^{2n} / \text{кгс}^n \cdot \text{час)}$$

Проверка уравнений (1.1) и (1.2) при непропорциональном нагружении показала значительные отклонения расчетных значений компонент деформаций от экспериментальных данных (фиг. 2, 3). (На фиг. 1, 2, 3 расчетные кривые, полученные при интегрировании соотношений (1.1) и (1.2), нанесены сплошными линиями *b.*)



Фиг. 1

2. Для описания ползучести в условиях сложного напряженного состояния в работе [1] предполагается существование потенциальной функции скоростей деформаций ползучести, в которую в качестве параметра упрочнения  $q$  вводится смешанный инвариант от компонент тензоров напряжений и деформаций.

В соответствии с видом зависимости (1.2) потенциальная функция строится в форме

$$\Phi = k_0 (S^{1/2} q^{-1})^\alpha S^{(n+1)/2} \quad (2.1)$$

$$S = 3\sigma_{kj}^* \sigma_{kj}^*, \quad \sigma_{kj}^* = \sigma_{kj} - 1/3 \delta_{kj} \sigma_{ll}$$

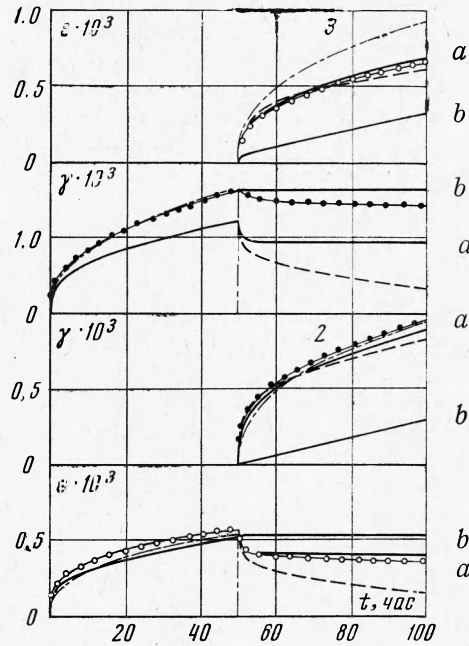
Здесь  $\delta_{kj}$  — символ Кронекера,  $q = \sigma_{kj} p_{kj}$  для значений  $\sigma_{kj} p_{kj} \geq 0$  и  $q = 0$  для отрицательных значений  $\sigma_{kj} p_{kj}$ ,  $k_0$  — константа, которая выражается через соответствующие константы из (1.2).

Выражение для скоростей деформаций ползучести  $p'_{kj} = \partial \Phi / \partial \sigma_{kj}$  в случае одноосного напряженного состояния преобразуется в уравнение  $p' p^\alpha = k \sigma^n$ , где  $\sigma$  — нормальное напряжение.

Для расчета компонент деформаций ползучести при совместном действии растяжения и кручения получены следующие зависимости:

$$\varepsilon_m = \varepsilon_{m-1} + \Delta \varepsilon_m$$

$$\gamma_m = \gamma_{m-1} + \Delta \gamma_m \quad (2.2)$$



Фиг. 2

$$\Delta \varepsilon_m = \frac{k (\sigma_m^2 + 3\tau_m^2)^{(n+\alpha-1)/2}}{(n+1) (\sigma_m \varepsilon_{m-1} + \tau_m \gamma_{m-1})^\alpha} \left[ (\alpha + n + 1) \sigma_m - \frac{\alpha \varepsilon_{m-1} (\sigma_m^2 + 3\tau_m^2)}{\sigma_m \varepsilon_{m-1} + \tau_m \gamma_{m-1}} \right] \Delta t_m \quad (2.3)$$

$$\Delta \gamma_m = \frac{k (\sigma_m^2 + 3\tau_m^2)^{(n+\alpha-1)/2}}{(n+1) (\sigma_m \varepsilon_{m-1} + \tau_m \gamma_{m-1})^\alpha} \left[ (\alpha + n + 1) 3\tau_m - \frac{\alpha \gamma_{m-1} (\sigma_m^2 + 3\tau_m^2)}{\sigma_m \varepsilon_{m-1} + \tau_m \gamma_{m-1}} \right] \Delta t_m \quad (2.4)$$

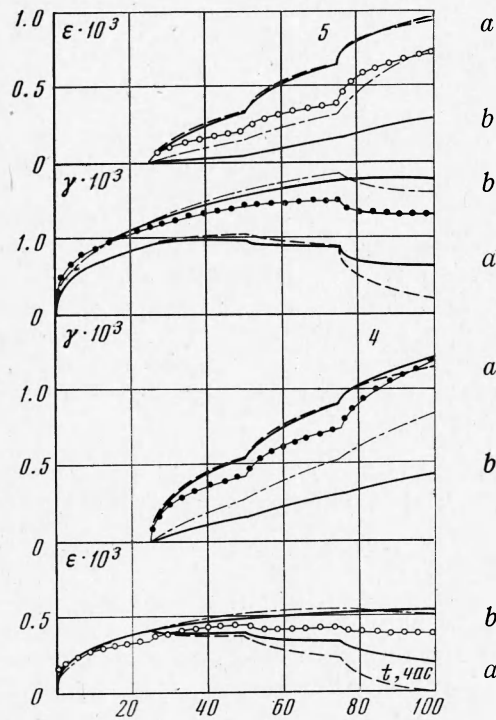
где  $\tau$  — касательное напряжение.

При изменении напряженно-деформированного состояния, когда величина  $q$  становится отрицательной или равной нулю, из (2.3) и (2.4) получается

$$\Delta \varepsilon_m / \Delta \gamma_m = - \varepsilon_{m-1} / - \gamma_{m-1}$$

Процесс ползучести при этом будет идти в направлении, противоположном направлению первоначально накопленной деформации до обращения последней в нуль.

Результаты расчетов по зависимостям (2.2) — (2.4) представлены на фиг. 1, 2, 3 штрихпунктирными линиями. Из графиков видно, что во втором и третьем экспериментах, в которых  $q = \sigma \varepsilon + \tau \gamma$  при переходе ко второму этапу становится равной нулю, расчетные значения деформаций ползучести в момент изменения нагрузки мгновенно обращаются в нуль и не соответствуют экспериментальным данным. В четвертом и пятом экспериментах при постепенной смене напряженных состояний и  $q > 0$  расчетные значения деформаций по (2.2) — (2.4) значительно лучше соответствуют экспериментальным данным, чем расчетные значения деформаций по (1.1) и (1.2). Однако уравнения (2.2) — (2.4) недостаточно хорошо отражают наблюдаемую в эксперименте интенсификацию процесса ползучести при изменении нагрузки.



Фиг. 3

3. В работах [2, 3] предлагается теория, в которой анизотропный характер упрочнения материала в первой стадии ползучести учитывается путем введения добавочного напряжения  $\rho$ . Предполагается, что справедливы следующие зависимости:

1) девиатор напряжений  $\sigma_{kj}^*$  равен сумме девиаторов активных  $\omega_{kj}^*$  и добавочных напряжений  $\rho_{kj}^*$

$$\sigma_{kj}^* = \omega_{kj}^* + \rho_{kj}^* \quad (3.1)$$

2) компоненты девиаторов приращения добавочного напряжения и деформации ползучести пропорциональны, причем коэффициент пропорциональности зависит от температуры, интенсивности напряжений  $\sigma_i$  и интенсивности активных напряжений  $\omega_i$

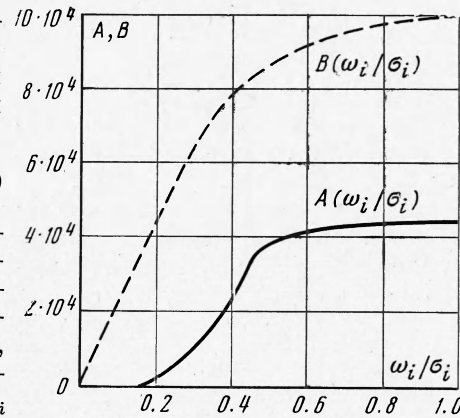
$$d\rho_{kj}^* = \frac{2}{3} A(\sigma_i, \omega_i, T) dp_{kj} \quad (3.2)$$

3) соотношения для компонент скоростей деформаций ползучести имеют вид

$$p'_{kj} = \frac{2}{3} Q(\omega_i, T) \omega_{kj}^* / \omega_i \quad (\omega_i = (\frac{2}{3} \omega_{kj}^* \omega_{kj}^*)^{1/2}) \quad (3.3)$$

Здесь  $\omega_i$  — интенсивность активных напряжений,  $Q(\omega_i, T)$  — функция интенсивности активных напряжений и температуры.

Для функции  $A(\sigma_i, \omega_i, T)$  в работе [3] принято следующее выражение:



Фиг. 4

$$A(\sigma_i, \omega_i, T) = \begin{cases} 0 & (\omega_i / \sigma_i \leq a) \\ A_1(T) A_2(\omega_i / \sigma_i) & (a < \omega_i / \sigma_i \leq 1) \\ A_1(T) & (\omega_i / \sigma_i > 1) \end{cases} \quad (3.4)$$

Функция  $Q(\omega_i, T)$  достаточно хорошо аппроксимируется формулой

$$Q(\omega_i, T) = C(T) \omega_i^r \quad (3.5)$$

В уравнениях (3.4) и (3.5)  $a, r, C(T), A_1(T)$  — константы ползучести. После обработки кривых ползучести сплава АК4-1 [4] при температуре 175° С для констант получены следующие значения:  $a = 0.175, r = 2.6, C(T) = 2.42 \cdot 10^{-7} (\text{мм}^{2r} / \text{кг}^r \cdot \text{час}), A_1(T) = 4.52 \cdot 10^4 (\text{кг} / \text{мм}^2)$ .

Зависимость (3.4) представлена на фиг. 4 (сплошной линией).

Применительно к проведенному эксперименту расчет компонент деформаций ползучести производился по уравнениям

$$\varepsilon_m = \varepsilon_{m-1} + \Delta\varepsilon_m, \quad \gamma_m = \gamma_{m-1} + \Delta\gamma_m \quad (3.6)$$

$$\Delta\varepsilon_m = C(T) \{[\sigma_m - \rho_{m-1}^{(\sigma)}]^2 + 3[\tau_m - \rho_{m-1}^{(\tau)}]^2\}^{(r-1)/2} [\sigma_m - \rho_{m-1}^{(\sigma)}] \Delta t_m \quad (3.7)$$

$$\Delta\gamma_m = 3C(T) \{[\sigma_m - \rho_{m-1}^{(\sigma)}]^2 + 3[\tau_m - \rho_{m-1}^{(\tau)}]^2\}^{(r-1)/2} [\tau_m - \rho_{m-1}^{(\tau)}] \Delta t_m \quad (3.8)$$

$$\rho_m^{(\sigma)} = A(\sigma_i, \omega_i, T) \Delta\varepsilon_m + \rho_{m-1}^{(\sigma)}, \quad \rho_m^{(\tau)} = 1/3 A(\sigma_i, \omega_i, T) \Delta\gamma_m + \rho_{m-1}^{(\tau)} \quad (3.9)$$

где  $\rho^{(\sigma)}, \rho^{(\tau)}$  — нормальное и касательное добавочные напряжения.

На графиках фиг. 1, 2, 3 результаты расчета по зависимостям (3.6) — (3.9) показаны штриховыми линиями. Как видно из графиков, во всех экспериментах при возрастающих напряжениях соответствие расчетных и экспериментальных данных можно считать удовлетворительным. При убывающих напряжениях наблюдается значительное занижение расчетных значений деформаций по отношению к экспериментальным.

Можно добиться лучшего соответствия экспериментальных и расчетных данных, если в соотношении (3.9) ввести для случая убывающих напряжений вместо функции  $A(\sigma_i, \omega_i, T)$  новую функцию  $B(\sigma_i, \omega_i, T)$

$$B(\sigma_i, \omega_i, T) = \begin{cases} B_1(T) B_2(\omega_i / \sigma_i) & (0 \leq \omega_i / \sigma_i \leq 1) \\ B_1(T) & (\omega_i / \sigma_i > 1) \end{cases} \quad (3.10)$$

Функция  $B(\sigma_i, \omega_i, T)$  для сплава АК4-1 при температуре 175° С представлена на фиг. 4 штриховой линией. При  $\omega_i / \sigma_i \geq 1$   $B = 10 \cdot 10^4 (\text{кг} / \text{мм}^2)$ .

Расчет деформаций ползучести при изменении напряжений с меньшего на большее производится по уравнениям (3.6) — (3.9). В случае изменения напряжений с большего на меньшее (3.9) заменяются соотношениями

$$\rho_m^{(\sigma)} = B(\sigma_i, \omega_i, T) \Delta\varepsilon_m + \rho_{m-1}^{(\sigma)}, \quad \rho_m^{(\tau)} = 1/3 B(\sigma_i, \omega_i, T) \Delta\gamma_m + \rho_{m-1}^{(\tau)} \quad (3.11)$$

Результаты расчета представлены на фиг. 2, 3 сплошными линиями *a*. Автор благодарит Л. М. Куршина за внимание к работе и помощь.

Поступила 13 XI 1972

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Соснин О. В. О ползучести упрочняющихся материалов. Инж. ж. МТТ, 1968, № 3.
2. Хажинский Г. М. Реологические уравнения для среды с анизотропным упрочнением. Изв. вузов, Машиностроение, 1968, № 3.
3. Малинин Н. Н., Хажинский Г. М. К построению теории ползучести с анизотропным упрочнением. Изв. АН СССР, МТТ, 1969, № 3.
4. Ермаков В. П., Равикович А. И. Ползучесть теплопрочного алюминиевого сплава при сложном напряженном состоянии. ПМТФ, 1971, № 2.