

3. О д и н г И. А. Допускаемые напряжения в машиностроении и циклическая прочность металлов, М., Машгиз, 1962.
4. П и с а р е н к о Г. С., Т р о щ е н к о В. Т., Б у г а й В. И. Исследование закономерностей усталостного разрушения металлов методом динамической петли гистерезиса. В сб.: «Прочность металлов при циклических нагрузках». М., «Наука», 1967, стр. 114—119.
5. И в а н о в а В. С. Установка для испытания на усталость плоских образцов при изгибе. Заводск. лаборатория, 1956, т. 22, № 12.
6. Б е р г Л. Г. Введение в термографию. М., Изд-во АН СССР, 1961.
7. А ф а н а с ь е в Н. Н. Статистическая теория усталостной прочности металлов. Киев, Изд-во АН УССР, 1953.
8. К о г а н Р. Л. О закономерностях пластической деформации в образцах при циклическом изгибе. В сб.: «Циклическая прочность металлов», М., Изд-во АН СССР, 1962.
9. Г у р е в и ч С. Е., Е д и д о в и ч Л. Д. Структурная повреждаемость стали в процессе усталости. В сб.: «Прочность металлов при циклических нагрузках», М., «Наука», 1967, стр. 55—61.
10. S c h e n k H., S c h m i d t m a n n, E. K e t t l e r H. Einfluß einer Verformungsaltezung auf die Vorgänge bei der Wechselbeanspruchung von Stahl. Arch. Eisenhüttenwesen, 1960, H. 11 S. 659.
11. Иванова В. С. Усталостное разрушение металлов. М., Металлургиздат, 1963.
12. W e i R. P., B a k e r A. J. A metallographic study of iron fatigued in cyclic strain at room temperature. Philos. Mag. 1965, vol. 12, No 119, pp. 1005—1020.
13. Г у р ь е в А. В., С т о л ь р о в Г. Ю. О развитии микропластической деформации в процессе усталости малоуглеродистой стали. В сб.: «Металловедение и прочность материалов», Волгоград, 1968, стр. 56—65.
14. Р о в и н с к и й Б. М., Р ы б а к о в а Л. М. Напряжение, деформации и структурные изменения в техническом железе при циклической пластической деформации. Изв. АН СССР, Металлы, 1965, № 3, стр. 101—103.
15. M c E v i l y A. J., Jr., B o e t t n e r R. C. On fatigue crack propagation in f. c. c. metals. Acta metallurgica, 1963, vol. 11, No 7, pp. 725—743.

О ПОЛЗУЧЕСТИ МАТЕРИАЛОВ С РАЗНЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ НА РАСТЯЖЕНИЕ И СЖАТИЕ

О. В. Соснин

(Новосибирск)

Приведены экспериментальные данные по ползучести трубчатых образцов при растяжении и кручении. Экспериментально показано, что результирующий вектор скоростей деформаций ползучести ортогонален к кривой постоянной мощности рассеяния. Приводятся приближенные аналитические выражения, позволяющие описать процесс ползучести материалов с разными характеристиками на растяжение и сжатие.

1. Легкие сплавы, обладая довольно стабильными свойствами в смысле мгновенных упруго-пластических характеристик, причем последние могут не зависеть ни от направления прикладываемой нагрузки, ни от ее знака, проявляют существенную анизотропию по отношению к ползучести. У таких сплавов, как магниевые, титановые, в зависимости от направления и от знака нагрузки скорость деформирования при одном и том же напряжении может отличаться в несколько раз. Так, у алюминий-магниевого сплава мгновенная диаграмма $\sigma - \epsilon$, снятая на растяжение и сжатие при температуре 200° С, полностью совпадает как в упругой, так и в пластической областях, скорости же деформаций ползучести $\dot{\eta}$ при одних и тех же напряжениях на растяжение и сжатие отличаются более чем в три раза.

На фиг. 1 представлены результаты экспериментов, проведенных на образцах, вырезанных из цилиндрической заготовки алюминий-магниевого сплава при температуре 200° С. Здесь по оси абсцисс отложено напряжение σ в кг/мм², по оси ординат — величины натуральных логарифмов скоростей деформаций ползучести $\dot{\eta}$ в час⁻¹. Цифры у линии соответствуют данным, полученным на образцах, вырезанных под углом 45° к оси заготовки — 1, из диаметральной плоскости заготовки — 2, из осевого направления заготовки — 3. Светлые точки соответствуют экспериментальным данным при

растяжении. Цифрой 4 отмечены экспериментальные данные при сжатии образцов, вырезанных из осевого направления заготовки. Из диаграммы фиг. 1 видно, что материал относительно свойств ползучести анизотропен и обладает разным сопротивлением растяжению и сжатию.

Процесс ползучести этого материала при температуре 200°C и напряжениях от 8 кг/мм^2 и выше протекает практически без упрочнения и для любого направления ν может быть описан зависимостью вида

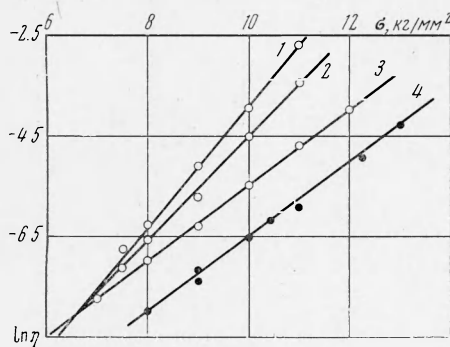
$$|\eta| = e^{-K_\nu + \beta_\nu |\sigma|} \quad (1.1)$$

Из диаграмм фиг. 1 нетрудно определить величины K_ν и β_ν для каждого из названных выше направлений на растяжение и сжатие

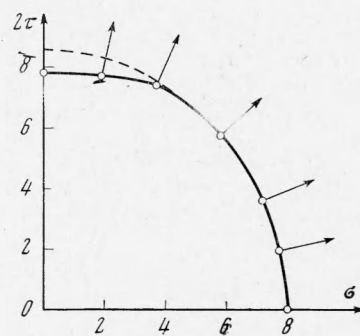
$$\begin{aligned} \beta_1 &= 1.24, & \beta_2 &= 1.0, & \beta_3 &= \beta_4 = 0.75 \text{ [мм}^2/\text{кг]} \\ K_1 &= 16.2, & K_2 &= 14.6, & K_3 &= 13.0, & K_4 &= 14.1 \end{aligned} \quad (1.2)$$

Здесь цифры у букв соответствуют цифрам у диаграмм фиг. 1.

Расчетные кривые по зависимости (1.1) с характеристиками (1.2) показали достаточно хорошую аппроксимацию экспериментальных кривых ползучести для всех четырех серий экспериментов.



Фиг. 1



Фиг. 2

С целью анализа поведения этого материала в условиях сложного напряженного состояния была проведена большая серия экспериментов при том же температурном режиме на трубчатых образцах, вырезанных из осевого направления исходной заготовки (рабочая длина образца 80 мм, наружный и внутренний диаметры — соответственно 20 и 18 мм), при различных комбинациях осевого растяжения и крутящего момента, приложенных к образцу. При чисто осевом растяжении результаты на трубчатых образцах совпадали с результатами, полученными на малых цилиндрических образцах, на которых определялись исходные характеристики материала (1.2).

На плоскости напряжений от экспериментально были найдены точки, в которых процессы ползучести протекают с одной и той же интенсивностью в смысле мощности рассеяния $W = \sigma_{ij}\eta_{ij}$. Таким образом, были построены три экспериментальные кривые $W = \text{const}$, соответствующие различным уровням интенсивности процесса. Величины напряжений σ и τ в кг/мм^2 , при которых проводились эксперименты, величины осевых скоростей деформаций ползучести η_{11} скоростей деформаций сдвига $d\gamma/dt \equiv 2\eta_{12}$, замеренные в эксперименте, а также экспериментальные величины $W = \sigma\eta_{11} + \tau 2\eta_{12}$ приведены в таблице.

На фиг. 2 сплошной линией представлена одна из кривых $W = \text{const}$, кружками отмечено напряженное состояние, при котором проводился эксперимент. В каждой из указанных точек, откладывая по горизонтали удвоенную величину η_{11} и по вертикали — величину $2\eta_{12}$, построен результирующий вектор скоростей деформаций ползучести, который достаточно хорошо совпадает с направлением нормали к кривой $W = \text{const}$. Аналогичная картина получается и для других двух кривых $W = \text{const}$. Из фиг. 2 следует, что, несмотря на сложность в поведении материала при ползучести, в пространстве напряжений существует поверхность, совпадающая с поверхностью $W = \text{const}$, к которой результирующий вектор скоростей деформаций ползучести ортогонален.

Этот результат является хорошим подтверждением гипотезы существования потенциальной функции скоростей деформаций ползучести для анизотропных сред.

σ	τ	$\eta_{11}^* 10^3$	$\eta_{11} 10^3$	$2\eta_{12}^* 10^3$	$2\eta_{12} 10^3$	$W 10^3$
8.00	0	0.93	0.95	—	—	7.60
7.76	0.97	0.91	0.90	0.35	0.40	7.40
7.20	1.80	0.88	0.85	0.68	0.70	7.35
5.77	2.88	0.70	0.65	1.10	1.20	7.20
3.72	3.72	0.46	0.36	1.41	1.70	7.66
1.93	3.85	—	0.18	—	1.75	7.10
0	3.91	—	—	—	1.90	7.45
9.00	0	1.96	1.95	—	—	17.55
8.70	1.09	1.92	1.95	0.90	0.65	17.71
8.00	2.00	1.84	1.84	1.64	1.50	17.63
6.33	3.17	1.51	1.55	2.56	2.57	17.85
4.00	4.00	0.87	0.70	2.78	3.70	17.60
2.10	4.20	—	0.20	—	4.20	18.10
0	4.25	—	—	—	4.15	17.64
10.00	0	4.15	4.10	—	—	41.00
9.60	1.20	3.90	3.70	2.06	1.50	37.40
8.80	2.20	3.80	3.50	3.80	3.34	37.94
6.90	3.45	3.10	3.00	5.70	5.24	38.45
4.30	4.30	1.71	1.25	5.83	7.30	36.77
2.22	4.45	—	0.45	—	8.40	38.40
0	4.58	—	—	—	9.00	41.20

2. Представляет интерес дать хотя бы приближенные аналитические зависимости, позволяющие описать процесс ползучести сред, разносопротивляющихся растяжению и сжатию. Оставаясь в рамках гипотезы существования потенциальной функции скоростей деформаций ползучести, очевидно, недостаточно предполагать ее зависящей только от квадратичной формы тензоров напряжения и анизотропии, необходимо введение нечетных инвариантов.

Введем самое простое предположение: допустим, что процесс ползучести зависит от знака первого инварианта тензора напряжений $I_1 = \sigma_{ii}$, т. е. все пространство напряжений плоскостью $\sigma_{ii} = 0$ разобьем на два подпространства, в каждом из которых, введением потенциальной функции, зависящей только от квадратичных инвариантов со своими характеристиками, попытаемся описать процесс ползучести. Или, говоря геометрическим языком, предположим, что в пространстве главных напряжений потенциальные поверхности $\Phi = \text{const}$ представляют собой два семейства соосных цилиндров (в общем случае анизотропных сред — не круговых) с осями, равнонаклоненными к осям координат. Оба семейства сопрягаются в окрестности девиаторной плоскости, проходящей через начало координат. Векторы скоростей деформаций ползучести ортогональны к этим поверхностям.

Для напряженного состояния, представляющего собой комбинацию растяжения и кручения, $I_1 \geq 0$ и, следовательно, характеристики материала, соответствующие сжатию, в потенциальную функцию не войдут. Для определения квадратичной формы в потенциальной функции с учетом осевой симметрии материала достаточно первых трех пар характеристик. Используя условие, что на фиг. 1 верхние три линии, соответствующие данным на растяжение, пересекаются в точке $\sigma_0 = 6.5 \text{ кг/мм}^2$ и повторяя рассуждения, аналогичные приведенным в [1], сконструируем потенциальную функцию в виде

$$\eta_{ij} = \partial\Phi/\partial\sigma_{ij}, \quad \Phi = M(S/T)^{1/2} \exp\{-[D + \sigma_0(2T/S)^{1/2}] + T^{1/2}\} \quad (2.1)$$

$$S = 3\sigma_{ij}^0\sigma_{ij}^0, \quad \sigma_{ij}^0 = \sigma_{ij} - 1/3\delta_{ij}\sigma_{kk}$$

$$T = A_{11}(\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + A_{22}(\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + A_{33}(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + \\ + 2A_{12}\sigma_{12}^2 + 2A_{23}\sigma_{23}^2 + 2A_{31}\sigma_{31}^2$$

где M — константа размерности 1 час^{-1} .

Применительно к описанию процессов ползучести при растяжении и кручении квадратичная форма T , с учетом того что $A_{12} = A_{13}$ и введением касательного напряжения τ , примет вид

$$T = (A_{22} + A_{33})\sigma^2 + 2A_{12}\tau^2 \quad (2.2)$$

коэффициенты которой определяются через величины (1.2) [1]

$$A_{22} + A_{33} = \beta_3^2, \quad 2A_{12} = (2\beta_1)^2 - \beta_2^2, \quad D = K_v - \beta_v \sigma_0 + 1/2 \ln 2 \quad (2.3)$$

где K_v, β_v — любая из первых трех пар (1.2). Подставляя в (2.3) значения (1.2), найдем

$$A_{22} + A_{33} = 0.56, \quad 2A_{12} = 5.2, \quad D = 8.45 \quad (2.4)$$

Компоненты скоростей деформаций ползучести из (2.1) с учетом (2.2) и (2.4) будут выражаться

$$\eta_{11} = C (2B_1 + 0.56B_2) \sigma, \quad 2\eta_{12} = C (6B_1 + 5.2B_2) \tau \quad (2.5)$$

Здесь

$$C = \exp \{ (0.56\sigma^2 + 5.2\tau^2)^{1/2} - 8.45 - 6.5 (0.56\sigma^2 + 5.2\tau^2)^{1/2} (\sigma^2 + 3\tau^2)^{-1/2} \}$$

$$B_1 = [(2\sigma^2 + 6\tau^2) (0.56\sigma^2 + 5.2\tau^2)^{-1/2} + \sqrt{2} 6.5 (2\sigma^2 + 6\tau^2)^{-1}]$$

$$B_2 = [(2\sigma^2 + 6\tau^2)^{1/2} - \sqrt{2} 6.5] (0.56\sigma^2 + 5.2\tau^2)^{-1/2} - (2\sigma^2 + 6\tau^2)^{1/2} (0.56\sigma^2 + 5.2\tau^2)^{-3/2}$$

Величины скоростей осевых η_{11}^* и сдвиговых $2\eta_{12}^*$ деформаций ползучести, рассчитанных по зависимостям (2.5), указаны в таблице.

Мощность рассеяния $W = \sigma\eta_{11} + \tau 2\eta_{12}$ непосредственно следует из (2.1)

$$W = M (S)^{1/2} \exp \{ -[D + \sigma_0 (2T/S)^{1/2}] + T^{1/2} \} \quad (2.6)$$

Вид кривой $W^* = \text{const}$, проходящей через точку $\sigma = 8 \text{ кг/мм}^2, \tau = 0$, рассчитанной по зависимости (2.6) с характеристиками (2.4), представлен на фиг. 2 пунктирной линией. В большей части экспериментально исследованной области напряжений расчетная кривая совпадает с экспериментальной. Непосредственный расчет показывает, что кривые $\Phi = \text{const}$ (2.1) и $W^* = \text{const}$ (2.6), проходящие через какую-либо одну точку плоскости σ, τ , довольно близки: наибольшая разница в уровнях напряжений между ними порядка 3%, а разница в направлениях нормалей к этим кривым практически отсутствует.

Сравнивая из таблицы величины расчетных и экспериментально замеренных скоростей деформаций ползучести и расположение расчетных кривых $W^* = \text{const}$ и экспериментально найденных на фиг. 2, можно заключить, что зависимость (2.1) вполне удовлетворительно описывает процесс ползучести материала, хотя он и обладает разными свойствами на растяжение и сжатие. Исключение составляет область, непосредственно примыкающая к напряженному состоянию, типа чистый сдвиг, когда $I_1 = 0$. Этот результат говорит в пользу предлагаемой в начале пункта гипотезы о возможности разделения и независимого описания процессов ползучести для случая положительных и отрицательных значений первого инварианта тензора напряжений. Наибольшей погрешности в зависимостях следует ожидать в окрестности нулевой величины I_1 .

Поступила 7 X 1969

ЛИТЕРАТУРА

1. Соснин О. В. Анизотропная ползучесть упрочняющихся материалов. МТТ, 1968, № 4.