

ЛИТЕРАТУРА

1. Степанов Ю. С. Об одном возможном методе оценки скорости и размеров метеорных частиц. Космические исследования, 1970, т. 8, вып. 5, стр. 758.
2. Степанов Ю. С. Исследование некоторых физико-механических характеристик при пробивании одиночной преграды. ПМТФ, 1966, № 3, стр. 111.
3. Андрианкин Э. И., Степанов Ю. С. Глубина пробивания при ударе метеорных частиц с допороговыми скоростями. Космические исследования, 1968, т. 6, вып. 5, стр. 752.
4. Вентцель Е. С. Теория вероятностей. М., «Наука», 1969.
5. Halperson S. M. Some phenomena associated with impacts into Aluminum. Proc. 6-th Sympos. Hyperveloc. Impact, Cleveland, Ohio, 1963, vol. 2, pt 2, p. 4557.

О ПОЛЗУЧЕСТИ УПРОЧНЯЮЩИХСЯ МАТЕРИАЛОВ С РАЗНЫМИ СВОЙСТВАМИ НА РАСТЯЖЕНИЕ И СЖАТИЕ

А. Ф. Никитенко, О. В. Соснин, Н. Г. Торшенов, И. К. Шокало

(Новосибирск)

В работе [1] утверждается, что легкие сплавы, как правило, обладают различными свойствами ползучести при растяжении и сжатии. Там же сделана попытка описать процессы ползучести таких материалов для простейшего случая степенной зависимости скорости установившейся ползучести от напряжения при неизменном показателе степени. В работе [2] показана возможность описания ползучести неупрочняющихся материалов более общей анизотропии, при этом используются различные зависимости для подпространства напряжений, где линейный инвариант тензора напряжений $\sigma_{ii} > 0$ и, соответственно, $\sigma_{ii} < 0$. В каждую из зависимостей входят характеристики материала, найденные только из экспериментов на растяжение и, соответственно, только из экспериментов на сжатие. В данной работе на примере ползучести при комнатной температуре одного из титановых сплавов экспериментально показано, что аналогичный метод раздельного описания в зависимости от знака первого инварианта тензора напряжений применим и к упрочняющимся материалам с разными свойствами на растяжение и сжатие.

1. В качестве исходного материала был взят лист титанового сплава — толщиной 20 мм. Направление наибольшего размера листа принято в дальнейшем называть продольным направлением, а перпендикулярное ему в плоскости листа — поперечным направлением. Заготовки для испытуемых образцов вырезались в продольном, в поперечном и в направлении, составляющем угол 45° с первыми (диагональное направление). В зависимости от вида и программы эксперимента из указанных заготовок изготавливались образцы различной формы, при этом предварительно было проведено исследование о влиянии режима механической обработки образцов и их последующей доводки с целью выбора и назначения строго определенного режима. После изготовления образцы термобработке не подвергались.

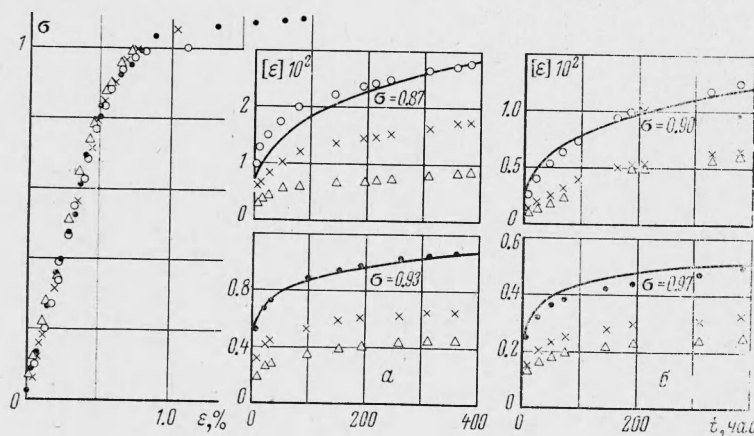
Для снятия диаграмм $\sigma - \epsilon_0$ изготавливались плоские образцы размером $5 \times 10 \text{ мм}^2$ и длиной рабочей части 100 мм. Для снятия аналогичных диаграмм на сжатие изготавливались цилиндрические образцы диаметром 12 мм и длиной рабочей части 40 мм. На фиг. 1 представлены диаграммы $\sigma - \epsilon_0$. Здесь и в дальнейшем за σ_{ij} берется безразмерная величина отношения текущего напряжения к $\sigma_{0,2}$ при растяжении. На диаграмме светлыми точками отмечены экспериментальные данные на растяжение образцов продольного направления, крестиками и треугольниками для поперечного и для диагонального направлений соответственно. Черными точками отмечены данные по сжатию образцов, вырезанных в продольном направлении. Из представленных диаграмм следует, что материал в смысле мгновенных упруго-пластических свойств практически изотропен и обладает одинаковыми свойствами на растяжение и сжатие.

Картина совершенно меняется в отношении процесса ползучести. Эксперименты на ползучесть при растяжении проводились на образцах прямоугольного сечения $10 \times 20 \text{ мм}^2$ и длиной рабочей части 160 мм. В процессе эксперимента измерялись осевое удлинение образца и изменение размеров по ширине и толщине в средней части рабочей

длины образца. Ряд экспериментов был проведен на плоских образцах того же типа, что и для снятия диаграмм $\sigma - \epsilon_0$, а также на трубчатых образцах. Различия в диаграммах ползучести, полученных на образцах разной геометрической формы сечения, не обнаружено.

Эксперименты на ползучесть при сжатии проводились на цилиндрических образцах тех же размеров, какие использовались для снятия диаграмм $\sigma - \epsilon_0$. Осевое удлинение и изменение величины диаметров в двух перпендикулярных направлениях, причем одно из них совпадало с направлением нормали к листу, так же как и в экспериментах на растяжение, измерялись микронными индикаторами часового типа.

На фиг. 2 представлено несколько типичных диаграмм ползучести. Здесь светлыми точками изображены осевые деформации при растяжении, темными — при сжатии, крестиками — поперечные деформации в направлении нормали к листу. На фиг. 2, а



Фиг. 1

Фиг. 2

представлены результаты, полученные на образцах из продольного направления, на фиг. 2, б — на образцах из поперечного направления. Величины напряжений, при которых проводились эксперименты, указаны на диаграммах. Диаграммы ползучести на образцах диагонального направления имеют аналогичный вид.

Из рассмотрения диаграмм следует: материал в смысле ползучести существенно анизотропен и обладает разными свойствами на растяжение и сжатие. Сумма двух поперечных деформаций по модулю близка к соответствующей величине модуля осевой деформации, т. е. в процессе ползучести материал ведет себя практически как несжимаемая среда. Интересно отметить, что во всех экспериментах на растяжение модуль суммы поперечных деформаций не превышал величины осевой деформации, в экспериментах же на сжатие модуль деформации не превышал суммы поперечных деформаций.

Несколько экспериментов было продолжительностью более 1000 час, при этом соотношение между величинами поперечных деформаций не изменялось, т. е. в процессе ползучести начальная анизотропия материала не менялась. Из графиков следует, что наименее прочным в смысле ползучести является направление нормали к листу, наиболее прочным — поперечное направление листа, диагональное направление является промежуточным, причем это справедливо как в отношении растяжения, так и в отношении сжатия.

Прочностные свойства материала в смысле ползучести для продольного направления листа и направления по нормали к листу близки между собой (фиг. 2, б), т. е. образцы, вырезанные из поперечного направления листа, можно считать трансверсально-изотропными. Последнее обстоятельство позволило изготавливать трубчатые образцы, ось которых совпадала с поперечным направлением листа, и рассматривать эти образцы как обладающие осевой симметрией свойств ползучести, что существенно при проведении экспериментов на совместное действие растягивающего усилия и крутящего момента.

Процесс деформирования при ползучести как на растяжение, так и на сжатие аппроксимировался зависимостью

$$\epsilon^\alpha d\epsilon = B\sigma^n dt \quad (1.1)$$

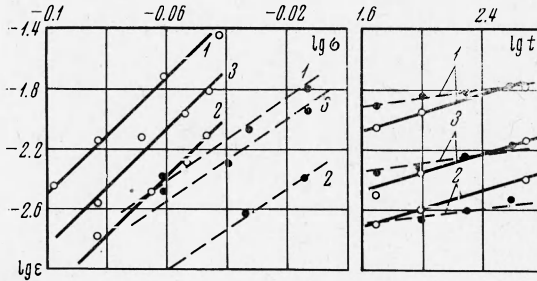
На фиг. 3 представлены экспериментальные результаты в координатах $\lg \epsilon - \lg t$ при величинах напряжений $\sigma = 0.826$ для экспериментов на растяжение и $\sigma = 0.930$ (линия 1) и $\sigma = 0.870$ (линии 2 и 3) для экспериментов на сжатие и в координатах $\lg \epsilon -$

$\lg \sigma$ для $t = 100$ час. Здесь светлыми точками отмечены данные на растяжение, темными — данные на сжатие, цифры у соответствующих линий обозначают следующее: 1 — результаты на образцах продольного направления, 2 — поперечного направления, 3 — диагонального направления. Из данных фиг. 3 были определены характеристики зависимости (1.1):

растяжение

$$\alpha = 2.3, \quad n = 64 \quad (1.2)$$

$$B_1 = 30 \cdot 10^{-6}, \quad B_2 = 0.27 \cdot 10^{-6}, \quad B_3 = 2.35 \cdot 10^{-6} \quad [1/\text{час}]$$



Фиг. 3

сжатие

$$\alpha^* = 6.69, \quad n^* = 103 \quad (1.3)$$

$$B_1^* = 572 \cdot 10^{-18}, \quad B_2^* = 0.021 \cdot 10^{-18},$$

$$B_3^* = 120 \cdot 10^{-18} \quad [1/\text{час}]$$

Здесь цифры 1, 2, 3 относятся соответственно к продольному, поперечному и диагональному направлениям.

Расчетные кривые, построенные по зависимости (1.1) с характеристиками (1.2) и (1.3), изображены линиями на фиг. 2. В целом совпадение расчетных кривых с

экспериментальными данными можно считать удовлетворительным.

2. Для описания процессов ползучести в таких средах при сложном напряженном состоянии будем предполагать, как и в [2], существование двух потенциальных функций для скоростей деформаций ползучести η_{ij} , выбрав их в виде

$$\Phi_1 = \left(\frac{\sqrt{S}}{N} \right)^\alpha T_1^{1/2(n+1)}, \quad \eta_{ij} = \frac{\partial \Phi_1}{\partial \sigma_{ij}} \quad (2.1)$$

для области напряжений, где $\sigma_{ii} > 0$

$$\Phi_2 = \left(\frac{\sqrt{S}}{N} \right)^{\alpha^*} T_2^{1/2(n^*+1)}, \quad \eta_{ij} = \frac{\partial \Phi_2}{\partial \sigma_{ij}} \quad (2.2)$$

для области напряжений, где $\sigma_{ii} < 0$

Здесь $N = \sigma_{ij} \varepsilon_{ij}$ при $\sigma_{ij} \varepsilon_{ij} \geq 0$ и тождественно полагается равным нулю при $\sigma_{ij} \varepsilon_{ij} < 0$

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

$$T_1 = A_{11}(\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + A_{22}(\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + A_{33}(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 +$$

$$+ 2A_{12}\sigma_{12}^2 + 2A_{23}\sigma_{23}^2 + 2A_{31}\sigma_{31}^2$$

Выражение для T_2 имеет аналогичный вид с коэффициентами A_{ij}^* , при этом учтено, что материал ортотропен и система координат совмещена с главными осями анизотропии.

Полагая в (2.1) отличными от нуля последовательно только σ_{11} , затем σ_{22} и σ_{33} и сравнивая с зависимостями (1.1), после подстановки соответствующих характеристик (1.2) найдем A_{11} , A_{22} , A_{33} . Выражая компоненты напряжений σ_{ij} через нормальное напряжение σ' , действующее на площадке, составляющей угол 45° с направлением X_1 в плоскости X_1X_2 , после несложных преобразований [3] и сравнения с (1.1) с учетом (1.2) найдем A_{12} . Коэффициенты A_{23} и A_{31} можно найти аналогичным путем по экспериментальным данным в диагональных направлениях в плоскостях X_2X_3 и X_3X_1 . Методика нахождения A_{ij}^* из (2.2) с учетом (1.1) и (1.3) аналогична.

Справедливость зависимостей (2.1) с коэффициентами A_{ij} , найденными по характеристикам (1.2), проверялась на экспериментах по ползучести трубчатых образцов при совместном действии растягивающего усилия и крутящего момента.

Заготовки для образцов вырезались из поперечного направления листа. Трубчатые образцы вытачивались с наружным и внутренним диаметрами соответственно 17 и 15 мм и длиной рабочей части 50 мм. Осевое напряжение определялось как отношение вели-

чины растягивающего усилия к площади сечения образца, сдвиговое напряжение — как отношение величины крутящего момента к площади сечения, умноженной на средний радиус кольца. Напряженное состояние считалось однородным и в процессе ползучести не меняющимся.

Применительно к описанию названных экспериментов квадратичные формы в (2.1) примут вид

$$S = 2\sigma^2 + 6\tau^2, \quad T_1 = (A_{11} + A_{33})\sigma^2 + 2A_{21}\tau^2 \quad (2.3)$$

Здесь учтено, что материал относительно оси X_2 обладает осевой симметрией, т. е. $A_{21} = A_{23}$ и введено сдвиговое напряжение τ по зависимостям $\sigma_{21} = -\tau \sin \varphi$, $\sigma_{33} = \tau \cos \varphi$, где угол φ отсчитывается от оси X_1 в плоскости X_1X_3 . По экспериментальным данным при одноосном растяжении (1.2) найдено

$$A_{11} + A_{33} = 0.5389, \quad 2A_{21} = 1.6807$$

Из (2.1) с учетом (2.3) получим

$$(\sigma\varepsilon + \tau\gamma)^{\alpha+1} = (\alpha + 1)(n + 1)(2\sigma^2 + 6\tau^2)^{1/2\alpha} [(A_{11} + A_{33})\sigma^2 + 2A_{21}\tau^2]^{1/2(n+1)t} \\ \frac{\Delta\varepsilon}{\Delta\gamma} = \frac{C_1\sigma - C_3\varepsilon}{C_2\tau - C_3\gamma} \quad (2.4)$$

Здесь

$$C_1 = \frac{2\alpha [(A_{11} + A_{33})\sigma^2 + 2A_{21}\tau^2]}{2\sigma^2 + 6\tau^2} + (n + 1)(A_{11} + A_{33}) \\ C_2 = \frac{2\alpha [(A_{11} + A_{33})\sigma^2 + 2A_{21}\tau^2]}{2\sigma^2 + 6\tau^2} + \frac{(n + 1)2A_{21}}{3} \\ C_3 = \frac{\alpha [(A_{11} + A_{33})\sigma^2 + 2A_{21}\tau^2]}{\sigma\varepsilon + \tau\gamma} \quad (2.5)$$

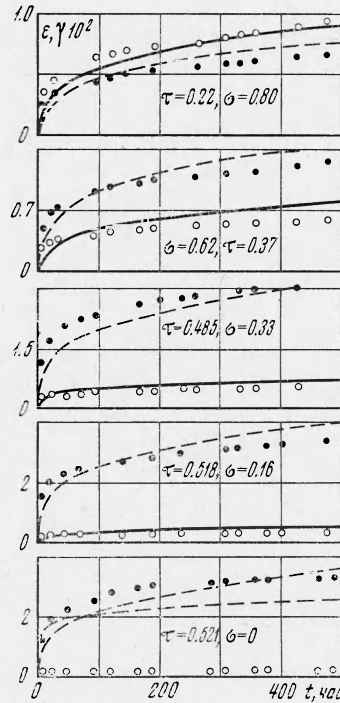
Раскрывая во втором выражении (2.4) неопределенность, которая имеет место в момент нагружения при $\varepsilon = \gamma = 0$, найдем

$$\Delta\varepsilon / \Delta\gamma = C_1\sigma / C_3\tau$$

При неизменных напряжениях последнее отношение остается постоянным.

Все экспериментальные результаты сравнивались с расчетными кривыми, полученными по зависимостям (2.4). На фиг. 4 светлыми точками изображены осевые деформации, темными — сдвиговые деформации γ . Сплошными линиями представлены расчетные кривые осевых деформаций ε , пунктирными — расчетные сдвиговые деформации γ . Величины напряжений σ и τ , при которых проводились эксперименты, указаны на диаграммах. При чистом кручении образца наблюдалось небольшое осевое удлинение, что и отражено на соответствующей диаграмме. Здесь же утолщенным пунктиром указана расчетная кривая по характеристике $2A_{21}^* = 1,2835$, полученной из экспериментальных результатов при чистом осевом сжатии (1.3). Как и следовало ожидать, последняя кривая идет ниже аналогичной кривой, найденной по характеристикам, соответствующим чистому растяжению.

Из представленных результатов (фиг. 4) можно заключить, что для описания процессов ползучести материалов, обладающих разными свойствами на растяжение и сжатие, можно использовать метод, основанный на введении различных зависимостей соответственно для областей напряженных состояний, где $\sigma_{ii} > 0$ и $\sigma_{ii} < 0$. В области напряженных состояний $\sigma_{ii} \approx 0$, где сказывается влияние как тех, так и других характеристик материала, предлагаемый метод не применим.



Фиг. 4

ЛИТЕРАТУРА

1. В е r m a n I., P a i D. H. A theory of anisotropic steady-state creep. Internat. J. Mech. Sci., 1966, vol. 8, No. 5.
2. С о с н и н О. В. О ползучести материалов с разными характеристиками на растяжение и сжатие. ПМТФ, 1970, № 5.
3. С о с н и н О. В. Об анизотропной ползучести материалов. ПМТФ, 1965, № 6.

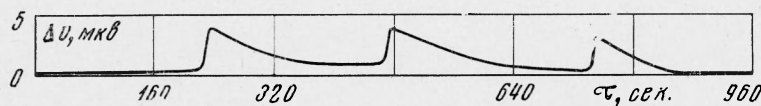
ОБ УТОЧНЕНИИ ФОРМЫ ТЕМПЕРАТУРНОЙ КРИВОЙ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ОБРАЗЦОВ

Л. А. Горбачев

(Усть-Каменогорск)

Изложены некоторые результаты исследований по уточнению формы температурной кривой, получаемой при фиксации теплового эффекта циклически нагружаемых образцов. Показано, что тепловой эффект имеет место с первых циклов нагружения, а не после приложения некоторого числа циклов, как это считалось ранее.

Устанавливается корреляция температурной кривой (ее формы) с формой кривой изменения внутреннего трения и изменения прогиба образца при циклических нагрузках. На основании этого констатируется, что форма упомянутых кривых косвенно описывает одни и те же изменения, происходящие в металле под действием циклических нагрузок.



Фиг. 1

Автором работы [1] при исследовании теплового эффекта при циклическом нагружении металлических образцов отмечено наличие начальной стадии нагружения, характеризующейся отсутствием теплового эффекта. Это обстоятельство связывается с тем, что для активизации генераторов дислокаций к металлу необходимо приложить некоторое число циклов нагрузки. Наличие такой стадии, равно как и предположительная трактовка причин ее существования, представляется спорным. Известно, что уже с первых циклов нагружения происходят необратимые физические процессы, приводящие к ослаблению связей кристаллической решетки [2]. Поэтому в той или иной степени эти изменения должны проявиться в виде теплового эффекта, на что прямо указывается в работе [3]: «... как только начинают появляться напряжения, как бы малы они ни были, одновременно с ними появляется нагревание, хотя бы и ничтожное». Поэтому отмеченная стадия [1] объективно связана скорее всего с недостаточной чувствительностью теплоизмерительной схемы или фиксирующих приборов.

Для уточнения этого вопроса выполнены исследования по изучению теплового эффекта при циклическом нагружении пластинчатых образцов, форма и размеры которых аналогичны описанным в работе [4]. Теплоизмерения проводились дифференциальной термопарой с использованием тела-образца в качестве составной части измерительной схемы, автоматическая запись температурных кривых — с помощью фоторегистрирующего пирометра Курнакова. Исключительно высокая чувствительность дифференциальной термопары (она, согласно данным работы [5], позволяет улавливать разность температур в двух точках в величинах, измеряемых десятками и даже сотыми долями градуса), зеркальных гальванометров пирометра Курнакова, а также расположение спаев термопары на исследуемом образце на небольшом расстоянии друг от друга позволило получать высокочувствительные, точные результаты, практически независимые от колебания температуры окружающей среды. На фиг. 1 приведена запись температурной кривой (Δ — разность т.э. д. с. в двух контролируемых точ-