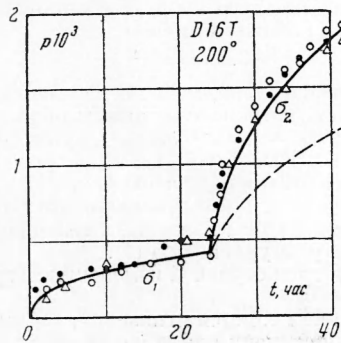


О ГИПОТЕЗЕ УРАВНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ ПРИ ПОЛЗУЧЕСТИ

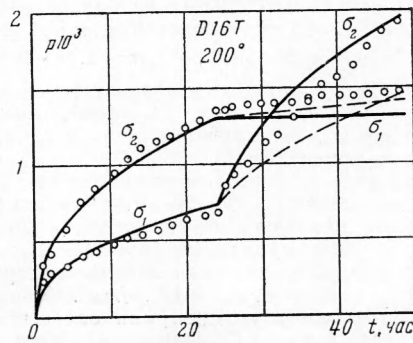
В. С. Наместников, Ю. Н. Работнов

(Новосибирск)

Гипотеза уравнения состояния достаточно хорошо описывает в первом приближении ползучесть металлов в тех условиях, когда процесс ползучести не сопровождается структурными изменениями. Задаваясь определенным аналитическим выражением для уравнения состояния и определяя соответствующие константы из опытов, проведенных в определенных условиях, например при постоянном напряжении, можно предсказывать поведение материала при переменных напряжениях, например можно считать кривую релаксации [1, 2]. Ползучесть при ступенчатом изменении нагрузки



Фиг. 1



Фиг. 2

в основном также описывается при помощи уравнения состояния [2, 3], однако при сопоставлении расчетных кривых с экспериментальными наблюдаются небольшие, но систематические отклонения от предсказаний теории. При увеличении напряжения скорость ползучести оказывается больше, чем скорость, предсказываемая гипотезой уравнения состояния, и опытные точки ложатся выше, чем теоретическая кривая [2]. Опытные данные при ступенчатом уменьшении нагрузки носят менее определенный характер; если уменьшение нагрузки значительно, то в первые часы наблюдается восстановление ползучести, которое вообще гипотезой уравнения состояния в обычной форме не описывается.

Пример, когда уравнение состояния не соблюдается, приведен Одквистом [4]. Опыты производятся при двух ступенях напряжения σ_1 и σ_2 продолжительности действия постоянного напряжения каждой ступени соответственно t_1 и t_2 . Согласно теории конечная деформация не зависит от порядка приложения нагрузок. В действительности деформация в двух опытах оказалась различной.

Уравнение состояния предполагает зависимость между величинами скорости пластической деформации \dot{p} , величиной пластической деформации p и напряжением σ (при постоянной температуре)

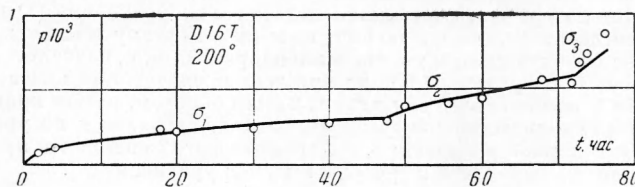
$$\Phi(p, \dot{p}, \sigma) = 0 \tag{1}$$

Для описания отмеченных эффектов введем в уравнение состояния еще один параметр, сохраняющий постоянное значение при постоянном напряжении, но изменяющийся скачком при ступенчатом изменении нагрузки. В качестве такого параметра выберем величину

$$\vartheta = \int_0^{\sigma} p d\sigma \tag{2}$$

Уравнение состояния будет иметь вид:

$$\Phi(p, \dot{p}, \sigma, \vartheta) = 0 \tag{3}$$



Фиг. 3

Одному и тому же приращению напряжения соответствует приращение параметра ϑ тем большее, чем больше накопленная деформация ползучести p , при приложении первоначальной нагрузки интеграл в соотношении (2) равен нулю; таким образом, кривые ползучести при постоянном напряжении описываются уравнением (3), в котором нужно принять $\vartheta = 0$.

Для обработки опытных данных бывает удобно задаться некоторым аналитическим выражением для уравнения состояния. Известно, что для уравнения состояния в форме (1) хорошей аппроксимацией является следующая:

$$\dot{p}p^\alpha = \kappa \exp \frac{\sigma}{A} \quad (4)$$

Наиболее простое выражение для закона (3), из которого при $\vartheta = 0$ следует (4), будет

$$\dot{p}p^\alpha = \kappa \exp \left(\frac{\sigma}{A} + \frac{\vartheta}{B} \right) \quad (5)$$

Постоянные α , κ , A по-прежнему определяются из опытов на ползучести при постоянном напряжении. Для определения постоянной B достаточно иметь одну кривую ползучести при ступенчатом изменении нагрузки. Для проверки теории были использованы результаты опытов на сплаве Д-16Т при температуре 200°, опубликованные в работе [2]. Значения констант α , κ и A взяты из этой работы, а именно

$$\alpha = 1.38, \quad \kappa = 1.22 \cdot 10^{-11} \text{ 1/час}, \quad A = 3.4 \text{ кг/мм}^2$$

На фиг. 1 приведены результаты испытания при нагрузке, меняющейся внезапно от $\sigma_1 = 8 \text{ кг/мм}^2$ до $\sigma_2 = 16 \text{ кг/мм}^2$, точки относятся к трем испытанным образцам. Сплошная линия соответствует уравнению (5) при $B = 2 \cdot 10^{-3} \text{ кг/мм}^2$, пунктирная линия — уравнению (4).

На фиг. 2 приведены результаты аналогичного испытания для напряжений $\sigma_1 = 12 \text{ кг/мм}^2$ и $\sigma_2 = 16 \text{ кг/мм}^2$, приложенных в различной последовательности. Здесь сплошные линии соответствуют расчету по уравнению (5) при найденных выше значениях констант, пунктирные кривые также соответствуют уравнению (4).

На фиг. 3 показаны аналогичные результаты для трех ступеней изменения нагрузки: $\sigma_1 = 4$, $\sigma_2 = 8$, $\sigma_3 = 12 \text{ кг/мм}^2$.

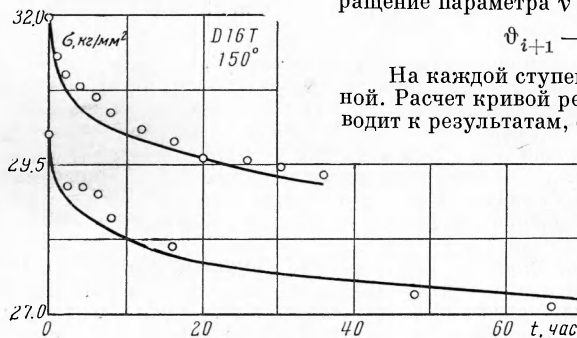
При обработке всюду принималось, что напряжение меняется мгновенно; таким образом, если величина деформации ползучести к концу ступени номер i есть p_i , то приращение параметра ϑ равно

$$\vartheta_{i+1} - \vartheta_i = p_i (\sigma_{i+1} - \sigma_i)$$

На каждой ступени величина ϑ остается постоянной. Расчет кривой релаксации по уравнению (5) приводит к результатам, отличным от результатов расчета

по уравнению (4), однако разница невелика, как это следует из фиг. 4, на которой приведены кривые релаксации при температуре 150°. Соответствующие значения констант для этой температуры:

$$\alpha = 2, \quad \kappa = 5.6 \cdot 10^{-18} \text{ 1/час} \\ A = 2.52 \text{ кг/мм}^2 \\ B = 68 \cdot 10^{-3} \text{ кг/мм}^2$$



Фиг. 4

Упрочнение материала в процессе ползучести обычно объясняется накоплением задержанных препятствиями групп дислокаций в плоскостях скольжения. Внезапное повышение напряжения вызывает разупрочнение материала, что и описывается уравнением (3). По-видимому, это разупрочнение связано с тем, что при повышении напряжения некоторые из препятствий прорываются и соответствующие группы дислокаций освобождаются, в результате чего соответствующие источники получают возможность генерировать новые дислокации. Если встать на эту точку зрения, то упрочнение материала, формально следующее из уравнения (3) при определении параметра ϑ согласно (2), объяснено быть не может. Поэтому логично предположить, что величина ϑ не изменяется при уменьшении напряжения, и, более того, если было достигнуто наибольшее напряжение σ^* , то при всех последующих изменениях напряжения σ , параметр ϑ не меняется, если $\sigma < \sigma^*$. Таким образом, расчет кривых ползучести при ступенчатом уменьшении нагрузки должен производиться по уравнению (1) так же, как и расчет кривой релаксации. На графике фиг. 2 видно, что при уменьшении нагрузки это уравнение дает лучшие результаты, чем уравнение (3).

Поступила
31 III 1961

ЛИТЕРАТУРА

1. Д а н и л о в с к а я В. И., И в а н о в Г. М., Р а б о т н о в Ю. Н. Ползучесть и релаксация хромомолибденовой стали. Изв. АН СССР, ОТН, 1955, № 5.
2. Н а м е с т н и к о в В. С., Х в о с т у н к о в А. А. Ползучесть дуралюмина при постоянных и переменных нагрузках. ПМТФ, 1960, № 4.
3. Ж у к о в А. М., Р а б о т н о в Ю. Н., Ч у р и к о в Ф. С. Экспериментальная проверка некоторых теорий ползучести. Инж. сб., 1953, т. XVII.
4. О д к в и с т Ф. Технические теории ползучести. Сб. перев., Механика, 1959, № 2.