

О ПОЛЗУЧЕСТИ ПРИ ПЕРЕМЕННОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ В УСЛОВИЯХ СЛОЖНОГО НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ

В. С. Наместников

(Новосибирск)

В последнее время внимание исследователей привлек вопрос о неизоотермическом пластическом деформировании. Были предложены разные варианты теории пластичности при неизоотермическом нагружении [1-3]. Аналогичный вопрос для случая ползучести рассматривается в книге [4]. Однако, насколько известно автору, в обоих случаях какие-либо экспериментальные данные по сложному напряженному состоянию при переменных температурах в литературе отсутствуют.

Ниже приводятся результаты экспериментального исследования ползучести тонкостенных трубчатых образцов в условиях совместного кручения и растяжения и переменной температуры.

Полная деформация ε_{ij} может быть представлена в виде суммы упругой e_{ij} , пластической η_{ij} деформаций, деформации ползучести p_{ij} и деформации температурного расширения $\alpha_0 T \delta_{ij}$

$$\varepsilon_{ij} = e_{ij} + \eta_{ij} + p_{ij} + \alpha_0 T \delta_{ij} \quad (1)$$

где α_0 — коэффициент линейного расширения, T — разность между текущей и исходной температурами, δ_{ij} — символы Кронеккера. Упругая деформация может быть представлена в виде, используемом обычно в теории упругости [5]. Пластическая деформация в данной работе не рассматривалась. Относительно деформации ползучести можно предположить следующее:

$$p_{ij} = \Lambda \sigma_{ij}^{\circ} \quad (2)$$

$$(\sigma_{ij}^{\circ} = \sigma_{ij} - \delta_{ij} \sigma_0, \quad 3\sigma_0 = \sigma_{kk})$$

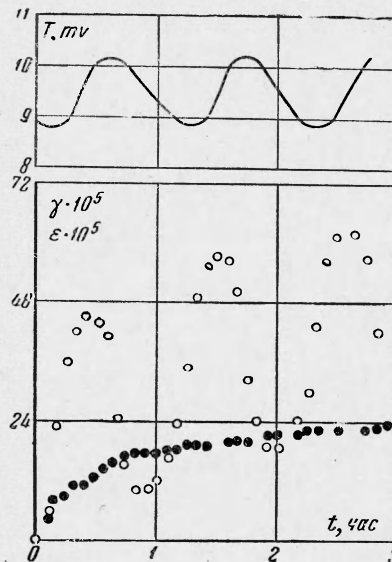
где σ_{ij} — компоненты тензора напряжений. Коэффициент Λ может быть определен при помощи гипотезы о связи между инвариантами тензоров напряжений и деформаций ползучести, в аналитическое выражение которой (взятое, например, в соответствии с теорией упрочнения или теорией старения) температура может быть введена явно, а также через входящие в него параметры. Такой путь принят в работе [4], он же по существу использован для пластического деформирования [2].

Зависимость от температуры может быть введена и другим путем, например, при помощи потенциала ползучести, если предположить определенную зависимость его от температуры. В частности, если зависимость потенциала течения от тензора напряжений выражается через второй инвариант, то снова получится соотношение вида (2).

Таким образом, изучение ползучести при сложном напряженном состоянии и переменной температуре складывается из исследования инвариантной зависимости и девиаторной зависимости (2). В данной работе рассмотрена только девиаторная зависимость.

Эксперименты были выполнены на установке, описанной ранее в статье [6]. В качестве испытуемого материала была выбрана технически чистая медь, поставленная в виде прутка, дополнительная термообработка которого не производилась. Была проверена исходная изотропия материала, для чего были испытаны на ползучесть при растяжении при одной и той же величине напряжения малые образцы, вырезанные из прутка в продольном и поперечном направлениях, а также сделаны продольный и поперечный микрошлифы. Оказалось, что структура материала мелкозернистая (по толщине стенки образца насчитывается до 15 зерен), а обнаруженная анизотропия материала незначительна.

В установках для испытаний на ползучесть стационарность температуры обеспечивается обычно путем периодической подачи максимального и минимального напряжений на нагреватели печи. Определенная частота включения максимального и минимального напряжений дает возможность получить постоянство температуры с заданной точностью. Если увеличить период подачи напряжения, то температура в печи будет периодической функцией времени с большей амплитудой (фиг. 1). Таким



Фиг. 1

путем было получено периодическое изменение температуры, амплитуда которого для разных образцов изменялась в пределах от 10 до 29°, а период — от 1 до 3 час. Продолжительность экспериментов составляла 22—75 час.

Эксперименты выполнялись следующим образом. В образце создавалась периодически изменяющаяся температура. По прошествии некоторого числа циклов к образцу прикладывались осевая сила и крутящий момент, которые в дальнейшем оставались постоянными. Нагружение было пропорциональным, т. е. выполнялось условие

$$\tau / \sigma = \lambda = \text{const} \quad (3)$$

В таблице слева и на фиг. 1 приведены результаты проведенных экспериментов, причем

$$\delta = \gamma^p / 3\epsilon^p \lambda - 1$$

Начало отсчета времени на фиг. 1 соответствует моменту при-

ложения нагрузки. Темные точки изображают деформацию сдвига, а светлые — приращение полной деформации удлинения после приложения нагрузки. На участке, предшествующем приложению нагрузки, сдвиговая деформация отсутствует, а осевая представляет собой периодическую функцию времени с тем же периодом, что и у функции разности температуры T , но с некоторым сдвигом по фазе, явившимся неизбежным следствием конструкции машины.

Таким образом, в соответствии с гипотезой Дюгамеля — Неймана, температурное расширение сказывается только на деформации удлинения, что видно также на фиг. 1.

В этих опытах нагрузки выбирались таким образом, что пластическая деформация η_{ij} была мала и ею можно было пренебречь. Интервал изменения температур был такой, что изменением модулей упругости также можно пренебречь. Следовательно, в соответствии с формулой (1), сдвиговая деформация, представленная на фиг. 1, является сдвиговой деформацией ползучести γ^p , а чтобы получить осевую деформацию ползучести ϵ^p , достаточно из осевой деформации, представленной на фиг. 1, вычесть деформацию, соответствующую температурному расширению. Последнее нетрудно сделать по данным, полученным на участках, где нагрузка отсутствовала, введение которых как раз и преследовало эту цель.

Пример полученных таким образом кривых ползучести приведен на фиг. 2. Гипотеза (2) в данном случае может быть переписана в виде

$$\frac{\gamma^p}{\epsilon^p} = 3 \frac{\tau}{\sigma} = 3\lambda \quad (4)$$

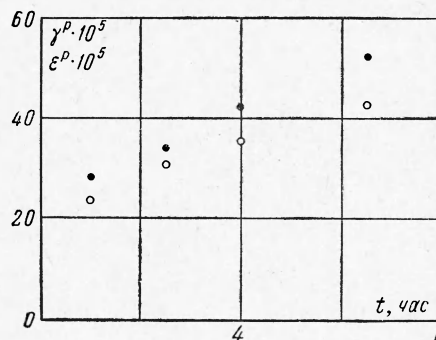
Как оказалось, отклонения левой части (4) от правой (см. таблицу) будут величинами того же порядка, что и для изотермического случая [7].

Таким образом, для данного материала и переменной температуры гипотеза о связи между девиаторами (2) удовлетворительно выполняется.

Поступила 15 IV 1964

ЛИТЕРАТУРА

1. Прагер В. Неизотермическое пластическое деформирование. Механика, сб. перев., 1959, № 5.
2. Биргер И. А. Теория пластического течения при неизотермическом нагружении. Изв. АН СССР, ОТН, Механика и машиностроение, 1964, № 1.
3. Паллей И. З. Влияние истории нагружения на напряженное состояние двухслойной оболочки. Вопросы динамики и прочности, 1962, вып. 9, АН ЛатССР.
4. Качанов Л. М. Теория ползучести. Физматгиз, 1960.
5. Лейбензон Л. С. Курс теории упругости. Гостехиздат, 1947.
6. Наместников В. С. О ползучести при постоянных нагрузках в условиях сложного напряженного состояния. Изв. АН СССР, ОТН, 1957, № 4.
7. Наместников В. С. О ползучести металлов. Тр. II Всесоюзного съезда по прикладной и теоретической механике, 1964.



Фиг. 2