

## К МЕТОДУ ПОСТРОЕНИЯ ОПРЕДЕЛЯЮЩЕГО УРАВНЕНИЯ В ТЕОРИИ УПРОЧНЕНИЯ

Б. П. РУСОВ

(Новосибирск)

Наиболее просто уравнение состояния в теории упрочнения записывается в форме [1, 2]

$$(1) \quad \dot{p} = g(\sigma)/f(p),$$

где  $p$  — деформация ползучести;  $\sigma$  — напряжение; точкой обозначено дифференцирование по времени.

Область применимости этого уравнения окончательно до сих пор не выяснена, и не существует достаточно общей методики определения функции упрочнения  $f(p)$ . На практике функцию  $f(p)$  обычно находят методом подбора.

Ниже с помощью специального преобразования кривых ползучести указан способ определения области применимости уравнения (1) и предложена методика построения функции  $f(p)$ .

Эксперименты показывают, что в не очень широком диапазоне напряжений и деформаций ползучесть металлов можно описать уравнением [1, 2]

$$(2) \quad \dot{p} = g(\sigma)/p^\alpha.$$

Область применимости уравнения (2) в некоторых случаях оказывается довольно узкой. В [3] показано, что для стали 30ХМА при температуре 500°C параметр упрочнения  $\alpha$  в уравнении (2) можно принять постоянным только при малых деформациях. При больших деформациях ползучести параметр  $\alpha$  оказывается зависящим от напряжения, т. е. форма (1) нарушается. К такому же выводу пришли авторы [4], которые исследовали ползучесть сплава Д-16Т.

Было проанализировано более тридцати серий кривых ползучести различных металлов и сплавов [5]. Анализ показал, что в большинстве случаев в логарифмических координатах прямыми можно представить только начальные участки кривых ползучести и то в определенном для каждого материала диапазоне напряжений. На фиг. 1 в осях  $\ln p \sim \ln t$  представлены кривые ползучести сплава АМг5В, снятые при температуре 200°C [6]. Цифры у кривых — значения напряжений, МПа. Кривые ползучести этого сплава не спрямляются в логарифмических координатах. Уравнением (2) нельзя описать ползучесть сплава АМг5В, если даже принять, что  $\alpha$  зависит от  $\sigma$ . Необходимо искать новую форму определяющего уравнения, и неизвестно, можно ли описать эти и другие, указанные выше опыты уравнением (1) или надо формулировать более сложную модель. Возникает необходимость разработки методики определения области применимости уравнения (1).

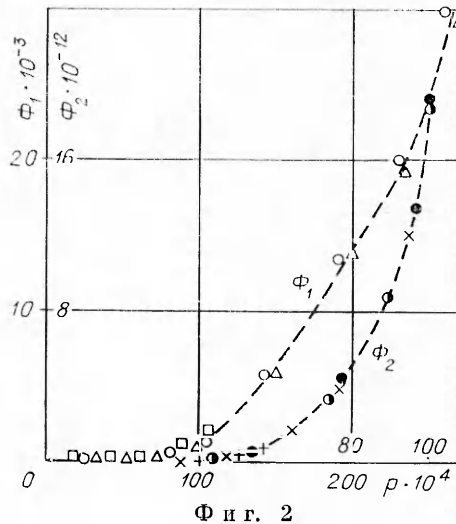
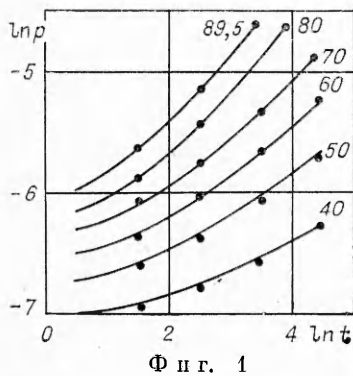
Предлагаемая здесь методика основана на том, что начальные участки кривых ползучести в некотором диапазоне напряжений можно описать уравнением (2).

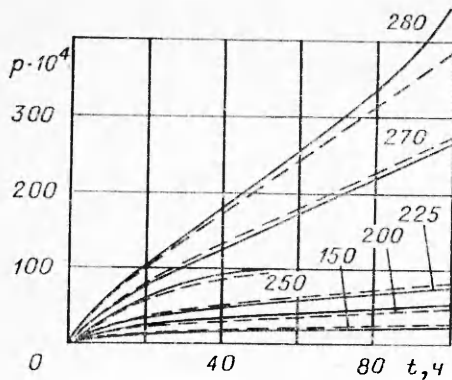
Представим уравнение (1) в виде

$$(3) \quad \dot{p} = g(\sigma)/(p^\alpha - \varphi(p)),$$

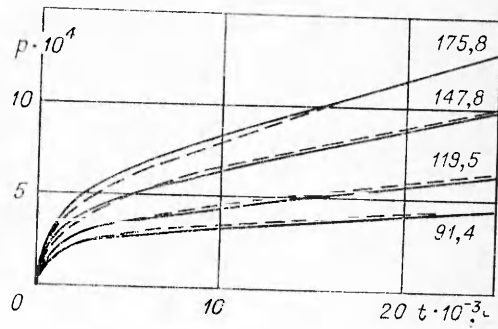
где  $\varphi(p) \ll p^\alpha$  при малых  $p$ .

Индивидуальную кривую ползучести можно описать уравнением (3) с любой точностью, взяв, например,  $\varphi(p)$  в виде полинома. Вопрос состоит в том, можно ли описать уравнением (3) серию кривых ползучести в достаточно широком диапазоне изменения напряжений и деформаций.





Фиг. 3



Фиг. 4

Проинтегрируем уравнение (3) при  $\sigma - \sigma_0 = \text{const}$ :

$$(4) \quad \int_0^p \varphi(p) dp = \frac{p^{\alpha+1}}{\alpha+1} - g(\sigma_0) t.$$

Обозначим

$$\int_0^p \varphi(p) dp = \Phi(p).$$

Если уравнение (3) справедливо (может описать данную серию кривых ползучести), то функция

$$(5) \quad \Phi(p) = \frac{p^{\alpha+1}}{\alpha+1} - g(\sigma_0) t$$

при разных значениях  $\sigma_0$ ,  $t$  должна представлять единую кривую. Здесь напряжение  $\sigma_0$  и время  $t$  фигурируют в качестве параметров. В частном случае, когда  $\varphi(p) \equiv 0$ , получаем степенной закон ползучести (2).

Чтобы иметь возможность построить зависимость  $\Phi \sim p$  по формуле (5), необходимо сначала найти функцию  $g(\sigma)$ . Ее можно определить известными методами [1, 7, 8], полагая в (4)  $\varphi(p) = 0$ .

На фиг. 2 представлена функция (5) для стали 30ХМА ( $\Phi_1$ ) и сплава АМг5В ( $\Phi_2$ ). Экспериментальные точки соответствуют отдельным кривым ползучести. Из фиг. 2 видно, что расчетные значения группируются около одной кривой.

Подобное построение было выполнено для указанных выше тридцати серий кривых ползучести [5]. Во всех рассмотренных случаях в осях  $\Phi \sim p$  они группируются около одной кривой. Это говорит о том, что уравнение (1) имеет достаточно широкую область применимости.

Для определения функции  $f(p)$  необходимо сначала найти  $\varphi(p)$ , например, численным дифференцированием  $\Phi(p)$ . Можно предварительно  $\Phi(p)$  аппроксимировать подходящей функцией, а потом, продифференцировав ее, найти  $\varphi(p)$ . После того как  $f(p) = p^\alpha - \varphi(p)$  определена (построен график), ее можно аппроксимировать другой более простой функцией.

Во многих случаях хорошие результаты дает функция

$$(6) \quad f(p) = \text{th}^\alpha ap.$$

В области малых деформаций  $p$  функция (6) вырождается в степенную, и уравнение (1) принимает форму (2). При  $p \rightarrow \infty$  функция (6) стремится к единице. Поэтому при достаточно больших деформациях ползучести скорость деформации ползучести  $\dot{p}$  определяется только величиной напряжения:

$$(7) \quad \dot{p} = g(\sigma).$$

Таким образом, уравнение (1) с функцией упрочнения (6) описывает первую и вторую стадии ползучести.

Если кривые ползучести имеют явно выраженный второй участок, то формула (7) позволяет найти функцию  $g(\sigma)$ .

Обработка кривых ползучести сплава АМг5В и стали 30ХМА показала, что для этих материалов можно принять  $\alpha = 1$ .

В этом случае решение уравнения (1) имеет вид

$$(8) \quad p = \frac{1}{a} \text{arch} e^{ag(\sigma_0)t}.$$

На фиг. 1 точками обозначены расчетные значения, подсчитанные по формуле (8) ( $a = 180$ ,  $g(\sigma) = 3,64 \cdot 10^{-9} \sigma^5$ ). На фиг. 3 сплошными линиями изображены кривые

ползучести стали 30ХМА [3], трехпунктными — расчетные значения ( $a = 166,67$ ,  $g(\sigma) = 2,408 \cdot 10^{-3} \exp(\sigma/29,4)$ ). Из фиг. 1,3 видно, что совпадение расчетных и экспериментальных значений хорошее.

На фиг. 4 сплошными линиями представлены кривые ползучести хромоникельмолибденовой стали при температуре  $450^\circ\text{C}$ , имеющие явно выраженный второй участок [2]. Трехпунктными линиями нанесены расчетные кривые ( $\alpha = 3$ ,  $a = 2400$ ,  $g(\sigma) = 8,14 \cdot 10^{-16} \sigma^{3,334}$ ). Из фиг. 4 видно, что и в этом случае уравнение (1) с функцией упрочнения (6) позволило удовлетворительно описать кривые ползучести хромоникельмолибденовой стали.

Проведенные выше исследования показывают, что уравнение (1) имеет достаточно широкую область применения. Совпадение расчетных результатов с опытом будет зависеть от точности аппроксимации найденного указанным выше методом графика функции упрочнения.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Работнов Ю. Н. Ползучесть элементов конструкций. М.: Наука, 1966.
2. Качанов Л. М. Теория ползучести. М.: Физматгиз, 1960.
3. Даниловская В. И., Иванова Г. М., Работнов Ю. Н. Ползучесть и релаксация хромомолибденовой стали. — Изв. АН СССР. ОТИ, 1955, № 5.
4. Соснин О. В., Торшенин Н. Г. Сжатие и выпучивание стержней при монотонно возрастающей нагрузке в условиях ползучести. — ПМТФ, 1967, № 5.
5. Русов Б. П. Расширение области применимости простейшей формы теории упрочнения. — В кн.: Всесоюз. симпозиум «Ползучесть в конструкциях». Тез. докл. Днепропетровск: ДГУ, 1982.
6. Дегтярев В. И. Пластичность и ползучесть машиностроительных конструкций. М.: Машиностроение, 1967.
7. Наместников В. С., Хвостунков А. А. Ползучесть дуралюмина при постоянных и переменных нагрузках. — ПМТФ, 1960, № 4.
8. Никитенко А. Ф. Об уравнении ползучести материалов с упрочнением. — ПМТФ, 1969, № 3.

Поступила 24/VI 1983 г.

УДК 539.376

#### ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЙ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

В. И. ГОРЕЛОВ

(Куйбышев)

Известно, что под воздействием высоких давлений металлы приобретают новые механические характеристики, которые могут сохраняться и после снятия давления [1—3]. Однако вопрос о влиянии длительного воздействия высоких давлений на последующее поведение материала под нагрузкой в обычных условиях практически не обсуждался.

В работе описываются эксперименты, в которых испытуемый материал в течение длительного времени при высоких температурах подвергался воздействию высоких давлений. После охлаждения и снятия давления из материала изготавливались образцы для исследования механических характеристик, которые затем сравнивались с характеристиками обычного материала. Создание и поддержание высокого давления осуществлялось с помощью теплового метода, использующего различие эффектов термического расширения металлов. С этой целью в закрытый по торцам цилиндр помещалось рабочее тело с коэффициентом объемного расширения, большим, чем у цилиндра. Цилиндр представляет собой контейнер, состоящий из двух скрепленных втулок. Втулки изготавливались из закаленной стали 5ХН1М. В качестве рабочих тел использовались алюминиевые сплавы АМг5М и АМг6, которые одновременно являлись и исследуемыми материалами.

Для контейнера были выбраны следующие размеры: наружный диаметр 135 мм, внутренний диаметр 40 мм, диаметр посадочной поверхности 65 мм, высота контейнера 146 мм.

Давление создавалось при  $T = 723 \text{ K}$ . В этих условиях давление для абсолютно жесткого контейнера, как показали расчеты, достигает  $3000 \text{ МН/м}^2$ . Так как контейнер обладает податливостью, то теоретически возможное начальное давление составляло  $500 \text{ МН/м}^2$ .

Условия эксперимента были таковы, что контейнер подвергался деформациям ползучести. Чтобы уменьшить влияние ползучести контейнера на падение внутреннего давления, втулки перед сборкой проходили специальную обработку [4]. Эта обработка заключалась в следующем: наружную втулку деформировали внутренним давлением, а внутреннюю — наружным. Деформирование проводилось в условиях ползучести в течение 50 ч при  $T = 723 \text{ K}$ . После этого втулки обрабатывались под размер, который обеспечивал расчетный натяг в контейнере. В изготовленный контейнер помещалось рабочее тело из сплавов АМг6 и АМг5. Размеры рабочего тела исключали зазоры по внутренней поверхности контейнера. Последний закрывался по торцам крышками, по-