

## НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ КРАТКОВРЕМЕННОЙ ПОЛЗУЧЕСТИ ПРИ ОДНООСНОМ РАСТЯЖЕНИИ

С. Т. Милейко, Ю. Н. Работнов

(Москва)

В зависимости от уровня напряжений и температур скорости ползучести металлов могут изменяться в очень широких пределах, поэтому ощутимые изменения размеров изделия или его разрушение в том или ином смысле может происходить за время примерно от одной секунды до десятков лет. Процессы, происходящие в течение более короткого времени, принято называть динамическими; изучение их требует специальных методов.

Кратковременной ползучестью будем называть ползучесть, происходящую в течение примерно  $1-10^3$  сек. Такое определение носит достаточно условный и приближительный характер, смысл его состоит не столько в том, чтобы заранее указать продолжительность процесса, сколько в том, чтобы выделить определенный диапазон напряжений и температур, для которого за указанное время будет накоплена достаточная деформация ползучести. Последнее выражение может показаться весьма неопределенным. В действительности, конструктор должен учитывать деформации, составляющие некоторую ощутимую долю упругой деформации, например, 10%. Таким образом, устанавливается нижний предел того, что называется «достаточной» деформацией. Этот нижний предел примерно соответствует величине деформации, которая может быть надежно измерена обычными методами. Что касается верхнего предела, то деформация порядка 1—2% — это та деформация, которая обычно считается максимально допустимой в конструкции. Область больших деформаций представляет интерес обычно лишь в связи с условиями разрушения, которое происходит при равномерной деформации порядка 6—10%.

За последние десять лет появилось большое число публикаций, содержащих характеристики кратковременной ползучести различных металлов и сплавов; эти исследования были вызваны к жизни прежде всего потребностями практики и ставили своей основной целью получение исходных данных для оценки прочности тех или иных изделий. Однако кратковременная ползучесть представляет и некоторый принципиальный интерес для механики ползущего тела. При высоких температурах и малых продолжительностях действия нагрузок у большинства материалов структурные изменения, происходящие в процессе ползучести, не влияют сколько-нибудь существенно на скорость ползучести, и единственным структурным параметром является параметр охрупчивания, действие которого проявляется тогда, когда деформация достигнет некоторой величины. Поэтому в основу теории кратковременной ползучести может быть положена более простая модель, чем те модели, которые обычно принимаются для описания ползучести большой и средней длительности.

§ 1. Характерная особенность кратковременной ползучести — это отсутствие первых участков на кривых ползучести, что может быть интерпретировано как отсутствие упрочнения. Если записывать уравнение ползучести с упрочнением в виде

$$\dot{\epsilon} e^{\alpha} = f(\sigma) \quad (1.1)$$

то нужно считать, что  $\alpha = 0$ .

Таким образом, ползучесть при постоянном напряжении происходит с постоянной скоростью  $\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}'$ , пока  $\epsilon$  достаточно мало и не проявляется охрупчивание, приводящее к ускорению ползучести.

Отсутствие упрочнения при достаточно высоких напряжениях и температурах обнаружено при испытаниях многих материалов (Д16, АМг6, ВМ-65-1, ОТ-4, ВТ-14, ЭИ-811, ЭИ-696 и некоторые другие). Бернеттом [1] отмечено это обстоятельство для сплава N-155.

Обычные для ползучести степенные и экспоненциальные зависимости скорости деформации от напряжения вполне удовлетворительны для кратковременной ползучести. Выбор лучшей для каждого конкретного случая формы зависимости определяется соображениями удобства их использования [2]. Будем принимать

$$\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}_n \left( \frac{\sigma}{\sigma_n} \right)^n \quad \text{или} \quad \dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}_e \exp \left( \frac{\sigma}{\sigma_e} \right) \quad (1.2)$$

Здесь  $\dot{\epsilon}_n$ ,  $\sigma_n$ ,  $n$ ,  $\dot{\epsilon}_e$ ,  $\sigma_e$  — константы при данной температуре.

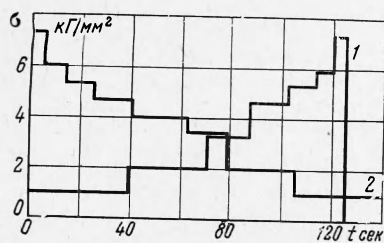
Справедливость соотношений типа (1.2), устанавливающих независимость скорости ползучести от предыстории, подтверждается также следующими экспериментами.

1. *Повторная релаксация* [3]. Образец (материал АМг6М, температура 227° С) нагружается до некоторого напряжения  $\sigma_0$ , затем установка переключается на режим релаксации, записывается кривая  $\sigma - t$ ; через некоторое время (десятьки секунд) напряжение снова повышается до значения  $\sigma_1 \approx \sigma_0$  и снова прослеживается релакса-

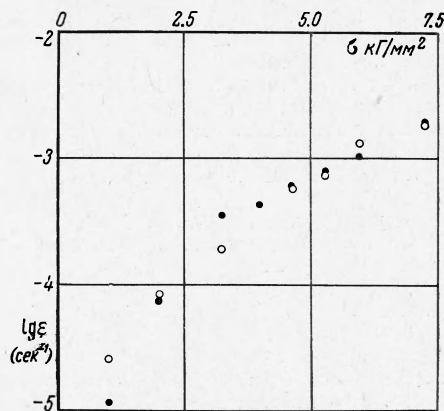
ция. Такие циклы повторяются три—пять раз, отношение конечного напряжения цикла к начальному 0.3—0.5. Результаты оказываются следующими: 1) если совпадают начальные напряжения цикла, то совпадают и кривые релаксации полностью; 2) уравнение кривой релаксации, полученное, например, для экспоненциальной зависимости (1.2) в виде

$$\sigma(t) = -\sigma_e \ln \left[ \exp \left( -\frac{\sigma_0}{\sigma_e} \right) + \frac{\varepsilon_e E}{\sigma_e} t \right] \quad (1.3)$$

одинаково хорошо описывает эксперимент на любом цикле ( $E$  — модуль упругости,  $\sigma_0$  — начальное напряжение цикла). Соответствующие кривые приведены в [3].



а



б

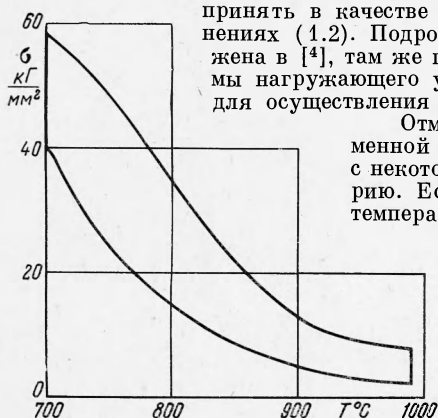
Фиг. 1. Титановый сплав ВТ-14, 800° С  
а — изменение напряжений во времени при испытании двух образцов;  
б — соответствующие (а) скорости ползучести (светлые кружки — № 1, темные кружки — № 2)

2. *Ступенчатое нагружение.* Изменяя нагрузку ступенями, получаем независимую от порядка чередования ступеней скорость ползучести, которая определяется только напряжением, действующим в данный момент времени (эксперимент ведется при постоянной температуре). На фиг. 1, а показаны примеры таких ступенчатых программ, осуществленных на двух образцах из титанового сплава ВТ-14 при  $T = 800^\circ \text{C}$ . Полученные зависимости скорости ползучести от напряжения представлены на фиг. 1, б.

Описанный опыт на ступенчатое нагружение целесообразно принять в качестве основного при определении констант в уравнениях (1.2). Подробно методика определения этих величин изложена в [4], там же приводятся механическая и электрическая схемы нагружающего узла быстродействующей рычажной установки для осуществления соответствующих программ.

Отметим, что независимость скорости кратковременной ползучести от предыстории распространяется с некоторыми ограничениями на температурную историю. Если в процессе испытания повышать ступенями температуру, то скорость ползучести будет определяться мгновенными значениями температуры и напряжения. Такой эксперимент выполнен на сплаве Д16Т при 240—380° С и сплаве ВТ-5 при 600—900° С.

Комбинируя результаты испытаний на кратковременную ползучесть с известными опытными данными по ползучести при средних и больших длительностях, можно сделать общий вывод, что с ростом напряжений и температур величина  $\alpha$  в уравнении (1.1), характеризующая степень упрочнения при ползучести, убывает, принимая



Фиг. 2. Область отсутствия упрочнения для стали ЭП-164

значения, равные нулю, при достаточно высоких  $\sigma$  и  $T$ . (При этом не предполагается, что с дальнейшим ростом температуры за уже исследованный интервал значения  $\alpha$  не могут снова возрастать.) Это положение согласуется с физическими представлениями об увеличении роли возврата с ростом температуры [5].

Имеющийся экспериментальный материал позволяет утверждать, что у многих материалов область  $\sigma$ - $T$ , в которой можно считать  $\alpha = 0$ , приблизительно совпадает с областью, в которой  $\dot{\varepsilon} = 10^{-5} - 10^{-2} \text{сек}^{-1}$ . На фиг. 2 показана эта область для стали ЭП-164. Этим не утверждается, что, вне отмеченной области не может быть условий для ползучести без упрочнения.

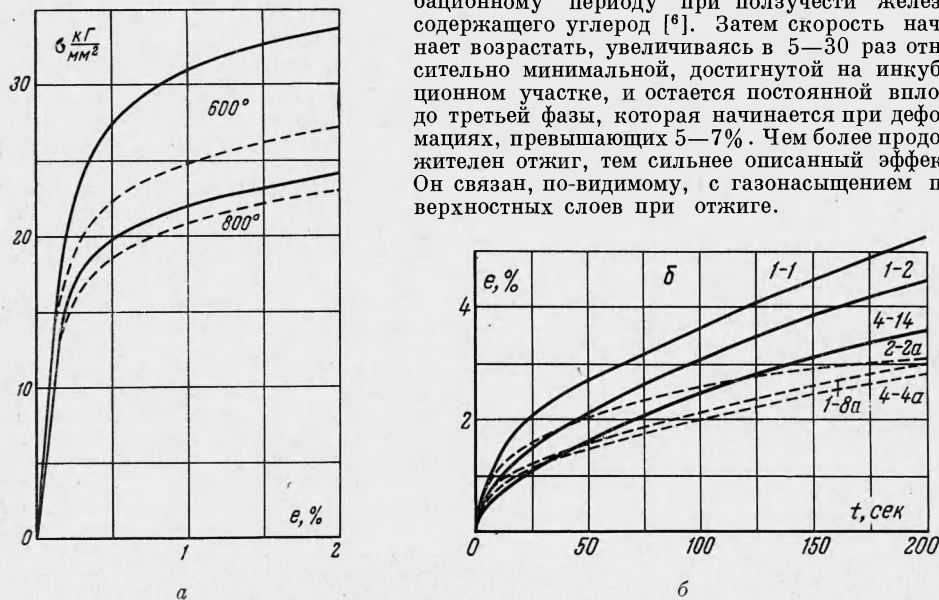
§ 2. Укажем на некоторые отклонения от нормального поведения, описанного выше.

Медь и некоторые медные сплавы в диапазоне температур от 400 до 1000° С и при напряжениях, обеспечивающих долговечность порядка десятков — сотен секунд, обнаруживают значительное упрочнение. При этом в опытах со ступенчатым нагружением кривые «деформация — время» следуют выводам теории упрочнения в ее простейшем варианте, в котором за меру упрочнения принимается накопленная деформация ползучести.

Резкое упрочнение имеет место при ползучести аустенитной стали X18H10T. После аустенитизации этой стали при 1070° С в течение 20 мин упрочнение при 800° С настолько значительно, что кривые ползучести плохо аппроксимируются степенной функцией. Ползучесть образцов, вырезанных из того же листа (холоднокатанного), и испытанных в тех же условиях, но без предварительной термообработки, происходит без упрочнения.

Отметим, что указанный режим термообработки не дает полностью аустенитного материала. Это проявляется уже при температурах испытания порядка 900° С. В этом случае при малых нагрузках обнаруживается «отрицательная» ползучесть, по-видимому, за счет фазового перехода  $\alpha \rightarrow \gamma$ . Положительная ползучесть при достаточно высоких напряжениях упрочнением не сопровождается.

Остановимся еще на особенности кратковременной ползучести титанового сплава ВТ-5-1. В состоянии поставки этот сплав подвергнут низкотемпературному отжигу. Кривые ползучести этого сплава без предварительной термообработки — прямые линии в координатах  $e - t$ . Отжиг в течение времени от 10 мин до 36 час на воздухе при 800° С существенно изменяет вид кривых. Появляется участок замедленной ползучести, подобный в некоторых деталях инкубационному периоду при ползучести железа, содержащего углерод [6]. Затем скорость начинает возрастать, увеличиваясь в 5—30 раз относительно минимальной, достигнутой на инкубационном участке, и остается постоянной вплоть до третьей фазы, которая начинается при деформациях, превышающих 5—7%. Чем более продолжителен отжиг, тем сильнее описанный эффект. Он связан, по-видимому, с газонасыщением поверхностных слоев при отжиге.



Фиг. 3. Сталь ЭИ-654, 600° С. Сплошные линии — образцы, обработанные по первому режиму, штриховые — по второму режиму.

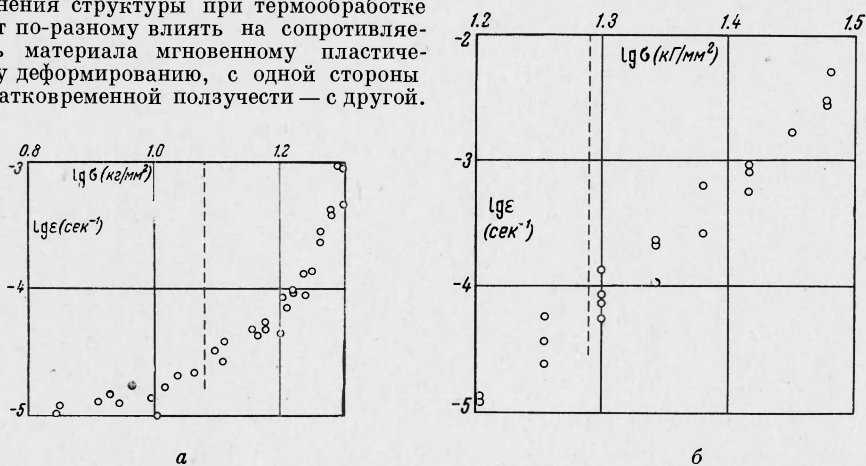
*a* — кривые растяжения при скорости нагружения  $\sim 30$  кгс/мм<sup>2</sup>сек. Образцы вырезаны из круга диаметром 120 мм, на расстоянии 40 мм от центра, *b* — кривые ползучести при  $\sigma = 36$  кгс/мм<sup>2</sup>.

Образцы вырезаны из того же круга. 1—1, 1—2, 1—8а — на расстоянии 40 мм от центра, 2—2а — 25 мм, 4—14, 4—4а — 53 мм

§ 3. Для расчетных целей часто принимают, что пластическая деформация при высокой температуре складывается из «мгновенной» и деформации ползучести. Приведем некоторые дополнительные экспериментальные данные, показывающие, что указанные виды пластической деформации, по-видимому, управляются разными механизмами.

Нержавеющая сталь ЭИ-654 подвергнута термической обработке по двум режимам. Первый режим — 1) подогрев в соляной ванне до 820° С, выдержка 10 мин, 2) на-

грев в бариевой ванне до  $1050^{\circ}\text{C}$ , выдержка 5 мин, охлаждение — вода, 3) повторение первой операции, 4) повторение второй операции. Второй режим — нагрев до  $1050^{\circ}\text{C}$  на воздухе, охлаждение — вода. Не касаясь анализа структуры, полученной после термообработки по этим двум режимам, обратимся к результатам испытаний. На фиг. 3, а — кривые деформирования, снятые при скорости нагружения  $\sim 30 \text{ кгс/мм}^2\text{сек}$  при  $600^{\circ}\text{C}$  для образцов, обработанных по обоим режимам. Сопротивляемость мгновенному пластическому деформированию материала, подвергнутого однократной закалке с нагревом на воздухе, намного ниже ( $\sim 20\%$  по напряжению  $\sigma_{0,2}$ ). В то же время кривые ползучести этих двух партий образцов (фиг. 3, б) отличаются лишь незначительно, причем несколько большее сопротивление ползучести обнаруживает материал, обработанный по второму режиму. Этот эффект является, очевидно, следствием того, что одни и те же изменения структуры при термообработке могут по-разному влиять на сопротивляемость материала мгновенному пластическому деформированию, с одной стороны и кратковременной ползучести — с другой.



Фиг. 4. Зависимость скорости ползучести от напряжения. Штриховые линии — предел пропорциональности на кривой мгновенного деформирования.

а — алюминиевый сплав АМг6М,  $200^{\circ}\text{C}$  (пять образцов);

б — сталь ЭИ-654,  $700^{\circ}\text{C}$  (пять образцов)

Заметим, что с повышением температуры до  $800^{\circ}\text{C}$  разница между обработанными по двум режимам партиями образцов не обнаруживается в опытах на ползучесть, а при быстром растяжении становится малой.

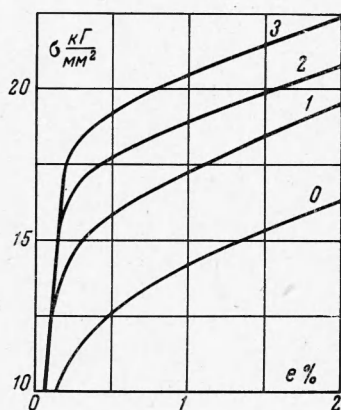
Важным представляется вопрос о взаимном влиянии этих двух видов пластической деформации. Ясность здесь необходима прежде всего для выбора обоснованной расчетной схемы изделий, материал которых испытывает в процессе работы как «мгновенные», так и ползучие деформации. При этом последовательность деформирования может быть произвольной, лишь бы суммарная пластическая деформация оставалась достаточно малой. В этой области известны лишь отдельные экспериментальные наблюдения. В [7] показано, что у стали 30ХНМА предварительная малая мгновенная деформация не влияет на последующую сравнительно медленную релаксацию напряжений (продолжительность опыта — десятки часов). Такой же результат получен во многих работах по изучению влияния величины предварительной деформации на последующую ползучесть; при уменьшении начальной деформации до 1—2% она не сказывается на кривой ползучести (например, [8]). В [3] изучалось влияние малой мгновенной деформации на кратковременную ползучесть алюминиевого сплава АМг6М. Установлено, что если это влияние и существует, то оно перекрывается разбросом экспериментальных данных.

С другой стороны, часто оказывается, что при обработке опытных данных при помощи формул (1.2) приходится принимать значения констант  $\sigma_n'$ ,  $n'$  при  $\sigma \leq \sigma'$  и  $\sigma_n''$ ,  $n''$  при  $\sigma \geq \sigma'$ . Величина  $\sigma'$  близка к пределу пропорциональности. Но есть и такие примеры, когда предел пропорциональности лежит в исследованном диапазоне напряжений, однако константы  $\sigma_n$ ,  $n$  сохраняют неизменное значение во всем интервале. В качестве иллюстрации приводится фиг. 4.

Влияние деформации ползучести на кривую мгновенного деформирования еще менее изучено<sup>1</sup>. Упрочняющее влияние деформации ползучести отмечено в [9].

<sup>1</sup> В этом параграфе идет речь об экспериментах, в которых и мгновенные и деформации ползучести получены при одной и той же температуре.

Авторами при участии А. В. Долгова проведен следующий эксперимент. Серия образцов из аустенитной стали X18H10T получила деформации ползучести в пределах 1% при напряжении  $12 \text{ кгс/мм}^2$  и температуре  $800^\circ \text{C}$ . Кривые ползучести в этих условиях — с упрочнением. Затем образцы разгружались, охлаждались, выдерживались в течение времени порядка одних суток и подвергались быстрому разрыву (со скоростью  $\sim 10\text{--}15 \text{ кгс/мм}^2\text{сек}$ ) на электромагнитной установке [3]. Полученные таким образом кривые, практически являющиеся кривыми мгновенного деформирования, представлены на фиг. 5. Сопротивление мгновенному пластическому деформированию образцов, получивших предварительную деформацию ползучести, выше и тем выше, чем больше величина пластической деформации. По этой же программе испытаны образцы титанового сплава BT-14 при  $T = 600^\circ \text{C}$ , когда ползучесть происходит практически без упрочнения. Никакого влияния предварительной ползучести на кривую мгновенного деформирования обнаружено не было.



Фиг. 5. Сталь X18H10T,  $800^\circ \text{C}$ . Кривые растяжения при скорости нагружения  $10\text{--}15 \text{ кгс/мм}^2\text{сек}$ . 0 — предварительно недеформированный образец, 1 — предварительная деформация ползучести 0.28% (за 58 сек), 2 — 0.52% (80 сек), 3 — 1.0% (3240 сек). Напряжение предварительной ползучести —  $12.0 \text{ кгс/мм}^2$ , температура —  $800^\circ \text{C}$

Можно предположить, что в случае, когда деформация ползучести упрочняет материал в смысле сопротивляемости ползучести, она тормозит также любую пластическую деформацию; когда же имеет место ползучесть без упрочнения (обычная кратковременная ползучесть) — она не сказывается на последующем мгновенном деформировании. Однако это предположение требует проверки. В частности, необходимо проверить роль старения в описанных выше опытах на стали X18H10T.

С ростом температуры деформации ползучести решительным образом преобладают по величине над мгновенными пластическими деформациями. Поэтому практически при достаточно высоких температурах обсуждаемый вопрос теряет остроту, за исключением случаев весьма кратковременных эпизодических нагружений за «мгновенный» предел пропорциональности.

Таким образом, в условиях кратковременной ползучести, как правило, можно принимать в расчете, что малая мгновенная пластическая деформация и деформация ползучести взаимно друг на друга не влияют. Использование же этой гипотезы в общем виде для ползучести с упрочнением может привести к ошибке.

Названная гипотеза была положена в основу способа построения кривых мгновенного деформирования [3]. Этот способ состоит в том, что снимаются кривые растяжения при постоянной скорости возрастания нагрузки; затем, зная зависимость скорости ползучести от напряжения, можно выделить ту составляющую деформации, которая связана с ползучестью. Заметим, что часто при сравнительно низких температурах полученная таким образом гипотетическая мгновенная кривая мало отличается от исходной кривой деформирования, если последняя снята при достаточно высокой скорости нагружения. При более высокой температуре разница может быть значительной.

§ 4. Осуществляя обратную операцию, т. е. добавляя к мгновенной кривой деформации ползучести, определенные расчетом при заданном законе изменения напряжения во времени, получаем кривую изменения деформации во времени. Хорошо контролируемым экспериментом служит растяжение с постоянной скоростью нагружения (рассчитывается веер кривых  $\sigma\text{--}\epsilon$  при скоростях нагружения, изменяющихся на два-три порядка). Можно задавать и более сложные программы нагружения.

§ 5. Отметим две особенности кратковременной ползучести.

1) Хорошо известно, что разгрузка после достаточно продолжительной ползучести вызывает возврат части накопленной деформации. Этот эффект отсутствует при кратковременной ползучести как в обычном случае (без упрочнения), так и в случае,

когда имеется упрочнение. Последнее проверялось на стали X18H10T, меди и медном сплаве, причем образец после ползучести выдерживался в течение времени, соизмеримого со временем ползучести.

2) Известно также, что при ползучести конструкционных материалов при температурах порядка половины температуры плавления имеет место резкая анизотропия характеристик ползучести (например, [10]). В области кратковременной ползучести с повышением температуры анизотропия уменьшается и может практически исчезнуть еще при температурах, при которых сохраняется достаточная несущая способность. Это связано, по-видимому, с быстрой рекристаллизацией материала.

§ 6. Параметр охрупчивания (обозначим его  $\omega$ ) характеризует изменения структуры в процессе ползучести, ослабляющие материал, приводящие его к разрушению. Для «чистого», недеформированного образца  $\omega = 0$ , в момент разрушения  $\omega = 1$ .

В [3] отмечены особенности разрушения при кратковременной ползучести сплава Д16 и даны оценки величины  $\omega$  в процессе ползучести. Показано, что если принять  $\omega = k\varepsilon$  ( $k$  — константа) и считать, что действующее напряжение в образце повышается за счет ослабления сечения микротрещинами и макросужения образца, то многие детали разрушения описываются достаточно хорошо<sup>1</sup>. В частности, эти предположения приводят к постоянству деформации при разрыве и к линейному суммированию повреждаемостей, наблюдаемым в эксперименте. При надлежащем выборе величины  $k$  рассчитываются третий участок кривой ползучести и долговечность.

В [11] построена общая феноменологическая схема разрушения при ползучести. В основе ее лежит предположение, что ползучесть есть комбинация, по крайней мере, двух процессов — пластической деформации и трещинообразования. Их взаимодействие сведено к простой, но достаточно общей схеме. (В качестве частного случая из нее может быть получена схема [3].)

Кинетические уравнения ползучести и разрушения записываются в виде

$$\varepsilon = \varepsilon_n \left( \frac{\sigma}{\sigma_n} \right)^n (1 - \omega)^{-r}$$

$$\omega = k \varepsilon^m (1 - \omega)^{-q} \quad (6.1)$$

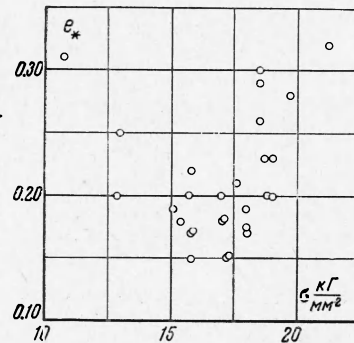
Не останавливаясь на деталях этой модели, отметим лишь некоторые особенности кратковременной ползучести и разрушения, наблюдаемые при испытаниях большого числа конструкционных материалов. Будем при этом указывать соответствующие упрощения общих уравнений (6.1).

1) Отмеченный в [3] факт независимости деформации при разрыве от величины условного напряжения (долговечности) для сплава Д16 имеет место для большинства испытанных материалов. Это означает, что в уравнениях (6.1) следует принять  $n=r=m=q$ . Однако в отдельных случаях сравнительно небольшие изменения напряжения могут резко и немонокотным образом изменять  $\varepsilon_*$  (фиг. 6 — результаты испытаний стали X18H10T при 800° С).

2) В отличие от ползучести в течение длительного времени, когда повышение температуры вызывает резкое охрупчивание, происходит падение пластичности технических сплавов; для кратковременной ползучести характерен постепенный переход к большей пластичности с повышением температуры. Это соответствует уменьшению величины  $k$  с температурой. Некоторые исключения из этого общего типа поведения, конечно, имеются. В частности, технически чистая медь, будучи при 500—600° С достаточно пластичной, обнаруживает совершенно хрупкий излом при 800° С (испытание проводилось на воздухе).

3) Для большинства материалов имеется такой интервал температур, в котором охрупчиванием при кратковременной ползучести можно пренебречь вообще ( $k = 0$ ).

§ 7. Параметры, фигурирующие в уравнениях (1.2), являются функциями температуры. При установлении температурных зависимостей этих параметров имелось в виду исключительно нахождение удобных эмпирических формул, могущих послужить для интерполяции опытных данных; всякая экстраполяция этих данных представляется рискованной. Существующие теоретические зависимости, как правило, связываются с некоторыми предположительными элементарными механизмами ползучести, которые могут быть реализованы в чистом виде лишь при специальных условиях.



Фиг. 6. Сталь X18H10T, 800° С. Зависимость удлинения при разрыве от напряжения

<sup>1</sup> Отметим, что эти предположения согласуются с некоторыми микроструктурными наблюдениями разрушения при ползучести [12, 13].

Так, экспоненциальные зависимости, используемые С. Н. Журковым [14],

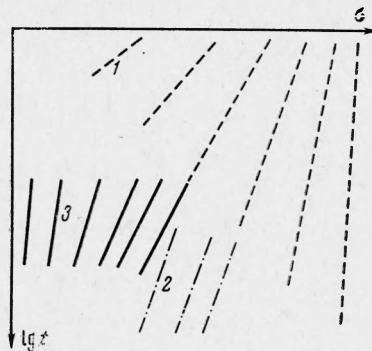
$$\varepsilon = \varepsilon_0 \exp\left(-\frac{U_0 - \gamma\sigma}{kT}\right) \quad (7.1)$$

и Дорном [15]

$$\varepsilon = \varepsilon_1 \exp\left(-\frac{U_0}{kT}\right) \Phi(\sigma) \quad (7.2)$$

подтверждаются в соответствующих интервалах напряжений и температур.

Если опытные данные по ползучести нанести в координатах  $\sigma$ - $\lg \varepsilon$  (фиг. 7), то по Журкову угол наклона полученных прямых уменьшается с ростом температуры, по Дорну он остается постоянным. В той области  $\sigma$ - $T$ , где технические сплавы обнаруживают кратковременную установившуюся ползучесть, характер изменения зависимости  $\sigma$ - $\lg \varepsilon$  с температурой может быть более сложным, несмотря на то, что рассматривается сравнительно узкая область скоростей деформации. При низких температурах рассматриваемого интервала наклон прямых  $\sigma$ - $\lg \varepsilon$  может оставаться постоянным, при достаточно высоких температурах он всегда растет с температурой.



Фиг. 7. Температурные зависимости ползучести (схема): 1 — ползучесть по Журкову, 2 — по Дорну, 3 — кратковременная ползучесть

Поэтому зависимости параметров  $\varepsilon_e$  и  $\sigma_e$  от температуры могут быть приняты следующими:

для низких температур

$$\sigma_e = \text{const}, \quad \varepsilon_e = \varepsilon_{e1} \exp \frac{T}{\vartheta_1} \quad (7.3)$$

тогда

$$\varepsilon = \varepsilon_{e1} \exp\left(\frac{\sigma}{\sigma_e} + \frac{T}{\vartheta_1}\right) \quad (7.4)$$

для высоких температур

$$\sigma_e = \frac{T_0 - T}{\beta}, \quad \varepsilon_e = \varepsilon_{e2} \exp \frac{T}{\vartheta_2} \quad (7.5)$$

тогда

$$\varepsilon = \varepsilon_{e2} \exp\left(\sigma \frac{\beta}{T_0 - T} + \frac{T}{\vartheta_2}\right) \quad (7.6)$$

Области определения констант находятся в каждом отдельном случае из опыта.

Приведем в качестве примера значения этих констант для двух сталей:

ЭП-164 в интервале 700—875° С

$$\sigma_e = 3,33 \text{ кгс/мм}^2, \quad \varepsilon_{e1} = 3,63 \cdot 10^{-30} \text{ сек}^{-1}, \quad \vartheta_1 = 15,80^\circ \text{ С}$$

ЭИ-811 в интервале 650—800° С

$$\varepsilon_{e2} = 8,32 \cdot 10^{-17} \text{ сек}^{-1}, \quad \beta = 240 \text{ мм}^2 \cdot \text{град} / \text{кгс}$$

$$T_0 = 1128^\circ \text{ С}, \quad \vartheta_2 = 32,7^\circ \text{ С}$$

Эти значения констант будут действительны в диапазоне изменения скоростей ползучести  $10^{-5}$ — $10^{-2}$  сек<sup>-1</sup>.

Очевидная некорректность экспоненциального закона ползучести (1.2) при напряжениях, близких к нулю, делает предпочтительным использование при весьма высоких температурах (для данного материала) степенной зависимости. Степенной закон, записанный в виде (1.2), содержит три константы, из которых одна может быть выбрана произвольно. Если принимать всегда  $\varepsilon_n = 10^{-4}$  сек<sup>-1</sup>, то  $\sigma_n$  будет соизмеримо с рабочим напряжением  $\sigma$ .

Обычно  $n$  монотонно уменьшается с температурой, в отдельных случаях величина  $n$  может стабилизироваться. Так, в случае титанового сплава ВТ-14 можно принять  $n = 3$  в диапазоне температур 700—1150° С.

Отметим, что скорости кратковременной ползучести весьма сильно зависят от температуры. Например, значения констант для стали ЭП-164 дают изменения скорости на порядок при изменении температуры на 30° С, когда средние температуры — около 800° С. При оценке разброса опытных данных следует учитывать точность измерения и регулирования температуры в эксперименте.

По-видимому, температурные зависимости ползучести более сильны, чем температурные зависимости мгновенной пластической деформации, в связи с чем интервал напряжений, в котором скорость ползучести изменяется от  $10^{-5}$  до  $10^{-2}$  сек $^{-1}$ , с ростом температуры перемещается по кривой мгновенного деформирования относительно текущего предела пропорциональности вниз.

§ 8. Приведем в заключение сведения о сплавах, характеристики которых использованы выше. Эти сведения даны в таблице. Термообработка проведена О. Ф. Станкевичем и П. В. Романовым.

Характеристика сплавов

Сплав	Основа	Режим термообработки (т. о.)	Твердость HV после т. о.
BT-14 лист 2 мм	Ti	Отжиг на воздухе при 850° С в течение 1 час	330
ЭП-164 круг диаметром 100 мм	Fe	1) Закалка с температуры 1130° С (выдержка 2 час) в воду 2) Старение 750° С — 16 час + 700° С — 8 час	270—304
ЭИ-696 пруток диаметром 40 мм	Fe	1) Закалка с температуры 1150° С (выдержка 2 час), охлаждение на воздухе 2) Старение 760° С — 20 час	329—338
ЭИ-811 лист 2 мм	Fe	Закалка с температуры 1000° С (выдержка 30 мин), охлаждение на воздухе	205—208
X18H10T лист 2,5 мм	Fe	Нагрев до температуры 1070° С (выдержка 20 мин), охлаждение на воздухе	136—134
AMg6H лист 2 мм	Al	Испытывался в состоянии поставки	

Авторы благодарны М. В. Митрофановой и В. И. Теленкову за участие в выполнении всех экспериментов.

Поступила 26 V 1966

## ЛИТЕРАТУРА

- Bernett E. C. Tensile and short-time creep properties of N-155 alloy sheet. Trans. ASME, 1960, ser. B, vol. 82, No. 4.
- Работнов Ю. Н. Опытные данные по ползучести технических сплавов и феноменологические теории ползучести (обзор). ПМТФ, 1965, № 1.
- Милейко С. Т., Теленков В. И. Кратковременная ползучесть алюминиевых сплавов. ПМТФ, 1962, № 5.
- Милейко С. Т. О методике определения констант кратковременной установившейся ползучести. Заводск. лаборатория, 1965, т. 30, № 3.
- McLean D. Mechanical Properties of Metals. N. Y. — L., 1963.
- Arsenaault R. I., Weertman I. Incubation creep effect in alpha-iron. Acta metallurgica, 1963, vol. 11, No 11.
- Даниловская В. И., Иванова Г. М., Работнов Ю. Н. Ползучесть и релаксация хромомolibденовой стали. Изв. АН СССР, ОТН, 1955, № 5.
- Каптелин Ю. П. Описание ползучести наклепанной меди. Сб. «Ползучесть и длительная прочность», СО АН СССР, Н., 1963.
- Наместников В. С. О ползучести алюминиевого сплава при переменных нагрузках. ПМТФ, 1964, № 2.
- Соснин О. В. Об анизотропной ползучести материалов. ПМТФ, 1965, № 5.
- Работнов Ю. Н. О разрушении вследствие ползучести. ПМТФ, 1963, № 2.
- Kramer D., Machlin E. S. The effect of high-temperature strain on crack formation and ductility in commercially pure nickel. Trans. AIME, 1959, vol. 215, p. 110.
- Intrater J., Machlin E. S. Grain boundary sliding and intercrystalline cracking. Acta metallurgica, 1959, vol. 7, No 2.
- Журков С. Н., Санфирова Т. П. Связь между прочностью и ползучестью металлов и сплавов. Ж. техн. физ., 1958, т. 28, № 8.
- Dorn J. E. Some fundamentele experiments on high temperature creep. J. Mech. Phys. Solids, 1954, vol. 3, No 2.