

А. М. СИМОНЯН

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРЕЕМСТВЕННОСТИ ПРИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ТРЕХСТАДИЙНОЙ ПОЛЗУЧЕСТИ ХРОМО-НИКЕЛЕВОЙ СТАЛИ

Для проведения расчетов элементов конструкций на ползучесть кроме общей информации о ползучести данного материала при постоянных напряжениях и температурах необходимо иметь достаточно надежное предсказание о деформациях ползучести при напряжениях и температурах, произвольно изменяющихся во времени. При изучении влияния истории нагружения на деформируемость металлов в работах [1—3 и др.] приведены экспериментальные данные, подтверждающие общий тезис, что скорость ползучести тела, претерпевшего некоторую необратимую деформацию, тем больше, чем при меньшем напряжении была достигнута эта деформация. Этот тезис, названный преемственностью, изучен в свете предсказаний по различным теориям ползучести в работе [4]. Подтверждения его наблюдались и в третьей стадии высокотемпературной ползучести хромо-никелевой стали [5], хотя эти эксперименты единичны.

В настоящей работе приведены экспериментальные данные, показывающие, что преемственность для ползучести в III стадии проявляется с большой контрастностью, что предопределяет учет его в соответствующих расчетах.

1. Эксперименты проведены на машине типа Zsl 502.10 Рауэнштейн с усовершенствованными термоизмерительными и терморегулирующими устройствами. В процессе испытания на ползучесть температура измерялась непосредственно у поверхности образца и регулировалась автоматически путем периодического включения и выключения печи с периодом 1.5—2 мин. В процессе опыта температура контролировалась с помощью одного и того же милливольтметра. Образцы  $\varnothing$  8 мм вытачивались из прутков  $\varnothing$  15 мм при непрерывной подаче масла на обрабатываемую поверхность с целью предотвращения нагрева в процессе изготовления.

Исследования проводились на образцах хромо-никелевой стали X18H10T при 700°C, причем изменение напряжения в образцах в процессе испытания производилось в течение нескольких секунд, но без допущения динамических воздействий. Испытания производились по программе

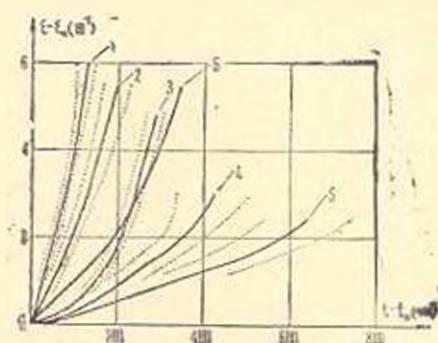
$$\varepsilon(t) = \begin{cases} \varepsilon_0 & \text{при } \varepsilon_0(t) < \varepsilon_0 \\ \varepsilon_1 & \text{при } \varepsilon_0(t) > \varepsilon_0 \end{cases} \quad (1.1)$$

где были взяты:  $\rho_0 = 0.02$ ;  $\sigma_0 = 11.15$  кг/мм<sup>2</sup>, а для  $\sigma_1$  принимались значения 9.30 кг/мм<sup>2</sup>, 11.15 кг/мм<sup>2</sup>, 12.40 кг/мм<sup>2</sup>, 15.52 кг/мм<sup>2</sup> и 18.56 кг/мм<sup>2</sup>. Всего испытано по этой программе 55 образцов.

2 Как показано в работе [5], третья стадия ползучести для сплава X18H10T при указанных значениях напряжения проявляется уже задолго до достижения  $\epsilon = 0.02$ . Там же показано, что деформации с возрастающей скоростью, определяющие наступление третьей стадии, не могут быть следствием только изменения поперечного сечения и длины образцов, а следовательно, изменения напряжения и базы измерения деформации, а имеют иную природу.

Напряжения  $\sigma_n$ , при которых осуществлялось достижение деформации ползучести  $\epsilon_n$ , были взяты в большом диапазоне с точки зрения сопротивляемости ползучести. Действительно, если при  $\sigma_n = 9.30 \text{ кг/мм}^2$  деформации ползучести 0.02 у некоторых образцов достигались за время до 1000 час. то при  $\sigma_n = 18.56 \text{ кг/мм}^2$  — за время до 20 мин.

Фиг. 1. Кривые ползучести стали X18H10T при 700°C и при  $\sigma = 11.15 \text{ кг/мм}^2$  в координатах  $\epsilon - t - t_0$  после деформирования до  $\epsilon_n = 0.02$  при 1)  $\sigma_n = 9.30 \text{ кг/мм}^2$ , 2)  $\sigma_n = 11.15 \text{ кг/мм}^2$ , 3)  $\sigma_n = 12.40 \text{ кг/мм}^2$ , 4)  $\sigma_n = 15.52 \text{ кг/мм}^2$ , 5)  $\sigma_n = 18.56 \text{ кг/мм}^2$ , 6) кривые ползучести при  $\sigma = 11.15 \text{ кг/мм}^2$  от начального момента приложения нагрузки ( $t_0 = 0, \epsilon_0 = 0$ ).



На фиг. 1 сплошными линиями показаны деформационные кривые ползучести в координатах  $\epsilon - t - t_0$  ( $\epsilon(t_0) = \epsilon_0$ ), то есть продолжения кривых ползучести после достижения деформации  $\epsilon_n = 0.02$ . Все эти кривые соответствуют ползучести, протекающей при одном и том же напряжении  $\sigma_n = 11.15 \text{ кг/мм}^2$ . Рядом с каждой из сплошных линий приведены по две пунктирные линии, между которыми с вероятностью 0.9 заключается математическое ожидание соответствующей кривой ползучести согласно формуле [7]

$$m - t_p \sigma_n < m < m + t_p \sigma_n \quad (2.1)$$

где  $m$  — математическое ожидание деформации в некоторый момент времени  $t$ , то есть среднее арифметическое значение из бесчисленного множества экспериментов,  $m$  — среднее арифметическое значение деформации  $\epsilon_i$  из имеющегося количества экспериментов ( $n$ )

$$\sigma_n = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\epsilon_i - m)^2}{n(n-1)}}, \quad t_p = \arg \Phi\left(\frac{1+p}{2}\right); \quad \Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{1}{2}t^2} dt$$

Как можно заключить из фиг. 1, кривые ползучести при одном и том же напряжении  $\sigma_n$  после достижения одной и той же деформации  $\epsilon_n$  суще-

ственно зависят от того, при каком напряжении  $\sigma_0$  была достигнута деформация  $\epsilon_0$ , причем зависимость эта значительна не только в течение некоторого времени после изменения напряжения, а в течение всего дальнейшего процесса деформирования.

Ограниченные пунктирными линиями области нахождения действительных кривых ползучести (математических ожиданий) позволяют сделать вывод, что для каждой пары смежных кривых ползучести с вероятностью, большей 0.95, можно говорить об отмеченном эффекте независимо от разброса экспериментальных данных, причем вероятность 0.95 соответствовала бы случаю, когда границы отмеченных смежных областей соприкасались бы друг с другом.

Линией б представлена кривая ползучести при том же напряжении  $\sigma = 11.15 \text{ кг/мм}^2$ , но от начального момента приложения нагрузки, то есть в координатах  $t=0$ . Легко видеть, что если предварительное деформирование имело место при меньших напряжениях или при том же напряжении, то проявляется разупрочнение материала с точки зрения сопротивляемости ползучести. Если предварительное деформирование имело место при нескольких больших напряжениях ( $\sigma = 12.40 \text{ кг/мм}^2$ ), то имеет место упрочнение лишь в начальной стадии дальнейшего деформирования, после чего материал быстро разупрочняется. При более значительных напряжениях предварительного деформирования имеет место упрочнение, причем довольно устойчивое. Если же, например, предварительное деформирование было осуществлено при  $18.56 \text{ кг/мм}^2$ , то дальнейшее деформирование при  $\sigma_0 = 11.15 \text{ кг/мм}^2$  происходит вначале с возрастающей, но незначительной скоростью (до 200 час), после чего имеет место деформирование с практически постоянной скоростью  $3.33 \cdot 10^{-3} \text{ 1/час}$  в течение почти 300 час, после чего скорость вновь возрастает. При этом деформирование происходит значительно менее интенсивно, чем это имеет место во второй стадии ползучести недеформированного образца ( $\dot{\epsilon}_{II} = 7.73 \cdot 10^{-3} \text{ 1/час}$ ), то есть упрочнение распространяется не только на долю деформаций, протекающих с возрастающей скоростью, но и на деформации установившейся ползучести.

Таким образом, несмотря на то, что третья стадия ползучести обычно объясняется разупрочнением материала, деформации в этой стадии могут оказывать как разупрочняющее, так и упрочняющее действие в зависимости от того при большем или меньшем напряжении имеет место дальнейшее деформирование. Эти факты могут иметь вполне наглядную физическую интерпретацию при рассмотрении весьма общего механизма ползучести. Как известно, деформации ползучести в поликристаллах складываются из внутризеренного и межзеренного скольжений, причем межзеренные скольжения, сопровождающиеся образованием межзеренных трещин, образуются уже при незначительных деформациях задолго до разрушения [8], причем они определяют процесс разрушения при длительной ползучести, так как с увеличением зерна хромо-никелевых сталей долговечность их существенно возрастает [9].

В работе [10, стр. 154] отмечено, что при низких напряжениях основную роль в разрушении играет трещинообразование, причем, согласно [11], трещины в поликристаллах образуются между зернами и определяют основную часть увеличения скорости ползучести. Доказательство решающей роли скольжения по границам зерен в сопротивляемости хромо-никелевых сталей длительным силовым воздействиям дано в работе [12], где при прочих равных условиях образцы с непрерывной пленкой карбидов по границам зерен показали в 10 раз большую долговечность, чем образцы с массивными, но прерывистыми выделениями карбидов. В работе [13] на основе металлографических исследований также делается вывод о том, что периоды возрастающей скорости связаны со скольжением по границам зерен.

Учитывая эти факты, а также и то, что, согласно, например, [14], доля деформаций ползучести, возникающих за счет скольжений на границах, повышается в сравнении с долей деформаций, накопленных в результате внутризеренного скольжения, с увеличением полного времени ползучести или что то же с уменьшением действующего напряжения приходим к выводу о том, что одни и те же деформации ползучести должны приводить к тем большему разупрочнению с точки зрения сопротивляемости ползучести, чем при меньших напряжениях эти деформации были достигнуты, что находится в совершенном согласии с полученными здесь экспериментальными данными. Труднее дать объяснение упрочнению, причем довольно существенному и устойчивому, имеющему место после деформирования при высоких напряжениях. Вероятно, упрочнение зерен кристалла, являющееся преобладающим при деформировании в случае высоких напряжений и имеющее место, в частности, вследствие полигонизации [15, 16], настолько велико, что создает большие препятствия для межзеренного скольжения. Согласно интерпретации Мотта [17, стр. 26], процесс полигонизации может быть рассматриваем как переползание краевых дислокаций из плоскостей скольжения вследствие термической активации, связанной со временем, и, следовательно, не должен проявляться при пластическом деформировании. Действительно, в отличие от деформаций ползучести пластические деформации несущественно влияют на упрочнение металла с точки зрения его сопротивления ползучести [18, стр. 208].

Обращаясь к модели Ю. Н. Работнова [10]

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = f(\varepsilon, \omega), \quad \frac{\partial \omega}{\partial t} = \varphi(\varepsilon, \omega) \quad (2.2)$$

где  $\omega$  — параметр поврежденности, например, в случае степенных зависимостей [10]

$$f(\varepsilon, \omega) = b\varepsilon^m (1 - \omega)^{-r}, \quad \varphi(\varepsilon, \omega) = c\varepsilon^p (1 - \omega)^{-q} \quad (2.3)$$

легко видеть, что преемственность будет соблюдаться при  $m > p$  независимо от  $r$  и  $q$ .

Действительно, из (2.2) и (2.3) получим

$$1 - \omega = \left[ 1 - \frac{c}{b} \varepsilon^{r-q} \varepsilon (r - q - 1) \right]^{\frac{1}{r-q+1}} \quad (2.4)$$

откуда видно, что при достижении некоторого значения деформации  $\varepsilon_0(t)$  параметр поврежденности тем больше, чем при меньшем напряжении  $\sigma$  была достигнута эта деформация. Дальнейшее же деформирование ( $t > t_0$ ), согласно (2.2), определяется лишь значением  $\omega(t_0)$  и дальнейшей историей изменения напряжения  $\sigma(t > t_0)$ .

Преемственность соблюдается и в используемой в [18] разновидностью (2.2)

$$f(\sigma, \omega) = k\sigma^m \omega^n, \quad \varphi(\sigma, \omega) = \sigma^l \quad (2.5)$$

в случае  $l > \nu$ , как это было показано в [4]. Однако, согласно разновидностям модели Ю. Н. Работнова в виде (2.3) или (2.5), предварительное деформирование может привести лишь к увеличению поврежденности  $\omega$ , то есть к разупрочнению материала с точки зрения сопротивляемости его дальнейшему деформированию. Факт же упрочнения материала в результате его деформирования в третьей стадии ползучести, проявляющийся довольно контрастно в настоящих экспериментах, мог бы быть описан моделью (2.2) лишь в случае знакопеременности функции  $\varphi(\sigma, \omega)$ .

Ограниченность программ проведенных здесь экспериментов не позволяет дать какие-либо конкретные рекомендации в отношении функции  $\varphi(\sigma, \omega)$ , и решение этой проблемы требует детального изучения.

Институт механики АН  
Армянской ССР

Поступила 15 XI 1977

Ա. Մ. ՍԻՄՈՅԱՆ

ԽՐՈՒՄԱՆԿԵԼԱՅԻՆ ՊՈՂՊԱՏԻ ԺԱՄԱՆԿՈՐԴՈՒԹՅԱՆ  
ՓՈՐՁԱԿԱՆ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒԹՅՈՒՆԸ ԲԱՐՁՐՋԵՐՄԱՍԻՃԱՆԱՅԻՆ  
ԵՐԵՎ-ՓՈԻԼԱՅԻՆ ՍՈՂՔԻ ԴԵՊՐՏԻՐ

Ա մ փ ո փ ո Վ մ

Քերված են X18H10T պողպատի երեք-փուլային սողքի փորձնական ուսումնասիրության արդյունքները այն նմուշների համար, որոնք ունեցել են միևնույն նախնական սողքի զեֆորմացիան: Ցույց է արված, որ լարման մեծացումով, որի ազդեցության տակ տեղի է ունենում նախնական սողքը, աճում է նյութի դիմադրողականությունը հետագա սողքին և այդ էֆֆեկտը բավական մեծ լարումների դեպքում կարող է բերել նյութի ամրացնողմանը:

AN EXPERIMENTAL STUDY ON SUCCESSION UNDER  
HIGH-TEMPERATURE THREE-STAGED CREEP  
OF CHROME-NICKEL STEEL

A. M. SIMONIAN

## S u m m a r y

Experimental results are presented on three-staged creep of specimens of X18H10T steel subjected to one and the same creep prestrain. It is shown that as the stress, under which a certain creep prestrain takes place, increases, the resistance of material to subsequent creep increases as well, this effect being rather evident. It is also shown that deformation at the third stage of creep, under sufficiently high stress, may result in the hardening of the material.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Наместников В. С. О ползучести алюминиевого сплава при переменных нагрузках. ПМТФ, 1964, № 2.
2. Наместников В. С., Хвостунков А. А. Ползучесть дуралюмина при постоянных и переменных нагрузках. ПМТФ, 1960, № 4.
3. Наместников В. С., Работнов Ю. Н. О гипотезе уравнивания состояния при ползучести. ПМТФ, 1961, № 3.
4. Симонян А. М. О двух вопросах в одномерной теории ползучести. Изв. АН Арм. ССР, Механика, 1977, т. XXX, № 2.
5. Симонян А. М. Исследование высокотемпературной ползучести хромо-никелевой стали в условиях ступенчатых изменений напряжений. Изв. АН Арм. ССР, Механика, 1974, т. XXVII, № 4.
6. Nadai A. Plasticity, Mc-Graw-Hill Book Co, NY-London, 1931.
7. Вентуль Е. С. Теория вероятностей. М., Наука, 1969.
8. Fazan B., Sherby O. D., Dorn Y. E. Some Observations on Grain Boundary Shearing During Creep. Transactions, American Institute of Mining and Metallurgical Engineering, vol. 260, 1954.
9. Куров В. Д., Мельников Г. П., Соколов А. А. Влияние структуры материала на длительную прочность. Научн. тр. ин-та механики, МГУ, 1973, № 23.
10. Качанов А. М. Основы механики разрушения. М., «Наука», 1974.
11. Keown S. R. Microstructural changes occurring during the creep deformation of a simple austenitic steel at 600°C. "Creep Strength steel and High-Temperature Alloys. Proc. Meet., Univ. Sheffield, 1972". London, 1974.
12. Ohta Sadao, Akita Ken-ichi. The effect of continuous grain boundary precipitates on the creep rupture behaviour of high carbon-high chromium-high nickel stainless steels (Session IV), "Microstructure and Design Alloys. Proc. 3-rd Int. Conf. Strength Metals and Alloys", Cambridge, 1973, vol. 1.
13. Грант Н. Дж. и Чаудхури А. Р. Ползучесть и разрушение. Ползучесть и возврат. М., Металлургиздат, 1961.
14. Collins M. J. Creep of low-alloy steel. "Creep Strength Steel and High-Temp. Alloys. Proc. Meet Univ. Sheffield. 1972". London, 1974.
15. Иванова В. С. Механико-термическая обработка как средство повышения жаропрочности металлов и сплавов. М., Изд. НПО машиностроительной промышленности, 1964.

16. Максимович Г. Г. Структура деформированных металлов. Киев, «Наукова думка», 1976.
17. Иванова В. С., Гордиенко Л. К. Новые пути повышения прочности металлов. М., «Наука», 1964.
18. Работин Ю. Н. Ползучесть элементов конструкций. М., «Наука», 1966.
19. Симолян А. М. Исследование ползучести стали X18H10T при больших деформациях. Проблемы прочности, 1975, № 6.