

А. М. СИМОНЯН

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛЗУЧЕСТИ СТАЛИ X18H10T ПРИ  
ПЕРЕМЕННЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Экспериментальные данные о ползучести металлов при переменных температурах относительно немногочисленны, хотя имеются теоретические предпосылки для построения уравнений ползучести (см., например, [1]).

В настоящей работе исследуется ползучесть образцов из стали марки X18H10T при постоянных напряжениях, но при ступенчатом (до 3 ступеней) изменении температуры и делается сравнение с теоретическими данными по различным теориям.

## 1. Методика исследований

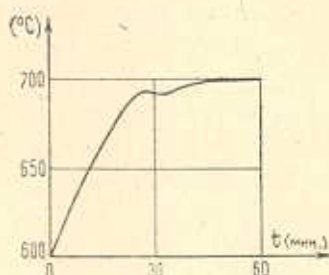
Исследования на ползучесть проведены на испытательной машине Zst 502.10 Рауэнштейн (ГДР). Выточка образцов  $\varnothing 8$  мм из прутков  $\varnothing 15$  мм производилась при непрерывной подаче масла на обрабатываемую поверхность, что препятствовало возникновению местных температурных градиентов, могущих привести к возникновению остаточных напряжений и к структурным изменениям. Нагружение образцов осуществлялось после полного нагрева печи путем плавного подъема двухступенчатого рычажного устройства с упора.

Эксперименты проводились при „ступенчатом“ изменении температур; при этом на каждой ступени температура в печи была колеблющейся  $\pm 2^\circ\text{C}$  с периодом  $\sim 2$  мин, а ступенчатое изменение температуры в печи в процессе опыта осуществлялось при неизменной нагрузке, причем максимальная скорость изменения температуры составляла  $\sim 4$  град/мин. На фиг. 1 показана кривая изменения температуры от 600 до 700 $^\circ\text{C}$ .

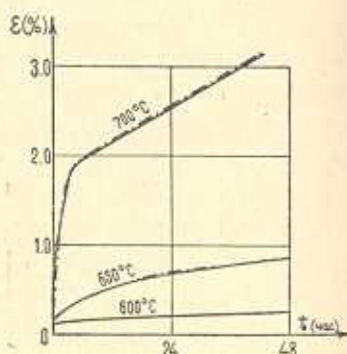
Отчеты деформаций снимались с помощью спирального микроскопа с экрана, фиксирующего относительное положение зажимных шин, закрепленных на выступах образца. Вследствие того, что в процессе изменения температуры зажимные шины, как и сам образец, претерпевали деформации от теплового расширения, у ненагруженных образцов определялась кривая изменения отчетов во времени при соответствующем изменении температур. Действительные кривые ползучести определялись путем вычитывания этих изменений от экспериментальных отчетов ползучести.

## 2. Результаты исследований

Исследования ползучести стали X18H10T при температурах 500, 600, 650 и 700°C показали, что вторая стадия ползучести у них выражена вполне отчетливо, причем она наступает тем раньше, чем выше температура. Отметим, что длительность 1-й стадии ползучести у той же стали практически не зависела от напряжения, когда рассматривались кривые ползучести при одной и той же температуре [2].



Фиг. 1.



Фиг. 2.

Кривые ползучести при напряжении  $1560 \text{ кг/см}^2$ , составляющем  $0.25 R$  ( $R$  — прочность стали при  $20^\circ\text{C}$  и при скорости деформирования  $4^\circ/\text{мин.}$ ), и при различных постоянных температурах вполне удовлетворительно описывается формулой

$$\varepsilon(t, T, \sigma = 0.25 R) = \varepsilon_0(T) + \alpha(T)t + \beta(T)(1 - e^{-\gamma(T)t}) \quad (2.1)$$

где для  $\varepsilon_0$ ,  $\alpha$  и  $\beta$  подобраны нижеследующие аппроксимации по температуре:

$$\varepsilon_0(T) = (78 + 0.0199 e^{0.00392T}) \cdot 10^{-5}$$

$$\alpha(T) = 2.705 e^{\frac{30 - \frac{26800}{T}}{T}} \cdot 10^{-5} \frac{1}{\text{час}} \quad (2.2)$$

$$\beta(T) = 53.8 e^{\frac{30 - \frac{25925}{T}}{T}} \cdot 10^{-5}$$

$T$  — температура  $^\circ\text{K}$ , а параметр  $\gamma$ , определяющий затухание невязкой составляющей ползучести, от температуры зависит не монотонно и в табл. 1 приводятся его значения без аппроксимации по температуре.

На фиг. 2 приведены усредненные кривые ползучести из 10—15 экспериментов при постоянных температурах  $\varepsilon_0(t)$  и теоретические кривые  $\varepsilon_1(t)$ , построенные по формулам (2.1).

Введя показатель аппроксимации  $\delta(t)$

$$\delta(t) = \frac{\int_0^t |\varepsilon_s(\tau) - \varepsilon_r(\tau)| d\tau}{\int_0^t |\varepsilon_s(\tau)| d\tau} \quad (2.3)$$

из табл. 1 заключаем о хорошем совпадении (2.1) с экспериментальными данными

Таблица 1

T°C	500	600	650	700
$\gamma \frac{1}{\text{час}}$	0.2	0.06	0.13	0.9
$\delta(48 \text{ час})$	0.006	0.018	0.016	0.018

Ниже, на основе различных теоретических предпосылок, рассмотрим обобщение уравнения (2.1) на случай переменных температур при действии того же постоянного напряжения  $\sigma = 0.25 R$ .

Запишем основное уравнение теории упрочнения [3] в виде

$$\frac{\partial \varepsilon_c(t)}{\partial t} = \psi(T, \varepsilon_c, \sigma) \quad (2.4)$$

В применении к (2.1) уравнение (2.4) даст

$$\dot{\varepsilon}(t) = \varepsilon_0[T(t)] + \int_0^t \{ \alpha[T(\tau)] + \beta[T(\tau)] \gamma[T(\tau)] e^{-\gamma|T(\tau)|\Phi[\varepsilon(\tau), T(\tau)]} \} d\tau \quad (2.5)$$

где  $\Phi(\varepsilon, T)$  является решением уравнения (2.1) относительно времени.

Используя методы построения наследственного уравнения [4] в применении к случаю переменных температур и постоянного напряжения, из (2.1) получим

$$\dot{\varepsilon}(t) = \varepsilon_0(T(t)) + \int_0^t \{ \alpha[T(\tau)] + \beta[T(\tau)] \gamma[T(\tau)] e^{-\gamma|T(\tau)|(t-\tau)} \} d\tau \quad (2.6)$$

Согласно теории течения [3], изотермическая ползучесть при постоянном напряжении должна протекать с постоянной скоростью, что противоречит (2.1). Учитывая, что затухающая часть ползучести „ $\beta$ -ползучесть“ относительно велика, причем исчерпывается быстро, с известным приближением представляется естественным ее отнести к мгновенной деформации, и тогда, согласно теории течения, при переменных температурах будем иметь

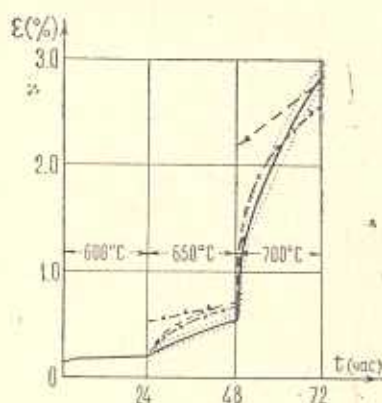
$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0[T(t)] + \beta[T(t)] + \int_0^t \alpha[T(\tau)] d\tau \quad (2.7)$$

Как показывают испытания образцов на ползучесть при понижении температуры,  $\beta$ -ползучесть не является обратимой, что согласуется с (2.5), но приводит к большим расхождениям с (2.6) и (2.7). В связи с этим в последних двух уравнениях члены, содержащие  $\beta(T)$ , заменим их максимальными значениями, достигнутыми до рассматриваемого момента  $t$ . Тогда вместо (2.6) и (2.7) соответственно получим

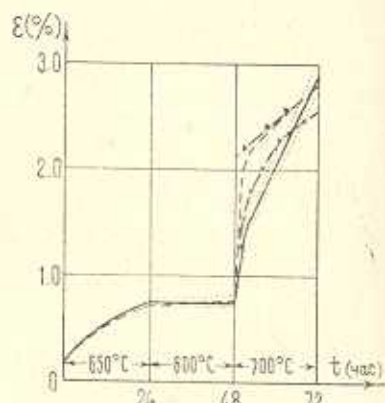
$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0[T(t)] + \int_0^t \alpha[T(\tau)] d\tau + \max_i \int_0^t \beta[T(\tau)] \gamma[T(\tau)] e^{-\gamma[T(\tau)](t-\tau)} d\tau \quad (2.8)$$

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0[T(t)] + \int_0^t \alpha[T(\tau)] d\tau + \max_i \beta[T(t)] \quad (2.9)$$

На фиг. 3—6 приведены экспериментальные кривые (сплошные линии), а также кривые, построенные по формулам теории упрочнения (2.5) (штриховые линии с крестиками), (2.8) (штриховые линии) и (2.9) штриховые линии с треугольниками. Теоретические кривые на первой



Фиг. 3.



Фиг. 4.

ступени изменения температуры построены на основании (2.1) и, естественно, не совпадают с экспериментальными, так как последние найдены на основании усреднения экспериментальных данных, полученных только для рассматриваемых экспериментов. После изменения температуры теоретические кривые различаются друг от друга, если только максимальное значение  $\beta$ -ползучести возрастает (фиг. 3 и 4).

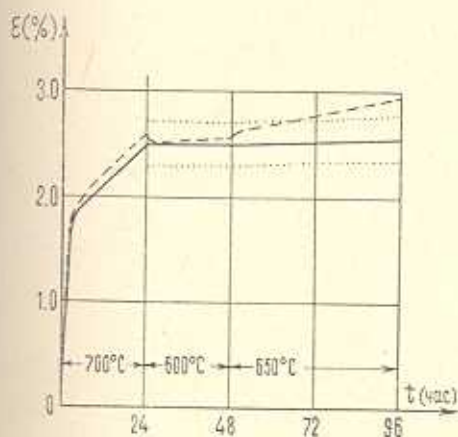
Пунктирными кривыми ограничена область, в которой с вероятностью 68,3% находится действительная экспериментальная кривая, то есть усредненная кривая при бесчисленном множестве экспериментов. Соответствующие расчеты проведены согласно [5].

Для сравнения экспериментальных данных с теоретическими использован показатель аппроксимации  $\delta(t)$ ; при этом в формуле (2.3) интегрирование осуществлено в пределах от 24 час (момента первого изменения температуры) до 72 час.

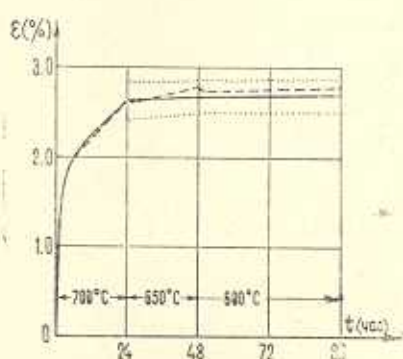
Таблица 2

№ серии эксперимента	1 (фиг. 3)	2 (фиг. 4)	3 (фиг. 5)	4 (фиг. 6)
Уравнение (2.5)	0.115	0.061	0.070	0.037
Уравнение (2.8)	0.210	0.110	0.070	0.037
Уравнение (2.9)	0.278	0.173	0.070	0.037

Как видно из данных табл. 2, в случае повышения температуры в процессе опыта наилучшее совпадение с экспериментальными данными дает уравнение теории упрочнения (2.5). В случае же понижения температуры (фиг. 5 и 6) теоретические кривые, построенные по раз-



Фиг. 5.



Фиг. 6.

личным теориям, совпадают друг с другом и дают незначительное расхождение с экспериментальными кривыми, однако это связано с малым вкладом ползучести после уменьшения температуры по сравнению с общей деформацией ползучести. Скорость ползучести после понижения температуры почти постоянна и значительно меньше, чем это представляется рассмотренными теориями.

Отсюда можно было бы предположить, что формула (2.1) верна лишь в определенном промежутке времени и, например, при достижении деформаций ползучести при  $650^{\circ}\text{C} \sim 2.5\%$  скорость ползучести

в этот момент будет ниже предсказываемой (2.1). В таком случае кривая, построенная согласно теории упрочнения (2.5), дала бы лучшее совпадение с экспериментальной кривой. Однако при  $650^{\circ}\text{C}$  и при длительности испытания более 400 час экспериментальные исследования показали, что скорость ползучести оказывается почти постоянной и в пределах расчетного значения даже после достижения деформаций порядка  $3\%$ .

Проведенные эксперименты позволяют оценить справедливость принципа коммутативности, то есть независимости общей деформации ползучести при ступенчатом изменении температур от последовательности ступеней. Как следует из рассмотрения фиг. 3 и 4, принцип коммутативности имеет место при совпадении температур на последней ступени их изменения. Аналогичное явление имело место и при ступенчатом изменении напряжений у данной стали в условиях ползучести при постоянной температуре  $600^{\circ}\text{C}$  [2].

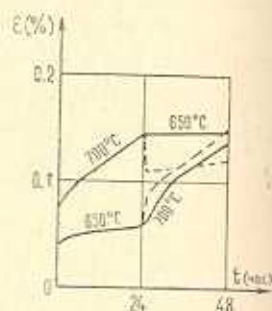
Для проверки общности полученных результатов проведены также эксперименты при напряжении  $960 \text{ кг/см}^2$  ( $0.15 R$ ), когда деформации ползучести меньше рассмотренных выше на порядок. Отметим, что аппроксимации (2.2), верные для  $\sigma = 1560 \text{ кг/см}^2$ , здесь неприменимы: при построении теоретических кривых ползучести на фиг. 7 мы пользовались соответственными численными значениями  $\varepsilon_0$ ,  $\alpha$  и  $\beta$  без аппроксимации по температуре. Как можно заключить из фиг. 7, мгновенные деформации здесь превосходят деформации  $\beta$ -ползучести, в отличие от ползучести при напряжении  $1560 \text{ кг/см}^2$  ( $0.25 R$ ). При этом усматривается, что мгновенные деформации при переменных температурах не являются обратимыми, что в предыдущих исследованиях на кривых деформаций отражалось несущественно. Теоретические кривые, построенные по формулам (2.5), (2.8) и (2.9),

практически совпадают друг с другом и на фиг. 7 показаны штриховыми линиями. Основные отмеченные выше закономерности сохраняются и для ползучести при  $960 \text{ кг/см}^2$ .

В условиях вышеприведенных экспериментов верны нежеследующие выводы.

1. В условиях ползучести при ступенчато-изменяющейся температуре и при постоянном напряжении теория упрочнения лучше согласуется с экспериментальными данными, чем теории наследственности и течения.

2. На каждой ступени изменения температуры имеет место вторая стадия ползучести. Скорость установившейся ползучести отличается от теоретического значения (у всех теорий она совпадает), причем превышает его, если до данной ступени ползучесть имела место при более низких температурах, и наоборот.



Фиг. 7.

3. При понижении температуры в процессе ползучести не имеет места обратная ползучесть, так же как и не происходит повышения скорости ползучести.

4. Затухающая часть ползучести ( $\beta$ -ползучесть) и мгновенная деформация не являются обратимыми при изменении температуры.

Институт механики АН Армянской ССР

Поступила 15 IV 1970

Ա. Մ. ՍԻՄՈՆԻԱՆ

### X18H10T ՊՈՂՊԱՏԻ ՍՈՂՔԻ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒԹՅՈՒՆԸ ՓՈՓՈՒՆԱԿԱՆ ԶԵՐՄԱՍՏԻՃԱՆՆԵՐԻ ԳԵՊՔՈՒՄ

Հետազոտված է 1560 կգ/սմ<sup>2</sup> և 960 կգ/սմ<sup>2</sup> լարման տակ գտնվող շժան-դոտվող պողպատի սողրը անփոփոխ և աստիճանային փոփոխական ջերմաստիճանների ղեպքում: Տրված է անփոփոխ ջերմաստիճանների ղեպքում սողքի կորերը զրանցող հավասարման ընդհանրացումը համաձայն ամրապնդման, ոչ դժային ժառանգականության և հոսքի տեսությունների: Համեմատումը փորձնական արդյունքների հետ ցույց է տալիս, որ ոչ իզոթերմիկ սողքի զրանցման համար ամենարժեքունկին հանդիսանում է ամրապնդման տեսությունը: Ցույց է տրված նաև, որ սողքի մարվող մասը և ակնթարթային ղեպքում առաջիկան ջերմաստիճանի փոփոխման ղեպքում դարձելի չեն:

### INVESTIGATION ON CREEP OF STEEL X18H10T AT VARIABLE TEMPERATURES

A. M. SIMONIAN

S u m m a r y

The investigation is dealt with on the creep of stainless steel under stresses of 1560 kg/cm<sup>2</sup> and 96 kg/cm<sup>2</sup> at constant and variable temperature ranging from 600 to 700°C.

A generalized equation of creep at constant temperature for the case of variable temperature is derived according to the theories of nonlinear heredity, hardening and flow.

The best coincidence with experimental data under nonexothermic creep is provided by the theory of hardening in its general form. It is also shown that extinguishing part of creep and instantaneous deformation are not reversible at temperature variation.

### Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Работнов Ю. Н. Ползучесть элементов конструкций. Изд. Наука, М., 1966.
2. Симонян А. М. Экспериментальное исследование ползучести нержавеющей стали X18H10T при 600°C. Изв. АН Арм. ССР, Механика, т. XXII, № 6, 1969.

3. Качанов А. М. Теория ползучести. Физматгиз, М., 1960.
4. Арутюнян Н. Х. Некоторые вопросы теории ползучести. Гостехтеориздат, М.—Л., 1952.
5. Леонтьев Н. А. Статистическая обработка результатов наблюдений. Гослесбумиздат, М.—Л., 1952.