

## ПОЛЗУЧЕСТЬ ЖАРОПРОЧНОЙ СТАЛИ ПРИ СЛОЖНОМ НАПРЯЖЕННОМ СОСТОЯНИИ

*И. И. Трунин*

(Москва)

Приводятся результаты исследования ползучести в условиях плоского напряженного состояния в трубчатых образцах при действии скручивающего момента, а также при совместном действии растягивающей и скручивающей сил.

В качестве материала исследования была выбрана сталь перлитного класса 15Х-1М1Ф, полученная в виде пароперегревательных труб, размером  $32 \times 6$  мм, промышленных плавков. Химический состав исследованной плавки стали 0.09 С, 0.11% Si, 0.54% Mn, 0.023% S, 0.012% P, 1.14% Cr, 0.93% Mo, 0.22% V.

Трубы пароперегревателей разрежали на заготовки длиной 205 мм и подвергали термической обработке по режиму, рекомендованному для промышленности: нормализация 1030—1050°C, выдержка 1 час, охлаждение на спокойном воздухе и последующий отпуск 720—730°C, выдержка 5 час.

Для контроля однородности свойств стали после термообработки на каждой трубке делалось по пять-шесть измерений твердости с обоих концов заготовок. Разброс значений твердости составлял +8—10%.

Испытания на ползучесть при сложном напряженном состоянии проводились на машинах ИП-2 и ИП-4М. Разработанные ранее конструктивные изменения этих установок [1,2] позволили варьировать напряженное состояние от чистого растяжения до чистого кручения. Испытания проводились при 570° — рабочей температуре деталей, изготавливаемых из стали 15Х1М1Ф.

Испытывались три серии трубчатых образцов: одна серия при одноосном растяжении ( $\sigma = \sigma_x$ ,  $\tau = 0$ ,  $\tau/\sigma = 0$ ), вторая — при действии одной скручивающей силы ( $\sigma = 0$ ,  $\tau = \tau_{xy}$ ,  $\tau/\sigma = \infty$ ) и третья — при совместном действии растягивающей и скручивающей сил ( $\sigma = \sigma_x$ ,  $\tau = \sigma/2$ ,  $\tau/\sigma = 0.5$ ).

Обычно из соображений получения однородного напряженного состояния по толщине стенки трубчатого образца при действии скручивающей силы исследователи стремятся [3] максимально уменьшить толщину стенки, чтобы отношение среднего радиуса  $R$  к толщине стенки  $\delta$  удовлетворяло условию  $R/\delta > 10$ . При этом отклонение значения  $\tau_{\max}$  на поверхности образца не более  $\pm 5\%$  от среднего значения  $\tau$  по толщине стенки.

Однако для уменьшения влияния поверхностных явлений (окисление, влияние на механизм развития пластических деформаций, облегченное развитие очагов разрушения с поверхности и др.) желательно увеличение толщины стенки.

Учитывая вышесказанное, в настоящем исследовании использованы трубчатые образцы с  $\delta = 1.5$  мм и  $2R = 25$  мм. При действии скручивающей силы для указанных размеров трубчатых образцов допускались следующие максимальные отклонения значений касательных напряжений от их среднего значения  $\Delta\tau/\tau \leq \pm 6.4\%$ .

В процессе испытания на ползучесть трубчатых образцов определялись относительная деформация в осевом направлении  $\varepsilon$  и относительная деформация сдвига  $\gamma$  по изменению угла закручивания

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} 100\%, \quad \gamma = \varphi \frac{r}{l} 100\%$$

Здесь  $\Delta l$  — удлинение рабочей части,  $l$  — длина рабочей части образца,  $r$  — средний радиус поперечного сечения рабочей части,  $\varphi$  — угол закручивания в радианах.

Задачей предлагаемой работы являлось изучение закономерностей ползучести в условиях сложного напряженного состояния на участке установившейся скорости нарастания деформации. В связи с этим длительность испытания на ползучесть в каждом случае определялась стремлением получить достаточно уверенное значение постоянной скорости при данном напряжении.

В большинстве случаев испытания продолжались около 2000 час. Напряженное состояние при каждом режиме испытания характеризуется главными нормальными напряжениями

$$\sigma_{1,2} = \frac{\sigma_x}{2} \pm \frac{1}{2} \sqrt{\sigma_x^2 + 4\tau_{xy}^2}$$

Сопоставление результатов испытаний на ползучесть в условиях сложного напряженного состояния и при одноосном растяжении проводилось по интенсивности напряжений и интенсивности скорости ползучести

$$\sigma_i = \sqrt{\sigma_x^2 + 3\tau_{xy}^2}, \quad V_i = \sqrt{V_x^2 + \omega_{xy}^2/3}$$

где  $\sigma_x$  — напряжение от осевой силы  $P$  в  $\text{з/мм}^2$ ,  $\tau_{xy}$  — напряжение от крутящего момента в  $\text{кг/мм}^2$ ,  $V_x$  — осевая скорость ползучести, в % на час,  $\omega_{xy}$  — угловая скорость ползучести в % на час.

Для определения скорости ползучести строились первичные кривые в координатах: время — деформация.

В случае испытания при одновременном действии растягивающей и скручивающей сил для каждого образца строились две первичные кривые: время — относительное удлинение, время — относительный сдвиг.

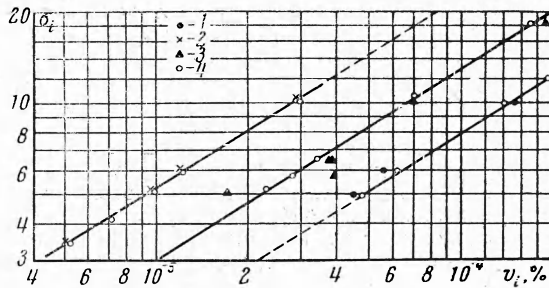
Результаты испытаний, а также все величины, полученные расчетным путем, приведены в табл. 1.

Таблица 1

Сталь 15Х1М1Ф. Результаты испытаний на ползучесть  $t = 570^\circ \text{C}$ ,  $n = 13.0353$ ,  $m = -11.4440$ ,  $\lg A = -8.8898$ , напряжения в  $\text{кг/мм}^2$ , скорости в % на час, значения  $V_{i1}$  — по кривой,  $V_{i2}$  — по формуле (1)

$\sigma_x$	$\tau_{xy}$	$V_x \cdot 10^5$	$\omega_{xy} \cdot 10^5$	$\sigma_i$	$\tau_{\max}$	$V_{i1} \cdot 10^5$	$V_{i2} \cdot 10^5$	$\sigma_x$	$\tau_{xy}$	$V_x \cdot 10^5$	$\omega_{xy} \cdot 10^5$	$\sigma_i$	$\tau_{\max}$	$V_{i1} \cdot 10^5$	$V_{i2} \cdot 10^5$
12	—	19	—	12	6.0	19	19	—	2	—	0.8	3.5	2	0.5	0.5†
10	—	15	—	10	5.0	15	14	14	7	16	18	18.5	9.9	19	17
6	—	5.6	—	6	3.0	5.6	6.2	8	4	5.0	3.6	10.4	5.6	6.0	7.0
5	—	4.5	—	5	2.5	4.5	4.7	5	2.5	3.5	2.0	6.6	3.5	3.7	3.4
—	6	—	5.0	10.4	6	2.9	2.9	5	2.5	3.5	2.4	6.6	3.5	3.8	3.4
—	3.5	—	2.0	6.0	3.5	1.2	1.2	4.5	2.25	3.0	3.5	5.9	3.2	3.8	2.8
—	3	—	1.5	5.2	3	0.9	0.96	4	2	1.5	1.4	5.2	2.8	1.7	2.3
—	2.5	—	1.2	4.3	2.5	0.7	7.04								

Если в качестве меры напряженного состояния принять интенсивность напряжений  $\sigma_i$ , а развитие ползучести оценивать по интенсивности скорости ползучести  $V_i$ , то на основании результатов испытания (табл. 1) можно отметить следующее. Процесс ползучести при растяжении развивается более интенсивно, чем при кру-



Фиг. 1. Зависимость между интенсивностью напряжения и интенсивностью скорости ползучести для стали 15Х1М1Ф, при  $t = 570^\circ$ : 1 — чистое растяжение, 2 — чистое кручение, 3 — кручение с растяжением, 4 — расчетные точки по формуле (1)

чению. Так, например, в случае  $\sigma_i = 6 \text{ кг/мм}^2$  имеем  $V_i = 5.6, 1.2 \cdot 10^{-5} \% / \text{час}$  при одноосном растяжении и чистом кручении, соответственно; этот факт лучше всего установить в координатах  $\lg V_i$  и  $\lg \sigma_i$  (фиг. 1); график, соответствующий чистому кручению, сдвинут в сторону больших напряжений, т. е. для получения заданной интенсивности скорости ползучести при кручении требуется более высокое значение  $\sigma_i$ , чем при растяжении. Так, например,  $V_i = 4 \cdot 10^{-5} \% / \text{час}$  при кручении соответствует  $\sigma_i = 12.5 \text{ кг/мм}^2$ , а при растяжении  $\sigma_i = 4.5 \text{ кг/мм}^2$ .

Сопоставление данных, полученных при одноосном растяжении и при совместном действии растягивающей силы и крутящего момента, позволяет отметить, что при одной и той же величине осевого нормального напряжения  $\sigma_x$  добавление крутящего момента несколько уменьшает осевую скорость ползучести  $V$ . Из табл. 1 видно, что одноосное растяжение при  $\sigma_x = 5 \text{ кг/мм}^2$  дает скорость  $V_x = 4.5 \cdot 10^{-5} \% / \text{час}$ , сложное напряженное состояние при  $\sigma_x = 5 \text{ кг/мм}^2$  и  $\tau_{xy} = 2.5 \text{ кг/мм}^2$  дает осевую скорость ползучести  $V_x = 3.5 \cdot 10^{-5} \% / \text{час}$ .

Аналогичное сравнение данных чистого кручения с соответствующими результатами испытания при совместном действии крутящего момента и растягивающей силы показывает, что при кручении приложение дополнительной растягивающей силы ускоряет угловую скорость ползучести. Так, из табл. 1 видно, что

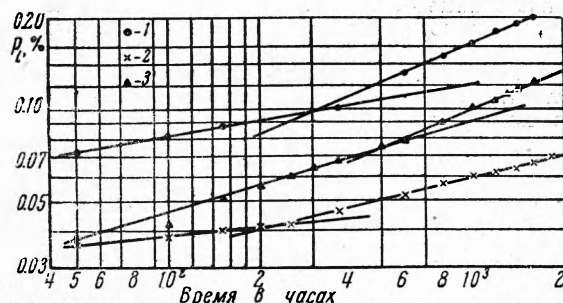
$$\omega_{xy} = 1,2 \cdot 10^{-5} \% / \text{час} \quad \text{при } \tau_{xy} = 2,5 \text{ кг/мм}^2, \quad \sigma_x = 0$$

$$\omega_{xy} = 2,4 \cdot 10^{-5} \% / \text{час} \quad \text{при } \tau_{xy} = 2,5 \text{ кг/мм}^2, \quad \sigma_x = 5 \text{ кг/мм}^2$$

Воспользуемся системой координат: логарифм времени и логарифм интенсивности деформации  $p_i = \sqrt{\varepsilon^2 + \gamma^2} / 3$ , где  $\varepsilon$  и  $\gamma$  — полная деформация при удлинении

и сдвиге соответственно; зависимость в этих координатах для  $\sigma_i \sim 6 \text{ кг/мм}^2$  построена на фиг. 2, графики представляют собой ломаные линии, состоящие из двух отрезков прямых: первая ветвь ломаной соответствует неустановившемуся участку кривой ползучести, вторая — участку постоянной скорости ползучести, перелом — переходу от первого ко второму участку кривой ползучести.

При анализе первичных кривых ползучести следует иметь в виду, что способ измерения деформации кручения при длительных испытаниях из-за потерь в момент приложения нагрузки на первой стадии испытания позволяет достаточно надежно оценивать только скорость ползучести, а не абсолютную деформацию сдвига.



Фиг. 2. Изменение интенсивности пластической деформации во времени. Сталь 15X1M1Φ,  $t_{\text{исп}} = 570^\circ$ ,  $\sigma_i \approx 6 \text{ кг/мм}^2$ : 1 — чистое растяжение, 2 — чистое кручение, 3 — кручение с растяжением

Поэтому обработку результатов испытаний по величине интенсивности пластической деформации следует рассматривать, как качественную оценку протекания процесса.

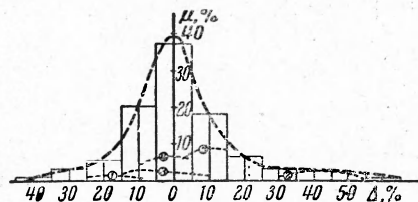
Следует отметить, что экспериментальные данные, полученные в этой работе на стали 15X1M1Φ, хорошо согласуются с результатами аналогичного исследования перлитной 0.5% молибденовой стали [4], в котором также показано, что растяжение вызывает более ускоренную ползучесть по сравнению с кручением. Сопоставление опытных данных по стали 15X1M1Φ, полученных на участке установившейся скорости ползучести, с результатами исследования стали ЭИ-257 аустенитного класса на первом участке затухающей скорости ползучести [5], также показывает качественное соответствие установившегося влияния напряженного состояния на интенсивность развития процесса ползучести.

Известно исследование, в котором получены противоположные результаты: при испытании на ползучесть стали 1X18N9T наибольшие скорости ползучести имели место при кручении, минимальные скорости — при растяжении [6].

Статистическая обработка результатов ряда работ по исследованию ползучести в условиях сложного напряженного состояния, проведенная Б. В. Зверьковым [7], показала, что указанные данные по стали 1X18N9T [6] находятся на наибольшем удалении от модального значения (фиг. 3). По нашему мнению, аномальное поведение стали 1X18N9T в данном случае связано с малой стабильностью ее структуры, так как при испытании на ползучесть при  $600^\circ$  происходит интенсивное выделение из твердого раствора вторичных фаз ( $\sigma$ -фаза,  $\alpha$ -фаза).

При кручении, как наименее жестком напряженном состоянии, для развития пластической деформации создаются более благоприятные условия, чем при одноосном растяжении [8], следовательно, в этом случае возможен более интенсивный распад твердого раствора, что в свою очередь увеличивает скорость ползучести.

Одной из целей исследования ползучести в условиях сложного напряженного состояния является определение критерия, при помощи которого можно оценить сопротивление ползучести по результатам простейших испытаний. Установление таких критериев даже для отдельных групп материалов значительно облегчит оценку конструкционной жаропрочности.



Фиг. 3. Гистограмма распределения отклонений при сравнении экспериментальных данных с теоретическими по интенсивности касательных напряжений: 1 — 1X13N16B —  $700^\circ$ , 2 — 1X18N9T —  $600^\circ$ , 3 — углеродистая сталь —  $550^\circ$ , 4 — углеродистая сталь  $450^\circ$ , 5 — внутреннее давление

Ниже делается попытка выявления критерия такого рода.

При выборе критерия используется то обстоятельство, что ползучесть зависит от величины максимальных касательных напряжений и от интенсивности напряжений, пропорциональной второму инварианту девиатора напряжений, т. е. от характеристики энергии сдвиговой деформации.

В качестве критерия ползучести была рассмотрена зависимость

$$V_i = A \sigma_i^n (\tau_{\max})^m \quad (1)$$

По результатам испытания на одноосное растяжение и по данным опытов на кручение определялись постоянные  $A$ ,  $n$ , и  $m$ . После этого расчетным путем определялись значения интенсивности скорости ползучести по заданным напряжениям (табл. 1, графа 8 и фиг. 1).

По этому же уравнению были рассчитаны скорости ползучести для стали 1Х18Н9Т из работы [6]. Результаты расчета приведены в табл. 2 (графа 3), которые также говорят о хорошем совпадении расчетных данных с экспериментальными (графа 4).

Таблица 2

Сталь 1Х18Н9Т. Расчет по данным работы [6] интенсивности скорости ползучести  $V_i$  по формуле (1)  $m = 9.9003$ ,  $n = -6.57799$ ,  $\lg A = -4.55556$ ; напряжение в кг, мм<sup>2</sup>

$\tau_{\max}$	$\sigma_i$	$V_{i2}$	$V_{i1}$	$\tau_{\max}$	$\sigma_i$	$V_{i2}$	$V_{i1}$
3	6	$1.12 \cdot 10^{-5}$	$1.30 \cdot 10^{-5}$	7.8	13.51	$6.90 \cdot 10^{-4}$	$6.36 \cdot 10^{-4}$
3.5	7	$1.87 \cdot 10^{-5}$	$2.00 \cdot 10^{-5}$	3.605	6.31	$6.16 \cdot 10^{-5}$	$6.40 \cdot 10^{-5}$
4.25	8.5	$3.56 \cdot 10^{-5}$	$3.0 \cdot 10^{-5}$	7.20	12.61	$6.28 \cdot 10^{-4}$	$3.29 \cdot 10^{-4}$
5	10	$6.12 \cdot 10^{-5}$	$6.10 \cdot 10^{-5}$	5.055	9.00	$1.60 \cdot 10^{-4}$	$1.17 \cdot 10^{-4}$
6	12	$1.12 \cdot 10^{-4}$	$1.16 \cdot 10^{-4}$	6.57	12.00	$4.27 \cdot 10^{-4}$	$2.94 \cdot 10^{-4}$
7.5	15	$2.35 \cdot 10^{-4}$	$3.64 \cdot 10^{-4}$	3.9	7.21	$5.66 \cdot 10^{-4}$	$5.90 \cdot 10^{-4}$
9	18	$4.31 \cdot 10^{-4}$	$4.20 \cdot 10^{-4}$	6.65	12.25	$3.36 \cdot 10^{-4}$	$3.71 \cdot 10^{-4}$
10	20	$6.12 \cdot 10^{-4}$	$1.50 \cdot 10^{-3}$	4.95	9.26	$4.03 \cdot 10^{-3}$	$8.20 \cdot 10^{-5}$
2.5	4.33	$1.57 \cdot 10^{-5}$	$1.40 \cdot 10^{-5}$	8.5	15.87	$1.23 \cdot 10^{-5}$	$1.53 \cdot 10^{-3}$
3	5.20	$2.87 \cdot 10^{-5}$	$2.90 \cdot 10^{-5}$	3.2	6.08	$2.45 \cdot 10^{-5}$	$4.10 \cdot 10^{-5}$
3.5	6.06	$4.83 \cdot 10^{-5}$	$4.50 \cdot 10^{-5}$	6.4	12.17	$2.44 \cdot 10^{-4}$	$2.40 \cdot 10^{-5}$
5.1	8.83	$1.69 \cdot 10^{-4}$	$1.45 \cdot 10^{-4}$	2.325	4.51	$6.00 \cdot 10^{-6}$	$5.70 \cdot 10^{-5}$
6.0	10.39	$2.89 \cdot 10^{-4}$	$2.26 \cdot 10^{-4}$	5.8	11.27	$1.61 \cdot 10^{-4}$	$1.94 \cdot 10^{-4}$
7.0	12.12	$4.83 \cdot 10^{-4}$	$3.46 \cdot 10^{-4}$				

К недостаткам рассмотренного уравнения можно отнести то, что для определения постоянных недостаточно экспериментов только при одноосном растяжении.

Однако хорошее совпадение расчетных данных с результатами эксперимента на стали 15Х1М1Ф и на стали 1Х18Н9Т, в которых был выявлен противоположный эффект влияния напряженного состояния на сопротивление ползучести, позволяет высказать предположение о применимости уравнения (1) для широкого круга материалов.

Автор благодарит Ю. Н. Работнова и В. С. Наместникова за ряд советов при обсуждении результатов исследования данной работы.

Поступила 5 II 1962

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Сорокин О. В., Туляков Г. А. Установка для испытания металлов на ползучесть при сложнопнапряженном состоянии. Сб. Прочность металлов. М., Изд-во АН СССР, 1957.
2. Трусов Л. П., Федорцов Г. П., Митрофанов В. Г., Трунин И. И. Машина ИП-2, ИП-4М для испытания на ползучесть и длительную прочность. Издание филиала ВИНТИ, тема 2, № II-56-527, 1956.
3. Сдобырев В. П. Критерий длительной прочности для некоторых жаропрочных сплавов при сложном напряженном состоянии. Изв. АН СССР, ОТН, Механика и машиностроение, 1957, № 6.
4. Одинг И. А., Иванова В. С., Бурдукский В. В., Геминев В. И. Теория ползучести и длительной прочности металлов. М., Металлургиздат, 1959.
5. Наместников В. С. Замечания о ползучести стали ЭИ/257 при сложном напряженном состоянии. Изв. АН СССР, ОТН, Мех. и маш., 1960, № 6.
6. Одинг И. А., Туляков Г. А. Ползучесть аустенитной стали при сложном напряженном состоянии. Изв. АН СССР, ОТН, 1957, № 9.
7. Зверьков Б. В. Ползучесть и длительное разрушение труб при сложных нагрузках. Диссертация, Ленинградский кораблестроительный институт, 1960.
8. Фридман Я. Б. Механические свойства металлов. Оборонгиз, 1952.