

ТЕХНИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

Член-корреспондент АН СССР И. А. ОДИНГ

**ЗАВИСИМОСТЬ МЕЖДУ КРИТЕРИЯМИ ВТОРЫХ УЧАСТКОВ  
РЕЛАКСАЦИИ И ПОЛЗУЧЕСТИ АУСТЕНИТНОЙ СТАЛИ**

В развитие положения Бейли<sup>(1)</sup>, рассматривавшего процесс ползучести металлов как слагающийся из чередующихся процессов размягчения и упрочнения, было установлено<sup>(2)</sup>, что скорость ползучести  $V_p$  прямо пропорциональна интенсивности (скорости) разупрочнения  $I_r$  и обратно пропорциональна интенсивности упрочнения  $I_u$  металла\*.

Эта основная закономерность процесса ползучести базируется на следующих положениях. Образец, растягиваемый постоянной по величине и знаку силой  $P$ , вызывающей в нем напряжение растяжения  $p = P/f_0$ , где  $f_0$  — начальная площадь поперечного сечения образца.

Известно, что под действием температуры металл разупрочняется, т. е. его силы внутренних связей уменьшаются. Обозначим среднюю величину сил внутренних связей, приходящуюся на единицу площади поперечного сечения растягиваемого образца, через  $\sigma$ . До тех пор пока  $\sigma \geq p$ , пластическая деформация происходит не будет. Если же наступит неравенство  $\sigma < p$ , то образец начнет пластически деформироваться. Разупрочнение протекает во времени  $t$  с некоторой интенсивностью

$$I_r = \frac{(d\sigma)_r}{dt}, \quad (1)$$

которая является величиной отрицательной, так как  $\sigma$  может только уменьшаться. В образце, нагруженном постоянным растягивающим напряжением  $p$ , силы внутренних связей  $\sigma$  могут стать меньше  $p$  лишь на бесконечно малую величину  $(d\sigma)_r$ , равную

$$(d\sigma)_r = \sigma - p = I_r dt, \quad (2)$$

ибо как только произойдет разупрочнение металла в такой мере, тотчас же образец начнет ползти. Деформация продолжится до тех пор, пока наклеп не восстановит силы внутренних связей, т. е. не вызовет упрочнения металла до величины  $\sigma = p$ . Для этого должна произойти пластическая деформация величиной  $d\varepsilon_p$ , которая вызовет приращение сил внутренних связей на величину

$$(d\sigma)_u = - (d\sigma)_r. \quad (3)$$

Упрочнение также происходит с некоторой интенсивностью

$$I_u = \frac{(d\sigma)_u}{d\varepsilon_p}. \quad (4)$$

Она будет всегда положительной величиной.

На основании уравнений (2), (3) и (4) имеем

$$I_u d\varepsilon_p = - I_r dt \quad \text{или} \quad V_p = \frac{d\varepsilon_p}{dt} = - \frac{I_r}{I_u} = - \frac{(d\sigma)_r / dt}{(d\sigma)_u / d\varepsilon_p}. \quad (5)$$

\* М. А. Большанина рассматривает упрочнение и разупрочнение (отдых) как основные явления любой пластической деформации<sup>(7)</sup>.

Это и есть основная закономерность ползучести, сформулированная выше.

Обратимся теперь к релаксации, которая всегда протекает при  $\sigma = p \neq \text{const}$ .

Основным уравнением релаксации является

$$\varepsilon_0 = \varepsilon_R + \varepsilon_{upr} = \text{const}, \quad (6)$$

где  $\varepsilon_{upr} = \sigma / E$  — упругая деформация,  $\varepsilon_R$  — пластическая деформация, нарождающаяся в процессе релаксации за счет уменьшения  $\varepsilon_{upr}$ ;  $\varepsilon_0$  — общая (начальная) деформация.

Дифференцируя уравнение (6) по времени, имеем

$$\frac{d\varepsilon_R}{dt} = -\frac{1}{E} \frac{(d\sigma)_R}{dt} = -\frac{V_R}{E}. \quad (7)$$

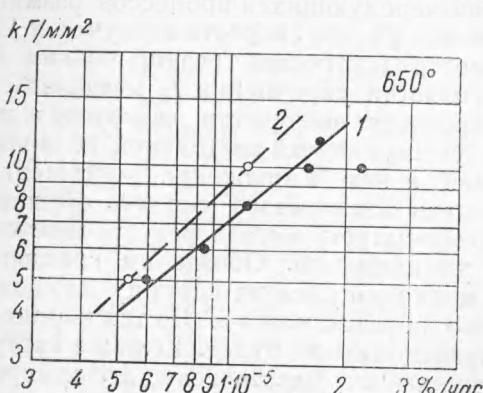


Рис. 1. Скорость пластической деформации при ползучести  $V_p$  (1) и при релаксации  $-V_R / E$  (2) для стали № 2207. Точками обозначены экспериментальные данные ползучести, кружками — релаксации

ренной релаксационной стойкости. Уравнение  $\sigma \geq \sigma_R$ . Для второго участка ползучести интенсивность упрочнения равна (4):

$$I_u = E e^{-\frac{\sigma - \sigma_R}{b}}. \quad (10)$$

Это уравнение также применимо лишь при условии  $\sigma \geq \sigma_R$ . Уравнения (5), (9) и (10) дают

$$V_p = -\frac{V_R}{E} e^{\frac{\sigma - \sigma_R}{b}} = -\frac{\sigma - \sigma_R}{t_0 E} e^{\frac{\sigma - \sigma_R}{b}}. \quad (11)$$

Полученное уравнение (11) показывает, что скорости пластической деформации при ползучести  $d\varepsilon_p / dt$  и при релаксации  $d\varepsilon_R / dt$  имеют величину одного и того же порядка лишь в том случае, когда величина  $e^{\frac{\sigma - \sigma_R}{b}}$  близка к единице. Выполнение этих условий зависит от величины коэффициентов  $\sigma_R$  и  $b$  (природа металла), а также величины  $\sigma$ . Удовлетворительное совпадение величин  $V_p$  и  $-V_R / E$ , причем всегда должно быть  $V_p > -V_R / E$ , можно ожидать при напряжениях, не превышающих 8–10 кГ/мм<sup>2</sup>, если принять во внимание критерии ползучести и релаксации современных сортов жаропрочной стали (4).

Интенсивность разупрочнения при ползучести  $I_r$  и скорость падения напряжения при релаксации  $V_R$  следует отождествить, ибо в обоих случаях механизм падения напряжения одинаков. Следовательно,

$$I_r = V_R. \quad (8)$$

Ранее (3) для второго участка релаксации было установлено:

$$I_r = V_R = -\frac{\sigma - \sigma_R}{t_0}, \quad (9)$$

где  $\sigma_R$  — предел релаксации, т. е. максимальное напряжение, которое не вызывает релаксации на втором участке;  $t_0$  — коэффициент внутризера.

Уравнение (9) применимо при условии  $\sigma \geq \sigma_R$ . Для второго участка ползучести интенсивность упрочнения

Для сопоставления вышеизложенной теории с экспериментальными данными четыре сорта жаропрочной аустенитной стали были испытаны на релаксацию и ползучесть. Сталь была избрана хромоникель-кобальт-титановая с различными присадками молибдена, вольфрама и титана. Эти сорта, замаркированные №№ 2208, 2207, 2124 и 2160, были подобраны так, чтобы критерии их ползучести значительно отличались в интервале тех напряжений, при которых шли испытания. Стали испытывались в литом состоянии после закалки с 1200—1240° в воду и отпуска при 830—840° в течение 10 час.

Испытания на релаксацию\* и ползучесть\*\* производились на изгиб с помощью кольцевых образцов<sup>(3)</sup> при температуре 650°.

Коэффициент  $t_0$  после второго нагружения для испытанных сортов стали был найден следующей величины: для стали № 2208  $8,47 \cdot 10^3$ ; для № 2124  $5,87 \cdot 10^3$ ; для № 2160  $4,84 \cdot 10^3$ ; для № 2207  $7,98 \cdot 10^3$ .

Модуль нормальной упругости для этих сортов стали при температуре 650° был установлен  $E = 1,16 \cdot 10^4$  кГ/мм<sup>2</sup>, а  $\sigma_R = 0$ .

Результаты произведенных испытаний на релаксацию и ползучесть представлены на рис. 1—4. Обращаясь к ним, мы видим, что эти результаты хорошо согласуются с вышеуказанной теорией.

У стали № 2207 (рис. 1) на протяжении всего интервала напряжений от 5 до 12 кГ/мм<sup>2</sup> скорости деформации, установленные при испытании на ползучесть  $V_p$ , близки к скоростям деформаций, вычисленным по результатам испытания на релаксацию —  $-V_R / E$ . Тем не менее и у этой стали наблюдается определенная тенденция в расхождении обеих скоростей деформации при более высоких напряжениях.

Особенно четко эта теория отображена в результатах испытания

стали № 2124 (рис. 2). В этом случае скорости  $V_p$  и  $-V_R / E$  совпадают только при сравнительно очень низких напряжениях — порядка 5 кГ/мм<sup>2</sup> и ниже. При 10 кГ/мм<sup>2</sup> эти скорости уже различаются на целый порядок.

Сталь № 2208 (рис. 3) при испытании на ползучесть дала несколько повышенный разброс опытных точек. Тем не менее и в этом случае можно констатировать удовлетворительное совпадение  $V_p$  и  $-V_R / E$  в интервале напряжения 5—10 кГ/мм<sup>2</sup>. Расхождение в величинах обеих указанных скоростей деформации здесь опять наблюдается при больших напряжениях. Отметим, что для всех испытанных сортов стали найдено  $V_p > -V_R / E$ .

\* Эксперименты проведены Е. Н. Волосатовой.

\*\* Эксперименты проведены Г. П. Федорцовым-Лутиковым.

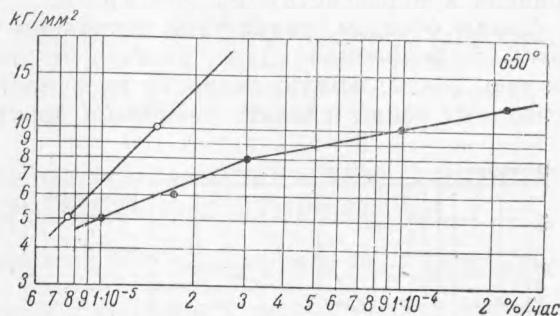


Рис. 2. То же, что и на рис. 1, для стали № 2124

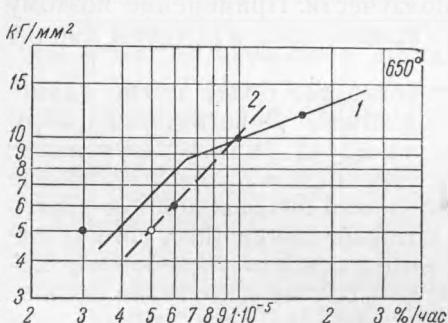


Рис. 3. То же, что и на рис. 1, для стали № 2208

Лишь для стали № 2208, как и для стали № 2160 (рис. 4), при малом напряжении ( $5 \text{ кГ/мм}^2$ ) получалось обратное неравенство  $V_p < -V_R / E$ . Однако это исключение не может служить опровержением изложенной теории. Разность обеих скоростей деформации как для стали № 2208, так и для № 2160 составляет весьма ничтожную величину, а именно  $0,3 \cdot 10^{-5} \text{ час}$ .

При больших напряжениях и для стали № 2160 результаты опыта привели к неравенству  $V_p > -V_R / E$ .

Таким образом, результаты испытания четырех сортов аустенитной литой жаропрочной стали хорошо подтверждают вышеизложенную теорию, связывающую скорости ползучести и релаксации. Эти данные позволяют также сделать несколько практических выводов.

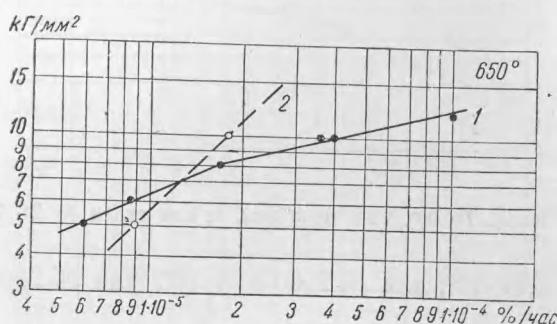


Рис. 4. То же, что и на рис. 1, для стали № 2160

фициента  $t_0$  требует значительно меньше часов вместо нескольких тысяч при ползучести. Применение поэтому этого метода для отборочных, а также приемочных испытаний вполне целесообразно.

Во-вторых, вышеизложенная теория позволяет более полно оценивать природу той или иной жаропрочной стали. Действительно обращаясь к рис. 1—4, можно видеть, что чем круче располагается линия  $(\ln \sigma, \ln V_p)$ , тем больше интенсивность упрочнения  $I_u$  у стали. Например, стали №№ 2207 и 2208 обладают большей интенсивностью упрочнения, чем стали №№ 2160 и 2124, у которых линии  $(\ln \sigma, \ln V_p)$  расположены более полого. Наибольшая интенсивность упрочнения, как уже указывалось, будет при  $I_u = E$ . В этом случае и крутизна наклона линии  $(\ln \sigma, \ln V_p)$  будет наибольшей и равной наклону линии, отображающей скорость пластической деформации при релаксации.

Далее, чем больше интенсивность разупрочнения  $I_r = V_R$  и чем, следовательно, меньше  $t_0$  и  $\sigma_R$ , тем правее (в сторону больших скоростей деформации) располагаются линии  $(\ln \sigma, \ln V_p)$ . Например, сталь № 2124 обладает большей интенсивностью разупрочнения, чем сталь № 2160.

Эти признаки должны быть полезны при анализе легирования и термической обработки жаропрочных сплавов.

Связь между критериями релаксации и ползучести на первых участках здесь не рассматривается, ибо тождественность природы этих критериев установлена в работах <sup>(5, 6)</sup>.

Поступило  
25 VIII 1950

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- <sup>1</sup> R. W. Bailey, Journ. Inst. Met., 35, 27 (1926). <sup>2</sup> И. А. Одинг, Металлург, № 1 (1934). <sup>3</sup> И. А. Одинг, Вестн. машиностроения, № 5—10 (1946). <sup>4</sup> И. А. Одинг, Сов. котлурбостроение, № 5 (1946). <sup>5</sup> Н. Н. Давиденков и П. И. Юзбинская, Сборник рефератов, Проблемы прочности при высокой температуре, 1950. <sup>6</sup> И. А. Одинг, Изв. АН СССР, ОТН, № 10 (1948). <sup>7</sup> М. А. Большинина, Изв. АН СССР, сер. физ., 14, № 2 (1950).