

ТЕХНИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

Член-корреспондент АН СССР И. А. ОДИНГ, О. В. СОРОКИН и Н. Д. САЗОНОВА

**О СВЯЗИ ЯВЛЕНИЙ ПОЛЗУЧЕСТИ И РЕЛАКСАЦИИ НАПРЯЖЕНИЙ
В МЕТАЛЛАХ**

За последние годы появился ряд работ (1-3), в которых подчеркивается принципиальная разница явлений ползучести и релаксации. Этот вопрос имеет большое научное и практическое значение, ибо многие детали машин работают в условиях релаксации напряжений, а методы расчета таких деталей пока еще не разработаны.

Ползучестью называется процессе нарастания деформаций во времени при постоянном напряжении. Однако ползучесть может вызываться и таким напряжением, которое меняется во времени по произвольному закону. И тогда в каждый данный момент будет происходить ползучесть под тем напряжением, которое в данный момент действует, причем для последующего деформирования предыдущая история деформирования образца играет здесь исключительно важную роль.

Релаксацию обычно характеризуют условиями:

$$\epsilon_0 = \epsilon_{\text{упр}} + \epsilon_{\text{пласт}} = \text{const}; \quad \epsilon_{\text{упр}} \neq \text{const}; \quad \epsilon_{\text{пласт}} \neq \text{const}, \quad (\text{A})$$

где ϵ_0 — начальная упругая деформация.

Из условий (A) делается вывод, что поскольку размер образца при релаксации остается постоянным, этот процесс представляет собой переход упругой деформации в пластическую. Для того чтобы можно было сказать, что упругая деформация переходит в пластическую, необходимо, чтобы все размеры релаксирующего образца или детали оставались постоянными. При фиксированном же одном размере в других направлениях идет обычная ползучесть только при переменном напряжении. Следовательно, условие (A) в действительности не реализуется, и его надо заменить таким условием:

$$\epsilon_{0x} = \epsilon_{\text{упр}x} + \epsilon_{\text{пласт}x}$$

Задание постоянной начальной деформации в одном направлении есть способ наложения на образец переменного напряжения, падающего во времени пропорционально нарастающей пластической деформации. Поэтому релаксацию следует рассматривать не как переход упругой деформации в пластическую, а как нарастание пластической деформации при одновременном и равном падении упругой.

Иначе можно сказать, что напряжение $\sigma(t)$ в данный момент времени t при релаксации определяется долей упругой деформации, остающейся к моменту t , т. е. зависит от величины выросшей пластической деформации $\epsilon_{\text{пласт}}(t)$

$$\sigma(t) = E [\epsilon_0 - \epsilon_{\text{пласт}}(t)].$$

Следовательно, напряжение падает благодаря росту пластической деформации. Рост же пластической деформации во времени есть ползучесть (только в данном случае она происходит при непрерывно падающем во времени напряжении).

Итак, процесс, который происходит при релаксации, представляет собой ползучесть при напряжении, падающем во времени пропорционально нарастающей пластической деформации, т. е. в данном случае имеем частный закон изменения напряжения, которых может быть бесконечно много. Если считать, что релаксация и ползучесть при $\sigma = \text{const}$ — процессы разные, то в такое же положение должен быть поставлен любой закон изменений напряжения, т. е. мы должны сказать, что все бесконечное множество законов изменений напряжений во времени несет с собой такое же множество принципиально различных процессов, с чем, конечно, нельзя согласиться, хотя бы потому, что тогда сразу же надо отказаться от попыток создать какую-либо достаточно общую теорию ползучести вообще.

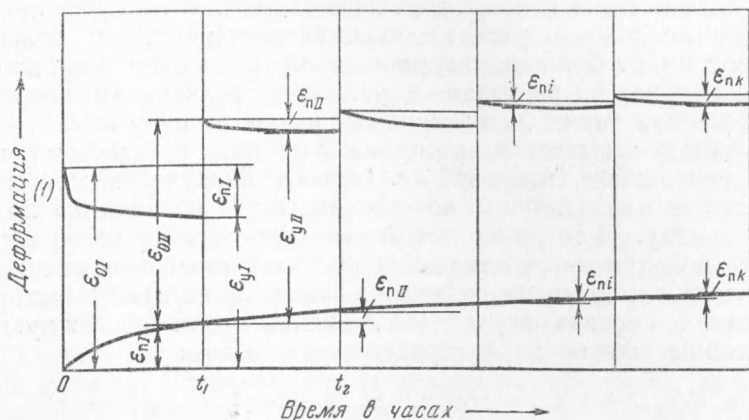


Рис. 1

Может быть предложен простой способ построения кривой ползучести по кривой релаксации с догрузкой одного образца (рис. 1) (ϵ_y — упругая деформация, ϵ_n — пластическая деформация).

Для этого экспериментально установим серию кривых релаксации путем последовательного догружения одного и того же образца до первоначального напряжения через равные промежутки времени $t_2 - t_1 = t_k - t_i$ и т. д. (верхние кривые рис. 1). Можно не строить каждую кривую, а только определять остаточные пластические деформации $\epsilon_{nI}, \epsilon_{nII}, \dots, \epsilon_{nk}$. Используя эти данные, нетрудно построить и всю кривую ползучести, как это представлено на рис. 1 (нижняя кривая).

Построенная таким образом кривая тем ближе подходит к истинной кривой ползучести, чем меньше промежутки $t_k - t_i$. При $t_k - t_i = 0$ это будет точной кривой ползучести при $\sigma = \text{const}$.

Возможно и обратное построение. Если через определенные интервалы времени, начиная непосредственно с начала испытания, проводить разгрузку образца, испытываемого на ползучесть, до величины $\sigma_i = \sigma_0 - E\epsilon_{i \text{ пласт}}$, то получаемая кривая нарастания пластической деформации должна совпадать с кривой релаксации, построенной в координатах $\epsilon_{\text{пласт}} - t$.

Перестроение кривых релаксации в кривые ползучести и обратно может быть также осуществлено, если проводить догружение не через равные промежутки времени, а через отрезки времени, соответствующие

щие равному падению напряжений или нарастания пластической деформации.

Таким образом, релаксация характерна тем, что ползучесть при ней происходит при переменном напряжении. Так же будет отличаться от ползучести при $\sigma = \text{const}$ ползучесть при любом ином законе изменения напряжения во времени. Вносит ли каждый частный закон что-нибудь новое, свойственное только ему и что не может быть предугадано из других случаев? Для такого заключения нет никаких оснований, и ответ на этот вопрос должен быть дан отрицательный.

Идентичность условий протекания ползучести и релаксации определяется величиной деформации, времени и напряжения при данных температурных условиях. Если созданные условия вызывают одинаковые механизмы пластической

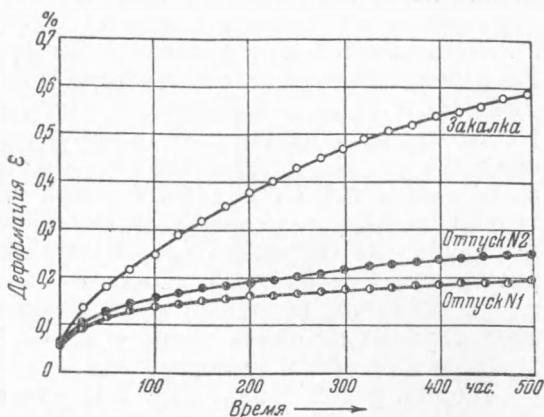


Рис. 2

деформации в процессе ползучести и релаксации, то это должно привести и к качественно одинаковому реагированию рассматриваемых процессов на одинаковые термомеханические обработки металла.

Для проверки вышеуказанного положения были проведены испытания на ползучесть ($\sigma = 12 \text{ кг/мм}^2 = \text{const}$) и на релаксацию ($\sigma_0 = 12 \text{ кг/мм}^2$) образцов из аустенитной хромоникелевой стали в трех состояниях термообработки. По одному образцу испытывали в закаленном состоянии без последующего отпуска, а два других после закалки подвергались нижеуказанным режимам отпуска: № 1 — $650^\circ \times 100 \text{ час.} + 800^\circ \times 25 \text{ час.}$; № 2 — $650^\circ \times 100 \text{ час.} + 800^\circ \times 5 \text{ час.}$

Первичные кривые ползучести представлены на рис. 2, а кривые релаксации — на рис. 3. Лучшие результаты при испытании как на ползучесть, так и на релаксацию дал отпуск № 1; худшие — закалка без отпуска. Качественно совпадает также ход кривых ползучести и релаксации после предварительной термомеханической обработки.

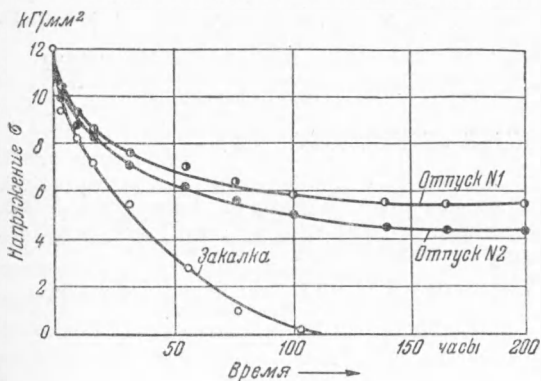


Рис. 3

В недавно опубликованном исследовании (4) наблюдалось значительное повышение сопротивления релаксации после холодного наклепа закаленной аустенитной стали. Холодная пластическая деформация перед старением способствовала повышению сопротивления релаксации в еще большей мере. Все эти закономерности были получены и в наших испытаниях на ползучесть.

Таким образом, в тех случаях, когда затормаживается рост пластической деформации при ползучести, протекающей при $\sigma = \text{const}$, замедляется и падение напряжений в условиях релаксации, являющееся

следствием роста пластической деформации со временем. Если кривые релаксации рис. 3 перестроить в координатах $\varepsilon_{\text{пласт}} - t$, то они располагаются так же, как кривые на рис. 2.

Попутно заметим, что только из-за искусственного разделения явлений ползучести и релаксации имеет место известное, но совершенно неверное мнение о том, что некоторые стали хорошо работают в условиях ползучести и неудовлетворительно в условиях релаксации. Это объясняется неправильным выбором критериев для сравнения. Во избежание подобных ошибок должна устанавливаться связь между деформацией, напряжением и временем (при постоянной температуре). Необходимость учета деформации в каждый момент времени, а не скорости ее на прямолинейном участке, как это сейчас делается, объясняется тем очевидным фактом, что, например, сталь с относительно малой равномерной скоростью ползучести, но с большой деформацией на «первом» участке не может всегда считаться удовлетворительной. Равномерная скорость ползучести, не определяя в этом случае величины выросшей пластической деформации (тем более, если срок службы не очень велик — $10^3 \div 10^4$ час.), не может явиться надежным критерием выбора стали.

Теории, рассматривающие ползучесть и релаксацию как самостоятельные явления, даже давая близкие совпадения (вследствие обилия коэффициентов, определяемых из самих экспериментов на ползучесть или релаксацию) расчетных и экспериментальных кривых для случаев $\sigma = \text{const}$ и $\varepsilon_{0,x} = \text{const}$, не в состоянии не только сколько-нибудь сносно описать процесс деформирования при произвольном изменении напряжений во времени (например, циклическом), но даже подойти к решению этого вопроса. Таким образом, очевидна необходимость выбора схемы деформирования при единичном напряжении, ибо только в этом случае возможно предсказать поведение материала в условиях, отличных от условий эксперимента. Ползучесть при $\sigma = \text{const}$ и релаксация напряжений при $\varepsilon_{0,x} = \text{const}$ будут просто частными случаями.

Институт машиноведения
Академии наук СССР

Поступило
18 VII 1953

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ Т. И. Волкова, Сборн. Релаксация и ползучесть металлов, 1952.
² В. З. Цейтлин, Сборник Релаксация и ползучесть металлов, 1952.
³ И. А. Одинг, ДАН, 75, № 2 (1950). ⁴ В. И. Просви́рин, Г. И. Бабушкина, Сборн. Вопросы металловедения аустенитных сталей, 1952.