

Член-корреспондент АН СССР И. А. ОДИНГ и В. З. ЦЕЙТЛИН

КРИТЕРИИ РЕЛАКСАЦИИ СТАЛИ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ

Ранее было установлено ⁽¹⁾, что релаксация состоит из двух групп одновременно протекающих процессов. Первая группа процессов протекает на границах зерен поликристаллического металла, и релаксация, вызванная этими межзеренными процессами, описывается уравнением, отображающим диффузионные явления ⁽²⁾ (линия *ab* на рис. 1)

$$\sigma_I = \sigma_0 e^{-kt / (1+pt)}, \quad (1)$$

где σ_I — напряжение в момент времени t ; σ_0 — начальное напряжение; k и p — коэффициенты, зависящие от природы металла и условий (например температуры) релаксации.

Вторая группа процессов протекает в теле зерна, и релаксация, вызванная этими внутризеренными процессами, лучше всего отображается уравнением, выведенным из предположения, что снижение напряжения в элементарных объемах металла протекает по схеме мономолекулярных реакций ⁽¹⁾ (линия *cd* рис. 1):

$$\sigma_{II} = \sigma_r + (\sigma_0 - \sigma_r) S_0 e^{-t/t_0}, \quad (2)$$

где σ_{II} — напряжение в момент времени t второго этапа релаксации; σ_r — предел релаксации, т. е. то наибольшее напряжение, которое еще не вызывает релаксации; $S = \sigma'_0 / \sigma_0$ — относительная величина, а σ'_0 — абсолютная величина начального напряжения второго этапа релаксации.

При $\sigma_r = 0$, а это чаще всего и имеет место при достаточно высоких температурах, представляющих сейчас практический интерес, уравнение (2) принимает вид:

$$\sigma_{II} = \sigma_0 S_0 e^{-t/t_0}, \quad \text{или} \quad \sigma_{II} = \sigma'_0 e^{-t/t_0}. \quad (3)$$

Суммарная кривая релаксации будет следовать уравнению

$$\sigma = \sigma_I - (\sigma'_0 - \sigma_{II}). \quad (4)$$

Она изображена линией *ad* на рис. 1.

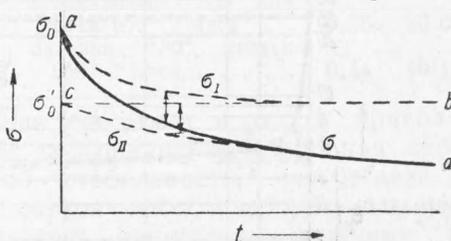


Рис. 1. Интерпретация кривой релаксации

Релаксационную кривую чаще всего изображают в простых координатах (рис. 1). Многие зарубежные исследователи представляют ее в координатах напряжение — логарифм времени. Но ни первое, ни второе изображение кривых релаксации не дает каких-либо преимуществ или удобств при их использовании. Мы избрали третью возможность, считая, что рациональнее всего представлять кривые релаксации в полулогарифмических координатах (рис. 2), нанося на ось ординат напряжение в логарифмическом масштабе, а на ось абсцисс — время в обычном масштабе.

В этом случае второй этап релаксации отобразится прямой DC , ибо, логарифмируя уравнение (3), имеем

$$\ln \sigma_{II} = \ln \sigma_0' - \frac{t}{t_0}. \quad (5)$$

При таком изображении кривой релаксации весьма просто и наглядно устанавливаются два важные критерия. А именно, можно,

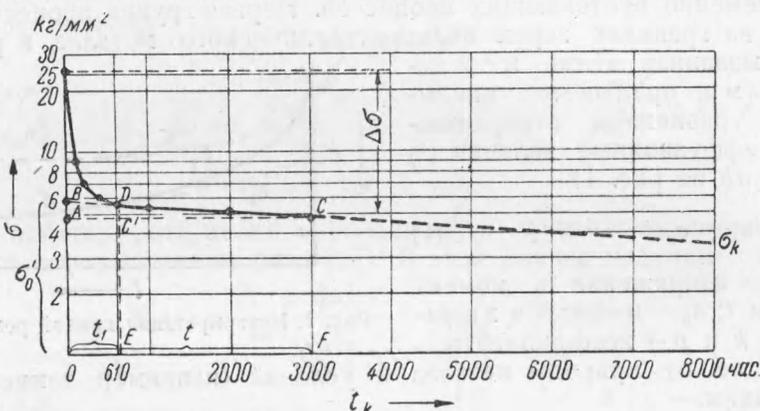


Рис. 2. Кривая релаксации в полулогарифмических координатах

экстраполируя прямую DC до оси ординат, определить величину напряжения σ_0' (точка B на рис. 2), а следовательно, и $S_0 = \sigma_0' / \sigma_0$. Последняя величина имеет большое значение — она отображает релаксационную стойкость границ зерен поликристаллического металла, ибо S_0 показывает величину снижения напряжения на первом этапе релаксации, вызванном межзеренными процессами. Назовем поэтому S_0 коэффициентом межзеренной стойкости металла.

Угол α наклона прямой DC к оси абсцисс характеризует второй критерий — величину коэффициента t_0 , ибо (рис. 2)

$$t_0 = \frac{1}{\lg \alpha} = \frac{AC}{AB}. \quad (6)$$

Величина же t_0 отображает внутризеренную релаксационную стабильность металла, ибо чем меньше угол α , тем больше величина t_0 и тем медленнее снижается напряжение на этом этапе релаксации.

Следовательно, чем больше t_0 , тем большей релаксационной стабильностью обладает зерно металла. Назовем поэтому t_0 коэффициентом внутризеренной стабильности металла. Его размерность выражается в часах. Величина t_0 отобразит тогда то число часов, в течение которых величина начального напряжения σ_0' второго этапа релаксации уменьшится в $e = 2,72$ раза.

Характеризовать сопротивляемость металлов релаксации с помощью двух критериев релаксации S_0 и t_0 более рационально, чем с помощью обычного показателя релаксации — величины падения напряжения $\Delta\sigma$ за избранный промежуток времени t (рис. 2). Ценность обоих релаксационных коэффициентов заключается в том, что они не зависят (или очень мало зависят) от начального напряжения σ_0 , по крайней мере до тех пор, пока это напряжение не превышает предела текучести металла σ_s^T при заданной температуре T . С достаточной достоверностью можно считать S_0 и t_0 не зависящими от σ_0 , пока $\sigma_0 \leq 0,8\sigma_s^T$.

Принимая во внимание значение процесса релаксации в проблеме жаропрочности металлов, оба критерия релаксации S_0 и t_0 приобретают большое значение при анализе методов легирования и термообработки жаропрочных сплавов. Примером могут служить следующие данные:

Сталь ЭИ-10			Сталь ЗОХМА		
	S_0	t_0		S_0	t_0
Отжиг 900°	0,74	7 140	Отжиг 860°	0,69	12 390
Нормализация 920° . . .	0,34	16 000	Нормализация 880° . . .	0,21	20 000
Нормализация 920°, от- пуск 650° 2 часа . . .	0,67	29 410	Нормализация 880°, от- пуск 650° 2 часа . . .	0,58	20 000
Закалка 920°, отпуск 650° 2 часа	0,53	10 600	Закалка 880°, отпуск 650° 2 часа	0,44	16 130

По ним видно, что такие операции, как отжиг и отпуск, приводят к упрочнению границ зерен, т. е. к повышению межзеренной стойкости и снижению внутризеренной стабильности, увеличивая S_0 и снижая t_0 . Нормализация этих сортов стали, наоборот, вызывает внутризеренное упрочнение и поэтому повышает величину t_0 , снижая S_0 .

Своеобразное влияние оказывает закалка с отпуском на оба критерия релаксации стали. В этом случае, по сравнению с нормализацией с отпуском, оба критерия релаксации снижены. Пониженная сопротивляемость релаксации границ зерен (относительно малая величина S_0), повидимому, объясняется тем, что в закаленной стали легирующие элементы больше растворены в теле зерен, а границы зерен в этом случае обеднены легирующими элементами. Однако закалка с отпуском приводит еще к точечно-зернистому строению самих зерен, которое отличается от структуры, вызванной нормализацией с отпуском, и которое, в соответствии с теорией А. А. Бочвара (3), должно увеличивать скорость релаксации за счет повышения эффективности растворно-осадительного механизма пластичности. Это обстоятельство, невзирая на повышенную легированность зерен, вызывает снижение их релаксационной стабильности, т. е. уменьшение t_0 .

Другим примером использования критериев релаксации S_0 и t_0 могут служить данные, представленные на рис. 3. Кривые релаксации в этом случае получены при испытании трех сортов аустенитной стали (4). Все три марки стали испытывались на релаксацию при комнатной температуре и содержали приблизительно одинаковое количество хрома, никеля и титана. Переменным здесь являлось содержание молибдена. Полученные результаты показывают, что при комнатной температуре у исследованных сортов аустенитной стали проявляется лишь первый участок кривой релаксации, характерный тем, что пластическая деформация здесь протекает главным образом по границам зерен. И тогда вместе с тем четко проявляется и роль молибдена как легирующего элемента, упрочняющего границы аустенитных зерен стали, — с возрастанием содержания молибдена, как это видно по представленным на рис. 3 данным, в указанных сортах стали коэффициент межзеренной стойкости S_0 увеличивается.

Таким образом, S_0 и t_0 могут служить показателями того, как действует легирующий элемент или термическая обработка, — повышают ли они сопротивляемость релаксации (и ползучести) зерна или границ зерен стали.

Иное применение получают оба критерия релаксации металла при расчете деталей машин на релаксацию. Покажем это на примере расчета на релаксацию шпилек фланцевого соединения.

Пусть требуется определить диаметр шпильки, когда известны критерии релаксации S_0 и t_0 , предел текучести стали σ_s^T и то конечное

(минимальное) усилие P_k , приходящееся на каждую шпильку, которое еще гарантирует достаточную плотность фланцевого соединения. Установив срок службы шпилек между перетяжками в t_k часов и используя уравнение (3), нетрудно установить и минимальное напряжение σ_k в конце указанного срока релаксации

$$\sigma_k = S_0 \sigma_0 e^{-t_k / t_0},$$

приравнивая $\sigma_0 = 0,8 \sigma_s^T$.

Теперь уже просто определить и диаметр шпилек

$$d = \sqrt{\frac{4P_k}{\pi \sigma_k}}.$$

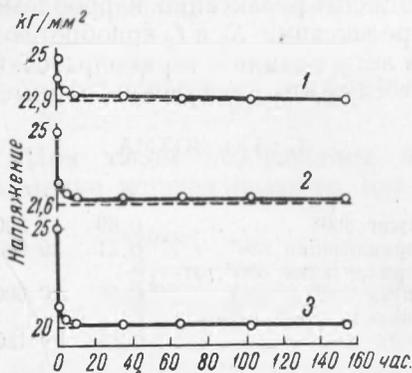


Рис. 3. Кривые релаксации при комнатной температуре ($T = 20^\circ$) трех марок аустенитной стали: 1 — ЭИ-432, Мо 2,5%, $S_0 = 0,92$; 2 — ЭИ-452, Мо 0,4%, $S_0 = 0,86$; 3 — ЭИ-402, Мо 0,0%, $S_0 = 0,80$

Иными словами, и в этом случае мы также воспользовались прямолинейной зависимостью между $\ln \sigma$ и t и экстраполировали экспериментально установленный прямолинейный участок DC вправо до интересующего нас промежутка времени $t_k = 8000$ час. (рис. 2). Графическое экстраполирование кривых релаксации с наименьшими погрешностями возможно делать тогда, когда кривая релаксации изображена в координатах время (t) — логарифм напряжения ($\ln \sigma$).

Таким образом, оба критерия релаксации S_0 и t_0 полезны и для металловедов, разрабатывающих новые составы и параметры термической обработки жаропрочных сплавов, и для конструкторов при расчете деталей машин на релаксацию.

Поступило
17 II 1950

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ И. А. Одинг, Вестн. машиностр., №№ 5—6, 7—8, 9—10 (1946). ² И. А. Одинг, Изв. АН СССР, ОТН, № 10 (1948). ³ А. А. Бочвар, Изв. АН СССР, ОТН, № 5 (1948). ⁴ И. А. Одинг и Е. Н. Волосатова, ДАН, 71, № 4 (1950).