

ЛИТЕРАТУРА

1. Жданович Г. Н. Теория прессования металлических порошков. — М.: Металлургия, 1969.
2. Лаптев А. М. Деформирование пористого материала в закрытой матрице // Изв. вузов. Машиностроение. — 1979. — № 7.
3. Перельман В. Е. Формирование порошковых материалов. — М.: Металлургия, 1979.
4. Петросян Г. Л. Пластическое деформирование порошковых материалов. — М.: Металлургия, 1988.
5. Штери М. Б., Сердюк Г. Г., Максименко Л. А. и др. Феноменологические теории прессования порошков. — Киев: Наук. думка, 1982.
6. Глухов Л. М., Бахтин В. Г., Кудрин А. Б. и др. Исследование способов повышения качества порошковых изделий сложной формы при прессовании // Изв. вузов. Черная металлургия. — 1987. — № 3.
7. Хилл Р. Общй метод анализа процессов металлообработки // Механика. — М., 1964. — № 3.
8. Скороход В. В., Тучинский Л. И. Условие пластичности пористых тел // Порошковая металлургия. — 1978. — № 11.

г. Москва

Поступила 8/VIII 1988 г.

УДК 539.374

Э. И. Блинов

АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ НЕОБРАТИМОГО ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ МЕТАЛЛОВ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОМ ТЕПЛОВОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

В [1] разработана теория неизотермической деформации металлов, которая, в частности, объясняет и описывает деформацию нагруженного тела при колебаниях температуры. Ниже в рамках этой теории аналитически описывается необратимое изменение формы из-за циклических теплосмен свободного от внешней нагрузки металлического образца.

1. Коэффициент роста. Эксперимент и теория. Относительную необратимую деформацию за один полный цикл теплосмены образца вслед за [2] будем называть коэффициентом роста γ . Как отмечено в [2], обычно бывает достаточно около 10—20 теплосмен, чтобы γ принял свое установившееся значение. А так как он редко превышает $5 \cdot 10^{-5}$ 1/цикл, то за такое число циклов относительное изменение размеров составляет не более 0,1 %. Поэтому при нескольких тысячах или десятках тысяч циклов теплосмен, за которые размеры образца вырастают на десятки и сотни процентов, нет смысла учитывать зависимость изменения формы от числа предшествующих циклов.

Анализ многочисленных экспериментов приводит авторов [2] к заключению, что γ в основном определяется интервалом и областью температур цикла и временем пребывания при верхней и нижней температурах. При достаточно быстрых теплосменах он почти не зависит от скорости нагреваний и охлаждения. Во всяком случае, эта скорость не является главным определяющим фактором, так что при расчетах ею можно пренебречь и полагать изменения температуры мгновенными.

В [1] получены формулы (6.5) и (6.6), воспроизведенные ниже:

$$(1.1) \quad \varepsilon_*^H = \varepsilon_0^H + B |\Delta T| / c;$$

$$(1.2) \quad c\varepsilon^H = c\Delta\varepsilon_*^H + K\alpha_* t + \frac{B}{\beta} \left[Kt - \left(1 - \frac{K}{\beta}\right) (1 - \exp(-\beta t)) \right] |\Delta T|,$$

где ε^H , ε_0^H , ε_*^H — относительная необратимая деформация полная, в начале и в конце скачка температуры соответственно; ΔT — мгновенное приращение температуры; t — время; B , K , α , β , c — постоянные материала.

Согласно этим формулам, мгновенное изменение температуры свободного от внешней нагрузки, текстурованного в условиях одноосного нагружения образца в виде тонкостенной цилиндрической трубки вызывает относительную необратимую деформацию

$$(1.3) \quad \Delta \varepsilon_T^n = \frac{B}{c} \left[1 + \frac{1}{\beta} (1 - \exp(-\beta t)) \right] |\Delta T|.$$

Согласно (1.3), в момент скачка температуры ($t = 0$, $\Delta T \neq 0$) деформация возрастает на конечную величину $\Delta TB/c$, а затем при $\Delta t \neq 0$, $\Delta T = 0$ происходит дальнейшее приращение деформации с затухающей скоростью, что отвечает опытным данным [2]. Пусть один полный цикл теплосмен состоит из мгновенного возрастания температуры, выдержки при фиксированной максимальной температуре, мгновенного убывания температуры и выдержки при постоянной минимальной температуре. При этом (1.3) описывает приращение деформации за полуцикл теплосмен (скачок температуры и выдержка при ее фиксированном измененном значении). Полагая, что за второй полуцикл деформация получает приращение, подчиняющееся тому же закону, что и за первый, коэффициент роста, согласно (1.3), запишем в виде

$$(1.4) \quad \gamma = A [1 + D(1 - \exp(-rt))] |\Delta T|$$

(A — параметр материала, D и r — постоянные коэффициенты).

Из [1] следует, что A может зависеть от интервала температур и от абсолютных значений верхней и нижней температур цикла. Следовательно, A может быть найден из эксперимента на теплосмены без выдержек при верхней и нижней температурах цикла, т. е. при мгновенном протекании циклов теплосмен. При этом в (1.4) $D = 0$, значит, $\gamma_m = A |\Delta T|$.

В описанных в литературе экспериментах постоянной, как правило, оставалась нижняя температура цикла, а изменялась верхняя [2]. Получены почти экспоненциальные температурные зависимости γ . В [2] показано, что для термически анизотропных материалов, под которыми понимаются поликристаллические агрегаты, изменение формы при циклических теплосменах происходит из-за анизотропии коэффициента термического расширения (уран, цинк, кадмий, олово и т. п.). Полное соответствие с опытными данными получается, если положить, что A зависит от дисперсии энергии активации и верхней температуры цикла: $A = a \exp(-\Delta Q/(RT))$, следовательно,

$$(1.5) \quad \gamma_m = a \exp[-\Delta Q/(RT_1)] |\Delta T|;$$

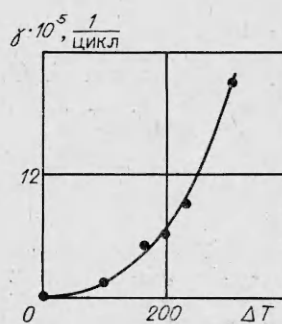
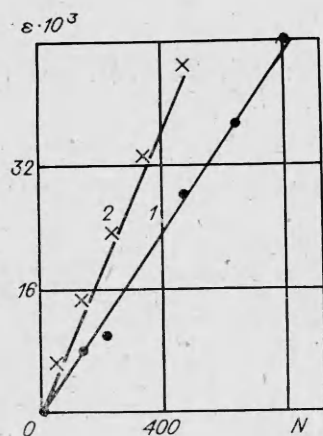
$$(1.6) \quad \gamma = a \exp[-\Delta Q/(RT_1)] [1 + D(1 - \exp(-rt))] |\Delta T|.$$

Здесь a — постоянный коэффициент; ΔQ — дисперсия энергии активации; R — универсальная газовая постоянная; T_1 — верхняя (максимальная) температура цикла.

Постоянные коэффициенты D и r найдем из экспериментально определенного изменения γ в зависимости от выдержки при фиксированной T_1 . Это приращение γ представляется разностью его значений в формулах (1.5) и (1.6):

$$(1.7) \quad \Delta \gamma = Da \exp[-\Delta Q/(RT_1)] [1 - \exp(-rt)] |\Delta T|.$$

2. Коэффициент роста цинка. Полученными формулами воспользуемся для описания коэффициента роста типичного представителя термически анизотропных материалов — цинка. Экспериментальные данные зависимости γ цинка от изложенных в п. 1 факторов приведены в [3]. В частности, из них следует, что без выдержки при фиксированной температуре ($T_1 = 533$ К и $\Delta T = 250$ К) $\gamma_m = 4 \cdot 10^{-5}$ 1/цикл. Подставляя эти значения в (1.5) и учитывая, что для цинка $\Delta Q = 3,5$ ккал/моль, находим $a = 4,3 \cdot 10^{-6}$ 1/(К·цикл). Изменения γ цинка из-за выдержек при фиксированной T_1 , полученные экспериментально [3], хорошо описываются формулой (1.7) при $D = 2,125$ и $r = 9,87 \cdot 10^{-3}$ с⁻¹.



Р и с. 2

Р и с. 1

Таким образом, расчетная формула примет вид

$$(2.1) \quad \gamma = 4,386 \cdot 10^{-6} \exp(-764,74/T_1) [1 + 2,155(1 - \exp(-9,87 \cdot 10^{-3}t)) | \Delta T |].$$

Воспользовавшись ею, опишем аналитически относительную деформацию тонкостенной цинковой трубки, свободной от внешних сил, при теплосменах в области температур 283—483 К при различных выдержках в высокотемпературной зоне ($T_1 = \text{const}$): 1) при $t_1 = 120$ с, $T_1 = 483$ К и $\Delta T = 200$ К из (1.8) $\gamma_1 = 5,622 \cdot 10^{-5}$ 1/цикл; 2) при $t_2 = 600$ с, $T_1 = 483$ К и $\Delta T = 200$ К из (1.8) $\gamma_2 = 9,085 \cdot 10^{-5}$ 1/цикл. Умножая γ_1 и γ_2 на соответствующее число циклов N , получаем значения относительной деформации при выдержках $t_1 = 120$ с (линия 1 рис. 1) и $t_2 = 600$ с (линия 2). Точками и крестиками показаны результаты испытаний, приведенные в [2].

Рассмотрим еще зависимость γ от интервала температур в случае, когда при верхней температуре цикла имеет место выдержка достаточно большая, чтобы за это время фактически произошли все процессы релаксации. Из расчетной формулы (2.1) следует, что достаточно выдержки при фиксированной T_1 в течение 15—20 мин. Остановимся на $t_* = 20$ мин. Возьмем следующие интервалы температур: $\Delta T = 100, 200, 300$ К. Принимаем, как и в экспериментах [3], нижнюю температуру всех циклов одинаковой: $T_0 = 283$ К. Тогда $T_1 = 383, 483, 583$ К для всех выбранных интервалов температур. Подставляя значения T_1 и ΔT в формулу (2.1) при $t = t_* = 1200$ с, получим отвечающие им коэффициенты роста: $\gamma_1 = 1,37 \cdot 10^{-5}$, $\gamma_2 = 7,1 \cdot 10^{-5}$, $\gamma_3 = 20 \cdot 10^{-5}$ 1/цикл.

На рис. 2 через расчетные значения коэффициента роста проведена линия, а результаты экспериментов показаны точками, положение которых говорит о полном соответствии результатов опытным данным.

ЛИТЕРАТУРА

1. Блинов Э. И., Русинко К. Н. Обобщенная теория неизотермической деформации // ПМТФ. — 1987. — № 5.
2. Давиденков Н. Н., Лихачев В. А. Необратимое формоизменение металлов при циклическом тепловом воздействии. — М.; Л.: Машгиз, 1962.
3. Давиденков Н. Н., Лихачев В. А., Малыгин Г. Д. Исследование необратимого теплового формоизменения цикла // ФММ. — 1960. — Т. 10, вып. 3.

г. Львов

Поступила 21/III 1988 г.,
в окончательном варианте — 5/IX 1988 г.