

В.В. Поляков, А.Н. Алексеев, А.В. Жданов, В.А. Турецкий

Особенности неупругого поведения пористых металлических материалов***Введение**

Создание новых композиционных материалов требует изучения зависимостей их физико-механических свойств от структуры и внешних условий. Существенный интерес для изучения физического поведения материалов с неоднородным строением представляют пористые металлы и псевдосплавы [1-4]. В настоящей работе исследовано влияние пористости на неупругие свойства данных материалов. Необходимо отметить как весьма слабую разработанность теоретического описания зависимостей между параметрами пористой структуры и величиной внутреннего трения, характеризующей диссипацию энергии механических колебаний, так и совершенно недостаточный для такой разработки набор экспериментальных данных.

Реологическая модель внутреннего трения в пористых металлах

В пористых металлах доминирующую роль в процессах рассеяния упругих колебаний играет поровая фаза (утверждение не затрагивает возможных максимумов внутреннего трения). Задачей метода внутреннего трения является получение релаксационного спектра колебаний. Анализ этого спектра позволяет выявить механизмы релаксации и установить влияние на нее структуры материала. Спецификой настоящей работы по сравнению с традиционным подходом является то, что основным параметром, вызывающим изменение внутреннего трения, служит не температура, а интегральная пористость. С позиций классической концепции Зинера [5] пористость в этом случае может быть интерпретирована как макроскопический термодинамический параметр, качественно аналогичный температуре. Такое макроскопическое описание, не претендующее на вскрытие механизмов релаксационных явлений, приводит к реологическим моделям внутреннего трения. В настоящей работе целью реологического описания избран анализ внутреннего трения на моно-

тонных участках зависимости от пористости (своеобразного "порового" фона). Это позволяет использовать модель Фойхта [6], правильно передающую запаздывание упругой релаксации упругого тела. Пики внутреннего трения анализируются отдельно и на основе существенно иных представлений, позволяющих вскрыть их физическое происхождение.

Для тела Фойхта время релаксации τ вводится при крутильных колебаниях как

$$\tau = \frac{\eta}{\mu}, \quad (1)$$

где η — коэффициент сдвиговой вязкости; μ — модуль сдвига. Величина внутреннего трения Q^{-1} , определяемая как доля энергии W механических колебаний, необратимо рассеянная за один период

$$Q^{-1} = \frac{\Delta W}{2\pi W}, \quad (2)$$

связана с временем релаксации τ и частотой колебаний ω согласно [9]

$$Q^{-1} = \omega\tau, \quad (3)$$

Обозначая физические характеристики компактного материала ($P=0$) индексом k , получим для относительного внутреннего трения

$$\frac{Q^{-1}}{Q_k^{-1}} = \frac{\omega}{\omega_k} \frac{\eta/\eta_k}{\mu/\mu_k}. \quad (4)$$

Частота при малых колебаниях может быть выражена через соответствующий модуль упругости [7] как $\omega \sim \left[\frac{\mu}{\rho} \right]^{1/2}$, где ρ — плотность среды, что приводит к формуле

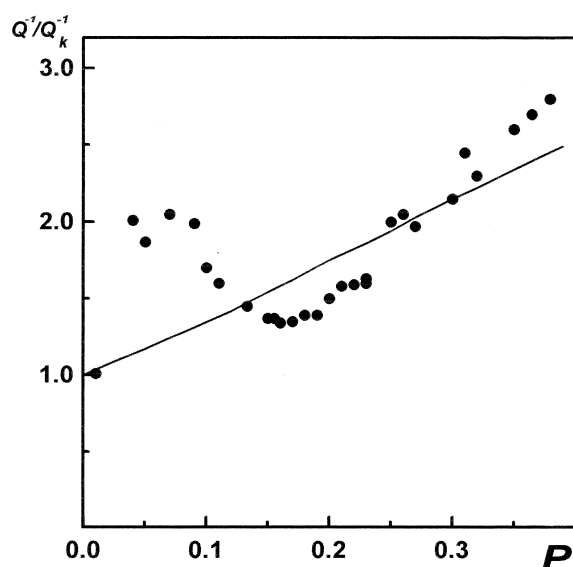
$$\frac{\omega}{\omega_k} = \left[\frac{\mu/\mu_k}{1-m} \right]^{1/2}. \quad (5)$$

Тем самым задача теоретического анализа внутреннего трения сводится к нахождению зависимостей от пористости относитель

* Работа выполнена при финансовой поддержке согласно гранту по фундаментальным проблемам металлургии (шифр 96-26-5.1-41).

ных величин μ/μ_k и η/η_k . Эти зависимости могут быть определены на основе общего структурного подхода, развитого в работах [8-10], позволяющего учесть как топологическую картину структуры (прежде всего наличие только изолированных или "бесконечных" кластеров поровой фазы), так и особенности конкретного процесса рассеяния. Таким образом, изложенный подход позволяет описать зависимость внутреннего трения от пористости, а также учесть ряд более тонких эффектов, связанных с изменением напряженно-деформированного состояния при смене вида упругих колебаний.

Результаты расчетов внутреннего трения с использованием выражений для μ/μ_k и η/η_k из [9;10] приведены для крутильных колебаний при фиксированной температуре $T=300$ К в виде кривой. На этом же рисунке нанесены экспериментальные точки, измеренные путем испытаний образцов пористого железа, приготовленных путем прессования и последующего спекания в вакууме. Испытания проводились в амплитудо-независимой области в вакууме при различных температурах путем измерения свободных затухающих колебаний с фиксированной частотой, составляющей 50-60 Гц. Как видно из рисунка, наблюдается соответствие вычисленной кривой с результатами измерений в диапазоне пористости свыше 10%. Это подтверждает адекватность развитого модельного описания внутреннего трения вне области возможных максимумов.



Относительное внутреннее трение пористого железа при крутильных колебаниях ($T=300$ К)

Анализ максимума внутреннего трения

Отличительной особенностью полученной экспериментальной зависимости является anomальное поведение внутреннего трения в интервале пористостей 5-10%. Этот интервал охватывает критическое значение $P=P_0$, соответствующее порогу перколяции [5-7], при котором часть изолированных пор сливается, образуя "бесконечный" кластер. Аномалия проявляется в виде отчетливого максимума на кривой $Q^{-1}(P)$. Отметим особенность анализируемого пика — его независимость от напряженно-деформированного состояния, что следует из одинакового расположения максимума при крутильных и изгибных колебаниях [7]. Кроме того, специально проведенные измерения с различной частотой колебаний (повышавшейся от 50 до 200 Гц) не выявили сдвига максимума по оси пористостей. Пик оставался также устойчивым относительно изменения температуры испытаний, изменявшейся в диапазоне от комнатной до 850 К.

Приведенные данные свидетельствуют в пользу того, что обнаруженная аномалия имеет нерелаксационное происхождение. Можно полагать, что она качественно аналогична пикам внутреннего трения при фазовых превращениях [11;12], связанных с критическими явлениями и устойчиво расположенных на оси температур. Примером является пик на релаксационном спектре железа при $\alpha \rightarrow \gamma$ превращении.

Для физической интерпретации обнаруженного максимума установим связь между характеристиками внутреннего трения и параметрами поровой структуры. Воспользуемся теоретическим анализом [13] процессов затухания упругих колебаний в гетерофазном материале, примененном в [14] для процессов в пористых средах. При распространении упругой волны на границах раздела поровой и твердой фаз возникают колебания упругих напряжений, вызывающие нарушения фазового равновесия между порой и раствором вакансий в решетке. Как следствие, происходит периодический процесс, заключающийся в переходе вакансий в пору и ее рост или испускание вакансий в решетку и "растворение" поры. Данный процесс и обуславливает необратимое рассеяние упругой энергии и рост внутреннего трения.

Величина внутреннего трения при изложенном механизме диссипации может быть оценена по формуле [14]

$$Q^{-1} \cong r^2/P, \quad (6)$$

где r — размер изолированных пор.

Привлечем представления теории перколяции [15; 16], согласно которым при приближении к порогу перколяции P_0 размер наибольшего изолированного кластера $R(P)$ описывается формулой [17]

$$R(P) = |P - P_0|^{-\gamma}, \quad (7)$$

где γ — критический индекс теории перколяции. (Отметим, что величина $R(P)$ аналогична длине корреляции $\xi(T) = |T - T_0|^{-\gamma}$ при описании фазовых переходов второго рода, что следует из аналогии между фазовыми переходами и перколяционными явлениями). Как видно из формулы (7), значение $R(P)$ быстро возрастает при $P \rightarrow P_0$. В районе порога перколяции в формуле (6) в качестве r выступает именно величина $R(P)$, определяющая при $R(P) \rightarrow \infty$ эффективный средний размер пор. Получаем выражение

$$Q^{-1} \approx \frac{1}{|P - P_0|^{2\gamma} P} \quad (8)$$

и стремление внутреннего трения к беско-

нечному значению при приближении к порогу перколяции в области $P < P_0$.

Для образцов конечного размера это означает появление максимума внутреннего трения, отражающего быстрый рост поглощения энергии упругих колебаний в критической области. При указании порога перколяции в области $P > P_0$ размер наибольшего изолированного порового кластера быстро уменьшается, что соответствует правой ветви максимума.

Заключение

Приведенные в работе результаты свидетельствуют о существенном влиянии пористости на внутреннее трение в металлах и своеобразии механизмов диссипации упругой энергии. Исследованная аномалия внутреннего трения в пористом железе может быть отнесена к новому виду максимумов, связанному с перколяционным переходом от изолированных пор к «бесконечному» поровому кластеру.

Литература

1. Дударев Е.Ф., Поляков В.В., Алексеев А.Н. Влияние пористости на температурную зависимость внутреннего трения в железе // *Металловедение и новейшие технологии*. Т. 17. № 7. 1995.
2. Поляков В.В., Алексеев А.Н. Зависимость внутреннего трения и упругих характеристик пористого железа от пористости // *Порошковая металлургия*. 1994. №3-4.
3. Поляков В.В., Алексеев А.Н. Синергизм внутреннего трения в пористых металлах // *Тез. докл. симп. «Синергетика, структура и свойства материалов, самоорганизующиеся технологии»*. М., 1996. Т. 1.
4. Поляков В.В., Алексеев А.Н. Об особенностях внутреннего трения в пористом железе // *Письма в ЖТФ*. Т. 18. Вып. 10.
5. Зинер К. Упругость и неупругость металлов // *Упругость и неупругость металлов*. М., 1954.
6. Реология / Под ред. Ф. Эйриха М., 1962.
7. Хаясака Т. *Электроакустика*. М., 1982.
8. Поляков В.В., Алексеев А.Н. Применение метода внутреннего трения к определению теплофизических характеристик пористых металлов // *Сибирский физико-технический журнал*. 1993. №4.
9. Поляков В.В., Алексеев А.Н. Влияние пористости на внутреннее трение в металлах // *Изв. вузов. Физика*. 1994. №6.
10. Поляков В.В., Алексеев А.Н. Зависимость внутреннего трения пористого железа от структуры // *Изв. вузов. Черная металлургия*. 1993. №6.
11. Новик А., Бери Б. *Релаксационные явления в кристаллах*. М., 1975.
12. Постников В.С. *Внутреннее трение в металлах*. М., 1974.
13. Кривоглаз М.А. Теория затухания упругих колебаний в системах, содержащих растворимые частицы или микрополости // *Физика металлов и металлостроения*. 1961. Т. 12. Вып. 2.
14. Гегузин Я.Е., Кривоглаз М.А. Движение макроскопических включений в твердых телах. М., 1971.
15. Шкловский Б.И., Эфрос А.Л. Теория протекания и проводимость сильно неоднородных сред // *УФН*. 1975. Т. 117. В. 3.
16. Киркпатрик С. Перколяция и проводимость // *Теория и свойства неупорядоченных материалов*. М., 1986.
17. Гулд Х., Тобочник Я. Компьютерное моделирование в физике. Ч. 2. М., 1990.