

ДИФФУЗИОННЫЙ МЕХАНИЗМ ЗАТУХАНИЯ ПРОДОЛЬНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН В НАВОДОРОЖЕННЫХ МЕТАЛЛАХ И СПЛАВАХ

Бурнышев И.Н.** , Васильев Л.С.* , Лыс В.Ф.**

*Физико-технический институт УрО РАН, 426000, г. Ижевск, Россия, ул. Кирова, 132

**Институт прикладной механики УрО РАН,

426067, г.Ижевск, Россия, ул. Т.Барамзиной, 34. E-mail: inburn@udman.ru

Анализ условий распространения механических колебаний в наводороженных металлах и сплавах является актуальной задачей физики конденсированного состояния. В частности, это связано с необходимостью диагностирования явлений водородного охрупчивания железоуглеродистых сплавов методами неразрушающего контроля с применением звуковых и ультразвуковых колебаний. Экспериментальные исследования показывают, что акустический фон процессов замедленного разрушения сталей в присутствии водорода заметно ниже. Это явление может быть связано с более высоким уровнем затухания механических колебаний в сталях, содержащих растворенный водород в качестве примеси.

Действительно, условия распространения механических колебаний в наводороженных твердых телах имеют некоторые особенности, сближающие в определенном смысле твердые тела с жидкими средами. Находясь в твердом растворе, атомарный водород является высоко подвижной примесью. Например, в интервале температур $T=(300\div 500)K$ коэффициент диффузии водорода в железе $D\approx(10^{-11}\div 10^{-9})m^2/c$ [1-3]. Время ожидания диффузионного скачка из междоузлия решетки равно

$$\tau \approx \frac{a^2}{D} \quad (1)$$

где a – параметр решетки основного металла (для железа, $a\approx 2,8\cdot 10^{-10}$ м).

Оценки показывают, что в указанном интервале температур $\tau \approx (10^{-8}\div 10^{-10})c$. Это означает, что при механических колебаниях с частотами $\nu < (10^8\div 10^{10})Гц$ атомы водорода смогут совершить несколько прыжков по междоузлиям за один период колебаний. Очевидно, что в силу необратимости диффузионных движений вынуждающая их механическая волна будет затухать как в вязкой среде.

Затухание волновых возмущений можно наблюдать экспериментально различными методами. При этом используются методики, основанные на применении продольных и поперечных акустических волн, а также упругих колебаний измерительных устройств. Поскольку механизмы затухания различных типов волн и колебаний могут существенно отличаться, то возникает проблема сравнения экспериментальных данных, полученных разными методами. Ее можно решить, используя конкретные модельные представления о механизмах затухания для каждого типа волн.

Целью настоящей работы является последовательное теоретическое рассмотрение диффузионных эффектов затухания продольных акустических волн в наводороженных металлах.

Рассмотрим сплошную твердотельную среду, в которой растворен атомарный водород в неупорядоченном состоянии. Плотность среды

$$\rho = \rho_0 + \rho_H, \quad (2)$$

где ρ_0 и ρ_H – плотности масс основного металла и растворенного водорода соответственно.

Уравнение движения среды запишем в виде [2-3]
$$\rho \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} = \text{div } \sigma \quad (3)$$

$$\text{Здесь } v = \frac{\rho_0 \vec{v}_0 + \rho_H \vec{v}_H}{\rho} \quad - \quad (4)$$

локальная скорость движения среды, \vec{v}_0 и \vec{v}_H - векторы скорости движения атомов решетки и водорода соответственно, σ -тензор напряжений.

При распространении продольной волны в среде создаются области сжатия и растяжения. Соответствующие градиенты давления будут создавать примесные потоки барродиффузии, которые, в свою очередь, вызовут компенсирующие их потоки обычной концентрационной диффузии. В итоге, плотность атомов водорода определится соотношением [2-3]

$$\frac{\partial \rho_H}{\partial t} = -D \operatorname{div} \operatorname{grad} \rho_H + \frac{D\Omega}{k_B T} \rho_{H0} \operatorname{grad} p \quad (5)$$

Здесь ρ_{H0} — средняя по объему плотность атомов водорода, p — давление в среде, D — коэффициент диффузии атомов водорода, k_B — постоянная Больцмана, Ω — атомарный объем.

Система уравнений (2)–(5) полностью определяет условия распространения плоских продольных волн в водородосодержащей среде. Заметим, что при распространении поперечных акустических волн плотность среды не меняется, поэтому механизм затухания у них будет другим.

Из этой системы можно найти также и дисперсионное уравнение, связывающее комплексную частоту продольных волн $\omega' = \omega + i\delta$ (6)

с волновым вектором \vec{k} :

$$\omega'^2 + i \frac{D\Omega\rho_H}{\gamma\rho k_B T} \omega' k^2 \left(\frac{Dk^2}{i\omega' - Dk^2} \right) = c_l^2 k^2 \quad (7)$$

Здесь γ — сжимаемость среды, i — мнимая единица, c_l — скорость распространения продольных волн.

Из уравнения (7) находим, что при $\omega \leq 10^{10}$ гц

$$\delta = \frac{D\Omega\rho_H k^2}{2\gamma\rho k_B T} \quad (8)$$

$$\omega = \sqrt{\delta^2 + \omega_l^2}, \quad \omega_l = c_l k \quad (9)$$

Равенство (9) означает, что продольные волны в наводороженной среде имеют характер оптических волн, поскольку $\omega(k=0) = \delta$ [2-3]. Оценка величины δ по уравнению (8) показывает, что затухание продольных волн пренебрежимо мало по сравнению с затуханием поперечных акустических волн той же частоты.

Выводы

1. Чисто продольные механические волны в наводороженных металлах носят оптический характер, а присутствие водорода практически не сказывается на их затухании;
2. Заметное затухание механических волн смешанного типа в водородосодержащих средах обусловлено затуханием их поперечной составляющей. Продольные составляющие демпфируются за счет существующего в кристаллах механизма перекачки энергии от них к поперечным составляющим волны;
3. Наиболее сильное затухание в наводороженных средах испытывают только чисто поперечные волны и чисто сдвиговые колебания среды.

Работа поддержана грантом РФФИ № 04-01-96020.