

Положение максимума интегральной интенсивности $K(\omega)$ в случае 180° доменной стенки с легкой осью [001] можно связать с частотами $\omega_T^{[111]} = S [A_1^2 + A_2^2/2]^{1/2}$ или $\omega_T^{[110]} = S [A_1^2 + 3A_2^2/4 + A_2A_1]^{1/2}$. Первая представлена в спектре при всех направлениях намагниченности в плоскости (110). Второй может отвечать максимальный коэффициент усиления в доменной границе. Пик на экспериментальной кривой хорошо согласуется с величиной $\omega_T^{[110]}$ при следующих значениях констант СТВ: $A_1 = -(70 \mp 10)$, $A_2 = -(310 \pm 10)$ МГц, $y = 0.20 \pm 0.02$.

Таким образом, получена информация о константах СТВ иона Cu^{2+} в феррошпинелях и показана существенная роль анизотропных СТВ в формировании спектра ЯМР.

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований.

Список литературы

- [1] Иванов М.А., Митрофанов В.Я., Фишман А.Я., Шемяков А.А. ФТТ **32**, 2, 433 (1990).
- [2] Ham F.S. Electron paramagnetic resonance. N.Y. (1972), P. 1.

УДК 539.4.01:539.211

© Физика твердого тела, том 37, № 4, 1995
Solid State Physics, vol. 37, N 4, 1995

ФРАКТАЛЬНАЯ ПОПРАВКА К ПРОЧНОСТИ И ВЯЗКОСТИ РАЗРУШЕНИЯ ХРУПКИХ ТВЕРДЫХ ТЕЛ С УЧЕТОМ АТОМНОЙ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ РАЗРУШЕНИЯ

В.В.Покропичный, В.В.Скороход

Институт проблем материаловедения им.И.Н.Францевича АН Украины,
Киев
(Поступило в Редакцию 26 мая 1994 г.)

Фрактальные свойства кристаллов являются в настоящее время предметом интенсивных исследований [1-3]. Мосолов [4], анализируя фрактальные свойства гриффитсовской трещины в теории упругости, получил асимптотическое выражение для коэффициента интенсивности напряжений K_{1c} и впервые связал его с фрактальной размерностью D . Однако явного выражения для прочности на разрыв σ и вязкости разрушения G_{1c} с учетом фрактальных свойств трещины получено не было и численных оценок не сделано. Восполним этот пробел.

Напомним, что в теории Гриффитса прочность на разрыв определяется из равенства приращения поверхностной $\Delta U_\gamma = 2\gamma\Delta l_g$ и упругой энергий $\Delta U_e = \pi\sigma_g^2 2l_g\Delta l_g/(4E)$ в условиях нормального раскрытия трещины [5]

$$\sigma_g = \sqrt{\frac{4\gamma E}{l_g}}, \quad (1)$$

где γ — поверхностная энергия, R — модуль Юнга, l_g — длина трещины Гриффитса.

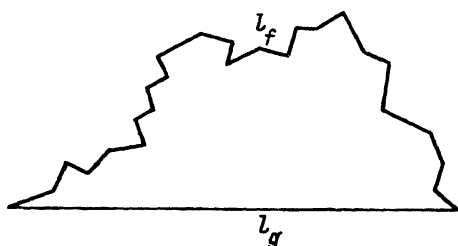


Рис. 1. Гриффитсовская и фрактальная длина трещины.

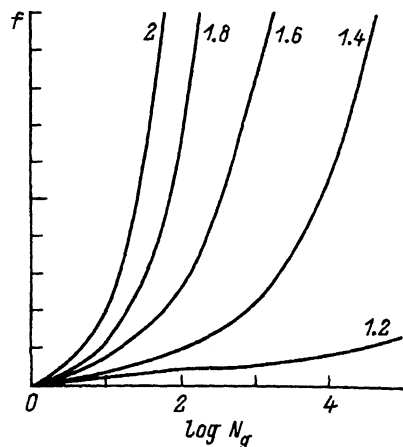


Рис. 2. Зависимость фрактального множителя f от длины трещины Гриффитса N_g и фрактальной размерности поверхности D .

В отличие от [4] будем считать, что для кристаллов существует нижний предел применимости фрактальной модели, равный не размеру зерна d , а межатомному расстоянию, близкому к параметру кристаллической решетки a . Сопоставим с длиной ломаной линии в теории фракталов [1] длину трещины «по прямой» l_g (рис. 1). Тогда в соответствии с теорией фракталов [1] фрактальная длина линии будет равна истинной (или эффективной) длине трещины l_f

$$l_f = a(l_g/a)^D = l_g(l_g/a)^{D-1}. \quad (2)$$

Физически это означает учет не только микроскопической, но и атомной шероховатости высокоиндексных фасетированных поверхностей разрушения. Теоретически это и есть ответ на вопрос: какой будет вязкость разрушения, если учесть атомную шероховатость поверхности разрушения. При этом фрактальная геометрия позволяет более корректно описать реальную форму и длину вскрытой трещины, чем модельная «чечевица».

Атомная шероховатость вскрывшейся трещины изменяет только поверхностную энергию и не сказывается на упругой. Поэтому в выражение для ΔU_γ следует подставить фрактальную длину трещины l_f (2) вместо гриффитсовской l_g . В результате получим фрактальное выражение для прочности на разрыв

$$\sigma_f = \sigma_g f^{1/2}, \quad (3)$$

которое отличается от классического (1) фрактальным множителем

$$f = D(l_g/a)^{D-1} = DN_g^{D-1}, \quad (4)$$

где $N_g = l_g/a$ — длина трещины «по прямой» в постоянных решетке.

В теории разрушения прочность на разрыв вычисляется как [6]

$$\sigma = \sqrt{\frac{EG_{1c}}{l_g}}, \quad (5)$$

где вязкость разрушения G_{1c} равна [7]

$$G_{1c} = 2\psi\gamma_{ef} = \psi(2\gamma + 2\gamma_c - \gamma_b). \quad (6)$$

Здесь ψ — показатель неровности поверхности разрушения [7], равный по разным оценкам от 1.8 до 4.0, γ_{ef} — эффективная поверхностная энергия, γ_c — энергия ступенек скола, γ_b — энергия границы зерна.

Сравнивая выражение (5) с полученным (3), видим, что показатель неровности в формуле (5) точно равен фрактальному множителю

$$\psi = f. \quad (7)$$

Зависимость фрактального множителя от длины трещины и фрактальной размерности представлена на рис. 2. Из этого рисунка видно, что с ростом шероховатости и длины вскрывшейся трещины прочность и вязкость разрушения могут быть значительно увеличены.

Для коэффициента интенсивности напряжений из определения $K_{1c}^2 = G_{1c}E$ получим соотношение

$$K_{1c} = \sqrt{2\gamma_{ef}Ef} \sim l_g^{\frac{D-1}{2}}, \quad (8)$$

в котором показатель степени отличается от полученного в теории упругости [4].

Оценим потенциальный резерв вязкости разрушения, который можно получить за счет создания атомной шероховатости поверхности разрушения по сравнению с шероховатостью субграниц дислокационных ячеек размером d . Приняв для деформированного молибдена $d \cong 300 \text{ nm}$ [7] и $D = 1.45$ [2], установим, что вязкость разрушения может быть увеличена в $f = 29$ раз, а при $D = 1.2$ в $f = 4.8$ раза.

Фрактальный множитель является экстенсивным геометрическим фактором, учитывающим повышение реальной площади поверхности трещин за счет шероховатости. Кроме этого, следует учитывать также интенсивный фактор, а именно изменение самой поверхностной энергии γ_{ef} за счет превышения энергией отдельных фасеток трещин минимальной. Именно этим объясняется появление слагаемого γ_c в общем выражении для вязкости разрушения (6), равного энергии образования ступенек скола. Его вычисление представляет собой отдельную задачу, решаемую, например, методом молекулярной динамики.

Из полученных результатов следует практический вывод о том, что для повышения ударной вязкости хрупких твердых тел следует стремиться к максимальному увеличению шероховатости поверхности разрушения на микроскопическом, мезоскопическом и атомном уровнях. С этой целью нужно приготавливать, например, дисперсионные включения разных размеров (от микроскопических до ультрадисперсных), используя при этом различную скорость выпадения разных фаз.

- [1] Смирнов Б.М. Физика фрактальных кластеров. М. (1991), 135 с.
- [2] Баланкин А.С. ФТТ **34**, 4, 1245 (1992).
- [3] Dauskardt R.H., Haubensak F., Ritchie R.O. Acta Met. Mater. **38**, 2, 143 (1990).
- [4] Мосолов Ф.Б. // ЖТФ **61**, 7, 57 (1991).
- [5] Уайэтт О., Дью-Хьюз Д. Металлы, керамики, полимеры / Пер. с англ.; Под ред. Б.Я.Любова. М. (1979), 580 с.
- [6] Трефилов В.И., Мильман Ю.В., Фирстов С.А. Физические основы прочности тугоплавких металлов. Киев (1975), 316 с.
- [7] Структура, текстура и механические свойства деформированных сплавов молибдена / Под общ. ред. В.И.Трефилова. Киев (1983), 232 с.

УДК 537.622.4:539.216.2

© Физика твердого тела, том 37, № 4, 1995
Solid State Physics, vol. 37, N 4, 1995

МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА МНОГОСЛОЙНЫХ ПЛЕНОК (Fe/Mo)₁₀, ПОЛУЧЕННЫХ МАГНЕТРОННЫМ РАСПЫЛЕНИЕМ

Л.А.Чеботкевич, С.В.Яловкина, Ю.Д.Воробьев, И.М.Слабженникова

Научно-исследовательский физико-технический институт
при Дальневосточном государственном университете, Владивосток
(Поступило в Редакцию 28 июня 1994 г.)

В настоящее время большой научный и практический интерес представляют многослойные магнитные структуры с чередующимися слоями из ферромагнитных и немагнитных материалов [1,2]. Такие структуры проявляют уникальные магнитные, механические и другие свойства. В частности, мультислойные пленки с высокой намагниченностью и магнитомягкими свойствами могут применяться в качестве элементов магнитных интегральных головок.

В данной работе исследуются магнитные свойства многослойных композиционно-модулированных пленок (Fe/Mo)₁₀ в зависимости от толщины слоев Fe и Mo.

Пленки получали методом магнетронного распыления на постоянном токе в атмосфере Ar. Давление остаточных газов в камере было не выше $3 \cdot 10^{-5}$ Торр, а давление Ar в процессе напыления составляло $7 \cdot 10^{-4}$ Торр. Поочередное напыление Fe и Mo осуществлялось из двух мишеней, над которыми располагалась вращающаяся карусель со стеклянными подложками. Скорость вращения карусели была 1.5 rev./min.

Магнитичность I_{eff} пленок измеряли индукционным методом, коэрцитивную силу H_c и поле анизотропии H_k — магнитооптическим методом. Кристаллическую структуру пленок исследовали дифракционным методом и методом электронной микроскопии. Толщину слоев определяли методом рентгеновской интерференции. Концентрационный состав пленок определяли методом оже-анализа с послойным травлением пучком аргона.

Данные электронной оже-спектроскопии свидетельствуют о присутствии кислорода ($\sim 5 \div 6$ at.%) и углерода (~ 2 at.%) в многослойных композиционно-модулированных пленках (Fe/Mo)₁₀.