

05.3;12

## ЭФФЕКТ ДАЛЬНОДЕЙСТВИЯ В УСЛОВИЯХ РАДИАЦИОННО-ИНДУЦИРОВАННОГО КИНЕТИЧЕСКОГО ФАЗОВОГО ПЕРЕХОДА

© В.С.Хмелевская, В.Г.Малынкин, С.П.Соловьев,  
Н.Ислам, К.О.Базалеева

Эффектом дальнего действия обычно называют явление глубокого и сверхглубокого проникновения фронта радиационных повреждений в вещество при ионно-плазменном облучении поверхности. Несмотря на то что эффект многократно наблюдали с помощью различных экспериментальных методов (смотри, например, [1-7]), его природа и даже само существование служат предметом интенсивных дискуссий. Причиной такого интереса являются следующие обстоятельства: во-первых, проникновение радиационных повреждений на глубины, на порядки превышающие расчетные значения, ставит под вопрос справедливость принятых моделей взаимодействия излучения с веществом, основанных на парных атомных соударениях; во-вторых, быстро развивающиеся высокие технологии радиационного модифицирования материалов требуют точного знания глубины измененных слоев.

В данной работе получены неопровержимые доказательства проявления эффекта дальнего действия, по крайней мере, в некоторых особых случаях. В частности, эффект наблюдается, если в материале происходит индуцированный облучением кинетический фазовый переход, описываемый для открытых систем термодинамикой необратимых процессов [8,9]. При этом в условиях непрерывного притока энергии или массы происходит особый вид упорядочения системы — ее самоорганизация, причем образующиеся структуры (диссипативные структуры) не соответствуют минимуму свободной энергии.

Ранее нами было обнаружено [10,11], что в некотором интервале доз, температур и интенсивностей потока при различных видах ионного и плазменного облучения в металлических твердых растворах образуется особое состояние с признаками, универсальными для различных материалов и разных способов облучения. Главные признаки особого состояния; гетерофазность, возникающая в ранее однородной равновесной структуре в узкой области параметров внешнего воздействия; нелинейная зависимость от интенсивности управляющего потока смещений; неравновесный харак-

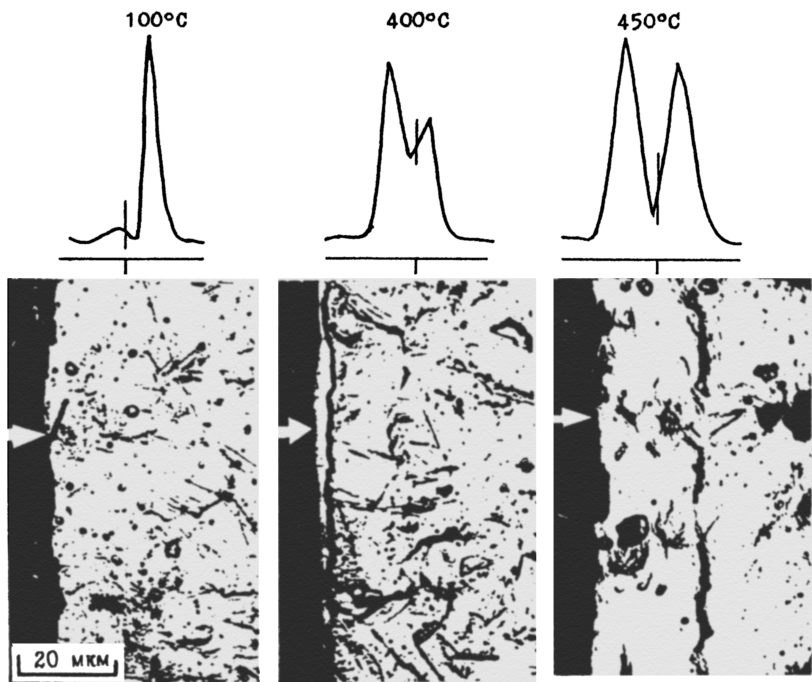


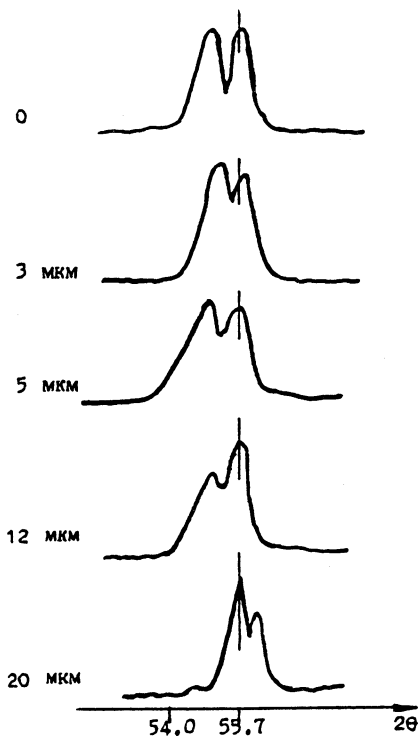
Рис. 1. Рентгеновские дифракционные линии (111) (вверху) и микроструктура сплава Fe-18Cr-10Ni после облучения при температурах 100, 400 и 450°C ( $Ag^+$ , 50 кэВ,  $5 \cdot 10^{17}$  ион/см<sup>2</sup>).

тер возникающего состояния; ячеистая морфология структуры — позволили идентифицировать обнаруженное состояние как диссипативную структуру.

Признаком, методически наиболее удобным для ее распознавания, является возникающая гетерофазность. Она может быть однозначно зарегистрирована как для поликристаллов, так и для монокристаллов методами рентгенодифракционного анализа. ВГЦК материалах, например, в этом случае все линии дифрактограммы раздваиваются.

В нашем эксперименте использован сплав с ГЦК структурой Fe-18Cr-10Ni, который облучали ионами  $Ag^+$  (50 кэВ) при различных температурах. Гетерофазная структура формировалась в узком интервале температур облучения (400–500°C), дифракционные линии твердого раствора в этом интервале раздваивались. Вне данной области температур облучения рентгеновские максимумы оставались одиночными.

При металлографическом исследовании образцов, разрезанных перпендикулярно облученной поверхности (на рис. 1 облученная поверхность указана стрелкой), обнару-



**Рис. 2.** Изменение формы рентгеновской дифракционной линии (111) сплава Fe-18Cr-10Ni, облученного при 450°C, по глубине слоя.

жено появление “радиационных белых слоев” — областей, измененных при облучении и имеющих травимость, отличную от неповрежденного материала.

Как видно из рисунка, “белый слой” может иметь очень большую толщину — около 20 мкм, что более чем на три порядка превосходит величины радиационно измененного слоя, предсказываемые теорией (около 100 А при данных напряжениях). Кроме того, наблюдается корреляция между толщиной “белого слоя” и рентгеновскими эффектами, соответствующими диссипативной структуре. Так, в образце, облученном при 100°C, где линия остается одиночной (рис. 1), не наблюдается “белого слоя”. Максимальная толщина “белого слоя” зарегистрирована в образце, облученном при 450°C, где рентгеновский эффект, соответствующий кинетическому фазовому переходу (раздвоение линии), максимален (рис. 1).

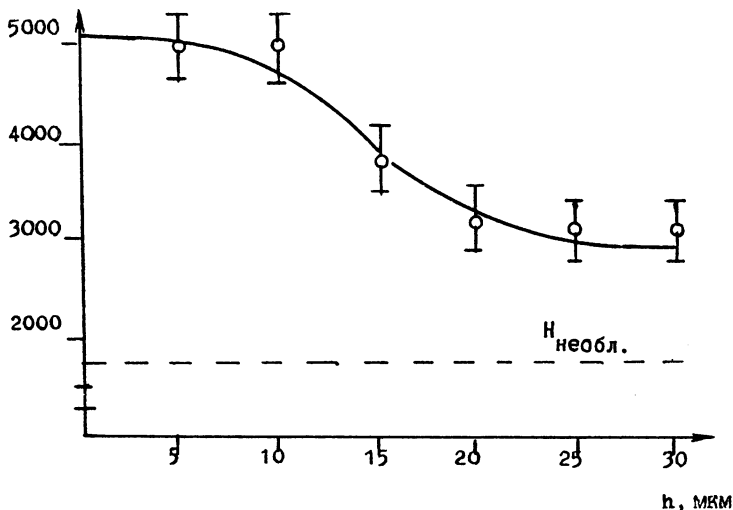
$H_v, \text{МПа}$ 

Рис. 3. Микротвердость облученного сплава Fe-18Cr-10Ni на различной глубине от поверхности.

Экспериментальное измерение глубины гетерофазного слоя путем послойного стравливания подтвердило эту связь. В образце, облученном при  $450^\circ\text{C}$ , раздвоение пика уменьшалось с глубиной, пик становился одиночным (исходное состояние) на глубине около 20 мкм от поверхности (рис. 2), что хорошо совпадает с металлографическими наблюдениями.

Увеличение микротвердости, вызванное облучением, на поверхности составляло 200% от исходной величины (1800 МПа). Измерения, сделанные на поперечном срезе, показывают, что микротвердость монотонно уменьшается с глубиной, но достигает исходного значения на очень большой глубине от поверхности — порядка 100 мкм (рис. 3).

### Список литературы

- [1] Гусева М.И. Поверхность. 1982. № 4. С. 27–48.
- [2] Быков В.Н., Малышкин В.Г., Хмелевская В.С. Вопр. ат. науки и тех. Сер. Физ. рад. повр. и рад. мат. 1989. В. 8 (50). С. 45–52.
- [3] Борисенко В.Е., Ершов С.Н., Калинин Ю.Л., Пантелеев В.А. // Письма в ЖТФ. 1982. Т. 8. В. 9. С. 559–561.
- [4] Gardner E.E., Schwuttker G.H., DeAngelis H.M. // Bulletin Amer. Phys. Soc. 1967. V. 12. P. 1119.
- [5] Бородин С.Н., Крейнделъ Ю.Е., Месяц Г.А., Овчинников В.В., Шабашов В.А. // Письма в ЖТФ. 1989. Т. 15. В. 17. С. 51–55.
- [6] Zhang Tonghe, Ji Chengzhon, Shen Jinghua, Yang Jianhua, Chen Jun, Gao Yozun, Sun Guiru // Nucl. Instr. and Meth. 1991. V. B59/60. P. 822–832.

- [7] *Johansen A., Johnson E., Sarholt-Kristensen L., Steenstrup S., Gerritsen E., Denissen C.J.M., Keetels H., Politek J., Hayashi N., Sakamoto J.* // Nucl. Instr. and Meth. 1990. V. B50. P. 119-126.
- [8] *Николис Г., Пригожин И.* Самоорганизация в неравновесных системах. М.: Мир, 1979.
- [9] *Хакен Г.* Синергетика. М.: Мир, 1990.
- [10] *Khmelevskaya V.S., Malynkin V.G., Solovyev S.P.* // J. Nucl. Mater. 1993. V. 199. P. 214.
- [11] *Хмелевская В.С., Соловьев С.П., Малынкин В.Г.* // Итоги науки и техн. Сер. Пучки зар. част. и тв. тело. 1990. Т. 2. С. 151-193.

Поступило в Редакцию  
13 декабря 1995 г.

---