

05.1;07;12

©1994

НЕУСТОЙЧИВОСТЬ В МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛАХ, ОБЛУЧЕННЫХ ЛАЗЕРОМ

В.С.Хмелевская, В.Г.Малынкин, Е.В.Базалеев

При структурном исследовании металлических твердых растворов на основе железа, никеля и меди, облученных ионными пучками разной природы и энергии, ранее было обнаружено [1-3], что в некотором интервале радиационных параметров развивается неустойчивость и формируется состояние с особыми свойствами, которое мы идентифицировали как диссипативную структуру, предсказываемую термодинамикой необратимых процессов [4,5].

С другой стороны, известно, что при лазерном облучении в веществе возникают процессы и структуры, которые несомненно являются следствием коллективных взаимодействий в твердом теле [6-9].

Представлялось целесообразным сравнение эффектов, вызываемых в одних и тех же материалах различными видами радиационного воздействия. Кроме того, существенный интерес вызывает также определение глубины нарушений в материалах при воздействии лазерного излучения.

В наших экспериментах использовались сплавы системы Fe-Cr-Ni (Fe-20Cr-20Ni) и Fe-Cr (Fe-18Cr и Fe-12Cr-Mo-W-V-Nb), а также чистое железо. Образцы представляли собой пластинки толщиной 1-2 мм. Сплавы Fe-18Cr и Fe-Cr-Ni были подвергнуты закалке, сталь Fe-12Cr-Mo-W-V-Nb — типовой термообработке (нормализация + отпуск). В результате все образцы были в однородном состоянии, при их рентгенодифракционном исследовании регистрировались только линии чистого металла или твердого раствора. Из образцов были приготовлены шлифы, затем электролитически удален слой, поврежденный при деформации. Потом образцы облучали с помощью лазера ЛТИ-406 (твердотельный лазер YAG : Nd с длиной волны 1.06 мкм) в режиме модулированной добротности с длительностью импульса 10-20 нс. Размер пятна составлял 3-5 мм, энергия импульса оставалась примерно постоянной (0.16-0.17 Дж), кроме одной из серий, где она варьировалась от 0.03 до 0.16 Дж. Импульсы посылались многократно с частотой 14 Гц, общее число импульсов изменялось от 1 до 560.

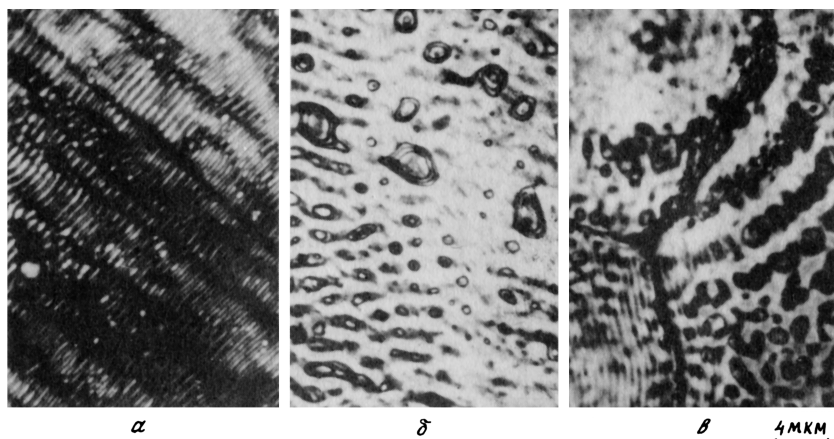


Рис. 1. Структура микро рельефа после лазерного облучения в сплаве Fe-12Cr-Mo-W-V-Nb:

a — 100, *б* — 200, *в* — 300 импульсов.

В соответствии с теоретическими представлениями [10] при указанных параметрах главным видом воздействия является возникновение ударной волны, причем волна разгрузки у поверхности может приводить к плавлению, испарению или выбросу материала. При этом поглощение излучения происходит в тонком слое порядка 1–0.1 мкм.

Облученные лазером образцы исследовались металлографически с поверхности и по глубине поврежденного слоя; кроме того, измерялась их микротвердость. Измерения выполняли с малой нагрузкой (20 г, глубина отпечатка 2 мкм), так как предполагалось, что измененный слой может составлять всего лишь несколько микрон и, кроме того, он, по-видимому, существенно неоднороден.

Результаты показывают, что лазерное воздействие приводит к значительным изменениям структуры и свойств исследованных материалов. Так, микротвердость сплава Fe-12Cr-Mo-W-V-Nb после облучения увеличивалась на 20–30%. Существенных различий этой характеристики в зависимости от энергии импульса и от числа импульсов при постоянной энергии импульса не обнаружено.

В то же время при изменении числа импульсов наблюдаются заметные изменения в микроструктуре рельефа. После однократного лазерного воздействия никаких дополнительных деталей в микроструктуре не появляется. Далее (100 импульсов) наблюдаются хорошо известные пространственно-периодические структуры (ППС), представляющие собой линейчатую решетку с длиной волны,

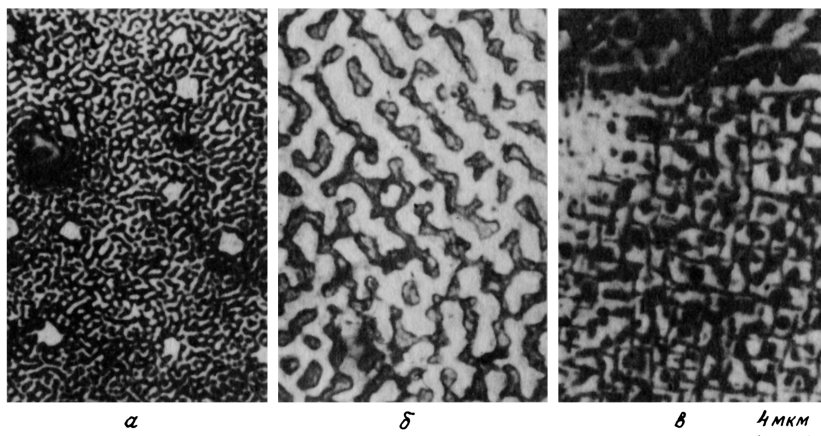


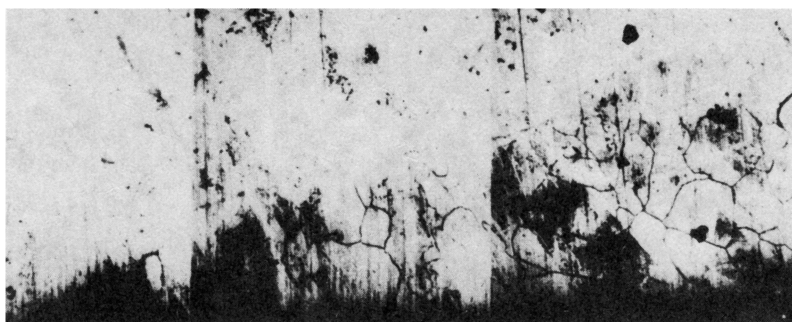
Рис. 2. Структура микрорельефа после лазерного облучения (150 импульсов) в железе (а), сплаве Fe-Cr-Ni (б) и сплаве Fe-Cr (в).

близкой к длине волны падающего излучения — 1.06 мкм [7]. Области ППС расположены пятнами на облученной поверхности, причем оказывается, что период данной одномерной решетки несколько отличается для разных участков (0.8–1.7 мкм).

При увеличении числа импульсов на образцах появляются характерные пятна, внутри которых поверхность претерпела эрозию, причем эти пятна никак не связаны с “первичными ППС” с периодом 1 мкм. При дальнейшем увеличении числа импульсов пятна начинают организовываться, образуя ливейчатые или концентрические структуры. Описанная эволюция показана на рис. 1, а–в.

Предыдущие исследования тех же материалов, облученных пучками или плазмой [1–3], показали, что радиационное воздействие приводит к появлению гетерофазности в ранее однородном равновесном сплаве — по-видимому, оно индуцирует появление сильнодефектных и слабоповрежденных областей. Можно предположить, что здесь наблюдаются аналогичные процессы — эрозионные пятна есть результат более быстрого испарения из областей с сильноповрежденной структурой.

Исследование облученных лазером модельных сплавов с различной кристаллической решеткой — Fe-Cr-Ni (ГЦК) и Fe-Cr (ОЦК), а также чистого железа — показало, что во всех материалах наблюдаются изменения микротвердости: в железе — увеличение на 125%, в сплаве Fe-Cr и в сплаве Fe-Cr-Ni — примерно на 50%. Одновременно появляются



12 мкм

Рис. 3. Структура поврежденного слоя в сплаве Fe-Cr после лазерного облучения.

изменения в рельефе, характерные для развития неустойчивости (рис. 2, а-в). Структуры на рисунках 2, а и б весьма подобны, хотя одна получена для чистого железа, другая — для сплава Fe-Cr-Ni.

На рис. 2, в показана граница зерна в сплаве Fe-Cr. Видно, что в одном из зерен образуется рельеф, подобный рельефу на рис. 2, а и б, однако в другом зерне (очевидно, с другой кристаллографической ориентировкой) наблюдаются квадратные ячейки, декорированные примесями, имеющимися в металле. Здесь можно напомнить, что подобные квадратные бенароподобные ячейки (правда, с другим характерным размером) мы наблюдали электронно-

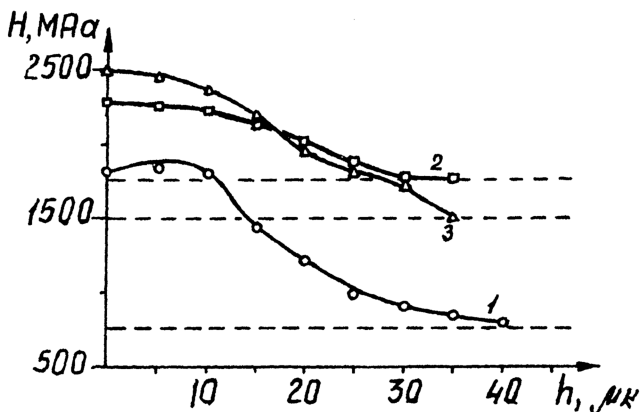


Рис. 4. Изменение микротвердости с глубиной от поверхности в железе (1) и сплавах Fe-Cr (2) и Fe-Cr-Ni (3) после лазерного облучения.

микроскопически в кристаллографической плоскости {100} после облучения ионными пучками того же сплава.

Для определения глубины лазерного воздействия были приготовлены шлифы образцов, разрезанных перпендикулярно облученной поверхности. Как показывают измерения микротвердости по глубине образцов (рис. 3), упрочненный слой во всех исследованных материалах составляет около 30 микрон. Металлографическое исследование обнаруживает области измененной травимости примерно такой же глубины (рис. 4). Как и в случае ячеек, граница поврежденной области декорирована примесями.

Обнаруженная глубина радиационного лазерного повреждения, как видно из приведенных данных, существенно превосходит глубину проникновения лазерного излучения, предсказываемую теорией (10^{-6} – 10^{-7} м) [10].

Список литературы

- [1] *Khmelevskaya V.S., Malynkin V.G., Solouyev S.P.* // J. Nucl. Mater. 1993. V. 199. P. 214–220.
- [2] *Khmelevskaya V.S., Malynkin V.G., Solouyev S.P.* // Phase Transitions. 1991. V. 29. P. 157–166.
- [3] *Хмелевская В.С., Соловьев С.П., Малышкин В.Г.* // Итоги науки и техники. Сер. Пучки заряженных частиц. 1990. Т. 2. С. 151–193.
- [4] *Николис Г., Пригожин И.* Самоорганизация в неравновесных системах. М., 1979.
- [5] *Хакен Г.* Синергетика. М., 1980.
- [6] *Емельянов В.И., Уварова И.Ф.* // ЖЭТФ. 1988. Т. 97. В. 8. С. 255–269.
- [7] *Канцырев В.Л., Сергеев П.Б., Тюнина Н.А.* // Письма в ЖТФ. 1992. Т. 18. В. 6. С. 63–67.
- [8] *Гашков О.П., Либенсон М.Н., Макин В.С., Трубаев В.В.* // Письма в ЖТФ. 1992. Т. 18. В. 10. С. 32–38.
- [9] *Аполлонов В.В., Проторов А.М., Шмаков А.В., Шмаков В.А.* // Письма в ЖТФ. 1991. Т. 17. В. 2. С. 52–56.
- [10] *Афанасьев Ю.В., Крохин О.Н.* // ЖЭТФ. 1967. Т. 52. В. 4. С. 966–972.

Обнинский институт
атомной энергетики

Поступило в Редакцию
12 июля 1994 г.