

ВЛИЯНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ И γ -ОБЛУЧЕНИЯ НА КИНЕТИКУ ФОРМИРОВАНИЯ ОТПЕЧАТКА И МИКРОТВЕРДОСТЬ ИОННЫХ КРИСТАЛЛОВ ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ МИКРОИНДЕНТИРОВАНИИ

© А.И. Тюрин, В.И. Иволгин, В.В. Коренков, Н.В. Коренкова

Tyrin A.I., Ivolgin V.I., Korenkov V.V. and Korenkova N.V. The influence of magnetic field and γ -irradiation on kinetics of the indentation formation and on microhardness of ionic crystals in dynamic microindentation. In the work the influence of pulsed magnetic field on the microhardness and kinetics of the indentation formation in dynamic microindentation was investigated. The effect of the preliminary treatment of the crystals in the magnetic field was shown to appear on the fourth stage of indentation forming - on the dislocation one.

В последние годы в литературе широко обсуждается влияние предварительной экспозиции «немагнитных» веществ в магнитном поле (МП). При этом МП с индукцией $B \sim 1$ Тл меняет многие пластические характеристики даже таких «немагнитных» веществ, как ионные кристаллы, диамагнитные металлы, полимеры и др. Наряду с подвижностью дислокаций [1], коэффициентом деформационного упрочнения [2], пределом текучести, декрементом затухания колебаний [3] меняется и микротвердость материала [4]. Для ряда магнитоэластических эффектов, например, увеличения подвижности индивидуальных дислокаций после обработки кристалла в МП, найдено качественно непротиворечивое объяснение [2].

Микротвердость сама по себе является сложной и трудно интерпретируемой характеристикой материала. В общем случае ее не удается связать с каким-либо другим макроскопическим свойством твердого тела. В [5–8] показано, что отпечаток даже в мягких кристаллах может образовываться за счет нескольких микромеханизмов, последовательно сменяющих друг друга при погружении индентора. На начальных стадиях погружения лидирующими являются монократные механизмы пластического течения, а на завершающих – дислокационные.

Представляет интерес выяснить, на какие именно стадии и микромеханизмы массопереноса влияют остаточные изменения структуры, наведенные МП.

Исследования проводились по новой методике на аппаратуре, позволяющей непрерывно *in situ* с высоким временным (50 мкс) и пространственным (20 нм) разрешением исследовать динамику локальной деформации при внедрении в материал жесткого индентора, которая дала принципиально новые результаты о динамике формирования отпечатков в различных исследованных материалах [5–9].

В настоящей работе на ряде номинально чистых ионных кристаллов (KCl, NaCl, LiF, MgO) и γ -облученных кристаллов LiF (доза облучения 10^7 рад.) исследован процесс деформирования материала при формировании отпечатка, установлена кинетика внедрения индентора, значения действующих сил, контактных напряжений и динамической твердости H_d , а также характер влияния предварительной обработки

кристалла в импульсном магнитном поле ($B = 24$ Тл) на изучаемые величины. Эти данные позволили получить информацию о спектре образующихся структурных дефектов и микромеханизмах массопереноса в микро- и нанообъемах в условиях действия высоких локальных напряжений.

Обнаружена многостадийность процесса локальной деформации при индентировании. Так, в кристаллах LiF число выявляемых стадий достигает пяти. Начиная со второй все стадии имеют закон изменения скорости погружения со временем, близкий к экспоненциальному, но отличаются предэкспонентами, показателями экспонент и значениями динамической твердости.

Исследования, проведенные на γ -облученных кристаллах LiF, показали, что общий характер формирования отпечатка (общий ход кинетических зависимостей глубины проникновения индентора от времени и количество выявляемых стадий) существенно не изменился. Тем не менее, введение при γ -облучении большого количества точечных дефектов приводит к изменению динамических характеристик процесса формирования отпечатка. Для всех выявленных стадий отмечено уменьшение глубины погружения, скорости и ускорения внедряющегося индентора. Отмечено также изменение экспоненциального закона изменения скорости погружения со временем, предэкспонент и показателей экспонент, а также возрастание значений динамической твердости в γ -облученных кристаллах на всех выявленных стадиях.

Влияние предварительной обработки магнитным полем обнаруживает изменение твердости исследуемого материала. Так, на кристаллах KCl, после их обработки в магнитном поле, отмечается уменьшение твердости и изменение кинетики формирования отпечатка по сравнению с необработанным кристаллом. При этом основное отличие обнаруживается на четвертой стадии, общее же количество выявляемых стадий и кинетика всех остальных стадий остается неизменной.

Для всех исследованных кристаллов определены временные границы выявленных стадий, силовые и активационные характеристики (энергия активации и

активационный объем). Так, для кристаллов LiF первая стадия занимает 3 ± 1 мс и характеризуется ростом скорости погружения индентора, контактных напряжений и значений динамической твердости. Вторая стадия занимает до 10 ± 2 мс, третья – до 40 ± 10 мс, четвертая – до 10 ± 2 с, пятая – до сотен секунд. Значения величины активационного объема, определенные для второй стадии формирования отпечатка, составляют 10^{-30} м³ и сопоставимы с объемом, занимаемым ионом в решетке, начиная с третьей стадии величина активационного объема возрастает до значений порядка 10^{-28} м³, т. е. принимает значения, характерные для дислокационных механизмов пластической деформации.

Анализ полученных данных показал, что первая стадия характеризуется малыми размерами отпечатка, ростом скорости внедрения индентора, высокими значениями скоростей относительной деформации и значений контактных напряжений (примерно на три порядка выше предела текучести материала) и, по-видимому, обусловлена тем, что на ней преобладает упругая деформация материала. Это согласуется с исследованиями и выводами ряда работ по статическому наноиндентированию в области малых нагрузок [10–11].

Во всех исследованных кристаллах на второй стадии, которая характеризуется высокими значениями контактных напряжений, скоростей относительной деформации, величины динамической твердости (примерно на порядок превышающей значения статической твердости), а так же малыми значениями активационного объема – доминирующими являются моноатомные механизмы массопереноса. Начиная с третьей стадии, когда происходит значительное уменьшение величины контактных напряжений, скоростей относительной деформации, величины динамической твердости (которая становится сопоставимой со статической твердостью), а также увеличением значений активационного объема – доминирующую роль в процессе массопереноса начинают играть процессы зарождения, движения и перераспределения дислокаций в дислокационной розетке.

Влияние предварительного γ -облучения изменяет статические и динамические значения твердости материала, а также динамические характеристики индентирования, однако количество выявляемых стадий, доминирующие микромеханизмы массопереноса и последовательность их смены остается неизменной.

Предварительная обработка кристаллов в МП приводит к увеличению подвижности индивидуальных дислокаций, увеличивая их пробеги [1–2]. Влияние МП именно на четвертую стадию обусловлено, по-видимому, тем, что определяющий вклад в формирование отпечатка на этой стадии вносит дислокационная пластичность, обусловленная преимущественным движением дислокаций от места укола в объ-

ем материала. Этот результат согласуется с данными, полученными ранее [12], по регистрации кинетики электрического дипольного момента P , приобретаемого образцом в процессе индентирования. Эти данные свидетельствуют о том, что наибольший прирост величины P , обусловленный движением электрически заряженных краевых дислокаций, происходит на заключительных, медленных стадиях формирования отпечатка.

Таким образом, в работе показано влияние внешних энергетических воздействий (МП и γ -облучения) на динамику формирования отпечатка. Выявлен характер и определены конкретные стадии, а также доминирующие микромеханизмы массопереноса при индентировании, на которые оказывается влияние предварительных внешних энергетических воздействий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алышц В.И., Даринская Е.В., Петржик Е.А. «In situ» изучение магнитоэластического эффекта в кристаллах NaCl методом непрерывного травления // ФТТ. 1991. Т. 33. № 10. С. 3001-3010.
2. Головин Ю.И., Моргунов Р.Б. Влияние слабого магнитного поля на состояние структурных дефектов и пластичность ионных кристаллов // ЖЭТФ. 1999. Т. 115. Вып. 2. С. 1-19.
3. Головин Ю.И., Моргунов Р.Б. Влияние постоянного магнитного поля на скорость макроскопического течения ионных кристаллов // Письма в ЖЭТФ. 1995. Т. 61. Вып. 7. С. 583-586.
4. Golovin Yu.I., Morgunov R.B., Lopatin D.V. and Baskakov A.A. Influence of a strong magnetic field pulse on NaCl crystal microhardness // Phys. Stat. Sol. (a). 1997. V. 160. R3.
5. Головин Ю.И., Тюрин А.И. О межзольных механизмах пластического течения на начальной стадии погружения индентора при микроиндентировании // Письма в ЖЭТФ. 1994. Т. 60. В. 10. С. 722-726.
6. Головин Ю.И., Тюрин А.И. Динамика начальной стадии микроиндентирования ионных кристаллов // Изв. РАН (серия физическая), 1995. Т. 59. С. 49-54.
7. Головин Ю.И., Тюрин А.И. Динамика и микромеханизмы ранних стадий внедрения жесткого индентора при микроиндентировании ионных кристаллов // Кристаллография. 1995. Т. 40. В. 5. С. 884-888.
8. Головин Ю.И., Тюрин А.И. Динамика и микромеханизмы деформирования ионных кристаллов при импульсном микроиндентировании // ФТТ. 1996. № 6. С. 1812-1818.
9. Головин Ю.И., Иволгин В.И., Коренков В.В., Тюрин А.И. Динамика формирования отпечатка и дислокационной розетки при импульсном микроиндентировании ионных кристаллов // ФТТ. 1997. № 2. С. 318-319.
10. Murakami Y., Tanaka K., Itokazu M. and Shimamoto A. Elastic analysis of triangular pyramidal indentation by the finite-element method and its application to nano-indentation measurement of glasses // Philos. Mag. A. 1994. V. 69. № 6. P. 1131-1138.
11. Page T.F., Oliver W.C. and Hargue C.J. The deformation behavior of ceramic crystals subjected to very low load (nano)indentations // J. Mater. Res. 1992. V. 7. № 2. P. 450-473.
12. Boyarskaya Yu.S., Golovin Yu.I., Kats M.S., Tyurin A.I. and Shibkov The electrical phenomena and microindentation dynamics of LiF single crystals // Phys. Stat. Sol. (a) 1992. V. 130. P. 319-325.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант № 98-02-16549.

Поступила в редакцию 18 ноября 1999 г.