

ФОРМИРОВАНИЕ ПОЛЕЙ НАПРЯЖЕНИЙ И ПЛАСТИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ ПРИ РАДИАЦИОННОЙ ОБРАБОТКЕ МАТЕРИАЛОВ

В.С. Красников¹⁾, А.П. Яловец¹⁾, А.Е. Майер²⁾

¹⁾Южно-Уральский государственный университет (НИУ)

пр. Ленина 76, Челябинск, 454080, Россия, e-mail: vas.krasnikov@gmail.com

²⁾Челябинский государственный университет

ул. Братьев Кашириных 129, Челябинск, 454000, Россия, e-mail: mayer@csu.ru

В работе представлены результаты моделирования генерации полей напряжений и пластической деформации при облучении электронными, ионными пучками, а также плазменными потоками.

Введение

При облучении металлов мощными потоками ускоренных заряженных частиц во многих случаях происходит упрочнение материала мишени, обусловленное ростом плотности дислокаций [1-3]. Данный эффект используется в технологических целях как один из факторов модификации материалов. Для обработки мишеней обычно применяют мощные ионные пучки и низкоэнергетические сильноточные электронные пучки умеренной интенсивности с плотностью мощности $10^7 \div 10^8$ Вт/см².

Моделирование выполнено с помощью модели механики сплошной среды с дислокационной пластичностью [4]

Динамика мишени и формирование распределений дислокаций

Рассмотрим картину формирования полей напряжения в мишени при облучении. Моделировалось воздействие электронного пучка на медную мишень, параметры пучка: энергия частиц 300 кэВ, плотность энергии пучка 8.6 Дж·см⁻², треугольная форма импульса, длительность облучения в расчетах варьировалась от 20 пс до 5 нс [5]. При таких параметрах облучения максимальная температура мишени составляла порядка 710 К, плавления мишени не наблюдалось. Толщина зоны энерговыделения при указанном режиме облучения ~ 100 мкм. Нагрев приповерхностного слоя ведет первоначально к возникновению зоны высоких давлений в образце (рис. 1 (а)), повторяющих пространственное распределение функции энерговыделения. Амплитуда сжимающих напряжений достигает значения 2.6 ГПа по завершению действия облучения. Вследствие неоднородного распределения давления в мишени, материал мишени начинает двигаться, так формируется распространяющаяся вглубь мишени ударная волна. Тепловое расширение материала в направлении свободной поверхности мишени ведет к возникновению волны разгрузки, движущейся вслед за волной сжатия, так формируется бегущая волна напряжений биполярной формы (рис. 1 (а)). Максимальная амплитуда волны растяжения составляет 1.2 ГПа. Распространение ударной волны сопровождается формированием четко выраженного упругого предвестника (врезка на рис. 1 (а)). Ввод энергии пучка в мишень со-

провождается ростом давления, сдвиговые напряжения возникают при движении вещества мишени у облученной поверхности (рис. 1 (б)).

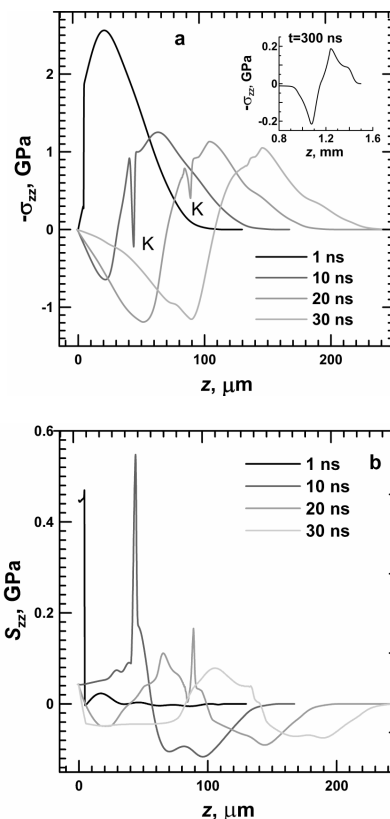


Рис. 1. Пространственное распределение напряжений в облученной медной мишени. Время облучения 20 пс

Сдвиговые напряжения в мишени превышают предел текучести более чем на порядок. Перегибы на графиках полных напряжений, помеченные буквами «К» (рис. 1 (а)), связаны с высоким уровнем сдвиговых напряжений. Максимумы значений девиаторов связаны с распространением зоны максимальной скорости деформации. Эти резкие пики являются аналогом упругого предвестника при распространении волны сжатия или площадки текучести при разгрузке вещества из сжатого состояния.

В результате действия интенсивных полей сдвиговых напряжений в мишени формируется

распределение дислокаций с четко различимым максимумом, локализованным вблизи поверхности мишени (рис. 2), вклад ударной при указанном режиме волны в рост плотности дислокаций не столь существенен. При уменьшении времени облучения до 1 нс наблюдается возрастание плотности дислокаций в максимуме распределения. Дальнейшее сокращение длительности не вызывает заметного роста плотности дислокаций в максимуме. Такой эффект соответствует характеру поведения сдвиговых напряжений, ответственных за пластическое течение в металле. Рост плотности дислокации ведет к увеличению предела текучести материала, и, следовательно, повышению его твердости.

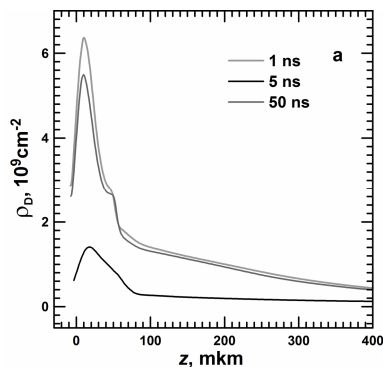


Рис. 2. Пространственное распределение плотности дислокаций в медной мишени на момент времени 10 мкс после облучения

Аналогичная картина формирования полей напряжений и распределения дислокаций получена при моделировании воздействия электронного пучка (20 кэВ, 800 нс, 3.3 Дж/см²) на железную мишень, здесь мишень также сохраняет твердотельное состояние. При увеличении вложенной энергии до 5.2 Дж/см² на поверхности мишени происходит плавление. В режиме облучения без плавления образуется распределение микротвердости с одним максимумом вблизи поверхности мишени (рис. 3 (а)). В режимах с плавлением происходит отжиг дислокаций, что ведет к формированию распределения микротвердости с двумя максимумами (рис. 3 (б)). Здесь результаты наших расчетов совпадают с данными эксперимента [2] лишь качественно. Второй максимум микротвердости в расчетах локализуется на границе расплав - твердое тело, хорошо известно что высокоскоростное (по нашим оценкам ~ 10⁸ К/с) охлаждение расплава металла ведет к образованию мелкозернистого материала с повышенной твердостью, этот эффект в нашей работе не учтен. Микротвердость вблизи поверхности мишени также зависит от остаточных напряжений, формируемых в мишени.

Повышение мощности пучка, в конечном счете, приводит к формированию плазменного факела, разлетающегося с облучаемой поверхности. В таком режиме облучения генерируемая ударная волна имеет большую амплитуду. По результатам расчетов можно выделить две пространственные области мишени, отличающиеся друг от друга с точки зрения действующих механизмов

генерации дислокаций. В первой области (в приповерхностном слое) основную роль играют термоупругие напряжения, возникающие при нагреве и остывании мишени. Во второй, относительно холодной части мишени, наработка дислокаций происходит за счет многократного прохождения ударной волны и волны разрежения, переотражающихся от свободных поверхностей.

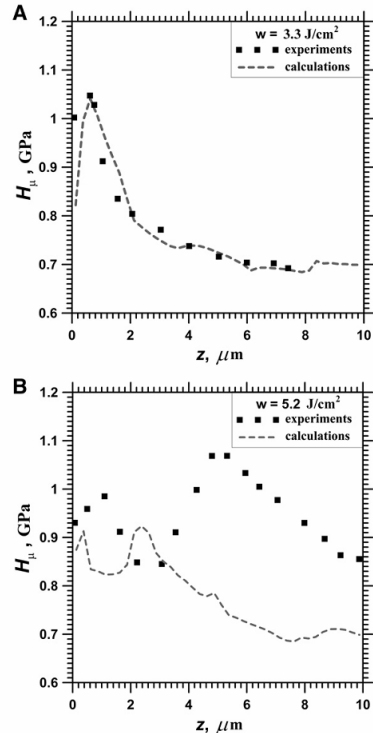


Рис. 3. Распределение микротвердости железной мишени по глубине для двух плотностей вложенной энергии

В приповерхностном слое плотность дислокаций определяется конкурирующими процессами: аннигиляцией, ускоряющейся с ростом температуры, и генерацией дислокаций, зависящей от величины сдвиговых напряжений. Поэтому модификация материала в тепловом максимуме зависит нелинейно от вложенной энергии. При малых вложенных энергиях плотность дислокаций в тепловом максимуме возрастает с ростом плотности тока вследствие увеличения термоупругих напряжений (результаты расчетов воздействия ионного пучка 50% р⁺, 50% С⁺, 0.5 MeV, 10 ÷ 2750 А·см⁻², 100 нс на алюминиевую мишень представлены на рис. 4 (а)). При достижении определенной температуры скорость наработки дислокаций сравнивается со скоростью их аннигиляции и при токе 20 А·см⁻² наблюдается максимум. Увеличение плотности тока в диапазоне 20–100 А·см⁻² ведет к снижению плотности дислокаций в тепловом максимуме вследствие преобладания аннигиляции над размножением дислокаций. При плотности тока больше 500 А·см⁻² образуется интенсивная ударная волна, напряжения в которой превышают предел текучести, и начинается наработка дислокаций

ударной волной. Это приводит к росту плотности дислокаций и в тепловом максимуме. Так же происходит резкий рост «ударного» максимума, и при достижении $2500 \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$ он становится сравним с тепловым максимумом. В рассмотренном выше случае облучения железа электронами формируется схожая немонотонная зависимость плотности дислокаций от вложенной энергии в приповерхностном максимуме (рис. 4(б)).

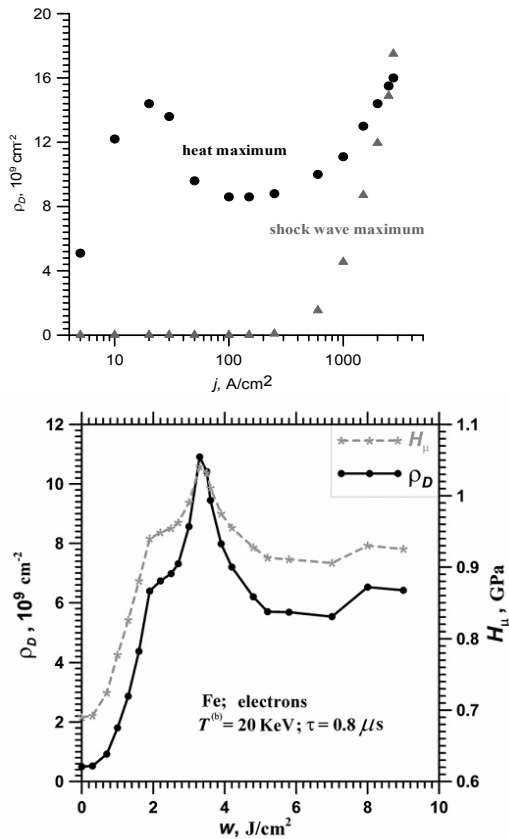


Рис. 4. Плотность дислокаций в тепловом и «ударном» максимуме в зависимости от плотности тока при ионном облучении в алюминиевой мишени (а); б - плотность дислокаций в тепловом максимуме в зависимости от плотности тока при электронном облучении в железной мишени

Воздействие плазменного потока моделировалось путем введения теплового потока на поверхность мишени. Исследование проводилось для облучения железной мишени потоками двух длительностей: 10 мкс и 100 мкс, плотность вло-

женной энергии постоянна и равна 30 Дж/см^2 . При указанных режимах ввода энергии амплитуда бегущей волны невелика ($\sim 0.5 \text{ МПа}$ при длительности 10 мкс) и основным фактором, ведущим к эволюции ансамбля дислокаций, является тепловая волна и связанные с ней напряжения, распространяющиеся вглубь мишени в результате теплопроводности. Глубина слоя, подверженного интенсивным структурным превращениям, составляет порядка 200 мкм (рис. 5) с резким максимумом, расположенным вблизи поверхности мишени на расстоянии, совпадающем с глубиной залегания расплава (18-20 мкм). Его формирование связано с уничтожением дислокаций во время плавления.

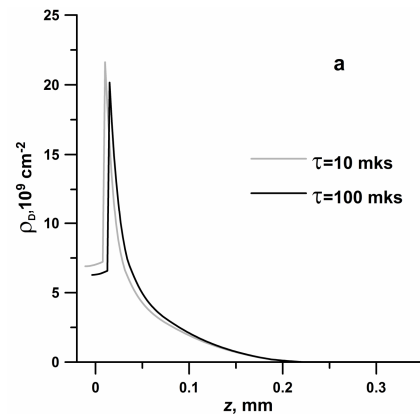


Рис. 5. Плотность дислокаций в железной мишени после облучения плазменным потоком

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке ФГБОУ ВПО «ЮУрГУ» (НИУ) в рамках государственных заданий Министерства образования и науки (№ 2012043-Г304, № 2012060-Г321).

Список литературы

1. Бойко В.И., Валяев А.Н., Погребняк А.Д. // УФН. - 1999. - Т. 169. - 11. - С. 1243-1271.
2. Proskurovsky D.I., Rotshtein V.P., Ozur G.E., and etc. // Surf. Coat. Tech. - 2000. - Vol. 125. - P. 49-56.
3. Погребняк А.Д., Кульментьева О.П. // Физическая инженерия поверхности. - 2003. - Т. 1-2. - С. 108-136.
4. Krasnikov V.S., Mayer A.E., Yalovets A.P. // Int. J. Plasticity. - 2011. - Vol. 27. - P. 1294-1308.

THE FORMATION OF STRESS AND PLASTICITY FIELDS UNDER ENERGY FLOWS TREATMENT

V.S. Krasnikov¹), A.P. Yalovets¹), A.E. Mayer²)

¹)South-Ural State University, Physical Department

Lenina 76, Chelyabinsk 454080, Russia, e-mail: vas.krasnikov@gmail.com

²)Chelyabinsk State University, Physical Department

Br. Kashirinikh str., 129, Chelyabinsk 454001, Russia, e-mail: mayer@csu.ru

In the paper the modeling results of the stress and plasticity fields generation under irradiation by electrons, ions and plasma are carried out.