

МЕХАНИЗМЫ МОДИФИКАЦИИ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ИНТЕНСИВНЫХ ПОТОКОВ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ И ПЛАЗМЫ

А.П. Яловец¹⁾, В.М. Асташинский²⁾, В.С. Красников¹⁾, А.Я. Лейви¹⁾, Н.Н. Черенда³⁾, В.В. Углов³⁾

¹⁾Южно-Уральский государственный университет (НИУ),

пр. Ленина 76, Челябинск, 454080, Россия, e-mail: yalovets.alex@rambler.ru

²⁾Институт тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАН Беларуси
Минск, 220072, Беларусь, e-mail: ast@imaph.bas-net.by

³⁾Белорусский государственный университет,
пр. Независимости 4, Минск, 220030, Беларусь, e-mail: Cherenda@bsu.by

В работе представлены результаты экспериментальных и теоретических исследований по взаимодействию потоков заряженных частиц и компрессионных плазменных потоков (КПП) с веществом. Исследования направлены на изучение механизмов модификации свойств материалов при обработке интенсивными потоками энергии.

Введение

Обработка ускоренными заряженными частицами или потоками плазмы является одним из перспективных методов улучшения эксплуатационных характеристик различного рода материалов. Быстрый ввод энергии в вещество мишени вызывает протекание в нем интенсивных тепловых и деформационных процессов, приводящих к изменению рельефа облучаемой поверхности, структуры и фазового состава материала мишени. Эти процессы могут сопровождаться увеличением прочности, износостойкости и эрозионной устойчивости материала.

К настоящему времени накоплен огромный эмпирический материал по данной проблеме, обобщение которого приводится в [1, 2]. За последнее десятилетие достигнуты значительные успехи и в теоретических исследованиях, которые позволили объяснить экспериментально наблюдающиеся эффекты, причем разработанные модели взаимодействия интенсивных потоков энергии с веществом дают не только качественное объяснение, но количественные характеристики, соответствующие экспериментально определенным.

Целью данной работы является обобщение результатов теоретических и экспериментальных исследований взаимодействия интенсивных потоков энергии с веществом.

Энергопоглощение

Радиационный эффект в облучаемом материале определяется в первую очередь функцией энерговыделения $D(\vec{r}, t)$, представляющей собой поглощенную энергию в единице объема в единицу времени.

Сравним эти функции для случаев электронного, ионного и плазменного облучения.

На рис.1 а приведены распределения функций энерговыделения в меди, нормированные на плотность тока пучка 100 A/cm^2 при различных энергиях частиц (индексы "e" - электроны, "p" - протоны, "p+C" - смешанный пучок 30% протонов и 70% ионов углерода). Из рисунка видно, что ширина зоны энерговыделения определяется

пробоем частиц в материале мишени. Увеличение энергии частиц приводит, главным образом, к увеличению облучаемого объема среды, но при этом мало меняется мощность энерговыделения.

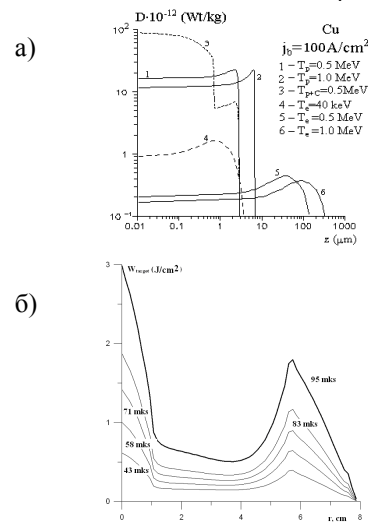


Рис. 1. а) Распределение функций энерговыделения в меди при различных энергиях частиц, б) Радиальное распределение плотности энергии на поверхности мишени в различные моменты времени при облучении гелиевой плазмой с начальной скоростью $v_0 = 10^4 \text{ м/с}$, температурой $T_0 = 1 \text{ эВ}$ и плотностью $\rho = 0,1 \rho_0$, где $\rho_0 = 1,78 \cdot 10^{-4} \text{ г/см}^3$ – плотность при нормальных условиях

С точки зрения функции энерговыделения плазменные потоки, в отличие от электронных и ионных пучков, являются не объемным, а поверхностным источником энергии [3]. На рис. 1б. представлено радиальное распределение плотности энергии на поверхности мишени в различные моменты времени при облучении гелиевой плазмой. Расчеты проведены по модели описанной в [3].

Режимы облучения

Облучение твердотельной мишени интенсивным потоком ускоренных заряженных частиц с плотностью мощности $\geq 10^6 \text{ Вт/см}^2$ приводит к сильному разогреву поверхностного слоя, что может сопровождаться его плавлением и испаре-

нием. По поведению вещества мишени можно выделить два режима облучения: докритический и закритический.

При докритическом режиме облучения вещество мишени испытывая тепловое расширение остается в твердом состоянии или же переходит в жидкое состояние. При этом скорость движения поверхности мишени достигает нескольких м/с; ускорение обусловлено либо изменением мощности потока энергии пучка, либо фазовыми переходами и составляет $10^5 \div 10^8$ м/с².

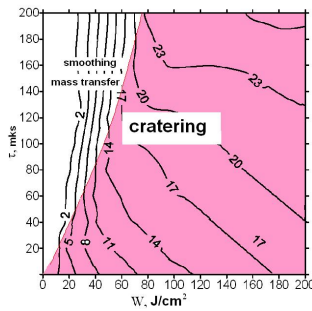


Рис. 2. Зависимость толщины расплава (в мкм) от плотности поглощенной энергии W и времени воздействия плазменного потока

При закритическом режиме облучения происходит формирование плазменного факела и его последующий разлет. Скорость свободной поверхности факела достигает более 10^3 м/с, ускорение — $10^9 \div 10^{11}$ м/с². Переход от докритического к закритическому режиму носит пороговый характер.

Качественно различный характер движения облучаемой среды при докритическом и закритическом режимах облучения определяет спектр происходящих в веществе динамических процессов. На рис. 2. представлены результаты численных расчетов зависимости толщины расплава от плотности поглощенной энергии W и времени воздействия плазменного потока.

Динамические явления

Сглаживание поверхности. При облучении твердотельной мишени с возмущенной (шероховатой) поверхностью в приповерхностном слое мишени возникают дополнительные (возмущенные) по сравнению со случаем облучения плоской поверхности поля напряжений и деформаций [4]. Характер возмущенных деформаций таков, что они стремятся уменьшить шероховатость поверхности.

После плавления включается гидродинамический механизм сглаживания. Динамика поверхности мишени определяется суммой сил поверхностного натяжения, сил инерции, вызванных ускоренным движением поверхностного слоя мишени, и вязких сил. Под действием сил поверхностного натяжения возмущенная поверхность мишени начинает испытывать колебания (капиллярные волны). Наличие вязких сил приводит к диссипации энергии колебаний и к их затуханию, в ре-

зультате чего амплитуда шероховатостей уменьшается [5].

Кратерообразование. В работе [4] показано, что образование кратеров при облучении есть результат развития неустойчивости тейлоровского типа на облучаемой поверхности мишени. Условия развития неустойчивости на облучаемой поверхности реализуются при закритических режимах облучения, когда в результате разлета плазменного факела в среде запасена большая кинетическая энергия.

При воздействии на поверхность мишени плазменного потока кроме указанных механизмов, определяющих изменение ее рельефа, имеет место развитие неустойчивости Кельвина-Гельмгольца (НКГ) [6, 7], что обусловлено формированием радиального течения плазмы при ее торможении на обрабатываемой поверхности. В результате поверхность характеризуется волнообразной структурой рельефа, гребни волн вытянуты в направлении радиального разлета плазменного потока вдоль поверхности мишени.

Массоперенос. Можно выделить несколько возможных механизмов массопереноса: диффузия, неустойчивость Релея-Тейлора и конвекция. Оценки толщины зоны перемешивания, вызванного термостимулированной диффузией в течение времени облучения, дают значения порядка 1 мкм. Следовательно, данный механизм массопереноса играет важную роль при облучении тонких (менее 1 мкм) пленок. В экспериментах [8, 9] толщина зоны перемешивания достигает нескольких десятков мкм.

В работе [10] было показано, что развитие неустойчивости Релея-Тейлора контактной границы может приводить к перемешиванию приповерхностных слоев мишени только в случае возмущений поверхности мишени, соответствующих определенному диапазону волновых чисел, который в свою очередь определяется режимом облучения. Поэтому для реализации данного механизма перемешивания требуется специальная подготовка поверхности, что является сложной задачей.

Если облучаемый объем мишени переходит в жидкое состояние, а температурный градиент направлен от облучаемой поверхности вглубь мишени, то возможно развитие термокапиллярной неустойчивости [10]. При неоднородном распределении температуры на поверхности более горячие области расплава за счет термокапиллярных сил растекаются вдоль нее. Это вызывает, в силу неразрывности жидкости, приток из глубины мишени новых более нагретых элементов жидкости. Таким образом, термокапиллярные силы при наличии температурного градиента, направленного вглубь мишени, могут вызвать развитие температурного возмущения вдоль поверхности.

Исследование массопереноса при плазменной обработке показало, что развитие НКГ и другие возмущения профиля поверхности создают условия для развития сдвиговой термокапиллярной неустойчивости. Толщина об-

ласти перемешивания может достигать нескольких мкм, она ограничена толщиной расплава.

Структурные превращения и остаточные напряжения. К основным процессам, обуславливающим модификацию структуры приповерхностного слоя относят: интенсивную пластическую деформацию; высокоскоростное охлаждение расплава, сопровождающееся образованием мелкодисперсных зерен; формирование остаточных напряжений вблизи поверхности мишени.

В работе [11] проведено исследование изменения микротвердости железной мишени, увеличивающейся за счет пластической деформации материала при электронном облучении (20 кэВ, 800 нс) различной мощности. В режиме облучения без плавления образуется распределение микротвердости с одним максимумом вблизи поверхности мишени. В режимах с плавлением происходит отжиг дислокаций, что ведет к формированию распределения микротвердости с двумя максимумами. Здесь результаты наших расчетов совпадают с данными эксперимента лишь качественно. Второй максимум микротвердости в расчетах локализуется на границе расплав - твердое тело. Хорошо известно что высокоскоростное (по нашим оценкам $\sim 10^8$ 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. В результате плавления вещества мишени девиаторные напряжения в ней релаксируют до нуля и при дальнейшем охлаждении опускаются в отрицательную область (рис. 3).

Заключение

В докладе сформулированы основные принципы физико-математических моделей, описывающих взаимодействие интенсивных потоков заряженных частиц и плазмы с веществом, приводящее к модификации свойств поверхностного слоя.

Благодарности

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (проект № 10-08-00251-а) и научно-исследовательской работы ФГБОУ ВПО «ЮУрГУ»

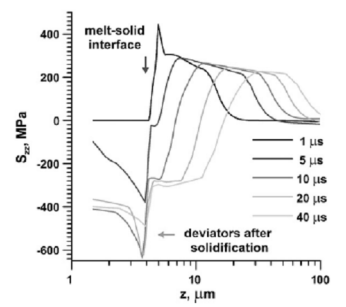


Рис. 3. Распределение девиаторов в железной мишени в режиме облучения с плавлением

(НИУ) проводимой в рамках государственного задания Министерства образования и науки РФ (№ 2012043-Г304).

Список литературы

1. Materials Surface Processing by Directed Energy Techniques. Edited by Y. Pauleau // Elsevier. – 2006. – 722 p.
2. Углов В.В., Черенда Н.Н., Анищик В.М., Асташинский В.М., Квасов Н.Т. // Минск: БГУ, 2013. – 248 с.
3. Leyvi A.Ya., Talala K.A., Yalovets A.P. // Proceedings CMM-2010 -Tomsk. - P. 173-176.
4. Красников В.С., Лейви А.Я., Майер А.Е., Яловец А.П. // ЖТФ. – 2007. – Т. 77, в.4. - С. 41-49.
5. Черенда Н.Н., Квасницкий В.В., Углов В.В., Баран Л.В., Гусакова С.В., Асташинский В.М., Кузьмицкий А.М. // Вакуумная техника и технология. - Т. 22, № 1. – 2012. - С. 57-64.
6. Асташинский В.М., Лейви А.Я., Талала К.А., Углов В.В., Черенда Н.Н., Яловец А.П. // Поверхность. – 2013. (принята к печати).
7. Leyvi A.Ya., Astashynski V.M., Zotova M.Yu., Cherenda N.N., Uglov V.V., Yalovets A.P. // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2012. – Т. 55. –В.12/2. – С. 196-199.
8. Углов В.В., Шиманский В.И., Черенда Н.Н., Асташинский В.М., Квасов Н.Т. // Физика и химия обработки материалов. – 2012. - №6. - С. 31-39.
9. Rotshtein V.P., Markov A.B., Ivanov Yu.F., and etc. // Proceedings CMM - 2004, Tomsk, Изд. ТПУ, 2004. - P. 258.
10. Волков Н.Б., Лейви А.Я., Талала К.А., Яловец А.П. // ЖТФ. - 2010. - Т. 80, в.4. - С. 52-58.
11. Krasnikov V.S., A.E. Mayer. // Surface and Coatings Technology. – 2012. – Vol. 212.- P. 79–87.

MECHANISMS OF MATERIALS PROPERTIES MODIFICATION UNDER THE ACTION OF HIGH-INTENSITY CHARGED PARTICLES AND PLASMA FLOWS

A.P. Yalovets¹), V.M. Astashynski²), V.S. Krasnikov¹), A.Ya. Leyvi¹), N.N. Cherenda³), V.V. Uglov³)

¹South-Ural State University, Lenina 76, Chelyabinsk 454080, Russia, e-mail: yalovets.alex@rambler.ru

²B.I. Stepanov Institute of Physics, National Academy of Sciences of Belarus, ast@imaph.bas-net.by

³Belarusian State University, 4, Nezavisimosti ave., Minsk, 220030, Belarus e-mail: Cherenda@bsu.by

Experimental and theoretical results on investigations of interaction of charged particles and compression plasma flows with substances are presented in this work. These investigations were carried out to reveal the main mechanisms of materials properties modification by treatment with intense energy flows.