

Степанова Ольга Михайловна

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВОЙ ЭРОЗИИ ПОВЕРХНОСТИ
ТВЁРДОГО ТЕЛА ПОД ДЕЙСТВИЕМ МОЩНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ
ПУЧКОВ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ**

Специальность 01.04.07. – физика конденсированного состояния

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени кандидата
физико-математических наук

Работа выполнена в ГОУ ВПО «Томский политехнический университет», г. Томск.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор
Кривобоков Валерий Павлович.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Смирнов Серафим Всеволодович,

доктор физико-математических наук, профессор
Шаркеев Юрий Петрович.

Ведущая организация: **Институт теплофизики СО РАН,**
г. Новосибирск.

Защита состоится **9 декабря 2009 г. в 16:00 часов** на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.269.02 при Томском политехническом университете по адресу: г. Томск, пр. Ленина, 30.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Томского политехнического университета по адресу: г. Томск, ул. Белинского, 55.

Автореферат разослан _____ 2009 г.

Учёный секретарь диссертационного совета,
доктор физико-математических наук

Коровкин М.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Методы обработки твёрдых тел с помощью пучков заряженных частиц являются перспективным направлением в радиационном материаловедении. Заметное место среди них занимают технологии, построенные на использовании эффекта эрозии поверхности.

Попадая в конденсированное вещество, ускоренная частица теряет свою энергию в результате столкновений с атомами среды. При этом происходит их ионизация, возбуждение, смещение, образование радиационных дефектов, нагрев облучаемого вещества и другие эффекты. Структурно-фазовые превращения, вызванные тепловым действием пучка, регламентируются балансом энергии, т.е. интенсивностью её ввода в твёрдое тело и её потерь из системы по всем каналам диссипации (теплопроводность, фазовые превращения, испарение и т.д.).

Под термином “эрозия” здесь понимается явление разрушения поверхности твёрдого тела в результате удаления вещества в виде отдельных атомов, молекул или их соединений как в жидком, так и в твердом состояниях. В основе его лежат следующие процессы:

- радиационно-стимулированная и тепловая десорбция атомов и молекул;
- распыление атомов, расположенных на поверхности и вблизи неё;
- блистеринг (отслоение вещества мишени в результате образования куполообразных вздутий в приповерхностном слое при имплантации в них больших доз ионов слабо растворимых газов);
- испарение атомов из твёрдой фазы (сублимация);
- испарение атомов из жидкой фазы, полученной в результате плавления мишени;
- откол мишени вследствие её хрупкого разрушения;
- разбрызгивание вещества из жидкой фазы и др.

Ключевым параметром для характеристики эффективности процесса удаления вещества с поверхности мишени во время облучения является коэффициент эрозии (количество удаленных атомов на одну падающую частицу).

Не все из перечисленных выше механизмов дают значительный вклад в процесс удаления вещества с поверхности. В этом смысле при воздействии мощных импульсных пучков заряженных частиц на твёрдое тело наиболее эффективны испарение и, в значительно меньшей степени, распыление [1, 2].

Ранее было показано, что в условиях распыления поверхности пучками низкой интенсивности (когда радиационным разогревом и его последствиями можно пренебречь) коэффициенты эрозии составляют 1 – 10, а в пределе – до 10^2 атом/ион [3]. Разогрев же мишени до температуры, при которой возможно ее интенсивное испарение, позволяет удалять 10^3 – 10^4 атомов на одну падающую частицу и даже больше. Другими словами, испарение в этом случае доминирует над распылением конденсированной фазы.

Тепловая эрозия мишени на таком уровне имеет место при облучении твердого тела мощными пучками ионов и электронов в импульсном режиме. Для до-

стижения наибольшего коэффициента эрозии необходимо, чтобы основная доля энергии пучка, введенная в твердое тело, расходовалась на испарение, а не уносилась в более глубокие области в результате теплопроводности [4]. Для этого к твердому телу с его характерными физическими свойствами надо оптимально подобрать вид пучка заряженных частиц (электроны, ионы), их энергию, длительность облучения, развёртку плотности тока во времени и т.д.

Анализ литературы и опыт многих лабораторий показывают, что уже созданы ускорители или их прототипы, которые способны обеспечить режимы облучения, близкие к оптимальным. Сегодня преимущества технологий обработки поверхности в импульсном режиме в принципе понятны. Однако некоторые аспекты эрозии поверхности исследованы пока недостаточно. Особенно это относится к тепловым процессам и тепловой составляющей эмиссии атомов с поверхности при её облучении пучками нано- и микросекундного диапазонов, импульсному режиму, диапазону высоких плотностей токов, т.е. к условиям, при которых интенсивность эрозионных процессов наибольшая.

Поэтому предметом исследования данной диссертации является процесс тепловой эрозии твердого тела под действием мощных импульсных пучков заряженных частиц, т.е. эрозии в результате испарения атомов с поверхности.

Актуальность работы. Эрозионные эффекты лежат в основе ряда технологий обработки материалов, в частности: радиационной полировки, технологического травления поверхности, удаления нежелательных атомов, высокоскоростного осаждения тонких плёнок из паровой фазы, созданной пучком, и некоторых других. В последнее время достигнуты значительные успехи в создании весьма совершенных нано- и микросекундных ускорителей заряженных частиц, но технологические возможности пучков исследованы пока недостаточно.

Примером может служить радиационная полировка поверхности. Зачастую механическое сглаживание микрорельефа связано с деформированием и загрязнением поверхности обрабатываемого материала, а также с большой трудоемкостью этого процесса. Мощные импульсные пучки заряженных частиц позволяют быстро и без больших затрат получить поверхность с малой шероховатостью (сотые доли микрона) [5]. Несмотря на очевидные практические перспективы, теоретическое обоснование наблюдаемых эффектов пока не сделано.

Предыдущие исследования кинетики тепловых процессов в твердом теле при облучении потоком заряженных частиц показали, что наиболее эффективным способом их изучения является численное моделирование. Доказана состоятельность такого подхода и выявлены некоторые закономерности эрозионных и тепловых процессов для случаев ионного и электронного облучения материалов [4].

Слабое место более ранних публикаций заключается в том, что в них отсутствует последовательное и детальное исследование закономерностей тепловой эрозии при облучении в импульсном режиме. Другим их недостатком является то, что расчеты выполнены в одномерном приближении. Такая постановка задачи не позволяет учитывать микрорельеф поверхности. Для выявления возможностей

пучков заряженных частиц и определения их параметров в технологиях полировки необходимо построение двумерной модели тепловой эрозии.

Целью настоящей работы является систематическое исследование процесса тепловой эрозии поверхности материалов (преимущественно металлов) под действием мощных ионных и электронных пучков длительностью $10^{-8} \dots 10^{-6}$ с, а также изучение их технологических возможностей и выявление роли испарения в сглаживании поверхностного рельефа при радиационной полировке. Для достижения поставленной цели было необходимо решить следующие задачи:

- 1) обобщить и развить модельные представления об эрозии поверхности материалов в результате испарения при облучении мощным импульсным пучком заряженных частиц;
- 2) разработать методику оптимизации параметров пучков для обеспечения максимальных коэффициентов эрозии;
- 3) выполнить систематическое исследование тепловой эрозии различных материалов и провести анализ полученных данных;
- 4) построить модель тепловой эрозии микровыступа на поверхности твёрдого тела под действием мощных импульсных пучков заряженных частиц, оценить их технологические возможности для полировки поверхности материалов по механизму испарения.

Научная новизна. Впервые разработана математическая модель испарения микровыступа на поверхности твёрдого тела. Выполнено первое систематическое исследование эрозии различных материалов при облучении поверхности твёрдого тела в импульсном режиме. Расчётным путём доказано, что в таких условиях под действием ионов возможен рост коэффициента эрозии на 3 – 4 порядка по сравнению с режимом классического распыления при умеренной плотности тока. Показана возможность достижения значительных коэффициентов эрозии при облучении поверхности электронами в импульсном режиме. Предложен механизм радиационного сглаживания микрорельефа поверхности, основанный на испарении, выявлена его роль в технологиях радиационной полировки материалов. Определены параметры пучков, близкие к оптимальным, и режимы облучения, при которых вклад испарения в снижение шероховатости поверхности наиболее значителен.

Практическая значимость. Исследованы технологические возможности мощных импульсных электронных и ионных пучков для эрозионной обработки поверхности твёрдых тел. Они расширяют наши знания о механизмах эрозии под действием заряженных частиц, способствуют дальнейшему развитию модельных представлений о ней и позволяют повысить эффективность разработки новых технологий. Предложенная модель тепловой эрозии микровыступа на поверхности твёрдого тела может быть использована при прогнозировании результатов импульсной обработки материалов ионами и электронами, а также выбора оптимальных параметров пучка.

Достоверность полученных результатов подтверждается физической

обоснованностью подходов к математическому моделированию тепловых процессов на поверхности мишени под действием импульсных пучков заряженных частиц, взаимосвязью рассматриваемых физических явлений, непротиворечивостью полученных результатов.

Результаты расчётов испарения выступа на поверхности металлической мишени хорошо согласуются с данными об изменении её шероховатости, полученными экспериментально.

Личный вклад автора состоит в разработке алгоритма расчетов, проведении численных экспериментов, обработке данных и установлении характерных особенностей тепловой эрозии поверхности твёрдого тела при импульсном облучении ионами и электронами. Автором получены все представленные в работе результаты по исследованию тепловой эрозии микровыступов на поверхности, определены параметры пучков и режимы облучения для наиболее эффективного испарения мишени, сформулированы выводы по результатам работы.

Научные положения, выносимые на защиту.

1. Доминирующим механизмом эрозии поверхности твёрдого тела под действием мощных субмикросекундных ионных пучков ($P \sim 10^6 \dots 10^8$ Вт/см², $\tau \sim 10^{-8} \dots 10^{-6}$ с, $E_0 = 0,1 \dots 1$ МэВ) является испарение, или тепловая эрозия. Значения её коэффициентов составляют $\sim 10^3 \dots 10^5$ атомов на ион. Толщина испарившегося слоя по порядку величины близка к длине проективного пробега ионов в данной среде.

2. Максимально возможные коэффициенты тепловой эрозии под действием мощного субмикросекундного электронного пучка ($P \sim 10^7 \dots 10^9$ Вт/см², $\tau \sim 10^{-7} \dots 10^{-6}$ с, $E_0 = 10 \dots 700$ кэВ) достигают значений $\sim 10^4 \dots 10^5$ атом/электрон.

3. Разработанная двумерная модель тепловой эрозии микровыступа на поверхности твёрдого тела, в основе которой лежит уравнение теплопроводности, записанное с учётом потерь тепла на фазовые переходы, описывает эволюцию рельефа мишени вследствие испарения.

4. Сглаживание поверхности по механизму тепловой эрозии имеет место при преимущественном испарении вершин выступов по сравнению со впадинами рельефа. При этом толщина слоя, охваченного фазовыми превращениями, должна быть меньше высоты неровностей.

Апробация работы. Основные результаты были доложены и обсуждены на следующих конференциях: 13th International Conference on Radiation Physics and Chemistry of Inorganic Materials, 10 – 15 сентября 2006 г., г. Томск; Седьмом Международном Уральском Семинаре «Радиационная физика металлов и сплавов», 25 февраля – 3 марта 2007 г., г. Снежинск; 11-ой Московской Международной Школе Физики ИТЭФ «Фундаментальные основы ядерных энерготехнологий нового поколения», 16 – 23 февраля 2008 г., г. Москва; XXIII Международной конференции «Уравнения состояния вещества», 1 – 6 марта 2008 г., республика Кабардино-Балкария, п. Эльбрус; 9th International Conference on Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows, 21 – 26 сентября 2008 г., г. Томск;

19-ой Международной конференции «Взаимодействие ионов с поверхностью», 21 – 25 августа 2009 г., г. Звенигород Московской обл.; научных семинарах лаборатории 23 НИИ ядерной физики ТПУ.

Публикации. Основные результаты работы по теме диссертации опубликованы в виде четырех журнальных статей (три из них – в журналах, рекомендованных ВАК) и тезисов 8 докладов в сборниках трудов российских и международных конференций.

Структура, объем и содержание работы. Диссертация состоит из введения, трёх глав, заключения и списка литературы. Общий объём работы составляет 116 страниц, в том числе 63 рисунка, 4 таблицы и список литературы из 115 наименований.

Во **введении** приведены общая характеристика работы и защищаемые положения.

Первая глава посвящена обзору различных аспектов эрозии твёрдого тела под действием пучков заряженных частиц, потоков плазмы и лазерного излучения.

Выделены три механизма эрозии: радиационный (распыление), тепловой (нагрев с последующим испарением) и механический (откольные повреждения). Технологии, основанные на удалении атомов с поверхности мишени (напыление тонких плёнок, очистка поверхности от загрязнений, ионное фрезерование и др.), в большинстве своём построены на радиационном и тепловом механизмах эрозии. Использование импульсных пучков позволяет увеличивать плотность потока энергии, вводимой в твёрдое тело. Благодаря уменьшению времени облучения снижается влияние теплопроводности мишени, поэтому эрозии подвергается лишь тонкий поверхностный слой без каких-либо тепловых повреждений объёмных областей материала.

При этом полный поток эмитируемого вещества для случая облучения ионами складывается из распылённых частиц и частиц, покинувших поверхность в результате испарения.

Распыление поверхности твёрдого тела является основным механизмом эрозии для режима облучения ионными пучками, при котором удаление атомов происходит из твёрдой фазы. Это явление к настоящему моменту хорошо изучено, накоплен большой объём информации о коэффициентах распыления различных веществ ионами разных масс и энергий. Однако вопросу температурной зависимости выхода атомов с поверхности в результате облучения уделено недостаточно внимания. Так как этот момент является не маловажным для решаемой здесь задачи, в п. 1.2 рассмотрена зависимость коэффициента распыления от температуры для ряда металлов. Заметное влияние температуры на коэффициент распыления проявляется только в режиме “тепловых” пиков (при $T \sim T_{melt}$), когда процесс эмиссии описывается как активационное испарение. В этих условиях значение выхода распыленных атомов может составлять до $\sim 10^2$ на один падающий ион.

С увеличением плотности мощности падающего потока до $10^5 - 10^9$ Вт/см² определяющей становится тепловая эрозия, которая связана с нагревом твердого тела вплоть до его испарения. Механизмам испарения посвящена значительная часть главы 1. Подробно представлены гидродинамическая модель эрозии мишени под действием пучка высокой интенсивности и двухфазная модель испарения, описывающая тепловую эрозию твёрдого тела при облучении пучком умеренной интенсивности, когда плотность вещества меняется незначительно и её изменениями пренебрегают.

Выполнена постановка задачи тепловой эрозии мишени в приближении существования кнудсеновского слоя (прилегающей к поверхности, паровой области, характеризующейся иными температурой $\bar{T}$, плотностью вещества $\bar{\rho}$ и массовой скоростью потока $\bar{u}$). В её основе лежит уравнение теплопроводности, записанное через тепловую составляющую внутренней энергии вещества E_T :

$$\frac{d}{dt}E_T(\vec{r}, t) = \lambda \cdot \Delta T(\vec{r}, t) + W(\vec{r}, t), \quad (1)$$

где T – температура, λ – коэффициент теплопроводности, $W(\vec{r}, t)$ – функция энерговыделения, определяемая кинетикой изменения плотности тока $j(t)$ и пространственным распределением линейных потерь энергии ускоренных заряженных частиц в веществе $Q(\vec{r})$.

Такая запись уравнения позволяет учитывать затраты тепла на плавление. При этом температуру находят из следующих соотношений:

$$T(\vec{r}, t) = \begin{cases} \frac{E_T(\vec{r}, t)}{c\rho}, & E_T(\vec{r}, t) < E_1; \\ T_{melt} + \frac{E_T(\vec{r}, t) - E_2}{c\rho}, & E_T(\vec{r}, t) > E_2; \\ T_{melt}, & E_1 \leq E_T(\vec{r}, t) \leq E_2. \end{cases} \quad (2)$$

Здесь $E_1 = T_{melt}c\rho$, $E_2 = E_1 + q_{melt}\rho$, c , ρ – удельная теплоемкость и плотность вещества мишени; T_{melt} , q_{melt} – температура и удельная теплота плавления соответственно.

В начальный момент времени температура равна T_0 :

$$T(\vec{r}, 0) = T_0. \quad (3)$$

Обратная сторона мишени в течение всего времени эксперимента теплоизолирована:

$$\lambda \cdot \nabla T(\vec{r}, t) = 0. \quad (4)$$

На поверхности тепловой поток определяется скоростью фронта испарения:

$$\lambda \cdot \nabla T(\vec{r}, t) = \rho V_f \Delta H, \quad (5)$$

где V_f – скорость фронта испарения, рассчитанная согласно двухфазной модели испарения, ΔH – разность удельных энтальпий твердой и газообразной фаз.

Условие (5) согласно двухфазной модели испарения с кнудсеновским слоем соответствует выражению:

$$\lambda \cdot \nabla T(\vec{r}, t) = V_f \cdot \rho_0 \cdot (L_0 + \frac{R}{\mu} \cdot [\frac{5}{2}\bar{T} - 3T_0]), \quad (6)$$

Для определения скорости фронта испарения V_f решают комплекс уравнений, включающий в себя законы сохранения массы и импульса, а также выражения для параметров кнудсеновского слоя:

$$\rho_0 \cdot V_f = \bar{\rho} \cdot (V_f - \bar{u}), \quad (7)$$

$$P_0 + \rho_0 \cdot V_f^2 = \bar{P} + \bar{\rho} \cdot (V_f - \bar{u})^2, \quad (8)$$

$$\bar{T} = 0.65T_0, \quad (9)$$

$$\bar{\rho} = 0.31\hat{\rho}, \quad (10)$$

$$\hat{\rho} = (\frac{mk\Theta_0^2}{2\pi\hbar^2T_0})^{3/2} \exp(-\frac{\lambda_1}{kT_0} - 1), \quad (11)$$

$$\bar{P} = \frac{\bar{\rho}}{\mu} \cdot R \cdot \bar{T}, \quad (12)$$

$$\bar{u} = (\frac{5k\bar{T}}{3m})^{\frac{1}{2}}. \quad (13)$$

Здесь $\bar{u}$ – массовая скорость паров на границе разрыва ($\bar{u} < 0$), ρ_0 , P_0 и T_0 – плотность, давление и температура конденсированной фазы, $\bar{\rho}$, $\bar{P}$ и $\bar{T}$ – плотность, давление паров и температура на границе разрыва, μ – молярная масса, R – универсальная газовая постоянная, ρ – плотность насыщенного пара, $\Theta_0 = (\hbar\nu_0)/k$ – дебаевская температура, ν_0 – эффективная дебаевская частота колебаний атомов, k – постоянная Больцмана, λ_1 – энергия связи кристаллической решетки, $\hbar = 2\pi\hbar$ – постоянная Планка, m – масса атома мишени.

Данная задача решалась как в одномерном (для расчета температурных полей и параметров тепловой эрозии различных материалов), так и в двумерном приближениях с движущейся со скоростью V_f границей раздела между конденсированной и паровой фазами. Разработка двумерной модели обусловлена необходимостью учёта рельефа мишени для выявления роли испарения в технологиях полировки материалов и изделий.

Выполнен литературный обзор по изменению морфологии мишени в результате облучения потоками заряженных частиц. Сделана постановка задачи тепловой эрозии микровыступа на поверхности твёрдого тела под действием мощных импульсных ионных и электронных пучков. Её целесообразно решать в цилиндрической системе координат с осевой симметрией.

Область моделирования и граничные условия задаются для микровыступа на поверхности мишени, высота которого H_{peak} соответствует параметру шероховатости реальной поверхности R_z . На рис. 1 H – толщина образца, H_{peak} – высота выступа на поверхности, S_{peak} – его полуширина.

Входными данными к задаче тепловой эрозии твёрдого тела являются параметры пучка (распределение потерь энергии заряженной частицей по глубине мишени $Q(x)$, временная развёртка импульса тока $j(t)$, максимальное значение его плотности J и длительность импульса τ) и мишени (её теплофизические характеристики).

Вторая глава представляет собой анализ полученных автором данных по расчетам эрозии, обусловленной испарением, в одномерном приближении. Исследование выполнено для случаев импульсного ионного и электронного облучения материалов с различными теплофизическими свойствами.

Задача описания тепловой эрозии состоит в определении функции энерговыделения $W(\vec{r}, t)$ (см. уравнение 1), расчета пространственно-временного поля температуры и кинетики испарения вещества с облучаемой поверхности мишени. При этом распылением поверхности в результате столкновительных процессов мы пренебрегаем.

Изложены использованные методики расчета линейных потерь энергии по глубине $Q(x)$ для ионов и электронов при торможении в веществе. Представлено описание функции $Q(x)$ для ионов разных масс и энергий. Исследовано влияние формы профиля энерговыделения на конфигурацию тепловых полей при облучении электронами.

Выполнены расчёты основных параметров тепловой эрозии мишени: скорости фронта испарения V_f , толщины испарившегося слоя Z_{evap} и коэффициента эрозии D :

$$Z_{evap} = \int_0^{t_{evap}} V_f(t) dt, \quad (14)$$

$$D = \frac{(\int_0^{t_{evap}} V_f(t) dt) e N}{\int_0^\tau j(t) dt}. \quad (15)$$

Здесь N – ядерная плотность вещества мишени, e – заряд электрона, t_{evap} – время, в течение которого происходит испарение с поверхности мишени, τ – длительность импульса облучения.

Адекватность изложенных модельных представлений доказывается хорошим совпадением результатов расчета толщины испарившегося слоя с измеренной глубиной кратера [6], образовавшегося на поверхности облучённого образца (рис. 2).

Данные численного моделирования относительно экспериментальных отличаются не более чем на 15%. Заметное несовпадение результатов для меди трудно объяснимо, так как согласно теплофизическим характеристикам металлов количество удаляемого вещества с её поверхности не может быть больше, чем с по

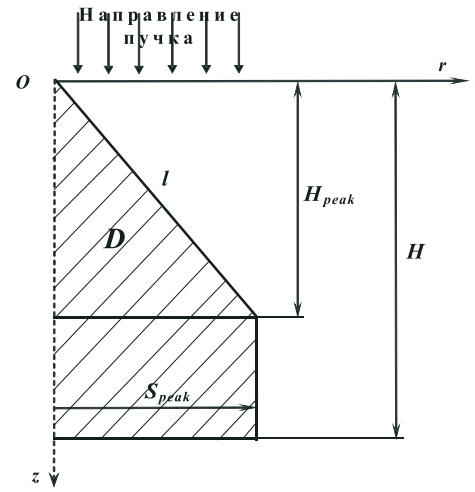


Рис. 1. Обозначение размеров области моделирования.

верхности железа (коэффициент теплопроводности: $\lambda_{Cu} = 397 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$, $\lambda_{Fe} = 73, 325 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$).

В первой части главы 2 представлены результаты расчетов коэффициента эрозии различных материалов (металлов, диэлектриков, полупроводников) под действием ионов углерода и аргона; выявлены параметры пучка для обеспечения максимально возможных коэффициентов эрозии и наиболее эффективного расходования энергии пучка на испарение. В качестве материала мишени были взяты металлы с различной плотностью и сильно отличающимися температурой плавления и теплотой испарения (рис. 3), а также для сравнения выполнен расчет для кристаллического кварца, кремния и арсенида галлия.

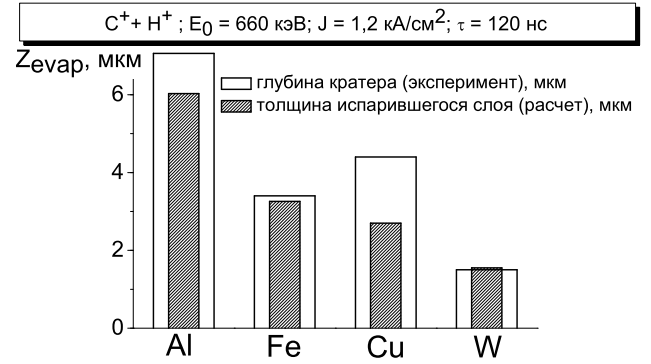


Рис. 2. Сравнение толщины испарившегося слоя металлов, рассчитанной по модели тепловой эрозии, с экспериментально полученными данными [6] о глубине кратера, образованного на поверхности мишени в результате облучения.

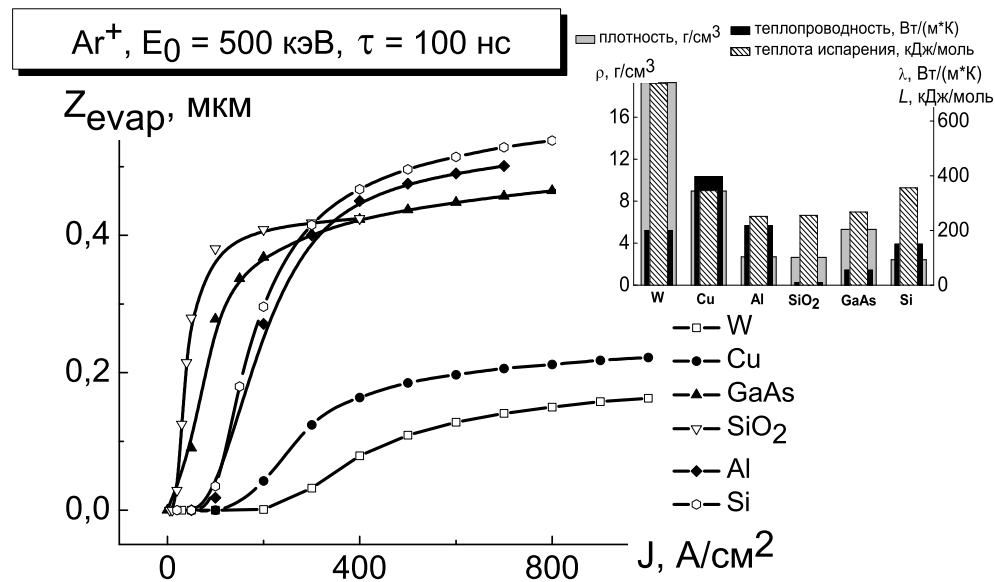


Рис. 3. Зависимость толщины испарившегося слоя от плотности тока для материалов с разными теплофизическими свойствами.

Очевидно, что количество удаляемого вещества в результате испарения зависит как от пространственного распределения линейных потерь ионов в среде (их пробегах), так и от его теплофизических свойств.

Для всех исследуемых материалов толщина удаляемого слоя в результате испарения близка к значению проективного пробега иона (рис. 3). Наибольшее количество вещества удаляется с поверхности кремния, алюминия, кварца и арсенида галлия (0,4 – 0,5 мкм), причем для всех них, кроме кремния, характерна

относительно низкая теплота испарения ($\sim 250 \dots 270$ кДж/моль). Следует отметить, что в данном случае, чтобы рассмотреть отдельно влияние плотности вещества и теплоты испарения, мы оперируем значениями в Дж/моль.

Несмотря на то, что значения теплоты испарения кремния и меди близки, количество испарившегося вещества кремния значительно выше. Это объясняется различием в плотности этих веществ: меньшая плотность материала связана с большими пробегами ионов (рис. 3), и, как следствие, с большими размерами области теплового воздействия.

Существенную роль в процессе диссипации энергии пучка играет теплопроводность конденсированной среды, и чем она выше, тем большая часть поступающей энергии уносится вглубь мишени, не приводя к испарению. Это является лимитирующим фактором для плотности тока, при которой начинается удаление атомов. Сопоставив рассчитанные параметры и характеристики исследуемых веществ, можно заметить устойчивую закономерность. Для тех материалов, у которых коэффициент теплопроводности меньше, процесс испарения начинается при меньших плотностях тока (что и объясняется низкой скоростью передачи тепла в глубинные слои мишени).

Но если отдельно рассматривать такие металлы как вольфрам и медь, то можно заметить, что для меди, несмотря на то, что её коэффициент теплопроводности практически в два раза выше, толщина испарившегося слоя больше, чем для вольфрама. Это является следствием того, что плотность последнего значительно больше.

Определить строгие закономерности влияния каждого теплофизического параметра в отдельности на эрозию вещества крайне трудно. Для каждого материала нужно рассматривать совокупность влияющих факторов. Но условно все твёрдые тела, для которых проводился расчет, можно разделить на три группы по их значению теплопроводности: W, Cu имеют наибольшие значения λ , их испарение становится заметным при $J = 100 \dots 200$ А/см². На втором месте – Al и Si с $\lambda_{Al} = 218$ Вт/(м · с) и $\lambda_{Si} = 150$ Вт/(м · с), для них граничные J близки и составляют ~ 60 А/см². Наиболее легко испаряемыми являются кварц и арсенид галлия, их кривые испарения начинают заметно расти при плотности тока около 10 А/см².

Следовательно, наибольшая эффективность ионов в удалении атомов с поверхности мишени проявляется при облучении материалов с низкой теплопроводностью. Например, выход атомов кварца D на один падающий ион в 2-4 раза выше, чем атомов металлов при тех же значениях начальной энергии E_0 (рис. 4). А максимально возможные коэффициенты эрозии D_{max} достигаются при меньших значениях плотности тока.

Расчеты для металлов показали, что D_{max} и им соответствующие плотности тока J_{max} зависят от начальной энергии частиц E_0 . С ростом E_0 величина D_{max} растет (рис. 5). Это связано с тем, что при больших значениях начальной энергии ионов их пробег и, как следствие, толщина поверхностного слоя, подвергнутого

разогреву, достаточному для испарения атомов, больше. При этом теплопроводность в течение действия импульса уносит из области энерговыведения гораздо меньшую долю тепловой энергии по сравнению со случаями, когда E_0 меньше. Это также приводит к уменьшению плотности тока J_{max} , необходимой для обеспечения D_{max} . Так, при $E_0 = (100 \dots 1000)$ кэВ она имеет значения $(100 \dots 600)$ А/см², в то время как при $E_0 \leq 100$ кэВ должна быть не менее $(600 \dots 3500)$ А/см².

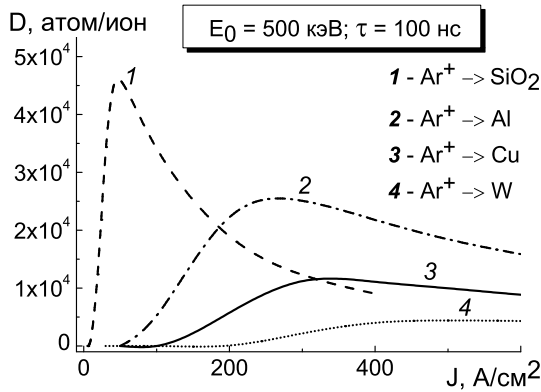


Рис. 4. Зависимость коэффициента эрозии от плотности тока для кварца и металлов.

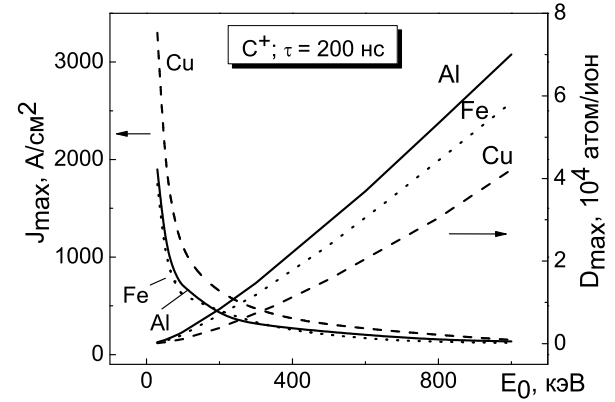


Рис. 5. Максимальные коэффициенты эрозии и соответствующие плотности тока в зависимости от начальной энергии ионов углерода.

Вторая часть главы посвящена электронному облучению металлов. Выполнены расчеты толщины расплавленного Z_{melt} и испарившегося Z_{evap} слоёв в зависимости от параметров пучка, выявлены пороговые значения плотности тока для плавления и испарения. Исследована энергетическая эффективность электронного пучка в сравнении с ионным.

Условия взаимодействия ускоренных ионов и электронов с атомами мишени различны. Благодаря меньшей массе электроны глубже проникают в материал, теряя свою энергию преимущественно в неупругих столкновениях. Этот факт исключает наличие распылительной составляющей эрозии: все удаляемые атомы покидают поверхность в результате испарения. Его интенсивность вследствие больших размеров области энерговыведения превышает интенсивность удаления вещества под действием ионов. В связи с этим электронное облучение поверхности твёрдого тела характеризуется своими особенностями.

Рассмотрены наиболее интересные с точки зрения технологического применения электронов закономерности тепловых процессов и зависимости коэффициента эрозии от параметров пучка и мишени. Основные результаты получены для микросекундных электронных пучков низких энергий (до 100 кэВ), так как они постепенно находят всё более широкое применение в поверхностной обработке металлических изделий и конструкций. Плотность энергии таких пучков варьируется от единиц до 100 Дж/см² в зависимости от длительности импульса (10^{-6}

... 10^{-5} с).

С увеличением энергии электронов граничные значения J , определяющие начало процесса испарения, уменьшаются. Так, для $E_0 = 10 \dots 20$ кэВ они изменяются в диапазоне от 250 до 150 А/см² при тепловой эрозии титана вследствие облучения электронами в течение 2 мкс (рис. 6).

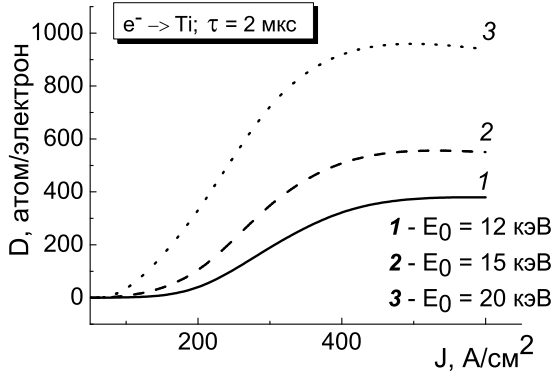


Рис. 6. Зависимость коэффициента эрозии от плотности тока пучка при различных значениях начальной энергии электронов.

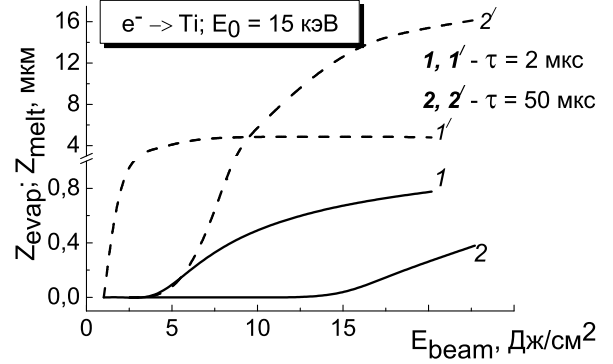


Рис. 7. Зависимость толщины расплавленного (--- кривые 1', 2') и испарившегося (— кривые 1, 2) слоёв титана при импульсном облучении электронами с энергией 15 кэВ от величины плотности потока энергии.

Существенное влияние на количество испарившегося и расплавленного вещества на поверхности мишени оказывает длительность импульса. На рис. 7 представлены зависимости Z_{melt} и Z_{evap} от плотности потока энергии E_{beam} для электронного пучка с длительностью импульса 2 мкс и 50 мкс.

При постоянном значении плотности потока энергии в области $E_{beam} \leq 20$ Дж/см² в результате короткоимпульсного облучения электронами ($\tau = 2$ мкс) плавление и испарение наступают при меньших плотностях тока, в отличие от облучения в течение 50 мкс. Причем количество испарившегося вещества при длительности импульса 2 мкс значительно выше, а толщина расплавленного слоя с увеличением плотности энергии выходит на насыщение уже при (8–10) Дж/см². В то время как при $\tau = 50$ мкс она продолжает расти и при 20 Дж/см² и более, чем в три раза превышает величину Z_{melt} , рассчитанную для пучка с длительностью импульса 2 мкс (рис. 6).

Снижение эффективности облучения для испарения поверхности с увеличением длительности импульса выявлено и под действием ионного пучка (рис. 8). Максимальное значение количества испарившихся атомов одним ионом D_{max} с ростом τ до 0,5 мкс падает как для меди, так и для кварца. При этом по мере увеличения длительности облучения для обеспечения максимальной эффективности требуемое значение плотности тока снижается.

Таким образом, при малых значениях τ тепловые процессы происходят более интенсивно, количество испарившегося вещества быстро растёт, в результате чего пары материала мишени над её поверхностью поглощают часть энергии пучка. Это препятствует распространению температурного поля вглубь образца. С увеличением длительности импульса растёт количество тепла, уносимого в результате теплопроводности, поэтому граница области теплового влияния сдвигается в глубинные слои мишени, а плотность потока энергии, выделяемая на поверхности, снижается.

Исследование режимов максимального испарения под действием электронного пучка выявило нетривиальное поведение плотности тока, соответствующей максимуму коэффициента эрозии, в зависимости от начальной энергии заряженных частиц (рис. 9). При $E_0 \leq 100$ кэВ характер зависимости плотности тока, обеспечивающей максимальное испарение, от энергии схож со случаем облучения ионами. Однако превышение $E_0 > 100$ кэВ резко меняет картину в обратную сторону: для получения максимального испарения с увеличением энергии электронов следует наращивать и плотность тока. При этом коэффициенты эрозии могут достигать $\sim 10^4 \dots 10^5$ атом/электрон.

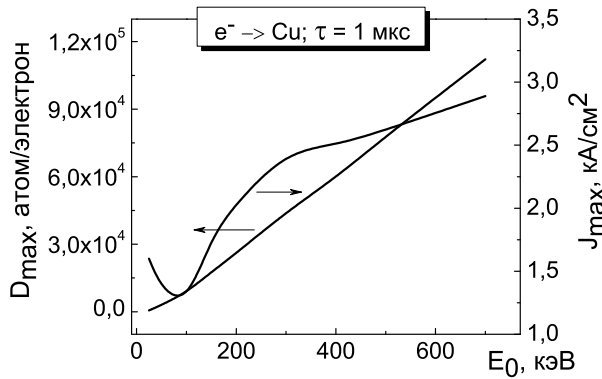


Рис. 9. Максимально возможный коэффициент эрозии и соответствующие ему плотности тока для различных начальных энергий электронов.

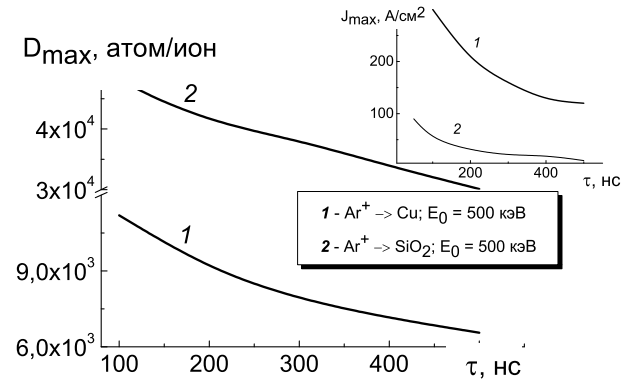


Рис. 8. Зависимость максимально возможного коэффициента эрозии от длительности импульса при облучении ионами.

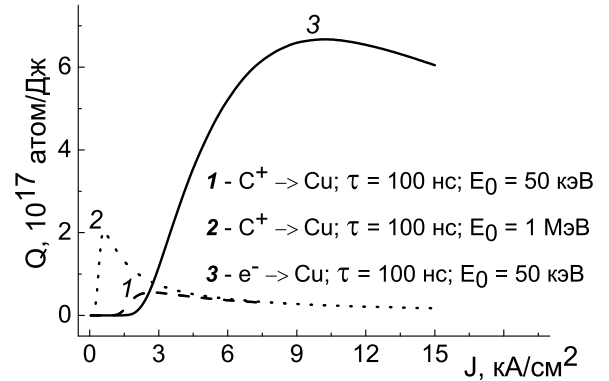


Рис. 10. Коэффициент энергетической эффективности электронного пучка в сравнении с ионным.

Выполнено сравнение возможностей ионов и электронов в технологиях травления поверхностей. Введён коэффициент энергетической эффективности пучка Q , который равен отношению числа атомов, покинувших мишень, к количеству вводимой энергии. Он характеризует эффективный энерговклад пучка в твёрдое

тело. В случае электронов его значение существенно выше, чем в случае ионов (рис. 10).

Здесь можно говорить о более слабом проявлении эффекта экранировки мишени при её испарении: доля энергии пучка, поглощаемая парами, мала по сравнению с количеством энергии, уносимой ими при ионном облучении. Это может быть связано с тем, что тепловая эрозия металлов под действием ионов протекает в течение действия импульса, и на поверхности твёрдого тела быстро образуется слой пара, способный поглотить значительную долю энергии пучка. Для электронов интенсивность испарения достигает своего максимума к концу облучения.

В конце главы представлена разработанная методика оптимизации параметров пучка для режима максимального испарения, позволяющая определить максимально возможные значения коэффициентов эрозии и соответствующие им значения плотности тока пучка.

В выводах ко второй главе выделены наиболее характерные особенности тепловых и эрозионных процессов, протекающих на поверхности твёрдого тела под действием ионов и электронов.

Для облучения ионами ($E_0 = 0,1 \dots 1$ МэВ, $P = 10^6 \dots 10^8$ Вт/см², $\tau = 10^{-8} \dots 10^{-6}$ с)

- испарение вещества мишени происходит в течение длительности импульса, и, как следствие, наблюдается ярко выраженный эффект экранирования поверхности образовавшимися парами;

- толщина удаляемого слоя в результате испарения сравнима с величиной проективного пробега иона в твёрдом теле;

- максимально возможный коэффициент эрозии линейно зависит от начальной энергии ионов, а соответствующая ему плотность тока снижается с её ростом.

Для облучения электронами ($P = 10^7 \dots 10^9$ Вт/см², $\tau = 10^{-7} \dots 10^{-6}$ с) можно выделить два диапазона энергии: до 100 кэВ и свыше 100 кэВ. При $E_0 \leq 100$ кэВ плотность тока пучка, соответствующая максимальному коэффициенту эрозии, падает с ростом энергии электронов. При $E_0 > 100$ кэВ для обеспечения режима максимального испарения с увеличением энергии плотность тока необходимо наращивать.

В отличие от тепловой эрозии под действием ионов для испарения вещества в условиях облучения электронами с $E_0 > 100$ кэВ характерно

- менее заметное влияние теплопроводности на процесс распространения тепла в мишени;

- интенсивное испарение вещества после действия облучения;

- меньшие значения доли энергии пучка, уносимой парами.

В третьей главе предложен механизм радиационной полировки поверхностей, основанный на испарении. Представляется, что одной из составляющих процесса сглаживания рельефа в условиях облучения мощными импульсными пучками заряженных частиц является преимущественное испарение вершин выступов по сравнению с долиной частью образца. Обязательным условием является то,

что толщина слоя, охваченного фазовыми превращениями, должна быть меньше высоты микронеровностей.

Для оценки технологических возможностей заряженных частиц введён коэффициент сглаживания, который характеризует способность пучка испарять преимущественно вершину микровыступа. Он определяется выражением:

$$G = \frac{Z_{\text{evap_peak}} - Z_{\text{evap_valley}}}{H_{\text{peak}}}, \quad (16)$$

где $Z_{\text{evap_peak}}$ – толщина испарившегося слоя на пике, $Z_{\text{evap_valley}}$ – толщина испарившегося слоя во впадине, H_{peak} – высота выступа (рис. 1).

В модельном описании реальная поверхность (рис. 11) представляет собой совокупность конусов разной высоты (рис. 12). Для характеристики эволюции рельефа в условиях многоимпульсного облучения используется показатель развитости поверхности:

$$R = \frac{L}{S}, \quad (17)$$

где L – длина профиля развитой поверхности; S – базовая длина поверхности. На рис. 11 m – базовая линия поверхности; в модельном представлении она совпадает с линией впадин (рис. 12).

Получены данные об изменении высоты неровностей микронного размера на поверхности металлов в условиях импульсного облучения ионами и электронами. Они свидетельствуют о нетривиальной природе процесса эволюции морфологии поверхности твёрдого тела под действием мощного импульсного пучка заряженных частиц. При соответствующем выборе условий облучения (начальной энергии частиц, плотности тока пучка и его длительности импульса) возможно сглаживание микрорельефа мишени по механизму испарения.

В главе 2 показано, что в задачах эрозионной обработки поверхностей эффективность облучения увеличивается с уменьшением длительности импульса. Поэтому в расчетах кинетики тепловой эрозии микровыступа мы постарались минимизировать продолжительность облучения, ориентируясь при этом на параметры существующих ускорителей. В наших расчетах предпочтение отдано пучкам субмикросекундного диапазона ($\tau \sim 100$ нс). Начальные энергии ионов равны от 100 кэВ до 1 МэВ.

На примере испарения микровыступов на поверхности меди под действием ионов углерода проведено численное исследование эволюции рельефа мишени в условиях облучения. Оно позволило выявить некоторые требования к пучку заряженных частиц для обеспечения наиболее эффективной обработки.

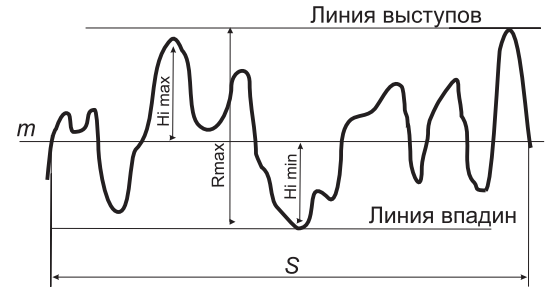


Рис. 11. Поперечный профиль поверхности в нормальном сечении.

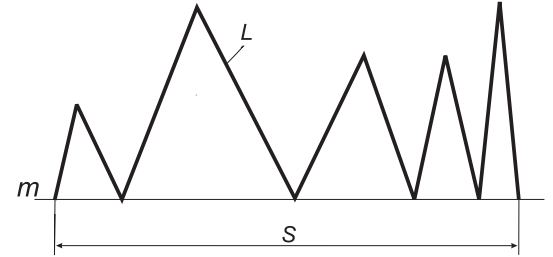


Рис. 12. Модельное представление реальной поверхности.

Во-первых, глубина энерговыведения ионов должна составлять 30 – 50 % от высоты неровностей. Ниже изложены результаты, поясняющие это требование.

В зависимости коэффициента сглаживания микровыступа G от плотности тока J наблюдается максимум (рис. 13). Его существование объясняется кинетикой испарения вещества с неровной поверхности. Для уменьшения высоты выступа необходимо, чтобы толщина испарившегося слоя с вершины пика Z_{evap_peak} превышала толщину испарившегося слоя со дна впадины Z_{evap_valley} . Выполнение условия $Z_{evap_peak} > Z_{evap_valley}$ происходит только при определенных параметрах облучения. Увеличение плотности тока приводит к более интенсивному испарению вещества по всей поверхности, т.е. скорости удаления атомов с вершины пика и со дна впадины сравниваются, и условие сглаживания выступа нарушается. Это отражается в снижении эффективности выравнивания рельефа.

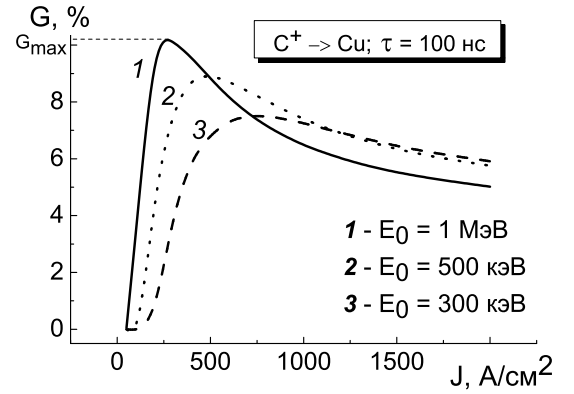


Рис. 13. Коэффициент сглаживания пика высотой 6 мкм на поверхности меди от плотности тока пучка ионов углерода.

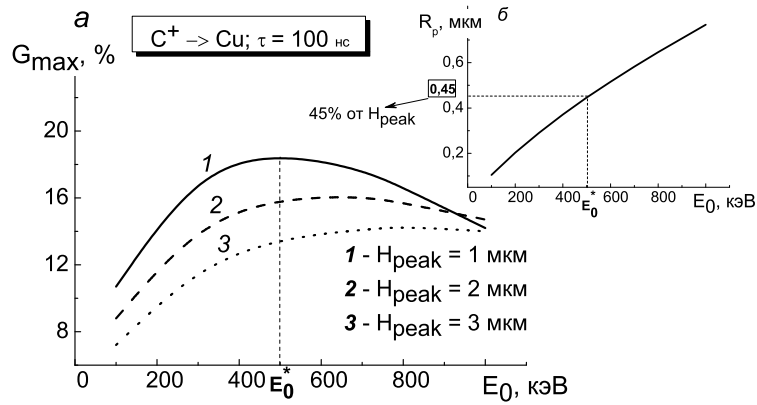


Рис. 14. Распределение максимальных значений коэффициентов сглаживания меди по энергиям ионов (а). Связь проективного пробега ионов углерода в меди с его начальной энергией (б).

Максимум в распределении наибольших коэффициентов сглаживания по энергиям ионов $G_{max}(E_0)$ соответствует наилучшим условиям для испарения вершин выступов (рис. 14). Начальная энергия иона определяет его пробег в веществе, поэтому одним из критериев выбора оптимальных условий для сглаживания является глубина проникновения заряженной частицы в мишень. Согласно результатам, представленным на рис. 14, пробег ионов должен составлять 30 – 50 % от высоты выступа. Поэтому с увеличением исходной H_{peak} для сглаживания поверхности необходимо наращивать энергию ионов.

Во-вторых, наилучшие условия сглаживания поверхности определяются соотношением энергии частиц и плотности тока пучка. Каждому значению E_0 со-

ответствует предельное значение J_b , превышение которого не отражается на результате обработки.

На рис. 15 показано уменьшение показателя развитости поверхности R (см. выражение 17) с нарастанием числа импульсов Q_{imp} . Полное сглаживание ($R \rightarrow 1$) мишени ($H_{peak} = 2$ мкм) достигается при плотностях тока 400, 600 и 1000 А/см². Причем с увеличением J от 200 до 600 А/см² скорость снижения показателя развитости растёт, но дальнейшее повышение J до 1000 А/см² не приводит к заметным изменениям в динамике уменьшения R (кривые на рис. 15 для $J = 600$ А/см² и $J = 1000$ А/см² совпадают). Следовательно, можно выделить предельное значение плотности тока J_b , превышение которого нецелесообразно.

Аналогичные расчёты выполнены для электронного пучка на примере облучения титана с выступами высотой 4 мкм (рис. 16). Отличительной особенностью электронов является их высокая проникающая способность. Размеры области теплового воздействия для значений начальных энергий более 50 кэВ достигают десятков – сотен микрометров. При этом толщина расплава может быть намного больше, чем толщина испарившегося слоя. Для того, чтобы снизить глубину проникновения электронов в материал мишени до уровня 30 ... 50 % от высоты выступа, начальная энергия частиц задавалась от 10 до 20 кэВ.

Так же, как в случае ионной полировки, можно выделить некоторое оптимальное значение энергии, соответствующее максимально эффективному испарению. А требования для наилучшего сглаживания, выявленные для ионов, справедливы и для электронного пучка.

Возможности электронов в сглаживании микрорельефа поверхности подтверждаются экспериментально. В работе [5] показано уменьшение шероховатости поверхности стали, облученной импульсным электронным пучком с энергией частиц 30 кэВ, до десятых долей микрометра. При этом авторы демонстрируют отсутствие после облучения на поверхности слоя, подверженного рекристаллизации. Это может свидетельствовать об испарении жидкой фазы, образовавшейся под

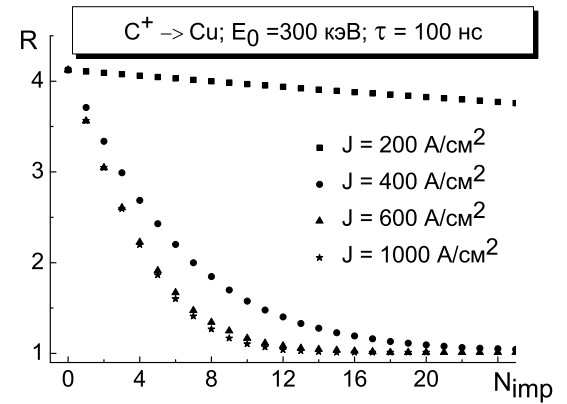


Рис. 15. Уменьшение показателя развитости поверхности меди при облучении ионами углерода с энергией 300 кэВ при длительности импульса 100 нс.

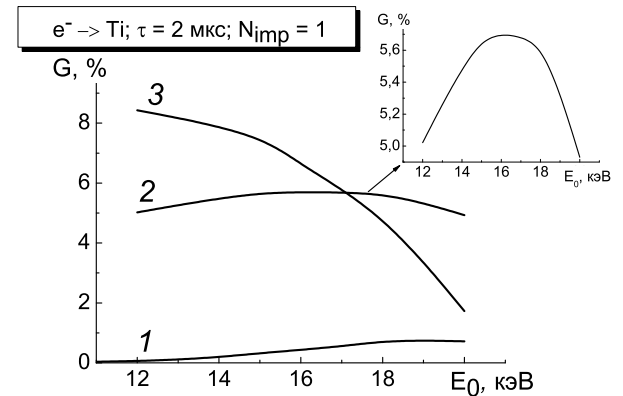


Рис. 16. Зависимость коэффициента сглаживания титана от начальной энергии электронов при облучении в течение 2 мкс (1 – $J = 200$ А/см², 2 – $J = 500$ А/см², 3 – $J = 600$ А/см²).

действием пучка, и, как следствие, о сглаживании мишени по механизму тепловой эрозии.

Этот экспериментальный результат был использован для тестирования разработанной двумерной модели. Полученные данные по уменьшению высоты выступа во время импульсного облучения электронами не противоречат экспериментальным результатам измерения параметра шероховатости R_z (рис. 17).

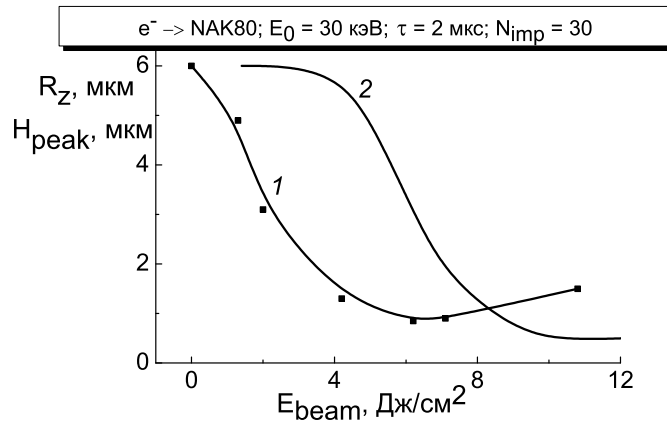


Рис. 17. Сопоставление результатов расчетов испарения микровыступа с экспериментальными данными измерения шероховатости поверхности для случая облучения стали NAK80 электронным пучком (1 – эксперимент [5], 2 – расчет).

Наблюдаемое расхождение диапазона E_{beam} для расчетной и экспериментальной кривых (рис. 17), вероятно, связано с недостатками приведенной модели тепловой эрозии микровыступа. К ним относится пренебрежение температурной зависимостью теплопроводности металла и, в дальнейшем, как следствие, её изменением во время облучения. Известно, что теплопроводность стали в результате облучения вследствие структурно-фазовых превращений, удаления примесей и измельчения зерна может существенно снижаться. Учесть это непросто, и в таких случаях требуется комплексный подход к облучаемому материалу, как к объекту исследования.

В целом же результаты, получаемые при вычислении данных об испарении микровыступов на поверхности твердого тела, соответствуют истине. А разработанная модель правильно отражает физический процесс и может быть использована при оценке роли испарения в сглаживании и выборе параметров пучка для полировки материалов с низкими коэффициентами теплопроводности.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ И ВЫВОДЫ

1. При эрозии поверхности твёрдого тела под действием мощных импульсных ионных пучков доминирующим процессом является не распыление, а испарение атомов. На этой идее построена модель тепловой эрозии мишени в условиях импульсного облучения ионами или электронами.

2. Мощные субмикросекундные ионные пучки ($P \sim 10^6 \dots 10^8$ Вт/см², $J \sim 10 \dots 10^3$ А/см², $\tau \sim 10^{-8} \dots 10^{-6}$ с, $E_0 = 0,1 \dots 1$ МэВ) способны вызывать испарение атомов с облучаемой поверхности на уровне $10^3 \dots 10^5$ атом/ион. Толщина испарившегося слоя, независимо от материала мишени, сравнима с величиной пробега частицы. Граничное значение плотности тока, при котором начинается заметное испарение, определяется коэффициентом теплопроводности материала: вещества с меньшей теплопроводностью и близкой плотностью атомов испаряются при меньших плотностях тока. Обеспечение максимально возможных коэффициентов эрозии требует оптимальной комбинации энергии заряженной частицы, плотности тока пучка и длительности импульса.
3. Максимально возможные коэффициенты эрозии под действием мощных субмикросекундных электронных пучков ($P \sim 10^7 \dots 10^9$ Вт/см², $J \sim 10^2 \dots 10^4$ А/см², $\tau \sim 10^{-7} \dots 10^{-6}$ с, $E_0 = 10 \dots 700$ кэВ) составляют $\sim 10^4 \dots 10^5$ атом/электрон.
4. Одной из составляющих процесса радиационной полировки поверхности является механизм, основанный на тепловой эрозии, интенсивность которой вследствие разной скорости теплоотвода на выступах и впадинах рельефа различна. Для учёта морфологии мишени разработана двумерная модель тепловой эрозии микровыступа в условиях импульсного облучения мощными ионными или электронными пучками.
5. Роль испарения в сглаживании рельефа является существенной, когда толщина слоя, охваченного фазовыми превращениями, меньше высоты неровностей на поверхности. При этом количество испарившегося вещества с вершин выступов должно быть больше, чем со дна впадин. Оптимизация условий облучения относительно исходной шероховатости обрабатываемой поверхности для наиболее эффективного её сглаживания сводится к выбору начальной энергии частиц, длительности импульса, плотности тока и количества импульсов.
6. Представленная модель тепловой эрозии адекватно описывает кинетику испарения поверхности твердого тела. Между численными и экспериментальными данными наблюдается удовлетворительное согласие. Поэтому она может быть использована для прогнозирования результатов облучения, а в частности, для выбора оптимальных параметров пучка для наиболее эффективного сглаживания поверхности по механизму испарения.

ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Степанова О.М. Исследование тепловых процессов в металлах при воздействии мощных импульсных ионных пучков // Сборник докладов XII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых уче-

ных «Современные техника и технологии», 27 – 31 марта 2006 г. Труды в 2-х т. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2006. – Т.1. – С. 480–482.

2. Степанова О.М., Кривобоков В.П. Тепловые процессы в металлах при их облучении мощными импульсными ионными пучками // III Международная конференция студентов и молодых ученых «Перспективы развития фундаментальных наук»: сборник трудов. Россия, Томск, 16 – 20 мая 2006 г. – Томск: Изд-во ТПУ, 2006. – С. 63–65.

3. Bleikher G.A., Krivobokov V.P., Stepanova O.M. The Analysis of Metal Surface Erosion under Irradiation by Pulsed Electron Beams // Изв. вузов. Физика. – 2006. – №10. Приложение. – С. 346–349.

4. Степанова О.М. Исследование эффективности использования энергии мощных импульсных ионных пучков на эрозию металлов // Физика и химия высокоэнергетических систем: Сборник материалов III Всероссийской конференции молодых ученых (24 – 27 апреля 2007г., г. Томск). – Томск: ТМЛ – Пресс, 2007. – С. 424–427.

5. Блейхер Г.А., Кривобоков В.П., Степанова О.М. Эрозия поверхности металлов под действием мощных субмикросекундных ионных пучков // Седьмой Международный Уральский Семинар «Радиационная физика металлов и сплавов»: тезисы докладов, 25 февраля – 3 марта 2007 г., г. Снежинск. – С. 5–6.

6. Блейхер Г.А., Кривобоков В.П., Степанова О.М. Параметры импульсных ионных пучков для обеспечения максимальных коэффициентов эрозии поверхности металлов // Изв. ВУЗов. Физика. – 2007. – №5. – С. 31–36.

7. Блейхер Г.А., Кривобоков В.П., Степанова О.М. Эрозия металлов при облучении мощными импульсными ионными пучками // Изв. вузов. Физика. – 2007. – №10/3. – С. 55–59.

8. Блейхер Г.А., Кривобоков В.П., Степанова О.М. Эрозия микровыступа на поверхности медного образца под действием мощного импульсного ионного пучка // Уравнения состояния вещества: тезисы XXIII Международной конференции, Институт проблем физической химии РАН, 2008 г., г. Черногловка. – С. 169.

9. Блейхер Г.А., Кривобоков В.П., Степанова О.М. Моделирование эволюции морфологии поверхности металлов при облучении мощными импульсными ионными пучками // Физика экстремальных состояний вещества – 2008. – Черногловка: Институт проблем химической физики РАН. – С. 214–216.

10. Блейхер Г.А., Кривобоков В.П., Степанова О.М. Математическая модель испарения микровыступа на поверхности металла при импульсном облучении электронами // Научная сессия МИФИ – 2008. Сборник научных трудов, том 3. М.: изд. МИФИ, 2008 г., с. 211–212.

11. Bleicher G.A., Krivobokov V.P., Stepanova O.M. On Evaporation Smoothing Mechanism of Metal Surface under the Irradiation by Submicrosecond Ion Beams // Proceedings of the 9th Int. Conf. on Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows. – Tomsk, 21 – 26 September 2008. – P. 230–233.

12. Блейхер Г.А., Степанова О.М., Кривобоков В.П. Эмиссия атомов с по-

верхности твёрдого тела при облучении ионным пучком в импульсном режиме // Труды XIX международной конференции «Взаимодействие ионов с поверхностью» (ВИП-2009). – Звенигород, 21–25 августа 2009 г. – Т. 1. – С.111–114.

СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bleikher G.A., Krivobokov V.P., Paschenko O.V. On Erosion Mechanisms of the Solid Surface under the Treatment with Submicrosecond Ion Beams // Proceedings of the 7th Int. Conf. on Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows. – Tomsk, 25 – 30 July 2004. – P. 281–284.

2. Сапульская Г.А. Компьютерное моделирование тепловых, термомеханических и эрозионных процессов в твёрдом теле при воздействии мощных наносекундных пучков заряженных частиц и рентгеновского излучения: Диссертация на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук. – Томск, 1994. – 169 с.

3. Бериш Р. Распыление твердых тел ионной бомбардировкой: Физ. распыление одноэлементных твердых тел. – М.: Мир, 1984. – 336 с.

4. Блейхер Г.А., Кривобоков В.П., Пащенко О.В. Тепломассоперенос в твердом теле под действием мощных пучков заряженных частиц. – Новосибирск: Наука, 1999. – 176 с.

5. Uno Y., Okada A., Uemura K., Raharjo P., Sano S., Yu Z., Mishima S. A New Polishing Method of Metal Mold with Large-Area Electron Beam Irradiation // Journal of Material Processing Technology. – 2007. – Vol. 187 – 188. – P. 77 – 80.

6. Бойко В.И., Скворцов В.А., Фортов В.Е., Шаманин И.В. Взаимодействие импульсных пучков заряженных частиц с веществом. – М.: Физматлит. – 2003. – 288 с.