

## Влияние поверхностного рельефа деталей на эффективность обработки негазовыми мощными ионными пучками с максимальной энергией ионов до 0.5 МэВ

Г.В. Потемкин<sup>1</sup>, А.Е. Лизачев<sup>2,\*</sup>, М.В. Жидков<sup>3</sup>, Е.В. Голосов<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Томский политехнический университет, Томск, Россия,

<sup>2</sup>ФИЦ Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, Россия,

<sup>3</sup>ФИЦ Проблем химической физики и медицинской химии РАН, Московская обл., Россия

\*carbin@yandex.ru

**Аннотация.** Проанализировано влияние шероховатости поверхности обрабатываемого материала мощным ионным пучком на процесс создания модифицированного слоя облучаемого материала. Модифицированный слой образуется из расплава на обрабатываемой поверхности детали. Оценена эффективность обработки и толщина модифицированного слоя

**Ключевые слова:** мощный ионный пучок, шероховатость поверхности, модифицированный слой.

### 1. Введение

Эффективность обработки деталей из конструкционных материалов мощными ионными пучками (МИП) с энергией до 0.5 МэВ [1] определяется свойствами её модифицированного слоя, которые в свою очередь зависят для соответствующих вакуумно-технологических условий процесса облучения от параметров пучка ионов и состояния облучаемой поверхности. Предварительно очищенная от загрязнений поверхность деталей обладает шероховатостью и субшероховатостью, которая располагается в свою очередь на элементах шероховатости по ГОСТ 2789-59 [2]. Рассмотрим влияние шероховатости обрабатываемым поверхностями на создание модифицированного слоя с помощью ионно-лучевой обработки.

### 2. Результаты.

Свойства изменённого поверхностного слоя детали зависит от его толщины. Для материала обладающего атомно-плоской поверхностью при фиксированной энергии ионов толщина слоя будет одинакова для всей площади обрабатываемой поверхности детали. Для реальной поверхности (рис. 1) толщина слоя, через которую проходят ускоренные ионы  $R_p$ , зависит от угла входа иона –  $\Theta$ , отсчитываемого от нормали к точке входа иона в материал. В этом случае глубина проникновения иона  $R_p^*$  зависит от формы выступов шероховатости и в этом случае  $R_p^* = R_p \cos\Theta$ .

Для оценки эффективности процесса ионно-лучевой обработки может служить толщина модифицированного слоя, которая в свою очередь зависит от характерного параметра:  $\alpha \approx R_p/R_z$ , представляющего собой отношение величин проективного пробега иона в материале –  $R_p$  к размаху профиля  $R_z$  для базовой длины 0.08 мм.

При использовании пучки ионов с фиксированной энергией частиц, не обладающих высокой плотностью мощности, шероховатость и субшероховатость при  $\alpha < 1$  позволяют получать на поверхности деталей защитный слой только переменной толщины.

Чтобы получить однородный модифицированный слой на поверхности с помощью пучков, не относящихся к мощным ионным пучкам (МИП), необходимо учитывать отклонения реальной поверхности мишени от атомно-плоской и оптимизировать энергию частиц.

Для МИП определяющую роль в формировании модифицированного слоя на поверхности обрабатываемого материала, играют теплофизические свойства обрабатываемого материала. На начальном этапе облучения решающую роль играет

концентрация нанообъектов на свободной облучаемой поверхности (субшероховатость) включая и эффекты повторного захвата распыленных частиц, которые в свою очередь, связаны с углами раскрытия нижележащих частей поверхности [3].

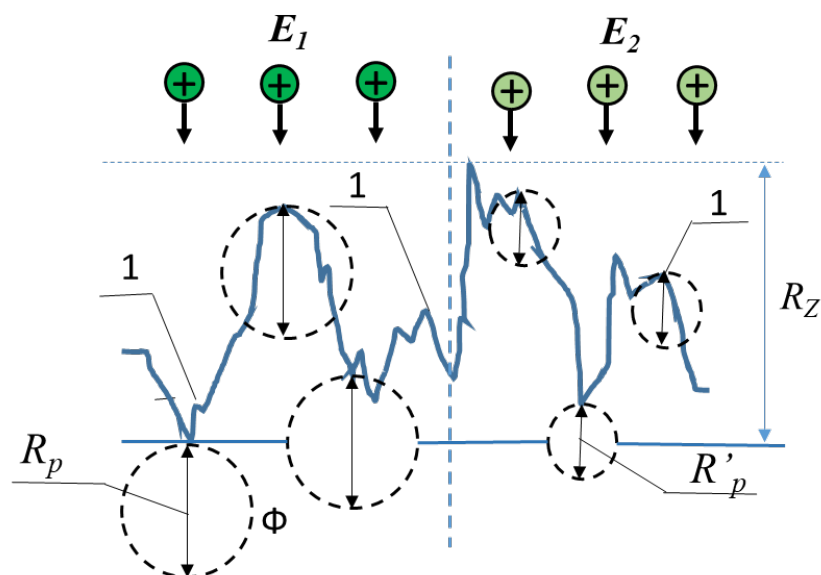


Рис. 1. Схема взаимодействия пучка ионов с реальной поверхностью мишени. На рисунке указаны: (+) ионы углерода,  $R_p$  – проективный пробег иона заданной энергии,  $R_z$  – размах профиля для базовой длины – 0.08 мм,  $\Phi$  – поперечный размер объема каскада столкновений,  $\Omega(E_i)$  для иона энергии  $E_i$ ; где  $\Omega(E_i) \sim [R(E_i)]^3$ , а  $R_p$  – средний пробег иона в материале, 1 – нанобъекты.

Процесс нагрева поверхности облучаемой мишени начинается в слое, толщина которого определяется проективным пробегом иона заданного сорта и энергии в конкретном материале. Распределение потерь энергии по глубине для пучка ионов углерода  $C^{+12}$  и протонов характеризуется наличием достаточно протяженной области и заканчивается острым пиком Брэгга. Амплитуда этого пика примерно на порядок (в области энергий до 1 МэВ) превышает потери энергии вблизи поверхности. Максимум тепловыделения для ионов находится на глубине  $\sim R_p$ , а шероховатую поверхность, включающую наноразмерные объекты, следует рассматривать как частично упорядоченную среду, в которой нанокристаллиты представляют собой слабосвязанные комплексы. Для элементов поверхности, чьи характерные размеры менее 100 нм, свойственно проявление сильных нелинейных размерных зависимостей всех свойств облучаемого материала от их размеров. В этом случае такие свойства облучаемого материала, как теплопроводность, коэффициент диффузии и плотность оказываются зависимыми от размера нанобъектов, что существенным образом влияет на процессы фазовых превращений.

Для установок типа ТЕМП-4, генерирующих пучки ионов углерода плотностью  $10^{16}$ – $10^{18}$  частиц/м<sup>2</sup>, длительностью  $(100$ – $1000) \cdot 10^{-9}$  с непрерывным энергетическим спектром до  $E_{max} \approx 300$  КэВ плотность мощности составляет  $P \approx 10^8$ – $10^{10}$  Вт/м<sup>2</sup>, что приводит к плавлению и абляции шероховатого слоя передним фронтом положительного импульса [4] (рис. 2).

Для МИП с непрерывным энергетическим спектром ионов в начальный период воздействия пучка на поверхность материала происходит разупорядочивание решетки поверхностного слоя одновременно на всей обрабатываемой поверхности вплоть до  $[R_z + R_p(E_{max})]$ . Это является результатом воздействия переднего фронта импульса при плотности ионов на 2–3 порядка меньших максимальной.

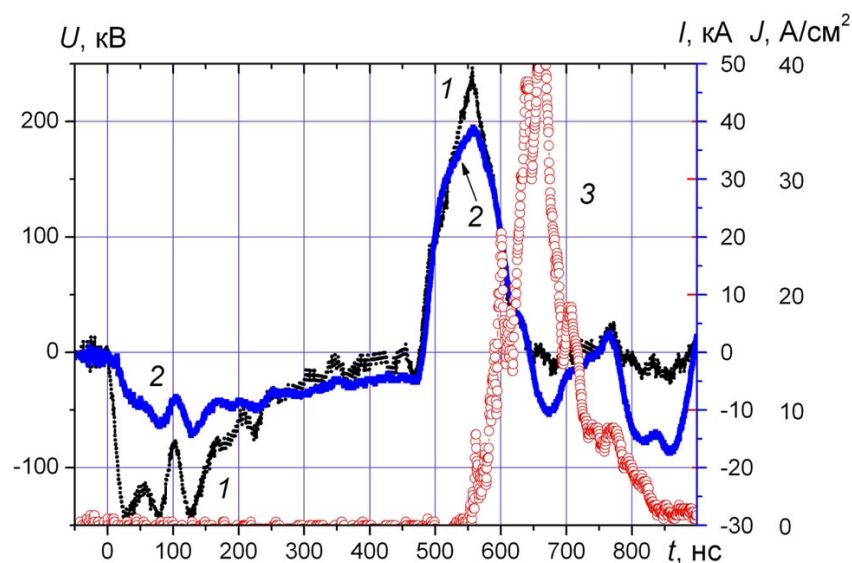


Рис. 2. Осциллограммы: 1 – напряжения; 2 – полного тока, измеряемого поясом Роговского; 3 – плотности ионного тока плоского диода с самоизоляцией.

Граница раздела твердое/жидкое движется вглубь облучаемого материала до её остановки после окончания импульса. Модифицированный слой образуется из расплава на обрабатываемой поверхности детали. Эффективность обработки и толщина модифицированного слоя для МИП можно оценить с помощью параметра  $\beta \approx L(E_{max}, P)/R_z > 2$ , связывающего толщину расплавленного слоя –  $L(E_{max}, P)$  и шероховатость исходной поверхности. При этом рельеф модифицированной поверхности после обработки будет определяться рельефом затвердевшей поверхности расплава никак не связанной с исходной шероховатостью детали.

### 3. Список литературы

- [1] I.F. Isakov, V.N. Kolodii, M.S. Opekunov, V.M. Matvienko, S.A. Pechenkin, G.E. Remnev, Yu.P. Usov, Sources of high power ion beams for technological applications, *Vacuum*, vol. **42**(1/2), 159–162, 1991, doi: 10.1016/0042-207X(91)90101-N.
- [2] А.Г. Суслов, М.Г. Шалыгин, С.В. Кузнецов, Исследование поверхностей с различной механической обработкой на уровне субшероховатости, *Научноёмкие технологии в машиностроении*, **9**, 45–47, 2015.
- [3] Р. Бериш (ред.), *Распыление твердых тел ионной бомбардировкой. Физ. распыление одноэлементных твердых тел. (Пер. с англ.)*. Москва: Мир, 1984.
- [4] Г.В. Потемкин, А.Е. Лигачев, М.В. Жидков, Свойства мощного ионного пучка с энергией частиц до 1 МэВ, получаемого из плазмы созданной высоковольтным импульсом на графитовом катоде, *Физика и химия обработки материалов*, **4**, 18–31, 2023.