

УДК 539.2:533.9.004.14

А.М. Жукешов

Казахский национальный университет имени аль-Фараби, Казахстан, г. Алматы

E-mail: zhukeshov@physics.kz

### Особенности взаимодействия импульсного потока плазмы с поверхностью материалов разной плотности

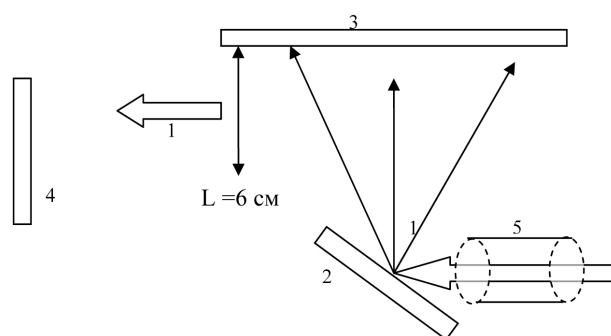
**Аннотация.** Методами металлографии и рентгеноспектрального анализа исследована поверхность конструкционных материалов разной плотности после воздействия импульсного плазменного потока. Показано, что распыление неравномерно в зависимости от угла отражения и приводит к формированию на подложках пленок различной толщины и пылевой буферной плазмы.

**Ключевые слова:** импульсный поток плазмы, металлография, рентгеноспектральный анализ, конструкционные материалы.

Изучение процессов распыления конструкционных материалов при воздействии на них высокотемпературных импульсных плазменных потоков представляет собой актуальную задачу как для развития представлений о физических механизмах распыления в нестационарных условиях, так и для практических приложений. Известно, что распыление пучками ионов в стационарном режиме в направлении угла отражения происходит достаточно интенсивно, однако скорости распыления невелики [1]. В то же время, для импульсных потоков характерны большие плотности тока, что может приводить к интенсивному распылению материалов [2]. Однако, импульсный характер воздействия ставит ограничение на скорость распыления, и в этом случае необходимо использовать многократное воздействие. Кроме этого, особенности взаимодействия высокоскоростного потока плазмы с поверхностью еще не достаточно изучены, и эта проблема является одной из актуальных в физике плазмы и термоядерного синтеза [3].

Вначале рассмотрим результаты исследования взаимодействия плазменного потока как целого с большими поверхностями, в качестве которых были выбраны листы конструкционных материалов размерами порядка  $100 \text{ см}^2$ . Для исследования распыления при воздействии на материалы мощных потоков плазмы, имитирую-

щие срыв плазмы на стенку токамака (рисунок 1), мы использовали режим работы ускорителя со сплошным наполнением рабочей камеры воздухом при остаточных давлениях 0,05-0,1 Торр.



1 – поток плазмы, 2 – мишень, 3, 4 – подложки, 5 – труба

**Рисунок 1** – Схема экспериментов по взаимодействию ИПП с материалами

В этом режиме КПУ энергия плазменного сгустка составляла  $40\text{--}60 \text{ Дж/см}^2$ , длительность импульса 15 мкс. При этом плотность мощности получается равной  $\sim 3 \text{ МВт/см}^2$ , что соответствует параметрам пристеночной плазмы ТЯР. Распыление изучалось для разных типов материалов мишеней – алюминия, меди, не-

ржавеющей стали и вольфрама. При такой энергии основными видами эрозии для всех материалов (в т.ч. для вольфрама) являлось плавление и испарение. В качестве подложки во многих случаях использовалась полированная нержавейка. Анализ продуктов эрозии производился после 5-30 импульсов. Для диагностики поверхности материалов применялись металлографический и сканирующий электронный микроскопы. Продукты эрозии в зависимости от угла отражения имели вид тонких пленок, толстых пленок, пыли, расплавленной зоны и

капель металла. Для горизонтальных подложек (рисунок 2, а) вдали от угла распыления образовывались тонкие пленки с неравномерной толщиной (участок 1 на рисунке 2, а), а вблизи угла распыления образовывались участки, состоящие из пыли и капель металла (участок 2). Для вертикально расположенных подложек, наряду с ярко выраженной тонкой пленкой с радужной поверхностью, вблизи угла падения (на рисунке 2, б сверху) при энергиях 40 Дж/см<sup>2</sup> наблюдается участок с пылью, а при энергиях 60 Дж/см<sup>2</sup> еще и расплавленная зона.

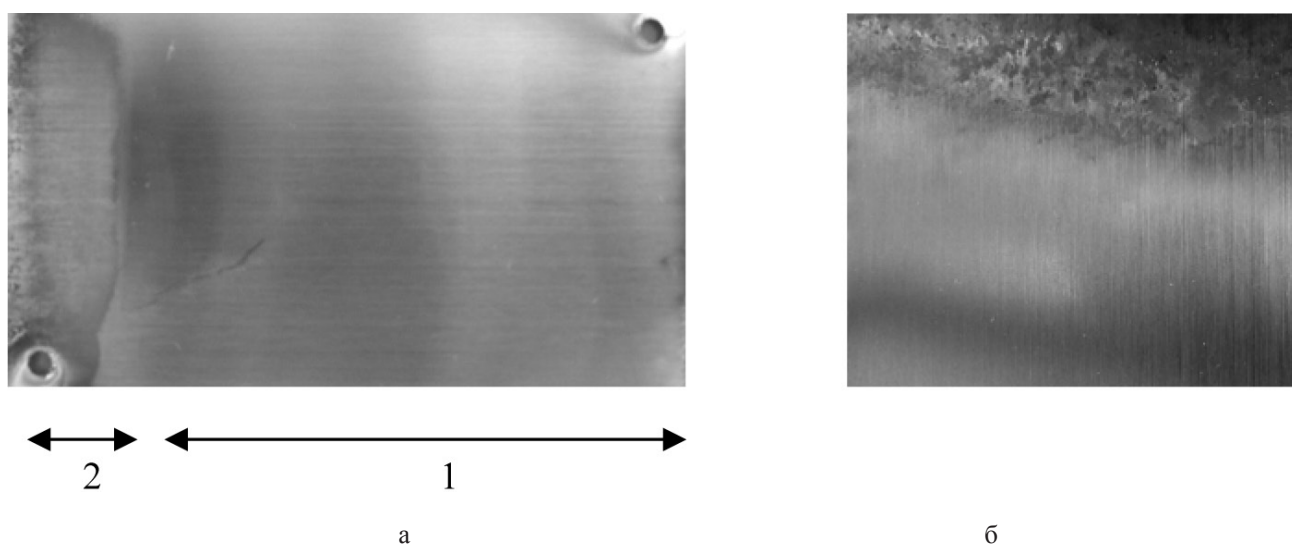


Рисунок 2 – Эрозия поверхности пластин, расположенных горизонтально (а) и вертикально (б)

Поверхность самих пластин – мишеней модифицировалась по-разному, в зависимости от начального давления в разрядной камере и плотности энергии. При давлении выше 0,5 Торр на поверхности пластин наблюдался участок с пылью, явных следов расплавления не было. При понижении давления до 0,05 Торр поверхность расплавлялась, однако по краям зоны расплавления оседала пыль.

Далее были проведены эксперименты по распылению графитовой мишени. В этом случае, между электродом ускорителя и мишенью 2 располагалась труба 5 из жести, внутренняя поверхность которого играла роль подложки (рисунок 1). Предполагалось, что в таком случае су-

щественно повысится плотность энергии при ограничении пространства распыления, так как без трубы плазма разлетается во все стороны. Выстрелы проводились при напряжении 22-24 кВ в среде остаточного воздуха в рабочей камере ускорителя. Предварительные эксперименты показали, что такая мера действительно способствует концентрации плазмы в центре трубы. Использовали многократный режим воздействия для усиления эффекта распыления. После 10 выстрелов внутренняя поверхность цилиндра имела три зоны: участок с распыленным материалом мишени, переходный участок и зону расплавления на конце цилиндра со стороны мишени. Эти три зоны показаны на рисунке 3.

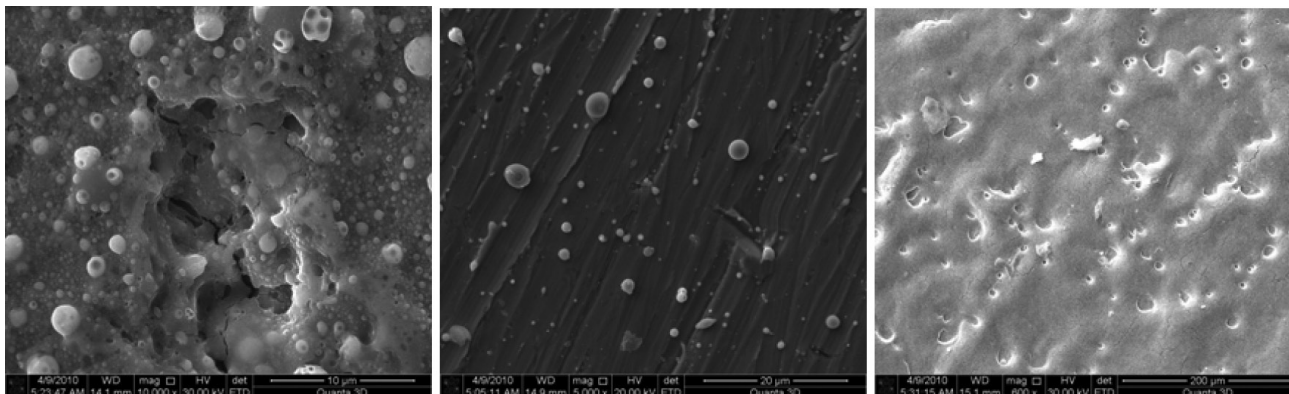


Рисунок 3 – РЭМ снимки поверхности трубы при распылении графитовой мишени

На фотографиях на рисунке 3 видны плотный запыленный слой (слева) участок с шаровидными образованиями (в центре) и участок с расплавленной поверхностью (справа). Анализ

на РЭМ показал, что шаровидные образования на фотографии в центре – это карбид железа (рисунок 4).

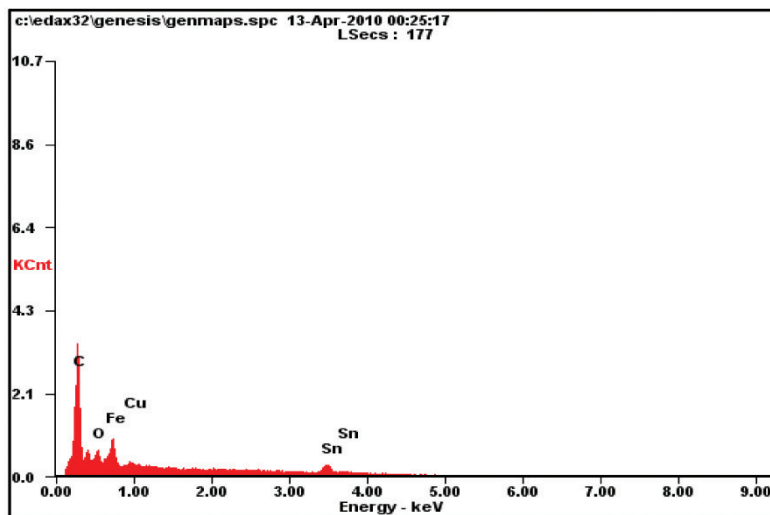
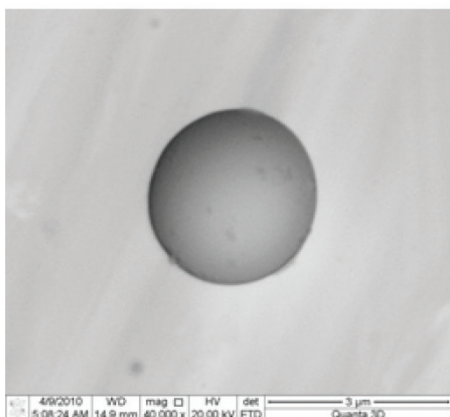


Рисунок 4 – Шаровидное образование и его спектр

Таким образом, в данном эксперименте показано, что в результате взаимодействия плазмы с мишенью образуется горячий буферный слой, имеющий высокую температуру, и далее слой, состоящий из материала мишени и пыли. Размеры шаровидных пылинок составляют от 3 мкм до 20 нм. Очевидно, что в экспериментах, приве-

денных выше, этот эффект также присутствует, но не так заметен.

С целью исследования влияния атомной массы материала мишени на процесс распыления проведены аналогичные эксперименты для меди и алюминия. Диаметр пятна составил 4 см для алюминия и графита, и 2,5 см для меди (рисунок 5).



Рисунок 5 – Диаметр пятна облучения для алюминия, меди и графита

Размер области буферной плазмы и соответствующей ему области расплавления также зависит от материала мишени. Так, если для медной мишени он оставляет около 3 см, то для графитовой мишени 1 см, а для алюминиевой – менее 1 см. В то же время, для алюминия, также как и вольфрама, характерно разбрызгивание металла.

Таким образом, при взаимодействии плазменного потока с поверхностью мишени образуется буферный слой плазмы, имеющий высокую температуру. Высота буферного слоя больше для материалов с большей плотностью, за исключением алюминия. Для размера пятна на поверхности мишени наблюдается обратная зависимость от массы. Неоднозначная зависимость размеров плазменного образования от плотности материала мишени объясняется энергией связи, которая для ковалентных кристаллов слабо зависит от плотности.

Результаты экспериментов позволяют полагать, что взаимодействие импульсного потока плазмы с поверхностью имеет свои специфические

особенности. Во-первых, это локализация плазмы в пятне на поверхности образца при условии наличия внешней стенки. В результате интенсивного испарения поверхности и под воздействием буферной плазмы часть материала оседает на стенках в виде пыли, размеры пылинок могут быть разными. Управление размерами пылинок, скорее всего, возможно путем вариации энергии потока в незначительных пределах.

#### Литература

- 1 Морозов А.И. Введение в плазмодинамику. – М.: Физматлит, 2006. – 576 с.
- 2 Жукешов А.М. Особенности формирования плазменного сгустка в импульсном ускорителе // Вестник КазНУ, серия физ. – 2003. – №6(14). – С. 102-105.
- 3 Langner J., Piekoszewski J., Stanislawski J., Werner Z. Present status and prospects of research in SINS on the modification of surface properties by pulsed plasma streams // Nukleonika, – 2000. – 45(3). – P. 193–197.

Ә.М. Жүкешов

#### Импульстік плазма ағынының әртүрлі тығыздықты материалдардың бетімен әсерлесу еркшеліктері

Жұмыста микроскопия және рентген спектрі әдістерімен әртүрлі тығыздықты конструкциялық материалдардың беті плазма әсерінен кейін зерттелген. Тозандату шағылу бұрышына біркелкі емес екені, сонымен қатар үлгілердің сырт бетінде пленкалар және буферлі плазманың қалыптасуы көрсетілген.

**Түйін сөздер:** импульстік плазма ағыны, металграфиясы, рентгенспектрлік анализ, құрылымдық материалдар

A.M. Zhukeshov

#### Peculiarities of pulse plasma streams interaction with different materials surfaces

The methods of metallography and x-ray spectral analysis is studied surface of constructional materials of different density after exposure to pulsed plasma flow. is shown The spray uneven depending on the angle of reflection and leads to the formation of the surface film of various thickness and dust buffer plasma.

**Keywords:** pulsed plasma flow, pulsed plasma flow, metallography, x-ray analysis, construction materials, X-ray analysis, the materials of construction.