

# ИЗМЕНЕНИЯ МИКРОРЕЛЬЕФА ПОВЕРХНОСТИ МИШЕНИ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ИНТЕНСИВНЫХ ПОТОКОВ ПЛАЗМЫ

*А.Я. Лейви, К.А. Талала, А.П. Яловец*

## **Аннотация**

В работе представлены результаты численных исследований по взаимодействию плазменных потоков с веществом. Исследования направлены на изучения влияния плотности вложенной энергии и количества импульсов на конечное состояние микрорельефа поверхности обрабатываемого материала.

## **Введение**

При обработке мишени интенсивными плазменными потоками, среди прочих явлений, наблюдается изменение микрорельефа ее поверхности [1]. Результат такой обработки (сглаживание поверхности, или наоборот, увеличение шероховатости) зависит от режимов обработки.

Данная работа посвящена численному исследованию изменения микрорельефа поверхности материала при обработке потоками плазмы [1]. В качестве исследуемого материала были выбраны образцы из Fe. Образцы подвергались обработке потоками плазмы в течении 100 мкс. Плотность поглощенной энергии составляет 10–35 Дж/см<sup>2</sup>.

## **Математическая модель**

Для описания изменения микрорельефа поверхности мишени при обработке плазменными потоками будем использовать модель, описанную в [2]. В данной модели рассматривается потенциальное течение несжимаемой жидкости с учетом сил поверхностного натяжения, вязкости и инерции при неоднородной плотности расплавленного слоя. Ванна расплава мишени представляется в виде слоев. Поле смещение  $\mathbf{u}(x; z; t)$ , связанное с динамикой возмущений внутри каждого слоя, имеет структуру, которая соответствует потенциальному течению несжимаемой жидкости и удовлетворяет уравнению Лапласа для потенциала скорости.

Для расчета термодинамических параметров мишень описывалась в рамках упругопластической модели [3] с учетом широкодиапазонных уравнений состояния.

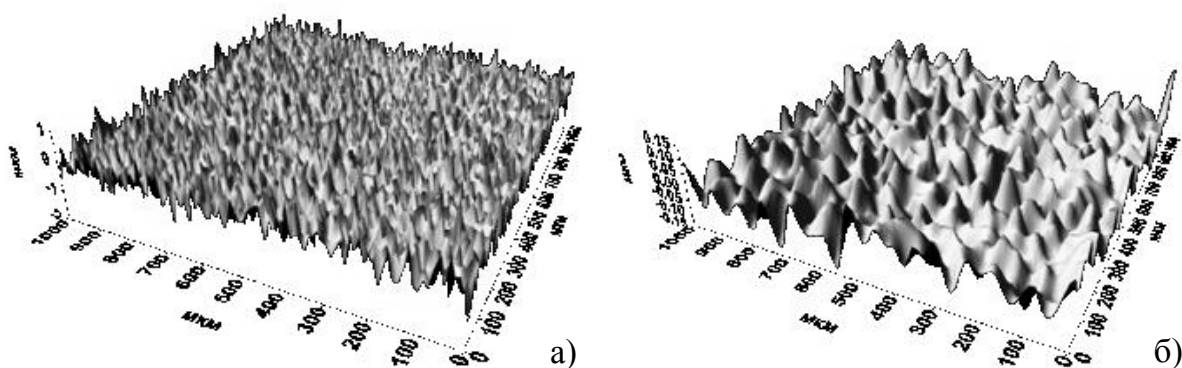
Для описания воздействия плазменного потока на вещество плазменный поток рассматривался в рамках двухтемпературной одножидкостной модели, с учетом переноса излучения. Авторами [4] было показано, что параметры плазменного слоя вблизи поверхности мишени выходят на стационарные значения, что упрощает дальнейшее рассмотрение задачи. А результат воздействия плазменного потока на вещество хорошо описывается заданием соответствующего теплового потока на поверхности

мишени. Таким образом, воздействие плазменного потока на вещество учитывалось заданием соответствующего теплового потока.

### Результаты численных расчетов

В качестве исследуемого материала было выбрано железо. Численные исследования воздействия плазменных потоков на вещество (железо) проводилось в широком диапазоне параметров воздействия: тепловой поток варьировался в диапазоне  $(0,1-50) \cdot 10^9$  Вт/м<sup>2</sup>, длительность воздействия – от 500 нс до 100 мкс.

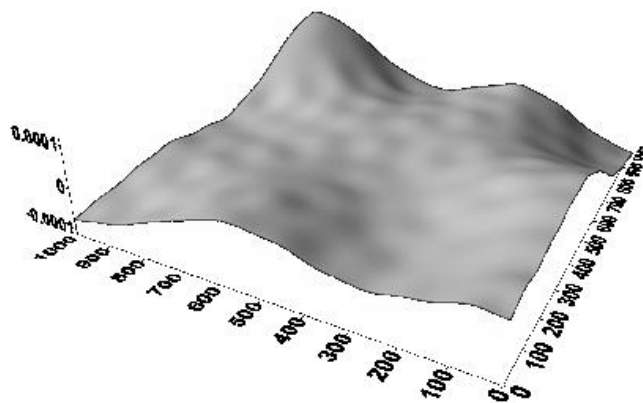
Рассмотрим результаты численных исследований. На рис. 1, а представлена исходная поверхность железного образца, со средней шероховатостью 3,1 мкм, на рис. 1, б – поверхность мишени после обработки плазменным потоком с параметрами  $q = 10^6$  Вт/см<sup>2</sup>,  $\tau = 10$  мкс,  $N = 1$ . Из рисунка видно, что шероховатость микрорельефа поверхности после обработки уменьшилась. При этом произошло изменение спектра возмущения: остались возмущения, соответствующие диапазону волн с наибольшей скоростью роста. Этот диапазон определяется параметрами обработки.



**Рис. 1.** Исходное состояние поверхности железной мишени до обработки (а) и после обработки плазменным потоком, соответствующим тепловому потоку  $q = 10^6$  Вт/см<sup>2</sup> (б).  
Длительность обработки – 10 мкс

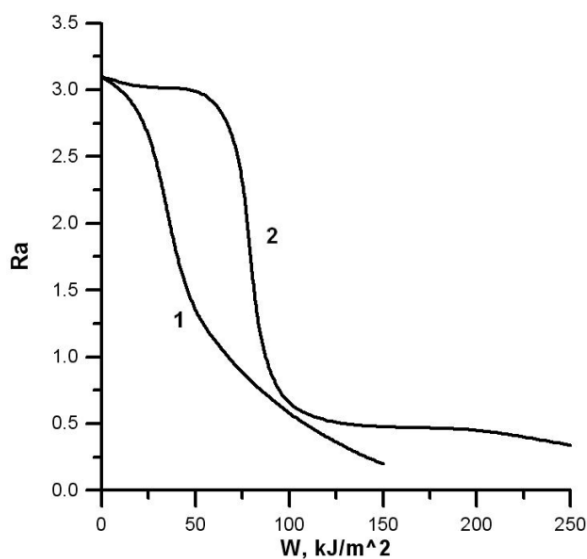
Численные исследования изменения шероховатости микрорельефа при различном времени обработки показали, что с увеличением времени обработки мишени наблюдается уменьшение шероховатости микрорельефа поверхности. Это объясняется тем, что при большем времени обработки увеличивается время существования расплава и, как следствие, происходит лучшее сглаживание микрорельефа поверхности мишени. Увеличение числа импульсов при неизменной плотности вложенной энергии за импульс уменьшает шероховатость обрабатываемого материала (рис. 2). После обработки плазменным потоком с параметрами  $q = 5 \cdot 10^5$  Вт/см<sup>2</sup>,  $\tau = 50$  мкс,  $N = 50$ , шероховатость уменьшается от 3 мкм (рис. 1, а) до 0,001 мкм.

**Рис. 2.** Состояние поверхности в результате обработки плазменным потоком, соответствующим тепловому потоку  $q = 5 \cdot 10^5$  Вт/см<sup>2</sup>. Длительность обработки – 50 мкс. Число импульсов  $N = 50$ . Начальное состояние поверхности рис. 1, а

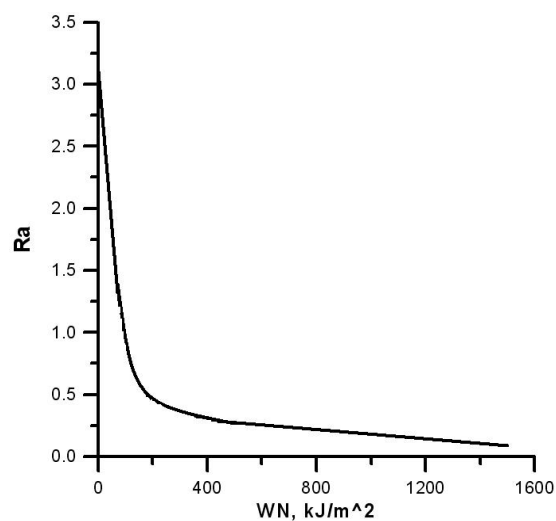


На рис. 3 представлена зависимость шероховатости поверхности материала от плотности вложенной энергии, для  $q = 10^6$  Вт/см<sup>2</sup> и  $q = 5 \cdot 10^5$  Вт/см<sup>2</sup>, число импульсов  $N = 1$ . С увеличением плотности вложенной энергии уменьшается шероховатость поверхности, что согласуется с экспериментальными данными [2].

На рис. 4 представлена зависимость шероховатости поверхности материала от полной вложенной энергии  $W \cdot N$  ( $N$  – число импульсов), для  $q = 1 \cdot 10^{10}$  Вт/м<sup>2</sup> – за один импульс. Здесь также прослеживается общая закономерность уменьшение шероховатости при увеличении полной вложенной энергии.



**Рис. 3.** Зависимость шероховатости поверхности материала от плотности вложенной энергии, для 1 –  $q = 10^6$  Вт/см<sup>2</sup>; 2 –  $q = 5 \cdot 10^5$  Вт/см<sup>2</sup>



**Рис. 4.** Зависимость шероховатости поверхности материала от полной вложенной энергии, для  $q = 1 \cdot 10^{10}$  Вт/м<sup>2</sup>

Дальнейшее увеличение плотности вложенной энергии приводит к кратерообразованию, которое наблюдается экспериментально. Например, при  $q = 10^6$  Вт/см<sup>2</sup>,  $\tau > 10$  мкс и  $q = 5 \cdot 10^5$  Вт/см<sup>2</sup>,  $\tau > 60$  мкс образуются кратеры малого диаметра (1–2 мкм) и большой глубины (более 10 мкм).

## **Выводы**

Общие закономерности сглаживания микрорельефа поверхности при плазменной обработке качественно соответствуют картине сглаживания при электронном облучении. Существенным отличием, является то, что результат воздействия плазменного потока, на вещество представляет собой поверхностный источник энергии, в то время как ионное или электронное воздействие является объемным источником энергии. И именно различие в характере источника энергии не позволяет экспериментально наработанную базу по сглаживанию поверхности электронными (ионными) пучками перенести на случай обработки материалов плазменными потоками. Однако построенные здесь математические модели позволяют спрогнозировать результат такой обработки.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке в рамках целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» № П2526 от 20 ноября 2009 г. и РФФИ (проект № 10-08-00251-а).

## **Библиографический список**

1. Structure of Silumin Surface Layer Modified by Compression Plasma Flow / A.P. Laskovnev, N.N. Cherenda, V.V. Uglov et al. // Proceedings of 10-th International Conference on Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows. – 2010. – P. 328–331.
2. О механизмах сглаживания микрорельефа поверхности мишени при облучении интенсивным потоком заряженных частиц / В.С. Красников, А.Я. Лейви, А.Е. Майер, А.П. Яловец // ЖТФ. – 2007. – Т. 77. – Вып. 4. – С. 41–49.
3. Яловец, А.П. Расчёт течений среды при воздействии интенсивных потоков заряженных частиц / А.П. Яловец // ПМТФ. – 1997. – Т. 38, № 1. – С. 151–166.
4. Leyvi, A.Ya. The dynamics of metal target surface at irradiation by intense plasma streams / A.Ya. Leyvi, K.A. Talala, A.P. Yalovets // Proceedings of 10-th International Conference on Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows, 19–24 September. – Tomsk, 2010.
5. Structure and Mechanical Properties of Copper-Carbon Nanostructured Films Formed by Compression Erosion Plasma Flows / V.V. Uglov, M.V. Astashynskaya, M.P. Samtsov et al. // Proceedings of 10-th International Conference on Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows-2010. – P. 620–623.