

## Эффект парового экранирования металлов при воздействии интенсивных плазменных потоков

М. А. Ларченко<sup>1,2</sup>, И.М. Позняк<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Московский физико-технический институт (государственный университет)

<sup>2</sup>Государственный научный центр Российской Федерации Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований

ITER – международный проект экспериментального термоядерного реактора типа токамак. Одна из ключевых проблем проекта – взаимодействие горячей термоядерной плазмы с защитными покрытиями вакуумной камеры. Ожидается, что во время срывов и ELM'ов дивертор и облицовочные пластины камеры будут испытывать значительные тепловые нагрузки. Моделирование срывов и ELM'ов не проводится на существующих токамаках по причине их недостаточной мощности. Для изучения эрозии материалов используются плазменные ускорители, электронные и ионные пучки.

В экспериментах было показано, что мощное тепловое воздействие плазмы приводит к эрозии защитных покрытий – металл трескается, происходит вылет капель и уменьшение его толщины вследствие движения расплавленного слоя [1]. Кроме этого, согласно теоретическим оценкам, должно происходить активное испарение материала [2]. Однако на практике эти оценки не подтверждаются, что указывает на некий эффект, который препятствует уносу массы за счет испарения [3].

Работы по облучению материалов потоками плазмы, проведенные на импульсном ускорителе МК-200, выявили существование экранирующего слоя, который образуется в результате испарения и ионизации материала мишени. Экранирующий слой поглощает и эффективно переизлучает падающую на него энергию, уменьшая тепловой поток, доходящий до мишени, и, тем самым, снижая потери массы на испарение [3].

В настоящее время для ресурсных испытаний начал использоваться другой тип плазменных ускорителей – квазистационарные ускорители. За счет более длительного импульса и большей плотности плазмы на КСПУ сильнее проявляется эрозия материалов. Но существует ли в таком режиме экранирующий слой, если да, то как меняются его свойства?

Целью данной работы является исследование эффекта экранировки металлических мишеней на установке КСПУ-Т при моделировании условий, характерных для переходных процессов ITER. В ходе работы проведен ряд экспериментов по облучению мишеней потоками водородной плазмы, измерена зависимость поглощенной мишенями энергии  $Q_{max}$  от энергии подведенной к электродам ускорителя  $Q_{ui}$ .

В качестве материалов мишеней были выбраны медь и ниобий. Оба материала обладают хорошими теплофизическими свойствами, однако их поведение под плазменным потоком существенно отличается. Медь формирует поверхность, напоминающую поверхность кипящей жидкости. На поверхности ниобия наблюдается течение расплавленного слоя (рис.1) [1].

На рис.2 представлены плотности энергии  $Q_{max}$ , поглощенные медной и ниобиевой мишенями на оси плазменного потока. При одинаковых условиях облучения, ниобий поглощает больше тепла, чем медь. С ростом энергии падающего потока разница в поглощенном тепле увеличивается, несмотря на то, что теплоотводящая способность у меди выше, чем у ниобия. Для оценки максимальной отводимой мощности можно использовать решение одномерной задачи теплопроводности:

$$W_{max} = \sqrt{\frac{\rho k c}{\pi}} \left( \frac{T_{max} - T}{\sqrt{t_{pulse}}} \right)$$

Если на поверхности существует расплавленный слой, формула становится неприменимой, поэтому положим  $T_{max} = T_{melting}$ . Значение  $W_{max}$  для меди составляет 758 МВт/м<sup>2</sup> при длительности импульса 1 мс, тогда как для ниобия при той же длине импульса  $W_{max} = 501$  МВт/м<sup>2</sup>.

На рис. 3 приведен результат численного решения одномерной задачи теплопроводности, которое учитывает процессы плавления, испарения, а также зависимость свойств меди и ниобия от температуры. Вычисления проводились с использованием кода, описанного в работе [4].  $T_{max}$  была взята равной температуре кипения при н.у. Падающий поток  $Q$  аппроксимировался импульсом постоянной мощности длительностью 1 мс.

Таким образом, при равных тепловых потоках медь способна отводить больше тепла, чем ниобий. Однако в эксперименте наблюдается обратное. Характер эрозии на поверхности меди позволяет сделать вывод о том, что испарение с ее поверхности должно происходить более интенсивно по сравнению с ниобием. Тогда расхождение между оценками и экспериментальными данными хорошо согласуется с гипотезой о наличии экранирующего слоя.

В следующем этапе экспериментов планируется изучение полного баланса энергии.

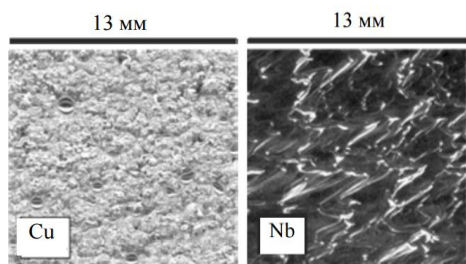


Рис.1 – Поверхность мишеней после плазменного воздействия.

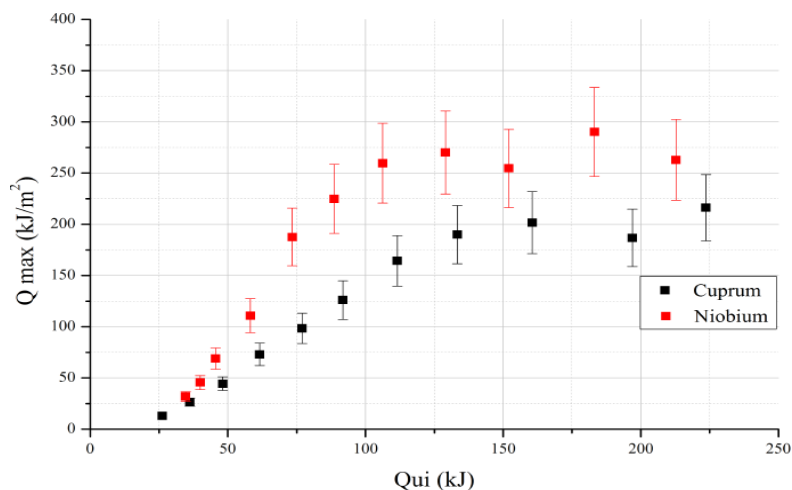


Рис.2 – Зависимость поглощенной энергии от энергии, подведенной к электродам.

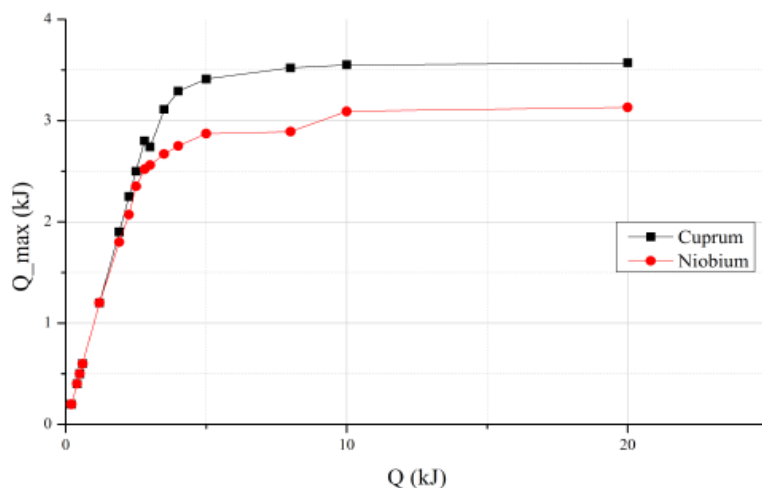


Рис.3 – Численное решение задачи теплопроводности.

### Литература

1. Позняк И.М., Климов Н.С. [и др.] Эрозия металлов при воздействии интенсивных потоков плазмы. – ВАНТ, Сер. Термоядерный синтез. – 2012. – № 4. – С. 23-33.
2. Van der Laan J. G., Akiba M., Hassanein A. et al. Prediction for disruption numerical results // Fusion Engineering and Design. 1991. V. 18. P. 135 – 144.
3. V.M. Safronov, N.I. Arkhipov, I.S. Landman, S.E. Pestchanyi, D.A. Toporkov Evaporation and vapor shielding of CFC targets exposed to plasma heat fluxes relevant to ITER ELMs
4. Климов Н.С. Макроскопическая эрозия материалов при их облучении потоками плазмы.