

04:11

Воздействие мощного плазменного потока на прозрачную механическую структуру

© В.Г. Котенко, Г.П. Глазунов, Н.Т. Дереповский, И.Е. Гаркуша, В.В. Чеботарев, Е.Д. Волков, О.С. Павличенко, В.И. Терешин

Национальный научный центр "Харьковский физико-технический институт",
310108 Харьков, Украина

(Поступило в Редакцию 14 августа 1995 г.)

Проведены экспериментальные исследования воздействия мощных плазменных потоков на механическую структуру с отличным от нуля коэффициентом прозрачности, составленную из тел, поверхность которых хотя бы в одном из главных направлений имеет достаточно малый радиус кривизны. На примере сеток и проволочек из нержавеющей стали показано, что эрозия такой структуры в результате воздействия мощного плазменного потока может существенно превышать эрозию плоской сплошной пластины.

Введение

Известно, что при развитии крупномасштабных магнетогидродинамических неустойчивостей плазменного шнура в крупных токамаках отдельные участки поверхности 1-й стенки могут подвергаться воздействию мощных импульсных плазменных потоков ($w_p \sim 10^{10}$ Вт/м², $\Delta t \sim 10^{-3} - 10^{-4}$ с) [1]. Это приводит к перегреву и чрезмерной эрозии этих участков и дополнительному поступлению примесей в плазму. Для преодоления этих трудностей в ряде работ [2,3] предлагается экранировать конструкции 1-й стенки ширмой из падающих твердотельных или жидкометаллических шариков. Ясно, что развитие этих идей требует проведения специальных исследований по взаимодействию мощных плазменных потоков ($w_p > w_t$, где w_t — предельная мощность теплоотвода с поверхности вещества вглубь [4]) с мишенью в виде набора шариков. Такая механическая структура имеет некую величину коэффициента прозрачности ($k = s'/s$, s — полная площадь мишени; s' — часть площади мишени, не занятая шариками) и составлена из материальных тел, поверхность которых имеет сравнительно небольшой радиус кривизны r хотя бы в одном из главных направлений. Простейшим примером такой структуры, удобной для проведения имитационных экспериментов, может быть проволочная сетка.

До настоящего времени изучение эрозии материалов под воздействием мощных плазменных потоков проводилось, как правило, на мишенях в виде сплошных плоских пластин, где $k = 0$ и $r = \infty$. При этом, несмотря на то что во многих экспериментах с целью более полного поступления энергии плазменного потока к поверхности мишени, размеры последней выбирались небольшими (5×5 мм), на процессы, которые могут возникать на краях пластины, обычно не обращалось внимания. Однако обнаруженные на установках JET и TFTR явления типа "bloom", сопровождающиеся усиленной эрозией

конструкций 1-й стенки и повышенным загрязнением плазмы, зарождаются как раз на краях пластин и других неоднородностях [5].

Усиление эрозии механических структур с $k \neq 0$ и (или) $r \neq \infty$ следует ожидать по следующим причинам. Эксперименты по взаимодействию мощных плазменных потоков с веществом пластины показали [6], что над ее поверхностью образуется переходной слой, состоящий из ионизованных паров вещества и частиц плазмы и экранирующий в существенной мере поверхность пластины от дальнейшего воздействия плазменного потока (рис. 1, а). В результате эрозия пластины уменьшается в $10 \dots 100$ раз по сравнению с расчетными данными для гипотетического случая поступления энергии плазменного потока к поверхности пластины без каких-либо потерь [7,8]. Для случая $k \neq 0$ возможно ослабление экранирующих свойств переходного слоя за счет частичного уноса ионизованных паров вещества в пространство между шариками под воздействием сил как газокINETического, так и, может быть, пондеромоторного происхождения. Это может повысить эрозию материальных тел, образующих прозрачную механическую структуру, до уровня, более близкого к вышеупомянутому расчетному.

Далее, известно, что коэффициент физического распыления вещества зависит от угла падения частиц на его поверхность [9]. Поскольку при облучении тел с относительно малым радиусом кривизны ($r < l$, l — характерный размер поперечного сечения потока частиц) частицы налетают на поверхность такого тела под всевозможными (от 0 до 90°) углами, то это может явиться причиной повышенной эрозии его поверхности.

Кроме того, для структуры с $k \neq 0$ при уменьшении r до значения ниже некоторого критического, когда силы поверхностного натяжения расплава не в состоянии противостоять силам, способствующим уносу вещества с поверхности тела в виде капель (рис. 1, б), возможно дальнейшее увеличение эрозии.

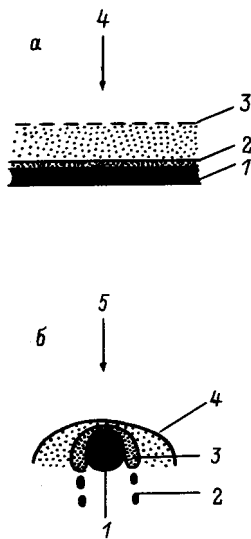


Рис. 1. Модель взаимодействия мощного плазменного потока со сплошной пластиной (а) и с телом малого радиуса кривизны (б). а: 1 — пластина, 2 — расплав, 3 — переходный слой, 4 — плазменный поток; б: 1 — тело малого радиуса кривизны, 2 — капли расплава, 3 — расплав, 4 — переходный слой, 5 — плазменный поток.

В настоящей работе изложены результаты экспериментов по исследованию эрозии механической структуры с $k \neq 0$ и $r \neq \infty$ в виде проволочной сетки, набора сеток или отдельных проволочек. При этом полагаем, что основные закономерности взаимодействия плазмы со статически неподвижной сеткой в достаточной мере адекватны случаю, когда смещение шарика за время взаимодействия с плазмой меньше l , т. е. $v \cdot \Delta t < l$, где v — скорость шарика.

Описание экспериментов и результаты

Эксперименты проводились на установке [10], в которой в качестве источника плазмы применялся импульсный плазменный ускоритель, работающий в одном из фиксированных режимов. Он создавал сгусток водородной плазмы длительностью ≈ 3 мкс с плотностью энергии у мишени ≈ 25 Дж/см² при средней энергии водородных ионов 1.8 кэВ. Поперечное сечение сгустка $\sim 10^2$ см² у мишени. Он налетал на опорную пластину из нержавеющей стали, в центре которой имелось окно 3×4 см для размещения исследуемых образцов. Они крепились в окне опорной пластины изолировано как от пластины и корпуса установки, так и между собой с помощью слюдяных прокладок толщиной 2 мм, уложенных по периметру каждого образца. Эрозия образцов измерялась по изменению их веса взвешиванием на лабораторных весах ВЛР-200 до и после плазменного воздействия (10 импульсов, скважность 10 мин).

Схемы проведенных экспериментов представлены на рис. 2. Исследуемые образцы были изготовлены из нержавеющей стали 12Х18Н10Т.

Базовым для сравнения являлся эксперимент со сплошной пластиной (СП). Его результаты, повторенные многократно с разбросом не более 10%, следующие: средняя потеря веса пластины за 1 импульс $\Delta M' = -0.8 \cdot 10^{-4}$ г/имп, удельная средняя потеря веса пластины $\Delta M'' = -0.66 \cdot 10^{-5}$ г/имп · см².

Исследовалась эрозия двух типов сетки: 1) основа сетки — проволока диаметром 0.3 мм, прозрачность 0.6; 2) основа сетки — проволока диаметром 0.5 мм, прозрачность 0.66.

Эксперимент а — это случай взаимодействия плазменного сгустка на "прострел", эксперимент б — плазменный сгусток после взаимодействия с сеткой наталкивается на сплошную пластину из меди, расположенную на расстоянии 5 мм за сеткой. Данные экспериментов сведены в таблицу.

Здесь знак "−" означает потерю веса, знак "+" означает прибавку в весе образца, а площадь поверхности сетки, взаимодействующей с плазмой, оценивалась как половина суммы площадей поверхности проволочек, помещающихся в окне опорной пластины. Из таблицы можно видеть, что эрозия сеток во много раз превышает эрозию сплошной пластины. Этот результат можно объяснить ослаблением экранирующих свойств переходного слоя, образующегося над сеткой, за счет уноса его части в пространство между проволочками и повышенной эрозией проволочек малого диаметра. Причем последнее обстоятельство, по-видимому, играет в данном случае доминирующую роль, так как при небольшой разнице в прозрачности сеток 1 и 2 разница в потере их веса довольно существенна. Видно также, что в эксперименте б по сравнению с экспериментом а эрозия сетки значительно уменьшилась, что указывает на дополнительную экранировку сетки в эксперименте б переходным слоем, возникающим при взаимодействии части плазменного сгустка, проникшего за сетку, с медной пластиной. В этом эксперименте обнаружено, что медная пластина приобретает некую добавку в весе за счет напыления материала сетки на поверхность пластины. Отметим, что напыление материала сетки

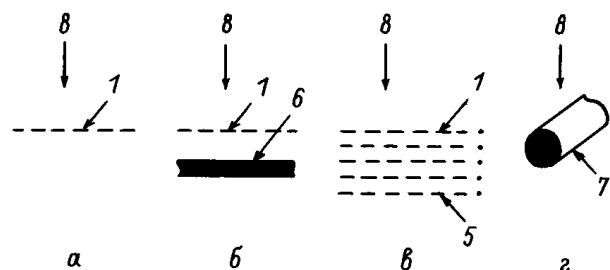


Рис. 2. Схемы экспериментов (а-г). 1-5 — сетки, 6 — медная пластина, 7 — отдельная проволочка, 8 — плазменный поток.

| Изменение веса 10^{-5} г | СП | Эксперимент а | | Эксперимент б | | | |
|----------------------------|-------|---------------|-------|---------------|-----------|------|-----------|
| | | 1 | 2 | 1 | СП (медь) | 2 | СП (медь) |
| $\Delta M'$ | -8.0 | -150 | -86 | -34 | +10 | -10 | +7.2 |
| $\Delta M''$ | -0.66 | -18 | -10.7 | -4.1 | +0.83 | -1.3 | +0.6 |

наблюдалось также на подложке из органического стекла в работе [4]. Кроме того, узлы сетки свариваются, сетка становится жесткой и выпуклой в направлении движения сгустка.

В эксперименте *б* плазменный сгусток взаимодействовал с набором из пяти сеток. Зависимость изменения веса сеток от их положения (номера n) представлена на рис. 3. Как видно из рис.3, для обоих типов сетки характерно превышение веса над исходным для сеток 3 и выше. Осмотр сеток под микроскопом показал, что первые две сетки сильно эродируют со стороны налета плазмы, а с противоположной имеются наплывы застывшего расплава по периметру проволочек. На проволочках сеток 3-5 обнаруживаются множество застывших капель расплава, оторвавшихся, очевидно, с мест его напыла на проволочках первых двух сеток.

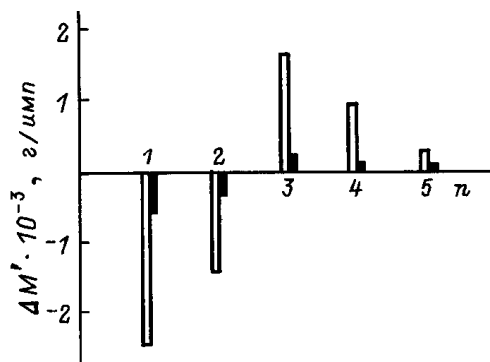


Рис. 3. Изменение веса сеток в зависимости от их номера n . □ — сетка 1, ■ — сетка 2.

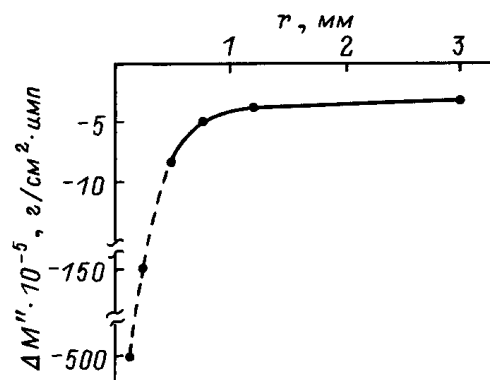


Рис. 4. Удельная потеря веса проволочек в зависимости от их радиуса r .

Обращаем внимание на то, что полная прозрачность системы из пяти сеток типа 1 меньше, чем для системы из сеток типа 2 ($k_1^5 = 0.072$, $k_2^5 = 0.125$). Однако из рис. 3 следует, что $\Delta M'_1 > \Delta M'_2$, т. е. вновь подтверждается наличие сильной зависимости эрозии проволочек от их радиуса. Это явилось дополнительным стимулом к проведению экспериментов типа *з*, в которых измерялась эрозия отдельных проволочек в зависимости от их радиуса. Результаты эксперимента представлены на рис. 4, из которого видно, что эрозия проволочек из нержавеющей стали резко увеличивается при уменьшении их радиуса начиная с $r < 0.5$ мм. С увеличением $r > 0.5$ мм потеря веса уменьшается и плавно приближается к значению, характерному для СП.

Выводы

Изучение величины эрозии проволочных сеток и отдельных проволочек под воздействием плазменных потоков большой мощности показало, что экранирующие свойства переходного слоя, образующегося над механической структурой с $k \neq 0$, могут быть заметно ослаблены по сравнению со случаем сплошной пластины, за счет чего их эрозия многократно увеличивается. К увеличению эрозии приводит также уменьшение радиуса кривизны облучаемых тел, из которых может быть составлена прозрачная механическая структура. Эксперименты с отдельными проволочками демонстрируют возможность очень сильной эрозии для тел с достаточно малым радиусом кривизны.

Обнаруженная в экспериментах *б* и *в* добавка к весу медной пластины и сеток 3-5 указывает на возможность применения системы сеток для защиты от воздействия мощных плазменных потоков некоторых внутренних конструкций термоядерных установок.

Таким образом, результаты проведенных экспериментов по имитации взаимодействия мощного плазменного потока со слоем падающих шариков или капель свидетельствует о том, что эрозия подобных механических структур может намного превысить эрозию сплошной поверхности.

Авторы выражают благодарность В.С. Войцене за ряд ценных замечаний в процессе работы над рукописью.

Список литературы

- [1] ITER Plasma Facing Components. ITER Documentation Series. N 30. IAEA, Vienna, 1991.
- [2] *Мирнов С.В.* // Физика плазмы. 1980. Т. 6. № 2. С. 229–233.
- [3] *Mironov S.V., Dem'yanenko V.N., Murav'ev E.V.* // J. Nucl. Mat. 1992. Vol. 196–198. P. 45–49.
- [4] *Архинов Н.И., Житлухин А.М., Сафронов В.М., Скворцов Ю.В.* Препринт ИАЭ им. Курчатова. М., 1992. № ИАЭ-5543/7.
- [5] *Ulrickson M.* // J. Nucl. Mat. 1990. Vol. 176–177. P. 44–50.
- [6] *Архинов Н.И., Житлухин А.М., Сафронов В.М.* и др. // Физика плазмы. 1987. Т. 13. № 5. С. 632–634.
- [7] *Cilligan J., Bourham M., Eddy W.* et al. // J. Nucl. Mat. 1992. Vol. 196–198. P. 596–601.
- [8] *Ahmed Hassanein, David A. Ehts.* // J. Nucl. Mat. 1992. Vol. 196–198. P. 680–685.
- [9] *Roth J.* // J. Nucl. Mat. 1990. Vol. 176–177. P. 132–141.
- [10] *Беликов А.Г., Гончаренко В.П.* и др. // ЖТФ. 1971. Т. 41. Вып. 9. С. 1881–1886.