УДК 538.971

ЭРОЗИЯ ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛА В РЕЗУЛЬТАТЕ ОБРАЗОВАНИЯ ВОЛНООБРАЗНОГО РЕЛЬЕФА ПОД ДЕЙСТВИЕМ МОЩНЫХ ПЛАЗМЕННЫХ ПОТОКОВ

Ю.В. Мартыненко

НИИ «Курчатовский институт», Москва, Россия

В термоядерных установках металлические поверхности, обращённые к плазме, подвергаются воздействию импульсов мощных плазменных потоков при срывах плазмы и при краевых неустойчивостях — ЭЛМах. При этом возможны разные механизмы эрозии металла. Предложена модель образования волнообразной поверхности расплавленного слоя, над которым движется поток плазмы. Показано, что рост гребней и протравливание долин волновой структуры может привести к глубокой эрозии материала, наиболее выраженной при относительно малых мощностях плазменных потоков. Волновая структура растёт в результате перетекания расплавленного слоя из долин на гребни волновой структуры, обусловленного разностью давления Бернулли над гребнем и в долине волновой структуры. Это является причиной глубокой эрозии материала. Рост высоты волн прекращается при высоте волн, превышающей длину волны, которая растёт при уменьшении мощности потока.

Ключевые слова: плазменные потоки, ЭЛМы, срывы плазмы, металл, эрозия, волновой рельеф, поток вязкой жидкости.

METAL SURFACE EROSION DUE TO WAVE RELIEF FORMATION UNDER POWER PLASMA FLOW

Yu.V. Martynenko

NRC «Kurchatov Institute», Moscow, Russia

Plasma faced metal surfaces are affected by power plasma pulses in thermonuclear devices at plasma disruption and ELMs and different mechanisms of metal erosion are possible. The model of wave relief formation on melted layer over which plasma/vapor flows is proposed. Hills growth and valleys etching are shown to result in deep metal erosion the most manifested at relatively low power of plasma flow. The wave structure grows as a result of melted layer flow from wave valley to hill caused by Bernoulli pressure difference over hill and in valley. It is the reason of deep material erosion. Wave height growth stops at wave height equal wave length which grows at plasma flow power decrease.

Key words: plasma flow, ELMs, plasma disruption, metal, erosion, wave relief, viscose liquid flow.

ВВЕДЕНИЕ

В термоядерных установках металлические поверхности, обращённые к плазме, подвергаются воздействию импульсов мощных плазменных потоков при срывах плазмы и при краевых неустойчивостях — ЭЛМах. При ожидаемых потоках мощности возможны разные механизмы эрозии металла: испарение,

движение расплавленного слоя под действием градиента давления плазмы, приводящее к удалению части расплавленного слоя, неустойчивости расплавленного слоя, приводящие к капельной эрозии, кипение, образование трещин.

Здесь будет рассмотрено образование волнообразного рельефа на поверхности металла при облучении импульсными потоками плазмы большой мощности и показано, что это может быть причиной глубокой эрозии материала, наиболее опасной при сравнительно малых потоках мощности.

Волны на расплавленной поверхности металла наблюдались в экспериментах на плазменных ускорителях в ТРИНИТИ и других лабораториях [1]. На рисунке показаны волны на поверхности ванадиевого сплава, образовавшиеся при импульсах дейтериевой плазмы в ускорителе МК-200 [2].

Структура поверхности ванадиевого сплава после облучения пятью импульсами дейтериевой плазмы в плазменном ускорителе МК-200 ($2 \cdot 10^{10}$ Вт/м², 50 мкс) [2]

ОБРАЗОВАНИЕ ВОЛН НА РАСПЛАВЛЕННОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПОД ДЕЙСТВИЕМ МОЩНЫХ ИМПУЛЬСОВ ПЛАЗМЫ

Зарождение волн на расплавленной поверхности обусловлено развитием тангенциальной неустойчивости, вызванной потоком пара/плазмы над расплавленной поверхностью [3]. До сих пор образование волн при воздействии плазменных потоков на металлы рассматривалось в линейном приближении [4—8], которое определяет длину волны [3]:

$$\lambda = 3\pi\alpha/\rho'U^2, \quad (1)$$

где α — поверхностное натяжение; ρ' и U — плотность и скорость пара. В работах [3—5] предложена модель капельной эрозии при отрыве верхушек гребней потоком газа/пара. По физической сути длина волны определяется конкуренцией разности давлений пара между гребнем и долиной волны согласно закону Бернулли и поверхностным натяжением. Поскольку частота колебаний [3]

$$\omega = (2\pi U/\lambda)(\rho'/(\rho + \rho')) = (2\pi\rho'U^3/3\pi\alpha)(\rho'/(\rho + \rho')) \quad (2)$$

(ρ — плотность жидкости) меньше инкремента неустойчивости [3]

$$\gamma = \{2\rho'U^3/3\alpha\}(\rho'/3\rho)^{1/2} \quad (3)$$

в $(3\rho'/\rho)^{1/2} \sim 10^3$ раз, то на первом же периоде рост гребней переходит в нелинейную стадию, на которой происходит перетекание жидкости из долин на гребни. Такое течение происходит под действием градиента давления пара между гребнем и долиной волны, который согласно закону Бернулли равен

$$\text{grad}P \approx \rho'U^2/\lambda. \quad (4)$$

Уравнение Навье—Стокса в этом случае можно записать как

$$\rho'U^2/\lambda = \rho\chi v/h^2, \quad (5)$$

где h — толщина расплавленного слоя; χ — кинематическая вязкость.

Скорость течения расплавленного металла при этом равна

$$v \approx (\rho'/\rho)U^2h^2/\lambda\chi, \quad (6)$$

а высота гребня H растёт со скоростью

$$dH/dt = v h/\lambda = (\rho'/\rho)U^2h^3/\lambda^2\chi. \quad (7)$$

При типичных плотности и скорости пара испаренного металла при ЭЛМах [9] $\rho' = 10^{17} \text{ см}^{-3}$, $U = 10^5 \text{ см/с}$ оценки дают величину скорости течения $v \approx 10 \text{ см/с}$ и рост гребня за один импульс (1 мс) $d = 1\text{—}10 \text{ мкм}$.

Полученная оценка сделана для гладкой подложки расплавленного слоя. Однако если длина волны больше размера кристаллических зёрен, то течение расплавленного слоя происходит не по гладкой подстилающей поверхности, а по поверхности с характерным размером неровностей, равным размеру зёрен. Это замедляет скорость течения и рост гребней.

Если высота гребней после первого импульса сопоставима или больше, чем толщина расплавленного слоя, то при последующих импульсах продолжается рост ранее образованных гребней. Ранее образовавшиеся гребни продолжают расти в результате перетекания расплавленного металла из долин со скоростью, определяемой (6). Таким образом, высота гребней растёт линейно с числом импульсов. При этом углубляются долины волновой структуры, откуда металл перетекает на гребни. Это приводит к протравливанию образца.

Рост гребней и углубление долин может замедлиться или прекратиться, когда высота гребней станет сравнима с длиной волны. При этом поток пара/плазмы не попадает в долины, а движется над гребнями, и разность давления над гребнем и в долине уменьшается. Интересно отметить, что для более мощных импульсов плазмы, когда велика плотность ρ' и скорость U пара/плазмы, длина волны $\lambda = 3\pi\alpha/\rho'U^2$

меньше и рост гребней прекращается при меньших высотах гребней, хотя при мощных импульсах плазмы гребни растут быстрее $dH/dt \sim \rho U^2 h^3 / \lambda^2$.

Отметим, что уже в работе [1] наблюдалось увеличение как амплитуды, так и длины волны при уменьшении мощности потока.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Развита модель образования волнообразной поверхности на нелинейной стадии неустойчивости расплавленного слоя, над которым имеется поток пара/плазмы. На этой стадии жидкость перетекает из долин на гребни. Течение происходит под действием градиента давления пара между гребнем и долиной волновой структуры.

Показано, что высота гребней и глубина долин волновой структуры растут с ростом числа импульсов плазмы пока высота волн меньше длины волны. Это может быть причиной глубокой эрозии материала. Рост гребней прекратится при высоте волн, превышающей длину волны. Структура кристаллических зёрен подложки, по которой течёт расплавленный металл, влияет на развитие волновой структуры на расплавленной поверхности и капельную эрозию металлов.

Работа поддержана грантом НШ-4361.2012.2 Президента РФ для государственной поддержки ведущих научных школ РФ.

REFERENCES

1. **Bakhtin V.P., Vasil'ev V.I., Grebenshchikov Yu.B., Konkashbaev I.K., Kucheryavyy Yu.V., Myanko V.I., Strunnikov V.M.** Excitation of waves by plasma flow on the molten metal surface — In Proc.: 1-st All-Union conf. «Modification of Properties of Structural Materials by Beams of Charged Particles». Part I, 1991, pp. 108—110 (in Russian).
2. **Jakushin V.L., Kalin B.L., Kraskovskaya N.V., Votinov S.N., Vasil'ev V.I.** — J. Nucl. Mater., 1996, vol. 233—237, pp. 390—394.
3. **Landau L.D., Livshits E.M.** *Mechanics of continua* — M.: St. Pub. h. of Techno.-Theoretical Literature, 1954 (in Russian).
4. **Martynenko Yu.V., Moskovkin P.G.** About droplet erosion of metals under the influence of plasma disruptions in tokamaks — VANT. Ser. Termoyadernyi sintez (Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Thermonuclear Fusion), 2000, issue 1, pp. 65—69 (in Russian).
5. **Khripunov B.I., Danelyan L.S., Guseva M.I., Gureev V.M., Korshunov S.N., Kulikauskas V.S., Martynenko Yu.V., Petrov V.B., Strunnikov V.N.** Peculiarity of deuterium ions interaction with tungsten surface in the condition imitating combination of normal operation with plasma disruption in ITER. — J. Nucl. Mater., 2000, November, pp. 1—5.
6. **Danelyan L.S., Guseva M.I., Gureev V.M., Khripunov B.I., Korshunov S.N., Kulikauskas V.S., Litnovsky A.M., Martynenko Yu.V., Petrov V.B., Strunnikov V.M., Stolyarova V.G., Vasiliev V.I.** — J. Nucl. Mater., 2001, vol. 290—293, pp. 1069—1073.
7. **Bazylev B., Janeschitz G., Landman I., Pestchanyi S., Loarte A., Federici G. et al.** ITER transient consequence for material damage: modeling versus experiments. — Physica Scripta, 2007, vol. 128, pp. 229—233.
8. **Bazylev B., Janeschitz G., Landman I., Pestchanyi S., Loarte A., Federici G. et al.** Behaviour of melted tungsten plasma facing components under ITER-like transient heat loads. Simulation & Experiment. — Fusion Eng. Des., 2008, vol. 83, p. 1077.
9. **Karlykhanov N.G., Martynenko Yu.V., Matveenko Yu.I., Moskovkin P.G., Politov V.Yu.** Interaction of plasma flow with a solid target. — Fizika plazmy (Plasma Physics), 1996, vol. 22, № 11, p. 998 (in Russian).

AUTHORS

Martynenko Yu.V. NRC “Kurchatov Institute”, pl. Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia;
Martynenko_YV@nrcki.ru

Received 24 April 2012
Problems of Atomic Science and Technology
Ser. Thermonuclear Fusion, 2012, issue 3, pp. 41—43.