УДК 538.9: 532

АНАЛИЗ МЕХАНИЗМОВ ФОРМИРОВАНИЯ РЕЛЬЕФА ПОВЕРХНОСТИ МАТЕРИАЛА ПРИ ОБРАБОТКЕ МОЩНЫМИ ПЛАЗМЕННЫМИ ПОТОКАМИ[1]

А.Я. Лейви[2]

Проводится анализ механизмов формирования рельефа поверхности мишени при обработке мощными плазменными потоками. Показано, что в случае плазменной обработки материала динамика поверхности определяется не только силами поверхностного натяжения и вязкости, но и силами, связанными с давлением плазменного потока на вещество. За счет действия этих сил шероховатость поверхности увеличивается даже при обработке в докритическом режиме.

Ключевые слова: нелинейная динамика, радиационная обработка, массоперенос, неустойчивость Релея-Тейлора, модификация материала

Введение

В последние годы, с целью модификации свойств конструкционных материалов широко используются мощные плазменные потоки (с плотностью мощности более 10^6 Вт/см^2). В результате плазменной обработки можно увеличить адгезию материала пленки с материалом подложки, увеличить микротвердость материала, модифицировать рельеф поверхности (сглаживание или увеличение рельефа поверхности).

В работах [1, 2] исследуется формирование рельефа поверхности материала при обработке компрессионными плазменными потоками (КПП) [3]. В данных работах показано, что после обработки КПП на поверхности мишени образуются две качественно отличающиеся области (центральная область и область радиального разлета). Центральная область – та часть поверхности образца, на которую плазменный поток падает нормально, и единице поверхности данной области передана максимальная энергия. Область радиального разлета – та часть поверхности образца, на которой происходит радиальный разлет плазменного потока. Из работ [1, 2] следует, что формирование волнообразного рельефа поверхности в области радиального разлета обусловлено развитием неустойчивости Кельвина–Гельмгольца. Также показано, что при обработке КПП в случае, когда плотность поглощенной энергии составляет W = 10–20 Дж/см^2, наблюдается докритический режим обработки (режим обработки без абляции). Тогда согласно работе [4] в центральной области в докритическом режиме должно наблюдаться сглаживание рельефа поверхности, в то время как шероховатость поверхности увеличивается [1, 2].

Данная работа посвящена исследованию механизмов формирования рельефа поверхности центральной области мишени при обработке мощными плазменными.

Анализ механизмов формирования рельефа поверхности мишени

В работах [4–6] показано, что динамика поверхности при обработке интенсивными потоками заряженных частиц определяется балансом сил поверхностного натяжения, вязкости, а также сил инерций, возникающих в результате теплового расширения вещества при его нагреве. В случае, когда обработка ведется мощными плазменными потоками, необходимо также учитывать давление плазменного потока на поверхность мишени.

Будем рассматривать ту область мишени, на которую плазменный поток падает нормально. Большинство технологических режимов обработки соответствуют случаю, когда приповерхностные слои обрабатываемой мишени переходят из твердого состояния в жидкое. В этом случае давление плазменного потока на поверхность материала может достигать 10 МПа [7], а ускорение свободной границы мишени составляет 10^2–10^5 м/с^2. Также поскольку приповерхностные

[1] Работа выполнена при частичной финансовой поддержке научно-исследовательской работы ФГБОУ ВПО «ЮУрГУ» (НИУ), проводимой в рамках государственного задания Министерства образования и науки РФ (№ 2012043-ГЗ04)

[2] Лейви Артем Ячеславович – кандидат физико-математических наук, доцент, кафедра общей и экспериментальной физики, Южно-Уральский государственный университет

E-mail leyvy@mail ru

слои переходят в жидкое состояние, то для определения влияния давления плазменного потока на вещество воспользуемся гидродинамическим подходом. Будем рассматривать систему «пленка–подложка».

В рамках потенциального течения несжимаемой жидкости рассмотрим систему двух жидкостей в двумерной декартовой геометрии. Пусть свободная поверхность пленки задается функцией $H(x,t)$. А граница раздела двух жидкостей задается функцией $Z(x,t)$. Функции $Z(x,t)$ и $H(x,t)$ – периодические по x. Жидкость, ограниченную функциями $Z(x,t)$ и $H(x,t)$, будем называть первой жидкостью (пленка) – область Ω_1. Полубесконечную область, ограниченную функцией $Z(x,t)$ будем называть второй жидкостью (материал основы) – область Ω_2. Индексы «1», «2» соответствуют первой и второй жидкости, ρ_1, ρ_2 – плотности жидкостей.

Поскольку течение в слое жидкости потенциально, то вектор скорости может быть записан как градиент потенциала скорости $\vec{v} = \nabla\varphi$, с другой стороны, для несжимаемой жидкости поле скоростей может быть представлено как ротор векторного потенциала $\vec{v} = \left[\nabla, \vec{e}_y\psi\right]$. Рассмотрим задачу в линейном приближении, полагая $ka \ll 1$ (k – волновое число, a – амплитуда возмущения). Тогда нелинейными членами в системе уравнений (1)–(4) вследствие малости пренебрегаем. Представим гравитационный потенциал в виде $G(x,Z,t) = -g_2(t)Z(x,t)$, $G(x,H,t) = -g_1(t)H(x,t)$, где $g_1(t), g_2(t)$ – ускорение соответствующих границ, и получим систему уравнений, описывающую динамику двух границ в линейном приближении. Введем число Атвуда $A = \dfrac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1}$. Пусть ускорение свободного падения направлено из первой жидкости во вторую. Система уравнений, описывающая движение жидкостей, в рамках нашей модели имеет вид:

$$\nabla^2\varphi_1(x,z,t) = 0,\ \nabla^2\varphi_2(x,z,t) = 0, \tag{1}$$

$$\frac{\partial\varphi_1(x,Z,t)}{\partial t} = Ag_2(t)Z(x,t) - \frac{P(x,Z,t)}{\rho_1},$$

$$\frac{\partial\varphi_1(x,H,t)}{\partial t} = g_1(t)H(x,t),\quad \frac{\partial\varphi_2(x,Z,t)}{\partial t} = g_2(t)Z(x,t) - \frac{P(x,Z,t)}{\rho_2}, \tag{2}$$

$$\frac{\partial Z}{\partial t} = v_{1z}(x,Z,t) = \frac{\partial\varphi_1(x,Z,t)}{\partial z},\qquad \frac{\partial H}{\partial t} = v_{1z}(x,H,t) = \frac{\partial\varphi_1(x,H,t)}{\partial z},$$

$$\frac{\partial Z}{\partial t} = v_{2z}(x,Z,t) = \frac{\partial\varphi_2(x,Z,t)}{\partial z}. \tag{3}$$

Поскольку нормальные компоненты скоростей на контактной границе равны, то в линейном приближении имеем: $\varphi_1 = -\varphi_2$ (4). Пусть на контактной и свободной границе возмущение задается в виде:

$$Z(x,t) = Z_0(t)\cos(kx),\ H(x,t) = H_0(t)\cos(kx),$$

где $Z_0(t)$ – амплитуда начального возмущения контактной границе, $H_0(t)$ – амплитуда начального возмущения свободной поверхности.

Не трудно убедиться, что в первой области потенциал скорости, имеющий вид

$$\varphi_1(x,z,t) = \frac{\varphi(z,t)\operatorname{sh}(k(H-z)) + \varphi(H,t)\operatorname{sh}(kz)}{\operatorname{sh}(kH)}\cos(kx), \tag{5}$$

удовлетворяет решению уравнения Лапласа (1). Потенциал (5) справедлив для системы с плоскими границами.

Подставляя решение уравнения Лапласа (5) в систему (1)–(3), можно получить систему уравнений, описывающую изменение амплитуды начального возмущения со временем в линейном приближении.

$$\begin{cases} \ddot{Z}_0(t) = \dfrac{-Ag_2kZ_0(t)\operatorname{ch}(kH) + kg_1H_0}{\operatorname{sh}(kH)} \\ \ddot{H}_0(t)\operatorname{ch}(kH) - \ddot{Z}_0(t) = g_1kH_0\operatorname{sh}(kH) \end{cases} \tag{6}$$

Проведем предельный переход: $kH \to -\infty$, означающий большую ($H >> \lambda$, λ - длина волны) толщину слоя. Тогда система (6) будет иметь вид:

$$\begin{cases} \ddot{Z}_0(t) = Ag_2kZ_0(t) \\ \ddot{H}_0(t) = -g_1kH_0(t) \end{cases}.$$

Из данной системы уравнений видно, что при $H >> \lambda$, в зависимости от знака числа Атвуда и ускорения, контактная и свободная границы могут быть неустойчивы (в соответствии с классической неустойчивостью Релея–Тейлора), либо устойчивы, что соответствует случаю гравитационных волн (устойчивая поверхность).

Рассмотрим неустойчивость Рихтмайера–Мешкова. В этом случае ускорение носит импульсный характер и имеет вид: $g(t) = U\delta(t)$, где U – скорость соответствующей среды после прохождения ударной волны. Тогда система (6) будет иметь вид:

$$\begin{cases} \dot{Z}_0(t) = \dfrac{-AkU_2Z_0(t)\operatorname{ch}(kH) + kU_1H_0}{\operatorname{sh}(kH)} \\ \dot{H}_0(t)\operatorname{ch}(kH) - \dot{Z}_0(t) = kU_1H_0\operatorname{sh}(kH) \end{cases}. \qquad (7)$$

Будем искать решение уравнений (6) и (7) в виде разложения в ряд Тейлора. Амплитуды соответствующих границ представим в виде:

$$Z_0(t) = \sum_n a_n t^n, \qquad H_0(t) = \sum_n b_n t^n.$$

Подставим эти амплитуды в (6), (7) и найдем a_n, b_n.

Для неустойчивости Рихтмайера–Мешкова

$$a_{n+1} = \frac{Ba_n + Db_n}{n+1}, \quad a_0 = Z_0(t=0), \quad b_{n+1} = \frac{Ba_n + (C+D)b_n}{(n+1)\operatorname{ch}(kH)}, \quad b_0 = H_0(t=0),$$

где $B = -AUk\operatorname{ch}(kH)/\operatorname{sh}(kH)$, $D = kU/\operatorname{sh}(kH)$, $C = kU\operatorname{sh}(kH)$.

Для неустойчивости Релея–Тейлора

$$a_{n+2} = \frac{Ba_n + Db_n}{(n+1)(n+2)}, \quad a_0 = Z_0(t=0), \quad b_{n+2} = \frac{Ba_n + (C+D)b_n}{(n+1)(n+2)\operatorname{ch}(kH)}, \quad b_0 = H_0(t=0),$$

где $B = -Agk\operatorname{ch}(kH)/\operatorname{sh}(kH)$, $D = kg/\operatorname{sh}(kH)$, $C = kg\operatorname{sh}(kH)$.

Ряд будем суммировать численно, в качестве критерия для окончания суммирования используем $\left|a_i/\sum a_i\right| < \varepsilon$, $\left|b_i/\sum a_i\right| < \varepsilon$, где параметр малости $\varepsilon \sim 10^{-4}$.

В качестве исследуемого вещества было выбрано Fe. Параметры обработки выбирались аналогично [3, 4]. Исследовалась центральная область в закритическом и докритическом режиме. Глубина расплава составляла 10 мкм. Амплитуда возмущений на контактной границе (граница раздела «расплав–твердое тело») равнялась нулю. Начальная амплитуда свободной поверхности бралась равной 1 мкм (в соответствии с экспериментальными данными). Численное решение уравнений (7) описанным выше методом показало, что на временах порядка 20 мкс при плотности поглощенной энергии 15 Дж/см^2 (докритический режим обработки) шероховатость поверхности составляет порядка 7,8 мкм, что хорошо согласуется с экспериментальными данными [3].

Таким образом, для описания формирования рельефа поверхности материала в центральной области необходимо учитывать давление плазменного потока помимо сил поверхностного натяжения и диссипации энергии за счет вязкости.

Заключение

Проведен анализ механизмов формирования рельефа поверхности материала при плазменной обработке в центральной области (та часть поверхности, на которую плазменный поток падает нормально). Показано, что для описания формирования рельефа поверхности материала в центральной области необходимо учитывать давление плазменного потока помимо сил поверхностного натяжения и диссипации энергии за счет вязкости.

Численные исследования показали, что учет давления плазменного потока на мишень при рассмотрении модификации поверхности при плазменной обработке позволяет объяснить рост шероховатости рельефа в докритическом режиме.

Литература

1. Изменение рельефа поверхности мишени при обработке компрессионными плазменными потоками / В.М. Асташинский, А.Я. Лейви, К.А. Талала и др. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2013. – № 10. – С. 1–8.
2. Mechanisms of Metal Surface Modification under Processing by Compression Plasma Flows / A.Ya. Leyvi, V.M. Astashynski, M.Yu. Zotova *et al.* // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2012. – Т. 55. – Вып. 12-2. – С. 202–205.
3. Формирование субмикронных цилиндрических структур при воздействии на поверхность кремния компрессионным плазменным потоком / В.В. Углов, В.М. Анищик, В.В. Асташинский и др. // Письма в ЖЭТФ. – 2001. – Т. 74, № 4. – С. 234–236.
4. 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.
5. О механизме образования микрократеров на поверхности мишени, облучаемой мощным электронным пучком / Н.Б. Волков, А.Е. Майер, А.П. Яловец и др. // Письма в ЖТФ. – 2006. – Т. 32, № 10. – С. 20–29.
6. Волков Н.Б. Нелинейная динамика контактной границы сплошных сред с различной плотностью / Н.Б. Волков, А.Е. Майер, А.П. Яловец // ЖТФ. – 2003. – Т. 73, № 3. – С. 1–9.
7. 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. – Tomsk, 2010. – P. 173–176.

ANALYSIS OF MECHANISMS OF SURFACE PATTERN FORMATION DURING THE HIGH-POWER PLASMA STREAM PROCESSING

A.Ya. Leyvi[1]

The analysis of mechanisms of surface pattern formation during the high-power plasma stream processing is carried out. It is showed that in the case of plasma processing the surface dynamics is determined not only by the surface tension forces and viscosity but also by the forces connected with the plasma stream pressure on the substance. By means of these forces the roughness of the surface increases even during the processing in the precritical mode.

Keywords: non-linear dynamics, radiation processing, mass transfer, Rayleigh–Taylor instability, material modification.

References

1. Astashinskiy V.M., Leyvi A.Ya., Talala K.A, Uglov V.V., Cherenda N.N., Yalovets A.P. *Poverkhnost'. Rentgenovskie, sinkhrotronnye i neytronnye issledovaniya.* 2013. no. 10. p. 1–8. (in Russ.).
2. Leyvi A.Ya., Astashynski V.M., Zotova M.Yu., Cherenda N.N., Uglov V.V., Yalovets A.P. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Fizika.* 2012. Vol. 55. Issue 12-2. P. 202–205. (in Russ.).
3. Uglov V.V., Anishchik V.M., Astashinskiy V.V., Astashinskiy V.M., Ananin S.I., Askerko V.V., Kostyukevich E.A., Kuz'mitskiy A.M., Kvasov A.M., Danilyuk A.L. *JETP Letters.* 2001. Vol. 74, no. 4. pp. 234–236.
4. Krasnikov V.S., Leyvi A.Ya., Mayer A.E., Yalovets A.P. *ZhTF.* 2007. Vol. 77. Issue 4. pp.41–49.
5. Volkov N.B., Mayer A.E., Talala K.A., Yalovets A.P. *Pis'ma v ZhTF.* 2006. Vol. 32, no. 10. pp. 20–29.
6. Volkov N.B., Mayer A.E., Yalovets A.P. *ZhTF.* 2003. Vol. 73, no. 3. pp.1–9.
7. Leyvi A.Ya., Talala K.A., Yalovets A.P. The dynamics of metal target surface at irradiation by intense plasma streams. *Proceedings of 10-th International Conference on Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows.* Tomsk, 2010. pp. 173–176.

Поступила в редакцию 20 сентября 2013 г.

[1] Leyvi Artem Yacheslavovich is Cand Sc (Physics and Mathematics), General and Experimental Physics Department, South Ural State University
E-mail leyvy@mail ru