

АНАЛИЗ МЕХАНИЗМОВ ЖИДКОФАЗНОГО МАССОПЕРЕНОСА ВЕЩЕСТВА ПРИ ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКЕ ТВЕРДОГО ТЕЛА¹

К.А. Талала², А.Я. Лейви³, А.П. Яловец⁴

Важным фактором в формировании новых свойств материала являются процессы массопереноса. Среди основных механизмов массопереноса в работе рассматривается неустойчивость Кельвина–Гельмгольца (НКГ). Показано, что развитие НКГ и другие возмущения профиля поверхности создают условия для развития сдвиговой термокапиллярной неустойчивости, а толщина области перемешивания может достигать нескольких мкм, она ограничена толщиной расплава.

Ключевые слова: плазма, плазменная обработка, массоперенос, неустойчивость Кельвина–Гельмгольца, компрессионные плазменные потоки, модификация материала.

Введение

В настоящее время обработка твердотельных мишеней мощными потоками энергии (с плотностью мощности 10^5 – 10^7 Вт/см²) широко используется для модификации свойств. Данные технологии обладают рядом преимуществ перед традиционными: обработка деталей сложной формы, малое время обработки, простота автоматизации процесса.

Перемешивание приповерхностных слоев в системах с покрытием приводит к изменению свойств материала: улучшению коррозионной и механической устойчивости, биосовместимости имплантатов. Рассмотрим процессы массопереноса вещества при обработке материала компрессионными плазменными потоками.

На конечное состояние обрабатываемой мишени влияют параметры обработки и исходное состояние поверхности. При разных режимах обработки может происходить сглаживание рельефа или образование кратеров.

Авторы [1] отмечают, что существует два качественно отличающихся по поведению материала режима обработки: докритический и закритический. Закритический режим обработки характеризуется образованием и интенсивным разлетом плазменного факела, как следствие скорость поверхности мишени достигает 100–1000 м/с, что приводит к развитию неустойчивости Релея–Тейлора (НРТ) и Рихтмайера–Мешкова (НРМ), появлению кратеров на обрабатываемой поверхности. Закритическому режиму предшествует докритический, в этом случае скорость обрабатываемой поверхности составляет 1–10 м/с и, как показано в [1], наблюдается сглаживание микрорельефа. Переход от докритического режима облучения к закритическому носит пороговый характер.

Отличительной особенностью изменения рельефа поверхности материала при воздействии плазменного потока является развитие неустойчивости Кельвина–Гельмгольца (НКГ) [2].

Целью работы является определение режимов обработки материалов, при которых массоперенос наиболее эффективен. А также определение основных механизмов массопереноса.

Основные механизмы массопереноса

Рассмотрим возможные механизмы массопереноса в системах с покрытием при обработке плазменным потоком. Прежде всего, это диффузия. В расплаве коэффициент диффузии составляет $D = 10^{-9}$ м²/с. При обработке плазменным потоком в течение 100 мкс оценим пространст-

¹ Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (проект № 10-08-00251-а) и научно-исследовательской работы ФГБОУ ВПО «ЮУрГУ» (НИУ), проводимой в рамках государственного задания Министерства образования и науки РФ (№ 2012043-Г304).

² Талала Ксения Анатольевна – кандидат физико-математических наук, доцент, кафедра оптики и спектроскопии, Южно-Уральский государственный университет. E-mail: ktalala@yandex.ru

³ Лейви Артем Ячеславович – кандидат физико-математических наук, доцент, кафедра общей и экспериментальной физики, Южно-Уральский государственный университет. E-mail: leivy@mail.ru

⁴ Яловец Александр Павлович – доктор физико-математических наук, профессор, кафедра оптики и спектроскопии, Южно-Уральский государственный университет. E-mail: yalovets@physicon.susu.ac.ru

венный масштаб диффузии $l = \sqrt{Dt} = \sqrt{10^{-13}} = 316 \cdot 10^{-9}$ м. Таким образом, за время существования расплава металла глубина диффузионного слоя не превышает 1 мкм, что много меньше глубины перемешивания (10–20 мкм), наблюдаемой в большинстве экспериментов. Роль диффузии существенна в тонких слоях (десятки–сотни нанометров) [3].

Массоперенос также могут вызывать различные гидродинамические неустойчивости. Неустойчивость Релея–Тейлора (НРТ) и неустойчивость Рихтмайера–Мешкова (НРМ) развиваются в системе двух жидкостей. В результате нагрева поверхность раздела движется ускоренно, что создает условие для роста возмущения за счет НРТ. После прекращения воздействия, поверхность раздела движется по инерции и амплитуды возмущений увеличиваются (НРМ). Рост ограничивается кристаллизацией расплава.

В работе [4] было показано, что развитие НРМ контактной границы может приводить к перемешиванию приповерхностных слоев мишени только в случае возмущений поверхности мишени, соответствующих определенному диапазону волновых чисел, который в свою очередь определяется режимом облучения, например, для пары Al и Fe и плотности вложенной энергии $W = 80$ Дж/см² этот диапазон составляет от 19 до 20 мкм. Поэтому для реализации данного механизма перемешивания требуется специальная подготовка поверхности, что является сложной в технологическом смысле задачей и не всегда оправданной.

При неоднородном нагреве мишени возможно возникновение конвективного течения [5]. В проводящем материале возможны два типа конвекции: термокапиллярная и термогравитационная, обусловленная ускорением облучаемой среды. Как показано в работе [6], при нагреве металлической мишени интенсивными потоками энергии развивается только термокапиллярная конвекция, роль термогравитационной неустойчивости мала.

Термокапиллярная неустойчивость развивается, если имеется градиент температуры, направленный внутрь жидкости относительно свободной поверхности. В случае обработки плазмой градиент температуры направлен в противоположную сторону, к свободной поверхности и оказывает стабилизирующее действие на объемное течение. Неоднородность температуры на поверхности также может приводить к возникновению объемного течения в тонком приповерхностном слое, т.е. к термокапиллярной конвекции. Формирование поверхностного градиента температуры осуществляется за счет неоднородностей состава и шероховатости поверхности.

Кроме того, при обработке плазменной струей на границе расплав плазма имеет разрыв касательных скоростей, что создает условия для развития неустойчивости Кельвина–Гельмгольца (НКГ). Турбулентная стадия НКГ может приводить к жидкофазному массопереносу. Также развитие НКГ приводит к неоднородному нагреву поверхности расплава, что способствует развитию сдвиговой термокапиллярной конвекции.

Для описания взаимодействия плазменных потоков с веществом была использована математическая модель, описанная в [7]. Такая модель взаимодействия плазменных потоков с веществом включает в себя (для мишени) совместное решение уравнений механики сплошных сред с широкодиапазонными уравнениями состояния. Динамика плазменного потока описывается в рамках двухтемпературной одножидкостной модели. При описании воздействия излучения, генерируемого плазменным потоком, были учтены процессы фоторекомбинации, фотоионизации, тормозного излучения.

Для описания слабонелинейной стадии развития НКГ на поверхности мишени, обрабатываемой компрессионным плазменным потоком, был использован метод локальных преобразований [8]. Данный метод позволяет моделировать динамику поверхности раздела слоев без расчета течения в объеме сред, что значительно сокращает объем вычислений.

Термодинамические параметры материала и плазменного потока, скорость плазмы рассчитывались посредством программного комплекса, описанного в [7].

Результаты моделирования

Воздействие плазменными потоками, как и облучение интенсивными пучками заряженных частиц, приводит к сильному разогреву поверхностного слоя материала, что может сопровождаться его плавлением и испарением. По поведению вещества мишени можно выделить два режима обработки: докритический и закритический [1].

Краткие сообщения

В докритическом режиме облучения вещество мишени плавится, но остается в конденсированном состоянии, а массовая скорость расплава не превышает 10 м/с. В закритическом режиме происходит формирование плазменного факела и его последующий разлет. Скорость свободной поверхности факела достигает более 10^3 м/с, ускорение – 10^9 – 10^{11} м/с². Переход от докритического к закритическому режиму носит пороговый характер. На рис. 1 приведена зависимость толщины расплава от плотности поглощенной энергии и времени воздействия плазменного потока. Закрашенная область относится к закритическому режиму обработки, который в первую очередь характеризуется интенсивным кратерообразованием. Жидкофазный массоперенос здесь затруднен вследствие испарения покрытия. В докритическом режиме обработки происходит сглаживание мелкомасштабных возмущений, а также рост длинноволновых возмущений за счет НКГ, массоперенос, обусловленный вихревой стадией НКГ и термокапиллярной сдвиговой неустойчивостью.

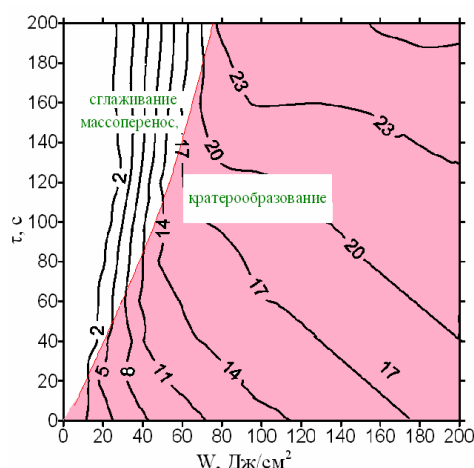


Рис. 1. Зависимость толщины расплава (в мкм) от плотности поглощенной энергии W и времени воздействия плазменного потока

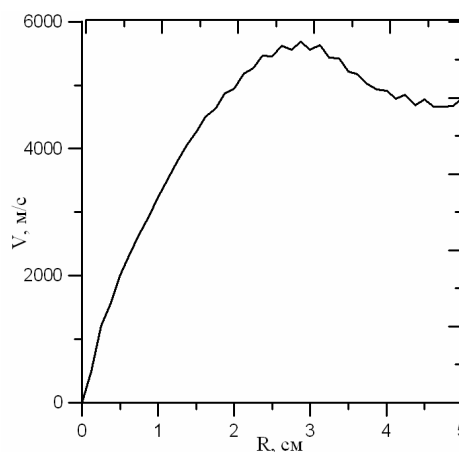


Рис. 2. Зависимость радиальной скорости от радиальной координаты для условий обработки: гелиевая плазма, с начальной скоростью $v_0 = 10^4$ м/с, температурой $T_0 = 2$ эВ и плотностью $\rho = 0,1\rho_0$

Как показано в [7], при длительной обработке материала плазмой устанавливается стационарное состояние плазмы вблизи поверхности. На рис. 2 приведена зависимость радиальной скорости от радиальной координаты. Скорость течения плазмы составляет несколько тысяч м/с при потоке энергии в центре $q = 3 \cdot 10^5$ Вт/см².

Оценим характерное время развития НКГ при таких данных. Плотность плазмы вблизи границы раздела $\rho_1 = 0,1$ кг/м³, плотность расплава алюминия $\rho_2 = 2700$ кг/м³, скорость плазменного потока $v = 3000$ м/с, длина волны $\lambda = 10$ мкм. Найдем число Атвуда $A = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} = 0,9997$.

Тогда время развития НКГ $\tau = \frac{2}{\sqrt{1 - A^2} kv} = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - A^2} \pi v} = 433 \cdot 10^{-8}$ с = 433 нм. Тогда за время обра-

ботки 100 мкс потоками плазмы [5] НКГ перейдет в турбулентную стадию. Стабилизирующими факторами является вязкость, поверхностное натяжение и конечная толщина расплава.

Рассмотрим эволюцию начального гармонического возмущения: начальная амплитуда $a_0 = 0,1$ мкм, длина волны $\lambda = 10$ мкм при условии обработки: гелиевая плазма с начальной скоростью $v_0 = 10^4$ м/с, температурой $T_0 = 1$ эВ и плотностью $\rho = 0,1\rho_0$. Тогда скорость плазменного потока (вдоль поверхности) возьмем $v = 3000$ м/с, плотность плазмы $\rho_1 = 0,1$ кг/м³, плотность расплава алюминия $\rho_2 = 2700$ кг/м³. Данные состояния плазмы получены из программного комплекса ВЕТАIN2P+ [7].

На рис. 3 приведена зависимость амплитуды возмущения от времени. Момент времени 27 мкс соответствует плавлению металлической мишени. Толщина расплава в этом случае со-

ставляет 2–3 мкм. В результате развития НКГ первоначально происходит рост амплитуды. Затем рост амплитуды прекращается, когда она становится близка к глубине расплава. К этому времени формируются вихревые структуры. Метод локальных преобразований, изложенный в данной статье, не позволяет моделировать детали вихревых структур.

Рост амплитуды возмущения поверхности расплава за счет НКГ также приводит к неоднородному нагреву поверхности расплава и создает тем самым условия для развития сдвиговой термокапиллярной неустойчивости. При амплитуде возмущения 1,5 мкм и тепловому потоку, соответствующему обработке гелиевой плазмой с начальной скоростью $v_0 = 10^4$ м/с, температурой $T_0 = 2$ эВ и плотностью $\rho = 0,1\rho_0$, перепад температуры составляет 50 К.

Заключение

Проведено исследование НКГ при плазменной обработке металлических мишеней. Показано, что за время обработки (100 мкс) для диапазона длин волн 5–50 мкм течение становится существенно нелинейным и переходит в турбулентную стадию.

Развитие НКГ и другие возмущения профиля поверхности создают условия для развития сдвиговой термокапиллярной неустойчивости. Толщина области перемешивания может достигать нескольких мкм, она ограничена толщиной расплава.

Литература

1. О механизме образования микрократеров на поверхности мишени, облучаемой мощным электронным пучком / Н.Б. Волков, А.Е. Майер, К.А. Талала, А.П. Яловец // Письма в ЖТФ. – 2006. – Т. 32, № 10. – С. 20–29.
2. 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.
3. Импульсное электронно-пучковое легирование сплава БТ6 цирконием путем перемешивания предварительно осажденной многослойной Zr/Ti пленки / В.П. Ротштейн, А.Б. Марков, Н. Шевченко и др. // Письма в ЖТФ. – 2008. – Т. 34, № 20. – С. 65–72.
4. Динамика поверхностных слоев многослойных мишеней облучаемых мощными электронными пучками / Н.Б. Волков, А.Я. Лейви, А.Е. Майер, К.А. Талала, А.П. Яловец // Физика экстремальных состояний вещества. – Черногловка: ИПХФ РАН, 2007. – С. 70–73.
5. Гершуни, Г.З. Конвективная неустойчивость несжимаемой жидкости / Г.З. Гершуни, Е.М. Жуховицкий. – М.: Наука, 1972. – С. 385.
6. Термокапиллярная конвекция в мишени, облучаемой интенсивным пучком заряженных частиц / Н.Б. Волков, А.Я. Лейви, К.А. Талала, А.П. Яловец // ЖТФ. – 2010. – Т. 80, № 4. – С. 52–58.
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.
8. 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.

Поступила в редакцию 11 сентября 2012 г.

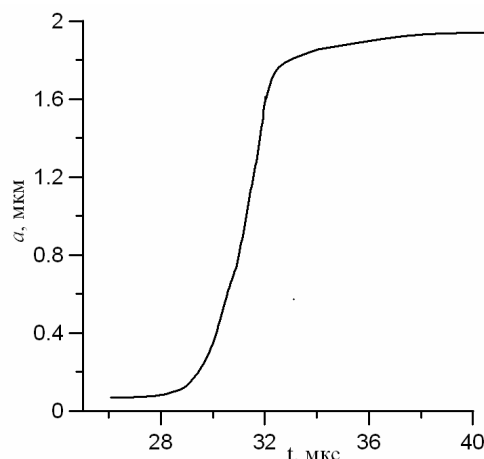


Рис. 3. Зависимость амплитуды возмущения от времени для условий обработки: гелиевая плазма с начальной скоростью $v_0 = 10^4$ м/с, температурой $T_0 = 2$ эВ и плотностью $\rho = 0,1\rho_0$.

MECHANISM ANALYSIS OF A LIQUID-PHASE MASS-TRANSFER SUBSTANCE AT PLASMA PROCESSING OF A SOLID BODY

X.A. Talala¹, A.Ya. Leyvi², A.P. Yalovets³

A Mass-transfer process is an important factor in development of new properties of materials. The article considers Kelvin–Helmholtz instability apart from basic mechanisms of mass-transfer. It is shown that development of Kelvin–Helmholtz instability and blooming create conditions for shift thermocapillary instability development, a depth of a convective zone may reach several microns, it is limited to melt depth.

Keywords: plasma, plasma processing, mass-transfer, Kelvin-Helmholtz instability, compression plasma flows, material modification.

References

1. Volkov N.B., Maier A.E., Talala K.A., Yalovets A.P. *Pis'ma v ZhTF*. 2006. Vol. 32, no. 10. pp. 20–29. (in Russ.).
2. Uglov V.V., Anishchik V.M., Astashinskii V.V. *et al. Pis'ma v ZhETF*. 2001. Vol. 74, no. 4. pp. 234–236. (in Russ.).
3. Rotshtein V.P., Markov A.B., Shevchenko N., Reuther H., Oskomov K.V., Shulov V.A. *Pis'ma v ZhTF*. 2008, Vol. 34, no. 20. pp. 65–72. (in Russ.).
4. Volkov N.B., Leivi A.Ya., Maier A.E., Talala K.A., Yalovets A.P. *Fizika ekstremal'nykh sostoianii veshchestva*. Chernogolovka: IPKhF RAN, 2007. pp. 70–73. (in Russ.).
5. Gershuni G.Z., Zhukhovitskii E.M. *Konvektivnaia neustoiichivost' neszhimaemoi zhidkosti* (Convective instability of incompressible liquid). Moscow: Nauka, 1972. 385 p. (in Russ.).
6. Volkov N.B., Leivi A.Ya., Talala K.A., Yalovets A.P. *ZhTF*. 2010. Vol. 80, no. 4. pp. 52–58. (in Russ.).
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.
8. Volkov N.B., Maier A.E., Yalovets A.P. *ZhTF*. 2003. Vol. 73, no. 3. pp.1–9. (in Russ.).

¹ Talala Xenia Anatoljevna is Cand. Sc. (Physics and Mathematics), Department of Optics and Spectroscopy, South Ural State University.
E-mail: ktalala@yandex.ru

² Leyvi Artem Yacheslavovich is Cand. Sc. (Physics and Mathematics), General and Experimental Physics Department, South Ural State University.
E-mail: leyvy@mail.ru

³ Yalovets Alexander Pavlovich is Dr. Sc. (Physics and Mathematics), Professor, Department of Optics and Spectroscopy, South Ural State University.
E-mail: yalovets@physicon.susu.ac.ru