

ЛАЗЕРНАЯ ДЕЗАКТИВАЦИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

© 2007 г. В. П. Вейко*, доктор техн. наук; Е. А. Шахно*, доктор техн. наук;
В. Н. Смирнов**, канд. техн. наук; А. М. Мясковский**, С. С. Боровских**;
Г. Д. Никишин***

* Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург

** ООО “Лазерные технологии”, Гатчина, Ленинградская обл.

*** ФД ГУП “ПРОМЕТЕЙ”, Санкт-Петербург

E-mail: veiko@lastech.ifmo.ru; shakhno@lastech.ifmo.ru; valentin56@mail.ru; laserman@sp.ru; serg-ifmo@mail.ru

Изложены основные механизмы лазерного переноса вещества. Рассмотрен способ дезактивации металлических поверхностей методом лазерного переноса. Исследована зависимость изменения толщины удаленного слоя от плотности мощности лазерного излучения. Определены границы испарительного и термомеханического режимов лазерной дезактивации. Предложен метод угловой лазерной дезактивации.

Коды OCIS: 350.3390.

Поступила в редакцию 22.01.2006.

1. Введение

Лазерный локальный перенос пленок – метод, предложенный одним из авторов много лет назад [1], в настоящее время широко применяется для прямой записи в устройствах памяти, нанесения электронных компонентов [2–5] и т. д. Как оказалось в последнее время, физические идеи лазерного переноса вещества также применимы и для лазерной очистки поверхностей [6]. Рассмотренный метод является новым направлением лазерных технологий в области очистки поверхностей.

Основными типами лазерного переноса являются прямой и обратный перенос [7–10] (рис. 1). В первом случае (рис. 1а) лазерный луч проходит через прозрачную донорную подложку (ДП) и локализуется на поверхности пленки, нанесенной на ее поверхность. Материал пленки переносится на акцепторную подложку в форме расплава, пара или плаз-

мы и осаждается на ней. В случае обратного переноса (рис. 1б) пучок лазерного излучения проходит сквозь прозрачную акцепторную подложку (АП), поглощается донорной пленкой в облученной области и вызывает ее абляцию с поверхности донорной подложки. Обратный перенос может быть реализован как для прозрачной, так и для непрозрачной донорной подложки.

В настоящее время методы переноса успешно используются для лазерной очистки твердых поверхностей со сбором удаленного загрязнения на прилегающую (коллекторную) поверхность. В этой статье мы обсудим физические механизмы лазерного переноса и представим современные применения лазерного переноса в области очистки поверхностей.

2. Физические модели лазерного переноса

2.1. Термомеханический отрыв пленки

Перенос в данном случае происходит по одной из следующих причин [11, 12].

1. Отслаивание пленки может произойти в результате теплового расширения пленки и появления радиальных сил сжатия, которые приводят к поперечному изгибу пленки. Отрыв пленки происходит в случае, когда нормальная составляющая этих сил превышает силу адгезии F . Значение адгезии, соответствующее отрыву пленки,

$$F \leq Eh(\alpha\Delta T)^{3/2}/l, \quad (1)$$

где ΔT – изменение температуры пленки, E – модуль Юнга, l – ширина дефекта на поверхности до-

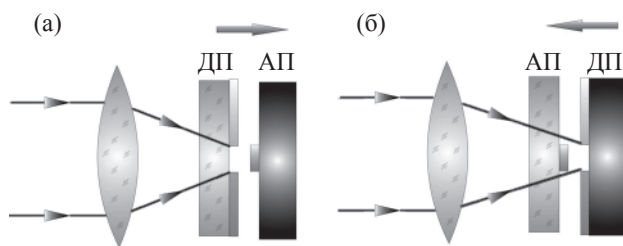


Рис. 1. Основные схемы переноса. а – прямой перенос, б – обратный перенос. АП – акцепторная подложка, ДП – донорная подложка.

норной подложки, α – коэффициент теплового расширения и h – толщина пленки. Для Al пленки $\Delta T = 6 \times 10^2$ К (максимальное изменение температуры до начала плавления), $h = 10^{-7}$ м, $l = 10^{-6}$ м и сила адгезии $F = 4 \times 10^6$ Па. Скорость фрагмента пленки после его отрыва

$$V = \alpha \varepsilon \sqrt{E/\rho} / pch, \quad (2)$$

где ε – плотность энергии лазерного излучения, ρ – плотность пленки, c – теплоемкость пленки.

2. Перемещение центра массы пленки при ее тепловом расширении и приводит к отрыву пленки, если возникающая инерционная сила превышает силу адгезии:

$$F \leq \rho h^2 \alpha \Delta T / \tau^2, \quad (3)$$

где τ – время разогрева пленки до температуры расплавления. Для $h = 10^{-7}$ м пленки из Al $\tau \approx 2 \times 10^{-8}$ с, значение силы адгезии $F \approx 4 \times 10^6$ Па. На стадии плавления величина F определяется расширением пленки под действием плавления.

2.2. Испарительный перенос

Если интенсивность лазерного излучения выше некоторого порогового значения, температура пленки достигает температуры кипения при нормальном давлении. В этом режиме отрыв пленки от подложки под действием испарения и/или термомеханического взаимодействия сопровождается радиальным течением паров между подложками за пределы облученной области и конденсацией пара на подложках. Толщина и масса пленки уменьшаются под действием испарения. Эта стадия заканчивается полным напылением пленки или достижением полного контакта между пленкой и акцепторной подложкой. Различие между начальной толщиной пленки на донорной подложке и конечной на акцепторной определяется испарением пленки во время движения и частичным перемещением материала в виде пара и расплава за пределы облученной области. Процессы нагревания, течение паров и расплава пленок рассмотрены в [10].

3. Дезактивация радиоактивно-загрязненных поверхностей

Одной из наиболее важных проблем является переработка оборудования, загрязненного радиоактивными продуктами в течение ядерного цикла. В настоящее время на атомных станциях накоплено большое количество отработанного оборудования, произведенного из дорогостоящих материалов. Это оборудование хранится в специально отведенных местах, экологическое давление на окружаю-

щую среду и расходы на содержание которых значительны. Проведенные исследования отчетливо показывают, что большая часть радиоактивных загрязнений (до 95%), сосредоточена в тонком приповерхностном окисном слое, который покрывает внутренние поверхности оборудования, имеющие непосредственный контакт с охлаждающим агентом, например водой. Эта пленка главным образом состоит из продуктов коррозии, в состав которых входят кальций, а также другие элементы и радиоактивные включения. Образование пленок происходит при взаимодействии материала с жидкостью и осаждении радиоактивных продуктов во время процесса коррозии.

Как правило, пленки имеют структуру с двумя слоями: плотный тонкий окисный слой, прилегающий к поверхности материала, и пористый внешний слой. Внешний слой имеет особое значение в формировании и накоплении радиоактивного загрязнения, так как имеет высокие абсорбционные свойства. Кроме того, охлаждающий агент, проникая в поры поверхностного слоя, вымывает растворимые фракции и замещает их нерастворимыми.

В настоящее время наиболее часто для дезактивации оборудования применяют химические и электрохимические методы. Их недостаток – большое количество жидких радиоактивных отходов, переработка которых весьма дорогостояща и трудоемка.

Лазерная дезактивация исключает применение химических реагентов. Применение излучения Nd:YAG-лазеров в режиме наносекундных импульсов позволяет удалять поверхностные коррозионные пленки толщиной до 200 мкм без оплавления и испарения основного материала [13, 14]. Авторами предложен способ дезактивации, при котором обработка лучом происходит через прозрачную для длины волны 1,06 мкм пленку, покрывающую поверхность материала, которая разделяет “грязную” и “чистую” зоны обработки и в то же время за счет нанесенного со стороны обрабатываемого материала клеевого слоя, сорбирует продукты дезактивации. Утилизация радиоактивных отходов может проводиться вместе с пленкой.

Изучение механизмов переноса и сорбирования материала окисных пленок с металлических поверхностей проводилось [15] на образцах-имитаторах без радиоактивных загрязнений. Локальный лазерный перенос и сбор на прозрачную сорбирующую пленку, расположенную около загрязненной поверхности, схематически представлен на рис. 2.

В экспериментах использовались Nd:YAG-лазер с длиной волны 1,06 мкм, длительностью импульса 10 нс и в качестве образцов металлические пластины размерами $20 \times 20 \times 2$ мм, имеющие на повер-

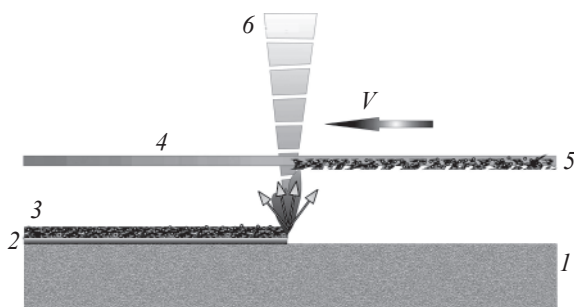


Рис. 2. Структура радиоактивного загрязнения поверхности и схема лазерной дезактивации. 1 – основной материал, 2 – плотный тонкий окисный слой, 3 – пористый коррозионный слой, 4 – прозрачная сорбирующая пленка, 5 – осажденные продукты очистки (радиоактивные загрязнения), 6 – лазерное излучение.

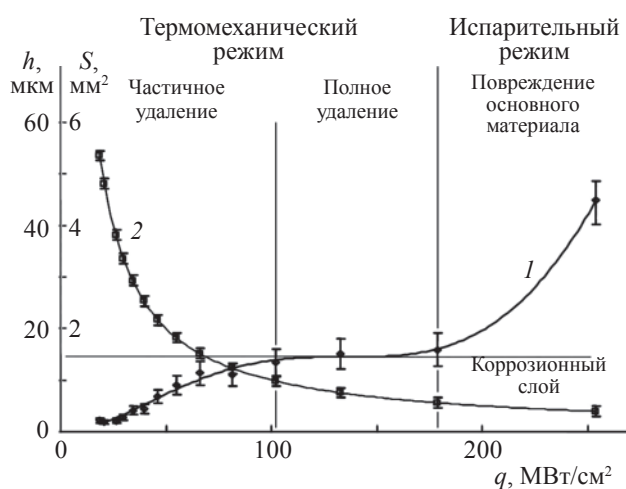


Рис. 3. Экспериментальные зависимости толщины (1) и площади (2) удаленного слоя от плотности мощности лазерного излучения. Энергия импульсов лазерного излучения постоянна.

хности коррозионный слой. Различие массы образцов до и после обработки позволило нам определить толщину удаленного слоя. Эксперименты (рис. 3) показывают, что возможны два основных режима: термомеханическое удаление, сопровождающееся характерным звуком, и испарительное удаление.

4. Лазерная обработка при наклонном падении излучения на поверхность

При лазерной дезактивации особо остро стоит вопрос сбора радиоактивных продуктов очистки на сорбирующей пленке. Одной из проблем, возникающих при нормальном падении лазерного излучения к поверхности, является попадание продуктов очистки в зону лазерного излучения и перенос уже

осажденных на сорбирующей пленке загрязнений обратно на очищаемую поверхность. Фотографии, полученные методом высокоскоростной фотосъемки, демонстрируют пространственное расположение летящих продуктов очистки и лазерного пучка при нормальном (рис. 4а) и угловом облучении (рис. 4б).

Это обстоятельство приводит к снижению количества осажденных на сорбирующей пленке загрязнений. Для снижения неблагоприятного действия данных факторов нами предлагается использовать для лазерной дезактивации наряду с сорбирующими пленками угловой метод подачи лазерного излучения в зону обработки (рис. 5).

Качественная оценка сорбирующей пленки после обработки загрязненной поверхности по схеме углового облучения, представленной на рис. 5, показала, большую по сравнению с нормальным способом облучения концентрацию осажденных продуктов. К тому же, как показывают исследования, например [16], угловой способ очистки предпочтительнее с энергетической точки зрения, так как с

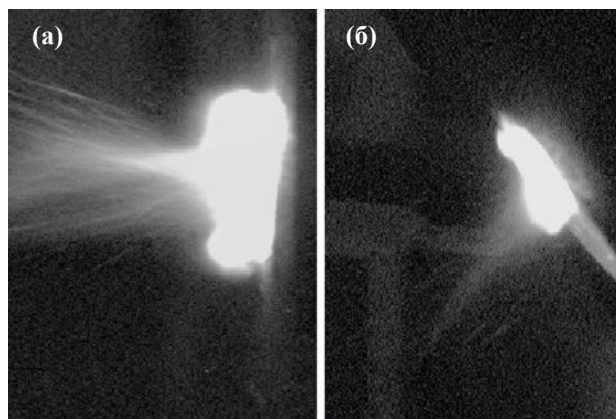


Рис. 4. Фотографии летящих частиц, полученные с помощью высокоскоростной фотосъемки. а – обработка под прямым углом; б – обработка под углом 45°.

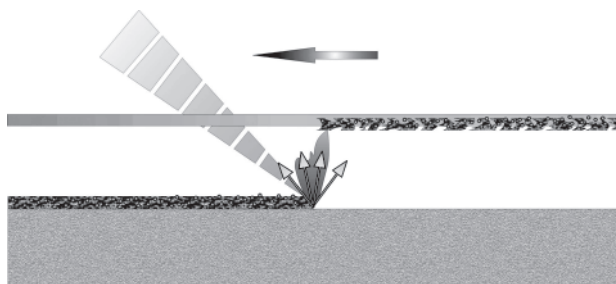


Рис. 5. Схема обработки при наклонном падении излучения на поверхность.

уменьшением угла падения лазерного пучка происходит снижение порогового значения плотности мощности излучения, необходимого для очистки.

Лазерная очистка загрязненных поверхностей образцов приводит к значительному снижению уровня их радиоактивности. Интенсивность альфа-излучения после лазерной дезактивации была снижена до фоновой величины, а бета-излучения – в десятки раз и более.

Эта работа поддерживалась грантом Президента Российской Федерации (НШ-1370.2003.8), грантом РФФИ (04-02-166-11a) и госконтрактом 02.445.11.7108.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вейко В.П., Котлецов Б.Н., Либенсон М.Н. Лазерная литография, “Электроника”, 1970.
2. Szörényi T., Tóth Zs. Pulsed laser synthesis and printing of compound semiconductors // Proc. SPIE. 1989. V. 1022. P. 93–96.
3. Fitz-Gerald J.M., Piqué A., Chrisey D.B. et al. Laser direct writing of phosphors screens high-definition displays // Appl. Phys. Lett. 2000. V. 76. № 11. P. 1386–1388.
4. Lu Y.F., Ren Z.M. Laser microprocessing and the applications in microelectronics industry // Proc. SPIE. 2001. V. 4157. P. 191–199.
5. Piqué A., Arnold C.B., Wartena R.C. et al. Laser direct-write of miniature and microbattery systems // RIKEN Review. 2003. № 50. P. 57–62.
6. Laser cleaning / Ed. by B.S. Luk'yanchuk. World Scientific Singapore, 2002.
7. Veiko V.P., Metev S.M. Laser-assisted microtechnology. Heidelberg, Springer Verlag, 1994 (first edition), 1998 (second edition).
8. Mogyorósi P., Szörényi T., Bali K., Tóth Zs., Hevesi I. Pulsed laser ablative deposition of thin metal films // Appl. Surf. Sci. 1989. V. 36. P. 157–166.
9. Veiko V.P., Kajdanov A.I., Kovachki H.A., Shakhno E.A. Mechanisms of local laser-induced forward transfer of films // Proc. SPIE. 1993. V. 1856. P. 11–18.
10. Veiko V.P., Shakhno E.A., Nánai L. Local laser-induced film transfer // Modern topics in chemical physics / Ed. by T.F. George, X. Sun, G. Zhang. Research Singpost, Kerala, India, 2002. P. 303–319.
11. Holmes A.S. Laser processes for MEMS manufacture // RIKEN Review. 2002. № 43. P. 63–69.
12. Tóth Z., Hopp B., Szörényi T., Bor Z., Veiko V.P., Shakhno E.A. Pulsed laser ablation mechanisms of thin metal films // Proc. SPIE. 1999. V. 3822. P. 18–26.
13. Никишин Г.Д., Смирнов В.Н. Применение лазерной дезактивации при утилизации АПЛ в Россудостроении // IV Междунар. конференция “Радиационная безопасность: Экология – Атомная энергия”. Санкт-Петербург, 24–28 сентября 2001 г. Сборник трудов.
14. Вейко В.П., Шахно Е.А., Смирнов В.Н. Низкопороговые механизмы лазерной очистки поверхности // Оптические технологии в фундаментальных и прикладных исследованиях / Под ред. профессора Васильева В.Н. СПб., 2001. С. 132–145.
15. Смирнов В.Н., Никишин Г.Д., Пименова М.А., Ивахнюк Г.К. Лазерная дезактивация. Основы и перспективы использования при утилизации атомных подводных лодок // Вестник Санкт-Петербургского института государственной противопожарной службы. 2005. № 2 (9). С. 33–36.
16. Lee J.M., Watkins K.G. Real-time surface monitoring in the laser cleaning of copper for soldering processes // Lasers in Eng. 1999. V. 8 (3). P. 229–239.