

В. П. ВЕЙКО, А. А. САМОХВАЛОВ

ЛАЗЕРНАЯ ОЧИСТКА РАСТРИРОВАННЫХ ВАЛОВ СО СПЕКТРАЛЬНЫМ КОНТРОЛЕМ

Представлена методика контроля процесса лазерной очистки посредством лазерно-искровой эмиссионной спектроскопии. Сформирован спектральный критерий безопасной лазерной очистки растрированных валов, позволяющий сохранять структуру поверхности при максимальном эффекте очистки.

Ключевые слова: лазерная очистка, волоконный лазер, лазерно-искровая эмиссионная спектроскопия, обратная связь, растрированный вал.

Введение. Лазерная очистка — достаточно известный метод, используемый во многих областях, среди которых реставрация объектов культурного наследия (очистка памятников, картин, мрамора, старинных монет и т.д.) [1] и микроэлектроника (очистка кремниевых подложек) [2] являются традиционными сферами ее применения. Также к современным областям применения лазерной очистки можно отнести удаление слоев коррозии, красок и различных покрытий с поверхностей деталей и узлов машин (например, турбинных лопаток, полиграфических анилоксовых валов, литевых форм и т.д.); удаление радиоактивных загрязнений с объектов атомной энергетики [3]; очистку железнодорожного полотна [4], очистку стен от граффити и т.д.

Несмотря на такие технологические преимущества лазерного метода, как бесконтактность, мобильность, отсутствие расходных материалов, экологическая безопасность, возможность селективного удаления загрязнений, не решенной остается проблема контроля процесса лазерной очистки. Частичное решение данной проблемы заключается в применении метода лазерно-искровой эмиссионной спектроскопии (ЛИЭС) [5], что было успешно продемонстрировано при реставрации предметов искусства [6—9].

Как правило, при лазерной очистке объектов культурного наследия используется режим одиночных импульсов с энергией порядка 50—100 мДж, где традиционная схема ЛИЭС с сигналом задержки [5] успешно применима. Но при очистке промышленных объектов технологически оправданным является многоимпульсный режим воздействия при энергии в импульсе порядка 0,5—1 мДж, что делает невозможным использование традиционной схемы ЛИЭС. Оптимизация метода ЛИЭС для контроля многоимпульсной лазерной очистки на примере очистки растрированного вала и является предметом исследования в настоящей статье.

Анализ известных подходов к проблеме контроля. В целом можно выделить две группы методов, пригодных для контроля процесса лазерной очистки: оптические и оптоакустические, с выполнением при этом функции обратной связи. К оптическим методам относятся ЛИЭС, метод отраженного пучка (Beam Reflection Method) [10] и фотодиодный метод измерения рассеянного света плазмы [6]. Оптоакустические методы заключаются в регистрации акустических спектров, возникающих при очистке.

Для технологии сухой лазерной очистки наиболее гибким и универсальным является метод ЛИЭС, основанный на регистрации спектра плазмы, возникающей при лазерной абляции. Типичный случай очистки по методу ЛИЭС описан в работе [7], где приведены результаты одновременного наблюдения характерных спектральных линий подложки и загрязнений. По отношению интенсивностей спектральных линий можно судить о глубине абляции поверхности и минимизировать тем самым возможные разрушения очищаемого образца.

В работе [8] описан другой подход, при котором очистке от воска была подвергнута деревянная подложка, критерием прекращения воздействия лазерного излучения служило появление в эмиссионном спектре характерной спектральной линии.

Если до начала процесса очистки возможно получение спектра незагрязненной подложки, выполняющего роль опорного, то задача несколько упрощается. В работе [9] описан подобный метод контроля процесса лазерной очистки: перед началом процесса был снят спектр чистого пергамента, являющийся в данном случае опорным, а в ходе самого процесса осуществлялось компарирование опорного спектра с регистрируемым после каждого лазерного импульса. В результате после четвертого лазерного импульса значение коэффициента корреляции составляло 0,98, и процесс очистки прекращался.

Критерием качества очистки, в частности металлов от окислов, может служить наличие линий кислорода в эмиссионном спектре, при исчезновении которых поверхность считается очищенной, что было показано в работе [3].

Постановка задачи. В настоящей статье исследуется процесс очистки от краски поверхности растриваемого вала, представляющего собой металлический цилиндр с плазменным напылением Cr_2O_3 , в слое которого выполнена лазерная гравировка в виде шестиугольных микроячеек. Изображение поверхности растриваемого вала до очистки приведено на рис. 1; стрелками показаны характерные эксплуатационные трещины и каверны поверхности вала, возникшие во время его эксплуатации. На рис. 2 показано поперечное сечение растриваемого вала, где 1 — перемычка, 2 — дно ячейки, 3 — стенки ячейки, 4 — металлическая основа вала.

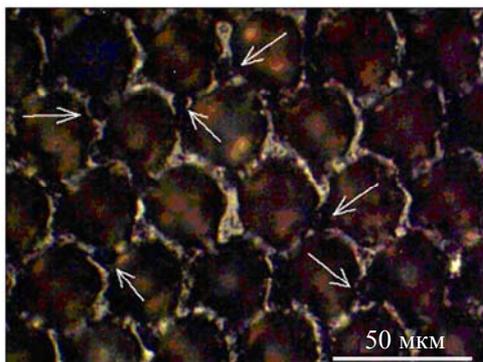


Рис. 1

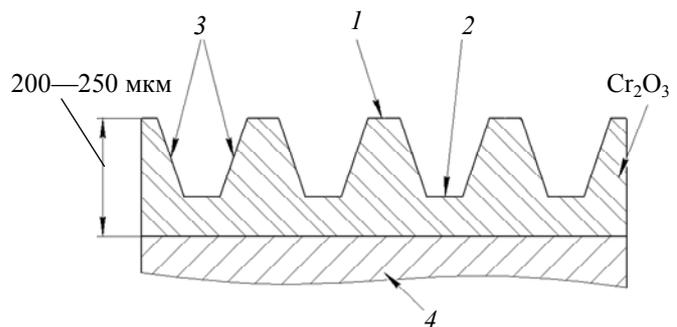


Рис. 2

В качестве образца для исследования использовался растриваемый вал, вышедший из эксплуатации и загрязненный УФ-отверждающейся краской (данная краска наиболее часто применяется во флексографии). Для контроля процесса лазерной очистки был выбран метод ЛИЭС, как наиболее чувствительный из всех оптических методов и позволяющий понять, насколько качественно выполнен процесс удаления загрязнений.

Проблема применения метода ЛИЭС заключалась в том, что для очистки был использован маломощный импульсный иттербиевый волоконный лазер IPG-Photonics со следующими параметрами: мощность излучения $P_{\text{max}}=20$ Вт, частота следования импульсов $f=20\dots 100$ кГц, длительность импульса $\tau=100$ нс, энергия импульса $J=1$ мДж. Также использовалась оптическая система, фокусирующая лазерный луч в пятно диаметром 200 мкм, что обеспечивало плотность мощности до $10^{10}\text{--}10^{11}$ Вт/см². Эрозионная плазма, образующаяся при воздействии указанных импульсов, сильно отличается от традиционной, используемой для средств диагностики методом ЛИЭС [9]. Поэтому и задача, и методика спектрального контроля при промышленной лазерной очистке, в отличие от упомянутых случаев очистки культурных ценностей [6—9], совсем иные: здесь осуществляется многоимпульсная очистка, в процессе которой необходимо обеспечить не расшифровку спектров, а выявление степени очистки

и, главное, момента ее завершения. Вследствие этого важно сформулировать критерий качества очистки.

В случае анилоксовых валов, где загрязнителями выступают различные органические и полимерные краски, регистрация и расшифровка их спектров методом ЛИЭС представляется нереальной и неразумной. Так как температуры испарения этих красок достаточно малы (порядка 300—400 °С) даже по сравнению с температурой плавления плазменного покрытия Cr_2O_3 (2435 °С), то необходимым и достаточным является регистрация порогов появления в спектре вторичных линий подложки (хрома Cr I), что должно обеспечить требования сохранности микрорельефа.

Экспериментальная проверка этого положения, в сущности, и была предметом исследований, описываемых в данной статье.

Экспериментальная установка. Для проведения исследований была создана экспериментальная установка, схема которой представлена на рис. 3. В качестве излучателя был использован волоконный импульсный лазер 1 (IPG-Photonics, параметры указаны выше), установленный для сканирования поверхности вала на двухкоординатном столе 6 (фирмы ISEL, Германия). Вращение анилоксового вала 5 осуществлялось через специальный механизм с приводом от бесколлекторного электродвигателя постоянного тока. Посредством изменения частоты вращения вала и скорости/шага координатного стола, а также условий фокусировки достигалась оптимальная для очистки развертка лазерного луча, представляющий собой спираль с определенным шагом.

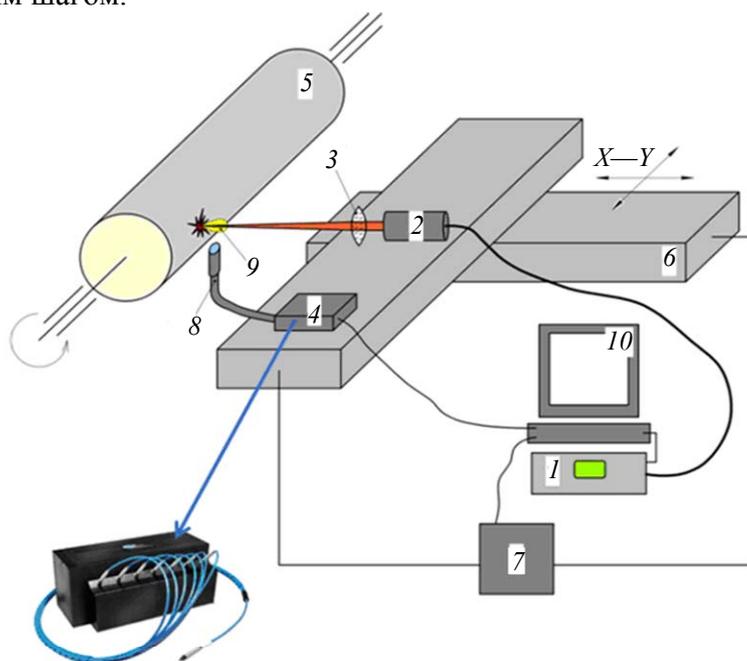


Рис. 3

Для регистрации спектра плазмы, возникающей в процессе лазерной очистки, использовался широкополосный волоконный спектрометр 4 (LIBS2500-5PLUS, фирмы “Ocean Optics”, США). В ходе экспериментов был задействован наиболее информативный диапазон длин волн 390—515 нм. Кроме названных элементов установки, на схеме показаны: 2 — коллиматор, 3 — фокусирующая линза, 7 — блок управления координатным столом, 8 — оптоволоконно спектрометра, 10 — управляющий компьютер.

Очистка растриванного вала осуществлялась в многоимпульсном режиме при непрерывном сканировании, поэтому на очищаемой поверхности возникал плазменный факел 9 (см. рис. 3). Вследствие этого для спектрометра был выбран режим скоростного считывания данных (High-Speed Acquisition) с частотой смены кадров 20 мс. Таким образом, процесс очистки контролировался в режиме реального времени. Плотность мощности лазерного излуче-

ния (q) плавно регулировалась путем изменения средней мощности в параллельном пучке, что позволяло точно выявить энергетические пороги появления новых пиков атомных линий.

Результаты эксперимента. В ходе экспериментов были получены эмиссионные спектры ($I(\lambda)$), соответствующие различным режимам (q_1 — q_5) лазерной очистки анилоксидного вала (рис. 4). Во всех режимах в спектре наблюдались линии хрома Cr I. Основные линии Cr I (425,37, 427,42 и 428,87 нм) были зарегистрированы даже при минимальной плотности мощности, что свидетельствует о локальной абляции микроструктуры анилоксидного вала. Также был обнаружен энергетический порог воздействия лазерного излучения, при котором в эмиссионном спектре возникала группа равноотстоящих спектральных линий (396,2, 396,75, 397,45, 398,21 и 398,9 нм) одинаковой интенсивности. Данная структура является мультиплетным расщеплением линий Cr I (рис. 5).

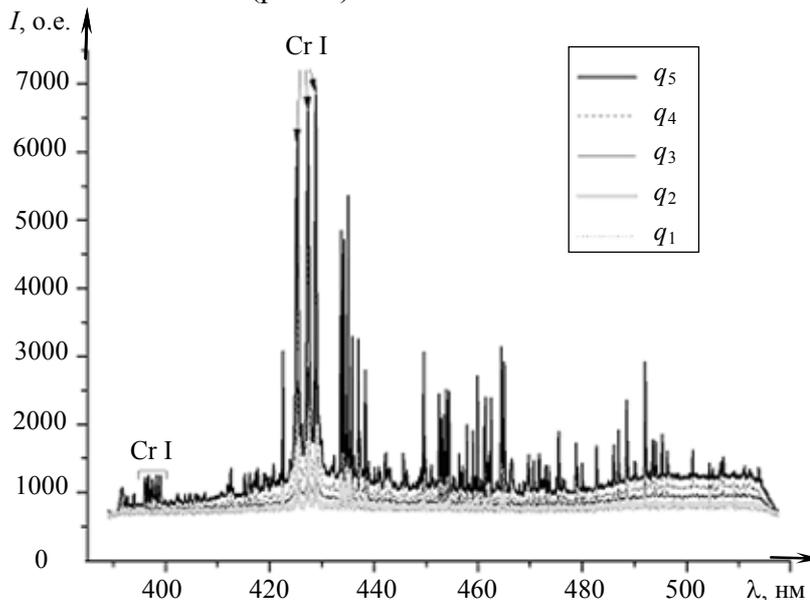


Рис. 4

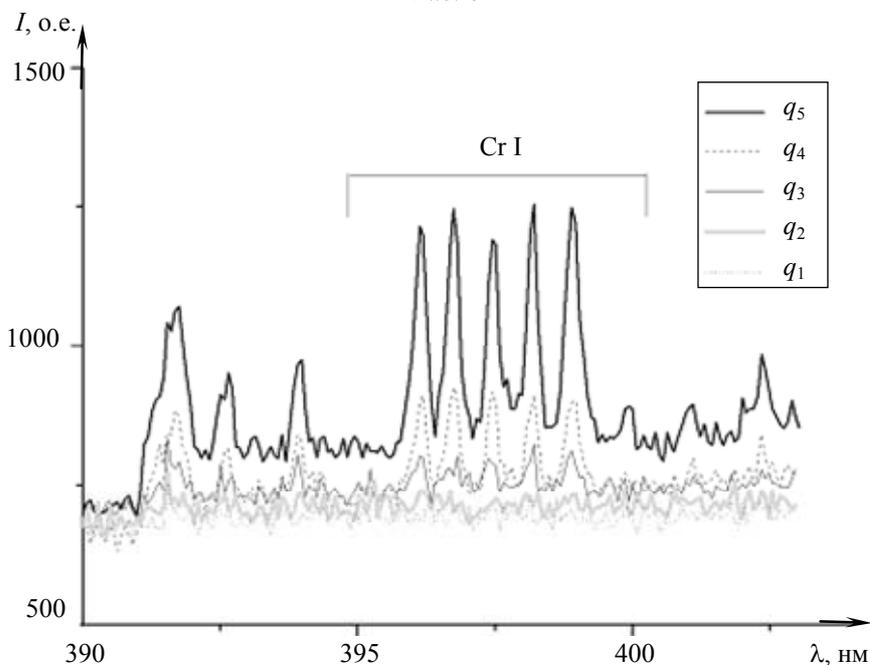


Рис. 5

Заметим, что молекулярных полос органических соединений в полученных спектрах обнаружено не было. Данный факт связан с тем, что молекулы углеводородов, из которых

состоит УФ-отверждающаяся краска, обладают невысокой энергией диссоциации (порядка 2—3 эВ) и в данном случае не могут быть зарегистрированы методом ЛИЭС.

Решение поставленной задачи контроля процесса лазерной очистки и выбора ее оптимального режима осуществлялось путем сопоставления полученных эмиссионных спектров и микрофотоизображений поверхности анилоксового вала при очистке в различных режимах (рис. 6): $q_1=1,86 \cdot 10^{10}$ Вт/м², $q_2=2,83 \cdot 10^{10}$ Вт/м², $q_3=3,88 \cdot 10^{10}$ Вт/м², $q_4=6,23 \cdot 10^{10}$ Вт/м², $q_5=9,9 \cdot 10^{10}$ Вт/м² (белой линией обозначена граница между необработанной и обработанной зонами вала).

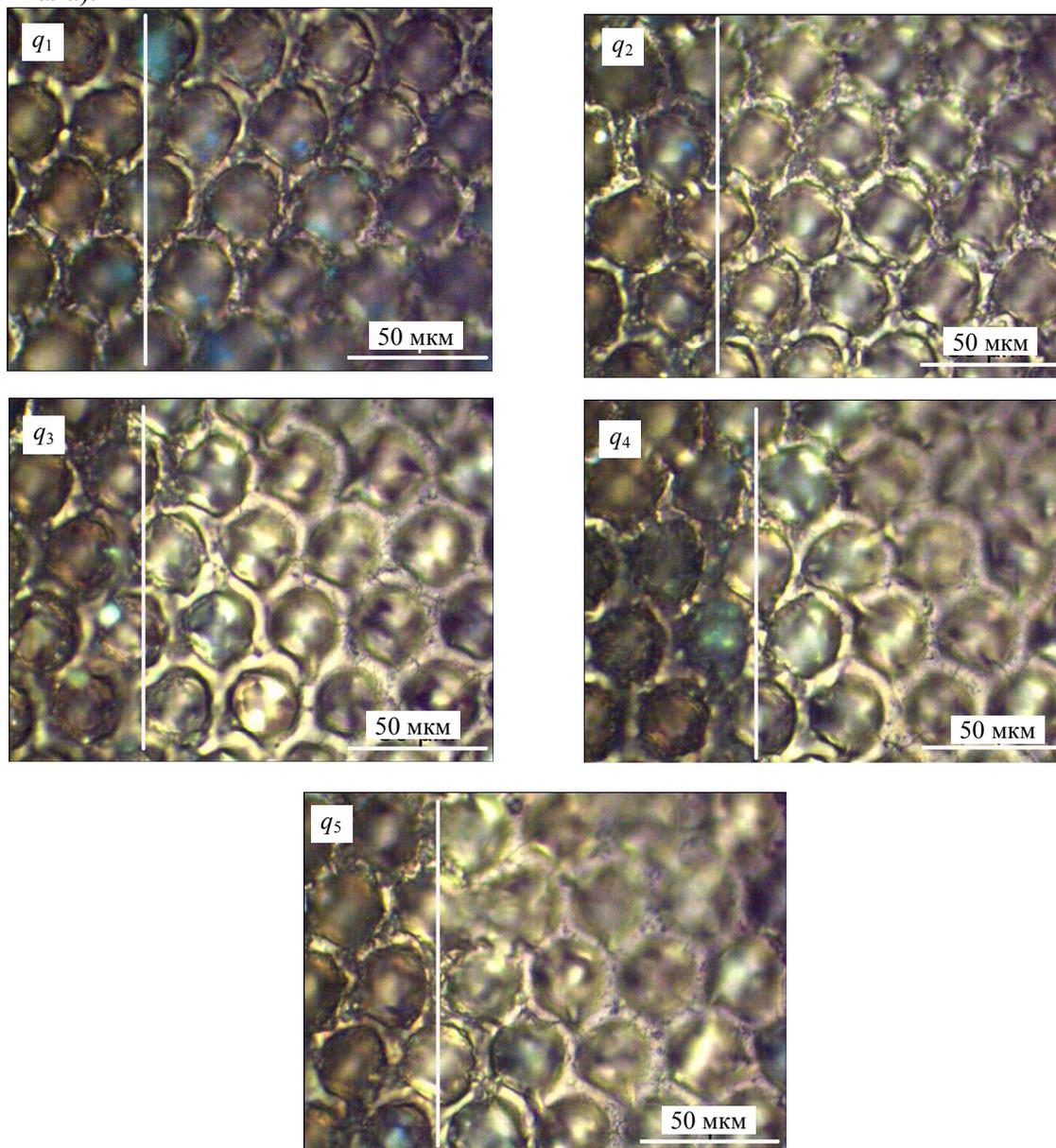


Рис. 6

Обсуждение результатов. Визуальным фактором, характеризующим безопасность лазерной очистки при микроскопии поверхности, являются резкие края перемычек и микротрещины. Анализ изображений поверхности анилоксового вала (см. рис. 6) показывает, что при режиме q_3 перемычки начинают значительно плавиться, что вызывает уменьшение высоты микрорельефа вала и недопустимо в технологическом процессе флексопечати. Режимы q_4 и q_5 соответствуют существенному плавлению перемычек и также не являются рабочими. При уменьшении плотности мощности до значений q_2 , q_1 расплавленные перемычки отсутствуют. Более того, можно заметить, что эксплуатационные микротрещины вала имеют исход-

ный вид, как и до лазерной очистки (см. рис. 1): это свидетельствует о безопасности этих режимов. Однако эффект очистки в режиме q_1 недостаточен — дно ячеек затемнено, а на стенках ячеек присутствуют фрагменты оставшейся краски. Таким образом, оптимальным является режим q_2 , при котором отсутствуют повреждения вала, а эффект очистки максимален.

На рис. 7 представлен график состояния поверхности растриваемого вала при различных режимах лазерной очистки.

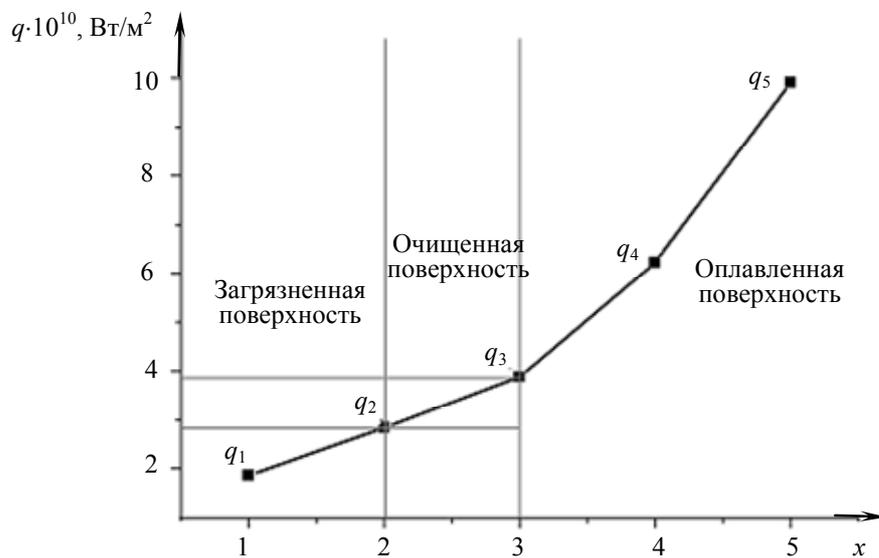


Рис. 7

Сопоставление изображений поверхности вала (см. рис. 6) с эмиссионными спектрами показало, что энергетический порог, характеризующий появление группы равноотстоящих спектральных линий (см. рис. 5), соответствует режиму q_3 . Таким образом, „опорным“ спектром при лазерной очистке в данном случае является спектр, в котором данная группа линий отсутствует, т.е. спектр q_2 . При этом диапазон рабочих плотностей мощности находится в интервале $2,83 \cdot 10^{10} — 3,88 \cdot 10^{10}$ Вт/м².

Заключение. Исходя из полученных результатов, можно сделать вывод, что использование модифицированного метода лазерно-искровой эмиссионной спектроскопии позволяет определить диапазон пороговых значений плотности мощности, необходимых для эффективного удаления загрязнений даже при очистке сложных поверхностей, таких как растриваемый вал. Исследуя эмиссионные спектры при различных режимах лазерной очистки, удалось выявить появление характерных пиков, соответствующих критическому разрушению подложки, на основе чего получен „опорный“ спектр.

В результате исследований сформирован спектральный критерий для контроля процесса лазерной очистки анилоксовых валов, заключающийся в том, что интенсивность определенной линии в наблюдаемом эмиссионном спектре не должна превышать ее интенсивности в „опорном“ спектре. Продемонстрирована работоспособность и эффективность спектрального критерия при лазерной очистке в многоимпульсном режиме.

Результаты проведенных исследований могут быть использованы при разработке других процессов лазерной очистки с помощью волоконных импульсных лазеров, которые в настоящее время широко применяются в промышленности.

Отметим, что метод ЛИЭС не позволяет определять порог возникновения микротрещин при очистке: это обусловлено наличием достаточно широкого диапазона значений плотности мощности процесса очистки. Отсутствие плазменного факела, что характерно для механизмов лазерной очистки, имеющих низкий энергетический порог, также ограничивает применение спектроскопии лазерной искры. Данные проблемы могут найти решение при использовании оптоакустического метода контроля.

Статья подготовлена по результатам работы, выполненной при финансовой поддержке программы „Научные и научно-педагогические кадры инновационной России“ на 2009—2013 гг. по гос. контракту № 14.В37.21.0144 от 20.07.2012 г. и гранта „ОПТЭК“ (Carl Zeiss) по договору № 77/11 КЦ от 31.05.2012 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Marczak J., Koss A., Targowski P., Góra M., Strzelec M., Sarzyński A., Skrzeczanowski W., Ostrowski R., Rucyk A. Characterization of laser cleaning of artworks // *Sensors*. 2008. Vol. 8. P. 6507—6548 [Электронный ресурс]: <www.mdpi.com/journal/sensors>.
2. Leiderer P., Boneberg J., Dobler V., Mosbacher M., Münzer H.-J., Chaoui N., Siegel J., Solis J., Afonso C.N., Fourrier T., Schrems G., Bäuerle D. Laser-induced particle removal from silicon wafers // *Proc. of SPIE*. 2000. Vol. 4065. P. 249—259.
3. Veiko V.P., Mutin T.Y., Smirnov V.N., Volkov S.A. Laser spark spectroscopy for online cleaning quality control method development // *Proc. of SPIE*. 2011. Vol. 7996.
4. [Электронный ресурс]: <<http://www.optoIQ.com/index/lasers-for-manufacturing/display/ils-article-display/250114/articles/industrial-laser-solutions/volume-21/issue-3/features/working-on-the-railroad.html>>.
5. Cremers D. A., Radziemski L. J. *Handbook of Laser-Induced Breakdown Spectroscopy*. London: John Wiley & Sons Ltd, 2006.
6. Lentjes M., Klomp D., Dickmann K. Sensor concept for controlled laser cleaning via photodiode // *Lasers in the Conservation of Artworks: Proc. of Intern. Conf. LACONA V, Osnabrück, Germany, Sept. 15—18, 2003*.
7. Klein S., Stratoudaki T., Zafropoulos V., Hildenhausen J., Dickmann K., Lehmkuhl Th. Laser-induced breakdown spectroscopy for on-line control of laser cleaning of sandstone and stained glass // *J. Appl. Phys. A*. 1999. N 69. P. 441—444.
8. Scholten J. H., Teule J. M., Zafropoulos V., Heerenc R. M. A. Controlled laser cleaning of painted artworks using accurate beam manipulation and on-line LIBS-detection // *J. Cultural Heritage*. 2000. Vol. 1. P. S215—S220.
9. Lentjes M., Dickmann K., Meijer J. Controlled laser cleaning of artworks with low resolution LIBS and linear correlation analysis // *Proc. of Intern. Conf. on Applications of Lasers and Electro-Optics, ICALEO'05, 31 Oct. — 3 Nov., 2005, Miami, USA*.
10. Whitehead D. J., Crouse P. L., Schmidt M. J. J., Li L., Turner M. W., Smith A. J. E. Monitoring laser cleaning of titanium alloys by probe beam reflection and emission spectroscopy // *J. Appl. Phys. A*. 2008. N 93. P. 123—127.

Сведения об авторах**Вадим Павлович Вейко**

— д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра лазерных технологий и экологического приборостроения; E-mail: veiko@lastech.ifmo.ru

Андрей Александрович Самохвалов

— аспирант; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра лазерных технологий и экологического приборостроения; E-mail: andrugko@list.ru

Рекомендована кафедрой
лазерных технологий и экологического
приборостроения

Поступила в редакцию
06.07.12 г.