

ЛАЗЕРНАЯ ФИЗИКА И ТЕХНИКА

УДК 681.7.069.223: 621.791.72: 903.32: 543.422.8

ПРИМЕНЕНИЕ РЕНТГЕН-ФЛУОРЕСЦЕНТНОГО АНАЛИЗАТОРА ДЛЯ КОНТРОЛЯ ЛАЗЕРНОЙ ОЧИСТКИ В РЕСТАВРАЦИИ

© 2010 г. В. И. Кудряшов*, канд. физ.-мат. наук; В. А. Парфенов**, канд. техн. наук;
А. С. Серебряков*, канд. физ.-мат. наук

* ЗАО “Комита”, Санкт-Петербург

** Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет “ЛЭТИ”,
Санкт-Петербург

E-mail: vadim_parfenov@mail.ru

Показана возможность применения рентген-флуоресцентного анализатора для контроля качества результатов лазерной очистки поверхности исторических памятников от загрязнений и природных наслоений. Предложенный подход может быть рекомендован для использования при проведении практических работ по реставрации экстерьерных памятников с использованием лазеров.

Ключевые слова: лазерная очистка, реставрация произведений искусства, рентгеновский дисперсионный спектральный анализ, рентген-флуоресцентный анализатор.

Коды OCIS: 300.6280, 300.6560, 350.3390

Поступила в редакцию 11.03.2010

В последние годы лазерная техника находит все более широкое применение в реставрации произведений искусства [1–4]. Одно из основных направлений использования лазеров в данной области – очистка поверхности исторических предметов от загрязнений и природных наслоений [2, 3, 5].

За рубежом технология лазерной очистки памятников хорошо отработана, и лазер уже давно превратился в инструмент для повседневной работы реставраторов во многих странах мира [1]. Однако в отечественной реставрационной практике использование лазеров началось сравнительно недавно. Поэтому совершенно естественно, что работа с лазерами сразу поставила на повестку ряд принципиально новых вопросов. Один из наиболее важных среди них – вопрос о качестве лазерной очистки.

В этой связи необходимо заметить, что для оценки результатов очистки, например, каменной скульптуры при ее реставрации, в нашей стране не существует четких критериев. Дело в том, что какие-либо приборные методы контроля результатов работы (за исключением

макро-фотосъемки) в настоящее время почти не используются. Специалисты-реставраторы руководствуются, как правило, собственной интуицией и соображениями художественного и эстетического характера, в основе которых лежат давно сложившиеся в данной сфере подходы и традиции. При этом окончательное заключение о качестве выполненной работы также носит субъективный характер, хотя и принимается коллегиально – на заседаниях реставрационных советов.

С технической точки зрения при использовании в реставрации такого мощного современного инструментария как лазер этого недостаточно. С учетом зарубежного опыта, где для контроля результатов процесса лазерной очистки применяют методы рентгеновской дифракции и рентгеновского дисперсионного спектрального анализа [6], в данной работе предпринята попытка использовать для этой цели аналогичный прибор отечественного производства.

Для проведения соответствующих исследований был выбран рентген-флуоресцентный

анализатор “Х-Арт М”, который разработан специалистами ЗАО “Комита” в сотрудничестве с НПО “Радиевый институт им. В.Г. Хлопина” и предназначен для экспресс-анализа химического состава различных веществ (рис. 1).

Данный рентген-флуоресцентный анализатор состоит из следующих основных функциональных блоков: источника рентгеновского излучения, приемника вторичного излучения, системы регистрации и обработки данных. В качестве источника рентгеновского излучения используется маломощная рентгеновская трубка с высоковольтным источником питания (напряжение до 50 кВ, максимальная мощность 50 Вт, материал анода – серебро или родий). Основными достоинствами анализатора “Х-Арт М” являются его компактность и мобильность. Этот прибор может быть установлен в салоне автомобильной передвижной лаборатории или размещен на лабораторном столе (см. рис. 1).



Рис. 1. Анализатор “Х-Арт М”. 1 – аналитический блок с видеокамерой, расположенные на штанге (блок может вращаться в вертикальной и горизонтальной плоскостях), 2 – блок питания рентгеновской трубки, установленный на передвижном столе, 3 – ноутбук для управления работой прибора, 4 – блок питания и охлаждения детектора и спектрометрическое устройство (размещены в нижней части приборной стойки).

В основе метода рентген-флуоресцентного анализа лежит использование энергетических спектров вторичного (характеристического) излучения, возбуждаемого в исследуемом образце при его облучении рентгеновской трубкой (РТ), которые несут в себе информацию о химическом составе вещества. Характеристические фотоны имеют линейчатый спектр и регистрируются охлаждаемым Si(Li)-детектором (рис. 2). Система охлаждения основана на использовании полупроводникового многоступенчатого микрохолодильника, работающего на эффекте Пельтье, который обеспечивает температуры ниже $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$, что позволяет обойтись без использования обычного в таких случаях жидкого азота.

В результате прибор дает возможность проводить высокоточный элементный анализ и при работе на открытом воздухе регистрировать химические элементы в диапазоне от магния до урана. Анализатор обеспечивает низкую погрешность контроля и порог обнаружения, который составляет около 10^{-4} мас% для элементов с атомными номерами от 20 до 40.

В ходе проведенных в работе экспериментальных исследований анализатор “Х-Арт М” использовался для контроля эффективности лазерной очистки камня. Эта работа проводилась на фрагментах подлинных исторических памятников Санкт-Петербурга, выполненных из пудостского известняка (из облицовки Казанского собора) и мрамора (из Некрополя XVIII в. Александро-Невской лавры).

Для анализа качества лазерной очистки регистрировались спектры, полученные при

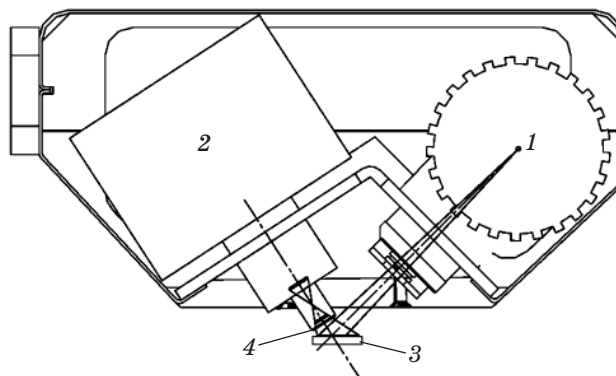


Рис. 2. Рентгенооптическая схема анализатора “Х-Арт М”. 1 – РТ, 2 – Si(Li)-блок детектирования, 3 – исследуемый образец, 4 – окно блока детектирования.

I , отн. ед.

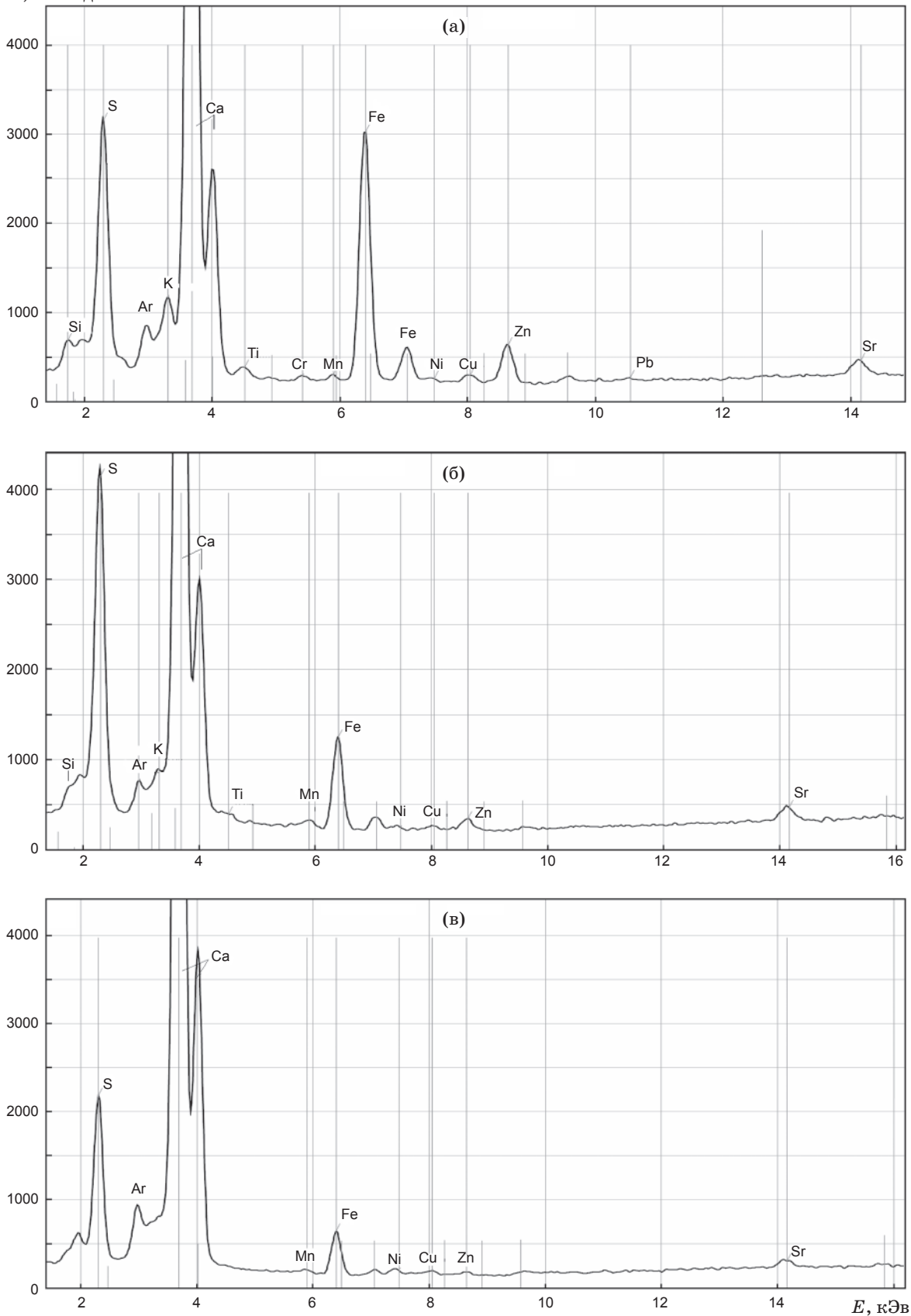


Рис. 3. Спектры излучения, полученные при исследовании поверхности образца из пудостского камня, зарегистрированные с помощью рентген-флуоресцентного анализатора. а – спектр поверхностного загрязнения (до лазерной обработки), б – спектр, полученный на участке поверхности, очищенном с помощью лазера, в – спектр, записанный на месте скола материала на боковой поверхности образца. Пик Ar – вклад воздушного промежутка между рентгеновской трубкой и детектором.

облучении поверхности исследуемого образца рентгеновским излучением до и после лазерной обработки. В обоих случаях образец подносился к входному окну аналитического блока анализатора. Здесь проводилось точное “нацеливание” рентгеновского пучка на контролируемый участок поверхности образца по его оптическому изображению на экране монитора, формируемому с помощью видеокамеры. По завершении “нацеливания” происходило облучение выбранной зоны рентгеновским пучком и регистрировался соответствующий спектр характеристического излучения. Среднее время экспозиции и обработки данных составляло 1–5 мин. В качестве примера на рис. 3 приведены спектры флуоресценции, которые были зарегистрированы для конкретного образца из пудостского камня.

Лазерная очистка осуществлялась с помощью специализированного реставрационного лазера итальянского производства *Smart Clean 2* (изготовитель – компания *El.En. Spa.*). Данный лазер имеет следующие выходные характеристики: длина волны излучения 1064 нм, длительность импульса – 20–100 мкс, энергия – 0,2–2 Дж, частота повторения импульсов – 1–30 Гц.

Обработка поверхности камня проводилась лазерным пучком диаметром около 2 мм. Доставка лазерного излучения в зону обработки и сканирование поверхности очищаемого предмета осуществлялись посредством оптоволоконного кабеля с ручным “фокусатором”, входящими в состав лазерной установки. Работа по очистке поверхности начиналась с пробных расчисток небольших (размером около 1×1 см) участков, причем при самых низких уровнях плотности энергии излучения. Затем плотность энергии постепенно увеличивалась для достижения требуемой степени очистки (решение о приемлемости результатов лазерной обработки принималось реставраторами).

С целью снижения риска возможных повреждений поверхности камня и увеличения эффективности этого процесса в работе использовался метод влажной лазерной очистки [5]. Для этого на поверхность образцов перед началом лазерной обработки (и в процессе ее проведения) наносился тонкий слой дистиллированной воды. Рабочие уровни плотности энергии, при которых выполнялась очистка образцов из пудостского камня, находились в диапазоне 3–8 Дж/см² (изменение значений связано с характером загрязнений на различных участках

поверхности), а частота повторения импульсов – 5–10 Гц. При указанных выходных параметрах лазера с поверхности камня были удалены гипсовые корки и саже-пылевые загрязнения.

Как видно из рис. 3, интенсивности спектральных линий, характеризующих наличие в поверхностном загрязнении железа, калия, цинка, меди и хрома, после лазерной очистки заметно уменьшились по сравнению с соответствующими интенсивностями до обработки поверхности пудостского камня. Это говорит о том, что в результате лазерной очистки были удалены вещества, присутствие которых на поверхности исследуемого образца может быть связано с антропогенными факторами. Известно, что хром, медь и цинк являются характерными индикаторами атмосферных загрязнений в промышленных мегаполисах.

Проведенные эксперименты показали, что применение рентген-флуоресцентных анализаторов дает возможность количественной оценки эффективности лазерной обработки поверхности памятников. По сведениям авторов статьи данная работа – первый опыт применения приборов такого типа для контроля лазерной очистки в отечественной реставрационной практике.

В заключение следует отметить, что предложенный в статье метод контроля может быть рекомендован при проведении практических работ по реставрации экстерьерных памятников с использованием лазеров. Разумеется, речь не идет при этом об отказе от сложившейся в реставрации практики визуальной оценки результатов работы реставраторами. Мнение художника-реставратора всегда было и без сомнения останется основным критерием при принятии решения о необходимой степени очистки поверхности памятника. Но, будучи дополненной современными аналитическими приборными методами контроля, такая оценка может стать более объективной и аргументированной.

Авторы работы благодарны А.В. Кичикову, предоставившему для экспериментов фрагменты памятника из пудостского камня.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Salimbeni R.* Laser techniques in Conservation in Europe // Proc. SPIE. 2005. V. 5857. P. 8–18.
2. *Чулин А.В., Парфенов В.А.* Использование лазерных технологий для реставрации металлических объектов истории и культуры // Оптический журнал. 2007. Т. 74. № 8. С. 56–60.

3. *Siano S., Grazie F., Парфенов В.А.* Оптимизированная лазерная очистка позолоченных бронзовых поверхностей // *Оптический журнал*. 2008. Т. 75. № 7. С. 18–29.
 4. *Парфенов В.А.* Лазерные технологии реставрации и исследования произведений искусства // *Исследования в консервации культурного наследия / Вып. 2. Материалы международной научно-методической конференции, посвященной 50-летию ГосНИИР / Под ред. Трезво-*
ва А.В., Лифшица Л.И., Яхонта О.В. М.: Индрик, 2008. С. 217–226.
 5. *Cooper M.* *Laser Cleaning in Conservation: An Introduction.* Oxford: Butterworth-Heinemann, 1998. 98 p.
 6. *Maravelaki-Kalaitzaki P., Zafiropulos V., Pouli P., Anglos D., Balas C., Salimbeni R., Siano S., Pini R.* Short free running Nd:YAG laser to clean different encrustations on Pentelic marble: procedure and evaluation of the effects // *Journal of Cultural Heritage*. 2003. V. 4. P. 77s–82s.
-