

В. П. ВЕЙКО, С. А. ВОЛКОВ, Т. Ю. МУТИН, В. Н. СМИРНОВ

## О ВОЗМОЖНОСТИ СПЕКТРОСКОПИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ПРОЦЕССА ЛАЗЕРНОЙ ОЧИСТКИ

Приведены результаты использования метода спектроскопии лазерного факела для контроля качества очистки поверхностей. Предложена схема модельного эксперимента по определению коэффициента дезактивации с использованием нерадиоактивных изотопов наиболее часто встречающихся радиоактивных загрязнений.

**Ключевые слова:** лазерная очистка, лазерная дезактивация.

**Введение.** Лазерная очистка — наиболее высокотехнологичный способ удаления поверхностных загрязнений. Одной из важнейших областей применения лазерной очистки является дезактивация радиационно-загрязненных поверхностей деталей и конструкций атомных энергетических установок при их обслуживании или демонтаже. Эта технология дает возможность повторно использовать дорогие конструкционные материалы, стали и сплавы, применение ее на АЭС позволяет снижать радиационные нагрузки на персонал [1, 2].

Известно, что 95 % поверхностных радиоактивных загрязнений сосредоточено в тонком окисном слое, который можно удалить с помощью лазерного излучения [3]. Необходимо разрабатывать методы контроля химического состава поверхности в режиме реального времени, также требуется установить связь между удалением оксидов и снижением радиоактивности. В настоящей работе представлены результаты использования метода спектроскопии лазерного факела при решении задачи контроля качества очистки. Также предложена схема модельного эксперимента по определению коэффициента дезактивации с использованием нерадиоактивных изотопов наиболее часто встречающихся радиоактивных загрязнений.

**Постановка задачи.** Как известно [1], при лазерной очистке происходит испарение загрязнений либо их удаление за счет возбуждения в материале ударной волны.

В любом случае при взаимодействии лазерного излучения (с параметрами, характерными для процесса лазерной очистки) с металлом тонкий поверхностный слой быстро разогревается и возникает приповерхностная сопутствующая плазма, излучающая свет. Спектр излучаемого света несет информацию о химическом составе поверхности.

Заметим, что на спектральном анализе испаряемых с поверхности объекта атомов основан метод лазерно-искровой эмиссионной спектроскопии, ЛИЭС [5, 6], состоящий в возбуждении лазерной плазмы, последующей регистрации спектров ее излучения и их анализе (рис. 1,

1 — лазер, 2 — зеркало, 3 — объектив, 4 — образец, 5 — плазма, 6 — объектив, 7 — волокно, 8 — спектрограф, 9 — CCD-камера). Это явление можно использовать в целях контроля качества очистки [6].

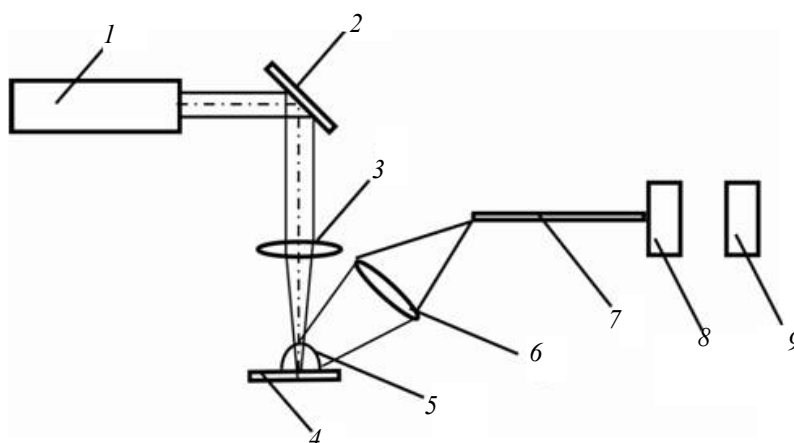


Рис. 1

**Экспериментальные исследования.** Способ контроля процесса лазерной очистки по спектрам сопутствующей плазмы был апробирован в ряде экспериментов с импульсным иттербиевым волоконным лазером и спектрометром Red Tide USB650 с волоконным вводом излучения. Для оценочного моделирования параметров излучающего объекта лазерная искра регистрировалась с помощью скоростной фотосъемки. Чтобы исключить засветку камеры на длине волны лазерного излучения 1,07 мкм, был использован набор отрезающих ИК-излучение фильтров. Излучение импульсного волоконного лазера средней мощностью 10 Вт фокусировалось на поверхности металла в пятно диаметром 100 мкм. Длительность импульса составляла 200 нс, энергия — 0,5 мДж. Для управления излучением был использован гальванометрический сканатор, позволяющий построчно обрабатывать поверхность мишени с расстоянием между областями воздействия 300 мкм. Частота следования импульсов составляла 20 кГц, таким образом, камера с экспозицией 1 мс регистрировала в один кадр двадцать пространственно сдвинутых изображений плазмы с интервалом 50 мкс. Полученные фотографии представлены на рис. 2 (*а* — строка лазерных импульсов на поверхности мишени, *б* — парогазовый факел из области взаимодействия).



Рис. 2

Были сделаны следующие выводы: над областью взаимодействия лазерного излучения с материалом образуется плазма, включающая в себя продукты очистки. Температура газового факела достигает 4000—6000 К, что подтверждается расчетами. Экспериментальные и теоретические оценки параметров газа позволяют построить приближенную спектроскопическую модель источника излучения, соотносящую наблюдаемые спектральные линии с химическими элементами, их испускающими.

Основная идея спектрального контроля качества очистки металлов (в том числе и радиационно-загрязненных) заключается в том, что слой поверхностных примесей — загрязнений — содержит кислород, а основной материал кислорода не содержит [6, с. 169—174]. Эта идея получила также свое подтверждение в экспериментах [4] по очистке ряда металлов, используемых в электронной технике (Ag, Al, Cu, Fe, Nb, Mo, Ta, Ti, W), при помощи Nd:YAG-лазера (50 мДж, 12 нс) и спектроскопических исследований этого процесса при помощи компактного спектрометра SPM002 фирмы OPHIR.

Эксперименты [4] проводились таким образом, что во время каждого импульса очистки регистрировался спектр сопутствующей плазмы. Идентификация спектральных компонент в спектрах излучения плазмы показала, что наряду с ожидаемыми спектральными линиями основного элемента мишени и сильного сплошного фона, обусловленного возбуждением атмосферного азота, в спектрах на начальной стадии процесса очистки присутствуют линии кислорода O, O<sup>+</sup>, O<sub>2</sub><sup>+</sup>.

На рис. 3 приведены зависимости отношения интенсивности излучения линий кислорода к интенсивности излучения линии основного элемента для мишеней из серебра и сильно окисленной меди от числа (*n*) очищающих лазерных импульсов. Видно, что начиная со 2-го

импульса очистки интенсивность излучения линий кислорода в сопутствующей плазме резко падает, т.е. уменьшается содержание этого элемента в мишени. Это также подтверждается как внешним видом объектов, так и их микроскопическим исследованием. Таким образом, зафиксировано значительное уменьшение интенсивности линий кислорода при повторной обработке. Полученные результаты позволяют создать методику оценки степени очистки поверхности (чаще всего это сильно корродированная сталь) от радиоактивных загрязнений по количеству кислорода в спектре факела, а также открывают перспективы для обратной связи при лазерной очистке.

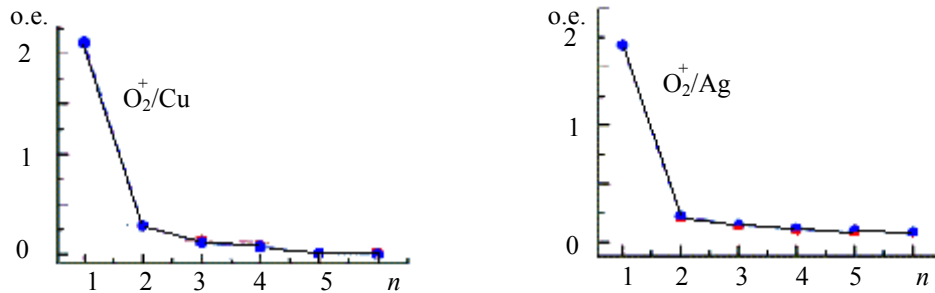


Рис. 3

**Обсуждение.** Спектральный мониторинг процесса лазерной очистки по сравнению с классической ЛИЭС осложняется двумя обстоятельствами.

1. Параметры лазера для очистки не всегда близки к тем, которые требуются для ЛИЭС, но поэтому задача расшифровки спектров „лазерной плазмы“ значительно усложняется.

2. Для очистки как для технологической задачи могут быть использованы комбинации различных лазеров, а также различные режимы их работы и дополнительные приемы (подогрев поверхности, сдвиг факела и т.д.) такие, что для мониторинга процесса могут потребоваться специальные „контрольные“ лазерные импульсы.

Для контроля степени очистки достаточно выявить различия в спектрах очищенной и неочищенной поверхности и создать спектральный фильтр, позволяющий фиксировать наличие или отсутствие выделенного набора спектральных линий в спектре.

Таким образом, возможна следующая схема лазерной очистки со спектральным контролем и управлением (рис. 4; 1—7 — то же, что на рис. 1, 8 — анализирующий фильтр). Вместо спектрального прибора используется спектральный фильтр и организуется канал оптоэлектронной обратной связи. Для создания такой системы потребуются предварительные эксперименты и калибровка, причем каждый конкретный случай очистки потребует создания своего фильтра.

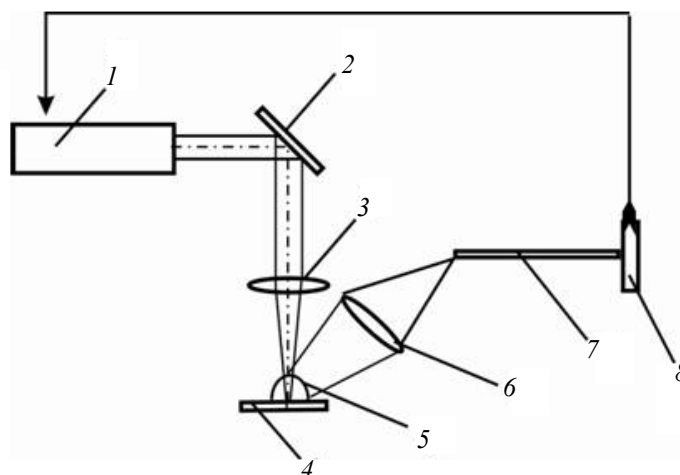


Рис. 4

Для уменьшения объема экспериментов с радиационно-загрязненными образцами можно предложить метод измерения коэффициента дезактивации без реальных радиоактивных загрязнений, например,  $^{133}\text{Cs}$ , причем наличие этих изотопов может быть также определено спектральными методами.

#### **Выводы.**

1. Показано, что степень очистки металлических поверхностей от окислов коррелирует с интенсивностью присутствующих в спектрах линий кислорода.

2. Возможно управление процессом лазерной очистки путем введения канала оптико-электронной обратной связи, в основу работы которой положен анализ спектров сопутствующей плазмы. Предложена схема такой обратной связи.

Работа поддержана государственным контрактом РФ № П968.

#### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Вейко В. П., Мутин Т. Ю., Смирнов В. Н., Никишин Г. Д., Шахно Е. А. Лазерная очистка и дезактивация металлических поверхностей: физические процессы и применения // Лазер-Информ. 2008. № 1—2. С. 376—377.
2. Никишин Г. Д., Стехин В. М., Смирнов В. Н. и др. Возможности применения лазерной дезактивации при утилизации оборудования ядерных энергетических установок. Владивосток, 2002.
3. Никишин Г. Д., Горынин В. И., Смирнов В. Н. и др. Применение лазерной дезактивации при утилизации АПЛ. Северодвинск, 2001.
4. Волков С. А., Лапинов С. Н. О возможности контроля процесса лазерной очистки по спектрам сопровождающей плазмы // XXXVII Междунар. конф. по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу. Звенигород, 2010.
5. Вейко В. П., Шахно Е. А. Физические механизмы лазерной очистки // Лазерная очистка / Под ред. Б. С. Лукьянчука. 2002. С. 311—340.
6. Кремерс Д., Радземски Л. Лазерно-искровая эмиссионная спектроскопия. 2009.

#### **Сведения об авторах**

- Вадим Павлович Вейко** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра лазерных технологий и экологического приборостроения; зав. кафедрой; E-mail: veiko@lastech.ifmo.ru
- Сергей Александрович Волков** — Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра лазерной техники и биомедицинской оптики; старший научный сотрудник
- Тимофей Юрьевич Мутин** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра лазерных технологий и экологического приборостроения; младший научный сотрудник; E-mail: timofeymutin@yandex.ru
- Валентин Николаевич Смирнов** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра лазерных технологий и экологического приборостроения

Рекомендована программным комитетом Конференции

Поступила в редакцию 08.09.10 г.