

Удаление оксидных пленок излучением ХеСІ-лазера для дезактивации поверхностей*

М.Л.Сангис, Ф.Делапорт, В.Марин, О.Утеза

Для очистки больших поверхностей с помощью автоматизированного устройства на базе эксимерного ХеСІ-лазера использована лазерная абляция. Основное внимание уделено очистке металлических окисленных поверхностей, являющихся типичными представителями поверхностей, загрязненных радионуклидами в процессе эксплуатации ядерных электростанций. Устройство состоит из ХеСІ-лазера, системы доставки излучения к поверхности, коллектора частиц загрязнения и системы контроля очистки в реальном масштабе времени. Рассмотрено взаимодействие излучения с поверхностью, в частности повреждение чистой поверхности очищающим излучением. Система доставки излучения к поверхности состоит из пучка волоконных световодов длиной 5 м и обеспечивает доставку лазерного излучения мощностью 150 Вт на длине волны 308 нм. Очистка контролируется регистрацией эволюции электрического поля плазмы в реальном масштабе времени. Система обеспечивает очистку поверхности со скоростью от 2 до 6 м²/ч при весьма незначительном изменении очищаемой поверхности.

Ключевые слова: загрязнение радионуклидами, лазерная очистка, удаление окислов.

Введение

Очистке и восстановлению исходного состояния поверхностей, загрязненных в результате различного рода деятельности, придается в настоящее время первостепенное значение не только на государственных предприятиях, но и в других организациях, работа которых приводит к всевозможным загрязнениям, а также в службах очистки, специализирующихся, в основном, на удалении вредных веществ (прежде всего радиоактивных) с оборудования, почвы и строений с помощью механической очистки, смывания или химического удаления. Эти способы возвращают оборудование, почву и строения в безопасное состояние, которое гарантирует их повторное применение или же менее дорогостоящее уничтожение.

Снижение радиационного облучения персонала является ключевой задачей при расчете расходов на обслуживание и поддержание в безопасном состоянии ядерных электростанций. Хотя уровень облучения персонала электростанции после постепенного роста в первые годы эксплуатации (в первые несколько топливных циклов) стабилизируется, ядерные электростанции со временем нуждаются во все более частой очистке. При высокой интенсивности облучения требуется больше персонала и более частая его смена, а снижение предельно допустимого уровня облучения (доза 2 бэр/год является предельно допустимой согласно требованиям Международной комиссии по радиологической защите, предъявляемым к защитным костюмам) ограничивает производитель-

ность электростанции. В радиоактивной зоне управления станции персонал может находиться меньшее время, устройства очистки являются более сложными, а требования к ним – более жесткими, чем на нерадиоактивных предприятиях.

В настоящее время механические и химические методы очистки хорошо развиты и широко используются. Механическая очистка основана, главным образом, на физическом удалении загрязнений с поверхности. При химической очистке с помощью различных химических реактивов осуществляется снижение концентрации или растворение поверхностных загрязнений. Однако у этих методов есть недостатки: вторичные потоки отработанных веществ, которые надо обрабатывать, их большие объемы, сильное разбрызгивание и необходимость тщательного контроля за их нераспространением. Все это трудноосуществимо дистанционно, требует применения опасных химических соединений и интенсивного труда обслуживающего персонала.

Таким образом, очевидна необходимость в новых очистных технологиях, которые позволили бы минимизировать расходы на очистку и снизить радиоактивное облучение обслуживающего персонала. Новые технологии по сравнению со старыми должны быть безопаснее и экономичнее. Лазерная обработка загрязненных поверхностей открывает новые возможности и перспективы, зачастую позволяющие расширить пределы ограничений, которые присущи старым технологиям. Лазеры интенсивно используются при различных операциях на поверхностях: нанесении покрытий, термообработки, а также, как будет подробно рассмотрено ниже, очистке поверхностей.

В настоящей работе рассмотрены общие проблемы лазерной очистки поверхностей и, конкретно, проблемы использования УФ лазерной очистки, а также продемонстрированы ее потенциальные возможности. Представлена находящаяся в стадии разработки система лазерной очистки больших площадей.

*Перевел с англ. Б.Ф.Полковников.

1. Система лазерной очистки

1.1. Выбор длины волны и длительности импульса

В последнее время в промышленных приложениях в основном используются лазеры трех типов: CO_2 -лазеры ($\lambda = 10.6$ мкм), Nd:YAG-лазеры ($\lambda = 1.06$ мкм) и эксимерные лазеры ($\lambda = 193 - 351$ нм). При лазерной обработке материалов в дополнение к плотности энергии степень воздействия излучения на облучаемую поверхность характеризуют два основных параметра – длина волны λ и длительность лазерного импульса τ . Действительно, толщина поверхностного слоя вещества, который подвергается воздействию излучения, обратно пропорциональна коэффициенту поглощения вещества $\alpha(\lambda)$. Например, для железа $\alpha(\lambda) \sim 1\%$ на $\lambda = 10.6$ мкм, $\sim 20\%$ на $\lambda = 1.06$ мкм и $\sim 50\%$ на $\lambda = 308$ нм (эксимерный ХеСl-лазер) [1]. От длительности импульса зависит глубина зоны, подвергаемой термическому воздействию. Эта глубина приблизительно пропорциональна корню квадратному из длительности импульса. Следовательно, для того чтобы термическое воздействие на поверхность очищаемого материала было незначительным, как это требуется при очистке, предпочтительнее использовать коротковолновые лазеры с короткими (наносекундные или даже еще короче) импульсами.

Если бы в системах очистки нужно было решать только проблемы взаимодействия лазерного излучения с веществом, вполне мог бы быть использован лазер с длиной волны 193 нм (ArF-лазер) и длительностью импульса ~ 10 нс. Однако по очевидным причинам необходимости автоматизации процесса и обеспечения безопасности персонала следует еще принимать во внимание проблему доставки лазерного пучка к поверхности по оптическому волокну. К сожалению, в настоящее время излучение высокой мощности на длине волны 193 нм передавать по оптическому волокну не удается. Волоконные световоды, позволяющие передавать коротковолновое излучение большой мощности, обычно делаются из кварца. Учитывая спектральные характеристики этого материала, можно прийти к выводу, что на сегодняшний день минимальной реальной длиной волны передаваемого излучения может быть 308 нм (ХеСl-лазер) [2].

В результате выбор длины волны излучения состоит в компромиссе между возможностью доставки излучения с помощью волоконных световодов, высоким коэффициентом воздействия излучения на вещество загрязнений и минимальным остаточным повреждением очищаемой поверхности. Излучение Nd:YAG-лазера хорошо транспортируется по волоконным световодам [3], но его коэффициент поглощения в металлах, как правило, невелик, а энергия фотона (1.2 эВ) намного меньше энергии связи большинства окислов и металлов. Это означает, что обычно для эффективного удаления окислов требуется высокая плотность энергии (более 5 Дж/см²), вызывающая нежелательное термическое повреждение очищаемой поверхности.

ХеСl-лазер (длина волны 308 нм), излучающий импульсы длительностью от 50 до 200 нс, представляется в этом отношении наилучшим. Дополнительное его преимущество заключается в том, что он хорошо разработан и на промышленном рынке широко представлены его образцы с высокой выходной мощностью (более 500 Вт). Проблема передачи УФ излучения по волоконному све-

товоду еще не полностью решена, но, как будет показано ниже, при определенных условиях удастся добиться передачи высокой средней мощности на длине волны 308 нм.

В экспериментах по очистке в нашей лаборатории использовался ХеСl-лазер марки СILAS 635 [4] с высокой средней мощностью. Установка имела высоту 2 м, ширину 1.3 м и длину 1.8 м и следующие энергетические характеристики: длительность импульса по полувысоте составляла 70 нс, максимальная выходная энергия – 3 Дж, максимальная частота повторения импульсов – 500 Гц и средняя мощность – 1 кВт при частоте повторения 400 Гц.

1.2. Система доставки излучения

Для оптимизации передачи мощного излучения эксимерного лазера по кварцевому световоду исследовались трансмиссионные свойства световода для излучения ХеСl-лазера, а также спектры флуоресценции сердцевинного световода во время и после УФ облучения, что позволило изучить особенности образования центров окраски (ЦО). Чтобы определить оптимальные условия, при которых световоды могут быть использованы в промышленных приложениях, они исследовались при различных параметрах лазерного излучения. Световоды типа Polimicro 600/660/700μm имели ступенчатый профиль показателя преломления. Сердцевина диаметром 600 мкм была сделана из чистого плавяного кварца и покрыта оболочкой из такого же кварца, легированного фтором. Типичное содержание ОН составляло 800 млн⁻¹, числовая апертура волокна равнялась 0.2.

Исследовались световоды длиной от 2 до 10 м. При этом варьировались различные лазерные параметры – число импульсов, частота повторения, плотность энергии и длительность импульса. На рис. 1 в качестве примера приведена зависимость пропускания двухметрового волоконного световода от числа импульсов при трех разных частотах повторения и плотности лазерной энергии 6 Дж/см². Во всех трех случаях пропускание стабилизировалось после облучения 2000 лазерных импульсов, причем установившееся пропускание было тем меньше, чем выше была частота повторения импульсов. Действительно, при повышении частоты повторения уменьшается время, в течение которого обесцвечиваются ЦО.

На механизм образования ЦО влияет и такой лазерный параметр как плотность энергии импульса E [5]. Пропускание световода T измерялось при разных плотностях входной энергии и частотах повторения импульсов 50 и 160 Гц. Наблюдалось такое же поведение T , как и на рис. 1. Коэффициент лазерно-наведенного поглощения мы измеряли после 10⁴ имп., когда наступало насыщение. Линейная зависимость $1/T$ от E , наблюдавшаяся и другими авторами [5–7], доказывает, что образование ЦО является результатом двухфотонного поглощения.

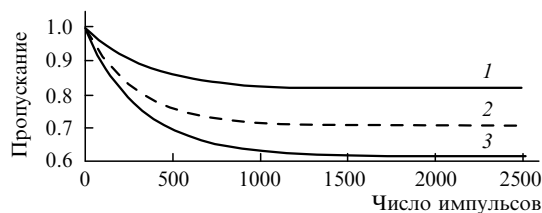


Рис. 1. Пропускание световода в зависимости от числа лазерных импульсов при плотности энергии 6 Дж/см² и частоте повторения импульсов 10 (1), 50 (2) и 160 Гц (3).

Лазерно-наведенное поглощение также сильно зависит от длительности лазерного импульса, распространяющегося по сердцевине световода [8]. При длительности 70 нс, что заметно больше, чем длительность импульсов стандартных промышленных лазеров (от 15 до 30 нс), образование ЦО подавляется.

Таким образом, передача по волоконному световоду излучения высокой средней мощности при возможно более низком поглощении осуществима при низкой плотности энергии импульсов и высокой частоте их повторения. Исходя из этого предположения мы исследовали пучок из 90 световодов длиной 5 м. Использование большого числа световодов снижает энергию, распространяющуюся по отдельному световоду, и, следовательно, уменьшает вероятность образования ЦО, в то время как высокая частота повторения обеспечивает высокую среднюю мощность излучения. Коэффициент заполнения, определенный как отношение площади светопередающей части световода к полной площади пучка световодов, освещаемых лазерным пучком прямоугольного сечения, составил $\sim 72\%$.

На выходе пучка световодов располагались две кварцевые линзы, которые формировали лазерное излучение, падающее на окисленную поверхность. При плотности энергии импульса 3 Дж/см² на входе световодов и частоте повторения импульсов 300 Гц общая эффективность передачи (с учетом коэффициентов заполнения, пропускания и поправки на форму пучка) составляла 50%. Приведенные выше параметры лазера характеризуют данную систему передачи мощного УФ излучения по световоду как одну из наиболее эффективных, поскольку пятиметровый пучок световодов непосредственно доставляет излучение мощностью 150 Вт на длине волны 308 нм на очищаемую поверхность. Исследования проводились в течение не менее 1 ч без какого-либо заметного уменьшения мощности лазерного излучения, подводимого к поверхности.

1.3. Расширение плазмы и сбор разлетающихся частиц

При воздействии на вещество лазерного пучка коротковолнового (УФ) короткоимпульсного излучения оно поглощается в тонком слое материала (в скин-слое толщиной $\sim \alpha^{-1}$). При этом объемная плотность мощности лазерного излучения, передаваемая веществу, превышает 1 ГВт/мм³. В этих условиях материя удаляется с поверхности вещества в виде струи плазмы, называемой «лазерным факелом». Такой факел главным образом состоит из атомов и молекул в основном, возбужденном и ионизированном состояниях. Разлетающиеся частицы первоначально движутся перпендикулярно поверхности вещества со скоростями порядка 10^5 см/с. В случае облучения поверхности, находящейся в окружающем воздухе, расстояния разлета составляют $\sim 2 - 10$ мм (в зависимости от плотности лазерной энергии). Чрезвычайно важно уметь собирать эти разлетающиеся частицы, которые в противном случае могут либо снова осесть на очищаемую поверхность, загрязняя ее, либо загрязнить окружающую атмосферу. Обычно рядом с поверхностью размещается коллектор для сбора всех частиц лазерного факела.

Для отработки способов сбора загрязняющих частиц были проведены как экспериментальные, так и модельные исследования расширяющейся плазмы. При разлете в воздух многокомпонентного вещества (такого как же-

лезо или нержавеющая сталь) соответствующие процессы слишком сложны, чтобы их можно было корректно смоделировать. По этой причине мы проводили эксперименты с однокомпонентной мишенью из Si, разлетающейся в атмосфере благородного газа (Ar или He).

Физические процессы при лазерной абляции, вызванной коротким лазерным импульсом (в интервале длительностей от пикосекунд до наносекунд) с относительно невысокой плотностью энергии (менее 10 Дж/см², что характерно для типичных условий очистки) могут быть разбиты на три последовательные стадии [9, 10]: 1) испарение материала мишени; 2) взаимодействие лазерного излучения с облаком испаренного материала, в результате чего оно разогревается и в нем образуется плазма; 3) расширение плазменного факела в вакуум или атмосферу окружающего газа. Первые два процесса длятся в течение лазерного импульса. При наносекундных лазерных импульсах резонно предположить, что третий процесс (т.е. стадия расширения факела) начинается после окончания лазерного импульса и, следовательно, может быть рассмотрен отдельно от первых двух.

Расширение плазмы в вакуум представляет собой простой адиабатический процесс, который может быть полностью описан и теоретически и численно промоделирован [9, 10]. Поведение плазмы при расширении в газовой атмосфере является куда более сложным вследствие развития новых физических процессов, таких как торможение частиц, формирование ударной волны, теплопроводность, диффузия, рекомбинация и образование кластеров.

Более глубокое понимание процессов, происходящих при разлете плазменного факела, было достигнуто на пути совместного рассмотрения экспериментальных результатов и результатов, полученных на многокомпонентных двумерных моделях, разработанных в нашей лаборатории. Трехмерные осесимметричные уравнения Навье – Стокса для сжимаемой жидкости решались для многокомпонентного газа с учетом влияния масс и вынужденной диффузии, теплопроводности и вязкости. Они могут быть записаны в следующем виде [11]:

$$\frac{\partial \rho_i}{\partial t} + \text{div}[\rho_i(\mathbf{v} + \mathbf{v}_{di})] = \omega_i, \quad i = 1, \dots, 4, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho v}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{v} \mathbf{v} - p \mathbf{I} + \tilde{\tau}) = 0, \quad (2)$$

$$\frac{\partial E_a}{\partial t} + \text{div}[E_a \mathbf{v} - (-p_a \mathbf{I} + \tilde{\tau}) \mathbf{v} + \mathbf{q}] = S_a, \quad (3)$$

$$\frac{\partial E_e}{\partial t} + \text{div}[(E_e + p_e)(\mathbf{v} + \mathbf{v}_{de})] = S_e + F_e. \quad (4)$$

Здесь ρ_i , \mathbf{v}_{di} , ω_i – плотность, скорость диффузии и массовый член источника (mass source term) компоненты i соответственно; \mathbf{v}_{de} – скорость диффузии электронов; \mathbf{v} – скорость; ρ – плотность смеси; p_a, p_e – атомно-ионное и электронное давление; p – общее давление; $\tilde{\tau}$ – тензор вязких сдвиговых напряжений; E_a, E_e – атомно-ионная и электронная энергия; S_a, S_e – функции источников атомно-ионной и электронной энергии; \mathbf{I} – единичный тензор; $i = 1$ соответствует нейтральным атомам, $i = 2$ – ионам, $i = 3$ – электронам, $i = 4$ – окружающим атомам.

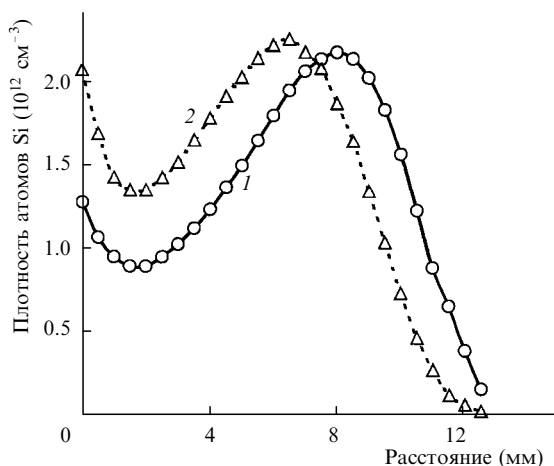


Рис.2. Результаты двумерных расчетов по уравнениям Навье–Стокса плотности атомов Si в зависимости от z в момент $t = 2.4$ мкс при плотности энергии 2.4 Дж/см² и давлении Ar 400 (1) и 700 мТор (2).

Подробное описание коэффициентов передачи (для теплопроводности и вязкости газообразного Si, Ar и He в отдельности, а также для их бинарной диффузии), представленных в виде полиномиальных разложений по температуре, можно найти в отчете [12]. Численные исследования были подтверждены времяпрелетными экспериментальными исследованиями атомов или молекул, а также измерением их температур с помощью техники лазерно-индуцированной флуоресценции. Эти исследования позволили адекватно описать общее поведение расширяющейся в окружающий газ плазмы, в частности эволюцию зоны смешивания, а также пространственно-временные зависимости температуры и плотности плазменного факела.

Применительно к очистке поверхности интересно исследовать влияние природы и давления окружающего газа на характер расширения плазмы, что позволит увеличить эффективность сбора частиц. На рис.2 в качестве примера приведен профиль плотности Si-плазмы вдоль оси симметрии факела z в момент $t = 2.4$ мкс при плотности энергии 2.4 Дж/см² и давлении аргона 400 и 700 мТор. Рост плотности атомов Si у поверхности мишени (при $z < 2$ мм) с повышением давления аргона указывает на то, что в разреженной части факела атомы Si в результате массовой диффузии эффективно увлекаются движущимися вспять атомами Ar; обратное движение атомов кремния становится все более существенным с повышением давления аргона.

Расщепление Si-факела (т. е. появление двух максимумов плотности) является более выраженным при давлении аргона 700 мТор, нежели при давлении 400 мТор (рис.2). Полученные результаты численных расчетов находятся в хорошем согласии с экспериментальными результатами, указывающими на заметное возрастание интенсивности обратного осаждения (перенапыления) частиц Si в окрестности лазерного пятна с ростом давления Ar [13].

На основании этих исследований было сконструировано коаксиальное сопло. В нем на выходе 90-волоконного пучка световодов располагаются две линзы для формирования пространственного профиля пучка излучения. Применение такого сопла позволяет защитить оптику от потока рассеянных частиц, удаляя их со скоростью от 10 до 100 м/с.

1.4. Управление очисткой в реальном масштабе времени

Для защиты промышленных рабочих от опасной радиации и для снижения стоимости очистки необходима разработка эффективного управления этим процессом. В нашем распоряжении имеются различные методы, такие как дистанционное наблюдение с помощью телекамеры, регистрация акустических шумов, оптическая спектроскопия и т. д. В рассматриваемой системе использовались два подхода. Первый основывался на оптической спектроскопии с регистрацией, например, линии излучения цезия в реальном масштабе времени. Второй, более оригинальный метод, был основан на регистрации и анализе электрического поля лазерной плазмы.

Мы исследовали [14] возможность измерения электрического поля, наведенного лазерной плазмой, с помощью довольно простого метода зондирования. При этом регистрировались особенности электрического поля, генерируемого при создании плазмы на различных мишенях, что должно было помочь управлению процессом очистки металлических поверхностей.

Эксперименты проводились с различными мишенями, находившимися в окружающем воздухе при атмосферном давлении ($p = 1$ атм). Испытывались мишени как из электропроводных материалов (Fe, Cu, сталь и т. д.), так и из диэлектриков (тефлон или окислы). С помощью электрического зонда измерялся потенциал электрического поля вблизи факела лазерной плазмы. В роли зонда выступал отрезок жилы коаксиального стандартного 50-омного кабеля длиной 1 см и диаметром 0.4 мм, нагруженный на 50-омный вход высокочастотного осциллографа. Оплетка кабеля была заземлена.

Было обнаружено, во-первых, что во время существования плазмы временная форма и амплитуда пробного сигнала $U(t)$ меняются при нахождении заземленного металлического проводника вблизи зонда. Приближение такого проводника к зонду приводит к изменению сигнала от биполярного с одинаковыми площадями под положительной и отрицательной полуволнами к однополярному. Такое изменение обусловлено увеличением емкости зонда вблизи металлической поверхности.

В экспериментах было зафиксировано появление электрического потенциала U в окрестности плазменного факела с самого порога возникновения плазмы как на проводящих, так и на диэлектрических мишенях. Амплитуда и форма сигнала U не зависели от того, находился ли зонд в кабельной изоляции или был освобожден от нее. Контрольный эксперимент показал, что этот потенциал не связан с фотоэффектом с поверхности зонда, но определяется положением зонда относительно пространственного положения электрического поля плазмы.



Рис.3. Изменение пробного электрического сигнала в процессе очистки поверхности от окислов.

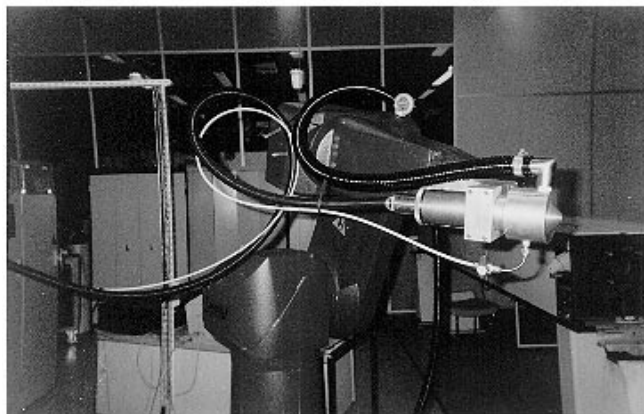


Рис.4. Внешний вид демонстрационного макета очистителя.

В наших экспериментах было обнаружено существенное различие между структурами и амплитудами электрических потенциалов лазерной плазмы, возникающей на проводящих и диэлектрических поверхностях. На рис.3 приведена зависимость максимального пробного сигнала от числа лазерных импульсов, необходимых для удаления пленки окисла с поверхности железного образца. Эксперимент проводился в воздухе при атмосферном давлении. После приблизительно 30 вспышек пленка окисла была полностью удалена и отношение сигналов от окисленной и чистой поверхностей стало достаточно большим (более 20) для того, чтобы процесс очистки можно было прекратить.

1.5. Установка для лазерной очистки

На базе различных узлов, описанных в предыдущих разделах, была создана демонстрационная установка для лазерной очистки. Она состояла из ХеСl-лазера СІLAS 635, пятиметрового волоконного жгута для доставки излучения к очищаемой поверхности, робота по сбору частиц загрязнений, насоса с фильтром для микрочастиц и компьютера, управлявшего системой и регулировавшего степень очистки.

В качестве робота, обеспечивавшего сбор частиц загрязнений, использовался робот RX130 Stäubli, применяемый на ядерных электростанциях. Максимальная скорость манипулятора робота достигала 1 м/с. На рис.4 показаны манипулятор робота, держащий коллектор для сбора загрязнений, а также системы доставки излучения и отсосная трубка.

2. Экспериментальные результаты по очистке поверхностей

Первые исследования были в основном посвящены определению порога повреждения нержавеющей стали (марки 304 и 316L) и модификации поверхности, вызываемых излучением ХеСl-лазера. Видимые повреждения наблюдались при плотности энергии излучения более 2 Дж/см² при пороге абляции 1 Дж/см². На рис.5 приведена сделанная с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) фотография поверхности нержавеющей стали, «изъеденной» пятью лазерными импульсами при плотности энергии 2 Дж/см². Хорошо видны микротрещины, присущие такому материалу, причем они остаются незаплавленными; это свидетельствует о том, что тепловыми процессами типа поверхностного плавления мо-

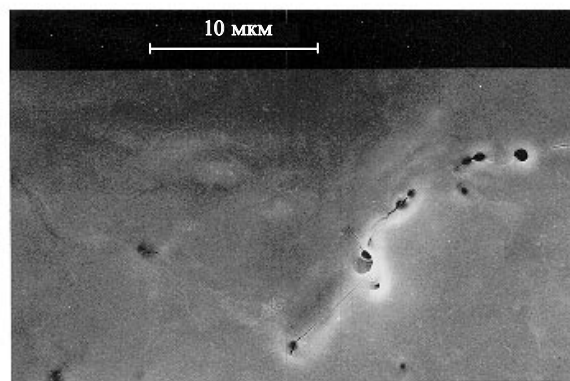


Рис.5. СЭМ-изображения окисленной поверхности образца из нержавеющей стали после лазерного облучения пятью импульсами с длиной волны 308 нм и плотностью энергии 2 Дж/см².

жно пренебречь. Тот факт, что очистка поверхности излучением эксимерного лазера не приводит к заплыванию микротрещин, весьма благоприятен в случае очистки от радиоактивных загрязнений, поскольку последние, как правило, концентрируются в трещинах и, следовательно, будут удалены.

На рис.6 приведены СЭМ-фотографии поверхности окисленного образца нержавеющей стали до и после лазерной очистки четырьмя импульсами излучения с плотностью энергии 1.5 Дж/см². Видно, что после очистки пленка естественного окисла полностью удалена и поверхность образца является весьма гладкой.

На рис.7 представлены СЭМ-фотографии среза образца до и после лазерной очистки 100 лазерными им-

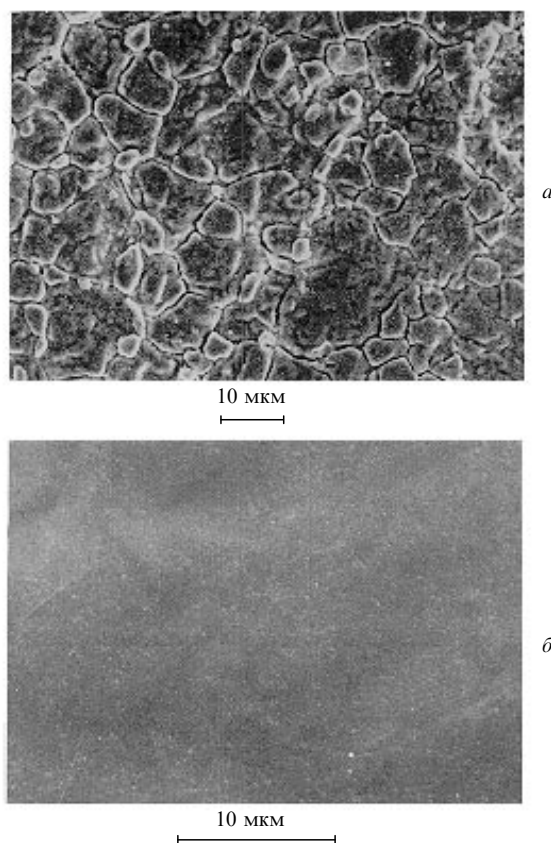


Рис.6. СЭМ-изображения окисленного образца из нержавеющей стали до (а) и после (б) лазерной очистки четырьмя импульсами с плотностью энергии 1.5 Дж/см².

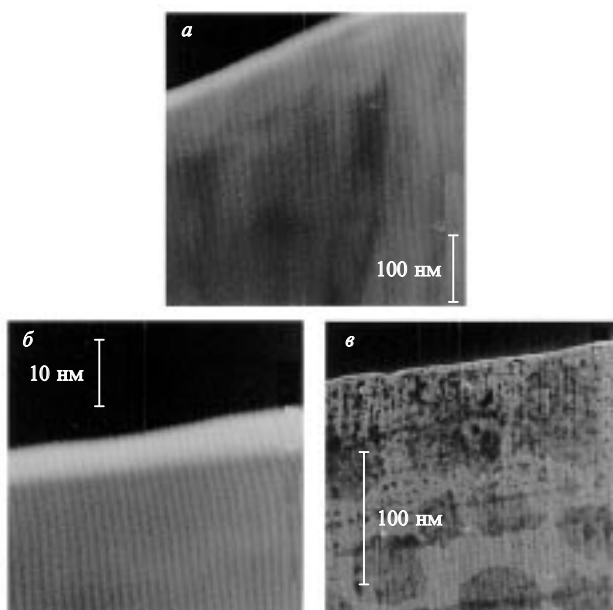


Рис.7. СЭМ-изображения поперечных срезов образца из нержавеющей стали до (а) и после (б, в) лазерной очистки 100 импульсами с плотностью энергии 6 Дж/см².

пульсами при плотности энергии 6 Дж/см². Никаких изменений поверхности не наблюдалось, кроме незначительного утолщения окисной пленки (~ 50 нм до облучения (рис.7, а) и ~ 80 нм после (рис.7, в)). Можно отметить очень слабое тепловое воздействие УФ лазерной абляции даже при высокой плотности энергии и большом числе импульсов. При абляционных параметрах, более близких к обычным параметрам очистки (1–2 Дж/см² и 10–20 лазерных импульсов), наблюдения на СЭМ не выявили никакой модификации очищаемой поверхности.

Другим важным аспектом лазерной очистки является проблема эффективного сбора частиц загрязнений. На рис.8 представлены два спектра рентгеновской флуоресценции образца из нержавеющей стали, загрязненного нерадиоактивными хлором и цезием, до и после лазерной очистки при плотности энергии 2 Дж/см² с использованием сбора частиц. После лазерной очистки все загрязнения были эффективно удалены совместным действием лазерной абляции и системы отсоса.

Заключение

Описанное устройство для лазерной очистки поверхностей, в котором используются XeCl-лазер (CILAS 635) и робот-манипулятор (RX130 Stäubli), с дистанционным управлением и контролем качества очистки при средней мощности лазера 150 Вт (308 нм) и 50 %-ной эффективности системы доставки излучения обеспечивает эффективную очистку при малых или отсутствующих повреждениях очищаемой поверхности.

При локализации загрязнений на поверхности это устройство может быть использовано для очистки множества различных материалов, таких как металлы, керамика, стекла, полимеры. Оно способно осуществлять очистку поверхностей со скоростью от 2 до 6 м²/ч (в зависимости от типа загрязнений). Следующим этапом экспериментов будет оценка возможностей очистки поверхностей от радиоактивных загрязнений.

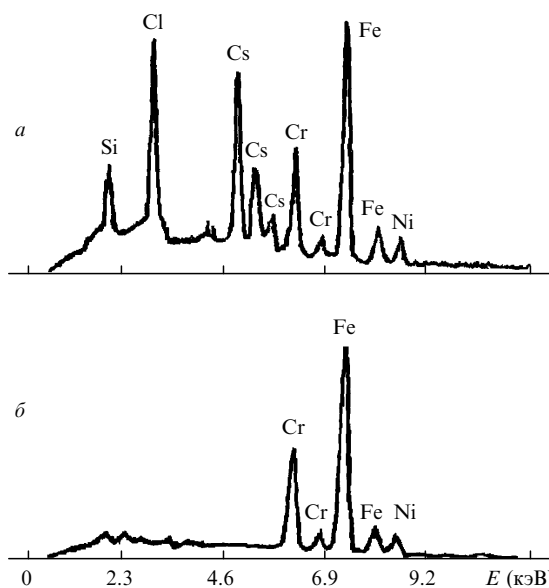


Рис.8. Спектры рентгеновской флуоресценции загрязненного образца до (а) и после (б) лазерной очистки.

Исследование было поддержано фондами фирмы ONET и ANVAR (Национальное агентство по внедрению результатов научных исследований). Авторы благодарны Д.Блину из ONET за постоянную поддержку и Б.Лакуру из фирмы «Cilas» за разработку экспериментального эксимерного лазера.

1. Dausinger F., Shen J. *ISIJ Intern.*, **33**, 925 (1993).
2. Brimacombe R.K., Taylor R.S., Leopold K.E. *J. Appl. Phys.*, **66**, 4035 (1989).
3. Boechat A., Su D., Jones J.D. *Meas. Sci. Technol.*, **2**, 1107 (1991).
4. Lacour B., Brunet H., Besaucele H., Gagnol C., Vinent B. *Proc. SPIE*, **2206**, 41 (1994).
5. Hillrichs G., Dressel M., Hack H., Kunstamm R., Neu W.I. *Appl. Phys. B*, **54**, 208 (1992).
6. Artjushenko V.G., Ikonov V., Pashinin V.P. et al. *Proc. SPIE*, **1420**, 176 (1991).
7. Karlitschek P., Hillrichs G., Klein K.F. *Optics Comms*, **155**, 376 (1998).
8. Taylor R.S., Leopold K.E., Mihailov S., Brimacombe R.K. *Optics Comms*, **63**, 26 (1987).
9. Singh R.K., Narayan J. *Phys. Rev. B*, **41**, 8843 (1990).
10. Anisimov S.I., Bäuerle D., Luk'yanchuck B. *Phys. Rev. B*, **48**, 12076 (1993).
11. Oran E., Boris J.P. *Numerical simulation of reactive flow* (N.Y., Elsevier, 1987).
12. Kee R.J., Dixon-Lewis G., Warnatz J., Coltrin M.E., Miller J.A. *Sandia Report SAND86-8246* (1986).
13. Movtchan I.A., Marine W., Dreyfus R.W., Le H.C., Sentis M., Autric M. *Appl. Surf. Sci.*, **96–98**, 251 (1996).
14. Кабащин А.В., Никитин П.И., Марине В., Сентис М. *Квантовая электроника*, **25**, 26 (1998).

M.L.Sentis, Ph.Delaporte, W.Marine, O.Uteza. Surface oxide removal by a XeCl laser for decontamination.

The laser ablation is used for large surface cleaning with an automated excimer XeCl laser unit. The study focuses on metal surfaces that are oxidised and are representative of contaminated surfaces with radionuclides in a context of nuclear power plant maintenance. The whole device contains XeCl laser, beam delivery system, particle collection cell, the system of real-time control of cleaning processes. Surface laser interaction and substrate modifications are considered, particularly clean surface modification by the cleaning radiation. The beam delivery system consists of an optical fibre bundle of 5 m long and allows delivering 150 W at 308 nm for laser surface cleaning. The cleaning process is controlled by analysing in real time the plasma electric field evolution. The system permits the cleaning of 2 to 6 м²/h of oxides with only slight substrate modifications.