На правах рукописи

Мелюков Дмитрий Валерьевич

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА БЕСКОНТАКТНО-УПРАВЛЯЕМОЙ ЛАЗЕРНОЙ АБЛЯЦИИ СЛОИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ

Специальность:

05.02.07 – Технологии и оборудование механической и физико–технической обработки

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва – 2012

Работа выполнена в Московском государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана

Научный руководитель: Григорьянц Александр Григорьевич

доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: Ямпольский Виктор Модестович

доктор технических наук, профессор,

Московский государственный университет приборостроения и информатики,

зав. каф. «Информационное обеспечение технологий соединения материалов».

НТБ МГТУ им.Н.Э.Баумана
1997099
Мелюков Д.В.Разработка и и

Денисов Владимир Николаевич

кандидат технических наук,

ОАО «Композит»

Федерального космического агентства,

главный научный сотрудник

Ведущая организация: Федеральное государственное унитарное предприятие «Научно-производственный центр газотурбостроения «САЛЮТ»

Защита диссертации состоится «23» мая 2012 года на заседании диссертационного совета Д 212.141.06 в Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5. Телефон для справок: (499) 267-09-63.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана.

Автореферат разослан «19» апреля 2012 г.

Ученый секретарь диссертационного совета Михайлов В.П.

д.т.н., доц.

Ана УЛИ

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Очистка поверхностей востребована практических во всех отраслях современной промышленности. В настоящее время массово используется ряд химических, физических и физико-химических технологий, которые успешно выполняют свои задачи в этой области. Однако там, где появляется необходимость делать это прецизионно, традиционные технологии не всегда способны обеспечить требуемые характеристики процесса. Кроме этого, контактный характер и наличие материального реагента в этих способах повышают опасность работы персонала и увеличивают сложность технологии утилизации отходов в случае использования в агрессивных средах и для очистки небезопасных материалов, в первую очередь радиоактивных.

Лазерная абляция представляется в этом ключе качественно более эффективной альтернативой ввиду полностью бесконтактного и дистанционного характера воздействия, а также из-за возможности осуществлять обработку с недостижимыми для других способов точностью и гибкостью. Помимо прочего, компактность, надежность, неприхотливость в обслуживании и эксплуатации, а также возрастающий КПД современных лазеров, дают основание предполагать высокий промышленный потенциал этого способа очистки.

Тем не менее, для полной реализации потенциала управляемой и бесконтактной очистки с помощью лазера требуется дополнить этот процесс соответствующим инструментом контроля и обратной связи. С этой целью в настоящей работе предлагается совместить лазерную абляцию и тепловую диагностику, основанную также на нагреве посредством лазера и регистрации теплового излучения фотодетектором.

Таким образом, разработка способа контролируемой очистки поверхности с абсолютным отсутствием физического контакта и с возможным применением сквозь материальные ограничители (технологические окна, иллюминаторы и проч.) является актуальной научно-технической задачей.

Целью диссертационной работы является разработка бесконтактно-управляемого процесса лазерной абляции поверхностных слоев на основе анализа данных изменения толщины слоя, получаемых с помощью неразрушающей тепловой диагностики.

Для достижения поставленной цели был поставлен ряд задач:

1. Разработать методику измерения толщины слоя, не требующую определения характеристик материала.
2. Разработать методики и технологические карты выбора и корректировки режимов лазерной абляции на основе данных теплового контроля.

3. Изготовить экспериментальную установку бесконтактно-управляемой лазерной абляции.
4. Исследовать разработанные методики на образцах с толщинами слоев в рамках теоретических моделей, выполненных из различных материалов.
5. Оценить область применения и ограничения разрабатываемой технологии.

При этом важно отметить, что при разработке теоретической методики решалась задача исключения из процесса управления сложных математических расчетов физических моделей лазерной абляции и определения необходимых для этих расчетов, теплофизических, оптических и иных характеристик материала.

Методы исследования. В теоретической части работы использовался аппарат математического моделирования и параметрического анализа процесса тепловой диагностики, включающий в себя теорию тепловых квадруполей и коэффициенты чувствительности. Математический анализ реализовывался с помощью численных расчетов в программном пакете MathCAD.

В экспериментальной части были проведены испытания лазерной абляции и тепловой диагностики на различных образцах с контролем результатов независимыми методами измерений. Лазерная абляция осуществлялась на двух установках зарубежного и отечественного производства. Первая из них включала в себя волоконный лазер IPG YPL-1/120/20 (Германия) номинальной мощности излучения 20 Вт, с длительностью импульсов 120 нс (по уровню 50% от максимума) и частотой следования 20 кГц, сфокусированного в пятно диаметром 106 мкм (по уровню 1/е в фокусе) на поверхности образца. Вторая установка была оснащена твердотельным лазером DPSSL-50S (Россия) мощностью 18 Вт, частотой следования импульсов 5-30 кГц и длительностью порядка 80 нс, сфокусированного в пятно диаметром 50 мкм, что повышает энергетику импульса в несколько раз по сравнению с первой установкой. Для тепловой диагностики использовался волоконный лазер IPG YLR-100 (Германия) с модулируемой выходной мощностью до 100 Вт и частотой модуляции до 10 кГц и охлаждаемый инфракрасный детектор VIGO PVMI-3TE-10.6 (Польша) с постоянной времени 7 нс. Независимая оценка результатов обработки осуществлялась с помощью измерения глубины абляции механическим профилометром, а также измерения электрического сопротивления аблируемого диэлектрического покрытия на металлической подложке.

Научная новизна диссертационной работы:

1. Установлено, что совмещение лазерной абляции с тепловой диагностикой, позволяет корректировать режим воздействия на основании измерений абсолютной толщины однородного

изотропного слоя и ее фактического относительного изменения в процессе обработки без непосредственного учета теплофизических характеристик материала и физических механизмов его удаления.

2. Показано, что тепловые отклики от двух различных источников нагрева зависят от разных сочетаний неизвестных теплофизических параметров, что позволяет при их комбинации исключить из расчетов все параметры, кроме толщины слоя. Таким образом, разработанная расчётная методика тепловой диагностики, дает возможность вычислять абсолютную толщину однородного изотропного слоя без определения его теплофизических характеристик и характеристик подложки.

Практическую значимость составляют следующие результаты:

1. Разработана технология бесконтактно-управляемой лазерной абляции, позволяющая осуществлять контролируемое удаление с точностью 10-15 % слоя (покрытия) с неизвестными теплофизическими характеристиками. С помощью этой технологии возможна абляция слоев толщиной до 5 мм, выполненных из различных материалов (сталь, графит, керамика);
2. Данная технология не требует никаких дополнительных измерений характеристик материала, кроме осуществляемых в процессе тепловой диагностики. Также не требуется сложное и ресурсоемкое численное моделирование физических процессов лазерной абляции;
3. Предложены технологические карты для однородного и неоднородного слоя. В случае однородного слоя разработаны методики количественного расчета режимов абляции для удаления слоя или его заданной части, а в случае неоднородного слоя имеется возможность качественно оценить протекание процесса очистки и однозначно определить полное удаление слоя.

Достоверность полученных результатов обеспечена корректным использованием общих положений фундаментальных наук, проверена по известным критериям изучаемых процессов, подтверждена экспериментальными данными и независимыми измерениями.

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на международных научных форумах и конференциях:

- 10th Quantitative Infrared Thermography International Conference, 27-30 июля, 2010, Квебек, Канада;

- EFDA JET annual meeting, июнь 2010, Сакле, Франция.

Материалы исследований неоднократно представлялись на научных семинарах кафедры «Лазерные технологии в машиностроении» МГТУ им. Н.Э. Баумана и Национальной инженерной школы Сент-Этьенна (ENISE) во Франции в период с 2008 по 2011 гг.

Публикации по теме диссертации. Основное содержание диссертации отражено в 5 научных статьях, из них 3 статьи в журналах из перечня ВАК и 2 статьи международных научно-технических конференций.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, заключения и списка литературы из 70 наименований. Диссертация изложена на 140 страницах, содержит 65 рисунков и 9 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В главе 1 изложено современное состояние технологий очистки ответственных конструкций в промышленности. Рассмотрены традиционные способы очистки: химические, электрохимические, физические – применительно к наиболее технологичной области – атомной промышленности, и более подробно – способ лазерной абляции.

В основе метода химической очистки лежит применение концентрированных или разведенных химических реагентов в контакте с загрязненной поверхностью. Удаление загрязнения происходит путем растворения поверхностного слоя и части основного материала. Преимуществом метода химической очистки является его применимость к большим по площади поверхностям, в том числе сложной геометрической формы. Главным недостатком химической очистки является образование большого количества второстепенных жидких отходов, представляющих собой продукты реакции кислоты с поверхностью.

Электрохимическая очистка (ЭХО) может быть рассмотрена как химическая очистка с применением электрического тока. Различают два способа ЭХО: помещение загрязненной детали в ванну с электролитом и обкладкой электролитическим материалом очищаемой поверхности. По сравнению с химической очисткой следует отметить более высокую скорость очистки и меньший уровень второстепенных отходов, однако, при этом невозможность удаления материалов изоляторов и ограниченность геометрии.

Под понятием физическая очистка понимается группа способов удаления загрязнения механическим или ручным воздействием. Такие способы включают в себя: ультразвуковую ванну; воздействие струей замороженных частиц CO_2; воздействие струей воды под давлением; очистка абразивом в сухой или жидкой среде; механическое воздействие

шлифованием, полированием, мытьем; деламинация поверхностного загрязнения; мытье с помощью пен и гелей. Данные виды обработки обладают каждый рядом своих преимуществ, обусловленных природой устранения загрязнения, однако все имеют в своей основе, как и предыдущие группы способов, контакт материальных частиц с поверхностью. Так, ультразвук применяется для загрязнений, имеющих слабую адгезию с подложкой, и часто применяется как дополнительный к химической или электрохимической очистке. Применение пеллет CO_2 единственный из перечисленных способов, который практически не создает вторичных отходов, но обладает низкой эффективностью в отношении глубоких загрязнений и высоким уровнем шума. Очистка методом воздействия струи воды под давлением используется для предварительной очистки, очистки инструмента и больших по площади поверхностей (стены, пол). Деламинационный метод интересен отсутствием жидких и газообразных отходов, быстротой нанесения и удаления загрязнения и возможностью очистки деталей сложных геометрических форм. Пенный метод позволяет экономить количество реагентов, одновременно уменьшая объем вторичных отходов, но зачастую требует многократного применения.

Основным преимуществом лазера относительно других методов очистки поверхности является полное отсутствие материальных частиц в качестве средства, удаляющего загрязнение. Кроме того, возможность применения лазера в обычной атмосфере на достаточно больших расстояниях и высокая степень автоматизации процесса делает такой инновационный инструмент крайне востребованным в условиях обработки в агрессивных и опасных средах. Продукты абляции находятся в твердом состоянии, что упрощает процесс их компактирования, возможно внедрение в процесс очистки автоматизации, обеспечивающей снижение риска обслуживающего персонала в агрессивных средах и при обработке опасных загрязнений, а также реализуемо использование волоконной оптики, позволяющей в ряде случаев проводить абляцию замкнутых полостей и труднодоступных объемов без их разрушения.

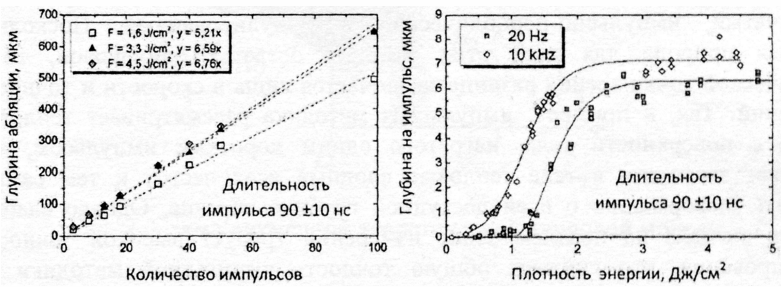

Рис. 1. Зависимости глубины лазерной абляции от количества импульсов и плотности энергии

Далее в главе 1 приводится краткий обзор физических механизмов и экспериментальных результатов по теме лазерной абляции, и подчеркивается, что в большинстве случаев эта технология носит пороговый характер эффективности относительно энергетического вклада, а также линейную зависимость от количества проходов.

Исходя из анализа, заключается, что лазерная абляция обладает рядом преимуществ по сравнению с другими методами, особенно в случаях прецизионной обработки и очистки в агрессивных средах.

Глава 2 посвящена обзору методов неразрушающей диагностики с целью их внедрения в качестве инструмента обратной связи для процесса лазерной абляции. Предварительный анализ показывает, что наибольшее соответствие требованиям бесконтактности и исследованию требуемых толщин представляет тепловая диагностика, основанная на нагреве лазерным лучом и измерении температурного отклика путем регистрации теплового излучения. Такая методика также называется фототермической.

Подробно рассматривается феномен теплового излучения, излагается теоретическая сторона вопроса, практические аспекты измерения температуры с помощью закона Планка и варианты исключения оптических характеристик поверхности для решения этой задачи. Предлагается измерение фазы теплового сигнала в процессе модулированного нагрева, как параметра, зависящего только от тепловых характеристик тела, и независимого от мощности нагрева и коэффициентов поглощения-отражения поверхности.

Далее излагаются основополагающие для тепловой диагностики понятия тепловых «волн» и теплового импеданса, а также методики, позволяющие определять тепловые характеристики тела путем анализа этих феноменов при различных условиях.

К критериям классификации условий проведения фототермических методик относится тип нагрева в зависимости от времени: импульсный, ступенчатый, импульсно-периодический и модулированный. Поскольку тепловая природа для всех этих методик остается одинаковой, то с практической точки зрения разница заключается лишь в скорости и точности измерений. Так, к примеру, импульсная методика рассматривает тепловой сигнал с поверхности тела, нагретого одним коротким импульсом, что позволяет запустить в теле тепловые «волны» всех частот и тем самым получить информацию о всей доступной глубине образца. Однако слабый уровень сигнала на позднем этапе измерений требует высокой точности детектирования, что снижает общую точность импульсной методики по сравнению с другими при прочих равных характеристиках оборудования. С другой стороны, периодический сигнал каждой частоты, используемый в

модулированных методах, позволяет устранить помехи путем более длительных измерений каждой гармоники и таким образом повышает точность получаемых результатов.

Проанализированные литературные данные показывают, что современные методы позволяют измерять теплопроводность, температуропроводность, тепловую эффузию, толщину слоя. Однако общим слабым местом всех разработанных на данный момент методик теплового контроля является то, что для определения всех характеристик слоя (теплопроводность, теплоемкость, толщина) требуется знать хотя бы одну из них заранее. То есть, измерение толщины слоя с абсолютно неизвестными тепловыми характеристиками невозможно.

Таким образом, делается вывод, что тепловая диагностика принципиально способна стать технологией контроля лазерной абляции, однако для этого требует разработки теоретических методов, дающих возможность измерять толщину слоя более независимо от тепловых параметров материала.

В **главе 3** исследуются математические модели тепловой диагностики, и проводится их глубокий параметрический анализ с целью разработки описанных выше методик.

Разработанная автором модель для одномерного теплопереноса в слое на подложке сравнивается с взятой из литературы математической моделью для такой же системы с двумерным распространением тепла, вызванным конечным размером пятна нагрева.

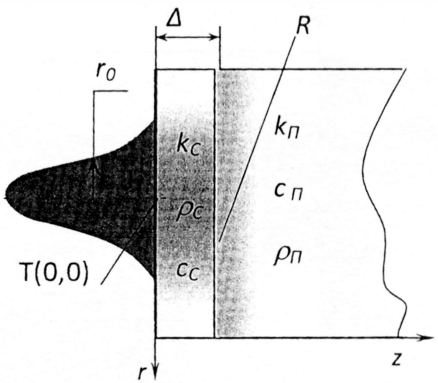

Рис. 2. Схема двумерной теоретической тепловой модели

На рис 2. представлена схема двумерной теоретической модели слоя с толщиной Δ, теплопроводностью k_C и объемной теплоемкостью $c_C\rho_C$ на

поверхности полубесконечной однородной изотропной подложки с теплопроводностью $k_П$ и объемной теплоемкостью $c_П\rho_П$ нагреваемую источником с частотой модуляции мощности f, имеющим гауссовый профиль радиуса r_0 (по уровню 1/e) на поверхности, объемным поглощением с экспоненциальным затуханием по глубине с коэффициентом α. Контакт между слоем и подложкой представлен в виде теплового сопротивления R.

Известно аналитическое решение для комплексной амплитуды температуры поверхности в центре лазерного пятна такой системы, из которого можно найти выражение теплового импеданса:

$$Z(f)=\frac{\alpha}{k_C}\int_0^\infty \frac{0.5\xi\cdot e^{-0.25\xi^2}}{\left(\frac{\xi}{r_0}\right)^2-i2\pi f\frac{c_C\rho_C}{k_C}-\alpha^2}\times$$
$$\times\left[\frac{2\alpha\cdot e^{-\kappa_1\Delta}}{\kappa_1 D}\left\{\left(e^{-\alpha\Delta}-e^{-\kappa_1\Delta}\right)\left(1+Rk_П\kappa_2\right)+\left(e^{-\kappa_1\Delta}-\frac{\kappa_1}{\alpha}e^{-\alpha\Delta}\right)\frac{k_П\kappa_2}{k_C\kappa_1}\right\}+\left(1-\frac{\alpha}{\kappa_1}\right)\right]d\xi \qquad (1)$$

где:

$$D=\left(1+e^{-2\kappa_1\Delta}\right)\frac{k_П\kappa_2}{k_C\kappa_1}+\left(1-e^{-2\kappa_1\Delta}\right)\left(1+Rk_П\kappa_2\right)$$
$$\kappa_1=\sqrt{\left(\frac{\xi}{r_0}\right)^2-i2\pi f\frac{c_C\rho_C}{k_C}},\quad \kappa_2=\sqrt{\left(\frac{\xi}{r_0}\right)^2-i2\pi f\frac{c_П\rho_П}{k_П}} \qquad (2)$$

Схематичное изображение одномерной модели приведено на рис. 3:

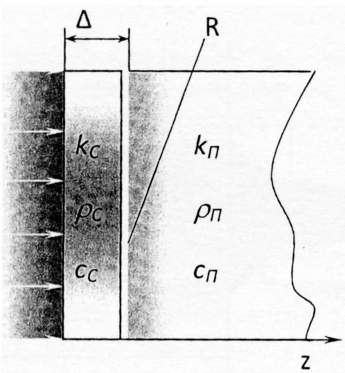

Рис. 3. Схема одномерной теоретической тепловой модели

Данная система аналогична описанной выше двумерной модели с той лишь разницей, что нагрев осуществляется равномерно распределенным поверхностным источником.

С помощью теории тепловых квадруполей находится выражение для комплексной температуры на поверхности слоя и из него выражение теплового импеданса:

$$Z(f)=\frac{1}{b_C\sqrt{i2\pi f}}\left[\frac{\tanh\left(\sqrt{i2\pi f}\,\beta_3\right)+\left(\beta_1+\beta_2\sqrt{i2\pi f}\right)}{\tanh\left(\sqrt{i2\pi f}\,\beta_3\right)\cdot\left(\beta_1+\beta_2\sqrt{i2\pi f}\right)+1}\right] \tag{3}$$

где $\beta_1=\frac{b_C}{b_П}$, $\beta_2=R\cdot b_C$ и $\beta_3=\frac{C_C\rho_C\Delta}{b_C}$, b_C и $b_П$ – тепловые эффузии слоя и подложки соответственно.

Как видно одномерная модель, являющая частным случаем двумерной модели, представлена более простым аналитическим выражением (3), в котором можно выделить определенные группы параметров β_1-β_3. В то время, как двумерная модель (1)-(2) не позволяет так легко вычленить подобные зависимости. Поэтому далее приводится совместный анализ этих двух моделей.

С помощью коэффициентов чувствительности осуществляется анализ теплового импеданса, рассчитываемого при помощи выражений (1)-(3). Результатом такого анализа является определение методики измерения абсолютной толщины однородного изотопного слоя без необходимости знания каких-либо его тепловых параметров. Данная методика основана на применении двух различных типов нагрева, которые дают тепловые отклики, зависящие от разных групп параметров и их комбинация позволяет исключить все неизвестные параметры из расчетов. Схематичное изображение методики представлено на рис. 4:

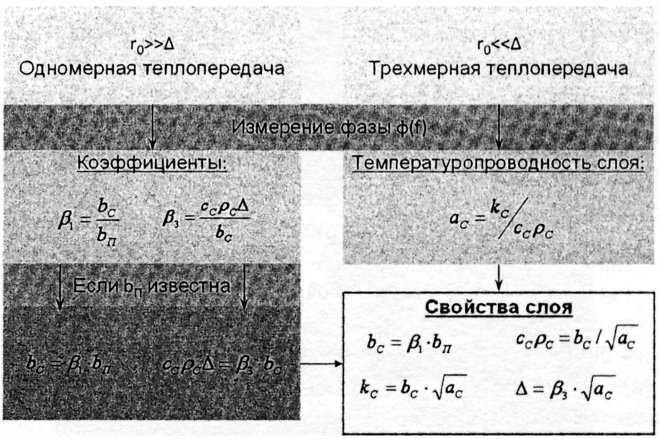

Рис. 4. Алгоритм определения параметров слоя

Совместно с независимостью фазы теплового импеданса от оптических характеристик, это означает, что предлагаемая методика позволяет бесконтактно и дистанционно измерять абсолютную толщину абсолютно неизвестного однородного слоя на неизвестной подложке. Однако, применимость данной методики ограничена возможностью фокусировки лазера, и составляет величины толщин слоев от нескольких десятков микрометров до нескольких миллиметров.

Для измерения относительной толщины слоя также выполнен анализ моделей (1)-(3), один из примеров которого приведен на рис. 5.

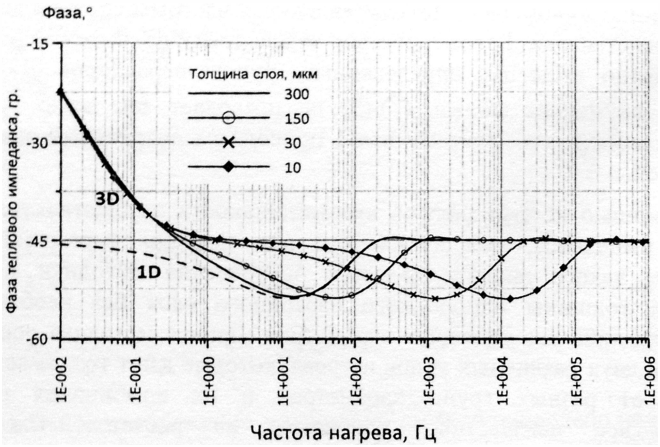

Рис. 5. Фазо-частотная диаграмма для различных толщин слоя тантала на подложке из нержавеющей стали. Радиус лазерного пучка 10 мм

Как видно, смещение фазочастотной характеристики (ФЧХ) происходит пропорционально толщине слоя. При этом форма кривой в области одномерной теплопередачи (сплошная линия, совпадающая с пунктиром) остается одинаковой для всех толщин. Из выражения (3) можно вывести, что смещение ФЧХ пропорционально квадрату толщины слоя. Это обстоятельство позволяет рассчитывать по смещению ФЧХ как изменилась толщина слоя с неизвестными параметрами относительно начального значения, то есть какая часть слоя была удалена и таким образом дает возможность скорректировать режим лазерной абляции чтобы удалить весь слой. Данная методика, в отличие от предыдущей, не ограничивает теоретически толщину слоя.

В любом случае полное удаление слоя возможно определить с помощью тепловой диагностики, когда ФЧХ представлена в виде линии со значением фазы -45°.

В **главе 4** обосновывается выбор экспериментального оборудования, описанного в разделе методы исследования. Основными критериями для выбора узлов установки лазерной абляции является получение необходимой плотности мощности 10^7-10^8 Вт/см^2, а для установки тепловой диагностики – пространственное и временное разрешение, максимальная температура нагрева и обеспечение поверхностного характера нагрева.

Приводится краткий обзор существующих источников нагрева и детекторов теплового излучения.

Общий вид установок приведен на рис. 6:

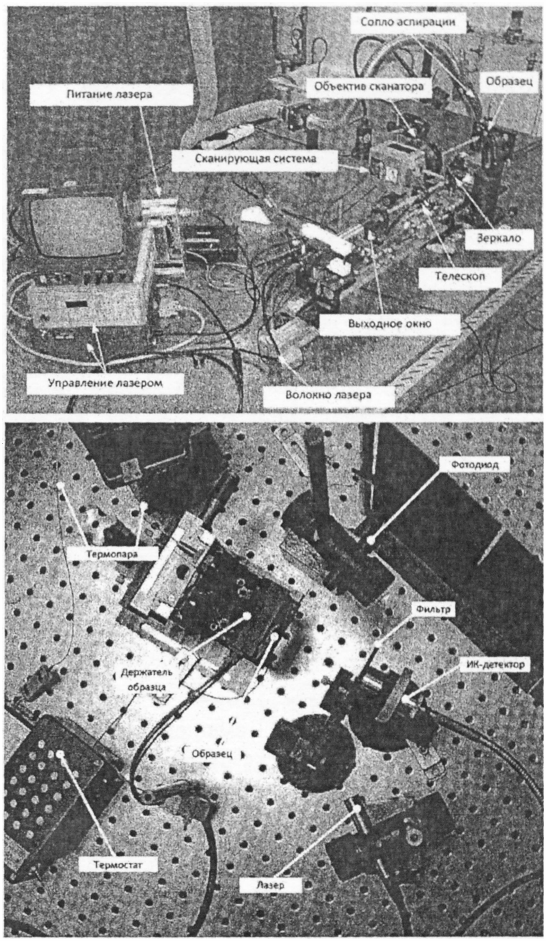

Рис. 6. Общий вид установок лазерной абляции (вверху) и тепловой диагностики (внизу).

Глава 5 посвящена экспериментальным результатам, основанным на методиках, разработанных в главе 3 и реализуемых на оборудовании главы 4.

Предварительно осуществляется проверка работоспособности установки на однородном образце.

Далее исследуется бесконтактно-управляемая абляция на образцах из листовой стали, образцах, имитирующих поверхность камеры термоядерного реактора, окисленной поверхности и лопатки турбины реактивного двигателя. Во всех случаях подтверждается возможность определить полное удаление слоя с помощью тепловой диагностики и практически во всех случаях отследить динамику лазерной абляции. Когда обрабатываемый слой однородный, можно также количественно рассчитать необходимое количество проходов для полного его удаления. На рис. 7 приведен пример тепловой диагностики лазерной абляции листовой стали:

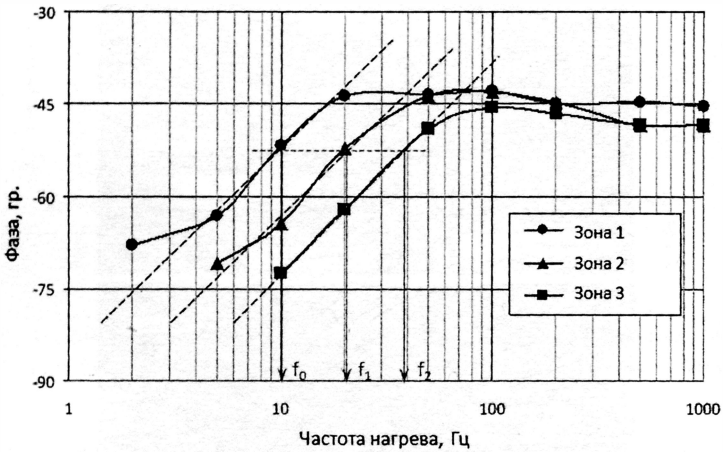

Рис. 7. ФЧХ аблированных зон листа стали:
1 – 0 проходов, 2 – 20 проходов, 3 – 30 проходов

Как было отмечено в главе 3, смещение ФЧХ пропорционально квадрату толщины, что дает возможность по разнице между толщинами для разного количества проходов экстраполировать его до момента полного удаления слоя.

Особое внимание уделяется очистке термобарьерного покрытия лопатки турбины реактивного двигателя. Применение лазера в этом случае обусловлено необходимостью прецизионной обработки. Для изготовления охлаждающих отверстий диаметром 1 мм, повышающих надежность работы детали, применяется технология электроэрозионной обработки, которая, однако, не способна производиться на диэлектрических материалах, коим

является керамическое термобарьерное покрытие. Нанесение покрытия после обработки может изменить аэродинамику отверстий. Поэтому оптимальным вариантном является нанесение покрытия и подготовка зон электроэрозионной обработки способом очистки, не зависящим от электрических характеристик материала. В данном случае лазер практически не имеет альтернативы.

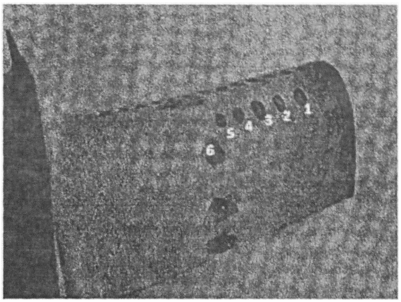

Рис. 8. Внешний вид зон (1-5) лазерной абляции лопатки турбины реактивного двигателя

В данном случае применение бесконтактной диагностики не является необходимым, однако позволяет отработать в целом разрабатываемую технологию. Тем не менее, было показано, что в процессе очистки может возникнуть ситуация, когда визуально поверхность кажется очищенной, а тепловая диагностика и независимые измерения электрического сопротивления говорят о наличии неудаленного слоя. Таким образом, подтверждается правильность выбора способа контроля лазерной абляции.

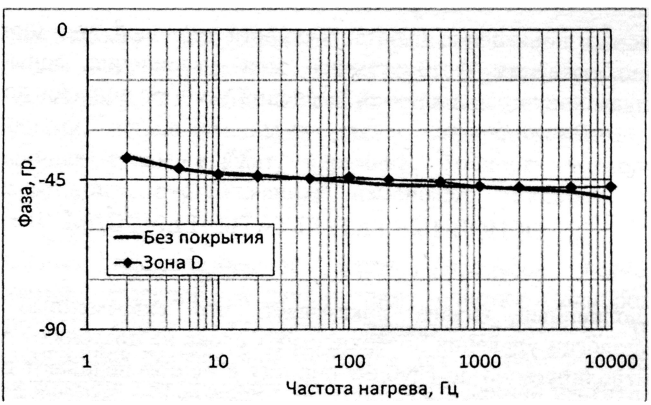

Рис. 9. ФЧХ очищенной зоны и обратной стороны подложки

Рис. 9 представляет сравнение тепловой диагностики конечного состояния зоны лазерной абляции керамического покрытия и обратной поверхности подложки без покрытия. Совпадение ФЧХ свидетельствует об одинаковых характеристиках поверхностей, а, следовательно, о полном удалении слоя.

Глава 6 обобщает результаты, полученные в теоретической и экспериментальной частях диссертации и на основе их синтеза формулирует последовательность операций технологии бесконтактно-управляемой лазерной абляции для двух типов обрабатываемых поверхностей: с однородным слоем и неоднородным слоем. Представлены технологические карты соответствующих процессов.

Также обсуждается область применения разработанной технологии и ее возможности. Для разработанной экспериментальной установки возможна обработка слоев практически из любого материала с толщиной от микрометров до миллиметров, на расстоянии порядка десяти сантиметров и поверхностным разрешением 5 мм.

С целью применения данной технологии в промышленных масштабах отмечается, что целесообразно перейти от точечной тепловой диагностики к поверхностной (распределенной) с помощью инфракрасных камер, основанных на матрице фотодетекторов. Таким образом, это позволит не только корректировать режим лазерной абляции сразу на некоторой обрабатываемой площади, но и учитывать морфологию реальной поверхности и задавать программу очистки с ее учетом. Кроме того, как уже отмечалось, для повышения производительности собственно процесса абляции возможно мультиплицирование воздействия нескольких лазерных источников в одной зоне обработки.

Наконец, повышение чувствительности тепловой диагностики за счет лучшего охлаждения фотодетектора или увеличения зоны измерений позволит увеличить расстояние применения всей технологии до нескольких метров и, возможно, более.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Выполненный анализ показывает, что современные способы и технологии удаления поверхностных слоев не позволяют осуществлять контролируемую по глубине очистку и не обеспечивают необходимую точность и надежность обработки высокотехнологичных промышленных изделий. Предложенное в диссертационной работе совмещение процесса лазерной абляции с тепловой диагностикой, основанной также на излучении лазера, дает возможность создания

эффективного способа бесконтактно-управляемой лазерной очистки слоистых материалов толщиной до 5 мм.

2. Установлено, что разработанный способ определения только фактического изменения толщины слоя в процессе лазерной абляции с помощью тепловой диагностики позволяет исключить ресурсоемкое математическое моделирование физических механизмов удаления материала и требуемое для этого определение теплофизических, оптических и иных характеристик слоя и подложки.

3. Разработаны теоретические методики теплового контроля, позволяющие измерять абсолютную и относительную толщину однородного изотропного слоя без непосредственного измерения свойств материала (оптических и теплофизических). Установлено, что измерения абсолютной толщины слоя возможны для покрытий не тоньше 50 микрон, в то время как отслеживание относительной толщины слоя не имеет принципиальных теоретических ограничений.

4. Предложенная комбинация двух различных режимов нагрева слоя (сфокусированным и расфокусированным пятном) дает тепловые отклики, зависящие от разных сочетаний параметров, что позволяет исключить неизвестные тепловые параметры из расчетов. Соответственно, с измерением только фазы теплового импеданса отпадает также необходимость и в определении оптических характеристик поверхности.

5. Предложены варианты экспериментального оборудования для реализации процесса бесконтактно-управляемой лазерной абляции с поверхностным разрешением 20 мм^2, на расстоянии порядка 10 см и возможностью применения на слоях толщиной до 5 мм;

6. Экспериментально подтверждена применимость разработанных методов для очистки различных материалов. Толщина исследованных слоев составляла от единиц до нескольких сотен микрометров. Материалами, использованными для изготовления образцов, были нержавеющая сталь, графит, керамика. Точность технологии по количественному отслеживанию изменения толщины составила порядка 10-15 %.

7. Предложены технологические карты процесса бесконтактно-управляемой лазерной абляции для очистки однородных и неоднородных слоев с толщиной порядка 10^{-3}-10^{-6} м. В случае однородного слоя разработаны методики для количественного расчета режимов абляции для удаления слоя или его заданной части, а в случае неоднородного слоя имеется возможность качественно оценить протекание процесса очистки и однозначно определить полное удаление слоя.

РАБОТЫ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Мелюков Д.В., Григорьянц А.Г. Технология лазерной абляции для подготовки сверления охлаждающих каналов лопаток турбин // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2012. №5. С.55-59.
2. Мелюков Д.В., Григорьянц А.Г. Технология управляемой лазерной абляции пленок // Технология машиностроения. 2011. №11. С. 31-33.
3. Development of laser lock-in thermography for plasma facing component surface characterization / X. Courtois [et al.] // Fusion Engineering and Design. 2011. Vol.86, № 9-11. P. 1714-1718.
4. Phase lock-in laser active pyrometry for surface layer characterization of Tokamaks walls / D. Melyukov [et al.] // Proc. of the 10th Quantitative Infrared Thermography International Conference. Québec city (Canada), 2010. P. 941-945.
5. Temperature measurement at large distance of plasma-facing surfaces in fusion reactor by active pyrometry / D. Melyukov [et al.] // Proc. of the 10th Quantitative Infrared Thermography International Conference. Québec city (Canada), 2010. P.117-123.