

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ**

В.П. Вейко, В.Н. Смирнов, А.М. Чирков, Е.А. Шахно

ЛАЗЕРНАЯ ОЧИСТКА В МАШИНОСТРОЕНИИ И ПРИБОРОСТРОЕНИИ

Учебное пособие



**Санкт– Петербург
2013**

Вейко В.П., Смирнов В.Н., Чирков А.М., Шахно Е.А. Лазерная очистка в машиностроении и приборостроении. – СПб: НИУ ИТМО, 2013. – 103 с.

Рассматривается новая область применения лазеров: очистка поверхности, которая находит все более широкое применение в различных областях приложений – от микроэлектроники, приборостроения и машиностроения до науки, искусства и медицины. Кратко обсуждаются свойства лазерного пучка, как универсального технологического инструмента для обработки поверхности. Обсуждаются физические механизмы лазерной очистки в различных условиях воздействия – от испарительного до ударного. Указаны основные технологические преимущества лазерной очистки поверхности по сравнению с традиционными способами очистки: механическими, химическими, электрохимическими, ультразвуковыми. Более подробно рассмотрено применение процессов лазерной очистки в различных отраслях промышленности и для дезактивации радиоактивно-загрязненных поверхностей. Обсуждаются особенности лазерного технологического оборудования для очистки поверхности. Сформулирована концепция комбинированной лазерной очистки и обработки поверхности. Уделено внимание технико-экономическим вопросам лазерной очистки. Учебное пособие предназначено для бакалавров и магистров направлений 200500 «Лазерная техника и лазерные технологии, 200400 «Оптотехника», а также для студентов специальностей 200201 «Лазерная техника и лазерные технологии». Рекомендовано к печати Ученым Советом инженерно–физического факультета 11.12.12, протокол №12.

Рекомендовано УМО по образованию в области приборостроения и оптоэлектроники в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлениям подготовки 200400 – Оптоэлектроника, 200500 – Лазерная техника и лазерные технологии и специальности 200201 – Лазерная техника и лазерные технологии



В 2009 году Университет стал победителем многоэтапного конкурса, в результате которого определены 12 ведущих университетов России, которым присвоена категория «Национальный исследовательский университет». Министерством образования и науки Российской Федерации была утверждена программа его развития на 2009–2018 годы. В 2011 году Университет получил наименование «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики»

© Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет
информационных технологий, механики и оптики, 2012
©В.П. Вейко, В.Н. Смирнов, А.М. Чирков, Е.А. Шахно, 2012

Содержание

Предисловие	5
Введение	9
1. Анализ существующих технологий очистки поверхности	11
– химическое обезжиривание	12
– электрохимическое обезжиривание	13
– механическая обработка поверхности	13
– ультразвуковая очистка поверхности	15
– технологическая и эксплуатационная наследственность	15
поверхностного слоя	
2. Лазерная очистка поверхности	20
– Основные свойства лазерного пучка применительно	20
к обработке поверхности	
– Физические основы лазерной очистки поверхности.....	23
– Испарительные механизмы лазерной очистки.....	24
– Ударно-механическая лазерная очистка.....	27
– Влажная лазерная очистка	31
3. Основные области применения лазерной очистки	33
– Лазерная очистка в промышленности.....	33
– Лазерная дезактивация радиационно-загрязненных	41
металлических поверхностей	
– Перспективы применения лазерной очистки.....	49
для сохранения памятников культурно-исторического наследия	
– Лазерное технологическое оборудование для очистки.....	53
и дезактивации поверхности	

4. Комбинированные методы лазерной очистки, обработки	
и контроля степени очистки поверхности	61
– Моно- и гибридные технологии обработки материалов.....	61
– Гибридные технологии лазерной очистки.....	62
– Комплексная лазерная обработка поверхности	65
– Лазерно-плазменные технологии обработки поверхности.....	67
– Лазерно-плазменное рафинирование поверхностного слоя.....	68
– Лазерно-плазменное «залечивание» поверхностного слоя	69
– Лазерно-плазменная полировка поверхностей	70
– Контроль процессов лазерной очистки методом лазерно-искровой	74
эмиссионной спектроскопии	
 5. Техничко-экономические вопросы лазерной очистки поверхности	80
– Роботизация и автоматизация лазерной очистки поверхности.....	80
– Производительность лазерной очистки поверхности	83
– Оценочное значение себестоимости лазерно-плазменной	85
очистки поверхности лопаток газоперекачивающих станций	
 Заключение.....	88
Литература	90

ПРЕДИСЛОВИЕ

Слово ЛАЗЕР является транскрипцией английской аббревиатуры LASER., что отражает физическую сущность процесса генерации лазерного излучения **L**ight **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation - усиление света с помощью вынужденного излучения [1].

Таким образом, лазерное излучение – это разновидность электромагнитного излучения оптического диапазона, которое, обладая рядом уникальных физических свойств, получило широкое применение в различных областях науки и техники. На рис. 1 показана примерная полоса длин волн электромагнитных колебаний различных видов лазеров, в которой генерируется лазерное излучение [2].

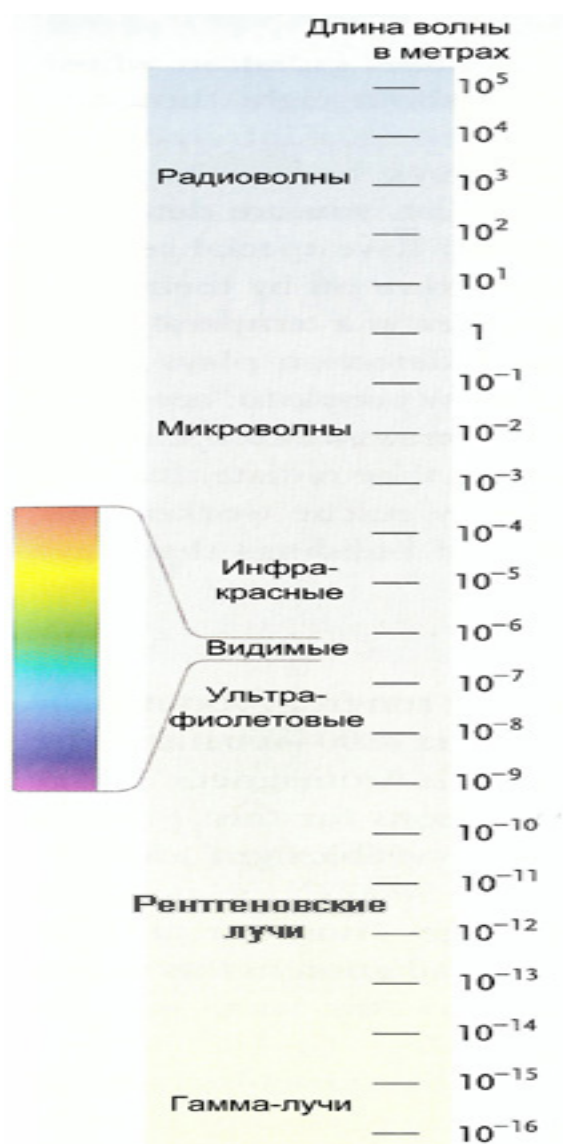


Рис. 1. Примерная полоса длин волн электромагнитных колебаний лазерного излучения

Уникальные физические свойства лазерного излучения – высокая монохроматичность и когерентность, низкая расходимость излучения и его

высокие удельные энергетические характеристики позволили создать перспективный вид высококонцентрированного источника энергии, который нашел широкое применение в различных отраслях науки и техники, промышленности и, в частности, в машиностроении [3] и приборостроении [4].

Ведущая роль в становлении и развитии лазеров принадлежит российским ученым и инженерам. Академики Н.Г. Басов и А.М. Прохоров были удостоены Нобелевской премии за выдающиеся работы по квантовой электронике, послужившие основой создания лазеров [5].

Использование волновых свойств и энергии электромагнитных волн в форме лазерных пучков революционным образом обогатило возможности человечества. Оптическая связь и лучевая обработка материалов, бесконтактная диагностика и лечение заболеваний, учет продукции и экологический мониторинг, контроль дорожного движения и цветная печать, звукозапись, навигация, световые шоу, стимуляция роста растений – этот далеко не полный перечень показывает, что диапазон эффективного применения лазеров чрезвычайно широк [6].

Лазерная техника и лазерные технологии успешно используются в микроэлектронике, автомобильной, аэрокосмической, электротехнической, атомной, судостроительной, станкоинструментальной, сельскохозяйственной, медицинской и многих других отраслях промышленности.

Высокая концентрация энергии лазерного пучка в локальном объеме пространства, высокоскоростное управление изменением энергии во времени и ее быстрое перемещение в пространстве открыли принципиально новые возможности в сфере обработки материалов.

Сущность обработки материалов концентрированными и высококонцентрированными потоками энергии заключается в преобразовании, с определенным коэффициентом полезного действия, энергии источника в тепловую энергию, которая производит изменения структурно-фазового состояния поверхностного слоя или агрегатного состояния вещества. В отличие от концентрированных источников энергии (электрическая дуга, плазменная обработка, светолучевая и др.), высококонцентрированные источники энергии (лазерные, электронно-лучевые) обладают значительно большими потенциальными

технологическими возможностями и более высокими технико-экономическими показателями ведения технологических процессов.

Современные технологии «горячей» обработки материалов все больше дополняют, а иногда и вытесняют классические методы «холодной» обработки в машиностроении – лазерное резка и фрезерование, лазерное полирование, лазерная очистка поверхности, лазерная токарная обработка, лазерная резка вместо вырубки, высечки и т. д.

Технологии лазерной термообработки, сварки, резки, пайки, наплавки, модификации, легирования, маркировки, гравировки, прошивки отверстий, лазерно-плазменной, химико-термической обработки, гибридные лазерные технологии находят все большее применение в различных видах производств машиностроительных предприятий – заготовительном, инструментальном, сварочном, термическом, гальваническом, металлургическом, механообрабатывающем, ремонтном и др..

Высокая технико-экономическая эффективность применения лазеров при обработке различных материалов обусловлена не только их преимуществами как высококонцентрированных источников энергии, но и их гибкостью и универсальностью как технологических инструментов. Несомненным достоинством лазеров является возможность одним источником обслуживать несколько рабочих мест и в течение нескольких секунд переходить с обработки одного вида продукции на другой, что резко сокращает межоперационное время, повышает коэффициент загрузки оборудования и является важным фактором экономической эффективности работы промышленного оборудования. При этом один и тот же лазер, в принципе, может производить различные технологические операции – сварку, резку, термообработку, наплавку, легирование и т. д.

Производство лазерной техники, синтезируя достижения электроники, оптики, точной механики, компьютерной техники и робототехники стало одной из ведущих отраслей промышленности, определяющей технологический прогресс развития цивилизации. Степень насыщения лазерным оборудованием в наше время является одним из важнейших критериев научного и технического развития для всех индустриально развитых стран мира [6].

Необходимо отметить, что в технически развитых странах мирового сообщества лазерные технологии уже вошли во многие отраслевые стандарты, что делает принципиально невозможным участие в международных кооперациях промышленных предприятий, не оснащенных лазерным оборудованием.

В настоящее время в промышленности и, в частности, в машиностроении на смену используемым газовым CO_2 -лазерам с длиной волны излучения $\lambda = 10,6$ мкм и твердотельным лазерам на алюмо-иттриевом гранате YAG : Nd с длиной волны излучения $\lambda = 1,06$ мкм приходят волоконные и дисковые лазеры, имеющие более высокую технико-экономическую эффективность.

Лазерные технологические установки с длиной волны $\lambda = 1,06$ мкм имеют ряд определенных преимуществ перед CO_2 -лазерами. Меньшая длина волны лазерного излучения определяет более высокое значение коэффициента поглощения обрабатываемой поверхностью материала. Использование оптоволоконной оптики открывает широкие технологические возможности, особенно при использовании роботов. Меньшая длина волны лазерного излучения твердотельных лазеров позволяет производить более локальную и прецизионную обработку материалов.

Авторы данного издания рассматривают вопросы применения лазерного технологического оборудования в качестве дополнения к “классическим” технологиям очистки поверхности.

В пособии рассматриваются не все лазерные технологии очистки поверхности, а в основном те, которые находят в настоящее время наиболее широкое применение в различных отраслях промышленности.

Целью настоящего пособия является рассмотрение физико-технологических основ и технико-экономической эффективности применения лазерных и гибридных лазерных технологий для очистки и сопутствующей обработки поверхности. Инженер-технолог, экономист, преподаватель, студент, изучивший данное пособие смогут определить, какие из рассмотренных лазерных технологий могут быть эффективно реализованы в условиях конкретного промышленного производства для решения задач повышения производительности труда, снижения затрат на

подготовку производства, повышения качества выпускаемой продукции и снижения себестоимости ее изготовления.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из основных показателей качества машин является их надежность, которая в значительной мере определяется эксплуатационными свойствами деталей и соединений: износостойкостью, усталостной прочностью, коррозионной стойкостью, герметичностью соединений, прочностью посадок и др. Все эти эксплуатационные свойства зависят от материала деталей, точности размеров и качества их рабочих поверхностей. Как правило, все разрушения деталей начинаются с поверхности. Таким образом, техническое решение проблемы повышения качества машин и приборов в значительной мере обусловлено возможностью технологического обеспечения качества поверхностного слоя деталей, которое включает в себя как геометрические характеристики, так и физико-химические свойства [7].

Наружный слой детали, имеющий макро- и микроотклонения от идеальной геометрической формы и измененные физико-химические свойства по сравнению со свойствами основного материала, называют поверхностным слоем. Он формируется при изготовлении и эксплуатации детали и по глубине может составлять от десятых долей микрометра до нескольких миллиметров [7].

Очистка поверхности является одной из базовых технологий во многих отраслях промышленности. Для некоторых видов производств – сварочного, лакокрасочного, гальванического – очистка поверхности является актуальнейшим вопросом, так как высокое качество очистки поверхности гарантирует высокий ресурс и надежность работы различных изделий.

Очистка в общем виде представляет собой операцию удаления поверхностных слоев, образованных какими-либо загрязнениями или покрытиями, иногда даже включая основной слой материала.

Необходимо отметить, что очистка поверхности заключается не только в удалении органических и неорганических загрязнений с поверхности и нанесенных ранее покрытий, потерявших свои служебные свойства в процессе эксплуатации,

но и, в более широком смысле, в решении вопросов технологической и эксплуатационной наследственности поверхностного слоя, которая может сопровождаться сопутствующими эффектами, а именно:

- улучшением трибологических свойств поверхности (R-Profil, W-Profil, P-Profil поверхности, стабилизации коэффициента трения и т.д.),
- активацией поверхности,
- перераспределением остаточных поверхностных напряжений,
- и в результате всего вышеперечисленного, изменением механических, коррозионных, физико-химических и др. свойств поверхности.

В настоящее время имеется достаточно много традиционных методов очистки поверхности: механических, ультразвуковых, химических, электрохимических и других, успешно используемых в промышленности.

В процессе своего эволюционного развития и совершенствования, традиционные технологии очистки поверхности подошли к потенциальному технологическому пределу и не в полной мере удовлетворяют все более возрастающим требованиям промышленности по технологическим, технико-экономическим, экологическим показателям, а также возможности эффективного решения вновь возникающих в промышленности задач.

Как известно, пучок лазера является универсальным технологическим инструментом, обладающим уникально высокими удельными энергетическими характеристиками для обработки материалов. Обеспечивая плотности мощности в зоне воздействия на поверхность металла более чем 10^8 Вт/см² излучение лазера открывает возможность испарения любых металлов при длительности воздействия наносекунды и менее [8]. При столь малой длительности энергетического воздействия зона термического влияния пренебрежимо мала и выгорания химических элементов на вновь образованной поверхности практически не происходит.

Высокая производительность лазерной очистки поверхности, достигающая нескольких квадратных метров в час, более высокая экологическая безопасность, отсутствие расходных материалов, высокая технологическая воспроизводимость процесса, а также возможность комплексно решать проблему очистки поверхности,

удаляя одновременно как органические, так и неорганические загрязнения, и решая вопросы технологической наследственности поверхностного слоя, открывает широкие потенциальные возможности внедрения данной технологии в различных отраслях промышленности.

1. АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЙ ОЧИСТКИ ПОВЕРХНОСТИ

В процессе производства и эксплуатации детали машин и механизмов подвергаются металлургическим, механическим, химическим, термическим и радиационным воздействиям, которые приводят к значительным изменениям в поверхностном слое. В результате технологических процессов сварки, прокатки, волочения, кузнечно-прессовой обработки, точения, фрезерования, шлифования и других видов механической обработки, а также в процессе эксплуатации на поверхности образуются различного рода органические и неорганические загрязнения – окисные пленки, ржавчина, окалина, остатки смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ), масляные пятна и т.д. Все это оказывает неблагоприятное влияние на механические, трибологические и другие эксплуатационные характеристики поверхности и поверхностного слоя, ухудшая механические характеристики, уменьшая стойкость против коррозии, снижая мало- и многоцикловую усталость и прочие характеристики деталей машин и механизмов, а также изменяя широкий круг их физико-химических свойств – оптических, теплофизических, гидромеханических и др. [9].

В случае если на поверхность детали должны наноситься покрытия: гальванические, лакокрасочные, защитно-декоративные, газотермические, неудовлетворительное состояние поверхности приводит к резкому уменьшению адгезионного взаимодействия нанесенного покрытия с поверхностью (подложкой) и его отслаиванию в процессе эксплуатации [10].

Традиционно дефекты поверхности и поверхностного слоя металла, органические и неорганические загрязнения удаляются механической, ультразвуковой, химической и электрохимической обработкой и другими

методами. К ним относятся шлифование, полирование, крацевание, струйно-абразивная обработка, обезжиривание, травление, активирование.

Химическое обезжиривание

Органические загрязнения, находящиеся на поверхности, могут не только уменьшать адгезионное взаимодействие наносимого покрытия с поверхностью, но и уменьшать смачивание поверхности при нанесении лакокрасочного покрытия, способствовать подпленочной коррозии, приводить к возникновению дефектов в наносимом покрытии.

Для очистки поверхности от загрязняющих органических веществ (хлорированные и сульфированные масла, жирные кислоты и их соли, углеродная сажа, токсичные, гидравлические и др.) используют метод обезжиривания. Под обезжириванием понимают процесс удаления с поверхности органических загрязнений.

Удаление основывается на различных физико-химических процессах, происходящих в зоне обработки: растворение, вытеснение, травление и др.

Химические методы очистки поверхности от загрязнений органического характера имеют следующие недостатки:

1. Низкая производительность.
2. Процесс является экологически неблагоприятным.
3. Требуется расходные материалы.
4. Процесс не позволяет удалять загрязнения неорганического характера.
5. Процесс не позволяет удалять дефекты поверхностного слоя.

Электрохимическое обезжиривание

Электрохимическое обезжиривание целесообразно применять для снятия с поверхности металла небольшого слоя жира. Обычно этому процессу предшествует химическое обезжиривание, которое удаляет основную массу загрязнений. По сравнению с химическим, электрохимическое обезжиривание дает более качественную очистку поверхности металла.

Механическая обработка поверхности

Механическая обработка поверхности деталей предназначена для очистки поверхности от окисных пленок, окалины, ржавчины, поверхностных дефектов, неорганических загрязнений (аэрозоли, металлической пыли и т.д).

Основными способами механической обработки поверхности являются шлифование, полирование, крацевание, виброобработка, струйная абразивная и гидроабразивная обработка.

Шлифование

Недостатком данной технологической операции является то, что она сама может вносить в поверхностный слой дефекты и микродефекты – прижоги, риски, микротрещины, в которых могут накапливаться остатки СОЖ.

Если поверхность имеет сложную 3D геометрию поверхности, то шлифование практически трудно реализовать. Шлифовать мягкие металлы, стали и сплавы затруднительно. Например, удаление поверхностных дефектов в нержавеющей стали проблематично.

Полирование

Полирование поверхности, имеющей сложную геометрическую форму практически производят в ручную. После полирования в микропорах, микротрещинах, микрорисках поверхности могут оставаться (после обезжиривания) остатки полировочной пасты, которые снижают эксплуатационные характеристики детали.

Крацевание

Для матирования поверхностей деталей, очистки их от небольшого слоя окалины, загрязнений, грата, травильного шлама используют крацевание. Крацевание проводят с помощью проволочных или волосяных щеток. Крацевание поверхности, у которой R_a лежит в диапазоне 3,2...8,0, приводит к уменьшению шероховатости поверхности. Если R_a ниже указанных значений, то крацевание может привести к ухудшению качества поверхности.

Крацевание не гарантирует высококачественной очистки поверхности от загрязнений и не устраняет дефекты поверхностного слоя. Операцию крацевания трудно механизировать, и она выполняется на станках вручную.

Струйная абразивная и гидроабразивная обработка

Струйную абразивную и гидроабразивную обработку применяют обычно для удаления с поверхности деталей толстого слоя термической окалины, ржавчины, грата. Абразивным материалом служит кварцевый или металлический песок, стальная дробь, корунд. Ударяясь о поверхность металла, частицы абразива сбивают прочно приставшие загрязнения, придавая ей матовость и своеобразно развитый микрорельеф.

Подбирая абразив определенной твердости и зернистости, состав рабочей жидкости и режим обработки, можно не только очистить поверхность металла от механических и химических загрязнений, но и достичь эффективного сглаживания поверхности.

Основными недостатками струйной абразивной и гидроабразивной обработки являются:

1. Выделение абразивной пыли при абразивной обработке, что требует изготовления или приобретения соответствующего оборудования.
2. Попадание абразивной пыли или гидроабразивной жидкости в микропоры, микротрещины поверхности, что ухудшает эксплуатационные свойства поверхности.
3. Утилизация гидроабразивной жидкости.

Дополнительно можно выделить следующие недостатки абразивоструйной обработки:

1. Необходимость демонтажа части оборудования, которое подвергается очистке, например лопаток турбин.
2. Не на все очищаемые поверхности абразив действует благоприятно.
3. При пескоструйной очистке части оборудования может происходить разгерметизация изделия, что является недопустимым.

4. Поверхность металла после пескоструйной очистки имеет свойство быстро окисляться и насыщаться влагой, так что последующая операция окраски должна выполняться через непродолжительное время (не более 4 часов).

5. Значительные затраты на утилизацию и очистку рабочего материала, расход которого очень значителен.

6. Высокие энергетические затраты абразивной очистки, достигающие до 100 кВт и выше.

Ультразвуковая очистка – способ очистки поверхности твёрдых тел, при котором в моющий раствор вводятся ультразвуковые колебания. Введение УЗ позволяет не только ускорить процесс очистки, но и получить высокую степень чистоты поверхности, а также заменить ручной труд, исключить пожароопасные и токсичные растворители, [11]. Ультразвуковая очистка применяется в машиностроительной, металлургической, электронной промышленности, в полупроводниковой технике и в приборостроении для очистки прецизионных деталей точных приборов, часов и ювелирных изделий, интегральных схем, хирургических инструментов, металлокерамических фильтров, металлургического проката и др.

Технологическая и эксплуатационная наследственность поверхностного слоя

Силовые, температурные и радиационные воздействия на поверхность детали при изготовлении и эксплуатации приводят к изменению физических свойств материала в поверхностном слое. Поверхность детали по сравнению с внутренним строением материала имеет ряд особенностей. Атомы поверхности имеют односторонние связи, поэтому они обладают нестабильным состоянием. Поверхность детали обладает повышенной химической активностью и адсорбирует атомы элементов окружающей среды как при обработке, так и при эксплуатации [10].

Все это влечет изменение физико-химического состояния поверхностного слоя материала детали, которое может характеризоваться упрочнением, остаточными напряжениями, структурно-фазовым состоянием, химическим составом и изменением микрогеометрии поверхности.

Непрерывный процесс совершенствования и создания новых приборов и машин зачастую ставит задачу повышения качества поверхностного слоя деталей. Эта задача может решаться за счет использования различных способов очистки, совершенствования существующих или разработки новых технологических методов.

Как известно, ресурс работы деталей машин и механизмов во многом зависит от качества поверхностного слоя.

Поверхностный слой любой стали всегда отличается от основного материала. Условия предшествующей обработки (металлургической, термической, механической, химической и др.), особенности воздействия инструмента, окружающей среды определенным образом фиксируются в поверхностном слое.

Физико-химические, механические свойства поверхностного слоя, его дефектность и остаточные поверхностные напряжения могут значительно отличаться от материала основы. Качество поверхности и поверхностного слоя металлов оценивается многими показателями: загрязнения поверхности органическими и неорганическими примесями, наличием ржавчины, окалины, шероховатостью, твердостью, наличием дефектов в поверхностном слое (поры, раковины, микротрещины, риски, неметаллические примеси и т.д.), а также микрогеометрией (шероховатостью) поверхности. При этом каждый из показателей качества поверхности имеет свою технологическую историю; одни возникают в литейном производстве, другие в прокатном, волочильном, кузнечно-прессовом, механическом, сварочном, гальваническом. Таким образом, появляется понятие о технологической наследственности, [12].

Технологическим наследованием называется явление переноса свойств объектов от предшествующих технологических операций к последующим. Эти свойства могут быть как полезными, так и вредными. Сохранение этих свойств в процессе технологических переходов называют технологической наследственностью. Аналогично вводится понятие эксплуатационной наследственности.

Параметрами технологического наследования являются конструктивные формы заготовок и деталей, погрешности технологических баз, погрешности

геометрических отклонений размеров, физико-химические, механические свойства, дефектность и химический состав поверхностных слоев и др.

Носители информации активно участвуют в технологическом процессе, проходя через различные «барьеры» либо задерживаясь на них частично или полностью. Самыми существенными барьерами являются металлургические и термические. В ходе прохождения металлургических барьеров такие дефекты как микротрещины, поры, раковины, риски, расслоения и др. могут либо развиваться, либо «залечиваться». Во всех этих или аналогичных случаях возникновение, изменение, ликвидация параметров характеризуется наследственной информацией.

Процессом технологического наследования можно управлять, с тем, чтобы свойства, положительно влияющие на ресурс работы и надежность, сохранять в течение всех технологических переходов, а свойства, влияющие отрицательно, ликвидировать в начале.

Если не предпринимать необходимые меры для ликвидации передачи вредных наследственных свойств от предшествующих технологических операций к последующим, качество изделий неизменно снижается. Пороки исходных заготовок и их материалов возникают еще в металлургическом производстве, имеют наследственный характер и, если не ликвидируются там же, проявляются и в ходе механической обработки в готовом изделии. Такие дефекты связаны с особенностями заготовительного производства и свойствами материалов. Основные виды дефектов представлены на рис. 2 [13]. Вредные примеси (рис. 2, а) располагаются по всему объему материала заготовки. Раковины на поверхности (рис. 2, б) и внутри заготовок (рис. 2, в) характерны для литых заготовок. Трещины (рис. 2, г) на поверхности и в материале заготовок (рис. 2, д) возникают после сварки и отдельных видов обработки резанием. При прокатке возникают закаты (рис. 2, е), которые на поверхности представляются в виде волосовин (рис. 2, ж).

Эти и аналогичные дефекты, если не удаляются в ходе механической обработки резанием, остаются и в готовом изделии, иногда с некоторыми видоизменениями. К сожалению, обнаружение некоторых видов дефектов происходит только на финишных операциях, когда уже поздно что-либо предпринимать.

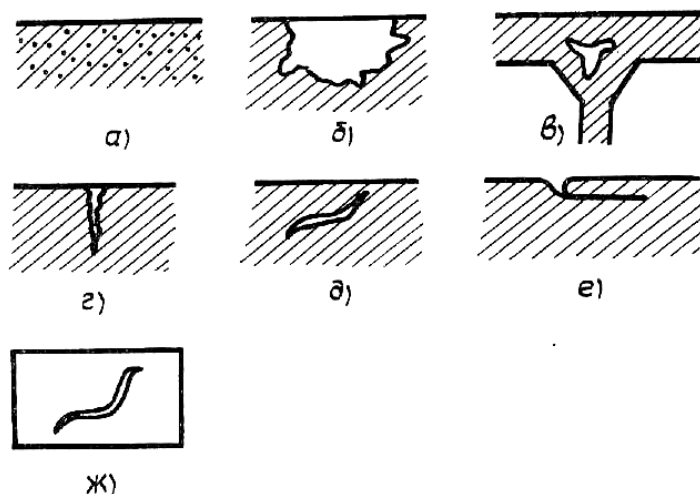


Рис. 2. Виды, дефектов материалов заготовок и деталей

Если вредные примеси (например, серу и фосфор) не удалить из поверхностного слоя на предшествующих нанесению покрытия технологических операциях, то они могут отрицательно сказаться на адгезионном взаимодействии нанесенного покрытия с подложкой и приводить к развитию подпленочной коррозии.

Если вредные примеси тем или иным способом не ликвидировать на предшествующих операциях, то они доходят до механосборочного производства.

Качество поверхности характеризуется микро- и макро- геометрией поверхности, волнистостью, структурой, упрочнением и остаточными напряжениями. Глубина поверхностного слоя и качество поверхности зависят от обрабатываемого материала, вида обработки, основных параметров инструмента, режима обработки и рода смазочно-охлаждающей жидкости.

Поверхностный слой после механической обработки (раскатки, вальцевания и т.п.) неоднороден по строению (рис. 3) [7]. Граничный слой 1 состоит из адсорбированной пленки газов, влаги, адсорбирующих частиц и смазочно-охлаждающей жидкости, которую можно удалить лишь нагревом детали в вакууме. Слой 2 – деформированный, сильно раздробленный металл с искаженной решеткой кристаллов и с обезуглероженными под воздействием высоких температур при механической обработке участками; в нем находятся окислы и нитриды, пустоты надрывы и трещины. Слой 3 состоит из зерен, сильно деформированных под действием давления. Слой 4 – металл с исходной структурой.

При более тонкой обработке (абразивными брусками, лентами и т.п.) слой 1 не изменяется по толщине, а слои 2 и 3 уменьшаются соответственно меньшему давлению и температуре поверхности при обработке.

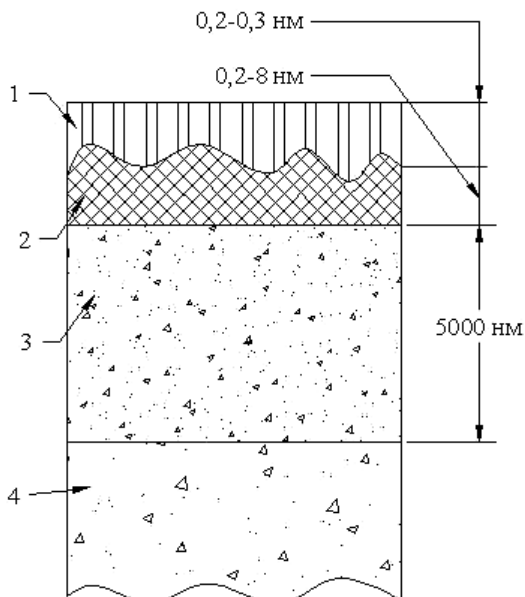


Рис. 3. Структура поверхностного слоя после механической обработки

Поверхностный слой в зависимости от указанных выше обстоятельств имеет толщину при точении 0,25...2,0 мм, при шлифовании 12-75 мкм, при тонком шлифовании 2...25 мкм, при полировании 0,2 мкм [7].

Поверхностный слой имеет гетерогенную структуру, анизотропен по механическим свойствам и имеет высокую микрохимическую неоднородность.

Технологическое наследование проявляется всегда, как объективная реальность фиксации памяти в металле о предшествующих технологиях обработки материалов.

Поэтому на технологических переходах необходимо создавать “барьеры”, которые препятствуют передаче отрицательных свойств по наследству. Такие “барьеры” являются точками бифуркации. В момент бифуркации технологическая система “лишается памяти”, т.е. отсекает всю предысторию, всю наследственность.

Например, существующие в настоящее время в машиностроительном производстве технологии абразивно-струйной очистки поверхности и проковки не могут в полной мере и комплексно решить проблему ликвидации отрицательных

свойств технологической наследственности, так как не могут проводить поверхностный слой через точку бифуркации.

Таковыми барьерами, способными отсечь многие негативные свойства, являются технологии лазерной и лазерно-плазменной обработки поверхности и поверхностного слоя.

Лазерно-плазменная обработка позволяет управлять технологической наследственностью поверхности и поверхностного слоя, проводя их через точку «бифуркации», то есть через такой технологический «барьер», который практически полностью устраняет многие наследственные пороки. Роль таких «барьеров» выполняют, например, следующие лазерно-плазменные технологии:

- лазерно-плазменная очистка поверхности от окалины, ржавчины, оксидов, органических и неорганических загрязнений.
- лазерно-плазменное рафинирование поверхностного слоя от серы, фосфора, O_2 , N_2 , H_2 и т.д.
- лазерно-плазменное «залечивание» поверхностного слоя (устранение дефектов в поверхностном слое).

Таким образом, возникает концепция комбинированной лазерной обработки поверхности, когда можно говорить не просто о ее лазерной очистке, но и о подготовке к последующим видам обработки (покраске, сварке) или к эксплуатации с повышенным ресурсом в результате одновременной с очисткой лазерной полировкой, упрочнением, повышением коррозионной стойкости и т.п.

2. ЛАЗЕРНАЯ ОЧИСТКА ПОВЕРХНОСТИ

Основные свойства лазерного излучения применительно к очистке и обработке поверхности

Свойства лазерного излучения, как универсального инструмента, проявляются в самых различных технологических возможностях обработки материалов – универсальности, гибкости, локальности обработки в пространстве и

во времени, производительности, прецизионности, селективности, корпоративности, «безызносности» [14, 15].

Универсальность лазерного излучения, как технологического инструмента, проявляется в том, что его можно применять для ведения различных технологических процессов – резки, сварки, термообработки, легирования, прошивки отверстий, токарной, фрезерной обработки и т. д.

В условиях производства очень важным фактором является возможность быстрого перехода с обработки одного вида деталей на другой или перехода с одного рабочего места на другое. Лазерный пучок в сочетании с современными средствами компьютерного управления позволяет реализовать эти возможности. Перевод лазерной обработки материалов с одного рабочего места на другое, или с одного технологического процесса на другой может составлять несколько секунд, в этом проявляется гибкость лазерного пучка, как технологического инструмента. Особенно ярко это свойство лазерного пучка проявляется при использовании его со световолоконными системами.

Локальность обработки в пространстве и во времени заключается в возможности сосредоточить энергию лазерного излучения мощностью в мегаватты в объеме от нескольких десятков до нескольких сот микрон и во времени несколько десятков пикосекунд. Столь высокая локальность позволяет обрабатывать строго определенные участки детали с минимальными зонами термического влияния.

Прецизионность перемещения пучка лазера в пространстве обеспечивается компьютерными системами управления и механизмами перемещения, например, роботами, координатными столами, которые обеспечивают точность позиционирования от микрона до сотен микрон. Столь высокие точности перемещения позволяют изготавливать с помощью лазера прецизионные детали машин и механизмов и обеспечивать высокую технологическую воспроизводимость технологических процессов.

Производительность лазерной обработки обеспечивается ее высокой скоростью – скорость резки до 100 м/мин, скорость сварки до 300 мм/сек, скорости термообработки до 200 см²/мин позволяют судить о лазерном пучке, как о высокопроизводительном обрабатывающем инструменте.

Одним из уникальных свойств лазерного излучения является его селективное воздействие на вещество. Именно на селективности воздействия лазерного излучения на атомы и молекулы построена быстро развивающаяся наука – лазерная фотохимия. Селективное свойство лазерного излучения нашло применение в лазерной стереолитографии, то есть получении объемных изображений. Лазерная стереолитография построена на свойствах определенных жидкостей практически мгновенно полимеризоваться под действием лазерного излучения с определенной длиной волны.

Корпоративные свойства лазерного излучения проявляются в возможности эффективной интеграции лазерного излучения с различными технологическими энергетическими источниками энергии – дуговыми, плазменными, индукционными, световыми, ультразвуковыми. Такое объединение позволяет получить новое качество, которое проявляется в виде расширения технологических возможностей процессов обработки материалов и появления новых качеств. Например, увеличение скорости сварки получается не просто сложением скоростей сварки каждого вида технологического процесса, а заключается в большем увеличении величины скорости сварки за счет увеличения эффективности технологического процесса.

Лазерный пучок, как технологический инструмент, не подвержен износу, в отличие, например, от резца или фрезы, применяющихся при механической обработке. Эффект «безызносности» дает пучку лазера большие экономические преимущества, и обеспечивает высокую воспроизводимость технологических процессов.

Необходимо отметить еще одно из достоинств лазерной обработки – это высокая пространственная разрешающая способность воздействия на материал, обеспечивающая формирование структур или изучение функциональных элементов с геометрическими размерами применительно к решению задач микротехнологии (размеры элементов $10^{-4}...10^{-6}$ м) и нанотехнологии (размеры элементов $10^{-7}...10^{-9}$ м).

Очень интересным свойством лазерного пучка, как технологического инструмента, является также то, что на него не действуют высокие и низкие

температуры, электрические и магнитные поля, то есть пучок лазера устойчив ко многим внешним физическим воздействиям.

Физические основы лазерной очистки поверхности

Физические процессы, происходящие при лазерной очистке поверхности, отличаются большим разнообразием и зависят от плотности мощности лазерного излучения на поверхности.

Общая схема процессов воздействия лазерного излучения на материалы применительно к очистке поверхности приведена на схеме рис. 4 .

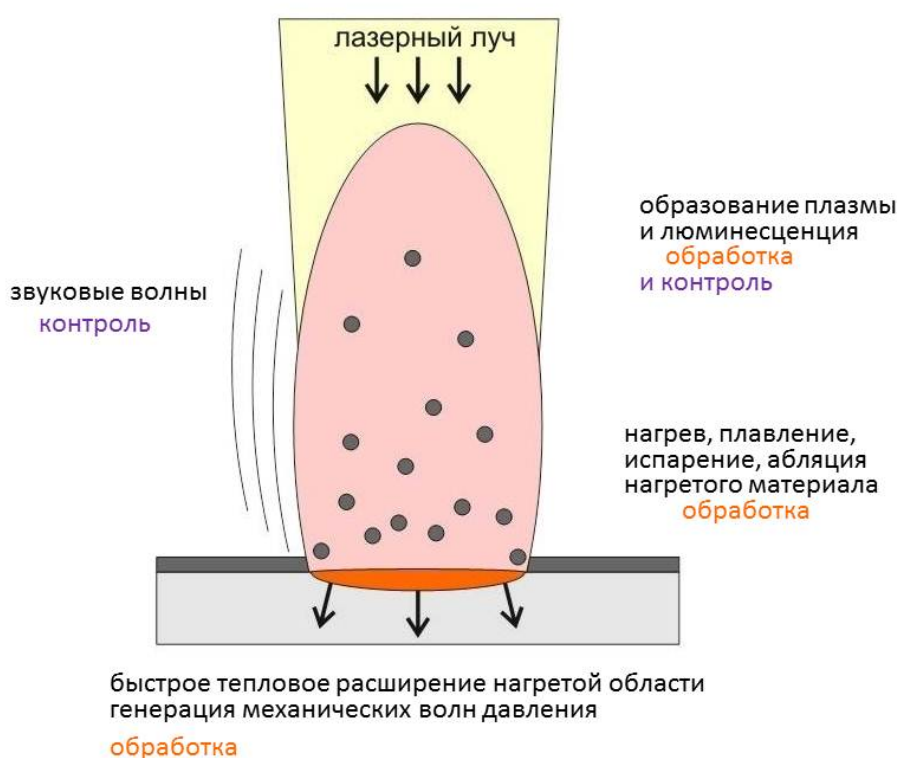


Рис. 4. Общая схема процессов воздействия мощного лазерного излучения на материалы применительно к лазерной очистке поверхности.

Процессы лазерного нагревания, испарения и абляции материала с образованием плазмы, а также быстрое тепловое расширение и возникновение ударных волн лежат в основе механизмов лазерной очистки, в то время как свечение плазмы и акустический сигнал в воздухе могут быть использованы для контроля режимов и степени очистки. Таким образом, для очистки представляет интерес весь спектр процессов взаимодействия лазерного излучения с веществом,

причем не только на воздухе, но и в жидкой среде, где зачастую процессы удаления загрязнений идут гораздо более эффективно и при меньших мощностях излучения.

Рассмотрим более подробно основные механизмы лазерной очистки.

Испарительные механизмы лазерной очистки

Исторически первоначально использовались преимущественно испарительные механизмы лазерной очистки поверхности (см. например [16]), когда плотность мощности излучения превышает значение, при котором начинается испарение загрязняющих веществ с поверхности.

В этом случае в основе физики процесса лазерного удаления поверхностных слоев (ржавчины, окалины, окислов, загрязнений, лаков, красок, жиров и т.д.) лежит эффект испарения, то есть перевода материала из твердой фазы в паро-газо-плазменную (рис. 5), при этом желательно минимизировать образование жидкой фазы.

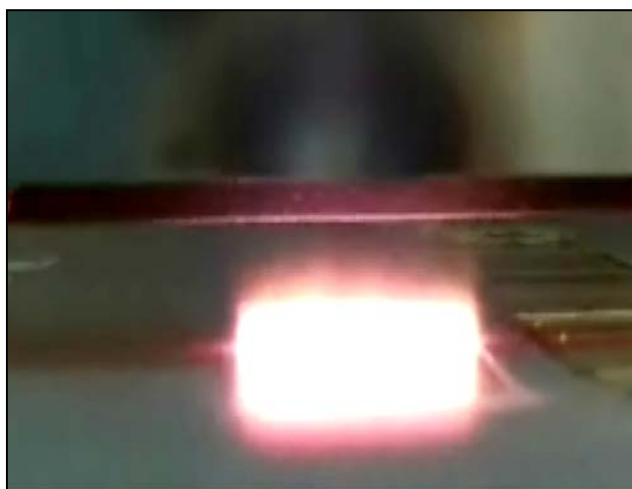


Рис. 5. Приповерхностная лазерная плазма, образующаяся при лазерно-плазменной очистке поверхности

Распространение света в веществе, как правило, описывается законом Бугера-Ламберта-Бэра:

$$q(x) = q_0 \cdot (1 - R) \cdot \exp(-\alpha x) \quad (1),$$

где q_0 – плотность мощности излучения, падающего на поверхность материала, $q(x)$ – плотность мощности излучения на глубине x , R – коэффициент отражения вещества, α – показатель поглощения вещества.

Показатель поглощения металлов на длине волны 1,06 мкм составляет 10^{-3} - 10^{-4} см⁻¹, тогда как показатель поглощения неметаллических веществ на несколько порядков ниже и составляет 10^{-1} - 10^{-3} -см⁻¹. Из соотношения (1) следует, что металлы на этой длине волны поглощают излучение лазера в тонком поверхностном слое, тогда как неметаллические вещества имеют объемное поглощение. Таким образом, при толщине неметаллического загрязнения несколько сотен микрон допустимо считать, что этот слой относительно прозрачен.

Опираясь на изложенное выше, опишем качественно испарительный механизм лазерной очистки (поверхности металлов от неметаллических загрязнений). Будем считать, что лазерный импульс, попадая на загрязненную поверхность, проходит сквозь загрязнение практически без ослабления и поглощается в приповерхностном слое материала (рис. 6,а).

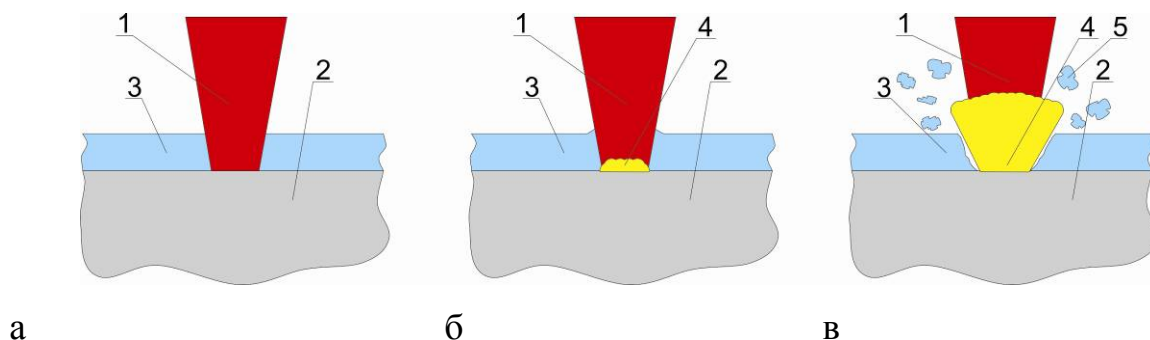


Рис 6. Испарительный механизм лазерной очистки. 1 – лазерный пучок, 2 – загрязненный материал, 3 – загрязнение, 4 – облако испаренного вещества, 5 – частицы загрязнения, удаленные с поверхности материала.

В случае, когда плотность мощности лазерного излучения достаточна для того, чтобы разогреть материал (металл) до температуры кипения на границе раздела загрязнение – основной материал, начинается испарение материала (рис.6,б). Под давлением разогретых до высоких температур паров слой неметаллического загрязнения разрушается и удаляется с поверхности материала (рис. 6,в). Кроме того, во многих случаях давление разогретого газа разрушает слой загрязнения не только в зоне области прямого лазерного воздействия, но и в близлежащей области, что повышает производительность лазерной очистки.

Таким образом, задача выбора оптимального режима работы лазера в испарительном режиме очистки сводится к обеспечению минимального порога испарения вещества основного металла. Известно, что таковой обеспечивается в

импульсном режиме воздействия [16]. Кроме того, чем меньше длительность воздействия, тем меньше размер прогретой зоны вещества и, следовательно, меньше количество образующегося расплава и пара (т.е. меньше повреждение основного вещества) при большем давлении последнего. Например, при воздействии импульса длительностью 10 нс и мощностью в 10 мДж, сфокусированного в пятно диаметром 0,2 мм, плотность мощности в зоне обработки достигает 3 ГВт/см². При данной плотности мощности глубина прогретого слоя в стали $x_{пр}$ составляет 10^{-4} – 10^{-5} см, при этом испарение происходит практически без образования расплава на поверхности вещества (абляция), и модификация исходной поверхности минимальна.

Для этого применяют импульсное лазерное излучение с короткой длительностью импульса (несколько десятков наносекунд) и высокой пиковой мощностью, обеспечивающей плотность мощности в зоне обработки $10^7 \dots 10^{10}$ Вт/см² при диаметре сфокусированного пятна пучка лазера $\approx 0,5$ мм, с энергией в импульсе несколько мДж и частотой следования импульсов более 20 кГц. Схема лазерной очистки поверхности сканированием пучка показана на рис. 7.

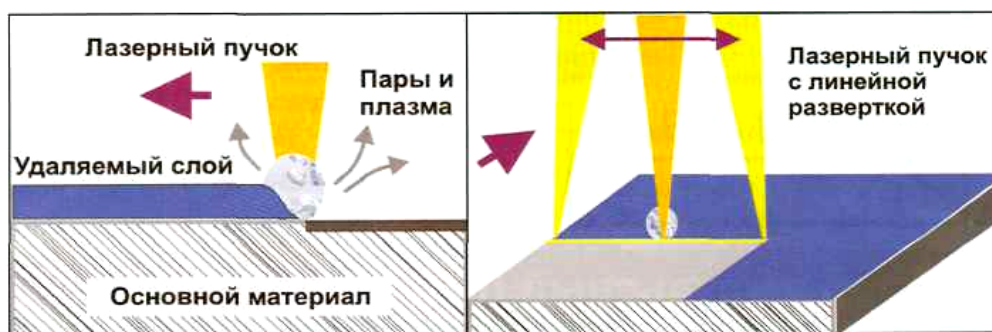


Рис. 7. Схема процесса лазерной очистки поверхности со сканированием

В настоящее время существуют модификации лазерной очистки в испарительном режиме с использованием эксимерных лазеров. Длина волны их излучения лежит в ультрафиолетовом диапазоне, что определяет малую глубину проникновения излучения в большинство металлов. Кроме того, при малой длине волны излучения фотон обладает достаточно высокой энергией, которая достаточна для разрыва межатомных связей в молекулах многих загрязнителей. Это определяет специфический механизм абляции (удаления) вещества, который

представляет собой фото-термодеструкцию: при поглощении излучения происходит разрыв связей в молекулах и вещество удаляется в виде плазмы. При этом большая часть энергии, не превращаясь в тепло, удаляется вместе с испаряемым слоем материала. Короткая длительность импульса (преимущественно наносекундного диапазона) также ограничивает распространение энергии вглубь материала. В таком режиме воздействия не происходит существенного нагрева материала (поэтому его называют **«холодной» абляцией**). Однако, недостатком здесь является большая энергоемкость процесса (количество энергии излучения на единицу массы удаляемого материала), что определяет его низкую производительность. Поэтому такой тип очистки используется в особых случаях, когда основной проблемой является недопустимость теплового воздействия на основной материал, например, в реставрационных работах с объектами живописи.

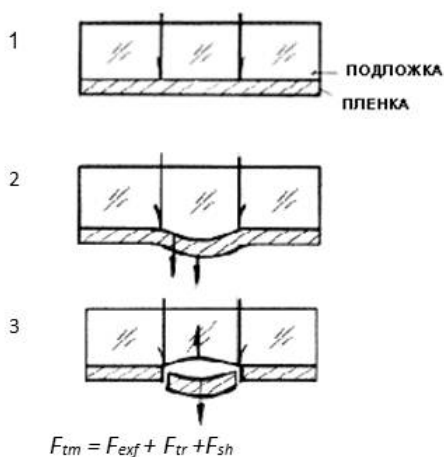
Таким образом, большинство испарительных режимов промышленной лазерной очистки требует достаточно высоких температур, и часть тепла переходит в приповерхностный слой основного (очищаемого) материала. Это может вызвать его повреждения различного характера: поверхностное плавление или испарение, инициирование химических процессов в приповерхностном слое (в частности, окисление металла, разложение термочувствительных материалов и т.п.), механическое повреждение (например, образование трещин или сколов). Кроме того, при высоких температурах может происходить вжигание вещества загрязняющих пленок и частиц в поверхностный слой основного материала, после этого очистка возможна только при совместном удалении с приповерхностным слоем основного материала. Испарительные режимы лазерной очистки возможны при использовании как импульсного, так и непрерывного лазерного излучения когда речь идет о черновых процессах, требующих высокой производительности.

Ударно-механическая лазерная очистка

Во многих случаях лазерной очистки для уменьшения теплового воздействия на поверхностный слой основного материала используются **доиспарительные** режимы лазерной очистки (Рис. 8) [17]. При этом очистка поверхности твердого тела от пленок, также как и от загрязняющих частиц, проводится в

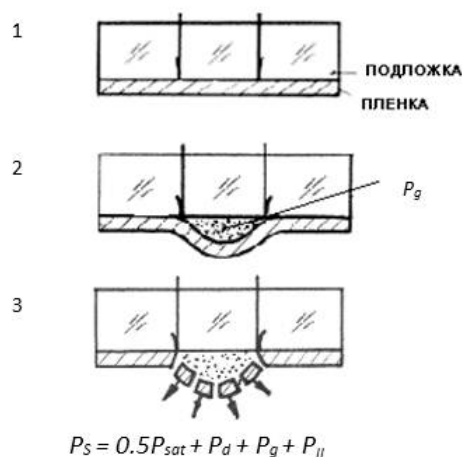
низкоэнергетических режимах, чтобы предотвратить разрушение поверхностных слоев или возникновение в них нежелательных физических и химических изменений. В этих условиях наиболее вероятными физическими механизмами очистки являются **ударно-механические**, связанные с быстрым тепловым расширением загрязняющих частиц, пленок или поверхностных слоев основного материала при поглощении лазерного излучения и возникновением вследствие этого ударной волны в материале (и в воздухе), а также взрывным удалением имеющихся газов и образующихся паров (Рис. 8).

I. Термомеханические механизмы разрыва пленок



F_{ext} — сила, вызванная секущим разломом пленки под воздействием продольного термического расширения,
 F_{tr} — сила, вызванная секущим термическим расширением пленки,
 F_{sh} — сила, вызванная колебанием пленки при движении поверхности подложки под действием их теплового расширения

II. Взрывные механизмы разрыва пленок за счет избыточного парового давления P_s



P_{sat} — давление насыщенных паров при T (большое для дефекта поверхности),
 P_d — давление выделяющихся молекул газа (большое для грязной поверхности)
 P_g — давление вследствие газификации (испарение, разложение) подложки (промежуточного слоя) и материала (пластик и т.д.)
 P_{II} — давление паров искусственного низко-испаряемого жидкого слоя (нагретого от подложки)

Рис. 8. Доиспарительные низкоэнергетические механизмы лазерной очистки.

Среди термомеханических явлений преобладают поперечное и продольное тепловое расширение (ТР) и колебания пленок или частиц загрязнения под действием циклического ТР. Среди взрывных явлений, возникающих из-за появления избыточного давления в полостях и зазорах между пленками загрязнений отметим повышение давления собственных паров при нагревании

(велико для дефектной поверхности), десорбцию адсорбированных газов (велико для загрязненной поверхности), газификацию основного материала (велико при очистке полимеров, бумаги, холста, красочных слоев и т.п.), а также легко испаряемого слоя, специально вносимого в систему, например, жидкости (воды).

При этом механизм очистки поверхности от пленок загрязнений отличается от такового для частиц тем, что процессу удаления загрязнения предшествует фрагментация (разрушение сплошной пленки на фрагменты).

Различают механизмы и технологии сухой и влажной лазерной очистки, при которых воздействие излучения происходит непосредственно на очищаемую поверхность (в случае сухой очистки) или на поверхность, предварительно покрытую тонким слоем жидкости (в случае влажной очистки).

Сухая лазерная очистка начинается с быстрого теплового расширения приповерхностного слоя основного материала и удаляемого загрязнения под действием коротких импульсов лазерного излучения [18], которое приводит к возникновению механических напряжений в загрязняющем слое и инерционной силы при прекращении импульса (Рис. 9).

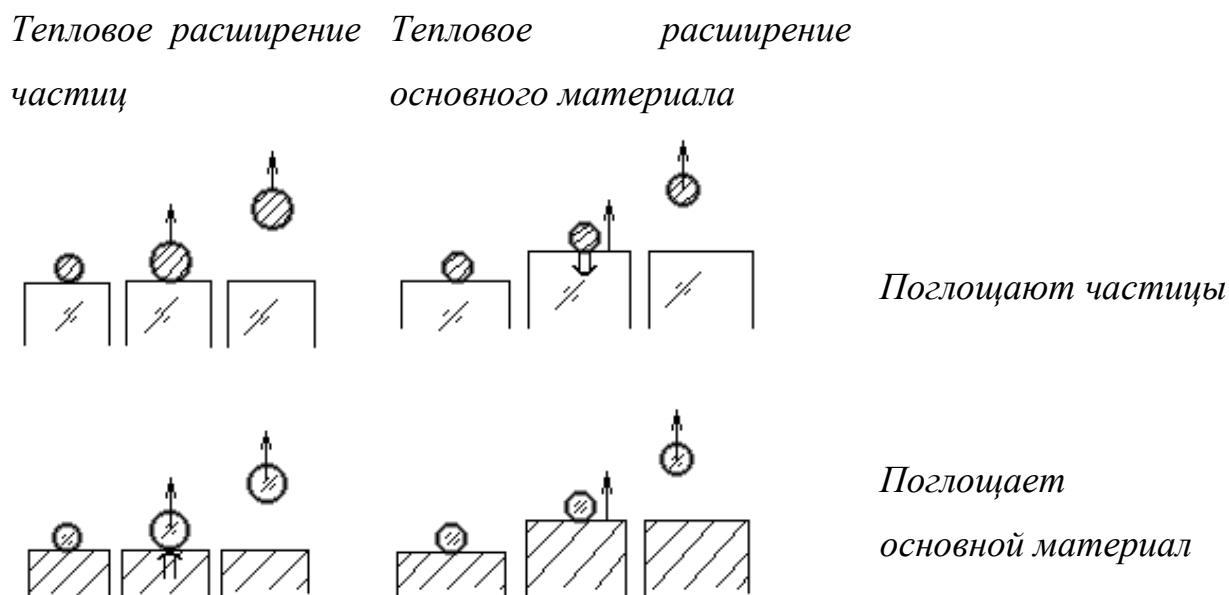


Рис. 9. Иллюстрация физических механизмов сухой лазерной очистки поверхности для случаев различного сочетания прозрачных и непрозрачных загрязнений и основного материала (металл, стекло).

Основными термомеханическими механизмами удаления пленок и частиц являются:

- «стряхивание» загрязнений с поверхности при термическом расширении подложки;
- отрыв загрязнений от поверхности вследствие смещения центра массы пленки;
- выброс фрагментов загрязнений с поверхности в результате действия в них термических напряжений сжатия.

Рассмотрим эти механизмы несколько подробнее.

Быстрое тепловое расширение происходит в тонком поверхностном слое толщиной порядка $\sqrt{a\tau}$, где a – температуропроводность материала поверхностного загрязненного слоя, τ – длительность импульса излучения (для наносекундного импульса $\sqrt{a\tau}$ составляет величину порядка микрометра). В результате имеет место ускоренное смещение центра массы этого слоя и возникает инерционная сила, сжимающая слой во время действия переднего фронта импульса и растягивающая его во время действия заднего фронта. Таким образом, происходит образование областей сжатия и растяжения материала и формируется ударная волна, распространяющаяся от поверхности вглубь материала и разрушающая неоднородный и пористый слой загрязнений.

Другим возможным физическим механизмом сухой лазерной очистки поверхности от загрязняющего (коррозионного) слоя является выброс его фрагментов с поверхности в результате действия в нем термических напряжений сжатия. Радиальное тепловое расширение упругого слоя приводит к возникновению в нем термических напряжений сжатия, что может являться причиной абляции пленки. Рассмотрим подробнее действие этого физического механизма.

При лазерном нагревании поверхностного слоя происходит его термическое расширение. В отсутствие изменения его размеров это термическое расширение преобразуется в напряжение сжатия. В свою очередь, энергия сжатия пленки

преобразуется в кинетическую энергию движения фрагментов слоя от поверхности. При этом энергия сжатия слоя может полностью расходоваться на энергию его движения, а может частично идти на преодоление сил адгезии. Превышение сил адгезии может произойти и в результате повышения давления в полости между загрязнением и подложкой при нагревании, например, из-за десорбции газов, при газификации тонкого приповерхностного слоя основного материала (в случае, когда он менее термостоек, чем материал пленки) и т.д. (Рис. 8).

Превалирующий физический механизм удаления пленки с поверхности твердого тела в доиспарительном режиме зависит от упругих свойств материала приповерхностного слоя и его структуры.

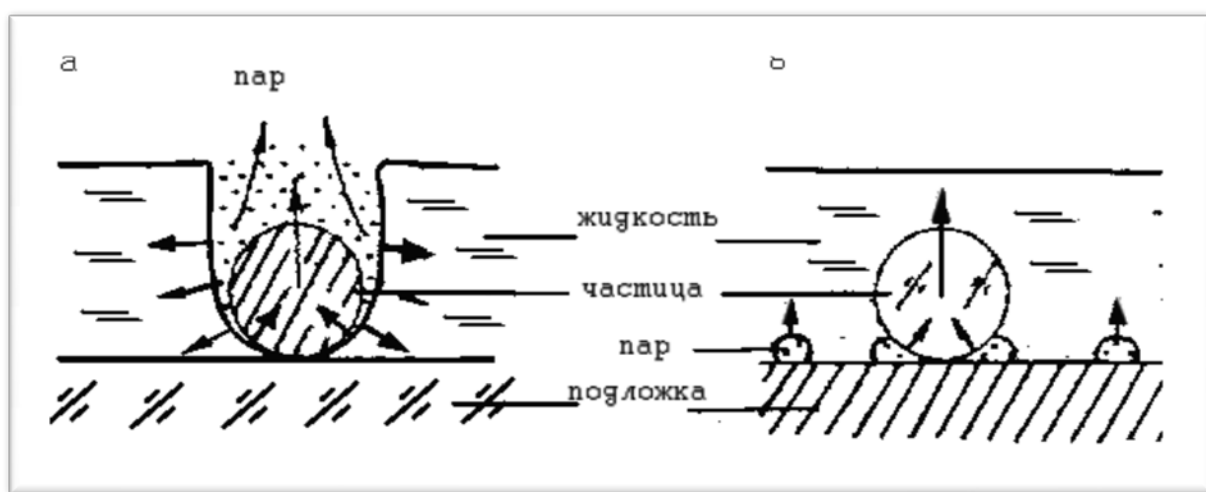
Влажная лазерная очистка

При влажной лазерной очистке поверхность перед обработкой покрывают тонким слоем жидкости (Рис.10) и задача состоит в испарении слоя жидкости (напомним, что для испарения водных растворов их достаточно нагреть всего до 100° С или немного выше), кипение которого разрушает и выносит загрязнения. При поглощении лазерного излучения в основном материале жидкость вблизи его поверхности нагревается до температуры, превышающей температуру ее кипения при нормальном давлении, что необходимо для инициирования объемного (пузырькового) кипения. При импульсном воздействии излучения после прекращения импульса энергетическая подпитка паровых пузырьков прекращается, вследствие теплопроводности в окружающую их жидкость они уменьшаются в размере и схлопываются. Совокупное схлопывание (сброс давления) - коллапс пузырьков приводит к возникновению ударной волны в жидкости, которая, распространяясь вглубь материала, вызывает разрушение загрязняющего слоя и выброс жидкости и образующихся продуктов очистки.

Влажная лазерная очистка поверхности от сильнопоглощающих излучение загрязнений (например, металлической пыли) имеет свои особенности. В этом случае излучение поглощается в верхней части загрязняющей частицы, и от ее вершины вдоль поверхности частицы (Рис. 10) формируется волна испарения жидкости, причем эффективное испарение происходит в узкой области вблизи

изотермы на поверхности частицы, соответствующей температуре кипения T_{ev} . Вокруг поверхности частицы образуется расширяющийся сверху и углубляющийся со временем паровой канал, давление паров в котором максимально в его нижней части. По мере развития парового канала область эффективного испарения перемещается к нижней половине частицы, при этом перпендикулярная поверхности подложки составляющая сил давления F_n оказывается направленной вверх и при $F_n > F_a$ выталкивает частицу с поверхности подложки.

Естественно, что энергетические пороги влажной лазерной очистки в 2–3 раза ниже, чем сухой [19].



1.

Рис.10. Иллюстрация физических механизмов влажной очистки поверхности: а – поглощение излучения частицей; б – поглощение излучения подложкой.

При необходимости очистки поверхности в области механических дефектов (царапины, трещины и т.п.) обработка поверхности в доиспарительных режимах обычно оказывается недостаточной для полного удаления коррозионного слоя. В этом случае обычно проводят также дополнительную локальную обработку поверхности в испарительном режиме.

3. ОСНОВНЫЕ ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ЛАЗЕРНОЙ ОЧИСТКИ

Лазерная очистка в промышленности

Лазерная очистка металлопроката

Мировой объем производства стали постоянно растет. Среднее металлургическое предприятие ежегодно выпускает порядка 100 млн. тонн металлопроката. После проката поверхность металла покрыта слоем окалины, которую необходимо удалить для дальнейшей переработки.

Самыми распространенными способами удаления окалины на сегодняшний день являются абразивные способы очистки с применением пескоструйных и дробеметных установок. Металлоперерабатывающие предприятия вынуждены самостоятельно решать задачу по очистке металлопроката, при этом очистка производится дважды: сначала очищается прокат от окалины, затем перед покраской с готовых изделий удаляются цеховые загрязнения: масло, пыль, ржавчина (очищенная поверхность быстро ржавеет даже в цеховых условиях) (Рис. 11).

При изготовлении крупногабаритных металлоконструкций, для повторной очистки которых требуются большие герметичные камеры, на производствах создаются участки с пескоструйными или дробеметными установками, потребляющими сотни киловатт электроэнергии и создающими экологические проблемы не только на предприятии, но и на прилегающих территориях.

Кроме больших затрат на электроэнергию и приобретение расходных материалов – песка и дроби, предприятия вынуждены также решать и экологические проблемы, связанные с их утилизацией.

Основными потребителями металлопроката являются отрасли экономики: транспорт, энергетика, строительство и их ремонтно-эксплуатационные службы. Авиационный, автомобильный, железнодорожный и водный транспорт преимущественно использует тонколистовой прокат для изготовления крупногабаритных конструкций - корпусов самолетов, автомобилей, вагонов, кораблей. Поскольку все корпуса требуют нанесения защитно-декоративных

покрытий, то вопрос получения «чистой» поверхности является для них крайне актуальным.

Традиционно для очистки тонколистового металлопроката перед нанесением, например, цинковых покрытий для защиты от коррозии, применяется технология жидкостной очистки с использованием кислотных и щелочных ванн, что не только усугубляет экологическую ситуацию вокруг производств, но и создает проблемы в случае аварий при транспортировке.



*Рис. 11. Очистка стальной полосы от масляной пленки (слева—очищенная часть).
Использован волоконный лазер со следующими параметрами : мощность 50Вт, частота импульсов 100 кГц, диаметр луча в зоне обработки 0,1 мм. Производительность 100 м²/ч.*

Очистка труб

Атомная энергетика, нефтегазовый комплекс, жилищно-коммунальное хозяйство применяют трубы для доставки энергоносителей к потребителю. Долговечность и экологическая безопасность требуют защиты внешних и внутренних поверхностей труб от коррозии. Если наружные поверхности труб защищают с помощью специальных покрытий, то для защиты внутренних поверхностей технологий нет. Разгерметизация магистральных трубопроводов при длительных сроках эксплуатации происходит из-за коррозионного разрушения материала труб и сварных швов.

Нанесение защитных коррозионностойких покрытий на внутренние поверхности труб возможно лишь при условии очистки труб изнутри. Такой способ может быть реализован с применением лазеров (Рис. 12).



а



б

Рис. 12. Очистка окалины с внутренних поверхностей насосно-компрессорных труб: а - стенд для очистки, б - очищенная внутренняя поверхность трубы

Лазерная очистка крупногабаритных сварных конструкций

В строительстве применяется огромное количество крупногабаритных сварных конструкций: например фермы мостов. Для их производства применяется листовая прокат толщиной 5 - 20мм. При сборке ферм мостов в «полевых» условиях необходимо очистить от ржавчины стыки блоков пролетных строений под фрикционные соединения. Сейчас применяется технология пескоструйной очистки. Процесс экологически грязный, энергозатратный, требует дополнительных мероприятий по защите, а также очистке расположенных рядом металлоконструкций и территорий.

Для решения этой проблемы предприятием НПП «Лазерные Технологии» разработаны и изготовлены две единицы лазерного оборудования в ранцевом и мобильном исполнении (Рис. 13). Оборудование может эксплуатироваться во всепогодных полевых условиях. Производительность очистки на мостостроительных конструкциях, достигнутая при приемо-сдаточных испытаниях, составляет 3 – 5 м²/ч. Чистота поверхности соответствует международному стандарту ISO SA 2,5. Коэффициент трения фрикционных соединений, подготовленных для сборки с применением технологии лазерной очистки от ржавчины, в 1,5 раза выше, чем при пескоструйной очистке. Это обеспечивает большую надежность и долговечность таких соединений.

Потребляемая мощность лазерного комплекса до 1,5 кВт. Удаляемый при лазерной очистке 100 мкм слой ржавчины не оказывает влияния на экологию окружающей среды, т.к. по объему он в 10^6 раз меньше, чем отходы песка при пескоструйной очистке.



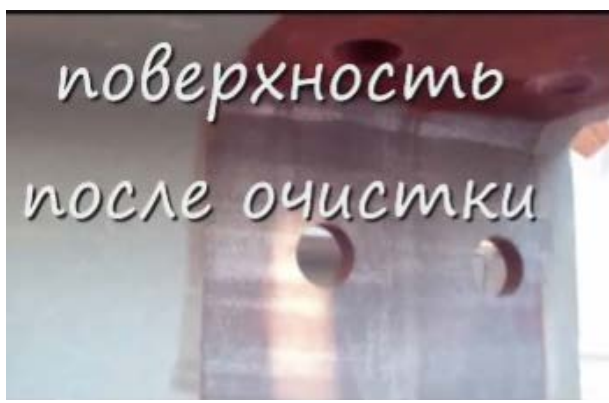
а



б



в



г

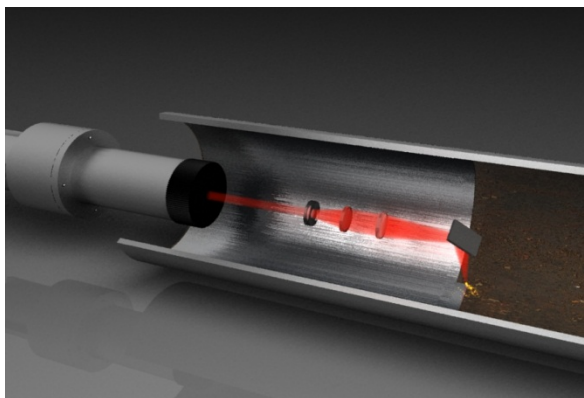
Рис. 13. Очистка стыков ферм моста: а-мобильный лазер, б-ферма моста, в-поверхность до очистки, г- поверхность после очистки

Лазерная очистка внутренних поверхностей труб теплообменников

Большие затраты приходится на выполнение ремонтных работ и ликвидацию последствий аварий. Для их предотвращения проводятся профилактические работы. При эксплуатации на АЭС теплообменного оборудования на внутренних поверхностях трубок откладываются солевые отложения, снижающие эффективность отвода тепла из реактора. За несколько лет работы КПД станции уменьшается на 20%, поэтому ее останавливают и выполняют работы по очистке труб теплообменников.

Трубки теплообменников изготовлены из латуни, внутренний диаметр 25мм, длина 12м, толщины стенок до 1,5мм. Применение механических способов очистки приводит к уменьшению толщины стенок, и после 2-3х процедур требуется их замена.

В этом случае применение лазерной очистки (Рис.14), исключая абразивный износ трубок теплообменника, особенно актуально: продлевается ресурс работы дорогостоящего оборудования, снижаются убытки от остановки атомной станции для замены теплообменников, уменьшаются дозовые нагрузки на персонал при выполнении ремонтных работ.



а



б

Рис. 14. Очистка от солевых отложений внутренних поверхностей труб теплообменников: а-схема очистки, б- вид теплообменника

Лазерная очистка поверхности лопаток турбин

На магистралях для перекачки газа применяются компрессоры. В процессе работы на поверхности лопаток осаждаются частицы, находящиеся в газе. Со временем толщина загрязнений увеличивается, что приводит к разбалансировке ротора турбины, вращающегося с большой скоростью. Эксплуатационные загрязнения поверхности могут также существенно ухудшать характеристики теплообмена лопаток, их аэродинамику, коэффициент полезного действия и стойкость к различным видам износа поверхности.

Наиболее распространенными загрязнениями поверхности лопатки турбин и поверхности теплообменного оборудования являются высокотемпературные окисные пленки. Лопатки турбин газоперекачивающих станций работают при

высоких температурах эксплуатации, и загрязняющие слои имеют весьма твердую структуру, окисные пленки, возникающие на поверхности, тугоплавкие и имеют высокое сцепление с металлом и удаляются классическими способами чрезвычайно тяжело.

Для выполнения регламентных работ по удалению эксплуатационных загрязнений регулярно производится остановка оборудования и съем лопаток.

Очистка поверхности лопаток производится с применением жидких химических реагентов. Соответственно, после проведения очистки требуется провести работы по сборке и балансировке ротора турбины.

Лазерная очистка поверхности пера лопатки (рис. 19) с такой задачей справляется достаточно высокопроизводительно и к тому же иногда придает дополнительные свойства очищенному сплаву за счет специфической модификации поверхностного слоя. Применение мобильных лазерных установок для выполнения очистки лопаток турбин (Рис.15) делает возможным производить очистку без демонтажа лопаток. Это существенно сокращает время выполнения регламентных работ и, соответственно, позволяет экономить средства за счет уменьшения времени простоя дорогостоящего оборудования.



а



б



в

Рис.15. Очистка турбинных лопаток от эксплуатационных загрязнений: а- очищенная лопатка, б- ротор турбины в сборе, в – лопатки до и после очистки

Очистка деталей запорно-регулирующей арматуры

Присутствие в газе твердых частиц приводит к абразивному износу дорогостоящей запорной арматуры. На поверхности шаровых кранов появляются задиры и царапины, нарушающие защитные свойства гальванических покрытий. При их ремонте требуется удалить с поверхности шара нарушенное электрохимическое покрытие перед его восстановлением.

Осуществляется этот процесс в электролитической ванне путем электрохимического травления. В этом случае неизбежно происходит травление материала шара, приводящее к изменению геометрических размеров всего изделия, что недопустимо. Применение в данном случае технологии лазерной очистки позволяет селективно удалять старое покрытие с поверхности шара с сохранением его геометрических размеров (Рис. 16).



а



б

Рис. 16. Очистка отработавших покрытий: а- корпус крана, б- шар

Аналогичная проблема существует при ремонте лопаток турбин с покрытием входных кромок нитридом титана.

По оценкам немецких специалистов фирмы CleanLaser стоимость 1 часа работы лазерной установки для очистки составляет 8-9 евро, а аналогичной пескоструйной 80-90 евро.

Замена экологически проблемных, энергозатратных абразивных и жидкостных способов очистки на лазерные решит экологические проблемы и экономически выгодна для предприятий

Лазерная очистка поверхности резьбы

После нарезания резьбы на поверхности остаются остатки СОЖ, органические и неорганические загрязнения, которые препятствуют получению высокого значения адгезии наносимого нанокompозитного полимерного покрытия.

Лазерная очистка резьб труб от органических и неорганических загрязнений позволяет получить энергетически активированную поверхность, близкую к ювенильной (Рис. 17), что увеличивает адгезию наносимого нанокompозитного полимерного покрытия с поверхностью резьбы.

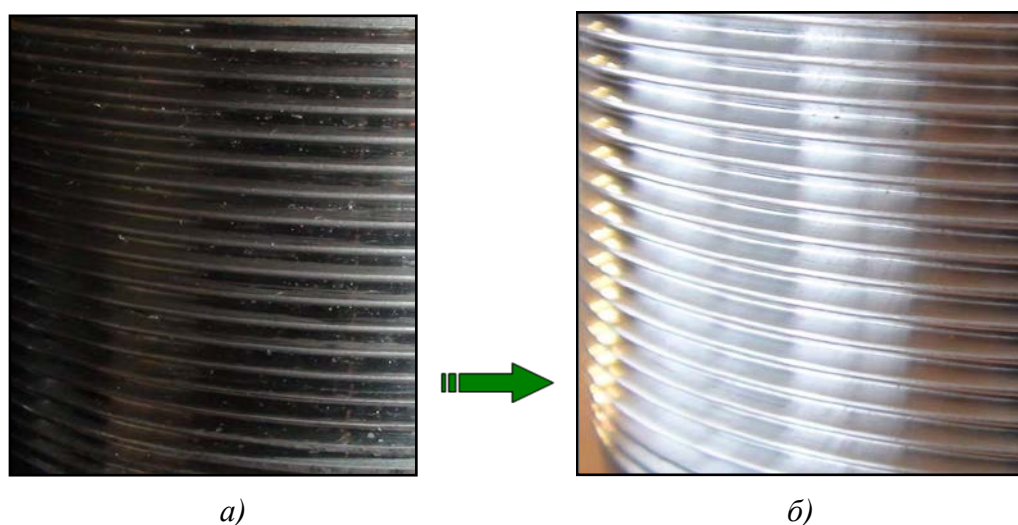


Рис. 17. Лазерная очистка поверхности резьб труб, а) внешний вид поверхности резьбы трубы до очистки, б) внешний вид поверхности резьбы трубы после лазерной очистки.

Процесс лазерной очистки поверхности является высокопроизводительным, так, время очистки резьбы трубы с условным диаметром 73 мм и длиной поверхности резьбы 110 мм составляет примерно 5 сек.

Еще одна специальная проблема, эффективно решаемая лазерной очисткой – это **очистка фильтров и сеток**. Здесь загрязнения эффективно удаляются не только с поверхности, но и из внутреннего объема отверстий (рис. 18, 19) .

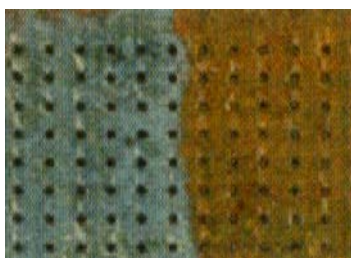


Рис. 18. Лазерная очистка каналов сетчатого фильтра



Рис. 19. Лазерная очистка фильтра

Необходимо отметить, что процесс лазерной очистки поверхности обладает высокой технологической воспроизводимостью, так как в отличие от, например, очистки механическими щетками луч лазера не «засаливается», не «тупится», не изнашивается и т.п.

Лазерная дезактивация радиационно-загрязненных металлических поверхностей

Строительство атомных электростанций (АЭС) и производство ядерного оружия создает угрозу экологии всей земли. Аварии на АЭС, замена отработавших агрегатов, добыча и транспортировка ядерного топлива, изготовление и хранение ядерного оружия требует постоянного мониторинга состояния объектов и разработки эффективных технологий дезактивации и утилизации отработавших свой срок узлов, агрегатов и сооружений атомных объектов.

Одной из проблем, привлекающей в настоящее время внимание специалистов, является задача восстановления исходного состояния материалов и деталей, подвергшихся поверхностному радиоактивному загрязнению в процессе реализации ядерно-топливного цикла (ЯТЦ), и включения их в промышленный оборот. Как правило, в результате проведения ежегодных профилактических и ремонтных работ на АЭС накапливается огромное количество отработавших свой ресурс радиационно-загрязненных металлоконструкций, узлов и элементов, выполненных из дорогостоящих металлов и сплавов [20].

Существуют два типа радиоактивных загрязнений: “наведенная” радиация и поверхностные загрязнения. Более 90% всех радиационно загрязненных объектов имеют поверхностные загрязнения. Как правило, твердые частицы радионуклидов располагаются в поверхностном слое и могут быть удалены без разрушения всей конструкции.

Вследствие повышенного уровня радиоактивности радиационно загрязненные объекты складывают на специально оборудованных территориях, нередко открытых, площади которых постоянно растут, увеличивая экологическую нагрузку на окружающую среду и отвлекая значительные материальные ресурсы на поддержание необходимой безопасности.

Как показывают исследования, пленка, толщина которой не превышает 150...200 мкм, содержит до 90...95% радионуклидов, загрязняющих металл. Кроме того, вследствие диффузионных процессов некоторая часть радионуклидов из коррозионной пленки может проникать в кристаллическую решетку металлической подложки, загрязняя поверхностные слои металла на глубину в несколько микрон.

Таким образом, удаление только коррозионной пленки с поверхности металла позволяет в значительной степени снизить уровень радиоактивности последнего, обеспечив при этом возможность повторного его использования либо промышленной утилизации.

По имеющимся оценкам, более 80...90% объема узлов и разнообразных деталей из высококачественных сталей и сплавов, хранящихся на специальных площадках АЭС, представляют собой поверхностно загрязненные радионуклидами металлические отходы, потенциальная стоимость которых в случае включения их в промышленный оборот значительно возрастает.

Основные методы дезактивации поверхностных радиоактивных загрязнений в настоящее время – химический и электрохимический, недостатком которых является образование значительного количества жидких радиоактивных отходов. Например, при химической дезактивации элементов контура АЭС с реактором типа РБМК образуется до 6000 м³ жидких радиоактивных отходов, переработка которых требует больших временных и финансовых затрат, включая проведение целого комплекса мероприятий по обеспечению радиационной и экологической безопасности.

Простые оценки показывают, что при лазерной дезактивации тех же металлоконструкций общий объем образующихся радиоактивных отходов, которые накапливаются в твердом состоянии, не превышает 1,5...2 м³. Все это делает лазерную дезактивацию потенциально серьезной альтернативой традиционным методам.

Впервые задача дезактивации с применением лазеров была поставлена в 2001г научно-исследовательским институтом ЦНИИКМ ПРОМЕТЕЙ для утилизации атомных подводных лодок. На базе института ЛИЯФ в Гатчине была организована лаборатория «Лазерной Дезактивации», в которой были проведены

первые эксперименты по применению лазеров для очистки фрагментов атомных подводных лодок.

Обработка осуществлялась в «горячей» камере с необходимыми условиями защиты от излучения и специальной вентиляции. Лазер располагался снаружи камеры, лазерный луч подавался к обрабатываемой детали через иллюминатор (Рис. 20).



а



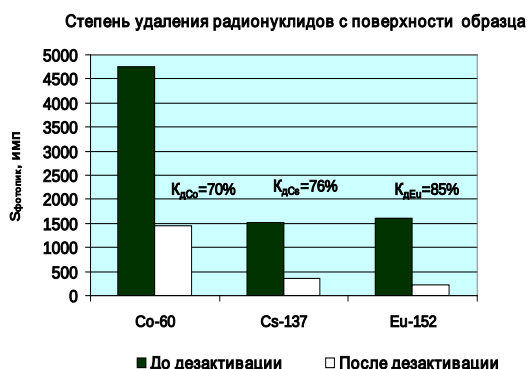
б

Рис. 20. Лазерная дезактивация радиационно-загрязненных образцов из стали (а), горячая камера ЛИЯФ (б).

Проведенные исследования показали возможность реализации процесса, уровень загрязнений на поверхности детали после лазерной дезактивации снизился до уровня ниже предельно допустимых концентраций ПДК (Рис. 21).



а



б

Рис. 21. Элемент узла атомной подводной лодки после зональной лазерной дезактивации(а), степень удаления радионуклидов с поверхности образца для Co60, Cs137 и Eu152(б).

На следующем этапе работ был изготовлен и предъявлен комиссии Росатома мобильный лазерный комплекс на базе AIG- лазера, работающего в импульсно-периодическом режиме с длительностью импульсов 10нс (Рис. 22).



а



б

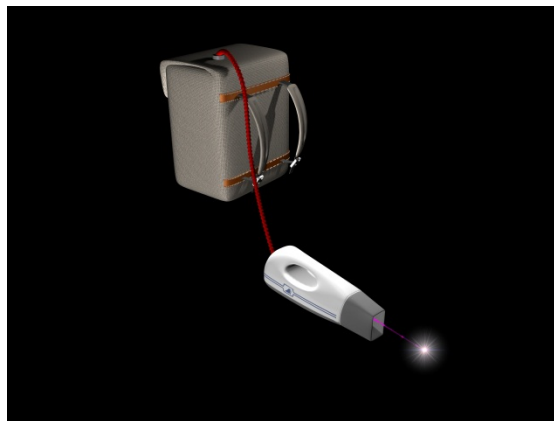
Рис. 22. Мобильный комплекс для дезактивации: а- излучатель с AIG-лазером, системой сканирования, на управляемой поворотной платформе, б- комплекс в сборе: излучатель, система охлаждения, источник питания

Для улавливания продуктов дезактивации был разработан новый способ, подтвержденный патентом РФ, заключающийся в обработке радиационно загрязненных поверхностей сквозь прозрачные для лазерного излучения полимерные сорбирующие пленки. [21].

В настоящее время разработан и изготовлен опытно-промышленный образец ранцевого лазера РЛ для выполнения работ по очистке и дезактивации в «стесненных» условиях. В качестве источника применен частотный волоконный лазер с длительностью импульса 100нс (Рис. 23).



а



б

*Рис. 23. Ранцевый лазер: а- волоконный иттербиевый лазер 50Вт,
б- общий дизайн устройства*

Исследования показали, что радиационное загрязнение таких конструкций протекает так, что основная доля радионуклидов накапливается в объеме тонкой оксидной пленки, покрывающей внутренние поверхности оборудования, которое в процессе эксплуатации на предприятиях ЯТЦ соприкасается с теплоносителем, например, водой. Пленка состоит, в основном, из разнообразных продуктов коррозии конструкционных материалов, соединений кальция и других элементов с включениями радионуклидов. Появление таких пленок обусловлено выносом и отложениями радиоактивных продуктов в процессе коррозии металла. При этом нерастворимые продукты коррозии отлагаются непосредственно из циркулирующего теплоносителя, а растворимые – по достижении определенного уровня концентрации ионов тех или иных химических элементов.

Как правило, эта пленка имеет двухслойную структуру, формируемую плотным тонким сплошным слоем, примыкающим к подложке, и пористым наружным (Рис. 24,а). Последний играет особенно важную роль в образовании и накоплении источников радиации, поскольку он обладает высокими абсорбционными свойствами и, кроме того, теплоноситель, активно проникая в рыхлый объем, растворяет и вымывает растворимые фракции коррозионных продуктов из пленки, замещая их при этом нерастворимыми соединениями.

Проведенные исследования показали, что процесс дезактивации может быть выполнен с хорошим качеством и высокой производительностью. И в этом случае

дезактивация проводится с применением прозрачных для излучения сорбирующих пленок. Уровень радиационного загрязнения поверхности до обработки совпадает с суммарным уровнем загрязнения, оставшимся на детали и на сорбирующей пленке после обработки (Рис. 24.б) .

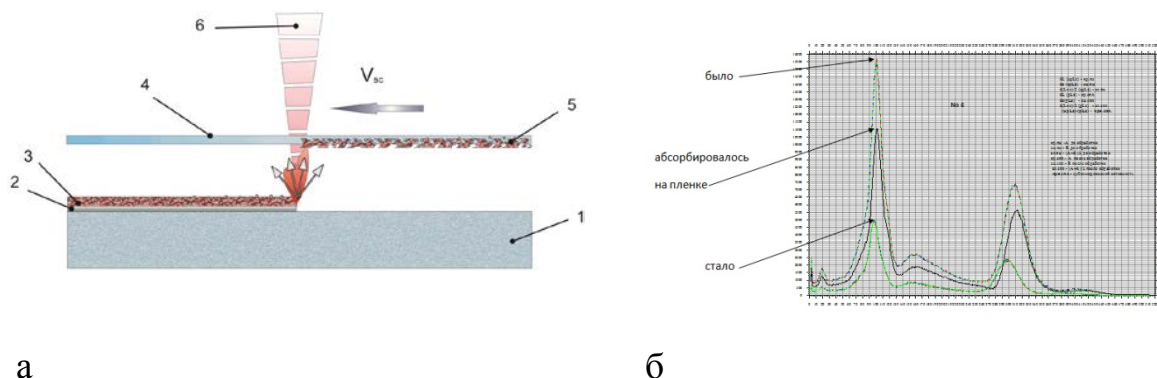


Рис .24. Чрезпленочная дезактивация: а-схема, 1 – основной материал, 2 – плотный нижний слой окислов, 3 – верхний пористый слой окислов, 4 – прозрачная сорбирующая плёнка, 5 – продукты очистки на плёнке, 6 – лазерный луч дезактивации, б- степень удаления радионуклидов с поверхности образца для $Co60$, $Cs137$ и $Eu152$

В сочетании с дистанционно управляемыми роботами (Рис.25) технология лазерной дезактивации пригодна для работы в условиях больших уровней радиации, например, при сборе россыпей ядерного топлива. В этом случаях лазер может также выполнять задачу фрагментации сорбирующих пленок для их сбора и укладки в контейнер.



Рис. 25. Мобильные роботы для ликвидации последствий катастроф (ИТУРЦ)

Опыт ликвидации последствий аварии на Чернобыльской АЭС показал, что практически вся техника, получившая поверхностные загрязнения, была оставлена в зоне катастрофы (Рис.26).



Рис. 26. Общий вид площадки с радиоактивно-зараженными машинами и аппаратами. Чернобыль 1986г

Лазерная чрезпленочная дезактивация делает возможным не только снижение дозовых нагрузок на персонал, но и может обеспечить возврат в производство применяемой при ликвидации последствий техногенных катастроф дорогостоящей техники, в том числе роботов и лазеров.

Немаловажной особенностью лазерных методов является возможность проведения дезактивации радиационно-загрязненных конструкций не только в газовых, но и в оптически прозрачных жидких средах, поскольку при этом "естественным образом" решается задача сбора и аккумуляирования радиоактивных отходов в небольшом объеме покровной жидкой среды.

Известно, что стандартные и хорошо изученные условия взаимодействия лазерного излучения и вещества обеспечиваются в газовой (атмосферной) среде или вакууме. Сбор образующихся при этом мельчайших капель и паров металла, загрязненных радионуклидами, осуществляется обычно с помощью громоздких специальных вентиляционных систем, оборудованных фильтрами. Это сопряжено с определенными техническими трудностями и неудобствами. Возможность осуществления лазерной дезактивации в жидкой среде (также как чрезпленочной дезактивации на воздухе) открывает еще один путь к созданию простых и эффективных систем сбора продуктов лазерной обработки. Принципиальная возможность дезактивации радиационно-загрязненных образцов, погруженных в жидкость, при воздействии на их поверхность лазерного частотно-импульсного излучения инфракрасного диапазона с одновременным сбором и аккумуляированием высвобождаемых радиоактивных продуктов в объеме кюветы, заполненной жидкостью (использовались вода и технический глицерин) уже продемонстрирована.

Усредненные значения коэффициентов дезактивации, полученные при лазерной дезактивации металлических поверхностей в жидкости, составляют:

- по альфа-излучателям – 50...60, практически независимо от того, в какой жидкости находился металл;
- по бета-излучателям – коэффициент дезактивации зависит от жидкости, в которую погружен металл, и составил ≈ 20 для воды и ≈ 120 для технического глицерина.

Коэффициенты лазерной дезактивации радиационно-загрязненного металла в воздухе и жидкости по альфа-излучателям близки между собой. В то же время коэффициенты дезактивации по бета-излучателям при лазерной обработке образцов в жидкости существенно превышали соответствующие значения, полученные в воздухе.

Перспективы применения лазерной очистки для сохранения памятников культурно-исторического наследия

Перед реставраторами стоит главная задача - сохранить культурное наследие для будущих поколений. Современные лазерные технологии конкурируют с традиционными технологиями в промышленной области за счет высокой производительности, отсутствия абразивного износа, энергосбережения и сохранения экологии.

В европейских странах лазерные технологии широко применяется для очистки фасадов и внутренних интерьеров исторических сооружений. Конструкции из мрамора, гранита, гипса, чугуна и других строительных материалов очищаются с хорошим качеством без изменения структуры материала (Рис.27).



а



б

Рис. 27. Лазерная очистка мраморных скульптур: а- процесс очистки, б- результат очистки

Основными факторами, разрушающими материал и изменяющими внешний вид памятников культуры являются промышленные и органические загрязнения. Санкт-Петербург - город мостов. Проблема реставрации мостов, чугунных решеток набережных и парков, металлодекора на фасадах зданий решается с применением пескоструйных технологий очистки, что наносит ущерб экологии города, рекам и каналам.

Опыт промышленных применений лазерной очистки показывает, что защита металлоконструкций от коррозии с применением покрытий может быть эффективна только в случае 100% -го удаления поверхностных загрязнений и выполнения работ по нанесению покрытий в течении 4 часов после очистки.

Несоблюдение этих правил приводит к губительным для металлоконструкций последствиям: отшелушиванию нанесенных покрытий, развитию подпленочной коррозии и образованию очагов коррозии в глубине материала. Подмена реставрационных работ покраской не решает проблемы сохранения и может привести к необратимым последствиям - утрате памятников.

При внедрении в процесс проведения реставрационных работ лазерных технологий может быть решен вопрос с экологической безопасностью и получен качественный скачок в защите от коррозии. Обработанные лазерным излучением стали приобретают антикоррозионные свойства даже без применения краски (Рис.28).



а



в

Рис. 28. Вид поверхности с антикоррозионными свойствами: а- поверхность трубы из стали 38Г2С после лазерной обработки, в- поверхность нержавеющей колонны (Индия)

Процесс реставрации - кропотливая работа специалистов. При все возрастающих объемах работ и образующемся дефиците времени целесообразно некоторые операции, например, удаление старой краски с металлодекора, выполнять с использованием роботизированных лазерных комплексов.



а



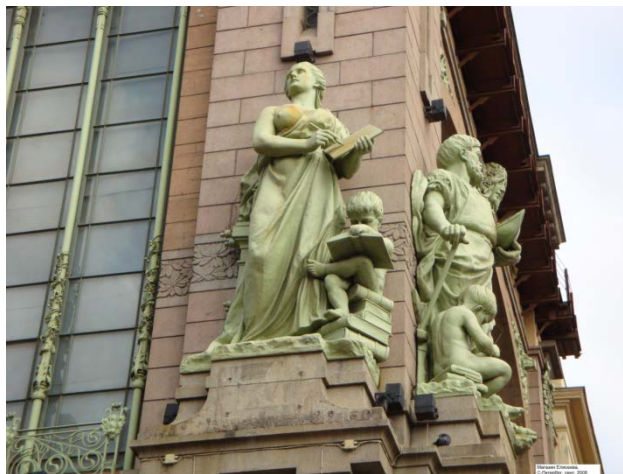
б

Рис. 29 Оловянная статуэтка: а - вид до очистки, б - вид после очистки

В НИУ ИТМО в 2009г организована лаборатория «Лазерной очистки и реставрации памятников культурно-исторического наследия», на базе которой студенты проходят практику и проводят научные исследования по применению лазерных роботизированных комплексов для очистки конструкционных материалов. Лаборатория оснащена новейшим оборудованием, позволяющим разрабатывать технологии для реставрационных работ на современном уровне.



а



б

Рис. 30. Лазерная очистка памятников культуры : а - роботизированный комплекс для обработка поверхностей сложной формы (НИУ ИТМО), б - скульптуры (Елисеевский магазин, Санкт-Петербург)

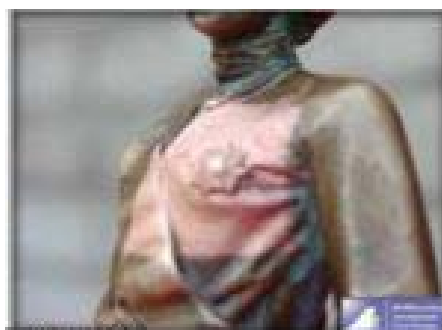
При реставрации разводных мостов проводится целый комплекс работ как по косметическому ремонту металлодекора, так и по ремонту механизмов подъема створа мостов, также относящимся к культурному наследию. При использовании пескоструйных технологий очистки песок попадает не только в Неву, но на рабочие поверхности механизмов, изготовленных вручную старыми мастерами с микронной точностью.

Реставрация - восстановление этих механизмов - требует не только идеальной очистки рабочих поверхностей механизмов, но и возвращения их служебных свойств: формы, микротвердости, шероховатости. Для решения этих задач также должны применяться современные лазерные технологии.

На сильном различии степени поглощения лазерного излучения загрязнениями и основным материалом основаны некоторые специальные методы лазерной очистки. Так, музейные экспонаты из мрамора и других камней очень эффективно очищаются излучением CO_2 -лазеров с длиной волны 10.6 мкм (рис. 31), так как длинноволновое излучение эффективнее поглощается именно загрязнениями органического характера, которые удаляются даже из микротрещин.



Рис. 31. Примеры лазерной очистки мраморных изделий



а)



б)

Рис. 32. Фотографии различных изделий, подвергнутых лазерной очистке:

а) бронзовая статуэтка; б) полоса очистки на мраморном изделии

Лазерное технологическое оборудование для очистки и дезактивации поверхности

Несмотря на многие преимущества лазерных технологий, их широкое внедрение в различных отраслях промышленности до последнего времени ограничивалось рядом значительных технико-экономических трудностей:

- высокой стоимостью лазерных технологических комплексов при сравнительно высоких эксплуатационных затратах;
- сложностью обслуживания лазерного технологического оборудования;
- техническими трудностями интеграции лазерного технологического оборудования в технологические линии, особенно связанные с серийным выпуском продукции;

- низким значением КПД технологических лазеров, который составляет для твердотельных лазеров с ламповой накачкой 2-5% и для газовых CO₂-лазеров 8-12%.

Необходимо отметить, что, несмотря на эти факторы, лазеры давно и успешно применяются для очистки музейных ценностей и памятников культуры, где параметры стоимости и производительности не играют определяющей роли.

Ситуация коренным образом изменилась в результате разработки и освоения серийного выпуска нового поколения лазеров – волоконных одномодовых с непрерывной выходной мощностью до 2 кВт, а также волоконных маломодовых и многомодовых лазеров соответственно до 10 кВт и до 50 кВт непрерывной выходной мощности, с КПД до 30%, благодаря чему их эксплуатационные расходы на энергопотребление и охлаждение оказываются в 3-5 раз меньше, чем у CO₂-лазеров и примерно в 20-50 раз меньше чем у твердотельных лазеров с ламповой накачкой. Волоконные лазеры, оснащенные оптоволоконными системами доставки излучения лазера в зону обработки и имеющие небольшие геометрические размеры, открыли новую технологическую страницу развития и внедрения лазерных технологий в машиностроении и родственных ей отраслях промышленности. Отсутствие в волоконных лазерах юстируемых узлов, а также расходных элементов и материалов обеспечивает высокую надежность их работы, и в процессе эксплуатации такие лазеры не требуют дорогостоящего обслуживания [22].

Более чем восьмилетний опыт эксплуатации оптоволоконных лазеров в промышленности США показал их высокую технико-экономическую эффективность (рис. 33) [23].

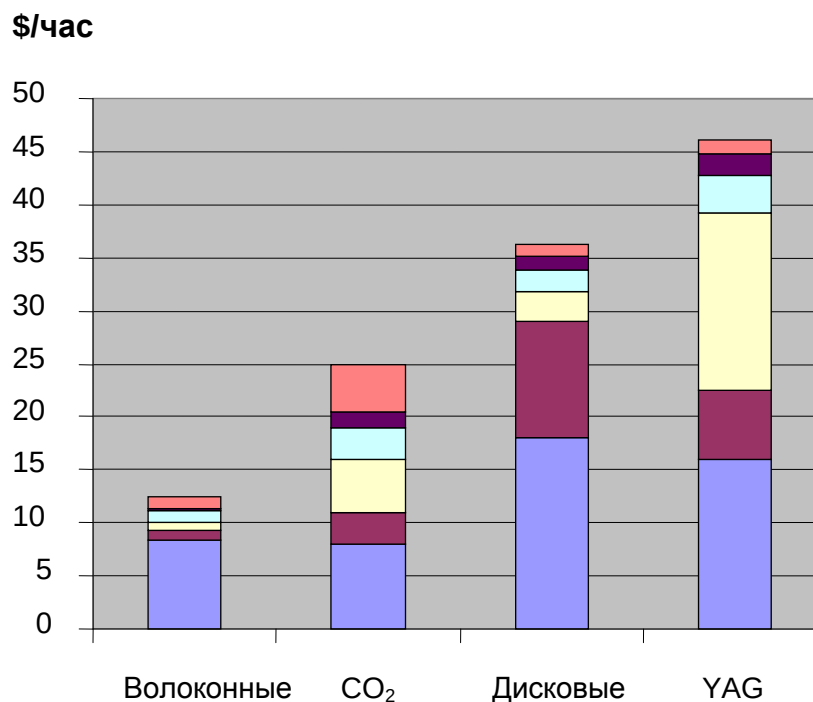


Рис. 33. Соотношение затрат при эксплуатации различных видов лазеров

- – затраты на лазерные газы и газы, необходимые для ведения технологического процесса;
- – затраты в зависимости от занимаемой площади;
- – затраты на заработную плату;
- – затраты на электроэнергию;
- – затраты на запасные части;
- – суммарные остальные затраты;

FIBER – волоконные лазеры;

CO₂ – лазеры на углекислом газе;

DISC – твердотельные дисковые лазеры;

YAG – твердотельные лазеры на алюмо-иттриевом гранате.

Необходимо отметить, что наибольшие уровни мощности волоконных лазеров достигнуты в лазерах на Yb-активированном волокне, генерирующем излучение с длиной волны 1,07 мкм, которое поглощается в металлах лучше, чем излучение с длиной волны 10,6 мкм (CO₂-лазеры). Кроме того, в десять раз меньшая длина волны позволяет получить меньшую расходимость излучения, а значит лучше его сфокусировать. Этим объясняется тот факт, что даже относительно маломощные 100-ваттные одномодовые лазеры обеспечивают резку стали толщиной 1,5 мм со скоростью до 4 м/мин.

Высокое качество лазерного излучения открывает возможность применять длиннофокусную оптику (фокусное расстояние до 2 м), что позволяет реализовать режим дистанционной сварки, существенно упрощающий интеграцию лазерного технологического оборудования в современные роботизированные производственные линии.

Хорошей интегрируемости волоконных лазеров в технологические линии способствует возможность транспортировки луча лазера по оптоволокну в металлизированных «рукавах» диаметром 8-15 мм на расстояние в несколько десятков метров практически без потери мощности и ухудшения пространственных характеристик.

Таким образом, оптоволоконные лазеры имеют многократное преимущество в энергопотреблении, надежности, массогабаритах, простоте сервиса и минимизации расходов по сравнению с CO_2 -лазерами и твердотельными лазерами с ламповой накачкой.

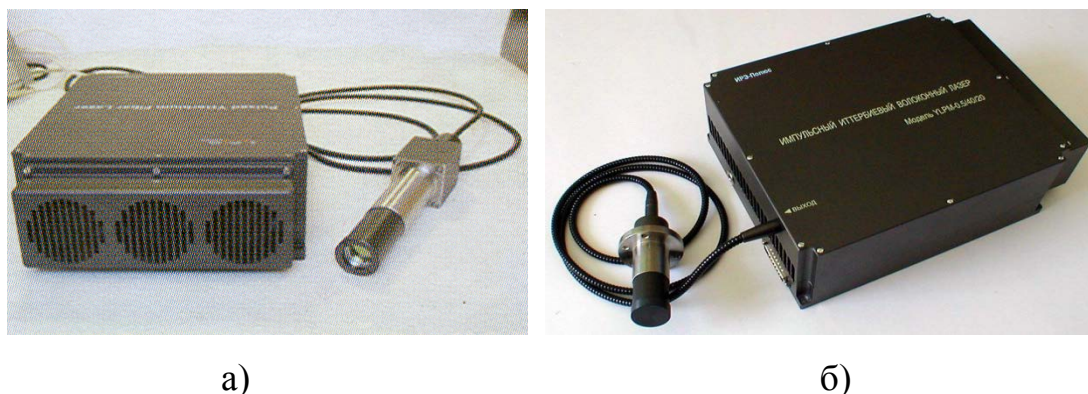
Высокий КПД волоконных лазеров, достигающий уже сейчас 30%, высокий ресурс, превышающий 50000 часов, отсутствие расходных и юстируемых элементов, возможность доставки лазерного излучения по волокну на расстояние до 200 метров и более позволяют говорить о технологических лазерах, как об обычном сварочном или другом технологическом оборудовании, которое легко интегрируется в производственные цеховые условия [24].

Таким образом, оптоволоконные лазеры имеют неоспоримые технические, технологические и эксплуатационные преимущества перед твердотельными YAG:Nd-лазерами и CO_2 -лазерами.

Появление новых типов лазеров - волоконных, дисковых и т.д., имеющих ресурс работы более 50,0 тыс. часов, высокую надежность, небольшие массогабаритные показатели, высокий КПД и низкое энергопотребление, сделало процесс лазерной очистки поверхности экономически целесообразным.

Для лазерной очистки поверхности используются лазеры со средней мощностью от 10 Вт до 1000 Вт.

В настоящее время наибольшее применение для очистки поверхности находят импульсные волоконные лазеры со средней мощностью излучения 20 Вт (рис. 34,а)



*Рис. 34. Волоконный импульсный лазеры для лазерной очистки поверхности:
а) YLR-20, б) мобильный лазер нового поколения*

Новое поколение импульсных волоконных лазеров идеально пригодно для очистки поверхностей, имеющих сложную геометрию. Это сверхкомпактные приборы с ресурсом работы более 100 000 часов с воздушным охлаждением и полным отсутствием каких-либо малоресурсных компонентов.

Технические характеристики лазера YRL-20, который можно использовать для очистки, приведены в таблице 1

Таблица 1

Оптические характеристики

	Мин.	Тип.	Макс.
Режим работы	Импульсный		
Центральная длина волны, нм		1062	1070
Номинальная средняя выходная мощность, Вт	18.0	19.0	20.0
Длительность импульса на частоте 40 кГц, нс	60	100	120
Частота следования импульсов, кГц	20		100
Номинальная энергия в импульсе, мДж		0,5	
Напряжение питания, В		24	25
Полный номинальный ток (при 24 В, 20 °С), А		5.5	7.0
Типичное энергопотребление (при 20 °С), Вт		130	180

Влажность, %	10		95
Габариты, ДхШхВ, мм.	215 x 95 x 286		
Вес, кг			8

Лазерное технологическое оборудование комплектуется системой сканирования луча лазера.

В настоящее время налажено производство мобильных волоконных лазеров, специально предназначенных для очистки поверхности (рис.34,б). Излучающая головка лазера имеет небольшие геометрические размеры и легко умещается в руках (рис. 35).



Рис. 35. Лазерная очистка поверхности с помощью ручной головки

Внешний вид другого серийно выпускаемого мобильного лазерного комплекса для очистки поверхности показан на рис. 36.



Рис. 36. Внешний вид мобильного лазерного комплекса для очистки и дезактивации поверхности

Промышленное оборудование для лазерной очистки производит немецкая фирма CleanLaser, имеющая свои представительства в большинстве промышленно развитых стран. В качестве излучателей применяются АІG-лазеры мощностью до 2 кВт.

В России разработкой технологии и оборудования для очистки и дезактивации с 2001 года занимается предприятие НПП «Лазерные Технологии», первым применившее для этих технологий мощные волоконные лазеры.

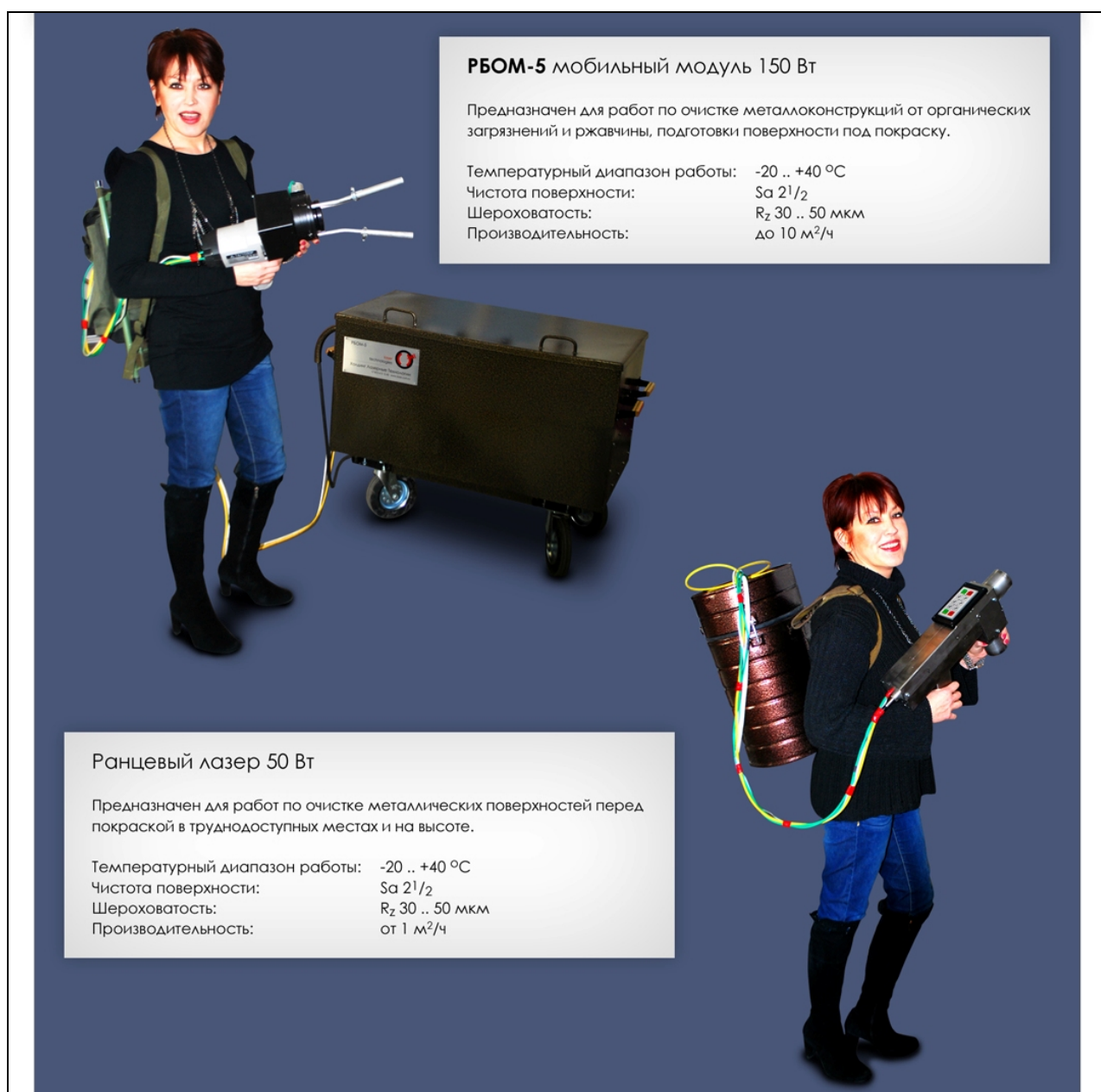


Рис. 37. Мобильный ранцевый лазер для очистки поверхностей с применением волоконных лазеров с воздушным охлаждением

По сравнению с оборудованием фирмы CleanLaser на основе AIG-лазеров, оборудование НПП «Лазерные Технологии» с волоконными лазерами имеет ряд преимуществ: в десятки раз больший ресурс работы лазера, минимальное энергопотребление, минимальные эксплуатационные затраты, габариты и вес. Сравнительные характеристики этих лазерных систем приведены в таблице 2.

Таблица 2

Параметр	Требуется для промышленности	CO ₂	YAG-Nd с ламповой накачкой	YAG-Nd с диодной накачкой	Диодные лазеры	Волоконные лазеры
Выходная мощность, кВт	1...30	1...30	1...5	1...5	1...5	1...30
Длина волны, мкм	Как можно меньше	10,6	1,06	1,06	0,6...0,98	1,07
КПД, %	Как можно больше	8...10	2...3	4...6	25...30	25...30
Дальность доставки излучения волокном, м	10...300	отсутствует	20...40	20...40	10...50	10...300
Стоимость обслуживания, отказ	Как можно меньше	1...1,5	1	4...12	4...10	0,1
Периодичность замены ламп или лазерных диодов, час	Как можно больше	-	300...500	2000...5000	2000...5000	Более 50 000

Преимуществом волоконных лазеров, применяемых в оборудовании НПП «Лазерные технологии», является также воздушная система охлаждения, позволяющая эксплуатировать комплексы во всепогодных условиях. Применяемые сканирующие системы пригодны для работы как оператора, так и робота.

Возможность регулировки параметров лазерного излучения позволяет проводить очистку тонколистовых материалов, выполненных из различных сталей и сплавов без ухудшения свойств поверхности.

4. КОМБИНИРОВАННЫЕ МЕТОДЫ ЛАЗЕРНОЙ ОЧИСТКИ И ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТИ

Моно- и гибридные технологии обработки материалов

Как показывает технико-экономический анализ современных тенденций развития классических «монотехнологий» обработки материалов концентрированными и высококонцентрированными потоками энергии (газопламенных, светолучевых, электродуговых, индукционных, плазменных, лазерных, электроннолучевых и т.д.), они практически полностью исчерпали свои потенциальные ресурсы и возможности для значительного повышения своих технико-экономических показателей.

С момента своего революционного создания, интенсивного внедрения в промышленность и эволюционного совершенствования, развитие монотехнологий перманентно приблизилось к своему экспоненциальному технологическому пределу.

Количественные и качественные ограничения, достигнутые в процессе развития монотехнологий, подтверждают аксиому о том, что универсальных технологий не существует, каждая технология имеет свои преимущества и недостатки, которые определяют ее эффективную технико-экономическую область применения на определенном жизненном цикле.

Создание новых технологических процессов определяется не только необходимостью n -кратного повышения технико-экономической эффективности производства, повышения конкурентоспособности выпускаемой продукции, но и новыми технологическими задачами обработки материалов, обладающих уникальными эксплуатационными свойствами (высокие твердость, жаропрочность, износостойкость и т.п.), задачами ресурсо- и энергосбережения и т.п.

Решение поставленных задач возможно только на основе введения в монотехнологические процессы новых физических эффектов, обусловленных взаимодействием различных энергетических источников с обрабатываемым материалом.

Комплексное объединение (интеграция) различных источников энергии

(монотехнологий) в единый технологический процесс позволяет в значительной мере нивелировать недостатки монотехнологий и получить новые качества, недостижимые при использовании монотехнологий по отдельности.

Анализ зарубежных научных исследований показывает, что создание и развитие новых промышленных технологий для обработки материалов в авиационной, космической, судостроительной промышленности идет в направлении комплексирования известных технологий в гибридные и комбинированные технологические процессы.

Высокая эффективность гибридных технологий (то есть технологий, при которых зона обработки формируется при одновременном воздействии нескольких источников энергии – принцип совмещения различных источников энергии во времени и пространстве) обусловлена появлением синергетических эффектов в технологических процессах при введении энергии от различных источников в обрабатываемую зону.

Эффективность комбинированных технологий (то есть технологий, при которых энергия различных источников вводится в зону обработки последовательно при условии совмещения промежуточных и вспомогательных операций – принцип пространственного совмещения различных источников энергии и разделением их во времени) обусловлена снижением потерь времени и качества за счет исключения и сокращения количества промежуточных и вспомогательных операций.

Как показывает практика, применение гибридных и комбинированных технологий приводит к многократному повышению производительности труда, снижения себестоимости выпускаемой продукции, снижению энергоемкости процессов обработки материалов и т.д. Показательным примером является лазерно-дуговая сварка, которая позволила значительно превзойти показатели каждого из этих отдельно взятых процессов[25].

Гибридные технологии лазерной очистки

В некоторых случаях жизненный цикл изделия предполагает периодической восстановлению защитного слоя, например, слоя краски. Для нанесения нового слоя

окраски необходимо полностью удалять предыдущий. Эта ситуация типична для случая транспортных средств, например, для железнодорожных вагонов. Из-за довольно толстого слоя краски и грунтовки (например, для пассажирских вагонов общая толщина слоя может достигать до 1 мм) здесь всегда применялась очистка пескоструйными методами.

Прямое использование лазерной очистки в описанном выше варианте в данной задаче невозможно из-за очень малой производительности процесса, так как послойное удаление такого массивного слоя краски и грунтовки требует больших энергетических затрат. Поэтому проводили исследование гибридного процесса, идея которого состояла в комбинации воздействия мощного непрерывного лазера и вторичного действия маломощного импульсного [22].

Предполагалось, что мощное тепловое действие непрерывного лазера приведет к сильной деструктуризации слоя краски и грунтовки, нарушении его прочности и связности и облегчит дальнейшее импульсное удаление маломощным лазером. Эксперименты проводили с использованием непрерывного волоконного лазера мощностью 700 Вт, излучение которого фокусировали в пятно диаметром 2 мм. Из корпуса грузового вагона со старой окраской вырезали круги диаметром 300 мм, устанавливали на вращатель и обрабатывали лазерным пучком на разных режимах. Затем проводилась окончательная очистка импульсным волоконным лазером мощностью 10 Вт с разверткой лазерного луча в линию.

Получаемые образцы изображены на рис. 38. Слева – образец после предварительной обработки, справа – образец на котором отдельные зоны очищались до чистого металла импульсным лазером.

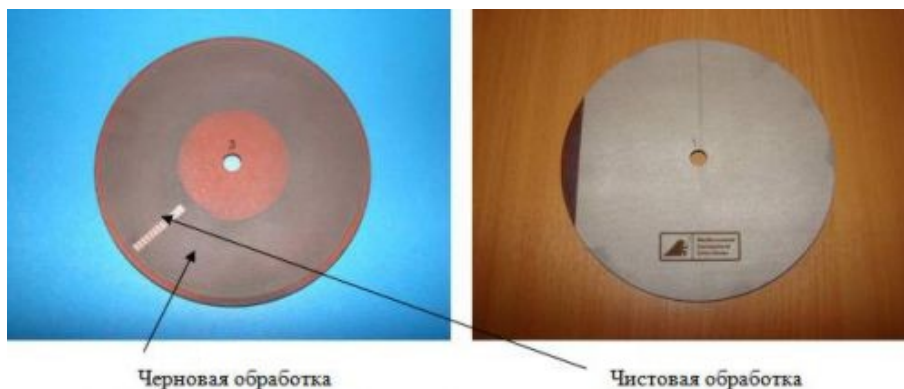
В результате исследований был обнаружен сильный синергетический эффект такого гибридного процесса, другими словами – теоретические предположения полностью оправдались. Получены следующие параметры по производительности процесса: производительность предварительной обработки (лазер 700 Вт) – $7 \text{ м}^2/\text{ч}$, производительность финишной обработки (лазер 10 Вт) – $0,5 \text{ м}^2/\text{ч}$.

Причем, резервы роста производительности для гибридного метода этими результатами далеко не исчерпываются. Действительно, схема разделенного по этапам и по времени гибридного процесса с точки зрения теории далеко не

оптимальна. Дело в том, что на первом этапе процесса проводится деструктуризация поверхностного слоя на всю его толщину, при этом значительная часть непрерывного лазерного потока уходит на нагрев основного металла за счет теплопроводности и теряется из полезного баланса процесса. Гораздо эффективнее было бы с точки зрения общетеоретических представлений производить деструктуризацию послойно и послойно удалять «рыхлый» материал импульсным лазером. Другими словами – нужно совместить воздействие двух видов излучения в одном процессе.



а)



б)

Рис. 38. Схема, а) и результаты б) комбинированного процесса лазерной очистки

Для волоконных лазеров такое совмещение не представляет особой проблемы, так как оба типа излучения передаются к рабочей головке по оптическим волокнам, более того, при необходимости можно сконструировать

специальный «комбинированный» волоконный излучатель, в котором оба типа излучения генерируются и передаются по единому оптическому кабелю. Причем непрерывная часть излучателя может быть выполнена не в лазерном варианте, а в варианте «диодного» излучателя, в котором в выходное волокно собирается излучение от накачивающих диодов, поскольку нам не требуется фокусировка в малые пятна. При такой схеме реализуется общий КПД от розетки порядка 40..50%. Результаты моделирования дают приведенные в таблице 3 оценки итоговой производительности очистки для слоя краски около 0,5 мм [22].

Таблица 3

Материал	Используемые серийные волоконные лазеры	Производительность	Оценка себестоимости обработки
Слой грунтовки и краски толщиной 0.5 мм	Лазерный диодный излучатель непрерывный мощностью 2 кВт + импульсный лазер мощностью 100 Вт	25 м ² /ч	12 руб/м ²
	Лазерный диодный излучатель непрерывный мощностью 5 кВт + импульсный лазер мощностью 200 Вт	60 м ² /ч	8 руб/м ²

Комплексная лазерная обработка поверхности

Очистка поверхности от окалины, окисных пленок, загрязнений органического и неорганического характера не может решить всех проблем, подготовки поверхности к эксплуатации, так как не решает задачи устранения технологической наследственности поверхностного слоя.

Дефекты поверхностного слоя содержат различные газы – кислород, водород, азот, пары воды и т.д., кроме того поверхностный слой может иметь повышенное содержание серы и фосфора. Если, например, после абразивоструйной обработки

нанести коррозионностойкое полимерное защитное покрытие, то через некоторое время вследствие протекания различных химических реакций в дефектах поверхностного слоя может развиваться надпленочная коррозия.

Поэтому любая технологическая операция очистки поверхности не будет являться полноценной, если не будет решен вопрос о технологической наследственности поверхностного слоя.

Комплексная лазерная обработка поверхности позволяет не только очистить поверхность от ржавчины, окалины, органических и неорганических загрязнений, рафинировать поверхностный слой, решить проблемы технологической наследственности, но и получить гомогенный изотропный поверхностный слой и поверхность, близкую к ювеноальной, что устраняет проблемы микрохимической неоднородности механических и физико-химических свойств.

Очистка поверхности от различного рода загрязнений и окислов имеет исключительно важное значение при нанесении разнообразных покрытий, имеющих различное служебное назначение – краски, лаки, гальванические, газотермические покрытия. Высокая степень очистки поверхности является хорошей предпосылкой повышения адгезионного взаимодействия покрытий с поверхностью. Существующие классические методы очистки поверхности – химические, гальванические, пескоструйные и т.д. не в полной мере удовлетворяют современным требованиям промышленного производства по качеству очистки, по производительности и экологическим требованиям к технологическим процессам.

Лазерная очистка поверхности позволяет достичь чистоты поверхности, близкой к ювеноальной, то есть атомно-чистой, что обеспечивает устойчиво-высокое значение адгезионного взаимодействия с наносимым покрытием и позволяет избежать его отслаивания в процессе эксплуатации.

Физическая сущность комплексной лазерной обработки поверхности состоит в учете всех факторов воздействия лазерного излучения на вещество в пространственно-временной взаимосвязи, а именно, прямого лазерного нагрева, ударно-механических и плазменных, а иногда и плазмо-химических воздействий (Рис.39), которые связаны между собой прямыми и обратными связями и которые в этой совокупности определяют полный результат воздействия на материал. Таким

образом, очистка поверхности, например, часто сопровождается наклепом металла, а значит, его упрочнением, повышением коррозионной стойкости и износоустойчивости и т.д.

Некоторые примеры таких новых комплексных видов лазерной обработки поверхности приведены ниже.

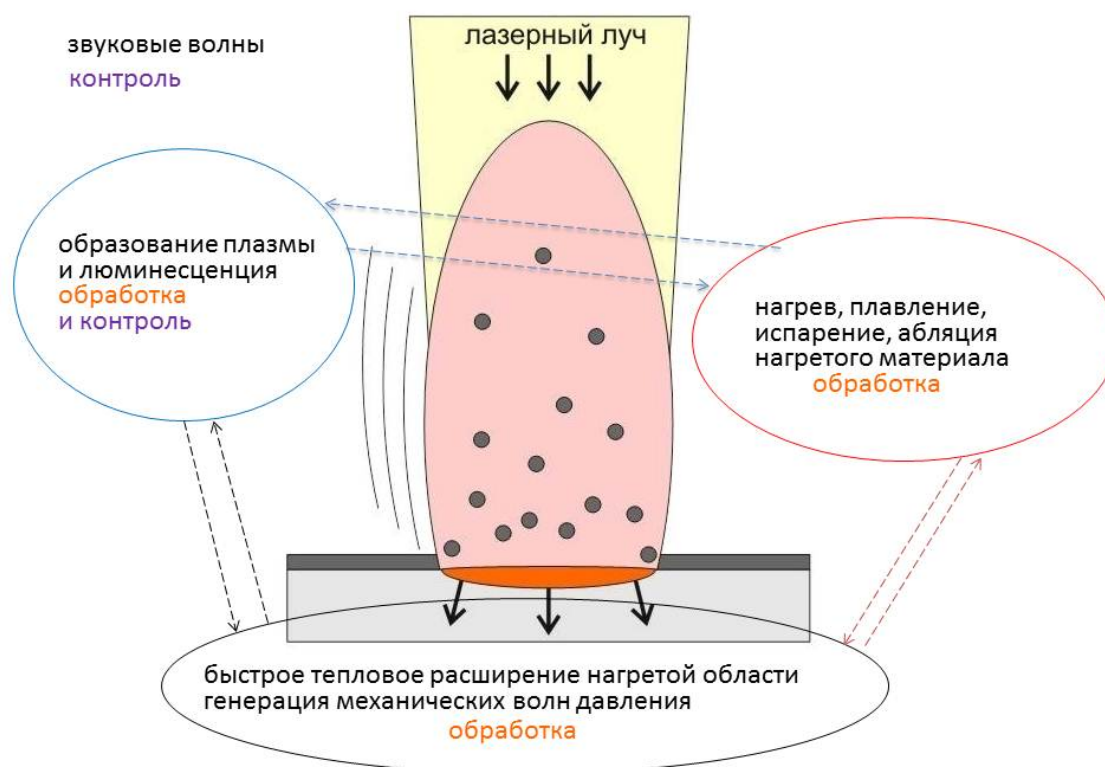


Рис. 39. Общая схема процессов воздействия мощного лазерного излучения на материалы при очистке учетом связей между тепловыми и механическими (термомеханическим) процессами в твердом теле и в окружающей среде и их совместного воздействия.

Лазерно-плазменные технологии обработки поверхности

До настоящего времени технологиям лазерно-плазменных методов обработки материалов не уделялось должного внимания, так как считалось, что лазерная плазма, образуемая при ведении технологических процессов лазерной обработки, отрицательно сказывается на технико-экономической эффективности обработки материалов и поэтому принимались самые различные способы борьбы с плазмообразованием. Но последние исследования показали, что лазерная плазма обладает рядом полезных свойств, которые можно эффективно использовать в

технологических процессах лазерно-плазменной обработки материалов при атмосферных условиях.

Идеология гибридных технологий лазерно-плазменной обработки материалов строится на технологических свойствах приповерхностной лазерной плазмы оптического разряда в парах металла, физических эффектах взаимодействия лазерной плазмы и лазерного излучения с обрабатываемым материалом, синергетических эффектах в зоне обработки.

Лазерно-плазменное рафинирование поверхностного слоя

Для исследования возможности лазерно-плазменного рафинирования поверхности сталей была выбрана сталь A12, которая содержит очень большое количество серы (более 0,1%) и фосфора (более 0,1%).

Проведенные на электронном микроскопе LEO 1455 VP (Англия) исследования химического состава (точность измерений 0,005%) поверхностного слоя стали A12, полученного методом лазерно-плазменного рафинирования поверхности, показали отсутствие серы и фосфора (рис. 40, 41).

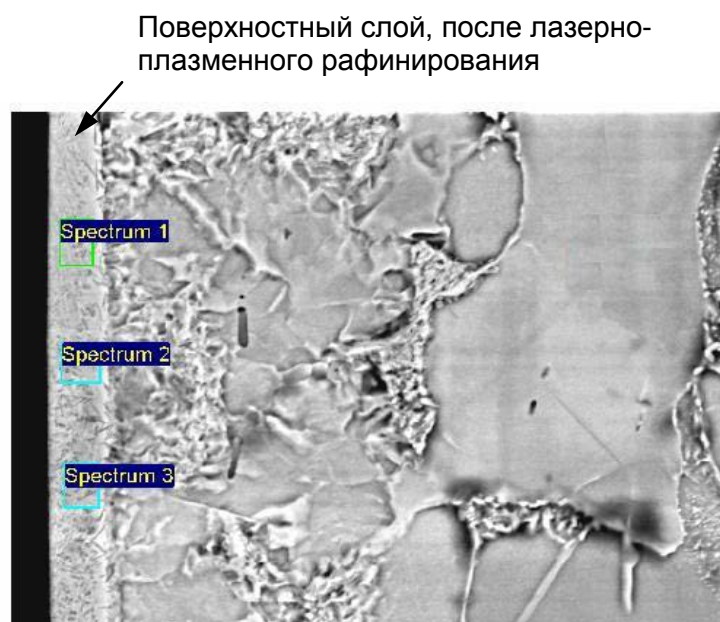


Рис. 40. Места пробы (Spectrum 1,2,3) на химический состав на шлифе поверхностного слоя стали A12 после лазерно-плазменной обработки, где Spectrum 1,2,3 места проб на химический состав

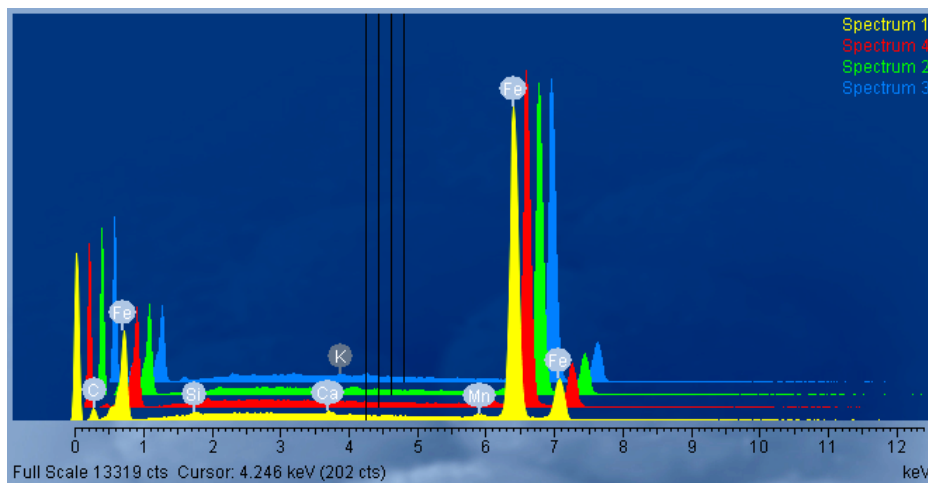


Рис.41. Спектрограммы химических элементов в поверхностном слое стали A12 после лазерно-плазменной обработки в местах проб Spectrum 1,2,3

Таким образом, содержание серы и фосфора в поверхностном слое стали A12 после обработки в инертной лазерной плазме стало менее 0,005%, то есть уменьшилась до уровня чистой стали, что позволяет улучшить механические свойства поверхностного слоя [26].

Уменьшение содержания серы и фосфора в поверхностном слое до уровня чистой стали снижает межкристаллитную коррозию и развитие подпленочной коррозии.

Лазерно-плазменное «залечивание» поверхностного слоя

Технология лазерно-плазменной обработки позволяет устранить в поверхностном слое различного рода дефекты (микротрещины, поры, раковины, закаты, волосовины и т.п.). Данная технология называется технологией лазерно-плазменного «лечения» поверхностного слоя. Фактически это высокоскоростная микрометаллургическая операция - переплав поверхностного слоя, проводимая лазерным пучком и приповерхностной лазерной плазмой, позволяющая устранить дефекты поверхностного слоя – поры, раковины, микротрещины, закаты, неметаллические включения, газы и другие дефекты.

После лазерно-плазменного рафинирования поверхностного слоя стали A12 исчезают сульфидные и фосфатные включения (рис. 42), формируется однородная

изотропная микроструктура поверхностного слоя повышенной твердости и износостойкости.

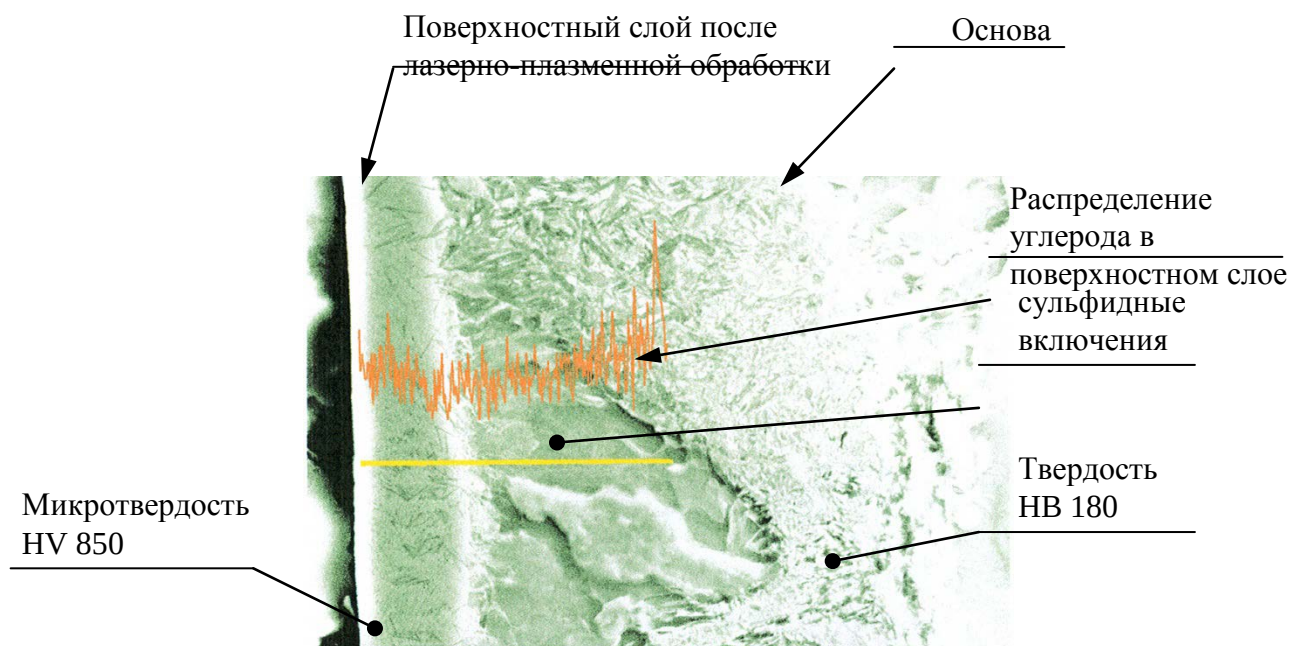


Рис. 42. В поверхностном слое после лазерно-плазменного рафинирования не наблюдается дефектов, вызванных сульфидными включениями

Лазерно-плазменная микрометаллургическая обработка поверхностного слоя позволяет получить структуры с высокой гомогенностью и изотропными свойствами, высокой микрохимической однородностью, что позволяет обеспечить устойчиво-высокое значение адгезии наносимого покрытия с поверхностью и избежать развития подпленочной коррозии.

Лазерно-плазменная полировка поверхности

Долговечность и себестоимость изготовления деталей машин в значительной мере определяется правильностью и обоснованностью выбора и назначения параметров качества их поверхностных слоев. В целом по машиностроению требования, в частности к шероховатости поверхностей деталей, завышено в 2 раза, что приводит к удорожанию их изготовления на 25 % без увеличения долговечности машин, а в отдельных случаях при ее снижении. Поэтому выбор и назначение параметров качества поверхностного слоя деталей машин является

одной из основных проектных оптимизационных задач конструктора, определяющая надежность и долговечность изделий [12].

Существующие в настоящее время традиционные методы полирования поверхности – механические, химические и электрохимические, ультразвуковые не в полной мере удовлетворяют современным требованиям машиностроения по производительности, себестоимости, технологической трудоемкости и получаемому качеству.

В настоящее время полирование поверхности, имеющей сложную геометрическую форму, например прессформ, производится методом ручной механической обработки, посредством применения специальных (алмазных) паст, т.е. последовательно слой за слоем вручную снимается поверхностный слой металла, в результате класс обработки рабочей поверхности прессформы постепенно повышается. Процесс механического полирования поверхности является очень длительным и трудоемким. Ручной труд, паста и время – вот основные составляющие финишного полирования поверхности.

Одним из перспективных современных направлений, позволяющих заменить ручной труд при полировании сложных 3D-поверхностей, является гибридная технология лазерно-плазменного полирования.

Шероховатость поверхности стали после механической токарной обработки показана на рис. 43.

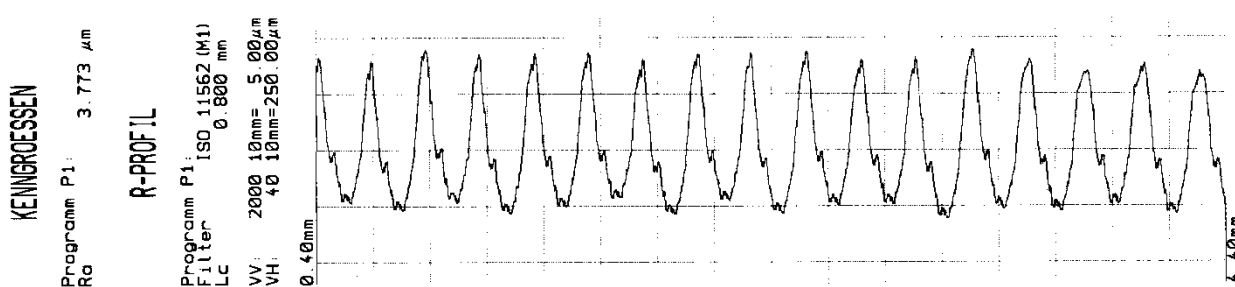


Рис. 43. Исходный R-Profil поверхности образца из инструментальной стали после токарной обработки ($R_a = 3,77$)

Как и другие методы лазерной обработки, метод лазерной полировки обладает высокой производительностью, локальностью, точностью, широкими

возможностями контроля и управления процессом обработки, простотой и экологической чистотой. Лазерная обработка не требует применения механического абразива и адаптированных к поверхности инструментов. Метод лазерной полировки может быть применен к широкому классу материалов – от металлов до стекла. Применение метода особенно предпочтительно при обработке асферических поверхностей и поверхностей, не являющихся поверхностями вращения. Действие поверхностного натяжения при лазерном поверхностном нагреве сглаживает рельеф шероховатой поверхности, а также способствует отжигу приповерхностного слоя и улучшению его структуры.

Физический механизм лазерного полирования поверхности (сглаживания шероховатостей и уменьшения их высоты) связан с движением расплава под действием сил поверхностного натяжения, направленным на уменьшение площади свободной поверхности,. Для успешной полировки поверхности с шероховатостью $R_{\max}$ в режиме сканирования пучком излучения диаметром d со скоростью V необходимо проплавление поверхности на всю толщину шероховатого слоя, т.е. чтобы мощность излучения превышала пороговое значение

$$P_{\text{пор}} = \rho d R_{\max} V L_{\text{пл}},$$

где ρ и $L_{\text{пл}}$ — соответственно плотность и удельная теплота плавления материала. Оптимальная скорость сканирования зависит от вязкости расплавленного материала: чем больше вязкость, тем медленнее должно быть сканирование, чтобы успело произойти сглаживание поверхности до остывания материала в зоне обработки. Так, допустимая скорость сканирования при полировке стекла много меньше, чем при полировке металла.

Процесс лазерно-плазменного полирования поверхности деталей цилиндрической формы показан на рис. 44.

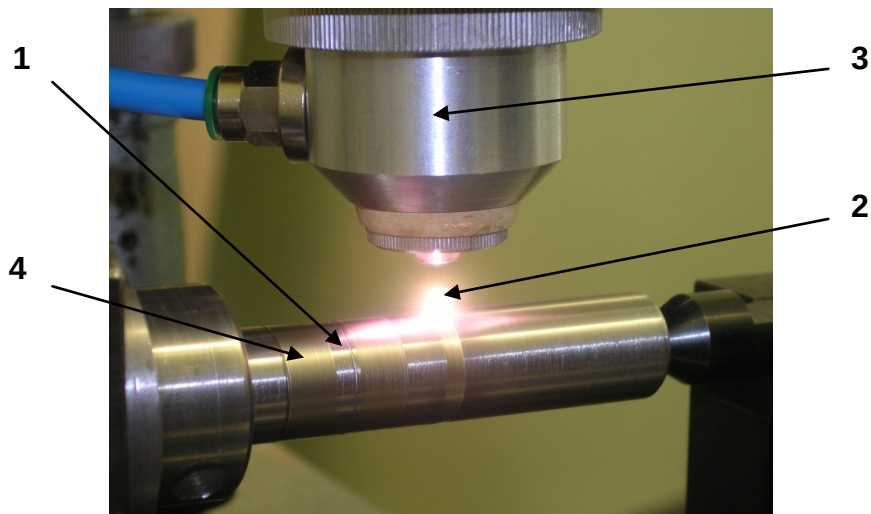


Рис. 44. Технологический процесс лазерно-плазменного полирования поверхности образцов, где: 1 – полируемая деталь, 2 – приповерхностная лазерная плазма, 3 – плазматрон, 4 – полированная поверхность.

Шероховатость поверхности стали после лазерного полирования представлена на рис. 45.

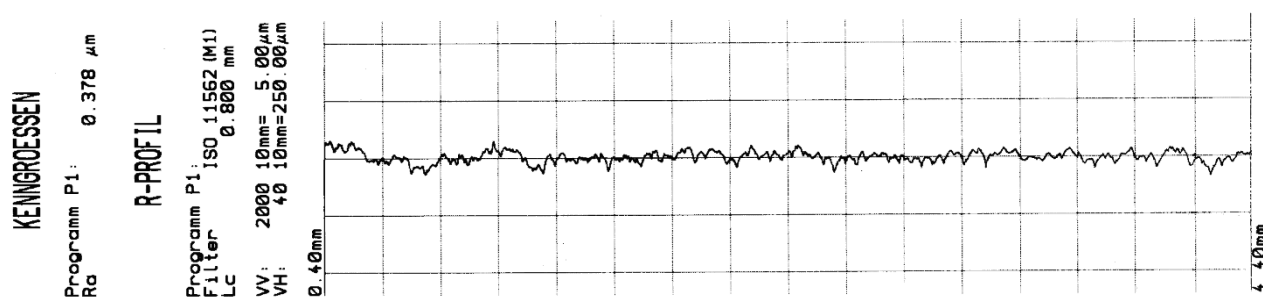


Рис. 45. R-Profile поверхности образца из инструментальной стали после лазерно-плазменного обработки ($R_a = 0,37$) в режиме «чернового» полирования.

Как видно из рис. 45, лазерно-плазменная обработка поверхности в режиме “чернового” полирования позволяет улучшить показатель R_a практически в 10 раз.

Производительность лазерного полирования поверхности в режиме “грубого” полирования составляет несколько $\text{см}^2/\text{мин}$ и зависит от мощности лазерного излучения и исходной шероховатости.

Лазерное полирование поверхности позволяет заменить ручное механическое полирование и производить полирование сложных 3^x-мерных поверхностей. Лазерное полирование позволяет получить глянцевую поверхность металла, (рис.

46) причем, никакой дополнительной механической обработки поверхности после лазерно-плазменного полирования не требуется.



Рис. 46. Полированные лазером вкладыши прессформ

Лазерно-плазменное полирование позволяет производить структурирование геометрии R-Profil поверхности с параметром $R_z = 2...3$ мкм.

Контроль процессов лазерной очистки методом лазерно-искровой эмиссионной спектроскопии

Качественный сдвиг в вопросах качества лазерной очистки возможен при введении оптической обратной связи в этот процесс на основе его контроля методом лазерно-искровой эмиссионной спектроскопии (ЛИЭС)

Как мы видели выше, процесс лазерной очистки состоит в удалении поверхностных загрязнений путем их перевода в газообразную или пылевую фракцию за счет лазерного нагрева. В первом случае очистка носит испарительный характер, когда большая часть энергии лазерного излучения тратится на нагрев поверхности – повышение потенциальной энергии поверхностных атомов и молекул и меньшая - на сообщение им кинетической энергии – тепловых скоростей, с которыми испаренные частицы собственно и удаляются с поверхности. При ударном механизме очистки примеси удаляются за счет возбуждения в материале ударной волны и улетают вместе с волной разгрузки в мелкодисперсной пылевой фракции; в этом случае температура нагрева

значительно ниже, а скорости разлета, как правило, выше за счет того, что большая доля энергии лазерного излучения переходит в кинетическую энергию частиц.

В любом случае при взаимодействии лазерного излучения (с параметрами, характерными для процесса лазерной очистки) с металлом тонкий поверхностный слой быстро разогревается и возникает «лазерная искра», излучающая свет. Спектр излучаемого света несёт информацию о химическом составе поверхности. Это явление можно использовать в целях контроля качества очистки.

Именно на лазерном испарении и спектральном анализе испаряемых с поверхности объекта атомов основан метод лазерно-искровой эмиссионной спектроскопии (ЛИЭС) [27]. Сущность ЛИЭС как раз и состоит в возбуждении лазерной плазмы, последующей регистрации спектров ее излучения и их анализе (рис. 47).

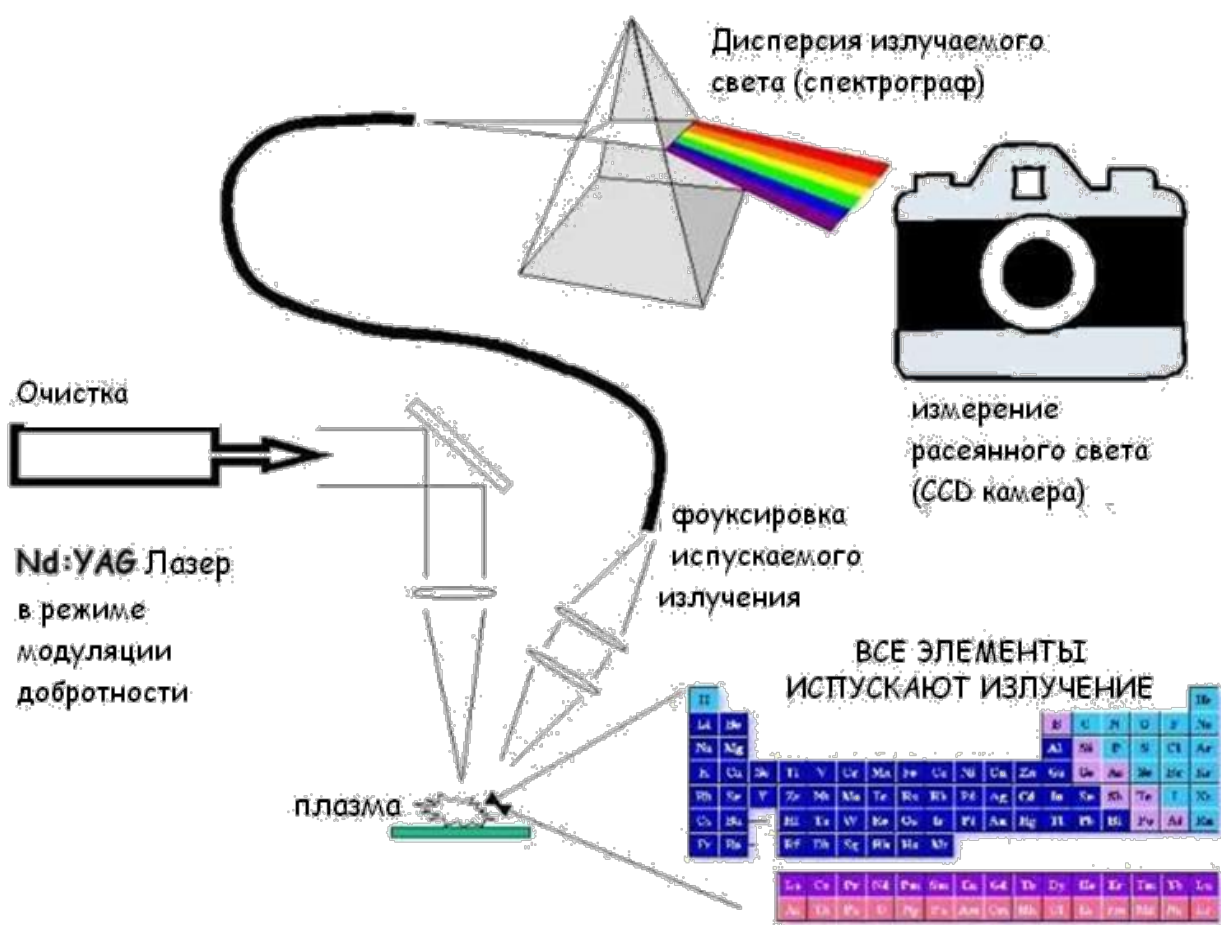


Рис. 47. Принципиальная схема лазерно-искровой эмиссионной спектроскопии

На кафедре Лазерных технологий и экологического приборостроения НИУ ИТМО предложен спектральный метод контроля качества очистки металлов [28]. Основная идея метода основана на том, что слой поверхностных примесей-загрязнений металлов практически всегда содержит кислород, а основной материал кислорода не содержит. Эта идея получила свое подтверждение в экспериментах по очистке старой меди и старого серебра при помощи Nd:YAG лазера (50 мДж, 12 нс) и спектроскопических исследованиях этого процесса при помощи спектрального анализатора (компактного спектрометра SPM002 фирмы OFIR).

Эксперименты проводились таким образом, что во время каждого импульса очистки (с 1 по 6, рис. 48, д, е) снимался спектр плазмы факела продуктов очистки (рис. 48, а, б, верхний красный спектр - 1-ый импульс, нижний черный - 6-ой). Затем спектры были идентифицированы: как и ожидалось, основными элементами в них оказались медь и кислород, и серебро и кислород соответственно объектам. Затем была построена зависимость соотношения кислорода к меди и кислорода к серебру в последовательных импульсах очистки от 1-го к 6-му (рис 48, в, г). Из рис. 48 в, г отчетливо видно, что, начиная с 3-го импульса очистки, количество кислорода в продуктах очистки резко падает, что полностью соответствует результатам собственно очистки и подтверждается как микроскопическим исследованием, так и внешним видом объектов (рис. 48 д, е). Таким образом, зафиксировано значительное уменьшение интенсивности линий кислорода при повторной обработке. Это существенный результат, который позволяет рассчитывать на создание методики оценки степени очистки поверхности (чаще всего это сильно корродированная сталь) от радиоактивных загрязнений по количеству кислорода в спектре факела, а также открывает перспективы для создания системы обратной связи при лазерной очистке.

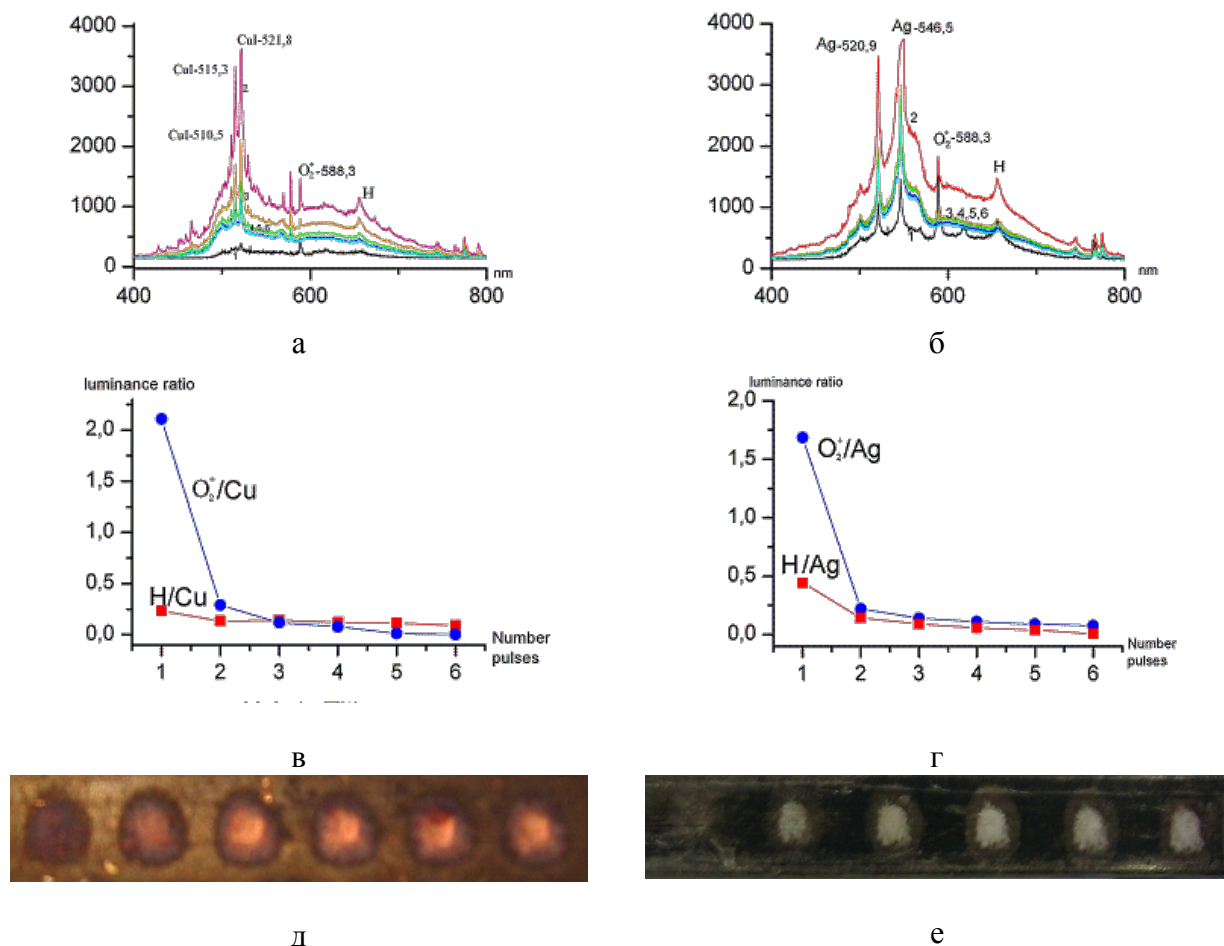


Рис.48. Спектр лазерной искры при очистке меди и серебра
 а – спектр очистки меди
 б – спектр очистки серебра
 в, г – зависимости содержания кислорода от стадии очистки
 д, е – фотографии образцов из меди и серебра соответственно

Таким образом, интенсивность линий кислорода, содержащегося в связанном состоянии в самом окисле, может являться критерием для определения степени чистоты, а также полезным сигналом в схеме системы on-line контроля самого процесса очистки.

В ходе экспериментов с технологическим импульсным волоконным лазером были записаны эмиссионные спектры парогазового факела, возникающего при последовательном сканировании поверхности очищаемого объекта из корродированной стали Ст45 лазерным излучением. Средняя мощность лазера составляла 10 Вт, частота следования импульсов 20 кГц, длительность импульса 100 нс, диаметр пятна 70 мкм, что соответствует плотности мощности излучения $1,3 \cdot 10^{12}$ Вт/м².

Из полученных эмиссионных спектров видно, что интенсивность дублета кислорода (588,86 нм и 589,46 нм) существенно снижается после пятого прохода, что может свидетельствовать о практически полном удалении коррозии (рис. 49,а).

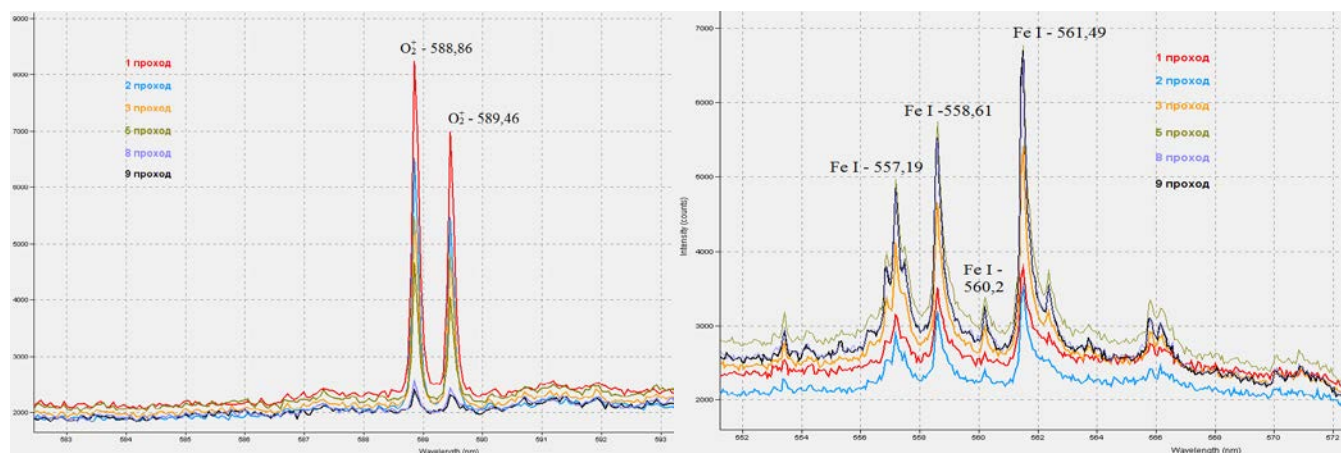


Рис. 49. Изменение интенсивностей линий (дублета) кислорода (а) и линий железа (б) в течение девяти проходов лазерного излучения.

Однако, из проведенных экспериментов видно также, что после пятого прохода вместе с уменьшением интенсивности линий кислорода интенсивность линий железа начинает резко возрастать (рис. 49,б), что говорит о начале существенной эмиссии подложки и о необходимости снижения мощности лазерного источника, или, в крайнем случае, о прекращении процесса очистки. Данные закономерности проиллюстрированы на рис. 50.



Рис. 50. Зависимость отношения интенсивности линии кислорода ($O_2^+ - 588,86$ нм) к линии железа ($Fe I - 558,61$ нм) от числа проходов лазерного излучения.

Таким образом, спектр излучения лазерного факела, возникающего при очистке поверхности металлов, несёт достаточно информации для идентификации различных химических элементов.

Методика диагностики процесса лазерной очистки заключается в том, что выбирается наиболее мощная спектральная линия очищаемой подложки (наиболее вероятный переход), возбуждающаяся при данных параметрах лазерного излучения и её интенсивность соотносится с интенсивности линии кислорода. Полученная пропорция, убывающая с числом проходов, позволяет контролировать степень лазерной очистки и не разрушить саму подложку. Например, в проведенных экспериментах такое отношение составило 0,53, что соответствует шестому проходу лазерного излучения (рис.49). Полученные данные свидетельствуют об эффективности метода ЛИЭС, позволяющего контролировать процесс лазерной очистки в реальном времени. Заметим, что поскольку в большинстве случаев радионуклиды находятся в составе оксидных пленок корродированных слоев, то данный метод может быть применен также и для контроля процесса дезактивации.

На основе проведенных экспериментов может быть разработана система автоматического регулирования процесса лазерной очистки, представленная на рис 51, где вместо универсального спектрального прибора используется аналитический спектральный фильтр (разумеется, созданный, откалиброванный на конкретную примесь).

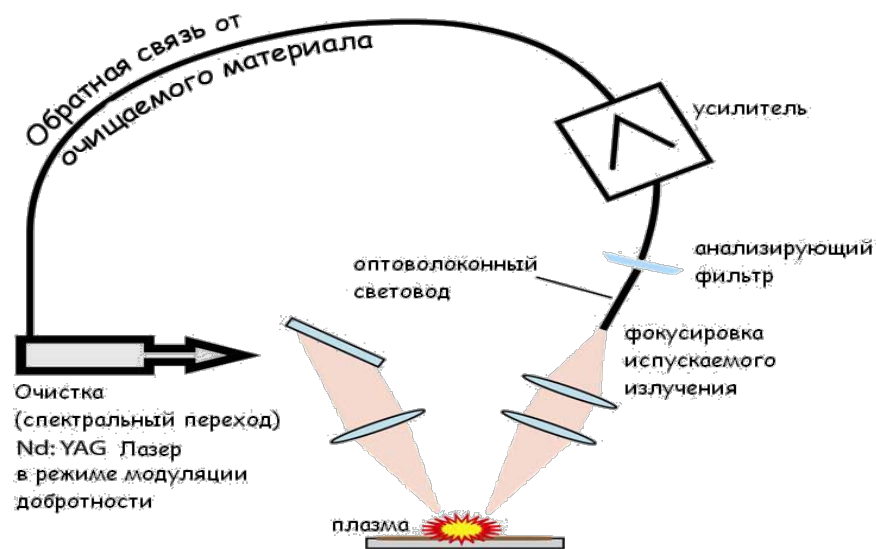


Рис. 51. Принципиальная схема лазерной очистки с обратной связью при помощи спектрального анализа

В качестве элемента обратной связи такой системы должен выступать волоконный спектрометр, спектральный диапазон которого должен лежать в области возбуждения характерных линий подложки и линий кислорода.

Таким образом, спектральный метод контроля позволяет не только судить о степени очистки поверхности металла от оксидов, ржавчины и других поверхностных слоев, но также предотвратить разрушение основного металла – при реставрации произведений искусства, ювелирных украшений и т.д. и поддается автоматизации.

5. ТЕХНИКО–ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ ЛАЗЕРНОЙ ОЧИСТКИ

Роботизация и автоматизация лазерной очистки поверхности

В начале 80^х годов прошлого века в технологически развитых странах начался новый этап научно-технической революции, связанный с созданием, быстрым совершенствованием и широким внедрением во все сферы человеческой деятельности персональной вычислительной и информационной техники, роботов, лазерной техники и технологий, которые оказали значительные социально-экономические последствия на развитие промышленной индустрии и человеческой цивилизации.

Данный этап научно-технической революции явился, наверно, последним связующим звеном на пути к новой научно-технической революции, связанной с нанотехнологиями. По мнению многих специалистов, компьютерные системы управления, роботы, лазеры будут способны заменить человека во многих отраслях промышленности, избавив его от тяжелого физического и монотонного труда, значительно повысят производительность труда, освободят человека от работы с вредными условиями труда в сварочном, металлургическом, гальваническом и многих других видах производств.

Изменится сам характер трудовой деятельности человека, все или почти все будут заниматься интересным, творческим трудом, требующим высокой квалификации, мобилизации всех интеллектуальных способностей личности для развития науки, производства, литературы, искусства.

Как показывает история развития промышленной индустрии, под влиянием научно-технической революции происходят не только существенные трансформации в содержании труда, квалификации, численности инженерно-технических работников, но и серьезные изменения в структуре спроса на рабочую силу. Новая техника и технология предъявляют повышенные требования к техническому, организационному и кадровому обеспечению производства. Одной из тенденций, порождаемых развитием современного этапа научно-технической революции, является вытеснение рабочей силы из производства товаров и услуг. Сокращение потребности в рабочей силе в той степени, в которой оно ведет к экономии на заработной плате, является одной из главных задач любого производителя продукции.

Социально-экономический эффект от внедрения лазерных технологий можно рассмотреть на примере лазерных роботизированных комплексов.

В интеграции компьютерных систем управления, роботов и технологических лазеров с оптоволоконными системами доставки луча лазера в зону обработки наиболее ярко проявляется гибкость луча лазера как технологического инструмента. Роботизированные лазерные технологические комплексы имеют ряд неоспоримых преимуществ перед рабочими.

Во-первых, они физиологически никогда не устают, что позволяет говорить о высокой технологической воспроизводимости процессов обработки материалов. Во-вторых, они могут работать практически в две, три смены без перерывов на обед, шесть дней в неделю. Седьмой день затрачивается на регламентное обслуживание. В-третьих, лазерным роботизированным комплексам не требуется отпуска, они не болеют и им соответственно не требуется оплата по больничным листам. В-четвертых, они в меньшей степени подвержены инфляционным процессам, так как это проявляется косвенно через обслуживающий технический персонал. В-пятых, лазерные роботизированные комплексы работают с высокой производительностью труда, которая не зависит от начала или окончания рабочего дня. Собственно для таких комплексов стирается понятие продолжительности рабочего дня, так как современным технологическим оптоволоконным лазерам и роботам гарантируется ресурс непрерывной работы в несколько тысяч часов.

Таким образом, современные лазерные роботизированные технологические комплексы социально независимы, что и определяет их высокую технико-экономическую эффективность внедрения и соответственно быструю окупаемость.

Необходимо отметить, что роботизированные лазерные технологические комплексы стимулируют не только рост производительности труда, но и повышение эффективности использования материалов, топлива, энергии и т.д.

Современные волоконные и твердотельные лазеры с диодной накачкой, оснащенные оптоволоком, легко стыкуются с роботами и открывают новые технологические возможности в промышленности для очистки поверхности.

На рис. 52,53 показаны роботизированные комплексы для лазерной очистки поверхности деталей автомобильного корпуса от загрязнений перед нанесением лакокрасочного покрытия.

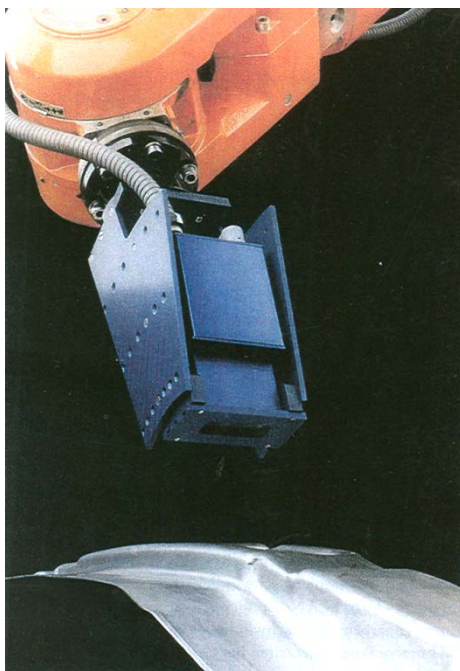


Рис. 52. Роботизированный комплекс для лазерной очистки поверхность

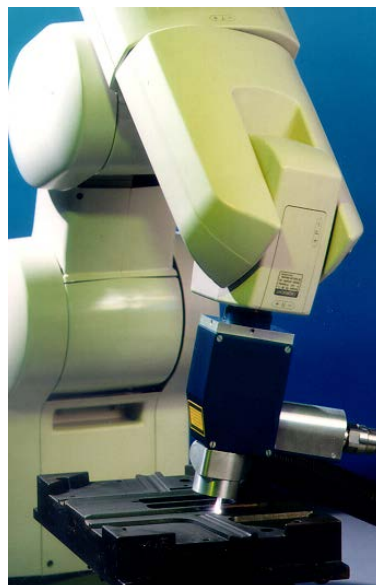


Рис. 53. Роботизированные комплексы для лазерной очистки поверхности

Лазерные технологические комплексы легко интегрируются в производство ремонтных работ взамен экологически проблемных традиционных технологий абразивной очистки.

Пример высокоэффективного применения лазерной очистки поверхности в показан на рис. 54.



Рис.54. Практические примеры высокоэффективного применения лазерной очистки поверхности: очистка фланцевых соединений от ржавчины взамен пескоструйной технологии

Производительность лазерной очистки поверхности

Производительность лазерной очистки поверхности от органических и неорганических загрязнений зависит от вида загрязнений (окисные пленки,

ржавчина, окалина, масла, консерванты, краска, лаки и т.д.), а также от толщины удаляемого покрытия и средней мощности луча лазера.

В таблице 4 [22] приведены экспериментальные данные по очистке различных материалов и различных покрытий и загрязнений, полученных на волоконном лазере с длиной волны $\lambda = 1,06$ мкм и средней мощностью 10 Вт. При повышении средней мощности лазера указанная в таблице 1 производительность может быть прямо пропорционально увеличена в соответствующее число раз.

Таблица 4

Материал	Покрытие/загрязнение	Ориентировочная производительность, м ² /ч
Металлы и сплавы	Окисные пленки	0,3...0,6
Сталь	Ржавчина с толщиной слоя до 100 мкм	0,15...0,3
Металлы и сплавы	Масла и прочие консерванты	2...5
Металлы и сплавы	Краска порошковая слой 50...100 мкм	0,2...0,4
Сварные швы перед покраской	Окисные структуры и остатки окалины	0,1...0,4
Пресс-формы	Сложные загрязнения от технологического процесса	0,3...0,5

По данным, взятым из немецкого журнала «Lasermarkt» 2000, р. 54-56. «Laser reinigt präzise und umweltfreundlich», производительность лазерно-плазменной очистки поверхности от ржавчины для лазера ($\lambda = 1,06$ мкм) средней мощности 1,0 кВт составляет 6...8 м²/час. Производительность лазерной очистки поверхности от окисных пленок составляет 7,2 м²/час для лазера средней мощностью 120 Вт и 21...28 м²/час для лазера средней мощностью 500 Вт, с длиной волны $\lambda = 1,06$ мкм.

При лазерной очистке поверхности выгорания углерода и, соответственно, изменения структурно-фазового состояния поверхностного слоя не происходит, и зона термического влияния практически отсутствует.

Необходимо отметить, что скорость очистки поверхности от окисных пленок зависит от вида окисных пленок, их тугоплавкости и химического состава.

Оценочное значение себестоимости лазерно-плазменной очистки поверхности лопаток газоперекачивающих станций

Расчет оценочного значения себестоимости лазерно-плазменной очистки 1 м² поверхности покрытой окисной пленкой произведем для 50 Вт лазера. Примем производительность очистки поверхности от окисной пленки – $\Pi = 1,5 \text{ м}^2/\text{час}$. Данные для расчета оценочного значения себестоимости лазерной очистки пера лопатки турбины приведены в таблице 5.

Таблица 5

Количество рабочих (операторов лазерных установок), работающих на лазерном комплексе	1 чел.
Заработная плата (с учетом северного коэффициента)	50,0 т.р.
Коэффициент сменности	$K_{см} = 2$
Длительность рабочей смены	$T_p = 8,0 \text{ часа}$
Коэффициент загрузки оборудования	$K_z = 0,8$
Производительность процесса лазерно-плазменной очистки поверхности	$\Pi = 1,5 \text{ м}^2/\text{час}$
Машинное время очистки боковой поверхности одной лопатки ($L = 60 \text{ мм}$, $H = 100 \text{ мм}$)	$\tau_m \approx 0,05 \text{ мин}$
Межоперационное время	$\tau_{мо} \approx 1,0 \text{ мин}$
Расходные газы	Аргон
Расход аргона	$Q \approx 30 \text{ л/мин}$
Стоимость аргона	$\Pi_{Ар} = 50 \text{ руб/м}^3$ $= 0,05 \text{ руб/л}$
Оценочное значение стоимости лазерного комплекса с НДС для очистки поверхности	$\Pi_k = 5,0$ млн.руб.
Период амортизации	5 лет
Годовые амортизационные отчисления (амортизация линейная)	20%
Стоимость 1 кВт/час электроэнергии	$\Pi_э = 1,126 \text{ руб.}$ кВт/час
Потребляемая лазерным комплексом электроэнергия	$\mathcal{E} < 1,0 \text{ кВт}$
Накладные расходы	150%

Оценка длительности технологического цикла

Расчет машинного времени очистки пера лопатки турбины

Машинное время очистки 1 м² поверхности – τ_m равно:

$$\tau_m = \frac{1 \text{ м}^2}{1,5 \text{ м}^2 / \text{час}} = 40 \text{ мин.}$$

Площадь двух боковых поверхностей пера лопатки турбины с шириной пера 60 мм и длиной 100 мм равна примерно 1200 мм². Время очистки одной лопатки составляет $\tau = 2,88 \text{ сек} \approx 3 \text{ сек} = 0,05 \text{ мин.}$

Расчет амортизационных отчислений при лазерно-плазменной очистке 1 м² поверхности

Рабочий фонд времени в день с учетом коэффициента сменности, коэффициента загрузки и 8,0 часовой рабочей смены

$$8,0 \cdot 2 \cdot 0,8 = 12,8 \text{ часов.}$$

Цена лазерной установки для лазерно-плазменной очистки с лазером мощностью 50 Вт составляет $\approx 5 \text{ млн. руб.}$

$$C_K \approx 5,0 \text{ млн. руб.}$$

$$\text{Амортизация в год} \quad C_K \cdot 0,2 = 1,0 \text{ млн. руб.}$$

$$\text{Амортизация в месяц} \quad C_K \cdot 1,0 / 12 = 0,833 \text{ млн. руб.}$$

Примем в месяце 24 рабочих дней

$$\text{Амортизация в день} \quad 34,7 \text{ тыс. руб.}$$

$$\text{Амортизация в час} \quad 2,7 \text{ тыс. руб.}$$

$$\text{Амортизация в минуту} \quad 45,2 \text{ руб.}$$

$$\text{Амортизация за технологический цикл, равный 0,05 мин.} \quad 2,26 \text{ руб.}$$

Расчет затрат на расходные материалы на очистку пера одной лопатки

Затраты на аргон

$$C_{Ar} = Q_{Ar} \cdot C_{Ar} \cdot \tau_M = 0,075 \text{ руб.}$$

Затраты на электроэнергию

$$C_{\text{э}} = C_{\text{э}} \cdot \text{Э} \cdot \tau_M \approx 0,001 \text{ руб.}$$

Расчет оценочного значения себестоимости лазерно-плазменной очистки боковой поверхности пера одной лопатки.

Исходные данные для расчета

- Заработная плата оператора лазерной установки (с учетом северного коэффициента) – 50,0 тыс. руб.
- Количество рабочих дней в месяц – 24 дня.
- Длительность рабочей смены – 8,0 час.
- Заработная плата в час – 260,4 руб./час.
- Заработная плата в минуту – 4,34 руб./мин.
- Заработная плата за время технологического цикла – 0,22 руб.

Накладные расходы принимаем равными 150%.

Расчет оценочного значения себестоимости очистки пера лопатки площадью 1200 мм² 50 Вт лазером приведены в табл. 6.

Таблица 6. Структура себестоимости очистки боковой поверхности пера лопатки турбины

№ п/п	Наименование статей расхода	%	Затраты, руб
1	Заработная плата		0,22
2	Начисления на ФОТ	26,3%	0,06
3	Расходные материалы на одну лопатку		0,08
4	Амортизация на очистку одной лопатки		2,26
6	Накладные от ФОТ	150%	0,33
7	Себестоимость		2,95

Заключение

Сформулируем в заключение еще раз основные технологические преимущества лазерной очистки поверхности (по сравнению с наиболее часто используемой в промышленности пескоструйной):

- бесконтактное воздействие на очищаемую поверхность,
- отсутствие абразивного износа очищаемой поверхности,
- возможность дистанционной очистки поверхности (на расстоянии до 1,5 м и более от источника излучения),
- возможность 100% локализации продуктов очистки.
- возможность очистки поверхности деталей сложной геометрической формы в труднодоступных местах,
- высокая производительность процесса, до нескольких квадратных метров в час,
- практическое исключение нагрева материала в процессе очистки поверхности,
- низкая энергоемкость процесса очистки поверхности – несколько кВт,
- высокая экологичность технологического процесса,
- мобильность оборудования.

Необходимо отметить еще одно существенное преимущество лазерной очистки поверхности. Лазерный пучок не тупится, не изнашивается, не загрязняется (засоряется, засаливается и т.д.), что позволяет обеспечить высокую технологическую воспроизводимость процесса лазерной очистки поверхности.

В результате изложенного можно прийти к следующим выводам.

1. Развитие промышленных лазерных излучателей позволяет на современном этапе рассматривать процессы лазерной очистки как реальную, экономически целесообразную альтернативу классическим методам очистки.

2. Лазерные методы очистки представляют собой наиболее экологически чистый процесс очистки, обеспечивающий дополнительно возможность высокой степени автоматизации процесса.

3. Современный уровень мощности волоконных излучателей способен обеспечить промышленные уровни производительности очистки до десятков квадратных метров в час при низкой стоимости процесса.

4. Лазерные методы очистки поверхности имеют высокую технологическую воспроизводимость процесса, так как «не тупятся», «не засаливаются», и, к тому же, не загрязняют поверхность остатками химических реактивов.

5. Комплексная лазерно-плазменная и лазерная обработка и очистка позволяют не только очистить поверхность от органических и неорганических загрязнений, но и решить вопрос о технологической наследственности поверхностного слоя, создав поверхность, близкую к ювеноальной при атмосферных условиях, а также обеспечить одновременно улучшение других ее эксплуатационных свойств (износоустойчивости, коррозионной стойкости и т.д.).

6. Современные оптоволоконные лазеры имеют небольшие геометрические размеры, низкое энергопотребление, небольшой вес, не требуют создания специальных условий по климатике и загрязненности атмосферы, поэтому достаточно легко интегрируются в технологические линии производств практически всех отраслей промышленности.

7. Спектральный контроль процессов лазерной очистки металлов позволяет обеспечить как требуемую степень очистки поверхности, так и ее сохранность, а также полную автоматизацию процесса.

Литература

1. Мейман Т., Лазерная Одиссея, - Изд. Печатные Традиции, 2010 г., 232 стр.
2. Элементы большой науки, Природа науки, Спектр электромагнитного излучения, http://elementy.ru/trefil/electromagnetic_spectrum?page_design=print.
3. Реди Дж., Промышленные применения лазеров. – М.: Мир. 1981. – 638 с.
4. Крылов К.И., Прокопенко В.Т., Митрофанов А.С. Применение лазеров в машиностроении и приборостроении. Л., Машиностроение, 1978, 335 с.
5. Квантовая электроника. Маленькая энциклопедия. Отв. Ред. Жаботинский М.Е. - М.: «Советская энциклопедия»: 1969.-432
6. Stil P, Optoelectronics Report, v. 10. № 3 (Febr. 2003).
7. Гаркунов Д.Н., Триботехника. - М.: Машиностроение, 1985.-424 с.
8. Вейко В.П. Либенсон М.Н., Червяков Г.Г., Яковлев Е.Б. Взаимодействие лазерного излучения с веществом, силовая оптика. М., Физматлит, 2008, 312 с.
9. Шнейдер Ю.Г. Эксплуатационные свойства деталей с регулярным микрорельефом. Л., Машиностроение, 1982,248 с.
10. Грилихес С.Я., Обезжиривание, травление и полирование металлов. – Л.: Машиностроение, Ленинград. Отд.,1983. - 101 с.
11. Голямина И.П., Ультразвук. – М.: Изд-во «Советская энциклопедия», 1979. – 400с.
12. Суслов А.Г., Дальский А.М., Научные основы технологии машиностроения.- М.: Машиностроение, 2002.-684 с.
13. Суслов А.Г. Качество поверхностного слоя деталей машин. – М.: Машиностроение, 2000.-320 с.
14. Забелин А.М., Оришич А.М., Чирков А.М. Лазерные технологии машиностроения.
15. Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н., Мисюров А.И. Технологические процессы лазерной обработки. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. – 664 с.
16. Вейко В.П., Либенсон М.Н. Лазерная обработка,- Л., Машиностроение, 1973, 191 с.
17. Вейко В.П., Шахно Е.А. Индуцированное лазером локальное осаждение тонких пленок. Оптический журнал, т.65, №10, 1998, с. 102–107.

18. Вейко В.П., Шахно Е.А. Физические механизмы лазерной очистки поверхности. Известия РАН, сер. физическая, т.65, №4, 2001, с.584–587.
19. Лукьянчук Б.С., Жэнг Ю.В., Лу И.Ф. К вопросу о механизме сухой лазерной очистки. Известия РАН, сер. физ., т.65, №4, 2001, с.591–600.
20. Вейко В.П., Никишин Г.Д., Смирнов В.Н. Мобильный лазерный комплекс для дезактивации атомных подводных лодок. Межотраслевой информационно–аналитический журнал «Индустрия», №1 (43). 2006, с.25.
21. Вейко В.П., Шахно Е.А., Мути́н Т.Ю., Самохвалов А.А. Патент «Способ удаления радиоактивной пленки с поверхности объекта» МПК: G21F 9/00, B23K 26/00, положительное решение от 26.06.2012
22. Смирнов В.Н., Скрипченко А.И., Медвецкий В.М. Очистка лазерным излучением // РИТМ, май, 2008. С. 64-66.
23. Industrial Laser Solutions, Feb. 2005. IPG Photonics.
24. Минаев В.П. Фирма и ее лидер // ЛАЗЕР-ИНФОРМ, вып. №8(335), апрель 2006, с. 1–9.
25. Туричин Г.А., Цибульский И.А., Кузнецов М.В., Сомонов В.В. Лазерно–дуговая сварка алюминиево–магниево́в сплавов. Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, №135, 2011, с.194–200.
26. Гуляев П.М. Чистая сталь. – М.: Металлургия, 1975. – 184с.
27. Кремерс Д., Радзиемски Л. Лазерно-искровая эмиссионная спектроскопия 2009.
28. Вейко В.П., Волков С.А., Мути́н Т.Ю., Смирнов В.Н. О возможности спектроскопического контроля процесса лазерной очистки. Известия ВУЗов. Приборостроение, тематический выпуск «Лазерные технологии в приборостроении», т.54, №2, 2011, с.65–68.



В 2009 году Университет стал победителем многоэтапного конкурса, в результате которого определены 12 ведущих университетов России, которым присвоена категория «Национальный исследовательский университет». Министерством образования и науки Российской Федерации была утверждена программа его развития на 2009–2018 годы. В 2011 году Университет получил наименование «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики»

КАФЕДРА ЛАЗЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И ЭКОЛОГИЧЕСКОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

Лазерные технологии не случайно называют технологиями XXI века. Открытые при нашей жизни лазеры уже сегодня широко проникли в промышленность, строительство, транспорт, связь, медицину, биологию, экологию, шоу–бизнес и другие сферы жизни. Лазерные принтеры, лазерные CD–диски, лазерные торговые сканеры и лазерные шоу сегодня известны всем. Менее известны широкой публике, но не менее важны лазерные технологии в микроэлектронике для нанесения и структурирования тонких пленок, для резки и сварки брони, закалки инструментальных сталей, декоративной обработки дерева, камня и кожи, при лечении болезней глаз, сосудов, опухолей, и т.д., а в ближайшей перспективе — для избавления человечества от очков и морщин (да, да — сотни операций по лазерной полировке роговицы глаза и кожи уже проведены), разработка реакций лазерного управляемого термоядерного синтеза и лазерных реактивных двигателей, создание трехмерных объектов за счет прямой трансформации виртуального (компьютерного) образа в материальный объект при взаимодействии лазерного излучения с веществом и многое, многое другое.

История кафедры ЛТ и ЭП делится на 4 разных периода:

Период I — с момента появления лаборатории лазерной технологии в ЛИТМО в 1965 г. до момента организации кафедры охраны труда и окружающей среды (ОТ и ОС) с отраслевой лабораторией лазерных технологий (ОЛЛТ) в 1982 г.

Период II — период развития кафедры ОТ и ОС и ОЛЛТ — 1982–1988 гг.

Период III — с момента создания на базе кафедры ОТ и ОС и ОЛЛТ кафедры лазерных технологий — 1988 г., в дальнейшем преобразованной в кафедру лазерных технологий и экологического приборостроения и по настоящее время.

Охарактеризуем периоды 1, 2 и 3 фактами.

1976 г. — научные работы ОЛЛТ по физическим основам лазерной обработки тонких пленок удостоены Премии Президиума АН СССР за лучшую научную работу в области «Фундаментальных проблем микроэлектроники».

1983, 1984 гг. — работы кафедры удостоены Премий Минвуза СССР за лучшую научную работу.

1986 г. — работы кафедры совместно с рядом других организаций удостоены Государственной Премии СССР.

1988 г. — кафедра ОТОС с лабораторией ЛТ по инициативе ректора ЛИТМО преобразована в выпускающую кафедру «Лазерных технологий» и начинается систематический выпуск специалистов по специальности 07.23 «лазерная техника и лазерные технологии».

1996 г. — кафедра ЛТ переименована в кафедру ЛТ и ЭП и осуществляет выпуск специалистов как лазерным технологиям, так и по специальности «инженер–педагог» со специализацией «экология».

С 2000 г. — лаборатория и кафедра ЛТ признаны Ведущей научной школой Российской Федерации по «Фундаментальным основам лазерных микротехнологий».

2001 – 2007 г. — этот статус ежегодно подтверждается.

2010 г. – присуждение Премии Правительства Российской Федерации в области образования за «Создание системы подготовки специалистов высшей квалификации по лазерным технологиям»

- За период времени с 1988 по 2010 г. кафедра выпустила более 400 специалистов в области лазерных технологий;
- За тот же период времени сотрудниками и аспирантами кафедры защищены 2 докторские и более 20 кандидатских диссертаций;
- По результатам работ кафедры издано 9 монографий;
- Результаты исследований сотрудников кафедры изложены более чем в 500 научных статьях и 50 патентах и авторских свидетельствах;

Период IV с 2008 г. и по настоящее время характеризуется тем, что университет явился победителем конкурса Правительства РФ 2006-2008г.г., проводимого в рамках приоритетного национального проекта «Образование» по отбору образовательных учреждений высшего профессионального образования, внедряющих инновационные образовательные программы.

При этом одним из направлений научно-образовательной деятельности Университета в рамках конкурса было выбрано направление «Лазерные технологии и системы», которое соответствует приоритетным направлениям развития науки, техники и технологий в РФ и критическим технологиям РФ.

По результатам маркетинговых исследований ожидаемый рынок труда специалистов по данному направлению в Санкт-Петербурге составляет 300 чел. в год, по России — порядка 1500 человек.

Важнейшей составной частью проекта явилось создание новых научно-образовательных структур, центров и лабораторий, для оснащения которых были проведены закупки необходимого оборудования и приборов. Приведем информацию по данному разделу программы более подробно:

Создание новых лабораторий и центров.

1. Лаборатория лазерных нанотехнологий в составе 4-х научно-образовательных направлений, укомплектованных современным лазерным,

измерительным и аналитическим оборудованием и финансируемых грантами РФФИ, РГНФ и Роснауки :

1) Лазерное формирование многофункциональных зондов (МЗ) для зондовой микроскопии с целью создания универсальных зондовых микроскопов.

Работа базируется на значительном заделе кафедры лазерных технологий и экологического приборостроения (далее ЛТ и ЭП) по лазерной вытяжке ближнепольных оптических зондов, нанокапилляров, многослойных зондов, кантилеверов и т.п.. Она проводится на базе 15 Вт квазинепрерывного ($f = 5$ кГц, $\tau = 1$ мкс CO_2 (Sinrad) лазера, специальной оптической системы облучения с торическим зеркалом и специализированных механических систем вытяжки с обратной электромеханической связью. Для контроля за процессом используется скоростная видеокамера AOS-x-motion (разрешение 1280 x 1024, размер пиксела 12 мкм, максимальная скорость съемки 32000 кадр/сек), и быстродействующий микропиrometer частичного излучения IFMO (спектральный диапазон 5.7–8.7 мкм, температурный диапазон 200–2000°C, диаметр объекта 0.5–5 мм, время отклика 0.1 с, точность ± 10 K), а для оценки результатов и разработки методик применения МЗ — зондовый микроскоп «Nanoeducator», НТ МДТ.

Работа проводится совместно с кафедрой нанотехнологий и материаловедения ИТМО (заведующий кафедрой — А.О.Голубок), имеющей большой опыт создания и применения зондовых микроскопов.

2) Исследование физических основ формирования А–К–А переходов в стеклокерамиках (А — аморфизованный, К — кристаллизованный слой) и способов управления их размерами, глубиной залегания, скоростью переключения и степенью кристаллизации.

Работа направлена на закрепление пионерского научного задела и на продвижение локальности А–К–А переходов в область наноразмеров, времен записи и переключения в область пико–и фемтосекунд, оптимизацию сред для

объемной оптической записи и поиск эффективных систем считывания информации.

Для реализации заложенных научных идей созданы стенды с пикосекундным лазером типа EXPLA PL 2143 ($\lambda = 266$ нм, 355 нм, 532 нм, 1060 нм, $W_{\text{имп}} = 30$ мДж, $\tau = 30$ пс, $f = 10$ Гц) и фемтосекундным лазером типа AVESTA (TiF-100-F4 $\lambda = 710$ -950 нм, $P_{\text{ср}} = 500$ мВт, $f = 90$ МГц, $\tau = 100$ фс), с 10) импульсными CO₂-лазерами ($\lambda = 10,6$ мкм) ТЕА-типа ($P_{\text{имп}} = 10^6$ Вт, $f = 500$ Гц, $\tau = 200$ нс) и щелевым ($P_{\text{ср}} = 150$ Вт, $f = 50$ -5000 Гц, $\tau = 30$ -500 мкс), позволяющими в максимальной степени реализовать потенциал работы.

Для контроля за процессом разработаны схемы, созданы и оснащены системы микрофотометрического контроля (микроскоп-спектрофотометр МСФУ-К (ОАО «ЛОМО»), увеличение – до 1000X, спектральный диапазон регистрации спектров: и оптической плотности 350-900 нм, минимальный размер фотометрируемого участка 1 мкм), микротепловизионного контроля (тепловизор FLIR-Titanium), спектральный диапазон 8-14 мкм, разрешение изображения 320 x 256, 14 бит, , максимальная частота обновления полных кадров 380 Гц скоростной видеографии (видеокамера AOS-x-motion) и др.

Работа проводится совместно с кафедрой оптоинформационных технологий и материалов (заведующий кафедрой — Н.В.Никоноров), обладающей большим опытом создания и исследования оптических материалов и всем комплексом необходимого термофизического, оптического и испытательного оборудования и приборов.

3) Наноструктурирование тонких металлических и полупроводниковых слоев.

Работа основана на обнаруженном в лаборатории кафедры ЛТ еще в 1967–70 гг. эффекте локального термохимического воздействия лазерного излучения и, в частности, на радикальном изменении растворимости Cr при его лазерном окислении. В последнее время этот эффект дополнен также «микроструктурным» воздействием лазерного излучения на структуру тонких слоев Cr, Si и,

соответственно Cr_2O_3 и SiO_2 . Оба эффекта позволяют управлять топологией и другими параметрами структур.

Работа базируется на использовании коротких (N_2 -лазер, 0.337 мкм, 10 нс) и сверхкоротких импульсов (пикосекундный и фемтосекундный лазеры, упомянутые выше, эксимерный ArF лазер (CL-7020, $W_{\text{имп}} = 250$ мДж, $P_{\text{ср}} = 5$ Вт, $f = 20$ Гц, $\tau = 17$ нс) и коротких длин волн (193 нм, 226 нм, 337 нм, 355 нм) для повышения разрешающей способности метода и продвижения его в область нанометрических размеров вплоть до теоретического предела разрешающей способности ($\sim$ толщины защитной окисной пленки). При ее проведении используются также указанные выше приборы и устройства — зондовый микроскоп, микротепловизор и целый ряд химических и термофизических методик.

Работа проводится в настоящее время совместно с группой д.ф-м.н. А.Г. Полещука из института автоматики и электрометрии Сибирского отделения РАН.

4) Управление микрогеометрией, наношероховатостью и физико-химическими свойствами поверхности материалов

В основе работы лежит эффект снижения шероховатости поверхности за счет лазерной абляции выступов. Этот эффект дополняется процессами гидродинамического затекания впадин, а также микроструктурирования, основанными на возникновении поверхностных электромагнитных волн и периодического рельефа и использовании других опто-физических явлений (интерференционных, ближнепольных и т.д.). Все изложенные методы и приемы позволяют создавать оптимальные параметры поверхностей (асферизация, полировка, структурирование) из стекла и пластмассы, металла и др. материалов.

В работе используются импульсные CO_2 -лазеры (TEA CO_2 и щелевой), эксимерный, пико- и фемтосекундные лазеры, специальные оптические системы, системы активного контроля профиля поверхности с обратной связью, зондовый микроскоп, микротепловизор.

Отдельное направление работ этого цикла — микро— и наноструктурирование поверхности кремния за счет модификации структуры и лазерной абляции, а также управление свойствами окисла.

В настоящее время проводится также большой цикл работ по созданию рельефов для оптимизации антикоррозионных, антиобледенительных, биосовместимых и др. подобных свойств поверхности различных материалов.

2. Лаборатория лазерной очистки и реставрации произведений культуры и искусства (ПКИН) организована совместно с фирмой ООО «Мобильные лазерные системы».

В лаборатории имеются 3 установки.

1. Лазерный комплекс очистки и реставрации ЛИК-1 на базе 200 Вт, 20 нс Nd-YAG импульсного лазера и 6-ти координатного робота (максимальный рабочий радиус (размах) 1300 мм, точность при повторении позиции ± 0.08 мм) с полной системой ориентации, управления позиционированием волоконно-оптической головки. Работает в режимах очистки металлических изделий сложной формы от загрязнений, оксидных пленок и т.п., подготовки под сварку, сварки и модификации поверхности с системой сбора продуктов очистки для производства работ в лабораториях и в условиях музейных интерьеров.

2. Мобильный лазерный комплекс МЛС2 на основе 50 Вт импульсного Yt-Er лазера с волоконным выводом и миниатюрной оптической головкой для очистки; может быть установлен на автономную передвижную платформу с дистанционным управлением, например, для очистки поверхностей от радиоактивных загрязнений.

3. Переносной ранцевый лазерный комплекс ЛИК-2 на основе 20 Вт импульсного Yt-Er лазера с волоконным выводом и оптической системой, миниатюрной системой сканирования поверхности и встроенной системой отсоса продуктов очистки.

Все изложенные лазерные системы опробованы при исследованиях и разработке следующих процессов лазерной очистки:

1) лазерная очистка радиоактивно-загрязненных поверхностей,

2) лазерная очистка теплообменников и др. элементов энергетического оборудования,

3) лазерная очистка и подготовка поверхности под лазерную сварку и консервацию,

4) лазерная очистка краскопечатающих (флексографических) валов для полиграфии,

5) лазерная очистка металлических поверхностей предметов культурно–исторического наследия, городской скульптуры и декора.

В настоящее время разрабатываются физико–химические основы процессов лазерной очистки неметаллических поверхностей (мрамора и др. минералов), а также процессов реставрации стеклянных и стеклокерамических изделий (смальты, финифти, стеклянных и керамических мозаик и т.п.), фресок , стен и памятников от граффити и т.п.

3. Учебно–производственный центр лазерных технологий резки, сварки, наплавки и термообработки создан совместно с фирмой ООО «СП Лазертех» на базе мощных иттербиевых волоконных лазеров ЛС–0.5 (кВт), ЛС– 2 (кВт) или ЛС– 5 (кВт) (IPG-Photonics, Россия, г.Фрязино).

Лазерный комплекс для трехмерного раскроя деталей ЛУВР-1 на основе волоконного лазера с мощностью 5,0 кВт и выходным волоконным кабелем ($\lambda = 1,07$) включает универсальный 6–ти координатный робот FA06E (KAWASAKI) с системой ориентации и позиционирования, и полный комплект остального оборудования (холодильная машина, система управления роботом (контроллер D40), система подготовки и подачи технологических газов, фирмы Precitec), система дистанционного видеонаблюдения за техпроцессом, и т.д.

Там же установлен Лазерный комплекс «Trotec Professional 1313» предназначенный для прецизионной резки и гравировки неметаллов. Комплекс включает CO₂ лазер мощностью 50 Вт, механизм сканирования типа «летающая оптика». Максимальная скорость лазерной гравировки 1 м/с, максимальная

площадь обрабатываемой поверхности 1300x1300 мм, программное разрешение 2 мкм, точность позиционирования ± 15 мкм).

Установка Trotec Professional TP 1313 применяется в следующих процессах: рекламном бизнесе, резке промышленных изделий из листовых неметаллических материалов, изготовлении вырубных штампов, трафаретов, лекал, текстильных изделий, изготовлении печатей и штампов.

Центр предназначен для подготовки специалистов современного уровня и разработки новых лазерных технологий в основном на базе волоконных технологических лазеров.

Для организации учебного процесса задействуется также современное производственное оборудование предприятий ООО «СП «Лазертех», ООО «Лазерный центр», ООО «Мобильные лазерные системы»:

- Лазерные технологические комплексы типа «Хебр» (CO₂-лазеры мощностью 1-кВт с порталными столами) для резки листовых металлических и неметаллических материалов, труб, сварка.

- Лазерные технологические комплексы типа «Trumatic» (CO₂-лазеры мощностью до 2,5 кВт с порталными столами) для резки листовых металлических материалов.

- Модернизированный лазерный технологический комплекс типа «Хебр» с иттербиевым волоконным лазером ЛС-2 для резки и сварки, в т.ч сплавов цветных металлов.

- Минимаркер М 10 с иттербиевым импульсным волоконным лазером для прецизионной маркировки.

- Установка «Бетамарк 2000» (лазер Nd-YAG с ламповой накачкой и модуляцией добротности) для прецизионной маркировки.

- Установка ТЕГРА – 500 (лазер Nd-YAG с ламповой накачкой) для резки цветных металлов и их сплавов.

- Специализированные лазерные комплексы со столами АП-400 (лазеры Nd-YAG с ламповой накачкой).

Таким образом, выполнение поставленных перед инновационно-образовательной программой (ИОП) в рамках направления «Лазерные технологии

и системы» позволило создать новый научно-учебный инновационный центр в СПбГУ ИТМО, оснащенный уникальным современным лазерным и измерительным оборудованием, способным реализовать подготовку высококвалифицированных научных кадров в области лазерных технологий и проводить исследования на самом высоком научном уровне.

Одним из недавних результатов выполнения ИОП является завоевание Университетом (в лице кафедры лазерных технологий) совместно с указанными выше организациями нескольких наград на **Международной выставке–конгрессе «Высокие технологии, инновации, инвестиции»**: Диплома I степени за создание лазерного комплекса для трехмерной обработки материалов на базе волоконного лазера, Диплома II степени за создание учебно–производственного центра «Лазерные технологии», Диплома II степени за разработку переносной лазерной установки для очистки материалов от различных поверхностных загрязнений, Диплома II степени за разработку ранцевого устройства для лазерной очистки с вручением 1 золотой и 3–х серебряных медалей.

ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ КАФЕДРЫ

1. Лазерная обработка пленочных элементов, в том числе

- наноструктурирование тонких металлических и полупроводниковых слоев,
- лазерное локальное осаждение тонких пленок.

2. Исследование физических основ формирования А–К–А переходов в стеклокерамиках (А — аморфизация, К — кристаллизация) и способов управления их размерами, глубиной их залегания, скоростью переключения и степенью кристаллизации.

3. Создание новых оптических материалов и элементов микро– и нанофотоники на базе лазерных технологий.

4. Лазерное формирование многофункциональных зондов для зондовой микроскопии с целью создания универсальных зондовых микроскопов.

5. Лазерное управление микрогеометрией и физико–химическими свойствами поверхности.

6. Физико-химические основы лазерной очистки в промышленности и при реставрации произведений культурно–исторического наследия.

7. Исследование воздействия пико– и фемтосекундных импульсов лазерного излучения на вещество.

8.Фундаментальные исследования в области взаимодействия лазерного излучения с веществом: лазерная абляция и конденсация металлических и композиционных пленок и эффекты самоорганизации.

9. Физико–математическое моделирование в задачах дистанционного лазерного зондирования морской среды.

Заведует кафедрой лазерных технологий и экологического приборостроения Заслуженный деятель науки России, Лауреат Государственной Премии СССР, Лауреат Премии Правительства РФ, действительный член Академии Инженерных Наук РФ, д.т.н., профессор В.П.Вейко. Среди преподавателей кафедры Почетный работник высшей школы, Лауреат Премии Правительства РФ, д.т.н., профессор Е.Б.Яковлев, д.т.н., профессор Е.А.Шахно, Почетный работник высшей школы, к.ф.–м.н., доцент Г.Д.Шандыбина, к.т.н., доцент В.В.Барановский, к.ф.–м.н., доц. Ю.И.Копилевич, к.ф.–м.н., доцент А.Н.Проценко, молодые преподаватели, к.т.н., доц. А.А.Петров, к.т.н., доц. Н.Н.Марковкина, к.т.н., асс. Б.Ю.Новиков.

Работа кафедры проводится в тесном контакте с ведущими предприятиями Санкт–Петербурга по лазерным технологиям: ООО СП «Лазертех» (ген. директор С.Н.Смирнов), ООО «Лазерный центр» (ген. директор С.Г.Горный), ООО «Мобильные лазерные системы» (ген. директор В.Н.Смирнов).

Кафедра также активно сотрудничает с университетами и институтами США (Prinston University, University of Areizona), Германии (BIAS, FHS Emden), Японии (RIKEN), Китая (HUST), Франции (ENISE), Италии (Lecce University) и др.

Вадим Павлович Вейко, Валентин Николаевич Смирнов,
Анатолий Михайлович Чирков, Елена Аркадьевна Шахно

Лазерная очистка в машиностроении и приборостроении

Учебное пособие

В авторской редакции
Редакционно-издательский отдел НИУ ИТМО
Зав. РИО
Лицензия ИД № 00408 от 05.11.99
Подписано к печати
Заказ №
Тираж 200 экз.
Отпечатано на ризографе

Н.Ф. Гусарова