

УДК 621.039.75

## ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ЛАЗЕРНОЙ ДЕЗАКТИВАЦИОННОЙ ОЧИСТКЕ ПОВЕРХНОСТЕЙ МЕТАЛЛОВ, ЗАГРЯЗНЕННЫХ РАДИОАКТИВНЫМИ МАТЕРИАЛАМИ

**Софронов Владимир Леонидович<sup>1</sup>,**  
vlsofronov@mephi.ru

**Карташов Евгений Юрьевич<sup>1</sup>,**  
kart.62@yandex.ru

**Ткачук Семён Александрович<sup>1</sup>,**  
semenaleksandrovih@gmail.com

**Пак Александр Дмитриевич<sup>1</sup>,**  
AIDPak@rosatom.ru

**Тинин Василий Владимирович<sup>2</sup>,**  
shk@atomsib.ru

**Галата Андрей Александрович<sup>2</sup>,**  
shk@atomsib.ru

<sup>1</sup> Северский технологический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», Россия, 636036, г. Северск, пр. Коммунистический, 65.

<sup>2</sup> АО «Сибирский химический комбинат», Россия, 636039, г. Северск, ул. Курчатова, 1.

**Актуальность** исследования обусловлена необходимостью поиска нового, более эффективного, метода дезактивации больших объемов металлических отходов, загрязненных радиоактивными веществами. Накопление такого вида отходов связано с производством и последующим сокращением ядерных боезарядов, демонтажем отработавших ресурс объектов атомной промышленности и неядерного сектора.

**Цель:** проведение исследований по дезактивационной очистке металлических поверхностей, загрязненных радиоактивными материалами, с использованием передвижной лазерной установки модульного типа.

**Объекты:** системы, состоящие из образцов различных металлов и связанных с ними слоев покрытий различной морфологии (слой коррозии, лакокрасочного покрытия, смазки), загрязненных радиоактивными веществами, а также лазерное излучение.

**Методы:** лазерная дезактивация (установка «HTF Clean 500»), радиометрический анализ (МКС-01А «МУЛЬТИРАД» и МКС-АТ-1117М), оптическая микроскопия (Micromed Polar Nikon SMZ745T), фотофиксация (Sony α-6000), сканирующая электронная микроскопия (Carl Zeiss Sigma), шлифовальный и обрезной инструменты, электронные весы (СПВ-60), линейный измерительный инструмент.

**Результаты.** Разработаны методики проведения исследований процесса лазерной дезактивации металлических поверхностей, загрязненных радиоактивными веществами и дозиметрических исследований образцов металлических поверхностей до и после их лазерной обработки. Определены оптимальные параметры процесса лазерной дезактивации поверхностей различной морфологии и состава; построены графики зависимостей степени удаляемого загрязнения различной морфологии и состава от числа проходов лазерной дезактивации; сделаны выводы о целесообразности использования метода лазерной очистки для обработки металлов, содержащих на поверхности радиоактивные вещества, и даны рекомендации по проведению процесса лазерной дезактивации для различных металлических отходов, загрязненных радиоактивными веществами.

### **Ключевые слова:**

радиация, дезактивация, поверхность, установка лазерной дезактивации, степень очистки, радиоактивное загрязнение, загрязненные поверхности.

### **Введение**

Одной из важнейших проблем, которую необходимо решить ГК «Росатом», является обращение с радиоактивными отходами, в том числе с металлическими, загрязненными радиоактивными веществами (МОЗРВ). Наличие достаточно большого объема таких отходов обусловлено как накоплением в результате производства и массового сокращения ядерных вооружений, так и демонтажем отработавших ресурс объектов атомной энергетики и промышленности. Большое количество МОЗРВ также накоплено на объектах неядерного сектора, в первую очередь, на

предприятиях нефтяной и газовой промышленности. Эти отходы представляют собой трубопроводы, арматуру и технологические аппараты газо- и нефтеперерабатывающих заводов, загрязненные природными радионуклидами (радий, торий, калий и др.) [1, 2].

Дезактивация поверхностей оборудования способствует значительному уменьшению вероятности поступления радиоактивных веществ в организм человека через органы дыхания, желудочно-кишечный тракт и кожные покровы, а также снижает дозовые нагрузки персонала, занятого в условиях воздействия источников ионизирующего излучения [3].

Способы дезактивации МОЗРВ традиционными химическими, физико-химическими и физико-механическими методами имеют существенные недостатки. В зависимости от состава и уровня радиоактивного загрязнения очистка проводится с использованием установок механической (дробеструйной), термической и лазерной дезактивации. У лазерной дезактивации есть ряд неоспоримых преимуществ перед другими методами.

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.

Лазерный пучок, как технологический инструмент, не подвержен износу, в отличие, например, от реза или фрезы, применяющихся при механической обработке. Эффект «безызносности» дает пучку лазера большие экономические преимущества и обеспечивает высокую воспроизводимость технологических процессов [4–7].

#### Физические основы лазерной дезактивации

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

Общая схема процесса воздействия лазерного излучения на обрабатываемый материал приведена рис. 1.

Взаимодействие лазерного излучения со сложной многокомпонентной системой поверхностных слоёв можно в целях упрощения представить в виде совокупности процессов. Главный процесс, определяющий

течение остальных процессов, – это, как правило, поверхностное поглощение лазерного излучения основным слоем металла. Динамика этого процесса определяет характер всех последующих явлений, устанавливая распределение энергии лазерного излучения по различным каналам [1]. Исключением из этого правила является предварительное разрушение лазерным излучением слоя лакокрасочных покрытий (ЛКП), за которым, впрочем, обязательно следует удаление разрушенного слоя следующим проходом, в котором опять главную роль играет поглощение лазерного излучения основным слоем металла. Другие основные процессы, имеющие место при лазерной очистке поверхности металла, – это разлёт лазерной искры (газов и фрагментов поверхности), термомеханическая реакция поверхности металла, фотоэмиссия лазерной искры (рис. 2).

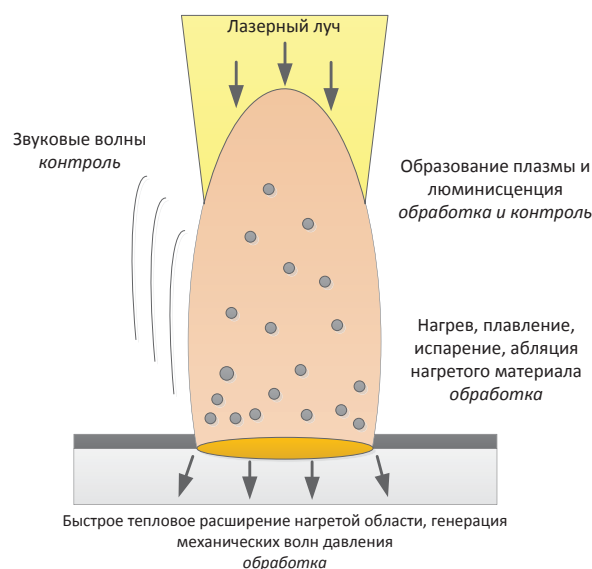


Рис. 1. Общая схема процессов воздействия лазерного излучения на материалы

Fig. 1. General scheme of laser radiation impact on materials

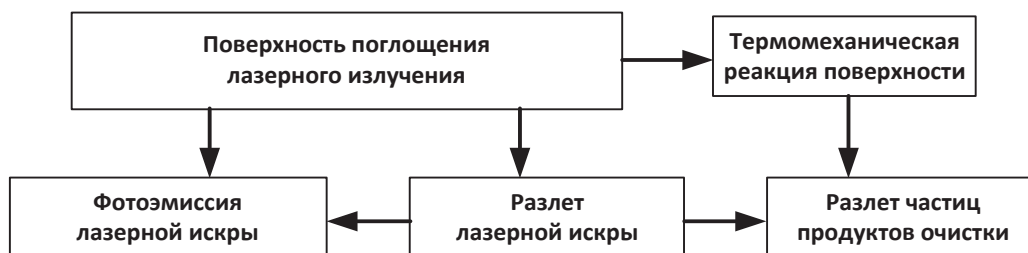


Рис. 2. Основные явления в составе процесса лазерной очистки

Fig. 2. Main phenomena in the composition of the laser cleaning

Физические процессы, происходящие при лазерной очистке поверхности, отличаются большим разнообразием и зависят от плотности мощности лазерного излучения на поверхности. Первоначально использовались преимущественно испарительные механизмы лазерной дезактивации поверхности, когда

плотность мощности излучения превышает значение, при котором начинается испарение загрязняющих веществ с поверхности [5, 8].

В этом случае в основе физики процесса лазерного удаления поверхностных слоёв (ржавчины, окалины, оксидов, загрязнений, лаков, красок, жиров и

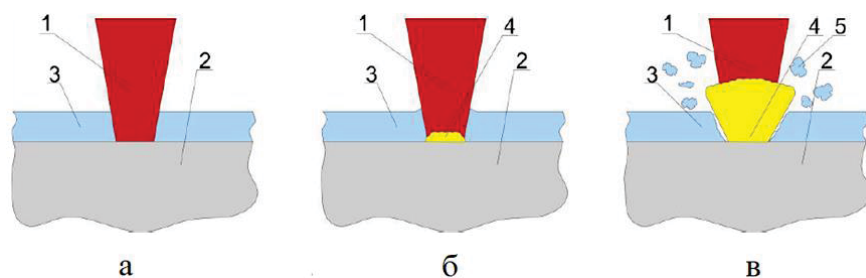
т. д.) лежит эффект испарения, то есть перевода материала из твердой фазы в паро-газо-плазменную, при этом желательнее минимизировать образование жидкой фазы.

Распространение света в веществе зачастую описывается законом Бугера–Ламберта–Бэра [9]:

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

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

Показатель поглощения для металлов на длине волны 1,06 мкм составляет  $10^3 \dots 10^4 \text{ см}^{-1}$ , тогда как показатель поглощения неметаллических веществ на несколько порядков ниже и составляет  $10^{-1} \dots 10^{-3} \text{ см}^{-1}$



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

**Fig. 3.** Evaporative mechanism of laser cleaning: 1 – laser beam; 2 – contaminated material; 3 – pollution; 4 – vaporized substance cloud; 5 – pollution particles removed from the material surface

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. 3, б). Под давлением разогретых до высоких температур паров слой неметаллического загрязнения разрушается и удаляется с поверхности материала (рис. 3, 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 очистки.

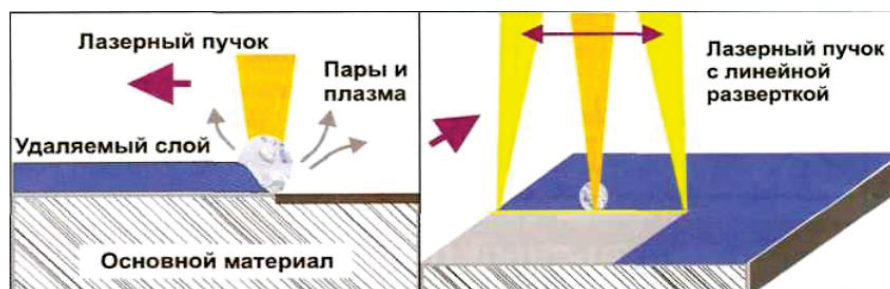
Таким образом, задача выбора оптимального режима работы лазера в испарительном режиме очистки сводится к обеспечению минимального порога испарения вещества основного металла. Известно, что таковой обеспечивается в импульсном режиме воздействия [9]. Кроме того, чем меньше длительность воздействия, тем меньше размер прогретой зоны вещества и, следовательно, меньше коли-

[9]. Из закона Бугера–Ламберта–Бэра 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. 3, а).

чество образующегося расплава и пара 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  $3 \text{ ГВт/см}^2$ . При данной плотности мощности глубина прогретого слоя в стали  $x_{\text{пр}}$  составляет  $10^{-4} \dots 10^{-5} \text{ см}$ , при этом испарение происходит практически без образования расплава на поверхности вещества (абляция), и модификация исходной поверхности минимальна [9, 10].

Для этого применяют импульсное лазерное излучение с короткой длительностью импульса (несколько десятков наносекунд) и высокой пиковой мощностью, обеспечивающей плотность мощности в зоне обработки  $10^7 \dots 10^{10} \text{ Вт/см}^2$  при диаметре сфокусированного пятна пучка лазера около 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. 4.



**Рис. 4.** Схема процесса лазерной дезактивации поверхности со сканированием

Fig. 4. Scheme of laser surface decontamination with scanning

Большинство испарительных режимов промышленной лазерной дезактивации 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, механическое повреждение. 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 дезактивации возможны при использовании как импульсного, так и непрерывного лазерного излучения, когда речь идет о

черновых процессах, требующих высокой производительности [11–14].

#### Схема установки и методика проведения экспериментов

В работе приведены результаты исследований по лазерной дезактивации загрязненных поверхностей при помощи модульной лазерной установка «НТФ Clean 500». Установка характеризуется высокой производительностью, достигающей нескольких квадратных метров в час, более высокой безопасностью по сравнению с другими установками по дезактивации, отсутствием расходных материалов. Применение оборудования такого типа позволит комплексно решить проблему очистки поверхности от органических и неорганических загрязнений [15].

Принципиальная схема установки приведена на рис. 5.

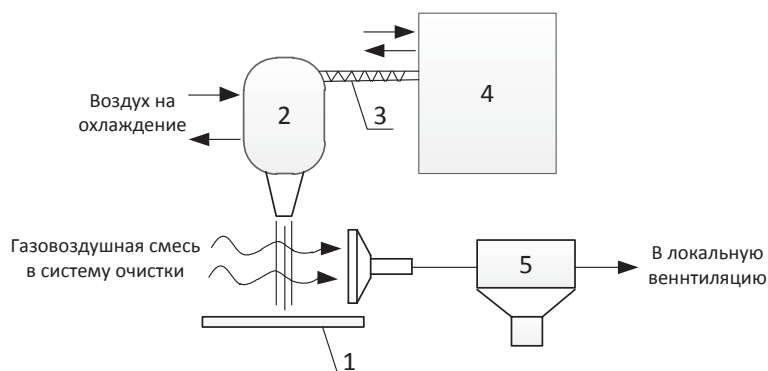


Рис. 5. Принципиальная схема установки лазерной дезактивации: 1 – обрабатываемая поверхность; 2 – ручной манипулятор; 3 – оптоволоконный кабель; 4 – генератор лазерного излучения; 5 – фильтровально-вытяжной модуль

Fig. 5. Schematic diagram of the laser decontamination unit: 1 – treated surface; 2 – manual manipulator; 3 – fiber optic cable; 4 – laser radiation generator; 5 – filtering and exhaust module

Основой установки является охлаждаемый генератор лазерного излучения – 4 с максимальной мощностью 500 Вт, работающий с частотой от 5 до 50 кГц. Источник через оптоволоконный кабель – 3 соединяется с ручным манипулятором – 2, снабженным «воздушным ножом» – системой охлаждения и удаления пыли с фокусирующей линзы манипулятора. Манипулятор управляется вручную оператором установки.

При обработке металла образуются аэрозоли, содержащие частицы металла, оксидов, радиоактивных элементов, которые захватываются потоком воздуха фильтровально-вытяжного модуля (ФВМ) – 5 на базе передвижной вентиляционно-аспирационной установки, где происходит очистка примерно на 98 % от твердых включений.

Технические характеристики оборудования приведены в таблице.

Параметры работы установки (мощность, скорость прохода) для каждого конкретного материала и загрязнения подбирали экспериментальным путем.

Для проведения исследований вырезали образцы из различных металлов с коррозионными отложениями, лакокрасочными покрытиями, отработавшим маслом и сварными швами, незагрязненные и загряз-

ненные радиоактивными веществами различной морфологии и состава.

Таблица. Характеристики оборудования

Table. Equipment characteristics

Характеристика установки Installation characteristics	Значение Value
Мощность лазерного источника, Вт Laser source power, W	от 50 до 500/50 to 500
Частота следования импульсов, кГц Pulse repetition rate, kHz	от 5 до 50/5 to 50
Ширина сканирования, мм Scanning width, mm	от 30 до 100/30 to 100
Скорость развертки, м/с Sweep speed, m/s	от 1 до 10/1 to 10
Длительность импульса, нс Pulse duration, ns	100
Длина волны, мкм/Wavelength, $\mu\text{m}$	1,07
Режим работы/Working mode	Импульсный/Pulse
Тип охлаждения/Cooling type	Жидкостной/Liquid

Исследуемые образцы до и после лазерной обработки анализировали на наличие радиоактивных веществ радиометром (МКС-01А «МУЛЬТИРАД»). Эти образцы имели следующие диапазоны радиоактивных загрязнений:

- $\beta$ : от 0 до 2500 част./ $(\text{мин} \cdot \text{см}^2)$ ;
- $\alpha$ : от 0 до 100 част./ $(\text{мин} \cdot \text{см}^2)$ .



При этом также проводили фотофиксацию поверхностей образцов металлов до и после лазерной обработки фотоаппаратом (Sony  $\alpha$ -6000) и определяли их площади поверхности ( $\text{см}^2$ ), толщины (мм) и массы (г).

Исследования по сухой лазерной обработке начинали с незагрязненных РВ образцов и далее переходили к МОЗРВ.

В процессе исследований установили, что после лазерной обработки поверхность металла модифицируется, оставляя характерный рисунок, связанный с высокотемпературными процессами, что также может сопровождаться *паразитным явлением* – заплыванием радиоактивных частиц в приповерхностный слой. Поэтому оптимальными считали параметры, обеспечивающие удаление загрязненного слоя с минимальным количеством «проходов» манипулятора по единице площади образца с мощностью и частотой лазерного генератора, исключающей заплывание радиоактивных элементов в объем модифицированной поверхности [16–20].

Для оценки степени сплавления радиоактивных частиц с модифицированным слоем проводили кратковременную обработку абразивным материалом (полукруглым напильником) поверхности образцов, после чего измерили остаточную  $\alpha$ - и  $\beta$ - активности поверхности в местах зачистки, а также в образовавшихся металлических шлифотходах.

Согласно МУК 2.6.1.1087-02 незагрязненным является металл, вблизи которого плотность потока альфа-излучения менее  $2,4 \text{ част./(мин}\cdot\text{см}^2)$ , а плотность потока бета-излучения не превышает  $24 \text{ част./(мин}\cdot\text{см}^2)$ . Такой металл приравнивают к металлическому лому.

#### Результаты экспериментов и обсуждение

*Подбор основных параметров процесса лазерной обработки.* С целью определения оптимальных параметров работы лазерной установки (мощность, скорость прохода и т. д.) вначале проводили исследования по лазерной обработке образцов материалов с нерадиоактивным загрязнением.

Установка по лазерной обработке металлических поверхностей имеет ряд параметров, которые можно

регулировать для достижения наилучших показателей процесса очистки. Такими параметрами являются:

- мощность лазерного пучка (P), %;
- частота лазерного излучения ( $\omega$ ), кГц;
- скорость развертки (N), м/с;
- ширина обработки (H), мм;
- скорость движения сервопривода (v), см/с.

Для определения параметров, которые оказывают наибольшее влияние на показатели процесса очистки, провели тестовые проходы на ряде образцов из Ст. 3, покрытых ржавчиной, но незагрязненных радиоактивными веществами.

Проведенные исследования, результаты которых графически приведены на рис. 6, показывают, что при вариации мощности лазерного излучения в интервале от 100 до 50 % наблюдается значительное уменьшение массы удаляемого с поверхности обработанного материала. При этом показатели очистки металлической поверхности остаются практически постоянными при изменении мощности установки в пределах от 100 до 90 %.

Частота лазерного излучения установки может меняться в интервале от 5 до 50 кГц. При увеличении частоты от 5 до 50 кГц наблюдается снижение ширины обрабатываемой поверхности от 100 до 30 мм (таблица).

Экспериментально при предварительных исследованиях по лазерной обработке загрязненных поверхностей различных металлов нами было установлено, что уменьшение ширины обработки детали до 50 мм и ниже приводит к локальному перегреву обрабатываемой поверхности, а также увеличивает число проходов, необходимых для достижения требуемых параметров обработки. Вследствие этого такие режимы характеризуются наименьшей производительностью на единицу мощности лазерного излучения.

Скорость развертки лазерного луча может изменяться в диапазоне от 1 до 10 м/с. При увеличении скорости наблюдаются явления, аналогичные тем, что фиксировали при увеличении частоты, т. е. происходит значительное уменьшение ширины обрабатываемой поверхности.

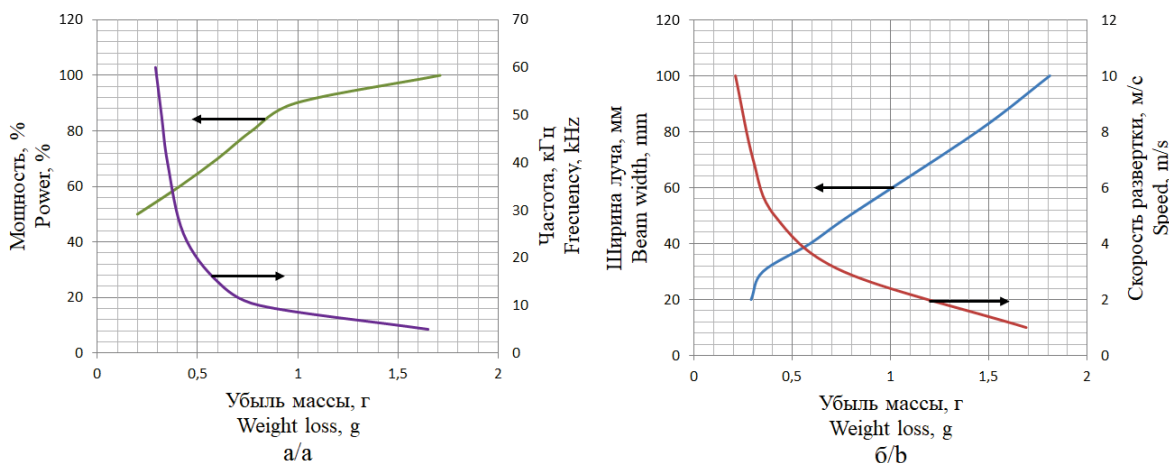


Рис. 6. Зависимости влияния основных параметров лазерного излучения на убыль массы образца из Ст. 3: а) мощности и частоты лазерного излучения; б) скорости развёртки и ширины лазерного излучения

**Fig. 6.** Dependences of the influence of the laser radiation main parameters on the weight loss of the sample from St. 3: a) power and frequency of laser radiation; b) sweep speed and width of laser radiation

Таким образом, из результатов приведенных исследований следует, что для достижения лучших показателей лазерной очистки металлической стальной поверхности, имеющей нерадиоактивные загрязнения, при минимальном числе проходов оптимальными параметрами являются: мощность лазерной установки – 90–100 %, частота – 5–10 кГц, скорость развертки – 1–2,5 м/с, ширина лазерного пучка – 90–100 мм.

Скорость движения сервопривода подбирали исходя из рекомендаций [14–17] для каждого исследуемого материала в диапазоне от 0,4 до 2,5 см/с.

*Исследования процесса очистки МОЗРВ.* Для проведения испытаний были отобраны следующие образцы, загрязненные радиоактивными элементами:

- Ст. 3 со слоем коррозионных отложений;
- Ст. 3, имеющая лакокрасочное покрытие типа ПФ-115;
- Ст. 3, загрязненная консистентной смазкой типа Литол-24;
- Ст. 10 со слоем коррозионных отложений;
- легированная сталь 12Х18Н10Т (полированная), загрязненная консистентной смазкой типа Литол-24;
- цветные металлы (Al и Cu), имеющие поверхностные окисления.

Кратко рассмотрим основные характеристики выбранных образцов металлов и условия их исследования:

- 1) *Ст. 3 со слоем коррозионных отложений.* Для исследования выбрали перфорированный настил в виде листового проката толщиной 3 мм, покрытый слоем продуктов коррозии, из которого вырезали пластины прямоугольной формы с площадью поверхности около 260 см<sup>2</sup>. Исследования проводили при скорости перемещения сервопривода от 0,4 до 2,3 см/с и постоянной мощности лазерного излучения (100 %);
- 2) *Ст. 3 со слоем ЛКП.* Для исследования выбрали листовую прокат толщиной 3 мм, покрытый слоем лакокрасочного покрытия неизвестного происхождения толщиной около 50 мкм, из которого вырезали пластины прямоугольной формы с площадью поверхности 180 см<sup>2</sup>. Исследования проводили при скорости перемещения сервопривода от 0,4 до 2,3 см/с и постоянной мощности лазерного излучения (100 %);
- 3) *Ст. 10 со слоем коррозионных отложений.* Для опытов выбрали отрезок трубы с толщиной стенки 3 мм, покрытый слоем продуктов коррозии, из которого вырезали части с площадями поверхности от около 300 см<sup>2</sup>. Исследования проводили при скорости перемещения сервопривода от 0,4 до 2,3 см/с и постоянной мощности лазерного излучения (100 %);
- 4) *легированная сталь марки 12Х18Н10Т, имеющая поверхностное окисление.* Для нарезания образцов прямоугольной формы с площадью поверхности

270 см<sup>2</sup> выбрали листовую прокат из стали толщиной 2 мм, покрытый тонким слоем поверхностного окисления;

- 5) *легированная сталь марки 12Х18Н10Т, имеющая поверхностные отложения.* Для нарезания образцов выбрали две единицы листового проката, использовавшихся в качестве составных частей аппаратов толщиной 4 и 8 мм, имеющих сварные швы. Площади поверхностей исследованных образцов варьировались от 170 до 220 см<sup>2</sup>;
- 6) *цветные металлы (Al марки АМг2 и Cu марки М1),* имеющие поверхностные окисления. Из листов вырезали образцы прямоугольной формы с площадью поверхности 270 см<sup>2</sup>.

Результаты проведенных исследований по лазерной дезактивации указанных образцов металлических материалов, загрязненных РВ, приведены на рис. 7.

Из данных, приведенных на рис. 7, следует:

- 1) лазерная дезактивация позволяет очистить образцы из легированной стали с уровнем  $\alpha$ -загрязнения 20–40 част./((мин·см<sup>2</sup>)) и  $\beta$ -загрязнения 90–100 част./((мин·см<sup>2</sup>)) до допустимых по МУК 2.6.1.1087-02 норм за 1 проход. Однако при дезактивации образцов с уровнем  $\beta$ -загрязнения более 600 част./((мин·см<sup>2</sup>)) не удается дезактивировать металл до допустимых норм по радиоактивному загрязнению. При этом после 3–5 проходов устанавливается постоянная величина по  $\alpha$ - и  $\beta$ -загрязнениям. Образцы с уровнем  $\beta$ -загрязнения порядка 600–4000 част./((мин·см<sup>2</sup>)) дезактивируются до 300–350 част./((мин·см<sup>2</sup>)). Недостаточная степень дезактивации образцов с высоким уровнем  $\beta$ -загрязнения связана с высокой отражающей способностью лазерного луча от поверхности легированной стали, видимо, поэтому в порах остается остаточное радиоактивное загрязнение. Следует отметить, что использование дополнительной химической дезактивации этих поверхностей раствором 6 % серной кислоты при температуре (60±5) °С в течение 4 часов позволило растворить слой образовавшейся после лазерной обработки окислы и удалить вместе с ним остаточное радиоактивное загрязнение;
- 2) при дезактивации образцов из цветных металлов (алюминий, медь) происходит полное удаление оксидной пленки и их очистка от радионуклидов до допустимых норм за 1–3 прохода лазерного луча;
- 3) при обработке образцов из углеродистой стали с коррозионными отложениями не удается дезактивировать металл до допустимых норм, так как наблюдается образование окислы на поверхности металла, которая, видимо, не полностью удаляется лазерным лучом. При этом установили, что уровень не снимаемого загрязнения напрямую зависит от начального уровня загрязнения образца;
- 4) при дезактивации образцов из стали с ЛКП вместе с краской также удаляются радиоактивные частицы, при этом установили, что чем толще слой краски,

тем большее количество проходов лазерной обработки необходимо для его удаления с поверхности;  
 5) лазерная обработка образцов металлов с отработавшим маслом оставляет на локальных участках продукты коррозии, которые имеют радиоактивное загрязнение;

б) лазерная обработка малоэффективна при дезактивации сварных швов. Основная часть  $\alpha$ -,  $\beta$ -активности после дезактивации остается именно в сварных швах.

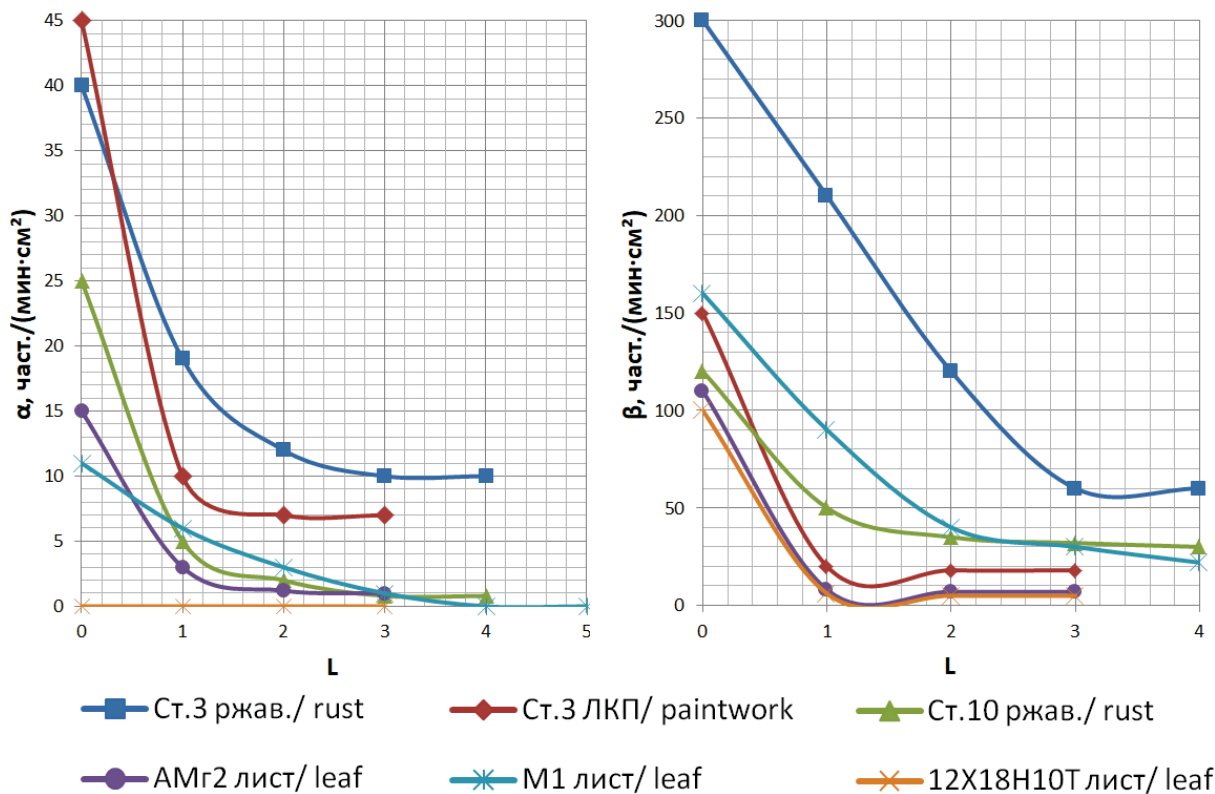


Рис. 7. Зависимости плотности  $\alpha$ - и  $\beta$ -излучений от металлических образцов из различных материалов от числа проходов лазерной обработки

Fig. 7. Dependences of the density of  $\alpha$ - and  $\beta$ -radiations from metal samples from various materials on the number of laser processing passes

На рис. 8 представлены структуры поверхности исследуемых образцов из стали 12Х18Н10Т до и после лазерной обработки, снятые при помощи фотоаппарата, оптического стереомикроскопа и электронного микроскопа.

Из фотоснимков видно, что поверхности образцов из легированной стали марки 12Х18Н10Т до и после лазерной обработки мало различаются (рис. 8, а, б). На поверхности исходного образца видны сетки зерновой структуры металла размерами от 1 до 10 мкм (рис. 8, а). После обработки на поверхности наблюдается цвет побежалости металла, характерный для оксидной пленки железа (рис. 8, б).

Характер покрытия поверхности по результатам оптической и сканирующей электронной микроскопии мало изменился, поверхность после обработки не стала более гладкой (рис. 8, б–е). Морфология поверхности мало изменилась (рис. 8, з–е), но, судя по всему, с неё был удален очень тонкий аморфный слой оксидов.

На рис. 9 представлены структуры поверхности исследуемых образцов из Ст. 10 до и после лазерной обработки, снятые при помощи фотоаппарата, опти-

ческого стереомикроскопа и электронного микроскопа.

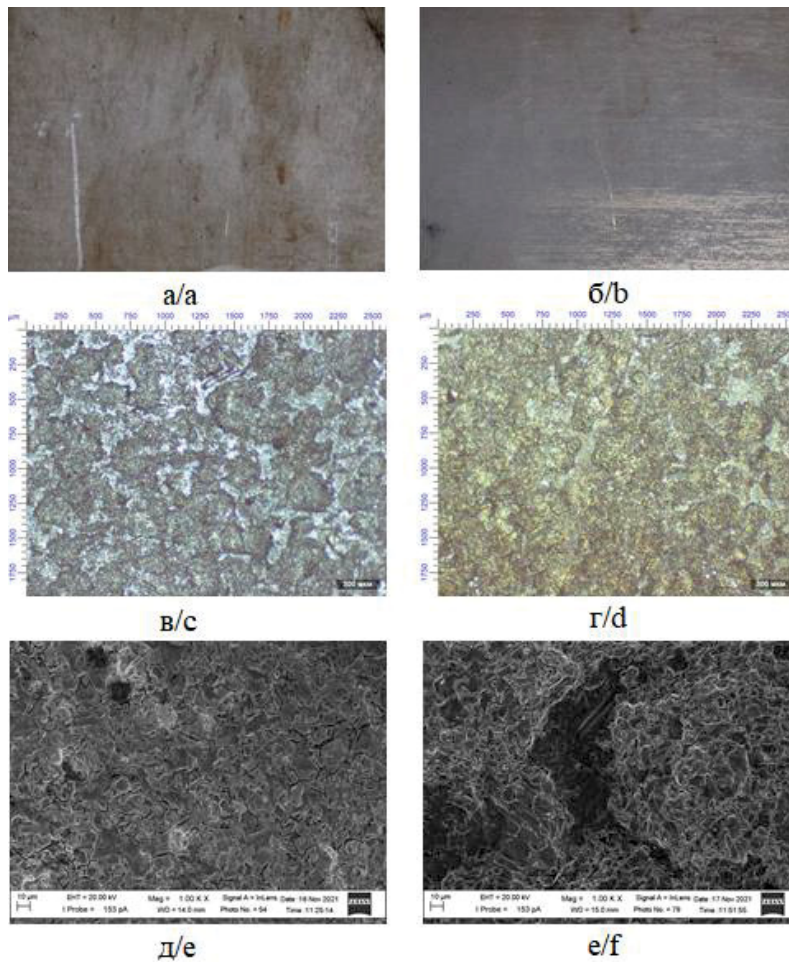
На большей части поверхности образца Ст. 10 наблюдаются следы пигментной коррозии коричневого цвета (рис. 9, а, в). После лазерной обработки на поверхности образца следы коррозии присутствуют в незначительном количестве, в основном наблюдается слой «окалины» и участки серебристо-белого цвета, характерные для металла (рис. 9, б, г).

Изменения морфологии поверхности образца из Ст. 10 после обработки выражены более явно: исходный образец практически полностью покрыт оксидными формами (рис. 9, д), после обработки поверхность приобретает гладкий вид (рис. 9, е). Проявляется внутренняя структура поверхностного слоя без заплывания пространства между агломератами (рис. 9, е). На поверхности исходного образца, кроме сетчатой структуры, слоя оксида железа, присутствуют частицы с размерами от 2 до 10 мкм различных форм (рис. 9, д). Посторонние частицы на поверхности образца после обработки отсутствуют.

После обработки наблюдается ярко выраженная структура металла со следами термического воздей-

ствия (округлые края зерна). Микротрещины на поверхности после обработки остаются открытыми, что уменьшает вероятность заплывания радиоактивных

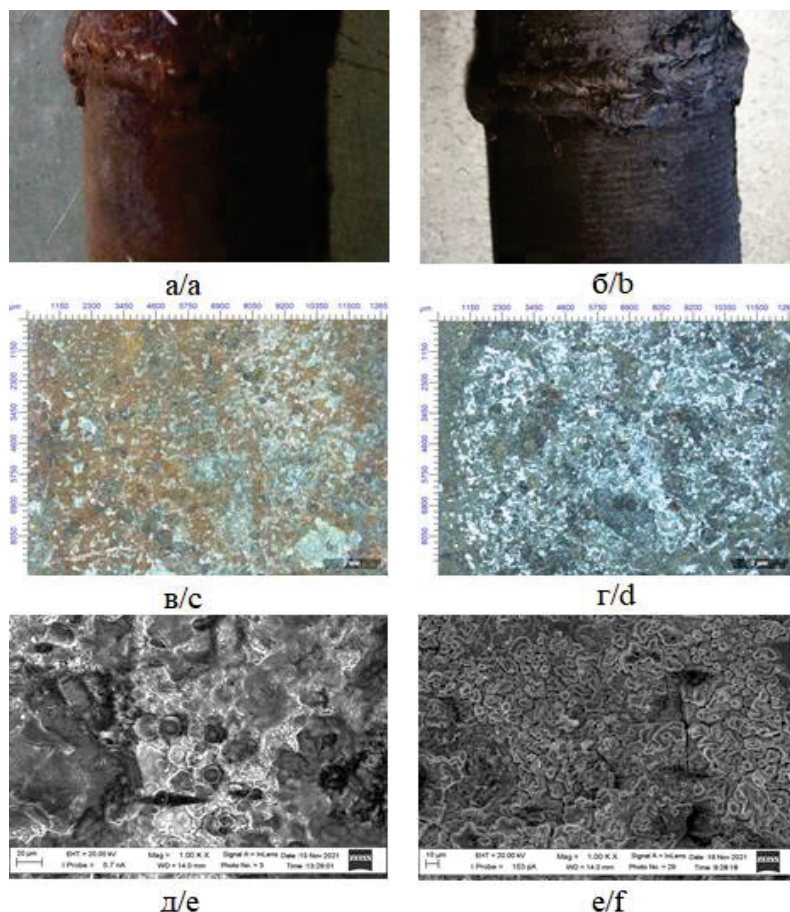
загрязнений на этих труднодоступных для дезактивации участках (рис. 9, в–е).



**Рис. 8.** Результаты обработки поверхности образца из стали 12X18H10T: а, б) общий вид образца до и после обработки; в, г) оптическая микроскопия до и после обработки; д, е) электронная микроскопия до и после обработки

**Fig. 8.** Results of processing the surface of the sample from steel 12X18H10T: a, b) general view of the sample before and after processing; c, d) optical microscopy before and after treatment; e, f) electron microscopy before and after treatment





**Рис. 9.** Результаты обработки поверхности образца из Ст. 10: а, б) общий вид образца до и после обработки; в, г) оптическая микроскопия до и после обработки; д, е) электронная микроскопия до и после обработки

**Fig. 9.** Results of processing the surface of the sample from St. 10: a, b) general view of the sample before and after processing; c, d) optical microscopy before and after treatment; e, f) electron microscopy before and after treatment

#### Заключение

Приведены результаты исследования процесса лазерной очистки поверхностей различных металлов (Ст. 3, Ст. 10, легированная сталь 12Х18Н10Т, алюминий АМг2 и медь М1) от нерадиоактивных (продукты коррозии, лакокрасочного покрытия, смазки) и радиоактивных (дезактивация) загрязнений. При очистке образцов от нерадиоактивных загрязнений определили оптимальные параметры:

- мощность лазерного луча (Р) 100 %;
- частота лазерного излучения ( $\omega$ ) 5 кГц;
- скорость позиционирования лазерного луча (N) 1 м/с;
- ширина обработки (Н) 100 мм;
- скорость перемещения манипулятора в диапазоне от 1 до 2,5 см/с.

При исследованиях по лазерной дезактивации поверхностей образцов указанных металлов от радиа-

ционных загрязнений на установке HTF CLEAN 500 показано:

- установка эффективна для дезактивации сталей, цветных металлов, которые имеют уровень радиоактивного загрязнения не более 40 част./ $(\text{мин} \cdot \text{см}^2)$  по  $\alpha$ -частицам и не более 360 част./ $(\text{мин} \cdot \text{см}^2)$  по  $\beta$ -частицам. При этом металл очищается от радионуклидов до требований МУК 2.6.1.1087-02, т. е. является незагрязненным и его приравнивают к металлическому лому;
- для проведения полной дезактивации материалов с более высоким уровнем загрязнений требуется проведение дополнительных исследований, видимо, на лазерных установках большей мощности;
- лазерная обработка позволяет очистить поверхности металлов как от ЛКП, смазок, продуктов коррозии, так и от радиоактивных загрязнений. При этом чем толще слой загрязнений, тем большее количество проходов необходимо для их удаления (более 2–3).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мутин Т.Ю. Лазерная дезактивация металлических поверхностей: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – СПб, 2012. – 101 с.
2. Оспенникова О.Г., Козлова А.А., Козлов И.А. Лазерные технологии для удаления лакокрасочных покрытий в процессе ремонта и обслуживания авиационной техники // Труды ВИАМ. – 2021. – № 4. – С. 110–123.
3. Кулагина Т.А., Шеленкова В.В. Методы обезвреживания загрязнений поверхностей // Журнал СФУ. – 2017. – Т. 10. – № 3. – С. 352–366.
4. Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н., Мисюрлов А.И. Технологические процессы лазерной обработки. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. – 664 с.
5. Лазерная очистка в машиностроении и приборостроении / В.П. Вейко, В.Н. Смирнов, А.М. Чирков, Е.А. Шахно. – СПб: НИУ ИТМО, 2013. – 103 с.
6. Роботизированная лазерная влажная очистка тонкостенных конструкций / Ю.Н. Кульчин, Н.Ю. Анисимов, А.А. Ионов, Д.С. Пивоваров, Е.А. Шарова, А.И. Никитин // Вестник ДВО РАН. – 2021. – № 4. – С. 30–39.

7. Кульчин Ю.Н., Никитин А.И., Субботин Е.П. Лазерная под-водная очистка корпусов морских судов // Прикладная фото-ника. – 2020. – № 4. – С. 90–104.
8. О возможности спектроскопического контроля процесса ла-зерной очистки / В.П. Вейко, С.А. Волков, Т.Ю. Мутин, В.Н. Смирнов // Известия ВУЗов. Приборостроение, темати-ческий выпуск «Лазерные технологии в приборостроении». – 2001. – Т. 54. – № 2. – С. 65–68.
9. Lu Y.F., Song W.D., Low T.C. Laser cleaning of micro-particles from a solid surface – theory and applications // Materials Chemistry and Physics. – 1998. – V. 54. – № 2. – P. 181–185.
10. Вейко В.П., Шахно Е.А. Индуцированное лазером локальное осаждение тонких пленок // Оптический журнал. – 1998. – Т. 65. – № 10. – С. 107–110.
11. Pasquet P., DelCoso R., Boneberg J. Laser cleaning of oxide iron layer: efficiency enhancement due to electrochemical induced absorptivity change // Applied Physics A. –1999. – V. 69. – № 6. – P. 727–730.
12. Dry laser cleaning of anodised aluminium / P. Meja, M. Autric, P. Delaporte, P. Alloncle // Applied Physics A. –1999. – V. 69. – № 6. – P. 121–128.
13. Вейко В.П., Шахно Е.А. Физические механизмы лазерной очистки поверхности // Известия РАН. – 2001. – Т. 65. – № 4. – С. 584–587.
14. Лазерная очистка и дезактивация поверхностей металлов: фи-зические процессы и применение / В.П. Вейко, Т.Ю. Мутин, В.Н. Смирнов, Г.Д. Никишин, Е.А. Шахно // Журнал Лазер-Информ. – 2008. – № 1. – С. 8–16.
15. Delaporte Ph., Gastaud M., Marine W. Dry excimer laser cleaning applied to nuclear decontamination // Applied Surface Science. – 2003. – V. 208. – P. 298–305.
16. Brygo F., Dutouquet Ch. Laser fluence, repetition rate and pulse duration effects on paint ablation // Applied Surface Science. – 2006. – V. 252. – № 6. – P. 2131–2138.
17. A comparison of ns and ps steam laser cleaning of Si surfaces / M. Mosbacher, N. Chaoui, J. Siegel et al. // Applied Physics A. – 1999. – V. 69. – P. 331–334.
18. Optical reflectance and scattering studies of nucléation and growth of bubbles at liquid-solid interface induced by pulsed laser heating / O. Yavas, P. Leiderer, H.K. Park et al. // Physical Review Letters. – 1993. – V. 70. – № 12. – P. 1830–1833.
19. Removal of paint layer by layer using a 20 kHz 140 ns qua-sicontinuous wave laser / Z. Zhanga, J. Zhang, Y. Wang et al. // Optik. – 2018. – V. 174. – P. 46–55.
20. Проскураков В.И., Ширин С.С., Бородин С.А., Лазерная мо-дификация поверхности стали 12Х18Н10Т порошком TiO<sub>2</sub> // Вестник СГТУ. – 2020. – № 1. – С. 81–86.

Поступила 29.06.2022 г.

Прошла рецензирование 22.09.2022 г.

#### Информация об авторах

**Софронов В.Л.**, доктор технических наук, профессор кафедры химии и технологии материалов современной энергетики Северского технологического института – филиала Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ».

**Карташов Е.Ю.**, кандидат технических наук, заведующий кафедрой машин и аппаратов химических и атом-ных производств Северского технологического института – филиала Национального исследовательского ядер-ного университета «МИФИ».

**Ткачук С.А.**, преподаватель кафедры машин и аппаратов химических и атомных производств Северского тех-нологического института – филиала Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ».

**Пак А.Д.**, аспирант кафедры химии и технологии материалов современной энергетики Северского технологи-ческого института – филиала Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ».

**Тинин В.В.**, кандидат технических наук, технический директор АО «Сибирский химический комбинат».

**Галата А.А.**, заместитель генерального директора АО «Сибирский химический комбинат» по выводу из экс-плуатации и приоритетным направлениям деятельности.

UDC 621.039.75

## RESEARCH ON LASER DEACTIVATION CLEANING OF METAL SURFACES CONTAMINATED WITH RADIOACTIVE MATERIALS

Vladimir L. Sofronov<sup>1</sup>,  
vlsofronov@mephi.ru

Evgeniy U. Kartashov<sup>1</sup>,  
kart.62@yandex.ru

Semen A. Tkachuk<sup>1</sup>,  
semenaleksandroviht@gmail.com

Alexander D. Pak<sup>1</sup>,  
AIDPak@rosatom.ru

Vasiliy V. Tinin<sup>2</sup>,  
shk@atomsib.ru

Andrey A. Galata<sup>2</sup>,  
shk@atomsib.ru

<sup>1</sup> Seversk Technological Institute – branch of the National Research Nuclear University «MEPhI»,  
65, Kommunistichesky avenue, Seversk, 636036, Russia.

<sup>2</sup> Seversk Chemical Combine,  
1, Kurchatov street, Seversk, 636039, Russia.

**The relevance** of the study is caused by the need to find a new, more efficient method for decontamination of large volumes of metal waste contaminated with radioactive substances. The accumulation of this type of waste is associated with the production and subsequent reduction of nuclear warheads, the dismantling of nuclear industry facilities and the non-nuclear sector that have exhausted their resources. **Purpose:** to conduct research on the deactivation cleaning of metal surfaces contaminated with radioactive materials using a mobile laser unit of a modular type.

**Objects:** systems consisting of samples of various metals and related layers of coatings of various morphologies (corrosion layer, paint coating, lubricants) contaminated with radioactive substances, as well as laser radiation.

**Methods:** laser deactivation (installation «HTF Clean 500»), radiometric analysis (MKS-01A «MULTIRAD» and MKS-AT-1117M), optical microscopy (Micromed Polar Nikon SMZ745T), photofixation (Sony α-6000), scanning electron microscopy (Carl Zeiss Sigma), grinding and cutting tools, electronic scales (SPV-60), linear measuring tool.

**Results.** The authors developed the techniques for conducting research of laser deactivation of metal surfaces contaminated with radioactive substances and dosimetric studies of metal surface samples before and after their laser treatment. The optimal parameters of laser decontamination of surfaces of various morphology and composition were determined; graphs of dependences of the degree of removed contamination of various morphology and composition on the number of laser decontamination passes are plotted; conclusions are made about the expediency of applying the laser cleaning method for processing metals containing radioactive substances on the surface, and recommendations are given on laser deactivation for various metal waste contaminated with radioactive substances.

### Key words:

radiation, decontamination, surface, laser decontamination installation, degree of purification, radioactive contamination, contaminated surfaces.

### REFERENCES

1. Mutin T.Yu. *Lazernaya dezaktivatsia metalicheskikh poverkhnostey*. Avtoreferat Dis. Kand. nauk [Laser decontamination of metal surfaces. Cand. Diss. Abstract]. St. Petersburg, 2012. 101 p.
2. Ospennikova O.G., Kozlova A.A., Kozlov I.A. Laser technologies for the removal of paint and varnish coatings in the process of repair and maintenance of aviation equipment. *Proceedings of VIAM*, 2021, no. 4, pp. 110–123. In Rus.
3. Kulagina T.A., Shelenkova V.V. Methods for the neutralization of surface contamination. *Journal of Siberian Federal University*, 2017, vol. 10, no. 3, pp. 352–366. In Rus.
4. Grigoryants A.G., Shiganov I.N., Misyurov A.I. *Tekhnologicheskie protsessy lazernoy obrabotki* [Technological processes of laser processing]. Moscow, MSTU im. N.E. Bauman Publ. house, 2006. 664 p.
5. Veiko V.P., Smirnov V.N., Chirkov A.M., Shakhno E.A. *Lazernaya ochistka v mashinostroenii i priborostroenii* [Laser cleaning in mechanical engineering and instrument making]. St. Petersburg, NRU ITMO Publ., 2013. 103 p.
6. Kulchin Yu.N., Anisimov N.Yu., Ionov A.A., Pivovarov D.S., Sharova E.A., Nikitin A.I. Robotic laser wet cleaning of thin-walled structures. *Bulletin of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences*, 2021, no. 4, pp. 30–39. In Rus.
7. Kulchin Yu.N., Nikitin A.I., Subbotin E.P. Laser underwater cleaning of marine hulls. *Applied Photonics*, 2020, no. 4, pp. 90–104. In Rus.
8. Veiko V.P., Volkov S.A., Mutin T.Yu., Smirnov V.N. On the possibility of spectroscopic control of the laser cleaning process. *Bulletin of the University. Instrumentation, thematic issue «Laser technologies in instrumentation»*, 2001, vol. 54, no. 2, pp. 65–68. In Rus.
9. Lu Y.F., Song W.D., T.C. Low. Laser cleaning of micro-particles from a solid surface – theory and applications. *Materials Chemistry and Physics*, 1998, vol. 54, no. 2, pp. 181–185.
10. Veiko V.P., Shakhno E.A. Laser-induced local deposition of thin films. *Optical journal*, 1998, vol. 65, no. 10, pp. 107–110. In Rus.

11. Pasquet P., DelCoso R., Boneberg J. Laser cleaning of oxide iron layer: efficiency enhancement due to electrochemical induced absorptivity change. *Applied Physics A*, 1999, vol. 69, no. 6, pp. 727–730.
12. Meja P., Autric M., Delaporte P., Alloncle P. Dry laser cleaning of anodised aluminium. *Applied Physics A*, 1999, vol. 69, no. 6, pp. 121–128.
13. Veiko V.P., Shakhno E.A. Physical mechanisms of laser surface cleaning. *Bulletin of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences*, 2001, vol. 65, no. 4, pp. 584–587. In Rus.
14. Veiko V.P., Mutin T.Yu., Smimov V.N., Nikishin G.D., Shakhno E.A. Laser cleaning and decontamination of metal surfaces: physical processes and applications. *Journal of Laser-Inform*, 2008, no. 1, pp. 8–16. In Rus.
15. Delaporte Ph., Gastaud M., Marine W. Dry excimer laser cleaning applied to nuclear decontamination. *Applied Surface Science*, 2003, vol. 208, pp. 298–305.
16. Brygo F., Dutouquet Ch. Laser fluence, repetition rate and pulse duration effects on paint ablation. *Applied Surface Science*, 2006, vol. 252, no. 6, pp. 2131–2138.
17. Mosbacher M., Chaoui N., Siegel J. A comparison of ns and ps steam laser cleaning of Si surfaces. *Applied Physics A*, 1999, vol. 69, pp. 331–334.
18. Yavas O., Leiderer P., Park H.K. Optical reflectance and scattering studies of nucléation and growth of bubbles at liquid-solid interface induced by pulsed laser heating. *Physical Review Letters*, 1993, vol. 70, no. 12, pp. 1830–1833.
19. Zhanga Z., Zhang J., Wang Y. Removal of paint layer by layer using a 20 kHz 140 ns qua-sicontinuous wave laser. *Optik*, 2018, vol. 174, pp. 46–55.
20. Proskuryakov V.I., Shirin S.S., Borodina S.A., Laser modification of the surface of 12X18H10T steel with TiO<sub>2</sub> powder. *Bulletin of the SGTU*, 2020, no. 1, pp. 81–86.

Received: 29 June 2022.

Reviewed: 22 September 2022.

#### Information about the authors

**Vladimir L. Sofronov**, Dr. Sc., professor, Seversk Technological Institute – branch of the National Research Nuclear University «MEPhI».

**Evgeniy U. Kartashov**, Cand Sc., head of the Department of Machines and Apparatuses for Chemical and Nuclear Production, Seversk Technological Institute – branch of the National Research Nuclear University «MEPhI».

**Semen A. Tkachuk**, lecturer, Seversk Technological Institute – branch of the National Research Nuclear University «MEPhI».

**Alexander D. Pak**, postgraduate student, Seversk Technological Institute – branch of the National Research Nuclear University «MEPhI».

**Vasilij V. Tinin**, Cand Sc., technical director, JSC «Siberian Chemical Combine».

**Andrey A. Galata**, deputy general director for decommissioning and priority areas of activity, JSC «Siberian Chemical Combine».