

Ю.Н. КУЛЬЧИН, Н.Ю. АНИСИМОВ, А.А. ИОНОВ, Д.С. ПИВОВАРОВ,
Д.С. ЯЦКО, Е.А. ШАРОВА, А.И. НИКИТИН

Роботизированная лазерная влажная очистка тонкостенных конструкций

В статье представлены результаты исследования процессов лазерного удаления красок с поверхности металлических деталей. Рассмотрены характерные особенности очистки поверхностей сканирующим лазерным излучением. Обозначены пути развития лазерного метода для практического использования в технологических операциях очистки поверхностей тонкостенных конструкций сложной геометрической формы. Предложен вариант использования импульсного нефокусированного лазерного излучения для решения задач оперативной очистки планеров летательных аппаратов.

Ключевые слова: лазерная влажная очистка, лазерная абляция, лазерная десорбция, тонкостенные конструкции, воздушное судно.

The robot-assisted laser wet cleaning of thin-walled constructions. Yu.N. KULCHIN^{1, 2}, N.Yu. ANISIMOV², A.A. IONOV³, D.S. PIVOVAROV¹, D.S. YATSKO¹, E.A. SHAROVA², A.I. NIKITIN¹ (1Institute of Automation and Control Processes, FEB RAS, Vladivostok, ²Far Eastern Federal University, Vladivostok, ³322 Aircraft Repair Plant, Primorsky Krai, Vozdvizhenka village).

The article presents the results of research of processes of laser removal of paints from the surface of metal parts. The characteristic features of surface cleaning by scanning laser radiation are considered. The ways of development of laser method for practical use in technological operations of cleaning surfaces of thin-walled structures of complex geometric shape are outlined. The variant of using pulsed unfocused laser radiation for solving problems of operative cleaning of airframe airframes is proposed.

Key words: laser wet cleaning, laser ablation, laser desorption, thin-walled structures, aircraft.

1. Введение

Прошедшие двадцать лет XXI в. характеризуются появлением на отечественном и мировом рынках большого количества робототехнических комплексов (РТК) лазерной обработки материалов. Сегодня технологические процессы лазерной резки, лазерной сварки, лазерного аддитивного производства деталей и лазерной очистки поверхностей изделий [1, 2] находят все более широкое применение в передовых отраслях промышленности.

*КУЛЬЧИН Юрий Николаевич – академик РАН, доктор физико-математических наук, профессор, научный руководитель (Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, Дальневосточный федеральный университет, Владивосток), АНИСИМОВ Никита Юрьевич – кандидат физико-математических наук, ректор (Дальневосточный федеральный университет, Владивосток), ИОНОВ Александр Александрович – главный инженер (ОАО «322 Авиационный ремонтный завод», Приморский край, с. Воздвиженка), ПИВОВАРОВ Дмитрий Сергеевич – младший научный сотрудник, ЯЦКО Дмитрий Сергеевич – младший научный сотрудник (Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, Владивосток), ШАРОВА Елена Александровна – аспирант (Дальневосточный федеральный университет, Владивосток), НИКИТИН Александр Иванович – ведущий инженер (Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, Владивосток). *E-mail: kulchin@iacp.dvo.ru

Работы выполнены при поддержке Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере, договор № 3131ГС1/48559.

Волоконный лазер [3] как инструмент, стабильно работающий при различных внешних условиях, послужил основой развития отдельного направления технологического развития: промышленная очистка поверхностей как альтернатива способу ручной химико-механической очистки изделий. Режим лазерной абляции чаще всего используется для очистки от ржавчины, окалин, краски, загрязнений различной природы поверхностей металлических деталей и конструкций крупного масштаба. Обработка лазерным лучом тонкостенных конструкций из металлов, металлических сплавов и композитных материалов вследствие быстропотекающих процессов термического нагрева и охлаждения может приводить к преобразованию их равновесного состояния и, как следствие, к недопустимой необратимой деформации. Проблему также представляет послойное прецизионное удаление пленок и лакокрасочных покрытий.

Процесс взаимодействия лазерного излучения с материальными объектами имеет существенные отличия в сравнении с их облучением обычными источниками света. В Центре лазерных технологий Института автоматики и процессов управления ДВО РАН (ЦЛТ ИАПУ ДВО РАН) проводятся фундаментальные и поисковые исследования, направленные на изучение особенностей процессов взаимодействия лазерного излучения с веществами различной природы, в том числе с биологическими объектами, находящимися в морской среде на поверхности конструкций из различных материалов [4, 5]. Опыт, приобретенный в ходе реализации научно-исследовательских работ по созданию технологии лазерной очистки корпусов судов от биологического обрастания, позволил найти новый технологический способ для реализации процесса лазерной очистки поверхностей тонкостенных конструкций. Суть разработанного метода заключается в нанесении на очищаемую поверхность тонкой пленки воды, что позволяет не только значительно уменьшить негативное температурное воздействие лазерного излучения на конструкцию, но и производить послойное селективное удаление покровных слоев.

Цель настоящей работы – изложение результатов исследований по разработке способа лазерного влажного селективного удаления красок и загрязнений различной природы с поверхности металлических тонкостенных конструкций, в том числе с обшивки планеров воздушных судов.

2. Особенности удаления краски лазерным излучением в режиме абляции с металлической поверхности тонкостенных конструкций

Промышленная технология лазерной очистки поверхности металлоконструкций и лазерного удаления лакокрасочных покрытий является альтернативой абразивному и ручному химико-механическому способам очистки. Принцип работы представленных на российском и мировом рынках лазерных мобильных и стационарных установок бесконтактного удаления с поверхности металлических деталей масла, пыли, оксидных пленок, ржавчины, окалин и краски основан на взаимодействии сфокусированного сканируемого лазерного излучения с обрабатываемой поверхностью. Однако сложность обеспечения точности фокусировки в процессе сканирования и высокая вероятность разрушения или изменения физико-механических свойств материала обрабатываемой детали/конструкции ответственного назначения требуют индивидуального подхода, в том числе предварительного моделирования процесса взаимодействия используемого лазерного излучения с удаляемым материалом и металлическим материалом тонкостенных конструкций сложного профиля [6]. Перечень красок, применяемых для создания покрытий планеров воздушных судов (ВС), достаточно велик, при этом каждый материал (эмали, грунтовки, шпатлевки) имеет индивидуальный химический состав и обладает характерными свойствами, в том числе индивидуальной поглощательной способностью [7], что существенно влияет на процесс лазерной очистки поверхности от лакокрасочных покрытий (ЛКП).

2.1. Результаты исследований температурных полей в зоне сухой и влажной очистки металлической поверхности от ЛКП лазерным излучением в режиме абляции

Исследования влияния лазерного излучения на физико-механические характеристики обшивки планера самолета производились на образце, изготовленном из элемента крыла воздушного судна КБ Сухого (рис. 1).



Рис. 1. Образец, изготовленный из элемента крыла ВС КБ Сухого: *а* – фрагмент элемента крыла самолета КБ Сухого, *б* – поперечный разрез элемента лакокрасочного покрытия

Образцы тонкостенной обшивки планера ВС состоят из алюминиевого сплава толщиной 0,7 мм, покрытого тремя слоями стандартного покрытия из следующих материалов: анодный слой (толщина слоя $22,67 \pm 0,625$ мкм), грунт (толщина слоя $30,09 \pm 1,080$ мкм), краска серо-голубая. Общая толщина слоя лакокрасочного покрытия составляла 1240 ± 20 мкм. Поперечный разрез покрытия при 500-кратном увеличении представлен на рис. 1, *б*.

Предварительно проведено исследование распределения температурных полей на сухой и влажной поверхностях образца крыла планера самолета, покрытого ЛКП, при воздействии сфокусированного лазерного излучения. Исследования проведены с использованием разработанного в ЦЛТ ИАПУ ДВО РАН роботизированного технологического комплекса в следующем составе: промышленный робот KUKA KR-30 HA, волоконный лазер YLR-150/1500-QCW-MM-AC (длина волны излучения 1,06 мкм); сканирующая система IPGP 2d Mid High Scanner программно-аппаратного комплекса управления оборудованием. Излучение лазера фокусировалось и сканировалось по очищаемой поверхности образца. Характеристики процесса облучения приведены в таблице.

Характеристики сканируемого лазерного излучения

Параметр	Показатель
Скорость перемещения лазерного пучка, мм/с	1500
Средняя выходная мощность лазерного излучения, Вт	300
Длительность импульса, с	$5 \cdot 10^{-5}$
Частота импульсов, Гц	10 000
Диаметр фокусного пятна на обрабатываемой поверхности, мкм	50

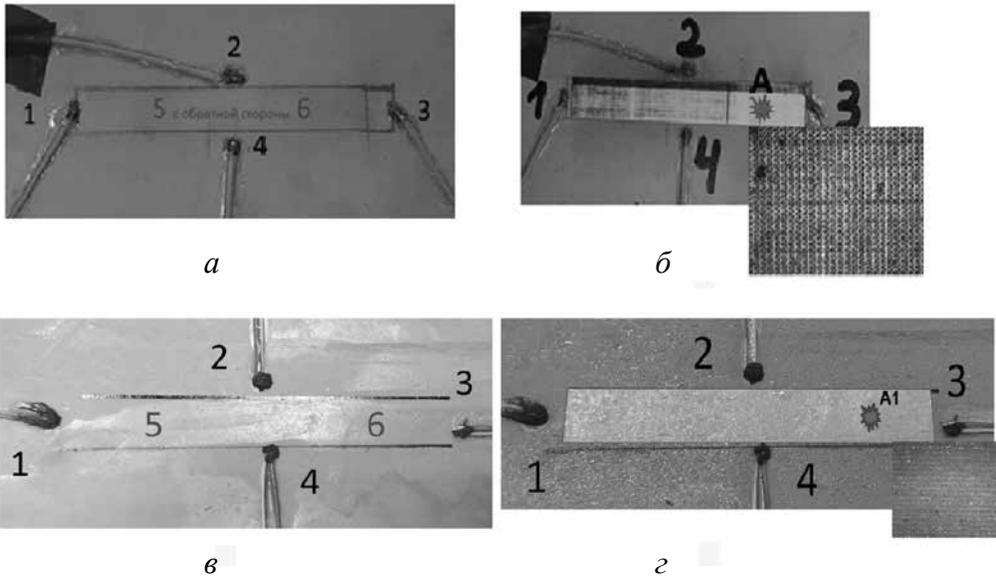


Рис. 2. Исследуемый образец (а) с установленными термопарами (термопары 5 и 6 размещены на обратной стороне обрабатываемого участка); внешний вид образца (б) после лазерной сухой очистки поверхности от ЛКП и фрагмента (вставка) очищенной поверхности в области А при 50-кратном увеличении; исследуемый образец (в) с установленными термопарами (термопары 5 и 6 размещены на обратной стороне обрабатываемого участка); внешний вид образца (г) после лазерной влажной очистки поверхности от ЛКП и фрагмента (вставка) очищенной поверхности в области А1 при 50-кратном увеличении

Контроль распределения температурного поля в образце осуществлялся с использованием четырех термопар ТР-01 (рис. 2), сигналы с которых поступали на измерительно-управляющее устройство УИУ2002. Места установки термопар предварительно защищались от ЛКП, а в образце изготавливались углубления на $1/3$ толщины металла с диаметрами, соответствующими размеру термопары. Для фиксации термопар использован цианоакрилатный клей с добавлением алмазного порошка (фракция 30–80 мкм), что увеличивало теплопроводность места соединения термопары и металла.

Внешний вид образца после сухой лазерной очистки поверхности от ЛКП в режиме абляции представлен на рис. 2, б. Размер очищенных участков 80×10 мм.

Использование сфокусированного сканирующего лазерного излучения в режиме абляции позволяет удалить слой краски, при этом анодный слой из оксида хрома (конверсионное покрытие желтого цвета) толщиной $22,67 \pm 0,625$ мкм остается неповрежденным. Однако на обработанной поверхности наблюдается образование характерной для режима абляции периодической структуры, показанной на фотографии участка поверхности в области А при 50-кратном увеличении (рис. 2, б).

Результаты исследований показали, что температурное поле на образце в области обработки импульсным лазерным излучением при сухой лазерной очистке имеет нестационарный характер. Измеренное значение верхнего предела температуры (на расстоянии 7–10 мм от сфокусированного лазерного пучка) в процессе лазерной абляции достигает 40 °С, при этом нагревание образца проходит значительно интенсивнее, чем процесс его остывания/охлаждения, что способствует возникновению деформации в обрабатываемом материале.

Экспериментальные исследования процесса удаления ЛКП импульсным лазерным излучением во влажной среде проведены на образце, изготовленном из материала обшивки планера самолета (рис. 1, а). Толщина слоя жидкости, непрерывно подаваемой на обрабатываемую поверхность, не превышала 50 мкм. Параметры сканирующего сфокусированного лазерного излучения находились в соответствии с данными таблицы. Анализ

результатов распределения температурного поля по образцу показал, что нагревание образца в области влажной импульсной лазерной очистки происходит неинтенсивно, при этом температура обрабатываемой поверхности тонкого металла в точках регистрации (рис. 2, в) находилась в пределах 23–25 °С и соответствовала температуре воды. Однако на обработанной поверхности также формировалась характерная для режима абляции периодическая структура (рис. 2, г – область А1) с менее выраженными последствиями воздействия сфокусированного лазерного излучения. Таким образом, охлаждающая жидкость способствует интенсивному охлаждению обрабатываемой детали и уменьшению глубины кратеров.

2.2. Результаты исследований температурных деформаций металлической поверхности в зоне очистки от ЛКП лазерным излучением в режиме абляции

Исследование температурных деформаций металлической поверхности в зоне сухой лазерной очистки от ЛКП выполнено на образце, изготовленном из элемента крыла самолета КБ Сухого (рис. 1).

Для измерения влияния термического разогрева на деформацию образца в процессе лазерной очистки вокруг очищаемой лазером области металлической поверхности (рис. 3) были установлены 8 тензорезисторных датчиков типа ТК Ф01-5-100 (рис. 3, а). Для фиксации тензорезисторов использован цианоакрилатный клей.

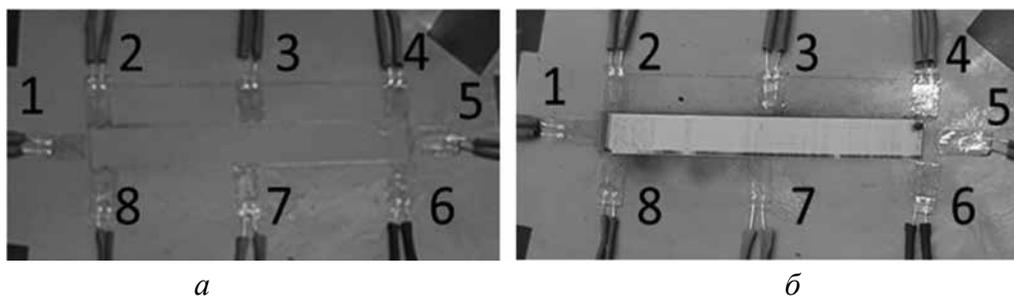


Рис. 3. Исследуемый образец с установленными тензорезисторными датчиками (а), образец после сухой лазерной очистки поверхности от ЛКП (б)

Параметры сканирующего сфокусированного лазерного излучения при удалении ЛКП соответствовали данным таблицы. На рис. 3, б представлена фотография образца после сухой лазерной очистки поверхности от ЛКП.

Результаты измерений показали, что в процессе сухой лазерной очистки поверхности металлического образца толщиной 0,7 мм от краски наблюдаются локальные термические деформации, нарастающие с течением времени обработки. В процессе очистки была зарегистрирована деформация металла в пределах 120–410 мкм/м. По завершении воздействия лазерного излучения в образце была зарегистрирована остаточная деформация в 250 мкм/м.

Это свидетельствует о неприменимости стандартных технологий сухой лазерной очистки поверхностей от ЛКП для тонкостенных конструкций ответственного назначения.

3. Роботизированная технология влажной лазерной очистки тонкостенных конструкций от ЛКП

При рассмотрении лазерной очистки как перспективной технологии для оперативного удаления ЛКП с поверхности обшивки летательных аппаратов возникла

необходимость решения ряда специфических вопросов для ее реализации применительно к тонкостенным конструкциям. Прежде всего, поскольку материал тонкостенной конструкции, в том числе обшивка планера самолета, находится в напряженно-деформированном состоянии, необходимо исключить ее локальный нагрев в процессе лазерной обработки, который может привести к изменению механических свойств металла. Кроме того, технология лазерного удаления краски должна обеспечить возможность удаления ЛКП с большой площади конструкций сложного профиля, в том числе с поверхностями двойной и тройной кривизны, с крепежных элементов, а также мест стыков металлических листов. Существенные требования предъявляются к экономической целесообразности использования лазера в технологическом процессе очистки тонкостенных конструкций, в том числе летательных аппаратов. В этом случае показатели эффективности технологического процесса (энергозатраты, затраты на утилизацию продуктов распада краски, мероприятия для соблюдения норм охраны труда, стоимость оборудования) должны обеспечить повышение нормы прибыли и уровня рентабельности относительно традиционных технологий очистки.

С учетом предъявляемых требований нами разработан роботизированный технологический комплекс, реализующий технологию лазерного удаления ЛКП с поверхностей тонкостенных конструкций. Для этого предложено использовать нефокусированное лазерное излучение, обладающее высокой энергией в импульсе. Данный подход к решению поставленной задачи позволил исключить сложный программный процесс управления перемещением сфокусированного лазерного излучения по обрабатываемой поверхности большой площади.

Использование режима лазерной десорбции, характеризуемого большой энергией в импульсе, позволило обеспечить более «мягкое» воздействие излучения на обрабатываемый материал, что способствует отделению слоя краски с поверхности в виде чешуек диаметром и толщиной, зависящими от геометрических и энергетических параметров лазерного луча [6].

Для исключения термического разогрева обрабатываемой поверхности, приводящего к изменению механических свойств материала тонкостенной детали, на ее поверхность одновременно с действием лазерного излучения подавалась охлаждающая жидкость в виде тонкой водяной пленки. Данное решение способствует повышению эффективности лазерной десорбции при облучении ЛКП под слоем жидкости [1, 8]. В этом случае в тонком слое воды возникают ударные волны с интенсивностью много большей, чем в воздушной

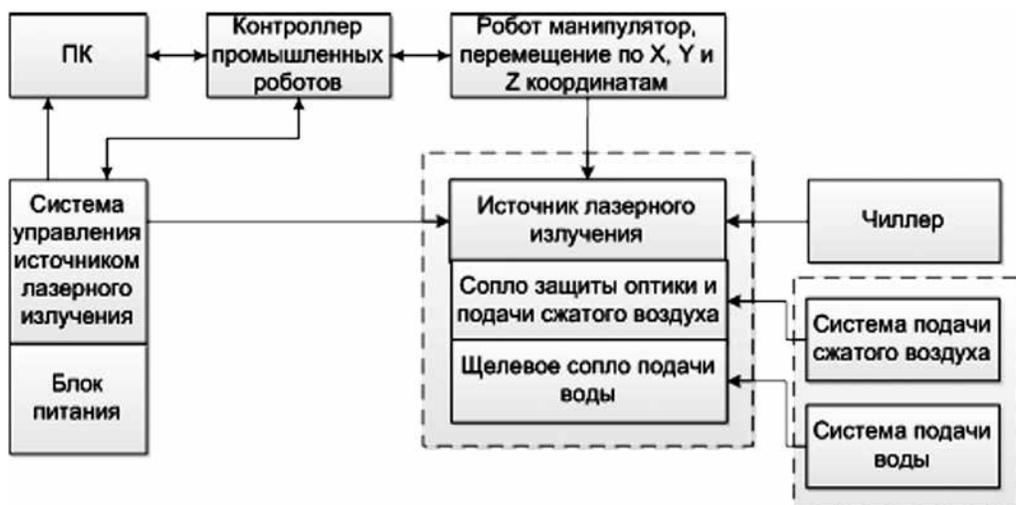


Рис. 4. Блок-схема роботизированной технологии лазерной влажной очистки поверхности обшивки планера летательного аппарата от ЛКП

среде, в результате чего появляется дополнительная возможность удаления слоев ЛКП с контролируемой толщиной посредством управления энергией лазерных импульсов.

На рис. 4 представлена блок-схема реализации роботизированной технологии лазерной влажной очистки поверхности тонкостенной конструкции (обшивки планера летательного аппарата) от ЛКП.

Для реализации режима влажной лазерной очистки в состав конструкции включено щелевое сопло подачи воды, конструктивно совмещенное с соплом пневматической защиты оптики системы. Образующаяся водяная пленка толщиной менее 50 мкм обеспечивает оперативное охлаждение очищаемой от краски поверхности и исключает негативное термомеханическое влияние лазерного излучения на обшивку летательного аппарата.

Схема, поясняющая принцип работы роботизированного технологического комплекса лазерной влажной очистки поверхности обшивки планера летательного аппарата от ЛКП, представлена на рис. 5.

На основе полученных результатов коллективом Центра лазерных технологий ИАПУ ДВО РАН и Базовой кафедры фотоники и цифровых лазерных технологий ДВФУ разработана конструкторская документация и проведены испытания роботизированной технологии лазерной влажной очистки применительно к элементам поверхности планеров летательных аппаратов.

В качестве источника излучения в РТК ЛВО использовался твердотельный импульсный лазер Q-smart 850 со следующими параметрами: длина волны излучения 1,064 мкм; максимальная средняя мощность излучения 10 Вт; частота повторения импульсов 10 Гц; длительность импульса 10×10^{-10} с; диаметр лазерного пучка на обрабатываемой поверхности $7 \pm 0,5$ мм. В соответствии с разработанной блок-схемой роботизированной

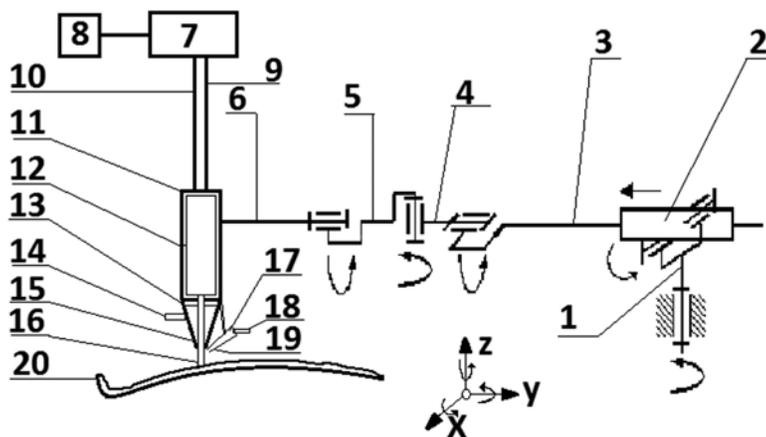


Рис. 5. Принципиальная схема роботизированного технологического комплекса лазерной влажной очистки поверхности обшивки планера летательного аппарата от ЛКП:

1–6 – подвижные звенья пространственного механизма промышленного робота; 7 – источник питания, управления и охлаждения лазера; 8 – персональный компьютер; 9 – кабель управления излучателем лазера; 10 – гибкие шланги системы охлаждения лазера; 11 – защитный корпус, обеспечивающий крепление излучателя лазера к промышленному роботу; 12 – излучатель лазера; 13 – защитное стекло из оптически прозрачного материала для используемой длины волны лазерного излучения 16; 14 – разъем для подачи сжатого воздуха в коническое сопло 15; 15 – коническое сопло диаметром, соответствующим диаметру лазерного излучения 16; 16 – несфокусированное лазерное излучение; 17 – плоское щелевое сопло для подачи воды в зону лазерной очистки; 18 – разъем для подачи воды в плоское щелевое сопло; 19 – щель плоского щелевого сопла шириной, соответствующей не менее чем трем диаметрам лазерного излучения, и высотой 50–150 мкм; 20 – обрабатываемая поверхность

технологии лазерной влажной очистки (рис. 4), РТК ЛВО в своем составе содержит шесть основных систем: лазерная система; робототехническая система; гидродинамическая система; газодинамическая система; система управления; инженерные сети. РТК ЛВО также имеет интерфейс для подключения к персональному компьютеру, входящему в состав комплекса. Общий вид основного оборудования РТК ЛВО приведен на рис. 6.

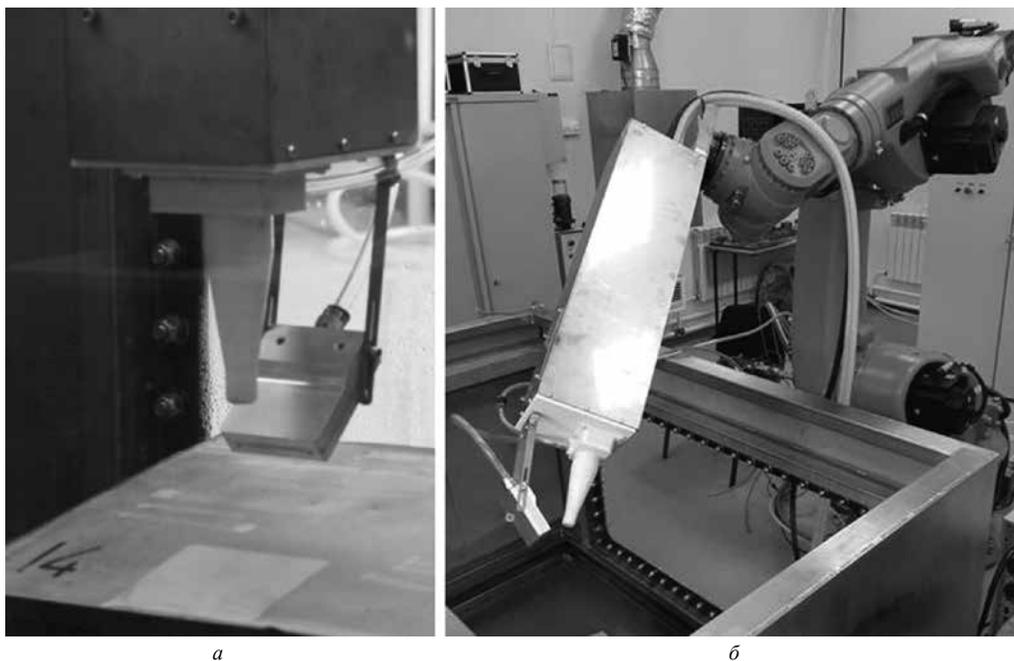


Рис. 6. Основные элементы РТК ЛВО: *а* – внешний вид конического и щелевого сопел, *б* – внешний вид 6-звеного промышленного робота-манипулятора KUKA KR-30 HA с установленным в специальном кожухе Q-smart 850 твердотельным лазером

Промышленный робот предназначен для программного перемещения излучателя импульсного твердотельного лазера Q-smart 850 над обрабатываемой поверхностью относительно очищаемого образца по заданной траектории. Расчет геометрических параметров области импульсной лазерной очистки производили исходя из оценки размеров границы абляции, образованной диаметром лазерного пучка на обрабатываемой поверхности [6].

В процессе испытаний разработанного РТК ЛВО выполнялась технологическая операция лазерного влажного селективного удаления ЛКП с поверхности металлической конструкции сложного профиля – фрагмента крыла летательного аппарата (СУ-25), материал – сплав Д16. Удаление краски осуществлялось во влажной среде на площади 100×90 мм несфокусированным импульсным лазерным излучением на расстоянии 5–200 мм от конического сопла. Работающий излучатель лазера программно перемещался над обрабатываемой поверхностью равномерно, под углом $90 \pm 3-10$ градусов относительно касательной прямой к обрабатываемой поверхности, со скоростью, обеспечивающей 20%-е перекрытие диаметров десорбции лазерного пучка по осям X и Y. Давление воды в плоском щелевом сопле – 0,6 МПа. Давление сжатого воздуха в коническом сопле – 0,3 МПа. Толщина слоя жидкости, сформированного на обрабатываемой поверхности, не более 50 мкм.

На рис. 7 представлена фотография образца очищенной поверхности фрагмента крыла летательного аппарата СУ-25. Удаление слоев старой краски выполнялось с регулируемым шагом по толщине от 50 до 300 мкм с сохранением конверсионного покрытия обшивки планера самолета.

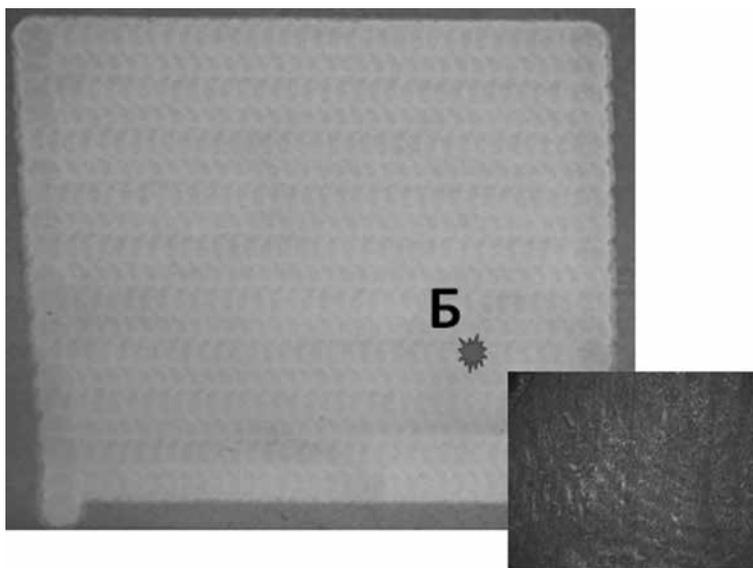


Рис. 7. Поверхность фрагмента крыла летательного аппарата (СУ-25), очищенная несфокусированным импульсным лазерным излучением в режиме влажной очистки, и фрагмент (вставка) очищенной поверхности в области *Б* при 50-кратном увеличении

В результате выполнения технологической операции лазерной влажной очистки поверхности металлической тонкостенной конструкции шероховатость обработанного участка составила 170–180 мкм, микротвердость, измеренная на микротвердомере ПМТ-3М по методу Виккерса при нагрузке 0,5 Н (время нагружения 10 с, время выдержки 10 с) с использованием программного обеспечения «ММС микротвердость», не отличается от значений основного материала и составляет $133,1 \pm 20$.

В процессе испытаний проведены измерения фактического значения параметров летучего вредного вещества – оксида углерода СО в воздухе рабочей зоны. Измеренное (газоанализатор ГАНК-4) количество выделяемого СО соответствует $0,86 \text{ мг/м}^3$. Отсутствие пыли и низкая концентрация выделяемого оксида углерода связаны с особенностью импульсного лазерного удаления лакокрасочного покрытия в водной среде: основная часть покрытия удаляется фрагментами в виде чешуек диаметром 3–8 мм.

Предельно допустимая в воздухе рабочей зоны концентрация вредных веществ, образующихся в результате влажного лазерного удаления лакокрасочных покрытий с обшивки планера, не превышает $1,0 \text{ мг/м}^3$. Расход воды – не более 50 л/ч. Расход сжатого воздуха – 160 л/мин. Для лазерного оборудования расход электроэнергии (удельный) – не более 1,5 кВт·ч. При использовании робота-манипулятора KUKA KR-30 HA для перемещения излучателя импульсного твердотельного лазера Q-smart 850 над обрабатываемой поверхностью расход электроэнергии составлял не более 8 кВт·ч.

В процессе эксплуатации РТК ЛВО образовавшиеся влажные продукты распада ЛКП могут оперативно собираться пневматическим способом для дальнейшей утилизации как экологически неопасные отходы, что позволяет обеспечить решение задач в сфере обеспечения экологической безопасности, определяемых Указом Президента РФ от 19 апреля 2017 г. № 176 «О Стратегии экологической безопасности Российской Федерации на период до 2025 года».

4. Заключение

Результаты исследований в области лазерного влажного селективного удаления красок и загрязнений различной природы с поверхности металлических тонкостенных конструкций позволяют сделать вывод о том, что разработанный лазерно-оптический метод обладает рядом преимуществ по сравнению с существующей технологией сухой очистки поверхности сфокусированным сканирующим лазерным излучением.

Несфокусированное импульсное лазерное излучение, перемещаемое по обрабатываемой влажной поверхности:

- исключает возникновение локальных термических напряжений в тонкостенном металле, находящемся в напряженно-деформированном состоянии;
- исключает возникновение кратеров диаметром 10–30 мкм на обрабатываемой поверхности;
- позволяет манипулировать лазерным пучком в 6 степенях свободы для оперативной очистки сложных поверхностей двойной и тройной кривизны;
- способствует существенному сокращению времени выполнения технологической операции очистки поверхности.

Разработанный РТК ЛВО для удаления ЛКП при ремонте авиационной техники обладает рядом существенных преимуществ по сравнению с существующими технологиями абразивного и химико-механического удаления красок и загрязнений с поверхности планеров летательных аппаратов:

- сокращает время операции удаления ЛКП;
- уменьшает число задействованных в процессе очистки работников в 5 раз;
- способствует повышению производительности труда не менее чем в 5 раз;
- характеризуется отсутствием воздействия на человека вредных веществ, традиционных образующихся в рабочей зоне очистки;
- снижает экологическую нагрузку на территорию предприятий авиационной отрасли.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вейко В.П., Самохвалов А.А. Анализ механизма лазерной абляции под слоем жидкости на основе термодинамической теории разрушения // Изв. высших учебных заведений. Приборостроение. 2014. Т. 57, № 6. С. 54–58.
2. Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н., Мисюров А.И. Технологические процессы лазерной обработки. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. 664 с.
3. Кульчин Ю.Н., Змеу С.Б., Субботин Е.П., Никитин А.И. Волоконные лазеры // Вестн. ДВО РАН. 2015. № 3. С. 67–78.
4. Кульчин Ю.Н., Никитин А.И., Субботин Е.П. Лазерная подводная очистка корпусов морских судов // Прикладная фотоника. 2020. № 4. С. 90–104.
5. Кульчин Ю.Н., Вознесенский С.С., Гамаюнов Е.Л., Голик С.С., Ильин А.А., Каменев О.Т., Никитин А.И., Павлов А.Н., Попик А.Ю., Ромашко Р.В., Субботин Е.П. Фотонные методы и технологии мониторинга океана и атмосферы // Квантовая электроника. 2020. Т. 50, № 5. С. 475–488.
6. Планковский С.И., Цегельник Е.В., Мельничук П.И., Лебедь В.И. Расчетно-экспериментальный алгоритм назначения режимов лазерного удаления лакокрасочных покрытий // Вопр. проектирования и производства конструкций летательных аппаратов. 2017. № 4. С. 34–41.
7. Филипс Дж. Оптические спектры твердых тел в области собственного поглощения. М.: Мир, 1968. 176 с.
8. Peyre P., Fabbro R. Laser shock processing: a review of the physics and applications // Optical and Quantum Electronics. 1995. Vol. 27. P. 1213–1229.