

УДК 629.7.023.222

О.Г. Оспенникова<sup>1</sup>, А.А. Козлова<sup>1</sup>, И.А. Козлов<sup>1</sup>

## ЛАЗЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ УДАЛЕНИЯ ЛАКОКРАСОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ В ПРОЦЕССЕ РЕМОНТА И ОБСЛУЖИВАНИЯ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ (обзор)

DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-4-110-123

*Рассмотрен ряд отечественных и зарубежных публикаций, посвященных исследованиям возможности применения технологий лазерной обработки поверхности для очистки от загрязнений, снятия лакокрасочных покрытий и подготовки металлической поверхности к проведению последующих технологических операций. Приведены наиболее яркие примеры использования технологий в зарубежной авиационной отрасли и отмечена высокая готовность их реализации на практике. Представлены теоретические сведения о лазерной технологии и выделены наиболее прогрессивные направления.*

**Ключевые слова:** лазер, очистка поверхности, удаление покрытий, лакокрасочные покрытия, ремонт, CO<sub>2</sub>-лазер, Nd:YAG-лазер, лазерная очистка.

O.G. Ospennikova<sup>1</sup>, A.A. Kozlova<sup>1</sup>, I.A. Kozlov<sup>1</sup>

## LASER TECHNOLOGY TO REMOVE PAINT COATINGS IN THE PROCESS OF REPAIR AND MAINTENANCE OF AIRCRAFT (review)

*A number of domestic and foreign publications devoted to research on the possibility of using laser surface treatment technologies for cleaning from dirt, removing paint coatings and preparing the metal surface for subsequent technological operations are considered. The most striking examples of the use of technologies in the foreign aviation industry are given and the high readiness of their implementation in practice is noted. Theoretical information about laser technology is presented and the most progressive directions are highlighted.*

**Keywords:** laser, surface cleaning, coating removal, paint coatings, repairing, CO<sub>2</sub>-laser, Nd:YAG laser, laser cleaning.

---

<sup>1</sup>Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials» State Research Center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

### Введение

Ресурс работы конструкций, механизмов и машин во многом зависит от качества поверхности деталей, которое может быть оценено по наличию загрязнений, коррозионных поражений, окалины, отслоившегося лакокрасочного покрытия (ЛКП), шероховатости и дефектов, возникающих в результате обработки, хранения или эксплуатации [1].

При проведении регламентных или ремонтных работ возникает необходимость удаления ЛКП, а также нагара и продуктов коррозии с элементов конструкции авиационной техники. В настоящее время для удаления ЛКП применяются ручная или механическая очистка (в том числе с использованием абразивной [2, 3] и термической очисток [4]), а также химическая очистка (смывки различного состава, расплавы щелочей или солей) [5–7].

При ручном методе очистки металлическими щетками, скребками или механизированным ручным инструментом преимуществом является отсутствие необходимости в закупке химических реагентов и оборудования. Из серьезных недостатков можно выделить риск повреждения анодного покрытия или плакирующего слоя (особенно при отсутствии опыта у рабочего) и большие временные трудозатраты. Кроме того, существует вероятность, что могут потребоваться дополнительные способы очистки. Следует отметить, что при очистке ручным методом поверхность материала имеет малую степень чистоты по сравнению с поверхностью, для очистки которой использовали другие способы. Необходимо также применение более одного типа механизированного инструмента, что делает такую подготовку поверхности более сложной и дорогостоящей.

Существует много различных способов абразивной очистки: обработка наждачной бумагой, сухая абразивоструйная обработка с использованием свободного зерна (корунда, кварца, синтетического алмаза, карбида кремния и пр.), абразивная очистка сжатым воздухом, влажная абразивная струйная очистка, суспензионная и гидроабразивная очистки [2]. Данный метод позволяет осуществить одновременно и быструю очистку, и подготовку как металлических, так и неметаллических материалов для проведения дальнейших технологических операций. Однако применение метода абразивной очистки имеет ряд недостатков: негативное воздействие на персонал (образование пыли), необходимость в закупке расходных материалов и утилизации отходов, невозможность обработки деталей сложной геометрической формы.

Термическая очистка поверхности является более производительной, чем ручная или механическая. К термическим способам удаления покрытий и загрязнений относят: огневую очистку с применением газокислородной горелки, воздушно-электродуговую очистку с применением электрической дуги, отжиг в печах и криогенную очистку с использованием средств глубокого охлаждения. Однако одним из существенных недостатков можно назвать возможность применения данного метода лишь для изделий из стали с толщиной стенки не менее 5 мм – во избежание деформации и коробления металла. Кроме того, использование термической очистки для алюминиевых сплавов или полимерных композиционных материалов (ПКМ) приводит к снижению их прочностных свойств. Как правило, после термической обработки необходима последующая дополнительная механическая или химическая очистка, для осуществления которой потребуются дополнительные затраты и оборудование, а также утилизация образующихся отходов [4].

Применение смывок как химического метода удаления покрытий получило самое широкое распространение. Тем не менее данный метод требует проведения дополнительных операций по очистке и обезжириванию обработанной поверхности, а также специальных мероприятий по обезвреживанию и утилизации отходов. Следует отметить и экологически неблагоприятные условия работы со смывками, что связано с их токсичностью и пожароопасностью. Входящие в состав смывок компоненты могут оказывать агрессивное действие на окрашенную металлическую поверхность и гальванические покрытия, что в дальнейшем может привести к возникновению и развитию коррозии.

Все указанные способы очистки характеризуются негативным влиянием на окружающую среду, а также возможностью повреждения подложки, с которой осуществляется удаление покрытия. Эффективность применяемых методов удаления уменьшается из-за использования современных систем лакокрасочных покрытий, отличающихся высокой эксплуатационной, химической и микробиологической стойкостью [8].

В основу инновационной модернизации производства авиационной техники положено создание не только современных материалов, но и технологий их обработки и защиты от воздействия окружающей среды [9–12]. Следует отметить, что в мировой

практике наблюдается тенденция к повышению требований по снижению вредного воздействия на окружающую среду и здоровье человека, в связи с чем осуществляется поиск более экологически благоприятных способов удаления ЛКП.

Процессы лазерного удаления ЛКП, продуктов коррозии и окалины исследуются зарубежными учеными в течение последних 20 лет. Данные процессы рассматриваются как перспективные технологии очистки и подготовки поверхности для ремонта авиационной техники. По сравнению с технологией удаления покрытий с помощью смывок, в процессе лазерной очистки образуется лишь небольшое количество твердых и легко утилизируемых отходов. В России технология применения лазера для подготовки поверхности при ремонте авиационной техники не используется.

Начало новому научному направлению – квантовой электронике, в том числе лазерной физике, положено работами А.М. Прохорова и Н.Г. Басова в СССР, а также Ч.Х. Таунса в США (1954–1955), которые в 1964 г. удостоены Нобелевской премии [13]. Впервые на возможность удаления краски с помощью лазера указал Артур Шавлов в 1965 г. [14], однако в то время технология лазерной очистки не получила широкого распространения в промышленности из-за отсутствия достаточно мощных источников лазерного излучения и недостаточных исследований в области подбора технологических режимов очистки. В настоящее время в связи с быстрым развитием технологии мощных импульсных лазеров лазерная очистка снова привлекла значительное внимание специалистов [15–17].

В работах [18–31] представлены способы поверхностной обработки и очистки металлических поверхностей путем использования лазерного излучения.

### Использование лазерной очистки в промышленности

Метод лазерной очистки металлических поверхностей используется при обработке деталей авиационных двигателей (комбинированное излучение мощных волоконных лазеров) [32], решении задач ремонтно-восстановительных работ в полевых условиях [33] и при антикоррозионной обработке [34, 35].

Антикоррозионная обработка поверхности с помощью лазерного луча является эффективной и не требует длительной подготовки, а возможность его настройки позволяет снять только поврежденный коррозией слой без существенного влияния на сам материал.

В работах [36, 37] сообщается об автоматизированном методе удаления ЛКП с внешней поверхности истребителя F-16 двумя роботами с лазерами непрерывного излучения мощностью 6 кВт (рис. 1). При этом перед началом процесса удаления роботы сканируют геометрическую форму самолета с помощью встроенных лидаров для определения оптимального способа удаления краски. Таким образом, появляется возможность селективного удаления ЛКП, например до грунтовочного слоя.

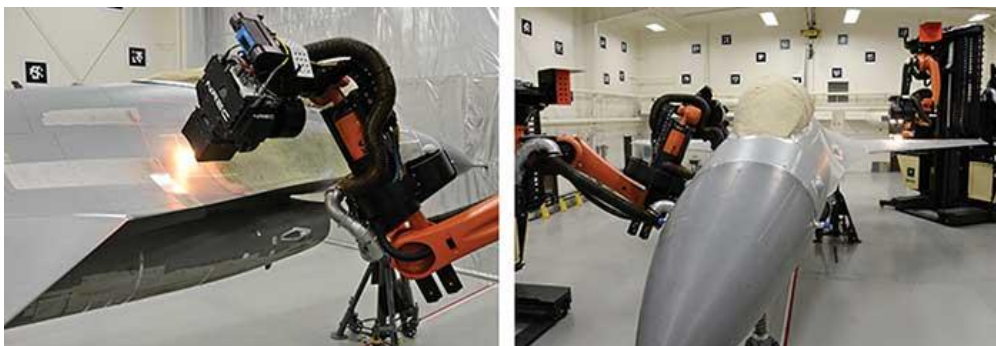


Рис. 1. Селективное удаление лакокрасочного покрытия самолета F-16 роботизированной лазерной системой [37]

В настоящее время разработаны современные ионно-плазменные технологии модифицирования поверхности и ассистированного осаждения, что позволяет существенно повысить характеристики ионно-плазменных покрытий на основе нитридов и карбидов металлов (эрозионную стойкость, микротвердость, плотность и пр.). Указанные покрытия позволяют защитить титановые сплавы при температурах до 550 и 650 °С, а также стали при температуре 700 °С во всеклиматических условиях эксплуатации [38–42]. Тем не менее засорение или образование загрязнений на деталях проточной части компрессора газотурбинного двигателя могут стать причиной потери мощности и уменьшения коэффициента полезного действия. Для восстановления рабочих характеристик двигателя необходимо проводить мероприятия по очистке проточной части компрессора, в том числе удаление нагара или продуктов коррозии с поверхности лопаток. В работе [43] исследовано влияние зарубежных и отечественных химических технологий удаления эксплуатационных углеродсодержащих загрязнений на комплекс свойств поверхности титанового сплава марки VT20. В то же время применение технологии лазерной очистки в данном случае достаточно перспективно, так как она является бесконтактным, высокопроизводительным и экологически чистым способом очистки поверхности, а использование мобильных лазерных установок делает возможной очистку лопаток без их демонтажа, что существенно сокращает продолжительность проведения регламентных работ [44–46].

При очистке лопаток газотурбинного двигателя импульсным лазерным излучением с правильным подбором технологических параметров процесса появляется возможность удаления покрытия с лопатки без повреждения ее материала, а также придание поверхности детали лопатки шероховатости без проведения пескоструйной обработки. Кроме того, для удаления покрытий или загрязнений с поверхности лопатки не используются агрессивные химические вещества, что в свою очередь позволяет сократить расходы на переработку химических отходов [47, 48].

Большое значение процесс лазерной очистки имеет при подготовке металлических поверхностей под лазерную сварку, поскольку в данном случае крайне важна качественная очистка поверхности от оксидных (в том числе анодных) пленок, масла, смазки, краски, влаги и покрытий для исключения образования дефектов сварного шва или беспрепятственного производства сварочных работ [49].

### **Технология и оборудование**

Лазер – источник когерентного электромагнитного излучения высокой направленности, способный осуществлять предельно возможную концентрацию энергии излучения в пространстве, времени и спектральном диапазоне [13]. В основу работы лазера положено квантово-механическое явление вынужденного (индуцированного) излучения, которое может быть импульсным и непрерывным. При импульсном излучении достигаются предельно большие пиковые мощности, при непрерывном излучении обеспечивается постоянная мощность.

Процесс лазерной очистки состоит в удалении поверхностных загрязнений или покрытий путем их перевода в газообразную или пылевую фракцию за счет воздействия лазерного излучения. Общая схема процесса удаления покрытия представлена на рис. 2.

Физические процессы, происходящие при лазерной очистке поверхности, во многом зависят от плотности лазерного излучения [50]. Механизм удаления краски лазером сопровождается термическим воздействием на материал, а также процессами испарения и ионизации. При малых значениях плотности энергии лазерного излучения разрушение покрытия фиксируется только на его поверхности, а частичное удаление

краски вызвано эффектом теплового напряжения (рис. 3, б). При увеличении плотности энергии излучения ЛКП может быть полностью удалено в том случае, когда разность тепловых напряжений между металлической подложкой и покрытием больше силы сцепления между ними. При этом условии удаление ЛКП осуществляется без какого-либо повреждения подложки (рис. 3, в). При еще более высокой плотности энергии излучения может наблюдаться эффект ионизации, что в свою очередь может привести к образованию лазерной плазмы, ударная волна которой вызывает повреждение металлической подложки (рис. 3, г).

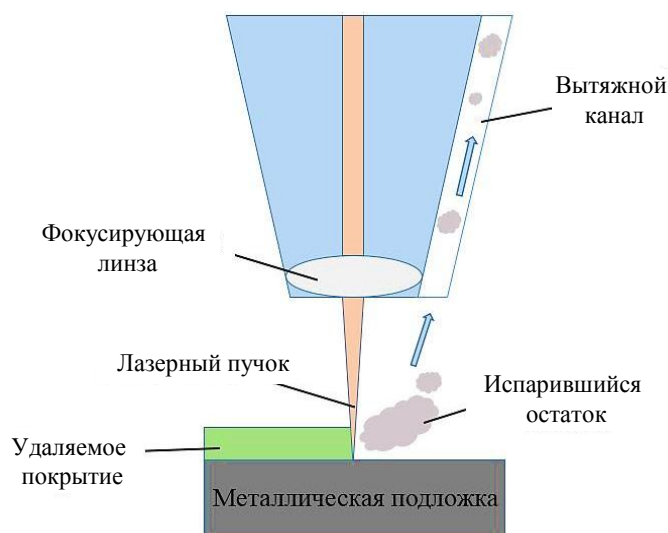


Рис. 2. Схема процесса лазерной очистки путем воздействия лазерного излучения

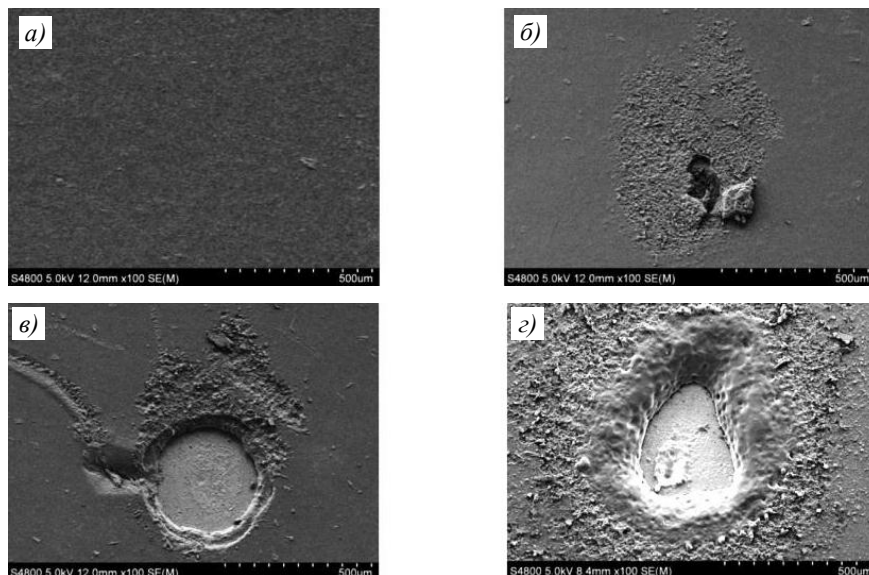


Рис. 3. Влияние плотности излучения Nd:YAG-лазера на результат удаления эпоксидно-полиэфирного лакокрасочного покрытия (ЛКП) толщиной 75 мкм, нанесенного на подложку из алюминиевого сплава [50]: поверхность ЛКП (а) и результат воздействия лазерного излучения при плотности энергии излучения 0,53 (б); 0,84 (в) и 1,58 Дж/см<sup>2</sup> (г)

Различают сухую и влажную лазерные очистки поверхности. Основным механизмом сухой лазерной очистки является быстрое тепловое расширение подложки или частиц, которое приводит к возникновению механических напряжений в загрязняющем

слое и инерционной силы при прекращении импульса. В том случае, если данные силы превосходят силу адгезии, происходит удаление частиц или покрытия с обрабатываемой поверхности. Физический механизм влажной лазерной очистки связан с удалением загрязняющего вещества с поверхности основного материала при кипении находящегося на ней тонкого слоя жидкости [51, 52].

В 1960-х гг. разработаны химические лазеры и лазерные диоды, а также газовые лазеры на диоксиде углерода и неодимовом стекле. Многие лазеры созданы на основе теории полупроводниковых гетероструктур, разработанной в 1963 г. Ж. Алферовым и Г. Кримером, получившими в 2000 г. Нобелевскую премию по физике [53].

В настоящее время в промышленности применяют газовые  $\text{CO}_2$ -лазеры (генерация излучения происходит на длине волны 10,6 мкм) [54–60]; твердотельные лазеры на иттрий-алюминиевом гранате Nd:YAG (генерация излучения – на длине волны 1,06 мкм), легированном ионами неодима (Nd), а также оптоволоконные и редко – твердотельные дисковые лазеры.

Конструкция лазерной установки включает две необходимые составляющие – активную среду и резонатор.

Активной средой  $\text{CO}_2$ -лазеров является газообразная смесь углекислого газа, азота и гелия. Иногда в смесь добавляют водород или водяной пар, которые помогают окислению монооксида углерода, появившегося в результате разряда, до углекислого газа. Разные типы  $\text{CO}_2$ -лазеров отличаются в основном способом снятия тепла, давлением газа и геометрической формой используемых электродов. Такие лазеры имеют электрическую «накачку» посредством возникновения разряда в газовой среде, которым можно управлять с помощью постоянного или переменного тока (20–50 кГц). Молекулы азота возбуждаются разрядом и переходят на метастабильный энергетический уровень. Сталкиваясь с молекулами углекислого газа, молекулы азота передают им свою энергию. Гелий в данной смеси служит для съема тепла.

Твердотельные дисковые лазеры предпочтительнее использовать в диапазоне очень больших мощностей. Преимуществами данного типа лазера можно назвать возможность проведения технологических операций с материалами, обладающими высокой отражающей способностью, ввиду нечувствительного к попаданию отраженных лучей резонатора лазера, а также возможность проведения обработки поверхности материалов, относительно плохо проводящих электрический ток. Принцип работы дискового лазера основан на использовании охлаждаемого активного элемента в форме диска. Высокая эффективность охлаждения лазерной среды обеспечивается благодаря большой площади поверхности диска, что важно с точки зрения процесса теплообмена. В результате средняя мощность излучения в пучке может достигать достаточно высоких значений. В настоящее время использование дискового лазера для очистки поверхности не имеет большой популярности из-за его технологических особенностей. Тем не менее существуют перспективы создания суперлазера на основе дисковых твердотельных лазеров, и такие работы ведутся за рубежом [61–65].

Лазер Nd:YAG – неодимовый твердотельный лазер. В качестве активной среды используется иттрий-алюминиевый гранат (Nd:YAG,  $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ ), легированный ионами неодима. Такие лазеры могут работать как в непрерывном, так и в импульсном режиме. Импульсные режимы отличаются характером генерации лазерного излучения. В свободной генерации длительность импульса обычно равна продолжительности жизни верхнего лазерного уровня (~250 мкс, зависит от концентрации неодима), а импульс представляет собой набор пучков с длительностью до сотен наносекунд.

Импульсные наносекундные лазерные системы (например, Nd:YAG-лазеры) позволяют получать на выходе высокие энергии в компактном корпусе при хорошем

качестве пучка и стабильности [66]. В промышленности применяются установки с различной мощностью: 50, 100, 500 и 1000 Вт. Установки с мощностью 500 и 1000 Вт имеют очень высокую производительность – позволяют обрабатывать поверхность со скоростью от 10 до 40 м<sup>2</sup>/ч. Для локальной очистки участков небольшого размера или определенной формы достаточно 100 Вт. При этом установки могут быть в мобильном исполнении. Поэтому в настоящее время это наиболее доступное и удобное оборудование для применения лазера при очистке и подготовке поверхности металлов для проведения дальнейших технологических операций.

В работе [67] представлены результаты исследований процесса удаления ЛКП путем воздействия импульсного Nd:YAG-лазера (частота 20 кГц, длина волны 140 нс и мощность 542 Вт), которые проводились на образцах из алюминиевого сплава 6061 толщиной 2 мм с нанесенной системой покрытий, состоящей из адгезионного полиуретанового грунтовочного слоя (50 мкм), слоя защитной эпоксидной грунтовки (50 мкм) и атмосферостойкого финишного покрытия (80 мкм). Построена математическая модель подбора параметров послыонного лазерного удаления покрытия и проведены экспериментальные исследования. Установлено, что экспериментально полученные данные хорошо согласуются с теоретическими расчетами, но только в том случае, когда толщина покрытия относительно большая. При противоположной ситуации (покрытие более тонкое) необходимо учитывать теплопроводность подложки.

Эффективность применения Nd:YAG-лазера определяется путем подбора частоты следования лазерного пучка, флюенса лазера и длительности импульса. При этом установлено, что частота следования должна находиться в пределах от 1 до 10 кГц, флюенс лазера – от 0,1 до 5 Дж/см<sup>2</sup>, а длительность импульса составлять 5 и 100 нс [68]. По мнению авторов работы, наибольшая эффективность получена при флюенсе лазера 1,5 Дж/см<sup>2</sup> и импульсе 100 нс для частоты следования 10 кГц.

Возможно также применение эксимерных лазеров, являющихся наиболее эффективными и мощными источниками когерентного излучения в ультрафиолетовой области спектра [60, 69–72].

Наибольшее преимущество в энергопотреблении и массогабаритах по сравнению с СО<sub>2</sub>- и твердотельными лазерами имеют оптоволоконные лазеры, которые обладают высоким ресурсом (превышающим 50000 ч), а также возможностью доставки лазерного излучения по волокну на расстояние до 200 м и более. Оптоволоконный лазер хорошо подходит для обработки поверхностей диэлектрических и композиционных материалов. Основным его недостатком является высокая чувствительность к отраженному лучу, часто возникающему при взаимодействии генерируемого излучения с материалом. Таким образом, применение данного типа лазера невозможно для поверхностей, обладающих высокой отражающей способностью.

### Влияние на свойства подложки

Выбор лазера для удаления ЛКП зависит от оптических свойств покрытия на длине волны лазерного излучения, его толщины и свойств материала подложки. Известно, что удаление ЛКП эксимерным лазером (разновидность ультрафиолетового газового лазера) не приводит к изменению свойств подложки, на которое оно нанесено [72].

Для эффективного удаления ЛКП с деталей, выполненных из металлов и ПКМ авиационного назначения, разработан импульсный ТЕА СО<sub>2</sub>-лазер (лазер с поперечным возбуждением, работающий при атмосферном давлении в рабочей камере) мощностью 1 кВт (энергия импульса 3,8 Дж, частота повторения 265 Гц) [56]. Эффективность применения ТЕА СО<sub>2</sub>-лазера объясняется высоким поглощением излучения ЛКП и низким

поглощением данного излучения металлической подложкой, что приводит к качественному удалению покрытия без повреждения подложки.

Тем не менее для каждого типа ЛКП параметры процесса удаления и выбор лазера могут быть определены путем обширных экспериментальных исследований. В работе [55] описано изучение процесса удаления черной краски толщиной 14 мкм на бетонной подложке с использованием Nd:YAG-, CO<sub>2</sub>- и эксимерных лазеров, а также определены технологические параметры режимов удаления. Зависимость значения флюенса лазера от толщины покрытия, удаляемого за один импульс ТЕА CO<sub>2</sub>-лазером с высокой частотой повторения, показана в работе [73]. При этом установлено, что оптимальная скорость сканирования может быть определена не только расчетным или экспериментальным путем, но также исходя из знания физических свойств эпоксидного покрытия, таких как теплота испарения и температурный коэффициент линейного расширения. На рис. 4 видно, что эпоксидное ЛКП полностью удаляется при скорости сканирования 35 мм/с.

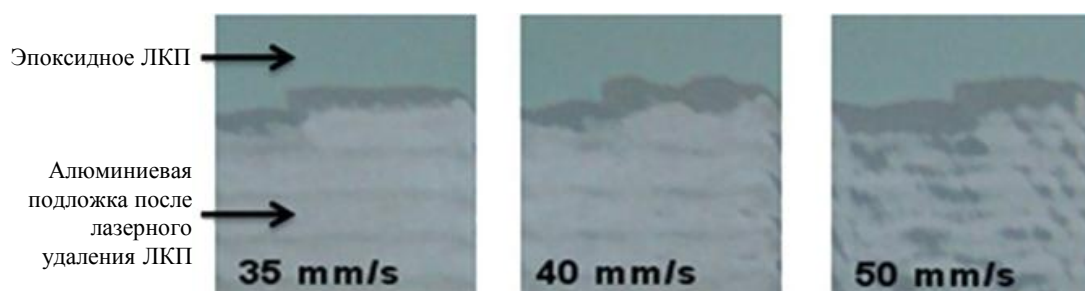


Рис. 4. Удаление эпоксидного лакокрасочного покрытия (ЛКП) толщиной 40 мкм с алюминиевой подложки ТЕА CO<sub>2</sub>-лазером с флюенсом 7,2 Дж/см<sup>2</sup> при частоте следования импульса 100 Гц [73]

Показано также влияние интенсивности CO<sub>2</sub>-лазера (при одном и том же значении флюенса) на процесс удаления эпоксидного ЛКП. Плазма, образующаяся перед мишенью при облучении коротким лазерным импульсом, расфокусирует лазерный луч (рис. 5), тем самым сильно уменьшая эффективность процесса удаления покрытия [56, 74].

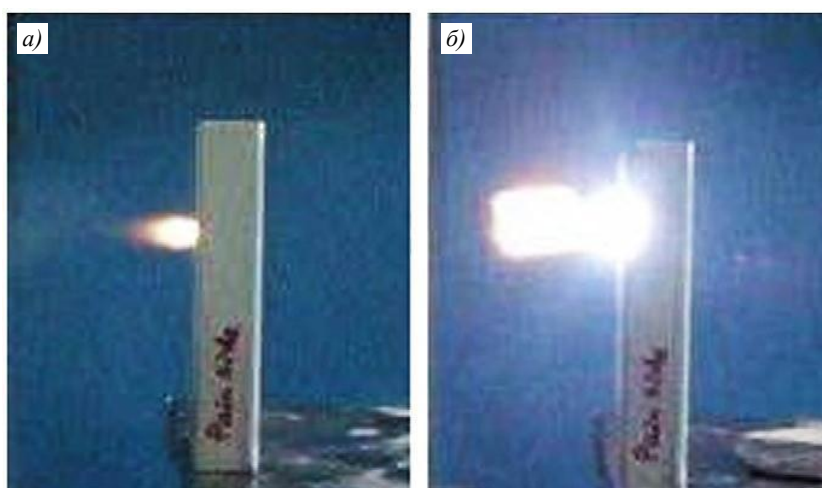


Рис. 5. Струя продуктов лазерного испарения над мишенью без образования (а) и с образованием плазмы (б) [73]

В работе [75] исследована возможность создания короткоимпульсного излучения с помощью ТЕА CO<sub>2</sub>-лазера, работающего в импульсно-периодическом режиме с частотой повторения 10 Гц, а также изучено влияние добавок азота в газовую смесь

$\text{CO}_2:\text{H}_2 = 500:50$  при общем давлении 0,06 МПа (0,6 бар). При этом установлено, что добавление азота в количестве до 8 % (объемн.) способствует увеличению пиковой мощности излучения при сохранении импульса.

На примере работы по изучению возможности удаления эпоксидной грунтовки BMS10-11 торговой марки PPG с поверхности обшивки самолета серии Boeing, изготовленной из алюминиевого сплава 2024 [76], показано, что применение неодимового твердотельного Nd:YAG-лазера является эффективным способом очистки при правильно подобранных технологических параметрах без повреждения материала обшивки. При этом сохраняются коррозионная стойкость и механические свойства поверхности обшивки самолета.

Вопросы влияния состава ЛКП на процесс удаления с помощью лазера изучены в работе [77], влияния лазерного флюенса, частоты следования и длительности импульса – в работах [72, 73], а процессы, протекающие при удалении краски с металлической подложки, отражены в исследовании [78].

### Основные проблемы

Одной из наиболее сложных задач является подбор режимов обработки поверхности лазером, которые обеспечат полное удаление ЛКП без повреждения материалов обшивки.

Интенсивность лазерного излучения при очистке авиационных конструкций от ЛКП должна обеспечивать превышение порога абляции для всех материалов, образующих покрытие. В работах [79–82] предложен алгоритм, позволяющий определять технологические параметры импульсной лазерной очистки поверхности деталей из алюминиевых сплавов при условии сохранения анодированного слоя. Для установления допустимых режимов используются экспериментальные данные по определению порога абляции для компонентов покрытия и критических параметров обработки анодированного слоя. Показано, что количество последовательных импульсов, необходимых для удаления слоя покрытия при известных интенсивности и длительности импульса излучения, может быть определено с использованием экспериментальных данных по глубине абляции при действии единичного импульса.

Лазерная очистка поверхности обладает большим потенциалом автоматизации [83–87].

Для контроля качества очистки поверхности возможно использование метода лазерно-искровой эмиссионной спектроскопии [88], который заключается в регистрации и химическом анализе спектров излучения, возникающего при взаимодействии лазерного излучения с тонким поверхностным слоем металла [51, 52, 89]. Спектральный контроль процесса позволит обеспечить правильный подбор режимов лазерной очистки, а также требуемую степень очистки и подготовки поверхности для последующих операций.

Ученые из Китая в своей работе [90] показали результаты исследования механизмов удаления микрочастиц поверхностной волной, индуцированной короткоимпульсным лазером в процессе очистки. Предложена также математическая модель процесса удаления микрочастиц меди с образца из нержавеющей стали для прогнозирования области удаления и подбора параметров (энергии лазера и размера лазерного пятна) обработки поверхности путем лазерной очистки.

### Заключения

Лазерная очистка поверхности при ремонте авиационной техники может заменить применяемые химические или абразивные способы обработки. При этом механическое или химическое воздействие на материал обрабатываемой поверхности

не оказывается, вследствие чего риск возникновения и распространения коррозии минимален. Лазерный метод является экологически более благоприятным процессом по сравнению с традиционно применяемыми и способствует осуществлению очистки труднодоступных участков, а также деталей сложной геометрической формы. Кроме того, лазерная очистка позволяет исключить процесс обезжиривания поверхности перед нанесением покрытий и осуществлять селективное удаление ЛКП. Использование современных лазеров также сокращает продолжительность ремонта агрегатов самолета с нескольких месяцев до нескольких недель и снижает его стоимость.

Тем не менее остается нерешенным вопрос лазерного удаления гляцевых белых ЛКП. Крайне интересной и перспективной является задача удаления покрытий с поверхностей деталей, изготовленных из ПКМ, когда невозможно применить химические способы очистки (с помощью смывок и растворителей). Таким образом, необходимо внедрение процессов удаления покрытий и подготовки поверхности с помощью лазерного излучения в авиационной промышленности.

#### **Библиографический список**

1. Каблов Е.Н. Коррозия или жизнь // Наука и жизнь. 2012. № 11. С. 16–21.
2. Франчук Г.М., Савченко В.И. Опыт использования аэрозольных газодинамических потоков в технологических процессах очистки. Киев: Знание, 1988. 16 с.
3. Технология лакокрасочных покрытий: сб. науч. трудов / ОАО НИИ ЛКП с ОМЗ «Виктория». М.: ЛКМ-пресс, 2009. С. 63.
4. Стойе Д., Фрейтаг В. Краски, покрытия и растворители / пер. с англ. под ред. Э.Ф. Ицко. СПб.: Профессия, 2007. 528 с.
5. Ицко Э.Ф., Дринберг А.С. Удаление лакокрасочных покрытий. М.: ЛКМ-пресс, 2010. 116 с.
6. Agarwala V.S., Rajeshwar K. Paint and coating removal technologies: Past, present and future // NACE – International Corrosion Conference Series (11–16 March 2001). Houston, 2001. Paper No. NACE-01577.
7. Maeno T., Mori K., Ogihara T., Fujita T. Removal of thin oxide scale by ultrasonic cleaning with diluted hydrochloric acid in hot stamping of bare 22MnB5 sheet using resistance heating // Procedia Manufacturing. 2019. Vol. 29. P. 225–231.
8. Каблов Е.Н., Семенова Л.В., Еськов А.А., Лебедева Т.А. Комплексные системы лакокрасочных покрытий для защиты металлических полимерных композиционных материалов, а также их контактных соединений от воздействия агрессивных факторов // Лакокрасочные материалы и их применение. 2016. № 6. С. 32–35.
9. Каблов Е.Н. Инновационное развитие – важнейший приоритет государства // Металлы Евразии. 2010. № 2. С. 6–11.
10. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. 2015. № 1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
11. Каблов Е.Н. Из чего сделать будущее? Материалы нового поколения, технологии их создания и переработки – основа инноваций // Крылья Родины. 2016. № 5. С. 8–18.
12. Каблов Е.Н. Шестой технологический уклад // Наука и жизнь. 2010. № 4. С. 2–7.
13. Щербаков И.А. Лазер // Большая российская энциклопедия. URL: <https://bigenc.ru/physics/text/4341828> (дата обращения: 22.01.2021).
14. Schawlow A.L. Lasers // Science. 1965. Vol. 149. No. 3679. P. 13–22.
15. Bo Y., Geng A., Xu Z. High average power Q-switched quasi-continue-wave Nd:YAG laser // Acta Physica Sinica. 2006. Vol. 55. No. 3. P. 1171–1175.
16. Furuta K., Kojima T., Fujikawa S. Diode-pumped 1 kW Q-switched Nd: YAG rod laser with high peak power and high beam quality // Applied Optics. 2005. Vol. 44. No. 19. P. 4119–4122.
17. Roberts D.E. Pulsed laser coating removal by detachment and ejection // Applied Physics. 2004. Vol. 79. No. 4. P. 1067–1070.

18. Method of removing rust from metallic objects: pat. US 4368080; filed 27.10.80; publ. 11.01.83.
19. Способ лазерной очистки поверхности: пат. RU 2538161C2; заявл. 28.12.12; опубл. 10.01.15.
20. Способ очистки поверхности и устройство для его осуществления: пат. RU 2297886; заявл. 06.06.05; опубл. 27.04.07.
21. Способ очистки поверхности материалов и устройство для его осуществления: пат. RU 2037342C1; заявл. 17.09.90; опубл. 19.06.95.
22. Способ поверхностной лазерной обработки и устройство для его осуществления: пат. RU 2445175C1; заявл. 28.06.10; опубл. 20.03.12.
23. Способ лазерной очистки металлов: пат. RU 2619692C1; заявл. 24.05.16; опубл. 17.05.17.
24. Способ лазерной очистки поверхности: пат. RU 2668619C1; заявл. 14.08.17; опубл. 10.02.18.
25. Шастин В.И., Белунник А.И., Лоцманов Г.С. Удаление лакокрасочных покрытий излучением лазера // *Материалы совещания «Лазерные технологические установки и перспективы их применения на предприятиях отрасли»*. М.: НИАТ, 1986. С. 3.
26. Шастин В.И. Удаление особо стойких лакокрасочных покрытий с использованием лазерного излучения // *Лакокрасочные материалы и их применение*. 2015. № 8. С. 42–46.
27. Kuang Z., Guo W., Li J. et al. Nanosecond fibre laser paint stripping with suppression of flames and sparks // *Journal of Materials Processing Technology*. 2019. Vol. 266. P. 474–483.
28. Jasim H.A., Demir A.G., Previtali B., Taha Z.A. Process development and monitoring in stripping of a highly transparent polymeric paint with ns-pulsed fiber laser // *Optics and Laser Technology*. 2017. Vol. 93. P. 60–66.
29. Madhukar Y.K., Mullick S., Shukla D.K. et al. Effect of laser operating mode in paint removal with a fiber laser // *Applied Surface Science*. 2013. Vol. 264. P. 892–901.
30. Schmidt M.J.J., Li L., Spencer J.T. An investigation into the feasibility and characteristics of using a 2.5 kW high power diode laser for paint stripping // *Journal of Materials Processing Technology*. 2003. Vol. 138. Is. 1–3. P. 109–115.
31. Самохвалов А.А. Лазерная очистка поверхности промышленных объектов от лакокрасочных покрытий и загрязнений: дис. ... канд. техн. наук / НИУ ИТМО. СПб., 2013. 107 с.
32. Смирнов В.Н. Разработка технологии обработки деталей авиационных двигателей // *Лазерные технологии*. 2016. URL: [http://laser.com.ru/refinement\\_aviation.html](http://laser.com.ru/refinement_aviation.html) (дата обращения: 24.01.2021).
33. Смирнов В.Н. Мобильные лазерные модули: решение задач ремонтно-восстановительных работ в полевых условиях двигателей // *Лазерные технологии*. 2016. URL: [http://laser.com.ru/article\\_mlm.html](http://laser.com.ru/article_mlm.html) (дата обращения: 24.01.2021).
34. Смирнов В.Н. Антикоррозионная обработка двигателей // *Лазерные технологии*. 2016. URL: <http://laser.com.ru/anti.html> (дата обращения: 24.01.2021).
35. Паньч Д.С. Применение лазерно-плазменной обработки для удаления коррозионного слоя в машинах и металлоконструкциях // *Евразийский научный журнал*. 2016. № 9. С. 197–199.
36. Вергер Р. Как наиболее эффективно удалить краску с реактивного истребителя // *Покрытия сегодня*. 2021. URL: <http://coatings-today.com/articles/view/69> (дата обращения: 22.01.2021).
37. Schlett J. Laser paint removal takes off in aerospace // *Vision Spectra*. 2016. URL: [https://www.photonics.com/Articles/Laser\\_Paint\\_Removal\\_Takes\\_Off\\_in\\_Aerospace/a61353](https://www.photonics.com/Articles/Laser_Paint_Removal_Takes_Off_in_Aerospace/a61353) (дата обращения: 22.01.2021).
38. Мубояджан С.А., Александров Д.А., Горлов Д.С. Ионно-плазменные нанослойные эрозионно-стойкие покрытия на основе карбидов и нитридов металлов // *Металлы*. 2010. № 5. С. 39–51.
39. Александров Д.А. Исследование износостойких покрытий на основе многокомпонентных нитридов титана // *Труды ВИАМ*. 2020. № 4–5 (88). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 01.02.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-45-62-69.
40. Александров Д.А., Мубояджан С.А., Журавлева П.Л., Горлов Д.С. Исследование влияния подготовки поверхности и ассистированного осаждения на структуру и свойства эрозионно-стойкого ионно-плазменного покрытия // *Труды ВИАМ*. 2018. № 10 (70). Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 01.02.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-10-62-73.

41. Мубояджян С.А., Александров Д.А., Горлов Д.С., Егорова Л.П., Булавинцева Е.Е. Защитные и упрочняющие ионно-плазменные покрытия для лопаток и других ответственных деталей компрессора ГТД // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. № 5. С. 71–81.
42. Каблов Е.Н., Мубояджян С.А. Эрозионностойкие покрытия для лопаток компрессора газотурбинных двигателей // *Электрометаллургия*. 2016. № 10. С. 23–38.
43. Ночовная Н.А., Никитин Я.Ю., Григоренко В.Б., Козлов И.А. Изменения свойств поверхности титанового сплава VT20 при химическом удалении эксплуатационных углеродсодержащих загрязнений // *Труды ВИАМ*. 2017. № 10 (58). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 01.02.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-10-5-5.
44. Ночовная Н.А., Никитин Я.Ю. Современное состояние вопроса в области очистки проточной части компрессора ГТД от эксплуатационных загрязнений (обзор) // *Труды ВИАМ*. 2017. № 3 (51). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 01.02.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-3-5-5.
45. Планковский С.И., Головин И.И., Сиренко Ф.Ф. Анализ существующих методов очистки поверхности лопаток турбин в газотурбинных двигателях // *Авиационно-космическая техника и технология*. 2013. № 6. С. 8–14.
46. Планковский С.И., Цегельник Е.В., Головин И.И., Мельничук П.И. Перспективы лазерной очистки при ремонте ГТД // *Авиационно-космическая техника и технология*. 2015. № 10 (127). С. 54–57.
47. Способ очистки и зачистки лопатки газотурбинного двигателя посредством импульсного лазера: пат. RU 2604406C2; заявл. 02.05.12; опубл. 10.12.16.
48. Turner M.W., Crouse P.L., Li L., Smith A.J.E. Investigation into CO<sub>2</sub> laser cleaning of titanium alloys for gas-turbine component manufacture // *Applied Surface Science*. 2006. Vol. 252. Is. 13. P. 4798–4802.
49. ГОСТ EN 4678–2016. Авиационно-космическая серия. Сварные и паяные изделия для авиационно-космических конструкций. Соединения металлических материалов, выполненные лазерной сваркой. Качество сварных изделий (с Поправкой). М.: Стандартинформ, 2017. 38 с.
50. Li X., Zhang Q., Zhou X. et al. The influence of nanosecond laser pulse energy density for paint removal // *Optik*. 2018. Vol. 156. P. 841–846.
51. Вейко В.П., Смирнов В.Н., Чирков А.М., Шахно Е.А. Лазерная очистка в машиностроении и приборостроении. СПб.: НИУ ИТМО, 2013. 103 с.
52. Вейко В.П., Мути́н Т.Ю., Смирнов В.Н. и др. Лазерная очистка поверхностей металлов: физические процессы и применение // *Известия высших учебных заведений. Приборостроение*. 2008. Т. 51. № 4. С. 30–36.
53. Левин А. Квантовый светоч: История одного из самых важных изобретений XX века – лазера // *Популярная механика*. 2019. URL: <https://www.popmech.ru/technologies/5466-kvantovyy-svetoch-istoriya-odnogo-iz-samykh-vazhnykh-izobreteniy-xx-veka-lazera> (дата обращения: 02.02.2021).
54. Schweizer G., Werner L. Industrial 2 kW TEA CO<sub>2</sub> laser for paint stripping of aircraft // *Proceedings of SPIE*. 1994. Vol. 2502. P. 57–62.
55. Liu K., Garmire E. Paint removal using lasers // *Applied Optics*. 1995. Vol. 34. P. 4409–4415.
56. Prinsloo F.J., Heerden S.P.V., Ronander E., Botha L.R. Efficient TEA CO<sub>2</sub> laser based coating removal system // *Proceedings of SPIE*. 2007. Vol. 6346. P. 1–8.
57. Tsunemi A., Hagiwara K., Saito N., Nagasaka K., Miyamoto Y., Suto O. Complete removal of paint from metal surface by ablation with a TEA CO<sub>2</sub> laser // *Applied Physics A*. 1996. Vol. 63. P. 435–439.
58. Chen G.X., Kwee T.J., Tan K.P., Choo Y.S., Hong M.H. Laser cleaning of steel for paint removal // *Applied Physics A*. 2010. Vol. 101. P. 249–253.
59. Forbes A., Du Preez N.C., Belyi V., Botha L.R. Paint stripping with high power flattened Gaussian beams // *Proceedings of SPIE*. 2009. Vol. 7430. P. 1–5.
60. Pantelakis S.G., Kermandis T.B., Haidemenopoulos G.N. Mechanical behavior of 2024 Al alloy specimen subjected to paint stripping by laser radiation and plasma etching // *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*. 1996. Vol. 25. P. 139–146.

61. Arabgari S., Aghaie M., Radmard S., Nabavi S.H. Thin-disk laser resonator design: The dioptric power variation of thin-disk and the beam quality factor // *Optik*. 2019. Vol. 185. P. 868–874.
62. Shayganmanesh M., Beirami R. Evaluation of thermal effects on the beam quality of disk laser with unstable resonator // *Optics communications*. 2017. Vol. 38315. P. 92–100.
63. Gavili A., Shayganmanesh M. Thin disk laser with unstable resonator and reduced output coupler // *Optics & Laser Technology*. 2018. Vol. 101. P. 349–357.
64. Larionov M. Thin disk lasers // *Encyclopedia of modern optics*. Second ed. Oxford: Academic Press, 2018. Vol. 2. P. 407–414.
65. Аполлонов В.В. Дискосые лазеры: преимущества и перспективы // *Экспертный союз*. URL: <http://лазер.рф/2017/09/15/5383> (дата обращения: 28.01.2021).
66. Рутеринг М. Целенаправленное удаление краски мощным Nd:YAG-лазером // *Фотоника*. 2010. № 2. С. 12–14.
67. Zhanga Z., Zhang J., Wang Y. et al. Removal of paint layer by layer using a 20 kHz 140 ns quasi-continuous wave laser // *Optik*. 2018. Vol. 174. P. 46–55.
68. Brygo F., Dutouquet Ch., Le Guern F. et al. Laser fluence, repetition rate and pulse duration effects on paint ablation // *Applied Surface Science*. 2006. Vol. 252. Is. 6. P. 2131–2138.
69. Лосев В.Ф., Ципилев В.П. Лазерные технологии и оборудование: учеб. пособие. Томск: Изд-во Томск. политехн. ун-та, 2008. 148 с.
70. Delaporte Ph., Gastaud M., Marine W. et al. Dry excimer laser cleaning applied to nuclear decontamination // *Applied Surface Science*. 2003. Vol. 208–209. P. 298–305.
71. Виноходов А.Ю. Электроразрядные лазерные и плазменные источники излучения УФ и ВУФ диапазона с высокой частотой следования импульсов: дис. ... канд. физ.-мат. наук. Троицк: РФЯЦ «ВНИИЭФ», 2004. 301 с.
72. Galantucci L.M., Gravina A., Chita G., Cinquepalmi M. An experimental study of paint-stripping using excimer laser // *Polymer and Polymer Composites*. 1997. Vol. 5. No. 2. P. 87–94.
73. Kumar M., Bhargava P., Biswas A.K. et al. Epoxy-paint stripping using TEA CO<sub>2</sub> laser: Determination of threshold fluence and the process parameters // *Optics & Laser Technology*. 2013. Vol. 46. P. 29–36.
74. Beck M., Berger P., Hugel H. The effect of plasma formation on beam focusing in deep penetration welding with CO<sub>2</sub> laser // *Journal of Physics D: Applied Physics*. 1995. Vol. 28. P. 2430–2442.
75. Панченко Ю.Н., Лосев В.Ф., Пучикин А.В., Yao Jun. TEA CO<sub>2</sub>-лазеры с высокой выходной интенсивностью излучения // *Известия высших учебных заведений. Физика*. 2013. Т. 56. № 11. С. 33–36.
76. Zhu G., Wang S., Cheng W. et al. Corrosion and wear performance of aircraft skin after laser cleaning // *Optics & Laser Technology*. 2020. Vol. 132. P. 64–75.
77. Razab M.K.A.A., Jaafar M.S., Abdullah N.H. et al. Influence of elemental compositions in laser cleaning for automotive coating systems // *Journal of Russian laser research*. 2016. Vol. 37. No. 2. P. 197–206.
78. Coutouly J.-F., Deprez P., Breaban F., Longuemard J.-P. Optimisation of a paint coating ablation process by CO<sub>2</sub> TEA laser: Thermal field modelling and real-time monitoring of the process // *Journal of Materials Processing Technology*. 2009. Vol. 209. Is. 17. P. 5730–5735.
79. Планковский С.И., Цегельник Е.В., Мельничук П.И., Лебедь В.И. Расчетно-экспериментальный алгоритм назначения режимов лазерного удаления лакокрасочных покрытий // *Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов*. 2017. Вып. 4 (92). С. 34–41.
80. Планковский С.И., Цегельник Е.В., Мельничук П.И., Головин И.И. К вопросу назначения режимов лазерной очистки элементов авиационных конструкций из алюминиевых сплавов от лакокрасочных покрытий // *Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов*. 2015. Вып. 4 (84). С. 105–111.
81. Планковский С.И., Цегельник Е.В., Мельничук П.И., Чащин Н.А. Экспериментально-расчетная методика определения ограничений режимов лазерной очистки деталей из алюминиевых сплавов // *Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов*. 2017. Вып. 3 (91). С. 61–70.

82. Han J., Cui X., Wang S. et al. Laser effects based optimal laser parameter identifications for paint removal from metal substrate at 1064 nm: A multi-pulse model // *Journal of Modern Optics*. 2017. Vol. 64. No. 19. P. 1947–1959.
83. Цегельник Е.В. Перспективные направления применения лазерных технологий в авиационной промышленности // *Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии*. 2015. Вып. 70. С. 121–129.
84. Weissling D.H., Wiedmann S.L., Solomon D.P. A Large-Scale Robotic System for Depainting Advanced Fighter Aircraft // *SAE International Journal of Aerospace*. 2011. Vol. 4. Is. 2. P. 1125–1132.
85. Блинков В.В. Применение лазерных технологий в авиационной промышленности // *ЛазерИнформ*. 2009. № 23 (422). С. 5–9.
86. Цегельник Е.В., Мельничук П.И. Современные подходы к автоматизации процессов лазерной очистки элементов авиационных конструкций от лакокрасочных покрытий // *АВИА-2015: материалы XII Междунар. науч.-техн. конф. (Киев, 28–29 апр. 2015 г.)*. Киев: Нац. авиац. ун-т, 2015. С. 16.35–16.38.
87. Точенов Л.А. Состояние и перспективы механизации технологических процессов очистки самолетов. М.: ЦНТИ Гражданской авиации, 1985. 54 с.
88. Кремерес Д., Радziemски Л. Лазерно-искровая эмиссионная спектроскопия / пер. с англ. М.: Техносфера, 2009. 360 с.
89. Вейко В.П., Волков С.А., Мутин Т.Ю., Смирнов В.Н. О возможности спектроскопического контроля процесса лазерной очистки // *Приборостроение*. 2011. № 2. С. 65–68.
90. Hsu S.-C., Lin J. Removal mechanisms of micro-scale particles by surface wave in laser cleaning // *Optics & Laser Technology*. 2006. Vol. 38. Is. 7. P. 544–551.