УДК 681.7.069.24 : 621.79.02

ВИБІР ДЖЕРЕЛА ЛАЗЕРНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ ДЛЯ ЦІЛЕЙ ПРОМИСЛОВОГО ОЧИЩЕННЯ ДЕТАЛЕЙ АВІАЦІЙНОЇ ТЕХНІКИ

С. І. Планковський[1], д-р техн. наук, проф.; ***Є. В. Цегельник***[1], канд. техн. наук;
І. І. Головін[1]; ***П. І. Мельничук***[2]

[1]Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «ХАІ»
[2]Державне підприємство «Антонов»

y.tsegelnyk@gmail.com

Наведено результати експериментального дослідження з виявлення можливості застосування лазерного випромінювання в промислових цілях очистки поверхонь елементів авіаційної й наземної техніки. Розглянуто три випадки застосування лазерного випромінювання: зняття лакофарбового покриття з поверхні літального апарата, видалення слідів поверхневої корозії й експлуатаційного нагару з поверхні пера лопатки турбіни й видалення продуктів високотемпературного окиснювання з поверхні поршня. Виявлено джерела лазерного випромінювання, що дозволяють здійснити дані операції. Проаналізовано експериментальні дані і показано можливе джерела для застосування лазерного очищення в промисловості.

Ключові слова: лазерне очищення поверхонь, абляція, видалення лакофарбових покриттів.

This article presents the experimental investigation results on identifying possibility of using laser light for industrial purposes of cleaning construction elements surfaces on aircraft and land engineering objects. Considered were three cases of laser light usage. The first case concerns with removal of paint and coatings from aircraft surface. The second case deals with surface corrosion trace removal and operating carbon deposit removal from surface of foil turbine. The third case considered removal of high-temperature corrosion products from piston surface. The laser sources were detected which allows us to conduct the aforementioned operations. The analysis of experimental findings was given. The image of possible laser source for industrial laser cleaning was formed.

Keywords: laser surface cleaning; ablation; removal of paint coatings.

Вступ

Під час виробництва й ремонту авіаційної техніки (АТ), як правило, зіштовхуються з різними типами забруднень на деталях і елементах конструкцій АТ. Існує різний від забруднень поверхонь, яка очищується, але зазвичай доволі складним.

Надійність газотурбінних двигунів значною мірою залежить від надійності роботи лопаток турбіни, оскільки вони є найбільш навантаженими деталями.

Газові турбіни інколи працюють на паливі, яке містить підвищену концентрацію сірки, що призводить до поступового накопичення на поверхні лопаток осаду солі й протікання сульфідної корозії.

Існують різноманітні технології очищення поверхні деталей від продуктів високотемпературного (ВТ) окиснювання й поверхневої корозії, але більшість із них потребують значних матеріальних витрат й потребують подальшої утилізації відходів процесу очищення [1].

Однією із більш навантажених деталей у двигуні є поршень. Він зазнає механічного навантаження у разі розширення робочої суміші при згорянні її в циліндрі, теплові — також від згоряння, так до того ж ще й прискорюється й уповільнюється по 100…200 разів у хвилину.

Небезпека скупчення нагару полягає в тому, що це може спровокувати виникнення низки неполадок: прогоряння днища поршнів, тарілок клапанів, заїдання поршневих кілець і значне зниження загального ККД двигуна.

Одним з ефективних і поширених методів видалення нагарів зі сталевих деталей або з деталей із чорних сплавів, типу поршень, є обробка деталей розплавами неорганічних солей. Наприклад, хороші результати видалення нагару дає обробка деталі розплавом їдкого натру, що має температуру плавлення 328 °С [2]. Але недолік даного методу виражається в тому, що рідини, які містять у своєму складі їдкий натр, у жодному разі не можна використовувати для очищення алюмінієвих деталей, тому що луг руйнує алюміній. Окрім того, цей метод небезпечний і потребує подальшої утилізації відходів процесу очищення.

Крім очищення деталей двигунів від експлуатаційних впливів, в авіації існує проблема видалення лакофарбових покриттів (ЛФП) з елементів конструкцій об’єктів авіаційної техніки в результаті регламентних (C-check, D-check) і відбудовних робіт або ж у разі зміни фірми — експлуатанта та ребрендинзі [3].

Для зняття ЛФП із авіаційної техніки поряд з хімічним методом, при якому використовуються як різні за составом змивки, так і різне обладнан-

© Планковський С. І., Цегельник Є. В., Головін І. І., Мельничук П. І., 2014

ня (пересувні валикові кисті, вакуумні й вакуумно-вихрові установки), знаходять застосування також аерозольно-гідродинамічний, криогенний, та інші методи.

Але більшість цих методів дорогі у використанні й небезпечні. Так, у ході обстеження сервісного центру одного з основних авіаносців США було виявлено значну кількість операцій, пов'язаних із застосуванням небезпечних і легко займистих речовин [4]. У процесі хімічної або дрібноструменевого очищення, яка застосовується ВМС США, утворюються такі шкідливі відходи:

– трихлоретан;
– перхлоретан;
– метил етил кетон;
– метилен хлорид;
– фреон;
– метил хлороформ;
– матеріал для дрібноструменевого очищення.

Останнім часом як матеріал елементів конструкцій літальних апаратів почали активно застосовувати композитні матеріали (КМ). У сучасному літаку частка використання КМ досягає 30…50 %. Хімічні методи видалення ЛФП не зовсім підходять, оскільки якщо з металом розчинники ніяк не взаємодіють, то у КМ вони вступають у хімічну реакцію з поверхнею. Отже, при перефарбуванні або ремонті композитні поверхні доводиться зачищати механічними методами. Такі методи мають дуже низьку продуктивність, і крім того можуть наносити ушкодження поверхневому шару КМ.

Один з перспективних методів видалення ЛФП із металевих і композитних поверхонь — лазерний [5]. Поряд із застосуванням методу лазерного очищення в архітектурі [6] і реставраційному процесі [7] використовується в авіаційній промисловості.

Однак для застосування в авіації необхідне вдосконалювання технології, шляхом додавання елементів контролю товщини шару ЛФП, глибини проникнення, застосовуваної потужності, сканерів контролю положення, а також безпосередньо необхідний вибір джерела лазерного випромінювання, що відповідає конкретним технологічним цілям.

Вибір джерела лазерного випромінювання для цілей промислового очищення деталей

Дослідники з Національного робототехнічного інженерного центру при Університеті Карнегі-Меллон і компанії Concurrent Technologies Corporation (США) розробили команду роботів, здатних знімати фарбу з літаків, використовуючи для цього лазери [8].

Наразі прототипи нових пристроїв (рис. 1) проходять тестування на Військово-повітряній базі Хілл у північній Юті, у рамках програми, спрямованої на пошук шляхів скорочення витрат на робочу силу, зниження рівня небезпеки для здоров'я й зменшення екологічних проблем, пов'язаних з перефарбуванням військових літаків. Concurrent Technologies Corporation займається створенням шести автономних мобільних роботів, здатних працювати в команді й видаляти фарбу й інші зовнішні покриття з винищувачів і транспортних літаків.

Рис. 1. Прототип автоматизованого роботехнічного комплексу з видалення ЛФП літака фірми Concurrent Technologies Corporation

Роботи являють собою досить великі пристрої й складаються з мобільної платформи, на якій кріпиться великий шарнірний маніпулятор, що рухається нагору й униз за допомогою гідравлічного підйомника.

На кінці кожного маніпулятора знаходиться масив сенсорів, які дозволяють йому рівномірно сковзати по поверхні літака. Там само розташований лазер безперервного випромінювання, який видаляє фарбу. Під час руху сенсори також можуть оцінювати стан літака. Швидкість, з якою вони працюють, повинна залишатися постійної, щоб лазер зміг зняти фарбу, не перегріваючи при цьому корпус літака. Одночасно із цим система HEPA збирає шматочки вилученої фарби.

Кількість роботів, необхідна для кожної команди, залежить від типу літака. Наприклад, для винищувача досить двох машин, а для вантажного літака буде потрібно чотири.

Система, що контролює роботів, генерує план очистки літака, але його можна змінити в процесі роботи. Вона також «ховає» області, які не повинні зачіпатися, тому технічному персоналу не доведеться бігати навколо з маскуючою стрічкою й папером.

Однак для застосування в цивільній авіації, де габаритні розміри повітряного судна суттєво більше, потрібні інші підходи для реалізації концепції автоматизованого очищення літака від ЛФП. Крім того, різний ступінь забруднення й тип поверхні деталі змушують замислитися про вибір джерела лазерного випромінювання для проведення лазерного очищення.

Це завдання було розглянуто в результаті пошукового дослідницького експерименту, проведеного у співпраці з АТ «НДІ Лазерних технологій». Для низки деталей авіаційної промисловості була перевірена можливість очищення поверхні за допомогою лазера й попередньо визначені можливі джерела лазерного випромінювання.

У результаті експерименту розглядалося два завдання:

– можливість видалення ЛФП із елементів обшивки літальних апаратів, на прикладі обшивки вертольота Мі-8 (рис. 2) й крилатої ракети (рис. 3);

– очистка поверхневого забруднення й продуктів ВТ окиснювання з робочої поверхні автомобільного поршня (рис. 4) та двох лопаток турбіни ГТД (рис. 5).

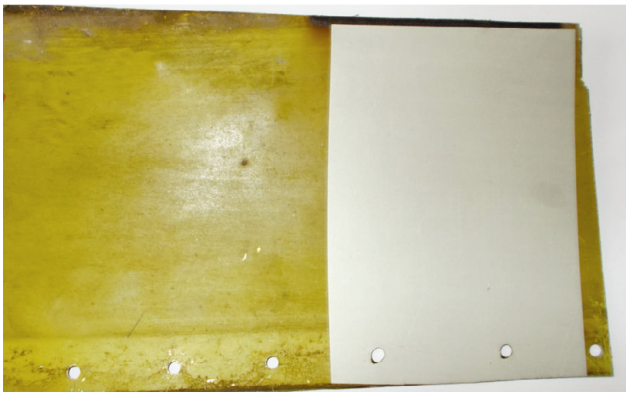

Рис. 2. Результати видалення ЛФП лазерним методом з елементів обшивки Мі-8

Рис. 3. Результати видалення ЛКП лазерним методом з обшивки крилатої ракети

Рис. 4. Сліди поверхневих забруднень і ВТ-корозії на автомобільних поршнях

а *б*

Рис. 5. Сліди ВТ-корозії (*а*) і експлуатаційного нагару (*б)* на поверхні лопатки турбіни

Слід зауважити, що коли йдеться про матеріали, які можливо обробити за допомогою двох або трьох типів лазерів, основна відмінність полягає в співвідношенні параметрів якості/продуктивності. У якійсь (часто доволі значній) мірі ці відмінності можуть бути переборені за рахунок системних рішень і підбору технології. Однак необхідно пам’ятати про принципову неможливість взаємодії певних лазерів з деякими матеріалами (різання міді за допомогою CO_2 лазерів практично неможливе, тоді як волоконний лазер не зможе обробити оргскло або фанеру).

Наступною принциповою відмінністю цих трьох типів лазерів, що використовуються для лазерної обробки, є їхня продуктивність, максимальна товщина оброблюваного матеріалу. Говорячи про максимальну товщину й швидкості, маємо на увазі порівняння між джерелами максимально доступної потужності кожного типу (тобто джерела, що застосовуються на сьогодні для оснащення верстатів лазерної обробки).

Волоконні лазери не потребують складного настроювання й регулярного обслуговування. Ресурс роботи таких лазерів становить від 50 000 год.

У випадку із CO_2 лазерами за рахунок особливостей будові оптичної системи необхідно здійснювати її налаштування і юстування. Ресурс роботи таких лазерів становить приблизно 20 000 год.

Для Nd:YAG лазерів потрібна періодична зміна запчастин (основний видатковий компонент — лампи розжарювання, ресурс — 250–500 год). Однак важливим аргументом на їхню користь є той факт, що їх вартість (і відповідно вартість верстата) на порядок менше, чим волоконного іттербієвого або slab CO_2 лазера при однаковій максимальній товщині оброблюваного матеріалу.

Зупинимося на волоконному та Nd:YAG лазерах.

Для лазерного очищення застосовували два типи лазера:

1. Наносекундний волоконний лазер з варійованою тривалістю імпульсів до 20 нс, частотою 30–40 кГц і вихідною потужністю випромінювання від 50 до 200 Вт.

2. Наносекундний Nd:YAG лазер із приблизно постійною тривалістю імпульсів близько 10 нс, частотою 30…40 кГц і вихідною потужністю випромінювання від 50 до 200 Вт.

Перелічені типи джерел лазерного випромінювання застосовувалися до двох задач очищення з метою виявлення універсального джерела.

У випадку з видаленням ЛФП із елементів обшивки було виявлено, що застосування наносекундного волоконного лазера з варійованою довжиною хвилі може дати хороші результати (див. рис. 2 і 3). Застосування ж наносекундного Nd:YAG лазера з постійною тривалістю імпульсів призводить до термічного пошкодження поверхні з утворенням опалін і жолоблення (рис. 6).

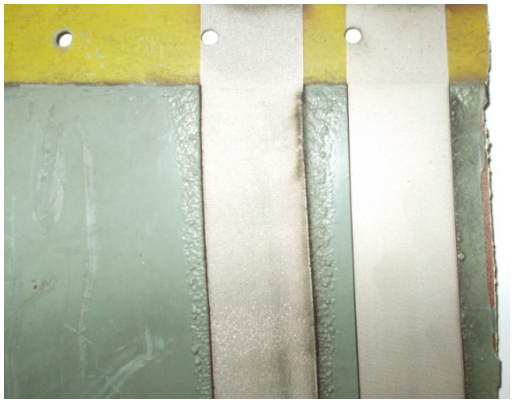

Рис. 6. Результати видалення ЛФП Nd:YAG лазером з елементів обшивки Мі-8

При мікроскопічному дослідженні зони обробки, зробленому у прямих електронах, чітко відслідковується поява жолоблення й відповідно деформація поверхні досліджуваного зразка (рис. 7).

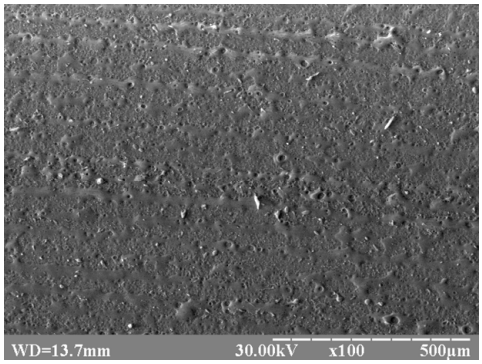

Рис. 7. Вид поверхні після обробки Nd:YAG лазером елементів обшивки Мі-8

Під час спроби здійснити очищення поверхневого забруднення та продуктів ВТ окиснювання поверхні поршня (див. рис. 4) за допомогою наносекундного волоконного лазера бажані результати не були досягнуті (рис. 8, *а*). Отже, застосування для цих цілей наносекундного Nd:YAG лазера дозволило досягтися бажаного результату (рис. 8, *б*).

а *б*

Рис. 8. Результати очищення автомобільного поршня волоконним лазером (*а*) і Nd:YAG лазером (*б*)

Очистка поверхні пера двох лопаток турбіни ГТД (див. рис. 5) від поверхневого забруднення й продуктів ВТ окиснювання наносекундним волоконним лазером з варійованою тривалістю імпульсів практично не дала результатів. Лише застосування наносекундного Nd:YAG лазера дозволило отримати результати (рис. 9).

а *б*

Рис. 9. Результати видалення продуктів ВТ-корозії (*а*) і експлуатаційного нагару (*б*) з поверхні лопатки турбіни лазерним методом

Висновки

Вибір джерела лазерного випромінювання дуже складний. Він залежить від того, які поверхні необхідно обробляти і який результат очікуємо отримати.

Довжина хвилі λ випромінювання прямо впливає на найбільш важливі параметри прикладного застосування лазера. Так, у різних типів лазерів, оснащених ідентичними за характеристиками оптичними системами, чітко помітні відмінності по діаметру плями фокусування й інтенсивності потужності у фокусному перетині лазерного пучка. Крім цього, довжина хвилі впливає на поглинання лазерного випромінювання оброблюваним матеріалом.

Експериментальним шляхом визначено, що видалення ЛФП із елементів поверхні літального апарата (ЛА) реалізоване при використанні волоконного лазера з варійованою тривалістю імпульсів. Зміна вихідної потужності дозволяє отримати різний ступінь очищення для різної кількості шарів ЛФП. Так само встановлено, що застосування Nd:YAG лазера із приблизно постійною тривалістю імпульсів за тих самих характеристик призводить до термічних деформацій елементів поверхні ЛА, однак дало хороші результати при видалення поверхневого забруднення й продуктів ВТ окиснювання з поверхні поршня й лопаток турбіни ГТД.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Планковский С.И.* Анализ существующих технологий методов очистки поверхности лопаток турбин в газотурбинных двигателях / С. И. Планковский, И. И. Головин, Ф. Ф. Сиренко // Авиационно-космическая техника и технология. — 2013. — № 6 (103). — С. 8–14.

2. *Беренсон С. П.* Химическая технология очищення деталей двигателей внутреннего сгорания / С. П. Беренсон. — М. : Транспорт, 1967. — 268 с.

3. *The Future* of Aircraft Paint Removal Methods: MS Thesis / Air Force Institute of Technology; auth. Michael J. Then. — USA, 1989. — 169 p. — AD-A214 946.

4. *Применение* технологии Dry Ice Cleaning (сухой лед CO_2) в аэрокосмической промышленности. — [Электронный ресурс] : проспект / Ice Ventec. — 3 с. — Режим доступа: http://www.icevent ek.ru/video/Case_Story_Dryice/Cleaning in the aero - space industry.pdf.

5. *Самохвалов А.А.* Лазерная очистка поверхности промышленных объектов от лакокрасочных покрытий и загрязнений: автореф. дисс. канд. техн. наук : 05.27.03 / Самохвалов Андрей Александрович. — Санкт-Петербург, 2013. — 20 с.

6. *Jasi´nska M.* Observation of the Laser Cleaning Effect on the Gotland Sandstone Elemental Composition / M. Jasi´nska, J. Bredal-Jørgensen, G. Sliwi´nski // Laser Chemistry. — 2006. — Vol. 2006, Id. 84781. — P. 1–6.

7. *Laser* Cleaning as a Conservation Technique for Corroded Metal Artifacts : MS Thesis / Luleå University of Technology; auth. Yang Sook Koh. Then. — Sweden, 2006. — 96 p.

8. *Weissling D. H.* A Large-Scale Robotic System for Depainting Advanced Fighter Aircraft / D. H. Weissling, S. L. Wiedmann, D. P. Solomon // SAE International Journal of Aerospace. — 2011. — Vol. 4, Iss. 2. — P. 1125-1132.

Стаття надійшла до редакції 23.06.2014