

УДК 629.735.33.083:621.795.3.044.3

doi: 10.32620/aktt.2022.5.02

Ю. В. Д'ЯЧЕНКО, І. О. ВОРОНЬКО, О. К. ГОРЛОВ

Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського  
«Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна

## АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ ПОЧАТКОВОГО І РЕМОНТНОГО ФАРБУВАННЯ ВИРОБІВ АВІАЦІЙНОЇ ТЕХНІКИ

*Предметом* вивчення статті є аналіз технологічних особливостей первісного та ремонтного фарбування виробів авіаційної техніки (АТ). Метою є аналіз та систематизація тенденцій світового авіабудування в галузі технологій пневматичного фарбування та видалення старого лакофарбового покриття (ЛФП) із зовнішніх поверхонь виробів АТ. *Завдання:* аналіз напрямів удосконалення технології пневматичного фарбування; аналіз технологічних особливостей лазерного видалення старого ЛФП. Отримано такі *результати*. Аналіз публікацій показав суттєві переваги системи електростатичного пневматичного фарбування з обмеженнями для полімерних композиційних матеріалів (ПКМ). Актуальною є розробка нових лакофарбових матеріалів (ЛФМ) із зменшенням вмістом летких органічних сполук та збільшеною величиною покриваності, а також принципово нових систем ЛФП на водній основі. Одним із сучасних засобів технологічного обладнання для пневматичного фарбування є стельові краново-телескопічні платформи. Світовою тенденцією є створення фарбувальних та сервісних центрів та роботизація фарбувальних робіт. Технологія лазерного видалення старого ЛФП є ефективною інноваційною альтернативою методам абразивної або хіміко-механічної очистки зовнішньої поверхні виробів АТ, які застосовують нині. Технологія лазерного очищення повинна забезпечити можливість ручного або автоматичного видалення старого ЛФП із поверхонь подвійної кривизни, елементів кріплення, а також стиків листів обшивки без термічного пошкодження анодної плівки на обшивках із алюмінієвих сплавів. Лазерні стенди та мобільні лазерні платформи мають високу продуктивність та низьку трудомісткість, багаторазове зменшення витрат на утилізацію продуктів розкладання старого ЛФП, виконання вимог охорони праці та екології порівняно з існуючими технологіями. *Висновки.* Наукова новизна викладених у статті матеріалів полягає в аналізі та систематизації технологічних особливостей первісного та ремонтного фарбування виробів АТ; обґрунтування створення фарбувального та сервісного центру для авіаційної промисловості України; визначення напрямків наукових та прикладних досліджень технології лазерного видалення старого багатошарового ЛФП.

*Ключові слова:* корозія; лакофарбові матеріали; пневматичне фарбування; роботизація фарбувальних робіт; лазерна абляція; лазерна десорбція, роботизовані стенди; мобільні платформи.

### Вступ

У конструкції сучасних виробів авіаційної техніки (АТ) застосовують різноманітні матеріали, найчастіше алюмінієві та магнієві сплави, різні марки сталей. Крім металевих матеріалів, використовують і неметалеві – гуму, пластмасу та полімерні композиційні матеріали (ПКМ). Літаки та вертольоти експлуатуються в різних кліматичних умовах. При цьому вони зазнають впливу атмосферних факторів – опадів у вигляді дощу та снігу, коливань температури, сонячної радіації, різних газів, що перебувають у повітрі промислових районів, морського туману.

Ці умови сприяють виникненню корозії металевих деталей, що погіршує їхню міцність або зміну первісних властивостей деталей з неметалічних матеріалів та ПКМ. Для надійної експлуатації виробів АТ подібні зміни неприпустимі [1].

Корозія – це самопливне руйнування металів і сплавів, а також інших речовин у результаті хімічної,

електрохімічної або фізико-хімічної взаємодії з навколишнім середовищем. До основних видів корозії за її механізмом відносять хімічну, електрохімічну, а також біологічну. Корозія металів завдає значної шкоди всім галузям господарства. Необхідність вдосконалення та підвищення ефективності методів захисту машин, обладнання та споруд від корозії, старіння і біопшкоджень обумовлена впливом процесів корозійного руйнування у економічній та екологічній площинах [1].

Щоб запобігти виникненню корозії виробів АТ, застосовуються різні захисні покриття: металеві, неметалеві неорганічні та лакофарбові. Одним з найпоширеніших способів боротьби з корозією є покриття металу фарбами. Національний стандарт ДСТУ 12944-2:20, який регламентує цей метод захисту від корозії, відповідає міжнародному стандарту ISO 12944-2:2017. Paints and varnishes. Corrosion protection of steel structures by protective paint systems

(Фарби та лаки. Захист від корозії сталевих конструкцій захисними лакофарбовими системами).

Лакофарбові покриття (ЛФП) – це покриття, що утворюються після висихання лакофарбових матеріалів (ЛФМ), нанесених на підготовлену поверхню літака або вертольота. ЛФМ – це складні рідкі органічні системи, до яких входять плівкоутворювачі разом з пігментами, наповнювачами, пластифікаторами, модифікаторами, затверджувачами та іншими добавками [1].

Основні компоненти будь-якого ЛФМ:

– плівкоутворювач – високомолекулярна органічна сполука, яка після висихання утворює на поверхні, що фарбують, ЛФП чи зумовлює його адгезію до поверхні. В залежності від виду плівкоутворювача, розрізняють поліакрилові, поліефірні, поліуретанові, епоксидні та інші ЛФМ;

– пігменти – тверді порошкоподібні тонко дисперсні неорганічні і органічні речовини, які надають покриттю прозорість, колір і впливають на інші властивості покриттів;

– розчинник – багатокомпонентна органічна рідина, що забезпечує розчинення плівкоутворювача, не викликаючи його хімічних перетворень, і випаровується в процесі плівкоутворення. Для пневматичного нанесення ЛФМ необхідно доводити до відносно невеликої в'язкості, на що витрачається багато розчинників. Розчинниками залежно від призначення ЛФМ можуть бути скипидар, уайт-спірит, ацетон, етилбензол. Такі речовини здатні спричинити негативну дію на організм професійних малярів. Це вимагає здійснення санітарного нагляду на всіх етапах контакту працівників підприємств з ЛФМ, їх компонентами та допоміжними матеріалами [2, 3].

Лак – це розчин плівкоутворювачів в органічних розчинниках, який після висихання утворює тверду прозору однорідну плівку. Плівки лаків, виготовлених на основі штучних смол, витримують високі температури, вплив лугів і кислот.

Вимоги, які пред'являють до ЛФП у авіабудуванні, значно вищі, ніж в інших галузях промисловості. Крім стійкості до атмосферних впливів і температурним перепадам, ЛФП повинні зберігати свої властивості і в умовах польоту на великих швидкостях, при перемінних навантаженнях і вібрації, витримувати без руйнування вплив високих температур, мастил і палив, що потрапляють на вироби АТ при їх експлуатації, а також вплив піску і пилу при зльоті і посадці. ЛФП повинні забезпечувати покращення аеродинамічних властивостей літака, створення необхідного камуфляжу або декоративного зовнішнього виду [1].

Під декоративними властивостями ЛФП, відповідно до стандартної термінології, мають на увазі

властивості покриття, що забезпечують його естетичне сприйняття. Декоративні властивості визначаються збереженням початкового зовнішнього вигляду ЛФП, кольору і блиску, а також стійкістю до процесу міління та впливу атмосферного пилу і бруду – брудоутримання [1].

Досвід експлуатації АТ показує, що повністю виключити корозію авіаційних матеріалів неможливо. Виходячи з характерних типів корозійного пошкодження і місця розташування конкретного конструктивного елемента, при проектуванні вибирають матеріали конструкції, схему його покриття, вибір конструктивного рішення з урахуванням корозійної поведінки, термінів виконання періодичних оглядів і регламентних робіт для виробів АТ [4, 5].

Отже, проблема захисту від корозії виробів АТ за допомогою ЛФП є одним із важливих загальнодержавних наукових та практичних завдань і вимагає подальших фундаментальних досліджень та технологічних розробок.

## 1. Аналіз особливостей пневматичного фарбування сучасних виробів АТ

З усіх методів нанесення ЛФМ при початковому та ремонтному фарбуванні сучасних виробів АТ найбільш широко застосовується пневматичний, його можна використовувати для нанесення всіх видів ЛФМ при фарбуванні різноманітних конструкцій АТ [6]. Метод відрізняється великою продуктивністю і можливістю отримувати тонкий шар ЛФП. Високоякісні ЛФМ для пневматичного фарбування сучасних літаків та вертольотів виробляють фірми PPG (США), AkzoNobel (Голландія), Mankiewicz (Німеччина) та Mараго (Франція).

**Фарборозпилювальна установка.** Розпилення ЛФМ відбувається з допомогою фарборозпилювача (фарбувального пістолета), з'єданого шлангом з допоміжним обладнанням, що забезпечує подачу в фарборозпилювач повітря та ЛФМ.

Стиснене повітря, що використовується для розпилення ЛФМ, повинне бути вільне від вологи і слідів мінерального мастила. При потраплянні мастила в ЛФП погіршується адгезія його до підкладки і міжшарове зчеплення. Тому повітря очищають з допомогою мастилизатверджувача.

По мірі роботи мастилизатверджувача в нижній частині його накопичується волога і мастило, їх необхідно періодично опускати як під час роботи, так і після її закінчення. Фарбонагнітальні баки призначені для подачі ЛФМ під тиском стисненого повітря в фарборозпилювач. Тиск повинен підтримуватися постійно, що забезпечує подачу ЛФМ в установленій кількості. Це являється обов'язковою умовою для но-

рмальній роботі фарборозпилювача. Фарбонагнітальні баки використовують для проведення фарбування середніх і великих об'ємів [6]. На рис. 1, а показана схема фарборозпилювальної установки. Фарборозпилювальна установка працює наступним чином: стиснене повітря подається в масловідвідник 3 для очищення від води та масла. Очищене повітря по шлангу 2 поступає в фарборозпилювач 1 і одночасно по шлангу 6 через регулятор тиску стисненого повітря у фарборозпилювальний бак 4. Під тиском стисненого повітря ЛФМ витісняється з баку і по шлангу 5 підводиться до фарборозпилювача. Загальний вигляд сучасної виробничої фарборозпилювальної установки показано на рис. 1, б, сучасного фарборозпилювача – на рис. 1, в.

На рис. 2 (а - в) показані приклади пневматичного фарбування зовнішньої поверхні деяких сучасних літаків та вертольотів.

Незручне розташування деяких зовнішніх поверхонь на виробі АТ при видаленні старого ЛФП та первинному або ремонтному пневматичному фарбуванні призводить до швидкої стомлюваності змивників та малярів, зниження продуктивності праці та можливості появи виробничих дефектів у вигляді підтікання фарби або лаку.

Найбільш незручними технологічними зонами для ручного пневматичного фарбування є зовнішні нижні поверхні фюзеляжу пасажирських літаків (рис. 2, г), винищувачів (рис. 2, д) та вертольотів (рис. 2, в), а також нижні поверхні мотогондол пасажирських літаків (рис. 2, е).

**Пневматичний фарборозпилювач.** Незважаючи на велику різноманітність типів пневматичних фарборозпилювачів, принцип їхньої дії однаковий [1, 6]. На рис. 3, а показані основні вузли сучасного пневматичного фарборозпилювача.

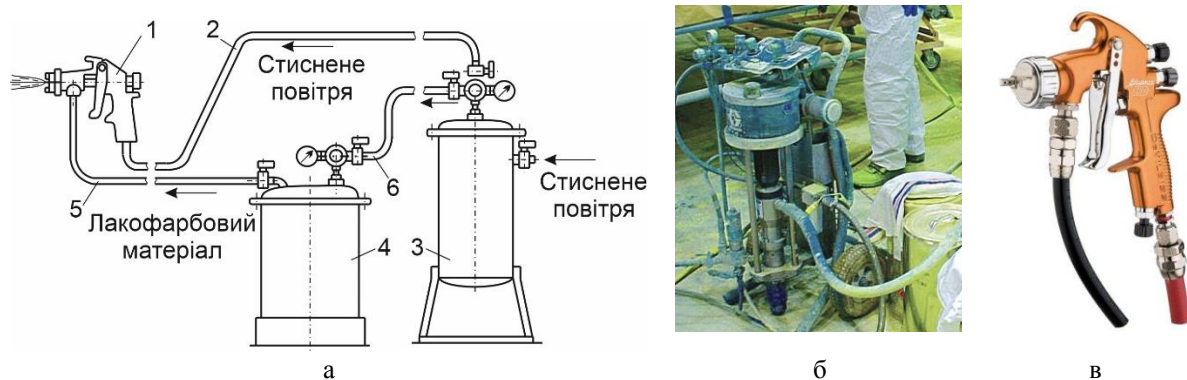


Рис. 1. Схема (а) та загальний вигляд фарборозпилювальної установки (б) і фарборозпилювача (в): 1 – фарборозпилювач; 2, 5, 6 – шланг; 3 – масловідвідник; 4 – фарборозпилювальний бак



Рис. 2. Приклади пневматичного фарбування деяких виробів АТ: а – аеробуса; б – винищувача; в – вертольота; г, д, е – приклади зовнішніх поверхонь виробів АТ, які незручні для пневматичного фарбування

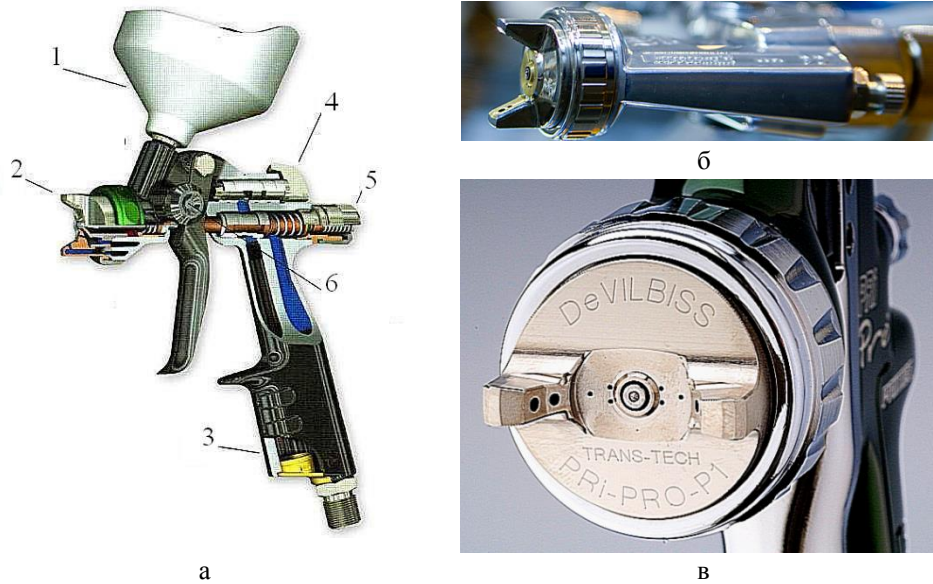


Рис. 3. Компонування (а), загальний вигляд розпилювальної головки (б) та сопла (в) пневматичного фарборозпилювача: 1 – бачок; 2 – розпилювальна головка; 3 – рукоятка; 4 – регулятор подачі стисненого повітря; 5 – регулятор подачі ЛФМ; 6 – регулятор форми факела розпилення ЛФМ

Під дією потоку повітря внаслідок спеціальної конструкції фарборозпилювача ЛФМ надходить з бачка 1 або із зовнішнього фарборозпилювального бака (див. рис. 1, в) і потім розпоршується. При підтисненні курка на рукоятці 3 фарборозпилювача до першого фіксованого положення відкривається тільки прохід стисненого повітря.

Якщо курок натиснути більше, зсувається голка розпилювача і фарба захоплюється потоком повітря з високою швидкістю. Корпус з рукояткою 3 виконує компонувальну і ергометричну функції пневматичного фарборозпилювача.

Розпилювальна головка 2 забезпечує пневматичне розпилення ЛФМ із зовнішнім змішуванням. Повітряні струмені, які виходять з отворів в консольних виступах розпилюючої головки, створюють потоки повітря, що допомагають сформувати рідкий склад ЛФМ в аерозольний факел розпилення конічної форми.

Для попереднього та експлуатаційного налаштування фарбувального пістолета передбачені спеціальні регулювальні гвинти (див. рис. 3, а):

- регулятор подачі повітря 4 для точного налаштування тиску стисненого повітря;
- регулятор подачі ЛФМ 5, що відповідає за продуктивність пневматичного фарбування;
- регулятор форми плями розпилення 6, котрий дозволяє підібрати оптимальну форму розпилення безпосередньо під час фарбування.

Від конструкції розпилювальної головки (рис. 3, б) значною мірою залежить ефективність та економічність застосування повітряного розпилення,

а саме: продуктивність, втрати ЛКМ на туманоутворення, витрата стисненого повітря, форма факелу та розміри його відбитка. Зі збільшенням діаметра центрального отвору сопла зростає продуктивність – збільшується кількість ЛКМ, що надходить на розпилення. При цьому для забезпечення потрібної дисперсності ЛКМ необхідно збільшити кількість стисненого повітря від компресора.

Фарбувальне сопло (рис. 3, в) має калібровані отвір для дозування потоку ЛКМ. Для фарбувальних ЛКМ різної в'язкості використовують сопла з отворами різного діаметра.

Фарбувальний пістолет має ряд важливих технічних та експлуатаційних характеристик:

- витрата рідкого фарбувального матеріалу в одиницю часу, мл/хв, показує продуктивність фарбувального пістолета. Зазвичай ця величина лежить в діапазоні від 100 до 300 мл/хв;

- витрата повітря в одиницю часу, л/хв, показує, наскільки потужний компресор потрібно для обслуговування даного фарбувального пістолета;

- діаметр сопла, мм – це параметр, що впливає на продуктивність пневматичного фарбувального пістолета і якість розпилення рідкого ЛФМ.

Системи пневматичного розпилення. Сучасні пневматичні фарбувальні пістолети, незалежно від конструктивних особливостей, розділяють на такі системи розпилення:

- НР (High Pressure – високий тиск). Пістолети цієї системи розпилюють ЛФМ при високому тиску на виході розпилюючої головки в діапазоні 0,12 – 0,15 МПа. Тиск повітря на вході фарбувального піс-



толета може мати діапазон від 0,25 до 0,5 МПа. Витрати повітря можна вважати досить низькими – від 100 до 300 л/хв. Переваги системи НР: широкий факел і велика швидкість нанесення ЛФМ забезпечують високу продуктивність фарбування. Недоліки системи НР: низький відсоток переносу ЛФМ і високе туманоутворення.

– HVLP (High Volume Low Pressure – висока продуктивність і низький тиск). Завдяки спеціальній конструкції повітряних каналів розпилення ЛФМ відбувається при низькому тиску на виході з сопла – 0,07 МПа і достатньо високому на вході від 0,25 до 0,3 МПа. За рахунок такої конституції розпилення перенос ЛФМ складає до 75%. На виході з сопла краплі ЛФМ мають невисоку швидкість, відповідно і менше утворення туману. Наносити матеріал таким фарбувальним пістолетом слід на невеликій відстані до 150 мм від поверхні, що фарбується. Переваги системи HVLP: високий процент переносу ЛФМ; низьке туманоутворення. Недоліки системи HVLP: високе споживання стисненого повітря (вище 360 л/хв.) вимагає потужного компресору з високою продуктивністю.

– LVLP (Low Volume Low Pressure – низька продуктивність і низький тиск). Являється компромісом між HVLP і НР. Тиск на виході з сопла 0,07 – 0,12 МПа, на вході 0,15 – 0,2 МПа. Дозволяє отримати високий до 90% перенос ЛФМ при відносно невеликій продуктивності компресору від 150 до 300 л/хв. Збільшення відстані від фарбувального пістолета до поверхні при нанесенні ЛФМ у зрівнянні з HVLP до 200 – 300 мм спрощує фарбування важкодоступних місць. Переваги системи LVLP: відносно низьке споживання повітря; високий перенос матеріалів на поверхню, що фарбується. На рис. 4 (а – в) представлено схему порівняння трьох систем розпилення по формі факела та коефіцієнту переносу ЛФМ.

На рис. 4, г показана схема утворення та руху факела ЛФМ. Повітряний потік, що виходить з розпилювальної головки 1 фарбувального пістолета, утворює зону змішування 2 з рідким ЛФМ, який поступає з центрального отвору сопла. Величину атомізації (розбивання) крапель фарби визначає тиск повітря. У середині факела 3 розмір крапель не змінюється. Чим більше розмір крапель, тим більшою енергією руху вони володіють, і при цьому зберігають напрям свого руху навіть при зміні напрямку повітряного потоку у поверхні, що фарбується 4. Якщо розмір крапель менше оптимального, то вони володіють наскільки малою енергією руху, що входять разом з повітрям в виді аерозольного туману 5.

Від розпилюючої голівки в значному ступені залежить ефективність і економічність застосування повітряного розпилення, а саме: продуктивність, втрати ЛФМ на туманоутворення, витрата стисненого повітря, форма факелу і розміри його відбитку. Витрати на туманоутворення різко зростають при підвищенні тиску повітря і переходу від круглої форми факела в плоску.

Для більшої наочності та простоти вибору фарбувального пістолета необхідної системи дотримуються єдиної схеми кольорового маркування, що наноситься на повітряну голівку і регулювальні гвинти фарбувального пістолета: білий (чорний) колір – система НР; зелений – система HVLP; синій – система LVLP.

Провідними світовими виробниками обладнання для пневматичного фарбування є фірми Graco (США), HVBAN (КНР), Wagner (Німеччина), Vezos (Велика Британія), Berizzi (Італія).

Незалежно від умов експлуатації існують обов'язкові вимоги, якими повинне володіти ЛФП для фарбування виробів АТ:

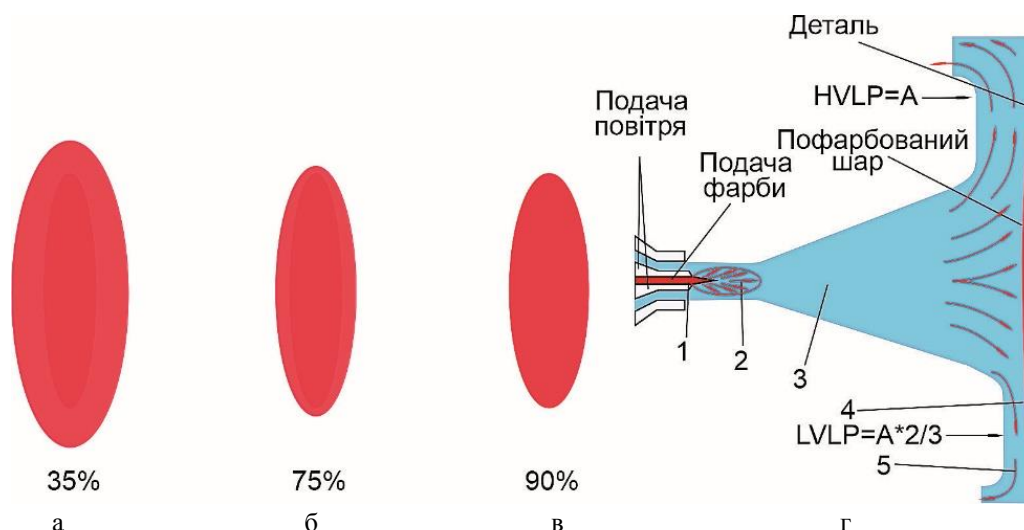


Рис. 4. Схема порівняння систем розпилення по формі факела та коефіцієнту переносу ЛФМ: а – НР; б – HVLP; в – LVLP; г – LVLP відносно HVLP

– адгезія – це виникнення механічного чи хімічного зв'язку між поверхневими шарами двох різнорідних тіл, наведених у зіткнення. Забезпечення гарної адгезії ЛФП до фарбованої поверхні виробів АТ дозволяє зберегти його захисні та декоративні властивості без відшаровування або лущення.

– твердість характеризує здатність ЛФП чинити опір місцевим деформаціям, зокрема втискування або проникненню в нього іншого тіла. Крім того, твердість характеризує стійкість плівки до руйнування при механічних впливах.

– еластичність – здатність шару ЛФП приймати свою попередню форму після зняття деформуючого зусилля. Еластичність забезпечує при знакозмінних навантаженнях вигин плівки ЛФП на поверхні літака або вертольота без утворення тріщин та руйнування.

– абразивостійкість характеризує стійкість плівки ЛФП до стирання. Цей показник особливо важливий для експлуатації виробів АТ на ґрунтових злітно-посадкових смугах або у спекотних країнах із піщаними бурями.

– хімічна стійкість – це стійкість плівки ЛФП до дії агресивних органічних реагентів, розчинників, мастил, палива.

– атмосферостійкість – здатність ЛФП протидіяти впливу атмосферних факторів (вологості, температури, повітря, сонячній радіації).

– термостійкість і морозостійкість – здатність ЛФП зберігати свій зовнішній вигляд і не руйнуватися під дією високих та низьких температур навколишнього середовища.

Системою ЛФП називається поєднання послідовно нанесених шарів ЛФМ різного призначення. Система ЛФП застосовується тому, що неможливо в одному ЛФМ поєднати різноманітні властивості, якими повинно володіти ЛФП [1, 6].

Технологія початкового і ремонтного фарбування. Стійкість повітряних суден (ПС) до впливу корозії прямо пов'язана з безпекою ПС та їх економічною ефективністю. Необхідність поставки вітчизня-

ної АТ за кордон викликала необхідність гармонізації галузевих стандартів з міжнародними стандартами якості [7].

Провідною світовою організацією в галузі експлуатації сучасної АТ є Європейське агентство безпеки авіації (англ. – European Aviation Safety Agency (EASA)). Згідно з вимогами EASA, підтримка льотної придатності ПС – це сукупність процесів, що забезпечують протягом терміну експлуатації відповідність ПС діючим вимогам до п'ятирічної придатності та її готовність до безпечного виконання польоту [5, 7].

Багатоповерхові драбини, настили та майданчики як допоміжне технологічне оснащення дозволяють дістатися будь-якої зовнішньої поверхні літаків та вертольотів при видаленні старого та нанесенні нового ЛФП (рис. 5).

На жаль, монтаж і демонтаж даних просторових технологічних майданчиків займає час, який порівняно або часто перевищує терміни виконання пневматичного фарбування зовнішньої поверхні сучасного пасажирського літака.

Документацію для фарбування ПС мають право розробляти тільки авіаційні організації, що мають спеціальний сертифікат EASA. Також існують певні стандарти нанесення службових написів та реєстраційних номерів на поверхню ПС.

Кольорографічна схема фарбування виробів АТ визначена конструкторською документацією, узгодженою з замовником. Для виготовлення трафаретів різних зображень та стандартних службових написів на борту літаків провідні авіаційні фірми застосовують широкоформатний струменевий плоттер моделі VersaCAMM VS-540 фірми Roland DG Corporation (Японія), який автоматично виконує багатобарвну роздруківку та контурний перетин зображень.

Для підвищення точності розташування трафаретів на зовнішній поверхні виробів АТ застосовують лазерну проекційну систему моделі CAD-PRO компанії LAP (Німеччина).

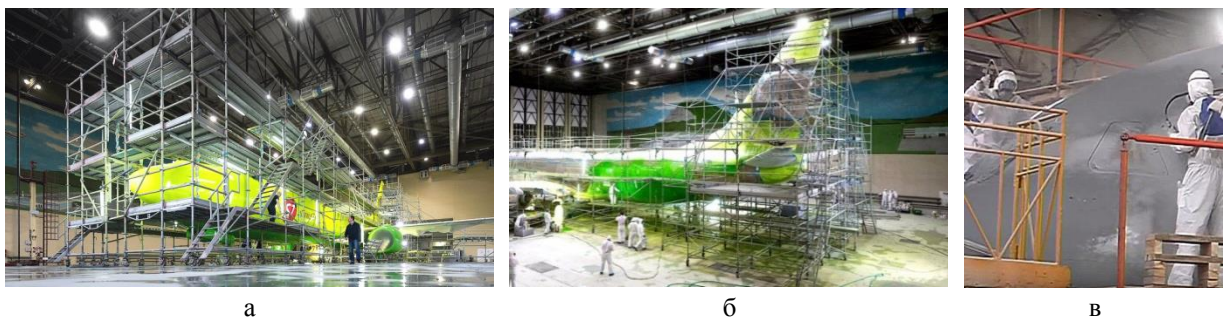


Рис. 5. Загальний вид допоміжного технологічного оснащення фарбувальних робіт пасажирського літака:  
 а – фюзеляжу та крила; б – кіля та хвостового оперення;  
 в – настилу із поручнями (ДП «АНТОНОВ»)

За допомогою проєціювання лазерних контурів проводять базування трафаретів. Початкове фарбування літаків та вертольотів виробляють на серійних авіаційних заводах, видалення старого ЛФП – на ремонтних авіапідприємствах. Кожні п'ять років при виконанні регламентних та ремонтних робіт або у разі ребрендингу виникають проблеми видалення старого ЛФП з поверхні ПС та їх ремонтного фарбування [8].

Літак або вертоліт готують до видалення старого ЛФП у спеціальному змивному цеху.

При видаленні старого ЛФП застосовують токсичні розчини, розчинники та інші шкідливі речовини, тому кожен працівник повинен мати засоби особистої захисту (комбінезон з капюшоном, рукавички, окуляри, респіратор).

Після герметизації всіх отворів та необхідних місць на зовнішню поверхню літака або вертольота наносять вручну за допомогою кисті або валика спеціальний органічний розчин із різким запахом – змивку. Цей дуже агресивний хімічний склад за лічені години роз'їдає старе ЛФП. Покриття спучується і відходить із зовнішньої поверхні виробу АТ клаптями та пластами (рис. 6, а).

Потім спучений шар ЛФП очищають спеціальними гумовими шпателями (рис. 6, б) і промивають поверхню струменями гарячої води.

Необхідно враховувати, що на кожний кілограм маси багатшарової системи ЛФП на зовнішній поверхні виробу АТ припадає приблизно дев'яти кілограмів старого вологого покриття, яке зруйноване змивним розчином об'ємом 150 літрів, а також 16 кубічних метрів гарячої води для одноразового чистового промивання поверхні [9].

Застосування рідких змивок як хімічного методу видалення покриттів набуло найбільшого поширення. Проте цей метод вимагає проведення додаткових операцій з очищення та знежирення обробленої поверхні, а також спеціальних заходів щодо знешкодження та утилізації відходів. Слід зазначити і екологічно несприятливі умови роботи із рідкими змив-

ками, що пов'язано з їх токсичністю та пожежонебезпечністю. Після видалення старого ЛФП (рис. 6, в) виробу АТ перекочують в малярський цех, обладнаний вентиляцією та освітленням у вибухозахищеному виконанні [9].

Повітря, що подається припливною вентиляцією, повинно бути ретельно очищене від пилу та інших забруднень. Витяжна вентиляція в малярному цеху повинна забезпечити відсмоктування лакофарбового пилу, пар розчинників і розріджувачів, щоб перешкодити осіданню лакофарбового пилу на поверхні, що фарбується, і утворенню вибухонебезпечної суміші. При пневматичному фарбуванні великогабаритних виробів АТ забруднене повітря відсмоктується через ґрати у підлозі цеху [1, 6]. Після видалення старого ЛФП слідує процес знежирення поверхні уайт-спіритом, після цього поверхню ґрунтують і шпаклюють.

Перед ґрунтуванням спеціальним папером або плівкою ретельно ізолюють усі поверхні, які не повинні бути пофарбовані. Потім за допомогою ручного пневматичного інструменту проводять шліфування зовнішньої поверхні літака або вертольота. Після шліфування поверхню повторно обробляють уайт-спіритом, щоб видалити маслянисті компоненти шпаклівки.

Для забезпечення якості нанесення та сушіння фарбування літака або вертольота роботи проводиться у малярському цеху серійного або ремонтного заводу цілодобово змінними бригадами. При кожному етапі фарбування зовнішньої поверхні виробу АТ одночасно працює до 20 малярів, щоб шари ґрунту і ЛФМ лягали і висихали одночасно на потрібній поверхні. Після закінчення всіх етапів фарбування на виріб АТ наносять шар глянцевого захисного лаку. Шар глянцевого лаку посилює атмосферостійкість та покращує декоративне сприйняття фірмового забарвлення пасажирського літака. Лакове покриття також стійке до ультрафіолетового випромінювання сонячної радіації і впливу протизамерзаючої рідини.



а



б



в

Рис. 6. Загальний вигляд: а – старого ЛФП після дії розчину змивки; б – процесу видалення старого ЛФП вручну гумовим шпателем; в – літака Ан-124 «Руслан» після видалення старого ЛФП та промивання



Обсяг ЛФП та вартість фарбувальних робіт залежать від розміру літака та складності кольорографічної схеми фарбування. Наприклад, на фарбування середньомагістрального пасажирського літака Boeing-737 йде до 500 літрів ЛФМ, Boeing-747 – до 450 літрів, Boeing-767 – до 340 літрів, найбільшого у світі пасажирського літака Airbus A-380 – до 3600 літрів [7]. Товщина системи ЛФП після пневматичного нанесення та сушіння при використанні сучасних поліуретанових ЛФМ не перевищує 0,2 мм; важить така система, наприклад, на пасажирському літаку Boeing-737 близько 115 кг, Airbus A-380 – близько 600 кг. На фарбування зовнішньої поверхні площею 4400 м<sup>2</sup> літака Airbus A-380 йде від 14 до 20 днів [7]. Фарбування одного пасажирського літака коштує від 50 до 200 тисяч доларів залежно від складності кольорографічної схеми фарбування [7].

## 2. Аналіз напрямків удосконалення технології пневматичного фарбування

Ключові тенденції розробки нових індустриальних ЛКМ спрямовані на зменшення шкідливого впливу на організм малярів та екологію, підвищення ефективності нанесення ЛФМ та експлуатації ЛКП. Одним з напрямків використання ЛФМ є захист навколишнього середовища з урахуванням нових законодавств, таких як REACH у Європі та директив з контролю викидів розчинників та небезпечних речовин у промислово-розвинених країнах. REACH (англ. Registration, Evaluation and Authorisation of Chemicals) є регламентом країн Європейського союзу про хімічні речовини та їх безпечно використання [7].

Метод пневматичного фарбування виробів АТ має певні недоліки: утворення аерозольного туману з ЛФМ, значні витрати ЛФМ при розпиленні, велика втрата розчинників. Для оздоровлення атмосфери повітря у процесі нанесення ЛФМ потрібно також застосовувати високопродуктивні фільтровентиляційні установки.

Нижче розглянуто основні напрямки удосконалення технології, обладнання та оснащення пневматичного фарбування сучасних виробів АТ.

Електростатичне пневматичне фарбування. Принцип електростатичного пневматичного фарбування (рис. 7, а) спрощено полягає в наступному: при розпиленні рідкий ЛФМ стикається з електродом, яким обладнаний кожен електростатичний фарборозпилювач, і отримує негативний заряд величиною від 60 до 100 кВ.

Початкове прискорення частинок ЛФМ відбувається за рахунок впливу на матеріал потоку стисненого повітря. Після розпилення аерозольний ЛФМ спрямовано рухається до заземленого виробу, що фарбується, по силових лініях електростатичного поля, яке виникає між фарборозпилювачем і поверхнею виробу. Для наочності на схемі електростатичного фарбувального пістолета (див. рис. 7, а) кольором виділені канали надходження стиснутого повітря (синій), рідкого ЛФМ (червоний) та високої напруги (жовтий).

На рис. 7, б показаний загальний вигляд електростатичного пістолета для нанесення рідких ЛФМ моделі ProXp60 фірми Graco (США), на рис. 7, в – приклад електростатичного пневматичного фарбування фюзеляжу пасажирського літака.

До складу установки для електростатичного фарбування входять фарборозпилювач, джерело високої напруги, повітряний та фарбувальний шланги, кабель живлення, кабелі заземлення, фарбонагнітальний бак у вибухозахищеному виконанні для подачі ЛФМ на фарборозпилювач. Наявність у системі електричного струму високої напруги зобов'язує суворо дотримуватись правил техніки безпеки та ретельно заземлювати основні елементи установки.

При фарбуванні великогабаритних виробів АТ замість стаціонарного джерела високої напруги використовують пневматичний генератор електричного струму постійної напруги, який забезпечує автономну роботу фарбувального пістолета.

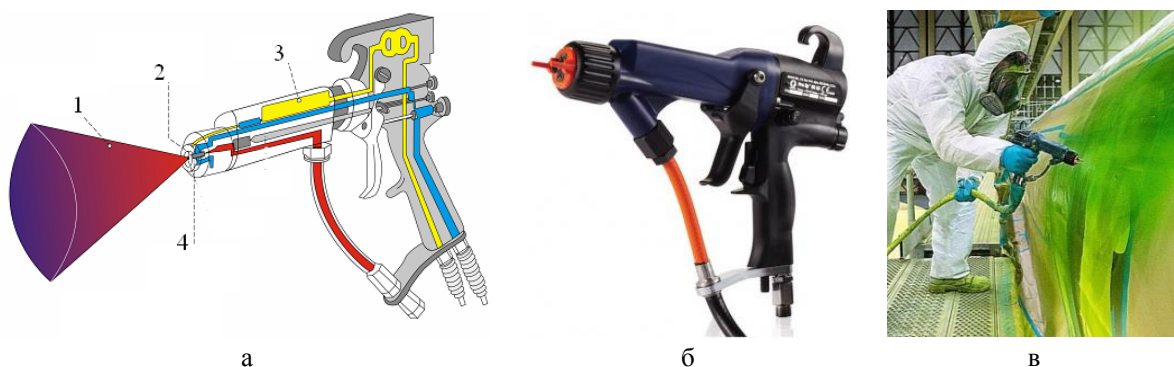


Рис. 7. Схема (а), загальний вигляд (б) та приклад використання (в) електростатичного фарбувального пістолета: 1 – факел ЛФМ; 2 – електрод; 3 – блок високої напруги; 4 – розпилювальна головка



Слід враховувати, що електростатичне пневматичне фарбування неелектропровідних панелей та обшивок з полімерних композиційних матеріалів (ПКМ) на планері літака або вертольота призводить до збільшення витрати ЛФМ та утворення аерозольного туману на рівні звичайного пневматичного фарбування (див. рис. 4).

Цю обставину необхідно враховувати при нормуванні витрат ЛФМ та розчинників для електростатичного фарбування сучасних виробів АТ.

Розробка нових ЛФМ. На пневматичне фарбування близькомагістрального пасажирського літака на 75-80 пасажирів типу Ан-148 витрачається від 800 до 900 кг ЛФМ у вигляді ґрунтовок, емалей, суміші розчинників, пігментів та затверджувача. У процесі пневматичного фарбування відбувається випаровування суміші розчинників, висихання та утворення твердої еластичної плівки ЛФП на поверхні літака. По завершенні фарбування сухий залишок у вигляді плівки ЛФП на поверхні літака становить близько 140 кг. У нових розробках провідних світових хімічних фірм домінують ЛФМ зі зменшенням вмісту летких органічних сполук на 30-40% та збільшеною величиною покривності. Покривність є одним з найважливіших технологічних показників ЛКМ, вона характеризує витрати пігментованих ЛФМ на один квадратний метр поверхні, що фарбується. Нові ЛФМ з високою покривністю забезпечують надійний антикорозійний захист та зменшення маси ЛФП на поверхні літака або вертольота в два-три рази [7]. У нових розробках також проводиться заміна ґрунтовки, що містить токсичний шестивалентний хром, на безхроматну ґрунтовку з такими ж високими антикорозійними властивостями ЛФП [7].

На жаль, хімічний метод видалення старого ЛФП в даний час є єдиним на авіаційних підприємствах провідних світових виробників літаків та вертольотів. Кожен з відомих механічних (пневмоабразивні та видалення покриттів льодовими гранулами) і термічних (плазмовий і лазерний) методів видалення старого ЛФП не забезпечує збереження анодованого шару на алюмінієвих обшивках сучасних виробів АТ [9].

Змивки старого ЛФП на основі кислот і лугів розглядають як хімічно агресивні середовища, а змивки на основі органічних розчинників – як фізично агресивними. З погляду екології існує проблема подальшої утилізації використаних матеріалів змивки та власне клаптів та пластів старого ЛФП. У світовій практиці спостерігається тенденція до підвищення вимог щодо зниження шкідливого впливу на довкілля та здоров'я людини, у зв'язку з чим здійснюється пошук більш екологічно сприятливих способів видалення старого ЛФП. Для декоративних ЛФП,

якими фарбують салон пасажирського літака зсередини, особливо важливий допустимий рівень димоутворення, горючості та тепловиділення [6, 7].

Хімічна компанія AkzoNobel (Голландія) розробила принципово нову систему ЛФП на водній основі для пневматичного фарбування салонів пасажирських літаків. Система ЛФМ під фірмовою назвою «Aero Wave» включає екологічно чисті компоненти: ґрунтовку з інгібітором корозії, ґрунтовку для ПКМ, покривний ЛФМ.

Система водних ЛФМ «Aero Wave» має спеціальний сертифікат EASA та використовується для пневматичного фарбування салонів пасажирських літаків провідними світовими авіаційними фірмами Boeing (США), Bombardier (Канада), Gulfstream (США). Хімічний концерн Mapego (Франція) розробив та освоїв серійне виробництво водної ґрунтівки Deft, одним із споживачів якої є авіаційна фірма Airbus. Істотним недоліком даних сучасних систем ЛФП на водній основі є їх невисока атмосферостійкість, особливо при впливі підвищеної вологості та сонячної радіації ультрафіолетового спектру випромінювання [7].

Стельові краново-телескопічні платформи. Це обладнання є одним з сучасних засобів технологічного оснащення (ЗТО) для пневматичного фарбування сучасних виробів АТ.

Галузевий стандарт має на увазі під ЗТО сукупність засобів, необхідних для здійснення технологічного процесу: устаткування, пристрої та інструмент, а також засоби механізації й автоматизації виробничих процесів.

Стельові краново-телескопічні платформи компаній STI Systems, Demag (Німеччина) та Klivlend (США) використовують для мобільного забезпечення фронту робіт з видалення старого ЛФП та пневматичного фарбування сучасних великогабаритних виробів АТ (рис. 8).

Кількість телескопічних платформ для базового і ремонтного пневматичного фарбування може варіюватися від чотирьох (звичайні пасажирські літаки) до восьми (аеробуси типу А-380 і важкі транспортні літаки типу Ан-124).

Кожна краново-телескопічна платформа розміром 7500 x 4000 мм може переміщатися відносно корпусу літака за трьома лінійними координатами і повертатися навколо вертикальної осі під зручним кутом до місця пневматичного фарбування. Бригада малярів може бути оперативно доставлена до всіх важкодоступних місць на кілі та верхніх і бокових поверхнях літака. На кожній телескопічній платформі розташовані пульт дистанційного управління та автономна пневматична фарборозпилювальна установка.



Рис. 8. Приклади застосування стельових краново-телескопічних платформ:

- а – загальний вигляд розміщення; б – ґрунтування фюзеляжу; в – нанесення захисного лаку на кіля;  
 г – нанесення фірмової символіки за допомогою трафаретів; д – фарбування крила;  
 е – фарбування фюзеляжу; ж – зняття захисного паперу з кіля

Телескопічні платформи обладнані автоматичною системою захисту від зіткнень один з одним та корпусом літака. Все оснащення краново-телескопічних платформ виконано у пило- та вибухобезпечному виконанні.

Дане сучасне технологічне оснащення оперативно забезпечує широкий фронт різноманітних робіт одночасно для кількох бригад малярів та скорочує час пневматичного фарбування пасажирських літаків у два-три рази [8, 10].

Фарбувальні та сервісні центри. Останнім часом з'явилися спеціалізовані центри для пневматичного фарбування та технічного обслуговування великогабаритної АТ, що використовують сучасне технологічне обладнання, у тому числі стельові краново-телескопічні платформи. Центри сертифіковані на фарбування та послуги з технічного обслуговування, ремонту металевих та композитних конструкцій сучасних ПС. Малярний цех має розміри 120х60х30 метрів, для одночасного фарбування двох пасажирських літаків передбачена рухома штора, яка поділяє цех на дві технологічні фарбувальні зони.

В даний час таких фарбувальних та сервісних центрів з технічного обслуговування великогабаритних літаків компаній Boeing та Airbus у всьому світі налічується всього сім. З кінця 2020 року в аеропорту м. Каунас (Литва) розпочалося будівництво фарбувального та сервісного центру. Цей проект є подальшим етапом робіт з удосконалення технічного обслу-

говування та ремонту сучасних літаків, що виконуються в Литві.

Відновлення зруйнованої війною економіки України неможливо без переходу авіаційної промисловості країни на принципово новий світовий рівень. Одне з провідних авіаремонтних підприємств України ДП «Завод 410 цивільної авіації» (м. Жуляни) здійснює ремонт, технічне обслуговування та модернізацію літаків і вертольотів. У лютого 2019 року завод почав надавати послуги з ремонту та технічного обслуговування літаків компанії Boeing, у планах підприємства передбачено обслуговування п'яти літаків Boeing-737 на рік та збільшити обсяг робіт до 2024 року до 40 літаків на рік [8, 10]. Дане авіаремонтне підприємство може стати базою для створення сучасного фарбувального та сервісного центру в Україні.

Роботизація фарбувальних робіт. Роботизація пневматичного фарбування пов'язана з розробкою системи маніпулюючих механізмів, які заміщують руку маляра при здійсненні нею координованих рухів і порівнюючих дій, необхідних для виконання пневматичного фарбування. Першоджерелом автоматизації даних координованих рухів стає повний електронний опис (ПЕО) виробу АТ, елементом якого є кольорографічна схема фарбування зовнішньої поверхні.

Серійний промисловий робот для пневматичного фарбування моделі KR-AGS фірми KUKA (Ні-

меччина) протягом багатьох років добре зарекомендував себе при автоматичному фарбуванні автотранспортної техніки. Антропоморфне компонування, можливість стаціонарного розташування на підлозі, збоку на стіні або в перевернутому положенні на стелі забезпечує автоматичне фарбування будь-яких важкодоступних зон на поверхні виробів АТ.

Фарбувальна головка (рис. 9, а) має централізоване підведення рідкого ґрунту, фарби або лаку, стиснутого повітря та уніфіковане посадкове місце для встановлення на малярський робот моделі KR-AGS фірми KUKA [11].

Ґрунтування листових обшивок виконується у спеціальній фарбувальній камері одночасно двома роботами фірми KUKA у спеціальному пілозахисному виконанні при поступальному переміщенні обшивки на стельовому рольгангу (рис. 9, б). Блок струменевого друку компанії XYREC (Нідерланди), розташований на роботі, здатний завдати на зовнішню поверхню літака кольоровий малюнок (рис. 9, в). Попередньо робот наносить ґрунтовку та необхідну кількість шарів ЛФМ, висушує їх, після чого за один робочий хід друкує фрагмент заданого малюнку завдовжки дев'ять та шириною 0,45 метрів. Під час струменевого друку робот здатний повертати друкуючий блок у відповідності з геометрією зовнішньої поверхні на основі ПЕО виробу АТ [11].

Розміри робочого простору для автоматичного фарбування виробів АТ на базі робота моделі KR-AGS фірми KUKA збільшують за рахунок стикування лінійних модульних блоків з кроковими двигунами (рис. 9, г).

### 3. Аналіз технологічних особливостей лазерного видалення старого ЛФП

Мета видалення багатошарового старого ЛФП – це підготовка зовнішніх поверхонь літаків і вертольотів до технічного діагностування, ремонту, виконання операцій відновлення зовнішнього вигляду та захисту від корозії [6, 9]. Жорсткі вимоги до технології видалення старого ЛФП із зовнішньої поверхні виробів АТ регламентовані міжнародним галузевим стандартом MA4872A «Зняття фарби з комерційних літаків – оцінка матеріалів та процесів» [12]. Ефективною інноваційною альтернативою найпоширенішим в даний час методам абразивного або хіміко-механічного очищення зовнішньої поверхні виробів АТ під час ремонту може бути технологія лазерного видалення старого ЛФП [9, 13, 14].

Для ремонтного фарбування виробів АТ технологія лазерного очищення повинна забезпечити можливість ручного або автоматичного видалення старого багатошарового ЛФП з протяжних поверхонь подвійної кривизни, елементів кріплення, а також стиків листів обшивки з високою продуктивністю без термічного пошкодження анодної плівки на обшивці з алюмінієвих сплавів [12].

Кожен із компонентів системи ЛФП (емалі, ґрунтовки, шпаклівки) має індивідуальний хімічний склад, відбивну та поглинальну здатність, що істотно впливає на підбір технологічних режимів.

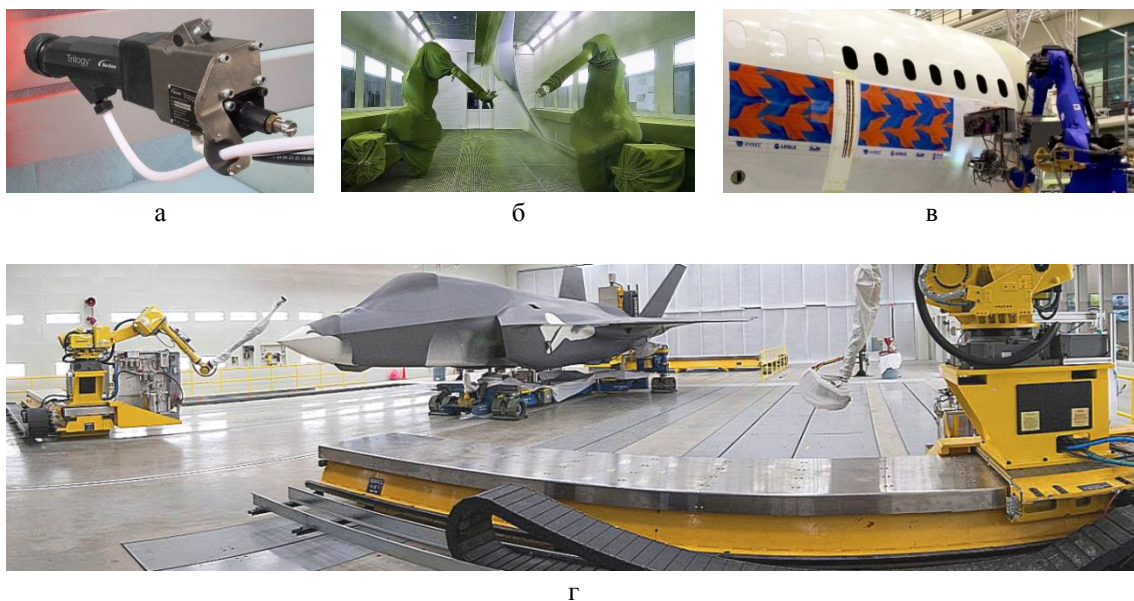


Рис. 9. Роботизація фарбування виробів АТ:

а – фарбувальна головка; б – ґрунтування листової обшивки;  
в – струменевий друк фірмової символіки; г – загальний вигляд роботизованого фарбувального цеху



Принцип лазерного очищення заснований на поглинанні потоку високоенергетичного лазерного випромінювання органічним ЛФП, в результаті якого відбувається термічне випаровування (режим абляції) або руйнування хімічних зв'язків молекулярних радикалів (режим десорбції) багат шарового старого ЛФП з поверхні [9, 12].

Лазерна абляція старого ЛФП. Найбільш підходящими для технології лазерної очистки обшивок виробів АТ методом абляції є газові  $\text{CO}_2$ -лазери (довжина хвилі випромінювання 10600 нм), оптоволоконні лазери (довжина хвилі випромінювання 1060 нм) та твердотільні лазери на ітрії-алюмінієвому гранаті Nd:YAG (довжина хвилі випромінювання 1060 нм).

Для кожного типу ЛФП параметри процесу видалення та вибір типу лазера можуть бути визначені шляхом теоретичних та експериментальних досліджень. Наприклад, принциповим недоліком оптоволоконних лазерів є висока чутливість до відбитого променя, тому даний тип лазера ефективний для лазерної абляції ґрунтовок і матових покриттів, але не білої глянсової фарби.

Для анодної плівки на обшивці з алюмінієвих сплавів поглинання інфрачервоного довгохвильового випромінювання  $\text{CO}_2$ -лазера з довжиною хвилі 10600 нм становить 2%, а для шарів органічного ЛФП – приблизно 92%. Для інфрачервоного випромінювання лазерів з довжиною хвилі 1060 нм ці показники становлять 4% і 31% відповідно [15]. Випаровування або відразу сублімація органічних матеріалів старого ЛФП у режимі абляції при швидкості переміщення високочастотного теплового поля до 3 м/хв забезпечують високу продуктивність технології лазерного очищення.

Необхідність забезпечення точного фокусування в процесі об'ємного сканування за поверхнею обшивки подвійної кривизни суттєво ускладнює моделювання процесу взаємодії у режимі абляції імпульсного лазерного випромінювання з ЛФП без термічного пошкодження анодної плівки на алюмінієвій обшивці [16].

В даний час вже розроблено експериментальне обладнання порталного компонування з ЧПК для видалення старого ЛФП з поверхні окремих металевих конструктивних елементів літака простої форми. Прикладом може бути автоматизоване лазерне очищення старого ЛФП на знімній панелі транспортного літака С-5М Galaxy за допомогою імпульсного волоконного лазера моделі YLP фірми Clean Laser (Німеччина) [15].

Випромінювач лазера поміщений у кожух з вузлами юстування та навішування на портал верстата з ЧПК, розташування панелі – вертикальне (рис. 10, а). Довжина хвилі випромінювання даного імпульсного волоконного лазера становить 1060 нм, номінальна вихідна потужність – 20 Вт, тривалість імпульсу – 120 нс, частота повторення імпульсів – 20...80 кГц, діаметр сфокусованого променя – 50...500 мкм, маса – 5 кг [13].

Вбудована оптична скануюча та фокусуєча система моделі IPGP 2D High Scanner (рис. 10, б) забезпечує високочастотну двокоординатну розгортку лазерного променя в прямокутне імпульсне теплове поле розміром 80x20 мм, переміщення якого програмується на основі ПЕО виробу АТ.

Газоподібні продукти абляції багат шарового старого ЛФП видаляються безпосередньо із зони термічного впливу за допомогою прямокутного розтрубу (див. рис. 10, б), який розташований в обтічнику над скануючою та фокусуєчою системою, та вбудованого в торець корпусу випромінювача гнучкого трубопроводу (рис. 10, в).

Технологічними параметрами процесу лазерного видалення старого багат шарового ЛФП за інших незмінних умов (склад, теплопровідність та товщина шарів ЛФП; кривизна зовнішньої поверхні виробів АТ) є частота модуляції і швидкість переміщення лазерного теплового поля. Невелика маса випромінювача та безконтактний характер процесу лазерної абляції спрощують управління просторовим положенням лазерного променя та розширюють технологічні можливості даного методу видалення ЛФП. На жаль, використання сфокусованого імпульсного лазерного випромінювання в режимі абляції

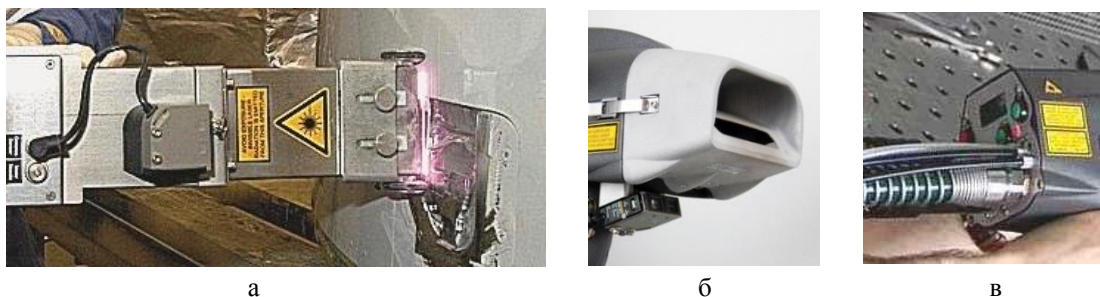


Рис. 10. Загальний вигляд: а – випромінювача лазера моделі YLP та панелі, що очищається, на порталному верстаті з ЧПК; б – оптичної системи та витяжного розтрубу; в – трубопроводу витяжної вентиляції

вимагає дуже точного витримання допустимих відхилень розфокусування лазерного променя [9, 14].

На поверхні анодованої плівки після впливу сфокусованого лазерного випромінювання можливе формування характерної для режиму абляції періодичної структури із локальними термічними деформаціями [9, 14]. У процесі очищення протяжної листової алюмінієвої обшивки товщиною 0,7 мм була зареєстрована залишкова деформація в межах до 320 мкм/м, що неприпустимо для тонколистових металевих конструкцій сучасних літаків і вертольотів [12].

Для обшивок та обтічників із ПКМ складної форми відхилення від розфокусування лазерного лучу може призвести до локальної абляції епоксидної смоли як одного зі складових компонентів ПКМ разом із шарами старої системи ЛФП, теплопровідність яких має близькі значення [16].

Лазерна десорбція старого ЛФП. На відміну від лазерної абляції для методу лазерної десорбції органічного ЛФП використовують несфокусоване інфрачервоне лазерне випромінювання з дуже короткою тривалістю імпульсу (приблизно на два порядки меншою порівняно з тривалістю імпульсу для лазерної абляції). Даний метод дозволяє суттєво спростити управління переміщенням лазерного випромінювання по оброблюваній поверхні великої площі. Сучасні наукові та прикладні дослідження спрямовані на вивчення особливостей взаємодії короткоімпульсного лазерного випромінювання з органічними речовинами різної структури. У статті [17] наведено огляд публікацій щодо дослідження механізму видалення шарів старого ЛФП методом лазерної десорбції, при якому руйнування хімічних зв'язків в органічних компонентах після поглинання лазерного потоку призводить до відшаровування та лущення шарів старого ЛФП фрагментами розміром до 8 мм.

Обертання багатогранного дзеркального барабана забезпечує розгортку несфокусованого лазерного променя у віялоподібний потік електромагнітної енергії періодичної дії. Таке рішення забезпечує створення зони лазерної обробки завширшки від 50 до 100 мм без суворого витримання відстані до шарів ЛФП, що видаляються.

Продукти розпаду старого ЛФП у вигляді лущиння видаляються безпосередньо із зони лазерної обробки за допомогою прямокутного розтрубу та гнучкого трубопроводу. У порівнянні з хімічним методом видалення шарів старого ЛФП за допомогою змивок, у процесі лазерного очищення утворюється на порядок менша кількість твердих і легко утилізованих відходів.

Промислові твердотільні лазери з потужністю випромінювання 500 та 1000 Вт забезпечують високу продуктивність видалення старого ЛФП у діапазоні від 10 до 20 м<sup>2</sup>/год [13, 15, 18]. Даний метод дозволяє суттєво спростити управління переміщенням лазерного випромінювання оброблюваної поверхні великої площі.

Показаний загальний вигляд твердотільного лазера (рис. 11, а) моделі Q-smart 500 фірми Lumibird (Франція) з наступними характеристиками: довжина хвилі – 1060 нм; потужність випромінювання – 500 Вт; частота повторення імпульсів – 10 кГц; тривалість імпульсу – 1 нс; діаметр променя – 10 мм, оптимальна ширина зони лазерної обробки – 80 мм; маса – 4 кг.

Невеликі розміри та маса випромінювачів сучасних твердотільних лазерів забезпечують можливість легкої установки на посадкове місце робота (рис. 11, б), а також застосовувати у мобільному ранцевому виконанні (рис. 11, в).

Особливості лазерного очищення обшивок з ПКМ вивчають на базі знімних панелей фюзеляжу конвертоплану Bell Boeing V-22 [13]. Також ведуться наукові та прикладні дослідження з лазерного очищення композитних лопатей вертольотів Boeing AH-64 і Sikorsky UH-60 [13]. Лазерна система у ранцевому виконанні була успішно випробувана для видалення герметика з паливних баків штурмовика Fairchild Republic A-10 [13].

Роботизовані стенди для лазерного видалення старого ЛФП. Висока продуктивність та безконтактний характер впливу, відсутність токсичних витратних матеріалів, досяжний рівень екологічної безпеки та можливість автоматизації процесу при дистанційному контролі якості обробки в реальному масштабі

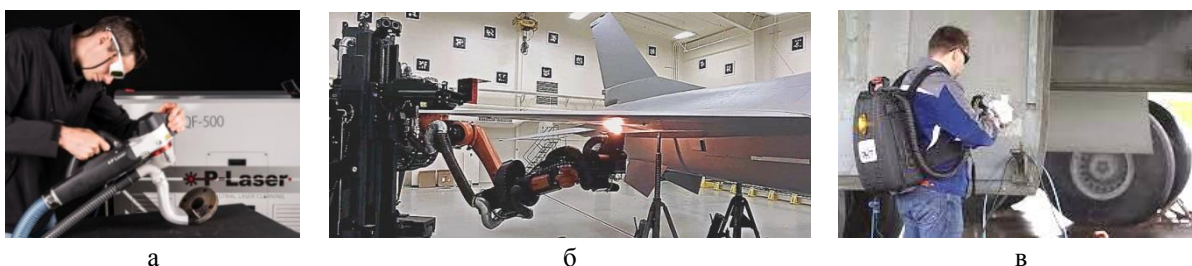


Рис. 11. Загальний вигляд лазера моделі Q-smart 500 для видалення старого ЛФП: а – вручну; б – на промисловому роботі-маніпуляторі моделі KR-30HA фірми KUKA; в – у мобільному ранцевому виконанні

часу визначають великі потенційні можливості технології лазерного очищення зовнішніх поверхонь сучасних виробів АТ.

Істотні вимоги пред'являлися до економічної доцільності використання технології лазерного видалення старого ЛФП із зовнішньої поверхні літаків та вертольотів. Розрахунки показують, що показники ефективності технології лазерного видалення старого ЛФП (висока продуктивність, низька трудомісткість, багаторазове зменшення витрат на утилізацію сухих та газоподібних продуктів розпаду ЛФП, дотримання норм охорони праці та екології, значно менша кількість виконавців) у сумі можуть забезпечити перевищення рівня рентабельності порівняно із існуючими технологіями абразивного та хіміко-механічного видалення старого багатшарового ЛФП [13, 16].

В останні роки активно ведуться наукові та прикладні роботи зі створення роботизованих стендів для лазерного видалення старого багатшарового ЛФП із зовнішньої поверхні виробів АТ без розстикування планера на агрегати.

Як реальні типові об'єкти для вивчення особливостей лазерного видалення старого ЛФП і накопичення виробничого досвіду протягом останніх років використовуються фюзеляжі винищувачів General Dynamics F-16 і McDonnell Douglas F-15, а також військово-транспортного літака Lockheed C-130 [13]. Комп'ютерні моделі компоновання роботизованих стендів для видалення старого ЛФП показані на рис. 12, а (для винищувача F-16 – зверху, для військово-транспортного літака C-130 – знизу).

Стенди мають уніфіковані модулі розташування робота антропоморфного компоновання фірми KUKA із блоком лазерного випромінювача консольно-стійкового типу (рис. 12, б, верхній – для винищувача F-16) або радіально-стійкового типу (рис. 12, б, нижній – для винищувача F-15). На рис. 12, в показані приклади лазерного видалення старого ЛФП з поверхонь крила винищувача F-16 (верхній) та фюзеляжу військово-транспортного літака C-130 (нижній).

Попередньо виконують ув'язування реперних точок на планері виробу АТ із системою координат робота за допомогою лазерного трекера і цільових знаків у вигляді спеціальних штрих-кодів на вертикальних панелях (див. рис. 12, в).

Компоновання та розміри робочого простору даних роботизованих стендів забезпечують вільний підхід до зовнішньої поверхні з усіх боків для всього переліку сучасних винищувачів, вертольотів, пасажирських та транспортних літаків середнього класу, а одночасна синхронна робота всіх роботизованих стендів – високу продуктивність.

Досвідчене лазерне очищення зовнішньої поверхні даних літаків без розстикування на агрегати за допомогою роботизованих стендів показало високу продуктивність, наприклад, час видалення старого ЛФП зменшився з семи до трьох днів для винищувача F-16 та з десяти до п'яти днів – для транспортного літака C-130 [13]. Основний час лазерного видалення старого ЛФП з композитної лопаті несучого гвинта вертольота Sikorsky UH-60 склав шість годин, тоді як стандартний метод очищення займає 24 години [13].

Платформа кожного стенду має вбудовані колеса для перекочування по підлозі та гідравлічні упори. Вартість роботизованих стендів для лазерного видалення старого ЛФП залежно від компоновання та розмірів робочого простору становить від 400 000 до 500 000 доларів США [13].



Рис. 12. Комп'ютерні моделі компоновання (а), загальний вигляд (б) та приклади застосування (в) роботизованих стендів для лазерного видалення старого ЛФП із зовнішньої поверхні літаків



Значна кількість наукових і прикладних досліджень в останні роки спрямована на вивчення механізму лазерного видалення шарів глянсових білих ЛФП та прозорих лаків [16, 17, 19]. Білі фарби мають високу відбивну здатність, а прозорі лаки з низьким вмістом твердої речовини – високу пропускну здатність. Вкрай важливою є завдання відпрацювання серійної технології лазерного видалення старого ЛФП із зовнішньої поверхні обшивок з ПКМ сучасних виробів АТ [16].

Мобільні платформи для лазерного видалення старого ЛФП. Відпрацювання технології на роботизованих лазерних стендах показало, що переустановка стендів та повторне ув'язування системи координат кожного стенду з реперними точками на зовнішній поверхні виробу АТ займає чимало допоміжного часу.

Фірма KUKA (Німеччина) розробила серію мобільних платформ різної вантажопідйомності на основі запатентованого колеса Mecanum. Колесо приводиться в рух автономним електричним двигуном, складається з двох обводів та вільноходових бочкоподібних гумових роликів, які встановлені під кутом 45 градусів (рис. 13, а). Колеса можуть рухатися незалежно одне від одного, що забезпечує мобільне переміщення платформи вздовж та впоперек, по діагоналі та колу в найтісніших місцях з точністю +/- 5 мм [13].

На рис. 13, б показано виставкову презентацію чотириосьової мобільної платформи для лазерного видалення старого ЛФП на базі робота моделі KR-30NA фірми KUKA. Акумуляторний блок забезпечує автономну роботу мобільної платформи без підзарядки протягом восьми годин.

Двохосьова мобільна роботизована платформа з похилою напрямляючою станиною та роботом моделі KR-30NA (рис. 13, в) забезпечує підведення лазерного випромінювача до віддаленим нижнім поверхням крила і фюзеляжу.

Мобільні роботизовані платформи обладнані телекамерами та автоматичною системою захисту від зіткнень один з одним та корпусом літака.

Стійкове компонування на базі антропоморфного робота фірми KUKA з нерухомим розташуванням необхідної кількості лазерних стендів (див. рис. 12, б) має обмеження за розмірами загального робочого простору.

Сучасні пасажирські літаки-аеробуси мають величезні розміри (наприклад, довжина найбільшого у світі пасажирського літака Airbus A-380 становить 73 м, висота – 24,1 м) і вимагають принципово нових компонувальних та технологічних рішень для вископродуктивного лазерного видалення багатошарового старого ЛФП.

Компанія XYREC (Нідерланди) створила найбільшу у світі мобільну роботизовану платформу для лазерного видалення старого ЛФП важливо-стійкового компонування (рис. 14, а). Чотирихосьова мобільна платформа масою 45 тонн несе вертикальну раму висотою 15 метрів з поворотною кареткою та висувною консоллю довжиною дев'ять метрів. На платформі встановлено газовий CO<sub>2</sub>-лазер фірми TRUMPF (Німеччина) потужністю 20 кВт безперервного випромінювання із довжиною хвилі 10600 нм. Дана довжина хвилі випромінювання є найбільш оптимальною для поглинання органічним матеріалом ЛФП при високому рівні відбиття від анодної плівки та ПКМ на обшивках сучасних виробів АТ [16].

Рама з напрямними для поворотної каретки з висувною консоллю встановлена на платформі і може повертатись навколо вертикальної осі на 360°, висувна консоль – на кут +/- 200°. Потік безперервного лазерного випромінювання проходить від випромінювача до оптичного модуля через систему з восьми нерухомих металевих полірованих дзеркал всередині рами та консолі.

Оптичний модуль (рис. 14, б) включає в себе два поворотних дзеркала для зміни просторового положення променя і багатогранний барабан для розгортання променя у віялоподібну площину та його сканування зі швидкістю 45 м/с. Тут також розташована вакуумна система видалення рідких та газоподібних продуктів розпаду старого ЛФП.



Рис. 13. Загальний вигляд: а – платформи с колесами Mecanum;

б – чотириосьової роботизованої мобільної платформи;

в – двоосьової роботизованої мобільної платформи з похилою напрямляючою станиною

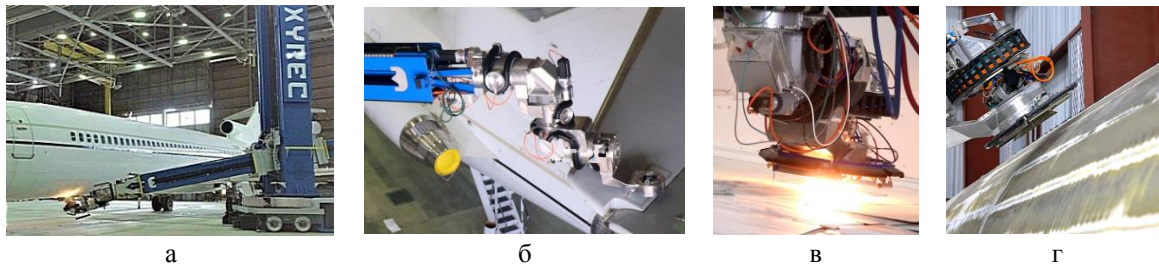


Рис. 14. Загальний вигляд: а – мобільної платформи; б – оптичного модуля з поворотними дзеркалами; в – процесу лазерної абляції; г – фрагмента обшивки фюзеляжу з очищеними від ЛФП ділянками

Оптимальна відстань від торця оптичного модуля до поверхні літака становить 200 мм, на тому відстані ширина лінії розгортки лазерного променя дорівнює 300 мм (рис. 14, в). Оптимальна швидкість переміщення лазерної віялоподібної площини в діапазоні від 0,1 до 0,2 м/с забезпечує дуже високу продуктивність процесу лазерного очищення в діапазоні від 100 до 200 м<sup>2</sup>/год.

Результат первісної рядкової лазерної обробки зовнішньої поверхні фюзеляжу літака без перекриття ділянок показано на рис. 14, г.

Мобільна платформа має телевізійну систему розпізнавання кольорів і управління лінійними та кутовими переміщеннями безперервного потоку лазерного випромінювання, що дозволяє дуже точно видаляти багаточислове старе ЛФП як з металевих, так і з композитних зовнішніх поверхонь великогабаритних виробів АТ.

Дана розробка компанії XYREC була визнана авторитетним науково-технічним журналом «Research & Development World» однією з найбільш значущих інновацій 2021 року [13].

Розрахунки [13] показують, що технологія лазерного видалення старого ЛФП може окупили виробничі витрати протягом п'яти років завдяки зниженню витрат на закупівлю та утилізацію небезпечних витратних матеріалів, а також перевагам швидшого часу виконання робіт та зменшення небезпеки для навколишнього середовища.

## Висновки

1. Багаторічний світовий досвід експлуатації виробів АТ показує, що повністю виключити корозію авіаційних матеріалів неможливо.

2. Ключові тенденції розробки та застосування нових індустріальних ЛФМ спрямовані на зменшення шкідливого впливу на організм малярів та екологію, підвищення ефективності нанесення ЛФМ та експлуатації багаточислових ЛФП.

3. Метод електростатичного пневматичного фарбування неелектропровідних панелей з ПКМ на планері виробів АТ не вирішує проблему зменшення обсягу аерозольного туману з ЛФМ.

4. Сучасні нешкідливі та екологічно чисті системи ЛФП на водній основі мають невисоку атмосферостійкість та не можуть застосовуватися для фарбування зовнішньої поверхні виробів АТ.

5. Стельові краново-телескопічні платформи є одним з сучасних засобів технологічного оснащення для пневматичного фарбування великогабаритних пасажирських та транспортних літаків.

6. Застосування сучасного технологічного устаткування для пневматичного фарбування великогабаритної АТ економічно ефективно на базі спеціалізованих фарбувальних центрів.

7. Для авіаційної промисловості України базовим підприємством для створення такого фарбувального та сервісного центру може стати ДП «Завод 410 цивільної авіації», який сертифікований на ремонт та технічне обслуговування літаків компанії Boeing.

8. Роботизація процесів пневматичного фарбування є одним із стратегічних напрямів науково-технічного прогресу при виробництві сучасних конкурентоспроможних літаків та вертольотів.

9. Технологія лазерного видалення старого ЛФП може бути ефективною інноваційною альтернативою найпоширенішим в даний час методам абразивного або хіміко-механічного очищення зовнішньої поверхні виробів АТ під час ремонту.

10. Для видалення багаточислового старого ЛФП на органічній основі з поверхні виробів АТ використовують два методи впливу потоку високоенергетичного лазерного випромінювання – термічне випарування (режим абляції) або руйнування хімічних зв'язків молекулярних радикалів (режим десорбції).

11. Роботизовані стенди та мобільні платформи є сучасним високопродуктивним обладнанням для лазерного видалення старого ЛФП із зовнішньої поверхні виробів АТ без розстикування планера на агрегати.

12. Подальші наукові та прикладні дослідження технології лазерного видалення старого ЛФП можуть бути присвячені, наприклад, вивченню впливу параметрів лазерного променя (потужність, частота повторення та швидкість сканування) на шорсткість поверхні та адгезію граничного шару після повторного фарбування металевих та композитних поверхонь виробів АТ.

## Література

1. *Технология защитных покрытий изделий авиационной и автомобильной техники [Текст]: учебное пособие* / Н. В. Нечипорук, Ю. В. Дьяченко, Ю. А. Воробьев, В. В. Воронько. – Харьков : Нац. аэрокосмический университет «Харьковский авиационный институт», 2011. – 180 с.
2. Архіпова, Г. Вплив летких органічних сполук лакофарбних матеріалів на організм працівників промислових підприємств [Текст] / Г. Архіпова, А. Падун, К. Погосова // Вісник Національного авіаційного університету. Успіхи аерокосмічних технологій. 2010. – Т. 43, № 2. – С. 127–132. DOI: 10.18372/2306-1472.43.1867.
3. Державні санітарні правила і норми застосування лакофарбових та допоміжних матеріалів на транспорті. ДСанПіН 7.7.5-01-3-09 [Електронний ресурс]: Постанова Першого заступника Головного державного санітарного лікаря України 09.02.2009 № 13. – Режим доступу: <https://regulation.gov.ua/documents/id238155> – 20.05.2022.
4. Бик, М. В. Методи захисту обладнання від корозії та захист на стадії проектування [Текст]: підручник / М. В. Бик, О. І. Букет, Г. С. Васильєв. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. – 314 с.
5. Формування вимог до інформаційного супроводу виробництва аерокосмічних виробів для забезпечення їх якості [Текст] / І. В. Бичков, А. С. Селєнцова, К. В. Майорова, Ю. А. Воробійов, В. Т. Сікульський // Авіаційно-космічна техніка і технологія. – 2022. – № 4(180). – С. 22-35. DOI: 10.32620/akt.2022.4.03.
6. Денкер, И. И. Технология окраски самолетов и вертолетов гражданской авиации [Текст] / И. И. Денкер. – М. : Высш. шк., 2007. – 215 с.
7. Лакокрасочные покрытия для защиты металлических и полимерных композиционных материалов от старения, коррозии и биоповреждения [Текст] / Н. И. Нефедов, Л. В. Семенова, В. А. Кузнецова, Н. П. Веренинова // Авиационные материалы и технологии. – 2017. – № 5. – С. 393–404. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-5-393-404.
8. Бичков, С. А. Особливості серійного виробництва регіональних пасажирських літаків Ан-148 та Ан-158 [Текст] / С. А. Бичков, О. Д. Донець, В. Г. Читак // Відкриті інформаційні та комп'ютерні інтегровані технології : зб. наук. пр. – Харків : Нац. аерокосм. ун-т «ХАІ», 2019. – Вип. 84. – С. 125–143. DOI: 10.32620/oikit.2019.84.06.
9. Мельничук, П. І. Аналіз сучасних методів видалення лакофарбових покриттів з об'єктів авіаційної техніки [Текст] / П. І. Мельничук, Є. В. Цегельник // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии : сб. науч. тр. / Нац. аэрокосм. ун-т им. Н. Е. Жуковского «ХАИ». – Харьков, 2017. – Вып. 78 – С. 110–120.
10. Бичков, С. А. Про перспективи розвитку фірми «АНТОНОВ» у сучасних умовах [Текст] / С. А. Бичков // Авіаційно-космічна техніка і технологія. – 2022. – № 1(177). – С. 4–11. DOI: 10.32620/akt.2022.1.01
11. *Robotic Laser Coating Removal System: Final Technical Report [Text]* / J. Arthur et al. // Concurrent Technologies Corp., Oklahoma City Air Logistics Center, Air Force Research Laboratory. – Wright-Patterson AFB, OH (USA), 2019. – 117 p.
12. *Standard MA4872A. Paint Stripping of Commercial Aircraft – Evaluation of Materials and Process [Text]*. – SAE International, 2012. – 73 p.
13. Оспенникова, О. Г. Лазерные технологии для удаления лакокрасочных покрытий в процессе ремонта и обслуживания авиационной техники (обзор) [Текст] / О. Г. Оспенникова, А. А. Козлова, И. А. Козлов // Труды ВИАМ. – 2021. – № 4 (98). – С. 110–123. DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-4-110-123.
14. *Effects of laser cladding on crack resistance improvement for aluminum alloy used in aircraft skin [Text]* / M. Song, L. Wu, J. Liu, Yu. Hu // Optics & Laser Technology. – 2020. – Vol. 133. – Article ID: 106531. DOI: 10.1016/j.optlastec.2020.106531.
15. *Abrasive flow finishing for surface roughness improvement of aluminum propeller: A case study [Text]* / M.A. Manjunath, P. Vinod, N. Balashanmugam, M. R. Sankar // Materials Today Processing. – 2020. – Vol. 26, Iss. 3. – P. 1113–1118. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.02.223.
16. *Corrosion and wear performance of aircraft skin after laser cleaning [Text]* / G. Zhu, S. Wang, W. Cheng, Yu. Ren, D. Wen // Optics & Laser Technology. – 2020. – Vol. 132. – P. 64–75. DOI: 10.1016/j.optlastec.2020.106475.
17. *Laser effects based optimal laser parameter identifications for paint removal from metal substrate at 1064 nm: A multipulse model [Text]* / J. Han, X. Cui, S. Wang, G. Feng, G. Deng, R. Hu // Journal of Modern Optics. – 2017. – Vol. 64, No. 19. – P. 1947–1959. DOI: 10.1080/09500340.2017.1330433.
18. *Vasanthakumar, P. Recent developments in powder metallurgy based aluminium alloy composite for aerospace applications [Text]* / P. Vasanthakumar,



K. Sekar, K. Venkatesh // *Materials Today Processing*. – 2019. – Vol. 18, Iss. 1-2. – P. 5400–5409. DOI: 10.1016/j.matpr.2019.07.568.

19. *The Surface Properties of an Aviation Aluminum Alloy after Laser Cleaning [Text]* / Yu. Ren, L. Wang, J. Li, W. Cheng, X. Ma // *Coatings*. – 2022. – Vol. 12, Iss. 2. – Article ID: 273. DOI: 10.3390/coatings12020273.

## References

1. Nechiporuk, N. V., D'yachenko, Yu. V., Vorob'yev, Yu. A., Voron'ko, V. V. *Tekhnologiya zashchitnykh pokrytiy izdeliy aviatsionnoy i avtomobil'noy tekhniki* [Technology of protective coatings for aviation and automotive products]. Kharkiv, National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute”, 2011. 180 p.

2. Arkhipova, H., Padun, A., & Pohosova, K. Vplyv letkykh orhanichnykh spoluk lakofarbnnykh materialiv na orhanizm pratsivnykiv promyslovykh pidpryemstv [Influence of volatile organic compounds of varnish-and-paint materials on the workers organism on the industrial enterprises]. *Proceedings of National Aviation University. Advances in Aerospace Technology*, 2010, vol. 43, no. 2, pp. 127–132. DOI: 10.18372/2306-1472.43.1867.

3. *Derzhavni sanitarni pravyla i normy zastosovannya lakofarbovykh ta dopomizhnykh materialiv na transporti. DСанПиН 7.7.5-01-3-09: Постанова Pershoho zastupnyka Holovnoho derzhavnoho sanitarnoho likarya Ukrainy 09.02.2009 № 13* [State sanitary rules and norms for the use of paints and lacquers and auxiliary materials for transport. ДСанПиН 7.7.5-01-3-09: Decree of the First Deputy Chief State Sanitary Doctor of Ukraine, dated February 9, 2009 No. 13]. Available at: <https://regulation.gov.ua/documents/id238155> (accessed 20.09.2022) (In Ukrainian).

4. Byk, M. V., Buket, O. I., Vasyly'ev, H. S. *Metody zakhystu obladnannya vid koroziyi ta zakhyst na stadiyi proektuvannya: pidruchnyk* [Equipment corrosion protection methods and protection at the design stage]. Kyiv, National Technical University of Ukraine, Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute Publ., 2018. 314 p.

5. Bychkov, I. V., Seleznyova, A. S., Maiorova, K. V., Vorobiov, I. A., Sikulskiy, V. T. Formuvannya vymoh do informatsiynoho suprovodu vyrobnytstva aerokosmichnykh vyrobiv dlya zabezpechennya yikh yakosti [Requirements Development for the Information Support Manufacturing of Aerospace Products to Ensure their Quality]. *Aviacijno-kosmicna tehnika i tehnologia – Aerospace technic and technology*, 2022, no. 4(180), pp. 22–35. DOI: 10.32620/akt.2022.4.03.

6. Denker, I. I. *Tekhnologiya okraski samoletov i vertoletov grazhdanskoy aviatsii* [Painting technology

for aircraft and helicopters of civil aviation]. Moscow. Higher School Publ., 2007. 215 p.

7. Nefedov, N. I., Semenova, L. V., Kuznetsova, V. A., Vereninova, N. P. Lakokrasochnyye pokrytiya dlya zashchity metallicheskih i polimernykh kompozitsionnykh materialov ot stareniya, korrozii i biopovrezhdeniya [Paint coatings for the protection of metal and polymer composite materials from aging, corrosion and biodamage]. *Aviation Materials and Technologies*, 2017, no. 5, pp. 393–404. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-393-404.

8. Bychkov, S. A., Donets', O. D., Chytak, V. H. Osoblyvosti seriynoho vyrobnytstva rehional'nykh pasazhyrs'kykh litakiv An-148 ta An-158 [Features of Serial Production of Regional Passenger Airplanes An-148 and An-158]. *Open Information and Computer Integrated Technologies*, 2019, no. 84, pp. 125–143. DOI: 10.32620/oikit.2019.84.06.

9. Mel'nychuk, P. I., Tsel'nyk, YE. V. Analiz suchasnykh metodiv vydalennya lakofarbovykh pokrytivy z ob'yektiv aviatsiyanoi tekhniki [Analyzes of Modern Methods of Paint Stripping from Aircraft Objects]. *Open Information and Computer Integrated Technologies*, 2017, no. 78, pp. 110–120.

10. Bychkov, S. A. Pro perspektyvy rozvytku firmy «ANTONOV» u suchasnykh umovakh [About Antonov Company Development Prospects in Modern Conditions]. *Aviacijno-kosmicna tehnika i tehnologia – Aerospace technic and technology*, 2022, no. 1(177), pp. 4–11. DOI: 10.32620/akt.2022.1.01.

11. Arthur, J. et al. *Robotic Laser Coating Removal System: Final Technical Report*. Concurrent Technologies Corp., Oklahoma City Air Logistics Center, Air Force Research Laboratory. Wright-Patterson AFB, OH (USA), 2019. 117 p.

12. *Standard MA4872A. Paint Stripping of Commercial Aircraft. Evaluation of Materials and Process*. SAE International Publ., 2012. 73 p.

13. Ospennikova, O. G., Kozlova, A. A., Kozlov, I. A. Lazernyye tekhnologii dlya udaleniya lakokrasochnykh pokrytivy v protsesse remonta i obsluzhivaniya aviatsionnoy tekhniki (obzor) [Laser technologies for the removal of lacquer coatings in the process of repair and maintenance of aviation equipment (review)]. *Proceedings of All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials*, 2021, no. 4 (98), pp. 110–123. DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-4-110-123.

14. Song, M., Wu, L., Liu, J. et al. Effects of laser cladding on crack resistance improvement for aluminum alloy used in aircraft skin. *Optics & Laser Technology*, 2020, vol. 133, article id: 106531. DOI: 10.1016/j.optlastec.2020.106531.

15. Manjunath, M. A., Vinod, P., Balashanmugam, N. et al. Abrasive flow finishing for surface roughness

improvement of aluminum propeller: A case study. *Materials Today Processing*, 2020, vol. 26, iss. 3, pp. 1113-1118. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.02.223.

16. Zhu, G., Wang, S., Cheng, W. et al. Corrosion and wear performance of aircraft skin after laser cleaning. *Optics & Laser Technology*, 2020, vol. 132, pp. 64-75. DOI: 10.1016/j.optlastec.2020.106475.

17. 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, pp. 1947-1959. DOI: 10.1080/09500340.2017.1330433.

18. Vasanthakumar, P., Sekar, K., Venkatesh, K. Recent developments in powder metallurgy based aluminium alloy composite for aerospace applications. *Materials Today Processing*, 2019, vol. 18, iss. 1-2, pp. 5400-5409. DOI: 10.1016/j.matpr.2019.07.568.

19. Ren, Y., Wang, L., Li, J. et al. The Surface Properties of an Aviation Aluminum Alloy after Laser Cleaning. *Coatings*. 2022, vol. 12, iss. 2, article id: 273. DOI: 10.3390/coatings12020273.

Надійшла до редакції 25.08.2022, розглянута на редколегії 28.09.2022

## TECHNOLOGICAL FEATURES ANALYSIS OF THE INITIAL AND REPAIR AIRCRAFT PRODUCTS PAINTING

*Yuri Dyachenko, Iryna Voronko, Oleksandr Gorlov*

The subject **matter** of this article is the technological features analysis of the initial and repair of aircraft products painting. The **goal** is to analyze and systematize the trends in the global aircraft industry in the pneumatic painting technology field and the removal of old paintworks from the outer aircraft product surfaces. The **tasks** include analysis of directions for improving the pneumatic painting technology; analysis of laser removal technological features of old paintwork. The following **results** were obtained. The analysis of publications showed significant advantages of the electrostatic pneumatic painting system with limitations for composite materials. Relevant is the development of new paintwork materials with a reduced content of volatile organic compounds and an increased hiding power, as well as fundamentally new water-based paintwork systems. One of the modern means of technological equipment for pneumatic painting is an overhead crane-telescopic platform. The global trend is the creation of painting and service centres and robotization of paintwork. The laser removal technology of old paintwork is an effective innovative alternative to the methods of abrasive or chemical-mechanical cleaning from the outer aircraft product surfaces, which are currently used. The laser cleaning technology should provide the possibility of manual or automatic old paintwork removal from the double curvature surfaces, fastening elements, as well as the joints of the sheathing sheets without thermal damage to the anode film on the aluminium alloys' sheathing. Laser stands and mobile laser platforms have high productivity and low labor intensity, multiple reductions in the disposing cost of the decomposition of old paintwork products, compliance with labor protection and environmental requirements compared to existing technologies. **Conclusions.** The scientific novelty of the materials presented in the article is shown by the analysis and systematization of the technological features of the aircraft products initial and repair painting; rationality substantiation for creating the painting and service centre for the Ukraine aviation industry; determination the directions of scientific and applied research on the laser removal technology of old multilayer paintwork.

**Keywords:** corrosion; paints and varnishes; pneumatic painting; paintwork robotization; laser ablation; laser desorption, robotic stands; mobile platforms.

**Д'яченко Юрій Веніамінович** – канд. техн. наук, доц., проф. каф. технології виробництва літальних апаратів, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

**Воронько Ірина Олексіївна** – канд. техн. наук, доц. каф. технології виробництва літальних апаратів, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

**Горлов Олександр Кузьмич** – канд. техн. наук, доц., проф. каф. технології виробництва літальних апаратів, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

**Yuri Dyachenko** – PhD, Docent, Professor of Technology of Aircraft Manufacturing Department, National Aerospace University «Kharkiv Aviation Institute», Kharkiv, Ukraine, e-mail: y.dyachenko@khai.edu, ORCID: 0000-0003-1252-244X.

**Iryna Voronko** – PhD, Associate Professor of Technology of Aircraft Manufacturing Department, National Aerospace University «Kharkiv Aviation Institute», Kharkiv, Ukraine, e-mail: i.voronko@khai.edu, ORCID: 0000-0002-9689-6977.

**Oleksandr Gorlov** – PhD, Docent, Professor of Technology of Aircraft Manufacturing Department, National Aerospace University «Kharkiv Aviation Institute», Kharkiv, Ukraine, e-mail: olexandr.gorlov@gmail.com, ORCID: 0000-0002-0914-3396.