



УДК 620.1:678.7

Астанін В. В.<sup>1</sup>, Глоба О. В.<sup>2</sup>, Шевченко О. А.<sup>1</sup><sup>1</sup> Національний авіаційний університет. Україна, м. Київ<sup>2</sup> Національний технічний університет України «КПІ». Україна, м. Київ

### ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ПОШКОДЖЕННЯ ЕЛЕМЕНТІВ КОНСТРУКЦІЙ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ ІЗ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ І МЕТОДИ ЇХ РЕМОНТУ

#### Анотація

*Представлено аналіз експлуатаційних пошкоджень в елементах конструкцій літальних апаратів із полімерних композиційних матеріалів. Виявлено, що типовими пошкодженнями є розшарування, пробої та тріщини. Для реалізації типових методів ремонту використано універсальний ремонтний комплекс. Запропоновано метод ремонту пошкоджень, особливістю якого є додаткове пришивання країв ремонтних латок. Ефективність даного методу перевірена експериментально.*

#### Abstract

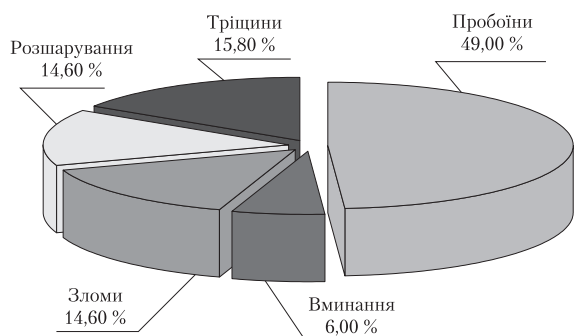
*Analysis of operational damage to aircraft structural elements made from polymeric composite materials is presented. Revealed that the typical damage are delamination, cracks and breakdown. To implement the typical repair methods used universal repair complex. The method of repairing damage, which is an additional sewing the edges of repair patch is proposed. The effectiveness of this method is tested experimentally.*

Композиційні матеріали (КМ) поступово замінюють традиційні метали у конструкціях сучасних літаків, що дозволяє суттєво підвищити їх ефективність, навіть незважаючи на значну собівартість КМ. Якщо у конструкціях військових літальних апаратів (ЛА) КМ практично замінили традиційні метали, а у цивільних літаках останнього покоління до 20 % відносно

ваги несучих поверхонь, агрегатів і фюзеляжу виготовляються з КМ [1], то у найсучаснішому В.787 вага КМ досягла 50 %.

У конструкціях сучасних ЛА використовуються в основному полімерні композиційні матеріали (ПКМ), які набагато технологічніші ніж аналогічні метали та мають значно (до 40 %) меншу вагу, але вони суттєво дорожчі. Велика вартість та значні розміри елементів з ПКМ примушують виконувати їх ремонт, а не заміну при виникненні пошкоджень в процесі експлуатації. Зважаючи на це важливою проблемою є впровадження обґрунтованих технологій ремонту із залученням сучасних комп'ютерних технологій та розробка інструментальних засобів для проведення ремонту пошкоджень в елементах із ПКМ. Аналіз експлуатаційних пошкоджень та особливостей ремонту елементів є важливими для розробки нових ефективних технологій ремонту.

Варіант комплексного розв'язання цієї проблеми представлена у статті авторів [2]. У монографії [3] надано аналіз дефектів у армованих пластиках та наведено дані про пошкодження елементів авіаційних конструкцій при їх експлуатації та випробуваннях. Ефективність використання ПКМ у конструкціях ЛА з акцентом на аналіз літаків сімейства АН представлено у [1]. Так здійснення програми по створенню високонавантажених агрегатів із ПКМ для широкофюзеляжного літака АН-70 дозволило довести їх обсяг у конструкції до 20 % від маси планера. Результати аналізу інформації про експлуатаційні пошкодження в елементах з вуглепластика на літаках АН (рис. 1) показують, що найбільш розповсюдженими серед них є пробоїни, тріщини, розшарування



**Рис. 1.** Частота виникнення різних пошкоджень в елементах з вуглепластика

та зломи. З огляду на те, що пошкодження типу пробоїна та тріщина складають більше половини з усіх інших, то розробка технологічних методів ремонту даних пошкоджень є важливою практичною задачею. Можливі дефекти, їх класифікація та методи ремонту пошкоджень у неметалевих конструкціях із заповнювачем розглянуто у роботі [4].

На ремонтному заводі була зібрана статистична інформація по експлуатаційним пошкодженням елементів конструкцій літаків Ан-24, Ан-26, Ан-30 та Ан-32, виготовлених з ПКМ (переважно склопластиків). Результати аналізу виявлених пошкоджень і дефектів із зазначенням найменування та причин їх виникнення представлені у таблицях 1 та 2.

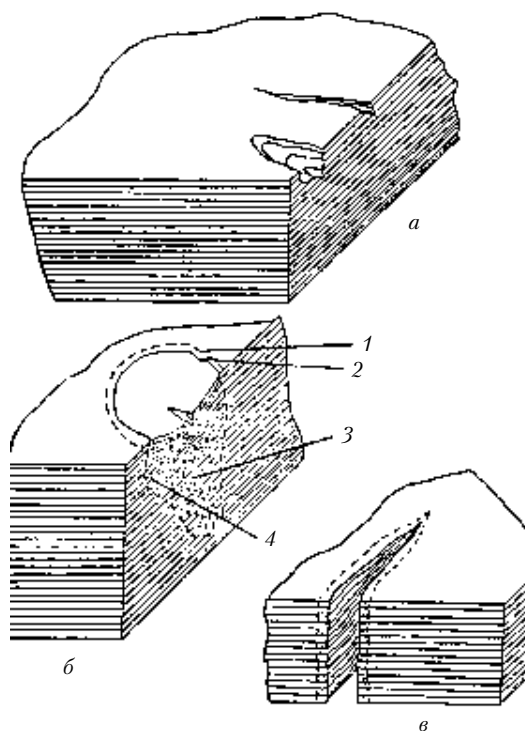
Аналіз представленої інформації показав, що типовими експлуатаційними пошкодженнями елементів конструкцій із ПКМ літаків Ан (24, 26, 30 та 32) є: розшарування зовнішнього шару, склотканини та стільникового наповнювача; пробої (крізі та некрізі); тріщини; вивітрювання та розм'якшення поверхневого шару; руйнування задніх крайок елементів. Основними причинами виникнення поданих експлуатаційних пошкоджень елементів з ПКМ були удари, пошкодження втоми, абразивний знос та недбала експлуатація. Типові експлуатаційних пошкоджень приведені на рис. 2.

Таблиця 1  
**Пошкодження обтічників та кінцівок кілів**

№	Найменування пошкодження	Причини виникнення
1	Вивітрювання зовнішнього шару	Абразивний знос
2	Розшарування між шарами склотканини	Удари
3	Розшарування стільникового аповнювача	Удари
4	Тріщини	Пошкодження, втоми
5	Крізі пробоїни	Удари
6	Розм'якшення поверхні обтічника	Удари

Таблиця 2  
**Пошкодження тримерів, елеронів, гребнів, обтічників рампи та стабілізаторів**

№	Найменування пошкодження	Причини виникнення
1	Руйнування задньої крайки	Абразивний знос
2	Вивітрювання зовнішнього шару	Абразивний знос
3	Пробой з усадкою наповнювача	Удари
4	Попадання вологи у наповнювач	Негерметичність зовнішнього шару
5	Розшарування склотканини	Удари
6	Тріщини	Пошкодження, втоми



**Рис. 2.** Типи експлуатаційних пошкоджень:

*a* – поверхневі пошкодження (забоїни, подряпини);  
*б* – вминання: 1 – границя зони пошкодження; 2 – границя вминання;  
3 – розшарування; 4 – зона розтріскування матриці та розриву волокон;  
*в* – крізі тріщини та пробої

Відмінною рисою полімерних КМ є крихкість та пов'язана з нею підвищена чутливість до механічних ударних навантажень та концентраторів напружень. Загальною проблемою при розробці елементів конструкцій з КМ та процесів їх виготовлення є визначення стандартних та типових дефектів (визначення їх допустимих розмірів) з метою подальшої розробки технологій їх ремонту.



У огляді по технологіям ремонту елементів з ПКМ [5] та у роботі одного з авторів статті [6] представлені методи постановки ремонтних вставок за допомогою спеціально розробленого ремонтного комплексу на основі універсального пневмоприводу з набором змінних технологічних насадок. Ремонт конструкцій із ПКМ, які мають пошкодження типу пробоя за допомогою ремонтних вставок виконується наступним чином, спочатку висвердлюється круглий отвір, який повністю перекриває пробій та пошкоджені краї.

люється на пошкоджену поверхню, за допомогою присосок закріплюється на цій поверхні і проводиться висвердлювання її пошкодженій частини. Скопи можуть виконуватися залежно від діаметра отвору або спеціальними алмазними інструментами, або спеціальною насадкою, яка представлена на малюнку (рис. 4, в). Відповідно до їх призначення насадки можуть знімати фаски в отворах, як на прямолінійних поверхнях, так і на поверхнях, що мають кривизну. Для виконання скосів може також використову-

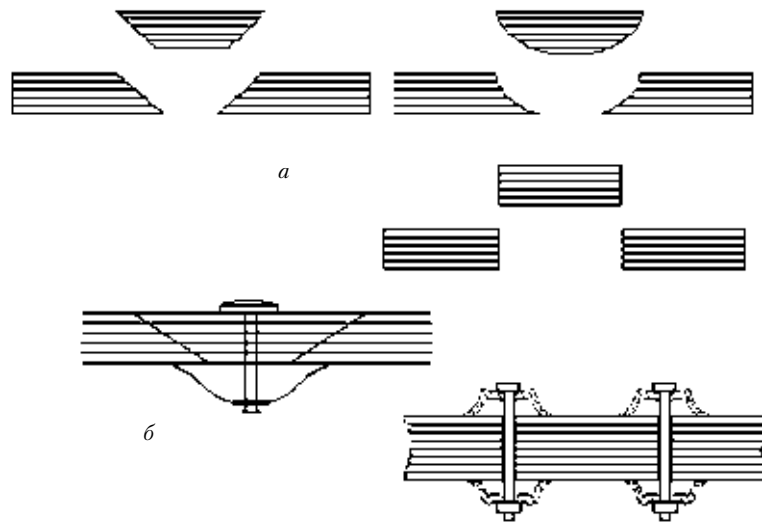


Рис. 3. Види підготовлених під ремонт поверхонь і ремонтних вставок (а) для них та методи їх постановки (б)

Далі на краях отвору виконується скоп або радіус (рис. 3, а) в залежності від товщини матеріалу та рекомендованої технології ремонту, а потім в підготовлений отвір вставляється ремонтна вставка (рис. 3, б).

Для реалізації представлених вище операцій та типових методів ремонту розроблено універсальний ремонтний комплекс. Основу комплексу складає універсальний пневмопривід з набором змінних технологічних насадок, кожна з яких разом з пневмоприводом утворює один з різновидів ручного механізованого інструменту, призначеного для виконання конкретних технологічних операцій (свердління, розрізання, розтин великих отворів, зачистка, полірування тощо). Обертання ріжучих елементів у насадках здійснюється універсальним пневматичним приводом (рис. 4, а). Для вирізання круглих отворів розроблено ряд кільцевих свердел, які виготовлені з швидко-ріжучої сталі або мають алмазне покриття. Цими інструментами можна, як свердлити отвори так і виготовляти накладки. Інструменти встановлюються в спеціальну технологічну насадку представлену на малюнку (рис. 4, б).

Насадка складається з основи, в яку вмонтовані три пневмоприсоски. Останні призначені для кріплення пристосування на поверхні, яка обробляється. Пристосування із закріпленою насадкою встанов-

вється пристосування, у якому встановлено спеціальний інструмент, який здійснює обертальний рух навколо своєї осі, що рухається по заданій йому траєкторії. Виліт інструмента може налаштовуватися на заданий розмір.

Привід складається з власне приводу і змінних редукторних головок. У залежності від потрібного режиму роботи до гільзи під'єднуються змінні редуктора якими регулюється частота обертання приводу (остання може регулюватися і за рахунок дроселювання). Із метою зручності роботи привід може

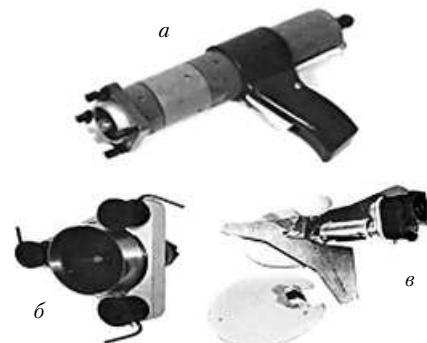


Рис. 4. Привід пневматичний універсальний (а), насадка для висвердлення отворів (б) та насадка для виконання скосів (в)

бути використаний у вигляді циліндра або у вигляді пістолета, для чого вона має знімну ручку. Крім перерахованих вище для вирізки пошкоджених ділянок застосовується і інші насадки — пила ножівкова горизонтальна і вертикальна, перфоратори і шнекові насадки; дискові і прямі ножиці.

Даний універсальний комплект для обробки конструкцій з ПКМ повністю забезпечує проведення всіх технологічних операцій з виконання ремонтних робіт елементів як у виробництві, так і у польових умовах, на виробі та на знятих вузлах і агрегатах.

Для аналізу міцності елементів конструкцій із ПКМ з експлуатаційними пошкодженнями у роботі [2] авторами запропонована автоматизована система, яка після виявлення пошкоджень і визначенні їх розмірів та координат розташування дозволяє проводити аналіз їх впливу на міцність з метою вибору методу ремонту. Система базується на алгоритмі, в якому порівнюється дійсний розмір пошкодження з критичним розміром пошкодження даного типу і орієнтації у даній зоні елемента із ПКМ. Умова перевірки критичності пошкодження полягає у порівнянні його характерного розміру ( $2L_{\text{експл}}$ ) з допустимим розміром ( $2L_{\text{доп}}^i$ ) для  $i$ -го типу пошкодження в конкретній зоні відповідного елемента із ПКМ і може бути записана так:  $2L_{\text{експл}} < 2L_{\text{доп}}^i$ .

При виконанні цієї умови можна обмежитись так званим «Косметичним ремонтом» або тимчасовим, які не потребують значних матеріальних витрат. У випадку, коли характерний розмір пошкодження ( $2L_{\text{експл}}$ ) є більшим ніж допустимий розмір ( $2L_{\text{доп}}^i$ ), тобто виконується умова  $2L_{\text{експл}} \geq 2L_{\text{доп}}^i$ , за допомогою «Експертної системи» із баз даних вибирається необхідна технологічна операція і відповідні їй інструменти та устаткування, а також ремонтні елементи. Складається операційна карта технології ремонту, на основі якої і виконується ремонт.

У випадку виявлення у конструктивному елементі із ПКМ нетипового експлуатаційного пошкодження для прийняття обґрунтованого рішення про ремонт може бути використаний програмний комплекс для оцінки критичності пошкодження. Якщо за допомогою «Програмного комплексу» та «Експертної системи» неможливо прийняти обґрунтоване рішення, то у цьому випадку інформація про нетипове пошкодження передається Розробнику або у спеціальний сервісний центр, якому надані повноваження по прийняттю ремонтних рішень та їх виконанню.

Типовими методами ремонту кризних пробоїн, є технології постановки ремонтних вставок (рис. 3), які досить швидко можуть бути реалізовані, але вони погіршують аеродинамічні характеристики поверхні та мають недостатню міцність, тому можуть бути використані для військових літаків, або як тимчасовий ремонт. Для довготермінового ремонту може бути використаний метод постановки приформованих латок (рис. 5, а), особливість постановки яких полягає

у накладанні на пошкодження і на підготовлені поверхні навкруги пошкодження просочених шарів тканини, або препрега. Підготовка поверхні навкруги місця для даного виду ремонту полягає у скошенні країв вирізу на заданий кут. Кут скошення за даними одних джерел складає  $7^\circ \div 12^\circ$ , а за даними інших надається у вигляді відношення ширини ділянки скосу до товщини ( $\delta$ ) і складає  $16 \div 32 \delta$  і навіть  $\geq 100 \delta$  за інформацією [4].

При навантаженні у скошеній склейці виникають додаткові напруження відриву, які особливо небезпечні на краях клейового шва, тому корисним може бути додаткове стягування біля краю клейового шва. При ремонті елементів за допомогою вставок або вформованих у підготовлений отвір латок пропонується додатково використовувати пришивання країв латок дворядним швом, один рядок якого повинен проходити біля (рис. 5, б). Використання даної технології дозволить зменшити скос краю отвору, підготовленого до постановки латки, та підвищити міцність вклеєної вставки чи приформованої латки.



Рис. 5. Види ремонту шляхом постановки приформованих латок (а) та з пришиванням їх країв (б)

Для виконання свердління отворів і пришивання країв вставок або латок розроблено універсальний комп'ютеризований комплекс, який складається: з основного пристрою для виконання свердління основного отвору за заданою програмою, виконання скосів крайок отвору під обхідним кутом і свердління отворів для входження голки з кріпильною ниткою; комп'ютерного блоку управління основним пристроєм; пневмостанції, що подає стиснене повітря на головний привід [7]. Свердління отворів під наступне входження голка з кріпильною ниткою може бути також використана багатошпіндельною голівкою з регульованою відстанню від центру латки. Пришивання виконується спеціальним пристосуванням, в якому голка переміщується по відповідному діляльному пристрою, що потребує точного позиціонування голки у процесі пришивання.

З метою перевірки ефективності запропонованого методу ремонту проведені експериментальні дослідження. Був вибраний матеріал TWINTEX, який являє собою КМ виготовлений шляхом консолідації при нагріванні тканини, зробленої методом перепле-

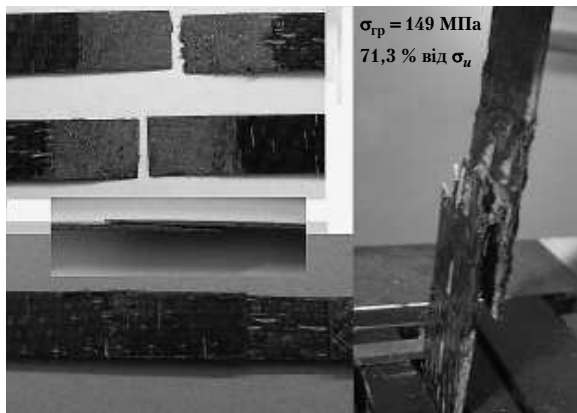


Рис. 6. Вигляд зпечених зразків на різних стадіях випробувань

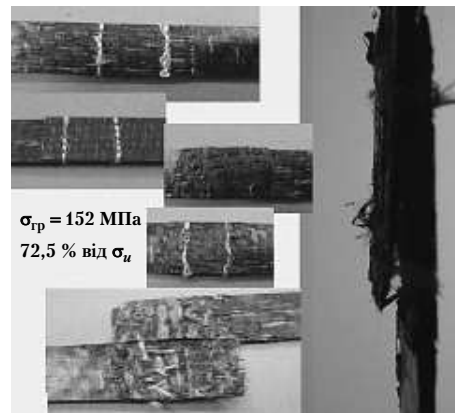


Рис. 7. Термоз'єднання зразків з додатковим пришиванням на різних стадіях їх випробувань

тіння ровінгу зі змішаних Е-скло та поліпропіленових волокон. TWINTEX має відмінну жорсткість, ударну міцність та забезпечує високу технологічність. Із пластини з матеріалу TWINTEX товщиною біля 2 мм були зроблені зразки завширшки  $25,0 \pm 0,2$  мм та довжиною біля 210 мм з накладками. Далі зразки були випробувані на машині Р-10 на розтягання до розриву і було визначене наступне середнє значення границі міцності  $\sigma_u = 210$  МПа.

Частини зразків після розриву оброблялися на клин по товщині щоб змодельовати у перерізі приформовану ремонтну латку (дивись рис. 6), для чого був зроблений поступовий скіс зразка на довжині  $\approx 16\delta$  (33 мм). Після цього 2 частини притискалися скошеними поверхнями і шляхом нагріву місця з'єднання до температури  $180^\circ \div 200^\circ$  «зпікалися» між собою. Для «відремонтованих» даним чином зразків було отримано наступне середнє граничне напруження розриву  $\sigma_{гр} = 149$  МПа, що складає 71,3 % від  $\sigma_u$  (рис. 6).

Наступні зразки були «відремонтовані» аналогічно попереднім, але додатково були прошиті пряддю зі склотканини дворядним швом з відстанню між отворами 3,5 мм. При випробуваннях на розрив для даних зразків середнє граничне напруження розриву складало  $\sigma_{гр} = 152$  МПа, що складає 72,5 % від  $\sigma_u$  (рис. 7).

### Висновки

На основі аналізу експлуатаційних пошкоджень в елементах конструкцій літальних апаратів із ПКМ і технологій їх ремонту розроблено універсальний ремонтний комплекс, який включає комп'ютерні програми, експертну систему із базами даних та комплект інструментальних засобів. Даний комплекс дозволить швидко вибрати оптимальний метод ремонту та необхідний комплект інструментів для його реалізації.

Запропоновано новий метод ремонту пошкоджень типу пробоїв в елементах із ПКМ, головною особли-

вістю якого є додаткове пришивання країв ремонтних латок. Випробування проведенні на зразках показали, що міцність термоз'єднання з додатковим пришиванням країв було більшим ніж міцність термоз'єднання без пришивання навіть незважаючи на послаблення перерізів отворами для проходження кріпильної пряді і становило відповідно 72,5 % та 71,3 % від  $\sigma_u$ . Такий незначний ефект, викликаний невідпрацьованістю технології пришивання, удосконалення якої є одним із напрямків подальших досліджень.

### Література

1. Астанін В. В., Хоменко А. В., Шевченко О. А. Композиційні матеріали у конструкціях сучасних літальних апаратів // Вісник НАУ. — К.: НАУ, 2004. — № 3. — С. 46–52.
2. Глоба А. В., Шевченко О. А. Комплексная система поддержки жизненного цикла элементов из композиционных материалов // Вісник НТУУ «КПІ», Машинобудування. — 2003. — № 44. — С. 182–187.
3. Серенсен С. В., Зайцев Г. П. Несущая способность тонкостенных конструкций из армированных пластиков с дефектами. — К.: Наук. Думка, 1982. — 296 с.
4. Панин В. Ф., Гладков Ю. А. Конструкции с заполнителем: Справочник. — М.: Машиностроение, 1991. — 272 с.
5. Карпусенко Б. Ф. Ремонт конструкций из композиционных материалов. Обзор // Техника, экономика, информация. Серия «Техника и технология». — 1985. — № 2. — С. 28–33.
6. Глоба А. В. Ремонт виробів з листового композиційного матеріалу // Наука, техніка, виробництво. Експрес-новини. — К.: 1999. — № 5–6. — С. 17–19.
7. Глоба О. В., Шевченко О. А. Ремонт пошкоджень елементів конструкцій із композиційних матеріалів з використанням комп'ютеризованої системи та комплекту інструментальних засобів // Вісник НТУУ «КПІ», Машинобудування. — 2011. — № 62. — С. 78–81.