

УДК 620.1: 678.7

*Шевченко О.А.<sup>1</sup>, Глоба О.В.<sup>2</sup>, Поліщук Д.М.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Національний авіаційний університет. Україна, м. Київ

<sup>2</sup> Національний технічний університет України "КПІ". Україна, м. Київ

## ВПЛИВ ВИДУ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ПОВЕРХНІ НА МІЦНІСТЬ РЕМОНТНИХ З'ЄДНАНЬ ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

*На основі аналізу методів ремонту типових експлуатаційних пошкоджень в елементах конструкцій літальних апаратів із полімерних композиційних матеріалів запропоновано новий вигляд форми технологічної поверхні для реалізації ремонту пробоїн. Експериментально досліджено вплив виду технологічної поверхні на міцність ремонтних з'єднань полімерних композиційних матеріалів і зроблені відповідні висновки.*

Ключові слова: полімерний композиційний матеріал, ремонт, технологічна поверхня.

### Вступ

У конструкціях військових літальних апаратів (ЛА) композиційні матеріали (КМ) практично замінили традиційні метали, оскільки це дає можливість підвищити ефективність конструкцій, навіть незважаючи на значну собівартість КМ. У літаків загального призначення ця заміна відбулося значно рані-

ше, а у конструкціях цивільних літаків дуже довго рівень відносної ваги несучих поверхонь, агрегатів і фюзеляжу виготовляються з КМ не перевищував 15% [1]. Справжнім проривом стала поява найсучаснішого цивільного літака з вагою КМ 50%, який у вересні 2011 року почав виконувати регулярні рейси. В жовтні 2012 було повідомлено про відкриття заводу для серійного виробництва А350, який є

відповіддю Європейського Консорціуму на «лайн-нер – мрію» В.787. Обіцяно довести у конструкції А350 вагу КМ до 53%,

Конструкції із полімерних композиційних матеріалів (ПКМ), які в основному використовуються у сучасних ЛА, є набагато технологічнішими ніж аналогічні металеві та мають до 40% меншу вагу. Але ПКМ мають суттєвий недолік, а саме дуже велику вартість. Технологічність конструкцій з композитів дозволяє отримати значні розміри елементів, які досягають вже більше 27 метрів у довжину (крило А400М з вуглепластика). Зазначені фактори примушують при виникненні пошкоджень в процесі експлуатації виконувати ремонт елементів з ПКМ, а не проводити їх заміну. Зважаючи на це важливою проблемою є вдосконалення технологій ремонту пошкоджень в елементах із ПКМ та розробка інструментальних засобів для проведення ремонту при їх експлуатації.

### Аналіз методів ремонту

У роботі авторів [1] була проаналізована ефективність використання ПКМ у конструкціях ЛА. Аналіз різноманітних дефектів у армованих пластиках та дані про пошкодження елементів авіаційних конструкціях при їх експлуатації та випробуваннях наведені у монографії [2]. Класифікація дефектів по ступені пошкодження та методи ремонту пошкоджень у неметалевих конструкціях із заповнювачем розглянуті у роботі [3]. Аналіз експлуатаційних пошкоджень в елементах конструкцій з вуглепластика був представлений у попередній роботі авторів [4], який виявив що найбільш типовими з них є розшарування, пробіої та тріщини. Частота виникнення різних пошкоджень в елементах з вуглепластика

була наступною: пробіої 49%, тріщини 15,8% і розшарування 14,6%. У роботі [4] було показано, що типовими експлуатаційними пошкодженнями елементів конструкцій із такого ПКМ як склопластик є: розшарування зовнішнього шару, склотканини та стільникового наповнювача; пробіої; тріщини; вивітрювання та розм'якшення поверхневого шару. Основними причинами виникнення даних експлуатаційних пошкоджень були удари, пошкодження втоми, абразивний знос та недбала експлуатація. Оскільки пошкодження типу пробіої складають біля половини від усіх, то розробка нових технологічних методів їх ремонту даних пошкоджень є важливою практичною задачею.

Методи ремонту пробіої у конструкціях ЛА з ПКМ шляхом постановки ремонтних вставок представлені у огляді по технологіям ремонту елементів з ПКМ [5] та у роботі одного з авторів [6], для чого був розроблений спеціальний ремонтний комплект на основі універсального пневмоприводу з набором змінних технологічних насадок. Перед постановкою ремонтних вставок висвердлюється круглий отвір, який повністю перекриває пробію та пошкоджені краї, на краях отвору виконується скос або радіус в залежності від товщини матеріалу та рекомендованої технології ремонту, а потім в підготовлений отвір вставляється і закріплюється ремонтна вставка (рис. 1, а). Даний метод ремонту крізних пробіої досить швидко можуть бути реалізовані, але не забезпечує достатню міцність, тому можуть бути використані як тимчасовий ремонт. Для довготермінового ремонту може бути використаний метод постановки приформованих латок (рис. 1, б), особливістю постановки яких полягає у накладанні на пошкодження і на підготовлені поверхні навкруги пошкодження просочених шарів тканини, або преп-

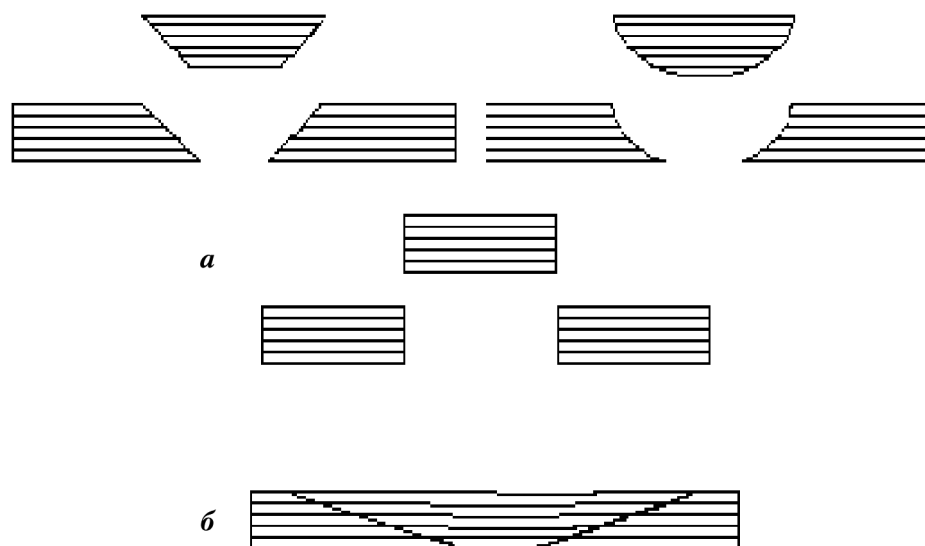


Рис. 1. Види підготовлених під ремонт поверхонь і ремонтних вставок (а) для них та метод ремонту шляхом постановки приформованої латки (б)

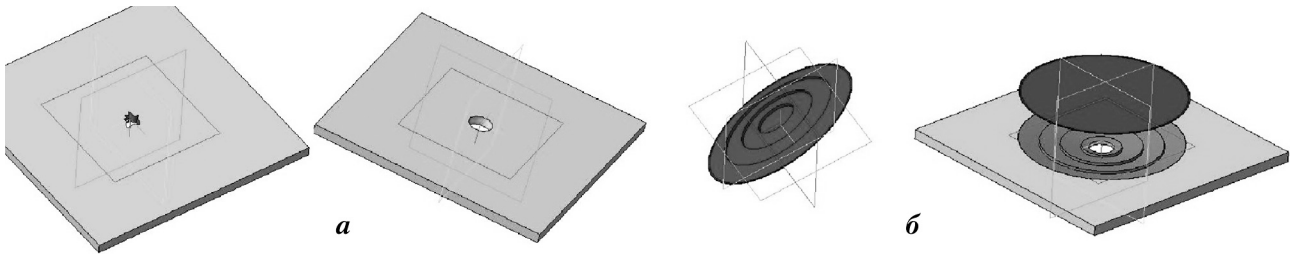


Рис. 2. Об'єкт досліджень пластина з пробоем та просвердленим отвором (а) та метод ремонту шляхом вклеювання ремонтної вставки (б)

рега. Підготовка поверхні навкруги місця для даного виду ремонту полягає у скошенні країв вирізу на заданий кут. Кут скошення за даними одних джерел складає  $7^\circ$  та  $1-3^\circ$  у роботі [7], а за даними інших надається у вигляді відношення ширини ділянки скосу до товщини ( $\delta$ ) і складає  $16 \pm 32 \delta$  і навіть  $100 \delta$  за інформацією [3]. Недолік даного методу полягає у складності виконання заданих скосів країв вирізу.

### Основна частина

Метою даної роботи є дослідження впливу форми поверхні полімерних композиційних матеріалів, яка готується під виконання ремонту, а також технології виконання ремонту (вставками чи приформованими латками). В якості об'єкту досліджень була вибрана пластина з пробоем підготовлена до виконання ремонту шляхом просвердлення отвору, який повністю вибирає пошкоджений матеріал (рис. 2, а). Ремонт даної пластини проводиться шляхом вклеювання ремонтної вставки у підготовлене відповідним чином заглиблення у пластині (рис. 2, б), або методом заповнення заглиблення просоченими шарами армованого пластика (приформування латки).

Зразки для аналізу та подальших досліджень вибиралися такими, щоб змодельовати пластину з пробоею та прийнятим ремонтним рішенням у найнебезпечнішому місці. Таким місцем є пробій, або отвір і тому для експериментальних досліджень вибираємо зразок у вигляді полоси завширшки 25 мм (приблизно 1 дюйм), яка практично повністю прослаблена пробоем або отвором. При реалізації ремонтних з'єднань можливі наступні конфігурації технологічних поверхонь зразків: стандартна; вогнута; сферична; ступінчаста та зубчастоступінчаста (рис. 3).

Виходячи з величини площі контакту пластин з різним профілем з ремонтними закладками, оптималь-

ним є останній варіант (рис. 3, д), оскільки площа контакту на цій пластинці є максимальною. Так само, при розриві така пластина матиме жорсткість вищу за інші варіанти за рахунок сходинок, які утворюють замок з сходинками закладки.

Для перевірки ефективності запропонованих методів реалізації ремонтних з'єднань були проведені експериментальні дослідження. Спочатку був відформований лист з склопластику розміром  $320 \times 630 \text{ мм}^2$  для виготовлення зразків. Даний лист був відформований з 12 шарів біаксіальної прошивної склотканини з питомою вагою  $450 \text{ г/м}^2$  з квазіізотропною схемою укладання  $[\pm 45/(0/90)_2/\pm 45/0/90/\pm 45]_2$ . Отриманий пакет методом інфузії у вакуумному мішку був просочений сумішшю епоксидної смоли Spolchemie Erodur 619 та отверджувача Spolchemie Telalit 0600 у пропорції 100:40. При цьому, у відповідності до рекомендацій до використаної смоли, був витриманий наступний режим термообробки – 24 години /  $25^\circ \text{C}$  + 15 годин /  $60^\circ \text{C}$ . Окремі етапи виготовлення пластини для зразків методом інфузії показані на (рис. 4).

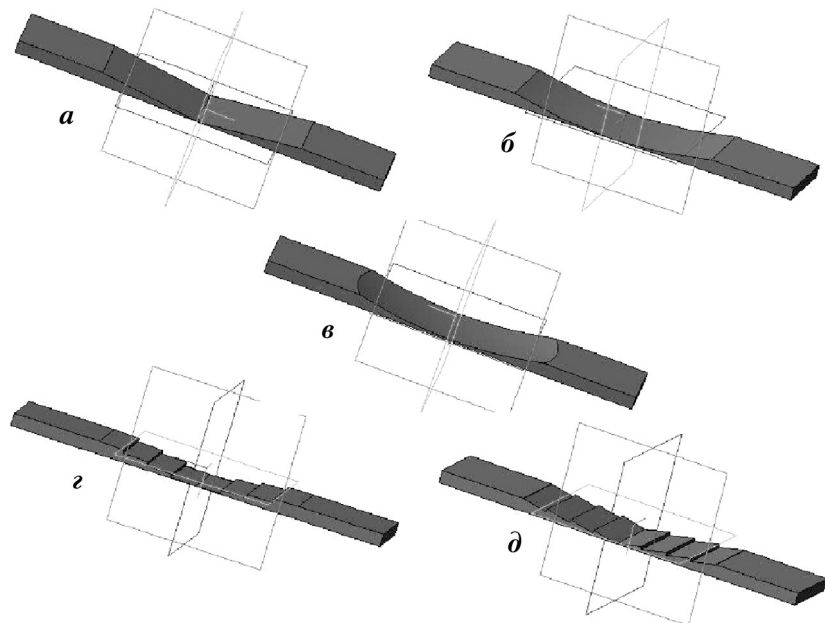


Рис. 3. Можливі конфігурація технологічної поверхні зразків: а – стандартна; б – вогнута; в – сферична; г – ступінчаста; д – зубчато-ступінчаста

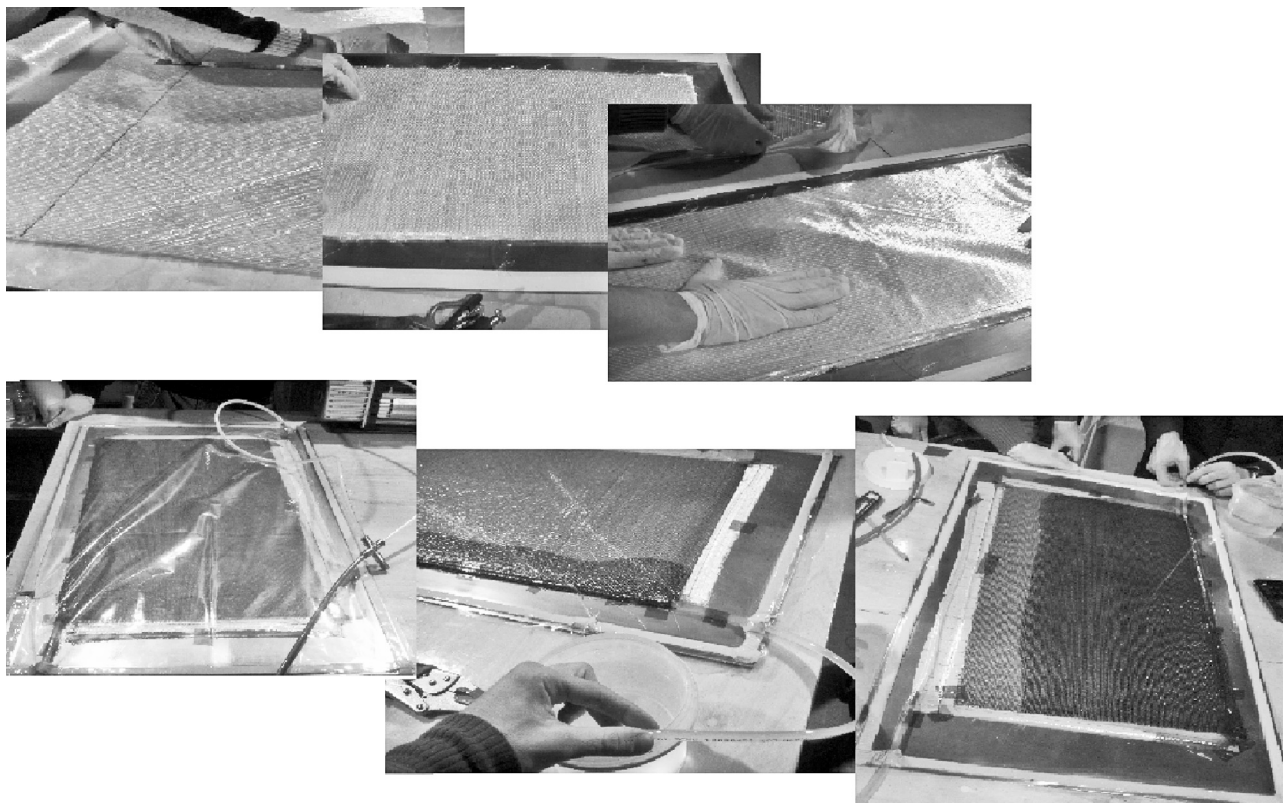


Рис. 4. Етапи виготовлення пластини для зразків методом інфузії

З отриманої пластини склопластику розміром  $320 \times 630 \text{ мм}^2$  були виготовлені зразки завширшки 25 мм та 10 мм шляхом різання у поперечному напрямку на спеціальній електричній установці кругом з алмазним напильником (рис. 5). Чотири зразки були випробувані на розтягання до розриву на розривній випробувальній машині Р-10 з метою визначення границі міцності  $\sigma_{и}$  ( $\sigma_{в}$ ). В результаті випробувань було отримано наступне середнє значення границі міцності  $\sigma_{и} = 347,5 \text{ МПа}$  (рис. 5). У подальших розрахунках дане значення буде прийнято за граничне напруження.

Подальші дослідження впливу форми поверхні на міцність ремонтних з'єднань проводились на зразках завширшки 25 мм, в яких були зроблені отвори діаметром 12 мм моделюючи розсвердлені пробії підготовлені для виконання ремонту (рис. 6, а). Далі були зроблені зразки 2 типів зі скошеними (конічними) та зубчато-ступінчастими поверхнями, причому останні призначені для двох варіантів з'єднання шляхом приформування, а також вклеюванням вставки (рис. 6, б). Зразки обробля-

лися ступінчастою і конусоподібною фрезами. Для виготовлення скошених та нахилених поверхонь була використана збірна фреза зі вставними різаль-

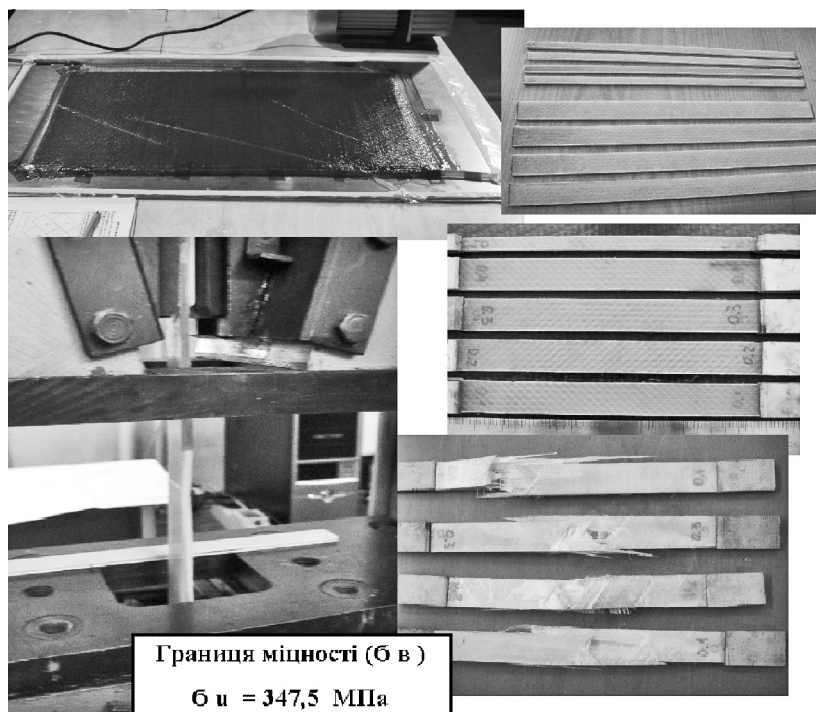
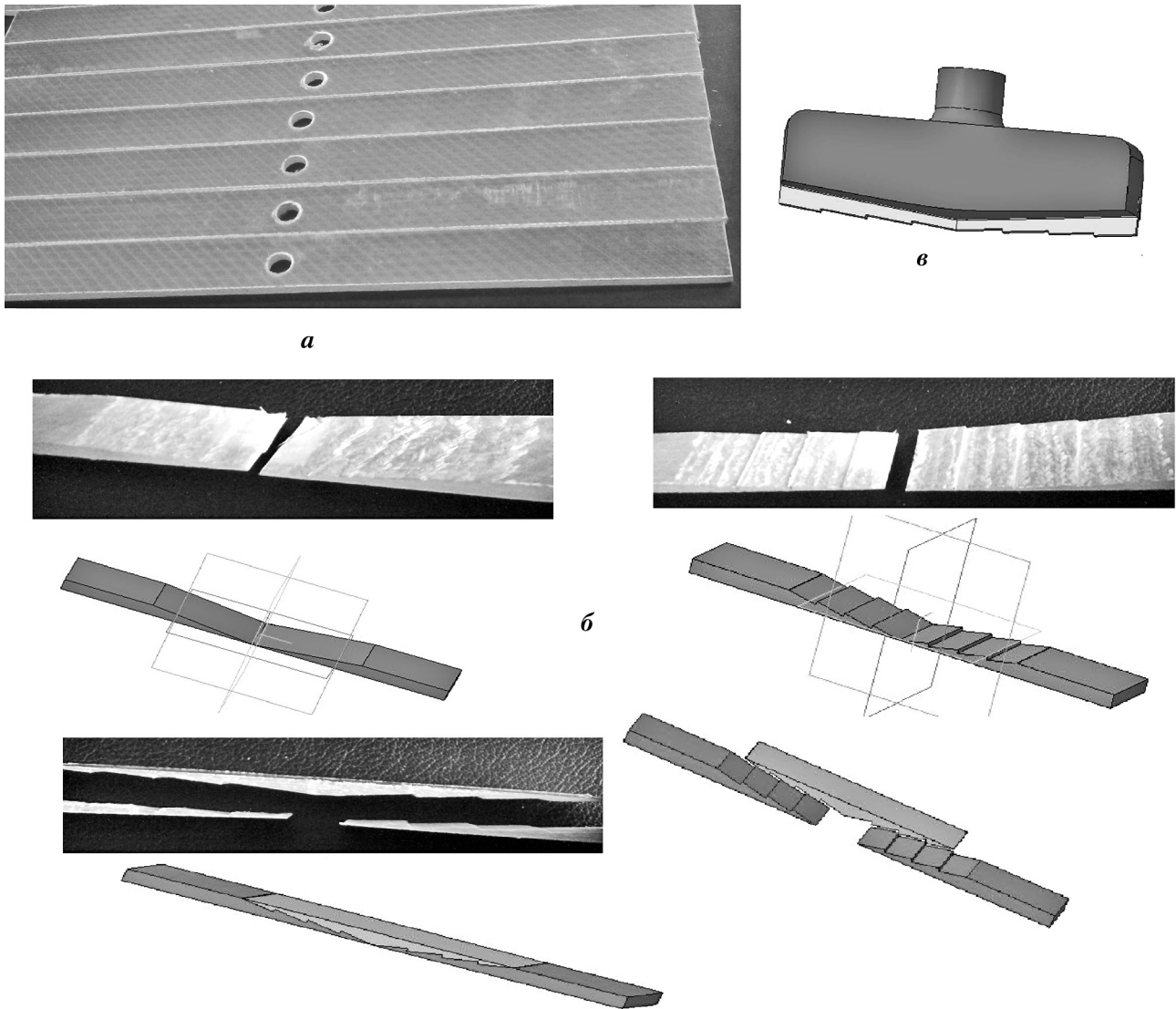


Рис. 5. Підготовлені зразки до і після випробувань на розтягання до розриву у випробувальній машині Р-10 шляхом вклеювання нъремонтної вставки (б)



**Рис. 6.** Підготовлені до різного типу ремонту зразки (а) та ремонтні вставки (б), а також збірна фреза зі вставними різальними пластинами (в)

ними пластинами і змінним кутом їх нахилу. Ріжучий елемент в зборі представлений на малюнку (рис. 6, в). Конструкція фрези дозволяє регулювати кут нахилу ріжучих елементів (пластин) від  $3^\circ$  до  $8^\circ$ . При виготовленні ремонтних вставок використовувалась також фреза, ріжуча поверхня елементів якої була спрофільована під поверхню вставки.

В усіх зразках була вибрана однакова довжина нахиленої частини пластини, яка дорівнювала 66 мм по довжині зразка, при цьому кут нахилу поверхні становив  $3,5^\circ$ , а відношення товщини зразка до довжини скошеної частини становило  $1/16$ . Дане вибране співвідношення є одним з мінімально рекомендованих, яке зустрічається у літературі. У ступінчастому зразку при довжині скошеної частини 66 мм кут нахилу поверхні складав  $6^\circ$ .

Ремонт пошкоджених пластин був змодельований з'єднанням двох половин зразків приформованими шарами такої ж самої біаксіальної прошивної

склотканини з аналогічною схемою укладання 12 попередньо просочених шарів, ширина яких змінювалася від 50 до 160 мм. Просочення шарів та вклеювання вставки проводилося сумішшю епоксидної смоли Spolchemie Epodur 619 та отверджувача Spolchemie Telalit 0600 у пропорції 100:40 з подальшим формуванням у вакуумному мішку із витриманням заданого температурного режиму (рис. 7, а). Після закінчення процесу формування і обрізання виступаючого за ширину пластин відформованого склопластикового матеріалу були наклеєні накладки для подальших випробувань пластин на розтягання (рис. 7, б).

### Результати досліджень

Випробування підготовлених зразків на розтягання до розриву (рис. 8, а) проводилося на випробувальній машині Р-10 з метою визначення граничного

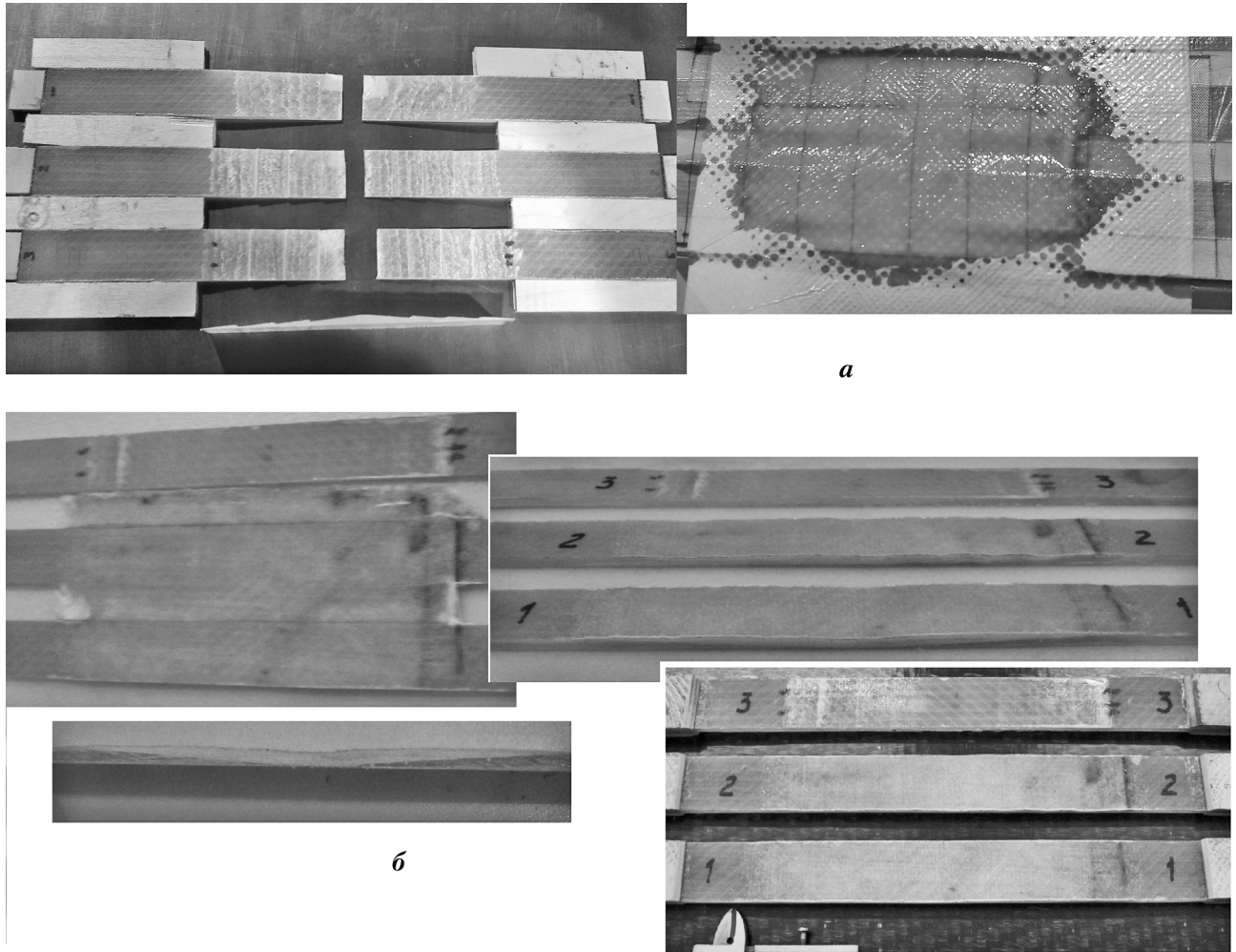


Рис. 7. Етапи виконання ремонтних з'єднань (а) та виготовлення зразків для випробувань (б)

напруження  $\sigma_{гр}$ , при якому відбувається повне руйнування ремонтного з'єднання, за наступною формулою:

$$\sigma_{гр} = P_{\max} / A_{\text{сер}}$$

де  $P_{\max}$  – руйнівне навантаження, а  $A_{\text{сер}}$  – середня площа поперечного перерізу зразка до виконання ремонтного з'єднання.

Після випробувань були отримані наступні значення граничних залишкових напружень: скошені поверхні та приформована латка  $\sigma_{гр} = 117,6$  МПа, що складає 33,84% від граничної міцності  $\sigma_{и}$ ; зубчато-ступінчасті поверхні та приформована латка  $\sigma_{гр} = 112,5$  МПа (32,34% від  $\sigma_{и}$ ); зубчато-ступінчасті поверхні та вклеєна вставка  $\sigma_{гр} = 92,46$  МПа (26,61% від  $\sigma_{и}$ ). Зразки до випробувань (рис. 8, а) та після їх проведення з отриманими результатами представлені на (рис. 8, б).

### Висновки

На основі аналізу експлуатаційних пошкоджень в елементах конструкцій літальних апаратів із полі-

мерних композиційних матеріалів виявлено, що найбільш типовими з них є розшарування, пробоїни та тріщини, причому в елементах з вуглепластика частота їх появи була наступною: пробоїни 49%, тріщини 15,8% і розшарування 14,6%.

Конструкція ремонтної поверхні визначається товщиною пошкодженого матеріалу. При товщині менше 8 мм сферичні поверхні недоцільно використовувати із-за складнощів конструювання спеціалізованого інструменту, оскільки при цьому кут в плані змінюється вздовж різальної кромки в кожній точці.

При геометричному аналізі площини контакту ремонтної поверхні виявлено, що ступінчаста поверхня має на 10 % більшу площину ніж конічна.

За результатами експериментальних досліджень було виявлено, що зубчато-ступінчасті та скошені (конічні) поверхні при імітації ремонту методом приформування ремонтних латок дають приблизно однакові (у межах похибки експерименту) дані залишкової граничної міцності, незважаючи на різницю у площі контакту.

Залишкова міцність зразка, який було відремонтовано вклеюванням зубчато-ступінчастої вставки

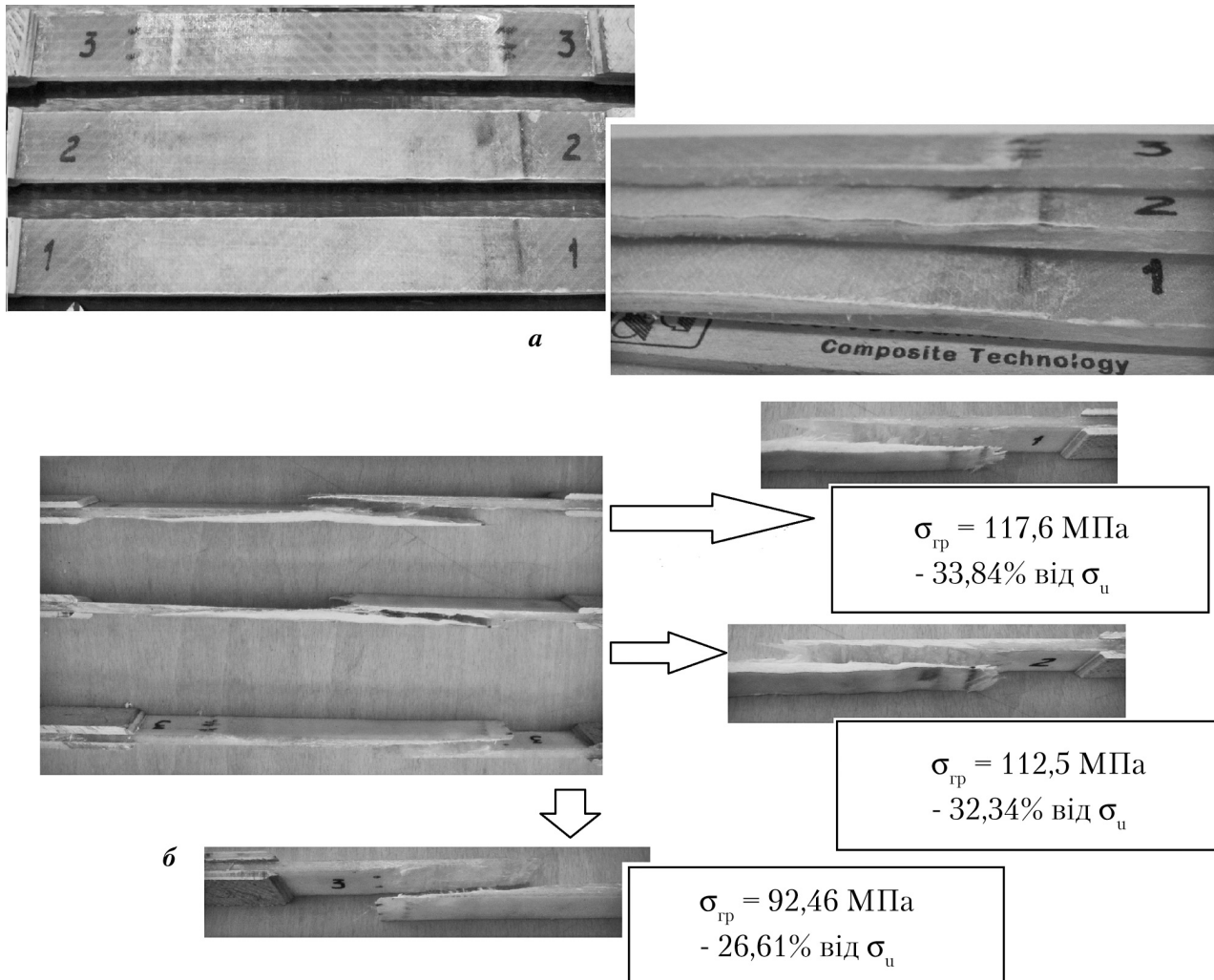


Рис. 8. Зразки до випробувань (а) та після їх проведення з отриманими результатами (б)

виявилась на 18% меншою від середньої залишкової міцності зразків відремонтованих шляхом приформування ремонтних латок.

Загальним є висновок, що під кожний тип пошкодження та матеріал треба підбирати необхідну технологію ремонту та інструментальне забезпечення.

### Література

- [1] Астанін В.В., Хоменко А.В., Шевченко О.А. Композиційні матеріали у конструкціях сучасних літальних апаратів. — К.-Вісник НАУ, №3, 2004. — С. 46-52.
- [2] Серенсен С.В., Зайцев Г.П. Несущая способность тонкостенных конструкций из армированных пластиков с дефектами. — Киев: Наук. Думка, 1982. — 296 с.
- [3] Панин В.Ф., Гладков Ю.А. Конструкции с наполнителем: Справочник. — М.: Машиностроение, 1991. — 272с.
- [4] Астанін В.В., Глоба О.В., Шевченко О.А. Експлуатаційні пошкодження елементів конструкцій літальних апаратів із композиційних матеріалів і методи їх ремонту. — К.-Технологічні системи, №4, 2011. — С. 46-52.
- [5] Карпусенко Б.Ф. Ремонт конструкций из композиционных материалов. Обзор.— В сб.: Техника, экономика, информация. Сер. «Техника и технология», 1985, вып.2. С. 28–33.
- [6] Глоба А.В. Ремонт виробів з листового композиційного матеріалу. Наука, техніка, виробництво. Експрес-новини.—К.: № 5-6.1999. С.17-19.
- [7] Технологические рекомендации ТР 1.4.1831 — 88. Ремонт сотовых клеевых конструкций из полимерных композиционных материалов. М.: НИИТ, 1984.183с.



Shevchenko O.A.<sup>1</sup>, Globa A.V.<sup>2</sup>, Polishchuk D. N.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> National Aviation University. Ukraine, Kiev

<sup>2</sup> National Technical university of Ukraine «Kyiv polytechnic institute». Ukraine, Kiev

## INFLUENCE OF TECHNOLOGICAL SURFACE TYPE ON STRENGTH OF POLYMERIC COMPOSITE MATERIALS REPAIR JOINTS

*Based on the analysis repair methods of the typical operational damage in aircraft structure elements of polymeric composite materials pursuant new type of shape technological surface to implement repair of holes is proposed. Experimentally investigated the influence of type of technological surface repair joints for strength polymeric composite materials and made appropriate conclusions.*

*Keywords: polymeric composite materials, repair, technological surface.*

### References

- [1] Astanin V.V., Homenko A.V., Shevchenko O.A. Kompozytsiyni materialy u konstruktsiyah suchasnyh litalnyh aparativ. – K. – Visnyk NAU, №3, 2004. – S. 46-52.
- [2] Serensen S.V., Zaytsev G.P. Nesushchaya sposobnost tonkostennyh konstruktsiy iz armirovanyh plastykov s defekta-my. – Kiev: Nauk. Dumka, 1982. – 296 s.
- [3] Panin V.F., Gladkov Yu.A. Konstruktsii s zapolnitelem: Spravochnik. – M.: Mashinostroenie, 1991. – 272s.
- [4] Astanin V.V., Globa O.V., Shevchenko O.A. Ekspluatatsiyni poshkodjennia elementiv konstruktsiy litalnyh aparativ iz kompozytsiynnyh materialiv i metody ih remontu. – K.-Tehnologichni sistemy, №4, 2011. – S. 46-52.
- [5] Korpusenko B.F. Remont konstruktsiy iz kompozitsionnyh materialov. Obzor. – V sb.: Tehnika, ekonomika, infopmatsiya. Ser. «Tehnika i tehnologiya», 1985, vyp.2. S. 28–33.
- [6] Globa O.V. Remont vyrobiv z listovogo kompozytsiynogo materialu. Nauka, tehnika, vyrobnytstvo. Ekspres-novyny.–K.: № 5-6.1999. S.17-19.
- [7] Tehnologicheskie rekomendatsiyi TR 1.4.1831 – 88. Remont sotovyh kleevykh konstruktsiy iz polimernykh kompozitsionnyh materialov. M.: NIAT, 1984.183s.