

Відновлення несучої здатності склопластикового облєтєння авіаційних балонів для зберігання рідин, стиснутих газів та вогнегасних складових

Р. В. Качмар¹ • Г. О. Кривов² • Б. С. Карпінос • Д. М. Єрмолін¹ •
В. А. Матвієнко² • М. М. Кайнов²

Received: 23 April 2021 / Accepted: 24 May 2021

Анотація. У статті запропоновано методику чисельних досліджень напруженого стану (НС) авіаційних балонів для зберігання рідин, стиснутих газів та вогнегасних складових з метою визначення конструктивно-технологічних параметрів (КТП) ремонту дефектів їх склопластикового облєтєння (СО) внаслідок тривалої експлуатації та механічних пошкоджень. На прикладах чисельного дослідження НС балонів циліндричної та кулеподібної форм визначено КТП ремонту їх СО із застосуванням склопластикових бандажів та накладок зі склотканини.

Конструктивно-технологічні параметри ремонту СО балонів, які визначаються згідно з розробленою методикою, дозволяють обрати для ремонту сучасні матеріали та засоби технологічного оснащення.

Ключові слова: авіаційний балон; несуча здатність; склопластикове облєтєння; чисельне дослідження; напружений стан; ремонт; склопластиковий бандаж; склотканина; накладка; конструктивно-технологічний параметр.

Вступ

У складі конструкцій літаків та вертольотів багатьох типів цивільної та державної авіації України експлуатуються балони високого тиску для зберігання рідин, стиснутих газів та вогнегасних складових.

Вагому частку з них складають балони з $P_{раб} = 15\text{--}25$ МПа. Відповідно до [1, 2] балони мають бути безосколковими, що забезпечується намотуванням на зовнішні поверхні балонів СО.

Як свідчить досвід і результати досліджень, експлуатація балонів супроводжується деградацією механічних властивостей СО внаслідок впливу кліматичних чинників [3] та механічних пошкоджень, які відображені на рис. 1.

Враховуючи відсутність в Україні виробництва таких балонів, одним з основних напрямків подовження терміну їх безпечної експлуатації є відновлення несучої здатності СО шляхом ремонту.

Нижче наведено результати розробки методики визначення КТП ремонту СО.

1. Характеристика НС балону з СО

Окремі аспекти ремонту конструкцій з полімерно-композиційних матеріалів (ПКМ), у тому числі СО об'єктів обертання, наведено у [4–6]. Найбільш широко питання визначення напруженого стану та ремонту зазначених об'єктів шляхом накладення бандажів з ПКМ описані у [7–12].

Зазвичай, значення експлуатаційних напружень корпусів та СО балонів не перевищують показників межі текучості та міцності матеріалів і визначається їх пружним деформуванням. Значення коефіцієнту запасу міцності відповідає нормативному показнику та становить близько двох.

Наведений на рис. 2 графік визначає залежність деформацій від напружень в складових балону:

– пряма 1 графіку характеризує залежність деформацій від напружень у металевому корпусі балону, де точка:

– M_c характеризує значення напруження

σ_{M-c} та деформації ϵ_{M-c} корпусу балона без СО;

– M_o – значення напруження σ_{M_o} та деформації ϵ_{M_o} корпусу балона з СО;

✉ Р. В. Качмар
krv1958ua@gmail.com

¹ ДП “Львівський державний авіаційно-ремонтний завод”, Львів, Україна

² АТ “УкрНДІАТПАТ, Київ, Україна



Рис. 1. Типові механічні експлуатаційні пошкодження СО балонів циліндричної та кулеподібної форм

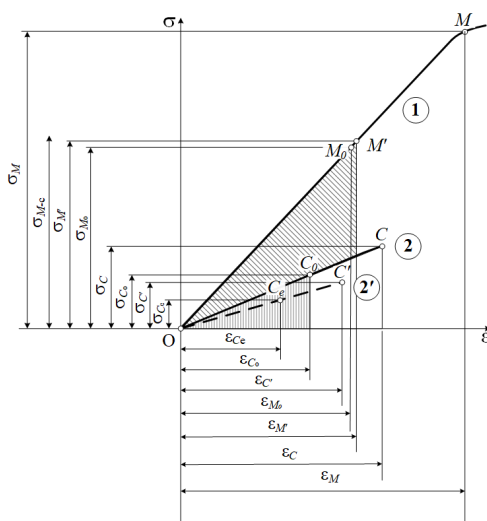


Рис. 2. Характер змін НС балону з СО

– M – межу текучості матеріалу корпусу балона з СО, що визначається значеннями напруження σ_M та деформації ϵ_M ;

– M' – межу текучості матеріалу корпусу балона з СО на термін від початку експлуатації, що визначається значеннями напруження $\sigma_{M'}$ та деформацією $\epsilon_{M'}$;

– прямі 2 та 2' характеризують залежність деформацій від напружень у СО балона, де точка:

– C_o – значення напруження σ_{C_o} та деформації ϵ_{C_o} СО балона на початку експлуатації;

– C_e – значення напруження σ_{C_e} та

– деформації ϵ_{C_e} СО балона на час від початку експлуатації;

– C – межу міцності СО балона на початку експлуатації, що визначається значеннями напруження σ_C та деформацією ϵ_C ;

– C' – межу міцності СО балона на термін від початку експлуатації, що визначається значеннями напруження $\sigma_{C'}$ та деформацією $\epsilon_{C'}$.

Відновлення несучої здатності СО балону забезпечується за умов:

– повернення напруженого стану СО балону в найбільш небезпечній зоні до напруженого стану СО на початку експлуатації:

$$\sigma_{M'} \geq \sigma_M, \quad (1)$$

де: σ_M – значення експлуатаційних напружень в найбільш небезпечній зоні балону, σ_{M_o} – σ значення напружень на початку експлуатації;

– компенсації зменшення СО балону внаслідок руйнування, що має такий вид:

$$\left(\frac{\sigma_C^2 - \sigma_{C_o}^2}{2E} \right) \leq \left(\frac{\sigma_{C'}^2 - \sigma_{C_e}^2}{2E_C} \right) \xi_1 + \left(\frac{\sigma_{C^k}^2 - \sigma_{C_e^k}^2}{2E_k} \right) \xi_2, \quad (2)$$

де E , E_C , E_k – модулі пружності матеріалів корпусу, СО балону та склопластикового бандажу або накладки зі склотканини, відповідно; $\sigma_{C_e^k}$, σ_{C^k} – експлуатаційні та граничні напруження у склопластиковому бандажі або накладці зі склотканини; ξ_1 , ξ_2 – відносні характеристики перерізів СО та склопластикового бандажу або накладки зі склотканини, відповідно, сума значень яких дорівнює одиниці.

2. Вихідні положення для розробки методики чисельного моделювання НС балонів з СО

Ці положення передбачають, що:

– основна мета ремонту СО балону є відновлення несучої здатності СО до початкового стану;

– умова експлуатаційної працездатності балону з СО є не перевищення поточних параметрів міцності регламентованої межі;

– рівень напружень від робочого тиску в балоні не повинен перевищувати межі текучості матеріалу балону;

– енергію руйнування балону від впливу зовнішнього чинника має поглинати СО;

– на початку експлуатації балону зазначені вище умови забезпечуються конструктивно-технологічними рішеннями, які прийняті на етапах проектування та виготовлення балону.

Розроблена методика моделювання та дослідження НС конструкції балону з СО передбачає послідовне виконання таких типових завдань:

– визначення механічних характеристик і властивостей кожного матеріалу;

– побудова комп'ютерних моделей окремих частин балону та їх поєднань;

– формування та оптимізація сітки скінченних елементів,

– визначення умов закріплення та навантаження;

– чисельні дослідження та аналіз їх результатів.

Практичне застосування цієї методики з урахуванням [13, 14] для визначення КТП ремонту дефектів СО балонів продемонстровано нижче, на прикладах моделювання та дослідження НС конструкцій балонів циліндричної та кулеподібної форм.

3. Послідовність процедур моделювання та аналізу НС балону циліндричної форми з СО в експлуатаційних умовах

3.1 Вихідні дані для проведення моделювання та аналізу НС балону циліндричної форми з СО

Прийняті для дослідження конструктивні параметри та механічні характеристики матеріалів корпусу та СО балону циліндричної форми наведені у таблицях 1 та 2, відповідно.

3.2 Визначення параметрів НС балону циліндричної форми з СО на початку експлуатації

Моделювання НС балону циліндричної форми з СО проведено стосовно його восьмої частини з відповідними умовами симетрії на поверхнях розрізів. Комп'ютерні моделі балону циліндричної форми з СО та його восьмої частини наведені на рис. 3.

За результатами моделювання НС балону циліндричної форми з СО на початку експлуатації максимальні значення напружень на внутрішній та зовнішній поверхнях сталевго корпусу балону становлять 420 МПа та 380 МПа, відповідно, що не перевищує межі плинності матеріалу корпусу балону. Напруження на внутрішній та зовнішній поверхнях СО балону становлять 85 МПа та 75 МПа, відповідно. Розподіл за віссю X інтенсивності напружень на поверхнях корпусу та СО балону циліндричної форми на початку експлуатації відображено на рис. 4. Наведені параметри НС балону циліндричної форми з СО прийняті такими, що відповідають його стану на початку експлуатації.

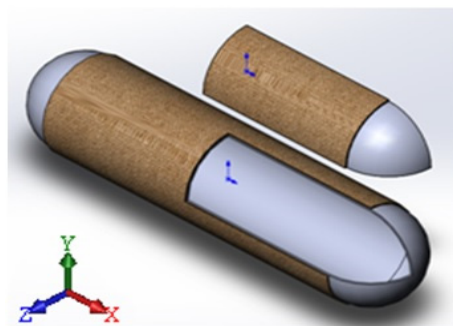


Рис. 3. Комп'ютерна модель балону циліндричної форми з СО та його восьмої частини

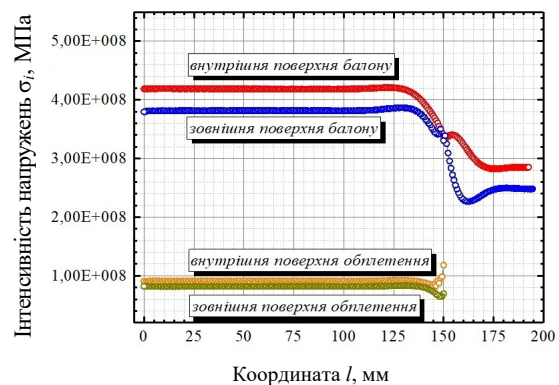


Рис. 4. Розподіл за віссю X інтенсивності напружень на поверхнях корпусу та СО балону циліндричної форми на початку експлуатації

Таблиця 1. Конструктивні параметри балону циліндричної форми з СО

Робочий тиск, МПа	Довжина, мм	Внутрішній діаметр балону, мм	Зовнішній діаметр балону без СО, мм	Зовнішній діаметр балону з СО, мм
25	400	85	89	92

Таблиця 2. Механічні характеристики матеріалів корпусу та СО балону циліндричної форми

Модуль пружності корпусу балону, МПа	Межа плинності матеріалу корпусу балону, МПа	Межа міцності матеріалу корпусу балону, МПа	Відносне видовження після розриву	Модуль пружності СО балону, МПа	Межа міцності СО балону на згин, МПа
208000	750	950	0,5	50000	950

3.3 Визначення впливу кліматичних умов та терміну експлуатації балону циліндричної форми на механічні властивості СО

Зважаючи на дані, наведені у [3], вплив кліматичних умов в процесі експлуатації балону циліндричної форми понад 10 років призводить до зниження модуля пружності СО на 20 %. Внаслідок цього підвищується рівень напружень в балоні циліндричної форми з СО, що призводить до погіршення несучої здатності обплетення. З огляду на це, зниження межі міцності СО балону циліндричної форми після 10 років експлуатації також прийнято на рівні 20 %, порівняно з аналогічним показником на початку експлуатації.

3.4 Визначення мінімальної товщини склопластикового бандажу для компенсації погіршення механічних властивостей СО балону циліндричної форми внаслідок впливу кліматичних умов в процесі експлуатації

Для компенсації погіршення вищезазначених властивостей на СО балону циліндричної форми змодельоване намотування на СО склопластикового бандажу, комп'ютерна модель якого зображена на рис. 5. Матеріал склопластикового бандажу прийнято аналогічним наведеному у таблиці 1.

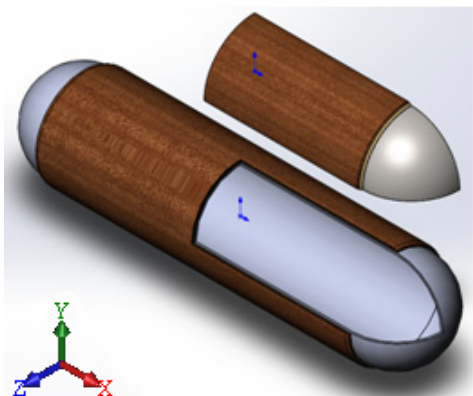


Рис. 5. Комп'ютерна модель балону циліндричної форми та його восьмої частини з намотаним склопластиковим бандажем

Мінімальна товщина склопластикового бандажу змінювалась у діапазоні від 0,2 мм до 1 мм з урахуванням виконання умов визначених (1) та (2). Виконання (1) досягається намотуванням на СО балону циліндричної форми склопластикового бандажу товщиною 0,3 мм. Виконання (1) і (2) досягається намотуванням на СО балону циліндричної форми склопластикового бандажу товщиною 0,4 мм, яку прийнято як товщину склопластикового бандажу для компенсації негативних наслідків впливу кліматичних умов в процесі експлуатації балону циліндричної форми з СО понад 10 років. Застосування склопластикового бандажу товщиною 0,4 мм дозволяє зменшити рівень напружень на внутрішній поверхні сталевго корпусу

балону до 412 МПа. Розподіл за віссю X інтенсивності напружень на поверхнях балону циліндричної форми з намотаним склопластиковим бандажем відображено на рис. 6.

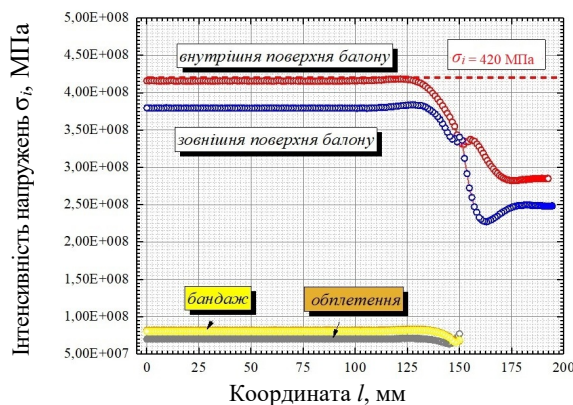


Рис. 6. Розподіл за віссю X інтенсивності напружень на поверхнях балону циліндричної форми з намотаним склопластиковим бандажем

3.5 Вихідні дані щодо параметрів механічного пошкодження СО балону циліндричної форми

З метою визначення мінімальної товщини склопластикового бандажу для компенсації негативного впливу дефектів СО на НС балону циліндричної форми внаслідок тривалої експлуатації та механічного пошкодження прийняті такі розміри пошкодження: глибина – 1,5 мм; ширина – 12 мм; довжина – 100 мм. Для забезпечення коректності результатів розрахунку в зоні механічного пошкодження проведено додаткову дискретизацію сітки скінченних елементів. Комп'ютерна модель восьмої частини балону циліндричної форми з механічним пошкодженням СО та склопластиковим бандажем відображена на рис. 7.

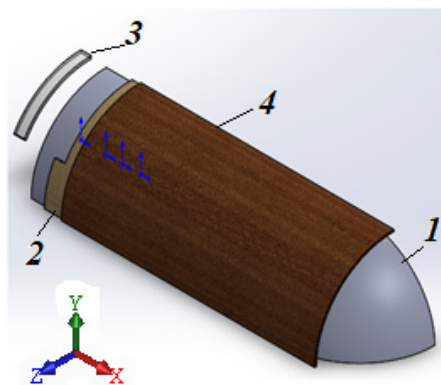


Рис. 7. Комп'ютерна модель восьмої частини балону циліндричної форми з механічним пошкодженням СО та склопластиковим бандажем: 1 – сталевий корпус; 2 – СО з механічним пошкодженням; 3 – шар клею; 4 – склопластиковий бандаж

3.6 Визначення характеру впливу тривалої (понад 10 років) експлуатації та механічного пошкодження СО на НС балону циліндричної форми

Результати розрахунків засвідчили негативний вплив тривалої (понад 10 років) експлуатації та механічного пошкодження СО на НС балону циліндричної форми. Підтвердженням цього є зростання до 525 МПа значення максимального напруження на зовнішній поверхні балону в зоні пошкодження, що на чверть перевищує аналогічний показник на початку експлуатації. Розподіл за віссю X інтенсивності напружень на поверхнях балону циліндричної форми з механічним експлуатаційним пошкодженням СО відображено на рис. 8.

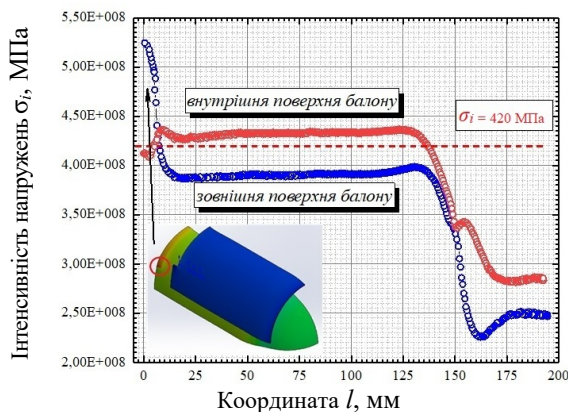


Рис. 8. Розподіл за віссю X інтенсивності напружень на поверхнях балону циліндричної форми з механічним пошкодженням СО

3.7 Визначення мінімальної товщини склопластикового бандажу для компенсації впливу тривалої (понад 10 років) експлуатації та механічного пошкодження СО балону циліндричної форми.

За підсумками розрахунків, мінімальна товщина склопластикового бандажу для компенсації згаданих дефектів СО балону циліндричної форми має становити 1 мм.

Проведений порівняльний аналіз можливих методів відновлення несучої здатності СО балонів циліндричної форми дають підстави вважати намотування склопластикових бандажів основною технологією ремонту дефектів обплетення. Підтверджуючим прикладом наведеного є розподіл за віссю X інтенсивності напружень на поверхнях балону циліндричної форми з механічним експлуатаційним пошкодженням СО та склопластиковим бандажем, що відображено на рис. 9.

- зусилля натягу склоплетки;
- характеристики матеріалу сполучника;
- частота обертання шпинделю намотувального верстата;
- кількість намотувальних шарів склоплетки;
- швидкість повздовжньої подачі механізму намотування;

- характеристики клею для заповнення механічних експлуатаційних пошкоджень;
- режими полімеризації клею.

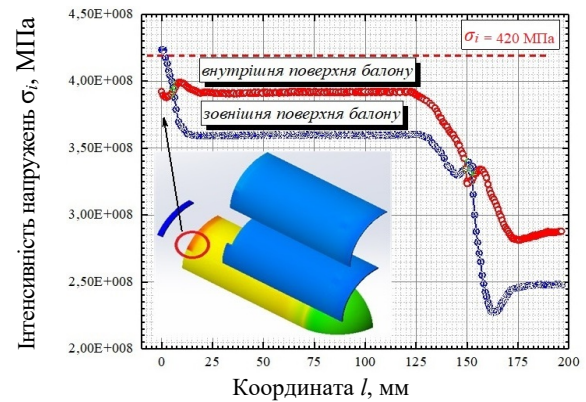


Рис. 9. Розподіл за віссю X інтенсивності напружень на поверхнях балону циліндричної форми з механічним експлуатаційним пошкодженням та склопластиковим бандажем

4. Послідовність процедур моделювання та аналізу НС балону кулеподібної форми з СО в експлуатаційних умовах

4.1 Вихідні дані для проведення моделювання НС балону кулеподібної форми з СО

Прийняті для дослідження конструктивні параметри балону кулеподібної форми з СО наведені у таблиці 3. Матеріали корпусу та СО балону кулеподібної форми прийняті аналогічними матеріалам з яких виготовленні корпус та СО балона циліндричної форми, механічні характеристики яких наведено у таблиці 2.

Таблиця 3. Конструктивні параметри балона кулеподібної форми з СО

Робочий тиск, МПа	Внутрішній діаметр балону, мм	Зовнішній діаметр балону без СО, мм	Зовнішній діаметр балону з СО, мм
21	170	174	177

4.2 Визначення параметрів НС балону кулеподібної форми з СО на початку експлуатації

Моделювання НС балону кулеподібної форми з СО проведено стосовно його восьмої частини з відповідними умовами симетрії на поверхнях розрізів, комп'ютерні моделі яких наведено на рис. 10.

За результатами моделювання НС балону кулеподібної форми з СО на початку експлуатації максимальні значення напружень на внутрішній та зовнішній поверхнях сталевій стінці балону становлять 405 МПа та 380 МПа, відповідно. Це не перевищує межі плинності матеріалу корпусу балону. Напружен-

ня на внутрішній та зовнішній поверхнях СО балону становлять 85 МПа та 77 МПа, відповідно. Розподіл за віссю X інтенсивності напружень на поверхнях сталевого корпусу та СО балону кулеподібної форми на початку експлуатації відображено на рис. 11. Наведені параметри НС балону кулеподібної форми з СО прийняті такими, що відповідають його стану на початку експлуатації.

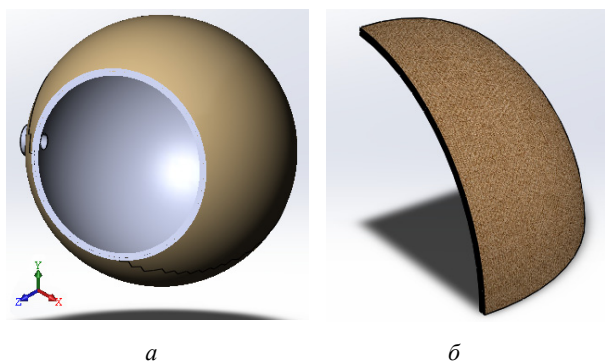


Рис. 10. Комп'ютерні моделі балону кулеподібної форми з СО (а) та його восьмої частини (б)

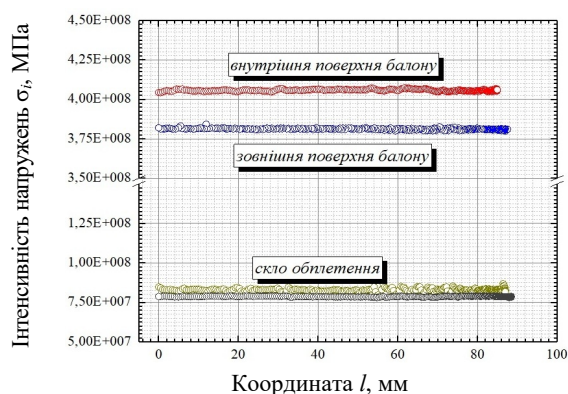


Рис. 11. Розподіл за віссю X інтенсивності напружень на поверхнях сталевому корпусу та СО балону кулеподібної форми на початку експлуатації

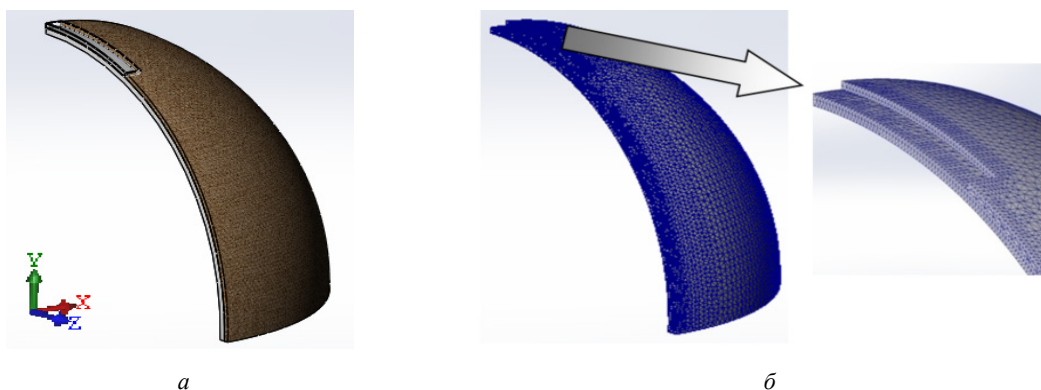


Рис. 12. Комп'ютерні моделі восьмих частин балону кулеподібної форми з механічним пошкодженням СО (а) та додатковою дискретизацією сітки скінченних елементів у зоні пошкодження СО (б)

4.3 Визначення впливу кліматичних умов та терміну експлуатації балону кулеподібної форми на механічні властивості СО

Зниження модуля пружності СО балону кулеподібної форми після 10 років експлуатації прийнято, як наведено у пп. 2.3, на рівні 20 % у порівнянні з аналогічним показником на початку експлуатації.

4.4 Визначення мінімальної товщини накладки зі склотканини для компенсації погіршення механічних властивостей СО балону кулеподібної форми внаслідок впливу кліматичних умов в процесі експлуатації

Для компенсації погіршення вищезазначених властивостей на СО балону кулеподібної форми змодельоване встановлення на СО накладки зі склотканини, модуль пружності матеріалу якої складає 29000 МПа, а межа міцності – 550 МПа.

Мінімальна товщина накладки зі склотканини змінювалась у діапазоні від 0,2 мм до 1 мм з урахуванням виконання (1) та (2). За результатами чисельного дослідження встановлено, що відновлення несучої здатності СО балону досягається за умов товщині накладки зі склотканини у 0,6 мм. З огляду на товщину шару вибраної склотканини у 0,9 мм, встановлення на балон накладки з цієї склотканини дозволило компенсувати погіршення механічних властивостей СО внаслідок впливу кліматичних умов в процесі експлуатації та забезпечити посилення міцності конструкції.

4.5. Вихідні дані щодо параметрів механічного пошкодження СО балону кулеподібної форми

З метою визначення мінімальної товщини накладки зі склотканини для компенсації негативного впливу дефектів СО балону внаслідок тривалої (понад 10 років) експлуатації та механічного пошкодження, розміри якого прийняті аналогічними параметрам пошкодження СО балону циліндричної форми. Для забезпечення коректності результатів розрахунку в зоні пошкодження проведено додаткову дискретизацію сітки скінченних елементів. Комп'ютерні моделі восьмих частин балону кулеподібної форми з механічним пошкодженням СО та додатковою дискретизацією на скінченні елементи у зоні цього пошкодження відображені на рис. 12.

4.6 Визначення характеру впливу тривалої (понад 10 років) експлуатації та механічного пошкодження СО на НС балону кулеподібної форми

Результати розрахунків засвідчили негативний вплив тривалої (понад 10 років) експлуатації та механічного пошкодження СО на НС балону кулеподібної форми. Це підтверджується зростанням до 550 МПа значення максимального напруження на зовнішній поверхні балону в зоні пошкодження, що більш ніж на третину перевищує аналогічний показник на початку експлуатації. Розподіл за осями X та Y інтенсивності напружень на поверхнях балону кулеподібної форми з механічним пошкодженням СО відображено на рис. 13 і 14, відповідно.

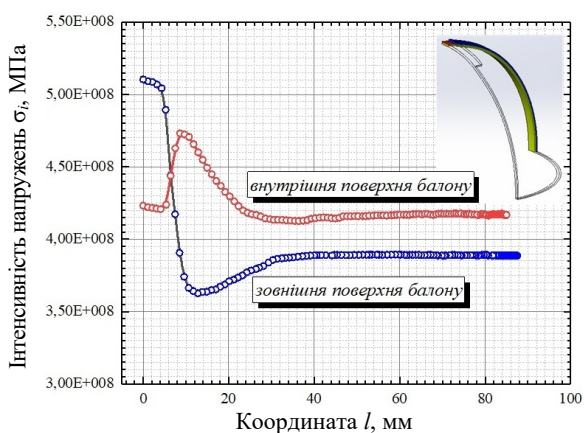


Рис. 13. Розподіл за віссю X інтенсивності напружень на поверхнях балону кулеподібної форми з механічним пошкодженням СО

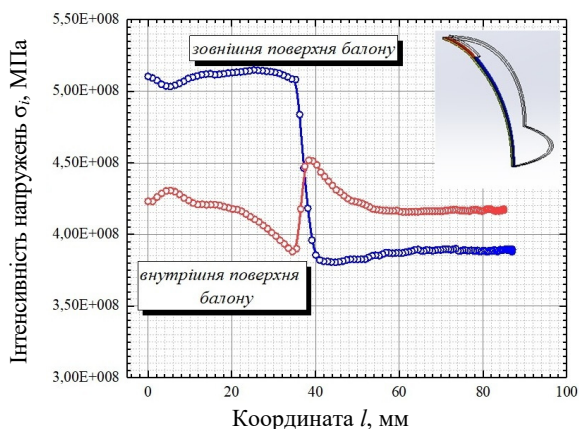


Рис. 14. Розподіл за віссю Y інтенсивності напружень на поверхнях балону кулеподібної форми з механічним пошкодженням СО

4.7. Визначення мінімальної товщини накладки зі склотканини для компенсації впливу тривалої (понад 10 років) експлуатації та механічного пошкодження СО балону кулеподібної форми

Мінімальна товщина накладки змінювалась у діапазоні від 0,6 мм до 3 мм з урахуванням виконання (1) та (2). За підсумками розрахунків встановлено, що відновлення несучої здатності СО балону досягається за умов загальної товщини накладки зі склотканини у 2,4 мм. З огляду на товщину шару склотканини у 0,9 мм, встановлення трьох накладок з цієї склотканини на балон дозволяє відновити несучу здатність СО балону та забезпечити посилення міцності конструкції. З метою забезпечення рівномірного розподілення концентрації напружень шари склотканини накладок зміщені на кут у 30° один від одного. Комп'ютерні моделі восьми частин сталевго корпусу балона кулеподібної форми з механічним пошкодженням СО та трьох накладок зі склотканини відображені на рис. 15.

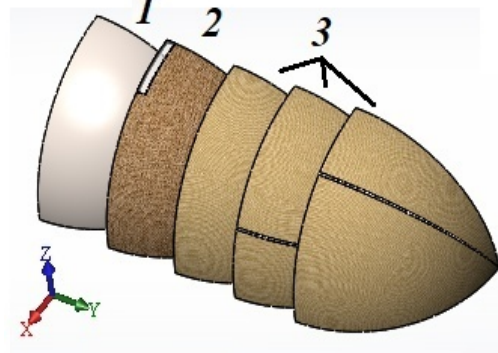


Рис. 15. Комп'ютерні моделі восьми частин сталевго корпусу балону кулеподібної форми з механічним пошкодженням СО та трьох накладок зі склотканини: 1 – сталевий корпус; 2 – СО з механічним пошкодженням; 3 – накладки зі склотканини

Результати проведеного порівняльного аналізу можливих методів відновлення несучої здатності СО балонів кулеподібної форми дають підстави вважати встановлення накладок зі склотканини основною технологією ремонту дефектів СО балонів кулеподібної форми. Підтверджуючим прикладом наведеного є розподіл за осями X та Y інтенсивності напружень на поверхнях балону кулеподібної форми з механічним пошкодженням СО та трьома накладками зі склотканини, що відображено на рис. 16 та 17, відповідно.

Результати моделювання НС балону кулеподібної форми, який експлуатувався тривалий час та має механічні експлуатаційні пошкодження СО свідчать про те, що несуча здатність СО балону може бути відновлена до стану на початку експлуатації методом встановлення на балон накладок зі склотканини. КТП ремонту СО балону включають такі дані:

- характеристики матеріалу склотканини;
- кількість накладок зі склотканини;
- характеристика клею для заповнення механічних пошкоджень;
- режими полімеризації клею.

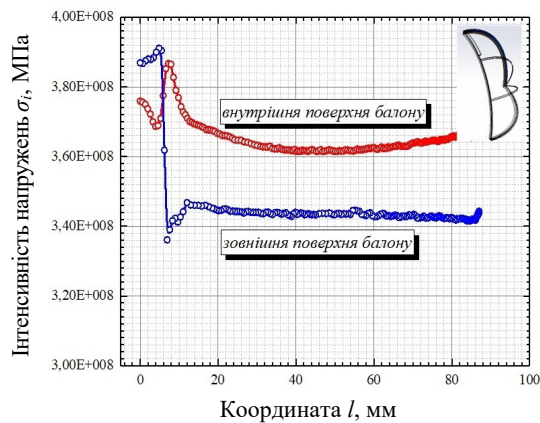


Рис. 16. Розподіл за віссю X інтенсивності напружень на поверхнях балону кулеподібної форми з механічним пошкодженням СО та трьома накладками зі склотканини

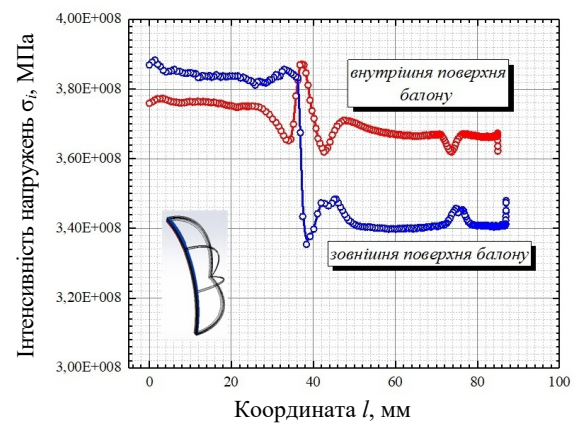


Рис. 17. Розподіл за віссю Y інтенсивності напружень на поверхнях балону кулеподібної форми з механічним пошкодженням СО та трьома накладками зі склотканини

Висновки

За результатами апробації методики на прикладах балонів, які експлуатувалися у складі конструкцій літаків і вертольотів багатьох типів цивільної та державної

авіації України, отримана інформація, яка дозволяє створити засоби технологічного оснащення та розробити технології відновлення балонів в умовах авіаремонтних підприємств України.

Reference

- [1] Branch Standard [Otraslevoi Standart, OST] OST 1 03749-74. Cylinders with $p_w = 21$ МПа (210 kgf/cm²) Types and main parameters, technical requirements, 1974.
- [2] Branch Standard [Otraslevoi Standart, OST] OST 1 03607-72. Cylinders with $p_w = 15$ МПа (150 кгс/см²) Types and main parameters, technical requirements, 1972.
- [3] E.N. Kablov, V.O. Startsev, "A systematic analysis of the influence of climate on the mechanical properties of polymer composite materials according to the data of domestic and foreign sources (review)", *Aviation materials and technologies*, Vol. 51, No. 2, pp. 47–58, 2018. <https://doi.org/10.18577/2071-9140-2018-0-2-47-58>
- [4] C.P. Andrasic, A.P. Parker, "Dimensionless stress intensity factors for cracked thick cylinders under polynomial crack-face loading", *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 19, Issue 1, pp. 187–193, 1984. <https://doi.org/10.20535/2521-1943.2020.0.219224>
- [5] D.A. Beschtnikov, G.I. Lvov, "Contact interaction of a pipe with the repair wrap from a composite material", *Bulletin of the National technical university "Kharkiv polytechnic institute"*, Vol. 973, No. 67, pp. 19–25, 2012.
- [6] R.V. Kachmar, D.M. Jermolin, G.A. Kryvov *et al.*, "Updating of technological base of repair of components from polymer composite materials of airframe", *Mechanics and Advanced Technologies*, Vol. 90, No. 3, pp. 57–63, 2020.
- [7] L.S. Shlapak, M.P. Linchevsky, V.O. Sarkisov, "Banding of pipelines as one of the ways to reduce of hoop stressed conditions", *Scientific Bulletin of Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas*. Vol. 28, No. 2, pp. 36–39, 2011.
- [8] Y.I. Matveev, A.N. Monoshkov, V.A. Luzhin *et al.*, "Determination ultimate pressure for banding pipes", *Pipeline construction*, No. 12, pp. 18–20, 1970.
- [9] A.I. Smirnov, "Effectiveness of banding pipes and cylindrical shells", *Strength of Materials*, Vol. 15, No. 12, pp. 77–79, 1983. <https://doi.org/10.1007/BF01523160>
- [10] V.Yu. Zavarukhin, A.A. Ostsemin, "Computing the limiting state of banded pipes", *Strength of Materials*, Vol. 22, No. 1, pp. 95–102, 1990. <https://doi.org/10.1007/BF00774987>
- [11] A.M. Naida, "Technology of repair of pipelines by wraps from polymer composite materials", *Prospecting and Development of Oil and Gas Fields*, Vol. 261, No. 1, pp. 25–29, 2008.
- [12] A.A. Lyapin, M.I. Chebakov, A. Dumitrescu *et al.*, "Finite-element modeling of a damaged pipeline repaired using the wrap of a composite material", *Mechanics of Composite Materials*, Vol. 51, No. 3, pp. 473–482, 2015. <https://doi.org/10.1007/s11029-015-9504-9>

- [13] D.V. Egorov, D.F. Balyakov, N.N. Shirokova, "Features of finite element modeling of products from composite materials in space technology, Actual problems of aviation and astronautics" in. *Abstracts of the X All-Russian scientific-practical conference of creative youth*, Krasnoyarsk, April 8–12, 2014, in 2 volumes, Vol. 1, pp. 27–28.
- [14] B.S. Karpinos, P.P. Kovel, V.M. Kulish *et al.*, "Modeling of helicopter rotor blade stress state with dangerous defects on it", *Collection of scientific works of State research institute of aviation*, No. 11. pp. 172–181, 2015.

Восстановление несущей способности стеклопластиковой оплетки авиационных баллонов для хранения жидкостей, сжатых газов и огнетушащих составляющих

Р. В. Качмар, Г. А. Кривов, Б. С. Карпинос, Д. Н. Ермолин, В. А. Матвиенко, М. Н. Кайнов

Аннотация. В статье предложена методика многочисленных исследований напряженного состояния (НС) авиационных баллонов для хранения жидкостей, сжатых газов и огнетушащих составляющих с целью определения конструктивно-технологических параметров (КТП) ремонта дефектов их стеклопластиковой оплетки (СО) в результате длительной эксплуатации и механических повреждений. На примерах численного исследования НС баллонов цилиндрической и шарообразной формы определены КТП ремонта их СО с применением стеклопластиковых биндажей и накладок из стеклоткани. Конструктивно-технологические параметры ремонта СО баллонов, которые определяются в соответствии с разработанной методикой, позволяют выбрать для ремонта современные материалы и средства технологического оснащения.

Ключевые слова: авиационный баллон, несущая способность, стеклопластиковая оплетка, численное исследование, напряженное состояние, ремонт, стеклопластиковый биндаж стеклоткань, накладки, конструктивно-технологический параметр.

Restoring bearing capacity of fiberglass overwrap of aviation cylinders for storing liquids, gases and fire-extinguishing compounds

R. Kachmar, G. Kryvov, B. Karpinos, D. Jermolin, V. Matvijenko, M. Kainov

Abstract. The article proposes a methodology for numerical research of stressed condition (SC) of aviation cylinders for storing liquids, gases and fire-extinguishing compounds in order to determine structural and technological parameters (STP) for repairing of defects in their fiberglass overwraps (FO) due to long-term operation and mechanical damages.

Structural and technological parameters for repair of FO using fiberglass bandages and fiberglass fabric patches are determined on the examples of numerical research of SC of cylindrical and spherical cylinders.

According to developed methodology, STP for repairing of FO of cylinders make possible to select modern materials and technological equipment.

Keywords: aviation cylinder; bearing capacity; fiberglass overwrap; numerical research; stressed state; repair; fiberglass bandage; fiberglass fabric; patch; structural and technological parameters.