

Аналіз конструктивно-технологічних особливостей забезпечення ресурсу середньої частини фюзеляжу в зоні вирізу під двері літаків транспортної категорії

Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут» Державне підприємство «Антонов»

Дана стаття присвячена аналізу конструктивно-технологічних особливостей забезпечення ресурсу вирізів середньої частини герметичного фюзеляжу літаків транспортної категорії. Фюзеляжі літальних апаратів (ЛА), стосовно з їх функціональних особливостей, мають велику кількість різноманітних вирізів та нерегулярностей. Під час польоту конструкція фюзеляжу сприймає навантаження у вигляді поперечних і повздовжніх сил згинальних і крутних моментів, які спричинені загальним згином конструкції під дією аеродинамічних, інерційних і динамічних навантажень, а також надлишковим тиском, що утворюється в середині герметичної частини фюзеляжу під час роботи системи кондиціонування повітря. Основними виразами можуть бути вирізи під вікна, двері, багажні, експлуатаційні та аварійні люки, вирізи під вантажний люк тощо. Особливу увагу слід зосередити на вирізах, які знаходяться в герметичній зоні фюзеляжу. Наявність вирізу в конструкції оболонки фюзеляжу призводить до ослаблення поперечного перерізу фюзеляжу в зоні вирізу. Як об'єкт вивчення було вибрано виріз під двері (1922x1012 мм), який знаходиться в середній частині фюзеляжу. Наявність такого вирізу в оболонці фюзеляжу створює досить високу концентрацію напружень саме в зоні радіусів скруглення кутів вирізу. Там спостерігається окрім концентрації залежно від кутів вирізів, які є скругленими, також концентрація напруження навколо отворів під елементи кріплення, які розташовані поблизу радіусів скруглення. Саме в цій зоні існує найбільша ймовірність появи та розвитку втомних тріщин. Щоб досягти бажаних показників довговічності в зоні значної концентрації напружень застосовують низку конструктивно-технологічних рішень (КТР). Використання КТР забезпечує виконання вимог статичної міцності та довговічності в зонах вирізів у герметичному фюзеляжі і висуває проблему отримання конструкції мінімальної маси.

Ключові слова: виріз фюзеляжу, герметичний фюзеляж, окантовка вирізу, концентратор напружень, радіус скруглення.

Вступ

Важливою вимогою до сучасної авіаційної конструкції (АК) є висока вагова ефективність і певний безпечний ресурс експлуатації. Забезпечення ресурсу приводить до появи проблеми зростання маси АК. Тому однією з перспективних та важливих проблем сьогодення в сфері проектування авіаційної техніки (АТ) є проблема забезпечення ресурсу нових та перспективних АК з оптимальною масою.

Під час розроблення нових АК літаків транспортної категорії (рисунок 1) конструкція має відповідати вимогам Авіаційних правил (FAR-25, CS-25, AP-25, АПУ-25).

Згідно з вимогами щодо оцінювання втомної міцності, має бути підтверджено, що аварійна чи катастрофічна ситуація виникла через втому, корозію, дефекти виробництва [1]. Таке підтвердження має бути виконане для кожного агрегату чи системи ЛА, пошкодження якої може призвести до аварійної чи катастрофічної ситуації. Також АК слід бути спроможною витримувати перемінні навантаження, які вона буде сприймати протягом всього життєвого

циклу без розвитку пошкоджень до величин, які призводять до катастрофічних наслідків [1]. Виконання вимог щодо забезпечення ресурсу, впливає на необхідність розроблення та впровадження нових або вдосконалення вже впроваджених методів і способів забезпечення ресурсу АК.

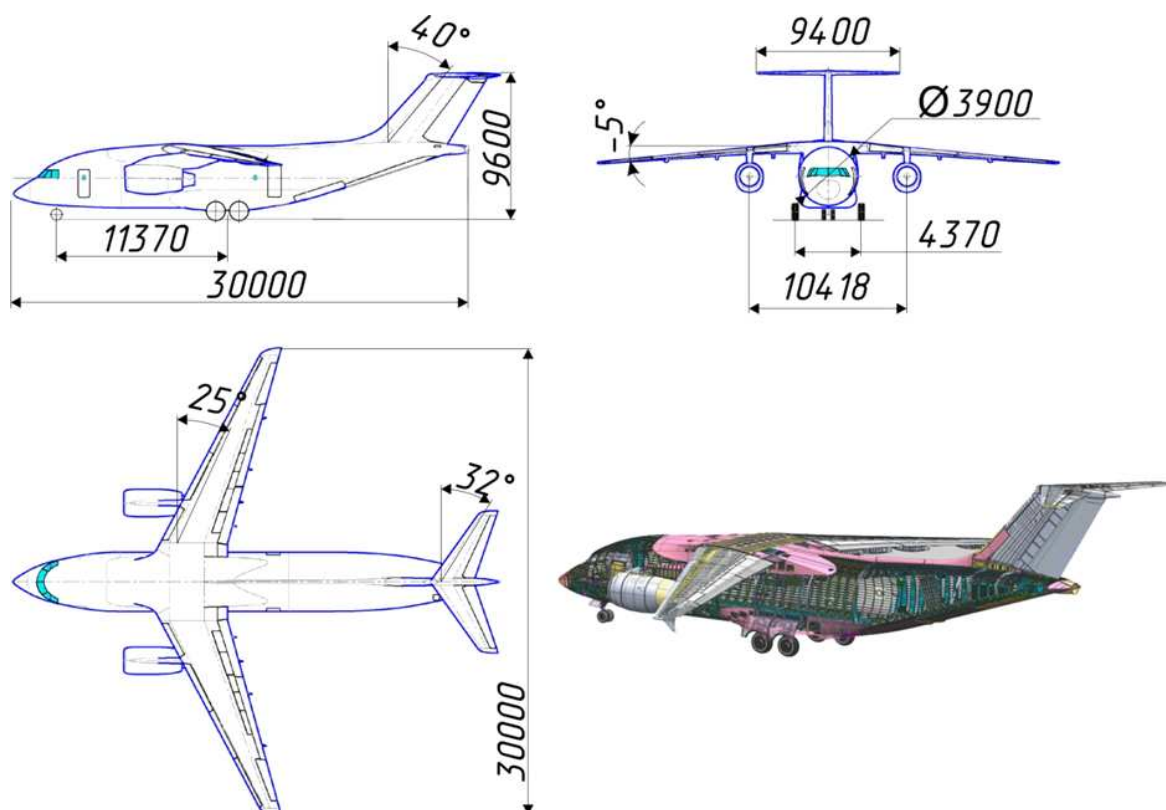


Рисунок 1 — Загальний вигляд літака транспортної категорії

Утомні тріщини розвиваються через дію багатьох специфічних факторів, які знижують ресурс конструкції, а саме: 1) високий рівень циклічних навантажень (особливо зосереджених); 2) наявність різного роду концентраторів напруження (чистота поверхні, отвори під кріплення, малі радіуси переходу на деталях з високоміцних сплавів); 3) несприятливе навколишнє середовище експлуатації, що призводить до появи корозії. Необхідно також враховувати наявність дефектів, що утворилися під час виготовлення деталей агрегату. Під час експлуатації, концентрація напружень, утворені через дію перелічених вище факторів підсумовується за гіпотезою лінійного підсумовування втомних пошкоджень «Пальмгрена-Майнера» [2], яка містить таку умову: втомна пошкоджуваність D відбудеться, коли відношення кількості прикладених до конструкції циклів (польотів) n_i до кількості допустимих циклів (польотів) до пошкодження конструкції N_i буде дорівнювати одиниці:

$$D = \sum \frac{n_i}{N_i} = 1, \quad (1)$$

де n – кількість циклів польотів;

N – кількість допустимих циклів польотів до пошкодження конструкції.

Для того, щоб отримати раціональну конструкцію, яка задовольняє вимогам міцності, надійності і економічності, необхідно з великою точністю

виконати її розрахунок і в процесі виготовлення використати всі рекомендації, які було отримано після розрахунків. А для підтвердження результатів розрахунків виконують статичні випробування з одночасним дослідженням напружено-деформованого стану за допомогою експериментальних методів. На рисунку 2 показано приклад виконання експериментального дослідження, виконаного методом крихких покриттів [3].

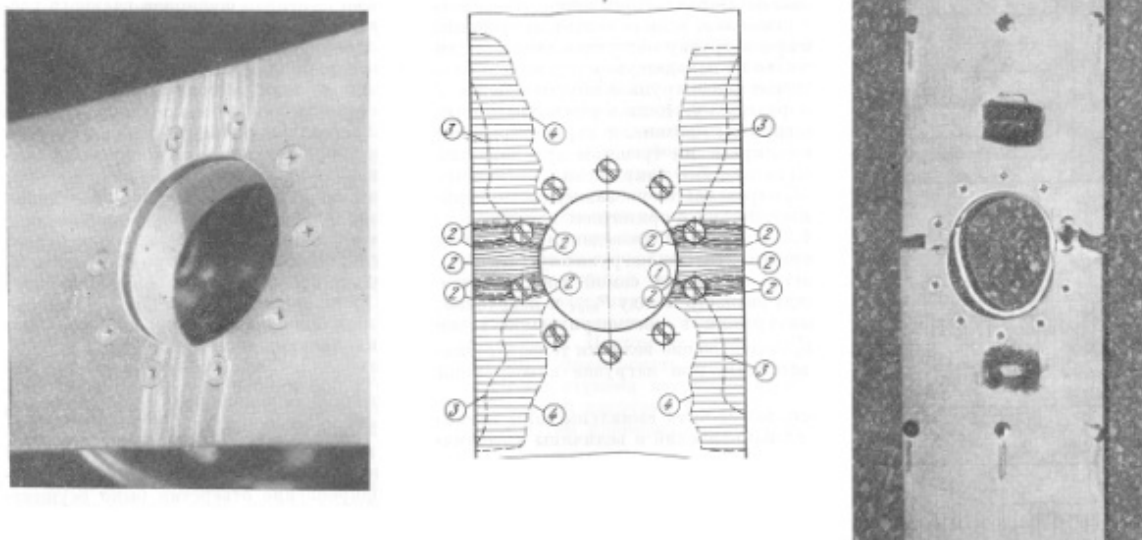


Рисунок 2 – Ілюстрація застосування методу крихких покриттів для дослідження НДС в зоні вирізу панелі крила: 1 – 2350 кгс/см²; 2 – 1760 кгс/см²; 3 – 1170 кгс/см²; 4 – 880 кгс/см²

Забезпечення високих показників ресурсу традиційно виконується методами, які забезпечують зниження напруження в цілому за рахунок збільшення площі поперечного перерізу елементів підсилення і збільшення зони введення в роботу цих елементів. Однак застосування таких методів призводить до збільшення маси АК. Досягти високих показників ресурсу можливо за рахунок зниження концентрації напружень в нерегулярних зонах конструкції за допомогою конструктивно-технологічних рішень (КТР).

1. Найпоширеніші вирізи в конструкції оболонки герметичного фюзеляжу

Під час польоту конструкцію фюзеляжу можна розглядати як тонкостінну консольну балку змінну за довжиною жорсткості, яка закріплена на лонжеронах центроплана крила і яка сприймає складний комплекс навантажень, а саме: 1) навантаження через наявність надлишкового внутрішнього тиску; 2) навантаження від загального згину і кручення фюзеляжу, викликаного дією аеродинамічних та інерційних навантажень.

Фюзеляж, як агрегат, що використовується для розміщення обладнання і корисного навантаження в вигляді вантажів або пасажирів, має велику кількість різного роду концентраторів напруження. Серед концентраторів напруження, варто виділити отвори та вирізи: 1) отвори під кріпильні елементи, які заповнюються тілом кріпильного елемента (найпоширеніші); 2) функціональні отвори для прокладання магістралей систем літака (гідравлічної, пневматичної,

електричної тощо); 3) вирізи облегшення в силових елементах; 4) різні за площею вирізи під двері, вікна, експлуатаційні та аварійні люки.

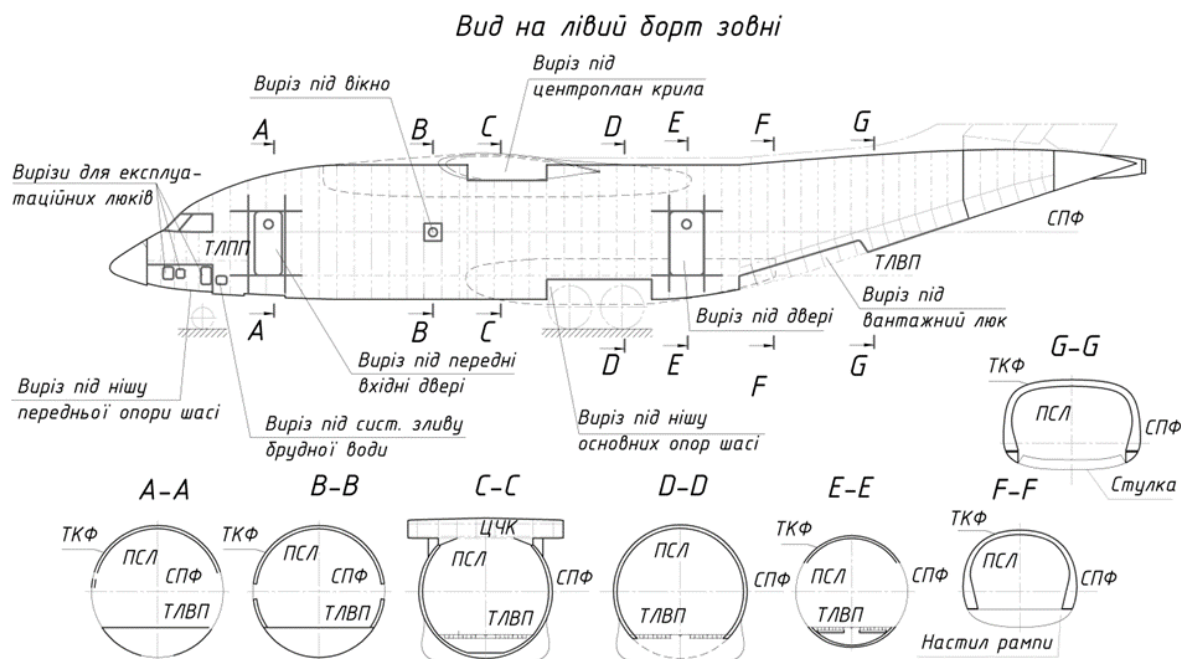


Рисунок 3 — Основні вирізи у фюзеляжі. Вид на лівий борт фюзеляжу
Вид на правий борт з середини

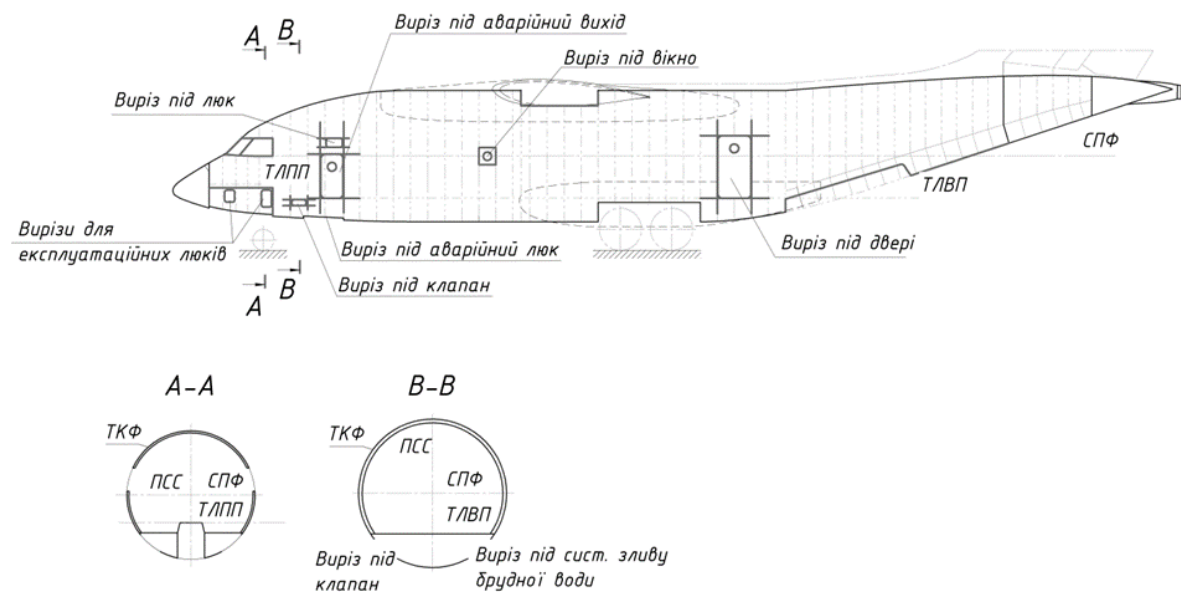


Рисунок 4 — Основні вирізи у фюзеляжі. Вид на правий борт з середини фюзеляжу

Однією з сильно навантажених та ресурсних зон герметичного фюзеляжу є зони радіусних переходів у кутах вирізів під двері, люки, вікна (рисунок 3, 4). Такі вирізи в оболонці зазвичай виконують прямокутної форми з закругленими кутами [4]. Виходячи з цього, можна зробити висновок, що в зоні вирізів оболонки герметичного фюзеляжу відбувається порушення однорідності конструкції, що призводить до перерозподілення силових потоків [5]. У зонах де існують наявні

вирізи, можна побачити, що цілісність контурів поперечних перетинів геометричної форми, яка утворилася в результаті вирізання матеріалу, порушилася. З точки зору механіки утворена форма на деякій ділянці має незамкнений контур, що знижує крутильну жорсткість цієї ділянки. Особливо має велике значення для герметичних фюзеляжів. Конструкція герметичного фюзеляжу під час експлуатації може роздуться через навантаження надлишковим тиском. Разом з надлишковим тиском конструкція також сприймає навантаження згину та кручення.

2. Конструктивно-технологічні методи забезпечення ресурсу вирізу під двері у фюзеляжі

Якщо розглядати виріз фюзеляжу під двері (1922x1012 мм), то можна зробити висновок, що зоною зосередження найбільших напружень в конструкції вирізу є зона радіусного переходу в куті вирізу (рисунок 5). Причому зазвичай в елементах підсилення нижніх кутів вирізу напруження нижчі порівняно з верхніми кутами, оскільки оболонка фюзеляжу в цьому місці підкріплена конструктивними елементами підлоги транспортної кабіни. Максимум напружень на краю радіусного переходу вертикальної кромки вирізу і радіусного переходу існує під дією виключно надлишкового тиску. Коли ж на конструкцію діє комплекс навантажень, який складається з навантажень під дією надлишкового тиску, а також згину та кручення, то точка максимальних напружень згідно з рівнянням Лапласа переміщується вгору уздовж радіуса залежно від співвідношення нормальних (кільцевих) і дотичних (меридіанних) напружень:

$$\frac{\sigma_t}{\rho_t} + \frac{\sigma_m}{\rho_m} = \frac{P}{t}, \quad (2)$$

де σ_t – кільцеві (широтні) нормальні напруження, спрямовані по дотичній до круглої ділянки (поперек фюзеляжу), МПа;

ρ_t – радіус круглої ділянки, по якій спрямовані кільцеві нормальні напруження, мм;

σ_m – меридіанні нормальні напруження, спрямовані по дотичній до меридіану круглої ділянки (вздовж фюзеляжу), МПа;

ρ_m – радіус меридіану круглої ділянки, по якій спрямовані меридіанні нормальні напруження, мм;

P – сила, що діє на круглу ділянку;

t – товщина елемента, який розглядається, мм.

Для забезпечення довговічності такої складнонавантаженої зони необхідно знизити рівень завантаженості при збереженні заданої маси конструкції. Як було зазначено вище, досягти високих показників ресурсу можливим завдяки впровадженню КТР. До технологічних рішень, що використовуються для забезпечення ресурсу зон вирізів, слід віднести: 1) виконання отворів під кріпильні елементи з максимально можливою чистотою поверхні; 2) забезпечення високої чистоти поверхні країв вирізу; 3) забезпечення високої якості приклеювання підкладних листів між собою і з обшивкою.

До конструктивних рішень необхідно віднести: 1) використання елементів підсилення достатнього поперечного перерізу для зниження рівня напружень; 2) використання радіуса округлення вирізу максимальної величини, яка можлива виходячи з кінематики відкривання-закривання дверей; 3) використання

декількох підкладних листів підсилювання і склеювання листів між собою і з обшивкою; 4) встановлення елементів кріплення з натягом і розташування їх на достатній відстані від краю вирізу; 5) встановлення по краю вирізу спеціального елемента, що захищає край обшивки, і підкладних листів для захисту від випадкових пошкоджень в експлуатації.

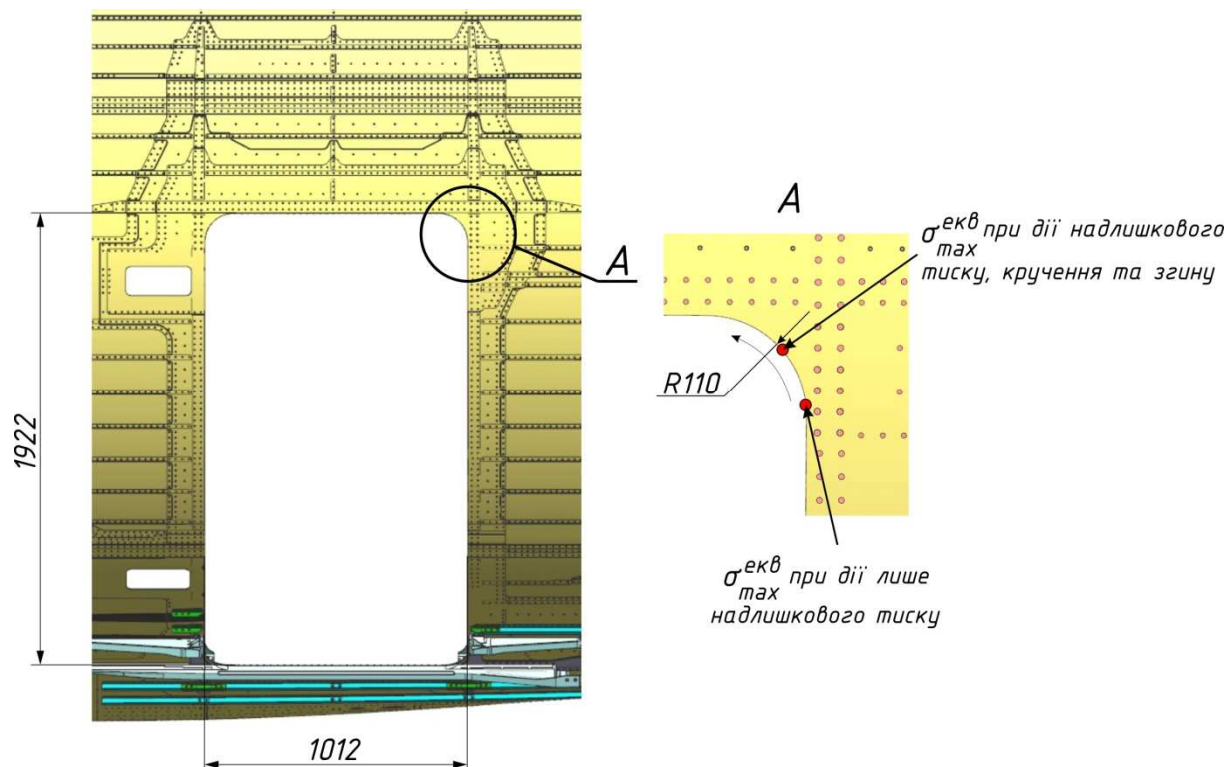
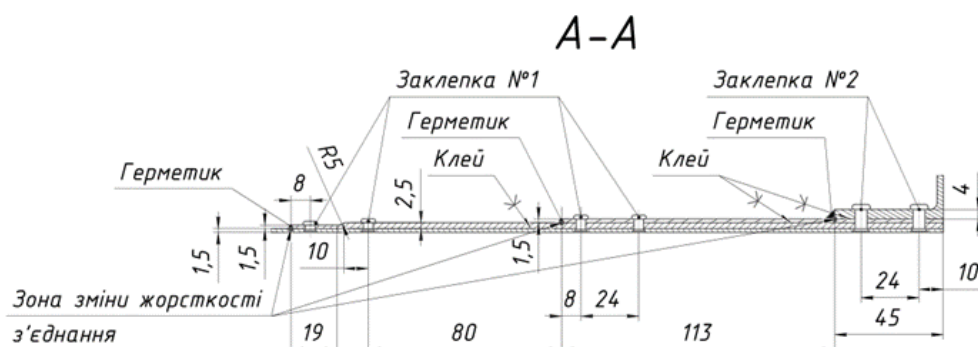
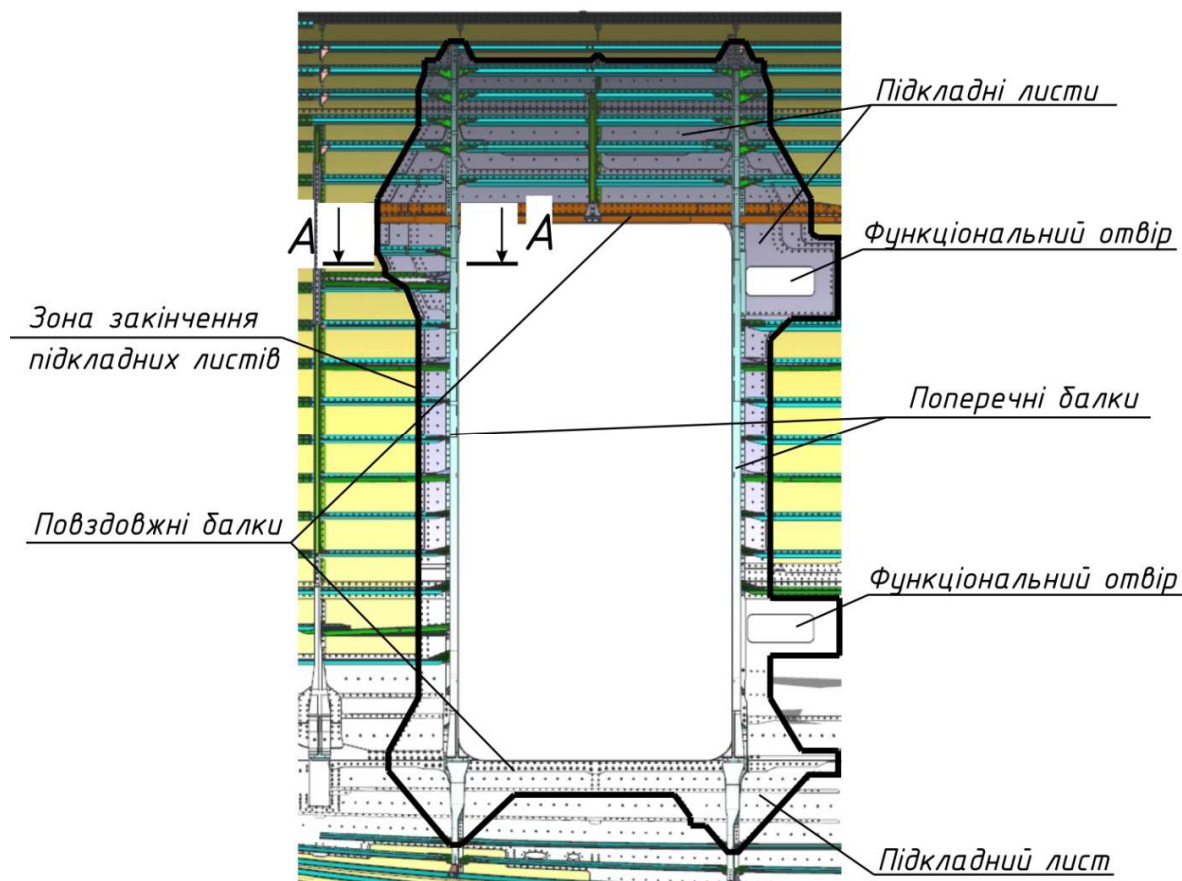


Рисунок 5 — Найбільш навантажена зона вирізу під двері

Зазвичай заклепкові з'єднання виконують за допомогою заклепок із компенсатором та використанням шару клею між деталями. Роль заклепок із компенсатором полягає у відкладенні моменту зародження втомних тріщин, через створення радіального натягу і збільшення сили стягування пакета [6]. В свою чергу, клейовий шар у з'єднанні виконує такі функції: 1) захиста листів обшивки та підкладних листів від появи фретинг-корозії; 2) суміщення роботи декількох елементів у пакеті як одного цілого. Однак клейове з'єднання має обмежений гарантований строк служби. Як відомо, клей є гігроскопічним. Через дію атмосферних явищ, а в основному вологи, характеристики клейового з'єднання можуть деградувати: клейовий шар може розтріскатися. Необхідно також розуміти, що клей через свою гігроскопічність може накопичувати вологу. В середині з'єднання, під час деформації елементів конструкції під навантаженням, мікрочастинки клею можуть пошкодити захисне покриття елементів пакета і сприяти розвитку корозії. Після деградації характеристик клейового з'єднання збільшується навантаження на елементи кріплення. Для попередження впливу атмосферних явищ клейове з'єднання захищають за допомогою валика герметика.



Заклепка № 1: Заклепка 4-І-Ан.Окс.-ОСТ1 34056-2005;
 Заклепка № 2: Заклепка 5-І-Ан.Окс.-ОСТ1 34056-2005;
 Герметик: У-30МЭС-5М ТУ38 1051436-88;
 Клей: Клей на плівковій основі ВК-51А ТУ1-596-212-85.

Рисунок 6 — Окантовка дверей та її елементи

Використання підкладних листів забезпечує утворення зон підсилення і збільшення жорсткості, в яких напруження розподіляються більш рівномірно. Зона, де закінчується підкладний лист також потребує особливої уваги з точки зору забезпечення ресурсу, оскільки там відбувається різка зміна жорсткості (рисунок 6), а отже і зростання напружень в обшивці. Якщо параметри підкладного листа вибрані нераціонально з точки зору підсилення вирізу в оболонці, то в обшивці по краю підкладного листа можуть виникнути втомні

тріщині від повторно-змінних навантажень. Вплив різкої зміни жорсткості по краю підкладного листа можна зменшити плавно збільшуючи його товщину в напрямку до краю вирізу за принципом Сен-Венана

Впровадженням перелічених КТР можна досягти заданих характеристик ресурсу, але при цьому багато з них ведуть до зростання маси конструкції. При цьому після досягнення великої кількості напрацювань, в конструкції, навколо вирізів починають утворюватися втомні тріщини, саме в зоні радіусних переходів (рисунки 7 – 9).

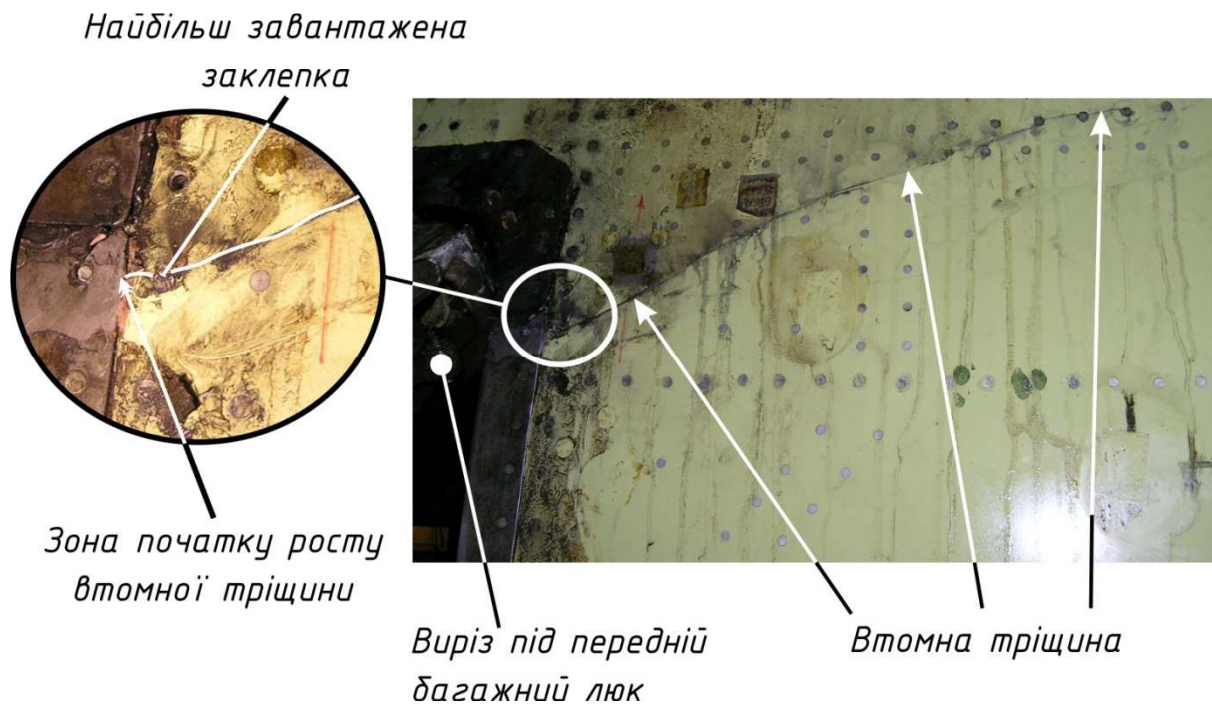


Рисунок 7 — Тріщина у верхньому правому куті біля вирізу під двері

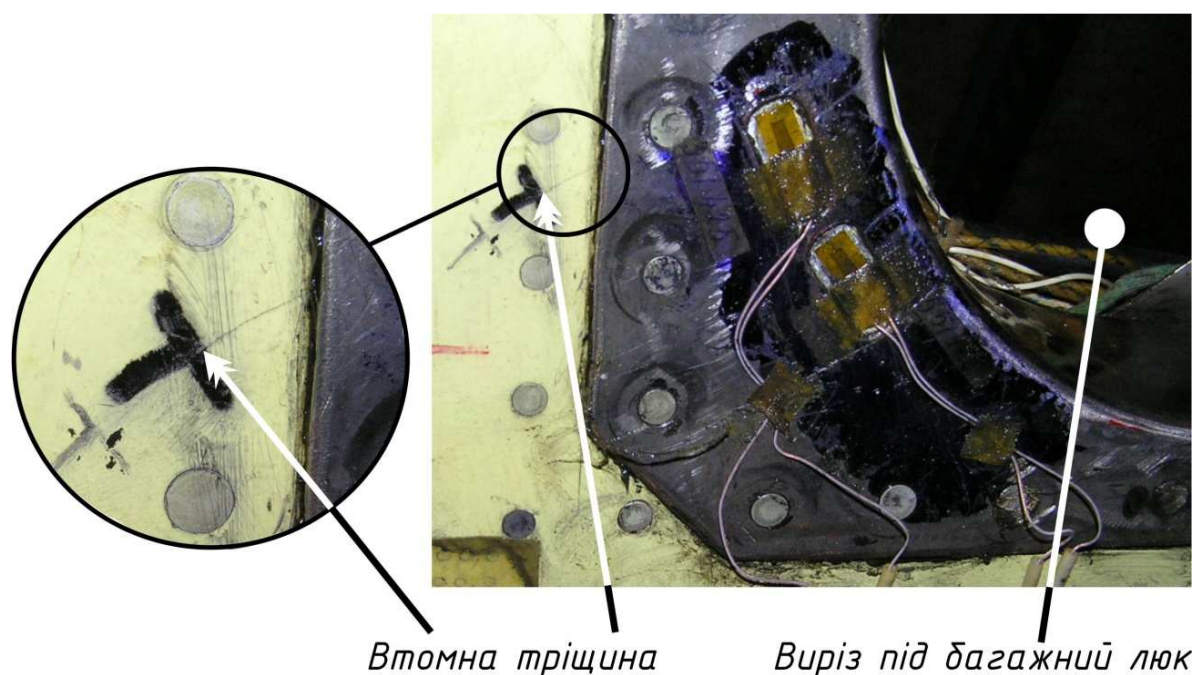


Рисунок 8 — Тріщина в нижньому лівому куті біля вирізу під двері

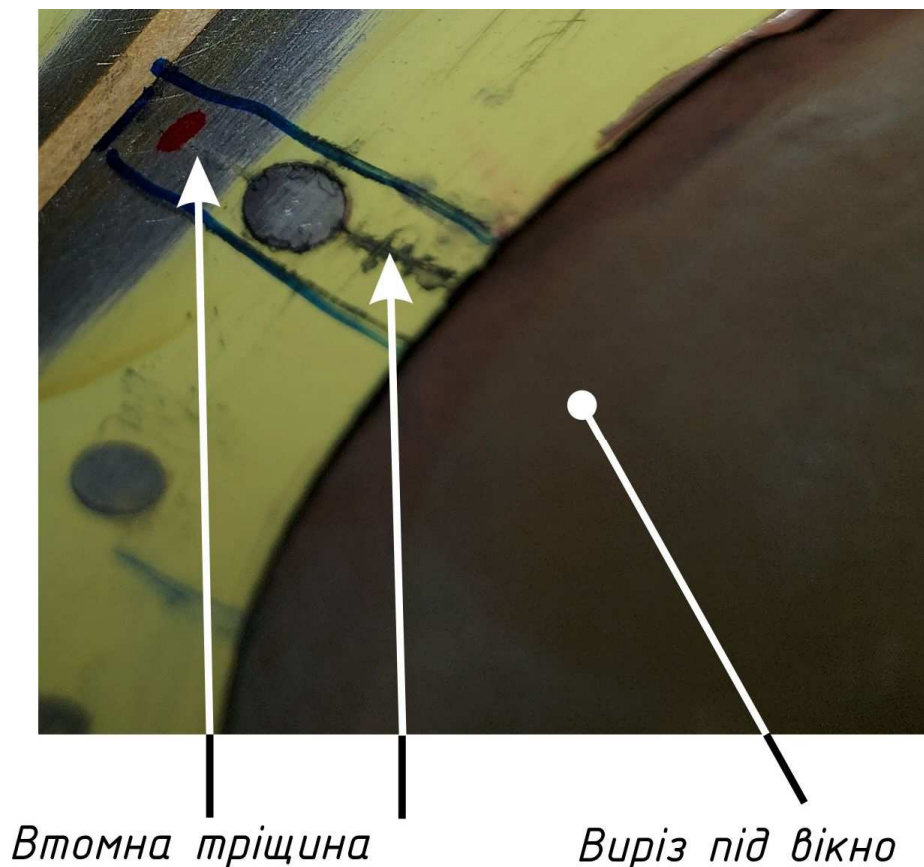


Рисунок 9 — Тріщина біля вирізу під вікно

Аналізуючи рисунки 7 – 9, можна зробити висновок, що в зонах вирізів радіуси округлення являють собою концентратори напруження, де після великої кількості циклів напружень утворюються втомні тріщини. Втомна тріщина, зростає до наступної найбільш завантаженої зони конструкції, якою може бути як заклепка, так і регулярна зона, де утворився дефект під час виготовлення деталі.

Висновки

Описано спрощене подання фюзеляжу під час польоту, його функціональне призначення, а також і навантаження, що діє під час крейсерського польоту на конструкцію фюзеляжу. Фюзеляж розглядається як тонкостінна консольна балка перемінної жорсткості із закріпленнями на лонжеронах несучих поверхонь. Конструкція фюзеляжу навантажується під дією загального згину, кручення через наявність аеродинамічних та інерційних сил, а також через дію надлишкового тиску в герметичній кабіні. Визначено основні концентратори напруження, які є наявними в конструкції фюзеляжу: отвори під кріпильні елементи; функціональні отвори; вирізи під вікна, двері, люки тощо. Вирізи в герметичному фюзеляжі послаблюють конструкцію, створюючи концентрацію напружень біля вирізу. Для вирізу під двері найбільша концентрація напружень буде спостерігатися в зонах верхніх кутів вирізу через включення в роботу підлоги біля нижніх кутів. Визначено:

1. найбільш завантаженою зоною радіуса округлення під час дії лише надлишкового тиску є точка, де радіус округлення сполучається з вертикальною кромкою вирізу;

2. якщо разом з надлишковим тиском діє згин та кручення, тоді найбільш завантажена зона переміщується в середину згідно з рівнянням Лапласа.

Досягнення високих показників ресурсу в зонах вирізів є можливим, через впровадження в конструкцію певних КТР, але при цьому багато КТР призводять до підвищення маси конструкції.

Виходячи з зазначеного, вище необхідно більш детально вивчити питання щодо напружено-деформованого стану вирізів у герметичному фюзеляжі, визначити найбільш раціональні значення радіусів округлення конструкцій навколо вирізів.

Список літератури

1. Нормы летной годности самолетов транспортной категории. Авиационные правила. Часть 25 (АП-25).

2. Стрижиус, В. Е. Методы и процедуры расчетов на усталость элементов авиационных конструкций / В. Е. Стрижиус – М.: МАИ-ПРИНТ, 2008. – 60 с.

3. Применение метода хрупких лаковых тензочувствительных покрытий для оптимизации по условиям прочности сложных машиностроительных конструкций / Н. И. Пригоровский, В. К. Панских, В. В. Муратов, В. В. Мерзлюк // Методы исследования напряжений в конструкциях – М., «Наука», 1976. – с. 68 – 75

4. Стригунов, В. М. Расчет на прочность фюзеляжей и герметических кабин самолетов / В. М. Стригунов – М.: Машиностроение, 1974. 288 с.

5. Проектирование конструкций самолетов: учебн. для студентов вузов / Е. С. Войт, А. И. Ендогур, З. А. Мелик-Саркисян, И. М. Алявдин. — М.: Машиностроение, 1987. — 416 с.

6. Гребеников, А. Г. Методология интегрированного проектирования и моделирования сборных самолетных конструкций /А.Г. Гребеников. — Харьков: ХАИ, 2006 — 532с.

References

1. Normy letnoj godnosti samoletov transportnoj kategorii. Aviacionnye pravila. Chast' 25 (AP-25).

2. Strizhius V.E. Metody i procedury raschetov na ustalost' e'lementov aviacionnyx konstrukcij. –M.: Izd-vo MAI-PRINT, 2008. – 60s.: il.

3. Primenenie metoda xrupkix lakovyx tenzochuvstvitel'nyx pokrytij dlya optimizacii po usloviyam prochnosti slozhnyx mashinostroitel'nyx konstrukcij. Prigorovskij N.I., Panskix V.K., Muratov V.V., Merzlyuk V.V. — Sb. «Metody issledovaniya napryazhenij v konstrukciyax». M., «Nauka», 1976.

4. Strigunov V.M. Raschet na prochnost' fyuzelyazhej i germeticheskix kabin samoletov. M., «Mashinostroenie», 1974, 288 s.

5. Proektirovanie konstrukcij samoletov: Uchebnyk dlya studentov vuzov, obuchayushhixsya po special'nosti «Samoletoostroenie» / E.S. Vojt,

A.I. Endogur, Z.A. Melik-Sarkisyan, I.M, Alyavdin. — M.: Mashinostroenie, 1987. — 416 s.: il.

6. Metodologiya integririvannogo proektirovaniya i modelirovaniya sbornyx samoletnyx konstrukcij /A.G. Grebenikov. — Хар'ков: Нас. ае'рокосм. un-t «ХАІ», 2006 — 532s.

Поступила в редакцію 15.02.2022, розглянута на редколегії 15.02.2022

Анализ конструктивно-технологических особенностей обеспечения ресурса средней части фюзеляжа в зоне выреза под дверь самолетов транспортной категории

Данная статья посвящена анализу конструктивно-технологических особенностей обеспечения ресурса вырезов средней части герметичного фюзеляжа самолетов транспортной категории. Фюзеляжи летательных аппаратов (ЛА) в связи с их функциональными особенностями имеют большое количество разных вырезов и нерегулярностей. Во время полёта, конструкция фюзеляжа воспринимает нагрузки в виде поперечных и продольных сил, изгибающих и крутящих моментов, которые вызваны общим изгибом конструкции под действием аэродинамических, инерциальных и динамических нагрузок, а также избыточным давлением, которое образовано в середине герметичной части фюзеляжа во время работы системы кондиционирования воздуха.

В качестве основных вырезов могут быть вырезы под окна, двери, багажные, эксплуатационные и аварийные люки, вырезы под грузовой люк. Особенное внимание необходимо сосредоточить на вырезах, которые находятся в герметичной зоне фюзеляжа. Наличие выреза в конструкции оболочки фюзеляжа приводит к ослаблению поперечного сечения фюзеляжа в зоне выреза. В качестве объекта изучения было выбрано вырез под двери (1922x1012 мм), который находится в средней части фюзеляжа. Наличие такого выреза в оболочке фюзеляжа создает достаточно высокую концентрацию напряжений, именно в зоне радиусов скругления углов выреза. Там наблюдается кроме концентрации из-за углов выреза, которые скруглены, также концентрация вокруг отверстий под крепежные элементы, которые размещены возле радиусов скругления. Именно в этой зоне существует наибольшая вероятность образования и развития усталостных трещин.

Чтобы достичь желанных показателей долговечности в зоне значительной концентрации напряжений используют ряд конструктивно-технологических решений (КТР). Использование КТР обеспечивают выполнение требований статической прочности и долговечности в зонах вырезов в герметичном фюзеляже и выдвигает проблему получения конструкции минимальной массы.

Ключевые слова: вырез фюзеляжа; герметичный фюзеляж; окантовка выреза; концентратор напряжений; радиус скругления.

Analysis of the design and technological features of ensuring the resource of the middle part of the fuselage in the area of the cutout under the door of aircraft of the transport category

This article is devoted to the analysis of the design and technological features of ensuring the resource of cutouts in the middle part of the pressurized fuselage of transport category aircraft. Aircraft fuselages, due to their functional features, have a large number of different cuts and irregularities. During flight, the fuselage structure perceives loads in the form of transverse and longitudinal forces, bending and torsional moments, which are caused by the general bending of the structure due to the action of aerodynamic, inertial and dynamic loads, as well as overpressure, which is formed in the middle of the pressurized part of the fuselage during operation of the air conditioning system.

The main cutouts can be: cutouts for windows, doors, luggage, maintenance and emergency hatches, cutouts for the cargo hatch. Particular attention must be paid to the cutouts that are in the sealed area of the fuselage. The presence of a cutout in the structure of the fuselage shell leads to a weakening of the cross section of the fuselage in the cutout area. As an object of study, a cutout was chosen, which is located in the middle part of the fuselage under the door (1922x1012 mm). The presence of such a cutout in the fuselage shell creates a sufficiently high concentration of stresses, namely in the area of the cutout corner rounding radii. There, in addition to the concentration due to the corners of the cutout, which are rounded, there is also a concentration around the holes for fasteners, which are located near the rounding radii. It is in this zone that there is the highest probability of the formation and development of fatigue cracks.

To achieve the desired durability indicators in the zone of significant stress concentration, a number of design and technological solutions are used. The use of constructive and technological solutions provides the requirements of static strength and durability in the areas of cutouts in the pressurized fuselage and puts forward the problem of obtaining a structure with a minimum mass.

Keywords: fuselage cutout; sealed fuselage; cutout trim; hub of inflammation; rounding radius.

Відомості про авторів:

Гоптар Тарас, аспірант каф. 103 «Проектування літаків і вертольотів» Національного аерокосмічного університету ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

About the Authors

Goptar Taras, post-graduate students of the Department of Airplanes and Helicopters Design, National Aerospace University named after M. Ye. Zhukovsky "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine,