

doi: 10.32620/oikit.2025.104.01

УДК 629 73 0012

О. Г. Гребеніков, В. Є. Василевський

Шляхи забезпечення ефективності закрилків крила літака транспортної категорії

Національний аерокосмічний університет «ХАІ»

У статті розглянуто основні підходи до підвищення живучості закрилків крила літаків транспортної категорії. Розглянуто інциденти, пов'язані з відмовами закрилків і органів керування механізацією крила й оперення, аналізуються причини та наслідки. Представлено алгоритм розрахунку потрібної площі закрилків для забезпечення заданих характеристик у злітній і посадковій конфігурації. Особливу увагу приділено конструктивним заходам підвищення характеристик живучості конструкції закрилків, як-от забезпечення багатоколійного передавання навантажень шляхом реалізації багатоелементної конструкції, сегментування конструкції закрилка на окремі незалежні модулі, дублювання шляхів передавання навантаження, застосування алюмінієвих сплавів з покращеними характеристиками завдяки підвищенню чистоти сплавів та введенню легуючих елементів, як-от цирконій і літій; застосування полімерних композиційних матеріалів, особливо вуглепластиків, що дає змогу знизити масу конструкції та підвищити її стійкість до втомних ушкоджень, обмеження рівнів напруг у потенційно небезпечних зонах і забезпечення мінімуму концентрації напружень; застосування конструктивно-технологічних заходів щодо підвищення характеристик живучості шляхом поверхневого зміцнення елементів конструкції, забезпечення інспектування конструкції та методи неруйнівного контролю, розрахунково-експериментальні дослідження характеристик живучості.

Ключові слова: живучість, закрилки, транспортний літак, відмова, дублювання, моделювання, безпечна пошкоджувальність.

Проектування і створення літака з необхідними характеристиками є складною науково-технічною проблемою за низкою основних напрямів розвитку авіації: аеродинаміка, стійкість і керованість, міцність, конструкція, вагова досконалість, створення сучасної силової установки, матеріали, технологія, системи та обладнання, експлуатаційна технологічність, безпека і надійність. Необхідно розробити велику програму досліджень для забезпечення характеристик літака за цими напрямками. Розроблення механізації крила і, зокрема, закрилків стоїть у цьому ряду як один із важливих напрямів.

Закрилки відіграють важливу роль у забезпеченні безпеки польотів, особливо на етапах зльоту і посадки. Відмови в їхній роботі або в системах їхнього керування можуть призвести до серйозних авіаційних подій. У цій статті розглядається комплексний підхід забезпечення ефективності закрилків крила транспортних літаків, що охоплює оптимізацію конструкції із застосуванням сучасних конструктивно-технологічних рішень, застосування нових матеріалів і технологій, а також використання передових методів аналізу та випробувань. Розглянуто інциденти, пов'язані з відмовами закрилків і органів управління механізацією крила, аналізуються причини і наслідки.

У серпні 2008 року літак McDonnell Douglas MD-82 авіакомпанії Spanair зазнав аварії під час зльоту з аеропорту Мадрида. Розслідування показало, що закрилки не були випущені, а система попередження про це не спрацювала. У результаті літак не зміг набрати необхідну підйомну силу і розбився, забравши життя 154 осіб [1].

Boeing 737-200 авіакомпанії Mandala Airlines розбився незабаром після зльоту з Медана, Індонезія. Розслідування встановило, що закрилки і передкрилки перебували в прибраному положенні, що призвело до недостатньої підйомної сили і катастрофи. Причиною могла бути помилка екіпажу або відмова системи управління закрилками [2].

Літак DHC-6 Twin Otter авіакомпанії Air Moorea зазнав аварії незабаром після зльоту з острова Муреа. Обрив тросів управління рулями висоти, спричинений зносом і впливом солоного клімату, призвів до втрати керованості. Додатковим фактором стало потрапляння літака в супутниковий струмінь від Airbus A340 [3].

Hawker Siddeley Trident 1C розбився незабаром після зльоту з аеропорту Хітроу. Екіпаж передчасно прибрав передкрилки на малій швидкості, що призвело до зриву потоку і втрати підйомної сили. Також було виявлено проблеми зі здоров'ям командира екіпажу, що могло вплинути на прийняття рішень [4].

Під час заходу на посадку в аеропорту Таунсвілла, Австралія, пілот Cessna 208B зіткнувся з проблемою управління. Після посадки було виявлено, що болт кріплення системи управління закрилками ослаб, що призвело до вільного руху закрилка. Це підкреслює важливість регулярного технічного обслуговування і перевірки кріплень [5].

Аналізуючи льотні інциденти і катастрофи, можна зробити такі висновки: основні причини відмов закрилків та інших агрегатів механізації та їхніх систем полягають у такому. Насамперед це людський фактор - помилки екіпажу під час підготовки до зльоту або посадки, неправильна інтерпретація показань приладів. На другому місці технічні несправності конструкції - пошкодження та зношення компонентів, тріщини в елементах конструкції, обриви тросів, відмова механічних та електричних систем управління. Сюди слід віднести і проєктні недоліки конструкції, що призводять до руйнування елементів агрегатів механізації крила, недостатню надійність конструктивних елементів, відсутність дублюючих систем. Також слід згадати і зовнішні впливи - потрапляння в супутниковий струмінь інших літаків, несприятливі погодні умови.

Аналіз катастроф показує, що відмови закрилків і систем їхнього керування становлять серйозну загрозу для безпеки польотів. Комплексний підхід, що охоплює підвищення якості проєктування, поліпшення підготовки екіпажів, технічного обслуговування і модернізацію систем, здатні значно знизити ризики подібних подій.

Завдання закрилків забезпечити необхідне збільшення підйомної сили та/або опору, зниження швидкості звалювання і вкоротити пробіг. Аеродинамічний розрахунок їхніх параметрів (площа, кут відхилення і відсоток висування) ґрунтується на поєднанні аналітичних моделей, даних випробувань і нормативних документів.

Площа закрилків прямо впливає на аеродинамічні характеристики крила у злітно-посадковій конфігурації. Її визначення базується на необхідному прирості коефіцієнта підйомної сили ΔC_y , який має компенсувати зниження швидкості та забезпечувати необхідну несучу здатність крила.

Під час зльоту і посадки, максимальний коефіцієнт підйомної сили визначається з умови рівності підйомної сили і ваги літака:

$$Y = W = \rho \frac{V^2}{2} S C_y,$$

де W – вага літака, ρ – густина повітря на рівні аеродрому, V – швидкість зльоту (або посадки), S – площа крила, C_y – загальний коефіцієнт підйомної сили

(включає внесок закрилків).

З рівняння можна знайти необхідний C_y і визначити, яку його частину має забезпечити приріст ΔC_y , що вноситься закрилками:

$$\Delta C_y = C_y - C_{y0}$$

де C_{y0} – коефіцієнт підйомної сили чистого крила (без механізації).

Приріст ΔC_y можна апроксимувати через площу закрилків і їхнє відхилення таким чином:

$$\Delta C_y = (C_1 S_3 / S) \sin \delta$$

де C_1 – чутливість крила до відхилення закрилків, що залежить від їхнього типу (щілинні, висувні тощо); S_3 – площа закрилків; δ – кут відхилення закрилків; S_3/S – частка площі закрилків.

З цієї формули можна виразити необхідне відношення S_3/S :

$$\frac{S_3}{S} = \Delta C_y / C_1 \sin \delta.$$

Значення C_1 варіюються від 1,1 до 1,8 залежно від конструкції механізації. Наприклад, щілинні закрилки в одному положенні забезпечують більше підйомної сили порівняно з простими відхилюваними.

За статистикою проектування сучасних повітряних суден, для злітної конфігурації зазвичай застосовується:

$S_3/S = 0,15$ – для літаків із помірною механізацією крила (регіональні турбогвинтові);

$S_3/S = 0,2-0,25$ – для магістральних і реактивних пасажирських ЛА;

$S_3/S \leq 0,3$ – для ЛА з коротким злітно-посадковим циклом [6], [7].

На підставі отриманих аеродинамічних розрахунків розробляються вихідні дані для конструювання закрилків. Це теоретичне креслення, загальний вигляд, конструктивно-силова схема закрилків, розрахункові навантаження на закрилки, які визначають на підставі масових, швидкісних характеристик літака і попередніх жорсткісних параметрів агрегатів. Як зазначалося вище, одними з причин відмов закрилків та їхніх систем є технічні несправності, пов'язані з недоліками конструкцій, допущених під час проектування або під час їхнього виготовлення. Тому під час проектування особливе місце необхідно приділяти одному з головних питань досягнення високої якості конструкції – забезпеченню характеристик живучості та безпечної ушкоджуваності закрилків та їхніх систем. У цій статті аналізуються методи і підходи під час проектування щодо забезпечення цих характеристик закрилків та їхніх систем.

Живучість авіаційних конструкцій - це здатність зберігати функціональність за наявності пошкоджень, що виникають у процесі експлуатації. Для закрилків крила транспортних літаків, які піддаються значним аеродинамічним і механічним навантаженням, забезпечення високої живучості є критично важливим. Це особливо актуально в умовах збільшення термінів служби повітряних суден і необхідності підтримання їхньої льотної придатності.

Для забезпечення живучості проектування конструкцій здійснюється за принципом безпечної пошкоджуваності. Як відомо, безпечна пошкоджуваність (damage tolerance) означає здатність конструкції зберігати достатню міцність і функціональність за наявності дефектів або ушкоджень, що не перевищують критичних розмірів, які можуть виникнути в процесі експлуатації. У контексті закрилків транспортного літака це особливо важливо, оскільки пошкодження навіть однієї секції закрилків може істотно вплинути на керованість і безпеку польоту.

Методи забезпечення безпечної пошкоджуваності містять у собі низку

заходів. Насамперед це забезпечення багатокільового передавання навантажень шляхом реалізації багатоелементної конструкції. Наприклад, поділ конструкції на незалежні несучі елементи: багатосекційні обшивки, множинні стрингери і лонжерони, які дають змогу конструкції зберігати несучу здатність навіть у разі часткового виходу з ладу одного або декількох елементів, забезпечуючи необхідний рівень залишкової міцності та стійкості. Кожен незалежний елемент служить стопером поширення тріщин у суміжних елементах конструкції.

При цьому рівні розрахункових навантажень обирають такими, що забезпечують досить повільне зростання дефектів, а методи контролю забезпечують їх своєчасне виявлення. Також необхідно застосовувати конструктивну сегментацію. Сегментування конструкції закрилка на окремі незалежні модулі дає змогу локалізувати пошкодження, не допускаючи його поширення на всю конструкцію [8]. Поділ закрилка на секції з незалежним приводом і силовою схемою. Так, наприклад, на літаках Ан-124 і Ан-178 закрилки на кожній консолі розділені на три секції, на літаку Ан-148 - на дві секції. [8], [9], [10].

Одним із ключових принципів забезпечення безпечної пошкоджуваності авіаційних конструкцій, включно із закрилками, є дублювання шляхів передавання навантаження. Цей підхід передбачає, що в разі повного руйнування одного зі шляхів передавання навантаження другий забезпечує залишкову міцність (за дії нормованого експлуатаційного навантаження).

Сучасні матеріали відіграють ключову роль у забезпеченні живучості закрилків. Насамперед це алюмінієві сплави з поліпшеними характеристиками завдяки підвищенню чистоти сплавів і введенню легувальних елементів, як-от цирконій і літій, що поліпшують втомну міцність і тріщиностійкість. Застосування ПКМ, особливо вуглепластиків, дає змогу знизити масу конструкції та підвищити її стійкість до втомних пошкоджень. При цьому необхідно забезпечувати надійний захист конструкції від впливу зовнішнього середовища.

Необхідно обмежувати рівні напружень у потенційно небезпечних зонах і забезпечувати мінімум концентрації напружень в елементах конструкції закрилків і систем їхнього керування. Застосування спеціальних конструктивних рішень у зонах концентрації напружень: наприклад, плавні переходи в місцях зміни геометричних параметрів елементів конструкції, вибір форми вирізів і отворів.

Застосування конструктивно-технологічних заходів щодо забезпечення характеристик безпечної пошкоджуваності. Використання залишкових стискальних напружень, наприклад, шляхом проведення зміцнення поверхневого шару матеріалу деталі дробоструминним обробленням та іншими методами [9].

Необхідно конструкцію закрилків проєктувати таким чином, щоб забезпечити простий доступ до критичних вузлів і елементів. Це введення в конструкцію оглядових люків і знімних панелей [9]. Важливу роль у забезпеченні характеристик живучості відіграють розрахунково-експериментальні дослідження. Розрахунки, як правило, виконуються за допомогою кінцево-елементних комплексів, таких як NSTRAN, ANSYS на базі математичних моделей елементів конструкцій і агрегатів закрилків. Розрахунки проводяться як з відсутністю пошкоджень, так і з імітацією тріщин і руйнувань. Досліджуються характеристики статичної міцності, втомної довговічності, тріщиностійкості, що дають змогу оптимізувати конструкцію, виявити критичні зони та визначити швидкість розповсюдження і критичні розміри пошкоджень.

При цьому необхідно забезпечити, щоб можливі тріщини розвивалися повільно і не призводили до раптового руйнування [8], [9]. За необхідності для

підтвердження результатів розрахунку проводяться експериментальні дослідження. Результати розрахунків і експериментів є основою для сертифікації закрилків і системи їхнього керування, а також розроблення моніторингу технічного стану конструкції зі створенням уніфікованих процедур контролю з мінімальною трудомісткістю і програмуванням міжремонтних інтервалів [10].

Особливу увагу необхідно приділяти моделюванню відмов у системі управління закрилками, що дає змогу заздалегідь передбачити поведінку літального апарата в разі відхилень у роботі механізації та виробити ефективні компенсувальні алгоритми. Це забезпечує не тільки підвищення рівня безпеки, а й розвиток інтелектуальних систем автоматичного керування, здатних адаптуватися до відмов.

Для своєчасного виявлення дефектів у конструкції закрилків застосовуються методи неруйнівного контролю. Для металевих конструктивних елементів це вихрострумний контроль, магнітний контроль, рентгенівський контроль, для композиційних конструкцій – ультразвуковий контроль для виявлення внутрішніх розшарувань і тріщин, радіографічний контроль – для оцінки щільності та внутрішніх дефектів. Підвищення живучості закрилків крила літака транспортної категорії - найважливіше завдання, безпосередньо пов'язане з безпекою польотів і експлуатаційною надійністю повітряного судна. Підвищення живучості закрилків має ґрунтуватися на комплексному підході, що охоплює оптимізацію конструкції, застосування сучасних матеріалів і технологій, використання передових методів аналізу та випробувань, що поєднує інженерні рішення, експлуатаційні регламенти та цифрові технології. Такий підхід дає змогу забезпечити високу надійність конструкції за збереження малої маси, ремонтопридатності та відповідності сучасним вимогам сертифікації.

Надійшла до редакції 19.05.2025, розглянута на редколегії 19.05.2025.

Ways to ensure the efficiency of transport category aircraft wing flaps

The article discusses the main approaches to increasing the survivability of wing flaps of transport category aircraft. Incidents related to failures of flaps and wing and fin mechanics controls are considered, and the causes and consequences are analysed. An algorithm for calculating the required flap area to ensure the specified characteristics in take-off and landing configurations is presented. Particular attention is paid to design measures to improve the durability characteristics of the flap structure, such as providing multi-track load transfer by implementing a multi-element design, segmenting the flap structure into separate independent modules, duplicating load transfer paths, using aluminium alloys with improved characteristics due to increased purity of alloys and the introduction of alloying elements such as zirconium and lithium; application of polymeric composite materials, especially carbon fibre-reinforced plastics, which allows to reduce the weight of the structure and increase its resistance to fatigue damage, limit stress levels in potentially dangerous areas and ensure minimum stress concentration; application of structural and technological measures to improve the durability characteristics by surface strengthening of structural elements, ensuring structural inspection and non-destructive testing methods, calculation and experimental studies of durability characteristics.

Keywords: survivability, flaps, transport aircraft, failure, duplication, modeling,

safe damageability.

Список літератури

1. Wired: Could a Spanair Software Glitch Have Been Prevented.
2. Wikipedia: Mandala Airlines Flight 091
3. Wikipedia (рус.): Катастрофа DHC-6 на Муреа
4. Wikipedia (рус.): Катастрофа Trident под Лондоном
5. ATSB: AO-2015-133 – Cessna 208 Flap System Failure
6. Латышев, В. М. Аэродинамика и механизация крыла. – М.: Машиностроение, 1975.
7. Торенбик, Ф. Аэродинамика самолета. — М.: Транспорт, 1973.
8. Герасимов, А. И., Чурюмов, А. Ю. Надежность и живучесть авиационных конструкций. – М.: Машиностроение, 2017.
9. Емельянов, В. Г., Серов, А. А. Конструкция и прочность самолётов. – М.: МАИ, 2019.
10. MIL-HDBK-516C. Airworthiness Certification Criteria. – U.S. Department of Defense, 2014.

References

1. Wired: Could a Spanair Software Glitch Have Been Prevented.
2. Wikipedia: Mandala Airlines Flight 091
3. Wikipedia (rus.): Katastrofa DHC-6 na Murea
4. Wikipedia (rus.): Katastrofa Trident pod Londonom
5. ATSB: AO-2015-133 – Cessna 208 Flap System Failure
6. Latyshev, V. M. Aerodinamika i mehanizaciya kryla. – M.: Mashinostroenie, 1975.
7. Torenvik, F. Aerodinamika samoleta. — M.: Transport, 1973.
8. Gerasimov, A. I., Churyumov, A. Yu. Nadezhnost i zhivuchest aviacionnyh konstrukcij. – M.: Mashinostroenie, 2017.
9. Emelyanov, V. G., Serov, A. A. Konstrukciya i prochnost samolyotov. – M.: MAI, 2019.
10. MIL-HDBK-516C. Airworthiness Certification Criteria. – U.S. Department of Defense, 2014.

Відомості про авторів

Гребеніков Олександр Григорович – професор, доктор технічних наук, професор кафедри конструкції літаків та вертольотів, Національний аерокосмічний університет «ХАІ», м. Харків, Україна, agrebenikov@ukr.net.

Василевський Віталій Євгенович – аспірант, Національний аерокосмічний університет «ХАІ», м. Харків, Україна, vitvas7309@gmail.com.

About the Authors:

Grebenikov Oleksandr – Professor, Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Aircraft and Helicopter Design, National Aerospace University "KhAI", Kharkiv, Ukraine, agrebenikov@ukr.net.

Vasilevskyi Vitalii – PhD student, National Aerospace University "KhAI", Kharkiv, Ukraine, vitvas7309@gmail.com.