

## ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу

**Краснопольського Володимира Сергійовича**

«Прогнозування граничного стану заклепкових з'єднань авіаційних конструкцій при втомному багатоосередковому пошкодженні», яка представлена на здобуття

наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю

05.07.02 – проектування, виробництво та випробовування літальних апаратів

**Актуальність теми дисертації.** Авіаційний транспорт вважається у світі найбільш безпечним завдяки високим вимогам по надійності які пред'являються до сучасних літаків. Велика кратність дублювання та резервування систем дозволяють безпечно завершити політ навіть при виникненні двох різнорідних відмов, однак небезпеку, пов'язану з механічним руйнуванням конструкції не можна запобігти таким способом. Саме тому особливої уваги потребують втомні пошкодження конструкції літака, які поступово прогресують з часом експлуатації. Досвід інспекцій конструкції літаків, що мають значний наліт, показує наявність у них особливого виду втомного пошкодження. Багатоосередкове втомне пошкодження полягає у одночасній наявності та розвитку багатьох втомних тріщин в одному конструктивному елементі. Як правило, таким елементом є заклепковий шов через велику кількість компактно розташованих концентраторів напруження. Тому можливі руйнування, викликані даним видом пошкодження можуть виявитися критичними для літака. Прогнозування багатоосередкового пошкодження у сучасній практиці здійснюється в переважній більшості випадків за допомогою математичних чисельних методів. Такий підхід має обмежену ефективність через не врахування базових фізичних принципів виникнення та розвитку втомних пошкоджень, а побудова детерміністичних моделей є складною задачею через велику кількість випадкових факторів, що впливають на розвиток дефектів. Тому побудова імовірнісної моделі багатоосередкового пошкодження з врахуванням принципів виникнення та розвитку тріщин є важливою задачею. З огляду на кількість літаків «старіючого парку» в сучасному світі та необхідність забезпечення їх надійної експлуатації тема дисертаційної роботи В.С. Краснопольського, яка присвячена розробці та обґрунтуванню нового методу прогнозування ресурсу та визначення надійності авіаційних конструкцій при втомному багатоосередковому пошкодженні безумовно є актуальною.

Актуальність теми дисертаційної роботи також визначається її зв'язком з держбюджетними науково-дослідними роботами №861-ДБ13 «Метод моніторингу відпрацювання ресурсу повітряних суден з використанням інструментальних засобів контролю втомного пошкодження», (№ держреєстрації 0113U000080) та №122-ДБ17 «Методологія прогнозування втомного багатоосередкового пошкодження конструкцій літаків транспортної категорії», (№ держреєстрації 0117U00234), які виконувались відповідно тематичним планам науково-дослідних робіт Міністерства освіти і науки України.

**Ступінь обґрунтованості наукових положень і висновків, їх достовірність.** Запропоновані в дисертаційній роботі моделі розвитку втомних пошкоджень не суперечать сучасним уявленням механіки втомного руйнування, а методи прогнозування ресурсу та визначення надійності заклепкових з'єднань засновані на базових положеннях теорії ймовірностей.

Наукові положення роботи є достатньо обґрунтованими, а достовірність висновків забезпечується виконаними експериментальними дослідженнями та теоретичними розрахунками, які продемонстрували збіг отриманих результатів. Дослідження проведені з використанням сучасного методичного забезпечення, а саме: з використанням сертифікованої випробувальної машини, застосуванням методів цифрової фотозйомки, автоматизованої обробки цифрових зображень, а також методів регресійного аналізу.

**Повнота викладу результатів в опублікованих працях, апробація роботи.** Матеріали дисертації досить широко та у повному обсязі опубліковані автором у наукових виданнях, що входять до міжнародної наукометричної бази, апробовані на міжнародних науково-технічних конференціях. Публікації складаються з 17 робіт, в тому числі 4 статті у фахових наукових журналах, 2 у виданнях, що входять в міжнародну наукометричну базу Scopus, 10 публікацій матеріалів доповідей на міжнародних науково-технічних конференціях і 1 свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір.

**Наукова новизна** отриманого в дисертації результату, полягає в тому, що вирішена науково-технічна задача визначення надійності та ресурсу заклепкових з'єднань панельних авіаційних конструкцій при багатоосередковому пошкодженні шляхом наукового обґрунтування та розробки нового математичного забезпечення для моделювання процесів утворення та росту

втомних тріщин в конструкціях з отворами із алюмінієвого сплаву Д16АТ з врахуванням експериментально встановлених закономірностей.

Дане математичне забезпечення включає нову математичну модель формування стохастичності розмірів втомних тріщин з врахуванням випадковості їх утворення та росту. На основі цієї моделі в роботі теоретично показано та експериментально підтверджено, що імовірнісний розподіл довжини втомних тріщин при багатоосередковому пошкодженні відповідає закону Парето.

Виходячи з даної передумови автором розроблено нову імовірнісну модель об'єднання зустрічних тріщин при даному виді пошкодження та створена узагальнена математична модель, що описує розвиток багатоосередкового пошкодження. На її основі запропоновано новий метод прогнозування ресурсу та визначення надійності заклепкових з'єднань авіаційних конструкцій при багатоосередковому пошкодженні.

**Практичне значення отриманих результатів** полягає в тому, що запропонований метод прогнозування ресурсу та визначення надійності заклепкових з'єднань авіаційних конструкцій при багатоосередковому пошкодженні дозволяє розраховувати ресурс авіаційних конструкцій і обґрунтовано встановлювати періодичність інспекцій та може бути використаний для прогнозування технічного стану літакових конструкції в експлуатації, що зменшить вірогідність відмови та підвищить безпеку польоту.

Розроблені в роботі методики проведення експериментальних досліджень та вимірювання довжини втомних тріщин можуть бути застосовані в інженерній практиці та в лабораторних дослідженнях плоских зразків з множинними концентраторами із заклепковим з'єднанням обшивки літаків для експериментального визначення втомної тріщиностійкості і отримання результатів підвищеної точності.

Результати роботи використовуються в навчальному процесі кафедри конструкції літальних апаратів Національного авіаційного університету в курсі «Ресурс та довговічність авіаційної техніки», а також на ДП «Антонов» у виробництві літаків транспортної категорії для підвищення точності прогнозування появи та розвитку втомних тріщин у панелях, що містять заклепкові з'єднання та визначення їх надійності і несучої здатності.

## Оцінка змісту дисертації

Перший розділ присвячено огляду стану проблеми багатоосередкового пошкодження в рамках сучасних концепцій проектування авіаційної техніки та формулюванню задач дослідження.

Автором наведено дані стосовно об'єму старіючого парку літаків у світі та підтверджена актуальність проблеми прогнозування ресурсу таких повітряних суден. Детально розглянуті сучасні методи, які застосовуються для цього та зазначено широке використання чисельного моделювання, зокрема методу Монте-Карло. Шляхом аналізу наведених підходів показано, що вони не завжди використовують коректні припущення щодо імовірнісного трактування втомного руйнування і тому не відображають цілісного впливу на процес пошкодженості визначальних факторів, таких як випадкове зародження та розповсюдження тріщин, випадкова швидкість їх росту та можливість взаємодії при об'єднанні.

На підставі викладеного автором наголошено, що прогнозування ресурсу авіаційних конструкцій повинно здійснюватися виключно у імовірнісному аспекті та показано що ключовим для цього є імовірнісний розподіл довжин втомних тріщин. При цьому основними для аналітичного опису багатоосередкового пошкодження є три фактори, а саме: випадкове утворення початкових втомних тріщин, випадковий їх ріст та особливості процесу об'єднання зустрічних тріщин в конструкціях з множинними отворами. На основі вищезазначеного автор сформулював мету та задачі дослідження.

У другому розділі проведено аналіз фізичних принципів втомного руйнування та на їх основі побудовано імовірнісну модель багатоосередкового пошкодження.

На основі імовірнісного трактування стану перемички між отворами в з'єднанні автором розроблено імовірнісну модель багатоосередкового пошкодження та отримано показники надійності, які дозволяють прогнозувати стан та залишкову міцність конструкції, а саме: функцію імовірності безвідмовної роботи, імовірність настання граничного стану і функцію розподілу ресурсу заклепкового з'єднання. Показано, що для практичного застосування розробленої моделі необхідно задати функцію розподілу числа циклів до утворення тріщини початкового розміру, функцію розподілу довжини втомних тріщин при фіксованому напрацюванні та імовірність об'єднання тріщин, що ростуть назустріч від сусідніх отворів.

Для реалізації запропонованого підходу автором розроблено математичну модель формування розподілу довжини втомних тріщин при багатоосередковому пошкодженні з врахуванням їх випадкового утворення та випадкової швидкості росту. На підставі збігу отриманого гіперболічного типу розподілу теоретично обґрунтовано використання закону Парето для опису довжини втомних тріщин. На основі такого припущення автором аналітично отримано імовірнісну модель об'єднання зустрічних тріщин з врахуванням того, що їх довжина має розподіл Парето. Дана модель дозволяє обчислити імовірність руйнування перемички в заклепковому з'єднанні за рахунок двох тріщин при визначеному напрацюванні та умовах навантаження. В якості функції розподілу числа циклів до утворення тріщини початкового розміру автором обґрунтовано використання двопараметричного розподілу Вейбула.

**Третій розділ** містить опис методів та методик проведення експериментальних досліджень втомного багатоосередкового пошкодження у зразках з множинними концентраторами напруження.

Автором випробувано два типи експериментальних зразків при напруженнях, що імітують стандартний політ. Перший тип мав лише набір отворів, конфігурація яких повторює заклепковий шов, другий містив ділянку заклепкового з'єднання. Всі зразки мали 14 концентраторів напружень, розташованих у три ряди, що дозволило спостерігати розвиток одночасно декількох тріщин на одному зразку.

У зв'язку з тим, що геометрія використаних зразків була відмінною від тих, що використовують у класичних втомних випробуваннях автором було проведено комп'ютерне моделювання напружень у зразку та показана його рівнонавантаженість і відсутність взаємного впливу полів напружень біля отворів.

Для підвищення точності отримуваних результатів автором була розроблена оригінальна методика реєстрації та вимірювання розмірів втомних тріщин на зразку без зупинки випробувань. Методика базується на використанні цифрової камери, яка кріпиться безпосередньо на зразку та здійснює фотофіксацію розвитку пошкоджень. По отриманим фотографіям автор визначив реальні розміри тріщин за допомогою розробленої методики по цифровій обробці знімків.

У четвертому розділі показано обробку, узагальнення та аналіз отриманих експериментальних даних по кінетиці росту втомних тріщин в дослідних зразках.

Автором були побудовані криві росту тріщин, апроксимація яких у логарифмічних координатах показала їх відповідність експоненційному закону. Також були проведені дослідження з реєстрації числа циклів навантаження до виникнення втомних тріщин заданої довжини та підтверджено, що отримана функція розподілу відповідає двопараметричному розподілу Вейбула.

На основі експериментальних даних автором були побудовані розподіли довжини втомних тріщин, що фіксувалися в зразках при різних значеннях циклічного напруження. Підтверджено, що дані функції відповідають розподілу Парето. Виявлено залежність показника ступеня даного розподілу від напруження зразка. Знайдено аналітичні залежності, які описують зміну цього параметру та підтверджено його зменшення перед руйнуванням.

У п'ятому розділі розроблено методику розрахунку значень параметрів імовірнісної моделі багатоосередкового пошкодження заклепкових з'єднань та метод прогнозування ресурсу і визначення надійності таких з'єднань. В рамках цього методу автором розраховано функції імовірності безвідмовної роботи заклепкового з'єднання, імовірності руйнування хоча б однієї перемички, функції розподілу ресурсу зразків та спрогнозовано їх ресурс.

На основі отриманих даних виконано порівняння розрахункових та експериментальних ресурсів зразків для всіх рівнів напружень з використанням п'яти різних підходів. Шляхом порівняння похибок застосованих способів виявлено, що точність запропонованого методу лежить в межах 10-20% в найменш точному та 1-8% в найбільш точному підході і для зразків із заклепковим з'єднанням завжди іде в запас міцності.

### **Зауваження по дисертації**

До матеріалів досліджень, викладених в дисертації, слід зробити такі зауваження:

1. Граничний стан при моделюванні багатоосередкового пошкодження визначався в роботі руйнуванням однієї перемички між отворами. На практиці руйнування заклепкового з'єднання не лімітується однією перемичкою. Залишкова міцність конструкції визначається розповсюдженням магістральних тріщин, які проходять через кілька отворів і мають довжину, що набагато перевищує розмір однієї перемички.

2. В роботі досліджена досить обмежена кількість зразків, що може вплинути на достовірність наведених статистичних оцінок. Для надійного

підтвердження висунутих теоретичних положень було б доцільно збільшити обсяг випробувань або застосувати запропонований метод до реальних літаків старіючого парку.

3. Зважаючи на те, що в сучасних літаках постійно збільшується доля конструктивних елементів виготовлених з композиційних матеріалів, варто було б дослідити розвиток багатоосередкового пошкодження та можливість застосування цього методу для них.

4. В конструкції крила і фюзеляжу літака використовуються не лише заклепки, але і болтові з'єднання. Робота лише виграла б, якби були проведені дослідження по можливості застосування запропонованого методу до різних типів заклепок та з'єднань.

### Висновок по дисертації в цілому

В цілому, незважаючи на зазначені вище недоліки, дисертація за актуальністю, науковою новизною, особистим внеском автора, практичною цінністю, достовірністю результатів, обсягом і рівнем публікацій відповідає основним вимогам до дисертацій і авторефератів.

Автореферат достатньо повно віддзеркалює основний зміст дисертації.

Робота має достатньо високий рівень оформлення, матеріал викладений лаконічно, графіки і фотографії високої якості і відповідають змісту тексту.

Усе викладене вище дозволяє вважати, що дисертація В.С. Краснопольського є закінченим науковим дослідженням, у якому отримані нові науково обґрунтовані результати.

Робота цілком відповідає п. 11 «Порядку присудження наукових ступенів», а її автор – Краснопольський Володимир Сергійович заслуговує присудження наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.07.02 – проектування, виробництво та випробовування літальних апаратів.

Офіційний опонент

Заступник головного конструктора

Державного підприємства «АНТОНОВ»

кандидат технічних наук

Підпис Василевського Є.Т. завіряю

Вчений секретар НТР ДП "АНТОНОВ",

Головний конструктор, к.т.н.



Василевський Є.Т.

Семенець О.І.