

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу
Краснопольського Володимира Сергійовича

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

що представлена на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук
за спеціальністю 05.07.02 – Проектування, виробництво та випробування
літальних апаратів

Актуальність теми дисертації

Явище втомного руйнування в авіації відоме давно. Ще за часів катастрофи літака Comet I були виявлені основні фактори, які здатні підсилити, чи навпаки послабити спротив конструкції розвитку втомних пошкоджень. Однак подальший досвід боротьби із проблемою показав, що потрібно враховувати не лише наявність дефектів, але і конфігурацію їх розташування у конструкції. Так стала актуальною проблема багатоосередкового пошкодження.

Багатоосередкове пошкодження характеризується ростом і розвитком в одному конструктивному елементі множинних втомних тріщин, що може призвести до їх об'єднання та раптового руйнування. Як правило, цей вид пошкодження проявляється в елементах конструкції літаків, що мають велику кількість концентраторів напруження. Найчастіше мова іде про заклепкові шви, що містять велику кількість отворів, розташованих в ряд і які є потенційними джерелами зародження втомних тріщин.

Очевидно, що чим довше експлуатується літак, тим більше втомних тріщин виникне в його конструкції. Тому, саме втомне багатоосередкове пошкодження становить основну загрозу льотної придатності парку старіючих літаків. Виходячи з того, що об'єми цього парку рік від року збільшуються проблема прогнозування їх ресурсу набуває все більшої гостроти. Тому сьогодні питання подовження ресурсу старіючих літаків, а також оцінка їх працездатності, призначення періодичності оглядів і прогнозування залишкової міцності конструкції беззаперечно є актуальним завданням.

З огляду на велику кількість потенційних місць зародження тріщин у

заклепковому з'єднанні очевидно, що оцінка показників залишкової міцності і надійності таких конструкцій повинна здійснюватися у імовірнісному аспекті. Зазвичай для статистичних оцінок показників MSD використовується методологія, заснована на моделюванні процесів зародження, росту і об'єднання тріщин методом Монте-Карло. Однак при цьому часто не враховуються основоположні принципи розвитку даного виду пошкодження, що впливає на достовірність прогнозів. Це також підкреслює актуальність розглянутої роботи, що присвячена розробці нового імовірнісного методу прогнозування надійності та ресурсу заклепкових з'єднань.

Також варто підкреслити, що дисертаційна робота Краснопольського В.С. виконана в рамках держбюджетних тем: №861-ДБ13 «Метод моніторингу відпрацювання ресурсу повітряних суден з використанням інструментальних засобів контролю втомного пошкодження», (№ держреєстрації 0113U000080), строк виконання 2013-2015 рр. та №122-ДБ17 «Методологія прогнозування втомного багатоосередкового пошкодження конструкцій літаків транспортної категорії», (№ держреєстрації 0117U00234), строк виконання 2017-2019 рр., які виконувалися згідно тематичними планами НДР Міністерства освіти і науки України.

Мета, задачі і склад роботи.

Дисертаційна робота виконана на кафедрі конструкції літальних апаратів Аерокосмічного факультету Національного авіаційного університету Міністерства освіти і науки України.

Метою дослідження є розробка та обґрунтування методу прогнозування ресурсу та визначення надійності заклепкових з'єднань авіаційних конструкцій при багатоосередковому пошкодженні. Відповідно до цього було сформовано задачі дослідження, за якими необхідно було розробити методики та провести експериментальні дослідження розвитку багатоосередкового пошкодження в зразках з багатьма концентраторами напруження та заклепковим з'єднанням, по експериментальним даним визначити закони розподілу довжини втомних тріщин та розподіли циклічного напруження до утворення таких тріщин, розробити необхідне математичне забезпечення для створення імовірнісної моделі багатоосередкового пошкодження, розробити метод прогнозування ресурсу та визначення надійності заклепкових з'єднань та встановити точність запропонованого методу.

Дисертаційна робота включає вступ, п'ять розділів, загальні висновки, список використаних літературних джерел, який містить 129 посилань та 2 додатки.

У вступі стисло обґрунтовано актуальність роботи, сформульовано мету та задачі дослідження, описані об'єкт і методи досліджень, показано наукову новизну та практичну цінність роботи, визначено особистий внесок автора, наведені відомості про апробацію результатів роботи.

У першому розділі роботи здійснено огляд стану проблеми, розкрито сучасний стан досліджень, виконаних за обраною темою, обґрунтовано основні напрями досліджень дисертаційної роботи.

Детально проаналізовано сучасні методи моделювання множинного втомного пошкодження, і зокрема багатоосередкового пошкодження заклепкових з'єднань. Показано, що чисельне моделювання методом Монте-Карло, що широко застосовується, не завжди достовірно відображає процес розвитку даного виду пошкодження. Зазначено, що через велику кількість концентраторів напруження та різноманіття пошкоджуючих факторів ресурсні характеристики авіаційних конструкцій повинні представлятися у імовірнісному аспекті.

На підставі аналізу існуючих підходів відзначено, що імовірнісний розподіл часу до появи початкових тріщин може бути описаний двопараметричним розподілом Вейбула. Показано, що ключовим для побудови імовірнісної моделі багатоосередкового пошкодження є імовірнісний розподіл довжини втомних тріщин, який би враховував випадковість зародження тріщин та випадкову швидкість їх росту. Це дозволило автору сформулювати мету і задачі дисертаційного дослідження.

У другому розділі розроблено оригінальне математичне забезпечення для побудови імовірнісної моделі багатоосередкового пошкодження.

Детально розглянувши імовірність всіх станів перемички між суміжними отворами автор отримав та обґрунтував чисельні характеристики, що дозволяють судити про надійність з'єднання у вигляді функції імовірності безвідмовної роботи, імовірності настання граничного стану і функції розподілу ресурсу заклепкового з'єднання. На їх основі отримана імовірнісна модель багатоосередкового пошкодження та показано, що для її застосування необхідно володіти трьома ключовими елементами, а саме: функцією розподілу числа циклів до утворення тріщини початкового розміру, функцією розподілу

довжини втомних тріщин при фіксованому напрацюванні та імовірністю об'єднання тріщин, що ростуть назустріч від сусідніх отворів.

На підставі досвіду провідних авіакомпаній світу автором обґрунтовано використання двопараметричного розподілу Вейбула в якості розподілу числа циклів до утворення початкових втомних тріщин. Виходячи з умов випадкового в часі утворення тріщин та випадкової швидкості їх росту побудовано аналітичну модель розвитку втомних пошкоджень. При цьому шляхом аналізу було виявлено, що отриманий при цьому імовірнісний розподіл довжини втомних тріщин є частковим випадком розподілу Парето. На основі даного припущення отримано модель об'єднання зустрічних втомних тріщин в певний момент часу. Автором здійснена компіляція всіх вищезазначених моделей та отримано завершену імовірнісну модель багатоосередкового пошкодження.

Третій розділ присвячено питанням методичного забезпечення експериментальної частини дослідження. Зокрема, представлені: методики проведення експериментальних досліджень; опис обладнання для випробувань, опис експериментальних зразків та методики їх підготовки до експериментів, методики отримання експериментальних даних. Випробування здійснювалися з використанням двох типів зразків з авіаційного алюмінієвого сплаву Д16АТ: з отворами та з ділянкою заклепкового з'єднання. Матеріал зразків, їх розміри і режими навантажування обирались таким чином, щоб коректно змоделювати режими експлуатації елементів авіаційних конструкцій.

Автором також запропоновано і описано методику безперервної реєстрації і вимірювання розмірів втомних тріщин на зразку в процесі його навантаження. Згідно цієї методики реєстрація тріщин здійснювалася цифровою камерою, яка кріпилася безпосередньо на зразку. Цифрові знімки погоджувалися в часі з циклічним напрацюванням і, таким чином, відслідковувався процес росту тріщин.

У четвертому розділі відображено результати експериментальних досліджень. На основі оброблених експериментальних даних побудовано криві росту тріщин та показано, що вони відповідають експоненційному закону. За допомогою статистичної обробки отриманих даних визначено, що розподіл числа циклів до утворення тріщин в зразках з множинними отворами для усіх режимів циклічного навантаження в основному відповідає розподілу Вейбула. Визначено параметри цього розподілу для всіх випробуваних зразків.

Базуючись на кривих росту тріщин отримані вибірки по їх довжинам при конкретних напрацюваннях та побудовані експериментальні розподіли довжини втомних тріщин. Шляхом аналізу визначено, що дані розподіли відповідають розподілу Парето. При обробці експериментальних даних автором виявлена залежність між показником ступеня розподілу Парето та циклічним напрацюванням, а також підтверджено його зменшення перед руйнуванням зразка.

У п'ятому розділі автором розроблено методику застосування імовірнісної моделі багатоосередкового пошкодження та представлено метод прогнозування ресурсу та визначення надійності заклепкових з'єднань.

Запропонований метод застосовано до випробуваних експериментальних зразків та розраховано імовірність їх безвідмовної роботи, імовірність руйнування перемичок та розподіл ресурсів. Зроблені прогнози по ресурсу і руйнуванню автор порівняв з експериментальними даними та показав їх задовільний збіг. При цьому отримані похибки для зразків із заклепковим з'єднанням завжди йшли в запас міцності зразка.

На підставі викладеного по роботі представлені загальні висновки, які містять основні наукові і практичні результати, отримані автором дисертації.

У додатку представлено акт впровадження результатів дисертаційної роботи Краснопольського В.С. «Прогнозування граничного стану заклепкових з'єднань авіаційних конструкцій при втомному багатоосередковому пошкодженні» на ДП «АНТОНОВ» та в навчальний процес Національного авіаційного університету.

Таким чином, дисертаційна робота має всі необхідні розділи, які включають: огляд існуючих теоретичних та технічних рішень, теоретичні і експериментальні дослідження з відповідним методологічним забезпеченням, співставлення теоретичних і чисельних розрахунків з експериментальними даними. Зміст роботи відповідає вимогам до оформлення кандидатських дисертацій, є логічним і має сучасну технічну термінологію.

Ступінь обґрунтованості і достовірності наукових положень та висновків. Наукові положення дисертації базуються на відомих аналітичних методах механіки втомного руйнування та теорії ймовірностей, застосуванні сучасних методів експериментальних випробувань і є достатньо обґрунтованими.

Достовірність отриманих результатів обумовлена високим науково-методичним рівнем досліджень, вживанням сучасної контрольної-вимірної і комп'ютерної техніки. Достовірність експериментальних результатів забезпечується низкою стандартних заходів, порівнянням розрахункових даних з експериментальними.

Оцінка наукової новизни дослідження й отриманих результатів.

Наукова новизна дослідження Краснопольського В.С. та отриманих їм результатів полягає в наступному:

1. Отримані нові експериментальні результати з багатоосередкового втомного пошкодження плоских зразків та елементів заклепкових з'єднань із алюмінієвого сплаву Д16АТ.

2. Розроблено нову математичну модель формування стохастичності розмірів втомних тріщин з врахуванням випадковості їх утворення та росту. На основі цієї моделі вперше теоретично та експериментально підтверджено, що імовірнісний розподіл довжини втомних тріщин відповідає закону Парето.

3. Розроблено нову імовірнісну модель об'єднання зустрічних тріщин при багатоосередковому пошкодженні з врахуванням, що довжина цих тріщин має розподіл Парето.

4. Розроблена математична модель багатоосередкового пошкодження і на її основі запропонований новий метод прогнозування ресурсу та визначення надійності заклепкових з'єднань авіаційних конструкцій при багатоосередковому пошкодженні.

Значимість для практики рекомендацій та висновків

Цінність для практики виконаного Краснопольським В.С. дисертаційного дослідження полягає у розробленому методичному забезпеченні експериментальних досліджень багатоосередкового втомного пошкодження плоских зразків та елементів заклепкових з'єднань, що дозволяє отримувати дані про поведінку великої кількості тріщин на одному зразку в процесі циклічного навантаження без зупинки експерименту.

Результати роботи можуть бути безпосередньо використані при розширенні існуючої нормативної бази проектування і оцінки ресурсу авіаційних конструкцій за умови багатоосередкового втомного пошкодження, а також при 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.

Повнота опублікування результатів дисертації.

Основні результати досліджень опубліковані у 17 наукових працях, зокрема 4 статті у фахових виданнях, 2 у виданнях, що входять до міжнародної наукометричної бази даних Scopus. Основні положення дисертації доповідались на 10 всеукраїнських та міжнародних науково-технічних конференціях.

Зміст автореферату ідентичний основним положенням дисертації та повністю висвітлює висновки роботи.

Зауваження по змісту і оформленню дисертації в роботі

1. Не окреслено межі застосування розроблених підходів до прогнозування ресурсу конструкцій з багатоосередковим пошкодженням. Так, всі експериментальні дослідження виконувалися за умови віднульового циклу і лінійного напруженого стану на трирядному заклепковому з'єднанні. Чи буде застосовним запропонований підхід до інших видів з'єднань та при інших умовах навантаження в роботі не розглядається.

2. Експериментальні дослідження проведено на зразках тільки одного алюмінієвого сплаву Д16АТ. При описанні зразків не наведені дані щодо мікроструктури сплаву, яка, як відомо, суттєво впливає на зародження та розповсюдження тріщин.

3. Коефіцієнт R^2 зветься коефіцієнтом кореляції, в той час як таке позначення традиційно вживається в науковій літературі для коефіцієнта детермінації, тому виникає питання, що автор все таки обчислював. Крім того, просто навести значення будь-якого коефіцієнта не достатньо, необхідно перевірити його статистичну значущість, нажаль, в роботі це не відображено.

4. В роботі наведена досить велика кількість графічного матеріалу стосовно експериментально отриманих та досліджуваних залежностей. Можливо дану інформацію в повному обсязі було б доцільно розмістити в окремому додатку.

Загальні висновки стосовно дисертації.

Дисертаційна робота Краснопольського В.С. «Прогнозування граничного стану заклепкових з'єднань авіаційних конструкцій при втомному багатоосередковому пошкодженні» є закінченим науковим дослідженням, яке спрямоване на вирішення важливої науково-технічної задачі, що має наукове значення і полягає в розробці методу прогнозування ресурсу авіаційних конструкцій з багатоосередковим пошкодженням для забезпечення льотної придатності та обґрунтування ресурсу літаків під час їх експлуатації.

Зроблені зауваження не є принциповими, і не зменшують позитивного враження від дисертаційної роботи.

Враховуючи актуальність теми, новизну і важливість отриманих наукових результатів, їх велике практичне значення, вважаю, що дисертація «Прогнозування граничного стану заклепкових з'єднань авіаційних конструкцій при втомному багатоосередковому пошкодженні» повністю 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 випробування літальних апаратів

Офіційний опонент
Завідувач кафедри
проектування літаків та вертольотів
Національного аерокосмічного
університету ім. М.Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут»
доктор технічних наук, професор
Заслужений працівник освіти України

Гребеніков О.Г.

Підпис д.т.н., проф. О. Г. Гребенікова завіряю
Проректор з наукової роботи
Національного аерокосмічного
університету ім. М.Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут»
доктор технічних наук,
старший наук. співроб.



Павліков В. В.