

## ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу  
Карана Євгена Валентиновича  
**"ПРОГНОЗУВАННЯ РЕСУРСУ АВІАЦІЙНИХ КОНСТРУКЦІЙ З  
БАГАТООСЕРЕДКОВИМ ПОШКОДЖЕННЯМ",**  
що представлена на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук  
за спеціальністю 05.07.02 – «Проектування, виробництво  
та випробування літальних апаратів»

### **Актуальність теми дисертації**

Дослідженню процесів втомного руйнування та розробці методів прогнозування ресурсу авіаційних конструкцій присвячено багато робіт. Однак життя постійно ставить нові завдання. У теперішній час для переважної більшості країн світу актуальною стала проблема старіючих літаків. Багато типів літаків виробили проектні ресурси. Проте такі старіючі літаки майже неможливо замінити новими типами літаків, через що владні органи в сфері авіаційної безпеки змушені подовжувати ресурси і терміни експлуатації таких літаків понад їх проектні характеристики.

Тривала експлуатація літаків супроводжується такими явищами, як деградація характеристик опору втомі і тріщиностійкості конструкцій, виникненням множинних втомних пошкоджень.

Множинні втомні пошкодження характеризуються наявністю в одній або декількох суміжних деталях значної кількості тріщин таких розмірів і з такою щільністю, що конструкція не може зберігати необхідну залишкову міцність після часткового руйнування. Окремим випадком множинного втомного пошкодження є багатоосередкове пошкодження, що характеризується появою в одному і тому ж елементі конструкції таких втомних тріщин, які в разі їх об'єднання призводять до втрати залишкової міцності. Як правило, такого пошкодження зазнають елементи літаків, які мають велику кількість отворів під заклепкові з'єднання, що розташовані в ряд і є потенційними джерелами зародження втомних тріщин через концентрацію напружень.

Слід зазначити, що дана проблема стала визначальною в комплексі заходів щодо забезпечення льотної придатності та обґрунтуванню ресурсів старіючого парку літаків.

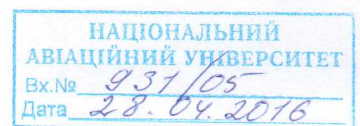
Дисертаційна робота Каран Є.В. виконана в рамках держбюджетних тем: № 666-ДБ10 «Прогнозування граничного стану елементів авіаційних конструкцій за параметрами деформаційного рельєфу поверхневого шару», (№ держреєстрації 0110U000219), термін виконання: 2010 - 2012 рр.; № 861-ДБ13 «Метод моніторингу вироблення ресурсу повітряних суден з використанням інструментальних засобів контролю втомного пошкодження», (№ держреєстрації 0113U000080), строк виконання 2007 - 2009 рр., які виконувалися згідно тематичними планами НДР Міністерства освіти і науки України.

У зв'язку з вищевикладеним, актуальність дисертаційної роботи Карана Є.В. "Прогнозування ресурсу авіаційних конструкцій з багатоосередковим пошкодженням", спрямованої на вирішення важливої науково-технічної проблеми забезпечення льотної придатності та обґрунтування ресурсів літаків під час експлуатації, не викликає сумнівів.

### **Мета, задачі і склад роботи.**

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

Метою дослідження є розробка методу прогнозування ресурсу авіаційних конструкцій з багатоосередковим пошкодженням заклепкових з'єднань. Відповідно до цього було





сформовано задачі дослідження, за якими необхідно було дослідити закономірності опору втомі зразків з множинними концентраторами і модельних зразків із заклепковими з'єднаннями внапуск, виготовлених з алюмінієвого сплаву Д16АТ, визначити статистичний розподіл і числові характеристики циклічного напруження до утворення втомних тріщин в зразках залежно від діючого напруження та вплив заклепкового з'єднання на втомну міцність зразків з множинними концентраторами, побудувати узагальнену кінетичну діаграму втомного руйнування, оцінити коефіцієнти рівняння Періса, розробити математичну модель, відповідне алгоритмічне та програмне забезпечення для чисельного моделювання багатоосередкового пошкодження заклепкових з'єднань авіаційних конструкцій із алюмінієвих сплавів, встановити точність розробленого методу.

Дисертаційна робота включає вступ, чотири розділи, загальні висновки, список використаних літературних джерел, який становить 116 посилань та 1 додаток.

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

**В першому розділі** роботи зроблено докладний огляд стану проблеми розкрито сучасний стан досліджень, виконаних за обраною темою, обґрунтовано основні напрями досліджень дисертаційної роботи.

Детально проаналізовано методи та моделі оцінки ресурсних характеристик авіаційних конструкцій за умови множинного втомного пошкодження, зокрема, і для багатоосередкового пошкодження заклепкових з'єднань. Зазначено, що ресурсні характеристики заклепкових з'єднань повинні представлятися у ймовірнісному аспекті, а для їх визначення слід застосовувати методи чисельного моделювання.

Розглянуто існуючі підходи до чисельного моделювання багатоосередкового втомного пошкодження. Відзначено, що ймовірнісне розподілення часу до появи початкової тріщини, переважно розраховується за двопараметричним розподілом Вейбулла. Цей висновок став обґрунтуванням для прийняття цього розподілу у якості базового під час моделювання початкової стадії утворення багатоосередкового пошкодження у даній роботі.

Проаналізовані кінетична діаграма втомного руйнування та підходи до моделювання випадкового росту тріщин на основі використання рівняння Періса. Показано, що при цьому мають місце різні припущення щодо коефіцієнтів цього рівняння. Розглянуто декілька моделей статистичного трактування цих коефіцієнтів.

Матеріал першого розділу дозволив автору сформулювати мету і задачі власного дисертаційного дослідження.

**В другому розділі** розглянуто питання методичного забезпечення експериментальної частини дослідження. Зокрема, представлені: опис експериментальних засобів і зразків, програма експерименту, методики випробувань. Випробування здійснювали на зразках з авіаційного алюмінієвого сплаву Д16АТ. Матеріал зразків їх розміри і форма, режими навантажування все обирались за умови коректного моделювання режиму експлуатації елементів заклепкових з'єднань в авіаційних конструкціях.

Запропоновано і детально описано методику безперервної реєстрації і вимірювання розмірів втомних тріщин на зразку в процесі його навантаження. Згідно цієї методики реєстрація тріщин здійснювалася цифровою камерою Logitech QuickCam E3500. Цифрові знімки у часі погоджувалися з циклічним напруженням і, таким чином, відслідковувався процес зростання тріщин.

**Третій розділ** присвячено відображенню результатів експериментальних досліджень. На основі статистичної обробки отриманих експериментальних даних визначено, що розподіл числа циклів до утворення тріщин в зразках з множинними отворами для усіх режимів циклічного навантажування в основному відповідає розподілу Вейбулла. Визначено параметри розподілу для зразків із сплаву Д16АТ.



Досліджено вплив заклепок в з'єднанні на тривалість стадій багатоосередкового пошкодження – стадії до утворення початкової втомної тріщини, стадії росту тріщин і стадії до повного руйнування зразків. Встановлено, що зразки із заклепковим з'єднанням на всіх стадіях мають більший опір втомному руйнуванню. При цьому, ефект заклепкового з'єднання збільшується із зростанням максимального напруження в циклі.

Побудовано кінетичні діаграми втомного руйнування для тріщин, що рееструвалися як в зразках з отворами, так і зразках із заклепковим з'єднанням. Встановлено, що за апроксимації експериментальних залежностей швидкості зростання тріщин від розмаху коефіцієнта інтенсивності напружень рівнянням Періса, коефіцієнти цього рівняння в напівлогарифмічних координатах є взаємозалежними і апроксимуються прямою лінійною. Дана лінійна залежність виявилася справедливою для обох типів зразків зі сплаву Д16АТ, що піддавалися випробуванням.

**У четвертому розділі** результати експериментальних досліджень, які були отримані на зразках зі сплаву Д16АТ, узагальнено і поширено на інші алюмінієві сплави, зокрема, на сплави 2024-Т3 і 7075-Т6. Аналіз літературних джерел показав, що для цих сплавів також є характерною лінійна залежність між коефіцієнтами рівняння Періса у напівлогарифмічних координатах. Крім того, аналіз засвідчив, що така ж залежність є притаманною і для різних типів сталей.

Наявність залежності між коефіцієнтами рівняння Періса дозволило автору сформулювати висновок про те, що кінетичні діаграми втомного руйнування для окремих тріщин повинні перетинатися в одній точці. Експериментальні дані, які отримані у роботі і взяті з літературних джерел, підтвердили наявність такого перетину.

Отримані експериментальні результати і зроблені узагальнення дозволили модифікувати рівняння Періса, в якому один з параметрів визначається через невідомі сталі матеріалу, а інший параметр вважається випадковою величиною. Встановлено, що для алюмінієвих сплавів статистичний розподіл даного коефіцієнта описується логарифмічно нормальним законом.

Запропоновано математичну модель, яка відтворює основні процеси втомного руйнування заклепкового з'єднання (утворення та росту втомних тріщин, об'єднання зустрічних тріщин) за допомогою методу Монте-Карло. Для реалізації даної моделі розроблена спеціальна комп'ютерна програма CrackSkinP.

Порівняння результатів чисельного моделювання з даними експериментальних досліджень засвідчило їх задовільну відповідність.

В цілому по роботі представлені загальні висновки, які містять основні наукові і практичні результати, отримані автором дисертації.

**У додатку** представлено акт впровадження результатів дисертаційної роботи Карана Є.В. "Прогнозування ресурсу авіаційних конструкцій при багатоосередковому пошкодженні" на ДП «АНТОНОВ».

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 та чисельних методах механіки деформівного твердого тіла та механіки руйнування, застосуванні сучасних методів експериментальних випробувань і є достатньо обґрунтованими.

Достовірність отриманих результатів обумовлена високим науково-методичним рівнем досліджень, вживанням сучасної контрольовано-вимірювальної 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 Карана Є.В. 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. Продемонстровано, що заклепкове з'єднання збільшує опір багатоосередковому втомному пошкодженню, стадія зростання тріщин зростає на 45...55% у порівнянні з вільними отворами.

3. Запропонована модифікація рівняння Періса для алюмінієвих сплавів та сталей, яка базується на лінійній залежності між коефіцієнтами рівняння Періса у напівлогарифмічних координатах.

4. Розроблено методику прогнозування ресурсу авіаційних конструкцій в умовах багатоосередкового пошкодження заклепкових з'єднань на основі проведення чисельного експерименту з врахуванням експериментально встановлених закономірностей утворення і росту втомних тріщин в алюмінієвому сплаві Д16АТ та методу Монте-Карло.

### **Значимість для практики рекомендацій та висновків**

Цінність для практики виконаного Караном Є.В. 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, а також у програмному забезпеченні, що дозволяє виконувати чисельний експеримент з моделювання багатоосередкового пошкодження елементів конструкцій із заданими параметрами заклепкових з'єднань для оцінки їх залишкової міцності.

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

### **Повнота опублікування результатів дисертації.**

Основні результати досліджень опубліковані у 20 наукових працях, зокрема 9 статей у фахових виданнях, 3 у виданнях, що входять до міжнародної наукометричної бази даних SCOPUS.

Основні положення дисертації доповідались на 8 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. Під час обґрунтування актуальності теми дослідження наводяться дані тільки зарубіжної статистики щодо старіючого парку літаків, статистичні дані по Україні не представлені.
2. 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. Відповіді на питання, що зміниться в запропонованих моделях з переходом до іншого циклу навантаження або до складного напруженого стану в роботі не має.
3. Відсутні (або недостатні) пояснення до ряду процедур дослідження. Так на сторінці 71 дисертації в таблиці 3.4 представлені параметри розподілу Вейбулла, але жодних пояснень щодо процедури їх визначення не наведено. Інший приклад, в таблиці 3.5 (сторінка 73 дисертації) розміщені дані щодо числа циклів до руйнування, але критерій досягнення граничного стану не вказано.



4. Експериментальні дослідження проведено тільки на зразках одного алюмінієвого сплаву Д16АТ. При описанні зразків не наведені дані щодо мікроструктури сплаву, яка, як відомо, суттєво впливає на зародження та розповсюдження тріщин.
5. 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, на жаль, в роботі це не відображено.
6. Є зауваження редакційного характеру. Автор активно використовує термін числовий експеримент замість чисельний. Розділ 4.3, присвячений описанню інтерфейсу програми CrackSkinP, більше схожий на покрокову інструкцію для користувачів. Тому, доцільно було б цю інформацію розмістити у додатках.

#### **Загальні висновки стосовно дисертації.**

Дисертаційна робота Карана Є.В. "Прогнозування ресурсу авіаційних конструкцій з багатоосередковим пошкодженням" є закінченим науковим дослідженням, яке спрямоване на рішення важливої науково-технічної проблеми, що має народногосподарське значення і полягає в розробці методу прогнозування ресурсу авіаційних конструкцій з багатоосередковим пошкодженням для забезпечення льотної придатності та обґрунтування ресурсів 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 ресурсу авіаційних конструкцій з багатоосередковим пошкодженням" повністю відповідає п. 9, 11 "Порядку присудження наукових ступенів" затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24 липня 2013 року №567 щодо кандидатських дисертацій, а її автор, Каран Євген Валентинович, заслуговує присудження наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.07.02 – проектування, виробництво та випробування літальних апаратів

Офіційний опонент,  
професор кафедри "Динаміки і міцності машин та опору матеріалів"  
Національного технічного університету України  
"Київський політехнічний інститут",  
доктор технічних наук, професор



Шукаєв С.М.

Підпис д.т.н., проф. Шукаєва С.М. засвідчую,  
Учений секретар НТУУ "КПІ"



Мельниченко А.А.



## ВІДГУК

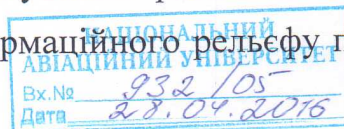
офіційного опонента на дисертаційну роботу

**Карана Євгена Валентиновича**

«Прогнозування ресурсу авіаційних конструкцій з багатоосередковим пошкодженням», яка представлена на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.07.02 – проектування, виробництво та випробовування літальних апаратів

**Актуальність теми дисертації.** Сучасні літаки – це складні високотехнологічні машини, що проектуються і виготовляються для довготривалого та інтенсивного використання, і до яких висуваються підвищені вимоги щодо надійної та безпечної експлуатації. Широкий спектр пошкоджуючих факторів, основним з яких є циклічне навантаження, обумовлює втомне руйнування конструкцій літака, які мають конструктивні концентратори напруження, насамперед отвори під заклепки. Досвід експлуатації літаків з достатньо великим напрацюванням (старіючий парк) свідчить, що вздовж заклепкових з'єднань обшивки фюзеляжу та крила має місце так зване багатоосередкове пошкодження, яке проявляється у виникненні та розповсюдженні великої кількості втомних тріщин. Згідно до вимог сучасної концепції допустимості пошкоджень для забезпечення цілісності конструкції при наявності тріщиноподібних пошкоджень необхідно забезпечувати необхідний рівень залишкової міцності такої конструкції. Для цього необхідно вирішувати цілий комплекс проблемних задач, до яких відноситься прогнозування утворення та розповсюдження втомних тріщин, обґрунтування граничних станів критичних конструкційних елементів з тріщинами та визначення граничних значень залишкової міцності. Такі актуальні задачі вирішуються зі застосуванням теоретичних та експериментальних методів механіки втомного руйнування, а також з використанням нових підходів, що базуються на методах чисельного моделювання втомного руйнування. В цьому плані тема дисертаційної роботи Є.В. Карана, яка присвячена розробці та обґрунтуванню нового методу прогнозування ресурсу авіаційних конструкцій з багатоосередковим пошкодженням на основі чисельного експерименту, є безумовно актуальною.

Актуальність теми дисертаційної роботи Є.В. Карана визначається також її зв'язком з держбюджетними НДР: № 666-ДБ10 «Прогнозування граничного стану елементів авіаційних конструкцій за параметрами деформаційного рельєфу пове-





рхневого шару», (№ ДР 0110U000219) та № 861-ДБ13 «Метод моніторингу вироблення ресурсу повітряних суден з використанням інструментальних засобів контролю втомного пошкодження», (№ ДР 0113U000080), які виконувалися згідно тематичними планами НДР Міністерства освіти і науки України.

**Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, їх достовірність.** Результати та висновки, що отримані у дисертаційній роботі, не заперечують сучасним уявленням механіки втомного руйнування матеріалів.

Усі наукові положення роботи, а також висновки і рекомендації, що випливають з них, достатньою обґрунтовані з використанням сучасного методичного забезпечення при проведенні експериментальних досліджень, а саме: використанням сертифікованої випробувальної машини, застосуванням методів цифрової фотозйомки, автоматизованої обробки цифрових зображень, методів числового моделювання, а також методів регресійного аналізу.

Достовірність отриманих у роботі експериментальних даних з кінетики росту втомних тріщин в алюмінієвому сплаві Д16АТ підтверджується співпаданням значень коефіцієнтів Періса з аналогічними даними для сплавів 2024-Т3 і 7075-Т6, взятим з літературних джерел.

**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 науково метричної бази, апробовані на міжнародних науково-технічних конференціях. Публікації складаються з 20 найменувань, 9 з яких опубліковано у наукових журналах з переліку Департаменту атестації наукових кадрів МОН України по технічних науках, 3 статті у закордонних виданнях, внесених до науково метричної бази Scopus та 8 матеріалів доповідей на міжнародних науково-технічних конференціях.

**Наукова новизна** основного, отриманого в дисертації результату, полягає в тому, що автором вперше науково обґрунтоване та розроблене математичне та методичне забезпечення для реалізації числового моделювання процесів утворення та росту втомних тріщин в конструкціях з отворами із алюмінієвого сплаву Д16АТ з врахуванням експериментально встановлених закономірностей утворення та росту втомних тріщини в отворах під заклепки.

До конкретних результатів, які мають наукову новизну, відносяться.



1. Експериментально встановлена лінійна залежність між коефіцієнтами рівняння Періса у напівлогарифмічних координатах для сплаву Д16АТ, яка узгоджується з аналогічними даними для зарубіжних авіаційних алюмінієвих сплавів.

2. На підставі лінійної залежності між коефіцієнтами рівняння Періса теоретично обґрунтовано та експериментально підтверджено, що кінетичні діаграми втомного руйнування для окремих тріщин перетинаються в одній точці, названої точкою фокусу.

3. Запропоновано нову емпіричну модель кінетики росту втомних тріщин, яка базується на модифікованому рівнянні Періса і дозволяє моделювати випадковий ріст тріщин в залежності від статистичного розподілу коефіцієнта  $m$ .

4. Розроблено та апробовано новий метод прогнозування ресурсу авіаційних конструкцій на основі проведення числового експерименту при багатоосередковому пошкодженні заклепкових з'єднань з врахуванням експериментально встановлених закономірностей утворення і росту втомних тріщин в алюмінієвому сплаві Д16АТ.

**Практичне значення отриманих результатів** полягає у можливості використання в інженерній практиці та в лабораторних дослідженнях методичного забезпечення випробувань плоских зразках з множинними концентраторами і із заклепковими з'єднаннями обшивки літаків для експериментального визначення втомної тріщиностійкості.

Розроблена автором комп'ютерна модель на основі методу Монте-Карло, а також відповідне алгоритмічне, програмне та методичне забезпечення дозволить ефективно проводити числовий експеримент з моделювання багатоосередкового пошкодження авіаційних конструкцій із заданими параметрами заклепкових з'єднань. Це надасть адекватну інформацію про граничний стан конструкцій і визначати їх ресурсні характеристики.

Результати дисертаційної роботи впроваджені у ДП «АНТОНОВ» і використовуються для визначення цілісності елементів конструкцій планера повітряного судна, а саме при оцінці залишкової міцності великогабаритних елементів з багатоосередковою пошкоджуваністю.

### **Оцінка змісту дисертації**

**Перший розділ.** Присвячений аналізу стану проблеми дослідження.

При аналізі стану проблеми автор детально зупинився на деяких існуючих методах визначення ресурсу авіаційних конструкцій, результатах сучасних дослі-



джені багатосередкового втомного пошкодження авіаційних конструкцій із заклепковими з'єднаннями, питаннях визначення основних ресурсних характеристик.

Показано, що існуючі підходи до числового моделювання багатосередкового втомного пошкодження базуються на моделях, в яких закладається ймовірнісні характеристики двох основних факторів пошкодження – утворення початкових втомних тріщин та їх випадкового росту. Аналіз літературних джерел показав, що в існуючих моделях використовуються не завжди коректні припущення щодо ймовірнісного трактування втомного руйнування, а також відмічено доволі обмежений обсяг експериментальних даних щодо втомної тріщиностійкості конструкційних алюмінієвих сплавів та впливу заклепок на опір багатосередковому втомному руйнуванню.

**Другий розділ** присвячений опису розробленого методу і методик дослідження багатосередкового втомного пошкодження на зразках, що імітують елементи заклепкових з'єднань авіаційних конструкцій.

Автор розробив оригінальну конструкцію плоских зразків, що мають 14 концентраторів напружень у вигляді отворів, а також зразки, які імітують заклепкове з'єднання обшивки. Це дало змогу на одному зразку досліджувати поведінку не одної, а зразу кількох тріщин.

Для дослідження багатосередкової пошкоджуваності зразків була розроблена оригінальна методика, безперервної реєстрації та вимірювання розмірів втомних тріщин на зразку в процесі його навантажування. Методика базується на використанні цифрової камери, яка закріплюється безпосередньо на зразку. Це дає можливість проводити коректні вимірювання розмірів тріщин в процесі навантажування без зупинки випробувальної машини

Автором розроблена методика визначення розмірів тріщин за їх цифровими зображеннями.

**Третій розділ** присвячений отриманню, узагальненню та аналізу експериментальних даних по кінетиці росту втомних тріщин в зразках двох типів – з множинними концентраторами у вигляді отворів та з заклепковим з'єднанням. Показано, що черговість появи тріщин в зразках є випадковою і описується рівномірним розподілом за отворами.



Встановлено, що заклепкове з'єднання підвищує опір багатоосередковому пошкодженню алюмінієвого сплаву Д16АТ. Так, максимальний ефект опору руйнуванню в заклепковому зєднанні має місце на стадії росту тріщин.

На базі проведених циклічних випробувань з кінетики росту тріщин в зразках з отворами і в зразках із заклепковим з'єднанням були побудовані відповідні кінетичні діаграми втомного руйнування, на яких присутні три характерні ділянки – низьких, середніх і високих швидкостей. Визначені коефіцієнти рівняння Періса  $m$  і  $C$  при лінійній регресії другої ділянки кінетичних діаграм.

Головним результатом у розділі є те, що при представленні експериментальних точок в напівлогарифмічних координатах коефіцієнти рівняння Періса  $m$  і  $C$  для зразків з отворами і з заклепковим з'єднанням є взаємозалежними і апроксимуються прямою лінійною.

**У четвертому розділі** проведений аналіз отриманих експериментальних даних та побудовані моделі числового експерименту багатоосередкової пошкоджуваності на основі отриманих закономірностей виникнення та росту атомних тріщин.

Аналіз літературних джерел показав, що лінійна регресія між коефіцієнтами рівняння Періса у напівлогарифмічних координатах має місце і для інших матеріалів, наприклад для сталей. Встановлено також, що лінійна регресія притаманна для інших алюмінієвих сплавів, зокрема для сплаву 2024-Т3 і для сплаву 7075-Т6. Експериментальні значення коефіцієнтів рівняння Періса  $m$  і  $C$  для цих сплавів задовільно збігаються з даними, що були отримані автором для сплаву Д16АТ. На базі цього автор показав, що КДВР для окремих тріщин повинні перетинатися в одній точці. Цю точку автор назвав точкою фокусу та визначив її координати для алюмінієвих сплавів і сталей.

Виходячи з встановленої залежності між параметрами  $\lg C$  і  $m$  та наявності точки фокусу у роботі запропонована нова емпірична модель кінетики росту втомних тріщин, яка дозволяє моделювати випадковий ріст тріщин в залежності від статистичного розподілу коефіцієнта  $m$ , що відповідає логарифмічно нормальному розподілу.

У розділі обґрунтовані основні положення та принципи побудови математичної моделі для проведення числового експерименту багатоосередкового пошкодження заклепкових з'єднань на основі методу Монте-Карло. Розроблене алгори-



тмічне та програмне забезпечення для комп'ютерної реалізації методу числового моделювання, розроблена методика проведення числового експерименту. Приведений приклад числового моделювання багатоосередкового пошкодження зразків з отворами. Порівняння результатів лабораторних випробувань та числового експерименту показало задовільний збіг даних.

### 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. Це занадто консервативна оцінка. На практиці руйнування заклепкового з'єднання при багатоосередковому пошкодженні не лімітується однією перемичкою. Залишкова міцність конструкції визначається розповсюдженням великих (лідерних) тріщин, які проходять через кілька отворів і мають довжину, яка набагато перевищує розмір однієї перемички.

2. В роботі не приведено обґрунтування щодо визначення коефіцієнту інтенсивності напруження. По-перше, якщо отвори розташовані в обмеженій пластині, то чому при визначенні КІН не враховується розмір (ширина) пластини? По-друге, для тонкої пластини доцільно було б враховувати змішану форми руйнування, тобто окрім  $K_I$  врахувати і  $K_{II}$ .

3. Зважаючи на те, що в сучасних літаках використовується більш як 20 видів різних алюмінієвих і титанових сплавів, робота тільки виграла би, якщо був проведений експеримент щодо багатоосередкового пошкодження для інших авіаційних матеріалів.

4. Обсяг експериментальних досліджень для зразків з отворами без заклепок набагато перевищує обсяг експериментальних результатів для зразків, що імітують заклепкове з'єднання. Тому, для визначення впливу заклепок на багатоосередкове пошкодження було б за доцільне збільшити обсяг випробувань таких модельних зразків.

### Висновок по дисертації в цілому

У цілому, незважаючи на зазначені вище недоліки, дисертація за актуальністю, науковою новизною, особистим внеском автора, практичною значимістю, ві-



рогідністю 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 Є.В. Карана є закінченим науковим дослідженням, у якому отримані нові науково обґрунтовані результати.

Робота цілком відповідає п. 9 та 11 “Порядку присудження наукових ступенів і присвоєння вченого звання старшого наукового співробітника”, а її автор – Каран Євген Валентинович заслуговує присудження наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.07.02 – проектування, виробництво та випробування літальних апаратів.

Офіційний опонент

Начальник конструкторського відділу

Державного підприємства «АНТОНОВ»,

кандидат технічних наук, доцент



Василевський Є.Т.

Підпис Василевського Є.Т.

засвідчую:

Головний конструктор з міцності

Державного підприємства «АНТОНОВ»

кандидат технічних наук



Семенець О.І.