

Київський політехнічний інститут

на правах рукопису

УДК 620.191:519.2.001.57(043.3)

ІГНАТОВИЧ Сергій Ромуальдович

СТАТИСТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ МНОЖИНОГО РУЙНУВАННЯ
КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

Фак 01.02.06 - динаміка, міцність машин, приладів та
апаратури

є

АВТОРЕЗЮМЕ
дисертації на здобуття вченого ступеня
доктора технічних наук

Київ - 1993

АВ 28.543

Дисертацією є рукопис

Робота виконана на кафедрі авіаційних двигунів Київського інституту інженерів цивільної авіації.

Наукові консультанти: доктор технічних наук,
професор
Л.П. Лозицький;
доктор технічних наук,
професор
А.Н. Ветров

Офіційні опоненти: академік АН України,
доктор технічних наук,
професор
Махненко Володимир Іванович;
доктор технічних наук
Голуб Владислав Петрович;
доктор технічних наук,
в.о. професора
Вобирь Микола Іванович

Провідна організація: Інститут проблем міцності АН України, Київ

Захист відбудеться "13" грудня 1993р. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 068.14.04 у Київському політехнічному інституті, 252056, Київ-56, проспект Перемоги, 37, КПІ-1201

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці КПІ

Автореферат розісланий "____" _____ 1993р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

Боронко О.О.

ЛНБ України ім. В. Стефаника



00810537 (0)

ЛНБ ім. В. Стефаника
АН України

АНОТАЦІЯ

Дисертаційна робота присвячена розробці нових теоретичних положень механіки множинного руйнування матеріалів, основаних на використанні імовірносного підходу до вирішення актуальних задач моделювання процесів реалізації граничних станів на стадії накопичення розсіяних пошкоджень до формування макроскопічної тріщини.

На захист виносяться:

- статистична модель розвитку пошкоженості твердого тіла, яка побудована на основі імовірносної інтерпретації положень механіки безперервної пошкоженості;
- структурна модель мікронеоднорідного пластичного деформування та руйнування конструкційних матеріалів;
- теоретично обґрунтований та експериментально підтверджений універсальний статистичний розподіл розмірів розсіяних пошкоджень;
- моделі об'єднання квазіоднорідних та неоднорідних за розмірами розсіяних дефектів;
- метод прогнозування ресурсу до формування на поверхні матеріалу, який пошкоджується, тріщини порогової довжини;
- установлені на хромонікелевих сплавах закономірності розвитку системи тріщин на поверхні при характерних для експлуатації деталей авіаційних ГТД режимах навантаження.

с

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність роботи. Сучасний рівень механіки руйнування характеризується наявністю великого об'єму результатів теоретичних та експериментальних досліджень з опору матеріалів виникненню та розповсюдженню макроскопічних тріщин. З підвищенням вимог до надійності конструкція та необхідність запобігання катастрофічних руйнувань відповідальних об'єктів на ранній стадії їх експлуатації в останній час особлива увага приділяється вивченню поведінки так званих малих (мікрометрових) тріщин, розміри яких близькі до характерних масштабів структури конструкційних матеріалів. Неодзгідність структури полікристалічних та композиційних матеріалів, як і інші фактори, такі, наприклад, як товщина та міцнісні характеристики поверхнього шару, особливості локалізації пластичної деформації і т.п., зумовляють особливий характер розвитку малих тріщин, для яких більшість закономірностей макромеханіки руйнування виявилися

непридатними. При цьому увага дослідників була, в основному, зосереджена на вивченні поведінки індивідуальних надрозмірних тріщин, а питання колективних ефектів, які є визначальними факторами пошкодження матеріалів на інкубаційній стадії макроруйнування, практично не заторкані. Очевидно, що вирішення таких питань повинно базуватися на використанні статистичного підходу.

Проблема розсіяного (множинного) руйнування (МР) матеріалів досліджена на сьогодні в досить обмеженому вигляді. Існуючі нечисленні теоретичні моделі схематично описують найбільш загальні прояви розсіяної пошкоженості, причому, як правило, у детерміністичній постановці. Експериментальні дослідження знаходяться у стадії накопичення даних, при цьому існуючі результати свідчать про наявність фундаментальних властивостей МР, інваріантних по відношенню до умов навантаження та типів матеріалів.

Висока наукова значимість та незадовільний сучасний стан даної проблеми дали можливість постановки у дисертації задач розробки нових моделей, що дають статистичний опис таких проявів МР, як неоднорідність розмірів розсіяних дефектів, їх об'єднання та виникнення пошкоджень більш високого розмірного рівня. Цим обумовлена наукова актуальність дисертаційної роботи. Прикладна актуальність дисертації визначається можливістю проведення коректних оцінок ресурса відповідальних елементів конструкцій на етапах їх розробки та в експлуатації за даними про пошкодженість, отриманими інструментальними засобами контролю.

Мета та задачі роботи. Основною метою досліджень є розробка теоретичних моделей множинного руйнування і прикладних методів оцінки пошкоженості конструкційних матеріалів при накопиченні розсіяних пошкоджень.

Для досягнення вказаної мети були поставлені та вирішені такі основні задачі.

1. Здійснити статистичну інтерпретацію феноменологічних моделей механіки безперервної пошкоженості.
2. Розробити структурні моделі формування поля мікронеоднорідних пластичних деформацій та пластичного розривлення.
3. Теоретично обґрунтувати статистичний розподіл розмірів розсіяних дефектів суцільності з урахуванням особливостей кінетики їх зародження та зростання.
4. Провести статистичне обґрунтування граничних станів в рамках концепції критичної концентрації квазіоднорідних за розмірами

дефектів.

5. Розробити метод ймовірносного прогнозування граничного стану об'єктів при об'єднанні неоднорідних за розмірами дефектів.

6. Розробити метод ймовірносного прогнозування ресурсу конструкційних матеріалів до формування тріщини порогової довжини.

7. Розробити методику експериментального дослідження закономірностей множинного руйнування поверхнього шару матеріалів.

8. Провести при різних умовах навантаження дослідження поверхневої пошкодженості матеріалів, які відрізняються своїми властивостями.

Методи дослідження. В процесі виконання роботи для одержання теоретичних результатів використовувалися методи теорій надійності та ймовірностей, перколяції, математичної статистики, статистики екстремальних значень, фізичної та статистичної теорій міцності, втоми та довготривалої міцності металів, методи фізичного та математичного моделювання.

В основу експериментальних досліджень були покладені методи випробувань матеріалів на потяг, малоциклову та багатоциклову втому. Для досліджень поверхневої пошкодженості використовувались методи кольорової капілярної та оптико-електронної дефектоскопії.

Наукова новизна роботи визначається такими положеннями:

- запропонований новий підхід до опису функціональної залежності скалярної міри пошкодженості у континуумі від часу з урахуванням кінетичних факторів - інтенсивності виникнення дефектів та швидкості розповсюдження розсіяних несучільностей;

- розроблена структурна модель формування неоднорідності локальних пластичних деформацій, яка базується на фізиці процесів невавершених асувів у системі дислокаційних ансамблів;

- запропонований новий підхід до аналітичного опису неоднорідності розмірів дефектів у вигляді статистичних розподілів, числові характеристики яких визначаються параметрами кінетики виникнення та зростання пошкоджень;

- уперше отриманий узагальнений розподіл розмірів розсіяних дефектів, інваріантний по відношенню до типу матеріалу та факторів пошкодженості, що є теоретичним обґрунтуванням відомої гіпотези про автосамодельність пошкоджень;

- розроблена модель формування асоціацій з кількох поруч розташованих пошкоджень у системі випадково розсіяних квазіоднорідних за розмірами дефектів. На основі цієї моделі теоретично обґрунтовані

критичні значення концентрацій розсіяних пошкоджень, які відповідають зміні масштабу руйнування за рахунок ажиття одиничних пошкоджень та виникнення дефектів більшого розмірного рівня;

- розроблений новий підхід до моделювання прояву об'єднання неоднорідних за розмірами розсіяних дефектів, на базі якого запропоновані три ймовірнісні моделі ажиття мікрометрових пошкоджень - лінійна, поверхнева та об'ємна;

- запропонований метод прогнозування наросту до формування тріщин порогової довжини, який відрізняється від відомих використанням апарату статистики екстремальних значень для врахування тріщин, маючи максимальний розмір в ансамблі розсіяних дефектів;

- уперше встановлені закономірності розвитку системи поверхневих мікрометрових тріщин при деформуванні потягом, циклічному навантаженню та багатфакторному навантаженню хромонікелевих сплавів.

Достовірність основних наукових положень та висновків забезпечується перевіркою прийнятих допущень, постулатів та отриманих основних теоретичних результатів з експериментальними даними власних досліджень та даними інших авторів, приведеними у науковій літературі.

Достовірність результатів експериментальних досліджень забезпечується використанням апробованих методик та ефективних вимірних засобів, метрологічним забезпеченням вимірів, застосуванням стандартизованих методів статистичної обробки даних, автоматизацією процесів реєстрації та обробки результатів.

Практична цінність роботи. Теоретичні розробки, зв'язані з моделюванням процесів розвитку системи мікрометрових тріщин, можуть бути використані для отримання порівняльних характеристик опорі руйнуванню існуючих та перспективних конструкційних матеріалів, а також при визначенні ефективності технологічних методів зміцнення.

Створені методи прогнозування виникнення тріщин недопустимих розмірів та об'єднання розсіяних пошкоджень при МР дозволять підвищити достовірність розрахунків деталей машин на міцність та надійність при їх проектуванні і виробництві. При наявності поточної інформації а пошкодженості конструкційних елементів ці методи забезпечуватимуть отримання коректних оцінок залишкового ресурсу таких елементів в експлуатації та при ремонті.

Експериментальні дані по закономірностям розвитку системи по-

верхніх мікрометрових тріщин при досліджених режимах навантаження хромонікелевих жароміцних сплавів можуть знайти застосування для визначення ресурсів відповідальних деталей авіаційних ГТД в експлуатації та при ремонті, а розроблені методичні аспекти експериментальних досліджень можуть бути використані для більш ґрунтовного вивчення опору матеріалів множинному руйнуванню та при розробці методів дефектації деталей промислових об'єктів.

Реалізація результатів роботи. Теоретичні та експериментальні дослідження пошкодженості матеріалів здійснювались відповідно до тематики госпдоговірних науково-дослідницьких робіт, які проводилися за замовленням експлуатаційних підприємств цивільної авіації, заводів виробників авіатехніки, проектних та науково-дослідницьких організацій, а також в рамках Програми "Підвищення надійності та довговічності ГТД" комплексного плану спільних робіт АН України, Мін ВУЗу та МАП на 1981-1985, 1986-1990 р.р.; Програми "Зниження матеріалоемкості обладнання та споруд, підвищення їх надійності та довговічності" ("Матеріалоемкість"), підпрограми "Надійність".

Методика кількісної оцінки пошкодженості сплавів Е1698ВД та ЖСЖ по критеріям розтріскування поверхневого шару використовується при проведенні експертиз льотних пригод.

Методика кількісної оцінки технічного стану конструкційних елементів ГТД по критеріям міцності використовується в проектній та експлуатаційній організаціях як методичне забезпечення підсистеми "Міцність-90" автоматизованої системи управління технічним станом двигунів ПС-90 "Алгоритм-90".

Рекомендації по оцінці експлуатаційної пошкодженості використовуються в методичному забезпеченні розробленої оптико-електронної автоматизованої системи огляду деталей газоповітряного тракту авіаційних ГТД з використанням телевізійної приставки до ендоскопу.

Апробація роботи. Основні результати доповідались та обговорювались на Всесоюзній науково-технічній конференції "Міцність елементів роторів турбомашин" (м.Житомир, 1981 р.); І Республіканській конференції по підвищенню надійності та довговічності машин та споруд (м.Київ, 1982 р.); ХХ (1984 р.), ХХІ (1986 р.), ХХІІ (1990 р.) та ХХІV (1992 р.) Всесоюзних науково-технічних нарадах по проблемам міцності двигунів (м.Москва); ІІ Всесоюзному симпозіумі "Механіка руйнування" (м.Житомир, 1985 р.); І Всесоюзній конференції "Механіка руйнування матеріалів" (м.Львів, 1987 р.); ХІІІ (м.Каунас, 1989 р.) та ХІV (м.Воронеж, 1992 р.) Всесоюзних конфе-

ренціях "Структура та міцність матеріалів у широкому діапазоні температур"; VI Всесоюзній конференції "Фізика руйнування (м.Київ, 1989 р.); XII Всесоюзній науково-технічній конференції "Конструкційна міцність двигунів" (м.Куйбишев, 1990 р.); VIII Міжнародній конференції по руйнуванню матеріалів (м.Київ, 1993 р.).

Публікації. Матеріали дисертації опубліковані в 56 печатних роботах. Основний зміст відображений в 40 публікаціях.

Структура та об'єм роботи. Дисертація складається з вступу, семи глав, висновків, додатків, списку літератури та містить 293 с. машинописного тексту з основним змістом, 403 с. з ілюстраціями, 410 с. з таблицями; 444 с. з додатками та передіком зміста, 493 с. з списком літератури ів 465 найменувань.

ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтована актуальність теми дисертації, намічені основні шляхи вирішування поставленої проблеми та приведені актуовані відомості про виконану роботу.

Перша глава роботи присвячена узагальненню та аналізу існуючих підходів до моделювання пошкодженості матеріалів.

В даний час існує дуже багато різних моделей, що описують процеси деградації міцності матеріалів з часом. В оглядовій частині дисертації такі моделі класифікуються як полумпіричні (феноменологічні) та структурні. В роботі був проведений аналіз відомих моделей накопичення пошкоджень, що відносяться до кожного з перелічених видів прийнятої класифікації.

При розгляді розрахункових моделей важливе значення приділено лінійному правилу підсумовування пошкоджень (ЛПП). Показано, що при автономності ймовірностей виникнення граничного стану (ГС) для різних рівнів навантаження, тобто коли густина розподілу наробітки до ГС на кожному блоці навантаження можна представити у вигляді добутку функції від параметру навантаженості та функції від ймовірності ГС для фіксованого моменту часу, аналітична умова ЛПП у вигляді рівності суми пошкоджень одиниці має місце.

Проаналізовані підходи, в яких використані різні трактування енергетичних критеріїв руйнування. Відмічено, що одержані три цьому результати спрямовані перш за все на конкретизацію ГС і не описують, як правило, фізичні особливості процесів накопичення пошкоджень.

В роботі дається аналіз проблеми структурного моделювання пошкодженості при врахуванні багатомасштабності та багатостадійності руйнування. Підкреслено, що можливість вирішення цієї проблеми, а також задачі ідентифікації ГС при структурному моделюванні може бути реалізована на основі фізичних уяв про пластичне деформування та мікроруйнування. Такий підхід використаний у роботі при побудові структурної моделі неоднорідного пластичного деформування та руйнування матеріалів.

Одним з найбільш актуальних та інтенсивно розробляємих на теперішній час напрямів проблеми пошкодженості є вивчення закономірностей МР конструкційних матеріалів. На основі аналізу та узагальнення приведених у літературі результатів досліджень цього питання зроблений висновок, що закономірності розвитку МР для різних матеріалів, умов навантаження та масштабів подібні. Подібність МР є фундаментальною властивістю пошкодженості, теоретичне та експериментальне вивчення якої тільки починається, а одержані результати можуть мати велике наукове та прикладне значення не тільки при прогнозуванні ресурсних можливостей матеріалів, але й для вирішення інших актуальних задач механіки руйнування. Відмічено, що сучасні дослідження даної проблеми знаходяться в основному на рівні накопичення експериментальних даних. В цьому зв'язку сформульовані напрями вивчення автономних проявів МР, зв'язаних з описом неоднорідності розмірів розсіяних дефектів та обґрунтуванням ГС при об'єднанні пошкоджень. Ці питання увійшли до складу задач дисертаційної роботи.

В заключному розділі глави сформульовані мета та задачі досліджень. На основі загального методичного підходу, який базується на використанні ймовірносних методів, поставлені задачі описання поетапного розвитку МР від субмікроскопічного розмірного рівня до масштабів, які відповідають виникненню макроскопічних дефектів.

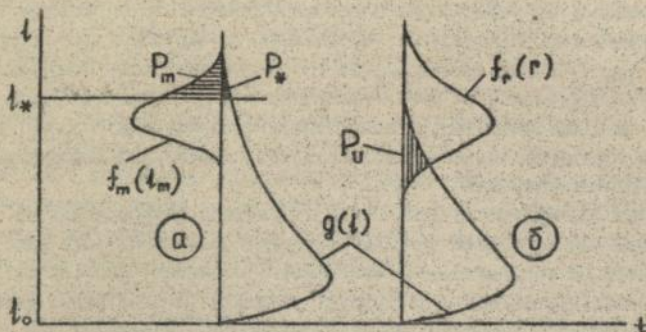
Для ймовірносного опису виникнення макроскопічних дефектів запропонований такий підхід.

Відповідно до схеми, зображеної на мал.1, виникнення макроскопічної тріщини може відбуватися двома способами.

1. За рахунок підростання одної з мікрометрових тріщин (МТ) у системі розсіяних дефектів до порогового рівня l_* , який характеризує початковий розмір макроскопічної тріщини.

Згідно з загальним підходом до ймовірносного прогнозування,

Ймовірність такої події P_* , яка у часовому представленні є функці-



Мал.1. Схема формування макроскопічних тріщин

єю розподілу наробітки до ГС, можна отримати з умови перетину густоти розподілу розмірів ММТ $g(l)$ з граничним значенням l_* . Так як до порогового рівня l_* будуть найбільш близькі тріщини, які мають максимальні довжини, то відповідну ймовірність реалізації цього механізму P_m слід визначати на основі розподілу екстремальних значень розмірів ММТ $f_m(l_m)$ (мал.1а).

2. Шляхом випадкового об'єднання двох чи кількох близько розташованих дефектів у системі розсіяних ММТ.

На відміну від першого механізму, для якого значення параметра ГС l_* фіксовано, в даному випадку подія об'єднання визначається випадковою величиною відстані між дефектами r , яка характеризується відповідним розподілом з густотою $f_r(r)$. Ймовірність об'єднання P_u визначається з умови перетину розподілів $g(l)$ та $f_r(r)$ (мал.1б).

Згідно з викладеним підходом до моделювання виникнення макродефектів у дисертації поставлені та вирішені задачі, зв'язані з обґрунтуваннями: початкового розподілу розмірів розсіяних ММТ $g(l)$, розподілу максимальних значень $f_m(l_m)$, розподілу відстані між сусідніми дефектами $f_r(r)$ та задачі визначення на базі цих розподілів ймовірностей P_m та P_u з врахуванням особливостей розсіювання та поведінки ММТ.

У другій главі викладені розроблені статистичні моделі механіки безперервної пошкодженості.

На відміну від широко використовуваного підходу, згідно з яким накопичення пошкоджень описується сформованим на основі певних постулатів кінетичним рівнянням, ймовірнісний метод дозволяє вирішити цю задачу шляхом безпосереднього визначення функціональної залежності міри пошкодженості від часу.

В моделі, яка пропонується, пошкоджений матеріал об'ємом V трактується як двофазне з'єднання непошкодженого континуума і випадково розподілених в ньому ділянок розвантаженого дефектами (дископодібними тріщинами, порами) матеріалу сумарним об'ємом V_0 . Міра пошкодженості $\omega(t) = V_0(t)/V$ еквівалентна ймовірності, в якій будь-яка точка об'єму V в фіксований момент часу t буде знаходитися у розвантаженої частині матеріалу. Вирішена задача по визначенню цієї ймовірності з врахуванням кінетичних параметрів накопичення пошкоджень: питомої інтенсивності утворення дефектів μ_d та випадкової швидкості їх розповсюдження u (індекс d означає розмірність простору: $d=1$ для одновимірного простору, $d=2$ для двовимірного та $d=3$ для тривимірного). Отримано, що при $\mu_d = \text{const}$ і $u = u_0 t^k$ (де u_0 і k - коефіцієнти), залежність середньої величини міри пошкодженості від часу описується степінною функцією вида

$$\omega_d(t)^C = \beta_d \mu_d m_{u_0}^d t^{d(k+1)+1} \quad (1)$$

де m_{u_0} - математичне сподівання (МС) коефіцієнта u_0 ; β_d - постійна, значення якої залежить від розподілу швидкості u .

Степінна залежність (1) якісно угадується з емпіричними даними по зміні дефекта густини різних матеріалів і з теоретичним обґрунтуванням деяких відомих апіорних функцій пошкодженості, наприклад, такої, яка використовується у теорії Кортена-Дована.

Розглянута модель оперує усередненими параметрами пошкодженості. Однак, однорідно навантажені перерізи зразка чи деталі через неоднорідне розташування дефектів в об'ємі та неоднорідні розміри дефектів будуть пошкоджені у різних мірі. Якщо міру пошкодженості переріза площиною S подати у вигляді $\omega_s = S_{\omega} / S$, де S_{ω} - сумарна пошкодженість площі перерізу, та прийняти у якості характеристики ГС критичне значення ω_c , то цілком очевидно, що руйнування зразка чи деталі наступить тоді, коли у найбільш пошкодженному перерізі реалізується умова $\omega_s = \omega_c$. На основі розподілу максимальних значень пошкодженості у перерізах отримано рівняння ГС у вигляді:

$$m_{\omega}(t_{\Gamma}) + \varphi_N [D_{\omega}(t_{\Gamma})]^{1/2} = \omega_f, \quad (2)$$

де $m_{\omega}(t_{\Gamma})$ і $D_{\omega}(t_{\Gamma})$ - відповідно, МС та дисперсія (D) пошкодженої перерізів у момент часу t_{Γ} , при якому ГС у найбільш пошкодженому перерізі реалізується в заданим значенням ймовірності γ (гамма-процентний ресурс); φ_N - функція, яка залежить від числа перерізів.

Числові характеристики пошкоженості m_{ω} и D_{ω} визначаються через початкові моменти розподілу розмірів дефектів та залежать від середнього числа дефектів у перерізі. Функція φ_N легко може бути отримана через параметри розподілу максимальних значень для заданих величин ймовірності γ .

У роботі дано рішення рівняння (2) відносно t_{Γ} , яке має вигляд

$$t_{\Gamma} = \mu_v^{-1} (\omega_f / 2 \sqrt{A m_r^2})^{1/a} \quad (3)$$

і встановлює залежність довговічності від μ_v - інтенсивності зародження дефектів в одиниці об'єму та від МС розмірів дефектів (m_r). Значення коефіцієнтів A і a у формулі (3) визначаються величиною γ (для $\gamma = 0,5$: $A = 1,6$ та $a = 0,56$).

У рамках розробленої моделі розкривається механізм зміни нахилу кривих довготривалої міцності у подвійних логарифмічних координатах. При високому рівні напружень довговічність обмежується переважно процесами зародження дефектів та їх накопиченням до граничної концентрації, а з зменшенням рівня напружень посилюються ефекти росту дефектів та вплив неоднорідності їх розмірів.

Феноменологічні моделі безперервної пошкоженості, які отримані статистичними методами, дозволяють по новому інтерпретувати прояви МР, зокрема якісно оцінювати вплив на довговічність матеріалів фізичних факторів пошкоженості - кінетики зародження та розповсюдження дефектів суцільності. Більш повний опис фізичних аспектів розсіяного руйнування при моделюванні пошкоженості конструкційних матеріалів проведений в рамках структурних моделей.

У третьій главі викладені принципи побудови структурних моделей пошкоженості з врахуванням загальних фізичних уяв про механізми локального пластичного деформування та мікроруйнування конструкційних матеріалів.

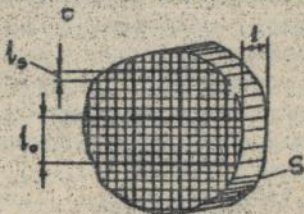
На першому етапі МР відбувається накопичення субмікроскопічних та мікроскопічних тріщин. В локальних об'ємах матеріалу формуються осередки руйнування, концентрація тріщин в яких достатня для ініціювання процесів адитива та виникнення дефектів більш високого розмірного рівня.

В метов обґрунтування розмірів структурних елементів, на яких

необхідно розвинути об'єм матеріала при побудові структурних моделей, був проведений докладний аналіз та узагальнення даних з фізики пластичного деформування та руйнування. Систематизовані характеристичні масштаби рівні цих двох взаємозв'язаних проявів та визначена зона розмірів для моделювання пошкодженості.

За базовий структурний елемент вибраний об'єм з лінійним розміром l_2 ($l_2 \sim 1$ мкм), відповідний характеристичному масштабу дислокаційної структури. Первинний акт руйнування, зв'язаний з виникненням дислокаційної тріщини, локалізується у межах об'єма l_2^3 .

Процеси мікропластичного деформування, які є сумарним ефектом від неважених зсувів в масштабі l_2 , будуть взаємозалежними в об'ємах з лінійним розміром l_0 , якій відповідає радіусу кореляції полів внутрішніх напружень. В цьому випадку масштаб l_0 ($l_0 \sim 10$ мкм) характеризує розмір структурної чарунки, в межах якої локалізується неоднорідність пластичних деформацій макрооб'єму матеріалу, а руйнування цієї чарунки через граничну концентрацію дефектів розмірного рівня l_0 приводить до формування тріщини довжиною порядку l_0 (такі тріщини іменуються мікрометровими, перехідними, короткими и др.). Для структурного моделювання прийнята схема дискретизації макрооб'єму матеріала одниничної товщини S з врахуванням фізично обгрунтованих розмірних масштабів l_2 и l_0 (мал.2).



Мал.2. Схема дискретизації макрооб'єму S

Виходячи з загальних уяв про дислокаційний механізм пластичного деформування з врахуванням зміцнення, отримана залежність пластичної деформації зсуву є локального об'єму масштабу l_0 від N - числа дислокаційних ансамблів (ДА) у даному об'ємі:

$$\epsilon = (\sqrt{\tau} N / 2D) (1 - \alpha B D N^2 / \tau l_0), \quad (4)$$

де τ - дотичні напруження від зовнішніх сил, усереднені по напрямкам зсуву; B - модуль сумарного вектора Бюргерса ДА, який складений в

n дислокацій; β - коефіцієнт ($\beta = 0,76 \dots 0,8$); α - коефіцієнт зміцнення, враховуючий взаємне розташування ДА ($\alpha \approx 4/3$); D - параметр пружності ($D = G/2\mu k$, G - модуль зсуву; $k = 1$ - для гвинтових і $k = 1/2$ - для крайових дислокацій); ν - коефіцієнт Пуассона).

Структурна модель пластичного деформування базується на вирішуваних задачі про статистичний розподіл випадкової величини N у локальних об'ємах масштабу l_0 . З залученням залежності (4) встановлено, що при фізично прийнятних припущеннях неоднорідність локальної пластичної деформації ϵ описується нормальним законом розподілу, що підтверджується численними експериментальними даними. Визначені числові характеристики розподілу. Так, дисперсія D_ϵ і $M C m_\epsilon$ деформацій зв'язані з діючими напруженнями $\bar{\tau}$ виразом

$$D_\epsilon = 0,38 \bar{\tau} m_\epsilon / D, \quad (5)$$

яке свідчить про пропорціональну залежність міри розкиду деформацій від $\bar{\tau} \cdot m_\epsilon$ - величини, яка характеризує питому роботу пластичного деформування макрооб'єму матеріалу.

Адекватність формули (5) підтверджена порівнянням розрахункових результатів дисперсії мікронеоднорідних пластичних деформацій з експериментальними даними, одержаними різними авторами і наведеними у наукових примірниках.

На основі отриманої структурної моделі запропонований ймовірносний метод прогнозування ресурсу конструкційних матеріалів по деформаційним критеріям РС. При еволюції в часом неоднорідності локальних пластичних деформацій у макрооб'ємі функція розподілу ресурсу $t_R - F(t_R)$ визначається з умови перетину густоти випадкового процесу мікронеоднорідного пластичного деформування з критичним рівнем деформації ϵ_* , відповідним руйнуванню структурного елемента l_0 та зародженню тріщини такого ж розміру:

$$F_R(t_R) = 1 - \Phi[(\epsilon_* - m_\epsilon(t_R))/D_\epsilon^{1/2}(t_R)], \quad (6)$$

де $\Phi(\cdot)$ - функція Гауса.

Маючи залежність усередненої по макрооб'єму величини пластичної деформації m_ϵ від часу і використовуючи для визначення D_ϵ теоретичне співвідношення (5), прогнозування ресурсу згідно з формулою (6) не викликає труднощів.

Структурна модель мікроруйнування описує випадковий процес зародження дефектів по механізму релаксації пружної енергії дислокаційних груп, яка йде на виникнення вільних поверхонь стійких дислокаційних тріщин. Структурному елементу масштабу l_0 (вал.2) приписуються три можливі стани: початкове (пружне), виникнення ДА та

зародження субмікротріщини. Інші релаксаційні процеси не враховуються. Передбачається, що поведінку первинних структурних елементів можна описати марковським випадковим процесом з дискретними станами та безперервним часом.

На основі визначеної через параметри N та n (відповідно, число ДА та субмікротріщин в мікрооб'ємі масштаба l_0 , $n \ll N$) ймовірності станів отримана формула, яка встановлює при фіксованих t залежність параметра дефектності (n) від параметра деформованості (N):

$$n = \chi N^2 / 2N_m. \quad (7)$$

де N_m - максимально можливе число структурних елементів масштабу l_0 у структурному елементі масштабу l_0 (мал.2); χ - кінетичний параметр, рівний відношенню інтенсивності перетворення ДА у субмікротріщини (μ) до інтенсивності виникнення ДА (ν): $\chi = \mu / \nu$. Параметр N_m визначається з умови екстремума залежності (4) як $N_m = (1_0 \bar{\epsilon} / 2DB)^{1/2}$.

Особливості кінетики пошкодження матеріалів на мікроскопічному рівні розглянуті у роботі на прикладі поваучості. Показано, що параметр ν зв'язаний з швидкістю поваучості $\dot{\epsilon}$ співвідношенням $\nu \sim 2,65D\dot{\epsilon}/T$, а параметр μ можна визначити на основі Больцмановської формули стосовно до частоти термоактиваційного злиття дислокацій у ДА: $\mu \sim \exp[u(b)/kT]$, де $u(b)$ - енергія активації виникнення тріщини як функція прикладеного напруження b , k - постійна Больцмана, T - температура.

Згідно з концепцією руйнування з-за об'єднання розсіяних дефектів гранична пошкодженість об'єму масштабу l_0 та виникнення тріщини відповідної довжини буде забезпечуватися накопиченням дефектів розмірного рівня l_0 до критичної величини концентрації: $\varphi_* = n_c / N_m$. На основі структурної моделі отримана формула, яка дає оцінку інтенсивності цього процесу (λ) та встановлює зв'язок між параметрами деформування і руйнування у масштабах від субмікроскопічного до мікрометрового:

$$\lambda = (1_0 / l_0)^2 (\mu \nu / 2 \varphi_*)^{1/2}. \quad (8)$$

Параметр λ характеризує кінетику накопичення пошкоджень на заключній стадії МР перед виникненням макроскопічних дефектів і є ключовим при оцінці числових характеристик неоднорідності розмірів мікрометрових тріщин.

Четверта глава роботи присвячена вирішенню однієї з актуальних задач МР матеріалів, зв'язаної з аналітичним описом неоднорідності розмірів розсіяних пошкоджень.

Інформація про статистичний розподіл розмірів тріщин у фіксо-

ваний момент часу при пошкодженості має визначальне значення для прогнозування ресурсу конструкції як по критерію підростання однієї чи кількох тріщин до гранично допустимої довжини, так і в умови об'єднання дефектів (мал.1). При цьому у існуючих методах використовуються, як правило, апріорні чи емпіричні розподіли.

Неоднорідність розмірів розсіяних дефектів обумовлена в першу чергу безперервними і паралельно протікаючими з часом процесами їх зародження та зростання. В цьому зв'язку при статистичному описі неоднорідності розмірів дефектів враховувалися два основні фактори кінетики пошкодженості: інтенсивність виникнення та швидкість повсюдності дефектів, яка характеризувалась параметром h .

Запроваджені параметр розміру y , зв'язаний з початковим l_0 та поточним l розмірами дефекту функцією, яка забезпечує лінійну залежність даного параметру від часу t : $y = \varphi(l_0, l) = h(t - \theta)$, де θ - час зародження дефекта (при $t = \theta$, $l = l_0$). Цей підхід при належному підборі функції $\varphi(l_0, l)$ дозволяє досліджувати широкий клас залежностей (лінійні, нелінійні) розміру від часу. У окремому випадку при лінійній зміні l від t параметр h є швидкістю зростання дефекту. Розглянутий варіант, при якому зародження дефектів є потік випадків з інтенсивністю λ , а зростання кожного зародженого дефекту відбувається з випадковою швидкістю, яка характеризується параметром h ($h \in [0, \infty]$). Задается $f(h)$ - густина ймовірності випадкової величини h .

На основі розробленої моделі отримано, що функція розподілу $G(y)$ параметра розміру y інваріантна по відношенню до часу і визначається виразом

$$G(y) = 1 - \int_0^{\infty} f(h) \exp(-\lambda y/h) dh. \quad (9)$$

Перехід від розподілу y до розподілу l здійснюється методом перетворення випадкових величин з врахуванням прийнятого функціонального співвідношення $y = \varphi(l_0, l)$.

У роботі проведено аналітичне дослідження виразу (9) при різних законах розподілу параметра h . Для $f(h)$, яка відповідає рівномірному, експоненціальному, релеевському та гамма-розподілу випадкової величини h , формула (9) дає для $G(y)$ різні по структурі аналітичні вирази, які задовольняють властивостям функції розподілу. Однак числові характеристики цих розподілів виявилися дуже близькими. Так, МС параметра y незалежно від розподілу h визначається одна-

ковим виразом $m_y = m_n / \lambda$, де m_n - МС випадкової величини h , а дисперсія D_y з точністю до числового множника - виразом $D_y \sim (m_n / \lambda)^2$. Отримані результати свідчать про певну спільність, яка властива неоднорідності розмірів розсіяних дефектів.

Автомодельність розподілів розмірів проявляється при їх графічному представленні у приведених координатах. Так, якщо здійснити перехід від розподілу величини y до розподілу нормованого параметра $Z = y/m_y$, то для різних розподілів h функції $G(Z)$ апроксимуються спільною залежністю

$$G(Z) = 1 - \exp(-bZ^\beta), \quad (10)$$

де $b = 1,1273$ и $\beta = 0,7687$.

Узагальнений розподіл (10) має характер розподілу типу Вейбулла. При переході від розподілу нормованого параметра Z до розподілу величини l (при умові $y=1-l_0$) показано, що неоднорідність розмірів розсіяних дефектів асимптотично описується також законом Вейбулла. При цьому зв'язок числових характеристик m_l , D_l та параметра l_0 встановлюється співвідношенням $m_l = l_0 + 0,761D_l^{1/2}$.

Отримані результати є теоретичним підтвердженням подібності емпіричних розподілів розмірів розсіяних дефектів для різних матеріалів та умов навантаження, на яких базується гіпотеза Гаренблатта-Вотвіної про автоматодельність пошкоджень. Наслідком даної гіпотези є гіперболічна залежність, яка описує розподіл числ. дефектів n за розмірами: $n \sim l^{-d}$, де d - параметр розподілу. Залежність такого типу властива і фрактальним кластерам, які також мають властивість подібності. Таким чином, можна припустити, що закономірності МР є частковим проявом фундаментальних законів порушення зв'язаності у системах, які складаються з дуже великого числа взаємо зв'язаних елементів, вивчення котрих здійснюється в рамках теорії перколяції.

У п'ятій главі роботи викладені методи прогнозування ГС матеріалів та ресурсу конструкцій при МР, зв'язаних з формуванням макроскопічних тріщин.

У тих випадках, коли у матеріалі відсутні початкові дефекти, близькі за розмірами до макроскопічних тріщин, а напружено-деформований стан однорідний чи квазіоднорідний, виникнення макротріщини може відбуватися двома можливими шляхами, реалізація яких проілюстрована схемою на мал.1. Цілком очевидно, що подібні механізми реалізації ГС можуть відповідати будь-якій стадії накопичення пошкоджень при переході від поточного масштабного рівня руйнування до

наступного.

При моделюванні об'єднання розсіяних пошкоджень необхідно враховувати фактор неоднорідності їх розмірів. Так, на стадії мікропошкодженості, яка розглядалась у третій главі, ГС, зв'язаний з виникненням тріщин масштабу l_0 , реалізується за рахунок накопичення та злиття дефектів в квазіоднорідними розмірами l_0 , а на інкубаційній стадії макроруйнування у об'єднанні приймають участь, як правило, тріщини неоднорідних розмірів (мал.1).

Математична модель об'єднання квазіоднорідних за розмірами не взаємодіючих дефектів бааується на визначенні ймовірності випадкової події, що в зоні простору $D=Nl^d$, яка складається з N дільно упакованих чарунок однакового розміру l (d - розмірність простору) і містить n чарунок з дефектами ($n < N$), буде сформована асоціація з s випадково розташованих поряд дефектних чарунок. На основі такої ймовірності отримана формула, яка встановлює залежність числа асоціацій n_s ($s = 1, 2, \dots, z$) від концентрації пошкоджень x ($x=n/N$):

$$n_s/N = (z^{s-1}/s!) x^s \exp(-zx). \quad (11)$$

де z - координаційне число решітки, яке залежить від способу компонування чарунок (число близьких сусідів).

Теоретична формула (11) задовільно описує процеси формування кластерів пошкоджень для різних s при чисельному моделюванні.

Дана модель може застосовуватися не тільки для сукупності чарунок, аля може бути використана і для опису кластероутворення в системах зв'язків чи вузлів, які розглядаються теорією перколяції.

Для прогнозування ГС при множинному руйнуванні запропоновані такі критерії.

Поріг агрегації x_a одиничних пошкоджень, відповідний початку їх об'єднання та виникненню першого кластеру з $s=2$. Значення x_a визначається асимптотичною формулою

$$x_a \approx (2l^d/zD)^{1/2}. \quad (12)$$

Критична концентрація агрегації x_m , яка відповідає максимуму залежності $n_1(x)$ і встановлює перехід до стадії масового злиття кластерів:

$$x_m = 1/z. \quad (13)$$

Значення x_a та x_m можуть використовуватися для оцінки величини граничної пошкоженості в структурних моделях, які розглядалися раніш (див.формулу (8)).

При опису об'єднання неоднорідних за розмірами та випадково розташованих у матеріалі тріщин необхідно прийняти до уваги факто-

ри їх випадкової орієнтації по відношенню одна до одної та по відношенню до діючих сил, а також взаємодію близько розташованих дефектів. Ці проблеми є дуже складними і багато їх аспектів досі не мають рівень. З цієї причини у розроблених статистичних моделях дані фактори враховуються побічно без проведення чисельних оцінок.

Відомо, що рівень взаємодії дефектів, при якому можливе їх об'єднання, може бути оцінений відношенням характеристичного розміру сусідніх дефектів (1) до відстані між їх центрами (r): $\lambda = 1/r$. Якщо прийняти, що для добре перемішаної системи пошкоджень об'єднання характеризується однаковим, усередненим значенням λ_* , то нерівність $1 \gg R$, де $R = \lambda_* r$ - приведена відстань між центрами сусідніх пошкоджень, визначає умову їх об'єднання.

Так як параметри 1 та r є випадкові величини, то моделювання об'єднання пошкоджень відбувається з врахуванням характеристик неоднорідності цих параметрів (мал.16).

У роботі розглянуті три статистичні моделі об'єднання неоднорідних за розмірами розсіяних дефектів, використання яких для мікрометрових тріщин дозволяє виконувати ймовірнісне прогнозування ГС, зв'язаних з формуванням макроскопічних дефектів.

Згідно з першою моделлю ймовірність об'єднання P_U хоча б однієї пари з n наявних у матеріалі тріщин визначається співвідношенням $P_U = 1 - (1 - p_U)^n$, у якому ймовірність p_U розраховується на основі розподілу довжини тріщин та відстані між ними за формулою

$$p_U = \int_0^{\infty} F_R(l) f_l(l) dl = 1 - \int_0^{\infty} F_l(R) f_R(R) dR, \quad (14)$$

де $F_R(\cdot)$ та $f_R(\cdot)$ - відповідно функція і густина розподілу приведеної відстані R ; $F_l(\cdot)$ та $f_l(\cdot)$ - відповідно функція і густина розподілу розмірів тріщин l .

Функції, які входять у (14), визначені, однак структура підінтегральних виразів не дозволяє отримати, окрім окремих часткових випадків, робочі формули для p_U у явному вигляді. Реалізація моделі, яка потребує розрахунків ймовірності P_U , можлива тільки методами чисельного інтегрування.

Друга модель базується на використанні числових характеристик розподілів розмірів тріщин.

На основі припущення про пуассонівський розподіл тріщин у одномірному, двомірному та тримірному просторах отримані такі формули для ймовірностей об'єднання

$$P_U^L = 1 - \exp(-2Lc_1 m_1 / \lambda_n); \quad (15)$$

$$P_U^S = 1 - \exp(-\pi S c_2 m_1^2 (1 + W_1^2) / \lambda_n); \quad (16)$$

$$P_U^V = 1 - \exp(-4\pi V c_3 m_1^3 (1/3\lambda_n^3)), \quad (17)$$

де c_1 , c_2 та c_3 - концентрації тріщин, відповідно, на лінії довжиною L , поверхні площею S та в об'ємі V матеріалу; W_1 - коефіцієнт варіації довжин тріщин; $d_3[1]$ - початковий момент третього порядку розподілу довжин тріщин.

Адекватність отриманих результатів підтверджується порівнянням розрахункових значень ймовірності P_U , отриманих по першій та другій моделям для вибірових розподілів параметра l та R . Окрім цього, формули (15) - (17) у напівдетерміністичній постановці (при $P_U = 0,5$) для випадку однорідних розмірів тріщин ($W \rightarrow 0$) узагальнюються у вигляді співвідношення, аналогічного (12) для порогу агрегації одиничних пошкоджень. Таким чином, модель (11) є окремим випадком загальної моделі об'єднання неоднорідних за розмірами тріщин.

Третя модель описує більш жорсткіший варіант об'єднання з урахуванням дефектів, які мають максимальні розміри у системі розсіяних пошкоджень.

На основі використання апарату статистики екстремальних значень випадкових величин отримані такі вирази для відповідних ймовірностей об'єднання:

$$P_{um}^L = 1 - \exp(-2\gamma c_1 m_1 / \lambda_n); \quad (18)$$

$$P_{um}^S = 1 - \exp(-\pi \gamma c_2 m_1^2 / \lambda_n); \quad (19)$$

$$P_{um}^V = 1 - \exp(-4\pi \gamma c_3 m_1^3 / \lambda_n^3). \quad (20)$$

де γ - параметр, рівний відношенню МС максимальних значень довжин тріщин ($m_{1,m}$) до МС довжин усіх тріщин (m_1): $\gamma = m_{1,m} / m_1$.

Параметр γ залежить від розподілу довжин тріщин. Для отриманого у роботі узагальненого розподілу (10) маємо

$$\gamma = 0,761 W_1 (u_n + C/d_n - 1) + 1, \quad (21)$$

де u_n та d_n - параметри розподілу екстремальних значень, які залежать від числа тріщин n . Функціональні залежності u_n та d_n від n встановлені.

На основі другої моделі для випадку квазіоднорідно орієнтованих на поверхні тріщин ймовірність об'єднання визначається виразом

$$P_U = 1 - \exp(-c_2 m_1 S^{1/2} / 2\lambda_n). \quad (22)$$

При накопиченні пошкоджень число дефектів n та параметри неоднорідності їх розмірів: $m_1, d_1, d_3[1]$ змінюються з наробітком. При

встановлених функціональних залежностях цих параметрів від наробітки розглянуті вище вирази для ймовірностей об'єднання трансформуються у формули для функції розподілу ресурсу до об'єднання пошкоджень.

Виявлення дефектів більш високого розмірного рівня може забезпечуватися не тільки об'єднанням розсіяних тріщин, а також і пляхом підростання деяких з цих тріщин, особливо маючих максимальні розміри, до заданого порогового значення довжини l_* (мал.1а).

З використанням встановленого узагальненого розподілу (10) визначений розподіл максимальних значень параметра Z . З умови перетину даного розподілу в граничних значеннях: $Z_n = (l_n - l_0) / (m_1 - l_0)$, де l_0 - початкова довжина тріщин у розглянутому розмірному діапазоні, сформована функція розподілу наробітки (ресурсу) до виникнення тріщини довжиною l_n :

$$P_m(t_n) = 1 - \exp\{-n^\beta(t_n) \exp[-Z_n d_n(t_n)]\}, \quad (23)$$

де t_n - ресурс; β - параметр розподілу (10); $n(t)$ та $d_n(t)$ - функції від наробітки, відповідно, числа тріщин та параметра розподілу екстремальних значень d_n . Так як параметр d_n завжди залежить від n , то для прогнозування t по формулі (23) необхідно мати тільки залежність $n(t)$.

На основі функції (23), яка перетворена в залежність фіксованої довжини тріщини l_* від n для різних значень ймовірності P_m , побудовані номограми, з допомогою котрих по відомим l_n, l_0 та m_1 визначаються гранично допустимі значення числа тріщин на обмеженій поверхні матеріалу.

Шоста глава включає опис експериментальних засобів та методичного забезпечення досліджень пошкоженості конструкційних матеріалів, які використовуються у авіадвигунобудуванні.

Метою експериментальних досліджень є одержання інформації про закономірності МР матеріалів при різноманітних пошкоджувачих факторах. У цьому зв'язку використовувався комплекс обладнання для випробувань, який забезпечував відтворення на лабораторних апаратах основних видів навантаженості, які є близькими до спектру експлуатаційних факторів пошкоженості деталей гарячої частини авіаційних двигунів. Це статичне та модальне деформування, багатофакторне навантаження, при якому на матеріал одночасно діють вібраційні напружки, циклічні температури та постійні розтягувальні навантаження:

Випробування при деформуванні потягом та малоцикловою ізотермічному навантаженні здійснювалися на установці УМЗ - 10ТМ промислового виготовлення.

Випробування при багатофакторному навантаженні проводилися на спеціальних стендах, розроблених та виготовлених на кафедрі авіаційних двигунів КІПДА. Конструкція стендів включає механічну частину, термоприставку та вібронавантажувачий устрій. Механічна частина складається з захватів, елементів системи нагріву та охолодження вразків і устрою, який забезпечує розтягування вразків в постійним навантаженням. Термоприставка стенда служить для підтримки у процесі випробувань заданої програми зміни температури. Нагрів вразків здійснюється прямим пропусканням електричного струму, а охолодження - обдувом стислим повітрям. Вібронавантажувачий пристрій включає електродинамічний вібратор ВЗДС-100Б та автоматизовану систему його управління.

Багатофакторне навантаження циліндричних вразків здійснювалося як при регулярній, так і при випадковій амплітуді цикла вібронавантаженості. Це забезпечувало можливість вивчення особливостей пошкодженості жароміцних лопаточних сплавів ІСВУВІ та ІСБК в умовах навантаженості, приближених до експлуатаційних. Для відтворення випадкової вібронавантаженості на електродинамічний вібратор подавався управляючий сигнал, отриманий вузькополосною фільтрацією коливань генератора білого шуму. Пікові значення цього сигналу випадкові і розподіляються за законом Релея. Характеристикою режиму вібронавантаженості служить середньквадратичне значення (СКЗ) напружень.

Для автоматизованої обробки інформації про навантаженість вразків і результатів досліджень їх поверхневої пошкодженості використовувалася система автоматизованої статистичної обробки даних, яка створена на базі ЕОМ "Електроніка-60" та IBM PC/IT.

Тріщини на поверхні вразків виявлялися методом капілярної дефектоскопії з використанням проникаючих речовинів.

Дані про число та розміри поверхневих тріщин на окремих етапах рив дефектів створена оптико-електронна система на базі промислової телевізійної установки "Ізмеритель-1".

Дані про число та розміри поверхніх тріщин на окремих етапах навантаженості вразків накопичувались, оброблялись і представлялись в використання ЕОМ. В автоматизованому режимі здійснювалося також вирішення задач методичного забезпечення експеримента, які були

ав'язані з розрахунками навантаженості та термометруванням зразків. Для цього був розроблений програмний комплекс обробки даних.

У сьомій главі викладені результати експериментальних досліджень пошкодженості хромонікелевих сплавів при дії різних пошкоджувальних факторів.

Особливості мікронеоднорідного пластичного деформування поверхнього шару і закономірності зародження тріщин вивчалися при випробуваннях зразків із сплаву E1698VD на потяг та малоциклового втому. Вимірювання зміщень ділянок поверхні матеріалу на базі 30 мкм методом реперних рядів показали, що на стадії до зародження тріщин формується неоднорідне поле пластичних деформацій, значення котрих розповсюджуються за законом Гаусса. У деяких випадках, коли загальна деформація зразка невизначна, спостерігаються відхилення від нормального закону в розміщенні найбільш ймовірних значень у зоні малих деформацій. Отримані особливості розподілу мікронеоднорідних деформацій узгоджуються з результатами теоретичних досліджень (глава 3), отриманих шляхом опису розподілу дислокаційних ансамблів.

На зразках із сплаву E1698VD, які відрізнялися різним станом поверхнього шару після проведення за різними режимами поверхнього пластичного деформування, досліджувався вплив неоднорідності пластичного деформування на тріщиноутворення. Точки залежності числа зареєстрованих поверхневих тріщин від дисперсії деформацій укладалися на загальну криву. Таким чином, в якості характеристики опору матеріалів зародженню тріщини можна використовувати значення дисперсії як міру розкиду значень мікронеоднорідних деформацій (див. формулу (5)).

Дослідження взаємовпливу деформацій на окремих мікроділянках показали, що радіус кореляції процесу деформування складає 60...100 мкм, що відповідає середньому значенню довжини тріщин, які реєструються, і погоджується з оцінками масштабів структурних елементів моделі, яка викладена у третій главі.

При потязі активне виникнення поверхневих тріщин відбувається на ранніх етапах пластичного деформування. Для сплаву E1698VD залежність концентрації тріщин c_3 від величини пластичної деформації ϵ_p зразків при різних температурах описується загальною степінною функцією: $c_3 = A\epsilon_p^{\alpha}$, де $A = 5,03 \cdot 10^{-3}$ та $\alpha = 2,2$, а для сплаву ЖОВУВІ вони лінійні: $c_3 = B\epsilon_p + b$, де коефіцієнти B і b залежать від температури. На основі отриманих залежностей визначені порогові значення пластичної деформації при потязі ϵ_{p1} , які відповідають зародженню

перших тріщин. Значення ϵ_{p_2} для досліджуваних сплавів змінюється в збільшенні площі поверхні, що пошкоджується, за спадочною гіперболічної залежності. Розмірний ефект тріщиноутворення проявляється до $S=100 \text{ мм}^2$ для Е1698ВД і до $S=5...10 \text{ мм}^2$ (в залежності від температури) для ЖСВУВІ. Дані результати можуть бути використані у розрахунках на міцність для обумовлення граничних значень пластичної деформації при одноразовому чи циклічному деформуванні відповідальних деталей авіаційних ГТД.

У процесі деформування потягом МС і СКЗ довжин тріщин зростає за лінійним законом. Збільшення температури при випробуваннях значною мірою ініціює зростання розмірних характеристик пошкодженості, що особливо характерно для сплаву ЖСВУВІ.

При малоциклової втомі зародження та розповсюдження розсіяних мікрометрових тріщин є домінуючі процеси пошкодженості майже до повного руйнування зразків. Малоцикловою навантаженню з знако-постійним (віддулевим) та знаковим (коефіцієнт асиметрії до-рівняє - 0,5) циклами напружень підлягали зразки з дискового сплаву Е1698ВД при різних постійних температурах. Вивчалися особливості розташування тріщин на поверхні і характеристики неоднорідності розмірів тріщин з врахуванням наробітки та режимів навантаження.

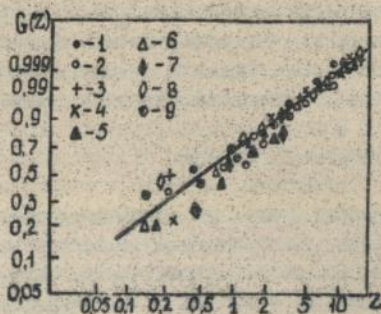
При усіх режимах випробування тріщини на поверхні зразків розташовуються статистично однорідно. Встановлено, що число тріщин на будь-якій обмеженій площі розподіляється за законом Пуассона. Таким чином, експериментально підтверджене одне з базових припущень, яке використовувалося у роботі при моделюванні пошкодженості і теоретичному прогнозуванні ГС.

З наробіткою число тріщин зростає за лінійним законом. Збільшення максимального напруження у циклі приводить до підвищення загального рівня концентрації тріщин, однак практично не впливає на інтенсивність тріщиноутворення. Підвищення температури приводить до інтенсифікації процесів зародження тріщин.

При малоцикловою навантаженні у більшості випадків спостерігається лінійне зростання значень МС довжини тріщин від наробітки. Однак, в деяких випадках значення середньої довжини зростанням числа циклів навантаженості не змінюється. Це зв'язано з реалізацією та взаємною компенсацією двох факторів, впливаючих на значення МС: зростанням довжин утворених тріщин та збільшенням числа зароджених дефектів малих розмірів.

СКЗ довжини тріщин змінюється від наробітки також за лінійним законом, причому при різних режимах навантаженості дані залежності подібні відповідним залежностям для МС. При цьому коефіцієнт варіації довжини тріщин не змінюється з наробіткою, що повністю погоджується з результатами теоретичного опису неоднорідності розмірів дефектів (глава 4). Його значення для усіх режимів малоциклових випробувань флюктує навколо середнього значення, рівного 0,517.

Неоднорідність розмірів поверхневих ММТ для усіх досліджуваних матеріалів незалежно від способу навантаженості описується у приведених величинах загальною функцією розподілу (мал.3, точка), яка відповідає узагальненому закону (10) (мал.3, лінія).



Мал.3. Узагальнений розподіл довжини поверхневих ММТ при різних умовах навантаженості: малоциклова втома (1...4); деформування потягом (5,6); багатofакторне навантаження з випадковою компонентою вібранапружень (7...9)

На основі експериментально отриманих концентраційних та розмірних характеристик пошкодженості сплаву В1698ВД за розробленнями у дисертації моделями проводився прогноз об'єднання тріщин і формування тріщини заданої довжини.

Адекватність моделі (23) перевірялась шляхом розрахункового прогнозування значень максимальної довжини тріщини на поверхні l_m для фіксованих ймовірностей цієї події P та порівнянням цих значень з емпіричними даними. При $l_x = l_m$ з (23) витікає

$$l_m = l_0 + (m_k - l_0) \left[\beta \ln n - \ln \ln(1 - P_m)^{-1} \right] / \Delta n, \quad (24)$$

де n - число тріщин на поверхні.

Емпіричні значення максимальної довжини тріщини укладаються у

інтервал розкиду розрахункових величин I_m для $P_U = 0,1 \dots 0,9$ і близькі до 50%-ї розрахункової ймовірності.

При багатofакторному навантаженні ММТ виникають задовго до руйнування при наробітках, які відповідають 10...30% довговічності зразків. Концентрація поверхневих тріщин як і при малоцикловому навантаженні збільшується з наробітком за лінійним законом. Також лінійно змінюється з наробітком МС та СКЗ довжини тріщин. Величина коефіцієнта варіації розмірів дефектів не змінюється від наробітки та режимів навантаженості. Його середнє значення дорівнює 0,77 для ЖСБУВІ при регулярному рівні вібронпружень і 1,02 для ЖСБК при випадковій зміні вібронпружень. Отримано, що випадкова зміна віброннавантаженості обумовлює більш неоднорідне поле розмірів розсіяних тріщин порівняно з регулярним віброннавантаженням. При меншому числі дефектів на поверхні ймовірність наявності тріщини максимальних розмірів в умовах випадкової віброннавантаженості підвищується.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ РОБОТИ

1. Запропонований новий підхід до моделювання процесу накопичення розсіяних пошкоджень, який базується на використанні статистичних методів опису феноменології крихкого руйнування матеріалів. Одержана функція, яка визначає у явному вигляді залежність скалярної міри пошкоженості від кінетичних параметрів - інтенсивності зародження та швидкості зростання розсіяних дефектів, а також від часу, причому ця залежність є степінною.

2. Розроблена стохастична модель накопичення пошкоджень, яка базується на ймовірносній трактовці моделі безперервної пошкоженості Качанова-Работнова. У рамках стохастичної моделі розкритий механізм формування довговічності з врахуванням неоднорідності пошкоженості зрізів зразка і дано якісне тлумачення природи нелінійності кривих довготривалої міцності деяких матеріалів.

3. Розроблена структурна модель формування неоднорідності пластичного деформування, яка описує статистичний розподіл деформацій у локальних об'ємах матеріалу. Показано, що коли пластичне деформування розповсюджується на більшу частину об'єму матеріалу, розподіл мікронеоднорідних деформацій описується нормальним законом, а значення його числових характеристик визначаються усередненими за мікрооб'ємом величинами напружень та деформацій. Дана модель лягла у основу ймовірносного методу прогнозування ресурсу конструкційних

матеріалів за деформаційними критеріями граничного стану.

4. На базі основних положень структурної моделі мікронеоднорідності пластичних деформацій розроблена структурна модель мікроруйнування, яка описує випадковий процес утворення мікропошкоджень за рахунок перетворення латентної енергії дислокаційних ансамблів у енергію вільних поверхонь стійких мікродефектів.

5. Розроблені теоретичні положення опису неоднорідності розмірів розсіяних дефектів як одного з фундаментальних проявів множинного руйнування різних за властивостями матеріалів, який реалізується у широкому діапазоні розмірних рівней. Встановлено, що розподіл числа дефектів за розмірами в приведених величинах інваріантний по відношенню до типу матеріалу та пошкоджувачих факторів, що є підтвердженням відомої гіпотези про автономність пошкодженості. Визначений узагальнений закон розподілу тріщин за розмірами, який з використанням приведених безрозмірних параметрів асимптотично близький до закону Вейбулла. Показано, що отриманий розподіл задовільно відповідає результатам проведених у роботі експериментальних досліджень неоднорідності поверхневих тріщин та даним інших дослідників, які приведені у науковій літературі.

6. Для невазаємодіючих квазіоднорідних за розмірами розсіяних пошкоджень вирішена задача по визначенню критичних значень концентрації, при яких починається їх злиття та утворення дефектів більшого розмірного рівня у вигляді асоціацій з одиничних пошкоджень. Дано теоретичне обґрунтування деяких критичних параметрів теорії перколяції, які використовуються для вирішування широкого кола теоретичних та прикладних задач у різних галузях науки і техніки.

7. Розроблені теоретичні положення моделювання об'єднання неоднорідних за розмірами дефектів з приближним врахуванням їх взаємодії. Отримані три ймовірнісні моделі об'єднання, одна з яких оснований на використанні статистичних законів розподілу розмірів дефектів, друга модель реалізується з використанням тільки числових характеристик неоднорідності розмірів, а третя модель описує об'єднання з врахуванням максимальних розмірів дефектів у вибірці. Для кожної з моделей отримані аналітичні вирази для ймовірності об'єднання, які трансформуються у функції розподілу нарості до граничного стану - утворення макроскопічних дефектів за рахунок злиття мікрометрових тріщин. На основі розроблених теоретичних положень побудована модель об'єднання для окремого випадку квазіоднорідної орієнтації тріщин на поверхні.

8. Розроблений метод прогнозування наробітки до формування тріщини порогової довжини (ресурсу), який відрізняється від відомих використанням апарату статистики екстремальних значень та врахуванням тріщин, маючих максимальний розмір у ансамблі розсіяних дефектів. Розроблений метод дозволяє проводити ймовірнісний прогноз наявності тріщини заданої довжини при поточному значенні наробітки за даними про число дефектів в обмеженій частині матеріалу.

9. З метою одержання даних про закономірності множинного руйнування конструкційних матеріалів при характерних для відповідальних конструкційних елементів авіаційних ГТД режимах експлуатаційного навантаження розроблені та створені (з участю інших авторів) випробувальні стенди, нові методики реєстрування та ідентифікації пошкоджень, алгоритмічне та програмне забезпечення для автоматизованої обробки експериментальних результатів. На оригінальних засіб оцінки пошкоженості отримано авторське свідоцтво.

10. Для перевірки основних положень і результатів розроблених теоретичних моделей множинного руйнування та реалізації методів прогнозування граничних станів проведені експериментальні дослідження розвитку системи поверхневих мікрометрових тріщин при деформуванні потягом (хромонікелеві сплави E1698VD, ЖСБУВІ); анізотропному (коефіцієнт асиметрії $-0,5$) і віднольовому малоцикловому навантаженні (E1698VD); неізотермічній асиметричній втомі з регулярною (ЖСБУВІ) та випадковою (ЖСБК) зміною вібронапружень у циклі. Встановлено, що незалежно від типу матеріалу, умов навантаженості і наробітки загальними проявами пошкоженості є: однорідне пуассонівське поле дефектів на поверхні матеріалу; автономність розподілу числа тріщин за розмірами, який відповідає отриманому теоретичному закону; безперервне збільшення концентрації дефектів з наробіткою; відсутність залежностей коефіцієнта варіації розмірів тріщин для кожного виду навантаженості від температури та рівня пошкоджуючих факторів.

11. Встановлені закономірності поверхневого розтріскування випробуваних матеріалів при малоцикловій втомі і разом з іншими дослідниками отримані концентраційні та розмірні характеристики поверхневих тріщин при багатфакторному навантаженні (неізотермічній асиметричній втомі) з регулярним та випадковим циклом вібронапружень. В усіх випадках накопичення дефектів і зміна їх середніх розмірів від наробітки описуються лінійними функціями. При малоцикловому навантаженні зростання рівня максимальних напружень у

щислі та температури приводить до інтенсифікації процесів утворення і зростання тріщин. В умовах регулярного вібронавантаження найбільш подюклюдними виявилися режими з підвищеним значенням максимальної температури у термоциклі та більш високим рівнем віброннапружень. Для багатофакторного навантаження з випадковою компонентою віброннапружень зростання його середньоквадратичного значення обумовлює більш інтенсивне накопичення тріщин. Одержані експериментальні дані можуть бути використані для прогнозування граничних станів конструкційних елементів, зв'язаних з об'єднанням мікрометрових тріщин і формуванням тріщини порогової довжини.

12. Отримані експериментальні залежності поверхневої концентрації тріщин, математичного сподівання та дисперсії їх розмірів від величини пластичної деформації при потязі. На основі даних з кінетики концентрації дефектів запропонований метод оцінки порогового значення пластичної деформації, при якому на обмеженій площі поверхні матеріалу є можливість утворення мікрометрових тріщин при одноразовому деформуванні.

Основний зміст дисертації відображений у наступних публікаціях.

1. А.с. 1281977. Способ оценки повреждаемости материалов / Ю.А.Никитин, С.Р.Игнатович, С.И.Ювенко.-Опубл. 07.01.1987.-Бюл. №1.
2. Автоматизированная система технического зрения для визуально-оптического контроля деталей проточной части газотурбинных двигателей / Н.В.Грищенко, С.Р.Игнатович, С.И.Ювенко, Г.А.Троков // XIV Научн. совещ. по проблемам прочности двигателей (Москва, апрель, 1992 г.): Тез. докл.-М.: В.и., 1992.-С. 20.
3. Закономерности образования и роста малых трещин на поверхности жаропрочных сплавов / С.Р.Игнатович, Г.А.Троков, С.И.Ювенко, Н.В.Грищенко // XIII Всесоюз. конф. "Структура и прочность материалов в широком диапазоне температур" (Каунас, окт., 1989 г.): Тез. докл.-Каунас: В.и., 1989.-С. 26.
4. Игнатович С.Р. Исследования малоциклового усталости жаропрочных сплавов с целью прогнозирования несущей способности роторных деталей авиационных ГТД // Обл. научно-техн. конф. "Прочность элементов роторов турбомашин" (Литомир, сентябрь, 1981 г.): Тез. докл.-Литомир: В.и., 1981.-С. 27.
5. Игнатович С.Р. К построению математической модели процесса накопления повреждений // I Республиканская конф. по повышению надежности и долговечности машин и сооружений (Киев, сентябрь, 1982 г.): Тез. докл.-Киев: Научова думка, 1982.-Ч. 1.-С. 25.

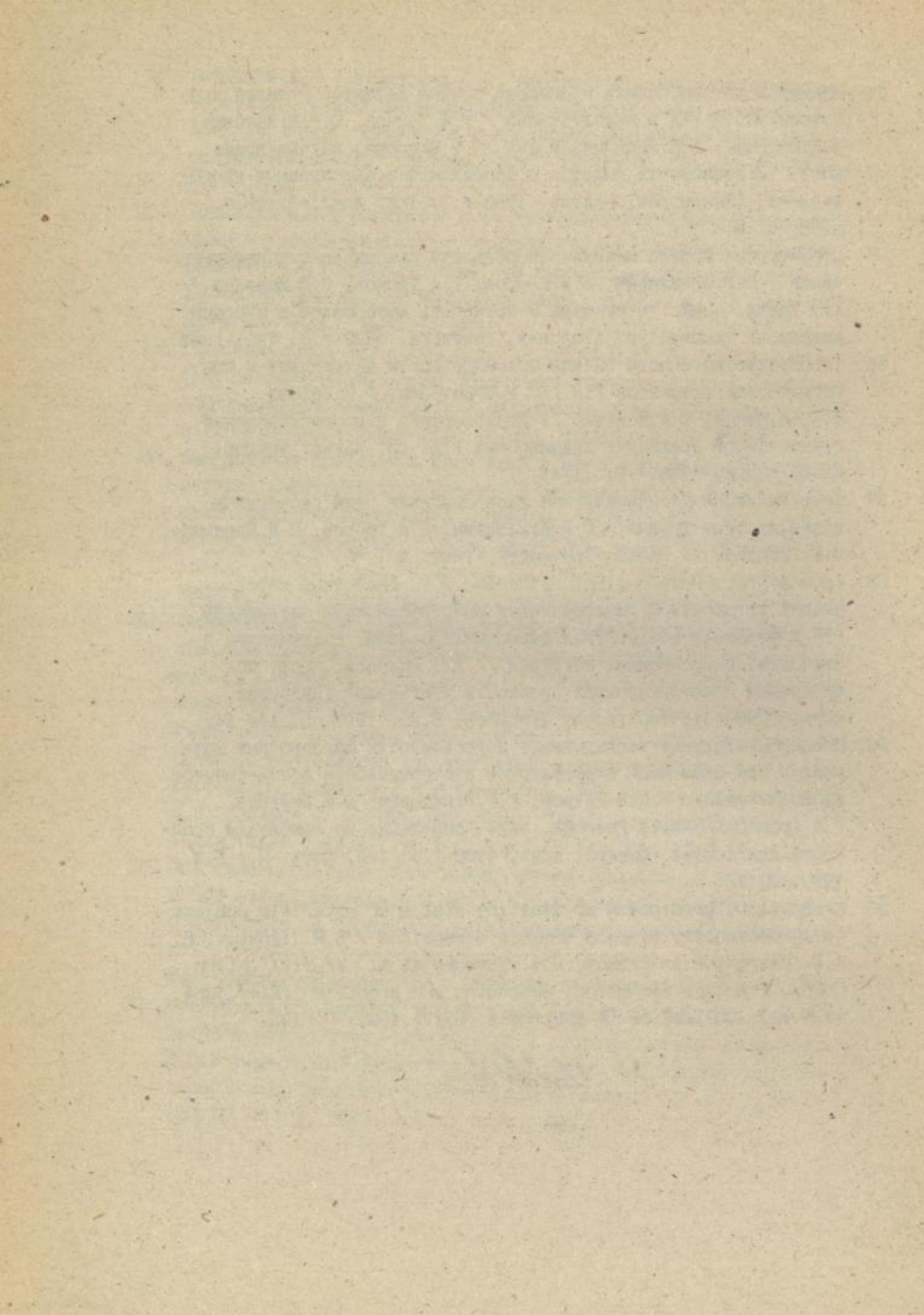
6. Игнатович С.Р., Грищенко Н.В. Метод оценки технического состояния деталей газотурбинных двигателей по критерию поверхностной поврежденности // Проблемы управления техническим состоянием авиационных двигателей: Сб. научн. трудов. - Киев: КИИГА, 1990. - С. 30-34.
7. Игнатович С.Р., Никитин Ю.А., Яовенко С.И. Механизм влияния поверхностного пластического деформирования на повреждаемость сплава ЭИ698ВД при малоцикловом нагружении // Надежность и долговечность машин и сооружений. - Киев: Наук. думка, 1986. - N 9. - С. 102-105.
8. Игнатович С.Р. Моделирование процессов множественного разрушения материалов // VI Всесоюз. конф. "Физика разрушения" (Киев, сент., 1989 г.): Тез. докл. - Киев: ИЛМ, 1989. - С. 61.
9. Игнатович С.Р. Один из подходов к описанию повреждаемости и разрушения твердых тел // Конструкционная прочность авиационных газотурбинных двигателей: Сб. научн. трудов. - Киев: КИИГА, 1983. - С. 78-81.
10. Игнатович С.Р., Троков Г.А., Тарасенко А.В. Оптико-электронный метод контроля технического состояния проточной части газотурбинного двигателя // Методы и средства контроля технического состояния авиационных двигателей: Сб. научн. трудов. - Киев: КИИГА, 1987. - С. 31-33.
11. Игнатович С.Р., Никитин Ю.А. Оценка повреждаемости никелевого сплава в условиях малоциклового нагружения до и после поверхностного пластического деформирования // Повышение надежности деталей и узлов авиационной техники и оценка их технического состояния в процессе обслуживания и ремонта: Межвуз. сб. научн. трудов. - Киев: КИИГА, 1985. - С. 41-47.
12. Игнатович С.Р. Оценка эксплуатационной поврежденности конструктивных элементов газотурбинных двигателей // Оценка технического состояния авиационных газотурбинных двигателей в процессе эксплуатации: Межвуз. сб. научн. трудов. - Киев: КИИГА, 1986. - С. 28-30.
13. Игнатович С.Р., Троков Г.А. Прогнозирование ресурса с учетом особенностей развития системы поверхностных микрометровых трещин // Пробл. прочности. - 1990. - N 2. - С. 17-22.
14. Игнатович С.Р. Прогнозирование объединения рассеянных дефектов // Пробл. прочности. - 1992. - N 2. - С. 71-77.
15. Игнатович С.Р. Распределение размеров дефектов при нагружении // Пробл. прочности. - 1990. - N 9. - С. 40-45.

16. Игнатович С.Р. Статистическое описание процессов микропластического деформирования металлов // Надежность и долговечность деталей и узлов авиационной техники: Сб. научн. трудов.-Киев: КИИГА, 1986.-С. 19-22.
17. Игнатович С.Р. Стохастическая модель накопления микроразрушений и ее использование для диагностирования ГТД // Теоретическое диагностирование авиационных двигателей: Сб. научн. трудов.-Киев: КИИГА, 1987.-С. 111-118.
18. Игнатович С.Р. Стохастическая модель повреждаемости материалов // Пробл. прочности.-1990.-№ 6.-С. 3-9.
19. Игнатович С.Р. Структурная модель накопления микроповреждений в конструкционных материалах // Пробл. прочности.-1988.-№ 5.-С. 8-12.
20. Игнатович С.Р., Лоанцкий Л.П., Никитин Ю.А. Теоретический и экспериментальный методы определения поврежденности циклически деформируемых материалов и их использование для оценки технического состояния элементов ГТД // XXI Всесоюз. научн. совещание по пробл. прочн. двигателей (Москва, июнь, 1986 г.): Тез. докл.-М.: В. и., 1986.
21. Яовенко С.И., Игнатович С.Р. Автоматизированный стенд для исследования долговечности турболопаточных материалов ГТД при трехкомпонентном нагружении // Эксплуатационная надежность авиационных ГТД: Межвуз. сб. научн. трудов.-Киев: КИИГА, 1988.-С. 126-132.
22. Лашков В.Ф., Игнатович С.Р., Малютя С.А. К оценке выработки ресурса ГТД по "лимитирующим" конструктивным элементам // Надежность и долговечность авиационных газотурбинных двигателей: Межвуз. сб. науч. трудов.-Киев: КИИГА, 1979.-С. 51-58.
23. Лоанцкий Л.П., Игнатович С.Р., Никитин Ю.А. Влияние ПШД микроразрисиами на малоцикловую повреждаемость никелевого сплава // Физико-хим. механика материалов.-1985.-№ 5.-С. 111-112.
24. Лоанцкий Л.П., Игнатович С.Р. Математическая модель процесса накопления повреждений в деформируемых материалах // Пробл. прочности.-№ 7.-1985.-С. 34-38.
25. Лоанцкий Л.П., Игнатович С.Р., Никитин Ю.А. Математическая модель процессов зарождения и распространения трещин в условиях статического и циклического деформирования // II Всесоюз. симпозиум по механике разрушения (Литомир, октябрь, 1985 г.): Тез. докл.-Киев: Б.и., 1985.-Т. 1.-С. 62.

26. Лозицкий Л.П., Игнатович С.Р. Прогнозирование долговечности материалов с учетом неоднородности размеров микродефектов // XIII Всесоюз. конф. "Структура и прочность материалов в широком диапазоне температур" (Каунас, окт., 1989 г.): Тез. докл.-Каунас: В.и., 1989.-С. 27.
27. Лозицкий Л.П., Игнатович С.Р. Прогнозирование ресурса материалов и конструктивных элементов ГТД до образования макротрещины // XII Всесоюз. конф. по проблемам конструкционной прочности двигателей (Куйбышев, июнь, 1990 г.): Тез. докл.-Куйбышев: В.и., 1990.-С. 97.
28. Лозицкий Л.П., Игнатович С.Р., Никитин Ю.А. Теоретический и экспериментальный методы оценки поверхностной поврежденности деформируемых материалов // Надежность и долговечность машин и сооружений. - Киев: Наук. думка, 1986.-N 9.-С. 59-66.
29. Обоснование предельных состояний и методы прогнозирования ресурса конструктивных элементов авиационных газотурбинных двигателей при накоплении рассеянных повреждений / Н.В.Грищенко, С.Р.Игнатович, С.И.Ювенко, Г.А.Троков // XXIV Научн. совещ. по проблемам прочности двигателей. (Москва, апрель, 1992 г.): Тез. докл.-М.: В.и., 1992.-С. 21-22.
30. Особенности накопления поверхностных микрометровых трещин при многофакторном нагружении никелевого сплава / С.Р.Игнатович, А.Н.Ветров, Г.А.Троков, С.И.Ювенко и др. // XIV Научн. конф. "Структура и прочность материалов в широком диапазоне температур" (Воронеж, сент., 1992 г.): Тез. докл.-М.: В.и., 1992.
31. Особенности развития системы малых трещин на поверхности жаропрочных сплавов / С.Р.Игнатович, Г.А.Троков, С.И.Ювенко, Н.В.Грищенко // VI Всесоюз. конф. "Механика разрушения" (Киев, сент., 1989 г.): Тез. докл.-Киев: ИТМ, 1989.-С. 250.
32. Повреждаемость поверхности жаропрочных сплавов на инкубационной стадии макроразрушения / С.Р.Игнатович, Г.А.Троков, С.И.Ювенко, Н.В.Грищенко // XII Всесоюз. конф. по проблемам конструкционной прочности двигателей (Куйбышев, июнь, 1990 г.): Тез. докл.-Куйбышев: В.и., 1990.-С. 55-56.
33. Применение структурных моделей для описания процессов пластического разрыхления, образования и распространения микротрещин / Л.П.Лозицкий, С.Р.Игнатович, Г.А.Троков, С.И.Ювенко // I Всесоюз. конф. "Механика разрушения материалов" (Львов, октябрь, 1987 г.): Тез. докл.-Львов: В.и., 1987.-Ч. 1.-С. 57.

34. Принципы автоматизации процессов поиска дефектов деталей прочной части ГТД в эксплуатации / Г.А.Троков, С.Р.Игнатович, С.И.Ювенко, Л.П.Ловицкий и др. // V Всесоюз. научно-практ. конф. "Безопасность полетов и профилактика авиационных происшествий" (Ленинград, ноябрь, 1988 г.): Тез. докл.-Л.: В.и., 1988.-С. 4.
35. Структурная модель микронеоднородности пластического деформирования / С.Р.Игнатович, А.Н.Ветров, Г.А.Троков, С.И.Ювенко // XIV Научн. конф. "Структура и прочность материалов в широком диапазоне температур" (Воронеж, сентябрь, 1992 г.): Тез. докл.
36. Теоретические основы оценки поврежденности материалов и конструктивных элементов ГТД / С.Р.Игнатович, А.Н.Ветров, М.А.Молочков, С.И.Ювенко // Диагностика и прогнозирование технического состояния авиационных ГТД: Сб. научн. трудов.- Киев: КИИГА, 1985.- С. 41-47.
37. Теоретическое и эмпирические распределения длин рассеянных поверхностных трещин / С.Р.Игнатович, Г.А.Троков, С.И.Ювенко, Н.В.Грищенко // Пробл. прочности.-1992.-№ 1.-С. 7-9.
38. Троков Г.А., Ветров А.Н., Игнатович С.Р. Расчетный метод оценки усталостной долговечности конструкционных материалов ГТД в условиях воздействия термоциклирования, статических и случайных вибрационных нагрузок // XII Всесоюз. конф. по проблемам конструкционной прочности двигателей (Куйбышев, июль, 1990 г.): Тез. докл.-Куйбышев: В.и., 1990.-С. 146-149.
39. Экспериментальные исследования долговечности жаропрочных материалов при случайном и регулярном изотермическом асимметричном вибронегрузении / А.Н.Ветров, С.Р.Игнатович, В.Е.Мильцов, Г.А.Троков // XXIII Всесоюз. науч. совещание по проблемам прочности двигателей (Москва, июль, 1990 г.): Тез. докл.-М.: В.и., 1990.-С. 15.
40. Probability prediction of limiting states of materials subject to inhomogeneity dispers damages dimensions / S.R. Ignatovich, A.N. Vetrov, G.A. Trokoz, S.I. Yovenko et al. // VIII Intern. Conf. "Fracture mechanics: successes and problems" (Kiev, June, 1993 y.): Collection of Abstracts.-Lviv, 1993.-P. 192.

U.S. Johnson



Подписано в печать 05.11.93. Формат 60x84/16. Бумага типографская.
Офсетная печать. Усл.кр.-отт.10. Усл.печ.л. 1,85. Уч.-изд.л. 2,0.
Тираж 100 экз. Изд. N 213/III. Заказ N 209-1. Цена

Издательство КИВИТА
252058. Киев-59, проспект Космонавта Комарова, 1.

463088

AB 28.543