

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
"КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ"**

на правах рукопису

УДК 539,375

САВЧЕНКО Олександр Віталійович

**РУЙНУВАННЯ АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ
В УМОВАХ ЦИКЛІЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ
З ПЕРЕВАНТАЖЕННЯМИ**

**СПЕЦІАЛЬНІСТЬ 05.02.09 - Динаміка, міцність машин,
приладів і апаратури**

АВТОРЕФЕРАТ

**дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук**

КИЇВ - 1996

AB34.902

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано на кафедрі динаміки і міцності машин та опору матеріалів
Національного Технічного Університету України "Київський політехнічний інститут".

Науковий керівник — доктор технічних наук, професор
Антипов Є.О.

Науковий консультант — доктор технічних наук, професор
Бобир М.І.

Офіційні опоненти — доктор технічних наук
Ігнатович С.Р.
— кандидат технічних наук
Семенець О.І.

Провідне підприємство — КиАВО, м.Київ

Захист відбудеться 24 червня 1996 р. о 15 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д01.02.18 в Національному технічному університеті України "Київський політехнічний інститут" за адресою: 252056, м.Київ-56, пр.Перемоги, 37, корп.Н1, ауд.Н166.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці університету.

Автореферат розіслано 21 травня 1996 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради,
кандидат технічних наук

Боронко О.О.


ЛНБ ім. В. Стефанива
АН УкрАІ

ЛНБ України ім.В.Стефаника



00754642 (S)

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ. Зростаючі вимоги до надійності та довговічності сучасних машин визначають актуальність досліджень направлених на розвиток методів прогнозування руйнування елементів конструкцій, в тому числі при наявності в них тріщин втоми. Деталі та вузли сучасних конструкцій експлуатуються в умовах зміни амплітуди та пікових викидів процесу циклічного навантаження (перевантаження), які суттєво впливають на швидкість зростання тріщин втоми.

Аналіз літературних даних свідчить, що вплив перевантаження для різних стадій експлуатації на розвиток тріщин втоми залишається недостатньо вивченим. Кількість результатів експериментальних робіт по цій проблемі обмежена. Вони не містять відомостей по багатьом матеріалам та умовам циклічного навантаження. Велика кількість конструкцій, що експлуатуються на сьогодні, спроектована з використанням розрахункових методів, які базуються на лінійному додаванні прирістів довжин тріщин без врахування взаємодії амплітуд навантажень різного рівня. Це приводить до значного заниження їх розрахункового ресурсу.

Критичний розгляд моделей, запропонованих для розрахункової оцінки впливу перевантажень на уповільнення зростання тріщин втоми показав, що вони не можуть успішно використовуватись для визначення ресурсу конструкцій, тому що описують лише одиничні залежності, отримані при випробуванні зразків певного типу в вузьких діапазонах змін довжин тріщин, не враховують дію декількох перевантажень, розмірів та інших факторів.

В зв'язку з цим проблема оцінки руйнування конструкційних матеріалів в умовах нестационарного циклічного навантаження, включаючого перевантаження, є актуальною.

МЕТА ДИСЕРТАЦІЇ полягає у встановленні закономірностей зростання тріщин втоми і розробці методу розрахунку життєздатності листових елементів конструкцій, працюючих в умовах циклічного навантаження з перевантаженням.

Згідно до вказаної мети сформульовані наступні основні задачі:

- розвиток методики та засобів випробувань листових матеріалів в умовах циклічного навантаження, наближених до експлуатаційних;
- дослідження впливу одиничних перевантажень на опір матеріалів руйнуванню втомою;
- вивчення кінетики закриття тріщини втоми в умовах циклічного навантаження з перевантаженням;

- розробка методики прогнозування життєздатності елементів конструкцій в умовах циклічного навантаження з перевантаженням.

МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ. Вивчення опору руйнуванню від втоми виконано на основі методів та критеріїв механіки руйнування. Аналіз та опрацювання результатів експериментальних досліджень здійснено з використанням сучасних чисельних методів, оформлених у вигляді прикладних програм для персонального комп'ютера.

НАУКОВА НОВИЗНА здобутих у дисертації результатів полягає у наступному :

- розроблена методика дослідження опору руйнуванню від втоми елементів листових конструкцій, яка дозволяє вивчати дію циклічного навантаження співпадаючого та перпендикулярного напрямку тріщини;

- з'ясовані закономірності впливу перевантажень на швидкість зростання тріщин втоми в листових зразках для різних матеріалів та довжин тріщин;

- вивчена кінетика закриття тріщин втоми у зв'язку з циклічним навантаженням з перевантаженням;

- запропонована та апробована для розрахунку зростання тріщини втоми після дії перевантаження, модель ефективного коефіцієнту інтенсивності напружень (КІН), яка враховує тріщиностійкість матеріалів, рівні перевантаження і циклічного навантаження у момент дії перевантаження;

ПРАКТИЧНА ЦІННІСТЬ ДИСЕРТАЦІЇ. Розроблена експериментальна методика комплексного дослідження руйнування листових елементів конструкцій в умовах нерегулярного циклічного навантаження. Отримані нові результати кінетики зростання тріщин втоми в алюмінієвих сплавах Д16чТ та 1973Т2 для різних довжин тріщини в умовах циклічного навантаження з перевантаженням. Стосовно досліджуваних матеріалів та умов навантаження запропонована модель ефективного КІН, яка дозволяє прогнозувати живучість елементів конструкцій, працюючих в умовах циклічного навантаження з перевантаженням.

РЕАЛІЗАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ РОБОТИ. Запропонована методика дослідження та прогнозування руйнування листових елементів конструкцій та одержані нові експериментальні дані можуть використовуватися при проектуванні нових та визначення залишкового ресурсу працюючих об'єктів авіакосмічного комплексу та енергетичного машинобудування. Основні результати роботи, висновки і рекомендації впроваджено на підприємстві АНТК "АНТОНОВ" при проектуванні та експлуатації виробів нової техніки.

АПРОБАЦІЯ РОБОТИ. Викладені в дисертації результати доповідалися і були обговорені на Міжнародній науково-технічній конференції студентів, молодих вчених та спеціалістів "Молоді вчені у вирішенні комплексної програми науково-технічного прогресу країн-членів РЕВ" (Київ, 19-22 квітня 1989 р.); XVI та XVIII наукових

конференціях молодих вчених Ін-ту механіки НАН України (Київ, 21-24 травня 1991 р. та 18-21 травня 1993 р. відповідно); науково-технічній конференції "Фундаментальні та прикладні проблеми космічних досліджень" (Житомир, 23-25 червня 1993 р.); на засіданні кафедри ДММ та ОМ механіко-машинобудівельного факультету НТУУ "КПІ" (24 квітня 1996 р.).

ПУБЛІКАЦІЇ. За матеріалами дисертації опубліковано 11 наукових праць.

СТРУКТУРА І ОБ'ЄМ РОБОТИ. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, заключення, списку літератури з 146 найменувань та додатку. Загальний обсяг дисертації складає 125 сторінки друкованого тексту, 65 малюнків та 12 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ.

У вступній частині дисертації дано обґрунтування актуальності виконаного дослідження, сформульовані ціль та задачі роботи, викладені основні результати та положення, що виносяться на захист. У першому розділі зроблено огляд літературних даних з основних питань, що порушені в дисертації. Приведено детальний аналіз моделей та критеріїв зростання тріщин при циклічному навантаженні. Детально розглянуто ефект закриття тріщин, його механізми та методики кількісної оцінки. Показано, що залежність рівня закриття тріщини від параметрів циклічного навантаження, напружено-деформованого стану матеріалу і геометрії тріщини дає змогу пояснити числені кінетичні ефекти руйнування втотою, в тому числі при наявності пікових викидів (перевантажень) процесу циклічного навантаження. На основі аналізу досліджень, присвячених кінетиці росту тріщин в умовах нестационарного циклічного навантаження показано, що природа, механізми і фактори, обумовлюючі її особливості вивчені недостатньо, відсутні дані про вплив рівня перевантажень на опір зростанню тріщин втотою багатьох конструкційних матеріалів. Критичний розгляд відомих моделей, запропонованих для розрахункової оцінки впливу ефекта перевантажень на уповільнення зростання тріщин показав, що вони не можуть бути успішно використані в прикладних розрахунках, так як описують лише данні, отримані при дослідженні зразків визначеного типу, не дозволяють враховувати дію декількох послідовних перевантажень, вплив товщини листа та інших факторів. На основі літературного огляду сформульовані мета та задачі дисертаційної роботи.

Для досягнення сформульованої мети та задач дисертаційної роботи розроблена комплексна методика, що дозволяє досліджувати різноманітні аспекти руйнування листових конструкційних матеріалів в умовах нестационарного циклічного навантаження.

Основною особливістю розробленої методики є можливість дослідження закономірностей кінетики руйнування втомою за умов диференційованого силового навантаження вздовж та впоперек тріщини, використовуючи розривну машину на одновісний розтяг. Це дає змогу розширити рамки моделювання реальної поведінки тріщини втоми та наблизити умови навантаження експериментальних досліджень до експлуатаційних. Методика базується на використанні розробленого захвату та хрестовидного зразка, оптимізованого по співвідношенню габаритних розмірів та розмірів робочої зони. Захват конструктивно представляє собою низку шарнірних пар, зібраних в пакет і стягнутих пластинами. Для запобігання заклинення пар у конструкції передбачені упорні стержні. Фіксація зразка у захваті здійснюється за допомогою спеціальних прижимів, які затягуються динамометричним ключем до певного зусилля, яке виключає зсув пелюсток зразка. Довгострокове використання захвату обумовлене виготовленням його деталей із сталі 35ХГСА та термічною обробкою його елементів. Запропонований захват забезпечує перерозподіл зусилля розтягу по ширині зразка, що дає змогу використовувати в дослідженнях усечений хрестовидний зразок, простіший у виготовленні, та суттєво більш ефективно використовуючий досліджуваний матеріал, ніж загальновідомий зразок з прорізами. У даній роботі, використання запропонованих зразка та захвату дозволило дослідити кінетику тріщин втоми згідно двох схем навантаження (мал.1). Перевірка однорідності напружено-деформованого стану робочої зони зразка виконана шляхом тензометрії. Тензорезистори, в кількості ста одиниць, наклеювались на зразок без тріщини таким чином, щоб визначити перерозподіл зусилля розтягу по ширині робочої зони, згин зразка та однорідність поля деформацій його робочої зони. Порівняння показників симетрично розташованих тензорезисторів, свідчить про відсутність згину та симетричність і рівномірність розподілу зусилля між пелюстками зразка. Використовуючи пакет прикладних програм, розроблених на кафедрі ДММ та ОМ НТУУ "КПІ", по деформаціям місць наклейки тензорезисторів розрахований напружено-деформований стан робочої зони зразка. Встановлена площа області, для якої відхилення напруг від величини середньої напруги робочої зони зразка не перевищувала 5% (табл.1).

Таблиця 1.

Номинальні напруження робочої зони σ_H , МПа	Середні напруги в робочій зоні		Відносна площа зони однорідного напруженого стану
	$\sigma_{усп} / \sigma_H$	$\sigma_{хсп} / \sigma_H$	
8,15	0,951	$-1,46 \cdot 10^{-3}$	0,78

Отримані результати свідчать, що в робочій зоні забезпечується напружено-деформований стан, який дозволяє використання зразка як об'єкта досліджень закономірностей руйнування листових конструкційних матеріалів.

Вивчення тріщиностійкості листових конструкційних матеріалів передбачає з'ясування поправочної функції $Y(\lambda)$, яка враховує вплив граничних умов на величину КІН. Зважаючи на невизначеність граничних умов, функція $Y(\lambda)$ (К-тарування) визначалася методом податливості, який базується на взаємоз'язку податливості зразка C та довжини тріщини l і дає вираз для визначення $Y(\lambda)$ у вигляді:

$$Y(\lambda) = \sqrt{\frac{E t}{\pi} \frac{1}{\lambda} \frac{dc}{d\lambda}}, \quad (1)$$

Для визначення $Y(\lambda)$ були одержані діаграми деформування зразка без тріщини та з тріщинами різної довжини. Експериментальні значення податливості (мал.2) описано поліномом:

$$C(\lambda) = C_0 + C_1 \lambda + \dots + C_n \lambda^n, \quad (2)$$

коефіцієнти C_i якого знайшли на основі аналізу властивостей поправочної функції та апроксимуючи результати експериментів методом найменших квадратів. Остаточно $Y(\lambda)$ має вигляд:

$$Y(\lambda) = \sqrt{1 + 6,52 \lambda^3} \quad (3)$$

Деяка відмінність отриманої функції від поправочних функцій для квадратної пластини в умовах м'якого та жорсткого навантаження свідчить про вплив геометрії та умов закріплення усніеного хрестовидного зразка на напружено-деформований стан його робочої зони.

Виходячи з практичних міркувань, за об'єкт досліджень вибрано поширені в техніці алюмінієві сплави Д16чТ та 1973Т2, опір руйнуванню яких в умовах стаціонарного та нестаціонарного циклічного навантаження вивчений недостатньо.

Вищевказані матеріали мають деяку анізотропію. Максимальна анізотропія (до 12% по границі текучості) властива сплаву Д16чТ. В роботі розрахункова частина виконувалась без урахування анізотропії сплавів. Тріщини втоми в усіх зразках були орієнтовані перпендикулярно до напрямку прокату.

Характеристики в'язкості руйнування сплавів отримані на усніених хрестовидних зразках. В умовах плаского напруженого стану виникають значні пластичні деформації, які накладають обмеження на характеристики тріщиностійкості

матеріалів. В роботі визначався умовний критичний КІН K_C^* , який розраховується по максимальному навантаженню та початковій довжині тріщини. Величина K_C^* є характеристикою, яка не враховує підростання тріщини, але об'єднує в собі початкову довжину тріщини та максимальне навантаження і використовується, як порівняльна величина, а також для обчислення граничної напруги, яку може витримати зразок з данного матеріалу при наявності початкової тріщини заданої довжини. Для досліджуваних сплавів Д16чТ $K_C^* = 85,5 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$, для сплаву 1973Т2 $K_C^* = 76,7 \text{ МПа м}$.

Вивчено опір росту тріщин для сплавів Д16чТ та 1973Т2 в умовах стаціонарного циклічного навантаження. Параметри базового циклу $\sigma_{\text{max}} = 130 \text{ МПа}$; $R = 0,1$; $f = 0,12$, рекомендовані авіаційним підприємством, як еквівалентні одному навантаженню елементів конструкцій транспортних літаків за типовий польотний цикл земля-повітря-земля. Порівняння довжини тріщини та розміру зони пластичних деформацій, виникаючих у її вершині при базовому циклічному навантаженні показало коректність застосування лінійної механіки руйнування.

Експериментальні результати швидкості зростання тріщини (ШЗТ) описані рівнянням Періса:

$$\frac{dl}{dN} = C(\Delta K)^n \quad (4)$$

де ΔK - розмах КІН циклу, коефіцієнти знайдені методом найменших квадратів. Для сплаву Д16чТ $C = 1,11 \cdot 10^{-7}$; $n = 3,09$, для сплаву 1973Т2 $C = 4,35 \cdot 10^{-8}$; $n = 3,38$.

Результати свідчать, що для діючих умов циклічного навантаження швидкість зростання тріщини в сплаві 1973Т2 вище ніж в сплаві Д16чТ. Таким чином, зростання характеристик тріщиностійкості при статичному навантаженні відповідає зменшенню швидкості зростання тріщини при циклічному навантаженні.

В роботі досліджено закриття тріщини (ЗТ) втомі в умовах стаціонарного циклічного навантаження. Згідно розробленої методики записувались діаграми деформування $P - \Delta$, та по моменту повного відкриття тріщини визначали зусилля ЗТ - $P_{\text{ор}}$. Експериментально визначено вплив відстані Z від вершини тріщини до точок кріплення деформометра на рівень $P_{\text{ор}}$ (мал.3). Для сплаву Д16чТ при фіксованій довжині тріщини $2l_0 = 25,0$ мм були побудовані діаграми деформування та визначені величини ЗТ для різних Z . З'ясовано, що при підтримуванні Z в границях 1,5...2,0 мм зусилля $P_{\text{ор}}$ практично не змінюється.

Дослідження ЗТ в умовах стаціонарного циклічного навантаження показали, що при зростанні тріщини втомі спостерігається збільшення зусилля $P_{\text{ор}}$, яке при

досягненні певної довжини стабілізується та не змінюється при наступному підростанні тріщини (мал. 3).

По стабілізованому значенню P_{OP} для досліджених сплавів одержані величини коефіцієнта закриття тріщини:

$$u = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{OP}}{\sigma_{max} - \sigma_{min}} \quad (5)$$

та розмаху ефективного КІН:

$$\Delta K_{ef} = u \Delta K \quad (6)$$

Це дало можливість описати кінетику зростання тріщини рівнянням Періса-Елбера:

$$\frac{dl}{dN} = C_1 (\Delta K_{ef})^{n_1} \quad (7)$$

та модифікованим рівнянням, яке більш точно описує експериментальні результати:

$$\frac{dl}{dN} = \frac{C_2 (\Delta K_{ef})^{n_2}}{K_{fc} - K_{max}} \quad (8)$$

Значення коефіцієнтів C_1, n_1, C_2, n_2, u наведені в таблиці 2.

Таблиця 2.

сплав	u	C_1	n_1	C_2	n_2
Д16чТ	0,57	$5,87 \cdot 10^{-7}$	3,09	$2,04 \cdot 10^{-4}$	2,42
1973Т2	0,49	$7,72 \cdot 10^{-7}$	3,38	$2,63 \cdot 10^{-4}$	2,31

Кінетика тріщин втоми в умовах циклічного навантаження з перевантаженням вивчалась при різних значеннях довжини тріщини та коефіцієнта перевантаження:

$$Q = \frac{\sigma_{OL}}{\sigma_{max}} \quad (9)$$

де σ_{max} - максимальне напруження базового циклічного навантаження, σ_{OL} - максимальне напруження циклу перевантаження.

Знайдено, що перевантаження з коефіцієнтом $Q = 1,25 \dots 1,3$ не викликає змін у зростанні тріщини, а перевантаження $Q = 2,4 \dots 2,5$ приводить до повної

уповільнення швидкості зростання тріщини втоми (мал.6,а). Експериментальні значення мінімальної ШЗТ втоми U_{\min} описані єдиним рівнянням, враховуючим опір сплаву руйнуванню втомою при стаціонарному циклічному навантаженні:

$$\frac{U_{\min}}{U_{\text{CAL}}^0} = K_0 + \frac{K_1}{Q} \quad (10)$$

Тут U_{CAL}^0 - ШЗТ втоми при стаціонарному циклічному навантаженні в момент дії перевантаження; $K_0 = 1,028$; $K_1 = 2,29$.

Число циклів уповільненого зростання тріщини N_D збільшується при збільшенні коефіцієнта перевантаження. Стосовно досліджених сплавів запропоноване рівняння для розрахунку N_D :

$$N_D = \frac{BQ^\beta}{\left(\frac{K_{\max}^0}{K_c^*}\right)^{\sqrt{2}}} \quad (11)$$

яке враховує як рівень перевантажень, так і тріщиностійкість сплавів при статичному навантаженні. Тут K_{\max}^0 - максимальне значення КІН базового циклічного навантаження в момент дії перевантаження; B, β - коефіцієнти, подані в таблиці 3.

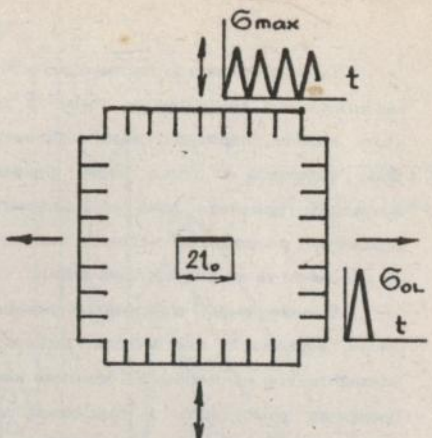
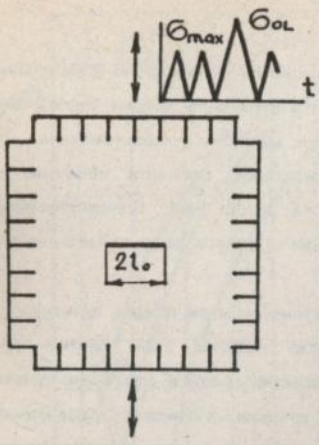
Таблиця 3.

Сплав	B	β
Д16чТ	48,0	6,44
1973Т2	47,52	5,1

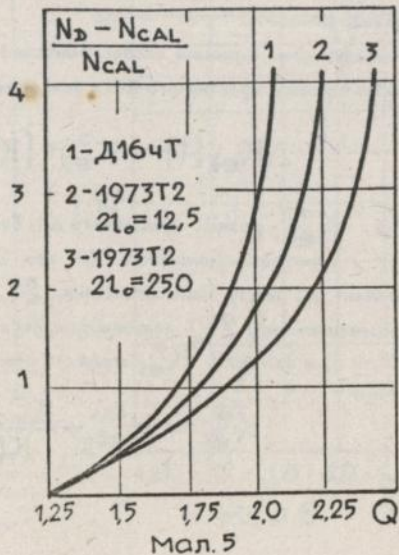
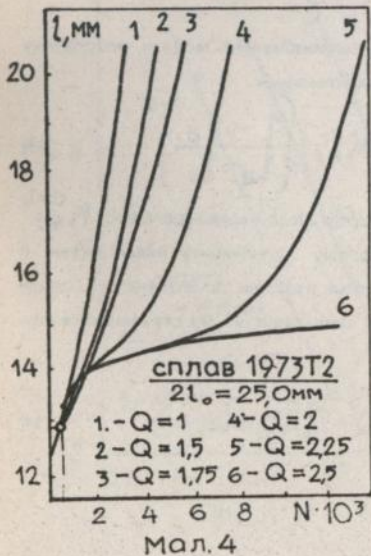
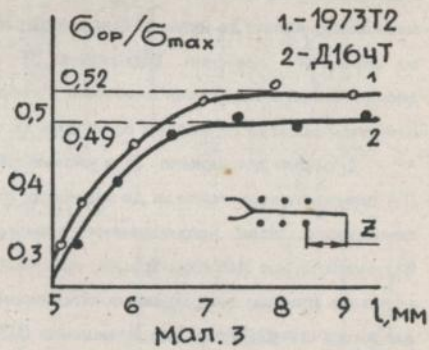
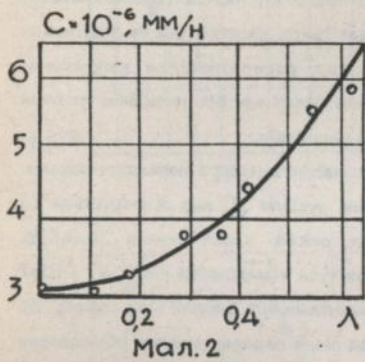
Для оцінки впливу перевантаження введено розрахунковий параметр ефективності перевантаження η

$$\eta = \frac{N_D - N_{\text{CAL}}}{N_{\text{CAL}}} \quad (12)$$

де N_{CAL} - число циклів базового навантаження, необхідних для підростання тріщини від довжини $2l_0$ (момент дії перевантаження) до довжини $2l_E$ (граніці зони впливу перевантаження(мал.5). При цьому ефект затримки тріщини залежить від пластичності матеріала та довжини тріщини. Цей ефект більш значний для більш пластичного сплава Д16чТ - ефективність перевантаження починає різко збільшуватись при менших значеннях Q . Для сплава 1973Т2 проведено серію досліджень при різних довжинах тріщин - ефективність виявляється вище для менших довжин тріщини, що обумовлене залежністю N_D та U_{\min} від довжини тріщини і максимального КІН стаціонарного циклічного навантаження в момент дії перевантаження.



Мал. 1



Умови експлуатації листових авіаційних конструкцій такі, що спільно з циклічним навантаженням, викликаючим появу та зростання магістральних тріщин періодично діють зусилля, перпендикулярні напрямку основного циклічного навантаження. До таких елементів в першу чергу відносяться гермоістинки, елементи обшивки та фіюзеляжу, коренева зона стрілоvidного крила та деякі інші. Використовуючи можливості розробленої методики виконано дослідження такого роду перевантажень на зростання та закриття тріщин втоми.

В експерименті максимальні значення сили, діючої вздовж тріщин, визначали з умови відсутності пластичного деформування всієї робочої зони зразка. Дія перевантажень не викликала помітних кінетичних ефектів: графіки зростання тріщин практично співпадають з графіками зростання тріщин в умовах одновісного стаціонарного циклічного навантаження. Рівень ЗТ після дії перевантаження значно зменшився, майже до нуля, а після напрацювання декількох десятків циклів відновився до первісного значення. Відхилення ЗТ пояснюється перерозподілом напружено-деформованого стану зони пластично деформованого матеріалу біля вершини тріщини і зміною геометрії поверхні її берегів та загострення вершини.

В роботі досліджено ЗТ в умовах циклічного навантаження з перевантаженням. Дія перевантажень привела до значного збільшення зусилля ЗТ, яке зменшується до початкового після напрацювання певного числа циклів навантаження (мал.6,6). Встановлено, що довжини тріщин, при яких відбувається відновлення рівня ЗТ і ШЗТ втоми до значень, відповідаючих стаціонарному навантаженню близькі між собою. Це дає змогу стверджувати, що зменшення ШЗТ втоми після перевантаження обумовлене зміною рівня ЗТ.

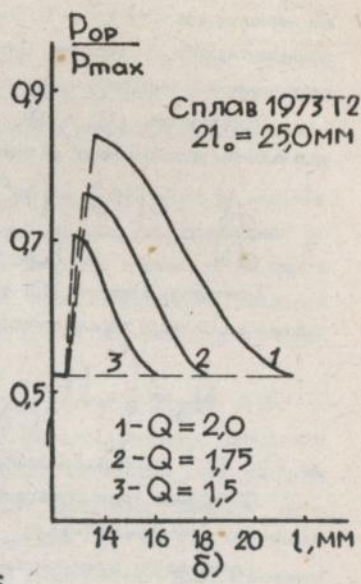
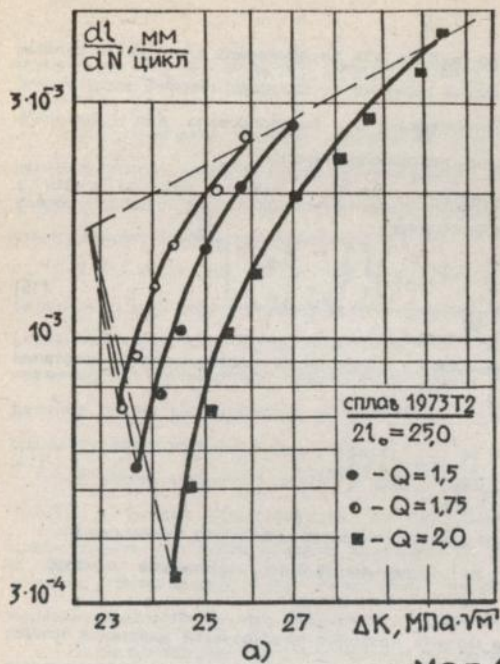
Узагальнюючи отримані експериментальні дані, запропонована модель розрахунку зміни розмаху ефективного КІН в зоні впливу перевантаження:

$$\Delta K_{ef}(1) = K_{ef}^0 + (K_{ef}^{CAL} - K_{ef}^0) \left(\frac{1 - l_0}{l_E - l_0} \right)^S \quad (13)$$

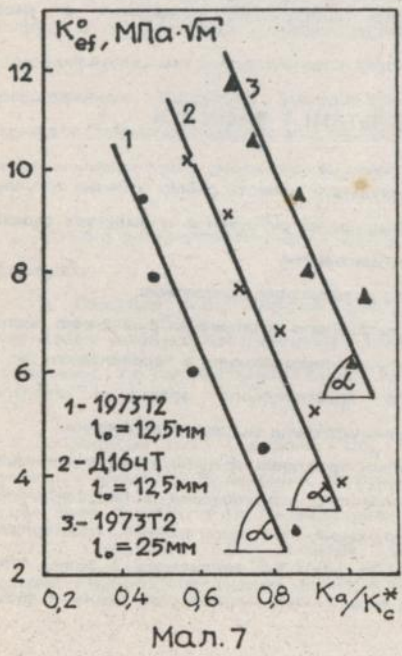
Тут K_{ef}^0 - розмах ефективного КІН безпосередньо після перевантаження, K_{ef}^{CAL} - розмах ефективного КІН при стаціонарному циклічному навантаженні в момент дії циклу перевантаження; $2l_0$ - довжина тріщини в момент дії циклу перевантаження; $2l_E$ - довжина тріщини в момент закінчення впливу перевантаження.

Для величини K_{ef}^0 отримано рівняння:

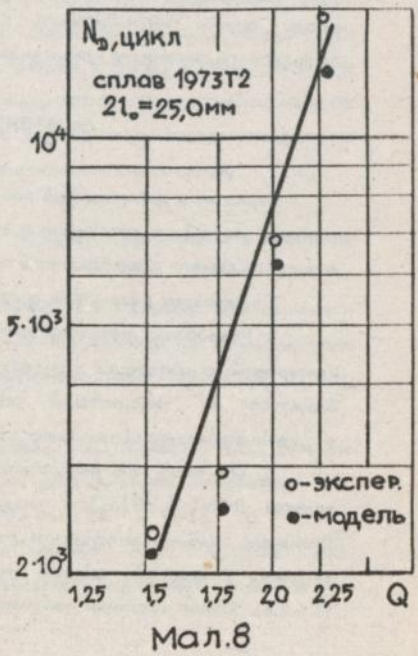
$$K_{ef}^0 = K_{ef}^{CAL} + \frac{K_{max}^*}{K_c} (Q-1) \operatorname{tg} \alpha \quad (14)$$



Мал. 6



Мал. 7



Мал. 8

де $\operatorname{tg} \alpha$ - тангенс кута нахилу базового графіка, для досліджених алюмінієвих сплавів він дорівнюється -24,4 (мал.7). Отримане рівняння по структурі подібне до рівняння запропонованого в роботах О.Б.Злочевського і модифіковане для циклічного навантаження з постійним максимальним напруженням циклу.

Підставляючи (13) в (8), отримуємо рівняння зростання тріщини втоми з урахуванням уповільнюючої дії перевантаження

$$\frac{dl}{dN} = \frac{c \left[K_{ef}^o + (K_{ef}^{CAL} - K_{ef}^o) \left(\frac{1 - l_e}{l_e - l_o} \right)^n \right]}{K_{fc} - K_{max}} \quad (15)$$

Інтегруючи рівняння (15) отримуємо число циклів уповільненого зростання тріщини втоми після перевантаження:

$$N_D = \int_{l_o}^{l_E} \frac{(K_{fc} - K_{max}) dl}{C \Delta K_{ef}^n} \quad (16)$$

де C, n - коефіцієнти, знайдені для стаціонарного циклічного навантаження.

Порівняння розрахункових та експериментальних результатів показує їх задовільну відповідність (мал.8).

Таким чином запропонована модель дозволяє прогнозувати зростання тріщин втоми з урахуванням уповільнюючої дії перевантаження і яка може служити основою методу оцінки життєздатності елементів конструкцій, працюючих в умовах стаціонарного циклічного навантаження.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ І ВИСНОВКИ

Отримані в дисертаційній роботі результати являють собою рішення актуальної наукової задачі по дослідженню закономірностей руйнування алюмінієвих сплавів в умовах циклічного навантаження з перевантаженнями.

До основних результатів виконаного дослідження відносяться:

1. Розроблена методика експериментального дослідження руйнування листових конструкційних матеріалів в умовах циклічного навантаження з перевантаженням, яка базується на використанні усненого хрестовидного зразка і забезпечує диференційоване по відношенню до напрямку тріщини силове навантаження.

2. Отримані нові результати кінетики зростання тріщини втоми в алюмінієвих сплавах Д16чТ і 1973Т2 в умовах циклічного навантаження з перевантаженням. Визначені граничні коефіцієнти перевантаження, при яких починає спостерігатись затримка у зростанні тріщини втоми (1,25...1,3) і які викликають її повну зупинку (2,4...2,5). Ефект затримки залежить від пластичності матеріалу та довжини тріщини:

вплив перевантажень вище для більш пластичного сплаву Д16ЧТ і для тріщин меншої довжини.

Запропоновані рівняння мінімальної швидкості зростання тріщини після дії перевантаження і числа циклів уповільненого зростання тріщини, які враховують довжину тріщини, рівень перевантажень та характеристики опору сплавів статичному і стаціонарному циклічному навантаженню.

3. Показано, що зусилля, яке діє вздовж тріщини і величина якого не викликає загального пластичного деформування робочої зони зразка, не призводить до кінетичних ефектів розвитку тріщини втомі. Рівень закриття тріщини після такого навантаження зменшується практично до нуля, але після напрацювання декількох десятків циклів відновлюється до первісного рівня, і тому не приводить до зміни швидкості зростання тріщини.

4. Вивчена кінетика закриття тріщин втомі в алюмінієвих сплавах Д16ЧТ та 1973Т2 в умовах стаціонарного, та при наявності перевантажень, циклічного навантаження. Дія перевантажень приводить до різкого збільшення рівня закриття тріщини. Встановлено, що зменшення швидкості зростання тріщини після перевантаження обумовлене зміною рівня закриття тріщини.

5. На основі узагальнення отриманих результатів запропонована модель розмаху ефективного КН, яка враховує кінетичні ефекти взаємодії навантажень різної амплітуди в листових конструкційних матеріалах. Здійснена перевірка моделі для розрахунку числа циклів уповільненого зростання тріщини у зв'язку з дією одиничного перевантаження. Задовільна відповідність розрахункових та експериментальних результатів показало можливість її використання для прогнозування життєздатності елементів конструкцій в умовах нестаціонарного циклічного навантаження.

Основні результати виконаних досліджень знайшли відображення в наступних публікаціях:

1. Савченко А.В., Антипов Е.А., Онищенко Е.Е. Оценка долговечности материалов в условиях программного циклического нагружения по эквивалентным напряжениям. // Вестник Киев. политех. ин-та. Машиностроение.-1990. - вып. 27. - с. 13-16.

2. Антипов Е.А., Онищенко Е.Е., Савченко А.В., Аристов А.В. Влияние параметров циклов и траектории нагружения на долговечность материалов. // Вестник Киев. политех. ин-та. Машиностроение.-1991.-вып. 28. - с. 11-14.

3. Онищенко Е.Е., Антипов Е.А., Савченко А.В., Аристов А.В. Экспериментальное определение значений энергетического контурного интеграла при

двухосном нагруженні. // Вестник Киев.политех.ин-та. Машиностроение.-1991. - вып. 28. - с. 61-64.

4. Антипов Е.А., Савченко А.В. Установка для исследования закономерностей роста трещин в материалах при циклическом программном нагружении. // Технология и автоматизация машиностроения.-1991.- вып.47.-с. 4-7.

5. Савченко А.В., Антипов Е.А., Онищенко Е.Е. Влияние длины трещины на коэффициент интенсивности напряжений в плоском образце для испытаний на двухосное нагружение. // Вестник Киев.политех.ин-та.Машиностроение.-1992.- вып. 29. - с. 90-94.

6. Антипов Е.А., Каплинский А.Л., Савченко А.В. Долговечность материалов в условиях сложного программного циклического нагружения. // Вестник Киев. политех. ин-та. Машиностроение.-1992. - вып.29. - с. 94-98.

7. Антипов Е.А., Каплинский А.Л., Савченко А.В. Разрушение материалов при простом программном нагружении. // Вестник Киев. политех. ин-та. Машиностроение.-1993. - вып. 30. - с. 73-77.

8. Савченко А.В., Антипов Е.А. Влияние перегрузок на кинетику развития усталостной трещины. // Вестник Киев.политех.ин-та. Машиностроение.-1995. - вып. 31. - с. 23-27.

9. Савченко А.В. Особенности экспериментального исследования влияния перегрузок на скорость роста трещин усталости. // Труды XVI науч. конф. мол. ученых Ин-та механики АН УССР, Киев, 21-24 мая, 1991. Ч.1 - Институт механики НАН Украины - Киев, 1991. - с. 168-172.

10. Антипов Е.А., Аристов А.В., Онищенко Е.Е., Савченко А.В. Определение текущих значений J-интеграла при двухосном нагружении пластины с центральной трещиной отрыва. // Тез. докл. Межд. науч.-технич. конф. студ., мол. ученых и специалистов "Молодые ученые в решении комплексной программы научно-технического прогресса стран-членов СЭВ", Киев.-1989. - с. 12-13.

11. Антипов Е.А., Савченко А.В. Рост трещин усталости в плоских панелях летательных аппаратов при циклическом нагружении с перегрузками. // Тез. допов. наук.-техн. конфер. "Фундаментальні та прикладні проблеми космічних досліджень", Житомир.-1993. - с. 92.

АННОТАЦІЯ

Савченко А.В. Разрушение алюминиевых сплавов в условиях циклического нагружения с перегрузками.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.02.09. - динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры, Национальный Технический Университет Украины " Киевский политехнический институт", Киев, 1996г.

Диссертационная работа посвящена разработке методов расчетно-экспериментального прогнозирования живучести листовых материалов при циклическом нагружении с перегрузками.

Представлены опытные данные по скорости роста трещин и закрытию трещин алюминиевых сплавов Д16чТ и 1973Т2, полученные на плоских образцах, содержащих центральную трещину нормального отрыва, при усталостном нагружении с пиковыми выбросами (перегрузками) различной интенсивности.

Предложена методика учета кинетических эффектов КИН нестационарного циклического нагружения и показана возможность ее успешного применения для расчета торможения усталостной трещины после воздействия растягивающей перегрузки.

THE ABSTRACT

Savchenko A.V. The destruction of Al-alloy under cyclic loading with overload.

The dissertation for a scientific degree of candidate of technical science, specialty 05.02.09-dynamic, strength of machines, devices and equipment, National Technical University of Ukraine "Kiev Polytechnical Institute ", Kiev, 1996.

The dissertation work is devoted to development calculation-experimental method of fatigue crack propagation with overload.

Fatigue crack propagation rate and crack closure were performed on D16chT and 1973T2 Al-alloy under cyclic loading with overload for sheet central normal break crack specimen.

The model for calculation effective stress intensity range under variable amplitude loading were given. Calculation results are compared with the experiments for fatigue crack growth delay under overload applied.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: перевантаження, швидкість зростання тріщин втоми, нестационарне циклічне навантаження, руйнування алюмінієвих сплавів.

ЛНБ ім. В. Стефанюка
АН України

Ніан. до друку 12 25 96. Формат 60x24/16 Папір 4700. Друк. офс.
Друк. офс. Умовн. друк. арк. 0,63. Обл.-вкл. арк. 0,7. Тир. 100
Зам. 6-1367.

Київська книжкова друкарня наукової книги. Київ, Б. Хмельницького, 19.

44768

AB 34.908

AB 34.908