

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ  
ІНСТИТУТ ПРОБЛЕМ МІЦНОСТІ

На правах рукопису

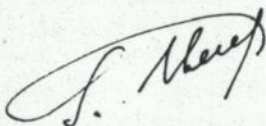
**ЦИБАНЬОВ Георгій Васильович**

УДК 539.43:669.017

**Розробка методів прогнозування циклічної довговічності  
елементів конструкцій за граничним станом матеріалу в  
зонах концентраторів та фретінгу**

Спеціальність: 05.02.09 - динаміка, міцність машин,  
приладів та апаратури

**Автореферат**  
дисертації на здобуття вченого ступеня  
доктора технічних наук



Київ 1996



Дисертація є рукописом.

Робота виконана в Інституті проблем міцності Національної академії наук України

Науковий консультант: академік НАН України, доктор технічних наук, професор В. Т. Троценко

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор М. С. Можаровський

доктор технічних наук, професор П. О. Фомічов

член-кореспондент інженерної академії  
України, доктор технічних наук П. В. Ясній

Провідна організація: КБ "Південне", м. Дніпропетровськ

Захист відбудеться 16 травня 1996р. о 9 год. 30 хв. на засіданні спеціалізованої ради Д 01.99.01 при Інституті проблем міцності НАН України за адресою:

252 014, м. Київ-14, вул. Тімірязєвська, 2.

З дисертацією можна ознайомитись в бібліотеці Інституту проблем міцності НАН України

Автореферат розіслано 11 квітня 1996р.

Вчений секретар  
спеціалізованої ради  
доктор технічних наук

Ф. Ф. Гігіняк

ЛНБ ім. В. Стефаника  
АН України

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність проблеми. Економічність та безпека в експлуатації машинобудівних конструкцій тісно пов'язана з міцністю та довговічністю їх елементів. Хоч дослідженням в цьому напрямку приділяється значна увага, кількість руйнувань конструкцій від втоми не зменшується, що свідчить про необхідність подальшого удосконалення як розрахункових методів оцінки довговічності конструкцій, так і конструкторсько-технологічних та матеріалознавчих пошуків для досягнення прогресу в області проектування і безпечної експлуатації машинобудівних виробів.

Ці вироби являють собою сукупність елементів, вузлів та агрегатів, які містять геометричні переходи та зони передачі зусиль через контакт і сили тертя контактуючих деталей. В них локалізуються високі рівні напружень і деформацій, які спричиняють зародження і ріст втомних тріщин. Вихідний матеріал також містить неоднорідну структуру і дефекти, рух та взаємоположення яких визначають його поведінку при втомі.

Складність проблеми прогнозування циклічної довговічності матеріалів у зв'язку з впливом різних конструкційних та технологічних факторів привела до наявності великої кількості досліджень і розробок. Більшість з них використовують одномірний підхід при вирішенні питань міцності елементів конструкцій, які працюють в умовах локального неоднорівного навантаження в осередках концентрації напружень, фретінг-корозії, при накладенні втоми й тертя і т.п., що може призвести до значних помилок у визначенні граничного стану матеріалу. Використання таких підходів обумовлено недостатнім розвитком методів пружно-пластичного вирішення задач про напружено-деформований стан зон локалізації багатоциклових пошкоджень, а також недостатнім обґрунтуванням застосування критеріїв граничного стану матеріалів, які використовуються у випадку наявності конструкційних та технологічних факторів.

Розвиток критеріїв граничного стану матеріалів при циклічному навантаженні для умов, які створюються конструкційними і технологічними факторами в локальних зонах конструкції, передбачає створення наукової бази для розробки розрахункових моделей визначення циклічної довговічності деталей та вузлів машин на стадії проектування, а також оптимального використання властивостей матеріалів в конструкціях. Рішення проблеми такої направленості представлено в даній роботі, що являє собою актуальний і необхідний етап у створенні сучасних машино-

будівних конструкцій різного призначення.

*Мета роботи* - розвинення та обґрунтування критеріїв граничного стану матеріалів і розробка на їх основі розрахункових моделей для визначення циклічної довговічності елементів, які відрізняються масштабом локалізації втомних пошкоджень та специфікою напружено-деформованого стану: гладкі поверхні, геометричні концентратори напружень, зони передачі навантажень через контактуючі поверхні. Супутні задачі, які розглядаються при вирішенні поставленої проблеми, - це методи урахування та практичного застосування явища непружності металів, наявності технологічних залишкових напружень в деталях, стадійність процесу зародження та росту втомних тріщин, впливу градієнта напружень статичних та циклічних компонент навантаження.

*Наукова новизна роботи.* В роботі вперше виконано комплексне дослідження критеріїв локального руйнування металів в умовах впливу концентрації напружень, фретінг-корозії, тертя ковзання зі зношуванням з урахуванням неоднорідності і неоднорідності напруженого стану матеріалу при його пружнопластичному деформуванні в області багаточислової втоми.

Встановлено, що граничний стан матеріалу в гладких поверхнях і в концентраторах напружень визначається співвідношенням нормальних і дотичних напружень в площинах найбільш сприятливо орієнтованих для ковзання. Нестісненість деформування і розсіяність орієнтовок цих площин обумовлюють найбільш коректне описання граничного стану матеріалу в таких умовах з допомогою взаємозв'язку між дотичними октаедричними і гідростатичними напруженнями.

У випадку стіснення деформування в поверхневому шарі матеріалу за рахунок наявності сил тертя і контакту граничний стан матеріалу досягається в площині максимальних дотичних напружень, що обумовлює змінний кут росту тріщини при фретінг-втомі і пітінги при втомі зі зношуванням (при неоптимальних режимах тертя).

Показано, що граничний стан матеріалу при наявності і відсутності концентратора напружень визначається однією і тією ж величиною приведенного напруження, однак, для концентратора напружень при цьому слід вести розрахунок для деякої глибини матеріалу, яка визначається його пружнопластичними властивостями при статичному і циклічному навантаженні і геометричними параметрами концентратора напружень.

Запропонована залежність для визначення рівня релаксації залишкових напружень при циклічному навантаженні. При використанні обгрунтованих в роботі критеріїв граничного стану матеріалів релаксовані значення залишкових напружень враховуються як статична складова напружень.

Для випадку фретінг-втоми матеріалів запропонована двох-параметрична модель руйнування, яка враховує ранній ріст тріщини в площині максимальних дотичних напружень з подальшим переходом в тріщину відриву. Довговічність в умовах фретінгу може бути визначена за запропонованою розрахунковою схемою з урахуванням двохстадійного розвитку процесу руйнування і використання відповідних діаграм втомного руйнування.

Встановлено взаємозв'язок втомних пошкоджень у вигляді непружних циклічних деформацій зі змінами у поверхневому шарі, вимірними різними фізичними методами: застосуванням ефекта Баркхаузена, рентгенографічним методом двохкристалевого спектрометра, електронної мікроскопії.

Непружна циклічна деформація при багатоциклового навантаженні характеризує індивідуальні пошкодження матеріалу, що дозволяє використовувати деформаційний критерій для побудови кривих втоми в межах одного рівня амплітуд напружень. Однак, на деформаційні криві втоми впливає масштабний фактор, який спричиняє неадекватне описання довговічності матеріалів в зразках різних розмірів.

Розроблено енергетичне трактування результатів втомних досліджень і на цій основі запропоновано методи визначення тривалості стадій втоми, постадійного сумування пошкоджень та визначення параметрів розсіювання границі втоми.

Установлені класи матеріалів, які володіють значними непружними деформаціями на границі втоми і встановлено їх взаємозв'язок з кількістю пластично деформованих об'ємів.

Показано взаємовплив параметрів зношування і характеристик опору втомі. Описання граничного стану матеріалу циклічно навантаженої трибосистеми деформаційними критеріями пов'язане з їх залежністю від параметрів контактування поверхонь.

Практичну цінність роботи представляє використання одержаних наукових результатів стосовно до оцінки та підвищення довговічності машинобудівних конструкцій різного призначення.

На основі встановленого критерію граничного стану матеріалу в концентраторах напружень розроблено розрахунково-експе-

риментальний метод визначення циклічної довговічності елементів легкої фермової конструкції, яка використовується в енергетичному модулі космічних об'єктів. Цей підхід застосовано також для оцінки довговічності силових вузлів оболонкових конструкцій типу "тяга з сферичними шарнірами", "стик оболонки".

Механізм та двохпараметричний критерій руйнування в умовах фретінг-корозії використано для розробки алгоритма розрахунку циклічної довговічності елементів з осередками фретінг-корозії. Результати використано для моделювання умов роботи вузла кріплення дискового автомобільного колеса до маточини і обґрунтування вибору матеріалу диска для підвищення його довговічності в умовах фретінгу.

Розроблені методики досліджень матеріалів при фретінг-втомі використані для вибору оптимальних зміцнюючих обробок і захисного покриття замкових з'єднань лопаток компресорів газо-турбінних двигунів, які відрізняються від серійних більш високою технологічністю і більш високою границею втоми.

На основі дослідження енергетичних і деформаційних критеріїв втоми конструкційних матеріалів запропоновано прискорений метод визначення їх границі втоми, який може бути використаний для контролю втомних властивостей матеріалів при їх одержанні і використанні. Розроблено нормативно-технічні документи.

Методики досліджень втоми металів при накладенні однонаправленого ковзання зі зношуванням дають можливість виконувати експериментальну апробацію різних технологічних та матеріалознавчих рішень з точки зору оптимізації властивостей матеріалів в умовах циклічно навантаженої трибосистеми.

Реалізація роботи. Методики і результати досліджень використані в ІЕЗ ім. Є.О.Патона НАН України при доведенні і оцінці ресурсу ферми, що має змогу трансформуватися, для енергетичного комплексу космічної станції "Мир", а також при оцінці циклічної довговічності елементів оболонкової конструкції в КБ "Південне".

Установлений в роботі механізм руйнування дискових автомобільних коліс в результаті фретінг-втоми і запропонований метод розрахунку використані в системі автоматичного проектування та для відпрацювання методів підвищення довговічності і зниження металоємності коліс вантажних автомобілів в ЦКТБ колісного виробництва.

Пропозиції по підвищенню довговічності замкових з'єднань

лопаток компресорів ГТД використані в моторобудівному об'єднанні КМВО (м.Казань) і передані для використання виробничому об'єднанню "Мотор-Січ" (м.Запоріжжя).

Обґрунтована оптимальна технологія обробки заготовок для гнучких зубчатих коліс хвильових редукторів, що забезпечує максимальну довговічність готових виробів при експлуатаційному двовісному циклічному навантаженні. Результати передані в НДІ-Редуктор (м.Київ) для використання у виробництві.

Основні положення, що вносяться на заміст:

- граничний стан матеріалів в циклічно навантажених елементах, які містять в собі локальні осередки багатовісного навантаження (геометричний концентратор напружень, зони передачі циклічних навантажень через контакт і тертя, накладення концентрації напружень і залишкових напружень) слід визначати в загальному випадку на основі критеріїв граничного стану матеріалів при неодновісному навантаженні;

- у випадку локального неодновісного навантаження матеріалу в концентраторі напружень за критерій його граничного стану може бути прийняте лінійне співвідношення між октаедричними дотичними і нормальними напруженнями; при цьому відповідальною за зародження втомної тріщини є певна частина поверхневого шару матеріалу, в якій критеріальний параметр перевищує своє значення, встановлене для заданої довговічності в гладкій поверхні; глибина шару визначається розрахунком на основі геометричних характеристик концентратора і пружнопластичних властивостей матеріалу при статичному і циклічному навантаженнях;

- при локальному неодновісному навантаженні матеріалу, обумовленому дією сил тертя ковзання і контакту разом з циклічними напруженнями, стисненість деформування поверхневого шару і його безпосереднє навантаження в контактні приводять до формування зародження тріщини у напрямку максимальних дотичних напружень; граничний стан матеріалу в цьому випадку визначається максимальним дотичним напруженням і напруженням, нормальним до площини його дії; ріст короткої тріщини визначається коефіцієнтом інтенсивності напружень зсуву;

- розрахункові моделі для визначення циклічної довговічності матеріалів і елементів конструкцій при наявності концентрації напружень і осередків фретінг-корозії можуть бути побудовані на основі установлених критеріїв граничного стану матеріалів в локальних зонах руйнування: в першому випадку

довговічність до зародження тріщини визначається за перевищенням еквівалентним напруженням на розрахунковій глибині від поверхні концентратора відомого для даних умов значення, в другому - застосовуються методи механіки руйнування з урахуванням двостадійності росту тріщини в полі неодновісних напружень;

- багаточиклова довговічність гладких поверхонь може бути оцінена більш точно на основі застосування деформаційних та енергетичних критеріїв втоми;

- чутливість непружної деформації до циклічної довговічності, яка реалізується індивідуально окремим зразком, обумовлена її взаємозв'язком з субструктурними змінами матеріалу; це дозволяє використовувати енергетичні та деформаційні критерії втоми матеріалів для оцінки рівня розсіяння їх втомних характеристик за рахунок дефектності та неоднорідності структури;

- для матеріалів, які в області багаточиклової втоми деформуються непружно, може бути використаний прискорений метод визначення границі втоми, який ґрунтується на застосуванні деформаційного підходу і запропонованої класифікації матеріалів за рівнем їх непружності на границі втоми;

- модель втоми матеріалу в гладких поверхнях може бути представлена як зміна деякого параметра матеріалу від його вихідного значення в ненавантаженому стані до кінцевого - при руйнуванні; таку модель можна описати з допомогою енергетичних представлень процесу втоми матеріалу, що дозволяє оцінювати розсіювання його властивостей, визначати тривалість стадій втоми і виконувати нелінійне сумування пошкоджень при нерегулярному навантаженні;

- при комбінованому навантаженні матеріалу циклічними зусиллями разом з однонаправленим тертям ковзання спостерігається взаємовплив циклічного навантаження на характеристики зношування і параметрів контактування і тертя на характеристики опору втомі сталей: циклічне навантаження підвищує характеристики зношування матеріалу у всіх випадках, а наявність контакту і тертя в певних умовах може значно підвищити довговічність матеріалу.

Апробація роботи. Основні наукові і прикладні результати доповідались і обговорювались більш ніж на 40 наукових форумах різного рівня: III, XV Науково-технічних конференціях (НТК) по конструкційній міцності двигунів (м. Куйбишев, 1974р., 1985р.); IV, V, VI, XI Міжнародних колоквиумах "Механічна втома металів"

(Брно, ЧРСР, 1977; Дрезден, НДР, 1979; Київ, УРСР, 1981; 1991); Міжнародних конференціях спеціалістів по автобусам та пересувним екіпажам (Будапешт, ВНР, 1984, 1987); Семінарі "Розрахунки і випробування на контактну втому матеріалів і деталей машин" (Москва, 1984); Симпозіумах "Механіка руйнування" (Київ, 1985; Житомир, 1990); Симпозіумі країн РЕВ (Суздаль, 1986); НТК "Підвищення технічного рівня, надійності та довговічності машин" (Мінськ, 1986, 1990, 1993); І Конференції "Механіка руйнування матеріалів" (Львів, 1987); Нарадах по проблемам міцності двигунів (Москва, 1988, 1990, 1992, 1994); НТК "Динаміка і міцність мобільних машин" (Кутаїсі, 1989, 1990); НТК по тепловій мікроскопії (Каунас, 1989); НТК "Сучасні проблеми будівельної механіки і міцності літальних апаратів" (Харків, 1991); НТК по вібраційній техніці (Тбілісі, 1991); Семінарі "Термов'язкопружнопластичні процеси деформування в елементах конструкцій" (Канів, 1992); Симпозіумі "Залишкові напруження: моделювання і керування" (Перм, 1992); Симпозіумі "Міцність матеріалів та елементів конструкцій при складному напруженому стані" (Севастополь, 1992); VIII Міжнародній конференції по руйнуванню матеріалів (Київ, 1993); Міжнародному симпозіумі по трібофатичі (Гомель, 1993); Міжнародній НТК "Міцність і надійність конструкцій нафтогазового обладнання" (Івано-Франківськ, 1994); Міжнародній НТК "Надійність машин та технологічного обладнання" (Ростов на Дону, 1994).

*Публікації.* За темою дисертації опубліковано 95 наукових праць, включаючи одну монографію, 5 авторських свідоцтв на винаходи, два нормативно-технічні документи, два препринти, ст.тті, доповіді та тези доповідей.

*Структура і обсяг роботи.* Дисертація складається із вступу, семи розділів, загальних висновків, списку використаних джерел з 540 найменувань. Дисертація має повний обсяг 565 сторінок, включаючи 181 рисунок і 41 таблицю.

*Особистий внесок автора.* Автором виконані методичні розробки, одержана більшість експериментальних результатів, проаналізовані ці дані, сформовані ідеї основних наукових результатів та розрахункові моделі, в яких вони застосовані.

#### ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовується актуальність розроблюваної в дисертації науково-технічної проблеми, основні методи її виріше-

ння за літературними джерелами та недоліки цих методів, на основі яких формулюється мета роботи. Коротко викладений зміст дисертації по розділах і визначені наукова новизна та практична значимість результатів, одержаних в роботі.

У першому розділі проаналізовано методи урахування напружено-деформованого стану матеріалу при розрахунках циклічної довговічності елементів конструкцій, які містять концентратори напружень, осередки комбінованої взаємодії циклічних навантажень з силами тертя і контакту, технологічні залишкові напруження. З'ясована проблема, яка потребує рішення.

Другий розділ містить в собі методичні розробки, виконані для реалізації поставленої проблеми. Вони стосуються методик експериментального дослідження зразків, елементів конструкцій різного призначення, деяких конструкцій.

Деформаційні та енергетичні критерії втомного руйнування досліджували в умовах однорідного навантаження з застосуванням однієї з різновидностей методу динамічної петлі гістерезису (рис. 1а): в момент переходу синусоїдального сигналу б через нульовий рівень нуль-орган подає команду ПЕОМ на зчитування показання сигналу деформації, яка і являє собою половину непружної деформації за цикл ( $\epsilon_H$ ):

$$\Delta \epsilon_H = k_0 b_a (1 + k_3) E^{-1} (x_a / \Delta x - 0,5)^{-1}; \quad (1)$$

$$D = k_\phi b_a \epsilon_H; \quad (2)$$

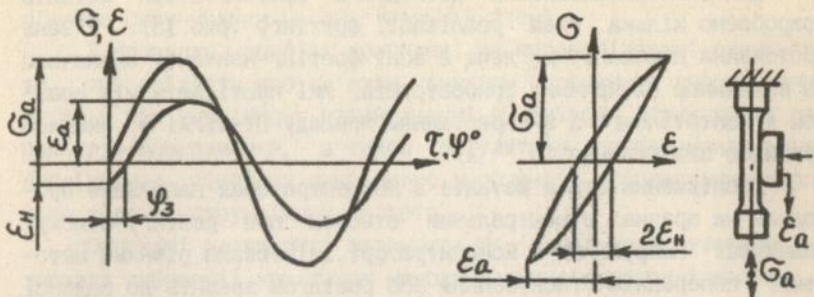
$$k_3 = \delta_3 / \delta_0; \quad k_\phi = 3,14; \quad (3)$$

$$\epsilon_a = k_0 y_a E^{-1} + \epsilon_H, \quad (4)$$

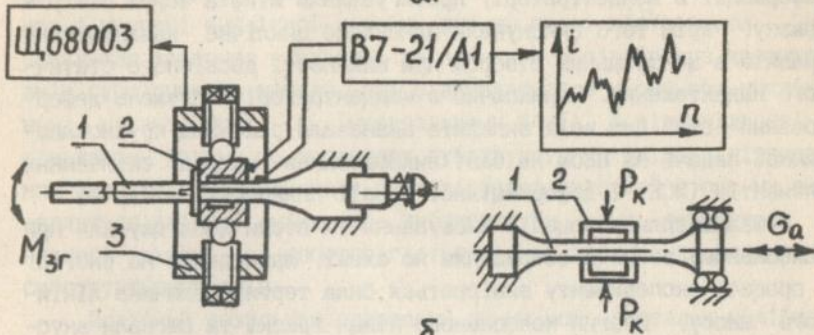
де  $b_a, \epsilon_a$  - амплітуди напруження і деформацій відповідно;  $k_0, k_3, k_\phi$  - коефіцієнти;  $x_a, y_a$  - амплітуди сигналів деформацій і напружень у мВ;  $\delta_3, \delta_0$  - амплітуди абсолютних значень деформацій потовщеної та робочої частин зразка відповідно;  $\Delta x$  - подвоєне значення сигналу деформації в момент б = 0; D - розсіяна за цикл енергія деформування в одиниці об'єму матеріалу.

Вимірювально-обчислювальний комплекс по дослідженню втоми та непружності металів має нижню границю вимірювання непружної деформації  $1 \cdot 10^{-5}$  відносних одиниць при точності виміру не гірше 3...5%.

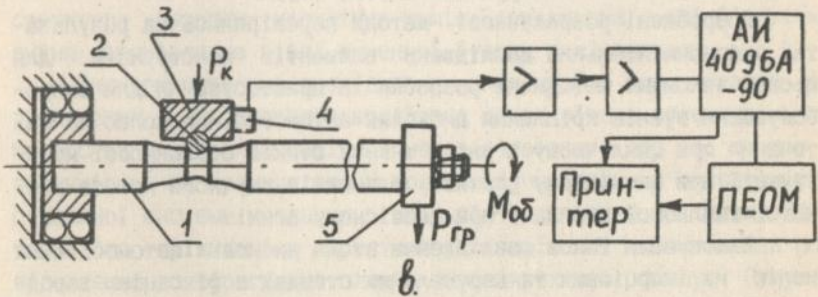
Субструктурні зміни в будові металічних кристалів при їх непружному деформуванні спостерігали з застосуванням методу рентгенівського двохкристалевого спектрометра в дифрактометричному та топографічному варіантах та методу магнітних шумів Баркхаузена.



а.



б.



в.

Рис.1 Схеми досліджень матеріалів

а - метод дослідження непружних деформацій; б - схеми випробувань на фретінг-втому при циклічному згині і розтяг-стиску; в - схема методики експерименту при втомі з тертям; 1 - зразок; 2 - констртіло; 3 - вузол створення і контролю контактного тиску; 4 - п'езодатчик; 5 - вузол створення і контролю циклічного навантаження

Для експериментальних досліджень фретінг-втоми металів розроблено кілька схем реалізації фретінгу (рис.16). Рівень протікання немеханічних явищ в зоні фретінг-контакту визначали за величиною електричних трибострумів, які протікають між зразком і контртілом, з використанням приладу В7-21/А1 з нижньою границею вимірювання  $10^{-11}$  А.

Дослідження втоми металів в концентраторах напружень проводили на зразках з центральним отвором при розтягу-стиску. Залишкові напруження в концентраторі ініціювали різними методами: попереднім стискуванням або розтягом зразків до заданої деформації в концентраторі, протягуванням штифта через отвір в зразку. Крім того виконували одновісне циклічне навантаження зразків з центральним отвором при наявності двовісного статичного навантаження. Виникаючий в концентраторі напружено-деформований стан для всіх випадків визначали рішенням пружнопластичної задачі на ПЕОМ на базі використання метода скінченних елементів (МСЕ) і деформаційної теорії плинності.

Взаємовплив процесів зношування та втоми досліджували при консольному згині з обертанням по схемі, приведений на рис.1в: В процесі експерименту вимірюються сила тертя, величина лінійного зносу, прогин консольного кінця зразка та сигнали акустичної емісії, які генеруються в зоні тертя.

Розроблені розрахункові методи перевірялись на результатах експериментальних досліджень елементів конструкцій. Для цього виконані методичні розробки та пристосування для випробовування вузлів кріплення дискових автомобільних колес до мачини при циклічному згині, тяг та стиків оболонкової конструкції при циклічному розтязі, елементів гнучкого колеса зубчатої хвильової передачі при двовісному згині.

Виконували також дослідження втоми дискових автомобільних коліс на інерційних та карусельних стендах з фіксацією зародження та росту втомних тріщин.

Для визначення оптимальних умов роботи лопаток компресорів газотурбінних двигунів (ГТД) в вузлах кріплення до диску при фретінг-втомі розроблена методика випробовування натурних вузлів кріплення з зосередженням пошкоджень в зоні контакту лопатки з диском.

Роботу елементів з концентраторами напружень в складі легкої розкладної ферми перевіряли на її фрагменті, який навантажувався циклічним згином з обертанням з накладанням цик-

лічного скручування по оригінальній схемі.

У третьому розділі приведені та проаналізовані результати, які свідчать про зв'язок кінетики непружного деформування металів при циклічному навантаженні зі змінами структурних параметрів пошкодження, а також результати експериментального дослідження кінетики циклічного непружного деформування широкого кола конструкційних сплавів.

Одержані залежності параметра  $\eta$  - загального кутового інтервалу дифракції кристалом монохроматичного випромінювання в певному рефлексі - показують його тісний взаємозв'язок зі зміною в процесі циклічної наробки ширини петлі гістерезиса. Цей результат дозволяє сказати, що величина  $\eta$  відображує характер змін субструктури металу, які відбуваються в ньому при циклічному навантаженні, в інтегральному виді. У відповідності з одержаними даними по характеру субструктурних змін, з підвищенням амплітуди напруження в області багатоциклової втоми не виявляється якісної зміни типа субструктури, яка формується в процесі втоми, а спостерігається лише наростання швидкості субструктурних змін.

Подібний результат одержаний як на монокристалах молібдена, так і на полікристалічній сталі 45 при дослідженнях змін структури методом магнітних шумів Баркхаузена, які фіксують зміни матеріалу на рівні доменної будови полікристалу.

Експериментальні дослідження циклічного деформування і руйнування монокристалів молібдена шести різних орієнтувань з застосуванням фрактографічних методів свідчать про те, що довговічність та границя втоми кристалів пов'язана з орієнтацією первинної системи ковзання, можливістю ковзання по іншим системам та орієнтацією кристалографічної осі навантаження по відношенню до вірогідних площин квазікрихкого сколу. Сукупність цих параметрів дозволяє оцінити як непружну поведінку матеріалу в умовах циклічного навантаження, так і відносну довговічність кристалів.

Дослідження полікристалічних конструкційних сплавів різного хімічного складу й обробки з фіксацією кінетики накопичення втомних змін структури через параметри непружного деформування дозволили виділити п'ять типів залежностей, які пов'язані з особливостями кристалічної будови, фазового складу та перетворень, легкістю створення ефективних бар'єрів для ковзання та руху дислокацій.

У четвертому розділі виконано розвиток деформаційний та енергетичних критеріїв втоми матеріалів стосовно до напружень та довговічностей багатоциклової області руйнувань. Для більш ніж тридцяти найменувань конструкційних сплавів показана прийнятність для описання багатоциклової втоми взаємозв'язку типа рівняння Кофіна-Менсона. При цьому показано широкий діапазон змінення як показника степеня ( $k = 0,084 \dots 1,02$ ), так і постійної цього рівняння ( $c = 0,0018 \dots 2,003$ ).

Експериментальні дослідження на матеріалах з різною непружною реакцією на циклічне навантаження (циклічне зміцнення, знеміцнення, стабільність, складна зміна непружності), виконані при постійних рівнях амплітуд напружень, показують, що для одного і того ж рівня амплітуди напруження можна побудувати деформаційні криві втоми. Такі результати приведені на рис. 2 і свідчать про те, що з допомогою характеристик непружності може бути урахована особливість накопичення втомного пошкодження в окремо взятому зразку метала.

В дослідях зі зразками, які відрізняються площею перерізу в  $\sim 20$  разів, помічено значний вплив масштабного фактору на кінетику непружного деформування і критеріальні залежності між непружністю та довговічністю. Більш пізня поява петель гістерезису у більш габаритних зразків та значно менший рівень непружності в них (рис. 3) пояснюється їх зв'язком з деформуванням поверхневого шару матеріалу. Представлення деформаційних кривих втоми для такого випадку також має відхилення від прийнятих залежностей в бік зниження непружної деформації при великих довговічностях та більш раннього переходу до деформування без прояву непружності.

На основі аналізу прояву непружності матеріалів різних класів при напруженнях близьких та рівних границі втоми встановлено рівні непружної деформації, які певний клас матеріалу виявляє на границі втоми. Використовуючи обгрунтовані методи побудови основних діаграм циклічного деформування при ступінчастому навантаженні та встановлені рівні непружної деформації на границі втоми, запропоновано метод прискореної оцінки цієї характеристики матеріалів.

Розвинуто енергетичне трактування результатів втомних випробувань. Розглянута схема деформування металів, при якій на його втомне пошкодження йде частина енергії деформування, пов'язана з перевищенням рівня пошкоджуючого напруження  $b_n$ .

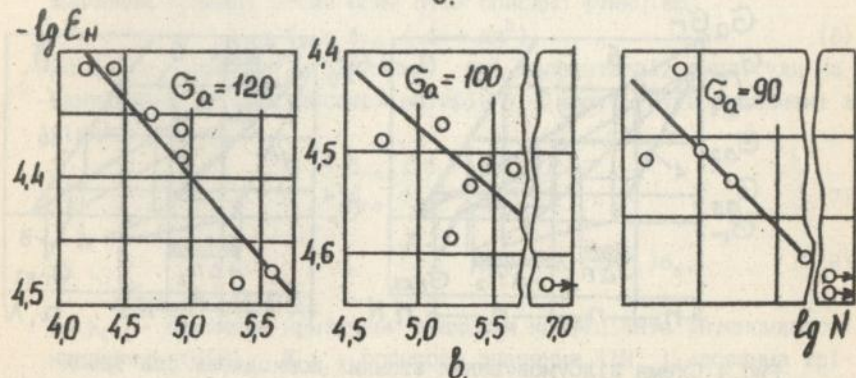
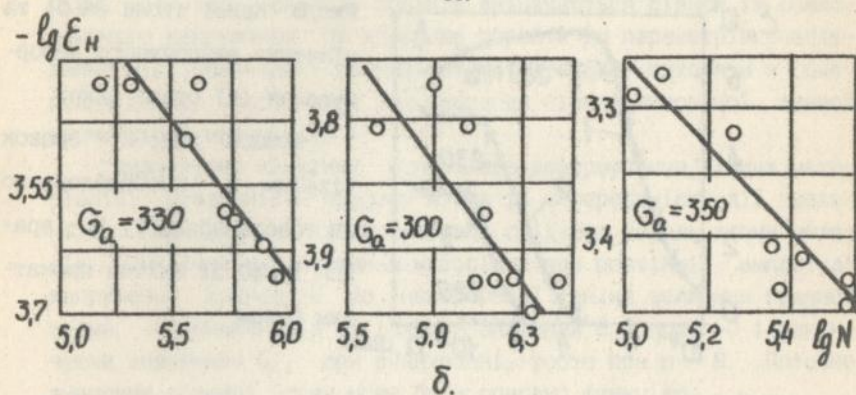
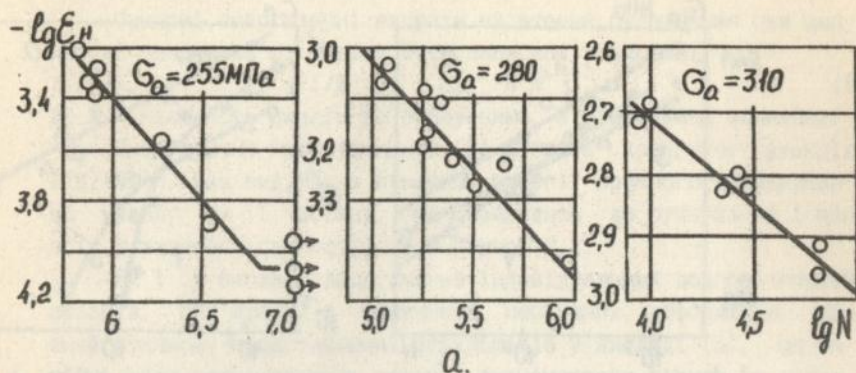


Рис.2. Взаємов'язок непружної деформації і довговічності при дослідженнях на постійних рівнях амплітуди напружень:  
 а - сталь 15Г2АФДпс; б - сплав ВрЖ9; в - чавун СЧ21-40

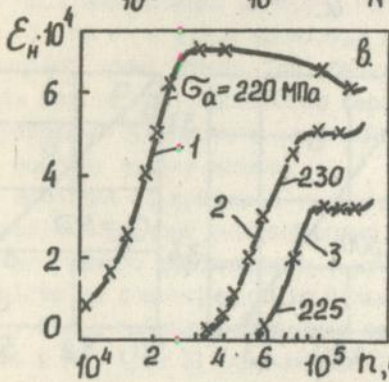
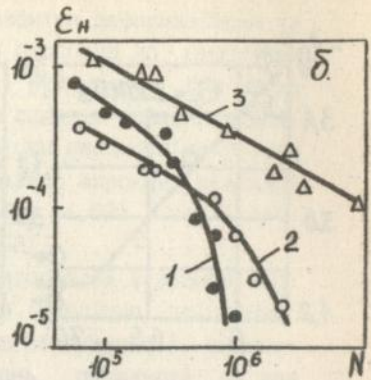
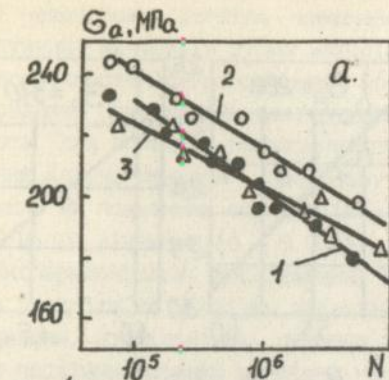


Рис.3. Криві втоми (а,б) та кінетика неупругого деформування (в) сталі 15кп: 1 - зразок 5мм; 2 - зразок 11х40мм з необробленого листового прокату; 3 - зразок 11х40 зі знятим прокатним шаром

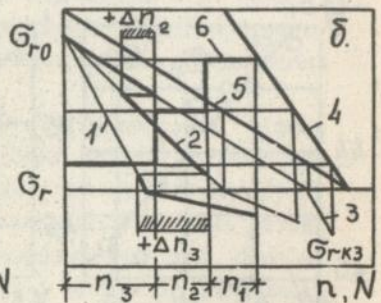
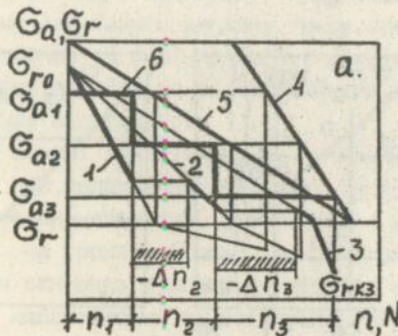


Рис.4 Схеми підсумовування втомних пошкоджень при трьох-ступінчатому навантаженні в прямому (а) і зворотному (б) порядку: 1,2,3 - криві зміни  $\sigma_{гт}$  при різних  $\sigma_{аі}$ ; 4 - крива втоми; 5 - лінія Френча; 6 - схема ступінчатого навантаження;  $+\Delta n_i$  - число циклів, на яке збільшується (+) або зменшується (-) довговічність

взаємозв'язаного з границею втоми  $\sigma_r$ .

Сумарні енергетичні витрати на втомне руйнування при амплітуді напружень  $\sigma_a$  можуть бути записані у вигляді:

$$D_c = 1/E (\sigma_a - \sigma_n)^2 \cdot N \cdot N^{k-1}, \quad (5)$$

де  $N$  - кількість циклів до руйнування,  $k$  - постійна величина.

Енергетичне представлення (5) містить коригуючу функцію  $f(N) = N^{k-1}$ , яка виділяє з сумарної енергії пружного деформування металу ту її частину, яка приводить до руйнування і при всіх  $N$  залишається постійною і рівною  $D_c$ .

Як і у випадку дослідження індивідуальних довговічностей зразків, пов'язаних з величиною непружних деформацій, при енергетичному представленні результатів у вигляді (5), потенційні можливості окремих зразків визначаються рівнем їх пошкоджуючого напруження. Це дозволяє перейти до параметрів розсіювання цієї величини і границі втоми матеріалу виходячи з обмежених даних, необхідних для побудови стандартизованої кривої втоми цього матеріалу.

Аналізуючи кінетику непружного деформування різних матеріалів, стадійність процесу втоми та неперервність дії механізму пошкодження, запропонована слідує модель втоми металів. Циклічне навантаження матеріалу при постійній амплітуді напруження приводить до неперервної зміни величини границі втоми, починаючи від її деякого значення  $\sigma_{r0}$  при  $n=0$  і закінчуючи значенням  $\sigma_{rk}$  при руйнуванні, тобто при  $n = N$ . Поточне значення границі втоми може бути описано функцією

$$\sigma_{rn} = \sigma_{r0} (1 - an^b), \quad (6)$$

де  $a$  і  $b$  - параметри рівняння, які залежать від амплітуди навантаження і властивостей матеріалу і можуть бути визначені з рівнянь

$$\begin{aligned} \sigma_r &= \sigma_{r0} (1 - aN_{\sigma_r}^b); \\ \sigma_{rk} &= \sigma_{r0} (1 - aN^b); \end{aligned} \quad (7)$$

$$K_{rc} = \sigma_a Y_1 \sqrt{l_k};$$

$$\sigma_{rk} = (K_{th}/K_{rc}) \sigma_a, \quad (8)$$

$$K_{th} = \sigma_{rk} Y_2 \sqrt{l_k};$$

де  $K_{rc}$  - прийняте критичне значення коефіцієнта інтенсивності напружень (КІН),  $K_{th}$  - порогове значення КІН;  $l_k$  - довжина тріщини в зразку, при якій досягається  $K_{rc}$ ;  $Y_1, Y_2$  - коефіцієнти;  $N_{\sigma_r}$  - кількість циклів до зародження тріщини (лінії Френча).

Виходячи з запропонованої моделі втоми, можна записати залежності для підсумовування втомних пошкоджень, які будуть

враховувати можливу нелінійність пошкоджень, пов'язаних з проходженням різних стадій втоми. В загальному вигляді накопичена енергія до руйнування запишеться сумою:

$$\sum_{i=1}^m (\sigma_{a1} - \sigma_{r0} [2(n_{i, i-1} - n_i)^{-1} \int_{n_i, n_{i-1}}^1 (1 - a_i n^{b_i}) dn] (\sigma_{a1} - \bar{\sigma}_{nt1}) n_i N_i^{k-1} = \bar{C}, \quad (9)$$

де  $i$  - індекс рівнів навантаження і відповідних їм величин;  $m$  - кількість рівнів навантаження;  $n_{i, i-1}$  - кількість циклів навантаження на рівні  $\sigma_{a1}$ , при якому величина  $\sigma_{rT}$  дорівнює досягнутих на рівні  $\sigma_{a(i-1)}$ ;  $\bar{\sigma}_{nt1}$ ,  $C$  - параметри кривої втоми з урахуванням змінності границі втоми в процесі навантаження.

На рис.4 наведена схема підсумовування втомних пошкоджень у відповідності з (9) з якої видно, що при цьому враховується порядок прикладання навантажень. Схема може бути розширена ймовірносним аспектом з урахуванням параметрів розсіювання границі втоми.

Одержані результати по непружному деформуванню конструкційних сплавів та енергетичне представлення їх кривих втоми надалі використані для одержання пружнопластичних рішень в зонах підвищених напружень, а також як обґрунтовані критеріальні співвідношення для оцінки довговічності у випадку нелінійного напруженого стану.

У н'ятому розділі виконано обґрунтування критерію для описання складного напруженого стану в концентраторі напружень та розробка моделі розрахункового переходу від довговічності гладких зразків до довговічності зразків з концентратором напружень та технологічними залишковими напруженнями в ньому.

Попередньо одержані результати свідчать про необхідність урахування напружено-деформованого стану матеріалу в найбільш напруженому об'ємі поверхневого шару, включаючи дію статичних та циклічних компонент напруження, наявність пошкоджень поверхневого шару матеріалу у вигляді мікронадривів. З аналізу кінетики залишкових напружень в процесі втоми впливає їх швидка релаксація та необхідність урахування стабілізованого рівня, який впливає на матеріал на протязі більш як 90% довговічності. Цей рівень ( абсолютне значення ) в концентраторі напружень може бути знайдений по встановленій залежності:

$$\sigma_0^{CT} = \sigma_0 (\sigma_{0,2} - \alpha_0 \sigma_n) / (\sigma_{0,2} - \sigma_{nc}^{II}), \quad (10)$$

де  $\sigma_0$  - початковий рівень залишкових напружень;  $\alpha$  - теоретичний коефіцієнт концентрації напружень;  $\sigma_{nc}^{II}$  - границя пропорці-

йності матеріалу при циклічному навантаженні.

Для врахування непружного деформування в концентраторі використані правило Нейбера і рівняння діаграми циклічного деформування:

$$(\alpha_0 b_n)^2 = b_{\max} \epsilon_{\max} E; \quad \epsilon_a = b_a / E + (b_a / E_n)^h; \quad (11)$$

$$(\alpha_0 b_n)^2 = b_{\max}^2 + E b_{\max} (b_{\max} / E_n)^h, \quad (12)$$

де  $b_n$  - номінальне напруження;  $b_{\max}$ ,  $\epsilon_{\max}$  - максимальне напруження і деформація в концентраторі;  $E$ ,  $E_n$ ,  $h$  - постійні.

Зважаючи на асиметрію циклу за рахунок залишкових напружень, з урахуванням залежностей\*:

$$\text{для } b_0^{CT} > 0 \quad b_{ar} = b_a [\cos(0,5\pi b_0^{CT} / b_b)]^J = \varphi b_a; \quad (13)$$

$$\text{для } b_0^{CT} < 0 \quad b_{ar} = b_a \{2 - [\cos(0,5\pi b_0^{CT} / b_b)]^J\} = \varphi b_a, \quad (14)$$

де  $b_{ar}$  - амплітуда асиметричного циклу, еквівалентна  $b_a$ ;  $J$  - постійна, одержано остаточну залежність для залишкових напружень, яка враховує статичну та циклічну пластичність матеріалу та наявність концентрації напружень:

$$(b_0^{CT} > 0):$$

$$b_0^{CT} = b_0 (b_{0,2} - b_{nc}^u)^{-1} (b_{0,2} - \sqrt{[\cos(0,5\pi b_0^{CT} / b_b)]^{2J} b_{\max}^2 + E [\cos(0,5\pi b_0^{CT} / b_b)]^{J(1+h)} b_{\max} (b_{\max} / E_n)^h}) \quad (15)$$

Для обґрунтування критерія граничного стану матеріалу в концентраторі та відпрацювання розрахункової моделі проведено експериментальні дослідження зразків з центральним отвором, в яких ініціювали залишкові напруження з різними епюрами їх розподілу по глибині та співвідношенням по осям. Використовуючи пакет програм MCE, були одержані пружнопластичні рішення задач розподілу залишкових напружень в концентраторі, а також напружень від дії циклічного навантаження. На рис. 5 приведені епюри розподілу компонент напружень для кількох амплітуд і позначено точками відстань від поверхні концентратора і значення тих напружень, які відповідають амплітуді напруження гладкого зразку при однаковій довговічності. З цих результатів видно, що градієнт першого головного напруження неприйнятний для описання швидкості падіння напружень, а підтримуючий вплив внутрішніх шарів матеріалу може бути тільки починаючи з глибини матеріалу, де напруження нижчі ніж у гладкого зразка. Враховуючи це та наявність статичних та циклічних навантажень в напрямках, які відрізняються від напрямку першого головного напруження, було проаналізовано еквівалентні напруження, порохо-

\*Косинусоїдальна залежність В. П. Голуба і В. І. Крижановського

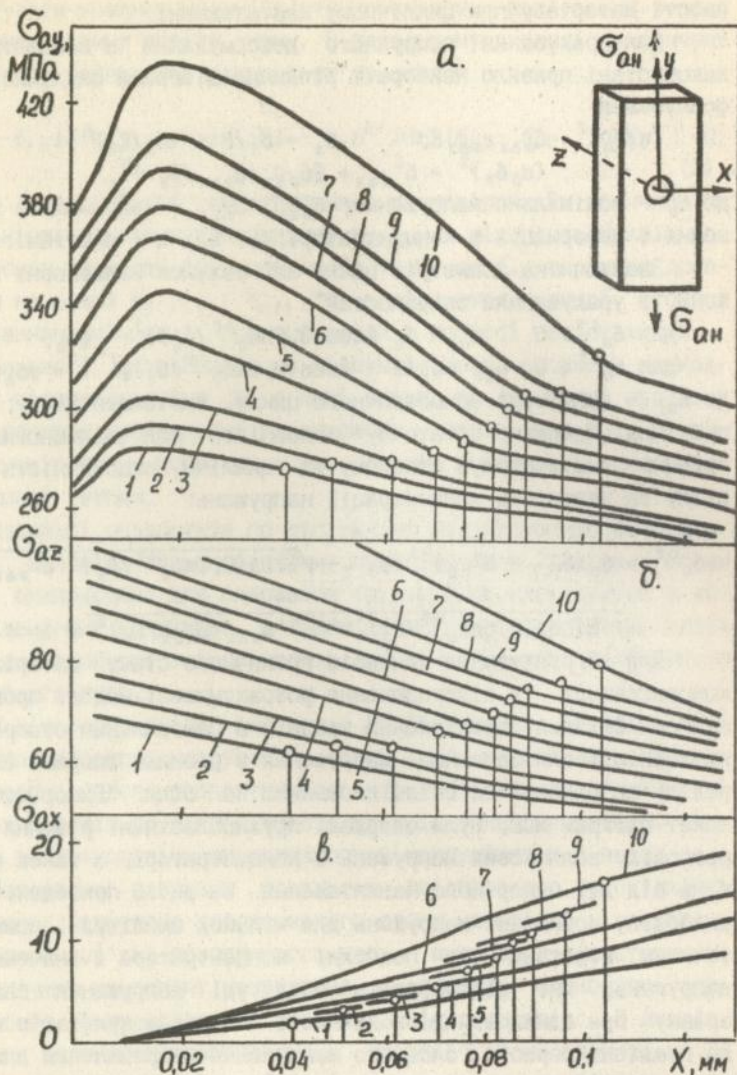


Рис.5 Епюри розподілу компонент напружень по глибині матеріалу в концентраторі зразка зі сталі 10ГН2МФА: а -  $\sigma_{ay}$ ; б -  $\sigma_{az}$ ; в -  $\sigma_{ax}$ ; 1 -  $\sigma_{ан}=106$ МПа; 2 - 114МПа; 3 - 121МПа; 4 - 130МПа; 5 - 137МПа; 6 - 146МПа; 7 - 153МПа; 8 - 166МПа; 9 - 172МПа; 10 - 180МПа.

вані для точок на поверхні концентратора ( $x_n$ ), на глибині максимального значення епюри першого головного напруження ( $x_{max}$ ) та для точки, де інтенсивність напружень на епюрі розподілу напружень співпадає з інтенсивністю напружень в ненадрізаному зразку ( $x_{екв}$ ). Еквівалентні напруження визначали за критеріями, в яких можна легко враховувати наявність статичних та циклічних компонент навантаження та які в дослідженнях останніх років широко застосовувалися для описання багатовісної втоми. Найбільш тісний взаємозв'язок всіх досліджених на втому варіантів концентратора з залишковими напруженнями і зразків без концентраторів спостерігається для точки  $x_{екв}$  при використанні критерія октаедричних напружень у вигляді:

$$\tau_{окт} + A P_{max} = B, \quad (16)$$

$$\text{де } \tau_{окт} = (1/3) \sqrt{(b_{ax} - b_{ay})^2 + (b_{ay} - b_{az})^2 + (b_{az} - b_{ax})^2}, \quad (17)$$

$$P_{max} = 1/3 (b_{ax} + b_{ay} + b_{az} + b_{ox} + b_{oy} + b_{oz}), \quad (18)$$

A і B - константи;  $b_{ai}$  - амплітуди компонент напружень по осям  $i = x, y, z$ ;  $b_{oi}$  - компоненти стабілізованих залишкових напружень (або статичних) по осям  $i = x, y, z$ .

Аналіз результатів показує, що і найбільш прийнятний критерій дає відхилення експериментальних точок від прямої за рівнянням (16).

Встановлена закономірність цих відхилень: як критерій (16), так і проаналізовані інші критерії не враховують чутливість матеріалів до асиметрії циклу. Приймаючи до уваги можливість описання єдиної діаграми граничних амплітуд через залежності (13), (14), для кожної компоненти амплітуди напружень можна записати її зміну за рахунок асиметрії у вигляді:

$$b_{air} = b_{ai} \varphi_i, \quad (19)$$

а складові частини рівняння (16)  $\tau_{окт}$  і  $P_{max}$  запишуться так:

$$\tau_{окт}(r) = (1/3) \sqrt{(b_{axr} - b_{ayr})^2 + (b_{ayr} - b_{azr})^2 + (b_{azr} - b_{axr})^2}; \quad (20)$$

$$P_{max}(r) = (1/3) (b_{axr} + b_{ayr} + b_{azr} + b_{ox} + b_{oy} + b_{oz}). \quad (21)$$

Було перевірено три варіанти залежності (16):

$$\tau_{окт} + A_1 P_{max}(r) = B_1; \quad (22)$$

$$\tau_{окт}(r) + A_2 P_{max} = B_2; \quad (23)$$

$$\tau_{окт}(r) + A P_{max}(r) = B. \quad (24)$$

У найкращій відповідності з критеріальною залежністю, побудованою по результатам випробувань гладких зразків, знаходяться результати розрахунку по залежності (24).

Проведений цикл досліджень дозволяє сформулювати розрахункову модель для визначення довговічності елементів конструкцій, які містять концентратор напружень і зазнають дії циклічного асиметричного синхронного синфазного навантаження по різних осям. Визначається  $x_{eKV}$  шляхом пошуку з сімейства епіюр розподілу напружень по глибині матеріалу в концентраторі методом послідовних наближень кривої, яка відповідає наперед заданим значенням  $b_a$  і  $N$  гладкого зразка, і за нею визначається зовнішнє навантаження на елемент з концентратором, яке відповідає довговічності  $N$ . Повторення процедури для інших значень довговічностей і напружень дозволяє побудувати криву втоми елемента з концентратором.

При побудові вихідних кривих втоми може бути використане енергетичне представлення даних у вигляді (5). Похибка розрахунку при цьому для області багатоциклової втоми складає в середньому 6...8% по номінальним напруженням.

В шостому розділі приведено обґрунтування критеріїв і розрахункових моделей для урахування сил тертя при циклічному навантаженні поверхонь, які знаходяться в контакті з ковзанням. Розробки виконані для випадків, коли реалізується механізм фретінг-втоми і коли умови контакту і ковзання виходять за межі дії цього механізму і граничний стан матеріалу визначається взаємодією процесів втоми та зношування.

Спостерігаючи зародження тріщин при фретінг-втомі відмічено, що короткі тріщини зароджуються на дуже ранній стадії, яка становить 5...10% від загальної довговічності, і ростуть по закономірностям, відображеним на рис. 6. Ранній ріст тріщини проходить в умовах складного напруженого стану, обумовленого діями сил тертя, контакту і циклічного навантаження. Співвідношення силових факторів змінюється з ростом тріщини, що приводить до зміни її нахилу до поверхні в зоні дії сил контакту і тертя. При реалізації умов плоского напруженого стану (згідно з Оцукою) в вершині тріщини реалізуються наступні напруження:

$$b_r = (2\pi r)^{-0.5} \cos(\theta/2) \cdot [K_I (1 + \sin^2(\theta/2) + 1.5K_{II} \sin\theta - 2K_{III} \operatorname{tg}\theta/2)]; \quad (25)$$

$$b_g = (2\pi r)^{-0.5} \cos(\theta/2) [K_I \cos^2(\theta/2) - 1.5K_{II} \sin\theta]; \quad (26)$$

$$\tau_{rg} = (2\pi r)^{-0.5} \cos(\theta/2) \cdot [K_I \sin\theta + K_{III} (3\cos\theta - 1)], \quad (27)$$

де  $r$  і  $\theta$  - полярні координати з початком у вершині тріщини;  $K_I$ ,  $K_{II}$  - коефіцієнти інтенсивності напружень відриву і зсуву. На-

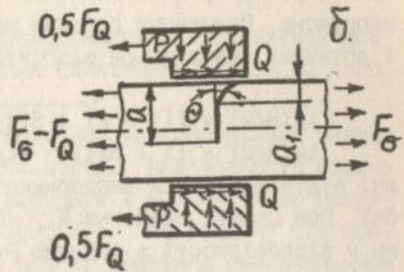
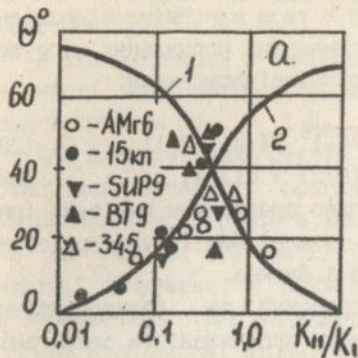


Рис.6 Розрахункові (1,2) та експериментальні залежності напрямку росту тріщини фретінг - втоми для різних матеріалів (а) і схематизація розподілу поверхневих та об'ємних зусиль в зоні фретінгу

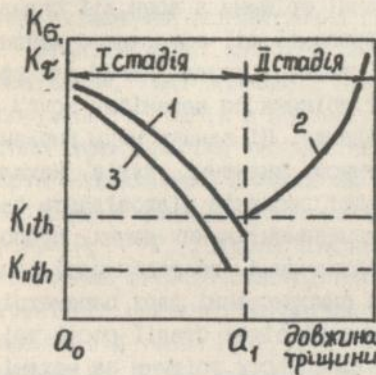


Рис.7. Схема двопараметричного росту тріщини при фретінг-втомі: 1 - по механізму зсуву; 2 - по механізму відриву; 3 - по механізму зсуву з формуванням тріщини, що не розповсюджується

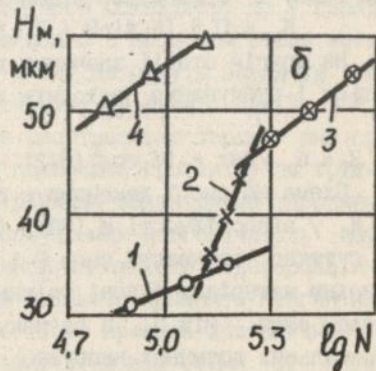
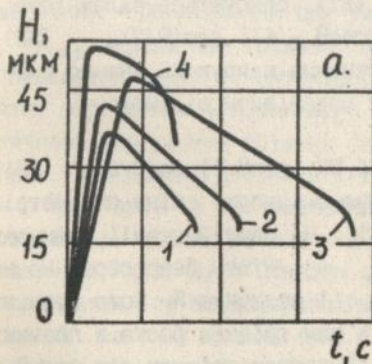


Рис.8. Кінетика прогину зразка (а) і криві втоми, виражені через прогин (б), в дослідженнях при постійному значенні циклічних напружень і варіюванні контактного тиску: 1 -  $P_k = 0$ ; 2 -  $P_k < P_{0пт}$ ; 3 -  $P_k = P_{0пт}$ ; 4 -  $P_k > P_{0пт}$

прямок росту тріщини визначається з умов максимуму відповідних напружень. Положення площини максимальних нормальних напружень і дотичних визначаються відповідно співвідношеннями:

$$\operatorname{tg}(\theta/2) = [(1 - \sqrt{1 + 8(K_{II}/K_I)^2} / 4(K_{II}/K_I)] ; \quad (28)$$

$$\operatorname{tg}(Q/2) = [1 + 6/(1 - 2\operatorname{tg}^2(Q/2) - KI/KII), \quad (29)$$

які підтверджуються експериментально одержаними вимірами (рис. 6а). При цьому значення  $K_I$ ,  $K_{II}$  в зоні фретінгу розраховували у відповідності з моделлю Рукс і Джонса.

Виконані розрахунки, спостереження та фрактографічний аналіз поверхні руйнування свідчать про наявність ознак зміни механізму руйнування при проростанні тріщини з зони дії складного напруженого стану в зону переважної дії циклічного навантаження: фрактографічні ознаки в сталях і сплаві АМг6Н рельєфно демонструють початковий ріст тріщини по механізму зсуву і подальший її перехід в тріщину відриву. Ці ознаки мають виразні у титанового сплава ВТ9. Розрахункові значення кутів нахилу початкової тріщини також в більшості випадків відповідають залежності (29). Грунтуючись на експериментальних даних, пропонується розрахункова модель для визначення довговічності при фретінг-втомі, яка базується на використанні двох параметрів механіки руйнування, відповідальних за різні стадії росту тріщини (рис. 7). Перша стадія відповідає росту тріщини за механізмом зсуву і, враховуючи рішення (27), описується залежністю:

$$K_t = 0,5 [K_I \sin\theta + K_{II} (3\cos\theta - 1)] \cos(\theta/2). \quad (30)$$

На другій стадії значення дотичних напружень значно зменшуються і руйнування проходить за механізмом відриву:

$$K_0 = \sigma_g \sqrt{2\pi r} = [K_I \cos^2(\theta/2) - 1,5K_{II} \sin\theta] \cos(\theta/2). \quad (31)$$

Схема на рис. 7 демонструє закономірності зміни параметрів  $K_t$ ,  $K_0$  у відповідності з (30), (31). На першій стадії руйнування суттєво впливають сили  $P$  і  $Q$ , які діють безпосередньо на поверхню матеріалу в зоні тріщини, і величина  $K_t$  може бути на порядок вище, ніж  $K_0$ , в зв'язку з чим тріщина росте в площині максимальних дотичних напружень. З ростом тріщини дія сил  $P$  і  $Q$  зменшується і  $K_t$  знижується до свого порогового значення. Якщо до цього моменту  $K_0$  не перевищує свого порогового значення - виникають умови границі втоми за нерозповсюдженням тріщини; при перевищенні значенням  $K_0$  своєї порогової величини  $K_{Ith}$  - відбувається зміна механізму руйнування і подальший ріст

тріщини проходить за механізмом відриву, який контролюється параметром  $K_0$ .

У відповідності з запропонованою моделлю підрахунок довговічності здійснюється сумуванням циклічних нарбок на просування тріщини по  $K_1$  і  $K_0$ .

Для випадку, коли стадія зародження тріщини займає значну частину довговічності, розглянута модель, яка враховує рівень електричних трибострумів в зоні контакту і концентрацію напружень за рахунок дії сил  $P$  і  $Q$  (рис. 66). На відміну від концентрації напружень в надрізах в зоні фретінга визначальними для зародження тріщин виявляються дотичні напруження.

При дослідженні втоми сталі з накладенням сил тертя з такими зміщеннями контактуючих поверхонь, коли механізм фретінгу не реалізується, спостерігається взаємодія процесів втоми та зношування, які впливають один на одного: наявність циклічних напружень в одній з контактуючих поверхонь приводить до зниження характеристик зносостійкості, а наявність контакту і тертя неоднозначно впливає на циклічну довговічність. Останнє пов'язане з наявністю оптимальних умов тертя при контактному тиску  $P_k = P_{opt}$ , коли довговічність максимальна і обумовлена створенням стійкої окисної плівки і дрібнодисперсних вторинних структур в циклічно навантаженому елементі трибосистеми. Відхилення від умови  $P_k = P_{opt}$  в бік зменшення  $P_k < P_{opt}$  і в бік збільшення  $P_k > P_{opt}$  приводять до зниження циклічної довговічності матеріалу. Дослідження цих умов тертя показують, що у випадку  $P_k < P_{opt}$  зародження тріщини пов'язано з процесом втоми металу і параметри тертя і контактного тиску не можуть завадити розвитку смуг втоми і подальшого розвитку тріщини. При  $P_k > P_{opt}$  причиною зародження тріщини стає неоптимальне тертя, яке приводить до появи пітінгів і їх подальшого розвитку як тріщин.

У зв'язку з встановленими різними механізмами зародження тріщини при різних контактних напруженнях довговічність матеріалу не може бути описана єдиною залежністю в деформаційних координатах, де за деформаційний параметр прийнято прогин консольної частини зразка (рис. 8). Тому прогноз довговічності і настання граничного стану матеріалу в умовах втоми зі зношуванням на теперішньому етапі можна вирішити на основі математичних моделей множинної регресії з використанням багатофакторного планування експерименту. Перетин поверхонь відгуку по критерію зношування та по критерію втоми дають оптимальні умо-

ви роботи трибосистеми при заданій довговічності.

В сьомому розділі приведені й проаналізовані приклади практичного застосування розроблених методик дослідження та розрахунку характеристик опору втомі елементів конструкцій та конструкцій в натурному вигляді.

Зони концентрації напруження і фретінгу досліджували на вузлах кріплення дискового автомобільного колеса до маточини в натурному вигляді і на моделях, тягах з сферичними шарнірами, вузлах стику оболонкової конструкції.

На основі експериментальних випробувань натурних автомобільних коліс встановлено, що зародження втомної тріщини обумовлене фретінг-корозією між диском колеса і маточиною. Розкриття причин руйнування дозволило створити спрощену модель вузла кріплення, на якій відтворено механізм руйнування і відпрацьовано методику розрахунку довговічності вузла, виходячи з запропонованої моделі двохстадійного росту тріщини при фретінг-втомі.

Розкриття механізму руйнування вузлів кріплення дискових коліс грузових автомобілів дозволило також запропонувати методи підвищення довговічності і шляхи зниження металоємності коліс на основі експериментального вибору покриттів дисків, які підвищують його довговічність в умовах фретінгу.

Експерименти на тягах з сферичними шарнірами в обоймах показали, що причиною втомного руйнування цих елементів є концентрація напружень в геометричних переходах обойм. Застосована в сферичному шарнірі фретінг-пара дає значно вищі розрахункові і експериментальні довговічності, не дивлячись на помітний фретінг-знос контактуючих поверхонь. В залежності від рівня напружень тріщини зароджуються в різних геометричних переходах обойм, що може бути пораховано на основі запропонованих розрахункових моделей зародження тріщин в концентраторах напружень.

Дослідження вузла "стик оболонки" також свідчать про більшу локалізацію напружень і деформацій в концентраторах напружень у вигляді технологічних отворів. Пошкодження від фретінгу в зонах контакту елементів оболонки з кріпильними деталями незначні.

Розрахункове й експериментальне дослідження циклічної довговічності елементів фермової конструкції виконували в умовах комбінованого навантаження циклічним згином з обернуттям і

крученням її натурального фрагмента довжиною 3,6м. Розрахунки показали наявність достатніх запасів міцності за характеристиками втоми в концентраторах напружень по всім підконтрольним елементам.

На основі виконаних дослідів і розрахунків прийняті рішення про необхідні доробки в штатному складі ферми і до теперішнього часу вона експлуатується в складі космічної станції "Мир".

Експериментальна оптимізація технології виготовлення гнучких коліс зубчатої хвильової передачі виконана на основі даних по двовісному циклічному навантаженні концентратора напружень у вигляді впадини зуба. Показано, що існуючий нормативний метод контролю елементів технологічного циклу виготовлення коліс не відповідає реальним змінам характеристик опору втомі елемента з концентратором, які є основною причиною руйнування коліс в експлуатації.

Цикл експериментальних досліджень виконано в пошуках варіантів підвищення циклічної довговічності замкового з'єднання лопаток з диском компресорів газо-турбінних двигунів за критерієм фретінг-втоми.

Проведені роботи свідчать про можливість застосування запропонованої розрахункової моделі втоми в умовах фретінга замкового з'єднання з врахуванням залишкових напружень стиску.

При наявності покриття на одній з поверхонь з'єднання розрахункова модель потребує доробки. Тому оптимізацію виконано експериментальним шляхом: перевірка шістнадцяти видів покриттів замкової частини лопатки дозволили запропонувати більш технологічний і дешевий вид покриття, який дає підвищення границі втоми замкового з'єднання при фретінг-втомі на 65%.

#### ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

1. Виконано комплексне дослідження втоми широкого кола конструкційних сплавів, починаючи з вивчення взаємозв'язків їх фізичних та механічних характеристик опору втомі в умовах однорідного одновісного навантаження і закінчуючи параметрами граничного стану, які характеризують циклічну довговічність матеріалів при наявності складного напруженого стану з асиметрією циклу по різних компонентах напружень, градієнта напружень, залишкових напружень, сил тертя і контакту, тобто факторів, які присутні в більшості реальних елементів конструкцій.

2. Показано, що при пружно-пластичному циклічному деформуванні металу в концентраторах напружень градієнт першого головного напруження та інтенсивності напруження недостатньо відображують напружений стан в поверхневому шарі металу. Тому визначення об'єму матеріала, в якому перевищені критеріальні співвідношення напружень, слід проводити на основі епюри розподілу напружень по глибині і поверхні найбільш напруженої зони концентратора з урахуванням характеристик плинності матеріалу при статичному та циклічному навантаженні.

3. Встановлено, що критерій локального руйнування матеріалів в концентраторі напружень за умовою зародження втомної тріщини при заданій довговічності являє собою певне співвідношення між дотичними та нормальними октаедричними напруженнями. При наявності асиметрії циклу по різних осям навантаження компоненти напружень, що входять в критеріальне співвідношення, визначаються з урахуванням зміни амплітуди симетричного напруження, викликаної асиметрією. Граничний стан для матеріалу в концентраторі обумовлений досягненням граничного рівня співвідношення октаедричних напружень в розрахунковому об'ємі, де це співвідношення перевищує встановлене для матеріалу в однорідному напруженому стані.

4. Запропоновано співвідношення для визначення рівня релаксованих залишкових напружень в концентраторі напружень, в якому враховуються рівень концентрації напружень, пружно-пластичні характеристики матеріалу при статичному та циклічному деформуванні, зміна параметрів діаграми циклічного деформування у зв'язку з наявністю початкових залишкових напружень.

5. Досліджено механізми руйнування конструкційних сплавів при втомі в умовах фретінг-корозії. Запропонована двопараметрична модель руйнування, яка враховує установлену кінетику руйнування: зародження й ранній ріст тріщини в зоні складного напруженого стану описуються критерієм максимальних дотичних напружень, а ріст тріщини при дії контактних напружень і сил тертя проходить в площині критеріальних напружень. Вихід тріщини з зони дії поверхневих зусиль змінює механізм і напрямок її росту, який надалі визначається критерієм росту тріщини відриву. Циклічна довговічність матеріалу може бути врахована сумуванням наробок, необхідних для проростання тріщини по одному і другому механізмам, для чого використовуються відповідні діаграми руйнування.

6. Вихід параметрів ковзання за межі дії механізму фретінг-втоми приводить до інших закономірностей настання граничного стану матеріалу в зоні дії контактних та циклічних напружень, сил тертя. Виявлено умови оптимального тертя в циклічно навантаженій трибосистемі, при яких її циклічна довговічність значно підвищується. Відхилення в бік менших контактних напружень приводить до зменшення довговічності за рахунок більш раннього зародження втомної тріщини, а в бік більших - до неоптимального тертя з появою пітінгів.

7. Показана зміна параметрів деформаційного критерію руйнування при зміні параметрів контактування циклічно навантаженої трибосистеми. Тому критерій граничного стану матеріалу при взаємодії механізмів втоми та зношування може бути встановлений на основі побудови математичних моделей множинної регресії, - ґрунтуючись на багатофакторному плануванні експерименту.

8. З одержаних результатів витікає, що при вільному деформуванні поверхні матеріалу, яке може бути в концентраторах напружень або без них, його граничний стан по зародженню тріщини втоми визначається критерієм октаедричних напружень, визначених у поверхневому шарі або на певній глибині від вільної поверхні. При стисненому деформуванні матеріалу, обумовленому наявністю контактних напружень і сил тертя - тобто сил, безпосередньо прикладених до циклічно деформованої поверхні - його граничний стан в зоні дії цих сил визначається максимальними дотичними напруженнями. В обох випадках критерії являють собою комбінацію дотичних напружень і нормальних в площині, перпендикулярній до площини дії дотичних напружень.

9. Встановлено взаємозв'язок кінетики втомних пошкоджень в металах у вигляді непружних циклічних деформацій з субструктурними змінами в поверхневому шарі, вимірними різними фізичними методами досліджень. Чутливість непружної деформації до структурного стану матеріалу дозволяє визначити індивідуальні пошкодження в матеріалі при одному й тому ж рівні напруження.

10. Пказано, що у зв'язку зі значним внеском поверхневих шарів матеріалів в непружне циклічне деформування в багатоцикловій області втоми, традиційні деформаційні критерії втоми по різному описують втому зразків з різним співвідношенням поверхневих шарів і внутрішніх об'ємів металу, що виражено в більш низьких значеннях непружних деформацій у габаритних зразків, а також у їх нелінійному взаємозв'язку при представ-

ленні результатів досліджень в двоохлогарифмічних координатах.

11. Виконано класифікацію матеріалів по характеру зміни непружної деформації в процесі циклічного навантаження та по її рівню на границі втоми, який досягається на стадії стабілізації процесу непружного деформування матеріалами різного структурного складу. На основі класифікації та обґрунтованих методів побудови діаграм циклічного деформування запропоновано прискорений метод визначення границі втоми. Для кожного класу матеріалу встановлено допуск на непружну деформацію при визначенні циклічної границі пропорційності, при якому остання співпадає з границею втоми.

12. Розроблена енергетична трактовка результатів втомних випробувань і на її основі запропоновані методи визначення тривалості стадій процесу втоми, поетапного сумування втомних пошкоджень і визначення параметрів розсіювання границі втоми матеріалів. Показано, що криві втоми являють собою енергетичне описання процесу руйнування, що розширює їх застосування на випадки локального складного напруженого стану.

13. Запропоновані критерії та моделі руйнування реалізовані у вигляді алгоритмів розрахунку циклічної довговічності матеріалів при наявності концентрації напружень та осередків фретінг-корозії. В останньому випадку запропоновано спосіб урахування немеханічних факторів які проявляються у вигляді електричних трибострумів.

14. Запропоновано оригінальні методичні розробки, які дозволяють експериментально обґрунтовувати рішення по впливу на втому епюри залишкових напружень, параметрів контакту й тертя при циклічному навантаженні трибосистем. Розроблено специфічні методики досліджень фретінг-втоми натурних замкових з'єднань лопаток ГТД, зародження тріщини в дискових автомобільних колесах, складного циклічного навантаження розкладної фермової конструкції.

15. Виконано дослідження дозволили запропонувати методи підвищення довговічності елементів конструкцій, які використовуються в авіаційній, космічній, автомобільній та робототехніці, а також методи розрахунку елементів конструкцій різного призначення. Вони ґрунтуються на запропонованих розрахункових моделях та експериментальному вивченні механізмів руйнування деталей в експлуатації та в близьких до неї умовах.

Основні положення дисертації опубліковано в слідуючих роботах.

1. Трощенко В.Т., Хамаза Л.А., Цыбанев Г.В. Методы ускоренного определения пределов выносливости металлов на основе деформационных и энергетических критериев. - Киев: Наук. думка, 1979. - 174с.

2. Трощенко В.Т., Хамаза Л.А., Цыбанев Г.В. Исследование циклических неупругих деформаций и усталости металлов// Пробл. прочности. - 1976. - №6. - С.3-9.

3. Определение усталостного повреждения металлов с использованием рентгенографической методики/ В.Т.Трощенко, Л.А.Хамаза, Е.Э.Засимчук, Г.В.Цыбанев и др.// Прогнозирование прочности материалов и конструктивных элементов машин большого ресурса. - Киев: Наук. думка, 1977. - С.187-192.

4. Трощенко В.Т., Коваль Ю.И., Цыбанев Г.В. Исследование связи усталостной долговечности металлов с уровнем циклических неупругих деформаций// Пробл. прочности. - 1977. - №11. - С.9-14.

5. Цыбанев Г.В. Анализ характеристик механических свойств металлов в связи с их циклическим неупругим деформированием// Пробл. прочности. - 1981. - №6. - С.23-27.

6. Циклическая прочность монокристаллов молибдена при комнатной температуре/ Н.Б.Бега, Г.В.Цыбанев, Л.А.Хамаза, Е.И.Митченко// Пробл. прочности. - 1981. - №10. - С.60-63.

7. Цыбанев Г.В., Мищенко Ю.Д. Построение диаграмм деформирования при различных режимах нагружения// Пробл. прочности. - 1981. - №5. - С.42-47.

8. Методика и некоторые результаты исследования неупругих деформаций и магнитных шумов при усталости стали 45/ В.Т.Трощенко, Г.В.Цыбанев, Г.Шотт, Л.Моргенталь// Пробл. прочности. - 1983. - №9. - С.74-78.

9. Vergleichende Messungen der plastischen verformungsamplitude und des Barkhausen-Raushens bei der Ermüdung von stahl/ G.Shott, L.Morgental, V.T.Troschenko, G.V.Tsybanjov// Neue Hutte. - 1984 - Heft 3, Marz. - S.100-103.

10. Трощенко В.Т., Цыбанев Г.В. Исследование выносливости сталей для дисков колес автомобилей с учетом эксплуатационных факторов// Труды XV конференции специалистов по автобусам и подвижным экипажам. - Будапешт: Научн.-техн. общество по машиностроению, 1984. - С.263-271.

11. Цыбанев Г.В. Оценка циклической долговечности образцов с

концентраторами напряжений по величине раскрытия надреза// Пробл. прочности. - 1987. - №3. - С.26-30.

12. Цыбанев Г. В., Кравец П. Я., Хоцяновский А. О. Методика испытаний на трещиностойкость при циклическом нагружении сдвигом// Пробл. прочности. - 1992. - №2.

13. Трощенко В. Т., Цыбанев Г. В., Хоцяновский А. О. Определение долговечности сталей при фреттинг-усталости// Пробл. прочности. - 1988. - №6. - С.3-8.

14. Цыбанев Г. В., Пономарев С. Л. Повышение точности поддержания режимов нагружения при испытаниях на многоцикловую усталость на установках типа УРС// Пробл. прочности. - 1986. - №12. - С.108-111.

15. Цыбанев Г. В. Энергетическая трактовка результатов усталостных испытаний и использование ее для определения стадии зарождения трещины// Пробл. прочности. - 1994. - №2. - С.21-30.

16. Цыбанев Г. В., Николаев И. А. Исследование влияния напряжений ниже предела выносливости на долговечность сплава Д16АТ при программном нагружении// Пробл. прочности. - 1983. - №12. - С.10-13.

17. Цыбанев Г. В., Николаев И. А. Исследование усталостной долговечности образцов с винтовым концентратором напряжений// Проблемы прочности. - 1985. - №3. - С.25-31.

18. Трощенко В. Т., Цыбанев Г. В., Степура А. В. Разработка метода учета влияния концентратора напряжений и остаточных напряжений на циклическую долговечность стали 10ГН2МФА. Сообщение 1. Анализ напряженно-деформированного состояния материала// Проблемы прочности. - 1993. - №8. - С.3-13.

19. Трощенко В. Т., Цыбанев Г. В., Степура А. В. Разработка метода учета влияния концентрации напряжений и остаточных напряжений на циклическую долговечность стали 10ГН2МФА. Сообщение 2. Прогнозирование циклической долговечности// Пробл. прочности. - 1993. - №10. - С.3-19.

20. Troshchenko V. T., Tsybanyov G. V., Khotsyanovsky A. O. Two parameter model of fretting fatigue crack growth// Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct. - Vol.17, No1. - 1994. - P.15-23.

21. Дифференциальное определение внешних нагрузок, приложенных к конструкции, по результатам тензоизмерений/ Ю. В. Чудутов, С. В. Иносов, В. В. Писаренко, Г. В. Цыбанев// Пробл. прочности. - 1983. - №9. - С.34-37.

22. Чудутов Ю. В., Писаренко В. В., Цыбанев Г. В. Инвариантные

полумостовые схемы измерения изгибающего момента// Пробл. прочности. - 1983. - №8. - С.114-116.

23. Цыбанев Г. В., Мищенко Ю. Д. Методика реализации жестких режимов нагружения при испытаниях на многоцикловую усталость//Пробл. прочности. - 1983. - №7. - С.27-30.

24. Корина Т. М., Цыбанев Г. В., Маковецкий И. В. Влияние технологических факторов на надежность и долговечность гибкого колеса волновой передачи//Надежность и долговечность машин и сооружений. - 1990. - №17. - С.101-106.

25. Цыбанев Г. В., Белас О. Н. Методика испытаний на усталость материала элементов трибосистемы//Пробл. прочности. - 1991. - №8. - С.72-77.

26. Носовский И. Г., Белас О. Н., Цыбанев Г. В. Влияние предварительного циклического нагружения на износостойкость стали 45// Пробл. прочности. - 1990. - №4. - С.31-34.

27. Troshchenko V. T., Tsybanjov G. V., Khotsyanovsky A. O. Application of fracture mechanics for predicting life of components under fretting fatigue conditions// Proc. XVIII Int. Conf. Coaches and Buses Experts. - Budapest, 1987. - P.175-178.

28. Методические рекомендации МР 15-81. Методы механических испытаний металлов. Методы ускоренного определения предела выносливости, основанные на деформационных критериях/В. Т. Трошенко, Л. А. Хамаза, Г. В. Цыбанев. - М.: Госстандарт (ВНИИМАШ), 1981. - 45с.

29. Цыбанев Г. В., Зорин В. В., Сивенков С. М. Методика поиска перспективной колесной стали// Основные направления экономии и рационального использования металлов в автотракторостроении: Доклады Всесоюзной НТК. - Челябинск: ЧФ НАТИ, 1984. - С.239-242.

30. А. с. 1415136 СССР, МКИ 4 G 01 N 3/32. Способ формирования начальной поверхностной трещины на образце для прочностных испытаний/ Г. В. Цыбанев, И. А. Николаев, А. О. Хоцяновский. - Опубл. 07.08.88. Бюл. №29.

31. А. с. 1573392 СССР, МКИ 4 G 01 N 3/32. Способ испытания материалов на усталость при изгибе/ И. Г. Носовский, Г. В. Цыбанев, О. Н. Белас, В. Ф. Тесля и др. - Опубл. 23.06.90г. Бюл. №23.

32. А. с. 1577492 СССР МКИ 4 G 01 N 3/56. Способ испытания пары трения/ И. Г. Носовский, Г. В. Цыбанев, О. Н. Белас, В. Ф. Тесля и др. - ДСП.

33. А. с. 1668914 СССР МКИ 4 G 01 N 3/. Способ износоусталостных испытаний материалов и установка для его реализации/ И. Г. Но-

совский, Г. В. Цыбанев, О. Н. Белас. - Оpubл. 07.08.91. Бюл. N29. 34. А. с. 1562747 СССР, МКИ 4 G01 N 3/32. Способ испытаний на усталость гибкого зубчатого колеса волновой передачи и установка для его осуществления/ Г. В. Цыбанев, В. Н. Торгов, Л. С. Бойко, Т. М. Корина. - Оpubл. 07.05.90. Бюл. N17.

35. Усталостное разрушение сталей и дисков колес автомобилей и рекомендации по их расчетам на прочность. Влияние различных факторов на характеристики сопротивления усталости сталей и колес// В. Т. Трощенко, Г. В. Цыбанев, В. В. Зорин и др. - Киев: ИПП АН УССР, 1988. - 46с.

36. Усталостное разрушение сталей и дисков колес автомобилей и рекомендации по их расчетам на прочность. Испытания и расчет долговечности автомобильных колес с учетом трещиностойкости их материала// В. Т. Трощенко, Г. В. Цыбанев, В. В. Зорин и др. - Киев: ИПП АН УССР, 1988. - 33с.

37. Цыбанев Г. В. Применение энергетической модели усталости материалов для оценки их характеристик сопротивления усталости при регулярном и блочном циклическом нагружении// Совершенствование технической эксплуатации корпусов судов: Тезисы докладов Всесоюзной НТК. - Ленинград: Судостроение, 1989. - С. 194-195.

38. Цыбанев Г. В. Анализ напряженного состояния в контакте с целью разработки критерия его предельного состояния при фреттинг-усталости// Трение. Усталость. Изнашивание: Тезисы докладов Международного симпозиума по трибофатике. - Гомель: БелИИЖТ, 1993. - С. 48-49.

39. Цыбанев Г. В. Феноменологическая модель усталости металлов, учитывающая изменение предела выносливости в процессе нагружения// Динамика и прочность мобильных машин: Тезисы докладов II НТК. - Кутаиси: Дом науки и техники, 1991. - С. 53-54.

40. Цыбанев Г. В. Модели и критерии учета влияния фреттинг-коррозии и концентрации напряжений на многоцикловую усталость конструкционных сплавов//Повышение технического уровня и надежности машин: Тезисы докладов НТК. - Минск: ИНДМаш АНБ, 1993. - С. 48-49.

41. Цыбанев Г. В. Критерии локального разрушения металлов при циклическом нагружении с учетом фреттинг-коррозии и концентрации напряжений// Надежность машин и технологического оборудования: Тезисы докладов Международной НТК. - Ростов на Дону: Издательский центр ДГТУ. - 1994. - С. 101-103.

Цыбанев Г. В. Разработка методов прогнозирования циклической долговечности элементов конструкций по предельному состоянию материала в зонах концентраторов и фреттинга. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.02.0.9 - динамика и прочность машин, приборов и аппаратуры, Институт проблем прочности НАН Украины, Киев, 1995.

Защищается 90 научных работ, 5 авторских свидетельств, в которых содержатся методические и теоретические разработки и их экспериментальная проверка по обоснованию предельного состояния материала в зонах локализации усталостного повреждения: концентраторах напряжений и зонах передачи усилий через трение контактирующих поверхностей металлов. Установленные критерии и расчетные модели применены для оценки надежности и долговечности элементов конструкций различного назначения. Показано соответствие экспериментальных и расчетных результатов.

Tsybanjov G.V. Elaboration of cyclic lifetime prediction methods for structural elements on the base of ultimate material state at concentrators and fretting sites. Dissertation for doctor of technical sciences in the speciality 05.02.09 - dynamic and strength of machines, devices and apparatuses, Institute for Problems of Strength of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev, 1995.

90 scientific works and 5 patents are being defended which involve methodic and theoretic elaboration as well as their experimental verification for the ultimate material state grounding in the zones of fatigue damage localization such as stress concentrators and sites of load transference by means of contacting metal friction. The criteria and calculation models established have been used for the reliability and lifetime evaluation of various purpose structural elements. The accordance of experimental results and calculations has been shown.

Ключові слова:

непружність, критерій, довговічність, фретінг, концентрація, складний напружений стан, елемент конструкції

---

Підпис. до друку 18.03.96р. Формат 60x84/16. Папір. офс.  
Офс. друк. Ум. друк. арк. 1,86. Ум. фарбо-відб. 1,98.  
Обл.- вид. арк. 2.0. Тираж 100 прим. Замовл. 76

Дільниця ротاپринтного друку ВНТІ ІПМіц НАН України  
252014, Київ 14, вул. Тімірязєвська, 2

446589

AB 34.600

**AB 34.600**