

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

Степаненко Сергій Михайлович

УДК 629.7.036:539.4

**ОПІР РУЙНУВАННЮ ЕЛЕМЕНТІВ КОНСТРУКЦІЙ
АВІАЦІЙНИХ ГАЗОТУРБІННИХ ДВИГУНІВ ТА ЕНЕРГОУСТАНОВОК
ПРИ ЕКСТРЕМАЛЬНИХ УМОВАХ НАВАНТАЖЕННЯ**

Спеціальність 05.02.09 – динаміка та міцність машин

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2003

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на державному підприємстві «Запорізьке машинобудівне конструкторське бюро «Прогрес» імені академіка О.Г. Івченка» Міністерства промислової політики України, м. Запоріжжя.

Науковий керівник: кандидат техн. наук,
академік Інженерної Академії України
Колесников Володимир Іванович,
ДП ЗМКБ «Прогрес» ім. О.Г. Івченка, м. Запоріжжя,
перший заступник керівника підприємства,
головний конструктор.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Воробйов Юрій Сергійович,
Інститут проблем машинобудування
ім. А.М. Підгорного НАН України, м. Харків,
завідувач відділом нестационарних механічних процесів;

доктор технічних наук, професор
Ігнатович Сергій Ромуальдович,
Національний авіаційний університет
Міністерства освіти і науки України, м. Київ,
завідувач кафедри конструкції літальних апаратів.

Провідна установа: Відкрите Акціонерне Товариство «Мотор Січ»
Міністерства промислової політики України, м. Запоріжжя.

Захист відбудеться **“ 19 ” травня 2004 р.** о **14³⁰ год.** на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.10 у Національному технічному університеті “Харківський політехнічний інститут” за адресою: 61002 м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”.

Автореферат розісланий **“ 29 ” березня 2004 р.**

Вчений секретар спеціалізованої
вченої ради Д 64.050.10

Бортовой В.В.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Нові ГТД проектуються на великі ресурси, умови інтенсифікації робочих процесів та підвищення питомих навантажень основних робочих вузлів. Окрім того, відбувається перехід на так звані «другу і третю стратегії управління ресурсом», коли експлуатація двигунів ведеться «по технічному стану», а експериментально підтверджується призначений ресурс тільки для критичних деталей, або він встановлюється шляхом розрахунків. Одним з вирішальних факторів в останньому випадку стає оцінка опору руйнуванню при наявності тріщин.

Сучасні енергоустановки атомних електростанцій мають системи аварійного охолодження активної зони (САОЗ), які, локалізуючи можливі аварійні ситуації, не повинні викликати додаткових руйнувань у разі існування тріщин у основному обладнанні.

Актуальність теми дисертації полягає в тому, що аналіз поведінки конструкцій, у яких за час довготривалої експлуатації можуть виникнути тріщини, а їх розвиток може привести до критичних ситуацій, аварій і катастроф, є важливим при розрахунково–експериментальному обґрунтуванні працездатності елементів конструкцій авіаційних ГТД та енергоустановок. Для одержання найбільш повних результатів, аналіз повинен включати поведінку конструкцій при екстремальних умовах навантаження, що вимагає розробки ефективних методів такого аналізу для використання конструкторами, які займаються питаннями міцності.

У даній дисертації під екстремальними умовами навантаження розуміються проектні і «запроектні» режими експлуатації, що можуть зруйнувати конструкції, у яких виникли тріщини.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана на державному підприємстві «Запорізьке машинобудівне конструкторське бюро «Прогрес» імені академіка О.Г. Івченка» (ДП ЗМКБ «Прогрес» ім. О.Г. Івченка) відповідно до державної програми розвитку авіаційної промисловості України, затвердженої президентом 03.07.92 р., а також є частиною науково-дослідних робіт, що проводяться по галузевих і міждержавних програмах, зв'язаних з підвищенням надійності і ресурсу авіаційних ГТД (договори по двигуну Д-27 №050/1675 від 31.08.90 р., по двигуну Д-18Т №774 від 06.07.95 р. і №046 від 22.08.96 р.). До дисертації також включені результати, одержані автором під час роботи в ОКБ «Гідропрес» (м. Подольськ, Московської обл.).

Мета і задачі дослідження полягають у створенні методу прогнозування критичних станів деталей конструкцій ГТД і енергоустановок у випадку розвитку в них тріщин, здатних призвести до руйнування і виникнення або збільшення зв'язаних з цим аварійних ситуацій.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

– провести вибір критеріїв руйнування об'єктів дослідження;

- для різних сполучень навантажень і конфігурацій об'єктів дослідження розробити методики та одержати залежності параметрів у вершині тріщини, характерні для вибраного критерію;
- здійснити підтвердження правильності обраного критерію руйнування шляхом експерименту або порівняння з відомими фактами руйнувань;
- визначити опір руйнуванню основних конструкцій ГТД і енергоустановок.

Об'єкт дослідження – основні елементи конструкцій ГТД (диски, робочі колеса, вали) і енергоустановок (у першу чергу корпуси ядерних реакторів).

Предмет дослідження – опір руйнуванню матеріалу зазначених елементів конструкцій із тріщинами при екстремальних умовах навантаження.

Методи дослідження – розрахункові аналітичні і метод скінчених елементів (МСЕ) та порівняння одержаних результатів з відомими фактами руйнувань або результатами експериментів.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в наступному.

1. Для випадків екстремальних умов навантаження елементів конструкцій визначено, що при збільшенні проявів крихкості металу внаслідок впливу експлуатаційних факторів не обов'язково найглибша тріщина може бути самою небезпечною. Виходячи з зазначеного положення, обґрунтована необхідність аналізу спектра тріщин при розгляді питань опору руйнуванню. Даний результат був одержаний вперше і відрізняється від відомих пропозицій розглядати як критичну максимально можливу тріщину.

2. Одержано, що для екстремальних умов навантаження елементів конструкцій енергоустановок і ГТД забезпечення опору руйнуванню при наявності тріщин необхідно вести за критеріями ініціювання тріщин, а не за критеріями гальмування. Дане положення є розвитком досліджень на вибір критеріїв руйнування.

3. Розроблено методику експрес-аналізу коефіцієнтів інтенсивності напружень (КІН) для тріщини у полі нерівномірного навантаження методом підбору еквівалентної задачі, що є розвитком ідей, висунутих у цій частині членом-кореспондентом РАН, д.т.н. М.А. Махутовим.

4. Встановлено, що визначення опору руйнуванню з використанням силового критерію по КІН є прийнятним для інженерного аналізу небезпечності аварійних руйнувань.

Практичне значення одержаних результатів.

1. Положення про те, що при екстремальних умовах навантаження для розгляду питань опору руйнуванню необхідно проводити аналіз спектра розрахункових тріщин, було обґрунтоване автором стосовно до корпусів ядерних реакторів. Це положення ввійшло в останню редакцію норм розрахунку на міцність устаткування і трубопроводів атомних енергетичних установок.

2. Для виявлення критичних зон, небезпечних з позицій виникнення тріщин, автором був запропонований інженерний метод прогнозування циклічної довговічності деталей ГТД, що базу-

ється на рекомендаціях ЦІАМ. Для перевірки ефективності конструктивних змін, що зм'якшують напружений стан у концентраторах, автором запропоноване і застосоване проведення чисельних експериментів на базі МСЕ.

3. Запропоновані аналітичні методи визначення КІН та критичних зон в конструкціях реалізовані у вигляді програм для ЕОМ, придатних для практичного використання. Досліджена практична ефективність застосування МСЕ у тривимірній постановці для одержання КІН біля тріщин.

4. Результати цієї дисертаційної роботи застосовані для розв'язання ряду практичних задач аналізу елементів конструкцій авіаційних ГТД і енергоустановок із тріщинами, і викладаються нижче.

Вірогідність і обґрунтованість одержаних результатів підтверджується порівнянням виконаних розрахунків із проаналізованими дійсними випадками руйнування і виявлення тріщин.

Персональний внесок здобувача. Теоретичні і практичні результати дисертації одержані особисто автором. Вони є розвитком ідей в області застосування механіки руйнування до задач аналізу опору руйнуванню в елементах конструкцій при аварійних ситуаціях, запропонованих М.А. Махутовим. Експериментальні розробки, обговорення і впровадження результатів роботи виконані спільно з фахівцями ряду підприємств, прізвища яких приведені в списку публікацій автора.

Самостійно виконані приведені в дисертації розрахунки опору руйнуванню елементів конструкцій енергоустановок і ГТД.

Апробація результатів дисертації. Результати дисертації були повідомлені: на Першій міжгалузевій конференції по конструкційній міцності в атомній техніці (НІКІЕТ, Москва, 1982 р.); на радянсько-фінському семінарі «Аналіз руйнування матеріалів, конструкції і дефекти устаткування АЕС типу ВВЕР-1000» (ІАЕ ім. І.В. Курчатова, Москва, 1983 р.); на Всесоюзній науково-технічній нараді з проблем атомної енергетики на тему «Досвід проектування, будівництва й експлуатації АЕС і шляхи подальшого удосконалювання» (Волгодонськ, 1985 р.); на 32-й науковій конференції МІФІ (Москва, 1987 р.); на Другому, Третьому і Четвертому конгресах двигунобудівників України з іноземною участю «Прогрес - Якість - Технологія» (Рибаче, Крим, 1997, 1998 і 1999 р.); на Міжнародній науково-технічній конференції «Удосконалювання турбоустановок методами математичного і фізичного моделювання» (Харків, 1997 р.); на ХХVІІ Міжнародній науково-технічній нараді з проблем міцності двигунів (ІМАШ, Москва, 1999 р.); на П'ятому, Шостому і Сьомому Міжнародних конгресах двигунобудівників (Рибаче, Крим, 2000, 2001 і 2002 рр.); на Міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми динаміки і міцності в газотурбобудуванні (ГТД – 2001)» (Київ, 2001 р.).

Публікації. Матеріали дисертації викладені в 22 публікаціях (з них 9 – без співавторів), у тому числі в спеціалізованих наукових журналах і збірниках наукових праць – 17 (з них відповідно до переліку №1 ВАК України, бюл. №4, 1999 р. – 9), матеріалів і тез доповідей конференцій – 5.

Структура й обсяг роботи. Дисертація складається з вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел, додатку. Загальний обсяг роботи складає 149 сторінок, включаючи 49 малюнків, 15 таблиць і список використаних джерел з 147 найменувань. Додаток – 1.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ

У **вступі** приводиться обґрунтування актуальності обраної теми дисертаційної роботи, висвітлюється її наукове і практичне значення, сформульовані цілі і задачі дослідження.

У **першому розділі** на підставі огляду літератури зроблений вибір напрямку досліджень. Аналіз умов навантаження і випадків руйнувань елементів конструкцій авіаційних ГТД показав, що прогнозування їхньої довговічності при проектуванні ведеться в основному за рівнем статичної і циклічної міцності, а опір руйнуванню від можливих тріщин при цьому, як правило, не враховується, або аналізуються відносно прості умови навантаження.

Для аналізу поведінки тріщин в елементах конструкцій застосовується механіка руйнування. Великий внесок у розвиток механіки руйнування внесли українські і закордонні вчені: А.Е. Андрейків, В.А. Вайншток, А.Н. Гузь, А.Я. Красовський, Н.Ф. Морозов, В.В. Панасюк, В.Т. Трощенко, Г.П. Черепанов, Дж. Райс, П.Періс, Г. Сі і багато хто інші. Стан наукової проблеми, зв'язаної з опором руйнуванню конструкцій у екстремальних умовах навантаження, характерний тим, що ця проблема комплексно вирішується стосовно до устаткування ядерних енергоустановок для АЕС, і знайшла практичне застосування в проектній практиці. У ядерній енергетиці методика розрахунку на опір руйнуванню включена в норми розрахунку на міцність. Системно випробовуються властивості матеріалів, що визначають опір поширенню тріщини при обраних критеріях руйнування. Проводиться комплекс досліджень по впливу на умови руйнування різних конструктивних і експлуатаційних факторів. Важливі наукові результати в цій області одержані Ю.Г. Драгуновим, Г.П. Карзовим, М.А. Махутовим, Є.М. Морозовим, Г.П. Нікішковым, В.В. Покровським, Є.Ю. Рівкіним, В.М. Філатовим та ін. Багато елементів такого системного підходу можуть бути застосовані в проектуванні авіаційних ГТД для розв'язання задач про тріщини, які здатні привести до аварій.

Розглянувши існуючі критерії руйнування (силові, деформаційні, енергетичні), проаналізувавши обсяг наявної інформації з критеріальних характеристик, необхідних для застосування того або іншого критерію опору руйнуванню, а також вивчивши наявний розрахунковий апарат

для реалізації запропонованих критеріїв руйнування, у даній роботі силовий критерій руйнування обраний як найбільше прийнятний.

Приведені міркування визначили основні напрямки досліджень даної роботи:

- аналіз температурного і напружено-деформованого станів, характерних для екстремальних умов навантаження, і вплив їх на вибір критерію руйнування, прийнятного для опису розглянутих ситуацій;

- розробка методик і одержання розрахункових значень параметрів руйнування для сполучень навантажень і конфігурацій об'єктів із тріщинами, стосовно до особливостей елементів конструкцій енергоустановок і ГТД;

- дослідження опору руйнуванню елементів конструкцій енергоустановок і ГТД.

У другому розділі приводяться результати проведеного автором аналізу термонапруженого стану корпусу енергоустановки типу ВВЕР-440 для АЕС при аварійних ситуаціях, а також аналізу термонапруженого стану елементів конструкцій авіаційних ГТД при перехідних режимах роботи. Робиться висновок про необхідність розглядати спектр розмірів тріщин, тому що не найглибша тріщина може виявитися критичною. Справа в тому, що корпуси енергоустановок із ВВЕР проектується так, щоб навантаження, що виникають при нормальних умовах експлуатації, не приводили в критичний стан гіпотетичну розрахункову тріщину, розміром в одну чверть товщини стінки корпусу. Аналіз проводиться за критерієм механіки руйнування $K_I \leq K_{IC}$, де K_I – КІН, K_{IC} – критичне значення КІН. З огляду на збільшення крихкості металу корпусу в процесі експлуатації, критичне значення КІН K_{IC} стає істотно залежним від температури. При розгляді можливих аварій температура і напруження в стінці корпусу змінюються з часом, як показано на рис.1. Відповідно, K_I і K_{IC} будуть змінюватися так, як показано на рис.2.

Як видно з рис. 2б, хоча для максимальної розрахункової тріщини з розміром $a = 0,25 \cdot h$ значення КІН вище, ніж для більш дрібних тріщин, але воно не досягає критичного значення. А от для тріщин з розміром $0,1 \cdot h \leq a \leq 0,2 \cdot h$ може настати критичний стан. Тобто, при навантаженнях, що виникають в аварійних ситуаціях, які розглядаються для АЕС, не обов'язково найглибша тріщина може виявитися самою небезпечною.

У дисертації показано, що цей висновок у загальному випадку справедливий і для елементів конструкцій ГТД. Тут також характерна наявність різкої концентрації напружень біля поверхні, і у випадку зростання крихкості матеріалу від температурного старіння й інших експлуатаційних факторів, співвідношення КІН і їхніх критичних значень може носити характер, подібний приведену на рис. 2. Крім цього, при порушеннях нормальних умов експлуатації ГТД (різкий віраж, помпаж, інші термосилові перевантаження) можлива значно більш різка концентрація напружень біля поверхні і низький рівень або навіть стискаючі напруження в глибині. Отже, визна-

чення критичних розмірів тріщин по напружено-деформованому стану деталі у подібних випадках також необхідно проводити для широкого спектра розмірів розрахункової тріщини.

Аналіз опору руйнуванню з позицій гальмування тріщини закладений у нормах розрахунку на міцність Американської спілки інженерів-механіків (ASME). Відповідно до цього критерію, опір руйнуванню вважається забезпеченим, якщо при заданих умовах навантаження тріщина, що поширюється, буде зупинена в межах трьох чвертей розрахункового перетину. Якщо гальмування відбувається за цими межами, або тріщина взагалі не гальмується, для цих випадків вводиться обмеження на ініціювання руйнування. Використовуючи силовий критерій механіки руйнування як для корпусу атомної енергоустановки (з реактором типу ВВЕР), так і для диску ротора ГТД, нами був проведений аналіз можливості гальмування тріщини, що рухається в металі. Одержано, що ні для енергоустановок, ні для основних елементів конструкцій ГТД задовольнити критерій опору руйнуванню за умовою гальмування тріщини, що рухається в металі, для екстремальних умов навантаження неможливо. Виходить, обґрунтування опору руйнуванню в цих випадках необхідно вести тільки за критерієм ініціювання руйнування. Для підтвердження правильності останнього висновку автор даної роботи брав участь у складанні програми іспитів, підготовці і проведенні іспитів великогабаритних зразків основного металу і зварених швів сталі 15Х2МФА. Іспити проводилися в ЧССР на стадії розробки й апробації нормативних методів оцінки опору корпусів реакторів крихкому руйнуванню. Одержані експериментальні результати іспитів на ініціювання руйнування і зупинку тріщини показали, що в нормальних умовах експлуатації може реалізовуватися стійкий докритичний ріст тріщин, а у випадку ініціювання крихкого руйнування можливість зупинки тріщини практично не може бути реалізована.

У третьому розділі приводяться результати розробки методик і одержання розрахункових значень параметрів руйнування для сполучень навантажень і конфігурацій об'єктів із тріщинами, стосовно до особливостей елементів конструкцій енергоустановок і ГТД.

Виходячи з аналізу, приведеного в другому розділі, нами одержано, що для напружено-деформованого стану конструкцій в екстремальних умовах навантаження характерний різко неоднорідний розподіл напружень у зонах можливого існування тріщин. Однією з цілей даної роботи є розробка методу визначення КІН, найбільш прийняттого для інженерних розрахунків при аналізі докритичного росту тріщин або для експрес-аналізу поведінки деталі з тріщиною. Для випадків, коли поля напружень змінюються по параболічному закону, М.А. Махутовим був запропонований аналітичний метод підбору еквівалентної задачі для розрахунку КІН. Автором даної роботи метод був дороблений і застосований у практичних розрахунках. Сутність методу полягає в заміні фактичній епюри напружень, що діє у розрахунковому перетині деталі, епюрою із задачі про напружений стан біля отвору в нескінченій пластині. При цьому знаходять номінальне напруження σ_n ,

що розтягує пластину, і радіус отвору r_0 такими, щоб розподіл напружень біля отвору в пластині при розтягуванні й розподіл напружень у розрахунковому перетині деталі були приблизно однаковими і відрізнялися на постійну величину $\Delta\sigma$, як це показано на рис.3. Тоді КІН K_I для тріщини в розглянутому перетині деталі буде визначатися як:

$$K_I = K_{I\rho} - K_{I\Delta} \quad (1)$$

де $K_{I\rho}$ – КІН для тріщини, що виходить на контур отвору в нескінченній пластині; $K_{I\Delta}$ – КІН для пласти-ни кінцевої ширини з крайовою тріщиною, що розтягується рівномірно напруженням $\Delta\sigma$. Для тріщин глибиною до чверті товщини розрахункового перетину запропонований метод дозволяє одержати результати, що добре погоджуються з рішенням, одержуваним МСЕ.

Аналогічний метод підбора еквівалентної задачі був нами застосований і для одержання формули розрахунку КІН у найбільш глибокій точці фронту тріщини, що починається на контурі підкріпленого отвору. Така задача актуальна для випадків виникнення тріщин у зонах патрубків енергоустановок, для бобишок на дисках у місцях кріплення до фланців валів, для жарових труб камер згоряння. Використовуючи одержане д.т.н. В.А. Вайнштоком рівняння для визначення КІН біля тріщини, що йде від галтелі на перетинанні внутрішніх поверхонь двох циліндрів, при навантаженні конструкції внутрішнім тиском, а також підхід, описаний вище, автором було одержане рівняння для визначення КІН K_I у максимально заглибленій точці тріщини, при її навантаженні напруженням, що змінюється за законом, близьким до параболічного, що характерно для таких місць у перехідних режимах і аварійних ситуаціях. В завершеному виді рівняння має вигляд:

$$K_I = f_A \cdot \sigma_{max} \sqrt{\frac{\pi \cdot a}{Q}} \cdot \left[1 - C_1 \frac{a}{h} \right], \quad (2)$$

де f_A – виправочна функція, що враховує форму тріщини; σ_{max} – максимальне значення епюри напружень, що діють в конструкції; a – розмір тріщини; Q – еліптичний інтеграл; C_1 – виправлення; h – зона, у межах якої перемінні по перетину напруження зберігають позитивне значення.

Для відцентрових коліс (ЦБК) актуальним є розрахунок КІН у лопатках і аналіз впливу лопатки, що розірвалася, на тріщину, що перейшла в тіло ЦБК. Тріщина в лопатці ЦБК може бути представлена як крайова тріщина в смузі, підкріпленій з протилежної сторони перпендикулярною пластиною. У довідковій літературі відсутні дані по КІН у тілах, подібних розглянутому. У зв'язку з цим, МСЕ був проаналізований вплив підкріплюючої пластини різної товщини на КІН біля крайової тріщини в смузі. Розрахункова схема показана на рис.4. Розглядалася скінчено-елементна модель, симетрична щодо серединної площини смуги і симетрична щодо площини розташування

тріщини. Вершина тріщини моделювалася сингулярними квадратичними елементами з проміжними вузлами, переміщеними на чверть довжини сторони в напрямку вершини тріщини.

Для перевірки точності розрахункової моделі були виконані розрахунки КІН для крайової тріщини в смузі (без підкріплюючої пластини). Для одержання у смузі умов плоскої деформації заборонялися переміщення усіх вузлів моделі в напрямку Z -координати. Порівняння результатів розрахунків з довідковими даними приведені в табл.1 і показує високу точність розрахунків.

Розрахунки КІН для основної задачі були проведені без завдання строгої вимоги до виконання умов плоскої деформації в смузі. Розраховувалася смуга з крайовою тріщиною без підкріплюючої пластини і смуга з підкріплюючою пластиною різної товщини. Результати розрахунків приведені в табл. 2. У табл. 2: $K_{I(0)}$ – КІН для смуги, вільної по Z (без підкріплення пластиною); $K_{I(0,1)}$ – КІН для смуги, підкріпленої пластиною товщиною $0,1 \cdot h$; $K_{I(0,15)}$ – КІН для смуги, підкріпленої пластиною товщиною $0,15 \cdot h$; $K_{I(0,2)}$ – КІН для смуги, підкріпленої пластиною товщиною $0,2 \cdot h$; Z – координата в напрямку товщини смуги.

Таблиця 1

КІН ($K_I / (\sigma \sqrt{\pi a})$) у смузі,
не підкріпленій пластиною

a/h	Довідкові дані при плоскій деформації	Розрахунок МСЕ при плоскій деформації	Похибка $\frac{K_I^{МСЕ}}{K_I^{довід}}$
0,05	1,14	1,1521	1,008
0,10	1,19	1,2056	1,011
0,20	1,37	1,3900	1,015
0,50	2,83	2,8636	1,012
0,60	4,03	4,0822	1,013
0,70	6,38	6,3941	1,002
0,75	8,46	8,4826	1,003
0,80	12,00	11,9724	0,9977

Таблиця 2.

КІН ($K_I / (\sigma \sqrt{\pi a})$) у смузі,
підкріпленій пластиною

a/h	$K_{I(0)}$	$K_{I(0,1)}$	$K_{I(0,15)}$	$K_{I(0,2)}$
0,05	1,2158	1,2540	1,2511	1,2436
0,10	1,2788	1,3000	1,2945	1,2832
0,20	1,4791	1,4455	1,4306	1,4044
0,50	3,0578	2,5783	2,4226	2,1753
0,60	4,3632	3,4606	3,0676	2,5392
0,70	6,8403	4,9342	3,8558	2,7464
0,75	9,0783	6,0148	4,1804	2,6571
0,80	12,816	7,3037	4,2540	2,2138

При проектуванні ГТД можливість утворення тріщин у деталях не допускається. Однак очевидно, що найбільш ймовірна їхня поява в зонах з конструктивною концентрацією напружень під впливом значних статичних і перемінних навантажень. У зв'язку з цим, основою для аналізу на опір руйнуванню при наявності тріщин повинні служити проектні дані про статичну і циклічну міцність деталей з виявленням найбільш навантажених критичних зон. Для швидкого визначення розрахункового числа циклів до утворення в деталях тріщин, автором був запропонований інженерний метод прогнозування циклічної довговічності деталей ГТД, що базується на рекомендаціях ЦІАМ. Пропонується для температури, при якій одержані експериментальні значення кривої

втоми, по рівнянню Менсона побудувати криву чисел циклів до руйнування в широкому діапазоні розмахів напружень (крива 1 на рис.5). Така крива може не збігатися з наявними експериментальними значеннями (крива 2 на рис.5). Розбіжність у розташуванні кривих 1 і 2 обумовлюється багатьма причинами. Зокрема, це зв'язано з тим, що використовувані в рівнянні Менсона значення параметрів міцності беруться по узагальненим паспортним і сертифікаційним даним для сплаву і відрізняються від відповідних значень матеріалу, на якому проводилися втомні іспити. Шляхом введення виправлення можна усунути цю розбіжність. Виправлення для приведення розрахункового числа циклів до руйнування до відповідних значень експериментального числа циклів при заданій температурі дорівнює :

$$\Delta_{lg N} = lg N_P^{\mathcal{E}} \pm lg N_P^P \quad (3)$$

де $N_P^{\mathcal{E}}$, N_P^P - відповідно експериментальне і розрахункове значення N_P при заданому рівні розмаху напружень. Одержані таким чином значення циклічної довговічності приймаються як середні величини. Виходячи з того, що розрахунок рекомендується вести за мінімальним значенням характеристик, на одержану величину N_P вводиться ще виправлення $k \cdot S_{lg N}$, що відбиває імовірність розкиду експериментальних значень малоциклової втоми, а також вводять запас по числу циклів n . На графіках малоциклової втоми це може бути представлено як :

$$lg [N] = lg N_P \pm \Delta_{lg N} - k \cdot S_{lg N} - lg n_N \quad (4)$$

де N_P – середнє значення числа циклів до руйнування по рівнянню Менсона; k – множник, що відповідає заданій імовірності влучення експериментальної точки на нижню границю довірчого інтервалу; $S_{lg N}$ – середньоквадратичне відхилення логарифмів чисел циклів до руйнування; n – запас міцності по числу циклів. Використовуючи рівняння (4), можна одержати криву допустимих значень циклічної довговічності $[N]$, та визначити критичні зони як місця можливих тріщин.

З іншого боку, виявлені критичні зони елементів конструкцій можуть бути проаналізовані з метою їхньої конструктивної зміни і зм'якшення виникаючого в них напруженого стану. Для такого аналізу найбільш ефективним є метод чисельного експерименту. Суть чисельного експерименту на базі МСЕ полягає в одержанні числовим методом результатів, що відповідають наявним експериментальним або натурним рішенням, а потім у проведенні за допомогою того ж математичного апарату серії розрахунків для вирішення досліджуваної проблеми. При цьому досліджується вузол або деталь із тріщиною і без тріщини, з варіюванням геометрією окремих елементів (зміна товщини, введення або видалення фрагментів конструкції деталей), а також зміною умов навантаження в розрахунковому вузлі. Як приклад, автором був проаналізований вузол кріплення диска останньої ступені КВТ двигуна Д-18Т. Випадки утворення тріщин на диску і проставці, що мали

місце при експлуатації, були усунуті шляхом підбору удосконаленої геометрії вузла, що знизила концентрацію напружень у диску і проставці. Експлуатація удосконаленого вузла показала істотне збільшення його бездефектного терміну роботи.

У четвертому розділі приводяться результати досліджень опору руйнуванню елементів конструкцій енергоустановок і авіаційних ГТД, засновані на розроблених автором методах визначення КІН для складних конфігурацій досліджуваних об'єктів і складних умов навантаження.

Так, з використанням методу підбору еквівалентної задачі був виконаний розрахунок на крихку міцність корпусу ВВЕР-440 на рівні активної зони в імовірній аварійній ситуації. У результаті проведених обчислень були одержані залежності величини запасу $n_{кр} = K_{IC} / K_I$ від розміру тріщини l , приведені на рис.6. Як видно з рис.6, запас $n_{кр}$ спочатку зменшується, а потім, після зниження загального рівня напружень і вирівнювання температур, збільшується. Аналіз міцності за приведеною методикою дозволяє не тільки оцінити опір крихкому руйнуванню $n_{кр}$, але і розрахувати величину найбільш небезпечної тріщини (у даному випадку 7...9 мм). На цій основі можна зробити висновок про необхідну якість дефектоскопічного контролю корпусів ВВЕР.

Стосовно до ГТД був проаналізований випадок руйнування ЦБК з двигуна Д-27 у процесі еквівалентних циклічних іспитів. Руйнування колеса відбулося від тріщини, що зародилася на периферії однієї з лопаток (на відстані 45 мм від вихідного краю). Втомна тріщина пройшла лопатку, вийшла на протилежну сторону колеса і далі поширилася по полотну на 18...22 мм у кожному напрямку. Після цього відбувся статичний долом. У полотні колеса (на ділянці приблизно 10 мм в обидва боки від лопатки, у якій зародилася тріщина) відзначено чергування зон зі статичним і втомним механізмами руйнування. Для визначення критичних розмірів тріщини були обчислені КІН у всьому спектрі розмірів. Розрахунок КІН виконувався МСЕ. Розрахункові значення КІН порівнювалися з циклічною в'язкістю руйнування K_{fc} . У результаті розрахунку було одержано, що для тріщини, яка розвивається в лопатці, КІН не досягає критичної величини. Тріщина в полотні колеса досягає критичного розміру при $a_c = 20$ мм. Одержаний результат відповідає характерові руйнування ЦБК з двигуна Д-27. Розрахунок КІН у полотні колеса показав, що в межах до $a = 10$ мм на торці тріщини, що виходить на протилежну від лопатки сторону, має місце закриття тріщини (спочатку на всій довжині, потім біля вершини). Це викликано згинаючим впливом лопатки. На торці тріщини з боку лопатки КІН у кілька разів перевищує критичну величину. Таким чином, розрахунком підтверджується характер руйнування, що мав місце на ЦБК в межах 10 мм в обидва боки від лопатки. При максимальних навантаженнях відбувалося зрушення тріщини в зоні високого рівня КІН і її гальмування в розвантажених зонах. Так відбувалося кілька разів у межах області істотного впливу лопатки на напруження біля вершини тріщини.

Був також виконаний аналіз руйнування диска 6 ступені КВТ двигуна Д-36, що відбулося в процесі еквівалентних циклічних іспитів. Дослідження зламу показало, що руйнування відбулося від двох тріщин втоми довжиною 24 і 42 мм, що розвилися в кільцевому напрямку по галтелі на полотні, на відстані 15 і 20 мм по обидва боки від отвору діаметром 8 мм, розташованого в середині фрагмента диска, що відірвався. Початок розтріскування збігся з глибокою рискою від механічної обробки. На частині диска, що відірвалася, була виявлена радіально спрямована тріщина довжиною до 20 мм, що розвилася від міжпазового виступу в напрямку відзначеного отвору. Було зроблене припущення, що ця тріщина у своєму розвитку не досягла критичного розміру, але підвищила рівень радіальних напружень у районі галтелі й ініціювала ріст тріщин, які привели до руйнування диска. Виконаний аналіз підтвердив це припущення. Радіальні напруження на радіусі розташування галтелі підвищились з однієї сторони отвору на 59 %, з іншої сторони – на 38 %. Цим може бути пояснений розвиток тріщин у цих місцях диска до 42 і 24 мм. Розрахунок КІН для ряду розмірів тріщини, що поширилася від міжпазового виступу в напрямку отвору, показав, що максимальне значення КІН для тріщин розміром до 20 мм не перевищує критичних значень. А от КІН для тріщини довжиною 42 мм, що розвилася по галтелі в полотні диска, зіставимий з критичним значенням. Ці результати також свідчать про можливість застосування силового критерію руйнування для одержання прийнятних в інженерній практиці результатів.

Нові авіаційні ГТД проектуються на умови інтенсивної експлуатації і, як наслідок цього, значного навантаження основних деталей. У зв'язку з цим, для попереднього аналізу міцності з урахуванням стадії розвитку тріщин має сенс проводити порівняльні розрахунки подібних деталей двигунів, що експлуатуються, і нових ГТД. Такий порівняльний аналіз був проведений автором для дисків ТВТ двигунів Д-18Т и Д-27. Диски виготовляються зі сплавів ЕП742 і ЕП962, для яких є дані по циклічній в'язкості руйнування K_{fc} і по швидкості росту втомних тріщин. Для порівняння були розглянуті два характерних для обох дисків місця розташування тріщин: радіальна тріщина, що розвивається від маточини під дією окружних напружень, і кільцева тріщина на полотні, що розвивається під дією радіальних напружень. Диск ТВТ двигуна Д-27, виготовлений з більш міцного сплаву ЕП962, піддається навантаженням на 27-33% більшим, ніж диск ТВТ двигуна Д-18Т зі сплаву ЕП742. При визначенні критичних розмірів тріщин це виразилося в тому, що для диска зі сплаву ЕП962 величини a_c одержані в 3,5 - 4,5 меншими, ніж для диска із сплаву ЕП742. Критичні розміри приведені в табл.3. Таким чином, при навантаженнях, близьких до границі текучості, збільшення фактичної напруженості на десятки відсотків знижує опір руйнуванню при виникненні тріщин відразу в кілька разів.

До аварійної ситуації могли привести тріщини, виявлені в процесі експлуатації деяких авіаційних двигунів АІ-20Д 5 серії, що виникли в шліцах на фланці вала гвинта. Тріщини пройшли

по шліцах і розповсюдились в окружному напрямку по тілу фланця. У результаті проведених обчислень МСЭ були визначені умови навантаження фланця вала гвинта, при яких можливе утворення тріщин у місцях їхнього фактичного виявлення. Були проведені розрахунки КІН для нормального відриву КІ, для поперечного КІІ і подовжнього КІІІ зрушень у вершині тріщини. Розрахункова схема фланця вала гвинта показана на рис.7. Результати розрахунків

приведені у табл. 4. Якісний аналіз одержаних результатів говорить про те, що низький рівень КІН для всіх розглянутих розмірів тріщин не достатній для досягнення критичного стану. Основний внесок у розвиток тріщин у шліцах вносить КІН ІІ роду. Тому характеристики тріщиностійкості необхідно визначати в першу чергу для даного типу руйнування.

Одержані результати вказують на те, що і при переході тріщин у тіло фланця вала подальший .

їх розвиток також буде відбуватися в першу чергу під впливом КІН ІІ роду, а критична тріщина може не досягатися зовсім

ВИСНОВКИ

Дана дисертація пов'язана з отриманням науково обґрунтованих результатів, які у сукупності розв'язують конкретне наукове завдання – одержати ефективний механізм аналізу опору руйнуванню конструкцій для використання конструкторами, які займаються питаннями міцності, що має істотне значення для авіаційного двигунобудування і енергетичного машинобудування. Основні наукові і практичні результати роботи полягають у наступному.

1. Вирішуючи задачу вибору критеріїв руйнування, одержано, що для екстремальних умов навантаження конструкцій енергоустановок і ГТД забезпечення опору руйнуванню при наявності тріщин необхідно вести за критеріями ініціювання тріщин, а не за критеріями їх гальмування. Встановлено, що визначення опору руйнуванню з використанням силового критерію по КІН є прийнятним для інженерного аналізу небезпечних руйнувань.

Таблиця 3

Критичні розміри тріщин a_c , мм

Місця розташування тріщин	Диск із сплаву ЕП742	Диск із сплаву ЕП962
Тріщина в полотні диска	17,4	3,5
Тріщина в маточині диска	15,8	4,3

Таблиця 4

КІН для тріщин у шліцах, МПа \sqrt{m} ;

Розмір тріщини a/h	K_I	K_{II}	K_{III}
0,05	0,046	3,002	0,074
0,25	0,155	4,687	0,182
0,50	0,340	5,984	0,325
0,75	0,520	5,233	0,317
0,97	0,575	4,207	0,049

2. У результаті дослідження змін термонапруженого стану при екстремальних умовах навантаження визначено, що не обов'язково найглибша тріщина може бути самою небезпечною. Виходячи з цього, обґрунтована необхідність аналізу спектра тріщин при розгляді опору руйнуванню в таких умовах.

3. Вирішуючи задачу одержання залежності параметрів у вершині тріщини, розроблено методику визначення КІН для тріщини в полі нерівномірного навантаження методом підбору еквівалентної задачі. З використанням даної методики одержана формула для визначення КІН для тріщини, що починається на контурі підкріпленого отвору.

4. Підтвердження правильності обраного критерію руйнування здійснено шляхом іспитів великогабаритних зразків основного металу і зварених швів сталі 15Х2МФА та шляхом порівняння з відомими фактами руйнувань.

5. В рамках дисертаційної роботи був проаналізований опір крихкому руйнуванню корпусу реактора типу ВВЕР-440. Виконано аналіз випадків руйнування в процесі іспитів ЦБК двигуна Д-27 і диска 6 ступені КВТ двигуна Д-36. Проаналізовано умови поширення тріщин у критичних зонах дисків турбін двигунів Д-18Т и Д-27. Виконано аналіз умов поширення тріщин по шліцах і у фланці вала гвинта двигуна АІ-20Д 5 серії.

6. Практичне значення одержаних результатів полягає у тому, що розроблені методики визначення КІН реалізовані у вигляді програм для ЕОМ і можуть бути безпосередньо використані в проектних і конструкторських організаціях при аналізі конструкцій із тріщинами при екстремальних умовах навантаження. МСЕ на тривимірних моделях одержані значення КІН для тріщини в смузі, підкріпленій перпендикулярною пластиною, що є розвитком прикладних задач.

Для виявлення критичних зон, небезпечних з позицій виникнення тріщин, автором був запропонований інженерний метод прогнозування циклічної довговічності деталей ГТД, що базується на рекомендаціях ЦІАМ. Для перевірки ефективності конструктивних змін, що зм'якшують напружений стан у концентраторах, автором запропоноване і застосоване проведення чисельних експериментів на базі МСЕ.

7. До основних якісних показників одержаних результатів варто віднести наступне. Одержані результати показують важливість розгляду екстремальних умов навантаження як особливих режимів для конструкцій, здатних при наявності тріщин в металі привести до руйнування.

До основних кількісних показників одержаних результатів варто віднести розроблені методи обчислення КІН і проведені з їхнім застосуванням дослідження випадків руйнувань.

Вірогідність одержаних результатів підтверджується порівнянням виконаних розрахунків і проаналізованих дійсних випадків руйнування.

Рекомендації з використання результатів впливають з основної мети роботи – одержати ефективний механізм аналізу опору руйнуванню конструкцій для використання конструкторами, які займаються питаннями міцності.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1). Колесников В.И., Степаненко С.М., Шереметьев А.В. К вопросу о методе расчета деталей ГТД на малоцикловую усталость // *Авіаційно–космічна техніка і технологія*: Зб. наук. праць. – Харків: Нац. аерокосмічний ун-т «Харк. авіац. ін-т», 1998. – Вып. 5.– С. 255 – 260.

Здобувачем виконаний аналіз особливостей даного методу.

2). Степаненко С.М. Определение коэффициента интенсивности напряжений для трещины при неравномерном нагружении ее берегов // *Авіаційно–космічна техніка і технологія*: Зб. наук. праць. – Харків: Нац. аерокосмічний ун-т «Харк. авіац. ін-т», 1999. – Вып. 10.– С. 101 – 106.

3). Степаненко С.М. Коэффициент интенсивности напряжений у трещины в полосе, подкрепленной с одной стороны перпендикулярной пластиной // *Авіаційно–космічна техніка і технологія*: Зб. наук. праць. – Харків: Нац. аерокосмічний ун-т «Харк. авіац. ін-т», 2000. – Вып. 19.– С. 252 – 255.

4). Колесников В.И., Степаненко С.М., Шереметьев А.В. Оценка циклической долговечности деталей ГТД // *Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов*: Темат. сб. науч. трудов. – Харьков: НАКУ «ХАИ», 2000. –Выпуск 22(5). – С. 72 – 76.

Здобувачем виконаний аналіз особливостей застосування запропонованого методу розрахунку.

5). Денисюк В.Н., Степаненко С.М. Коэффициенты интенсивности напряжений при смешанном типе нагружения трещин в шлицах вала авиационного ГТД // *Авіаційно–космічна техніка і технологія*: Зб. наук. праць. – Харків: Нац. аерокосмічний ун-т «Харк. авіац. ін-т», 2001. –Вып. 26. –С.148–150.

Здобувач виконав розрахунки КІН і приймав участь в аналізі одержаних результатів та формулюванні висновків.

6). Степаненко С.М. Сопротивление разрушению конструктивных элементов с трещинами при аварийных режимах работы // *Авіаційно–космічна техніка і технологія*: Зб. наук. праць. – Харків: Нац. аерокосмічний ун-т «Харк. авіац. ін-т», 2002. – Вып. 30. – С. 94 – 96.

7). Степаненко С.М. Оценка сопротивления корпуса ядерного реактора хрупкому разрушению при разрыве I контура // *Вопросы атомной науки и техники*: Сб. науч. тр. – М., ЦНИИ атоминформ, 1979. – Выпуск 2(2). – С.37–41.

8). Махутов Н.А., Степаненко С.М. Прочность корпуса реактора типа ВВЭР при аварийных режимах работы // *Проблемы прочности*. – 1980. – №6. – С.8–11,19.

Здобувачем були розвинуті ідеї М.А. Махутова в метод підбору еквівалентної задачі та виконанні розрахунків опору руйнуванню корпусу реактора.

9). Степаненко С.М., Пиминов В.А. К вопросу о хрупкой прочности корпусов ядерных реакторов с водой под давлением // Вопросы атомной науки и техники: Сб. науч. тр. – М., ЦНИИ атоминформ, 1983. – Выпуск 7(36). – С.29–32.

Здобувачем був зроблений аналіз придатності критерію зупинки тріщини в умовах аварійного навантаження корпусу реактора.

10). Анализ применения нормативных методик расчета на сопротивление хрупкому разрушению корпусов ВВЭР /Ю.М. Максимов, В.А. Пиминов, А.В. Резепова, С.М. Степаненко // Вопросы атомной науки и техники: Сб. науч. тр. – М., ЦНИИ атоминформ, 1984. – Выпуск 1(38). – С.10–17.

Здобувачем була виконана частина розрахунків, проведені порівняльні оцінки, а також він брав участь в обговоренні одержаних результатів.

11). Оценка сопротивления разрушению материала корпусов ВВЭР / Брумowski М., Полахова Г., Шульц И., Аниковский В.В., Драгунов Ю.Г., Звездин Ю.И., Максимов Ю.М., Ривкин Е.Ю., Степаненко С.М., Филатов В.М. // Атомная энергия. –1988. – Т.64, вып. 6. – С.410–415.

Здобувач брав участь у постановці задачі досліджень, участь у проведенні експериментів та аналізі одержаних результатів.

12). Прибора Т.И., Степаненко С.М. Численный эксперимент при прочностной доводке узла крепления диска последней ступени КВД двигателя Д-18Т // Новые технологические процессы и надежность ГТД: Производственно–технический сборник. –М.: ЦИАМ, 1992. –№1. –С.85–95.

Здобувачем була виконана частина розрахунків, а також він брав участь в аналізі одержаних результатів.

13). Степаненко С.М. К вопросу о прочности дисков ГТД с учетом стадии развития усталостных трещин // Тр. Международной научно–технической конференции «Совершенствование турбоустановок методами математического и физического моделирования». –Харьков: ИПМаш НАН Украины, –1997. –С.537–539.

14). Степаненко С.М. Оценка прочности дисков газотурбинных двигателей с учетом сопротивления развитию трещин // XXVII Международное научно–техническое совещание по проблемам прочности двигателей (Москва, март 1999 г.): Тез. докл. – М.: ИМАШ – ЦИАМ – МАМИ. –1999. –С.54–56.

15). Махутов Н.А., Степаненко С.М. Предупреждение аварийных ситуаций, связанных с развитием трещин в деталях роторов ГТД, методами механики разрушения // Проблемы динамики и прочности в газотурбостроении : Тез. докл. международной научно–технической конференции / Под ред. В.Т. Трощенко и А.П. Зиньковского. –Киев: Ин-т проблем прочности НАН Украины. –2001. – С. 83 – 84.

Здобувачем виконані теоретичні дослідження та розрахунки КІН.

АНОТАЦІЇ

Степаненко С.М. Опір руйнуванню елементів конструкцій авіаційних газотурбінних двигунів та енергоустановок при екстремальних умовах навантаження. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук зі спеціальності 05.02.09 – динаміка та міцність машин. – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, 2004.

Дисертація присвячена створенню методу прогнозування критичних станів основних елементів конструкцій ГТД і енергоустановок у випадку розвитку в них тріщин, здатних привести до руйнування деталей і виникненню або збільшенню зв'язаних з цим аварійних ситуацій. Обґрунтовано, що критерієм руйнування, прийнятним для розв'язання таких задач в інженерній практиці, може бути силовий критерій за умовами ініціювання тріщин. Для визначення коефіцієнтів інтенсивності напружень у поле нерівномірних навантажень розроблений метод підбору еквівалентної задачі, яка має відомі рішення, а також одержано ряд рішень методом скінчених елементів. На прикладах аналізу тріщин у корпусі реактора ядерної енергоустановки, у дисках компресорів і турбін авіаційних ГТД, у валі гвинта показаний збіг розрахункових результатів і реальних критичних розмірів тріщин. Обґрунтовано, що в умовах, коли в матеріалі збільшуються прояви крихкості, не найглибша тріщина може бути критичною.

Ключові слова: конструкційна міцність, довговічність, тріщина, коефіцієнт інтенсивності напружень, руйнування, енергоустановка, газотурбінний двигун.

Степаненко С.М. Сопротивление разрушению элементов конструкций авиационных газотурбинных двигателей и энергоустановок при экстремальных условиях нагружения. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.02.09 – динамика и прочность машин. – Национальный технический университет «Харковский политехнический институт», Харьков, 2004.

Диссертация посвящена созданию метода прогнозирования критических состояний основных элементов конструкций ГТД и энергоустановок в случае развития в них трещин, способных привести к разрушению деталей и возникновению или усугублению связанных с этим аварийных ситуаций. На основе анализа существующих критериев разрушения, имеющейся информации о полученных значениях критериальных характеристик для материалов, применяемых в ГТД и энергоустановках, а также на основе изучения имеющегося расчетного аппарата, в данной работе

обосновано, что критерием разрушения, приемлемым для инженерной конструкторской практики, может быть силовой критерий разрушения по условиям инициирования трещин.

Из рассмотрения термонапряженного состояния корпуса энергоустановки типа ВВЭР-440 для АЭС при аварийных ситуациях и с учетом зависимости критических значений коэффициента интенсивности напряжений (КИН) от температуры и охрупчивания, сделан вывод о необходимости рассматривать спектр размеров трещин для определения сопротивления разрушению конструкции, так как не самая глубокая трещина может оказаться критической. Показано, что в общем случае этот вывод справедлив и для элементов конструкции ГТД. Здесь также характерно наличие резкой концентрации напряжений у поверхности, и в случае охрупчивания материала от температурного старения и других эксплуатационных факторов, соотношение КИН и их критических значений может носить характер, подобный их соотношению в энергоустановках при аварийных ситуациях. Получено также, что ни для энергоустановок, ни для основных элементов конструкций ГТД удовлетворить критерий сопротивления разрушению по условию торможения движущейся в металле трещины при существующих уровнях их нагружения невозможно.

Одной из целей работы является разработка метода определения КИН, наиболее приемлемого для инженерных расчетов рассматриваемого класса задач. Для определения КИН в поле неравномерных нагрузок, характерных аварийным условиям нагружения, разработан метод подбора эквивалентной задачи, имеющей известные решения. Сущность метода заключается в замене фактической эпюры напряжений, действующих в расчетном сечении детали, эквивалентной эпюрой из задачи о напряженном состоянии у отверстия в бесконечной пластине. После чего КИН определяют уже с использованием этой эпюры напряжений. На основе этого метода была получена формула расчета КИН в наиболее глубокой точке фронта трещины, начинающейся на контуре подкрепленного отверстия. Для центробежных колес (ЦБК) актуальным является расчет КИН в лопатках и анализ влияния разорвавшейся лопатки на трещину, перешедшую в тело ЦБК. В настоящей работе предложено трещину в лопатке ЦБК представить как краевую трещину в полосе, подкрепленной перпендикулярной пластиной. Методом конечных элементов (МКЭ) получены значения КИН для данной задачи.

Основой для анализа сопротивления разрушению при наличии трещин должны служить проектные данные о статической и циклической прочности деталей с выявлением наиболее нагруженных критических зон деталей. В связи с этим предложен инженерный расчетно-экспериментальный метод определения зон деталей, наиболее подверженных малоциклового усталости. Метод базируется на использовании уравнения Мэнсона и на его корректировке по имеющимся экспериментальным данным с использованием необходимых поправок.

Ключевые слова: конструкционная прочность, долговечность, трещина, коэффициент интенсивности напряжений, разрушение, энергоустановка, газотурбинный двигатель.

Stepanenko S.M. Failure Resistance of Structural Members of Aircraft Gas-Turbine Engines and Power Plants under Extremely Loading Conditions. - Manuscript.

Thesis for a candidate degree of Engineering science by specialty 05.02.09. –Machine Dynamics and Strength.- National Technical University “ Kharkov Polytechnical Institute”. Kharkov, 2004.

The dissertation is dedicated to creation of method for forecasting critical conditions of the major structural members of gas—turbine and power plant in case of cracks propagation in them capable to result in parts failure and occurrence or aggravation of emergency situation. It is substantiated that considered can be as a failure criterion accepted for solving such problems in engineering practice the strength criterion on the condition of cracks initiation. To define stress intensity factors in the field of non-uniform loads, a method of selection of equivalent task being solved by well-known methods is developed as well as a number of solved problems are obtained by using the final element method. The examples of the analysis of cracks arranged in the nuclear power reactor casing, compressor and turbine discs of aircraft gas-turbine engines, propeller shaft show conformity of the calculated results with the actual dimensions of critical cracks. It is substantiated that under conditions of a material embitterment a crack of negligible depth can be considered as a critical one.

Key words: structural strength, durability, crack, stress intensity factor, failure, power plant, gas-turbine engine.