

МЕТОДИКА ОЦІНКИ ВТОМНОЇ ДОВГОВІЧНОСТІ ТА ЗАЛИШКОВОГО РЕСУРСУ ВЕЛИКОГАБАРИТНИХ ДЕТАЛЕЙ З ДОПОМОГОЮ ЛОКАЛЬНИХ МОДЕЛЕЙ

Для більш точної оцінки довговічності та залишкового ресурсу великогабаритних конструкцій запропоновано використовувати модель у вигляді “вирізки” із небезпечної зони чи вузла конструкції, яка повинна повністю імітувати конструкцію і технологію виготовлення небезпечної зони. Схема навантажування і напружений стан моделі має відповідати схемі і стану небезпечної зони. Для більш точної оцінки залишкового ресурсу деталі чи конструкції запропоновано використовувати моделі з реальними корозійними та механічними пошкодженнями, одержаними в процесі експлуатації чи їм рівними. Розроблено конструкцію стенду для випробувань таких моделей, яка дозволяє проводити випробування в широкому діапазоні геометричних параметрів жорстким навантажуванням на консольний згин з регулюванням асиметрії циклу та амплітуди деформації. Для вирішення задачі узгодження напруженого стану моделі та реальної конструкції використано метод скінченних елементів (МСЕ) та програмні засоби параметричної оптимізації в середовищі Ansys. Подальші дослідження буде спрямовано на експериментальну перевірку та вдосконалення даної методики на відповідальних великогабаритних елементах конструкцій особливо з критичним терміном експлуатації, де проблема оцінки залишкового ресурсу та його прогнозу є першочерговою.

Головний критерій надійності експлуатації елементів конструкцій та деталей машин є виключення їх руйнування під час усього строку експлуатації. Для цього необхідно забезпечити відповідність напруженого стану реальному опору матеріалу руйнуванню протягом заданого терміну з урахуванням усіх значущих факторів. Слід враховувати механізми руйнування матеріалів, які можуть проявити себе під час експлуатації, такі як, у першу чергу, втомні процеси (багатоциклова, малоциклова втома, термічна, контактна, циклічна повзучість), часто поєднані з корозійними процесами. Втома вже більше століття є головним питанням інженерів. Однак, незважаючи на величезну кількість досліджень, які проводилися в цілому світі і значний прогрес у розумінні процесів руйнування, аварії, пов’язані зі втомою, все ще є звичайним явищем. Так, в роботі [1] показано, що більше 90% усіх руйнувань інженерних конструкцій, що трапляються у світі, є безпосереднім наслідком втомних процесів.

Забезпечення надійної роботи елементів конструкцій та деталей машин є складною і багатоплановою задачею. Це в повній мірі стосується оцінки довговічності та залишкового ресурсу великогабаритних деталей та елементів конструкцій. Її можна вирішити тільки шляхом поєднання зусиль на окремих етапах: від стадії проектування, де закладається надійність, через стадію виготовлення, де вона забезпечується, до стадії експлуатації, де надійність повинна реалізуватися.

Слід звернути увагу на те, що будь-яка машина є складною технічною системою, яка підлягає впливу великої кількості випадкових факторів. За причинами виникнення їх можна поділити на три великі групи:

1. При проектуванні – використання наближених моделей проектованої машини.
2. При виготовленні – випадкові розкиди характеристик матеріалу деталей, випадкові відхилення параметрів технології виготовлення від розрахункових значень, а також технології складання.
3. При експлуатації – випадкові розкиди характеристик середовища експлуатації (робочий тиск, кліматичні, ґрунтові фактори т.п.) і випадкові зміни характеристик самих деталей (корозійні ураження, втомні пошкодження тощо).

Зрозуміло, що тільки при врахуванні усіх цих випадкових факторів можна проводити обґрунтовану та вірну оцінку залишкового ресурсу деталі.

Отже, для визначення залишкового ресурсу деталі за її фактичним пошкодженням, в першу чергу, необхідно користуватися імовірнісними методами розрахунку.

Ефективність і перспективність використання імовірнісних методів розрахунку на втому пов'язані ще й з тим, що на основі врахування закономірного розсіювання характеристик міцності і навантаженості вони дозволяють розрахувати функцію розподілу ресурсу деталі до виникнення втомної тріщини, яка є найважливішою характеристикою довговічності, надійності деталі та її поведінки в процесі експлуатації. Емпіричну оцінку функції розподілу ресурсу отримують статистичною обробкою даних про кількість випадків появи втомної тріщини в умовах експлуатації. Близькість емпіричної і розрахункової функції розподілу ресурсу є критерієм вірності використаних імовірнісних методів розрахунку і вихідних даних про навантаження і міцність.

При розробці імовірнісних методів прогнозування втомної довговічності необхідно вирішити такі задачі:

- визначення розрахункових характеристик опору втоми деталей;
- визначення розрахункових характеристик навантажування деталей;
- визначення функцій розподілу ресурсу (довговічності) деталі.

Важливим етапом роботи є визначення статистичних характеристик кривої втоми. Це дозволяє проводити розрахунки залишкового ресурсу з урахуванням імовірності неруйнування, що є необхідною умовою як при плануванні діагностики деталей, так і при прийнятті рішення про їх ремонт чи заміну. При регулярному навантаженні, коли параметри циклу не змінюються в часі, імовірнісна діаграма втоми [5] у вигляді кривих рівної ймовірності неруйнування може бути відтворена за допомогою рівнянь кривої втоми [2]

$$N = \frac{Q}{\sigma} \ln \{1 + [\exp(\frac{\sigma - \sigma_{rR}}{V_0}) - 1]^{-1}\}$$

та функцій нормального розподілу значень границі витривалості

$$\bar{\sigma}_{rR} = \bar{\sigma}_{r \min} - t S_{r \max} \quad (t \geq 0),$$

де N – кількість циклів до руйнування деталей;

σ – максимальне напруження циклу регулярного навантаження з постійним значенням коефіцієнта асиметрії;

V_0 – параметр з розмірністю напруження;

Q – коефіцієнт витривалості;

$\bar{\sigma}_{r \min}$ – нижня межа довірчого інтервалу для середнього значення межі витривалості при регулярному навантаженні з коефіцієнтом асиметрії r ;

$S_{r \max}$ – верхня межа довірчого інтервалу для квадратичного відхилення значень межі витривалості;

σ_{rR} – частинне значення границі витривалості, що відповідає ймовірності неруйнування R ;

t – квантиль нормального розподілу.

За результатами випробувань втоми локальних моделей з використанням методики [4] визначаються параметри рівняння кривої втоми (Q і V_0) і функції нормального розподілу значень границі витривалості ($\bar{\sigma}_r$ і S_r).

Методи розрахунку опору втоми деталей достатньо добре розроблені в даний час для різних типових деталей [3, 4]. На основі геометричних і міцнісних характеристик деталі визначають середнє значення і коефіцієнт варіації границі витривалості деталі з урахуванням концентрації напружень, масштабного фактора, якості обробки поверхонь, технологічних факторів.

Складною і до кінця не вирішеною задачею при розрахунках на довговічність є урахування складного характеру напруженого стану, пов'язану, в першу чергу, із його багатовісністю, нестационарністю та багаточастотністю. Для її вирішення необхідно розробити методику оцінки накопичення втомних пошкоджень в умовах складного

навантажування з урахуванням як нестационарності процесу, так і його багаточастотності в єдиному комплексі.

Дуже важливим, але все ще недостатньо розробленим є питання оцінки і урахування навантажування деталей при нерегулярному, особливо широкополосному процесі навантажування. Виділення амплітуд напружень, які враховують при накопиченні втомних пошкоджень, проводять по-різному. Запропоновано декілька методів схематизації випадкових процесів, метою яких є одержання функції розподілу амплітуд напружень, еквівалентної реальному випадковому процесу за ступенем втомного пошкодження: методи максимумів, екстремумів, розмахів, повних циклів, “дошу” т. і.

Ряд дослідників використовують для опису розподілу амплітуд різні неперервні функції розподілу: β – розподіл [5], експоненційний [5], найчастіше нормальний розподіл [3, 6].

На сучасному етапі немає якого-небудь фізичного обґрунтування розподілу навантаження. Звичайно для теоретичної моделі розподілу приймають функції із загальних міркувань, наприклад, з міркувань зручності розрахунків, що призводить до негативного результату [7].

Для опису довговічності необхідно використовувати імовірісно-фізичні моделі, які базуються на аналізі зв'язків між відмовами і фізичними параметрами, які викликають ці відмови. Для цього найбільш підходить ДМ-розподіл, який найкраще вирівнює дослідні дані у порівнянні з усіма іншими розподілами, описується досить простою функцією і має прості вирази для усіх основних показників надійності. [8].

Найбільш повну і точну інформацію про довговічність та залишковий ресурс деталей машин можна одержати при втомних натурних випробуваннях з дотриманням схеми експлуатаційного навантажування. Але такі випробування великогабаритних деталей пов'язані з великими методичними і технологічними труднощами, потребують значних матеріальних витрат та часу. Для унікальних, особливо великогабаритних елементів конструкцій, такі випробування в більшості випадків взагалі є принципово неможливі.

Випробування зразків металу матеріалу деталі дають тільки початкову інформацію. В такому випадку необхідно проводити випробування моделей малих розмірів з використанням критеріїв подібності. Як критерій подібності при випробуваннях моделей звичайно використовують напруження. Стенди для випробувань моделей повинні повністю відповідати схемі навантажування реальної конструкції. Моделюючи сили і моменти визначають згідно з рівністю напружень моделі і натурної конструкції. Досвід випробувань таких моделей показує можливість надійної оцінки кількості циклів до точки нижнього перегину кривої втоми і параметра m чи V_0 кута нахилу кривої втоми натурної конструкції. Але для визначення середніх значень і середньоквадратичних відхилень границі витривалості, що має вирішальне значення при оцінці несучої здатності та ресурсу, дана модель не прийнятна.

Для більш точної оцінки довговічності та залишкового ресурсу великогабаритних конструкцій пропонується використовувати метод локального моделювання. Основні вимоги до локальної моделі:

- модель у вигляді “вирізки” із небезпечної зони чи вузла конструкції повинна повністю моделювати конструкцію і технологію виготовлення небезпечної зони;
- схема навантажування і напружений стан моделі повністю відповідає схемі і стану небезпечної зони.

Традиційні методи виготовлення концентратора напружень V -подібного типу та подальшого вирощування втомної тріщини не відповідають вимогам до локальної моделі елементів конструкцій з корозійними та механічними пошкодженнями. Тому пропонується використовувати моделі з реальними корозійними та механічними

пошкодженнями, одержаними в процесі експлуатації чи їм рівними. Це дасть змогу більш точно оцінити залишковий ресурс деталі чи конструкції.

В більшості випадків реальний експлуатаційний спектр навантажування в небезпечних ділянках великогабаритних конструкцій призводить до складного напруженого стану. Оцінка довговічності ускладнюється ще й складним характером навантажування в часі з істотно різною асиметрією циклів.

Проведений аналіз ліг в основу розробки стенду для випробувань локальних моделей. Розроблена конструкція стенду (див. рис.1) дозволяє проводити випробування локальних моделей в широкому діапазоні геометричних параметрів жорстким навантажуванням на консольний згин з регулюванням амплітуди деформації в межах 0...10 мм. Використання спеціальної силової головки дозволяє змінювати коефіцієнт асиметрії циклу R в межах $-1 \leq R < 1$ навіть у процесі блокового навантажування.

Для вирішення задачі узгодження напруженого стану локальної моделі та реальної конструкції використано метод скінченних елементів (МСЕ) та програмні засоби параметричної оптимізації в середовищі *Ansys*.

Відомо, що поява тріщини не є мірилом досягнення граничного стану великогабаритної конструкції. Визначальну роль в такому випадку мають параметри циклічної тріщиностійкості. Їх визначення для ділянок конструкцій зі складною геометрією впирається в непереборні звичайними методами математичні труднощі. З допомогою ж МСЕ *Ansys* результати досліджень локальних моделей можна використовувати не тільки для визначення параметрів кривої втоми натурної конструкції, але й для визначення параметрів циклічної тріщиностійкості її небезпечної ділянки. Це дозволяє з більшою імовірністю прогнозувати поведінку втомної тріщини в процесі експлуатації, що збільшує точність оцінки залишкового ресурсу конструкції.

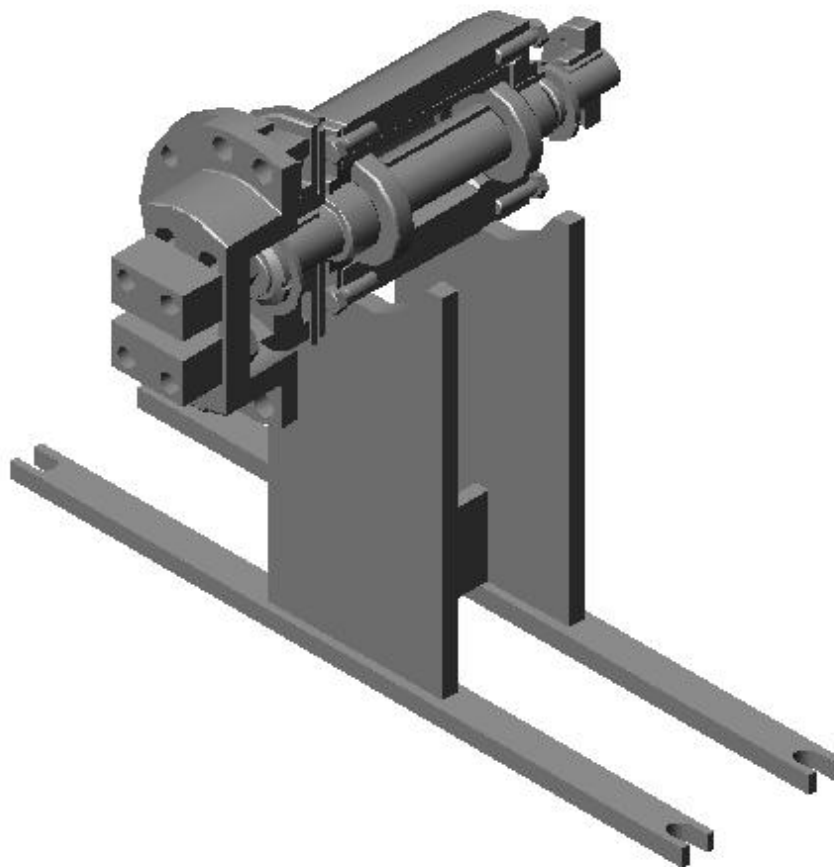


Рис. 1. Загальний вигляд навантажувального блока для дослідження локальних моделей та індикаторів навантажування

Аналіз відомих експериментальних методів прогнозування ресурсу деталей показав перспективність методів, що базуються на застосуванні індикаторів втомного пошкодження. На підставі аналізу теоретичних та експериментальних даних можна зробити висновок про те, що проблему оцінки залишкового ресурсу та індикації накопичення втомних пошкоджень найбільш доцільно розв'язувати шляхом створення спеціального зразка-індикатора, що є локальною моделлю конструкції відносно її втомних характеристик [9-16].

Тому локальні моделі у вигляді індикаторів навантажування доцільно використовувати і для оцінки залишкового ресурсу конструкції.

Для того, щоб втомні характеристики індикатора співпадали зі втомними характеристиками конструкції в широкому діапазоні навантажень, індикатор повинен відповідати наступним вимогам:

- він повинен виготовлятися з того ж матеріалу, що й конструкція;
- мати однаковий з конструкцією характер навантажування;
- мати однаковий з конструкцією рівень і градієнт максимальних напружень в зоні втомного руйнування.

Дуже важливим є те, що використання локальних моделей для виготовлення індикаторів втоми дає можливість забезпечити наперед задану ймовірність неруйнування деталей і в умовах нерегулярного (випадкового) навантажування. Для цього необхідно провести комплекс стендових та експлуатаційних випробовувань локальних моделей. Випробування необхідно спрямовувати не тільки на оцінку параметрів втоми небезпечних з точки зору втомного руйнування деталей, а й на визначення кінетичних критеріїв опору втомі [2]. З їх допомогою можна визначати залишкову довговічність деталі в умовах експлуатації навіть за результатами лише двох вимірювань. Слід відзначити, що використання індикаторів втоми та кінетичних критеріїв опору втомі [2, 16] в поєднанні із засобами неруйнівного контролю створює необхідну базу для оцінки залишкового ресурсу в умовах експлуатації.

Подальші дослідження будуть спрямовані на експериментальну перевірку та вдосконалення даної методики на відповідальних великогабаритних елементах конструкцій, особливо з критичним терміном експлуатації, де проблема оцінки залишкового ресурсу та його прогнозу є першочерговою.

The fullest and precise information on a residual resource of members of constructions can be received at fatigue field tests with holding of the scheme of operation loading. But such trials of large-sized constructions, to which one treat also pipes of large diameters are connected to large methodical and technological difficulties, demand considerable material inputs and time. For more precise estimation of a residual resource of mains it is offered to use a method of local simulation and the tension of model completely respond the scheme and state of a dangerous zone. The conventional methods of manufacture of a stress raiser V- of a similar type and further cultivation of a fatigue crack do not meet the requirements to local model of pipes with corrosive and mechanical damages. Therefore it is offered to use models with actual corrosive and mechanical damages, whether obtained on-stream by it equal. It will enable precisely to evaluate a residual resource of a construction. For the coordination of a tension of local model and actual pipeline the finite element method and software of a parameter optimization in environment Ansys utilized. Obtained dependences are in a ground of mining of the fixture for trials of local models.

Література

1. Miller K.J., Proc. Int. Mech. Eng., 1991, 2051.
2. Почтенный Е.К. Кинетика усталости машиностроительных конструкций. – Мн.: УП «Арти-Фекс», 2002. – 186 с.
3. РД 50-83-88. Рекомендации. Расчеты и испытания на прочность. Расчеты на прочность валов и осей. Введ. - 01.07.89.
4. Решетов Д. Н., Иванов А. С., Фадеев В. З. Надежность машин. - М: Высшая школа, 1988-238с.
5. Капур К., Ламберсон Н. Надежность и проектирование систем: Пер. с англ./ Под ред. И. А. Ушакова. - М.: Мир, 1980. - 604 с..
6. ГОСТ 27.005-97. Надежность в технике. Модели отказов. Основные положения. Введ. 01.01.99.
7. Кордонский Х. Б., Ларин М. М. Выравнивание данных усталостной долговечности по распределениям Бернштейна и обратному нормальному // Заводская лаборатория, 1983, №7.-С. 52-55.

8. Стрельников В. П. Приложение теории марковских процессов к исследованию усталостной долговечности Проблемы прочности. 1986.- №2.- С.13-17.
9. Бойко В.И., Коваль Ю.И. Анализ неразрушающих методов оценки усталостного повреждения металлов. – Киев, 1982. – 36 с. – (Препринт АН УССР. Ин-т пробл. прочности).
10. Морозов Б.А. Моделирование и прочность металлургических машин // М., Машгиз, 1960, 287 с. с ил.
11. Вагапов Р.Д. Статистическая теория рассеяния случайной координаты повреждения тела // Машиноведение. – 1970. – №4 – С.63-74.
12. Почтенный Е.К., Ракицкий А.А., Рыжков Е.П., Горбацевич М.И. Оценка сопротивления усталости штамповочного картера с использованием локальных моделей // ВЕСЦІ Академіи Наук Беларускай ССР. – 1987. – №1. – С. 3-6.
13. Ракицкий А.А., Горбацевич М.И., Шоломицкий В.И. Методика составления квазислучайного блока нагружения // ВЕСЦІ Академіи Наук Беларускай ССР. – 1987. – №1. – С.74-76.
14. Журавель А.И., Почтенный Е.К., Шурип К.В., Матусевич В.И. Оценка долговечности рам тракторных прицепов // ВЕСЦІ Академіи Наук Беларускай ССР. – 1987. – №1. – С. 6-11.
15. Парфенович Е.О. Оценка долговечности деталей по результатам испытаний моделей: Автореф. дис. канд. тех. наук: – Минск. – 1993. – 17 с.
16. Крижанівський Є.І., Івасів В.М., Чернов Б.О., Ільницький М.К. Вибір і дослідження моделей підводних трубопроводів. Державний міжвідомчий науково-технічний збірник “Розвідка і розробка нафтових і газових родовищ”, Івано-Франківськ, випуск 36, 1999.

Одержано 28.07.2004 р.