

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ МОРСЬКИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ЧЕРЕДАРЧУК НАТАЛІЯ ІВАНІВНА

УДК 621.979.1:62-144:539.431

ДИСЕРТАЦІЯ

**МЕТОД ПОРІВНЯЛЬНОЇ НЕПРЯМОЇ ОЦІНКИ ГРАНИЦІ
ВИТРИВАЛОСТІ ВІДНОВЛЕНИХ КОЛІНЧАСТИХ ВАЛІВ
ДВИГУНІВ ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ**

05.22.20 – Експлуатація та ремонт засобів транспорту

Технічні науки

Подається на здобуття вченого ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідні джерела

_____ Н.І.Чередарчук

Науковий керівник:

КОНОПЛЬОВ АНАТОЛІЙ ВАСИЛЬОВИЧ
доктор технічних наук, професор

Одеса – 2021

АНОТАЦІЯ

Чередарчук Н.І. Метод порівняльної непрямой оцінки границі витривалості відновлених колінчастих валів ДВЗ. - Кваліфікаційна наукова робота на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за фахом 05.22.20 – експлуатація та ремонт засобів транспорту. – Одеський національний морський університет, Одеса, 2021.

У дисертаційній роботі розроблено метод непрямой порівняльної прискореної оцінки опору втомі відновлених колінчастих валів ДВЗ, що дозволяє удосконалювати процес ремонту цих виробів.

Для його розробки, теоретичного обґрунтування і перевірки точності попередньо було вирішено ряд наступних завдань.

Науково обґрунтована можливість використання руйнівного напруження для непрямой порівняльної оцінки втомної міцності відновлених колінчастих валів ДВЗ.

За допомогою кореляційних залежностей між параметрами кривої втоми і границею витривалості доведена можливість розрахункової оцінки руйнівних напружень для відновлених колінчастих валів ДВЗ.

Проведено оцінку впливу перегинів і розривів експериментальної кривої втоми відновлених колінчастих валів ДВЗ на величину розрахункових значень руйнівних напружень при лінійно зростаючому навантаженні.

Обґрунтовано застосування дволанкової кривої втоми для уточнення значень руйнівних напружень при розрахунковій оцінці втомної міцності відновлених колінчастих валів ДВЗ зі зростаючим навантаженням.

Проведено аналіз точності розробленого методу з урахуванням впливу швидкості збільшення навантаження, а також випадкової і систематичної складових загальної похибки.

Виконана перевірка точності розробленого прискореного методу на лабораторних зразках і елементах відновлених колінчастих валів ДВЗ за опублікованими в літературних джерелах даними.

Ключові слова: колінчастий вал ДВЗ, ремонт, елемент колінчастого вала, зразки, випробування на опір втомі.

ANOTATION

Cheredarchuk N.I. Method of comparative indirect estimation of endurance limit of restored crankshafts of internal combustion engines. - Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

The dissertation on competition of a scientific degree of the candidate of technical sciences on a specialty 05.22.20 - operation and repair of vehicles. - Odessa National Maritime University, Odessa, 2021.

In the dissertation work the method of indirect comparative accelerated estimation of fatigue resistance of the restored crankshafts of internal combustion engines is developed, which allows to improve the process of repair of these products.

For its development, theoretical substantiation and verification of accuracy, a number of the following tasks were previously solved.

The possibility of using destructive stress for indirect comparative assessment of fatigue strength of restored crankshafts of internal combustion engines is scientifically substantiated.

With the help of correlations between the parameters of the fatigue curve and the endurance limit, the possibility of calculated estimation of the destructive stresses for the restored crankshafts of the internal combustion engine is proved.

The influence of inflections and ruptures of the experimental fatigue curve of the restored crankshafts of the internal combustion engine on the value of the calculated values of the destructive stresses at linearly increasing load is estimated.

The use of a two-link fatigue curve to clarify the values of destructive stresses in the design assessment of the strength of the restored crankshafts of the internal combustion engine with increasing load is substantiated.

The analysis of the accuracy of the developed method is carried out taking into account the influence of the rate of load increase, as well as random and systematic components of the total error.

The accuracy of the developed accelerated method on laboratory samples and elements of the restored crankshafts of internal combustion engines according to the data published in literature sources is checked.

Key words: ICE crankshaft, repair, crankshaft element, samples, fatigue resistance tests.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Публікації, в яких викладено основні наукові результати дисертації

1. Коноплев А.В., Чередарчук Н.И., Сологуб В.О. Определение точек перегибов и разрывов кривой усталости при ускоренном определении предела выносливости // Транспортна академія України: Збірник наукових праць до 25річчя ТАУ.– Одеса: ОНМУ, 2017.– С. 58-68.
2. Коноплев А.В., Греченко П.И., Чередарчук Н.И., Сологуб В.О. Особенности построения кривой усталости при напряжениях, близких к пределу выносливости // Вісник ОНМУ: Збірник наукових праць. Випуск 3(52) [Фахове видання України].–Одеса: ОНМУ, 2017.– С. 154-162.
3. Коноплев А.В., Греченко П.И., Чередарчук Н.И., Сологуб В.О. Оточках перелома кривых усталости, выраженных степенным и показательным уравнениями // Вісник ОНМУ: Збірник наукових праць. Випуск 3(56) [Фахове видання України].–Одеса: ОНМУ, 2018.– С. 206-213.

4. Коноплев А.В., Кононова О.Н., Чередарчук Н.И., Сологуб В.О., Рожко Е.К. Обзор и анализ способов восстановления гребных валов // Вісник ОНМУ: Збірник наукових праць. Випуск 4(57) [Фахове видання України].—Одеса: ОНМУ, 2018.— С. 143-149.
5. Коноплев А.В., Чередарчук Н.И., Галевский В.В., Кононова О.Н., Рожко Е.К., Сологуб В.О. Определение предельных скоростей роста амплитуды напряжений при ускоренных испытаниях деталей машин на сопротивление усталости. // Вісник ОНМУ : Збірник наукових праць. Випуск 3(60) [Фахове видання України].—Одеса: ОНМУ, 2019.— С. 59-69.
6. Коноплев А.В., Греченко П.И., Чередарчук Н.И., Галевский В.В., Сологуб В.О., Рожко Е.К., Кононова О.Н. Сравнительная косвенная оценка пределов выносливости деталей по результатам их испытаний с возрастающей нагрузкой // Вісник ОНМУ: Збірник наукових праць. Випуск 3(60) [Фахове видання України].—Одеса: ОНМУ, 2019.— С. 70-80.
7. Коноплев А.В., Чередарчук Н.И., Сологуб В.О. О точке перелома кривых усталости в полулогарифметрических координатах // Перша міжнародна науково-технічна конференція «Перспективні технології для забезпечення безпеки життєдіяльності та довголіття людини». Тезидоповідей.— Одеса: ОНМУ, 2018.— С. 17-21.
8. Коноплев А.В., Кононова О.Н., Чередарчук Н.И., Сологуб В.О. Использование уточненного коэффициента относительной долговечности при оценке усталостной прочности восстановленных гребных валов // Друга міжнародна науково-технічна конференція «Перспективні технології для забезпечення безпеки життєдіяльності та довголіття людини». Тезидоповідей.— Одеса: ОНМУ, 2019.— С. 38-41.
9. Коноплев А.В., Чередарчук Н.И., Галевский В.В., Кононова О.Н., Рожко Е.К., Сологуб В.О. Определение разрушающих напряжений по параметрам двухзвенного наклонного участка составной кривой усталости // International periodic scientific journal. Третя міжнародна науково-технічна конференція «Перспективні технології для забезпечення безпеки

життєдіяльності та довголіття людини».Тезидоповідей.– Одеса: ОНМУ, 2020.– С. 30-35.

10. Коноплев А.В., Кононова О.Н., ГалевскийВ.В., Рожко Е.К., Чередарчук Н.И., Сологуб В.О., Косвенная оценка пределов выносливости деталей судовых механизмов по результатам по результатам сравнительных испытаний //ІМіжнародна науково-практична морська конференція кафедри СЕУіТЕ Одеського національного морського університету – Одеса: ОНМУ, 2020.– С. 156-161.

ЗМІСТ

ВСТУП	10
РОЗДІЛ 1. ВИБІРКОВИЙ ОГЛЯД І АНАЛІЗ СПОСОБІВ	
ВІДНОВЛЕННЯ ТА МЕТОДІВ ВИЗНАЧЕННЯ ГРАНИЦІ	
ВИТРИВАЛОСТІ ВІДНОВЛЕНИХ КОЛІНЧАСТИХ ВАЛІВ ДВЗ...	16
1.1. Види пошкоджень колінчастих валів ДВЗ і сучасні методи їх відновлення	16
1.2. Специфіка методів, що використовують для порівняльної прискореної оцінки характеристик опору втомі колінчастих валів ДВЗ при їх ремонті.....	20
1.3. Використання похилої ділянки кривої втоми для оцінки границі витривалості відновлених колінчастих валів ДВЗ.....	22
1.4. Аналіз методів, що базуються на використанні похилої ділянки кривої втоми та використовують для прискореного визначення границі витривалості відновлених колінчастих валів ДВЗ	30
1.5. Характеристики режимів випробувань відновлених колінчастих валів ДВЗ на опір втомі зі зростаючим навантаженням	38
1.6. Оцінка границі витривалості відновлених колінчастих валів ДВЗ на основі випробувань лабораторних зразків.....	44
1.7. Особливості натурних випробувань і оцінка характеристик опору втомі відновлених колінчастих валів ДВЗ.....	48
1.8. Висновки до розділу 1.....	53
РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА МЕТОДУ НЕПРЯМОГО ПОРІВНЯННЯ	
ГРАНИЦІ ВИТРИВАЛОСТІ ВІДНОВЛЕНИХ КОЛІНЧАСТИХ	
ВАЛІВ ДВЗ	54
2.1. Непряма порівняльна оцінка границі витривалості відновлених колінчастих валів ДВЗ на основі результатів їх випробувань зі зростаючим навантаженням.....	54
2.2. Використання кореляційних залежностей між параметрами кривої	

втоми і границею витривалості при розрахунковій оцінці руйнівних напружень відновлених колінчастих валів ДВЗ.....	64
2.3. Вплив перегинів і розривів експериментальної кривої втоми відновлених колінчастих валів ДВЗ на величину розрахункових значень руйнівних напружень при випробуванні валів зі зростаючим навантаженням.....	71
2.4. Застосування складеної кривої втоми для уточнення розрахункових значень руйнівних напружень при імітації випробувань відновлених колінчастих валів ДВЗ зі зростаючим навантаженням	77
2.5. Залежність розрахункових руйнівних напружень від швидкості збільшення навантаження при використанні складеної кривої втоми....	86
2.6. Висновки за розділом 2.....	91
РОЗДІЛ 3 ТОЧНІСТЬ РОЗРОБЛЕНОГО МЕТОДУ ПОРІВНЯЛЬНОЇ НЕПРЯМОЇ ОЦІНКИ ГРАНИЦІ ВИТРИВАЛОСТІ ВІДНОВЛЕНИХ КОЛІНЧАСТИХ ВАЛІВ ДВЗ...	
3.1. Систематична похибка розробленого методу, обумовлена вибором швидкості збільшення амплітуди напруження.....	93
3.2. Систематична похибка розробленого методу, пов'язана з вибором початкового напруження.....	108
3.3. Зв'язок кількості випробуваних елементів з випадковою складовою похибки розробленого методу.....	112
3.4. Висновки за розділом 3	114
РОЗДІЛ 4. ПЛАНУВАННЯ ЕКСПЕРИМЕНТУ І ПЕРЕВІРКА РОЗРОБЛЕНОГО МЕТОДУ НА ЗРАЗКАХ І ЕЛЕМЕНТАХ КОЛІНЧАСТОГО ВАЛА ДВЗ.....	
4.1. Перевірка однорідності дисперсій руйнівних напружень і границі витривалості, а також їх розмахів варіювання за результатами випробувань гладких і надрізаних зразків.....	115
4.2. Планування обсягу експерименту.....	121

4.3. Схема експериментальної установки і методика проведення випробувань зразків.....	122
4.4. Визначення граничних швидкостей збільшення амплітуди напруження при проведенні експерименту.....	124
4.5. Застосування розробленого методу для порівняльної оцінки границі витривалості відновлених колінчастих валів ДВЗ.....	132
4.6. Висновки за розділом 4.....	135
ВИСНОВКИ.....	136
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	138
ДОДАТКИ.....	150
Додаток А. Методика «Непряний метод порівняльної оцінки границі витривалості відновлених колінчастих валів ДВЗ».....	151
Додаток Б. Акт використання результатів дисертаційного дослідження в навчальному процесі ОНМУ	155
Додаток В. Довідка про використання в навчальному процесі ОНМУ результатів одержаних в процесі виконання дисертаційного дослідження	156
Додаток Г. Довідка про використання в навчальному процесі ОНМУ результатів одержаних в процесі виконання дисертаційного дослідження.....	157
Додаток Д. Акт використання результатів дисертаційної роботи у вигляді методики в ПрАТ «ІСРЗ».....	158
Додаток Е. Акт використання результатів дисертаційної роботи у вигляді методики в судновласну компанію ООО «СК ПРЕСТИЖ»....	159
Додаток Є. Акт використання результатів дисертаційної дослідження у вигляді методики в судноремонтну компанію ТОВ «Транс Шіп Сервіс».....	160

ВСТУП

Актуальність теми. Опір втомі деталей машин і елементів конструкцій в значній мірі обумовлює ресурс і експлуатаційну надійність всієї конструкції і є важливим фактором при проектуванні сучасних автомобілів, суден, підйомно-транспортних механізмів, верстатів та інших технічних засобів. У зв'язку з цим першочергового значення має проблема, пов'язана із забезпеченням втомної міцності деталей, що зазнають в робочих умовах змінних навантажень.

В даний час не існує загальноприйнятої науково обґрунтованої та експериментально підтвердженої теорії втомних явищ, яка враховувала б вплив на опір втомі різних факторів конструктивного, технологічного та експлуатаційного характеру і дозволила б розрахунковим шляхом отримувати достовірні дані для проектування деталей машин і елементів конструкцій з необхідною точністю. У зв'язку з цим на всіх етапах розробки і введення в експлуатацію нових машин, а також конструкцій, що підлягають ремонтним операціями, проводяться стендові втомні випробування натурних (повнорозмірних) деталей, їх елементів, вузлів і конструкцій в цілому, що є найбільш ефективним способом визначення достовірних втомних характеристик.

Традиційні випробування на опір втомі тривалі і трудомісткі. У зв'язку з цим в останні кілька десятиліть активно розвиваються прискорені методи випробувань, причому, кожен з них має своє призначення і область застосування. Дисертацію присвячено розробці прискореного методу визначення характеристик опору втомі, який за своєю суттю є непрямим і призначений для проведення порівняльної оцінки втомної міцності відновлених колінчастих валів ДВЗ.

До теперішнього часу в Україні та за кордоном були проведені дослідження, результатом яких була розробка нових прискорених методів і модернізація деяких існуючих. Найбільший внесок в рішення даної проблеми внесли В.Т. Трощенко, Л.М. Школьник, Н.М. Степнов, Є.К. Почтенний, В.М.

Гребенник, П. Форрест, С.В. Серенсен, Ф.Ф. Бенуа, В.П. Когаєв, В.С. Іванова, І.А. Одінг, Н.В. Олійник, О.І. Стальниченко, М. Про, Є. Лер, Л. Локаті, Н. Еномото і інші.

Незважаючи на численні дослідження, проблема розвитку прискорених методів випробувань на опір втомі залишається актуальною. Вони спрямовані як на економію матеріальних ресурсів і часу, так і на підвищення точності оцінки втомних характеристик.

Актуальність дисертаційного дослідження зумовлена й тим, що розрахункові методи поки не забезпечують необхідної точності. Дослідження спрямоване на вирішення важливого завдання, яке полягає в розробці нового прискореного методу непрямой оцінки характеристик опору втомі, призначений для порівняльної оцінки втомної міцності відновлених колінчастих валів ДВЗ. Дисертаційне дослідження допоможе інженерам при вирішенні практичних завдань, пов'язаних з ремонтом колінчастих валів ДВЗ і сприятиме розвитку науки.

Зв'язок з науковими програмами, планами, темами. Дослідження виконано відповідно до пріоритетних напрямів розвитку науки і техніки, затвердженими Кабінетом Міністрів України від 7 вересня 2011 року «Про затвердження Переліку пріоритетних тематичних напрямків наукових досліджень і науково-технічних розробок на період до 2020 року» сформульованими відповідно до Закону України «Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки» від 11.07. 2001р. №2623-III, та плану проведення науково-дослідних робіт Одеського національного морського університету за пріоритетними напрямами. Результати науково-дослідних робіт за участю автора викладені в звітах НДР:

1. Комплексна розробка методів оцінки конструктивної міцності деталей судових механізмів, відновлених сучасними способами (№ д.р. 0112U002686).

2. Дослідження вибору складу наплавочних матеріалів, які забезпечують високий опір циклічним навантаженням (№ д.р. 0106U001270).

3. Розвиток методів експериментального оцінювання характеристик опору втомі.

У зазначених НДР автор брала участь як виконавець окремих етапів.

Мета і завдання дисертаційного дослідження.

Метою роботи є забезпечення втомної міцності відновлених під час ремонту колінчастих валів ДВЗ за рахунок удосконалення методів експериментальної порівняльної непрямой оцінки їх характеристик на опір втомі.

Зазначена мета досягається вирішенням наступних взаємопов'язаних наукових завдань:

1. провести аналіз сучасних способів відновлення зношених поверхонь колінчастих валів ДВЗ і методів їх прискорених випробувань на опір втомі в межах загального процесу ремонту;

2. обґрунтувати можливість використання руйнівних напружень в якості характеристики, що дозволить проводити порівняльну оцінку втомної міцності відновлених колінчастих валів ДВЗ. На цій основі розробити непрямий прискорений метод що, на відміну від існуючих, має вищу точність та економічність;

3. оцінити вплив перегинів і розривів експериментальних кривих втомі відновлених колінчастих валів ДВЗ та обґрунтувати можливість використання дволанкової кривої втомі для підвищення точності визначення руйнівних напружень;

4. оцінити систематичну похибку розробленого методу в залежності від режимів проведення випробувань елементів відновлених колінчастих валів ДВЗ;

5. провести перевірку точності розробленого прискореного методу на лабораторних зразках і елементах відновлених колінчастих валів ДВЗ за опублікованими в літературних джерелах даними.

Об'єктом дослідження є процес ремонту колінчастих валів ДВЗ і пов'язані з ним методи перевірки їх втомної міцності після відновлення зношених поверхонь.

Предметом дослідження є втомна міцність відновлених колінчастих валів ДВЗ.

Методи дослідження.

Достовірність виконаних досліджень базується на:

- використанні методів статистичної обробки експериментальних і розрахункових даних для оцінки характеристик опору втомі зразків і елементів відновлених колінчастих валів ДВЗ в ймовірнісному трактуванні;
- використанні методу моделювання експерименту на основі кореляційних залежностей між параметрами похилої ділянки кривої втоми і границею витривалості для обґрунтування запропонованих припущень і оцінки систематичної похибки методу.

Достовірність теоретичних розробок підтверджена порівнянням результатів, отриманих при прискорених випробуваннях елементів колінчастих валів, відновлених різними способами, з результатами випробувань за стандартною методикою, які наведені в літературних джерелах.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному:

Вперше:

- запропоновано і теоретично обґрунтовано використання руйнівних напружень в якості характеристики при порівняльній оцінці втомної міцності відновлених колінчастих валів ДВЗ на відміну від границі витривалості та довговічності до руйнування;
- розроблено метод порівняльної непрямої оцінки втомної міцності колінчастих валів ДВЗ в якому скорочується час експерименту за рахунок випробувань зі зростаючою амплітудою навантаження.

Отримали подальший розвиток:

- методика обліку перегинів і розривів експериментальної кривої втоми, яка дозволяє визначати величину розрахункових значень руйнівних напружень при випробуваннях зі зростаючим навантаженням;

– спосіб визначення розрахункових значень руйнівних напружень, який враховує дволанкове представлення кривої втоми.

Удосконалено:

- методику оцінки точності методу в якій враховано випадкову і систематичну складові похибки.

Практичне значення отриманих результатів.

Результати дисертаційного дослідження мають практичне значення і призначені для використання на підприємствах, які виконують ремонт деталей ДВЗ методами наплавлення та іншими способами відновлення зношених поверхонь. Результати дослідження мають також теоретичну цінність для закладів вищої освіти Міністерства освіти і науки України та використовуються в освітньому процесі Одеського національного морського університету при підготовці бакалаврів, магістрів та докторів філософії за спеціальностями: 131 – Прикладна механіка; 133 – Галузеве машинобудування; 135 – Суднобудування; 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка; 271 – Річковий та морський транспорт. Вони внесені до робочих програм курсів «Основи конструювання машин», «Технічне обслуговування і ремонт судових технічних засобів», «Організація та технологія судноремонту», «Основи триботехніки», «Міцність судових двигунів внутрішнього згорання», «Деталі машин», «Оперативна оцінка якості конструкторських рішень при проектуванні машин», «Прискорені методи випробувань деталей машин на опір втоми» і «Експериментальні методи випробувань деталей машин на опір втоми».

Особистий внесок здобувача.

Наукові положення, розробки та висновки дисертаційної роботи, які виносяться на захист, отримані автором самостійно. У дисертаційне дослідження зі статей, написаних у співавторстві, зараховані тільки результати, отримані автором особисто, або з безпосередньою його участю.

У статті [1] автору належить методика визначення точок перегинів і розривів кривої втоми при прискореному визначенні границі витривалості.

У статті [2] автору належить метод побудови кривої втоми при напруженнях, близьких до границі витривалості.

У статті [3] автору належить спосіб розрахунку точок перегину кривих втоми, виражених степеневим і показниковим рівняннями.

У статті [4] автору належить огляд і аналіз способів відновлення валів.

У статті [5] автору належить розрахунок граничних швидкостей зростання амплітуди напруження при прискорених випробуваннях елементів відновлених колінчастих валів ДВЗ на опір втоми.

У статті [6] автору належить порівняльна непряма оцінка границі витривалості відновлених колінчастих валів ДВЗ за результатами їх випробувань зі зростаючим навантаженням.

У статті [7] автору належить розрахунок координат точки перегину кривих втоми відновлених колінчастих валів ДВЗ.

У статті [8] автору належить ідея використання уточнюючого коефіцієнта відносної довговічності при оцінці втомної міцності відновлених колінчастих валів.

У статті [9] автору належить розрахунок руйнівних напружень за параметрами дволанкової похилої частини складеної кривої втоми.

У статті [10] автору належить розробка методу непрямої оцінки границі витривалості за результатами порівняльних випробувань.

Апробація результатів дисертації.

Основні положення і наукові результати дисертаційної роботи доповідалися на міжнародних, науково-практичних конференціях, нарадах і семінарах.

Публікації.

Основні результати дисертаційного дослідження опубліковані в 10 наукових роботах. З них: у спеціалізованих виданнях, рекомендованих Міністерством освіти і науки України - 6 робіт; в збірниках наукових праць, виданих за матеріалами науково-практичних конференцій - 4 роботи.

Обсяг і структура дисертації

Дисертація складається зі вступу, 4 розділів, висновків і списку використаних джерел з 110 найменувань і додатків. Загальний обсяг роботи - 160 с., в тому числі 137 с. основного тексту, 13 с. списку використаних джерел, 36 рисунків, 27 таблиць.

РОЗДІЛ 1

ВИБІРКОВИЙ ОГЛЯД І АНАЛІЗ СПОСОБІВ ВІДНОВЛЕННЯ ТА МЕТОДІВ ВИЗНАЧЕННЯ ГРАНИЦІ ВИТРИВАЛОСТІ ВІДНОВЛЕНИХ КОЛІНЧАТИХ ВАЛІВ ДВЗ

1.1 Види пошкоджень колінчастих валів ДВЗ і сучасні методи їх відновлення

Сучасні двигуни внутрішнього згоряння (ДВЗ) працюють при інтенсивних режимах експлуатації, що призводить до значного збільшення навантажень і, як наслідок, до виникнення як випадкових, так і закономірних відмов. У ДВЗ найчастіше відмови носять закономірний характер і виникають через зношування робочих поверхонь, тому проблема збільшення робочого ресурсу двигуна завжди є актуальною.

Практика показує, що граничні зношування 85% деталей не перевищують 0,3 мм і їх залишкові ресурси становлять 60% і більше [85]. Лише 20% деталей ДВЗ, що надходять на ремонт, підлягають остаточному вибракуванню. Інші деталі можна відновити, причому собівартість відновлення складе 15 ... 70% від собівартості їх виготовлення [1].

Колінчастий вал є однією з найдорожчих деталей двигуна. Як показує досвід ремонтних робіт, малогабаритні колінчасті вали дешевше замінити новими, а великогабаритні економічно доцільно відновлювати. При цьому їх відновлення дозволяє отримати економію матеріальних, виробничих і трудових ресурсів до 70%.

Колінчасті вали двигунів транспортних засобів виготовляють, як правило, з вуглецевих і легованих сталей або з високоміцного магнієвого чавуну. Корінні і шатунні шийки піддають гарту ТВЧ на глибину 1,5 ... 3 мм, досягаючи твердості шийок 50 ... 62 одиниць HRC [11].

В процесі експлуатації на колінчастий вал впливають: сила тертя, вібрації, знакозмінні навантаження і агресивне середовище. Ці фактори викликають нерівномірне зношування шатунних і корінних шийок; порушення якості поверхні шийок (задири, риски, корозія); механічні пошкодження (тріщини, дефекти різьби); прогин колінчастого вала, що призводить до порушення перпендикулярності осі вала до осі циліндра, внаслідок чого умови змащування сполучених поверхонь погіршуються, масляна плівка на поверхнях деталей, що труться, руйнується і виникає граничне або сухе тертя [39, 41].

Вивчення причин зношування колінчастих валів показує, що в більшості випадків вони виникають внаслідок втоми матеріалу або наявності в них внутрішнього напруження. Внутрішнє напруження може виникнути через контраст температур при наплавочній операції технологічного процесу відновлення великогабаритного колінчастого вала дизельного двигуна або через високі температури, що впливають на металопокриття колінчастого вала при його чорновій обробці шліфуванням [39].

Пошкодження, що виникають, усувають обробкою шийок під ремонтний розмір шляхом шліфування з подальшим поліруванням різними видами наплавлень або плазмовим напиленням. Прогин вала усувають пластичним деформуванням (правкою).

Основні методи відновлення валів, що застосовуються в ремонтному виробництві, можна умовно розділити на методи, що дозволяють відновити номінальний розмір і початкову геометрію валу і методи, які використовують відновлення під «ремонтний розмір», тобто під розмір, для якого існує можливість застосування «ремонтних» деталей [45 -47].

Нижче на рис. 1.1 показані найчастіші види пошкоджень колінчастого вала [10].

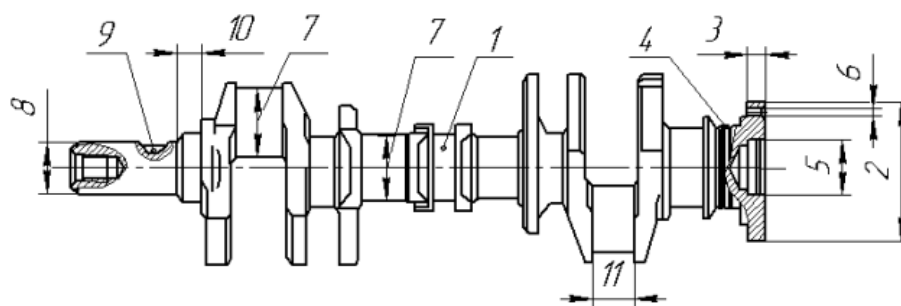


Рисунок 1. 1 – Основні пошкодження колінчастого вала: 1 - вигин вала; 2 - зношування зовнішньої поверхні фланця; 3 - биття торцевої поверхні фланця; 4 - зношування канавок для проходження мастила; 5 - зношування отвору під підшипник; 6 - зношування отворів під болти кріплення маховика; 7 - зношування корінних і шатунних шийок; 8 - зношування шийки під шестерню і маточину шківів; 9 - зношування шпоночної канавки по ширині; 10 - збільшення довжини передньої корінної шийки; 11 - збільшення довжини шатунних шийок

В даний час для відновлення зношених поверхонь колінчастих валів під номінальний розмір найчастіше використовують напilenня, наплавлення, гальванічне осадження і покриття полімерно-композитними матеріалами. Крім перерахованих методів, для відновлення порушеної геометрії валів застосовують також термопластичну механічну деформацію [12, 49].

Технологія напilenня полягає в нанесенні розплавленого металу на поверхню вала під високим тиском. При цьому за способом розплавлення металу розрізняють електродугове, газополум'яне, високочастотне, полум'яне і детонаційне напilenня. Основним недоліком всіх перерахованих видів напilenня є те, що покриття має низьку міцність зчеплення з основним металом. Головною перевагою є те, що при цьому не відбувається високий розігрів поверхні, а, отже, і не змінюється структура матеріалу вала, не виникає його викривлення, а також не знижуються характеристики опору втомі.

На відміну від напilenня, наплавлення здійснюється шляхом нанесення шару металу, що розплавляється безпосередньо на поверхні вала.

Розрізняють наплавку під шаром флюсу, в середовищі захисних газів, газову, вібродугову і електродугову. Технологія наплавлення дозволяє наносити шари металу практично будь-якої товщини. При наплавленні відбувається сильне і нерівномірне нагрівання поверхні вала, яке може призвести до викривлення і зміни структури поверхневого шару металу. Нанесений шар відрізняється високою твердістю, тому виникають труднощі в подальшій механічній обробці наплавленого шару. Ці фактори можна віднести до недоліків даного способу відновлення.

Гальванічне осадження представляє собою формування шару металу на відновлювальній поверхні шляхом електрохімічного осадження з електроліту. Даний спосіб характеризується такими перевагами як відсутність нагріву деталі і можливість нанесення шару різної товщини з будь-якого металу або їх комбінації з заданими властивостями.

Відновлення зношених поверхонь валів полімерно-композитними матеріалами полягає в формуванні на заздалегідь підготовленій поверхні шару полімерної композиції з подальшим її затвердінням. Цьому способу притаманні згадані вище переваги, але головним є те, що нанесений полімерний шар значно покращує триботехнічні характеристики посадочних поверхонь валу. При цьому, однак, слід мати на увазі, що границя витривалості валу знижується за рахунок зменшення діаметра металевої його частини.

Термопластична деформація представляє собою технологічний процес зміни геометричних розмірів під механічним впливом (осаду, витяжка, висадка, протягнення, правка і т. д.) попередньо розігрітого валу. За допомогою такого методу можна проводити правку осьових деформацій валів, а також усувати деякі зміни форми поверхонь. Цей спосіб обмежений у застосуванні через його технологічну недосконалість.

Відремонтовані колінчаті вали підлягають технічному контролю за такими параметрами [49].

- овальність і конусність корінних і шатунних шийок;

- биття вала по середній шийці;
- шорсткість поверхонь шийок;
- границя витривалості.

Крім того, необхідно щоб однойменні шийки були прошліфовані під один ремонтний розмір, і радіус кривошипа знаходився в заданих межах.

1.2 Специфіка методів, що використовують для порівняльної прискореної оцінки характеристик опору втомі колінчастих валів ДВЗ при їх ремонті

Процес ремонту колінчастих валів, по-перше, повинен включати вибір і відпрацювання технології відновлення, а, по-друге, проведення вибіркового контролю їх якості. У загальному випадку етапи технологічного процесу ремонту колінчастих валів представлено на рис.1.2.

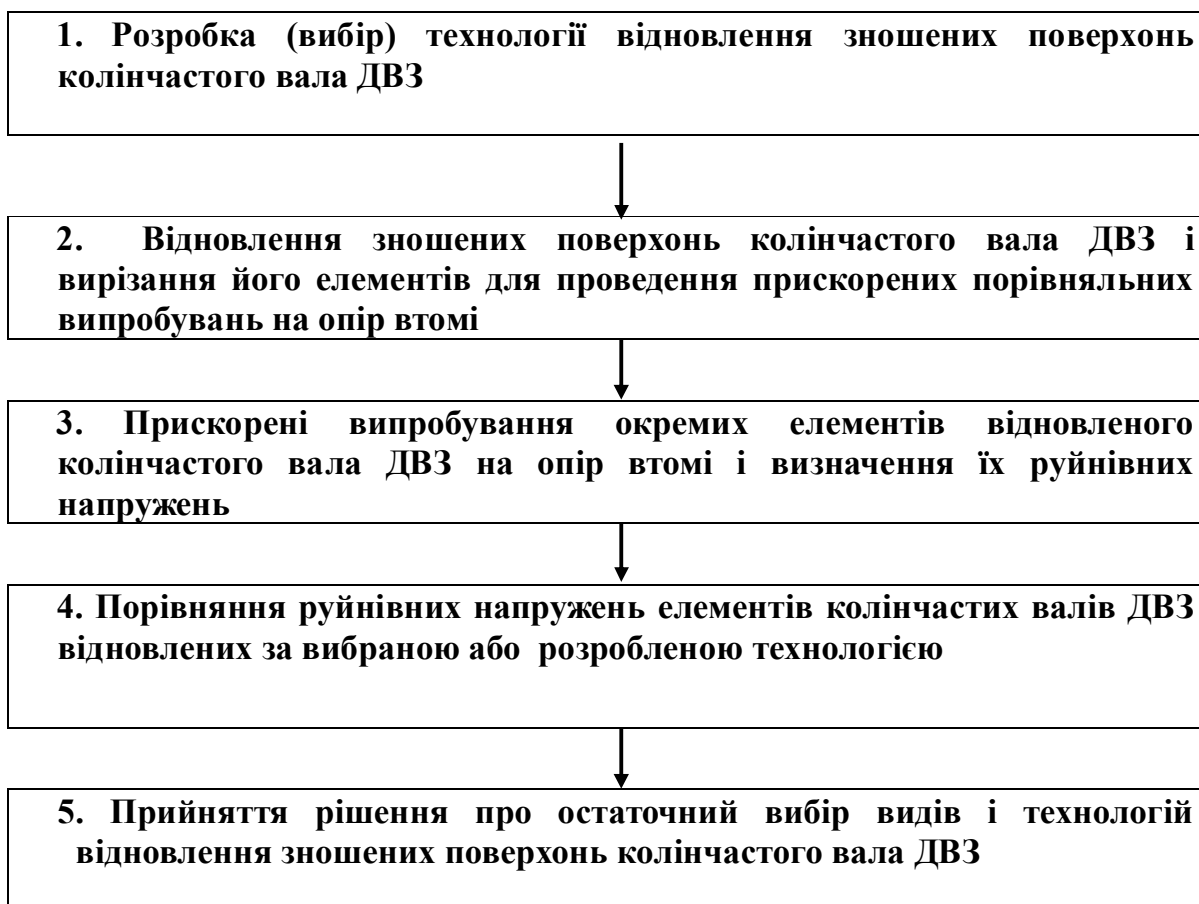


Рисунок 1.2. Етапи технологічного процесу ремонту колінчастих валів ДВЗ

Ці вимоги можуть бути забезпечені тільки за рахунок проведення експерименту. Оскільки колінчаті вали працюють при циклічному навантаженні, отже експеримент, повинен бути спрямований на перевірку характеристик опору втомі, в першу чергу границі витривалості.

Тривалість і трудомісткість втомних випробувань ускладнює процес ремонту і значно збільшує його час. Щоб уникнути цих несприятливих факторів на практиці використовують прискорені методи [5-10, 14-17, 20, 28-38, 52, 58-69, 65, 74-76, 78-82, 94-102, 104 - 109]. Існуючі прискорені методи випробування не є універсальними і в кожному конкретному випадку повинні перевірятися на можливість їх використання для конкретних деталей і умов їх експлуатації. Вибір того чи іншого методу базується на їх класифікації [27, 65]. Проведемо аналіз даних класифікацій стосовно проблеми випробування відновлених колінчастих валів.

У першій з них дано аналіз ознак, пов'язаних з режимами проведення випробувань, мінімально необхідною кількістю об'єктів і сутністю вихідних передумов. У другій класифікації є ще одна ознака - призначення. Відповідно до цієї ознаки розрізняють методи, що використовують для оцінки втомних характеристик тільки зразків і методи, які можна використовувати як для зразків, так і для натурних деталей. Очевидно, цю ознаку необхідно розширити, включивши в нього методи, призначені тільки для визначення порівняльних характеристик опору втомі. Ці методи сформувалися в окрему групу порівняно недавно і орієнтовані на порівняльну оцінку втомної міцності натурних деталей. Очевидно, ці методи можна використовувати і для зразків, а зразки можна розглядати як спрощений варіант деталі. Крім того, на зразках простіше і набагато дешевше здійснювати перевірку того чи іншого вибраного або розробленого методу.

Відповідно до розглянутих класифікацій, для вирішення завдань, пов'язаних з відпрацюванням технології відновлення колінчастих валів і контролю якості їх ремонту необхідні методи, які дозволять порівнювати границі витривалості відновлених валів між собою, або відновлених валів з

новими. Специфікою цих методів є те, що для них не є обов'язковим визначення абсолютних значень границь витривалості. Досить визначити наскільки ці величини (границі витривалості) відрізняються між собою. В цілому ряді випадків цього достатньо для вирішення конкретних технічних завдань. Наглядним прикладом тому може бути завдання з проведення порівняльного аналізу ефективності різних технологій відновлення колінчастих валів [29 - 35, 42, 45, 102, 103]. Порівняльні методи можуть бути прямими і непрямими. Прямі припускають безпосереднє визначення втомних характеристик об'єктів і їх подальше порівняння. У той же час непрямі цього не вимагають і в цьому їх основна перевага. Дане дисертаційне дослідження присвячена розвитку непрямого методу.

1.3 Використання похилих ділянок кривої втоми для оцінки границі витривалості відновлених колінчастих валів ДВЗ.

При класичному підході до оцінки опору втомі відновлених колінчастих валів необхідно визначити їх границі витривалості. В цьому випадку їх визначають стандартним способом - шляхом проведення тривалих випробувань. Однак, існують прискорені розрахункові і експериментально - розрахункові методи, які не вимагають безпосереднього визначення границі витривалості, а базуються на визначенні параметрів похилої ділянки кривої втоми для необхідної ймовірності руйнування. Це дозволить виключити, або зменшити експериментальну частину, і тим самим скоротити час проведення експерименту і матеріальні витрати.

Щоб побудувати похилу ділянку кривої втоми тим чи іншим способом необхідно мати математичну модель у вигляді рівняння з відповідними параметрами. В даний час запропоновано багато різних рівнянь, проте їх застосування в кожному конкретному випадку має свої особливості. Іншими

словами, вибір тієї чи іншої моделі кривої втоми залежить від розв'язання конкретних завдань.

Розглянемо деякі з існуючих моделей кривої втоми, які засновані на виборі формули для описання похилої ділянки кривої втоми і найчастіше використовуються як при обробці результатів випробувань, так і при розрахунковій оцінці втомної міцності об'єктів. (Далі під узагальнюючим терміном «об'єкти» будемо розуміти як конкретні деталі, так і їх окремі елементи, моделі або зразки).

Найбільш поширеною і найчастіше використовуваною моделлю кривої втоми є показникова. Рівняння цієї кривої в канонічній формі записують в наступному вигляді [65]

$$10^{\sigma/k} \cdot N = 10^{\sigma_R/k} \cdot N_G = 10^{\sigma_{dl}/k} = 10^{C_{II}} \quad \text{або} \quad 10^{\tau/k} \cdot N = 10^{\tau_R/k} \cdot N_G = 10^{\tau_{dl}/k} = 10^{C_I}, \quad (1.1)$$

де σ і τ - поточні нормальне і дотичне напруження; N - число циклів до руйнування; k і C_{II} параметри; σ_{dl} ; τ_{dl} ; σ_R і τ_R - початкові ординати кривої втоми і границі витривалості відповідно для випадків дії нормальних і дотичних напружень.

Оскільки порівняльні випробування відновлених колінчастих валів і їх окремих елементів в переважній кількості випадків проводять при дії нормальних напружень (при згині), то далі будемо обмежуватися лише формулою з σ_R .

Відповідно до цього рівняння похилу ділянку кривої втоми, можна представити у вигляді прямої лінії в координатах $\lg N - \sigma$ (рис. 1.3)

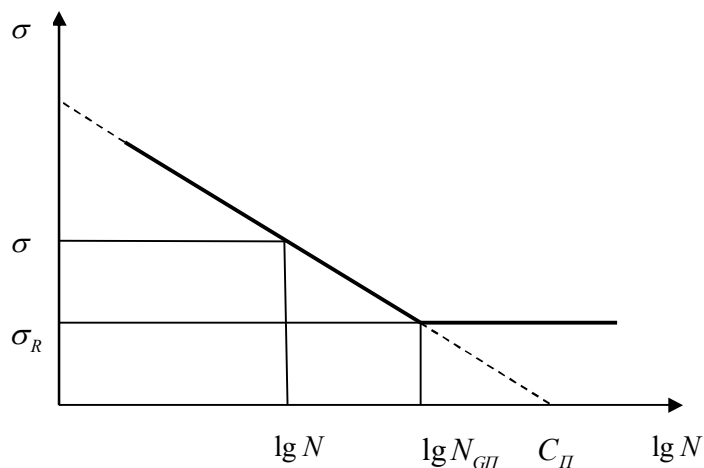


Рисунок 1.3 – Схематичне зображення кривої втоми, вираженої показниковим рівнянням

Крива втоми в напівлогарифмічних координатах проста, наглядна і добре узгоджується з експериментальними результатами випробувань відновлених колінчастих валів. Недоліком даної моделі можна вважати те, що в нижній своїй частині вона будується способом екстраполяції, і це не враховується при оцінці коефіцієнта кореляції.

Степенева модель похилої ділянки кривої втоми застосовується не рідше ніж показникова, в тому числі для апроксимації результатів випробувань відновлених колінчастих валів. Вона, як і показникова, має ті ж переваги і недоліки. Однак її відмінність від показникової моделі полягає в тому, що кут нахилу кривої суттєво залежить від границі витривалості, тобто існує чітко виражена залежність $m_c(\sigma_R)$. Теж саме можна сказати і про параметр C_c , залежність якого від σ_R також носить явно виражений характер. Завдяки цим залежностям були отримані кореляційні зв'язки між параметрами похилої ділянки і границею витривалості, які дозволили розробити цілий ряд методів прискореної оцінки характеристик опору втомі [65 - 65, 95-102]. Рівняння цієї моделі має вид [65]:

$$\sigma^{m_c} \cdot N = \sigma_R^{m_c} \cdot N = \sigma_{dC} = 10^{C_c}, \quad (1.2)$$

де m_C и C_C - параметри; σ_{dc} - початкова ордината

Схема розташування кривої втоми в координатах $\lg N$ - $\lg \sigma$ представлена на рис. 1.4.

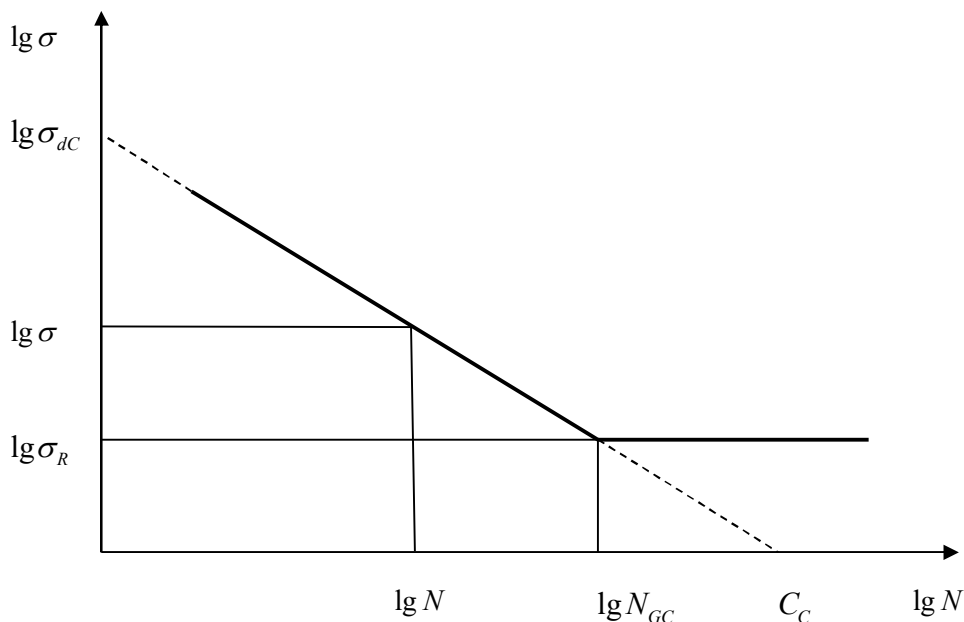


Рисунок 1.4 Схематичне зображення кривої втоми, вираженої степеневим рівнянням

Криві втоми в напівлогарифмічних і логарифмічних координатах майже однакові за формою. Кожна з них має дві прямолінійні ділянки: похилу і горизонтальну. З точки зору відповідності експериментальним даним випробувань відновлених колінчастих валів обидві ці моделі можна вважати рівноцінними. Однак прийнято вважати, що степенева модель зручніше для проведення розрахунків, а показникова - для графічної інтерпретації результатів експерименту. Параметри степеневого і показникового рівнянь m_C , C_C , k і C_{II} , являються кутовими коефіцієнтами (котангенсом і тангенсом кутів нахилу кривої до горизонтальної осі в логарифмічних і напівлогарифмічних координатах) і абсцисами точок перетину з віссю $\lg N$, проте, істотно відрізняються за величиною. Крім того, параметр k має розмірність напруження, а параметр m_C - ні. Початкові

ординати $\sigma_{дп}$ і $\lg \sigma_{дс}$ є координатами точок перетину продовжень похилих ділянок кривих втоми, і також істотно різняться між собою. При цьому параметр $\sigma_{дп}$, як і параметр k , має розмірність напруження. Близькими за величиною в цих двох моделях можна вважати абсциси точок перетину похилих і горизонтальних ділянок $\lg N_{дп}$ і $\lg N_{дс}$, хоча вони для однакових експериментальних даних завжди матимуть деяку відмінність.

Між параметрами степеневого і показникового рівнянь кривої втоми існують залежності, які отримані інтегральним методом [60].

$$k = \frac{\Delta \sigma_{зр}^2}{2 \left\{ C_C \Delta \sigma_{зр} - \frac{m_C}{\ln 10} [\sigma_{зр} (\ln \sigma_{зр} - 1) - \sigma_R (\ln \sigma_R - 1)] - \lg N_{зр.П} \Delta \sigma_{зр} \right\}}, \quad (1.3)$$

$$C_{П} = \frac{0,5 m_C \Delta \sigma_{зр}^2 + \Delta \sigma_{зр} \lg N_{зр.П} + \frac{1}{k} \frac{10^{\lg \sigma_{зр}} - 10^{\lg \sigma_R}}{\ln 10}}{\Delta \sigma_{зр}}, \quad (1.4)$$

де $\sigma_{зр}$, $N_{зр.С}$ і $N_{зр.П}$ - граничні напруження і довговічності до руйнування відповідно до степеневого і показникового рівнянь; $\Delta \sigma_{зр} = \sigma_{зр} - \sigma_R$.
Справедливий і зворотний перерахунок цих параметрів.

$$m_C = 2 \frac{C_{П} \Delta \sigma_{зр} - \lg N_{зр.С} \Delta \sigma_{зр} - \frac{1}{k} \frac{10^{\lg \sigma_{зр}} - 10^{\lg \sigma_R}}{\lg 10}}{\Delta \sigma_{зр}^2}, \quad (1.5)$$

$$C_C = \frac{\frac{\Delta \sigma_{зр}^2}{2k} + \frac{m_C}{\ln 10} [\sigma_{зр} (\ln \sigma_{зр} - 1) - \sigma_R (\ln \sigma_R - 1)] + \lg N_{зр.С} \Delta \sigma_{зр}}{\Delta \sigma_{зр}}. \quad (1.6)$$

Існують і інші підходи до перерахунку параметрів, однак вони менш точні, оскільки базуються на грубих припущеннях [65].

Третьою важливою за поширеністю моделлю кривої втоми є рівняння Вейбулла, яке має вигляд

$$(\sigma - \sigma_R)^{m_w} \cdot N = 10^{C_w}, \quad (1.7)$$

де m_w , C_w - параметри.

У більш загальному випадку це рівняння записується у вигляді:

$$(\sigma - \sigma_R)^{m_w} \cdot (N + B) = 10^{C_w}, \quad (1.8)$$

де B - параметр.

Рівняння Вейбулла асимптотичне і єдине для всієї кривої втоми. Воно представляється прямою лінією в координатах $\lg N$ - $\lg(\sigma - \sigma_R)$ (рис.1.5).

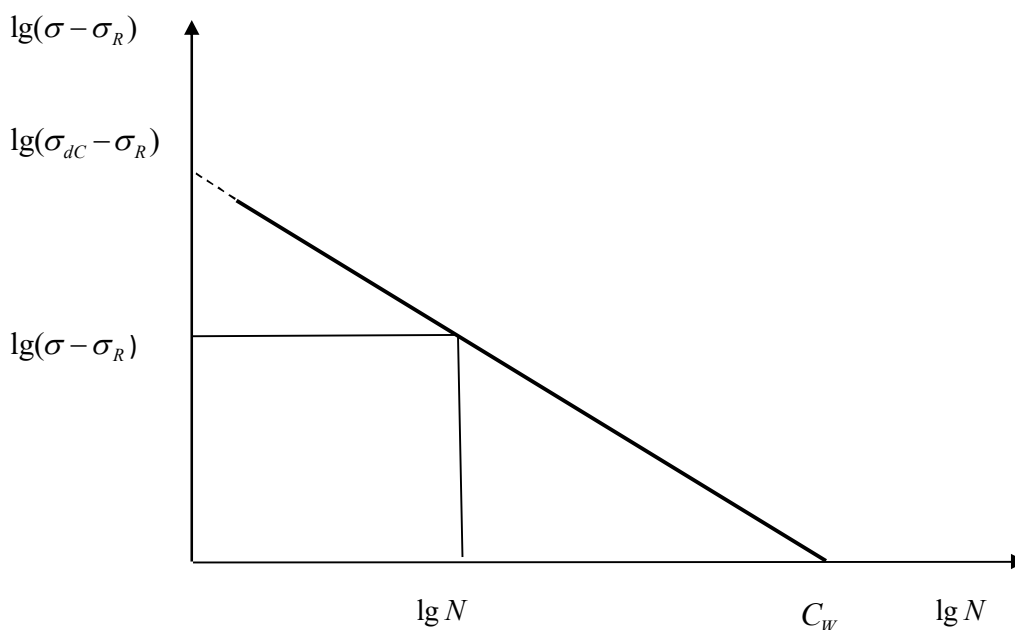


Рисунок 1.5 Схематичне зображення кривої втоми, вираженої рівнянням Вейбулла

У порівнянні з показниковим і степеневим рівняннями кривої втоми рівняння Вейбулла, як правило, має більш низький коефіцієнт кореляції, тому для описання кривих втоми відновлених колінчастих валів його застосовують рідше. Крім того, воно не дозволяє зображати сімейство кривих втоми на одному графіку. В роботі [23] було запропоновано модернізувати його за рахунок введення замість границі витривалості змінного параметра A . Цей параметр визначають методом ітерацій з умови отримання найвищого коефіцієнта кореляції. Модернізоване рівняння Вейбулла в цьому випадку записується так [27]

$$(\sigma - A)^{m_w} \cdot N = 10^{C_w}. \quad (1.9)$$

Параметри рівняння (1.7) пов'язані з параметрами степеневого і показникового рівнянь. Ці зв'язки отримані, як і залежності (1.3) - (1.6), на основі інтегрального методу і мають вигляд: [60]

$$m_w = 2 \frac{C_C \lg(\sigma_{zp} - \sigma_R - 10) - m_C \int_{\sigma_R+1}^{\sigma_{zp}} \frac{\lg \sigma}{\sigma - \sigma_R} d\sigma - \lg N_{zp.W} \lg(\sigma_{zp} - \sigma_R)}{\lg^2(\sigma_{zp} - \sigma_R)}; \quad (1.10)$$

$$C_w = \frac{0,5m_C [\lg \sigma_{zp} - \lg(\sigma_R + 1)]^2 + [\lg \sigma_{zp} - \lg(\sigma_R + 1)] \lg N_{zp.W} + D}{\lg \sigma_{zp} - \lg(\sigma_R + 1)}; \quad (1.11)$$

$$\text{де } D = m_w \int_{\sigma_R+1}^{\sigma_{zp}} \frac{\lg(\sigma - \sigma_R)}{\sigma} d\sigma.$$

$$m_W = \frac{2[\lg N_{G\Pi} \lg \Delta\sigma_{zp} - (\Delta\sigma_{zp} - 1)/(k \lg 10) - \lg \Delta\sigma_{zp} \lg N_{zp.W}]}{\lg^2(2\Delta\sigma_{zp})}; \quad (1.12)$$

$$C_W = \frac{\frac{\Delta\sigma_{zp}^2}{2k} + \Delta\sigma_{zp} \lg N_{zp.W} + \frac{m_W(\Delta\sigma_{zp} \lg \Delta\sigma_{zp} + 1)}{\ln 10}}{\Delta\sigma_{zp} - 1}; \quad (1.13)$$

$$k = \frac{\Delta\sigma_{zp}^2}{2 \left[C_W (\Delta\sigma_{zp} - 1) - \Delta\sigma_{zp} \lg N_{zp.\Pi} - \frac{m_W}{\ln 10} (\Delta\sigma_{zp} \ln \Delta\sigma_{zp} - \Delta\sigma_{zp} + 1) \right]}; \quad (1.14)$$

$$C_{\Pi} = \frac{0,5m_W \lg^2 \Delta\sigma_{zp} + \lg \Delta\sigma_{zp} \lg N_{zp.\Pi} + (\Delta\sigma_{zp} - 1)/(k \lg 10)}{\lg \Delta\sigma_{zp}} + \frac{\sigma_R}{k}, \quad (1.15)$$

де $N_{zp.W}$ - довговічність до руйнування відповідно до рівняння Вейбулла, що відповідає граничному напруженні σ_{zp} .

Всі три розглянуті моделі побудуємо в одній системі координат. Найбільш наочне їх зображення в координатах $\lg N - \lg \sigma$

(Рис.1.6)

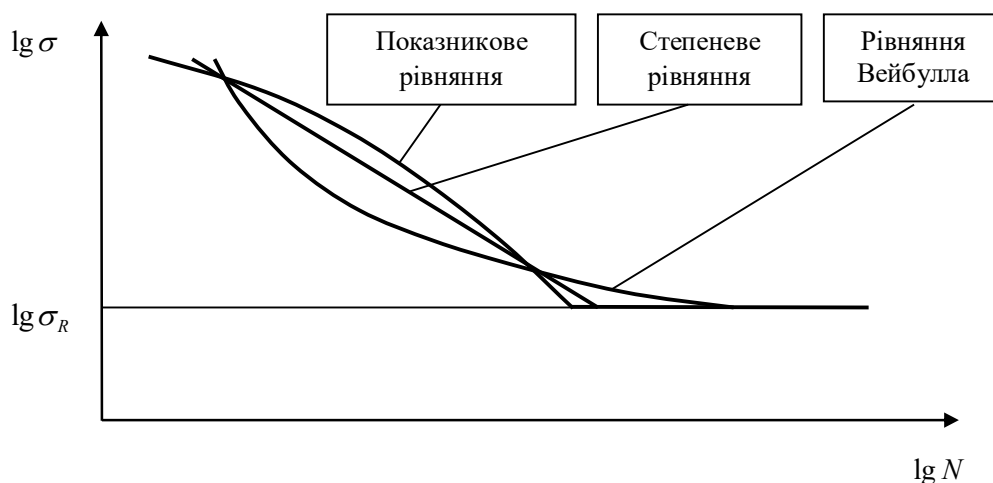


Рисунок 1.6 Схематичне зображення взаємного розташування кривих втоми

З наведеної схеми видно, що крива втоми, побудована відповідно до степеневому рівнянню займає середнє положення, і, як правило, саме це рівняння найближче до експериментальних даних випробувань відновлених колінчастих валів.

1.4 Аналіз методів, що базуються на використанні похилої ділянки кривої втоми та використовують для прискореного визначення границі витривалості відновлених колінчастих валів ДВЗ

Аналіз методів прискореного визначення границі витривалості, що базуються на випробуваннях зі зростаючим навантаженням і використовують параметри похилої ділянки рівняння кривої втоми можна зробити на основі класифікації запропонованої в роботі [27]. Акцентуємо увагу на тих методах, які розроблені в останні роки і використовують для порівняльної оцінки границі витривалості відновлених колінчастих валів.

Метод визначення границі витривалості, що базується на зв'язках параметрів степеневому рівнянню кривої втоми [50]. Розглянутий метод є

однією з модернізацій методу Локаті. Він базується на кореляційних залежностях параметрів степеневого рівняння кривої втоми від границі витривалості.

Ці залежності були отримані в результаті обробки великого масиву дослідних даних, включаючи результати випробувань зразків, моделей і реальних деталей з вуглецевих і легованих сталей з різними концентраторами напружень, різної термообробкою і способами зміцнення. В результаті були отримані наступні залежності параметрів m_C і C_C від границі витривалості σ_R [51]

$$m_C = f_C(\sigma_R) = a_C \sigma_R + b_C, \quad (1.16)$$

$$C_C = F_C(\sigma_R) = \alpha_C (m_C + 1) \lg \sigma_R + \beta_C, \quad (1.17)$$

де $a_C = 0,027$; $b_C = 1,4$; $\alpha_C = 0,997$; $\beta_C = 4,0 + 0,5(2,5 - \lg \sigma_R)^2$, при $\lg \sigma_R \geq 2,5$ $\beta_C = 4,0$.

На основі лінійної гіпотези накопичення втомних пошкоджень і розв'язання рівнянь (1.2), (1.16) і (1.17) отримано рівність для визначення границі витривалості [51]

$$\sum_{i=1}^p n_i / N_i = \sum_{i=1}^p n_i \cdot 10^{0,997(0,027+2,4)\lg \sigma_R + \beta - (0,027\sigma_R + 1,4)\lg \sigma} = 1, \quad (1.18)$$

де N_i – довговічність до руйнування на i -тому рівні навантаження; n_i – число циклів навантаження на i -тому рівні навантаження; p – число рівнів навантаження.

Модернізований метод Локаті заслуговує на особливу увагу тому, що з його допомогою можна моделювати різні режими віртуальних випробувань без проведення реального експерименту, а головне, що його можна використовувати для порівняльної оцінки границі витривалості відновлених колінчастих валів.

Перевага цього методу також полягає ще й в тому, що він в результаті модернізації перейшов з контрольного в основний і в модернізованому вигляді дозволяє визначати границю витривалості за результатами випробувань одного об'єкта. Іншими словами він дозволяє отримати індивідуальні характеристики опору втоми, властиві конкретному об'єкту.

Як недолік розглянутого методу слід відзначити його невисоку точність, зумовлену кореляційними залежностями (1.16) і (1.17), які мають середній ступінь щільності. Численні експерименти показали, що похибка методу може досягати 20% [65]. При цьому метод має широку сферу застосування і може бути використаний як для оцінки границі витривалості зразків, так і натурних деталей або їх моделей і окремих частин. Таким чином, за своїми характеристиками даний метод можна розглядати в якості одного з базових для подальшого вдосконалення.

Метод визначення індивідуальних значень границі витривалості за допомогою параметрів середньомовірної кривої втоми, вираженої модернізованим рівнянням Вейбулла [24-25]. Цей метод, як і розглянутий вище, може використовуватися для порівняльної оцінки границі витривалості відновлених колінчастих валів. Він базується на використанні модернізованого рівняння Вейбулла в якому границя витривалості замінена параметром (див. рівняння 1.9). Схема визначення границі витривалості за цим методом представлена на рис. 1.7.

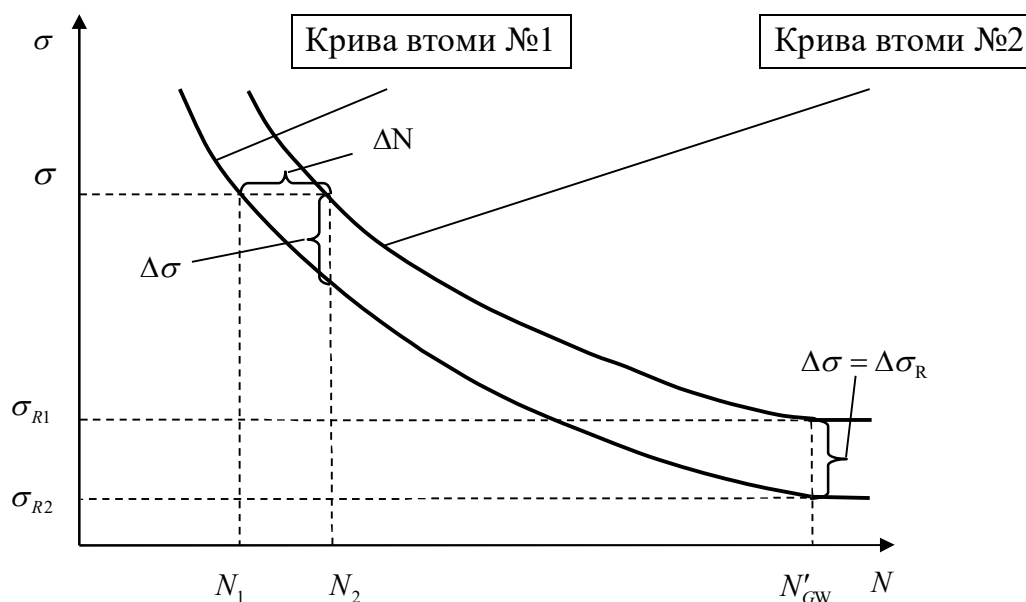


Рисунок 1.7 Схема визначення границі витривалості відповідно до методу, що базується на модернізованому рівнянні Вейбулла

На схемі прийняті наступні позначення: $\Delta\sigma$, $\Delta\sigma_R$ і ΔN - різниці напружень, границь витривалості і довговічностей між еквідистантними кривими втоми №1 і №2 відповідно; N_1 і N_2 - довговічності за кривим втоми №1 і №2, відповідні напруженню σ ; N'_{GW} - загальна абсциса точок перетину похилої і горизонтальної ділянок кривих втоми.

Будемо вважати, що криві втоми №1 і №2 належать відновленим колінчастим валам, причому параметри кривої втоми одного з них апріорі відомі. Без зміни логіки міркувань можна також прийняти, що порівняльний аналіз втомної міцності проводиться для випадку порівняння відновленого колінчастого валу і нового.

З метою отримання рівняння для визначення границі витривалості відновленого колінчастого валу було використано модернізоване рівняння Вейбулла виду (1.9), записане для кривих втоми №1 і №2 у вигляді [24]

$$(\sigma - A)^{m_{w1}} N_1 = (\sigma_R - A)^{m_{w2}} N_{GW} . \quad (1.19)$$

де m_{w1} і m_{w2} - параметри кривих втоми №1 і №2 виражених модернізованим рівнянням Вейбулла відповідно.

Рівняння (1.19) передбачає, що $\Delta\sigma = \Delta\sigma_R$ незалежно від рівня навантаження (це також видно з рис.1.9). Допускаючи рівність параметрів $m_{w1} = m_{w2} = m_w$, була отримана рівність[25]

$$\sigma_R = A + \left[\frac{(\sigma - A)^{m_w} \cdot N_1}{N_{GW}} \right]^{1/m_w} . \quad (1.20)$$

Перевагою розглянутого методу можна вважати його простоту і допустиму точність. Систематична похибка цього методу обумовлена заявленим вище припущенням ($m_{w1} = m_{w2} = m_w$), і за даними роботи [27] не перевищує 7%. До основного недоліку методу слід віднести те, що для його реалізації необхідно априорі знати параметри кривої втоми m_w і C_w одного з валів.

Метод визначення границі витривалості на основі гіпотези про рівність функцій розподілу логарифма довговічності до руйнування і границі витривалості [27]. Даний метод заснований на гіпотезі про рівність функцій розподілу логарифма довговічності до руйнування і границі

витривалості. Схема визначення границі витривалості відповідно до методу наведена на рис. 1.8.

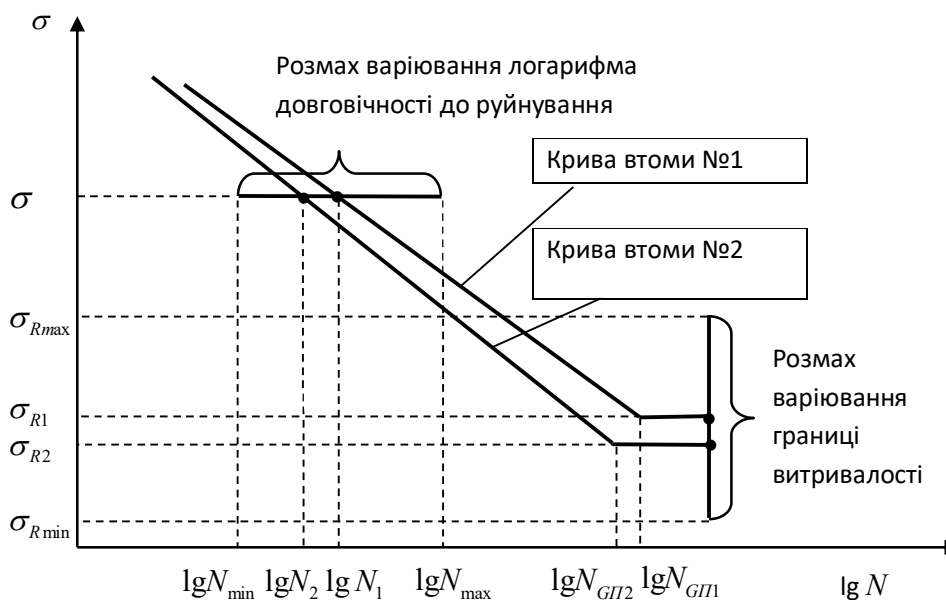


Рисунок 1.8 Схема визначення границі витривалості за методом, що базується на гіпотезі про рівність функцій розподілу логарифма довговічності до руйнування і границі витривалості

На схемі показані розмахи варіювання границі витривалості і довговічності до руйнування на рівні напруження σ . Вони обмежені відповідно величинами $\sigma_{R\min}$ - $\sigma_{R\max}$ і $\lg N_{\min}$ - $\lg N_{\max}$. Точками позначено розташування порівнювальних об'єктів на похилих ділянках кривих втоми в розподілах логарифма довговічності до руйнування і границі витривалості. Припускається, що розподіл логарифма довговічності до руйнування і границя витривалості відповідають нормальному закону розподілу.

Відповідно до методу, значення границі витривалості знаходиться за рівністю [27]

$$\sigma_{R_2} = \sigma_{R_1} + \frac{S_{\sigma_R} \cdot (\lg N_2 - \lg N_1)}{S_{\lg N}}, \quad (1.21)$$

де $S_{\lg N}$ і S_{σ_R} - середньоквадратичне відхилення логарифма довговічності до руйнування і границі витривалості відповідно. Залежність (1.21) можна виразити через коефіцієнт варіації логарифма довговічності до руйнування $\gamma_{\lg N}$, маючи на увазі, що $S_{\lg N} = \gamma_{\lg N} \cdot \lg N_1$

$$\sigma_{R_2} = \sigma_{R_1} + \frac{S_{\sigma_R} \cdot (\lg N_2 - \lg N_1)}{\gamma_{\lg N} \cdot \lg N}. \quad (1.22)$$

Перевагою розглянутого методу можна вважати його високу точність (систематична похибка не перевищує 5% [27]), а основним недоліком - необхідність в попередньому визначенні величин $S_{\lg N}$ і S_{σ_R} , за результатами випробувань репрезентативної вибірки. Крім того, він передбачає проведення випробувань тільки при стаціонарному навантаженні.

Метод порівняльної оцінки втомної міцності, що базується на визначенні довговічності до руйнування [29]. Цей метод передбачає проведення порівняльного аналізу втомної міцності за допомогою коефіцієнта відносної довговічності k_γ , величина якого визначається за формулою [30]

$$k_\gamma = \frac{\lg N_1 - \lg N_2}{\lg N_2 - \Delta \lg N}, \quad (1.23)$$

де $\Delta \lg N$ - величина переміщення точки перетину кривих втоми, яка визначається за залежністю

$$\Delta \lg N = \frac{m_{C1} C_{C2} - m_{C2} C_{C1}}{m_{C1} - m_{C2}}. \quad (1.24)$$

З урахуванням формули (1.24) залежність (1.23) має вигляд

$$k_\gamma = \frac{\lg N_1 - \lg N_2}{\lg N_2 - \frac{m_{C1} C_{C2} - m_{C2} C_{C1}}{m_{C1} - m_{C2}}}. \quad (1.25)$$

Метод передбачає, що розташування похилої ділянки кривої втоми з параметрами m_{C1} і C_{C1} відомо. За цими параметрами знаходять значення m_{C2} і C_{C2} . Це здійснюється штучним прийомом - еквідистантним зміщенням експериментальних даних вздовж осі ординат кривої втоми з параметрами m_{C1} і C_{C1} на величину $\Delta \sigma$. У свою чергу, величина $\Delta \sigma$ визначається шляхом розв'язання системи рівнянь, кожне з яких є степеневим рівнянням похилої ділянки кривої втоми з параметрами m_{C1} , C_{C1} і m_{C2} , C_{C2} .

Метод був розроблений для порівняльної оцінки деталей машин і механізмів, зокрема для проведення оперативного порівняльного аналізу втомної міцності нових і відновлених колінчастих валів ДВЗ. Основними перевагами методу можна вважати його високу точність (систематична

похибка не перевищує 7%), а також простоту проведення експерименту, що важливо при випробуваннях великогабаритних деталей. Його недоліком слід вважати те, що його використання можливе, тільки в разі, коли відома початкова крива втоми з параметрами m_{C1} і C_{C1} .

1.5 Характеристики режимів випробувань відновлених колінчастих валів ДВЗ на опір втоми зі зростаючим навантаженням

Особливістю методів, заснованих на зростаючому навантаженні, є та, що амплітуда напруження змінюється ступенево або безперервно в процесі проведення експерименту. У більшості випадків навантаження збільшують плавно або дискретно за лінійним законом. При такому навантаженні можливе тренування металу, тому в деяких методах пропонують поєднання зростаючого і спадного режимів [22, 27].

Прискорені методи випробування зі зростаючим навантаженням отримали велике поширення [65]. Причиною тому є те, що при зростаючому навантаженні відбувається перехід з області відсутності пошкоджень в область їх накопичення. Межею між цими областями і є границя витривалості. Даний факт дає можливість запропонувати ідеалізовану схему (без урахування розсіювання властивостей міцності) випробувань декількох об'єктів при однаковій швидкості безперервного зростання амплітуди напруження в наступному вигляді (рис. 1.9)

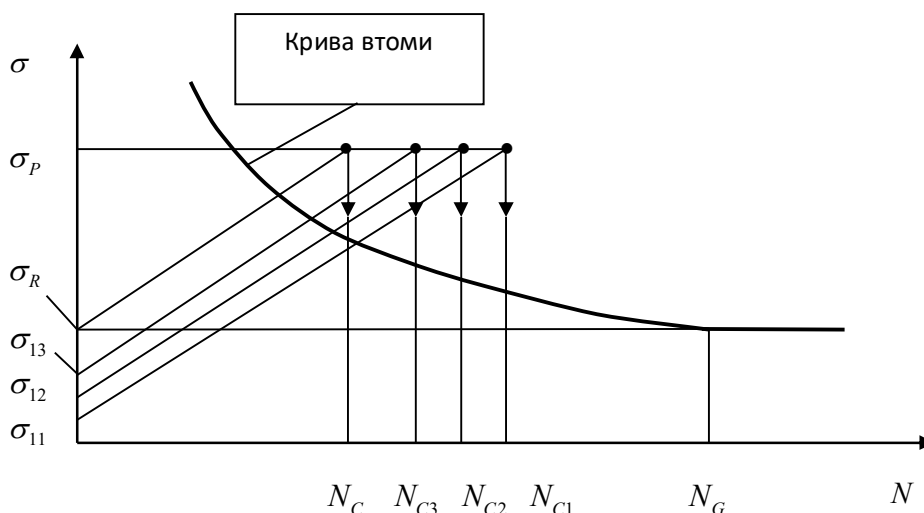


Рисунок 1.9 Ідеалізована схема випробувань об'єктів з однаковою швидкістю збільшення амплітуди напруження

На схемі використані наступні позначення: σ_{11} , σ_{12} , σ_{13} - початкові напруження; N_{C1} , N_{C2} , N_{C3} - відповідні сумарні довговічності до руйнування; N_C - сумарна довговічність до руйнування, що відповідає границі витривалості. Вертикальними стрілками на схемі позначено руйнування об'єктів.

У разі, коли значення σ_1 більше границі витривалості, руйнівне напруження збільшується, причому, чим більше це значення, тим більше буде величина руйнівного напруження. Таку закономірність легко обґрунтувати, використовуючи лінійну гіпотезу накопичення втомних пошкоджень і рівняння Вейбулла. У загальному вигляді формула для визначення руйнівного напруження буде мати вигляд [39]

$$\sigma_P = \sigma_R + \left[\alpha(m_W + 1)10^{C_W} + (\sigma_1 - \sigma_R)^{m_W + 1} \right]^{\frac{1}{m_W + 1}}. \quad (1.26)$$

Параметри цього рівняння невідомі і залежать, в основному, від виду матеріалу. Для групи чорних металів їх можна вважати сталими, відповідно рівними $m_w = 1,0$ и $C_w = 7,0$. Іншими словами, будемо вважати рівняння Вейбулла уніфікованим. У цьому випадку формула (1.26) набуде вигляду [39]

$$\sigma_p = \sigma_R + \left[2\alpha 10^7 + (\sigma_1 - \sigma_R)^2 \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (1.27)$$

Нижче, в табл. 1.1 наведено розрахунок руйнівних напружень за залежністю (1.27) при значенні границі витривалості $\sigma_R = 100$ МПа, (характерне для відновлених колінчастих валів ДВЗ) і швидкості збільшення амплітуди напруження $\alpha = 300 \text{ Па/цикл}$ за умови, коли всі початкові напруження перевищують границю витривалості. Величина цієї швидкості прийнята за рекомендаціями [27], на основі вимог до тривалості випробувань і точності оцінки руйнівних напружень. Значення σ_1 будемо збільшувати поступово на 20 МПа, починаючи від границі витривалості.

Таблиця 1.1

Результати розрахунку руйнівних напружень відповідно до уніфікованого рівняння Вейбулла при $\alpha = 300 \text{ Па/цикл}$ і $\sigma_1 > \sigma_R$.

σ_1 , МПа	120	140	160	180	200
σ_p , МПа	180,00	187,18	197,98	211,36	226,49

За результатами розрахунку руйнівних напружень відповідно до уніфікованого рівняння Вейбулла побудовано графік залежності $\sigma_R(\sigma_1)$ (рис. 1.10)

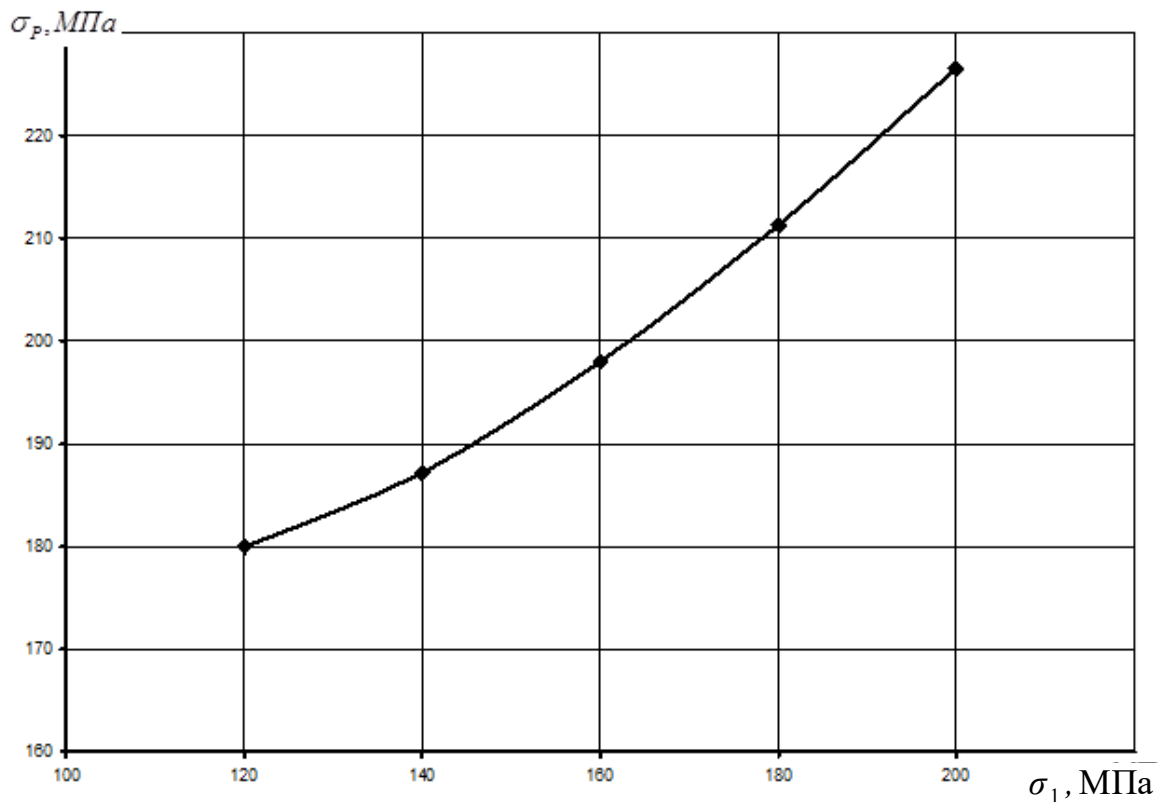


Рисунок 1.10 Розрахункова залежність руйнівного напруження від початкового навантаження при $\sigma_R = 100$ МПа

На використанні залежності руйнівного напруження від початкового базується один з методів прискореного визначення границі витривалості, в якому значення σ_R визначається як абсциса точки перетину похилої і горизонтальної ділянок залежності $\sigma_R(\sigma_1)$, як це показано на рис 1.11 [65]

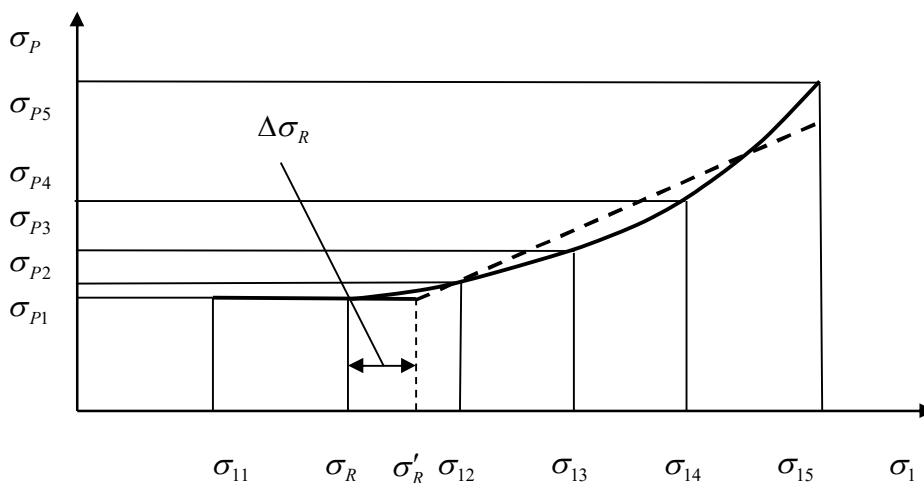


Рисунок 1.11 Визначення границі витривалості за залежністю $\sigma_R(\sigma_1)$

Прямолінійну (горизонтальну) ділянку залежності $\sigma_R(\sigma_1)$ будують за результатами випробувань при початковому напруженні $\sigma_1 \leq \sigma_R$, а криволінійну (похилу) - при $\sigma_1 > \sigma_R$.

В роботі [27] запропоновано при наближеній оцінці границі витривалості криволінійну ділянку замінити прямолінійною, проте в цьому випадку границя витривалості буде визначена із систематичною похибкою $\Delta\sigma_R = \sigma'_R - \sigma_R$.

Таким чином, вибір початкового напруження має принципове значення з точки зору розробки прискорених методів оцінки характеристик опору втомі. З іншого боку, важливо відзначити, що вибір, в ході експерименту, низьких значень σ_1 призводить до збільшення тривалості експерименту. Щоб тривалість експерименту була мінімальною, початкові напруження вибирають близькими до границі витривалості, орієнтуючись на результати випробувань аналогічних колінчастих валів або на дані попередніх

розрахунків. Якщо границя витривалості попередньо оцінити складно, то початкове напруження можна прийняти рівним нулю. В цьому випадку результати випробувань будуть застосовані.

Другою важливою характеристикою режиму проведення випробувань є швидкість збільшення амплітуди напруження. В даний час, як вже зазначалося вище, використовують ступеневе і плавне збільшення навантаження при лінійному характері її зростання. В першому випадку $\alpha = d\sigma/dN$, а в другому - $\alpha = \Delta\sigma/\Delta N$ (де $\Delta\sigma$ і ΔN - приріст напруження і тривалості випробувань на кожному ступені напруження, крім останньої).

Ступеневий режим навантаження простіше з точки зору його технічної реалізації. У той же час, плавний - зручніше при проведенні розрахунків. Авторами роботи [65] запропонований перерахунок руйнівних напружень ступеневого і плавного режимів на основі гіпотези лінійного накопичення втомних пошкоджень і ступеневого рівняння кривої втоми. Так, руйнівне напруження σ_{pnl} при плавному навантаженні було запропоновано визначати за експериментально встановленим руйнівним напруженням σ_{pct} при ступеневому навантаженні за допомогою однієї з формул [65]

$$\sigma_{pnl} = \left[\sigma_1^{m_C+1} + (m_C + 1) \left(\Delta\sigma \sum_{i=1}^{p-1} \sigma_i^{m_C} + \alpha \sigma_{pct}^{m_C} n_p \right) \right]^{1/(m_C+1)}, \quad (1.28)$$

$$\sigma_{pnl} = \left[\left(\sigma_{pct} - 0,5\Delta\sigma \right)^{m_C+1} + (m_C + 1) \alpha \sigma_{pct}^{m_C} n_p \right]^{1/(m_C+1)}, \quad (1.29)$$

$$\sigma_{pnl} = \sigma_{pct} + \Delta\sigma(1/a - \xi), \quad (1.30)$$

де ξ - коефіцієнт, що відображає особливості процесів накопичення втомних пошкоджень перед руйнуванням на рівні $\sigma_{рст}$. Коефіцієнт ξ приймають рівним 0,5 [65]. Так як напруження $\sigma_{рпл}$ належить інтервалу $\sigma_{рст} \pm 0,5\Delta\sigma$, то формула є наближеною, але простою і дає задовільну точність оцінки напруження $\sigma_{рпл}$ [65].

Можливість переходу від ступеневого режиму навантаження до плавного дозволяє, в подальшому, опускати індекси «пл» і «ст» при руйнівному напруженні σ_p .

Очевидно, помилка розрахунку буде зростати при розширенні діапазону міцності колінчастих валів ДВЗ і віддалення реальних характеристик їх міцності від середніх кореляційних, а початкових напружень від границі витривалості.

1.6 Оцінка границі витривалості відновлених колінчастих валів ДВЗ на основі випробувань лабораторних зразків

Економічна доцільність змушує шукати шляхи оцінки характеристик опору втомі реальних деталей на основі даних випробувань лабораторних зразків. Дана проблема існує і у випадку з випробуванням колінчастих валів ДВЗ. З цієї причини великого поширення набула статистична теорія подібності втомного руйнування, що дозволяє визначати функцію розподілу границі витривалості натурних деталей з урахуванням їх розмірів і конструкції [76, 85-87]. В якості критерія подібності втомного руйнування прийнято використовувати відношення L / G , де L - периметр (або частина периметра) робочого перерізу деталі, що прилягає до зони дії максимальних

напружень σ_{max} ; G - відносний градієнт першого головного напруження. З цієї теорії випливає, що якщо значення цього критерія у деталей різної форми і розмірів рівні, то і функції розподілу їх границь витривалості також рівні. Таким чином, з'являється можливість визначати границі витривалості натурних деталей, що відповідають заданій ймовірності руйнування, використовуючи характеристики втоми зразків випробування яких не викликає ускладнень.

Експериментальна перевірка показала, що для певних умов роботи деталей статистична теорія подібності втомного руйнування дає задовільні результати. Однак, слід враховувати, що прийняті допущення (нехтування впливом другого і третього компонентів головних напружень, впливом довжини деталі і деяких інших факторів), а також похибки, обумовлені складністю розрахункового визначення відношення L / G для деталей складної форми, обмежують область застосування розробленої теорії та, в деяких випадках, знижують ефективність її практичного застосування.

Здатність деталей чинити опір втомному руйнуванню залежить не тільки від їх конструкції та механічних властивостей, але і від характеру навантажень що зазнають деталі, тому натурні випробування дозволяють уникнути тих проблем, які обумовлені побудовою моделі самої деталі, але проблеми моделювання експлуатаційних режимів навантаження залишаються при цьому не вирішеними.

Спрощене моделювання експлуатаційних режимів навантаження, передбачає заміну їх стаціонарним режимом і, отже, вносить певну похибку в розрахунки нестационарно навантажених конструкцій, тому в даний час велике значення надається вивченню характеристик опору втомі в умовах механічної напруженості, близької до експлуатаційної. Слід також зазначити, що в цій галузі досліджень існує багато невирішених питань, що відносяться

до обґрунтування методики складання детермінованих випробувальних програм. Так, наприклад, відомо, що більшість амплітуд напружень спектрів, отриманих на основі статистичного аналізу експлуатаційної напруженості конструкцій, розташовані нижче початкової границі витривалості і що тільки незначна їх частина знаходиться на одному рівні або вище неї. Відомо також, що границя витривалості матеріалу завжди більша ніж у виготовленої деталі.

Ефективна економія часу досягається шляхом форсування режимів проведення випробувань за напруженням. Однак, тут виникають додаткові труднощі пов'язані із забезпеченням подібності шкідливої дії експлуатаційних спектрів навантажень і програм, які виконують випробувальні машини. Так, складання форсованих програм, реалізація яких при випробуванні зразків давала б можливість досліджувати закономірності накопичення втомних пошкоджень в натурних деталях, ускладнюється тим, що параметри кривих втоми матеріалу і готових деталей різні. На практиці найбільшого поширення набуло блокове програмування, що передбачає варіювання напружень за дискретною багатоступінчастою схемою.

У зв'язку з тим, що параметри кривих втоми різні, просте збільшення амплітуд напружень, пропорційних відношенню початкових границь витривалості, не дає позитивних результатів, так як при цьому істотно змінюється характер розподілу інтенсивності накопичення ушкоджень за етапами блоку що формується. Більш прийнятною вважається методика складання еквівалентних програм, що базується на припущенні про те, що вплив розглянутих вище конструктивних і технологічних факторів на характеристики опору втомі як при стаціонарних, так і при нестаціонарних режимах навантаження практично однаковий. В цьому випадку достатньо мати криві втоми, отримані при стаціонарному навантаженні. Ці криві використовують для обчислення навантажень і тривалості їх дії для кожного

етапу блоку. Кожен етап блоку забезпечує подібність розподілу відносних пошкоджень для зразків і натурних деталей в межах всього діапазону реалізованих програмою напружень. Необхідно, однак, мати на увазі, що висновок розрахункових залежностей, що використовуються для таких обчислень, оснований на припущенні про достовірність гіпотези лінійного додавання накопичених втомних пошкоджень. Численні експериментальні дослідження показують, що таке припущення може бути прийнято тільки для обмеженого числа випадків.

При моделюванні експлуатаційних режимів навантаження додаткові труднощі виникають у зв'язку з вибором методу схематизації випадкових процесів і побудови відповідних спектрів. В даний час застосовуються багато із запропонованих методів, однак обґрунтованість їх не очевидна. Поки важко з повною підставою рекомендувати той чи інший підхід до складання еквівалентних випробувальних програм, тому остаточний результат програмних випробувань на втому завжди залежить не тільки від механічних властивостей досліджуваної конструкції, але, в якійсь мірі, і від початкових умов, які були прийняті при моделюванні експлуатаційних навантажень в кожному окремому випадку. Отже, хоча програмні випробування дають більш повне уявлення про поведінку деталей в умовах нестационарного навантаження, але питання моделювання навантаження конструкцій потребує продовження експериментальних досліджень.

В підсумку можна зробити висновок про наступне.

На сучасному етапі розвитку теорії подібності втомного руйнування її недоцільно використовувати для порівняльної оцінки границі витривалості відновлених колінчастих валів ДВЗ. Однак, випробування колінчастих валів можна замінити випробуванням лабораторних зразків при перевірці і відпрацюванні методів прискорених випробувань, як існуючих, так і тих, що розробляються.

1.7 Особливості натурних випробувань і оцінка характеристик опору втомі відновлених колінчастих валів ДВЗ

Відомо, що характеристики опору втомі матеріалів і натурних деталей (їх моделей і окремих частин), виготовлених з цього матеріалу, істотно різні. Якщо цю різницю оцінювати по відношенню до границі витривалості гладких лабораторних зразків і готових деталей, зокрема, відновлених колінчастих валів ДВЗ, то вона становить 4,5 [11, 21-22]. Слід також зазначити, що розвиток втомних тріщин і подальший їх розвиток в натурних деталях відбувається набагато раніше, ніж в зразках, коли тріщина з'являється після вичерпання значної частини свого ресурсу. Відмінність характеристик опору втомі матеріалів і реальних деталей пояснюється впливом різних факторів, обумовлених геометрією, технологією виготовлення і умовами експлуатації.

Особливості випробувань натурних деталей обумовлені різноманітністю їх розмірів і форм, які визначають не тільки міцність деталей, але і їх жорсткість. Якщо для зразків однакової міцності діапазон жорсткостей порівняно невеликий, то для рівноміцних, але різних в конструктивному відношенні натурних деталей жорсткості можуть бути істотно різними.

При підготовці натурних випробувань необхідно забезпечити руйнування деталі в місцях найбільшої експлуатаційної напруженості. При цьому необхідно враховувати кріплення деталі і вплив пошкоджень з боку затискних пристроїв, особливо в зонах концентрації напружень, які вони викликають.

При натурних випробуваннях місця кріплення деталей передбачені їх конструкцією, тому часто буває важко уникнути поломок в затискачах. При цьому слід мати на увазі, що характер розподілу експлуатаційних напружень в небезпечних перерізах деталі може визначатися не тільки її конструкцією, але і жорсткістю елементів що з'єднуються. У зв'язку з цим при натурних випробуваннях виникає необхідність в попередньому моделюванні напружено-деформованого стану, так як недотримання експлуатаційного характеру розподілу напруження за небезпечним перерізом деталі можемо отримати неправильне уявлення про її несучу здатності.

Певні труднощі викликають питання, пов'язані з вивченням кінетики втомного руйнування деталей, оскільки тріщини втоми можуть розвиватися в недоступних місцях, наприклад, в закритих порожнинах зварних конструкцій. Це вимагає розробки нових методів спостереження за розвитком тріщин і їх реєстрації.

Крім зазначених труднощів підготовки та проведення натурних випробувань існують ще й організаційні проблеми, пов'язані з підбором необхідної кількості кондиційних деталей і придбанням відповідного випробувального обладнання. Особливо складна організація випробувань на втому великогабаритних конструкцій і деталей, для руйнування яких необхідні громіздкі випробувальні комплекси.

У ряді випадків подолати зазначені труднощі можна шляхом випробування не всієї конструкції, а тільки найбільш слабкого її елемента. Так, наприклад, відомо, що найбільш слабким елементом багатоопорних колінчастих валів двигунів внутрішнього згоряння є щоки, експлуатаційні руйнування яких викликаються при дії згинного моменту. З огляду на високу вартість і габарити колінчастого вала, його випробування замінюють випробуваннями окремих колін, вирізаних з готової деталі. Вирізка елементів здійснюється таким чином, що місця очікуваних руйнувань, а саме, щоки з галтельними переходами до шатунним і корінним шийок, залишаються без

будь-яких змін. Це дозволяє з одного вала отримати кілька колін з практично однаковими щоками і використовувати для вирізки вали, забраковані по другорядним дефектам, що не впливають на міцність щік.

У деяких випадках, щоб уникнути вирізання конструктивних елементів з готового колінчастого вала його елементи виготовляють спеціально, дотримуючись при цьому всіх технологічних вимог креслення вихідної конструкції. Слід, однак, мати на увазі, що при виготовленні таких спеціальних елементів поза усталеного виробничого потоку масового або серійного виробництва вплив деяких технологічних факторів, що не піддається моделюванню, залишається неврахованим, що певним чином відображується на механічних властивостях об'єкта випробувань і, в кінцевому рахунку знижує достовірність одержаних результатів. Так, границі витривалості литого багатоопорного колінчастого вала, отримані в результаті випробування колін, в одному випадку вирізаних з готової деталі, а в іншому випадку - спеціально відлитої і відпрацьованої поза виробничим потоком, можуть виявитися суттєво різними навіть при самому ретельному виконанні всіх вимог до креслення [11].

У випадках, коли випробування натурних великогабаритних деталей технічно нездійсненні, а їх конструкція виключає можливість вирізки окремих, найбільш напружених елементів, то в таких випадках випробування проводять над моделями цих деталей, виконаних в меншому масштабі, стосовно до можливостей наявного або проєктованого для цієї мети випробувального устаткування.

Існують різні підходи до моделювання натурних деталей і конструкцій. Дотримання геометричної подібності при проєктуванні моделі значно змінює розподіл напружень по перерізу і змінює об'єми матеріалу що піддають напруженню. Вплив «слабкої ланки» стає при цьому іншим, а випробування моделей дає завищене уявлення про міцність оригіналу [11, 70 -73].

Фактором, що визначає несучу здатність конструкції в основний період її роботи, тобто, до появи першої втомної тріщини, є відносний градієнт напружень, тому, якщо ставиться завдання визначення параметрів кривої втоми вала за початком руйнування, найбільш обґрунтованим слід вважати моделювання, яке передбачає подібність навантаження поверхневих шарів матеріалу моделі і оригіналу. При неоднорідному напруженому стані (наприклад при згині) умова подібності навантаження може бути записана у вигляді рівності відносних градієнтів напруження моделі і деталі [11]

$$\left(\frac{d\sigma}{dy} \frac{1}{\sigma_{\max}} \right)_{\text{мод}} = \left(\frac{d\sigma}{dy} \frac{1}{\sigma_{\max}} \right)_{\text{дет}}, \quad (1.31)$$

де $\frac{d\sigma}{dy}$ - градієнт напруження; σ_{\max} - найбільше напруження в перерізі.

Геометрична подібність моделі не забезпечує рівність відносних градієнтів напружень, тому вона (подібність) не може бути дотримана, наприклад, для валів шляхом зміни тільки розмірів [11].

Для дотримання подібності навантаження поверхневих шарів матеріалу необхідно міняти не тільки розміри валів, а й їх конструкцію шляхом введення концентратора напружень. Відповідний розрахунок форми виточки дозволяє підібрати потрібні розміри і виконати умову рівності відносних градієнтів.

Разом з тим при вирішенні питання про доцільність планування випробування моделей слід мати на увазі, що такі випробування не повністю усувають проблеми, пов'язані з масштабним фактором. Дотримання подібності навантаження поверхневих шарів моделі і натурної конструкції тільки частково нейтралізує його вплив на результати випробувань, так як вплив неоднорідності самого матеріалу залишається при цьому все ж таки

значним. Крім того, роль неоднорідності матеріалу в зменшенні границі витривалості деталі помітно підвищується зі зменшенням інтенсивності концентрації напружень. Слід також мати на увазі, що при проектуванні і виготовленні моделей, навіть в тих випадках, коли вони в конструктивному відношенні дуже близькі до оригіналу, не всі її властивості, що впливають на міцність, можливо моделювати. Як і при виготовленні зразків, тут не можуть бути відтворені поля залишкових напружень деталі, пластичні деформації, викликані її правкою, ливарні або зварювальні дефекти та ін. При виготовленні моделей неможливо відтворити всі особливості, властиві виробничому потоку в масовому або серійному виробництві валів. Стосовно до вивчення втомного руйнування і живучості, подібність навантаження тонкого поверхневого шару, має другорядне значення, так як тут вирішальними стають інші фактори, зокрема розподіл експлуатаційних напружень по всьому об'єму конструкції, передісторія навантаження і т.д.

Розгляд наведених вище факторів, що знижують міцність реальних валів в порівнянні з міцністю матеріалу, з якого вони зроблені, і аналіз відповідних шляхів підвищення інформативності результатів випробувань на опір втомі лабораторних зразків і малогабаритних моделей дозволяють зробити висновок, що заміна випробувань самої деталі будь-якими іншими випробуваннями або розрахунками завжди пов'язана зі зменшенням точності визначення її втомних характеристик. Таким чином, в тих випадках, коли вирішується питання про міцність конкретної деталі і коли випробування її технічно можливе, не слід уникати випробування деталі і шукати шляхи їх заміни більш простими дослідженнями.

Результати натурних випробувань, не мають численних помилок непрямого визначення властивостей валів і передбачають моделювання тільки зовнішніх видів експлуатаційних силових і інших видів впливів, є найбільш надійною основою при вирішенні численних завдань, пов'язаних з оцінкою втомної міцності відновлених колінчастих валів ДВЗ. Цей висновок актуальний як для визначення характеристик опору втомі в загальному

випадку, так і для окремого випадку, коли проводиться тільки порівняльний аналіз границь витривалості.

1.8 Висновки

1. Колінчасті вали ДВЗ працюють при інтенсивних режимах експлуатації, що призводить до закономірного зношування їх робочих поверхонь.

2. Практика показує, що лише 20% колінчастих валів ДВЗ, що надходять у ремонт, підлягають остаточному вибраковуванню, решту можна відновити. При цьому собівартість відновлення колінчастих валів ДВЗ становить 15 ... 70% від собівартості їх виготовлення.

3. Вивчення причин поломок колінчастих валів показує, що в більшості випадків вони виникають унаслідок втоми матеріалу або наявності в них внутрішніх напружень. Внутрішні напруження можуть виникнути через контраст температур при наплавочній операції технологічного процесу відновлення колінчастого вала, або через високі температури, що впливають на його металопокриття при чорновій обробці шліфуванням.

4. Для порівняльної оцінки характеристик опору втомі відновлених колінчастих валів ДВЗ раціонально використовувати методи прискорених випробувань. При цьому для вирішення даного завдання можна використовувати методи непрямого порівняння границі витривалості.

5. Основними складовими при плануванні прискорених випробувань відновлених колінчастих валів ДВЗ на опір втомі зі зростаючим навантаженням є вибір початкового навантаження і величини швидкості збільшення амплітуди навантаження.

6. Характеристики опору втомі відновлених колінчастих валів ДВЗ визначають безпосередньо за результатами їх випробувань, або за результатами випробувань їх моделей або окремих елементів.

РОЗДІЛ 2

РОЗРОБКА МЕТОДУ НЕПРЯМОГО ПОРІВНЯННЯ ГРАНИЦІ ВИТРИВАЛОСТІ ВІДНОВЛЕНИХ КОЛІНЧАСТИХ ВАЛІВ ДВЗ

2.1 Непряма порівняльна оцінка границі витривалості відновлених колінчастих валів ДВЗ на основі результатів їх випробувань зі зростаючим навантаженням

Аналіз прискорених методів показав, що в якості порівнюваних параметрів при оцінці втомної міцності відновлених колінчастих валів ДВЗ можна приймати як границю витривалості, так і довговічність до руйнування. При цьому порівняння довговічностей до руйнування доцільно використовувати в тих випадках, коли, об'єкти майже не відрізняються за втомною міцністю і мають близькі границі витривалості, що знаходяться, як правило, в загальній зоні розсіювання. Незалежно від обраного параметра для проведення порівняльного аналізу, експеримент планують як прискорений або скорочений.

Два цих терміна розглядаються, як рівноцінні в контексті оперативних методів визначення характеристик опору втомі. Ці поняття розрізняються умовно тим, що при прискорених випробуваннях скорочується час експерименту, а при скорочених - як час, так і кількість випробовуваних об'єктів. Найчастіше ці поняття не розмежовують і вважають експеримент прискореним, не акцентуючи уваги на те, за рахунок чого досягається прискорення.

В основі прискорених методів визначення характеристик опору втомі можуть бути різні схеми проведення експерименту. Зокрема, в деяких з них використовують принцип збільшення частоти навантаження, в інших - випробування проводять при стаціонарному навантаженні при високому рівні напруження, в-третьох, випробування проводять із збільшенням

амплітуди навантаження. При цьому об'єкти випробувань доводять до остаточного руйнування, появи тріщини, або випробують їх при заданому базовому числі циклів. В даному випадку розробка нового підходу буде базуватися на методах, заснованих на випробуваннях з лінійно зростаючим навантаженням з доведенням об'єктів до остаточного руйнування. При цьому сумарна довговічність до руйнування, що фіксується під час експерименту, буде використовуватись для визначення величини руйнівних напружень σ_p , яку в цьому випадку визначають за формулою:

$$\sigma_p = \sigma_1 + \alpha n_c, \quad (2.1)$$

де σ_1 - початкове напруження; α - швидкість збільшення амплітуди напруження; n_c - сумарне число циклів до остаточного руйнування.

Формула (2.1) отримана на основі схеми лінійного навантаження об'єктів, яка представлена на рис. 2.1.

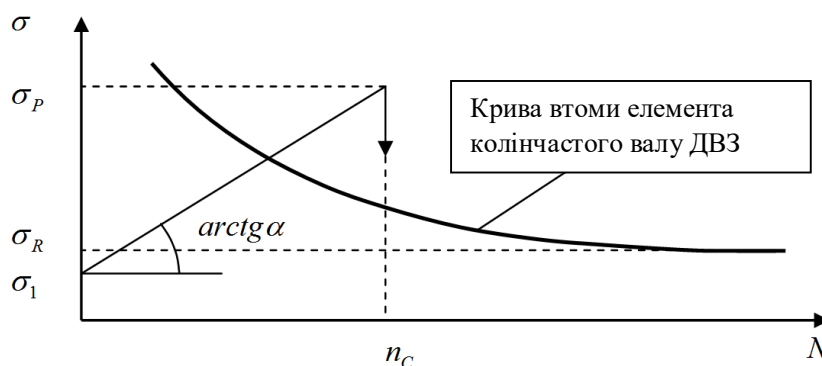


Рисунок 2.1. Схема проведення випробувань при лінійно зростаючій амплітуді напружень

Розглянемо можливість використання руйнівних напружень σ_p в якості характеристики за допомогою якої можна проводити порівняльний аналіз втомної міцності відновлених колінчастих валів ДВЗ. Схема проведення випробувань, в якій для порівняння втомної міцності елементів можуть використовуватися величини руйнівних напружень, представлена на рис. 2.2. Вона побудована для випадку випробування двох елементів колінчастих валів ДВЗ при однаковій швидкості збільшення навантаження α від різних початкових напружень σ_{11} і σ_{12} (хоча їх можна приймати і однаковими). Ключовою умовою при складанні даної схеми є те, що ці величини приймаються заздалегідь нижче границі витривалості.

Визначимо співвідношення між границями витривалості σ_{R1} і σ_{R2} та руйнівними напруженнями σ_{p1} і σ_{p2} , користуючись кореляційними залежностями між середньоймовірною границею витривалості і параметрами похилої ділянки кривої втоми, вираженої степеневим рівнянням і рівнянням Вейбулла. При цьому розглянемо випадок, коли параметри похилої ділянки кривої втоми є фіксованими ($m_w = 1$ і $C_w = 7,0$), а також, коли вони пов'язані з границею витривалості наступними кореляційними залежностями [36].

$$m_w = f_w(\sigma_R) = \frac{1}{a_{w1}\sigma_R^{0,01} - b_{w1}} = \frac{1}{5,254\sigma_R^{0,01} - 5,038} - 1; \quad (2.2)$$

$$C_w = F_w(\sigma_R) = \lg \frac{(\alpha_{w1}\sigma_R + \beta_{w1})^{m_w+1}}{m_w + 1} = \lg \frac{(7,029\sigma_R + 3599)^{m_w+1}}{m_w + 1}, \quad (2.3)$$

де a_{w1} , b_{w1} , α_{w1} , β_{w1} - сталі коефіцієнти.

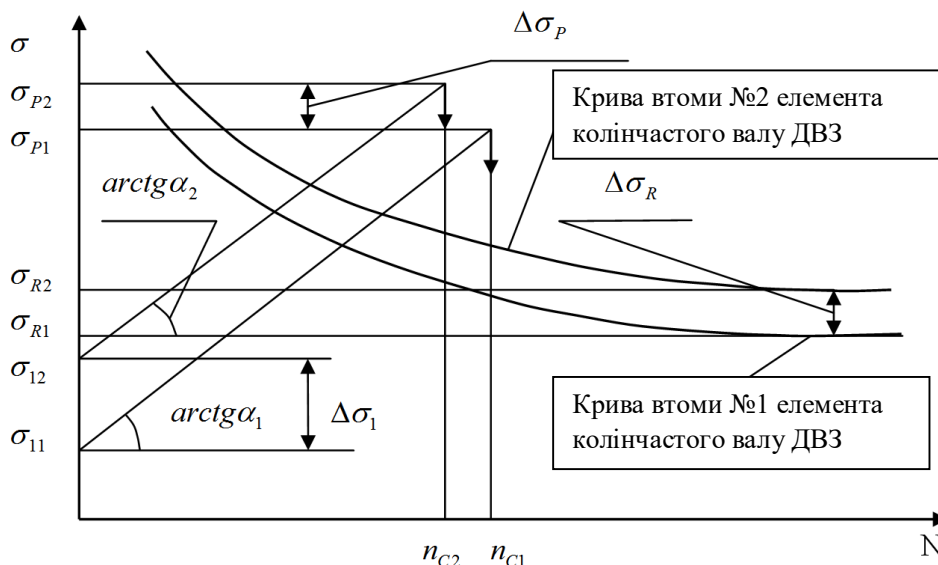


Рисунок 2.2 Схема проведення порівняльних випробувань двох елементів колінчастих валів ДВЗ при однаковій швидкості збільшення амплітуди напруження від різних початкових рівнів навантаження

Ці залежності отримані шляхом статистичної обробки репрезентативної вибірки результатів експерименту, і точно так як і залежності (1.16) і (1.17) їх можна застосувати для сталей і чавунів.

Руйнівні напруження σ_{p1} і σ_{p2} визначимо за допомогою лінійної гіпотези додавання накопичених пошкоджень, яку для випадку плавного збільшення амплітуди напруження представимо у вигляді

$$a = \int_0^{n_c} \frac{dn}{N} = \frac{1}{\alpha} \int_{\sigma_1}^{\sigma_p} \frac{d\sigma}{N}, \quad (2.4)$$

де a - сума накопичених пошкоджень.

Таким чином, з урахуванням вищенаведених залежностей, величини руйнівних напружень для степеневого рівняння і рівняння Вейбулла можуть бути визначені за формулами [39]:

$$\sigma_p^{WV} = \sqrt{2 \cdot 10^7 \alpha} + \sigma_R; \quad (2.5)$$

$$\sigma_p^W = [\alpha(m_W + 1)10^{C_W}]^{\frac{1}{m_W+1}} + \sigma_R; \quad (2.6)$$

$$\sigma_p^C = [\alpha(m_C + 1)10^{C_C} + \sigma_R^{m_C+1}]^{\frac{1}{m_C+1}}, \quad (2.7)$$

де σ_p^{WV} , σ_p^W і σ_p^C - руйнівні напруження, знайдені на основі уніфікованого рівняння Вейбулла (зі сталими параметрами m_{WV} і C_{WV}), рівняння Вейбулла зі змінними параметрами m_W і C_W , а також степеневого рівняння зі змінними параметрами m_C і C_C відповідно.

Для проведення розрахунку за допомогою даних формул використаємо нормальний закон розподілу границі витривалості і методом генерування випадкових чисел визначимо по 10 значень σ_R , представивши їх у вигляді варіаційних рядів. Розрахунки проведемо за формулами (2.5) - (2.7) для середніх границь витривалості $\bar{\sigma}_R = 100, 200, 300, 400, 500$ МПа і однаковою швидкістю збільшення навантаження ($\alpha = 300$ Па/цикл). Ця величина швидкості, як вказано в 1 розділі, близька до максимально допустимої і в той же час, вона гарантовано забезпечує руйнування елементів в багатоцикловій області.

Крім того, додатково визначимо величину σ_p^{CW} як середнє значення між величинами σ_p^C і σ_p^W (Табл. 2.1).

Таблиця 2.1

Результати розрахунку руйнівних напружень за залежностями (2.5) - (2.7)

$\bar{\sigma}_R = 100, \text{ МПа}$				
$\sigma_{Ri}, \text{ МПа}$	$\sigma_p^C, \text{ МПа}$	$\sigma_p^W, \text{ МПа}$	$\sigma_p^{WV}, \text{ МПа}$	$\sigma_p^{CW}, \text{ МПа}$
1	2	3	4	5
83,7	159,6	189,2	161,1	174,4

Продовження табл. 2.1

1	2	3	4	5
87,1	164,0	191,3	164,6	177,7
88,9	166,2	192,5	166,4	179,4
94,5	173,1	196,2	171,9	184,7
96,4	175,5	197,6	173,9	186,6
96,8	176,0	197,8	174,2	186,9
99,3	179,1	199,6	176,6	189,4
101,8	182,2	201,4	179,2	191,8
108,8	190,7	206,5	186,2	198,6
114,2	197,3	210,7	191,7	204,0
Середні значення	176,4	198,3	174,6	187,4
$\bar{\sigma}_R = 200$ МПа				
σ_{Ri} , МПа	σ_P^C , МПа	σ_P^W , МПа	σ_P^{wy} , МПа	σ_P^{cw} , МПа
172,0	266,0	259,8	249,5	262,9
187,1	283,5	273,5	264,6	273,5
191,3	288,3	277,3	268,7	282,8
193,6	291,0	279,5	271,1	285,3
197,0	294,9	282,6	274,4	288,8
197,0	294,9	282,6	274,5	288,8
200,2	298,6	285,5	277,6	292,1
202,5	301,2	287,7	280,0	294,5
207,2	306,6	292,1	284,6	299,4
211,0	310,9	295,6	288,4	303,3
Середні значення	293,6	278,0	273,3	285,8
$\bar{\sigma}_R = 300$ МПа				
294,8	405,3	376,0	372,3	390,7
297,7	408,6	378,9	375,2	393,8
298,8	409,8	379,9	376,3	394,9

Продовження табл. 2.1

1	2	3	4	5
300,6	411,7	381,7	378,0	396,7
301,7	413,0	382,7	379,1	397,9
303,7	415,2	384,8	381,2	400,0
307,3	419,2	388,2	384,7	403,7
308,3	420,3	389,3	385,8	404,8
314,1	426,7	394,9	391,5	410,8
323,2	436,7	403,8	400,6	420,3
Середні значення	416,6	386,0	482,5	401,4
$\bar{\sigma}_R = 400$ МПа				
387,3	507,0	467,3	464,7	487,5
387,9	507,7	467,9	465,4	487,8
σ_{Ri} , МПа	σ_P^C , Мпа	σ_P^W , МПа	σ_P^{wy} , МПа	σ_P^{CW} , МПа
393,7	514,0	473,7	471,1	493,9
393,8	514,1	473,8	471,3	494,0
396,4	516,9	476,4	473,9	496,7
397,5	518,2	477,5	475,0	497,9
398,5	519,2	478,5	476,0	498,9
405,7	527,1	485,7	483,2	506,4
407,3	528,8	487,3	484,8	508,1
413,3	535,2	493,2	490,7	514,2
Середні значення	518,8	478,1	475,6	498,5
$\bar{\sigma}_R = 500$ МПа				
483,5	611,0	563,7	561,0	587,4
492,1	620,1	572,2	569,5	596,2
494,0	622,2	574,2	571,4	598,2
498,7	627,3	579,0	576,2	603,2
504,2	633,2	584,5	581,7	608,9

Продовження табл. 2.1

1	2	3	4	5
504,7	633,6	584,9	582,1	609,1
505,5	634,5	585,8	583,0	610,2
506,6	635,5	586,7	583,8	611,1
507,8	637,0	588,1	585,3	612,6
510,1	639,5	590,4	587,6	615,0
Середні значення	629,4	581,0	578,2	605,2

З метою з'ясування закономірностей зміни руйнівних напружень і границь витривалості проведемо їх порівняльну оцінку за трьома показниками: за середнім значенням, їх розмахів варіювання та дисперсій. Розмах варіювання руйнівних напружень і границь витривалості будемо визначати як різницю відповідних максимальних і мінімальних значень для кожного з варіаційних рядів (табл. 2.2).

Таблиця 2.2

Розрахункові значення розмахів варіювання границь витривалості і руйнівних напружень

$\bar{\sigma}_R$, МПа	$(\sigma_{R10} - \sigma_{R1})$, МПа	$(\sigma_{P10} - \sigma_{P1})^C$, Мпа	$(\sigma_{P10} - \sigma_{P1})^W$, МПа	$(\sigma_{P10} - \sigma_{P1})^{WY}$, МПа	$(\sigma_{P10} - \sigma_{P1})^{CW}$, МПа
100	30,5	37,7	21,6	30,5	29,6
200	39,0	44,9	58,1	39,0	40,4
300	28,4	29,6	27,8	28,4	29,6
400	26,0	27,1	25,9	26,0	26,7
500	26,6	28,5	26,8	26,6	27,6

Значення дисперсій границі витривалості і руйнівних напружень визначимо за такими формулами [83]. Результати розрахунку зведемо в окрему таблицю (табл. 2.3).

$$S_{\sigma_R}^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\sigma_{R_i} - \bar{\sigma}_R)^2; \quad (2.8)$$

$$S_{\sigma_P}^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\sigma_{P_i} - \bar{\sigma}_P)^2, \quad (2.9)$$

де n - кількість випробуваних елементів.

Таблиця 2.3

Розрахункові значення дисперсій границь витривалості $S_{\sigma_R}^2$ і руйнівних

напружень $S_{\sigma_P}^2 C, S_{\sigma_P}^2 W, S_{\sigma_P}^2 WY$ и $S_{\sigma_P}^2 CW$

$\bar{\sigma}_R$, МПа	$S_{\sigma_R}^2$, МПа ²	$S_{\sigma_P}^2 C$, МПа ²	$S_{\sigma_P}^2 W$, МПа ²	$S_{\sigma_P}^2 WY$, МПа ²	$S_{\sigma_P}^2 CW$, МПа ²
100	90,0	137,1	45,0	90	91,1
200	121,5	161,6	102,8	121,5	132,2
300	73,0	89,5	70,1	72,9	79,8
400	70,7	83,5	70,3	70,7	76,9
500	71,3	81,8	72,2	71,3	77,0

Як видно з таблиці 2.2 різниця розмахів варіювання руйнівних напружень може бути суттєвим, зокрема, якщо порівнювати між собою величини $(\sigma_{P10} - \sigma_{P1})^C$ і $(\sigma_{P10} - \sigma_{P1})^W$. У той же час абсолютні відхилення різниць $(\sigma_{R10} - \sigma_{R1})$ і $(\sigma_{P10} - \sigma_{P1})^{CW}$ знаходяться в межах 1 МПа для всього прийнятого діапазону зміни границі витривалості. Останнє порівняння слід вважати більш коректним, оскільки величини $(\sigma_{P10} - \sigma_{P1})^{CW}$ отримані знаходженням середнього арифметичного руйнівних напружень, знайдених по кореляційним залежностям параметрів рівняння Вейбулла і степеневому рівнянню.

Однорідність рядів дисперсій визначимо за критерієм Хартля [83].

$$F_{\max} = S_{\max}^2 / S_{\min}^2, \quad (2.10)$$

де S_{\max}^2 і S_{\min}^2 максимальне і мінімальне значення дисперсій розглянутих величин. Розрахункові значення F_{\max} , знайдені за формулою (2.10) для розглянутих границь витривалості відповідно рівні: 1,5; 1,6; 1,3; 1,2 і 1,1. Вони значно менші табличних значень F_{\max} для рівнів значущості $\alpha = 0,05$ і $0,01$. Таким чином, однорідність рядів дисперсій границь витривалості і руйнівних напружень, наведених в табл. 2.3, підтверджується для всіх значень σ_R .

Середні значення руйнівних напружень максимально відрізняються один від одного на 13,6; 7,4; 7,9; 8,5 і 8,9 відсотків відповідно для границь витривалості 100, 200, 300, 400 і 500 МПа (рис. 2.3).

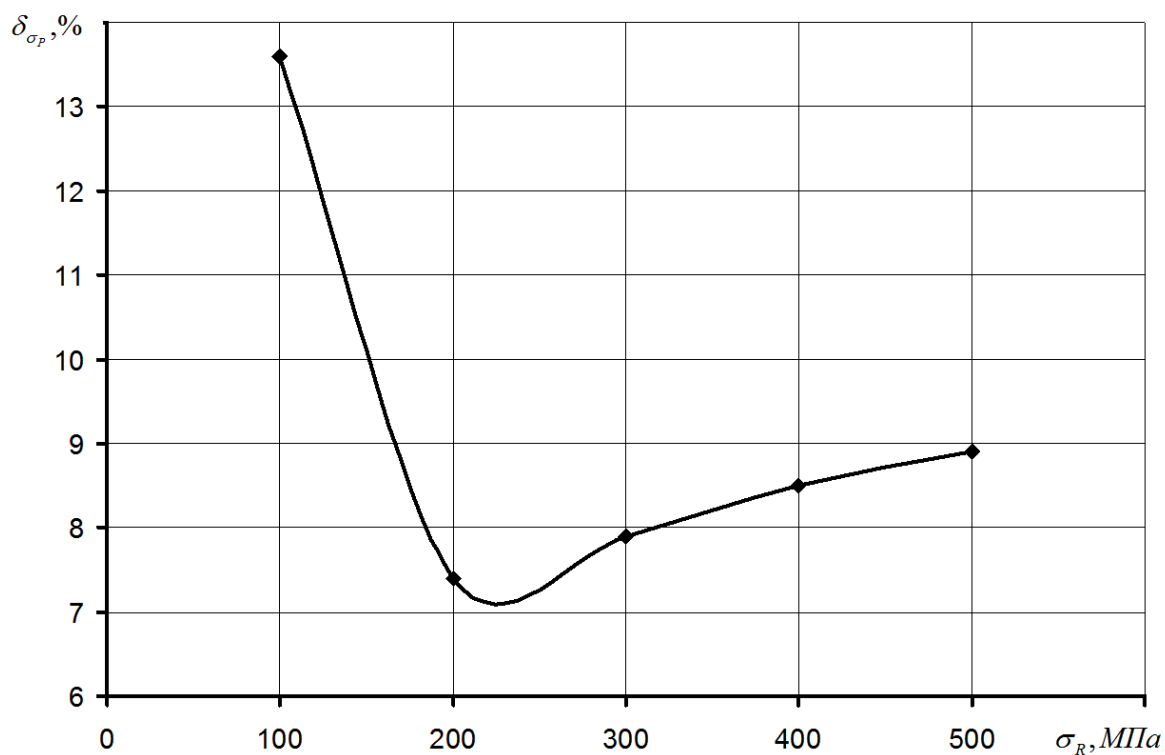


Рисунок 2.3 Залежність відхилень середніх значень руйнівних напружень від границі витривалості

Наведений вище графік має мінімум, який знаходиться в діапазоні значень границь витривалості 200 - 300 МПа. Така поведінка пояснюється тим, що кореляційні залежності (1.16) - (1.17) і (2.2) - (2.3) мають найбільшу відповідність один одному при значеннях границь витривалості, що входять в цей діапазон.

Проведені розрахунки показали, що порівняльну оцінку границі витривалості відновлених колінчастих валів можна проводити непрямим способом порівнюючи її з руйнівним напруженням при випробуваннях з лінійно зростаючим навантаженням від початкових напружень, які не перевищують границю витривалості.

2.2 Використання кореляційних залежностей між параметрами кривої втоми і границею витривалості при розрахунковій оцінці руйнівних напружень відновлених колінчастих валів ДВЗ

Використання кореляційних залежностей між параметрами похилої ділянки кривої втоми і границею витривалості дозволяє визначати руйнівні напруження для відновлених колінчастих валів ДВЗ за допомогою розрахунку. Це дає можливість проводити віртуальний експеримент і визначати закономірності їх зміни в залежності від обраних режимів навантаження (початкового напруження і швидкості збільшення амплітуди напруження).

Однозначно віддати перевагу тим чи іншим кореляційним залежностям складно. Щоб виключити помилки при встановленні закономірностей зміни руйнівних напружень, слід розглядати різні варіанти кореляційних залежностей, отримані для різних моделей кривої втоми. Для зниження ймовірності помилки при розрахунку руйнівних напружень варіанти кореляційних залежностей доцільно застосовувати одночасно. Особливо, це важливо в тих випадках, коли розрахунки відповідно до кореляційних рівнянь

призводять до суперечливих результатів. Як приклад розглянемо саме такий випадок, коли різні кореляційні рівняння призводять до різної тенденції зміни абсциси точки перелому кривих втоми N_{GC} і N_{GP} степеневого і показникового рівнянь.

Величину $\lg N_{GC}$ в координатах $\lg N - \lg \sigma$, з урахуванням залежностей (1.16) і (1.17), визначимо з рівності [54]

$$\lg N_{GC} = \varphi(\sigma_R) = [m_C(a_C - 1) + \alpha_C] \lg \sigma_R + \beta_C, \quad (2.11)$$

де параметри a_C , b_C , α_C і β_C визначені в Розділі I (див. формули 1.16 і 1.17).

Для параметрів кривої втоми, вираженої показниковим рівнянням, отримані кореляційні залежності для сталевих об'єктів між величиною $\lg N_{GP}$ і границею витривалості при симетричному згині σ_{-1} [13]:

- для вуглецевих сталей

$$\lg N_{GP} = \varphi_{II}(\sigma_{-1}) = (\alpha_{II}\sigma_{-1} + \beta_{II})/k = (0,43\sigma_{-1} + 289,6)/k; \quad (2.12)$$

- для легованих

$$\lg N_{GP} = (1,48\sigma_{-1} - 33,5)/k; \quad (2.13)$$

- для вуглецевих і легованих

$$\lg N_{GP} = (2,11\sigma_{-1} + 132,5)/k, \quad (2.14)$$

де σ_{-1} - границя витривалості при симетричному циклі зміни напруження; α_{II} , β_{II} - емпіричні коефіцієнти; k - параметр.

Використовуючи залежності (2.11) і (2.14), визначимо величини $\lg N_{GP}$ і $\lg N_{GC}$ для інтервалу значень границі витривалості 100 - 500 МПа (табл. 2.5).

Параметри степеневого і показникового рівнянь визначимо також іншим шляхом, а саме через параметри рівняння Вейбулла. Для цього скористаємося залежностями параметрів m_W і C_W від границі витривалості (2.2) і (2.3). Значення параметрів m_W і C_W розрахуємо за допомогою формул (2.15) і (2.16) для діапазону значень границь витривалості 100 - 500 МПа (табл. 2.4)

$$m_W = \frac{1}{5,254\sigma_R^{0,01} - 5,038} - 1, \quad (2.15)$$

$$C_W = \lg \frac{(7,029\sigma_R + 3599)^{m_W+1}}{m_W + 1}. \quad (2.16)$$

Таблиця 2.4

Розрахункові значення параметрів m_W і C_W , визначені за формулами (2.15) і (2.16)

σ_R , МПа	100	200	300	400	500
m_W	1,157	0,993	0,907	0,850	0,809
C_W	7,504	7,073	6,883	6,776	6,711

Розрахунок параметрів m_W і C_W в параметри m_C , C_C степеневого рівняння, а також k і C_{II} показникового рівняння, здійснимо за допомогою методу найменших квадратів, визначивши попередньо значення $\lg N$ для напружень, відповідних зоні багатоциклової втоми (табл. 2.5). При цьому, відомо, що значення напружень σ попередньо задані.

Таблиця 2.5

Розрахункові значення параметрів m_c , C_c , k і C_{II} для інтервалу значень
 границі витривалості 100 - 500 МПа

$\sigma_R = 100$ МПа; $m_w = 1,157$; $C_w = 7,504$						
σ , МПа	$\lg \sigma$	$\lg N$	m_c	C_c	k	C_{II}
1	2	3	4	5	6	7
105	2,021	6,695	4,864	16,245	70,973	7,838
110	2,041	6,329				
120	2,079	5,975				
130	2,114	5,7683				
140	2,146	5,622				
150	2,176	5,508				
160	2,204	5,415				
170	2,230	5,336				
180	2,255	5,268				
190	2,279	5,208				
200	2,301	5,154				
210	2,322	5,142				
220	2,342	5,098				
$\sigma_R = 200$ МПа; $m_w = 0,993$; $C_w = 7,073$						
205	2,312	6,379	7,305	23,033	78,444	8,732
210	2,322	6,080				
220	2,342	5,781				
230	2,362	5,606				

Продовження табл. 2.5

1	2	3	4	5	6	7
240	2,380	5,482				
250	2,398	5,386				
260	2,415	5,307				
270	2,431	5,241				
280	2,447	5,183				
290	2,462	5,132				
300	2,477	5,087				
310	2,491	5,046				
$\sigma_R = 300 \text{ МПа}; m_W = 0,907; C_W = 6,883$						
305	2,484	6,249	9,960	30,788	79,659	9,859
310	2,491	5,976				
320	2,505	5,703				
330	2,519	5,543				
340	2,531	5,430				
350	2,544	5,342				
360	2,556	5,270				
370	2,568	5,209				
380	2,580	5,157				
390	2,591	5,111				
400	2,602	5,069				
$\sigma_R = 400 \text{ МПа}; m_W = 0,850; C_W = 6,776$						
405	2,6070	6,182	12,034	37,363	84,991	10,742
410	2,613	5,926				
420	2,623	5,670				
430	2,633	5,520				
440	2,643	5,414				
450	2,653	5,332				

Продовження табл. 2.5

1	2	3	4	5	6	7
460	2,663	5,265				
470	2,672	5,208				
480	2,681	5,158				
490	2,690	5,115				
500	2,699	5,076				
$\sigma_R = 500 \text{ МПа}; m_W = 0,809; C_W = 6,711$						
505	2,703	6,146	14,045	43,927	89,274	11,608
510	2,708	5,902				
520	2,716	5,658				
530	2,724	5,516				
540	2,732	5,415				
550	2,740	5,337				
560	2,748	5,272				
570	2,756	5,218				
580	2,763	5,171				
590	2,771	5,130				
600	2,778	5,093				

Графіки залежностей $\lg N_{GC}(\sigma_R)$ і $\lg N_{GP}(\sigma_R)$ для степеневого і показникового рівнянь представлені на рис. 2.4. Їх розрахункові значення представлені в табл. 2.6.

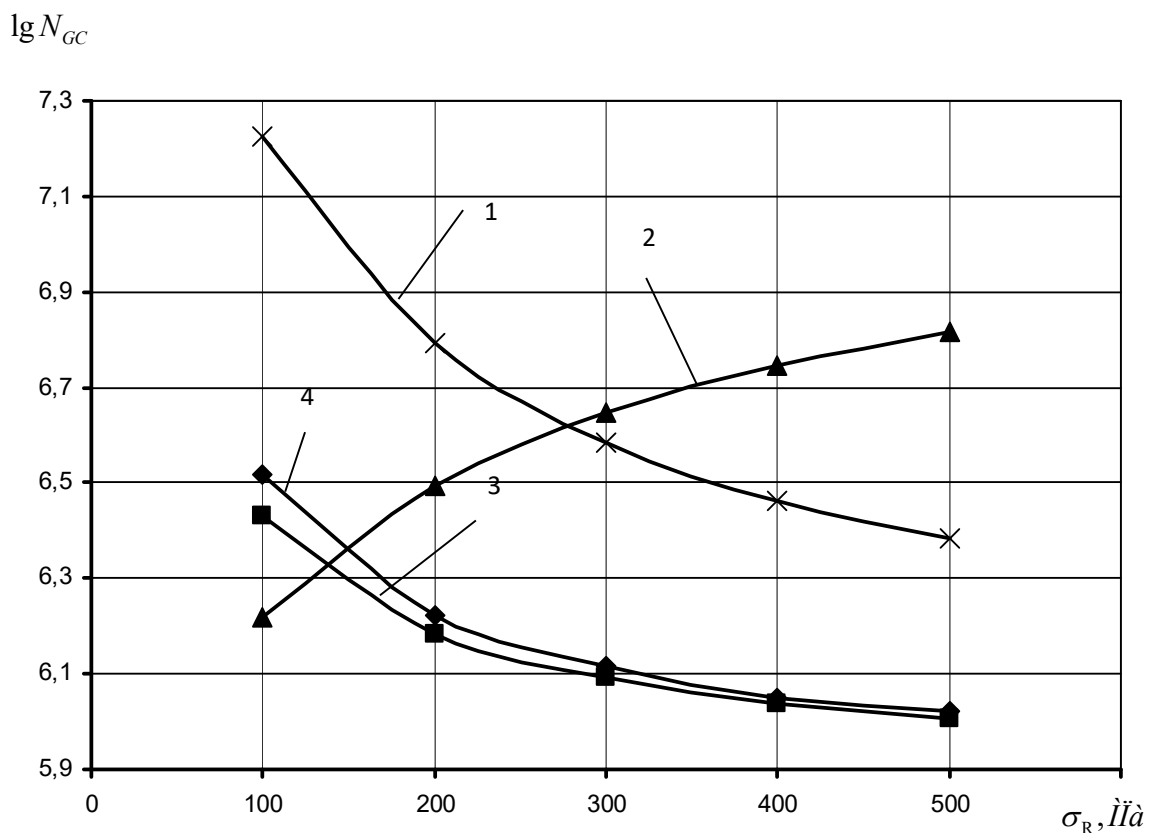


Рисунок 2.4. Залежності $\lg N_{GC}(\sigma_R)$ і $\lg N_{GP}(\sigma_R)$: 1 – формула (2.14); 2 – формула (2.11); 3 і 4 – (відповідно до даних табл. 2.6)

Таблиця 2.6

Розрахункові значення $\lg N_G$ для діапазону значень границі витривалості
100 – 500 МПа

σ_R , МПа	100	200	300	400	500
$\lg N_{GC}$	6,517	6,224	6,116	6,050	6,020
$\lg N_{GP}$	6,429	6,182	6,093	6,036	6,007
$\lg N_{GC}^{(3)}$	6,220	6,493	6,647	6,745	6,815
$\lg N_{GP}^{(4)}$	7,226	6,791	6,584	6,463	6,383

Крім розглянутих кореляційних залежностей ϵ і t_i , які отримані не на основі статистичної обробки експериментальних даних, а шляхом перерахунку параметрів одних рівнянь кривої втоми в параметри інших.

Зокрема, параметри рівняння Вейбулла були отримані на основі параметрів степеневого рівняння [56]

$$m_W = f_W(\sigma_R) = a_W \sigma_R + b_W = 0,002\sigma_R + 0,8; \quad (2.17)$$

$$C_W = F_W(\sigma_R) = \alpha_W \sigma_R + \beta_W = 0,005\sigma_R + 6,6, \quad (2.18)$$

де a_W , b_W , α_W , β_W - емпіричні коефіцієнти.

У наближеному варіанті приймають $m_W = \text{const} = 1,0$, а параметр C_W визначають за формулою

$$C_W = \lg \sigma_R + 5,1. \quad (2.19)$$

Ці рівняння приводять до близьких результатів і тому окремого інтересу не представляють.

Проведений аналіз показав, що кореляційні залежності величин $\lg N_{GC}(\sigma_R)$ і $\lg N_{GP}(\sigma_R)$ можуть бути як спадними, так і зростаючими в залежності від досліджуваної вибірки, тому з метою зменшення можливої систематичної похибки аналіз тенденцій зміни руйнівних напружень доцільно проводити за кількома кореляційними рівняннями одночасно, з подальшим знаходженням середнього значення результату.

2.3 Вплив перегинів і розривів експериментальної кривої втоми відновлених колінчастих валів ДВЗ на величину розрахункових значень руйнівних напружень при випробовуванні валів зі зростаючим навантаженням

Криві втоми реальних деталей, в тому числі колінчастих валів ДВЗ, будують за обмеженою кількістю елементів, що обумовлено їх високою вартістю. Тим часом, на підставі численних випробувань зразків з чорних

металів було встановлено, що ці криві можуть мати розриви і перегини в області динамічного межі текучості [18]. Даний факт необхідно враховувати при визначенні руйнівних напружень, коли елементи випробовують зі зростаючим навантаженням. Особливо це актуально у випадках, коли для підвищення продуктивності випробувань застосовують максимальні швидкості збільшення амплітуди напруження і є ймовірність руйнування в зазначеній області, близької до межі мало і багатоциклової втоми.

Крива втоми, що має розрив і перегин схематично зображено на рис. 2.5 [18].

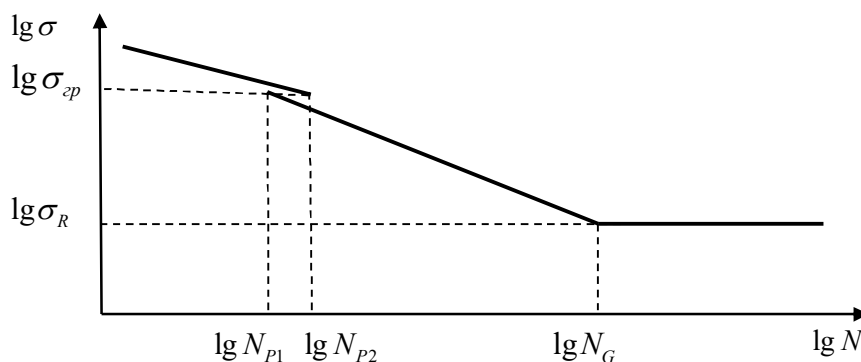


Рисунок 2.5 Схематичне зображення кривої втоми з розривом і перегином в зоні динамічного межі текучості

Експериментально однозначно визначити цю межу складно, оскільки мова йде про деякий діапазон напруження, хоча і досить невеликий. Для отримання картини розриву кривої втоми необхідно визначитися з математичною моделлю цієї кривої. Очевидно, що найбільш наглядно її можна представити в логарифмічній або напівлогарифмічній системі координат, використавши в якості моделі цієї кривої степеневе або показникове рівняння.

Наприклад, візьмемо в якості моделі кривої втоми степеневе рівняння у вигляді (1.2)

Для вирішення завдання з визначення межі розриву кривої втоми звернемося до моделювання процесу втомного руйнування елемента при його навантаженні зі швидкістю α , при цьому швидкість навантаження збільшується лінійно. Будемо вважати, що накопичення втомних пошкоджень буде відповідати гіпотезі Пальгрена - Майнера (залежність 2.6).

Схематичне представлення процесу навантаження елемента шляхом збільшення амплітуди напруження зі швидкістю α представлено на рис. 2.4

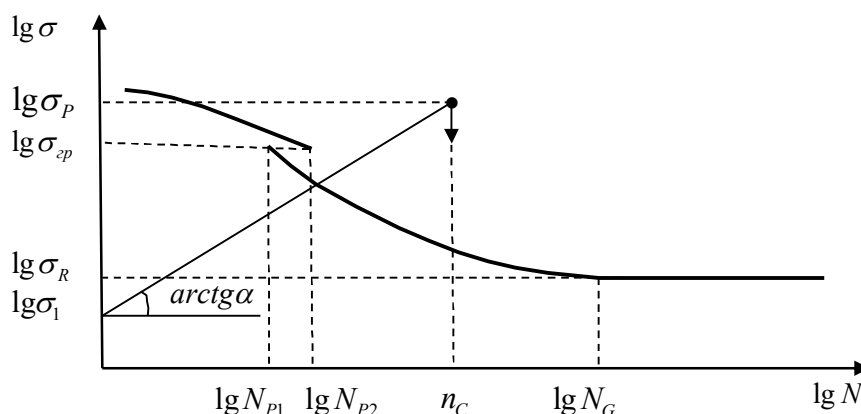


Рисунок 2.6 Схеми навантаження елемента шляхом збільшення амплітуди напруження зі швидкістю α

Відповідно до даної схеми, отримано рівняння, аналогічні (2.5)-(2.7), кожне з яких буде відповідати своїй ділянці. Для ділянки, обмеженої напруженнями $\sigma_1 - \sigma_{sp}$ це рівняння матиме вигляд

$$\sigma_{sp}^{m_c+1} - \sigma_1^{m_c+1} = a\alpha(m_c + 1)10^{C_c}, \quad (2.20)$$

де a - сума накопичених пошкоджень на ділянці напружень $\sigma_1 - \sigma_{sp}$.

$$\frac{\sigma_{sp}^{m_c+1} - \sigma_R^{m_c+1}}{\alpha(m_c + 1)10^{C_c}} + \frac{\sigma_P^{m'_c+1} - \sigma_{sp}^{m'_c+1}}{\alpha(m'_c + 1)10^{C'_c}} = 1. \quad (2.21)$$

При виведенні формули (2.21) було зроблено припущення про те, що лінійна гіпотеза додавання накопичених пошкоджень справедлива стосовно всієї кривої втоми, тобто включаючи малоциклову область. Це припущення не можна вважати строгим з точки зору процесу накопичення пошкоджень, проте з формальної точки зору для визначення величини $\sigma_{гр}$ допустимо. Рівняння (2.21) розв'язується методом ітерації.

Для перевірки отриманої залежності використаємо експериментальні дані випробувань гладких лабораторних зразків з вуглецевої сталі, опубліковані в роботі [18]. Представимо ці дані в табличній формі і графічно (табл. 2.7, рис. 2.7).

Таблиця 2.7

Дані випробувань гладких лабораторних зразків з вуглецевої сталі

№	σ , МПа	N , Цикл.	$\lg \sigma$	$\lg N$	№	σ , МПа	N , Цикл.	$\lg \sigma$	$\lg N$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	495	2500	2,695	3,398	28	405	18000	2,607	4,255
2		3000		3,477	29	390	14000	2,591	4,146
3		4000		3,602	30		20000		4,301
4	480	3000	2,681	3,477	31		25000		4,398
5		5000		3,699	32	375	19000	2,574	4,279
6	465	5000	2,667	3,699	33		25000		4,398
7		6000		3,778	34		32000		4,505
8		7000		3,845	35	360	19000	2,556	4,279
9	450	8000	2,653	3,903	36		25000		4,398
10		9000		3,954	37		30000		4,477
11	443	6000	2,646	3,778	38		35000		4,544
12		7500		3,875	39	345	20000	2,538	4,301

13		8500		3,929	40		33000		4,519
14		9500		3,978	41		48000		4,681
15		12000		4,079	42		60000		4,778
16		17000		4,230	43	330	48000	2,519	4,681
17	435	6000	2,638	3,778	44		58000		4,763
18		8000		3,903	45		62000		4,792
19		10000		4,000	46		80000		4,903
20		12000		4,079	47		90000		4,954
21	420	9000	2,623	3,954	48	315	90000	2,498	4,954
22		12000		4,079	49		130000		5,114
23		14000		4,146	50	300	200000	2,477	5,301
24		17000		4,230	51	285	300000	2,455	5,477
25	405	9500	2,607	3,978	52		420000		5,623
26		14000		4,146	53	270	800000	2,431	5,903
27		16000		4,204	54		2000000		6,301

В результаті обробки результатів випробувань зразків параметри верхнього і нижнього ділянок кривої втоми відповідно дорівнюють: $m' = 12,920$; $C' = 38,249$; і $m = 9,497$; $C = 28,887$. Границя витривалості $\sigma_R = 270$ МПа.

Оскільки випробування при плавно зростаючому навантаженні в рамках представленого експерименту не проводилися, задамо деяке значення руйнівного напруження, яке гарантовано перевищує область розриву кривої втоми. Наприклад, візьмемо $\sigma_p = 450$ МПа. При цьому значенні руйнівного напруження визначимо швидкість α відповідно до залежності (2.21)

$$\alpha = \frac{\sigma_{ep}^{m+1} - \sigma_R^{m+1}}{(m+1)10^C} + \frac{\sigma_p^{m'+1} - \sigma_{ep}^{m'+1}}{(m'+1)10^{C'}} = \frac{443^{9,497+1} - 270^{9,497+1}}{(9,497+1)10^{28,887}} + \frac{450^{12,92+1} - 443^{12,92+1}}{(12,92+1)10^{38,249}} =$$

$$= 0,008073 \text{ МПа} / \text{цикл} = 8073 \text{ Па} / \text{цикл}.$$

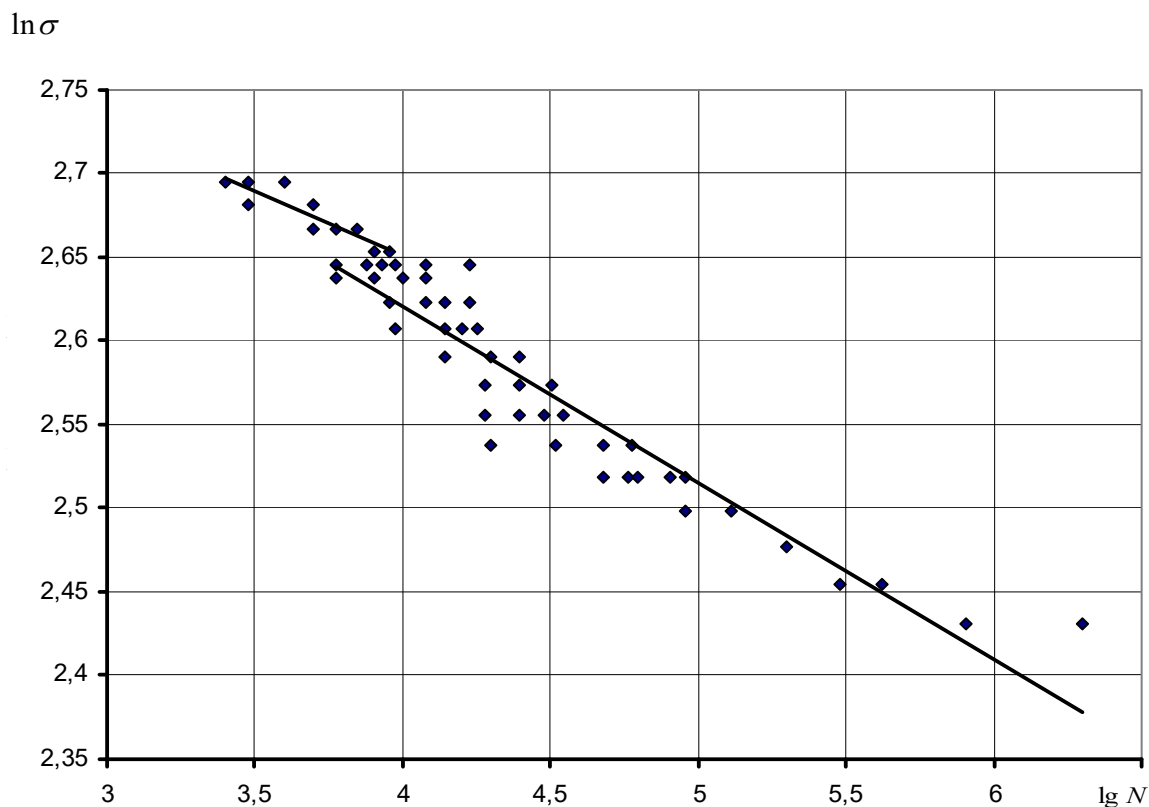


Рисунок 2.7 Результати випробувань гладких лабораторних зразків із вуглецевої сталі [18]

Орієнтуючись на отримані значення швидкості α , визначимо з використанням рівності (2.21) значення напружень, що відповідають розриву або перегину кривої втоми, тобто знайдемо величини σ_{zp} , які відповідають декільком значенням руйнівного напруження σ_p , імітуючи його розсіювання (табл. 2.8).

Таблиця 2.8

σ_p , МПа	446,0	448,0	452,0	454,0	456
σ_{zp} , МПа	447,4	445,3	440,5	437,6	434,6

Таким чином, запропонована методика, заснована на лінійній гіпотезі накопичення втомних пошкоджень і степеневому рівнянні кривої втоми, дозволяє однозначно визначити точки перегину кривої втоми. Її перевірка за експериментальними даними випробувань гладких зразків, виготовлених з вуглецевої сталі, підтвердила справедливість такого підходу.

2.4 Застосування складеної кривої втоми для уточнення розрахункових значень руйнівних напружень при імітації випробувань відновлених колінчастих валів ДВЗ зі зростаючим навантаженням

Криві багатоциклової втоми відновлених колінчастих валів ДВЗ представляють у вигляді ламаної лінії, що складається з похилої і горизонтальної ланок. Точка перелому (перетину) цих ланок визначає перехід з області руйнування в область необмеженої довговічності. Насправді цей перехід не може бути настільки різким, отже, ділянка кривої втоми близько до границі витривалості не відповідає реальній залежності довговічності і напруження.

З трьох, розглянутих в пункті 1.3 моделей кривої втоми, що застосовуються для описання залежності σ - N відновлених колінчастих валів ДВЗ (показникового, степеневого і Вейбулла) лише модель Вейбулла дає плавний перехід з області руйнування в область неруйнування, оскільки вона є асимптотичною. В області малих довговічностей модель гірше відповідає лабораторним показникам, що в результаті призводить до зниження коефіцієнта кореляції при апроксимації результатів експерименту. Таким чином, з метою підвищення коефіцієнта кореляції похилу ділянку кривої втоми можна представити складеною (дволанковою). При цьому

верхня її частина буде відповідати степеневому рівнянню, а нижня - рівнянню Вейбулла. Зокрема, такий варіант був запропонований в роботі [55]. При цьому було розв'язано завдання щодо визначення точки перетину цих двох ланок складеної кривої втоми (точка А), тобто були визначені її координати $\lg \sigma_{II}$ і $\lg N_{II}$ (Рис. 2.8).

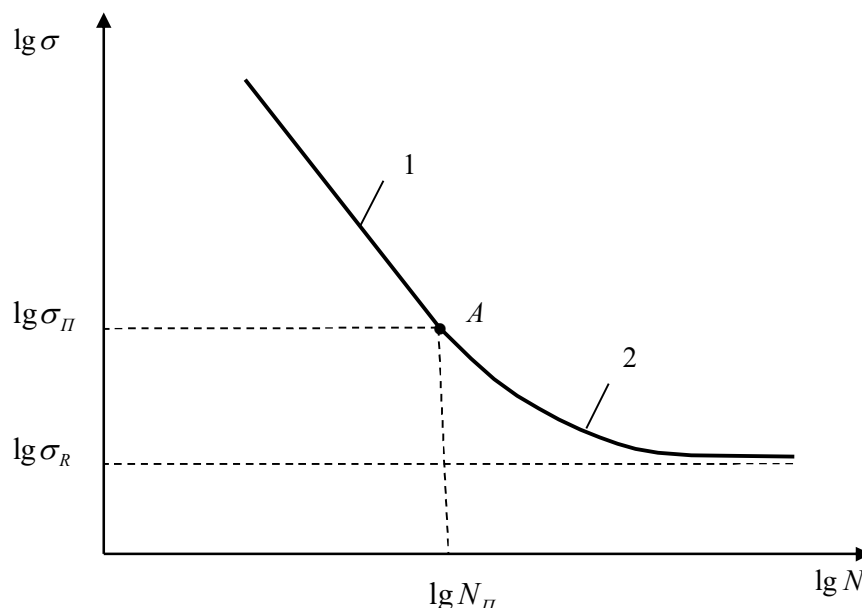


Рисунок 2.8 Схема представлення дволанкової кривої втоми в координатах $\lg \sigma - \lg N$: 1 - прямолінійна частина, підпорядкована степеневому рівнянню; 2 - криволінійна, підпорядкована рівнянню Вейбулла.

Недоліком розглянутого підходу є те, що при навантаженнях, близьких до границі витривалості важко отримати експериментальну залежність $\sigma - N$ через те, що частина випробуваних елементів при таких напруженнях не буде зруйновано. Крім того, розглянутий підхід стосується побудови розрахункових, а не експериментальних кривих втоми.

Розглянемо варіант вирішення даної проблеми іншим способом. Похилу ділянку кривої втоми будемо представляти складеною, однак, у вигляді двох прямолінійних ланок. Верхню її частина будемо будувати за результатами випробувань декількох груп елементів при різних значеннях навантаження у всьому діапазоні напруження багатоциклової області. Для побудови нижньої частини кривої використаємо експериментальні дані, отримані при випробуванні елементів за методом «вгору - вниз». Цей метод, як відомо, використовується для визначення середньомовірного значення границі витривалості за числом зруйнованих і незруйнованих елементів.

Для безпосередньої побудови похилої ділянки кривої втоми ці результати випробувань, у вигляді конкретних довговічностей зруйнованих елементів при відповідних напруженнях, використовувати некоректно, оскільки це призведе до штучного викривлення результатів розподілу довговічностей близьких до границі витривалості (за рахунок вибору найменш міцних елементів з загальної їх кількості). Щоб уникнути такого варіанту, в роботі [27] було запропоновано провести додаткові випробування тих елементів, які в процесі випробувань за методом «вгору – вниз» не зруйнувалися.

Для розгляду суті цього підходу і можливості його використання для побудови складеного похилої ділянки кривої втоми використаємо методику випробувань елементів за методом «вгору - вниз». Нижче, на рисунку 2.9 представлена схема випробувань при круговому згині 30 гладких зразків зі сталі 45 за цим методом і таблиця 2.9 з результатами їх випробувань при трьох рівнях змінних напружень, що перевищують границю витривалості [60].

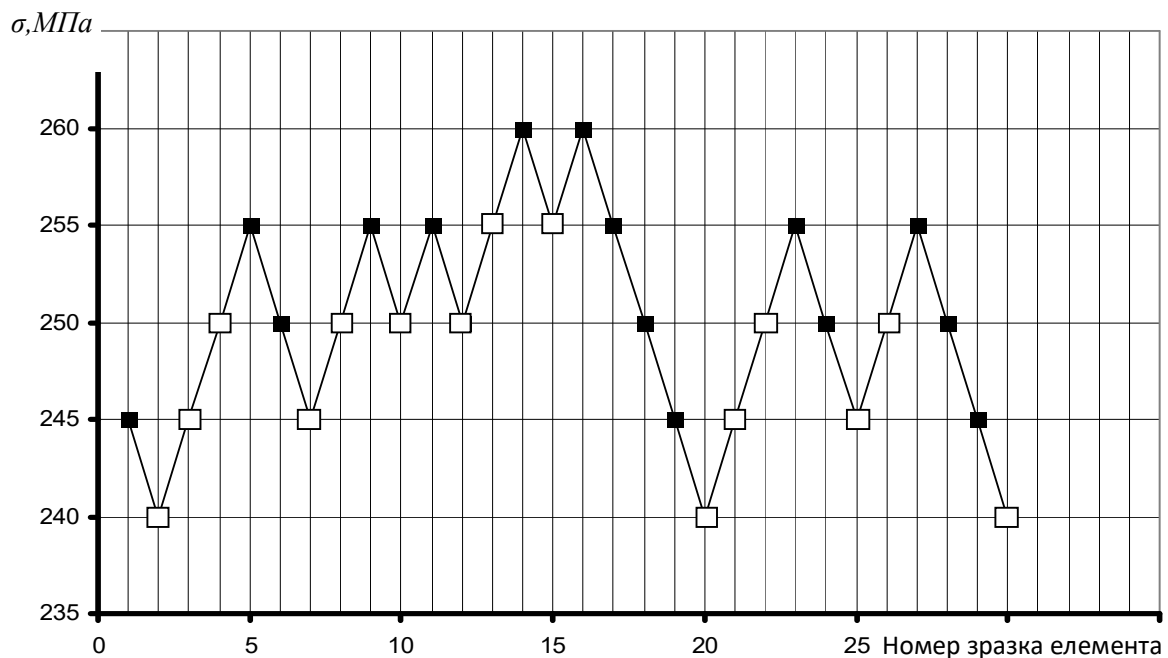


Рис. 2.9 Схема випробувань за методом «вгору - вниз»

На схемі чорні квадратики відповідають випадку, коли елементи зруйнувалися, а окреслені контуром - відповідно, якщо елементи не зруйнувалися.

Таблиця 2.9

Результати випробувань зразків при трьох рівнях змінних напружень, що перевищують границю витривалості [38]

№ п/п	σ , МПа	N , Цикл.	$\lg\sigma$	$\lg N$
1	2	3	4	5
1	300	72200	2,477	4,859
2	300	86200	2,477	4,936
3	300	98300	2,477	4,993
4	300	113300	2,477	5,054
5	300	199200	2,477	5,299
6	285	206800	2,455	5,316
7	285	206800	2,455	5,316

Продовження таблиці 2.9

1	2	3	4	5
8	285	299100	2,455	5,476
9	285	308900	2,455	5,490
10	285	394400	2,455	5,596
11	270	336600	2,431	5,527
12	270	362400	2,431	5,559
13	270	547100	2,431	5,738
14	270	602600	2,431	5,780
15	270	703600	2,431	5,847

В результаті обробки даних, наведених в табл. 2.9, отримуємо: $m_c = 18,10$; $C_c = 49,81$. Границя витривалості, визначена за допомогою методу «вгору - вниз», дорівнює $\bar{\sigma}_R = 250$ МПа.

Елементи, що не зруйнувалися при базовому числі циклів ($N_b = 10^7$), повторно випробували при стаціонарному навантаженні. При цьому рівень напруження кожного елемента збільшували ступенево (величина ступені відповідала базі випробувань N_b) відносно початкового прийнятого, згідно з наведеною схемою до тих пір, поки він не зруйнується. Правомірність проведення повторних випробувань теоретично обґрунтована тим, що накопичення втомних пошкоджень відбувається тільки при навантаженнях, що перевищують границю витривалості. Можливим проявом ефекту тренування нехтуємо, оскільки, по-перше, напруження випробувань незначно відрізняються від границі витривалості, і, по-друге, база випробувань відносно невелика.

Параметри степеневого рівняння, що описує верхню частину похилої ділянки кривої втоми, визначали за допомогою методу найменших квадратів за даними, наведеними в табл. 2.9. Для побудови нижньої її частини використовували залежність, отриману з умови, що коефіцієнт варіації

логарифма довговічності до руйнування сталей [35] і розраховується за формулою:

$$\frac{\lg N_i - \lg \bar{N}}{\lg \bar{N}} = \frac{\lg N_{Gi} - \lg \bar{N}_{GC}}{\lg \bar{N}_{GC}}, \quad (2.22)$$

де N_i - довговічність до руйнування i -того елемента; \bar{N} - довговічність до руйнування i -того елемента по середньомовірній кривій втоми; N_{Gi} - довговічність i -того елемента на рівні напруження, що відповідають границі витривалості; N_{GC} - абсциса точки перелому середньомовірної кривої втоми, вираженої степеневим рівнянням.

На підставі даних табл. 2.9 і за допомогою залежності (2.22) всі додатково отримані значення довговічності N , були перераховані на рівень границі витривалості. Результати розрахунку представлені в табл. 2.10

Таблиця 2.10

№ зразка	σ , МПа	N_i , цикл.	$\lg N_{Gi}$	№ зразка	σ , МПа	N_i , цикл.	$\lg N_{Gi}$
1	2	3	4	5	6	7	8
1	245	4503000	6,492	16	255	1000000	6,149
2	245	3672000	6,406	17	255	1125000	6,201
3	245	2141000	6,177	18	255	1590000	6,355
4	245	2897000	6,305	19	255	1097000	6,190
5	245	1206000	5,934	20	255	2396000	6,538
6	245	2980000	6,317	21	255	1348000	6,282
7	250	1615000	6,208	22	255	2716000	6,593
8	250	1155000	6,063	23	255	1206000	6,232
9	250	1337000	6,126	24	255	1809000	6,413
10	250	1069000	6,029	25	255	1556000	6,346

Продовження таблиці 2.10

1	2	3	4	5	6	7	8
11	250	1457000	6,163	26	255	866000	6,085
12	250	1215000	6,085	27	260	1834000	6,580
13	250	1848000	6,267	28	260	1004000	6,305
14	250	2109000	6,324	29	260	1020000	6,312
15	255	1420000	6,305	30	260	982000	6,295

Отримані результати дають можливість побудувати нижню частину похилої ділянки кривої втоми за двома парами значень $\lg N$ і $\lg \sigma$. Враховуючи, що вона повинна бути неперервною, значення $\lg N_1$ і $\lg \sigma_1$, визначали за степеневим рівнянням кривої втоми за параметрами верхньої її частини, взявши значення напруження, відповідно самому нижньому рівню навантаження, тобто, $\sigma_1 = 270$ МПа

$$\lg N_1 = C - m \lg \sigma = 49,81 - 18,11 \lg 270 = 5,802.$$

Нижня значення $\lg \sigma_2$ прийmemo рівним логарифму границі витривалості $\lg \sigma_R$, а значення $\lg N_2$ - як середнє арифметичне значень $\lg N_{Gi}$, наведених в табл. 2.10

$$\lg N_2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n N_{Gi}. \quad (2.23)$$

Таким чином, $\lg N_2 = 6,269$. При цьому параметри нижньої частини похилої ділянки кривої втоми дорівнюють: $m_2 = 14,15$; $C_2 = 40,20$. Крива втоми з дволанковою похилою ділянкою в логарифмічній системі координат представлена на рис. 2.10.

Тепер з метою проведення порівняльного аналізу представимо криву втоми з дволанковою похилою ділянкою в напівлогарифмічній системі координат. За залежністю 1.1 розрахуємо параметри верхньої частини похилої ділянки кривої втоми k_1 і $C_{П1}$.

В результаті розрахунку вони виявилися відповідно рівними: $k_1=36,33$ МПа; $C_{П1}=13,23$.

По аналогії до степеневому рівнянням визначимо параметри k_2 і $C_{П2}$ показникового рівняння. Вони відповідно дорівнюють 52,63 МПа і 11,02. Крива втоми з дволанковою похилою ділянкою в напівлогарифмічній системі координат представлена на рис. 2.11.

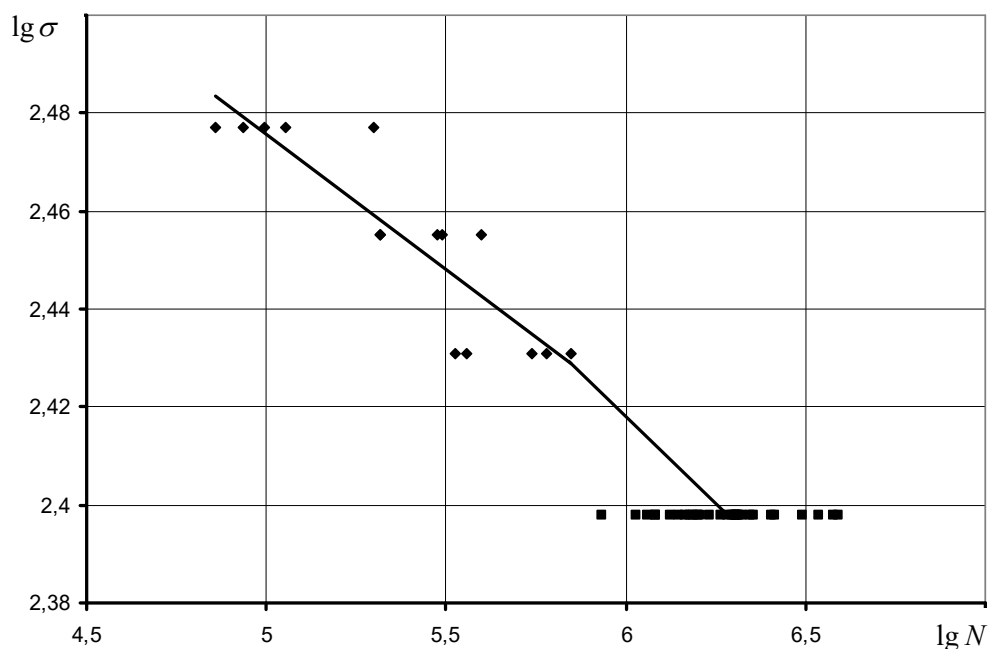


Рисунок 2.10 Крива втоми з дволанковою похилою ділянкою в логарифмічній системі координат.

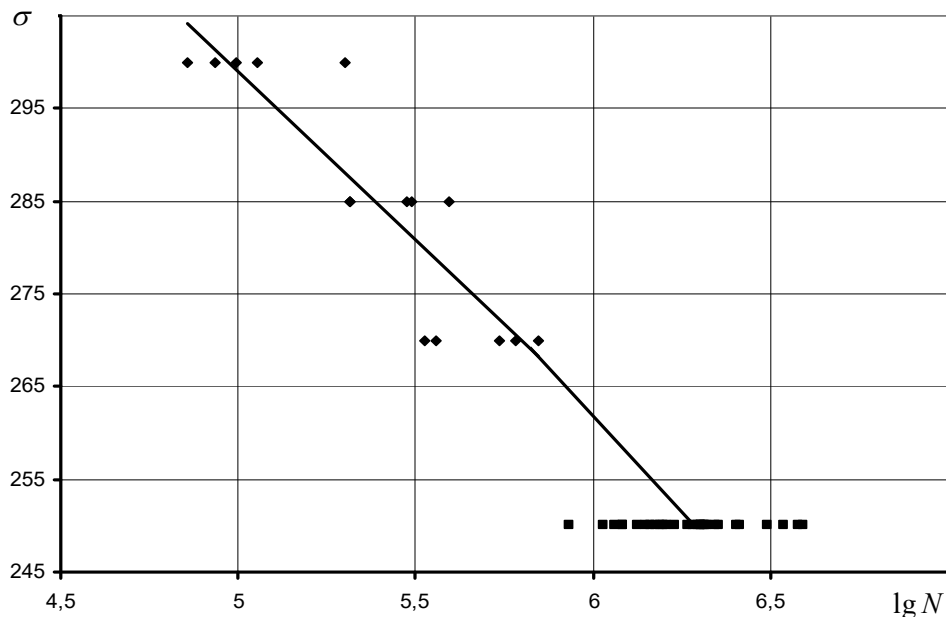


Рисунок 2.11. Крива втоми з дволанковою похилою ділянкою в напівлогарифмічній системі координат

З рисунків 2.10 і 2.11 видно, що положення верхньої і нижньої частин похилих ділянок кривих втоми різні. У другому випадку відмінність нахилів набагато менше, що пояснюється меншою зміною, пов'язаною з логарифмічною системою координат.

Звертаємо увагу на той факт, що в порівнянні з кривою втоми, зображеної на рис. 2.8, криві втоми, показані на рис. 2.10 і 2.11 збільшують свій нахил при переході від верхньої частини до нижньої. Вважати це закономірністю немає підстав. Відносний кут нахилу верхнього і нижнього ділянок, як показує практика, не завжди однаковий. Він залежить від ряду факторів, у тому числі, і від рівняння кривої втоми.

2.5 Залежність розрахункових руйнівних напружень від швидкості збільшення навантаження при використанні складеної кривої втоми

Як було показано раніше, при напруженнях, близьких до границі витривалості, реальна крива втоми може відрізнятись від степеневій залежності, і стає, частіше за все, пологішою. У зв'язку з чим її похилу ділянку представляють у вигляді двох ланок, одна з яких (нижня) є криволінійною (рис. 2.12).

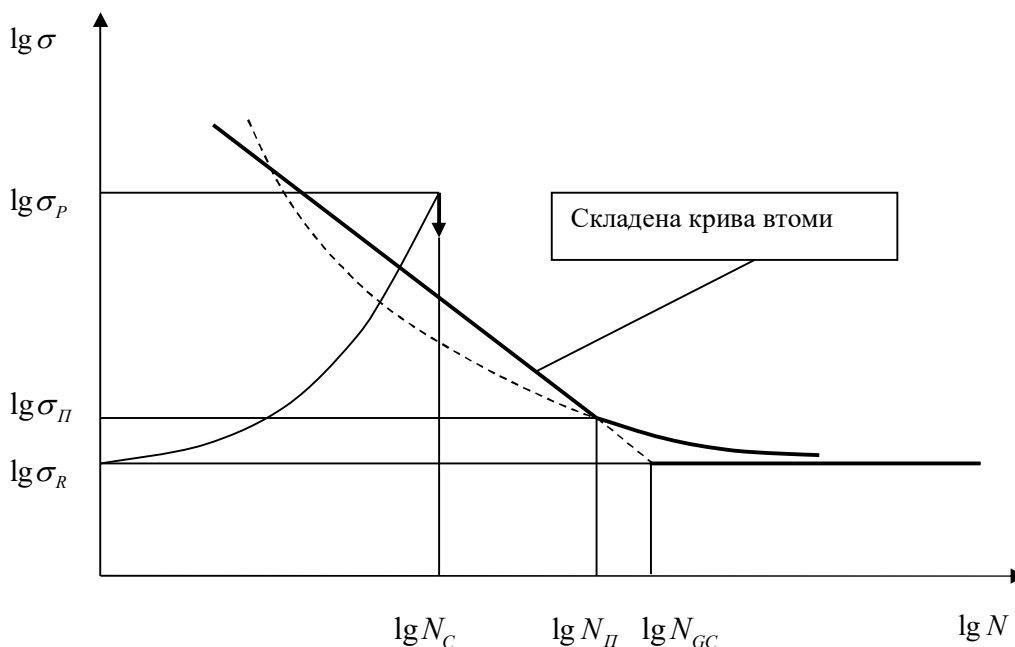


Рисунок 2.12 Схема для розрахунку руйнівних напружень за похилою ділянкою складеної кривої втоми

Точка перетину двох частин похилої ділянки з координатами $(\lg N_{II}, \lg \sigma_{II})$ визначається при її побудові за експериментальними даними. На наведеній вище схемі також показано навантаження випробуваного елемента зі зростаючим навантаженням від початкового навантаження σ_1 , яке умовно дорівнює границі витривалості σ_R .

Величини руйнівних напружень визначимо за допомогою лінійної гіпотези додавання накопичених втомних пошкоджень за формулою:

$$\frac{(\sigma_{II} - \sigma_R)^{m_W + 1}}{\alpha(m_W + 1) \cdot 10^{C_W}} + \frac{(\sigma_P^{m_C + 1} - \sigma_{II}^{m_C + 1})}{\alpha(m_C^{m_C + 1}) \cdot 10^{C_C}} = 1, \quad (2.24)$$

Перевірку залежності (2.24) проведемо для зразків, виготовлених із сталей 45 і 40Х, гладких зразків і зразків з концентраторами напружень, результати випробувань яких наведені в роботі [60] (їх характеристики описані в 4 розділі). Результати розрахунку руйнівних напружень σ_P , величин накопичених втомних пошкоджень для двох частин похилої ділянки a^C , a^W , а також відносних відхилень руйнівних напружень δ_{σ_P} представлені в табл. 2.11.

Таблиця 2.11

Результати розрахунку величин m_C , m_W , C_C , C_W , σ_P^C , σ_P , σ_{II} , a^C , a^W , δ_{σ_P}

Сталь 45 (зразок 1 типу); $\sigma_R = 250$ МПа; $m_C = 18,10$; $C_C = 49,81$; $m_W = 2,11$; $C_W = 8,59$; $\sigma_{II} = 272,32$ МПа					
α , Па/цикл	σ_P^C , МПа	σ_P , МПа	a_C	a_W	δ_{σ_P} , %
50	283,14	285,14	0,737	0,263	0,70
100	292,88	294,00	0,869	0,131	0,34
200	303,31	303,92	0,934	0,066	0,20
300	309,69	310,10	0,956	0,044	0,13
400	314,32	314,64	0,976	0,033	0,10

Продовження таблиці 2.11

Сталь 45 (зразок 2 типу); $\sigma_R = 204$ МПа; $m_C = 13,01$; $C_C = 36,62$; $m_W = 1,40$; $C_W = 7,65$; $\sigma_{II} = 213,00$ МПа					
50	245,62	246,10	0,964	0,036	0,20
100	257,37	257,64	0,982	0,018	0,10
200	270,05	270,19	0,991	0,009	0,05
300	277,85	277,94	0,994	0,006	0,04
400	283,54	283,62	0,995	0,005	0,03
Сталь 45 (зразок 4 типу); $\sigma_R = 145$ МПа; $m_C = 6,65$; $C_C = 20,94$; $m_W = 1,87$; $C_W = 8,84$; $\sigma_{II} = 179,62$ МПа					
50	198,50	201,83	0,737	0,263	1,65
100	216,02	217,97	0,869	0,131	0,90
200	235,78	236,89	0,934	0,066	0,47
300	248,36	249,15	0,956	0,044	0,32
400	257,74	258,36	0,987	0,033	0,24
Сталь 40X (зразок 1 типу); $\sigma_R = 274$ МПа; $m_C = 18,67$; $C_C = 51,86$; $m_W = 1,92$; $C_W = 8,23$; $\sigma_{II} = 291,73$ МПа					
50	306,27	307,97	0,823	0,177	0,55
100	316,33	317,28	0,911	0,088	0,30
200	327,18	327,69	0,956	0,044	0,16
300	333,82	334,17	0,971	0,030	0,11
400	338,64	338,92	0,978	0,022	0,08
Сталь 40X (зразок 3 типу); $\sigma_R = 154$ МПа; $m_C = 7,96$; $C_C = 24,00$; $m_W = 1,47$; $C_W = 7,99$; $\sigma_{II} = 168,49$ МПа					
50	204,03	205,00	0,939	0,061	0,47
100	219,44	219,99	0,969	0,031	0,25

Продовження таблиці 2.11

200	236,53	236,84	0,985	0,015	0,13
300	247,29	247,50	0,990	0,010	0,09
400	299,26	255,42	0,992	0,08	0,07
Сталь 40Х (зразок 4 типу); $\sigma_R = 159$ МПа; $m_c = 7,72$; $C_c = 23,07$; $m_w = 1,28$; $C_w = 7,28$; $\sigma_{\square n} = 174,37$ МПа					
50	187,64	189,98	0,768	0,232	1,23
100	200,26	201,70	0,884	0,116	0,72
200	215,11	215,95	0,942	0,058	0,39
300	224,72	225,33	0,961	0,039	0,27
400	231,93	232,40	0,871	0,029	0,20

У таблиці прийняті наступні позначення: σ_p^C - руйнівне напруження, знайдене для випадку, коли вся похила ділянка кривої втоми виражена тільки степеневим рівнянням.

Відносне відхилення руйнівних напружень δ_{σ_p} знаходили за формулою

$$\delta_{\sigma_p} = \frac{\sigma_p - \sigma_p^C}{\sigma_p^C} 100. \quad (2.25)$$

Залежність величин δ_{σ_p} від швидкості збільшення навантаження α зображена на рис. 2.13

Інтенсивність зменшення руйнівних напружень у всіх випадках різна, тому для встановлення тенденції її зміни, побудуємо на підставі даних табл. 2.11 залежність різниць максимальних $(\delta_{\sigma_p})_{\max}$ і мінімальних $(\delta_{\sigma_p})_{\min}$ значень від границі витривалості σ_R (Рис. 2.14).

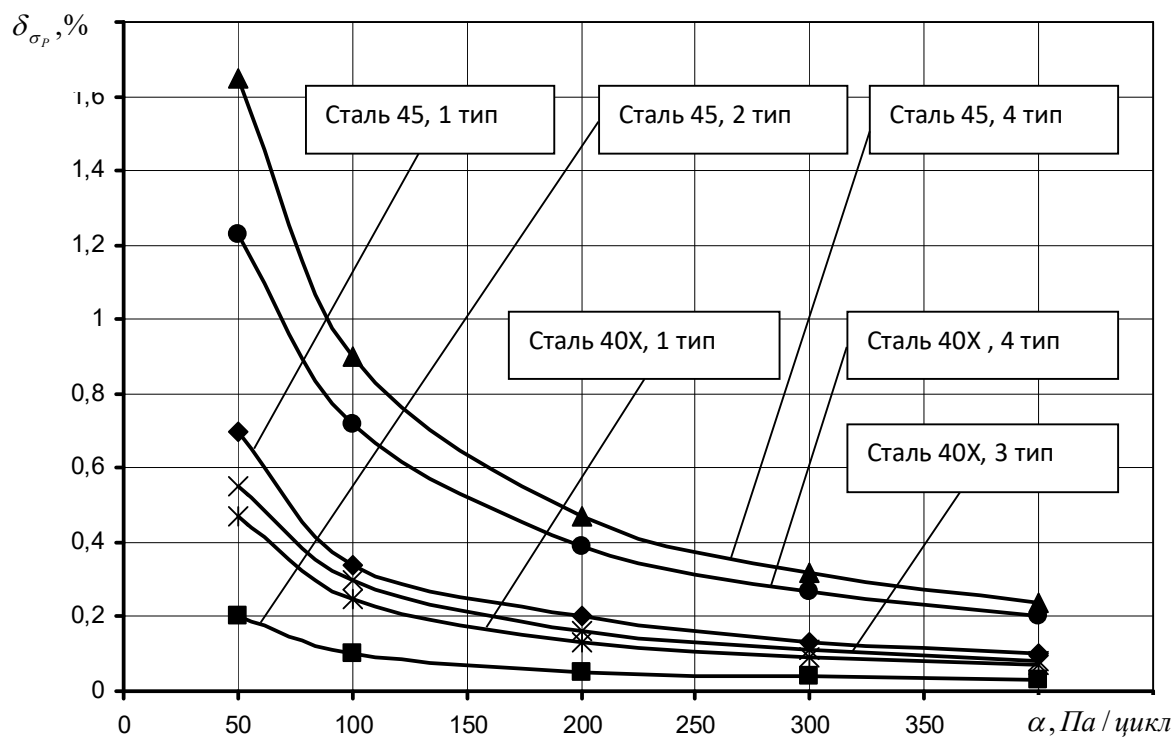


Рисунок 2.13 Залежність δ_{σ_p} від швидкості збільшення навантаження α

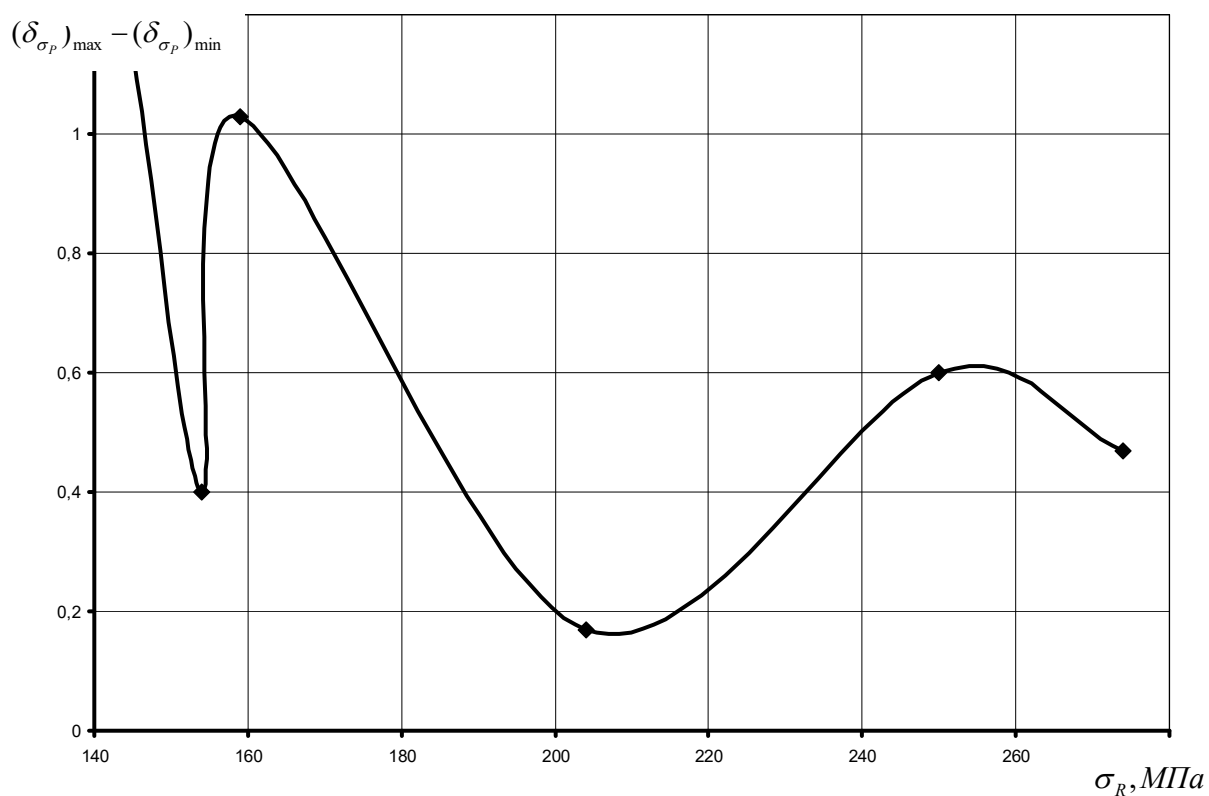


Рисунок 2.14 Залежність різниць максимальних $(\delta_{\sigma_p})_{\max}$ і мінімальних

$(\delta_{\sigma_p})_{\min}$ відхилень руйнівних напружень від границі витривалості σ_R

З наведених вище рисунків видно, що при збільшенні швидкості навантаження α відхилення руйнівного напруження δ_{σ_p} має тенденцію до зменшення, а інтенсивність зменшення руйнівних напружень $(\delta_{\sigma_p})_{\max} - (\delta_{\sigma_p})_{\min}$ від величини границі витривалості σ_R носить стохастичний характер.

2.6 Висновки

1. Порівняльну оцінку втомної міцності деталей машин економічно і технічно доцільно здійснювати непрямым способом. Для цього необхідно порівняти руйнівні напруження при випробуваннях елементів з однаковим лінійно зростаючим навантаженням від початкових напружень, які не перевищують границю витривалості. Такий підхід виправданий тим, що руйнівне напруження і границя витривалості, при визначених вище параметрах випробувань, мають однорідні характеристики розсіювання.

2. Для аналізу тенденцій зміни руйнівних напружень запропоновано використовувати кореляційні залежності параметрів похилої ділянки кривої втоми з границею витривалості. Показано, що виконувати це доцільно з кількох кореляційних рівнянь одноразово, щоб зменшити ймовірність систематичної похибки методу.

3. При експериментальному або розрахунковому визначенні руйнівних напружень запропоновано враховувати можливі точки розриву або перегину кривої втоми. При цьому отримано розв'язання задачі щодо визначення меж ділянок кривої втоми, які відповідають цим перегинам і розривам. Задача базується на лінійній гіпотезі накопичення втомних пошкоджень і степеневому рівнянні кривої втоми.

4. Розрахунок руйнівних напружень повинен враховувати можливу зміну параметрів похилої ділянки кривої втоми близько до границі витривалості. Визначення цих параметрів базується на використанні

експериментальних результатів, отриманих за допомогою методу «вгору - вниз».

5. Розрахункові величини руйнівних напружень залежать від швидкості збільшення навантаження. Дослідження показали, що при збільшенні швидкості навантаження α відхилення руйнівного напруження δ_{σ_p} має тенденцію до зменшення, а інтенсивність зменшення руйнівних напружень $(\delta_{\sigma_p})_{\max} - (\delta_{\sigma_p})_{\min}$ від величини границі витривалості σ_R носить стохастичний характер.