

Міністерство освіти і науки України
Одеський національний морський університет

ЧЕРЕДАРЧУК НАТАЛІЯ ІВАНІВНА



УДК 621.979.1:62-144:539.431

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

Спеціальність 05.22.20 – Експлуатація та ремонт засобів транспорту

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Одеса - 2021

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Одеському національному морському університеті
Міністерства освіти і науки України

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Конопльов Анатолій Васильович,
Одеський національний морський університет
Міністерства освіти і науки України,
Зав. кафедрою «Машинознавство»

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, доцент
Будашко Віталій Віталійович,
Національний університет «Одеська морська
академія» Міністерства освіти і науки України,
директор навчально-наукового інституту
автоматики та електромеханіки

кандидат технічних наук, доцент
Савчук Володимир Петрович,
Херсонська державна морська академія
Міністерства освіти і науки України
завідувач кафедри експлуатації суднових
енергетичних установок

Захист відбудеться 27 квітня 2021 року о 14:00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д41.060.01 в Одеському національному морському університеті Міністерства освіти і науки України за адресою: 65029, м. Одеса, вул. Мечникова, 34

З дисертацією можна ознайомитися в науково-технічній бібліотеці імені проф. Г.К.Сулова Одеського національного морського університету за адресою: 65029, м. Одеса, вул. Мечникова, 34

Автореферат розісланий «__» _____ 2021 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Д41.060.01,
кандидат технічних наук, доцент



Олексій ДРОЖЖИН

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Двигуни внутрішнього згоряння працюють при інтенсивних режимах експлуатації, що призводить до значного збільшення навантажень і, як наслідок, до виникнення випадкових і закономірних відмов, тому проблема збільшення робочого ресурсу двигуна завжди залишається актуальною.

Практика показує – лише 20% деталей ДВЗ, що надходять у ремонт, підлягають остаточному вибраковуванню. Інші деталі, і в першу чергу колінчасті вали, можна відновити. При цьому собівартість їх відновлення складе від 15% до 70% собівартості їх виготовлення.

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%.

У процесі експлуатації на колінчастий вал ДВЗ впливають: сила тертя, вібрації, знакозмінні навантаження і агресивне оточуюче середовище. Ці фактори викликають нерівномірне зношування шатунних і корінних шийок; порушення якості поверхні шийок у вигляді задирок, рисок і корозії; механічні пошкодження у вигляді тріщин і дефектів різьби; прогин колінчастого вала, що призводить до порушення перпендикулярності осі вала і осі циліндра, внаслідок чого умови змащування сполучених поверхонь погіршуються.

Вивчення причин поломок колінчастих валів ДВЗ показує, що в більшості випадків вони виникають унаслідок втоми матеріалу або наявності в ньому внутрішнього напруження. Внутрішні напруження можуть виникнути через контраст температур при наплавочній операції технологічного процесу відновлення великогабаритного колінчастого вала або через високі температури, що впливають на метал колінчастого вала ДВЗ при його чорновій обробці шліфуванням. Ушкодження, що виникли, усувають різними видами наплавлень із подальшою обробкою під ремонтний розмір шляхом шліфування та полірування.

Відремонтвані колінчасті вали піддають технічному контролю за низкою параметрів. При цьому обов'язково контролюють границю витривалості, оскільки вона після операцій відновлення вала, як правило, знижується. Найбільш раціональним і інформативним способом такого контролю є прискорені методи випробування, проблемі вдосконалення яких присвячена дисертаційна робота.

До теперішнього часу в Україні та за кордоном були проведені дослідження, результатами яких стала розробка нових прискорених методів випробувань і модернізація деяких існуючих. Найбільший внесок у розв'язання даної проблеми внесли: В.Т.Троценко, Л.М.Школьник, Н.М. Степнов, Є.К.Поважний, В.М.Гребенник, П. Форест, С.В. Серенсен, Ф.Ф.

Бенуа, В.П. Коган, В.С. Іванова, І.А. Одінг, Н.В. Олійник, О.І. Стальниченко, П. Форрест, М. Про, Є. Лер, Л. Локаті, Н. Еномото та інші.

Незважаючи на численні дослідження, проблема розвитку прискорених методів випробувань колінчастих валів ДВЗ на опір втомі залишається актуальною. Всі прискорені методи випробувань 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 не можуть бути застосовані для вирішення зазначеного завдання і це змушує шукати нові, досконаліші експериментальні методи прискореної оцінки характеристик опору втомі колінчастих валів ДВЗ. Дослідження допоможе інженерам при розв'язанні практичних завдань, пов'язаних із ремонтом колінчастих валів ДВЗ і сприятиме розвитку науки і техніки.

Зв'язок із 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 на основі закону України «Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки» від 11 липня 2001 року №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 дослідження.

Метою роботи є забезпечення втомної міцності відновлених під час ремонту колінчастих валів ДВЗ за рахунок удосконалення методів експериментальної порівняльної непрямої 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 втомних відновлених колінчастих валів ДВЗ та обґрунтувати можливість використання дволанкової кривої втомної 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'єкт 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 втомних зразків і елементів відновлених колінчастих валів ДВЗ в ймовірнісному трактуванні;
- використанні методу моделювання експерименту на основі кореляційних залежностей між параметрами похилої ділянки кривої втомної 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 непрямой 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 втомі» і «Експериментальні методи випробувань деталей машин на опір втомі».

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 втомі.

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 прямої 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 (список із 4 доповідей зазначено наприкінці автореферату).

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

Обсяг і структура дисертації

Дисертація складається зі вступу, 4 розділів, висновків і списку використаних джерел із 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.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступній частині обґрунтовано актуальність обраної теми, сформульовані цілі та завдання дослідження, визначено об'єкт, предмет і методи дослідження, відображена наукова новизна отриманих результатів, їх практичне значення та особистий внесок здобувача. Також розглянуто зв'язок із науковими програмами, планами, темами, наведена інформація про публікації та апробацію результатів досліджень, його структура і обсяг.

У першому розділі «Вибірковий огляд і аналіз способів відновлення та методів визначення границі витривалості відновлених колінчастих валів ДВЗ» було проведено аналіз видів пошкоджень колінчастих валів ДВЗ і розглянуто сучасні методи їх відновлення. В рамках проведеного огляду були вивчені причини поломок відновлених колінчастих валів і показано, що в більшості випадків вони виникають унаслідок втоми матеріалу або наявності в них внутрішніх напружень. Також були розглянуті основні методи відновлення валів, що застосовуються в ремонтному виробництві, питання підвищення їх характеристик опору втоми. Було проведено аналіз сучасних

методів, що можуть використовуватись для прискореного визначення границі витривалості відновлених колінчастих валів ДВЗ, заснованих на використанні похилих ділянок їх кривої втоми. Визначено характеристики режимів випробувань відновлених колінчастих валів ДВЗ на опір втоми при випробуваннях зі зростаючим навантаженням. Була проведена оцінка втомної міцності лабораторних зразків і проаналізовано особливості натурних випробувань відновлених колінчастих валів ДВЗ.

Проведений аналіз дозволив визначити актуальні завдання дослідження і зробити наступні 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 втоми 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 втоми зі зростаючим навантаженням є вибір початкового навантаження і величини швидкості збільшення амплітуди навантаження.

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

У другому розділі «Розробка методу непрямого порівняння границі витривалості відновлених колінчастих валів ДВЗ» наведено теоретичне обґрунтування прискореного методу, в основі якого лежать випробування з лінійно зростаючим навантаженням. Зокрема, використовується принцип збільшення амплітуди навантаження. При цьому об'єкти випробувань доводять до остаточного руйнування або до появи тріщини певних розмірів. Схема таких випробувань наведена на рис. 1.

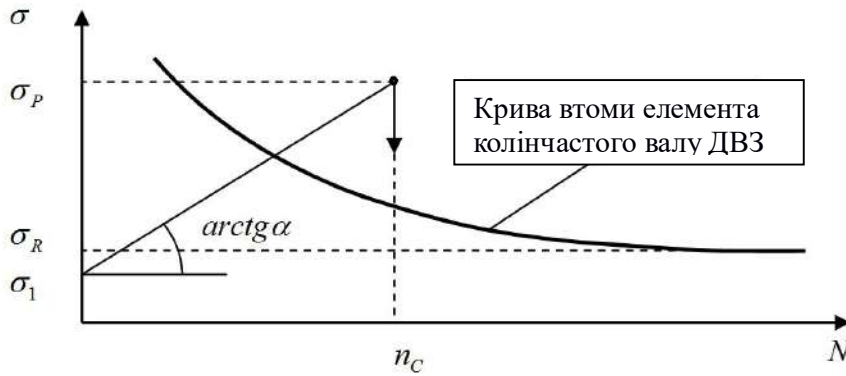


Рисунок 1 – Схема проведення випробувань при лінійно зростаючій амплітуді навантаження

При цьому сумарна довговічність до руйнування n_C , що фіксується під час експерименту, використовується для визначення величини руйнівного напруження σ_P , яке, в цьому випадку, знаходять за формулою.

$$\sigma_P = \sigma_1 + \alpha n_C, \quad (1)$$

де σ_1 – початкове напруження (МПа); α – швидкість збільшення амплітуди навантаження (МПа/цикл).

Як характеристику для проведення порівняльного аналізу втомої міцності відновлених колінчастих валів запропоновано використовувати руйнівне навантаження σ_P . Схема проведення випробувань, в якому для порівняння втомої міцності використовують величину руйнівного напруження, представлена на рис. 2.

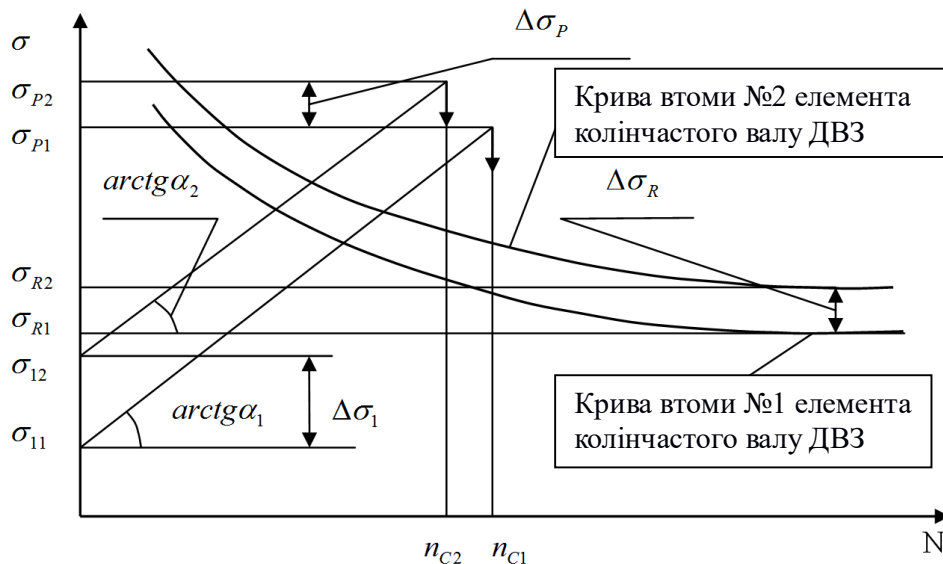


Рисунок 2 – Схема проведення порівняльних випробувань двох елементів відновлених колінчастих валів ДВЗ при однаковій швидкості збільшення амплітуди напруження від різних початкових рівнів навантаження

Вона побудована для випадку випробування двох колінчастих валів ДВЗ при однаковій швидкості збільшення навантаження α від різних початкових напружень σ_{11} і σ_{12} , які при плануванні експерименту повинні прийматися нижче очікуваної границі витривалості.

Для оцінки можливості використання руйнівних напружень в якості порівняльної характеристики втомної міцності відновлених колінчастих валів були визначені співвідношення між границями витривалості σ_{R1} і σ_{R2} та руйнівними напруженнями σ_{P1} і σ_{P2} . Для цього були використані кореляційні залежності між середньомовірною границею витривалості і параметрами похилої ділянки кривої втоми, вираженої степеневим рівнянням і рівнянням Вейбулла. Для рівняння Вейбулла були розглянуті випадки, коли параметри похилої ділянки кривої втоми є фіксованими ($m_W = 1$ і $C_W = 7,0$), і коли їх зв'язок із границею витривалості виражено наступними кореляційними залежностями:

$$m_W = f_W(\sigma_R) = \frac{1}{a_{W1}\sigma_R^{0,01} - b_{W1}} = \frac{1}{5,254\sigma_R^{0,01} - 5,038} - 1 ; \quad (2)$$

$$C_W = F_W(\sigma_R) = \lg \frac{(\alpha_{W1}\sigma_R + \beta_{W1})^{m_W+1}}{m_W + 1} = \lg \frac{(7,029\sigma_R + 3599)^{m_W+1}}{m_W + 1} , \quad (3)$$

де a_{W1} , b_{W1} , α_{W1} , β_{W1} - сталі коефіцієнти.

Руйнівні напруження σ_{P1} і σ_{P2} визначали за допомогою лінійної гіпотези додавання накопичених пошкоджень, яка, для випадку плавного збільшення амплітуди навантаження, має вигляд:

$$a = \int_0^{n_c} \frac{dn}{N} = \frac{1}{\alpha} \int_{\sigma_1}^{\sigma_p} \frac{d\sigma}{N}, \quad (4)$$

де a – сума накопичених пошкоджень; $d\sigma$ і dn – приріст напруження і числа циклів відповідно.

В результаті розв'язання системи рівнянь (2) – (4) отримано рівності для визначення величин руйнівних напружень для степеневого рівняння і рівняння Вейбулла у вигляді

$$\sigma_p^{WY} = \sqrt{2 \cdot 10^7 \alpha} + \sigma_R ; \quad (5)$$

$$\sigma_p^W = [\alpha(m_W + 1)10^{C_W}]^{\frac{1}{m_W+1}} + \sigma_R ; \quad (6)$$

$$\sigma_p^C = [\alpha(m_c + 1)10^{C_N} + \sigma_R^{m_c+1}]^{\frac{1}{m_c+1}}. \quad (7)$$

де σ_p^{wy} , σ_p^w і σ_p^C – руйнівні напруження, знайдені на основі уніфікованого рівняння Вейбулла (зі сталими параметрами m_{wy} і C_{wy}), 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 формул (5) – (7) був прийнятий нормальний закон розподілу границі витривалості і методом генерування випадкових чисел визначено 10 значень σ_R , представивши їх у вигляді варіаційного ряду. Розрахунки проведені для границь витривалості $\bar{\sigma}_R = 100, 200, 300, 400, 500$ МПа при однаковій швидкості збільшення навантаження ($\alpha = 300$ Па / цикл). Результати розрахунку для $\bar{\sigma}_R = 100$ МПа представлено в табл. 1.

Таблиця 1 – Результати розрахунку руйнівних напружень за залежностями (5) – (7)

$\bar{\sigma}_R = 100$ МПа				
σ_{Ri} , МПа	σ_p^C , МПа	σ_p^w , МПа	σ_p^{wy} , МПа	σ_p^{CW} , МПа
83,7	159,6	189,2	161,1	174,4
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

У таблиці 1 значення σ_p^{CW} визначені як середні між величинами σ_p^C і σ_p^w .

На підставі даних таблиці 1 була проведена порівняльна оцінка руйнівних напружень і границь витривалості за їх розмахами варіювання і дисперсіями. Результати розрахунку представлені в таблицях 2 і 3.

Таблиця 2 – Розрахункові значення розмахів варіювання границі 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

Таблиця 3 – Розрахункові значення дисперсій границі 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

Значення дисперсій границі витривалості і руйнівних напружень визначали за формулами.

$$S_{\sigma_R}^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\sigma_{R_i} - \bar{\sigma}_R)^2; \quad (8)$$

$$S_{\sigma_P}^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\sigma_{P_i} - \bar{\sigma}_P)^2, \quad (9)$$

де n - кількість випробуваних об'єктів.

Як видно з таблиці 2 різниця розмахів варіювання руйнівних напружень $(\sigma_{R10} - \sigma_{R1})$ і $(\sigma_{P10} - \sigma_{P1})^{CW}$ знаходяться в межах 1 МПа для всього прийнятого діапазону зміни границі витривалості. Дане співставлення результатів слід вважати коректним, оскільки величини $(\sigma_{P10} - \sigma_{P1})^{CW}$ є середніми значеннями руйнівних напружень, знайдених за кореляційними залежностями параметрів рівняння Вейбулла і степеневого рівнянь.

Однорідність рядів дисперсій визначали за критерієм Хартля. Розрахункові значення цього критерія, для розглянутих границь витривалості відповідно дорівнюють 1,5; 1,6; 1,3; 1,2 і 1,1. Вони значно менші допустимих табличних значень F_{\max} для рівнів значущості $\alpha = 0,05$ і $0,01$. Таким чином, однорідність рядів дисперсій границь витривалості і руйнівних напружень, наведених у таблиці 3, підтверджується для всіх значень σ_R .

Криві втоми реальних деталей, в тому числі колінчастих валів ДВЗ, будують за обмеженою кількістю елементів, що обумовлено їх високою

вартістю. На підставі численних випробувань зразків із чорних металів було встановлено, що ці криві можуть мати розриви і перегини в області динамічної границі текучості. Даний факт необхідно враховувати при визначенні руйнівних напружень, коли елементи випробовують зі зростаючим навантаженням. Особливо це актуально у випадках, коли для підвищення ефективності випробувань застосовують максимальні швидкості збільшення амплітуди напруження і є ймовірність руйнування в зазначеній області, близькій до межі мало- і багатоциклової втоми.

Крива втоми, що має розрив і перегин схематично зображено на рис. 3

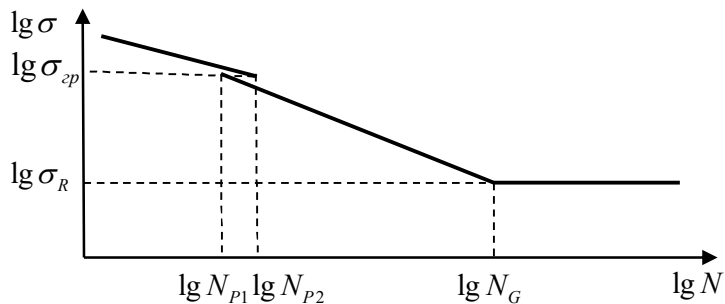


Рисунок 3 – Схематичне зображення кривої втоми з розривом і перегином в зоні динамічної границі текучості

Експериментально однозначно визначити цю границю складно, оскільки мова йде про деякий діапазон напруження, хоча і досить невеликий.

Для вирішення завдання щодо визначення точки розриву кривої втоми використано моделювання процесу втомного руйнування елемента при його навантаженні зі швидкістю α . При цьому прийнято, що накопичення втомних пошкоджень буде відповідати гіпотезі Пальгрена–Майнера.

Схематичне представлення процесу навантаження елемента способом збільшення амплітуди напруження зі швидкістю α подано на рис. 4

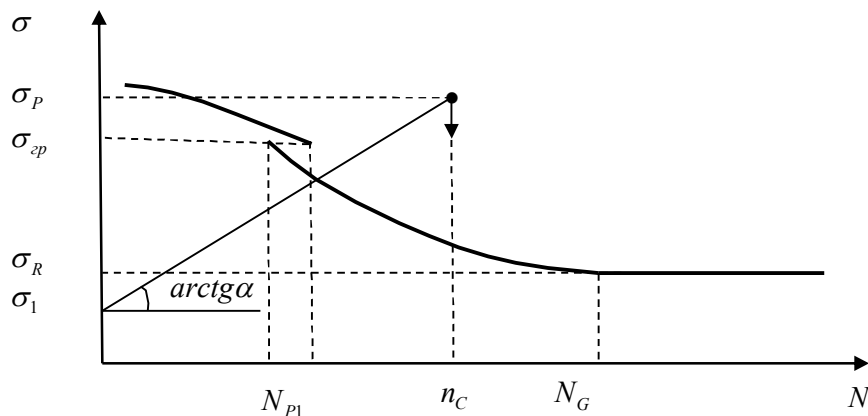


Рисунок 4 – Схема навантаження елемента способом збільшення амплітуди напруження зі швидкістю α

Відповідно до даної схеми і лінійної гіпотези додавання накопичених пошкоджень, отримано трансцендентне рівняння, що враховує розрив і перегин кривої втоми, яке дозволяє визначати граничне напруження σ_{rp} , при якому відбувається розрив кривої, а саме:

$$\frac{\sigma_{ep}^{m_c+1} - \sigma_R^{m_c+1}}{\alpha(m_c+1)10^{c_c}} + \frac{\sigma_p^{m'_c+1} - \sigma_{ep}^{m'_c+1}}{\alpha(m'_c+1)10^{c'_c}} = 1. \quad (10)$$

Запропонована методика, що базується на лінійній гіпотезі накопичення втомних пошкоджень і степеневому рівнянні кривої втоми, дозволяє однозначно визначити точки перегину кривої втоми. Її перевірка за експериментальними даними випробувань зразків, виготовлених із вуглецевої сталі, підтвердила справедливість такого підходу.

Крива багатоциклової втоми відновлених колінчастих валів ДВЗ при переході від області руйнування до області не руйнування має плавний перехід, який досягається за рахунок подання похилої ділянки у вигляді двох ланок, як це показано на рис. 5.

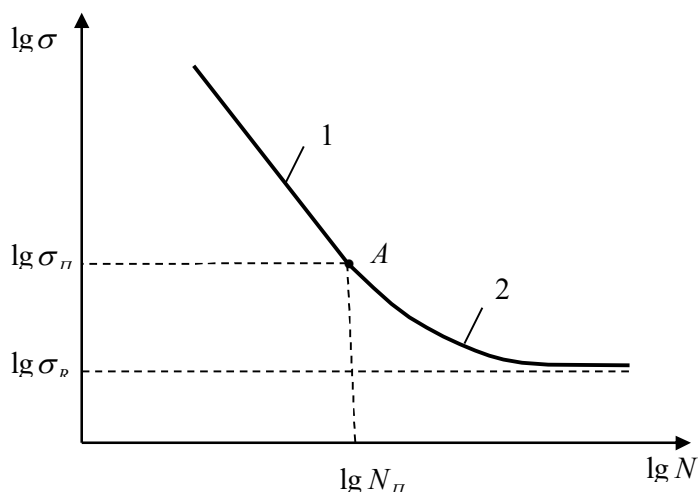


Рисунок 5 – Схема представлення дволанкової кривої втоми в координатах $\lg \sigma - \lg N$: 1 – прямолінійна частина, підпорядкована степеневому рівнянню; 2 – криволінійна, підпорядкована рівнянню Вейбулла.

Верхня її частина будується за результатами випробувань декількох груп елементів, а нижня - за експериментальними даними, отриманими при випробуванні елементів за методом «вгору –вниз», як це показано на схемі рис. 6.

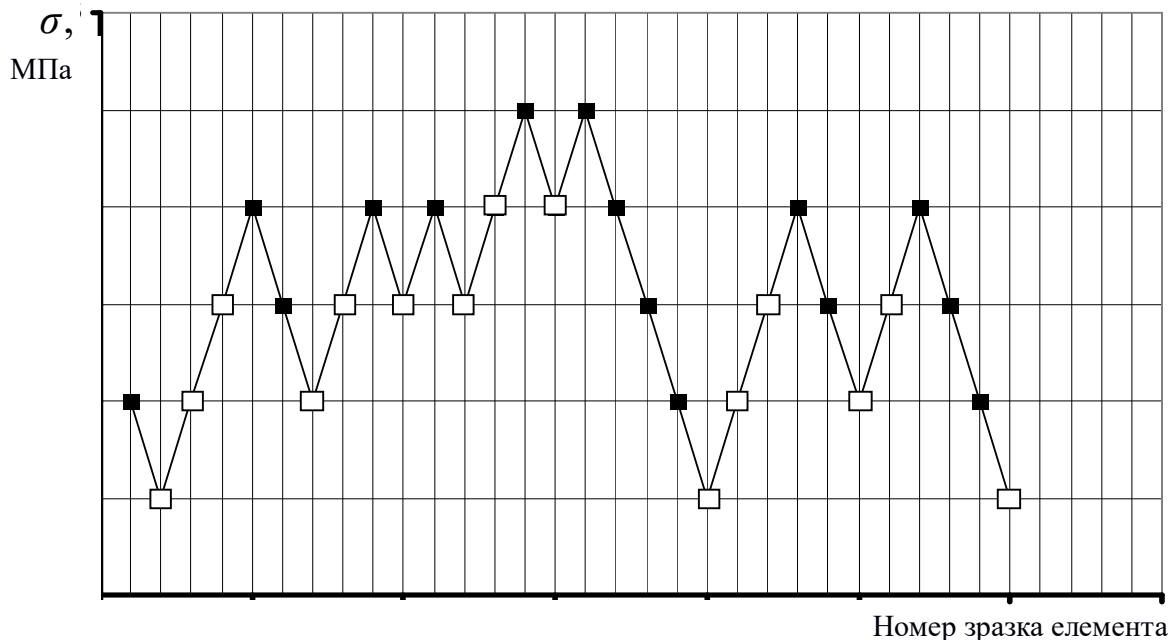


Рисунок 6 – Схема випробувань за методом «вгору– вниз»

На схемі чорні точки відповідають випадку, коли елементи зруйнувалися, а окреслені контуром – у випадку, коли елементи не зруйнувалися.

У третьому розділі «Точність розробленого методу порівняльної непрямой оцінки границі витривалості відновлених колінчастих валів ДВЗ» була проведена перевірка впливу вибору швидкості збільшення амплітуди напруження і початкового навантаження на величину розрахункового руйнівного напруження.

Перевірка проведена при значеннях границі витривалості 100 – 500 МПа і значеннях швидкості збільшення навантаження 100 – 600 Па / цикл. Розрахунок проведено відповідно до залежностей (5) – (7). У результаті було встановлено, що швидкість збільшення амплітуди напруження практично не впливає на величину руйнівних напружень.

Відповідно до розробленого методу рівень початкового навантаження призначають нижче границі витривалості, величина якої відома лише орієнтовно. При плануванні випробувань елементів колінчастих валів ДВЗ не виключається випадок вибору початкового навантаження, що перевищує границю витривалості, це вплине на величину руйнівних напружень, і в результаті на точність самого методу.

На рис. 7 представлені залежності похибок руйнівних напружень від границі витривалості, у випадках якщо початкове напруження більше границі витривалості на 10, 20 і 30 МПа. Їх аналіз показує, що зі збільшенням границі витривалості похибка оцінки руйнівних напружень знижується, причому це зниження тим інтенсивніше, чим вище початкове напруження.

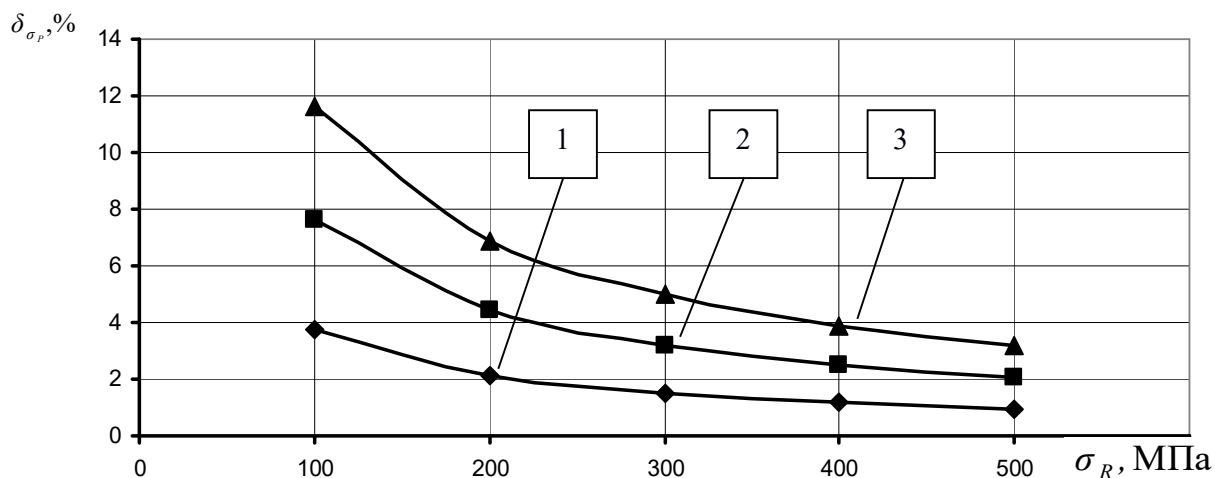


Рисунок 7 – Залежності похибок руйнівних напружень від границі витривалості:

$$1 - \delta_{\sigma_{p10}}(\sigma_R); 2 - \delta_{\sigma_{p20}}(\sigma_R); 3 - \delta_{\sigma_{p30}}(\sigma_R).$$

У четвертому розділі «Планування експерименту і перевірка розробленого методу на зразках і елементах колінчастих валів ДВЗ» наведена інформація про вибір максимальної швидкості збільшення навантаження при плануванні експерименту, представлена схема і описання експериментальної установки, зразків і елементів колінчастих валів ДВЗ, вирізаних із цілого валу, а також результати використання розробленого методу на елементах колінчастих валів ДВЗ.

Зразки були двох типів: гладкі і надрізані. Перші мали виточку в формі тора, а другі – кільцевий надріз (рис. 8).

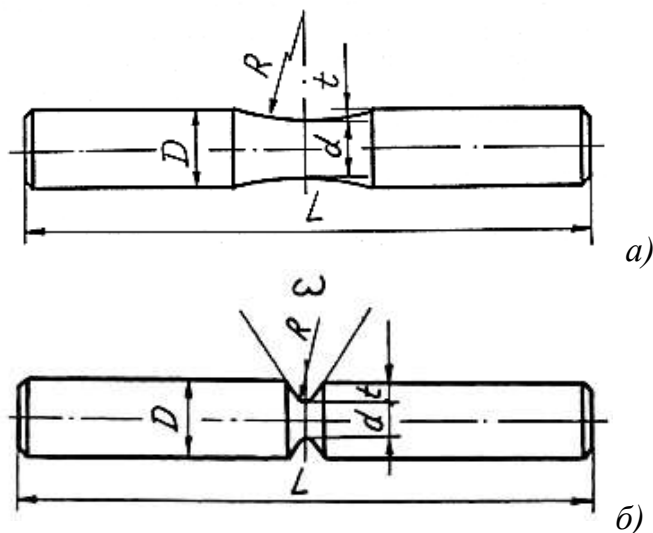


Рисунок 8 – Зразки для випробувань на опір втомі: а) – гладкий зразок; б) – зразок із надрізом (концентратором напружень)

Геометричні параметри зразків d , D , L , R , t і ω забезпечували широкий діапазон критерія подібності втомного руйнування L/G (L –

периметр, або частина периметра небезпечного перерізу, в зоні максимальних напружень; G – відносний градієнт першого головного напруження).

Такий підхід дозволив не тільки перевірити точність розробленого методу, але також дає можливість моделювати випробування відновлених колінчастих валів ДВЗ за допомогою зразків.

Випробування зразків на опір втомі зі зростаючим навантаженням проводилися на модернізованій машині НУ–3000, забезпеченій пристроєм для постійного зростання амплітуди напруження.

Граничні швидкості навантаження визначали для двох рівнянь кривої втоми (степеневим і Вейбулла), за залежностями:

$$\alpha_{\max}^C = \left[(10^{C_c} / N_{н.з})^{(m_c+1)/m_c} - \sigma_1^{m_c+1} \right] / [(m_c + 1)10^{C_c}]; \quad (11)$$

$$\alpha_{\max}^W = \left[(10^{C_w} / N_{н.з})^{(m_w+1)/m_w} - (\sigma_1 - \sigma_R)^{m_w+1} \right] / [(m_w + 1)10^{C_w}], \quad (12)$$

Результати розрахунку представлені на рис. 9.

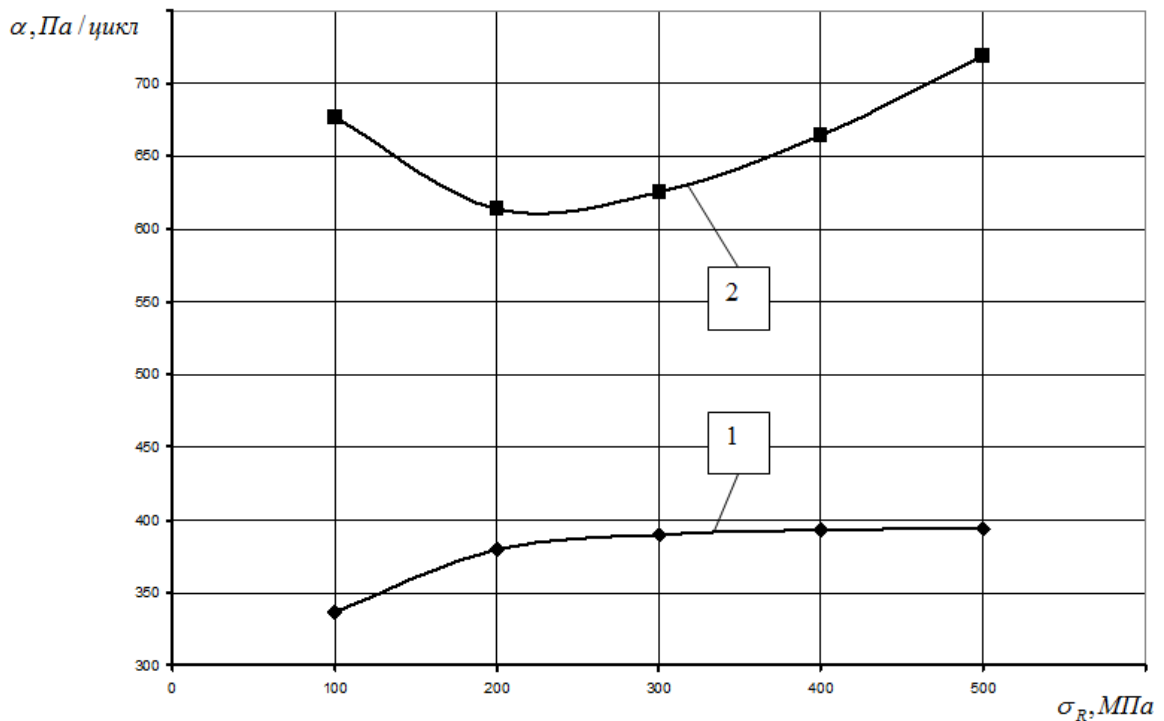


Рисунок 9 – Зміна величин α_{\max}^C і α_{\max}^W у залежності від границі витривалості:
1 – відповідно до залежності (11); 2 – відповідно до залежності (12)

Велика розбіжність величин α_{\max}^C і α_{\max}^W (до 95%) пояснюється тим, що рівняння Вейбулла при прийнятій однаковій межі мало- і багатоциклової

втомі призводить до підвищених значень граничних напружень $\sigma_{гp}^C$ і $\sigma_{гp}^W$, як це показано на рис. 10.

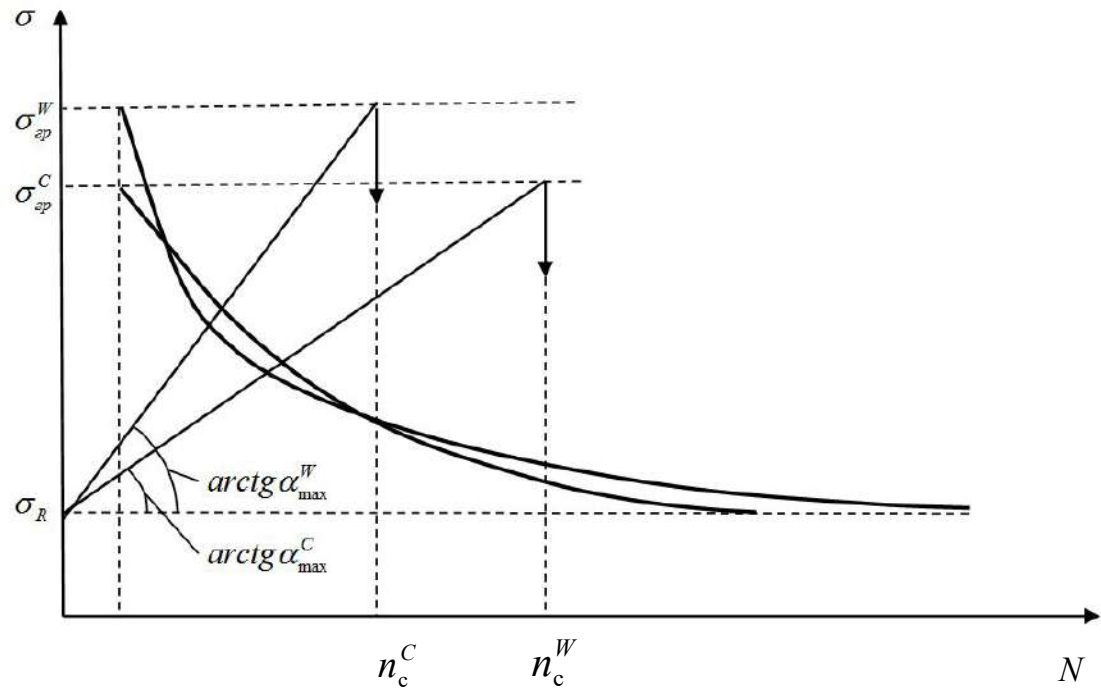


Рисунок 10 – Схема, яка пояснює розбіжності швидкостей α_{max}^C і α_{max}^W

Випробування колінчастих валів ДВЗ замінюють випробуванням окремих колін, вирізаних із цілого валу (рис. 11)

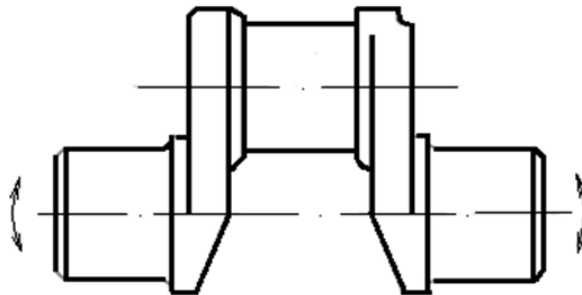


Рисунок 11 – Елемент колінчастого валу ДВЗ, вирізаний з цілої деталі

При проведенні випробувань ідентичність експлуатаційних і стендових зразків зберігається. Як і в експлуатації, руйнування відбувається в найбільш слабких місцях - щоках від напружень згину. Такий прийом дозволяє з одного валу отримати кілька колін, що дає можливість економити ці деталі.

У таблиці 4 представлені результати випробувань нових та відновлених колінчастих валів, що взяті з літературних джерел. Ці випробування проводилися з метою оцінки впливу методу відновлення на границю витривалості.

Таблиця 4 – Результати тривалих і прискорених випробувань, а також розрахункові значення різниць границь витривалості колінчастих валів Д-54 (нових і відновлених)

№ з/п	σ_P^H , МПа Д-54 (нові)	σ_P^B , МПа Д-54 (відновл.)	$\sigma_P^H - \sigma_P^B$ МПа	α , Па/цикл	$(\sigma_R^{дл})_{нов.} - (\sigma_R^{дл})_{відновл.}$ МПа	$\delta_{абс.}$, МПа
1	130	125	5	40	8	-3
2	160	165	5	80	8	-3
3	180	170	10	170	8	2
4	230	200	30	350	8	22
Середні значення			12,5		8	4,5

Абсолютну і відносну похибки $\delta_{абс.}$ і $\delta_{відн.}$ визначали за формулами:

$$\delta_{абс.} = (\sigma_R^{дл})_{нов.} - (\sigma_R^{дл})_{відновл.}, \text{ МПа.} \quad (13)$$

$$\delta_{відн.} = \frac{\bar{\Delta}\sigma_P - \bar{\Delta}\sigma_R}{(\sigma_R)_{нов.}} 100, \%. \quad (14)$$

Відносна похибка $\delta_{відн.}$, знайдена за формулою (14), дорівнює 5,2%, що можна вважати допустимою, оскільки допустима відносна похибка визначення границі витривалості для прискорених методів становить 12%.

ВИСНОВКИ

В результаті проведеного дослідження вирішено важливу науково-технічну задачу, яка полягає в розробці методу порівняльної оперативної оцінки втомної міцності відновлених колінчастих валів ДВЗ при відпрацюванні технологій їх ремонту. Її розв'язання базується на непрямій оцінці границі витривалості за результатами випробувань елементів колінчастих валів ДВЗ зі зростаючим навантаженням. Основні висновки, наукові та практичні результати дисертаційної роботи:

1. Проведено аналіз сучасних способів відновлення зношених поверхонь колінчастих валів ДВЗ і прискорених методів їх випробувань на опір втомі. В результаті було встановлено, що для розв'язання поставленої задачі найбільш ефективними є методи непрямого визначення характеристик опору втомі.

2. Теоретично обґрунтована можливість використання руйнівного напруження для непрямой порівняльної оцінки втомної міцності відновлених колінчастих валів ДВЗ, а також можливість застосування кореляційних залежностей між параметрами кривої втоми і границею витривалості при розрахунковій оцінці руйнівних напружень цих деталей. На цій основі розроблено прискорений метод порівняльної непрямой оцінки втомної міцності відновлених колінчастих валів ДВЗ, що відрізняється від відомих більшою точністю та економічністю.

3. Проведено оцінку впливу можливих перегинів і розривів експериментальної кривої втоми відновлених колінчастих валів ДВЗ на величину розрахункових значень руйнівних напружень при лінійно зростаючому навантаженні. Обґрунтовано застосування складеної кривої втоми з метою уточнення значень розрахункових руйнівних напружень при імітації випробувань відновлених колінчастих валів ДВЗ зі зростаючим навантаженням.

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

5. Проведена перевірка точності розробленого прискореного методу на лабораторних зразках і елементах відновлених колінчастих валів ДВЗ за опублікованими в літературних джерелах даними, яка підтвердила його розрахункову високу точність.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковані 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 25 річчя 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. О точках 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.

Публікації, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

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». Тези доповідей.– 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». Тези доповідей.– 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». Тези доповідей.– Одеса: ОНМУ, 2020.– С. 30-35.

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

АНОТАЦІЯ

Чередарчук Н.І. Метод порівняльної непрямой оцінки границі витривалості відновлених колінчастих валів двигунів внутрішнього згоряння. – 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 means of transport. - 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 estimated estimation of destructive stresses for restored crankshafts of internal combustion engines is proved.

The influence of bends and breaks 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 calculated assessment of the fatigue strength of the restored crankshafts of the internal combustion engine with increasing load is substantiated.

The analysis of accuracy of the developed method is carried out taking into account influence of speed of increase of loading, and also casual and systematic components of the general 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.

Keywords: engine crankshaft, repair, crankshaft element, samples, fatigue resistance tests.