

Міністерство освіти і науки України  
Одеський національний морський університет

Кваліфікаційна наукова  
робота на правах рукопису

Кононова Ольга Миколаївна

УДК 620.178.352


**ДИСЕРТАЦІЯ**

**МЕТОД ОПЕРАТИВНОЇ ОЦІНКИ ОПОРУ ВТОМІ ВІДНОВЛЕНИХ  
СУДНОВИХ ГРЕБНИХ ВАЛІВ**

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

 О.М. Кононова

Науковий керівник:

Конопльов Анатолій Васильович, доктор технічних наук, професор

Одеса – 2019

## АНОТАЦІЯ

*Кононова О.М.* Метод оперативної оцінки опору втомі відновлених судових гребних валів. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.22.20 – Експлуатація та ремонт засобів транспорту. – Одеський національний морський університет, Одеса, 2019.

В дисертаційній роботі розроблено метод оперативної оцінки опору втомі моделей відновлених судових гребних валів, в межах якого вирішені наступні завдання.

Проведено порівняння двох підходів до оцінки втомної міцності моделей відновлених гребних валів: за їх границями витривалості і довговічностями до руйнування.

На основі кореляційних залежностей між границею витривалості і параметрами похилої ділянки кривої втоми, вираженої степеневим рівнянням, уточнена залежність для визначення коефіцієнта відносної довговічності. Також була запропонована залежність для визначення границі витривалості за відомим значенням даного коефіцієнта для випадку відсутності загального діапазону напружень в багатоцикловій області напружень.

Проведено аналіз точності методу оперативної оцінки опору втомі моделей судових гребних валів при їх порівняльних випробуваннях. При цьому були розглянуті як випадкові чинники, що впливають на точність, так і систематичні.

Здійснено перевірку розробленого методу на зразках і моделях відновлених судових гребних валів. Аналіз результатів показав, що розроблений метод дозволяє проводити оперативну порівняльну оцінку довговічності до руйнування на будь-якому з рівнів напружень  $U$  порівнянні з аналогами метод дозволяє уточнювати величини логарифмів довговічностей до 8%.

Результати дослідження становлять методичну основу при проведенні порівняльних випробувань моделей відновлених гребних валів для відпрацювання технологій їх ремонту.

*Ключові слова:* судновий гребний вал, ремонт, моделі, випробування на опір втомі, коефіцієнт відносної довговічності, границя витривалості.

## ANOTATION

*Kononova O.N.* Method for rapid assessment of fatigue strength of restored ship propeller shafts. – Qualification scientific work on the rights of a manuscript.

Thesis for the degree of candidate of technical sciences (Ph.D.) in the specialty 05.22.20 – Operation and repair of means of transport. – Odessa National Maritime University, Odessa, 2019.

In the thesis, a method was developed to quickly assess the fatigue resistance of models of reconstructed ship propellers, within which the following tasks were solved.

A comparison was made of two approaches to assessing the fatigue strength of models of restored propeller shafts: according to their endurance limits and durability to failure.

Based on the correlation dependences between the fatigue limit and the parameters of the sloping portion of the fatigue curve, expressed by a power equation, the dependence for determining the relative durability coefficient is refined. A correlation was also proposed for determining the endurance limit from the known value of this coefficient for the case of the absence of a common stress range in the high-cycle stress region.

Analysis of the accuracy of the method of rapid assessment of the fatigue resistance of models of propeller shafts during their comparative tests. At the same time, both random factors affecting accuracy and systematic factors were considered.

The developed method was tested on samples and models of restored propeller shafts. Analysis of the results showed that the developed method allows for the operational comparative assessment of durability to failure at any of the stress levels, compared with analogs, the method allows us to clarify the shafts if these logarithms ; durability up 8%.

The results of the study constitute a methodological basis for conducting comparative tests of models of restored propeller shafts for testing the technologies for their repair.

*Key words:* ship propeller shaft, repair, models, tests for fatigue resistance, coefficient of relative longevity, limit of endurance.

## **СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

### *Публікації, в яких викладено основні наукові результати дисертації*

1. Кононова О.Н., Шумило А.Н. Оценка циклической прочности деталей судовых машин по уравнениям подобия усталостного разрушения // Проблемы техники: Научно-производственный журнал Выпуск 2 [Фахове видання України]. – Одеса: ТОВ «Фірма «Інтерпрінт»», 2009. – С. 108-113.
2. Коноплев А.В., Кононова О.Н. Повышение точности построения кривых усталости // Вісник ОНМУ: Збірник наукових праць. Выпуск 2 (30) [Фахове видання України]. – Одеса: ОНМУ, 2010. – С. 117-122.
3. Коноплев А.В., Кононова О.Н., Евдокимов В.Д. Анализ точности метода ускоренного определения предела выносливости // Проблемы техники: Научно-производственный журнал Выпуск 3 [Фахове видання України]. – Одеса: ТОВ «Фірма «Інтерпрінт»», 2014. – С. 17-25.
4. Коноплев А.В., Кононова О.Н., Иоргачев В.Д. Анализ точности метода ускоренной оценки предела выносливости // Проблемы техники: Научно-производственный журнал Выпуск 4 [Фахове видання України]. – Одеса: ТОВ «Фірма «Інтерпрінт»», 2014. – С. 28-32.

5. O.M. Shumylo, O.M. Kononova Assessment of average resource of ship's shafting // Вісник ОНМУ: Збірник наукових праць. Випуск 2 (48) [Фахове видання України]. – Одеса: ОНМУ, 2016. – С. 173-180.
6. Коноплёв А.В., Кононова О.Н., Кибиков А.Г. Сравнительная оперативная оценка долговечности новых и восстановленных деталей // Вісник ОНМУ: Збірник наукових праць. Випуск 1 (50) [Фахове видання України]. – Одеса: ОНМУ, 2017. – С. 92-99.
7. Коноплёв А.В., Кононова О.Н. Оценка сопротивления усталости восстановленных деталей судовых машин и механизмов // Вісник ОНМУ: Збірник наукових праць. Випуск 2 (55) [Фахове видання України]. – Одеса: ОНМУ, 2018. – С. 68-74.
8. Коноплёв А.В., Кононова О.Н., Кибиков А.Г. Уточнение коэффициента относительной долговечности для объектов с низкими пределами выносливости // Вісник ОНМУ: Збірник наукових праць. Випуск 3 (56) [Фахове видання України]. – Одеса: ОНМУ, 2018. – С. 197-205.
9. Коноплёв А.В., Кононова О.Н., Рожко Е.К. Оценка систематической погрешности коэффициента относительной долговечности // Вісник ОНМУ: Збірник наукових праць. Випуск 1 (54) [Фахове видання України]. – Одеса: ОНМУ, 2018. – С. 99-105.
10. Коноплёв 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.
11. Шумило О.М., Кононова О.М., Вітюк Л.С. Технічна експертиза зруйнування суднового гребного валу // Вісник ОНМУ: Збірник наукових праць. Випуск 4 (57) [Фахове видання України]. – Одеса: ОНМУ, 2018. – С.73-92.
12. Golovan, A. & Rudenko, S., Gritsuk, I., Shakhov, A., Vychuzhanin, V., Mateichyk, V., Kononova, O., Kuric, I., Mllan Saga (2018) Improving the Process of Vehicle Units Diagnosis by Applying Harmonic Analysis to the

Processing of Discrete Signals. [Електронний ресурс] SAE Technical Paper 2018-01-1774, 2018, 2-11. - ISSN 0148-7191/ – DOI: 10.4271/2018-01-1774.  
(індексується в наукометричних базах: SCOPUS)

***Публікації, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації***

13. Коноплёв А.В., Кибаков А.Г., Кононова О.Н., Рожко Е.К. Использование долговечности до разрушения в качестве основной характеристики при проведении сравнительных испытаний на сопротивление усталости // Тези доповідей першої міжнародної науково-технічної конференції «Перспективні технології для забезпечення безпеки життєдіяльності та довголіття людини». Одеса: ОНМУ, 2018. – С. 46-50.
14. Коноплёв А.В., Галевский В.В., Кононова О.Н., Рожко Е.К. Экспериментальная проверка метода ускоренной оценки долговечности судовых гребных валов // Тези доповідей другої міжнародної науково-технічної конференції «Перспективні технології для забезпечення безпеки життєдіяльності та довголіття людини» Одеса: 2019. – С. 45-49.
15. Коноплёв А.В., Кононова О.Н., Чередарчук Н.И., Сологуб В.О. Использование уточнённого коэффициента относительной долговечности при оценке усталостной прочности восстановленных гребных валов // Тези доповідей другої міжнародної науково-технічної конференції «Перспективні технології для забезпечення безпеки життєдіяльності та довголіття людини» Одеса: 2019. – С. 38-41.
16. Шумило А.Н., Кононова О.Н. Внедрение аналитических методов расчета судовых конструкций и деталей по критерию сопротивления усталости // Тези доповідей Матеріали міжнародної науково-практичної конференції, присвяченої пам'яті професорів Фоміна Ю.Я. і Семенова В.С. Одеса: 2019. – С. 244-247.

***Публікації, які додатково відображають наукові результати дисертації***

17. Шумило О.М., Кононова О.М. Обґрунтований вибір матеріалу для деталей машин, що підлягають в експлуатації циклічному навантаженню // Тези доповідей I Міжнародної науково-практичної конференції «Європейська наука XXI століття: Стратегія і перспективи розвитку – 2006». – Том 22. Технічні науки. – Дніпропетровськ: Наука і освіта, 2006. – С. 80-85.
18. Коноплёв А.В., Кононова О.Н. Косвенная проверка гипотезы о равенстве функций распределения долговечности до разрушения и предела выносливости // Тези доповідей VI Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні порти – проблеми та рішення» – Іллічівськ: 2014. С. 39-42.
19. Шумило О.М., Кононова О.М. Визначення запасів втомної міцності валів і осей в ймовірнісному аспекті // Основні результати наукової діяльності південного наукового центру. Збірний наукових праць Південного наукового центру – Одеса: 2017. – С.180-192.

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>ВСТУП</b> .....	11
<b>РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД І АНАЛІЗ СПОСОБІВ ВІДНОВЛЕННЯ І МЕТОДІВ ВИЗНАЧЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ОПОРУ ВТОМІ СУДНОВИХ ГРЕБНИХ ВАЛІВ</b> .....	19
1.1. Види пошкоджень суднових гребних валів. Огляд сучасних способів їх відновлення .....	19
1.2. Опір втомі гребних валів відновлених наплавленням.....	23
1.3. Способи підвищення характеристик опору втомі відновлених гребних валів .....	25
1.4. Експериментальна оцінка характеристик опору втомі відновлених гребних валів .....	28
1.5. Прискорене визначення характеристик опору втомі відновлених гребних валів .....	35
1.6. Висновки до розділу 1.....	51
<b>РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА МЕТОДУ ПРОВЕДЕННЯ ПОРІВНЯЛЬНИХ ВИПРОБУВАНЬ НА ОПІР ВТОМІ НОВИХ І ВІДНОВЛЕНИХ МОДЕЛЕЙ СУДОВИХ ГРЕБНИХ ВАЛІВ</b> .....	53
2.1. Оцінка втомної міцності нових і відновлених моделей гребних валів за їх границями витривалості і довговічностями до руйнування .....	53
2.2. Розробка методу порівняльної оцінки втомної міцності моделей нових та відновлених гребних валів на основі коефіцієнта відносної довговічності .....	74
2.3. Уточнення коефіцієнта відносної довговічності для низьких значень границі витривалості .....	77
2.4. Визначення коефіцієнта відносної довговічності при відсутності загального діапазону напружень в багатоцикловій області .....	84
2.5. Фізичний зміст коефіцієнта відносної довговічності .....	86
2.6. Висновки за розділом 2.....	88



<b>РОЗДІЛ 3. ОЦІНКА ТОЧНОСТІ МЕТОДУ ВИЗНАЧЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ОПОРУ ВТОМІ МОДЕЛЕЙ СУДНОВИХ ГРЕБНИХ ВАЛІВ .....</b>	<b>90</b>
3.1. Вплив вибору функції кривої втоми на коефіцієнт відносної довговічності при порівняльних випробуваннях моделей гребних валів.....	90
3.2. Оцінка систематичної похибки визначення коефіцієнта відносної довговічності, пов'язаної з рівнем напружень і циклічною міцністю моделей гребних валів .....	99
3.3. Оцінка випадкової похибки визначення коефіцієнта відносної довговічності .....	104
3.4. Висновки за розділом 3 .....	106
<b>РОЗДІЛ 4. ПЕРЕВІРКА РОЗРОБЛЕНОГО МЕТОДУ ОЦІНКИ ХАРАКТЕРИСТИК ОПОРУ ВТОМІ ВІДНОВЛЕНИХ СУДНОВИХ ГРЕБНИХ ВАЛІВ .....</b>	<b>107</b>
4.1. Перевірка розробленого методу на зразках з різними теоретичними коефіцієнтами концентрації напружень .....	107
4.1.1 Планування об'єму експерименту .....	109
4.1.2 Експериментальна установка і методика проведення випробувань	111
4.2. Перевірка запропонованого методу за результатами випробувань моделей відновлених гребних валів з облицюванням.....	129
4.3. Перевірка запропонованого методу за результатами випробувань моделей відновлених гребних валів без облицювання.....	136
4.4. Висновки за розділом 4.....	139
<b>ВИСНОВКИ.....</b>	<b>140</b>
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....</b>	<b>142</b>
<b>ДОДАТКИ.....</b>	<b>154</b>
Додаток А. Методика визначення характеристик опору втоми на основі уточненого коефіцієнта відносної довговічності.....	154

Додаток Б. Акт використання результатів дисертаційного дослідження в навчальному процесі ОНМУ при підготовці бакалаврів і магістрів за спеціальністю 271 Річковий та морський транспорт.....	159
Додаток В. Довідка про використання в навчальному процесі ОНМУ результатів дисертаційного дослідження при підготовці докторів філософії (PhD) за спеціальністю 131 Прикладна механіка.....	160
Додаток Г. Акт використання результатів дисертаційної роботи у виробничу діяльність ПРАТ «ІСРЗ».....	161
Додаток Д. Акт впровадження результатів дисертаційної роботи в виробництво ТОВ «TRUST SHIP SERVICE».....	162
Додаток Е. Акт впровадження результатів дисертаційної роботи в виробництво ТОВ «ГРАНІ».....	163

## ВСТУП

**Актуальність теми.** Збільшення інтенсивності вантажоперевезень водним транспортом (найекономічнішим) призводить до безперервного зростання вантажопідйомності транспортних суден. Збільшення розмірів морських суден і вдосконалення рушійних систем пред'являють підвищені вимоги до матеріалів і технологій відновлення гребних валів, які після досягнення граничного стану економічно доцільно відновити, виключаючи необхідність їх заміни новими. Безпека плавання судна пов'язана з надійною роботою гвинто-рульового комплексу, тому основною вимогою, що пред'являється до судових валів, є забезпечення їх високої надійності.

Суднові гребні вали відносяться до категорії відповідальних деталей. Вони працюють в умовах значних змінних навантажень, і до технології їх відновлення пред'являються високі вимоги.

Найбільш економічним способом відновлення гребних валів вважається електродугове наплавлення, проте широкого застосування в практиці судноремонту цей спосіб не знайшов через значне зниження їх характеристик опору втомі. В даний час наплавленням відновлюють гребні вали відносно невеликих діаметрів, переважно судів обмеженого і прибережного плавання. Гребні вали суден середнього і великого тоннажу, а також вали з корозійними руйнуваннями глибиною більше 15 мм наплавленням не відновлюються, а замінюються новими.

Аналіз причин руйнування наплавлених валів показує, що поломки носять в основному втомний характер і є результатом впливу циклічних навантажень. Завдання підвищення опору втомі відновлених наплавленням валів може бути вирішено на основі розробки заходів, що знижують вплив несприятливих факторів, пов'язаних з наплавленням, а також нових оперативних методів порівняльної оцінки їх характеристик опору втомі з метою відпрацювання технологій відновлення.

Відновленням гребних валів займаються багато фірм, в основному в країнах з розвиненим суднобудуванням і судноремонтом. Впровадження контролю якості відновлених валів дозволило ширше впроваджувати нові технології ремонту, однак, навіть при цьому, їх використання поки обмежено.

Французьке Бюро Верітас не допускає ремонт гребних валів методом наплавлення, вважаючи, що зварювальні напруження і приховані тріщини можуть призвести до руйнування валу в процесі експлуатації. Це бюро вимагає, щоб по всій довжині валу, що омивається водою, стояло суцільне облицювання з нержавіючої сталі або з кольорового металу.

Бюро судноплавства США допускає відновлення валів електродуговим наплавленням тільки за умови обов'язкового контролю стану валу до і після відновлення за допомогою ультразвукової дефектоскопії.

Італійський Морський Регістр допускає використання наплавлених валів за допомогою нержавіючої сталі, проте, в його правилах вказується на небезпеку зниження границі витривалості за рахунок можливого утворення тріщин в зоні сплаву першого наплавленого шару з основним металом.

До теперішнього часу проведено багато досліджень в області опору втомі відновлених судових гребних валів. Найбільший внесок у вирішення цієї проблеми внесли: В. Грегор, Х. Гото, І. Масумото, Н. Оутід, Г. Томас, П. Форест, Ф.Д. Трайб, Ф.Ф. Бенуа, В.П. Коган, В.С. Іванова, І.А. Одінга, А.Н. Бабаєв, А.Е. Вайнерман, В.Д. Веселков, Л.А. Глікман, В.А. Дєєв, І.В. Кудрявцев, М.В. Олійник, Т.Г. Кравцов, Д.В. Іоргачьов, О.І. Стальниченко та інші.

Незважаючи на проведені численні дослідження за даним науковим напрямком, проблема опору втомі наплавлених валів залишається до теперішнього часу актуальною. Особливо це стосується оперативних методів оцінки характеристик опору втомі таких валів при відпрацюванні нових технологій їх відновлення.

Існуючі традиційні методи випробувань на опір втомі тривалі і трудомісткі. У той же час методи, які засновані на прискорених

випробуваннях, дозволяють багаторазово економити як час на проведення експерименту, так і кількість об'єктів випробувань. Однак, їх недоліками є невисока точність і проблема вибору того чи іншого методу для вирішення конкретної технічної задачі.

Проведення випробувань відновлених деталей є однією з ланок загального технологічного процесу, і, тому їх вдосконалення є невід'ємною частиною всього ремонтного процесу. Актуальність роботи також обумовлена тим, що альтернативи експерименту при вирішенні даного питання поки немає.

Дисертаційне дослідження спрямоване на вирішення одного з завдань ремонтно-відновлювального процесу – вдосконалення методів прискореного визначення характеристик опору втомі гребних валів, підданих відновлювальним операціям. Воно сприяє, як розвитку науки, так і вирішенню практичних завдань, перш за все, в судноремонті та суднобудуванні.

**Зв'язок з науковими програмами, планами, темами.** Дослідження виконані 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 и науково-технічних розробок на період до 2020 року», сформульованими на основі закону України «Про пріоритетні напрями розвитку науки и техніки» від 11.07. 2001р. № 2623-III, та плану проведення науково-дослідних робіт кафедри «Машинознавство» Одеського національного морського університету за пріоритетними напрямами. Результати науково-дослідних робіт за участю автора викладені в звітах НДР:

1. Дослідження вибору складу матеріалів для наплавлення, які забезпечують високий опір циклічним навантаженням (№ д.р. 0106U001270).
2. Комплексна розробка методів оцінки конструктивної міцності деталей судових механізмів, відновлених сучасними способами (№ д.р. 0112U002686).

3. Розвиток методів експериментального оцінювання характеристик опору втоми.

У зазначених НДР автор брала участь як виконавець окремих етапів.

**Мета і задачі дослідження.** Метою роботи є розробка методу оперативного визначення довговічності до руйнування відновлених суднових гребних валів більш точого ніж існуючі аналоги.

Зазначена мета досягається вирішенням наступних взаємопов'язаних наукових завдань:

1. Обґрунтувати можливість використання довговічності до руйнування як основної характеристики при оперативній порівняльній оцінці втомної міцності моделей відновлених суднових гребних валів;

2. Обґрунтувати принцип уточнення коефіцієнта відносної довговічності на основі використання кореляційних залежностей між параметрами похилої ділянки кривої втоми і границею витривалості;

3. Розробити метод оперативної порівняльної оцінки циклічної міцності моделей відновлених суднових гребних валів на основі використання уточненого значення коефіцієнта відносної довговічності;

4. Оцінити точність розробленого методу з урахуванням впливу вибору рівняння кривої втоми, а також випадкової і систематичної похибок визначення коефіцієнта відносної довговічності;

5. Провести перевірку точності методу на стандартних лабораторних зразках і моделях відновлених суднових гребних валів за наведеними в літературних джерелах результатами випробувань.

**Об'єктом дослідження** є процес вдосконалення технологій ремонту суднових гребних валів.

**Предметом дослідження** є оперативні методи оцінки опору втоми моделей відновлених суднових гребних валів.

**Методи дослідження.** Достовірність виконаних досліджень базується на:

– використанні методів статистичного аналізу експериментальних і розрахункових даних для оцінки характеристик опору втомі зразків і моделей відновлених суднових валів;

– використанні кореляційних залежностей між параметрами пошколеної ділянки кривої втомі і границею витривалості, отриманих шляхом обробки репрезентативної вибірки експериментальних даних для обґрунтування запропонованих припущень і оцінки систематичної похибки методу;

Достовірність отриманих, в дисертаційному дослідженні, результатів підтверджена співставленням результатів розрахунків за запропонованим методом та експериментальними даними, які наведені в літературних джерелах інших авторів.

**Наукова новизна отриманих результатів** полягає в наступному:

*Вперше:*

– запропоновано і теоретично обґрунтовано при порівняльних випробуваннях моделей відновлених суднових гребних валів на опір втомі, на відміну від існуючого підходу, замість границі витривалості, використовувати як основну характеристику опору втомі довговічність до руйнування, що суттєво зменшує тривалість експерименту;

– розроблено метод оперативної оцінки опору втомі моделей суднових гребних валів на основі використання коефіцієнта відносної довговічності, якій, на відміну від існуючих, є більш точним та економічним.

*Вдосконалено:*

– метод оцінки точності визначення коефіцієнта відносної довговічності, в якому враховуються випадкова і систематична складові його похибки, що дозволило визначити загальну похибку розробленого методу.

*Отримали подальший розвиток:*

- метод визначення коефіцієнта відносної довговічності для низьких значень границі витривалості, які характерні для відновлених суднових гребних валів;

- метод визначення коефіцієнта відносної довговічності при відсутності загального діапазону напружень в багатоцикловій області.

### **Практичне значення отриманих результатів.**

Результати дисертаційного дослідження мають практичне значення і призначені для використання на підприємствах, які виконують ремонт деталей судових машин і механізмів методами наплавлення та іншими видами відновлювання зношених поверхонь. Наукові результати дисертаційного дослідження впроваджені на ПРАТ «Іллічівський судноремонтний завод», ТОВ «Trust Ship Service», ТОВ «ГРАНІ».

Результати дослідження мають також теоретичне значення для закладів Міністерства освіти і науки України та використовуються в навчальному процесі Одеського національного морського університету при підготовці бакалаврів і магістрів за спеціальностями 271 – Річковий та морський транспорт; 142 – Енергетичне машинобудування і включені в робочі програми курсів «Технічне обслуговування і ремонт судових технічних засобів», «Організація та технологія судноремонту», а також використовуються при викладанні дисциплін «Прискорені методи випробувань деталей машин на опір втомі», «Експериментальні методи випробувань деталей машин на опір втомі» при підготовці докторів філософії (PhD) за спеціальністю 131 – Прикладна механіка.

**Особистий внесок здобувача.** Наукові положення, розробки та висновки дисертаційної роботи, які винесені на захист, отримані здобувачем самостійно. У дисертаційне дослідження з статей, написаних у співавторстві, включені тільки результати, отримані автором особисто, або з безпосередньою його участю.

У спільній роботі [1] здобувач брала участь в оцінці довговічності деталей судових машин на основі рівняння подібності втомного руйнування. У статтях [2, 19] здобувач брала участь в обробці даних при побудові кривих втоми. У спільних роботах [3] і [4] внесок здобувача полягав у визначенні систематичної похибки методу. У статтях [5, 12, 13] здобувач брала участь у



постановці завдання і формуванні висновків. У спільній роботі [6] автору належить розробка методу порівняльної оперативної оцінки втомної міцності нових і відновлених суднових гребних валів. У статті [7] здобувачем проведено аналіз технології відновлення суднових гребних валів, а також методів їх випробувань на опір втомі. Внесок здобувача в роботі [8] полягає в розробці методу уточнення коефіцієнта відносної довговічності для об'єктів з низькими границями витривалості. У спільній статті [9] здобувач запропонувала спосіб оцінки систематичної похибки коефіцієнта відносної довговічності. В роботі [10] здобувач провела аналіз способів відновлення суднових гребних валів. В роботі [11] внесок здобувача полягає в технічній експертизі руйнування гребного валу. У спільній статті [14] здобувачем проведено аналіз вибору матеріалу для деталей, що піддаються циклічним навантаженням. У статті [15] здобувачем запропоновано використовувати довговічність до руйнування як основний критерій втомної міцності поряд з границею витривалості. У статті [16] здобувачем проведено розрахунок коефіцієнта запасу втомної міцності валів в імовірнісному аспекті. У спільній роботі [17] здобувачем проведена перевірка методу прискореної оцінки довговічності моделей суднових гребних валів за результатами експерименту. У статті [18] здобувач запропонувала метод уточнення коефіцієнта відносної довговічності.

**Апробація результатів дисертації.** Основні наукові положення й результати дисертаційної роботи доповідалися, обговорювалися та отримали позитивні відгуки на:

- I міжнародній науково-практичній конференції «Європейська наука XXI століття: Стратегія і перспективи розвитку – 2006» (м. Дніпропетровськ, 2006);

- VI міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні порти – проблеми та рішення» (м. Іллічівськ, 2014);

- I, II міжнародних науково-технічної конференціях «Перспективні технології для забезпечення безпеки життєдіяльності та довголіття людини» (м. Одеса, 2018, 2019);

- міжнародній науково-практичній конференції, присвяченій пам'яті професорів Фоміна Ю.Я. і Семенова В.С. (Одеса-Стамбул-Одеса, 2019).

**Публікації.** Основні результати дисертаційної роботи опубліковані в 19 наукових роботах. З них: 11 робіт – у спеціалізованих виданнях, рекомендованих Міністерством освіти і науки України; 1 робота – у науковому виданні, яке входить до переліку міжнародної наукометричної бази SCOPUS; 7 робіт – в збірниках наукових праць, виданих за матеріалами міжнародних науково-практичних конференцій.

#### **Обсяг і структура дисертації**

Дисертація складається зі вступу, 4 розділів, висновків, списку використаних джерел, який містить 117 найменувань, 6 додатків. Основну частину роботи доповнено 25 таблицями, ілюстровано 43 рисунками. Загальний обсяг роботи складає 163 с., в тому числі 141 с. основного тексту, 12 с. списку використаних джерел, 22 с. таблиць і рисунків, що займають площу сторінки, 9 с. додатків.

# РОЗДІЛ 1

## ОГЛЯД І АНАЛІЗ СПОСОБІВ ВІДНОВЛЕННЯ І МЕТОДІВ ВИЗНАЧЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ОПОРУ ВТОМІ СУДНОВИХ ГРЕБНИХ ВАЛІВ

### **1.1 Види пошкоджень суднових гребних валів. Огляд сучасних способів їх відновлення**

Вдосконалення судноремонтного виробництва передбачає скорочення тривалості, підвищення якості і зниження вартості ремонту судів. Загальносвітова тенденція до прагнення ресурсозбереження примушує по-новому подивитися на проблему забезпечення суднових машин і механізмів запасними деталями, які можна періодично відновлювати. У судноремонтному виробництві в першу чергу ця вимога відноситься до суднових гребних валів, які є відповідальними і дорогими деталями.

Гребні вали в процесі експлуатації піддаються циклічному навантаженню при дії згинного моменту від ваги гвинта та консольної частини валу, зношується в результаті тертя в дейдвудних підшипниках, а через незрівноваженість мас (при втраті лопаті, виході гвинта з води або корозії лопатей) відчуває додаткові навантаження, викликані крутильними коливаннями. Внаслідок зносу дейдвудних підшипників гребний вал просаджується під дією власної ваги, а його вісь вигинається, що призводить до збільшення амплітуди напружень. Крім перерахованих факторів гребний вал може відчувати ударні навантаження (при ударі гвинта об лід та інші тверді тіла). При частому оголенні гвинта (під час штормової погоди) гвинт обертається з різною частотою, що також впливає на його втомну міцність.

Вищезгадані чинники призводять до зносу облицювань, порушення ізоляції між облицюваннями, вигину осі валу, утворення втомних тріщин і нерідко до повного руйнування в результаті втоми.

Незважаючи на захист гребних валів покриттями і облицюваннями, не можна не брати до уваги фактор корозійного впливу води. Такий вплив виключено конструкцією гребного валу, але він стає можливим при порушенні цілісності облицювань і покриттів. Відомо, що спільний вплив корозійного середовища і циклічних навантажень призводить до зниження границі витривалості практично до нуля. Розглядати в цьому випадку можна тільки обмежену границю витривалості при відповідній довговічності.

Крім розглянутих чинників на довговічність гребного валу помітний вплив має фреттинг-корозія. Вона спостерігається в місцях посадки маточини гребного гвинта на вал, а також в місцях посадки облицювань. В результаті цього впливу відбувається пошкодження посадочних поверхонь у вигляді втомних тріщин і раковин.

Поломки гребних валів найчастіше спостерігаються в перерізі, що близький до великого діаметру конуса вала під гребним гвинтом, між торцями маточини гвинта і кормовим облицюванням гребного валу. Рідше руйнування відбуваються в кутах шпонкового пазу, під облицюваннями і міжоблицювальною ізоляцією. На зламах гребних валів можна спостерігати зону розвитку магістральної тріщини і зону остаточного долому, що свідчить про втомну природу руйнування (рис. 1.1) [88].

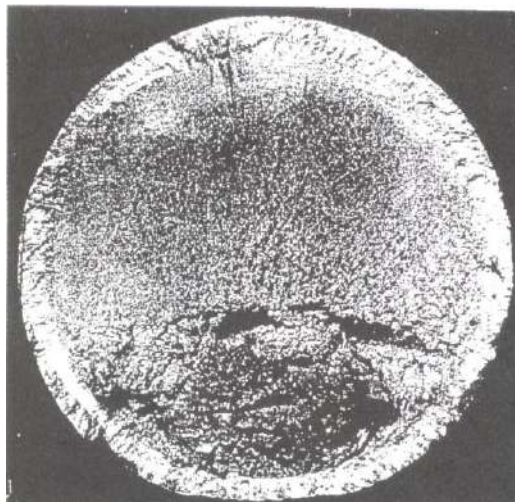


Рисунок 1.1 – Характерний втомний злам гребного валу

Для виготовлення гребних валів транспортних, промислових, спеціалізованих суден, а також суден технічного і портового флоту використовуються вуглецеві і леговані сталі з границею текучості  $\sigma_T = 250 \dots 800$  МПа і для швидкісних суден з  $\sigma_T = 550 \dots 750$  МПа. Це в першу чергу сталі марок: 35, 40, 45, 40Х, 35ХМ, 34ХМА, 38ХВА, 38ХНВА, 20Х13. У гребних валів, виготовлених з корозійностійких сталей, границя витривалості, з урахуванням масштабного фактору, може досягати 100...150 МПа, а при використанні конструкційних сталей – 40...70 МПа [1, 9, 22]. Для швидкісних суден найчастіше застосовують аустенітно-мартенситні сталі марок: 09Х17Н6Т, 0Х15Н5Д2Т, 1Х16Н4Б, 0Х17Н4Д2, 09Х17Н7Ю [10, 20, 89].

Гребні вали суден великого тонунажу виготовляють з бронзовими або біметалічними облицюваннями для захисту від морської води (рис.1.2), а вали суден малого і середнього тонунажу найчастіше не мають облицювань і працюють в контактi з морською водою.

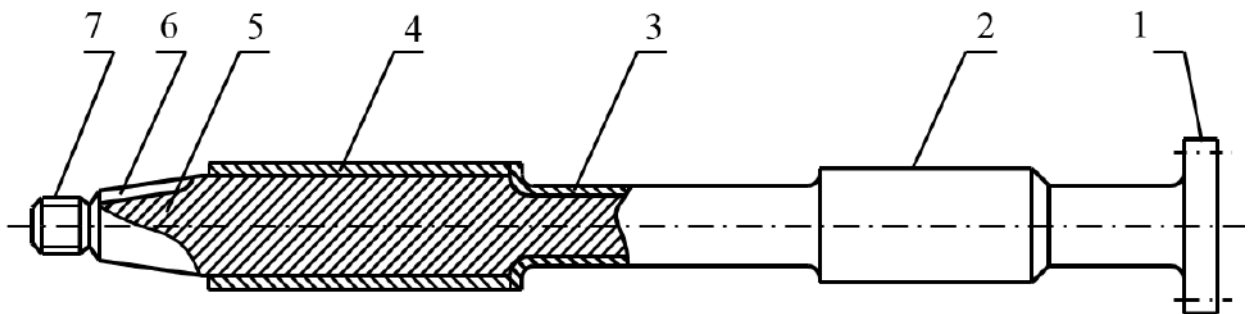


Рисунок 1.2 – Гребний вал з облицюванням: 1 – приєднувальний фланець; 2,4 – бронзові облицювання; 3 – запобіжне покриття; 5 – конус гребного валу; 6 – ложкоподібний шпонковий паз; 7 – різьблення під гайку гребного гвинта

Бронзові облицювання не забезпечують належного захисту вала від корозії і на практиці не рідкісні випадки, коли слабшає посадка облицювання і вода, яка потрапляє в простір під облицюванням, виступає додатковим випадковим фактором, що сприяє втомному руйнуванню вала [2, 3, 9, 16, 21, 58]. Проте, в 90 % випадків гребні вали виготовляють з облицюваннями, але

через високу вартість їх роблять не суцільними, а переривчастими тільки в місцях установки дейдвудних підшипників [88]. Простір між облицюваннями покривають епоксидними смолами, які оберігають вал від корозії. Такий захист валів з економічної точки зору є оптимальним з урахуванням того, що їх діаметри можуть досягати 1000 мм і мати довжину 10 метрів і більше. Маса валу при цьому може досягати 50 тон.

Призначення облицювання полягає не лише в оберіганні гребного валу від корозії, воно також є однією з пар тертя ковзання. Другою парою є втулки-вкладиші, матеріалами, для виготовлення яких служать дерево-шаруваті пластики, текстоліт, бакаут, капролон, гума і таке інше. В якості мастила при цьому застосовують забортну воду.

З огляду на, те що гребні вали є не тільки відповідальними деталями, а ще й дорогими, їх доцільно відновлювати. Вартість їх відновлення становить приблизно 30 % від вартості нових [89]. Найбільш поширеним способом відновлення гребних валів є наплавлення електродним дротом під флюсом по гвинтовій траєкторії з постійним кроком [19, 57, 61, 81]. Завдяки простоті цей спосіб легко механізується і забезпечує високу якість наплавлення. Продуктивнішим є спосіб широкошарового наплавлення електродною стрічкою [48, 49, 50]. Цей спосіб відрізняється малою глибиною проплавлення основного металу, що сприятливо впливає на його структуру в навколошовній зоні.

Плазмовий спосіб наплавлення струмопровідним дротом, який використовується для виготовлення нових валів, поки не знайшов широкого застосування при їх ремонті. Головною причиною тому є невисока продуктивність цього способу (4-8 кг/годину) [91].

Інші, способи відновлення зношених деталей, зокрема, електроконтактне, вібро-дугове, імпульсно-дугове і електрошлакове наплавлення, детонаційне напилення, тверде сталювання і різні гальванічні покриття доки не знайшли застосування при відновленні судових гребних валів.

## 1.2 Опір втомі гребних валів відновлених наплавленням

На втомну міцність відновлених суднових гребних валів окрім основних чинників, впливають також додаткові, пов'язані з властивостями наплавленого матеріалу, дефектами зварювання і залишковими напруженнями. Найбільш небезпечними є зварювальні дефекти, які можуть стати джерелом виникнення і розвитку втомних тріщин. До таких дефектів відносяться непровари, гарячі тріщини і шлакові включення, що розташовані біля границі сплавлення. Границя витривалості валів з такими дефектами може знижуватися до 32 % [81].

Границя сплавлення є відповідальною ділянкою за початок руйнування, оскільки вона має низькі механічні характеристики. Внаслідок цього, руйнування починається під наплавленим шаром, а не на поверхні, як у ненаплавлених валів [85, 95]. Встановлено, що вплив дефектів проявляється більшою мірою, коли вони сконцентровані в місцях дії розтягуючих напружень і, навпаки, знижується, коли дефекти злокалізовані в зоні стиску [14, 54]. При цьому, якщо наплавлений метал має високу твердість, то вплив напружень стиску за наявності зварювальних дефектів невеликий [23].

Місце розташування зварювального дефекту також має вплив на опір втомі, зокрема, найбільш віддалені від поверхні зварювальні дефекти впливають у меншій мірі [110].

Розміри відновлених валів, що мають зварювальні дефекти, також помітно впливають на їх опір втомі. Масштабний фактор таких валів проявляється більшою мірою, чим без них [60].

Залишкові напруження обумовлені неоднорідністю пластичних деформацій і структурними перетвореннями, що відбуваються в наплавленому металі і навколошовній зоні [1, 14]. Вони можуть бути такими, що розтягують, і таким, що стискають. Величина розтягуючих напружень може досягати 500 МПа [96]. Незважаючи на таку значну величину, вони не мають істотного впливу на опір втомі, оскільки здатні релаксувати під дією циклічних

навантажень. Для швидкого зняття залишкових розтягуючих напружень іноді застосовують локальне пластичне деформування, ультразвукову і вібраційну обробку [7].

У разі наявності залишкових стискуючих напружень в поверхневому шарі, включаючи границю сплавлення, границя витривалості збільшується на 6...20 % [14, 96]. Автори роботи [95] вважають, що це обумовлено тим що залишкові напруження стиску перешкоджають поширенню тріщин.

Про вплив властивостей наплавленого металу на опір втомі відновлених гребних валів в літературі думки суперечливі [15, 18, 59, 113]. Існує точка зору, що пластичність основного і наплавленого металу має бути однакою для забезпечення рівної міцності [5], проте це не є обов'язковою умовою підвищення опору втомі [113]. Дослідження, проведені в роботі [17], показують, що основну роль в підвищенні опору втомі грає твердість наплавленого металу, хоча і не є радикальним засобом.

Товщина наплавленого шару не має істотного впливу на характеристики опору втомі валів. Істотніший вплив має зона термічного впливу. Існує стійка точка зору, що головною причиною послаблення навколошовної зони є хімічна неоднорідність металу, яка обумовлена високою температурою при наплавленні [103, 107, 114].

Усі наведені вище дослідження відносяться до валів, що наплавлені перлітовими сталями. У ряді робіт наводяться результати досліджень втомної міцності валів, наплавлених хромонікелевими сталями [6, 57, 81, 82]. Оцінюючи ці результати, можна відмітити, що до теперішнього часу не знайдений спосіб, який може забезпечити наплавлення без істотного зниження характеристик опору втомі. Проведені випробування зразків показали, що наплавлення хромонікелевими сталями знижує границю витривалості на 26...67 % [8, 55]. Головною причиною зниження характеристик опору втомі вважають зварювальні дефекти, зокрема шлакові включення і гарячі тріщини [56, 111].



Досвід експлуатації показує, що руйнування реальних валів як нових, так і відновлених відбувається в межах  $2,5 \cdot 10^8 - 4,5 \cdot 10^8$  циклів, що значно перевищує стандартну базу випробувань на опір втомі ( $10^7$  циклів).

### **1.3 Способи підвищення характеристик опору втомі відновлених гребних валів**

Відомі металургійний і механічний способи підвищення характеристик опору втомі [54, 55, 87]. Перший заснований на зміні властивостей наплавленого металу в процесі кристалізації зварювальної ванни, а другий – на створенні в поверхневому шарі наплавленого металу напружень стиску. Зміна властивостей наплавленого металу металургійним способом може бути досягнута за рахунок утворення в аустенітній матриці голчастого фериту [87]. Цей спосіб дозволяє підвищити границю витривалості на 8...10 %, що є недостатнім.

Найбільш ефективним способом підвищення характеристик опору втомі, як вважають автори робіт [54, 55], є пластична деформація наплавленого поверхневого шару з метою створення в ньому залишкових напружень стиску. Ці напруження перешкоджають зародженню і розвитку втомних тріщин.

Найбільш поширеним способом пластичного деформування поверхні є обкатка роликami. Цей метод застосовують не лише для наплавлених валів, але також і для нових. При цьому, як вважає автор роботи [84], можна підвищити границю витривалості на 20...40 %. При використанні металу наплавлення нержавіючу сталь, латунь або мідь границю витривалості можна підвищити в 1,5 рази.

Ефективність обкатки залежить від співвідношення товщини наплавленого зміцненого шару. Іншими словами, чим більше товщина зміцненого шару, тим вище характеристики опору втомі. Проте, досягти значної товщини зміцненого шару складно. Для цього потрібні великі зусилля,

близько 8...10 кН, що є практично нездійсненним для валів діаметром менше 150 мм (через недостатню жорсткість).

Ще одним недоліком цього методу зміцнення є те, що у виробничих умовах складно контролювати режим обкатки і товщину зміцненого шару. Проблема контролю полягає в тому, що наплавлений шар і навколошовна зона різко відрізняються за твердістю, а метал наплавлення неоднорідний за товщиною і довжиною ділянки, що наплавляється.

Обкатка роликками може привести до появи на поверхні дрібних тріщин, проте їх зростання сильно гальмується напруженнями стиску.

Зазвичай наплавлення валу здійснюють під облицюванням. При насадці облицювання (або гребного гвинта на вал) у торців облицювання (маточини гвинта) утворюються ділянки значної концентрації напружень. За рахунок цього границя витривалості валу знижується більш ніж в 2 рази. Саме тут найчастіше відбувається його руйнування. Основний вплив на процес руйнування чинить фреттинг-корозія. В одних випадках вона виступає як прискорювач зносу, а в інших – як джерело зародження втомних тріщин [53, 54].

Вразливим місцем гребного валу є також шпонковий паз, який при відновленні вала теж наплавляють. Наплавлення в цьому випадку знижує границю витривалості на 30 %, а ефективний коефіцієнт концентрації напружень в небезпечному перерізі досягає 2,17 - 2,34 [4]. Таким чином, для підвищення несучої здатності гребного валу, необхідно вирішувати дві взаємозв'язані задачі. Одна з яких відноситься до поверхневого зміцнення наплавленого шару, а друга – до зниження інтенсивності фреттинг-процесів.

Відомо, що процес фреттинг-корозії в основному залежить від величини натягу в місцях посадки, амплітуди відносних мікрозміщень і їх частоти. Мікрозміщення, у свою чергу, обумовлені різною жорсткістю вала і маточини. Як правило, вони значно більші на валу, чим на маточині. При цьому деформації валу і маточини гребного гвинта не постійні по довжині з'єднання (при згині відмінність прогинів валу і маточини збільшується від середньої

частини маточини до її торців, а при крутінні – відмінність кутів закручування буде більше біля торця маточини з боку підведення крутного моменту).

Змінити таку картину деформації з'єднання вала з гребним гвинтом можна за рахунок раціонального конструювання. Зокрема цього можна добитися за рахунок змінної жорсткості маточини гвинта [11, 31, 32, 33, 47, 53, 65, 66]. На рис. 1.3. зображено різноконусне з'єднання вала і маточини з кільцевою виточкою, яка забезпечує змінну по довжині жорсткість [53].

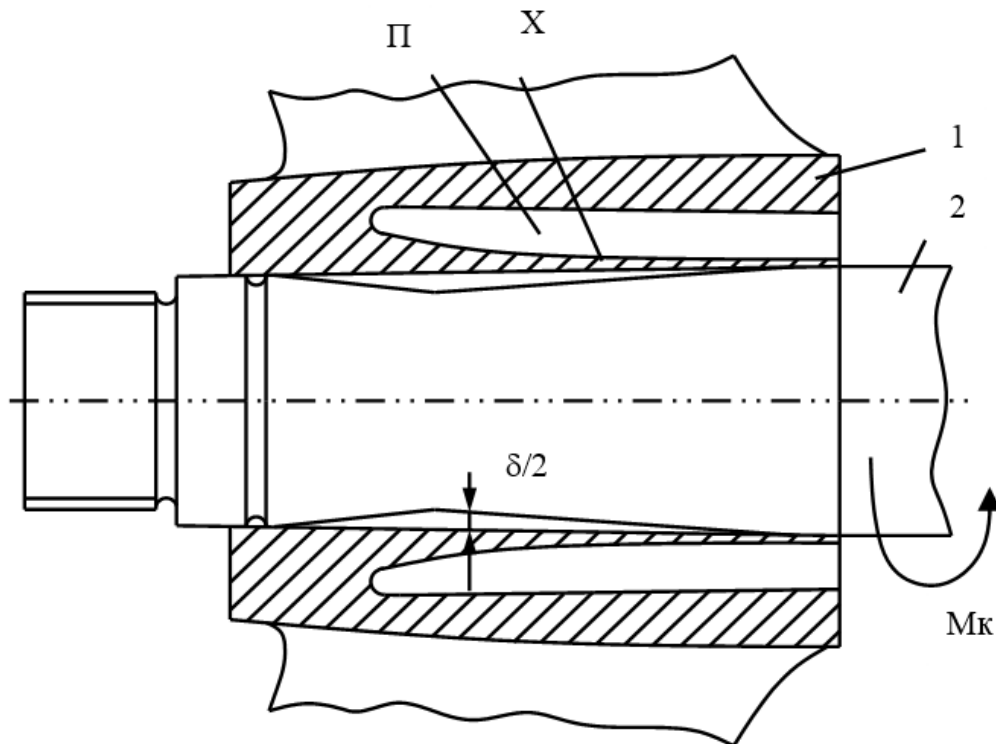


Рисунок 1.3 – Різноконусне з'єднання гребного гвинта 1 з гребним валом 2, що має кільцеву виточку з боку торця маточини: П – кільцева порожнина, Х – демпфуючий хвостовик;  $\delta$  – умовно зображений змінний натяг

Збільшення податливості маточини за рахунок кільцевої виточки з одного боку зменшує тиск в небезпечному перерізі вала, а з іншої – знижує величину їх відносних переміщень. Це не лише дозволяє запобігти фреттинг-корозії, але також за рахунок підвищеної податливості пом'якшити дію ударних навантажень. Ефект підвищення циклічної довговічності таких з'єднань підтверджений їх тривалою експлуатацією [53].

Гребні гвинти з підвищеною пружною податливістю розробляються на базі звичайних жорстких конструкцій. Це можливо здійснити в тих випадках, коли є запас їх статичної міцності [53]. При цьому досягається зменшення маси орієнтовно на 30 % і підвищення довговічності.

Ефект підвищення довговічності таких деталей може бути пояснений тим, що на пружну деформацію деталей під час експлуатації витрачається кінетична енергія. Частково вона розсіюється (механічний гістерезис), а частково переходить в потенційну енергію (акумулюється). При знятті навантаження потенційна енергія зі зміщенням в часі повертається в систему і, таким чином, знову перетворюється на кінетичну. При цьому максимальне значення навантаження знижується за рахунок підвищення його мінімальної величини, тобто відбувається його вирівнювання.

Слід також відмітити, що в з'єднаннях гребного вала і гвинта відбувається перерозподіл контактного навантаження, що дозволяє значно знизити величину концентрації напружень, усунути кромковий ефект і фреттинг-корозію.

Нині немає єдиної строгої теорії розрахунку з'єднань з податливими деталями. Це обумовлено тим, що на їх довговічність впливає велика кількість чинників, врахувати які при аналітичному розрахунку неможливо. Цю проблему можна розв'язати шляхом проведення експерименту. Стандартні методи проведення випробувань вимагають значних витрат часу і матеріальних ресурсів. Враховуючи цю обставину, найбільш доцільним способом для вирішення цього завдання є прискорені методи [28], засновані на скороченому експерименті.

#### **1.4 Експериментальна оцінка характеристик опору втомі відновлених гребних валів**

При проведенні випробувань відновлених гребних валів, або їх моделей (зразків) зазвичай використовують втомні випробувальні установки, що

забезпечують навантаження чистим згином при симетричному вигині зразка, який обертається (рис. 1.4).

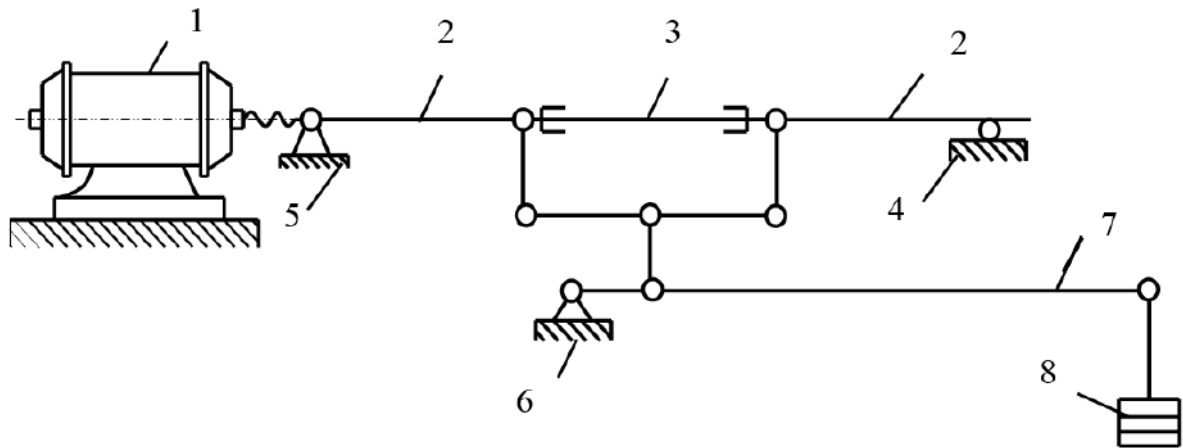


Рисунок 1.4 – Кінематична схема установки для випробування на опір втомі:

- 1 – електродвигун; 2 – шпиндель; 3 – зразок; 4 – рухлива опора;  
5 – опора шпинделя; 6 – опора важеля; 7 – важіль; 8 – вантаж.

Ця схема забезпечує навантаження зразка по всій робочій частині і в той же час близька до реальних умов роботи суднового гребного вала. Зразки для проведення випробувань зазвичай виготовляють великих розмірів. Це обумовлено технологічним процесом наплавлення і зменшенням впливу масштабного чинника на результат випробувань, тобто розміри зразків, по можливості, мають бути близькі до розмірів реальних валів. Ця схема використовується для проведення випробувань при частотах 1500 - 3000 циклів на хвилину.

В роботі [52] приведені конструкції зразків і моделей валів для випробувань діаметром 70 і 200 мм з конічними хвостовиками (рис.1.5).

Великогабаритні моделі, діаметром 200 мм в робочій частині, були потрібні для обґрунтування перенесення результатів випробувань валів діаметром 70 мм на натурні вали.

Для запобігання руйнування зразків в захоплювачах їх конічні частини покривали дисульфідом молібдену, який утворює плівку на цих поверхнях і перешкоджає фреттинг-корозії та схоплюванню.

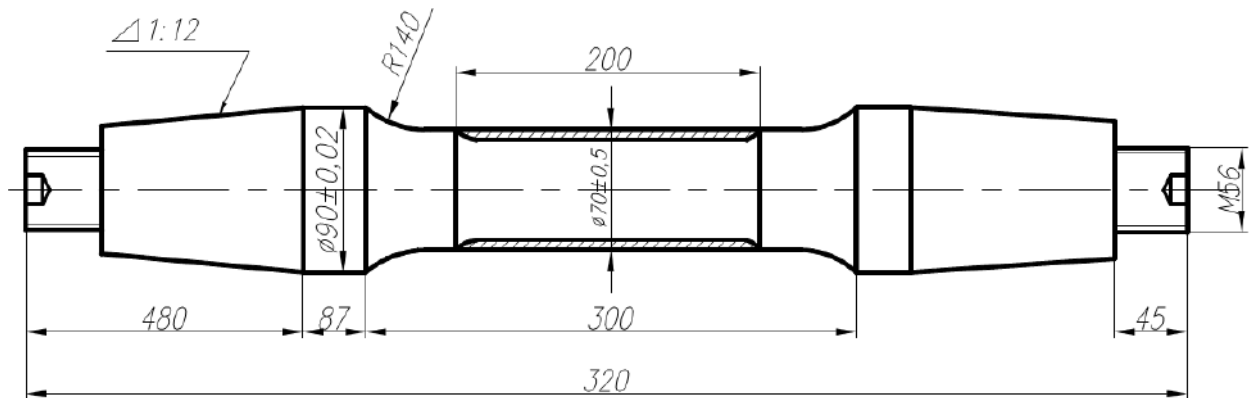


Рисунок 1.5 – Зразок з наплавленням для випробувань на опір втомі

З метою дослідження спільного впливу наплавлення і насадки були запропоновані конструкції зразків з одностороннім знімним конусом (рис. 1.6) [52].

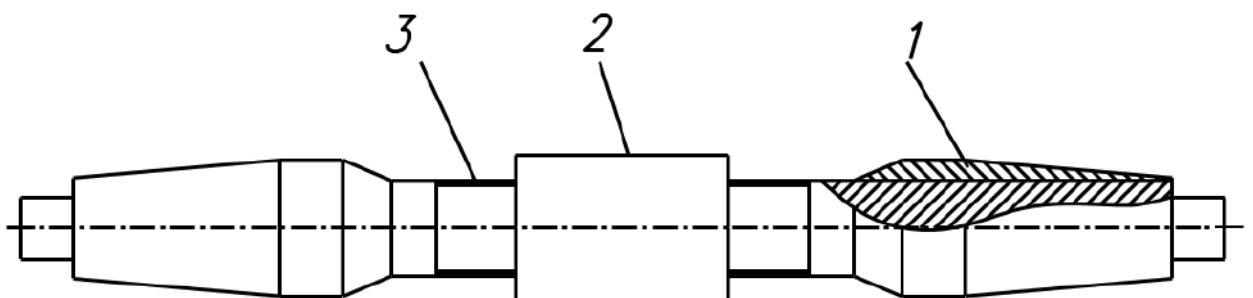


Рисунок 1.6 – Зразок з одностороннім знімним конусом:

1 – знімний конус; 2 – насадка; 3 – наплавлення

Наплавлення зразків здійснювалося по гвинтовій траєкторії. Довжина напавленої ділянки дорівнювала трьом діаметрам перерізів робочої зони зразка. Натяг  $\Delta$  визначали залежно від діаметру робочої частини зразка за формулою [52]

$$\Delta = 0,5 \cdot 10^{-3} d, \quad (1.1)$$

де  $d$  – діаметр зразка в робочій частині.

Товщина насадки також визначається залежно від діаметру робочої частини зразка [52].

$$t \geq 0,03 \cdot d + 7,5 \text{ (мм)}. \quad (1.2)$$

Довжину облицювання приймають рівною подвійному діаметру робочої частини зразка.

Технологія виготовлення зразків з наплавленим шаром припускає відповідну термічну і механічну обробку та зміцнення робочої поверхні.

В якості критерія циклічної міцності приймають довговічність до остаточного руйнування. При цьому фіксують число циклів і відповідні номінальні напруження.

Через високу вартість зразків похилу ділянку кривої втоми будують за обмеженим числом випробувань. Горизонтальну ж ділянку, тобто границю витривалості, зовсім визначають орієнтовно, лише верхнім і нижнім рівнями напружень (верхній рівень відповідає випадку руйнування зразка, а нижній – неруйнування), що є серйозним недоліком таких випробувань. Середньомовірні значення границі витривалості при цьому зовсім не визначають. Порівняння і відпрацювання різних технологій відновлення суднових гребних валів при такому підході здійснити можна лише у грубому наближенні.

Нижче в табл. 1.1 представлені результати випробувань на опір втоми зразків діаметром 70 мм, наплавлених електродним дротом Св-08А під флюсом і Св-08Г2С у вуглецевому газі, а також наплавлених електродною стрічкою із сталі 08кп під флюсом АН-348А з різною товщиною наплавленого шару (3, 5 і 7 мм) [52]. Графічне зображення результатів випробувань в координатах  $\lg N - \sigma$  представлено на рисунках 1.7 й 1.8.

Таблиця 1.1 – Результати випробувань зразків з різними видами наплавлення на опір втомі

№ зразку	Напруження $\sigma$ , МПа	Довговічність до руйнування $N$ , цикл.	№ зразку	Напруження $\sigma$ , МПа	Довговічність до руйнування $N$ , цикл.
1	2	3	4	5	6
Наплавлення електродним дротом Св-08А під флюсом					
1	180	5,45	6	160	6,23
2	170	5,34	7	150	6,27
3	170	5,78	8	150	6,53
4	160	5,59	9	150	$10^7$ (зразок не зруйнувався)
5	160	5,78	10	140	$10^7$ (зразок не зруйнувався)
Наплавлення електродним дротом Св-08А 08Г2С в вуглецевому газі					
1	150	5,38	6	110	5,93
2	130	5,40	7	110	6,78
3	120	5,95	8	100	6,28
4	120	6,44	9	90	6,53
5	115	$10^7$ (зразок не зруйнувався)	10	90	$10^7$ (зразок не зруйнувався)



Продовження таблиці 1.1

1	2	3	4	5	6
Наплавлення електродною стрічкою із сталі 08Кп під флюсом АН-348А (товщина наплавленого шару 3 мм)					
1	180	5,60	6	150	6,48
2	180	6,00	7	150	6,73
3	160	5,70	8	150	6,93
4	160	6,00	9	140	10 <sup>7</sup> (зразок не зруйнувався)
5	160	6,20		-	-
Наплавлення електродною стрічкою із сталі 08Кп під флюсом АН-348А (товщина наплавленого шару 5 мм)					
1	180	5,32	3	160	5,90
2	170	6,00	4	130	10 <sup>7</sup> (зразок не зруйнувався)
Наплавлення електродною стрічкою із сталі 08Кп під флюсом АН-348А (товщина наплавленого шару 7 мм)					
1	200	5,33	5	130	6,70
2	180	5,90	6	130	10 <sup>7</sup> (зразок не зруйнувався)
3	160	6,08	7	125	10 <sup>7</sup> (зразок не зруйнувався)
4	140	6,81		-	-

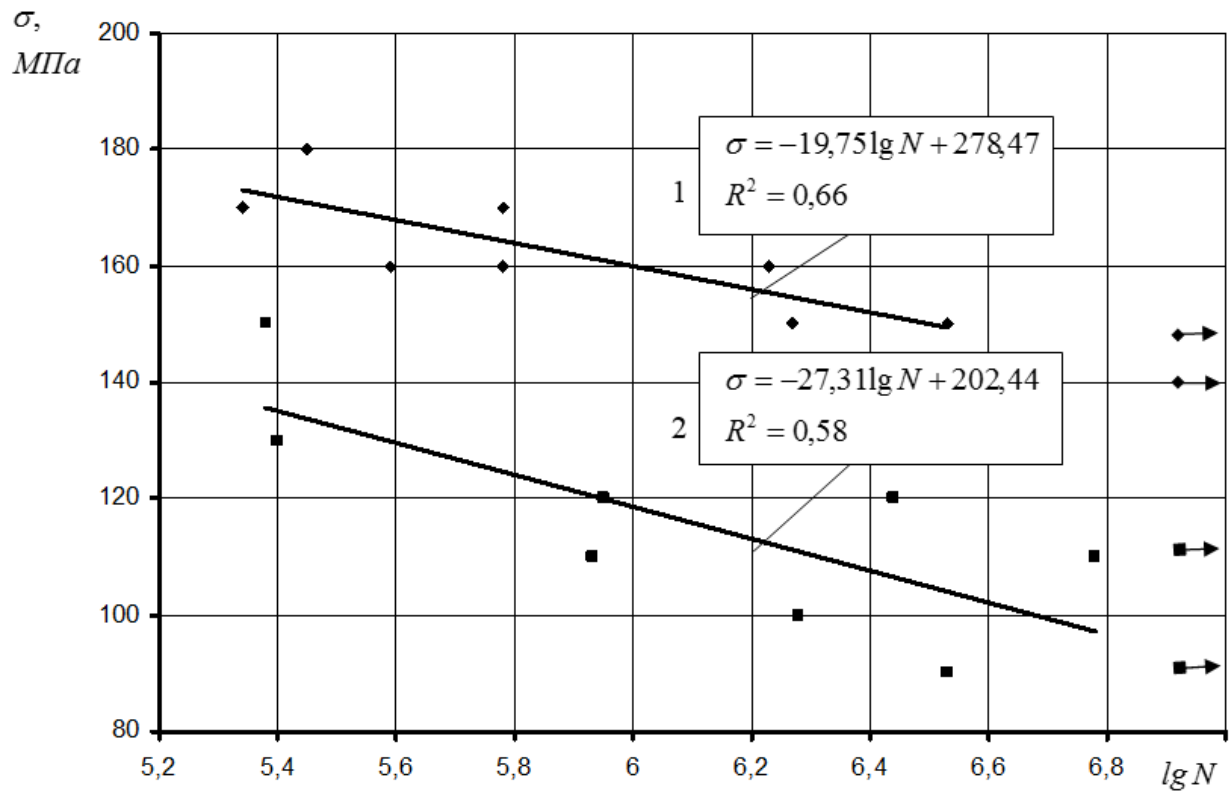


Рисунок 1.7 – Результати втомних випробувань зразків, наплавлених електродним дротом Св-08А під флюсом (1) і електродним дротом Св-08А 08Г2С в середовищі вуглекислого газу (2)

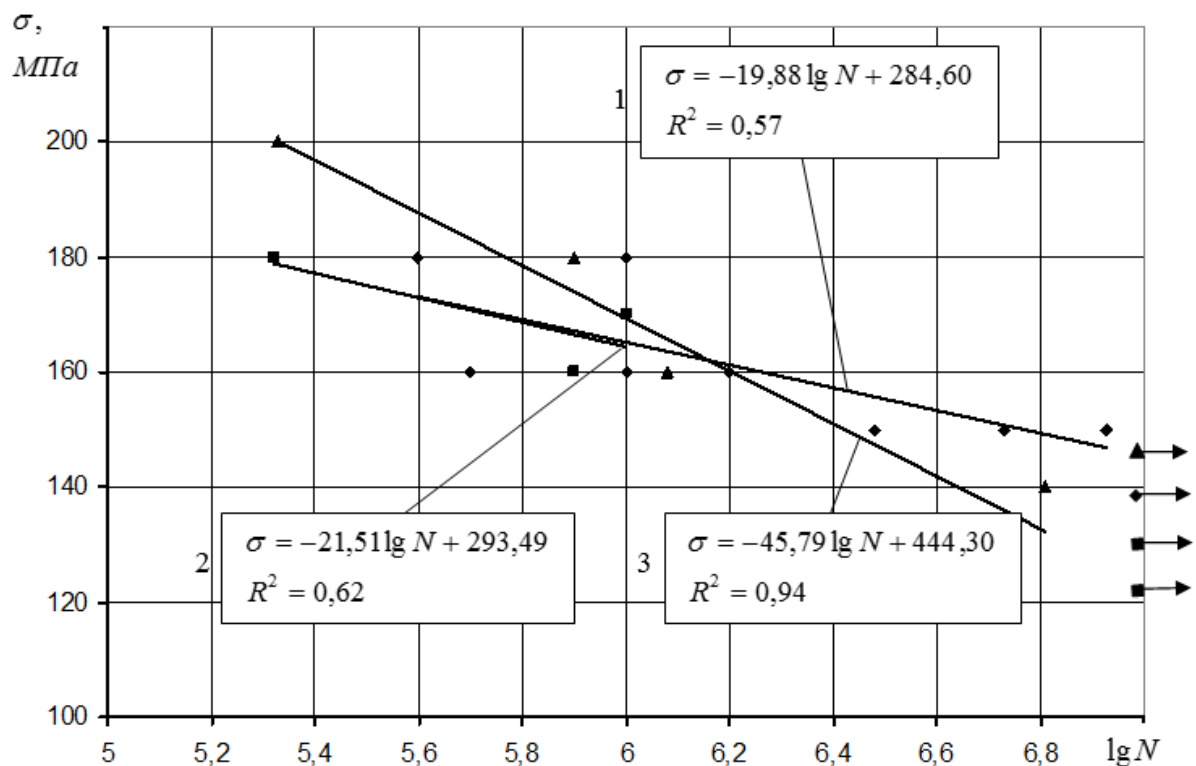


Рисунок 1.8 – Результати втомних випробувань зразків, наплавлених електродною стрічкою із сталі 08кп під флюсом АН-348А

Провівши аналіз результатів випробувань можна також помітити, що експериментальні точки, що відповідають різним способам наплавлення, можуть знаходитися в загальній зоні розсіювання (рис.1.8) і визначити який з них є більш кращим практично неможливо. Порівняння між собою границь витривалості в цьому випадку є також не коректним, оскільки їх середні значення не визначаються. Положення похилих ділянок кривих втоми при такому розсіюванні обмежених довговічностей і малій кількості експериментальних точок неможливо визначити з достатньою точністю, що підтверджують невисокі коефіцієнти кореляції, які приведені на графіках. З урахуванням зазначеного можна припустити, що існуючі методи прискореної оцінки границі витривалості, що основані на зв'язках між параметрами похилої і горизонтальної ділянок кривої втоми, призводитимуть до грубих помилок її визначення. Це припущення ґрунтоване на тому, що деталі, які мають близькі границі витривалості, мають також близькі кутові коефіцієнти кривих втоми [62, 63, 66, 68, 69]. У нашому ж випадку кутовий параметр змінюється в інтервалі значень 19,881 - 45,791 при практично однаковій границі витривалості даних зразків.

При проведенні порівняльних випробувань на опір втоми слід планувати їх проведення таким чином, щоб можна було співставляти між собою не лише зразки валів, що піддаються різним способам відновлення, а також мати можливість провести їх порівняльний аналіз відносно нових валів. Таке порівняння потрібне з тієї причини, що характеристики опору втоми відновлених і нових валів мають бути близькими.

### **1.5 Прискорене визначення характеристик опору втоми відновлених гребних валів**

Проведення порівняльних випробувань моделей відновлених гребних валів на опір втоми традиційним способом нераціональне внаслідок їх тривалості і дорожнечі. Вони, по-перше, значно більше звичайних

лабораторних зразків, а, по-друге, для їх виготовлення потрібні додаткові технологічні операції, нанесення наплавленого шару з подальшою механічною обробкою. При проведенні втомних випробувань лабораторних зразків, як правило, заздалегідь перевіряють твердість кожного з них, формуючи відповідний варіаційний ряд. Потім загальну їх кількість ділять на партії по 20 - 30 штук так, щоб в межах кожної партії вони мінімально відрізнялися за твердістю. Це робиться для того, щоб розсіювання обмежених довговічностей звести до мінімуму, що у свою чергу дозволить отримати стабільніші характеристики при меншій кількості випробуваних зразків.

При проведенні випробувань моделей гребних валів таку селекцію не роблять. Пов'язано це з тим, що сама кількість цих моделей, як правило, обмежена. Слід також враховувати, що технологічні процеси виготовлення лабораторних зразків і наплавлених моделей валів істотно різняться. Як результат різними будуть і характеристики їх розсіювання. Зокрема, у лабораторних зразків дисперсія буде набагато менша. Вказані чинники зумовлюють вибір того або іншого методу прискореного визначення характеристик опору втомі.

До теперішнього часу розроблено багато прискорених методів випробувань зразків, моделей і натурних деталей на опір втомі. Щоб вибрати один з них для вирішення конкретного завдання (у нашому випадку для порівняльної оцінки характеристик опору втомі гребних валів) проведемо аналіз існуючих методів, ґрунтуючись на їх класифікації, яка запропонована проф. А.В. Конопльовим [28].

При створенні цієї класифікації був закладений комбінований варіант її побудови, в основі якого було поєднання фасетного і ієрархічного принципів. На підставі ієрархічного принципу класифікації усі прискорені методи поділилися за двома ознаками – груповими і режимними (рис. 1.9), а на підставі фасетного – за суттю початкових теоретичних передумов (рис. 1.10) [28].

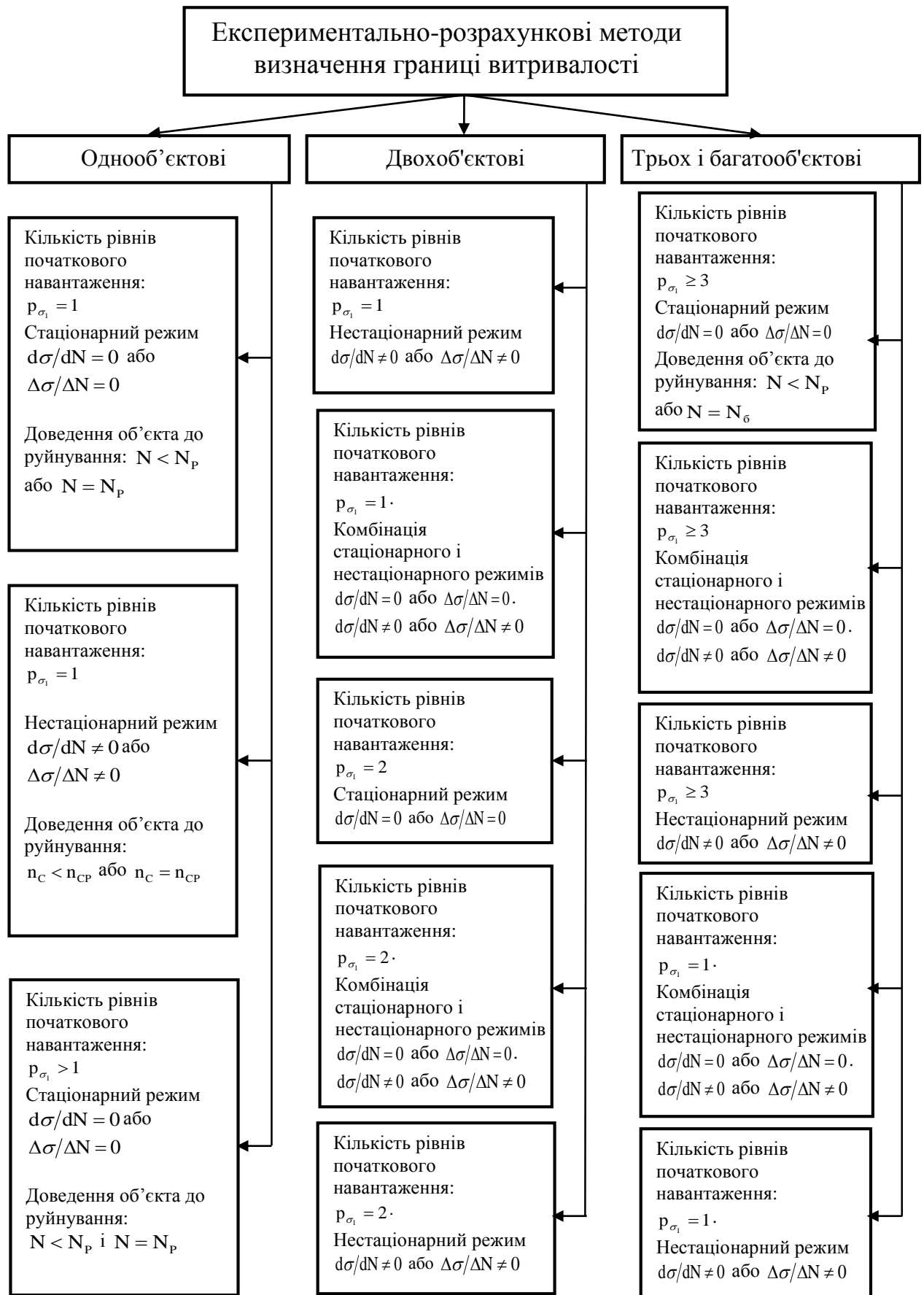


Рисунок 1.9 – Схема класифікації прискорених методів визначення границі витривалості (за груповими і режимними ознаками)



Рисунок 1.10 – Класифікація експериментально-розрахункових методів визначення границі витривалості (за суттю початкових теоретичних передумов)

На схемі прийняті наступні позначення:  $p_{\sigma_1}$  – кількість рівнів початкового навантаження,  $\Delta\sigma/\Delta N$  або  $d\sigma/dN$  – швидкість зміни напружень;  $n_c$  і  $n_{CP}$  – відповідно сумарне число циклів без руйнування та зі зруйнуванням (нестационарний режим вантаження);  $N$  і  $N_p$  – відповідно довговічності без руйнування та зі зруйнуванням (стаціонарний режим навантаження).

В якості групової класифікаційної ознаки було запропоновано прийняти мінімально допустиму кількість об'єктів, необхідну для реалізації методу. За цією ознакою методи були поділені на одно, двох, трьох, та багатооб'єктові.

Другою за ієрархією класифікаційною ознакою був прийнятий режим проведення випробувань (число рівнів початкового напруження, швидкість зміни амплітуди напруження, режим доведення або недоведення об'єкту до руйнування).

Щоб вибрати необхідний метод, ґрунтуючись на приведену вище класифікацію, сформулюємо основні вимоги до нього для випадків випробувань гребних валів, як нових, так і відновлених:

- можливість визначення характеристик опору втомі за допомогою мінімальної кількості зразків;
- режим навантаження зразків повинен забезпечувати мінімальний час проведення випробувань;
- випробування повинні здійснюватися на установках, що не вимагають додаткового устаткування для випробувальної установки (стаціонарний режим);
- метод повинен забезпечувати необхідну точність оцінки характеристик опору втомі;
- метод повинен враховувати той факт, що при випробуванні моделей гребних валів на відміну від лабораторних зразків перехід похилої ділянки кривої втомі в горизонтальну відбувається при великих довговічностях;
- метод повинен дозволяти здійснювати порівняльну оцінку характеристик опору втомі у разі, коли ці характеристики незначно відрізняються (знаходяться в одній області розсіювання).

Як видно зі схем (рис. 1.9 і 1.10) перерахованим вимогам (окрім останньої) задовольняють однозразкові методи, що ґрунтовані на стаціонарному режимі навантаження та використовують зв'язки між параметрами похилої і горизонтальної ділянок кривої втомі.

Один з таких методів застосований в роботі [90] для визначення границі витривалості моделей гребних валів на основі зв'язків між параметрами кривої втомі Вейбулла. Випробування проводили при симетричному згині зразків, що оберталися, на моделях, представлених на рис. 1.11.

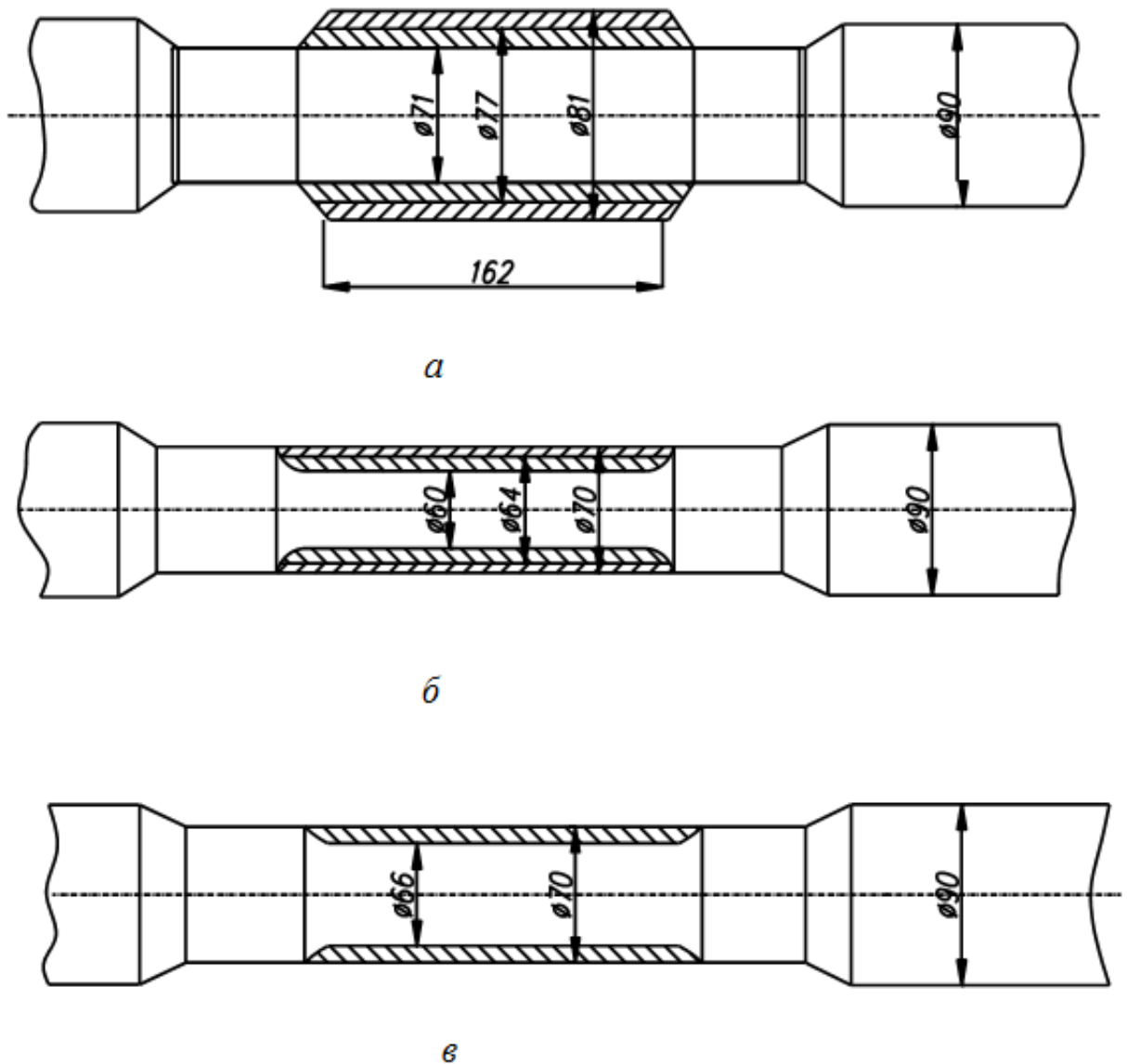


Рисунок 1.11 – Моделі гребних валів: *а, б* – наплавлення із сталі 04Х19Н11М3 з підшаром із сталі 08кп; *в* – наплавлення з порошкового дроту

Моделі виготовляли з вуглецевої сталі 35. Наплавлення здійснювали на основний метал (рис. 1.11 в) під флюсом АН-26, або на підшар із сталі 08кп заздалегідь наплавлений на основний метал під флюсом АН-348А (рис. 1.11 а, б). В подальшому моделі піддавали термообробці і проточували до необхідних розмірів. В табл. 1.2 представлені характеристики моделей, з позначенням режимів наплавлення і термообробки [80, 90].



Таблиця 1.2 – Характеристики моделей

№ партії	Позначення моделі	Дріт для наплавлення	Режим термообробки
I	в	ПП АН-10	Відпуск при 550 °С, 3 години
II	в	ПП АН-134	Відпуск при 850 °С, 5 годин
III	в	ПП АН-10	Без термообробки
IV	б	04X19Н11М3	Без термообробки
V	а	04X19Н11М3	Без термообробки

Випробування моделей на опір втомі проводили за стандартною методикою. Кількість моделей кожного виду складала 4 - 6 штук. Їх результати представлені в табл. 1.3 [90]. Графічно вони показані на рис. 1.12.

Таблиця 1.3 – Результати випробувань моделей на опір втомі

№ партії	№ моделі	Рівень напруження $\sigma$ , МПа	Довговічність до руйнування $N$ , тис. цикл.	№ моделі	Рівень напруження $\sigma$ , МПа	Довговічність до руйнування $N$ , тис. цикл.
I	1	180	3300	4	170	10000*
	2	180	10000*	5	160	10000*
	3	170	3800	-	-	-
II	1	180	1300	3	160	6500
	2	160	5860	4	140	10000
III	1	180	1850	4	130	10000*
	2	160	2900	5	120	10000*
	3	140	5320	-	-	-

Продовження табл.1.3

№ партії	№ моделі	Рівень напруження $\sigma$ , МПа	Довговічність до руйнування $N$ , тис. цикл.	№ моделі	Рівень напруження $\sigma$ , МПа	Довговічність до руйнування $N$ , тис. цикл.
IV	1	200	120	4	120	5300
	2	160	850	5	110	5800
	3	140	3200	6	105	10000*
V	1	220	350	4	160	4850
	2	200	1790	5	150	10000*
	3	180	1580	-	-	-

\* Моделі не зруйнувалися при базовому числі циклів

За представленими в табл. 1.3 даними середньоїмовірні значення границь витривалості моделей визначити неможливо. Тому для їх визначення були використані кореляційні залежності між параметрами рівняння Вейбулла і границею витривалості, яке для багатоциклової зони втомлювання записується у вигляді

$$(\sigma - \sigma_R)^{m_w} N = 10^{C_w} = const, \quad (1.3)$$

де  $\sigma$  і  $N$  – поточні напруження і довговічності до зруйнування відповідно;

$\sigma_R$  – границя витривалості;  $m_w$  і  $C_w$  – параметри.

Згадані кореляційні зв'язки отримані на основі обробки репрезентативної вибірки експериментальних даних у вигляді наступних лінійних рівнянь [72]

$$m_w = 0,002\sigma_R + 0,8, \quad (1.4)$$

$$C_w = 0,005\sigma_R + 6,8, \quad (1.5)$$

де  $\sigma_R$  виражено в МПа.

Вираз (1.3) з урахуванням (1.4) і (1.5) запишемо у вигляді

$$(\sigma - \sigma_R)^{0,002\sigma_R + 0,8} N = 10^{0,005\sigma_R + 6,8}. \quad (1.6)$$

В рівнянні (1.6) єдиною невідомою величиною є границя витривалості, яка визначається методом ітерації.

Відомо, що криві втоми в формі рівняння Вейбулла не можливо представити на одному графіку у вигляді сімейства, тому вони були перераховані в параметри степеневого рівняння, яке записується у вигляді

$$\sigma^{m_c} N = 10^{C_c} = const, \quad (1.7)$$

де  $m_c$  і  $C_c$  – параметри похилої ділянки кривої втоми.

Перерахунок параметрів здійснювали, ґрунтуючись на інтегральному методі, за формулами [72]

$$m_c = 2 \frac{C_w [lg \sigma_{zp} - lg(\sigma_R + 1)] - [lg \sigma_{zp} - lg(\sigma_R + 1)] lg N_{zp.C} - E}{[lg \sigma_{zp} - lg(\sigma_R + 1)]^2}, \quad (1.8)$$

$$\text{де } E = \int_{\sigma_{R+1}}^{\sigma_{zp}} \frac{lg \Delta\sigma_{zp}}{\sigma} d\sigma \text{ і } \Delta\sigma_{zp} = \sigma_{zp} - \sigma_R.$$

$$C_c = \frac{0,5m_w lg^2 \Delta\sigma_{zp} + lg N_{zp.C} lg \Delta\sigma_{zp} + m_c H}{lg \Delta\sigma_{zp}}, \quad (1.9)$$

$$\text{де } H = \int_{\sigma_{R+1}}^{\sigma_{zp}} \frac{lg \sigma}{\sigma - \sigma_R} d\sigma.$$

У виразі (1.8) величина граничних довговічностей  $N_{zp.C}$  є невідомою. З достатньою для практичних цілей точністю її можна прийняти рівною  $10^5$  циклів [83, 93, 94], однаковою для подальших розрахунків. Обчислення параметрів  $m_c$  і  $C_c$  за формулами (1.8) - (1.9) здійснюється за допомогою чисельних методів. Знайдені за залежностями (1.4) - (1.6) і (1.8), (1.9) значення представлені в табл. 1.4 [90].

Таблиця 1.4 – Обчислення параметрів похилої ділянки кривої втоми для степеневого рівняння і рівняння Вейбулла

№ партії	№ моделі	Границя витривалості $\sigma_R$ , МПа	$m_w$	$C_w$	$m_c$	$C_c$
1	2	3	4	5	6	7
I	1	170,2	1,14	7,65	6,30	20,76
	3	161,8	1,12	7,61	6,40	20,90
Середні значення		166,0	1,13	7,63	6,35	20,83
II	1	158,9	1,12	7,59	4,96	17,47
	2	154,7	1,11	7,57	5,21	18,04
	3	155,1	1,07	7,57	5,20	18,01
	4	137,2	1,10	7,49	5,58	18,77
Середні значення		151,5	1,10	7,56	5,24	18,07
III	1	164,2	1,13	7,62	4,63	16,73
	2	150,2	1,10	7,55	4,96	17,42
	3	135,0	1,07	7,48	5,39	18,34
Середні значення		149,8	1,10	7,55	4,99	17,50
IV	2	132,5	1,07	7,46	3,55	13,99
	3	132,1	1,06	7,46	3,64	14,20
	4	115,7	1,03	7,38	3,97	14,94
	5	106,4	1,01	7,33	4,21	15,46
Середні значення		121,7	1,04	7,41	3,84	14,64
V	1	152,8	1,11	7,56	5,68	19,13
	2	182,1	1,16	7,71	5,05	17,84
	3	162,0	1,12	7,61	5,41	18,56
	4	153,7	1,11	7,57	5,65	19,07
Середні значення		162,7	1,13	7,61	5,45	18,65

Для проведення порівняльного аналізу визначимо величини  $m_c$ ,  $C_c$ ,  $m_w$  і  $C_w$  за методом найменших квадратів і порівняємо їх значення з аналогічними параметрами, наведеними в табл. 1.4 (табл. 1.6). Виходячи з кількості випробуваних моделей, таке порівняння можна здійснити лише для II, IV і V типів. Попередньо визначимо значення  $lg N$  і  $lg \sigma$  (табл. 1.5).

Таблиця 1.5 – визначення  $lg N$  і  $lg \sigma$

№ партії	№ моделі	$lg \sigma$	$lg N$
II	1	2,255	6,114
	2	2,204	6,768
	3	2,204	6,813
	4	2,146	7,000
IV	1	2,301	5,079
	2	2,204	5,929
	3	2,146	6,505
	4	2,079	6,724
	5	2,041	6,763
V	1	2,342	5,544
	2	2,301	6,253
	3	2,255	6,199
	4	2,204	6,686

Таблиця 1.6 – Визначення відхилень параметрів похилої ділянки кривої втоми для степеневого рівняння

№ партії	$m_c$	$\bar{m}_c$	$\delta_{m_c}, \%$	$C_c$	$\bar{C}_c$	$\delta_{C_c}, \%$
II	9,43	5,24	79,7	27,45	18,07	51,9
IV	7,10	3,84	84,9	21,50	14,65	46,8
V	8,65	5,45	58,7	25,86	18,65	38,7

На рисунку 1.12 наведені криві втоми цих моделей в координатах  $\lg N - \lg \sigma$ .

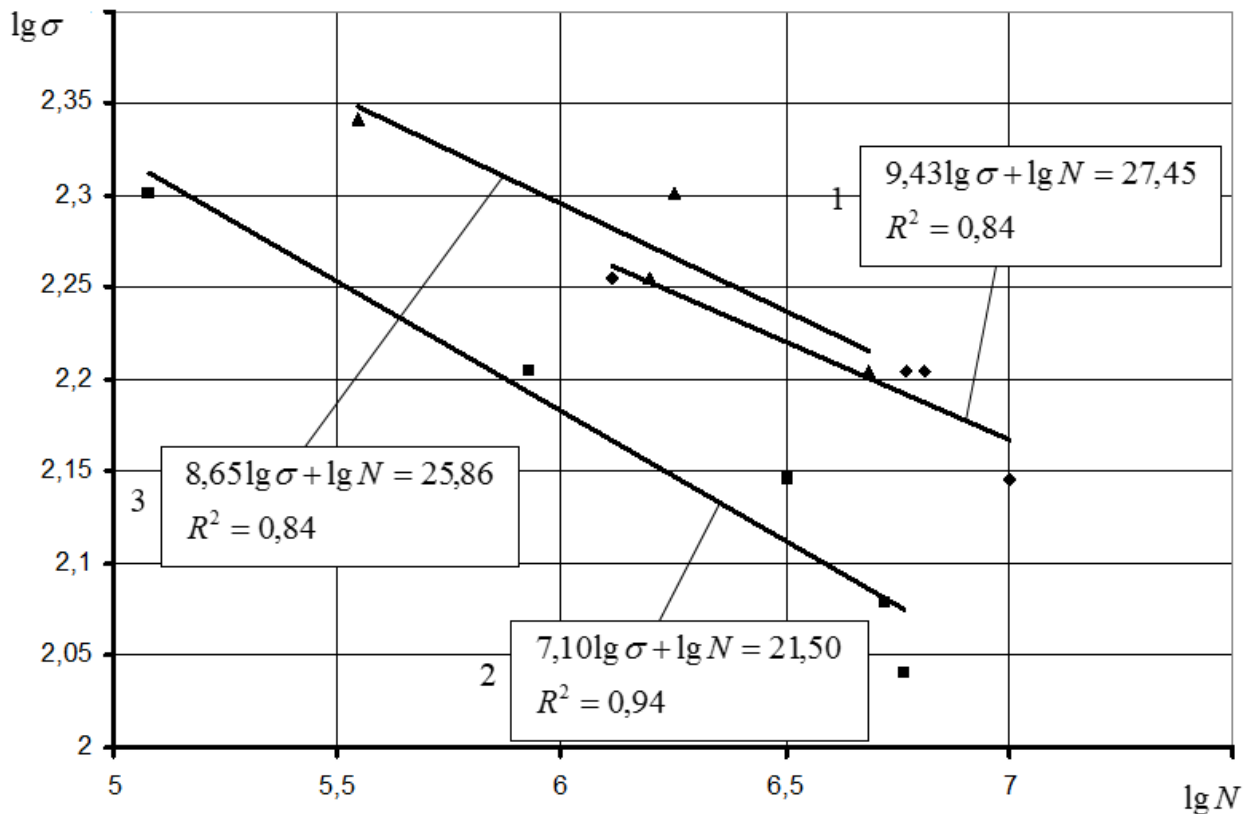


Рисунок 1.12 – Криві втоми наплавлених моделей II (крива 1), IV (крива 2) і V (крива 3) видів в координатах  $\lg N - \lg \sigma$

Провівши аналіз результатів випробувань моделей суднових гребних валів наведених в табл. 1.3 - 1.6 і на рис. 1.12, зауважимо, що переважна їх більшість (18 з 25) були випробувані при напруженнях, близьких до границі витривалості. Довговічності до руйнування при цьому перевищували  $10^6$  циклів. Завданням прискорених випробувань, як відомо, є економія моделей і скорочення тривалості експерименту. В даному випадку істотної економії часу немає, тому, їх можна вважати прискореними лише умовно.

Порівнюючи параметри похилої ділянки кривої втоми  $m_C$  і  $\bar{m}_C$ , а також  $C_C$  і  $\bar{C}_C$ , помітно, що їх відмінності істотні. Похибки  $\delta_{m_C}$  та  $\delta_{C_C}$  досягають декількох десятків відсотків, що мало пов'язане з кількістю випробуваних моделей, а обумовлено похибкою кореляційних залежностей (1.4) - (1.5). Крім

того, свою похибку додає сам інтегральний метод перерахунку параметрів рівняння Вейбулла в параметри степеневого рівняння. Можна припустити, що ці параметри мали б ще більшу відмінність, якби випробування моделей проводили при напруженнях, близьких до границі малоциклової та багатоциклової втоми. Це пов'язано з тим, що крива втоми Вейбулла помітно гірше описує експериментальні результати при високих напруженнях, які значно перевищують границю витривалості [67]. В цій роботі автори пропонують криву втоми Вейбулла замінювати складеною кривою, а саме двохланковою. Верхню частину кривої запропоновано описувати степеневим рівнянням, а нижню – рівнянням Вейбулла (рис. 1.13) [76].

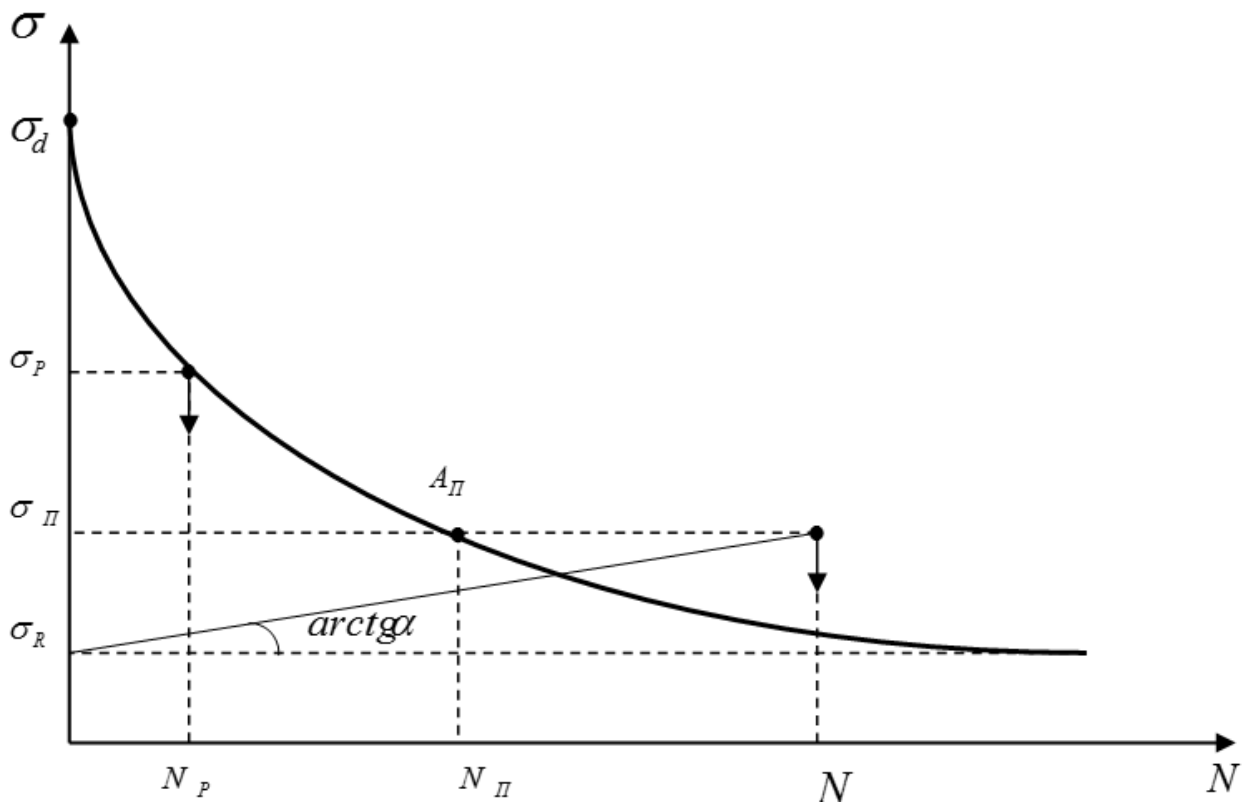


Рисунок 1.13 – Схема побудови складеної кривої втоми при  $N_P < N_{II}$

У цьому методі похилу ділянку кривої втоми будують на основі результату випробувань однієї моделі з використанням інформації про номінальні напруження, що виникають при остаточному руйнуванні [67]. Метод ґрунтується на припущенні, що максимальне номінальне напруження

$\sigma_{н.мах}$  в момент руйнування дорівнює умовній границі міцності  $\sigma_d$  (напруження, що відповідає довговічності в один цикл). Цей параметр є початковою ординатою кривої втоми, побудованої в логарифмічних координатах. Іншими словами, метод заснований на статистичній близькості величин  $\sigma_{н.мах}$  і  $\sigma_d$ . З усіх відомих моделей кривої втоми найкращий збіг цих величин має місце при використанні степеневого рівняння.

Запропоноване рішення мало на меті підвищити коефіцієнт кореляції при побудові похилої ділянки кривої втоми, і, як наслідок підвищити точність визначення границі витривалості. Основним завданням при побудові двохланкової кривої втоми було визначення точки перетину двох ділянок. При цьому розглядалися два випадки. Спочатку передбачалося, що довговічність до руйнування  $N_p$  розташована лівіше точки перетину двох ділянок кривої  $N_{II}$  (рис. 1.13) [67]. В цьому випадку точку  $N_{II}$  визначають шляхом штучного введення в схему допоміжного результату, математично прорахованих, випробувань моделі при лінійно зростаючому навантаженні зі швидкістю  $\alpha$ . При цьому приймають, що її руйнування відбудеться при напруженні, що відповідає точці перетину двох ділянок кривої. В результаті такого штучного прийому можна записати вираз, що пов'язує між собою величини  $\sigma_R$ ,  $\sigma_{II}$ ,  $\alpha$  та  $N_C$  [67].

$$\sigma_R = \sigma_{II} - \alpha \cdot N_C, \quad (1.10)$$

З рівняння (1.6) визначають напруження, відповідне точці  $A_{II}$  [112].

$$\sigma_{II} = \left(10^{C_C} / N_{II}\right)^{\frac{1}{m_C}}, \quad (1.11)$$

При розробці методу авторами було зроблено припущення про існування кореляційного зв'язку між  $\alpha$  і  $N_{II}$  у вигляді співвідношення  $\alpha = 10^7 / N_{II}^2$  [67]. Крім того, передбачалась рівність  $N_C = (m_w + 1) \cdot N_{II}$  [67].



На підставі цього було запропоновано вираз для визначення границі витривалості [67]

$$\sigma_R = \left( \frac{10^{C_c}}{N_{II}} \right)^{\frac{1}{m_c}} - \frac{10^7(m_w + 1)}{N_{II}}. \quad (1.12)$$

Математично змодельований експеримент випробування моделі при лінійно зростаючому навантаженні дозволяє записати вираз [67]

$$\int_{\sigma_R}^{\sigma_{II}} (d\sigma/N) / \alpha = \sigma_{II}^{m_c+1} - \sigma_R^{m_c+1} = \alpha(m_c + 1)10^{C_c}. \quad (1.13)$$

При спільному рішенні рівнянь (1.12) і (1.13) отримано вираз [112]

$$\begin{aligned} \left( \frac{10^{C_c}}{N_{II}} \right)^{\frac{m_c+1}{m_c}} - \left[ \left( \frac{10^{C_c}}{N_{II}} \right)^{\frac{1}{m_c}} - \frac{10^7(m_w + 1)}{N_{II}} \right]^{m_c+1} &= \\ = \alpha(m_c + 1)10^{C_c} &= \frac{10^7(m_c + 1)10^{C_c}}{N_{II}^2} \end{aligned} \quad (1.14)$$

або

$$\left( \frac{10^{C_c}}{N_{II}} \right)^{\frac{m_c+1}{m_c}} - \left[ \left( \frac{10^{C_c}}{N_{II}} \right)^{\frac{1}{m_c}} - \frac{2 \cdot 10^7}{N_{II}} \right]^{m_c+1} = \frac{10^{C_c+7}(m_c + 1)}{N_{II}^2} \quad (1.15)$$

У формулі (1.14) параметр  $m_w$  прийнятий рівним 1.

Залежність (1.15) дає можливість визначити довговічність  $N_{II}$ , що відповідає точці перетину  $A_{II}$  двох частин складеної кривої. При цьому відповідне напруження  $\sigma_{II}$ , можна знайти з формули (1.11).

Друге завдання відповідає варіанту, коли довговічність до руйнування  $N_p > N_{II}$  (рис.1.14) [67].

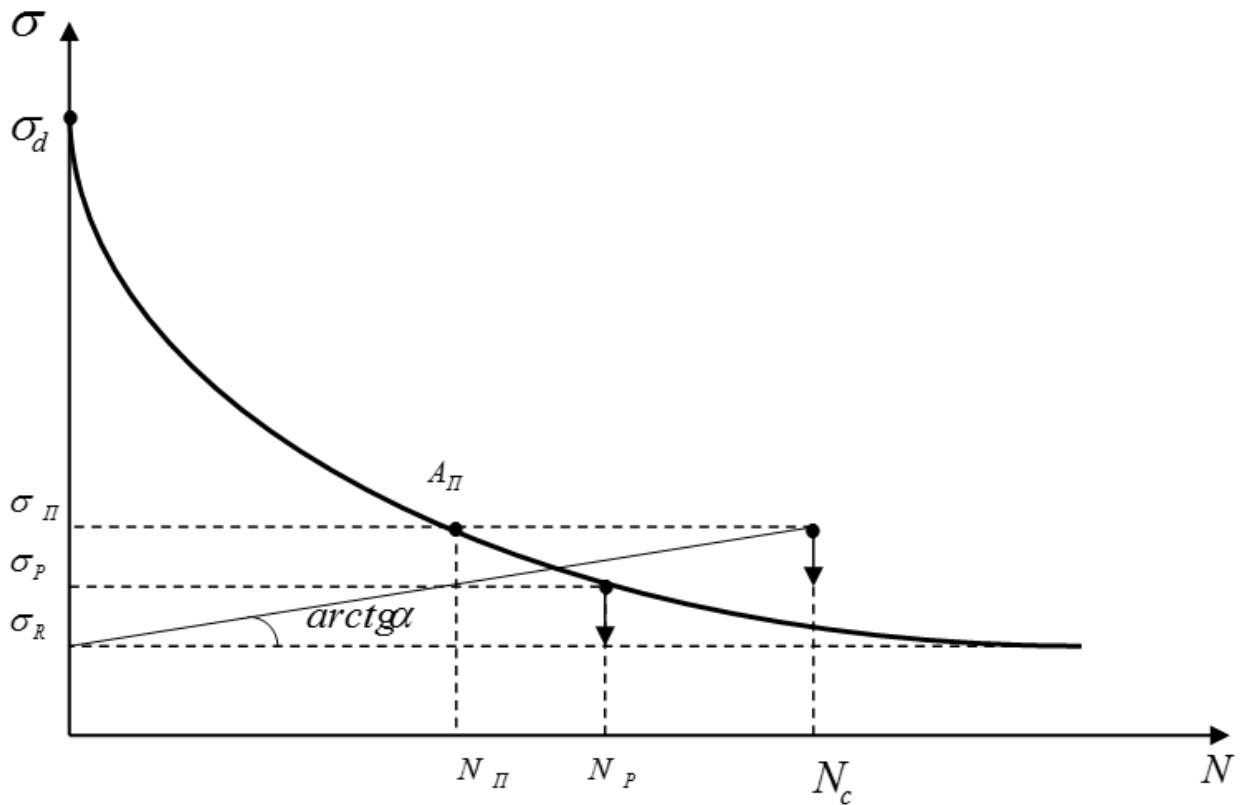


Рисунок 1.14 – Схема побудови складеної кривої втоми при  $N_P > N_{\Pi}$

Як і в першому випадку, тут використовується допоміжна умова у вигляді результату віртуальних випробувань об'єкта при лінійно зростаючому навантаженні і на основі аналогічного підходу отримано рівняння для визначення точки перетину  $A_{\Pi}$  [67]

$$\frac{\sigma_{\Pi} \frac{C_W - m_W \lg(\sigma_{\Pi} - \sigma_R)_{+1}}{\lg(\sigma_d / \sigma_{\Pi})} - \sigma_R \frac{C_W - m_W \lg(\sigma_{\Pi} - \sigma_R)_{+1}}{\frac{dn(\sigma_d / \sigma_{\Pi})}{dn(\sigma_d / \sigma_{\Pi})}}}{\left[ \frac{C_W - m_W \lg(\sigma_{\Pi} - \sigma_R)}{\lg(\sigma_d / \sigma_{\Pi})} \right] \sigma_d \frac{C_W - m_W \lg(\sigma_{\Pi} - \sigma_R)_{+1}}{\lg(\sigma_d / \sigma_{\Pi})}} - \frac{(\sigma_{\Pi} - \sigma_R)^{m_W + 1}}{\lg(\sigma_d / \sigma_{\Pi})} = 0 \quad (1.16)$$

Рівняння (1.16) дозволяє обчислити величину  $\sigma_{\Pi}$  при відомих  $\sigma_R$ ,  $m_W$  і  $C_W$  методом ітерації, а значення  $N_{\Pi}$  визначають з рівняння Вейбулла.

Для визначення границі витривалості, як і в першому випадку, використовують рівняння (1.12). Подання похилої ділянки у вигляді

двохланкової кривої дало можливість вирішити проблему визначення границі витривалості деталей, для яких експериментальні довговічності при невисоких напруженнях виявлялися близькими до бази випробувань, а іноді і перевищували її. Як показує досвід, такі довговічності характерні для деталей великих розмірів, в тому числі суднових гребних валів [28, 87, 102, 104, 105, 106, 107, 108, 109, 110]. Таким чином, цей метод, як і попередній, може бути використаний для визначення характеристик опору втомі відновлених гребних валів, хоча даних про його застосування для цих цілей в літературі немає.

Методу притаманні два основні недоліки. По-перше, він заснований на використанні кореляційних залежностей і, по-друге, на припущенні про сталість параметру  $m_w$ , що вносить систематичну похибку. Однак, головним недоліком цього методу, як і попереднього, є те, що він також не дозволяє проводити порівняння характеристик опору втомі гребних валів, як нових, так і відновлених, границі витривалості яких, відрізняються між собою незначно і знаходяться в загальній зоні розсіювання.

## Висновки до розділу 1

1. Суднові гребні вали є відповідальними і дорогими деталями. У судноремонтному виробництві з економічної точки зору їх доцільно відновлювати.

2. Гребні вали в процесі експлуатації піддаються циклічному консольному згину від ваги гвинта. В результаті тертя в дейдвудних підшипниках відбувається знос посадочних поверхонь. Через незрівноваженість мас вали також відчують навантаження, викликані крутильними коливаннями. Крім перерахованих факторів на опір втомі гребного валу впливає фреттинг-корозія. Вона спостерігається в місцях посадки маточини гребного гвинта на вал, а також в місцях посадки облицювань. В результаті цього впливу на контактній поверхні утворюються втомні тріщини. У деяких випадках, крім перерахованих впливів, гребний вал

може відчувати ударні навантаження, що також впливає на його втомну міцність.

3. Досвід експлуатації показує, що руйнування гребних валів як нових, так і відновлених відбувається в межах циклів  $2,5 \cdot 10^8 - 4,5 \cdot 10^8$ , що значно перевищує стандартну базу випробувань на опір втомі ( $10^7$  циклів).

4. Основною причиною зниження показників опору втомі відновлених гребних валів вважають зварювальні дефекти, зокрема шлакові включення і гарячі тріщини.

5. Руйнування відновлених гребних валів починається під наплавленим шаром. Вплив зварювальних дефектів проявляється в більшій мірі, коли вони сконцентровані в місцях напружень розтягування і, навпаки, знижується, коли дефекти локалізовані в зоні стиску.

6. Найбільш ефективним способом підвищення характеристик опору втомі відновлених гребних валів є поверхневе пластичне деформування наплавленого шару для створення в ньому залишкових напружень стиску.

7. Підвищити втомну міцність з'єднання гребний вал - гвинт можна за рахунок застосування маточини гвинта зі змінною жорсткістю.

8. Експериментальну оцінку характеристик опору втомі відновлених гребних валів здійснюють на моделях, навантажуючи їх симетричним згином з обертанням.

9. Для оперативної оцінки характеристик опору втомі відновлених гребних валів раціонально використовувати скорочені випробування моделей (прискорені методи).

10. Методи прискорених випробувань повинні базуватися на використанні в якості порівняльної характеристики сталого параметру, що забезпечує надійну оцінку розглянутих способів відновлення.

Матеріали розділу представлені в роботах [34, 39, 42, 43, 97, 98, 99, 100, 101].

## РОЗДІЛ 2

### РОЗРОБКА МЕТОДУ ПРОВЕДЕННЯ ПОРІВНЯЛЬНИХ ВИПРОБУВАНЬ НА ОПІР ВТОМІ НОВИХ І ВІДНОВЛЕНИХ МОДЕЛЕЙ СУДОВИХ ГРЕБНИХ ВАЛІВ

#### **2.1 Оцінка втомної міцності нових і відновлених моделей судових гребних валів за їх границями витривалості і довговічностями до руйнування**

При проведенні порівняльних випробувань моделей гребних валів на опір втоми в якості основної характеристики використовують границю витривалості. Зазвичай порівнюють границі витривалості відновлених і нових валів між собою. Такий експеримент дозволяє вирішити головну задачу і відповісти на питання як вплинув процес наплавлення на міцність від втоми відновленого валу. Рідше порівняння проводять тільки для валів, відновлених різними способами, не порівнюючи їх з новими. В цьому випадку вирішується тільки одне завдання, а саме, який з методів відновлення забезпечує більш високу границю витривалості. Коректне порівняння цих величин можливо тільки в разі, коли вони співвідносяться зі статистичної точки зору. На практиці найчастіше порівнюють середньомовірні значення границь витривалості, які визначають на основі статистичної обробки репрезентативних вибірок (наприклад, за методом «вгору - вниз») [92].

Випробування починають проводити при навантаженнях, що перевищують границю витривалості і, якщо експериментальних даних виявляється достатня кількість, то спочатку будують похилу ділянку кривої втоми, а границю витривалості визначають як середнє напруження між сусідніми рівнями, на одному з яких (верхньому) сталося руйнування, а на другому (нижньому) – ні. Така схема може бути застосована в разі, коли на кожному з декількох (зазвичай 4 - 5) рівнях напружень випробовують по одній

моделі. Якщо ж на цих рівнях випробовують по кілька моделей (статистичний експеримент), то і границя витривалості повинна бути визначена одним з статистичних методів. Таким чином, в результаті випробувань моделей, як в першому, так і в другому випадках отримують інформацію не тільки про їх границі витривалості, а також про положення похилої ділянки кривої втоми. Іншими словами, визначають обмежені довговічності і відповідні їм напруження. Надалі, при проведенні порівняльного аналізу характеристик опору втомі моделей валів ця інформація ніяк не використовується, і є допоміжною (для визначення границі витривалості).

Наведена вище методика проведення випробувань на опір втомі є традиційною, проте в даний час для вирішення питань, пов'язаних з відновленням гребних валів, все частіше застосовують прискорені методи. За останні кілька десятиліть ці методи удосконалювалися за трьома напрямками [77]. По-перше, пропонувалися нові схеми проведення випробувань, що дозволяють істотно скоротити час їх проведення. По-друге, були розроблені методи, що дозволяють визначати границю витривалості за результатами випробувань мінімальної кількості об'єктів (в граничному випадку за одним). По-третє, вдалося підвищити точність прискорених методів за рахунок спільного врахування їх систематичних і випадкових похибок [28].

Прискорені методи вирішують те саме завдання, що і традиційні при менших часових і матеріальних витратах, однак і вони не ефективні в разі, коли порівнювані границі витривалості моделей виявляються в єдиній зоні розсіювання, і для отримання стійких їх значень необхідно збільшувати обсяг експерименту.

В роботі [25] було запропоновано в якості основної характеристики при проведенні порівняльного аналізу нових і відновлених моделей замість границі витривалості розглядати довговічність до руйнування. Таке порівняння стало можливим завдяки використанню коефіцієнта відносної довговічності  $k_\gamma$ , величина якого визначається за формулою [28]

$$k_\gamma = \frac{\lg N_1 - \lg N_2}{\lg N_2}, \quad (2.1)$$

де  $N_1$  і  $N_2$  – довговічності до руйнування двох моделей суднового гребного валу (нової і відновленої), що випробовувались при однаковому рівні змінних напружень.

Сенс такого підходу полягає в тому, що довговічність до руйнування, як одна з характеристик надійності, є більш чутливою до зміни характеристик міцності матеріалу, отже, вона дозволяє точніше провести порівняльний аналіз нових і відновлених моделей гребних валів. Кількісно оцінити переваги такого підходу можна за допомогою проведення розрахунку та подальшого зіставлення відповідних похибок оцінки границі витривалості і довговічності до руйнування. Для його проведення скористаємося кореляційними залежностями між границею витривалості  $\sigma_R$  і параметрами  $m_C$  і  $C_C$  похилої ділянки кривої втоми, вираженої степеневим рівнянням [62, 63, 64, 70, 71, 73, 74, 75, 76, 77, 79, 86.]

$$m_C = f_C(\sigma_R) = a_C \sigma_R + b_C; \quad (2.2)$$

$$C_C = F_C(\sigma_R) = \alpha_C (m_C + 1) \lg \sigma_R + \beta_C, \quad (2.3)$$

де  $a_C = 0,027$ ;  $b_C = 1,4$ ;  $\alpha_C = 0,997$ ;  $\beta_C = 4,25$ .

Прийнято вважати, що прискорені методи дозволяють визначати границю витривалості з похибкою, що не перевищує 12 %. Виходячи з цього, задаємося рядом значень границі витривалості (100, 200, 300, 400, 500 МПа) і за формулами (2.2) і (2.3) визначаємо параметри  $m_C$  і  $C_C$  для значень  $\sigma_R = \bar{\sigma}_R$  і  $\sigma_R = \bar{\sigma}_R \pm 0,12 \cdot \bar{\sigma}_R$ . Довговічності до руйнування визначимо з виразу

$$N = 10^{C_C} / \sigma^{m_C}, \text{ цикл.} \quad (2.4)$$

Результати розрахунку представлені в табл. 2.1. Також у ній наведені похибки визначення довговічності до руйнування  $\delta_N$ , що розраховані для діапазону напружень, які відповідають зоні багатоциклової втоми, через кожні 10 МПа.

Таблиця 2.1 – Результати розрахунку довговічностей до руйнування та їх відносних похибок на основі степеневого рівняння

$\bar{\sigma}_R = 100$ МПа							
$\sigma_R = \bar{\sigma}_R = 100$ МПа; $\bar{m}_C = 4,10$ ; $\bar{C}_C = 14,42$		$\sigma_R = \bar{\sigma}_R + 0,12 \cdot \bar{\sigma}_R = 112$ МПа; $m_C = 4,42$ ; $C_C = 15,33$			$\sigma_R = \bar{\sigma}_R - 0,12 \cdot \bar{\sigma}_R = 88$ МПа; $m_C = 3,78$ ; $C_C = 13,51$ .		
$\sigma$ , МПа	$N$ , цикл	$\sigma$ , МПа	$N$ , цикл	$\delta_N$ , %	$\sigma$ , МПа	$N$ , цикл	$\delta_N$ , %
1	2	3	4	5	6	7	8
100	1657296	-	-	-	100	905709	-45,35
110	1121218	-	-	-	110	631960	-43,64
120	784796	120	1359302	73,20	120	454988	-42,02
130	565239	130	953956	68,77	130	336309	-40,50
140	417133	140	687295	64,77	140	254220	-39,06
150	314359	150	506508	61,12	150	195915	-37,68
160	241273	160	380704	57,79	160	153544	-36,36
170	188174	170	291144	54,72	170	122128	-35,10
180	148862	180	226094	51,88	180	98419	-33,89
190	119264	190	177995	49,24	190	80244	-32,72
200	96644	200	141859	46,78	200	66115	-31,59
Середнє значення				58,70	Середнє значення		-37,99



Продовження таблиці 2.1

1	2	3	4	5	6	7	8
$\bar{\sigma}_R = 200$ МПа							
$\sigma_R = \bar{\sigma}_R = 200$ МПа; $\bar{m}_C = 6,8$ ; $\bar{C}_C = 22,14$		$\sigma_R = \bar{\sigma}_R + 0,12 \cdot \bar{\sigma}_R = 224$ МПа; $m_C = 7,45$ ; $C_C = 24,05$ .			$\sigma_R = \bar{\sigma}_R - 0,12 \cdot \bar{\sigma}_R = 176$ МПа; $m_C = 6,15$ ; $C_C = 20,26$ .		
$\sigma$ , МПа	$N$ , цикл	$\sigma$ , МПа	$N$ , цикл	$\delta_N$ , %	$\sigma$ , МПа	$N$ , цикл	$\delta_N$ , %
200	3141853	200	-	-	200	1275823	-59,39
210	2254751	210	-	-	210	945004	-58,09
220	1643295	220	-	-	220	709811	-56,81
230	1214620	230	2852211	134,82	230	539979	-55,54
240	909397	240	2077386	128,44	240	415592	-54,30
250	688966	250	1532757	122,47	250	323296	-53,08
260	527681	260	1144482	116,89	260	253987	-51,87
270	408241	270	864039	111,65	270	201362	-50,68
280	318798	280	659018	106,72	280	160994	-49,50
290	251121	290	507447	102,07	290	129734	-48,34
300	199418	300	394213	97,68	300	105312	-47,19
310	159562	310	308794	93,53	310	86074	-46,06
320	128579	320	243766	89,58	320	70802	-44,94
Середнє значення				110,39	Середнє значення		-51,98
$\bar{\sigma}_R = 300$ МПа							
$\sigma_R = \bar{\sigma}_R = 300$ МПа; $\bar{m}_C = 9,5$ ; $\bar{C}_C = 30,18$		$\sigma_R = \bar{\sigma}_R + 0,12 \cdot \bar{\sigma}_R = 336$ МПа; $\bar{m}_C = 10,47$ ; $\bar{C}_C = 33,15$ .			$\sigma_R = \bar{\sigma}_R - 0,12 \cdot \bar{\sigma}_R = 266$ МПа; $\bar{m}_C = 8,53$ ; $\bar{C}_C = 27,25$ .		

Продовження таблиці 2.1

1	2	3	4	5	6	7	8
$\sigma$ , МПа	$N$ , цикл	$\sigma$ , МПа	$N$ , цикл	$\delta_N$ , %	$\sigma$ , МПа	$N$ , цикл	$\delta_N$ , %
300	4457506	300	-	-	300	1345653	-69,81
310	3264433	310	-	-	310	1017397	-68,83
320	2414455	320	-	-	320	776076	-67,86
330	1802443	330	-	-	330	596948	-66,88
340	1357357	340	4320863	218,33	340	462776	-65,91
350	1030617	350	3189607	209,49	350	361419	-64,93
360	788624	360	2374750	201,13	360	284234	-63,96
370	607893	370	1782417	193,21	370	225008	-62,99
380	471845	380	1348105	185,71	380	179237	-62,01
390	368663	390	1027044	178,59	390	143623	-61,04
1	2	3	4	5	6	7	8
400	289850	400	787853	171,81	400	115733	-60,07
410	229244	410	608338	165,37	410	93757	-59,10
420	182337	420	472662	159,22	420	76340	-58,13
Середнє значення				186,98	Середнє значення		-63,96
$\bar{\sigma}_R = 400$ МПа							
$\sigma_R = \bar{\sigma}_R = 400$ МПа; $\bar{m}_C = 12,2$ $\bar{C}_C = 38,49$		$\sigma_R = \bar{\sigma}_R + 0,12 \cdot \bar{\sigma}_R = 448$ МПа; $m_C = 13,5$ ; $C_C = 42,57$ .			$\sigma_R = \bar{\sigma}_R - 0,12 \cdot \bar{\sigma}_R = 352$ МПа $m_C = 10,9$ ; $C_C = 34,47$ .		
$\sigma$ , МПа	$N$ , цикл	$\sigma$ , МПа	$N$ , цикл	$\delta_N$ , %	$\sigma$ , МПа	$N$ , цикл	$\delta_N$ , %
400	5610718	400	-	-	400	1259620	-77,55
410	4151330	410	-	-	410	962291	-76,82

Продовження таблиці 2.1

1	2	3	4	5	6	7	8
420	3093919	420	-	-	420	739931	-76,08
430	2321855	430	-	-	430	572482	-75,34
440	1753992	440	-	-	440	445547	-74,60
450	1333391	450	5752693	331,43	450	348716	-73,85
460	1019776	460	4276098	319,32	460	274404	-73,09
470	784434	470	3198855	307,79	470	217043	-72,33
480	606746	480	2407662	296,82	480	172523	-71,57
490	471800	490	1822808	286,35	490	137786	-70,80
500	368737	500	1387804	276,37	500	110543	-70,02
510	289597	510	1062332	266,83	510	89075	-69,24
520	228512	520	817422	257,71	520	72078	-68,46
Середнє значення				292,83	Середнє значення		-73,06
$\bar{\sigma}_R = 500 \text{ МПа}$							
$\sigma_R = \bar{\sigma}_R = 500 \text{ МПа};$ $\bar{m}_C = 14,9$ $\bar{C}_C = 47,03$		$\sigma_R = \bar{\sigma}_R + 0,12 \cdot \bar{\sigma}_R = 560 \text{ МПа};$ $m_C = 16,52;$ $C_C = 52,25$			$\sigma_R = \bar{\sigma}_R - 0,12 \cdot \bar{\sigma}_R = 440 \text{ МПа}$ $m_C = 13,28;$ $C_C = 41,89.$		
$\sigma,$ МПа	$N,$ цикл	$\sigma,$ МПа	$N,$ цикл	$\delta_N,$ %	$\sigma,$ МПа	$N,$ цикл	$\delta_N,$ %
500	6610421	500	-	-	500	1103919	-83,30
510	4921376	510	-	-	510	848646	-82,76
520	3684957	520	-	-	520	655744	-82,20
530	2774417	530	-	-	530	509184	-81,65
540	2099980	540	-	-	540	397255	-81,08
550	1597637	550	-	-	550	311345	-80,51
560	1221464	560	7140741	484,61	560	245088	-79,93
570	938311	570	5330364	468,08	570	193750	-79,35

Продовження таблиці 2.1

1	2	3	4	5	6	7	8
580	724111	580	3999254	452,30	580	153792	-78,76
590	561290	590	3015326	437,21	590	122559	-78,16
600	436947	600	2284288	422,78	600	98042	-77,56
610	341561	610	1738444	408,97	610	78719	-76,95
Середнє значення				445,66	Середнє значення		-80,18

Залежності  $|\bar{\delta}_N| - \bar{\sigma}_R$ , побудовані за даними, наведеними в табл. 2.1, представлені на рис. 2.1.

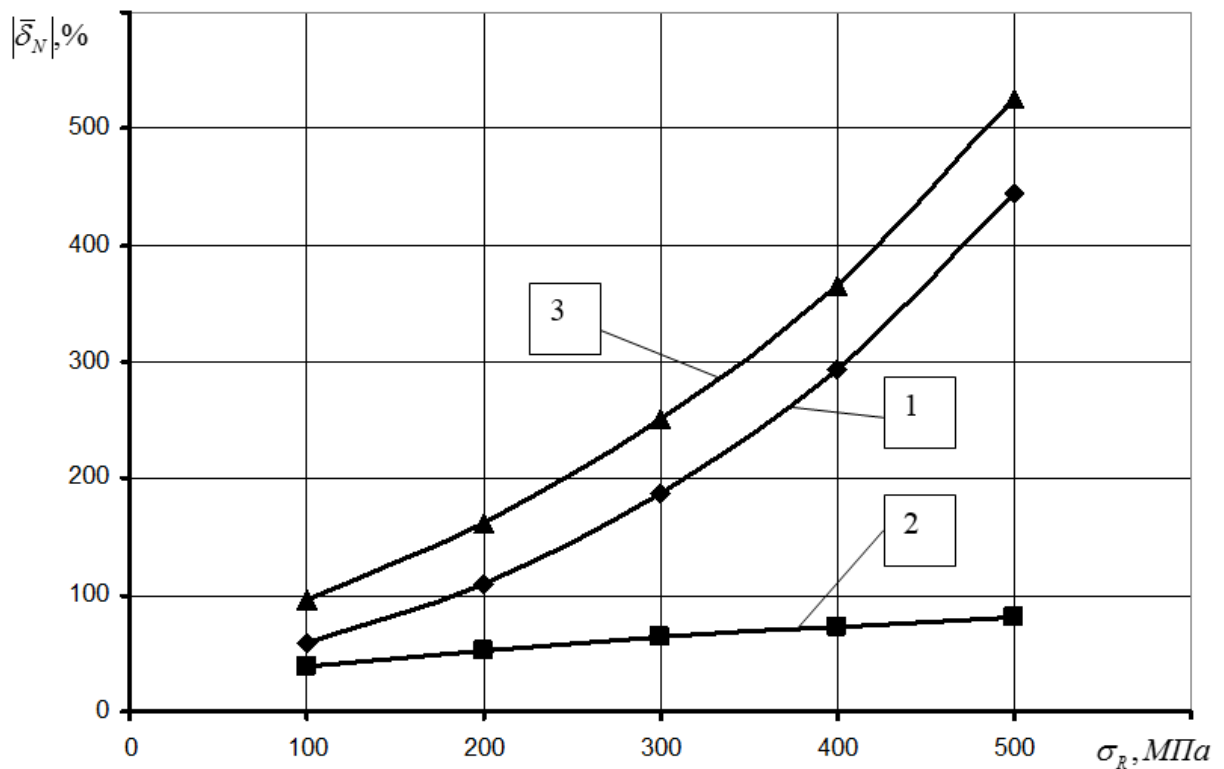


Рисунок 2.1 – Залежності  $|\bar{\delta}_N| - \bar{\sigma}_R$  для додатних (1), від'ємних (2) і сумарних (3) відхилень довговічності до руйнування, знайдених за степеневим рівнянням

Для більш повної картини зміни похибок  $\delta_N$ , проведемо аналогічний розрахунок, ґрунтуючись на іншому рівнянні кривої втоми, а саме на рівнянні Вейбулла. При цьому в якості взаємозв'язків між параметрами кривої втоми приймемо наступні залежності [44]

$$m_w = \frac{1}{5,254\sigma_R^{0,01} - 5,038} - 1, \quad (2.5)$$

$$C_w = \lg \frac{(7,029\sigma_R + 3599)^{m_w+1}}{m_w + 1}. \quad (2.6)$$

Результати розрахунку представлені в табл. 2.2

Таблиця 2.2 – Результати розрахунку довговічності до руйнування і їх відносних похибок на основі рівняння Вейбулла

$\bar{\sigma}_R = 100$ МПа							
$\sigma_R = \bar{\sigma}_R = 100$ МПа $\bar{m}_w = 1,157$ $\bar{C}_w = 7,504$		$\sigma_R = \bar{\sigma}_R + 0,12 \cdot \bar{\sigma}_R = 112$ МПа; $m_w = 1,128$ ; $C_w = 7,422$ .			$\sigma_R = \bar{\sigma}_R - 0,12 \cdot \bar{\sigma}_R = 88$ МПа; $m_w = 1,190$ ; $C_w = 7,598$ .		
$\sigma$ , МПа	$N$ , цикл.	$\sigma$ , МПа	$N$ , цикл.	$\delta_N$ , %	$\sigma$ , МПа	$N$ , цикл.	$\delta_N$ , %
1	2	3	4	5	6	7	8
100	-	-	-	-	100		
110	2223310	-	-	-	110	1001191	-54,97
120	997030	120	2531130	153,87	120	641020	-35,70
130	623693	130	1014034	62,59	130	463803	-25,64
140	447112	140	616036	37,78	140	359713	-19,55
150	345376	150	436520	26,39	150	291779	-15,52
160	279691	160	335398	19,92	160	244216	-12,68
170	234003	170	270928	15,78	170	209200	-10,60
180	200505	180	226428	12,93	180	182428	-9,02

## Продовження таблиці 2.2

1	2	3	4	5	6	7	8
190	174961	190	193962	10,86	190	161349	-7,78
200	154882	200	169287	9,30	200	144355	-6,80
Середнє значення				38,82	Середнє значення		-19,83
$\bar{\sigma}_R = 200 \text{ МПа}$							
$\sigma_R = \bar{\sigma}_R = 200 \text{ МПа}$ $\bar{m}_W = 0,993$ $\bar{C}_W = 7,073$		$\sigma_R = \bar{\sigma}_R + 0,12 \cdot \bar{\sigma}_R = 224 \text{ МПа}$ $m_W = 0,968;$ $C_W = 7,015.$			$\sigma_R = \bar{\sigma}_R - 0,12 \cdot \bar{\sigma}_R = 176 \text{ МПа}$ $m_W = 1,021;$ $C_W = 7,141.$		
$\sigma,$ МПа	$N,$ цикл	$\sigma,$ МПа	$N,$ цикл	$\delta_N,$ %	$\sigma,$ МПа	$N,$ цикл	$\delta_N,$ %
200	-	200	-	-	200	539268	-
210	1202264	210	-	-	210	377885	-68,57
220	604056	220	-	-	220	290426	-51,92
230	403849	230	1827046	352,41	230	235627	-41,65
240	303497	240	706988	132,95	240	198103	-34,73
250	243177	250	441881	81,71	250	170810	-29,76
260	202906	260	322477	58,93	260	150076	-26,04
270	174108	270	254361	46,09	270	133794	-23,15
280	152487	280	210259	37,89	280	120673	-20,86
290	135655	290	179342	32,20	290	109875	-19,00
300	122180	300	156449	28,05	300	100836	-17,47
310	111147	310	138805	24,88	310	93159	-16,18
320	101947	320	124785	22,40	320	86559	-15,09
Середнє значення				81,75	Середнє значення		-30,37

## Продовження таблиці 2.2

1	2	3	4	5	6	7	8
$\bar{\sigma}_R = 300 \text{ МПа}$							
$\sigma_R = \bar{\sigma}_R = 300 \text{ МПа};$ $\bar{m}_W = 0,907$ $\bar{C}_W = 6,883$		$\sigma_R = \bar{\sigma}_R + 0,12 \cdot \bar{\sigma}_R = 336 \text{ МПа}$ $m_W = 0,884;$ $C_W = 6,836$			$\sigma_R = \bar{\sigma}_R - 0,12 \cdot \bar{\sigma}_R = 264 \text{ МПа};$ $m_W = 0,933;$ $C_W = 6,937$		
$\sigma,$ МПа	$N,$ цикл	$\sigma,$ МПа	$N,$ цикл	$\delta_N,$ %	$\sigma,$ МПа	$N,$ цикл	$\delta_N,$ %
300	-	300	-	-	300	305471	-
310	946237	310	-	-	310	243023	-74,32
320	504622	320	-	-	320	202274	-59,92
330	349342	330	-	-	330	173526	-50,33
340	269111	340	2021990	651,36	340	152125	-43,47
350	219803	350	668071	203,94	350	135554	-38,33
360	186302	360	414852	122,68	360	122332	-34,34
370	161993	370	304911	88,22	370	111529	-31,15
380	143515	380	242766	69,16	380	102532	-28,56
390	128974	390	202565	57,06	390	94919	-26,40
400	117220	400	174316	48,71	400	88391	-24,59
410	107512	410	153320	42,61	410	82729	-23,05
420	99353	420	137068	37,96	420	77770	-21,72
Середнє значення				146,86	Середнє значення		-38,02
$\bar{\sigma}_R = 400 \text{ МПа}$							
$\sigma_R = \bar{\sigma}_R = 400 \text{ МПа};$ $\bar{m}_W = 0,850;$ $\bar{C}_W = 6,776.$		$\sigma_R = \bar{\sigma}_R + 0,12 \cdot \bar{\sigma}_R = 448 \text{ МПа};$ $m_W = 0,829;$ $C_W = 6,741.$			$\sigma_R = \bar{\sigma}_R - 0,12 \cdot \bar{\sigma}_R = 352 \text{ МПа};$ $m_W = 0,875;$ $C_W = 6,821.$		
$\sigma,$ МПа	$N,$ ЦИКЛ	$\sigma,$ МПа	$N,$ ЦИКЛ	$\delta_N,$ %	$\sigma,$ МПа	$N,$ ЦИКЛ	$\delta_N,$ %

## Продовження таблиці 2.2

1	2	3	4	5	6	7	8
400	-	400	-	-	400	223828	-
410	843335	410	-	-	410	189671	-77,51
420	467869	420	-	-	420	165027	-64,73
430	331472	430	-	-	430	146358	-55,85
440	259567	440	-	-	440	131698	-49,26
450	214721	450	3100603	1344,01	450	119861	-44,18
460	183896	460	702035	281,76	460	110092	-40,13
470	161312	470	424748	163,31	470	101883	-36,84
480	144004	480	311337	116,20	480	94884	-34,11
490	130285	490	248500	90,74	490	88839	-31,81
500	119124	500	208177	74,76	500	83564	-29,85
510	109854	510	179932	63,79	510	78918	-28,16
520	102022	520	158954	55,80	520	74792	-26,69
Середнє значення				273,80	Середнє значення		-33,26
$\bar{\sigma}_R = 500 \text{ МПа}$							
$\sigma_R = \bar{\sigma}_R = 500 \text{ МПа};$ $\bar{m}_W = 0,809$ $\bar{C}_W = 6,711$		$\sigma_R = \bar{\sigma}_R + 0,12 \cdot \bar{\sigma}_R = 560 \text{ МПа}$ $m_W = 0,788;$ $C_W = 6,680$			$\sigma_R = \bar{\sigma}_R - 0,12 \cdot \bar{\sigma}_R = 440 \text{ МПа}$ $m_W = 0,832;$ $C_W = 6,745$		
$\sigma,$ МПа	$N,$ цикл	$\sigma,$ МПа	$N,$ цикл	$\delta_N,$ %	$\sigma,$ МПа	$N,$ цикл	$\delta_N,$ %
500	-	500	-	-	500	184322	-
510	797995	510	-	-	510	162136	-79,68
520	455477	520	-	-	520	145087	-68,15
530	328102	530	-	-	530	131544	-59,91
540	259976	540	-	-	540	120504	-53,65
550	217037	550	-	-	550	111317	-48,71
560	187273	560	-	-	560	103543	-44,71



## Продовження таблиці 2.2

1	2	3	4	5	6	7	8
570	165316	570	779830	371,72	570	96872	-41,40
580	148388	580	451636	204,36	580	91080	-38,62
590	134902	590	328117	143,23	590	85999	-36,25
600	123880	600	261564	111,14	600	81503	-34,21
610	114687	610	219387	91,29	610	77494	-32,43
Середнє значення				184,35	Середнє значення		-48,88

Результати розрахунку, що наведені в табл. 2.2, представлені у вигляді графіків залежності модуля середніх значень похибок  $|\bar{\delta}_N|$  від границі витривалості (рис. 2.2)

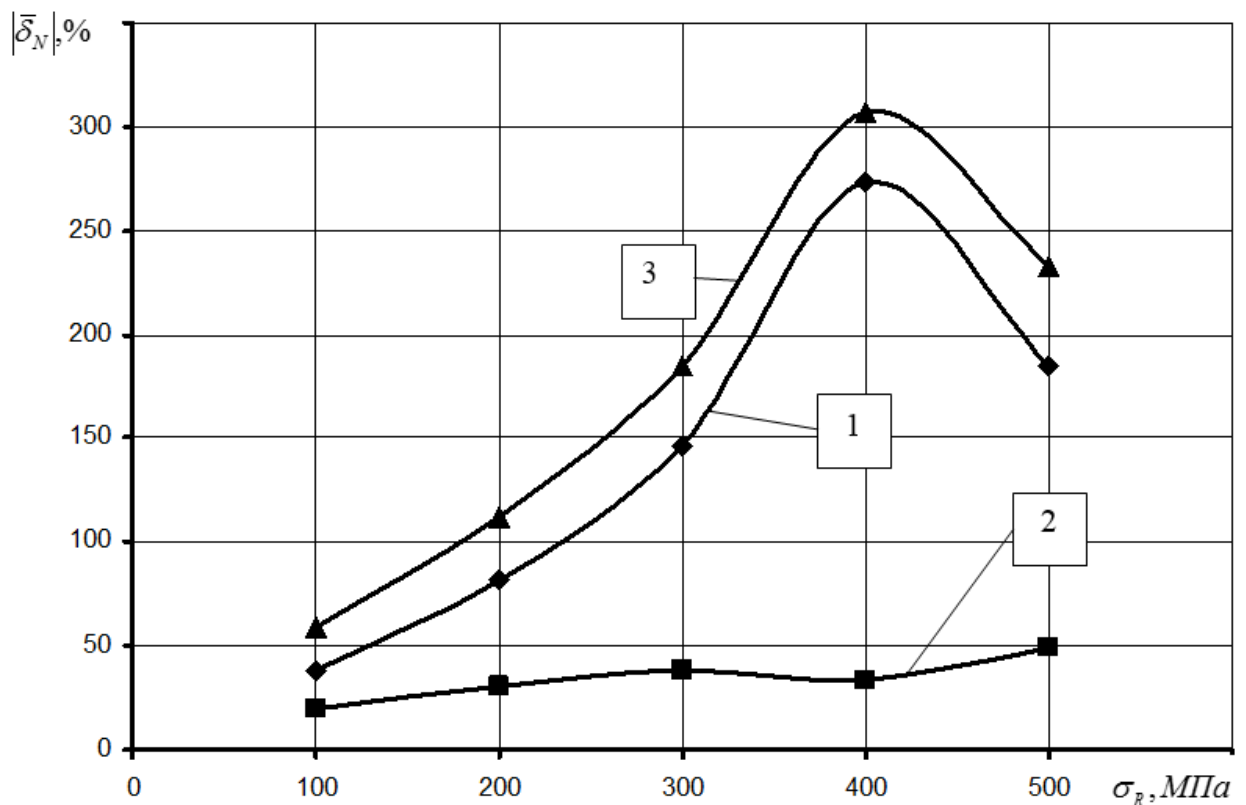


Рисунок 2.2 – Залежності  $|\bar{\delta}_N| - \bar{\sigma}_R$  для додатних (1), від'ємних (2) і сумарних (3) відхилень довговічності до руйнування, знайдених за рівнянням Вейбулла

Середні значення відхилень довговічності до руйнування  $|\bar{\delta}_N|$  дають загальну картину їх залежності від границі витривалості для двох даних моделей кривої втоми, проте це є недостатнім для загальної оцінки відхилень величин  $\delta_N$ . Необхідно також мати картину зміни  $\delta_N$  по рівнях напружень. Користуючись таблицями 2.2 і 2.3, побудуємо графіки залежностей  $\delta_N(\sigma - \sigma_R)$  для додатних і  $|\delta_N|(\sigma - \sigma_R)$  для від'ємних відхилень довговічностей до руйнування, а також сумарних їх значень  $\delta_{N\Sigma}(\sigma - \sigma_R)$  стосовно усього діапазону значень границі витривалості (100...500 МПа) (рис. 2.3 - 2.6).

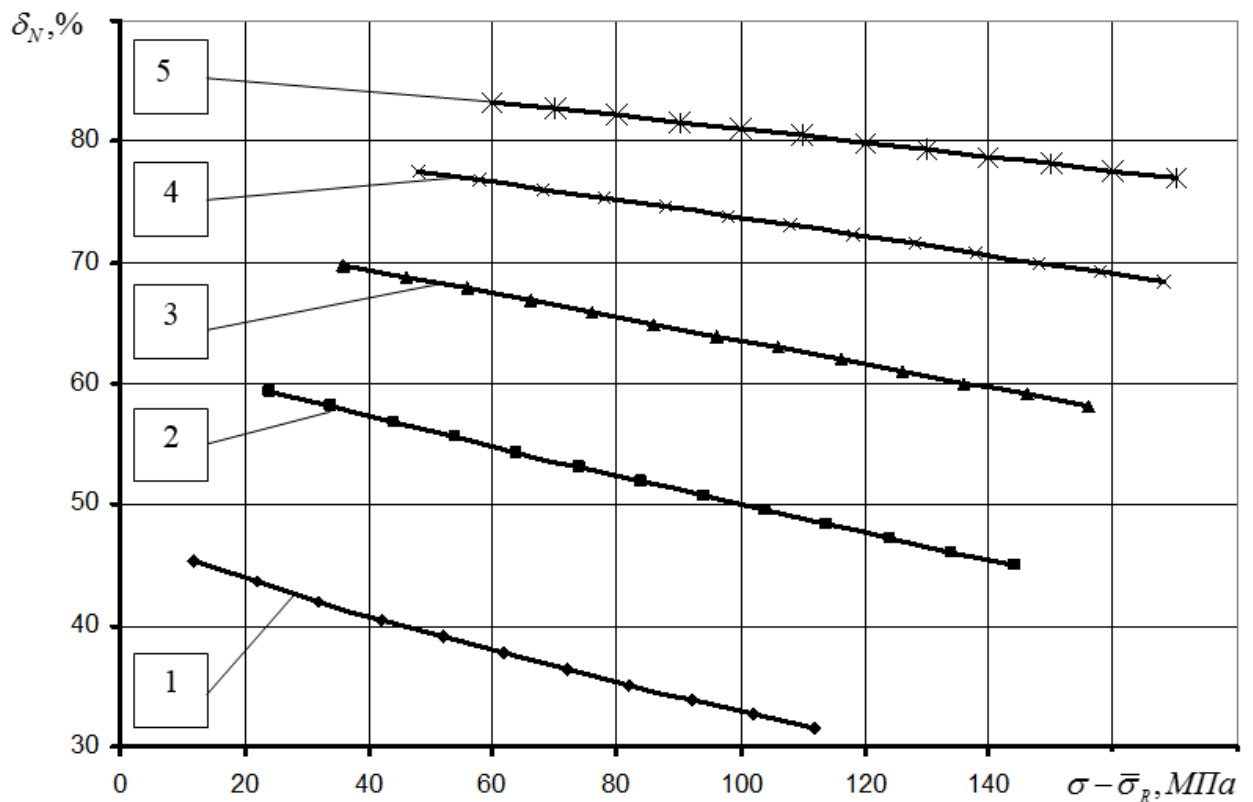


Рисунок 2.3 – Залежності  $\delta_N$  від рівня напружень  $(\sigma - \bar{\sigma}_R)$  для від'ємних відхилень довговічності до руйнування  $N$ , знайдених за степеневим рівнянням для середньомовірних значень границь витривалості, які дорівнюють: 1 –  $\bar{\sigma}_R = 100 \text{ МПа}$ ; 2 –  $\bar{\sigma}_R = 200 \text{ МПа}$ ;  
3 –  $\bar{\sigma}_R = 300 \text{ МПа}$ ; 4 –  $\bar{\sigma}_R = 400 \text{ МПа}$ ; 5 –  $\bar{\sigma}_R = 500 \text{ МПа}$

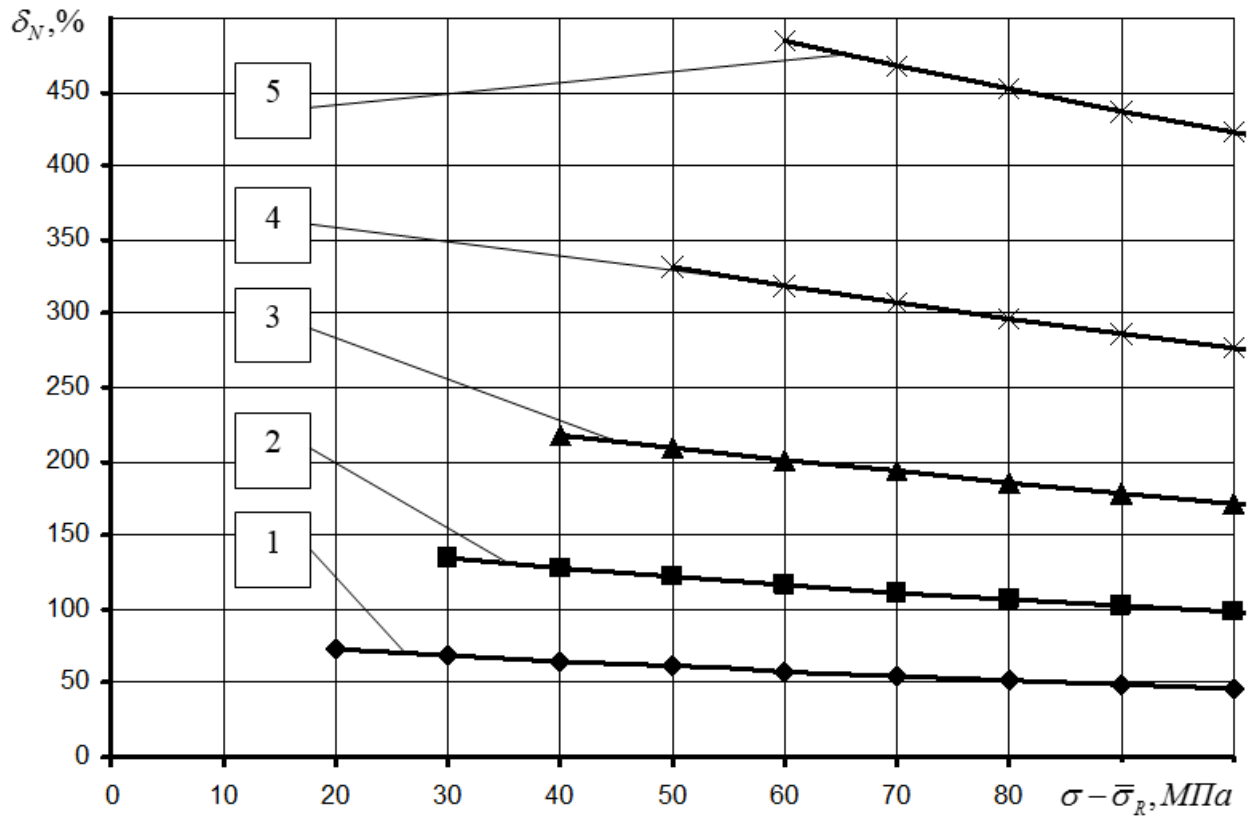


Рисунок 2.4 – Залежності  $\delta_N$  від рівня напружень  $(\sigma - \bar{\sigma}_R)$   
 для додатних відхилень довговічності до руйнування  $N$ ,  
 знайдених за степеневим рівнянням для середньомовірних значень

границь витривалості, які дорівнюють:

$$1 - \bar{\sigma}_R = 100 \text{ МПа}; 2 - \bar{\sigma}_R = 200 \text{ МПа};$$

$$3 - \bar{\sigma}_R = 300 \text{ МПа}; 4 - \bar{\sigma}_R = 400 \text{ МПа};$$

$$5 - \bar{\sigma}_R = 500 \text{ МПа}$$

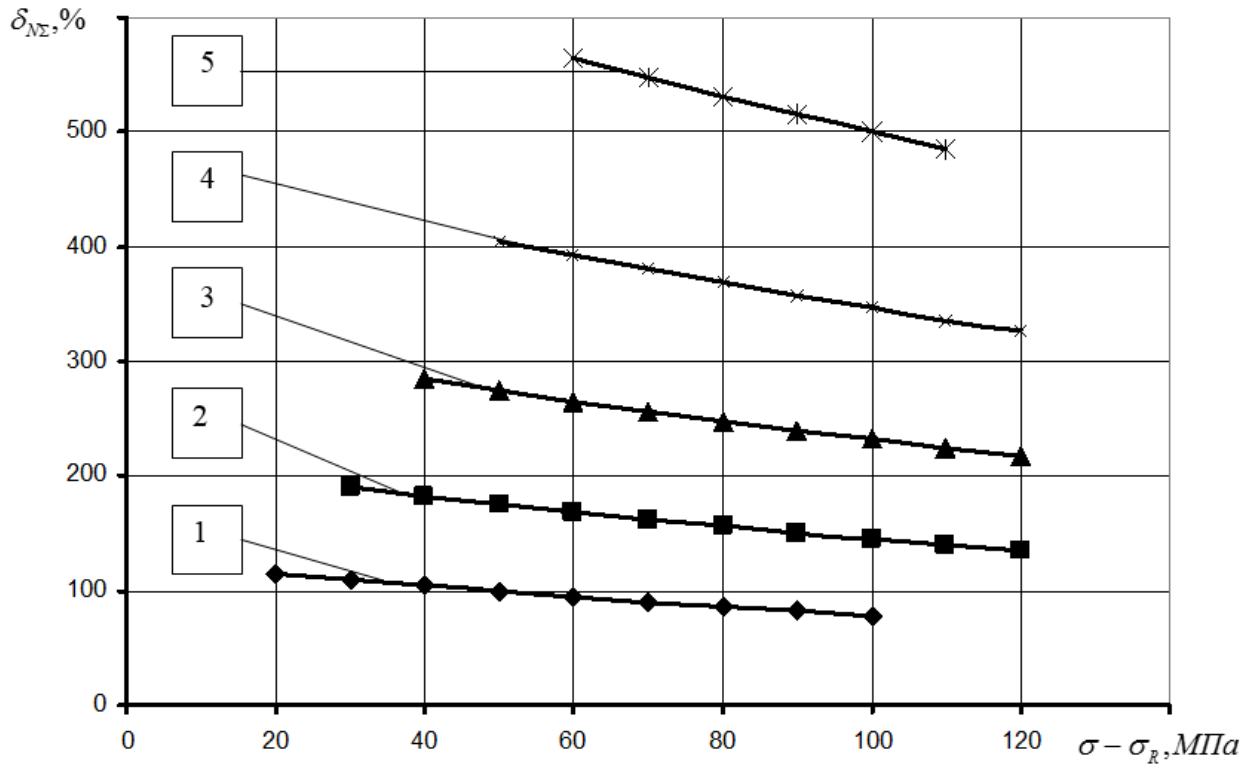


Рисунок 2.5 – Залежності  $\delta_{N\Sigma}$  від рівня напружень ( $\sigma - \bar{\sigma}_R$ ) для сумарних відхилень довговічності до руйнування  $N$ , знайдених за степеневим рівнянням для середніймовірних значень

границь витривалості, які дорівнюють:

1 –  $\bar{\sigma}_R = 100 \text{ МПа}$ ; 2 –  $\bar{\sigma}_R = 200 \text{ МПа}$ ;

3 –  $\bar{\sigma}_R = 300 \text{ МПа}$ ; 4 –  $\bar{\sigma}_R = 400 \text{ МПа}$ ;

5 –  $\bar{\sigma}_R = 500 \text{ МПа}$

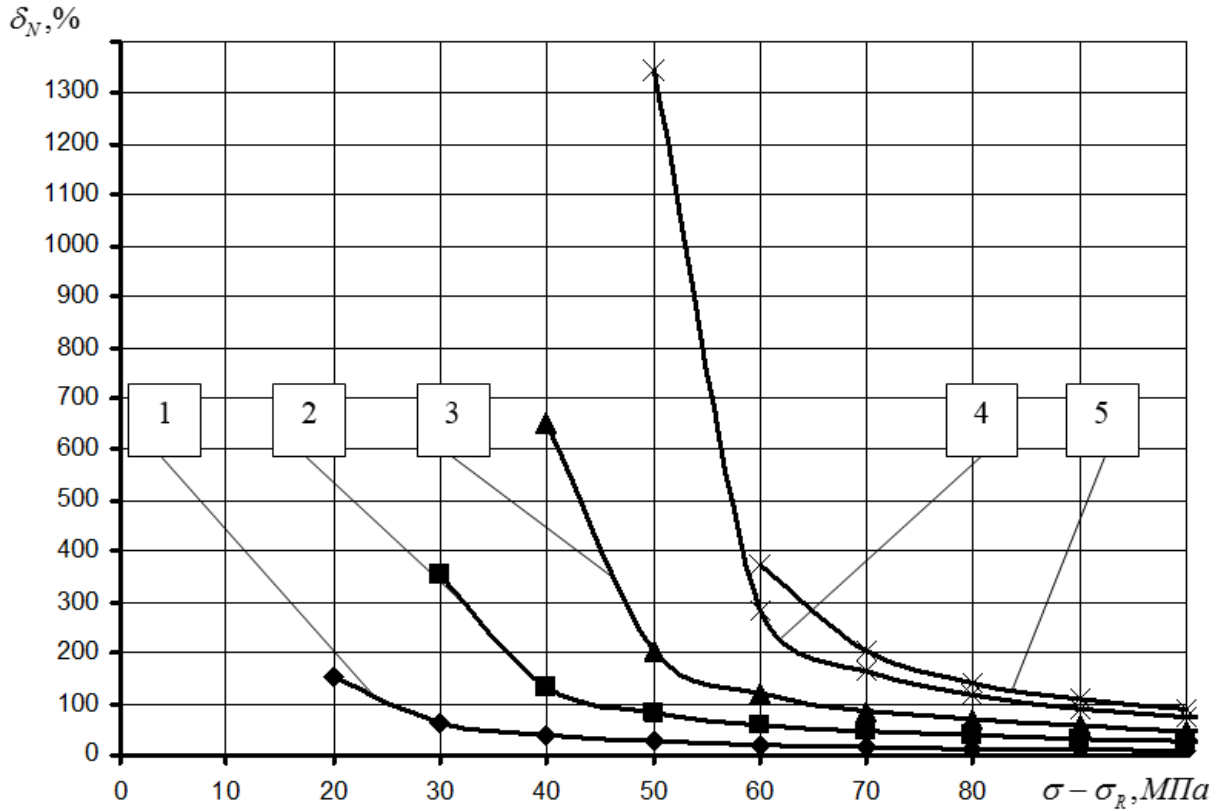


Рисунок 2.6 – Залежності  $\delta_N$  від рівня напружень  $(\sigma - \sigma_R)$  для додатних відхилень довговічності до руйнування  $N$ , знайдених за рівнянням Вейбулла для середніймовірних значень границь витривалості, які дорівнюють:

$$1 - \bar{\sigma}_R = 100 \text{ МПа}; 2 - \bar{\sigma}_R = 200 \text{ МПа};$$

$$3 - \bar{\sigma}_R = 300 \text{ МПа}; 4 - \bar{\sigma}_R = 400 \text{ МПа};$$

$$5 - \bar{\sigma}_R = 500 \text{ МПа}$$

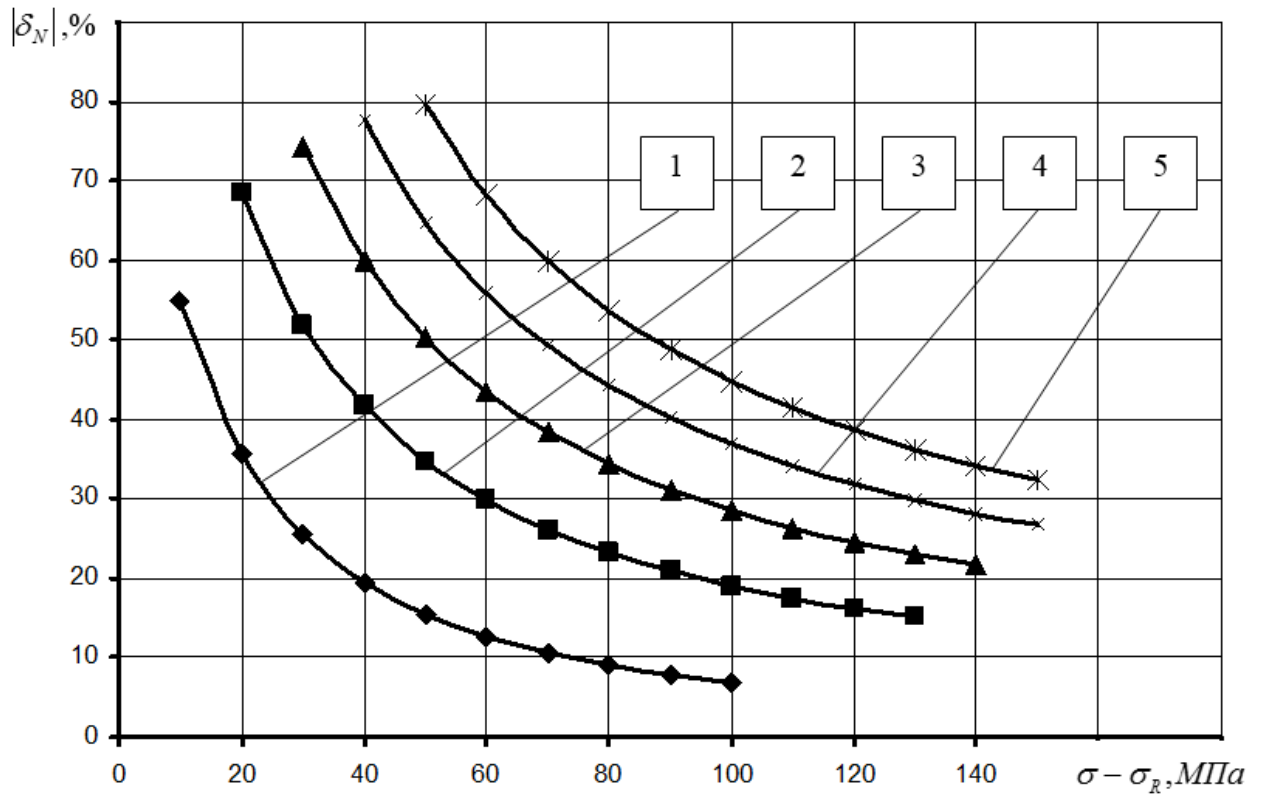


Рисунок 2.7 – Залежності  $|\delta_N|$  від рівня напружень  $(\sigma - \sigma_R)$  для від'ємних відхилень довговічності до руйнування  $N$ , знайдених за рівнянням Вейбулла для середнеймовірних значень границь витривалості, які дорівнюють:

$$1 - \bar{\sigma}_R = 100 \text{ МПа}; \quad 2 - \bar{\sigma}_R = 200 \text{ МПа};$$

$$3 - \bar{\sigma}_R = 300 \text{ МПа}; \quad 4 - \bar{\sigma}_R = 400 \text{ МПа};$$

$$5 - \bar{\sigma}_R = 500 \text{ МПа}$$

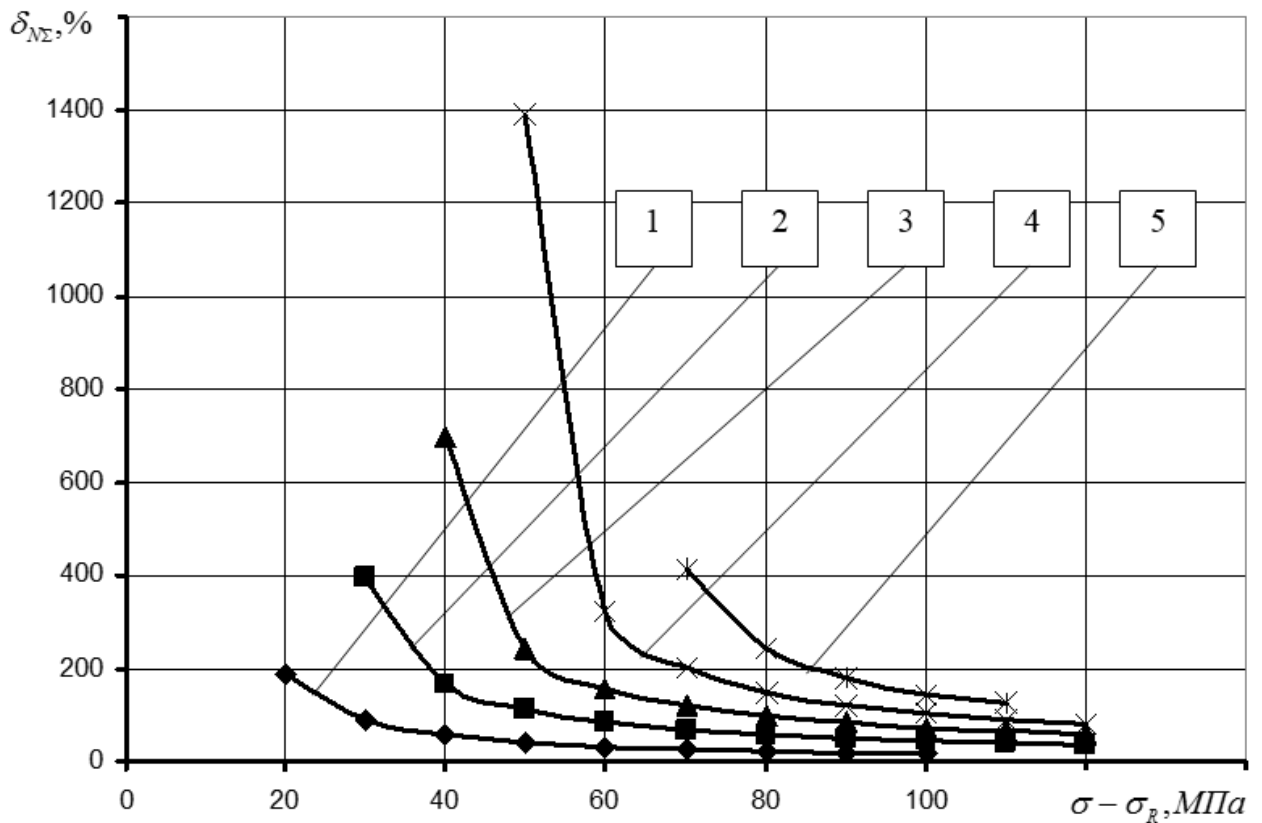


Рисунок 2.8 – Залежності  $\delta_{NS}$  від рівня напружень  $(\sigma - \sigma_R)$  для сумарних відхилень довговічності до руйнування  $N$ , знайдених за рівнянням Вейбулла для середньомовірних значень границь витривалості, які дорівнюють:

$$1 - \bar{\sigma}_R = 100 \text{ МПа}; 2 - \bar{\sigma}_R = 200 \text{ МПа}; 3 - \bar{\sigma}_R = 300 \text{ МПа};$$

$$4 - \bar{\sigma}_R = 400 \text{ МПа}; 5 - \bar{\sigma}_R = 500 \text{ МПа}$$

З наведених вище графіків видно, що незалежно від моделі кривої втоми і виду кореляційних зв'язків між параметрами похилої ділянки кривої втоми і границею витривалості, середні відхилення додатних і від'ємних довговічностей  $\bar{\delta}_N$  зростають зі збільшенням границі витривалості. При цьому від'ємні відхилення за абсолютною величиною помітно менші додатних. Це обумовлено тим, що параметри середньомовірних кривих втоми були визначені за допомогою методу найменших квадратів в логарифмічних координатах  $\lg N - \lg \sigma$  і  $\lg N - \lg(\sigma - \sigma_R)$ , які є нерівномірними. Щоб

врахувати цей фактор, на графіках (рис. 2.1 і 2.2) показані сумарні відхилення, які охоплюють весь діапазон відхилень довговічностей до руйнування  $N$ .

Залежності  $|\delta_N|(\sigma - \sigma_R)$  і  $|\delta_{N\Sigma}|(\sigma - \sigma_R)$  представлені на рис. 2.3 – 2.8, характеризують відповідні діапазони відхилень довговічностей до руйнування в залежності від рівня циклічного навантаження. У всіх розглянутих випадках проглядається тенденція зменшення цих діапазонів при переході від низьких рівнів напружень до вищих, що узгоджується з експериментальними результатами.

Розрахунки величин  $|\delta_N|$  і  $|\delta_{N\Sigma}|$ , представлені в таблицях 2.1 і 2.2, виконані для границь витривалості  $\sigma_R = \bar{\sigma}_R \pm 0,12 \cdot \bar{\sigma}_R$ , тобто для випадку зміни границі витривалості на  $\pm 12\%$ . Це значення вважають максимально допустимою погрішністю для методів прискореного визначення границі витривалості, і, крім того, приблизно в цьому ж діапазоні значень, зазвичай, спостерігається розсіювання величин  $\sigma_R$  при проведенні випробувань на опір втомі багатьох деталей, у тому числі моделей відновлених суднових гребних валів [51, 78].

Границі витривалості суднових гребних валів після відновлення, як правило, не перевищують 200 МПа, тому проведені дослідження в діапазоні значень  $\sigma_R = 100 \dots 500$  МПа виконано з великим запасом, проте, з точки зору перспективи воно може бути використано і для інших деталей, границі витривалості яких вище 200 МПа.

Прийнята при розрахунку відхилень довговічностей величина зміни границі витривалості  $\pm 12\%$  була прийнята для всього діапазону її зміни з деяким припущенням. Реально величину  $|\delta_N|$  слід визначати з урахуванням границі витривалості, тобто ввести поправочний коефіцієнт.

В роботі [28] запропоновано допустиму похибку оцінки границі витривалості  $\delta_{\sigma_R}$  визначати з урахуванням приведенного коефіцієнта точності

$K_{PP}$



$$\delta_{\sigma_R} = \frac{100(\sigma_R - \bar{\sigma}_R)}{\bar{\sigma}_R} \leq K_{PP}[\delta_{\sigma_R}], \quad (2.7)$$

де  $K_{PP} = \frac{\sigma_{RT}}{\sigma_R}$ ,  $\sigma_{RT}$  – базові значення границь витривалості при виборі необхідної точності (дорівнюватимуть 50 МПа; 100 МПа і 200 МПа відповідно для високої, середньої і низької точності) [28].

На графіку (рис. 2.9) представлена залежність  $\delta_{\sigma_R}(\sigma_R)$ , побудована за допомогою формули (2.7) для базових значень границь витривалості 50 МПа; 100 МПа і 200 МПа [28].

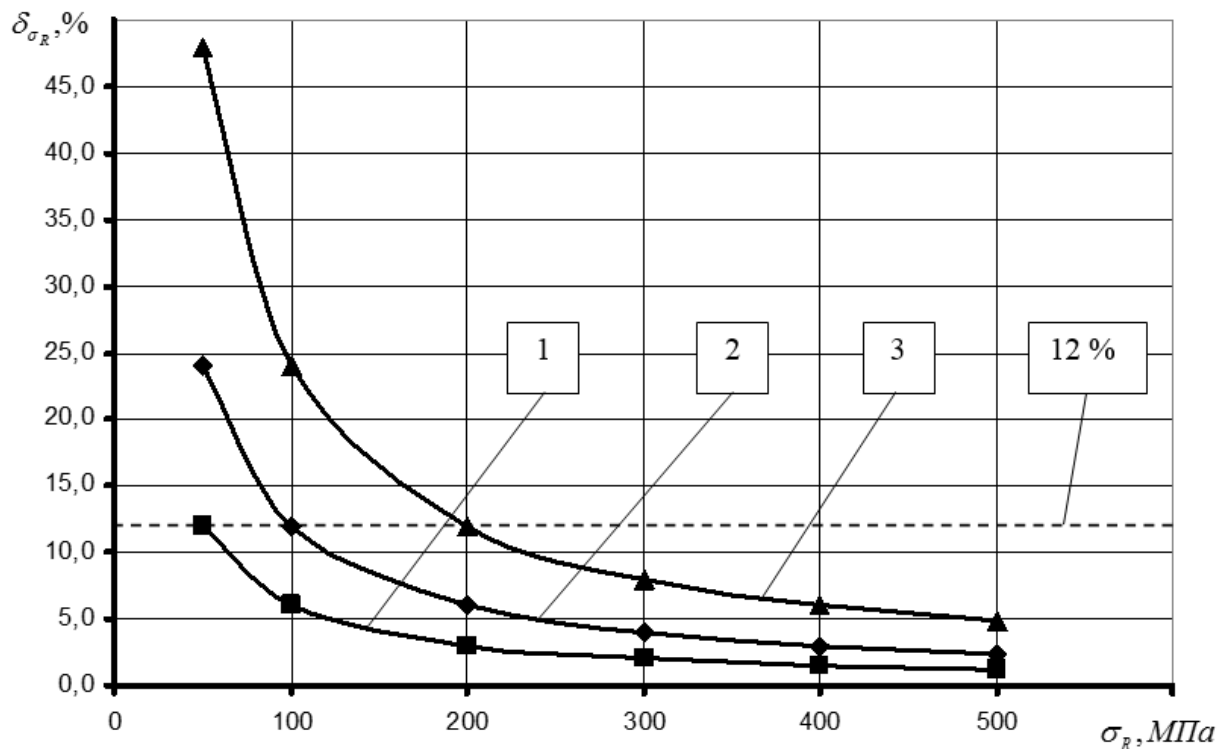


Рисунок 2.9 – Графік залежності  $\delta_{\sigma_R}$  від  $\sigma_R$  з урахуванням наведеного коефіцієнта точності  $K_{PP}$  для високої (1), середньої (2) і низької точності (3)

З графіка видно, що зі збільшенням границі витривалості похибка її оцінки  $\delta_{\sigma_R}$  зменшується. Для моделей гребних валів, границі витривалості яких знаходяться, як правило, в діапазоні 100...200 МПа, похибка в 12 % (пунктирна лінія на графіку) цілком прийнятна (середнє значення).

Таким чином, чутливість запропонованого методу порівняльної оцінки характеристик опору втоми за довговічністю до руйнування значно вище, ніж за границею витривалості, що важливо для випадків, коли величини  $\sigma_R$  відрізняються між собою незначно, зокрема, для порівняння характеристик втомної міцності відновлених суднових гребних валів.

## **2.2 Розробка методу порівняльної оцінки втомної міцності моделей нових та відновлених гребних валів на основі коефіцієнта відносної довговічності**

Будемо вважати, що результати випробувань на опір втоми як нових, так і відновлених моделей суднових гребних валів можна описати степеневим рівнянням виду

$$\sigma^{m_c} N = \sigma_{dC}^{m_c} = \sigma_R^{m_c} N_{GC} = 10^{C_c}, \quad (2.8)$$

де  $\sigma$  і  $N$  – поточні значення напруження і довговічності до руйнування відповідно;  $m_c$  і  $C_c$  – параметри похилої ділянки кривої втоми;

$\sigma_d$  і  $N_G$  – початкова ордината і абсциса точки перелому кривої втоми відповідно в координатах  $\lg N - \lg \sigma$ .

Ґрунтуючись на рівнянні (2.8), представимо схему можливого взаємного розташування кривих втоми для двох порівнюваних видів моделей гребних валів в логарифмічних координатах, відновлених за різними технологіями (умовно назвемо їх: технологія № 1 і технологія № 2) (рис. 2.10). В даному випадку конкретизація технологій відновлення не має значення, оскільки переваги і недоліки кожної з них відібуються на довговічності до руйнування при проведенні випробувань на опір втоми. В якості допоміжної інформації на схемі позначені точки  $b, c, d, e$  з координатами відповідно  $(\lg N_{12} - \lg \sigma_1)$ ,  $(\lg N_{22} - \lg \sigma_2)$ ,  $(\lg N_{21} - \lg \sigma_2)$ ,  $(\lg N_{11} - \lg \sigma_1)$ , що імітують результати випробувань моделей відновлених гребних валів на двох рівнях напружень.

Дана схема передбачає, що похилі ділянки кривих втоми мають загальний діапазон напружень в області багатоциклової втоми.

Зі схеми випливає, що трикутник  $abe$  подібний трикутнику  $acd$ , а трикутник  $aef$  подібний трикутнику  $adg$ . Це дозволяє виразити коефіцієнт відносної довговічності  $k_\gamma$  у вигляді такої пропорції

$$k_\gamma = \frac{eb}{dc} = \frac{fe}{gd} = \frac{eb}{fe} = \frac{dc}{gd} = \frac{\lg N_{12} - \lg N_{11}}{\lg N_{11}} = \frac{\lg N_{22} - \lg N_{21}}{\lg N_{21}}. \quad (2.9)$$

При побудові схеми і виведення залежності (2.9) було зроблено припущення про те, що обидві криві перетинають вісь ординат в одній точці з координатами  $(0; \lg \sigma_d)$ .

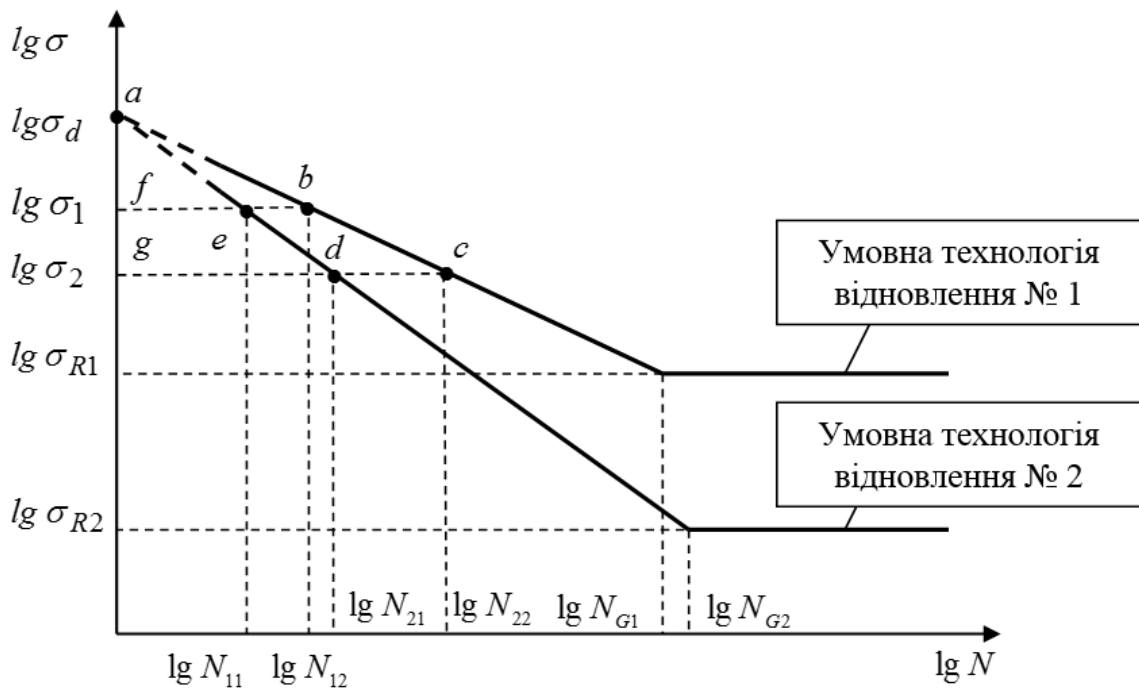


Рисунок 2.10 – Схема взаємного розташування кривих втоми моделей суднових гребних валів в координатах  $\lg N - \lg \sigma$ , відновлених за умовними технологіям № 1 і № 2

Можливість такого припущення розглядалася в роботі [40], в якій була представлена залежність  $\lg \sigma_d = C/m = f(\sigma_R)$ , побудована за допомогою зв'язків між параметрами степеневого рівняння кривої втоми і границею витривалості  $m(\sigma_R)$  і  $C(\sigma_R)$  в діапазоні значень  $\sigma_R$  від 50 до 600 МПа (рис. 2.11).

Щоб встановити тенденцію зміни параметра  $\sigma_{dC}$  в залежності від границі витривалості, запишемо вираз для його визначення, користуючись залежностями (2.2), (2.3) і (2.8)

$$\sigma_{dC} = \left[ 10^{\alpha_C(m_C+1)\lg \sigma_R + \beta_C} \right]^{\frac{1}{a_C \sigma_R + b_C}}. \quad (2.10)$$

Задаючись рядом значень границь витривалості в реальному діапазоні його зміни (100...500 МПа), визначимо за формулою (2.10) величини параметра  $\sigma_{dC}$  (табл. 2.3). Для наочності представимо результати розрахунку також у вигляді відповідного графіка (рис. 2.11).

Таблиця 2.3 – Розрахункові значення параметрів  $m_C$ ,  $C_C$ ,  $\sigma_{dC}$

$\sigma_R$ , МПа	100	200	300	400	500
$m_C$	4,10	6,80	9,50	12,20	14,90
$C_C$	14,29	22,15	29,93	38,25	46,80
$\sigma_{dC}$ , МПа	3287,96	1804,95	1502,77	1429,53	1434,62
$\lg \sigma_{dC}$	3,52	3,26	3,18	3,16	3,16

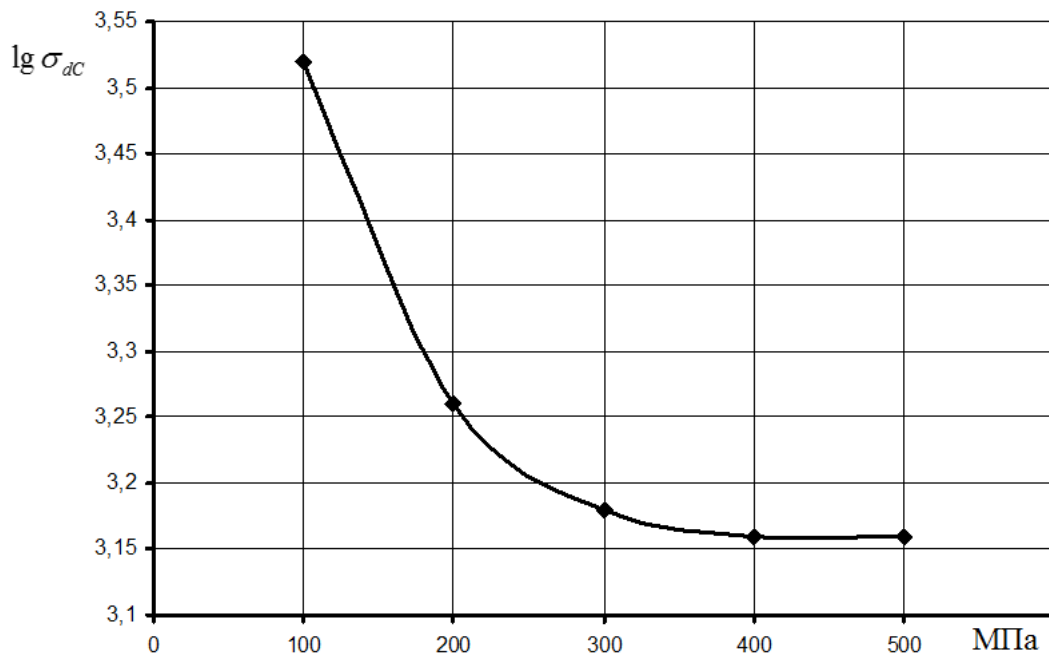


Рисунок 2.11 – Залежність  $\lg \sigma_{dC} - \sigma_R$

З наведеного на рисунку 2.11 графіка видно, що величина  $\sigma_{dC}$  спочатку круто зменшується, до значення границі витривалості рівної приблизно 300 МПа, а потім стає практично постійною. Графік не дає інформації про те, де реально перетинаються криві втоми між собою. Проте, зміщення точок перетину, особливо при низьких значеннях границі витривалості, впливає на похибку оцінки коефіцієнта відносної довговічності за формулою (2.9).

Враховуючи, що границі витривалості відновлених гребних валів не перевищують 200 МПа, необхідне коригування коефіцієнта відносної довговічності для таких об'єктів.

### **2.3. Уточнення коефіцієнта відносної довговічності для низьких значень границі витривалості**

Як вже було згадано вище залежність  $lg \sigma_{dC}$  від границі витривалості  $\sigma_R$  не дає інформації про те, де реально перетинаються криві втоми між собою. У зв'язку з цим більш інформативною буде залежність  $lg \sigma_{dC}$  від логарифму довговічності  $lg N$ , яка дозволяє спостерігати область перетинів кривих втоми. Вказана залежність побудована на основі результатів, наведених в табл. 2.3 і представлена на рис. 2.12.

Наведений нижче графік дозволяє визначити максимальний інтервал точок перетину похилих ділянок кривих втоми  $\Delta lg N_{max}$ . Крайня ліва абсциса дорівнює нулю, оскільки ордината  $lg \sigma_{dC}$  для двох значень границі витривалості ( $\sigma_R = 400$  МПа і  $\sigma_R = 500$  МПа), як видно з рисунка 2.12 і табл. 2.3, є спільною.

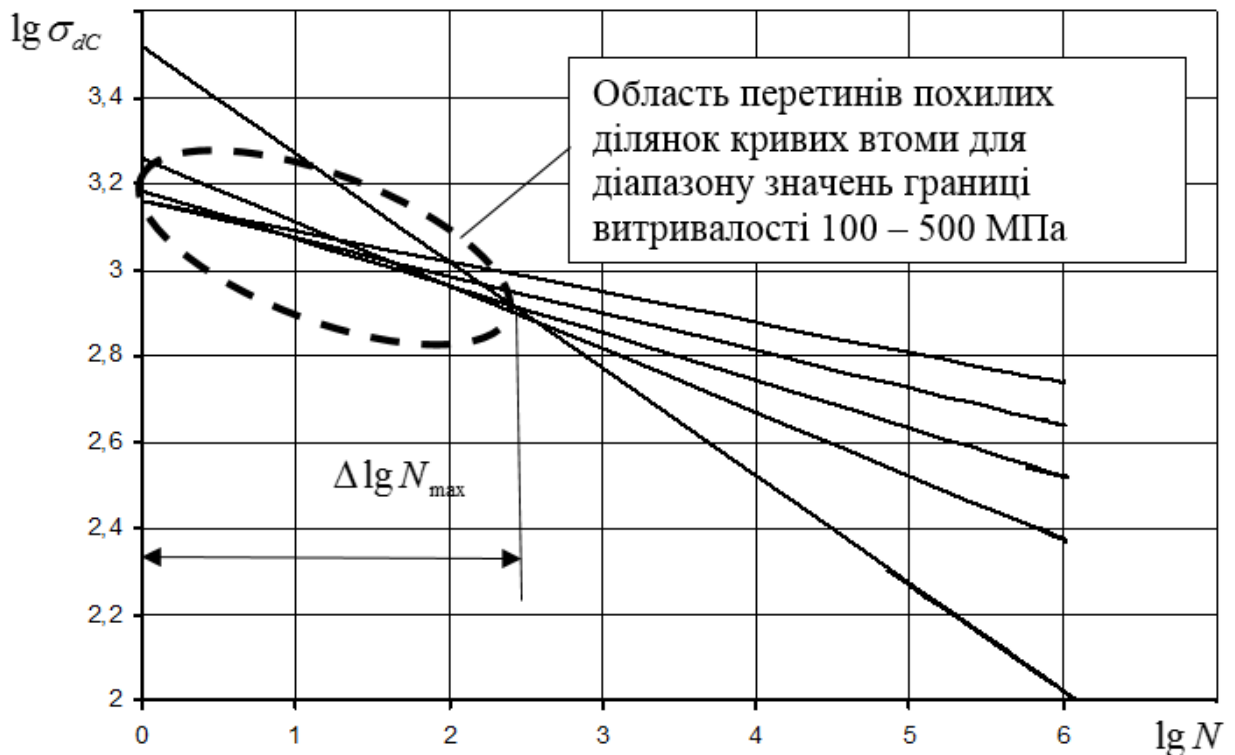


Рисунок 2.12 – Сімейство похилих ділянок кривих втоми в координатах  $\lg N - \lg \sigma$  для діапазону значень границі витривалості 100 ÷ 500 МПа

Значення крайньої правої абсциси визначимо, вирішуючи систему двох степеневих рівнянь в логарифмічному вигляді, записаних для границі витривалості 100 МПа і 200 МПа з урахуванням даних табл. 2.3, тобто

$$\begin{cases} 4,1 \lg \sigma + \lg N = 14,29 \\ 6,8 \lg \sigma + \lg N = 22,15 \end{cases} \quad (2.11)$$

Звідки  $\lg N = 2,35$ . Таким чином,  $\Delta \lg N_{max} = 2,35$  ( $\Delta N = 224$  цикли).

Незважаючи на настільки незначне зміщення абсцис точок перетину похилих ділянок кривих втоми, їх початкові ординати змінюються в широкому діапазоні значень  $\Delta \lg \sigma = 3,16 - 3,52 = 0,36$  ( $\Delta \sigma = 1866$  МПа).

Абсциси точок перетину кривих втоми  $\lg N$ , як видно з рис. 2.12, приймають тільки додатні значення. Це обумовлено параметрами кореляційних рівнянь (2.2) і (2.3), проте, реально можливий перетин цих кривих і ліворуч від осі ординат.

При порівнянні початкових ординат кривих втоми нових і відновлених гребних валів, границі витривалості яких близькі, їх відмінність буде тим менше, чим менше різниця між їхніми границями витривалості. У цьому випадку коефіцієнт відносної довговічності  $k_\gamma$  буде визначений з більшою точністю, проте, деяка систематична похибка збережеться. Звести до мінімуму цю похибку можна за рахунок визначення зміщення абсциси  $\Delta \lg N$  (рис. 2.3). У цьому випадку рівняння (2.9) запишеться у вигляді

$$k_\gamma = \frac{\lg N_1 - \lg N_2}{\lg N_2 - \Delta \lg N}. \quad (2.12)$$

Тут значення  $\lg N_1$  і  $\lg N_2$  відносяться до нових і відновлених моделей гребних валів (в залежності від цілей порівняльного експерименту вони можуть відноситися тільки до нових або тільки до відновлених). Значення  $\Delta \lg N$  можна виразити через параметри  $m_c$  і  $C_c$ , вирішуючи систему двох рівнянь (2.11), записаних для двох похилих ділянок кривих втоми, що перетинаються в одній точці тобто

$$\begin{cases} m_{c1} \lg \sigma + \Delta \lg N = C_{c1} \\ m_{c2} \lg \sigma + \Delta \lg N = C_{c2} \end{cases}. \quad (2.13)$$

Звідки

$$\Delta \lg N = \frac{m_{c1} C_{c2} - m_{c2} C_{c1}}{m_{c1} - m_{c2}}. \quad (2.14)$$

З урахуванням (2.14) залежність (2.12) перепишемо у вигляді

$$k_\gamma = \frac{\lg N_1 - \lg N_2}{\lg N_2 - \frac{m_{c1} C_{c2} - m_{c2} C_{c1}}{m_{c1} - m_{c2}}}. \quad (2.15)$$

Залежність (2.15) передбачає, що параметри похилих ділянок  $m_{c1}$ ,  $m_{c2}$ ,  $C_{c1}$  і  $C_{c2}$  відомі. Однак, в разі порівняльних випробувань моделей гребних валів ці параметри відомі тільки для моделей, щодо яких здійснюється співставлення характеристик опору втоми. Іншими словами відомими є тільки параметри  $m_{c2}$  і  $C_{c2}$ . Для визначення параметрів  $m_{c1}$  і  $C_{c1}$  можна

використовувати результат експерименту одної моделі валу і один із способів, який дозволив би за цим результатом і будь-якою апіорною інформацією (наприклад, по зв'язках між параметрами кривої втоми і границею витривалості) або прийнятому допущенню визначити обидва параметри.

В даному випадку завдання з достатньою точністю можна вирішити шляхом поєднання вихідної середньоїмовірної кривої втоми і результатом випробування об'єкта, переміщаючи її паралельно самій собі уздовж осі ординат в звичайних координатах  $N - \sigma$ , як це показано на схемі (рис. 2.13).

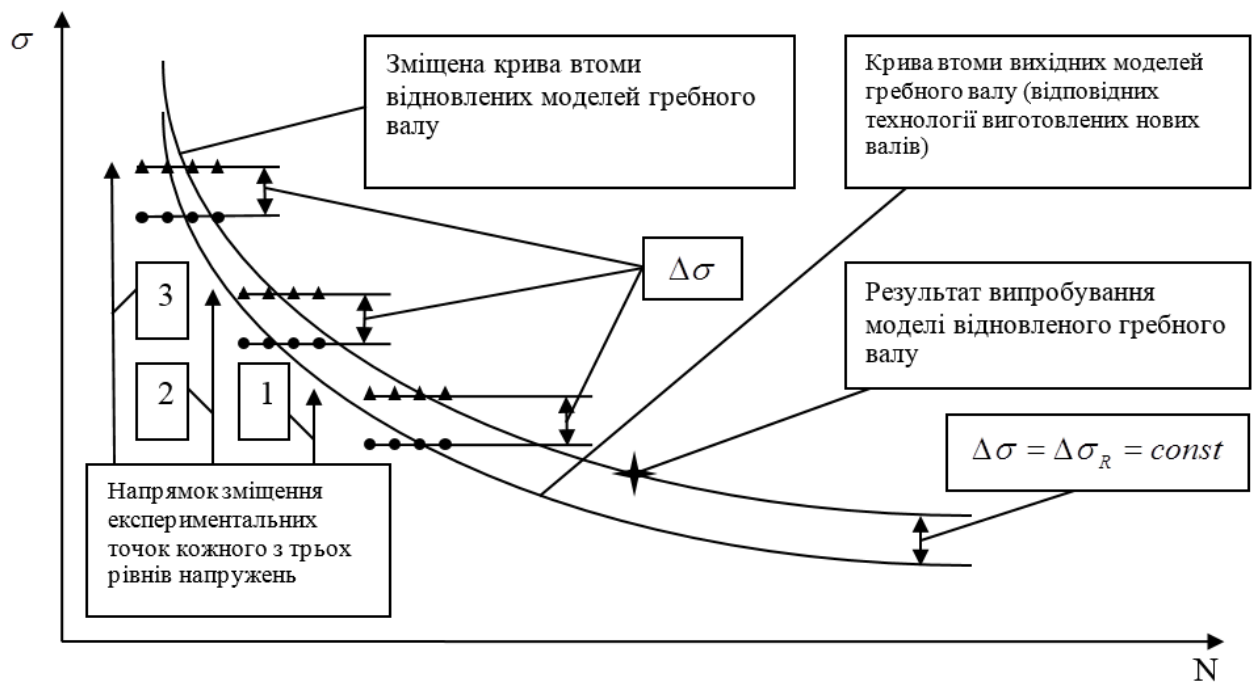


Рисунок 2.13 – Схема до визначення параметрів  $m_{c1}$  і  $C_{c1}$  зміщеної кривої втоми для моделей відновленого гребного валу

В роботі [28] зроблено обґрунтування такого припущення. Зокрема було проведено дослідження, яке свідчить про те, що нахил кривих втоми пов'язаний, в основному, з логарифмічною системою координат. У звичайних же координатах сімейства кривих втоми з різними границями витривалості можна вважати еквідистантними. Результати згаданого дослідження наведені нижче в табл. 2.14 [28]



Таблиця 2. 14 – Розрахункові значення параметрів  $m_C$ ,  $m'_C$ ,  $C_C$  і  $C'_C$  та їх відносних похибок

$\sigma_R$ , МПа	50	100	200	300	400	500
$m_C$	2,75	4,10	6,80	9,50	12,20	14,90
$m'_C$	2,79	4,15	6,80	9,41	12,00	14,62
$\delta_m$ , %	1,4	1,2	0	-1,0	-1,6	-1,9
$C_C$	10,60	14,42	22,14	30,18	38,49	47,03
$C'_C$	11,39	14,85	22,14	29,77	37,70	45,91
$\delta_C$ , %	7,5	3,0	0	-1,4	-2,1	-2,4

У таблиці  $m'_C$  і  $C'_C$  – параметри, які отримані шляхом обробки розрахункових значень довговічності і відповідних напружень зміщеної кривої втоми за допомогою методу найменших квадратів. Похибки визначення параметрів  $\delta_m$  і  $\delta_C$  не перевищують 12 %, що є прийнятним для інженерних розрахунків. Відзначимо також, що даний діапазон зміни границі витривалості є досить широким, тому в реальному діапазоні його значень для гребних валів (100...200 МПа) максимальна похибка визначення параметра  $m_C$  дорівнює 1,2 %, а параметра  $C_C$  – 3%.

Розглянутий підхід до уточнення коефіцієнта відносної довговічності дозволив домогтися його однозначності незалежно від рівня напружень. При цьому єдиний результат випробувань моделі відновленого гребного валу може не відповідати параметрам  $m_{C1}$  і  $C_{C1}$ . Можливе відхилення від них невелике і ним можна знехтувати.

З метою підтвердження розглянутого вище підходу до уточнення коефіцієнта відносної довговічності  $k_\gamma$  розглянемо результати випробувань на опір втомі лабораторних зразків без наплавлення з концентратором напружень у вигляді кільцевої виточки зі сталі 45 [72]. В процесі випробувань вони оберталися і навантажувалися чистим вигином (табл.2.15).

Таблиця 2.15 – Результати випробувань моделей без наплавлення зі сталі 45 при симетричному круговому згині

№ п/п	$\sigma$ , МПа	$N$ , Цикл.	$lg \sigma$	$lg N$	$\bar{\sigma}_R$ , МПа
Сталь 45, моделі з концентратором напружень ( $\alpha_\sigma = 1,5564$ )					
Параметри степеневого рівняння: $m_c = 13,038$ ; $C_c = 36,674$ .					
1	270	77300	2,431	4,888	204,0
2		87300		4,941	
3		103000		5,012	
4		115900		5,064	
5		146900		5,167	
6	250	197100	2,398	5,295	
7		232900		5,367	
8		262300		5,419	
9		304400		5,483	
10		370300		5,569	
11	230	588700	2,362	5,770	
12		708800		5,851	
13		740700		5,870	
14		835100		5,921	
15		1100500		6,041	
16	210	1237700	2,322	6,093	
17		1240200		6,094	
18		2784800		6,445	
19		2806300		6,448	
20		3931800		6,595	

За знайденими в результаті статистичної обробки експериментальних даних параметрами  $m_c$  і  $C_c$ , визначимо з степеневого рівняння (2.4) логарифм

довговічності при одному з напружень, при якому були випробувані моделі (наприклад, 270 МПа)

$$\lg N = C_C - m_C \lg \sigma = 36,674 - 13,038 \cdot 2,431 = 4,979.$$

Будемо вважати, що модель гребного валу, характеристики опору втомі якої необхідно порівняти з вихідними, випробувана при тому ж напруженні, тобто  $\sigma = 270$  МПа і її довговічність склала  $N_1$  циклів. При цьому будемо вважати, що ця довговічність буде перевищувати довговічність по кривій втоми в 10 разів, тобто  $N_1 = 5952796$  циклів ( $\lg N_1 = 5,979$ ). У цьому випадку (без коригування) відповідно до формули (2.9) коефіцієнт відносної довговічності  $k_\gamma$  буде дорівнювати

$$k_\gamma = \frac{\lg N_1 - \lg N_2}{\lg N_2} = \frac{5,979 - 4,979}{4,979} = 0,201.$$

Змістимо криву втоми вгору на величину напруження, яке дорівнює

$$\Delta\sigma = 270 - \left( \frac{10^{C_C}}{N} \right)^{\frac{1}{m_C}} = 270 - \left( \frac{10^{36,674}}{952796} \right)^{\frac{1}{13,038}} = 39 \text{ МПа}.$$

Визначимо параметри  $m_C$  і  $C_C$  для зміщеної кривої втоми на величину  $\Delta\sigma$  за допомогою методу найменших квадратів за даними, наведеними в табл. 2.15. В результаті отримуємо:  $m_C = 15,129$ ;  $C_C = 42,648$ . За формулою (2.14) знаходимо значення  $\Delta \lg N$

$$\Delta \lg N = \frac{m_{C1} C_{C2} - m_{C2} C_{C1}}{m_{C1} - m_{C2}} = \frac{15,129 \cdot 36,674 - 13,038 \cdot 42,648}{15,129 - 13,038} = -0,574$$

Від'ємне значення  $\Delta \lg N$  вказує на те, що точка перетину кривих втоми лежить ліворуч від осі ординат, що допустимо, оскільки вона не має фізичного сенсу і є допоміжною безрозмірною величиною.

Уточнене значення  $k_\gamma$  відповідно до формули (2.12) дорівнюватиме

$$k_\gamma = \frac{\lg N_1 - \lg N_2}{\lg N_2 - \Delta \lg N} = \frac{5,797 - 4,979}{4,979 + 0,574} = 0,147.$$

Таким чином, уточнення коефіцієнта  $k_\gamma$  склало 26,9 %. Його значення постійно для всього діапазону напружень порівнюваних моделей гребних валів. Це дозволяє проводити порівняльний аналіз їх втомної міцності, зіставляючи між собою значення  $k_\gamma$ . Крім того, за відомими величинам цього коефіцієнта можна проводити порівняльну оцінку довговічності на будь-якому з рівнів напружень, в тому числі на тих рівнях, на яких випробування не проводилися.

#### **2.4. Визначення коефіцієнта відносної довговічності при відсутності загального діапазону напружень в багатоцикловій області**

Розглянута в п. 2.3. схема до визначення коефіцієнта відносної довговічності  $k_\gamma$  (рис. 2.10), передбачала, що криві втоми моделей гребних валів мають певний загальний діапазон напружень. Іншими словами, ці криві розташовані таким чином, що є можливість їх випробувати на деяких загальних для них рівнях напружень, які позначені  $\sigma_1$  і  $\sigma_2$ . Однак, наявність загального діапазону напружень для обох кривих втоми є окремим випадком. У загальному ж випадку такий діапазон напружень може бути відсутнім, і тоді коефіцієнт  $k_\gamma$  слід визначати шляхом екстраполяції похилої ділянки однієї з кривих втоми в область напружень, розташованих нижче границі витривалості (рис. 2.14).

Визначення коефіцієнта відносної довговічності в даному випадку буде таким самим як описано вище. Різниця буде лише в тому, що за даним коефіцієнтом неможна буде зіставити між собою довговічності до руйнування. Однак з його допомогою можна визначити границі витривалості, і в подальшому по них проводити порівняльну оцінку втомної міцності моделей гребних валів.

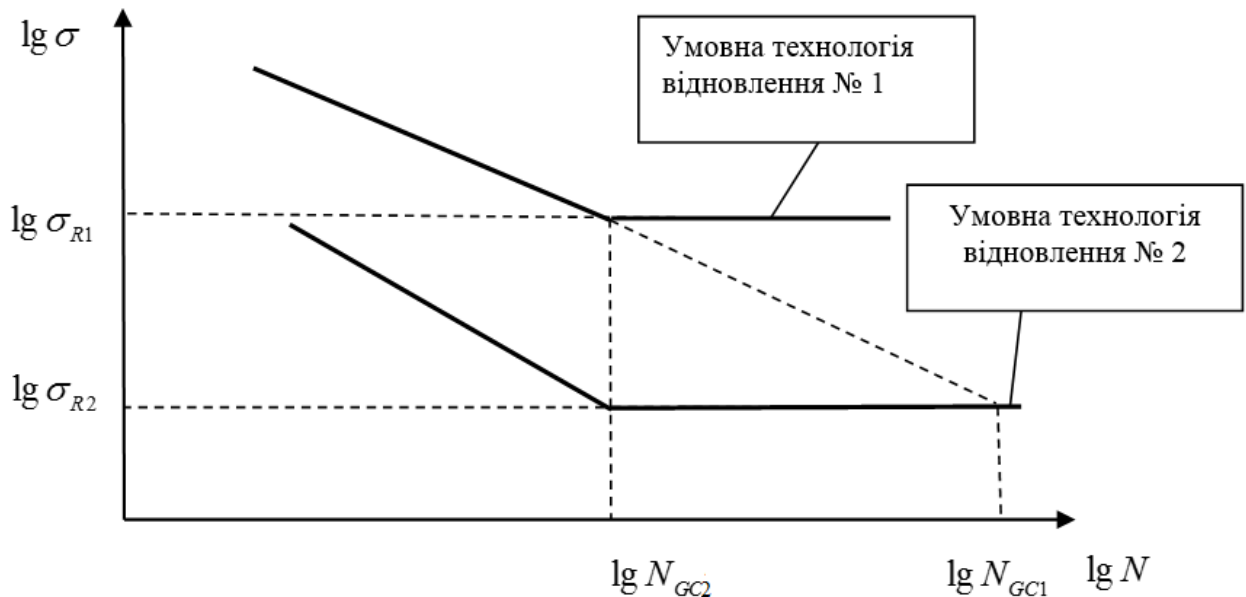


Рисунок 2.14 – Схема взаємного розташування кривих втоми відновлених моделей гребних валів, які не мають загального діапазону напружень на похилій ділянці

В якості вихідних припущень для вирішення цього завдання приймемо, що абсциси перелому обох кривих втоми збігаються і дорівнюють  $lg N_{GC2}$ . Будемо також вважати, що параметри кривої втоми, відповідної умовної технології відновлення № 1  $m_{C1}$  і  $C_{C1}$ , а також границя витривалості  $\sigma_{R1}$  відомі на основі результатів їх випробувань. Її похилу ділянку продовжимо до перетину з горизонтальною ділянкою кривої втоми, яка відповідає моделям з умовною технологією відновлення № 2 (пунктирна лінія). Точка перетину з горизонтальною ділянкою другої кривої втоми визначатиме умовну абсцису  $lg N_{GC1}$ .

Для даної схеми запишемо степеневе рівняння кривої втоми (2.8) у вигляді:

$$m_{C1} lg \sigma_{R2} + lg N_{GC1} = C_{C1}, \quad (2.16)$$

де  $\sigma_{R2}$  – границя витривалості відновлених моделей гребного валу № 2.

Залежність (2.12) в цьому випадку буде мати вигляд

$$k_\gamma = \frac{\lg N_{GC1} - \lg N_{G2}}{\lg N_{G2} - \Delta \lg N}, \quad (2.17)$$

звідки

$$\lg N_{GC1} = k_\gamma (\lg N_{G2} - \Delta \lg N) + \lg N_{G2}. \quad (2.18)$$

Вирішуючи спільно рівняння (2.16) і (2.18), отримаємо залежність для визначення границі витривалості моделей гребних валів, відновлених за умовною технології № 2

$$\lg \sigma_{R2} = \frac{C_H - k_\gamma (\lg N_{G2} - \Delta \lg N) - \lg N_{G2}}{m_{C1}};$$

або

$$\sigma_{R2} = 10^{\frac{C_H - k_\gamma (\lg N_{G2} - \Delta \lg N) - \lg N_{G2}}{m_{C1}}}. \quad (2.19)$$

## 2.5 Фізичний зміст коефіцієнта відносної довговічності

Коефіцієнт відносної довговічності може бути визначений для деталей, моделей або лабораторних зразків при проведенні порівняльних випробувань на опір втоми. В даній роботі він використовується для порівняльної оцінки втоми міцності відновлених моделей судових гребних валів. Це поняття введено вперше і вимагає окремого аналізу та обґрунтування. Щоб сформулювати його фізичний зміст, визначимо ті його значення, які він може приймати, а також можливі обмеження при його обчисленні. Для цього зобразимо схему можливого взаємного розташування похилих ділянок кривих втоми моделей гребних валів, відновлених за умовними технологіям № 1 і № 2. При цьому розглянемо два можливих варіанти їх порівняльної оцінки. Будемо вважати, що в першому випадку крива втоми моделей, характеристики втоми яких ми хочемо визначити, розташована правіше кривої втоми тих моделей, щодо яких проводиться порівняння. У другому випадку – навпаки. Інакше кажучи, криві втоми моделей які порівнюються і моделей, щодо яких

порівнюють, міняються місцями. Ці варіанти показані пунктирними лініями (рис. 2.15).

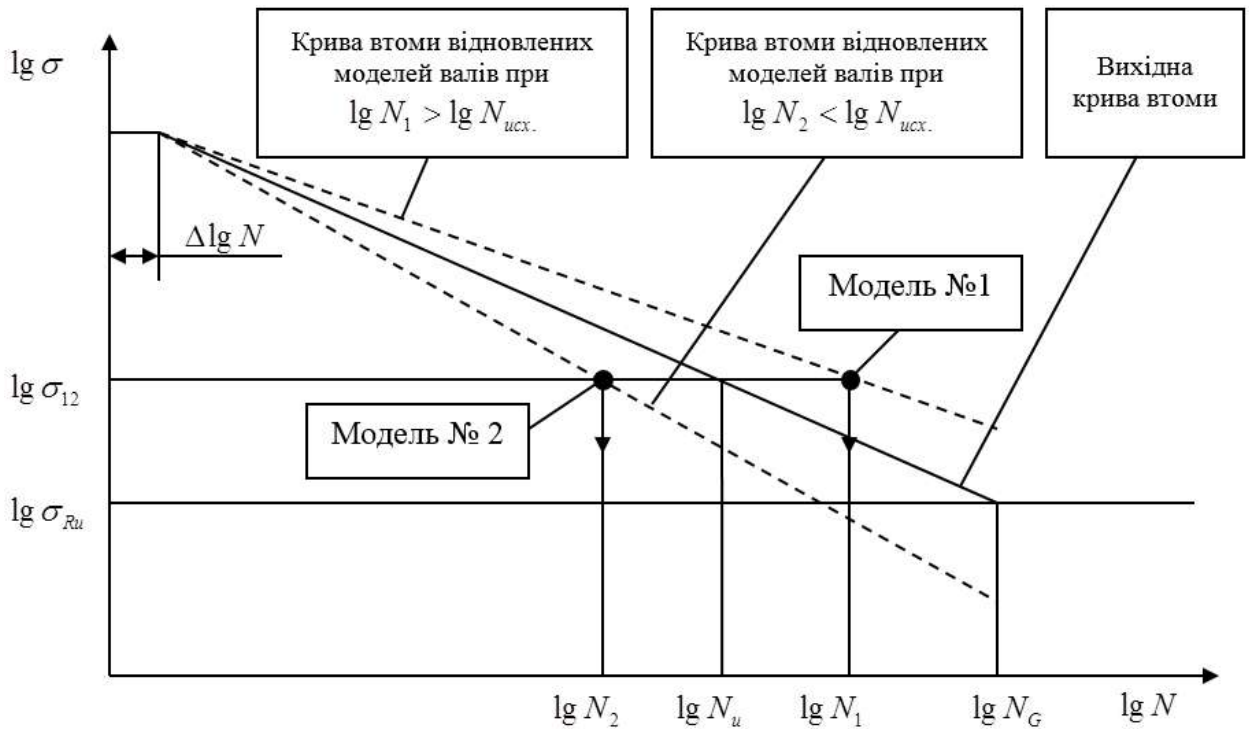


Рисунок 2.15 – Схема можливого взаємного розташування похилих ділянок кривих втоми моделей гребних валів, відновлених за умовними технологіями № 1 і № 2

На підставі формули (2.9) запишемо вирази для визначення коефіцієнта відносної довговічності для моделей № 1 і № 2

$$k_{\gamma} = \frac{\lg N_1 - \lg N_u}{\lg N_u - \Delta \lg N}; \quad (2.20)$$

$$k_{\gamma} = \frac{\lg N_2 - \lg N_u}{\lg N_u - \Delta \lg N}. \quad (2.21)$$

Оскільки,  $\lg N_1 > \lg N_{исх.}$ , а  $\lg N_2 < \lg N_{исх.}$  то значення  $k_{\gamma}$ , знайдене за залежністю (2.20) буде додатним, а за залежністю (2.21) – від'ємним. Таким чином, знак коефіцієнта  $k_{\gamma}$  вказує на те, де розташований результат у вигляді довговічності до руйнування відновленого гребного валу щодо довговічності за початковою кривою втоми на тому ж рівні напружень. Інакше кажучи, якщо

він розташований ліворуч, то втомна міцність відновленого валу буде менше, якщо праворуч – більше.

Межі зміни даного коефіцієнта встановимо, виходячи з того, що  $\lg N_1$  і  $\lg N_2$  можуть змінюватися в інтервалі від 5 до 7, а  $\Delta \lg N$  в граничному випадку становить 2,35 (див. рис. 2.12). Підставляючи ці значення в формули (2.20) і (2.21), отримуємо найбільш імовірний інтервал можливих значень  $k_\gamma = -0,43... + 0,75$ .

Беручи до уваги те, що поняття коефіцієнта відносної довговічності в дисертації введено вперше, йому можна дати наступне визначення:

Коефіцієнт відносної довговічності  $k_\gamma$  є відношенням різниці логарифмів довговічності до руйнування порівнюваних об'єктів  $\lg N_1$  і  $\lg N_2$ , що відповідають одному рівню напружень, до логарифму довговічності тих об'єктів, щодо яких ведеться порівняння з урахуванням поправки  $\Delta \lg N$ , що враховує зміщення точки перетину кривих втоми уздовж осі ординат.

Коефіцієнт відносної довговічності дозволяє: по-перше, проводити порівняння втомної міцності відновлених гребних валів безпосередньо, порівнюючи відповідні значення  $k_\gamma$ ; по-друге, він дозволяє визначати довговічності відновлених гребних валів на будь-якому рівні напружень, включаючи і ті, на яких випробування не проводилися; по-третє, при відсутності загального діапазону напружень у порівнюваних моделях гребних валів він дозволяє знаходити і порівнювати їх границі витривалості.

## 2.6. Висновки за розділом 2

1. В даний час для оцінки характеристик опору втомі доцільно замість традиційних методів використовувати прискорені, які дозволяють істотно скоротити як час проведення випробувань, так і кількість випробовуваних об'єктів (зразків, моделей, натурних деталей). Розвиток цих методів йшов за трьома основними напрямками. По-перше, розроблялися нові схеми



випробувань при плануванні експерименту, по-друге, скорочувалася кількість об'єктів випробувань (в граничному випадку до одного). По-третє, аналізувалася і встановлювалася точність цих методів на основі врахування систематичних і випадкових похибок.

2. Було запропоновано в якості основної характеристики при проведенні порівняльного аналізу нових і відновлених моделей гребних валів замість границі витривалості розглядати довговічність до руйнування, використовуючи коефіцієнт відносної довговічності  $k_\gamma$ .

3. На основі кореляційних залежностей між параметрами похилої ділянки кривої втоми і границею витривалості проведено розрахунок довговічності до руйнування (без конкретизації об'єктів) та їх відносних похибок для степеневого рівняння і рівняння Вейбулла в широкому діапазоні значень  $\sigma_R$ . Розрахунком показано, що навіть при незначній зміні границі витривалості довговічності до руйнування у всьому діапазоні напружень змінюються в рази більше. Іншими словами, довговічність до руйнування, як характеристика опору втомі, більш чутлива, ніж границя витривалості.

4. Розроблено метод прискореного визначення коефіцієнта відносної довговічності для проведення порівняльної оцінки втомної міцності моделей гребних валів. Він дозволяє порівнювати характеристики опору втомі як відновлених моделей з новими, так і відновлених за різними технологіями між собою.

Матеріали розділу представлені в роботах [34, 35, 36, 37, 40, 43, 112].

## РОЗДІЛ 3

### ОЦІНКА ТОЧНОСТІ МЕТОДУ ВИЗНАЧЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ОПОРУ ВТОМІ МОДЕЛЕЙ СУДНОВИХ ГРЕБНИХ ВАЛІВ

#### 3.1 Вплив вибору функції кривої втоми на коефіцієнт відносної довговічності при порівняльних випробуваннях моделей гребних валів

Коефіцієнт відносної довговічності, є безрозмірною величиною, визначається за двома експериментальними результатами, отриманими в ході випробувань моделей гребних валів ( $lg N_1$  і  $lg N_2$ ). Всі викладки, що стосуються визначення цього коефіцієнта і його уточнення, проведені в п. 2.2, передбачають, що похилі ділянки кривих втоми підпорядковані степеневим рівнянням. Між тим, значення  $k_\gamma$  яке визначається за залежністю (2.12) в значній мірі залежить від вибору моделі кривої втоми. На підтвердження цього розглянемо в якості рівнянь похилої ділянки кривої втоми три найбільш поширені моделі: степеневу, показникову, а також Вейбулла, і визначимо відповідні значення коефіцієнта  $k_\gamma$ . Для кожної моделі обчислимо систематичні похибки, скориставшись залежностями між параметрами їх похилих ділянок і границею витривалості. Спочатку розглянемо степеневе рівняння.

За залежностями (2.2), (2.3) і (2.4) розрахуємо спочатку довговічності до руйнування, а потім, за формулою (2.1) – коефіцієнти відносної довговічності  $k_\gamma$ . Розрахунки проведемо для двох значень границі витривалості, які відповідають крайнім границям діапазону, притаманному моделям гребних валів ( $\sigma_R = 100$  МПа і  $\sigma_R = 200$  МПа). Для прийнятих значень визначимо параметри  $m_C$  і  $C_C$  за залежностями (2.2) і (2.3). Задаючись рядом значень напружень, що перевищують границю витривалості, визначимо відповідні їм довговічності (табл. 3.1).

Таблиця 3.1 – Результати розрахунку значень  $\lg N$ ,  $k_\gamma$  і  $\delta_{k_\gamma}$  для степеневого рівняння кривої втоми

$\sigma_R = 100$ МПа; $m_C = 4,10; C_C = 14,42$		$\sigma_R = 110$ МПа; $m_C = 4,37; C_C = 15,18$		$k_\gamma$	$\delta_{k_\gamma}, \%$
$\sigma$ , МПа	$\lg N$	$\sigma$ , МПа	$\lg N$	$\bar{k}_\gamma = 0,031$	
110	6,05	-	-	-	-
120	5,90	120	6,09	0,034	8,68
130	5,75	130	5,94	0,033	6,11
140	5,62	140	5,80	0,032	3,61
150	5,50	150	5,67	0,031	1,184
160	5,38	160	5,55	0,031	-1,190
170	5,28	170	5,43	0,030	-3,52
180	5,17	180	5,32	0,029	-5,80
190	5,08	190	5,22	0,029	-8,04
200	4,99	200	5,12	0,028	-10,25
$\sigma_R = 200$ МПа; $m_C = 6,80; C_C = 22,15$		$\sigma_R = 220$ МПа; $m_C = 7,34; C_C = 23,73$		$k_\gamma$	$\delta_{k_\gamma}, \%$
$\sigma$ , МПа	$\lg N$	$\sigma$ , МПа	$\lg N$	$\bar{k}_\gamma = 0,048$	
210	6,36	-	-	-	-
220	6,22	-	-	-	-
230	6,09	230	6,39	0,0493	2,63
240	5,96	240	6,26	0,0503	4,87
250	5,84	250	6,13	0,0497	3,45
260	5,73	260	6,00	0,0471	-1,83
270	5,62	270	5,88	0,0462	-3,62
280	5,51	280	5,77	0,0472	-1,69
290	5,41	290	5,66	0,0462	-3,73
300	5,31	300	5,55	0,0452	-5,84

У цій таблиці також представлені результати аналогічного розрахунку параметрів кривої втоми і довговічності до руйнування при значеннях границь витривалості, що дорівнюють 110 і 220 МПа (додатне відхилення 10%), а також значення коефіцієнта відносної довговічності і його похибки щодо середнього значення.

Для тих же вихідних даних за аналогією проведемо розрахунок для показникового рівняння і рівняння Вейбулла (1). При цьому показникове рівняння представимо у вигляді

$$10^{\frac{\sigma}{K}} N = 10^{C_{II}}, \quad (3.1)$$

де  $K$  і  $C_{II}$  – параметри.

Параметри цих рівнянь визначимо методом найменших квадратів за наведеними в табл. 3.1 значеннями  $\sigma$  і  $\lg N$  (табл. 3.2 и 3.3).

Таблиця 3.2 – Результати розрахунку значень  $\lg N$ ,  $k_\gamma$  і  $\delta_{k_\gamma}$  для показникового рівняння кривої втоми

$\sigma_R=100$ МПа; $k = 84,64$ МПа; $C_{II}=7,302$		$\sigma_R=110$ МПа; $k = 82,56$ МПа; $C_{II}=7,511$		$k_\gamma$	$\delta_{k_\gamma}, \%$
$\sigma$ , МПа	$\lg N$	$\sigma$ , МПа	$\lg N$		
				$\bar{k}_\gamma=0,030$	
110	6,00	-	-	-	
120	5,88	120	6,06	0,0294	-1,8400
130	5,77	130	5,94	0,0295	-1,5467
140	5,65	140	5,82	0,0296	-1,2467
150	5,53	150	5,69	0,0297	-0,9300
160	5,41	160	5,57	0,0298	-0,6000
170	5,29	170	5,45	0,0299	-0,2567
180	5,18	180	5,33	0,0300	0,1033
190	5,06	190	5,21	0,0301	0,4800
200	4,94	200	5,09	0,0303	0,8733

## Продовження таблиці 3.2

$\sigma_R=200$ МПа; $k = 85,48$ МПа; $C_{II}=8,79$		$\sigma_R=220$ МПа; $k = 82,65$ МПа; $C_{II}=9,16$		$k_\gamma$	$\delta_{k_\gamma}, \%$
$\sigma, \text{МПа}$	$\lg N$	$\sigma, \text{МПа}$	$\lg N$	$\bar{k}_\gamma=0,046$	
210	6,33	-	-	-	-
220	6,22	-	-	-	-
230	6,10	230	6,38	0,0456	-0,96
240	5,98	240	6,26	0,0458	-0,48
250	5,87	250	6,14	0,0460	0,02
260	5,75	260	6,01	0,0462	0,54
270	5,63	270	5,89	0,0465	1,08
280	5,51	280	5,77	0,0468	1,65
290	5,40	290	5,65	0,0470	2,24
300	5,28	300	5,53	0,0473	2,85

Таблиця 3.3 – Результати розрахунку значень  $\lg N$ ,  $k_\gamma$  и  $\delta_{k_\gamma}$  для рівняння кривої втоми Вейбулла

$\sigma_R=100$ МПа; $m_w = 1,15$ ; $C_w = 7,38$		$\sigma_R=110$ МПа; $m_w = 1,09$ ; $C_w = 7,33$		$k_\gamma$	$\delta_{k_\gamma}, \%$
1	2	3	4	5	6
$\sigma, \text{МПа}$	$\lg N$	$\sigma, \text{МПа}$	$\lg N$	$\bar{k}_\gamma=0,032$	
110	6,23	-	-	-	-
120	5,88	120	6,24	0,061	89,18
130	5,68	130	5,91	0,041	26,82
140	5,54	140	5,72	0,033	2,88
150	5,43	150	5,58	0,029	-9,25
160	5,34	160	5,48	0,027	-16,24
170	5,26	170	5,39	0,025	-20,50

Продовження таблиці 3.3

1	2	3	4	5	6
180	5,19	180	5,32	0,025	-23,50
190	5,13	190	5,26	0,024	-25,20
200	5,08	200	5,20	0,024	-26,20
$\sigma_R=200$ МПа; $m_w=1,14; C_w=7,70$		$\sigma_R=220$ МПа; $m_w=0,99; C_w=7,52$		$k_\gamma$	$\delta_{k_\gamma}, \%$
$\sigma, \text{ МПа}$	$\lg N$	$\sigma, \text{ МПа}$	$\lg N$	$\bar{k}_\gamma=0,040$	
210	6,560000	-	-	-	-
220	6,216826	-	-	-	-
230	6,016082	230	6,530000	0,085424	113,56
240	5,873652	240	6,216826	0,058426	46,065
250	5,763174	250	6,016082	0,043883	9,7075
260	5,672908	260	5,873652	0,035386	-11,535
270	5,596588	270	5,763174	0,029766	-25,585
280	5,530477	280	5,672908	0,025754	-35,615
290	5,472163	290	5,596588	0,022738	-43,155
300	5,420000	300	5,530477	0,020383	-49,0425

За даними таблиць 3.1 - 3.3 побудуємо похилі ділянки кривих втоми і визначимо, таким чином, їх взаємне розташування, а також логарифми довговічностей, при яких вони перетинаються (рис. 3.1 - 3.3). Для цього попарно вирішимо відповідні системи рівнянь

$$\begin{cases} 4,10 \lg \sigma + \lg N = 14,42 \\ 4,37 \lg \sigma + \lg N = 15,18 \end{cases}, \begin{cases} 6,80 \lg \sigma + \lg N = 22,15 \\ 7,34 \lg \sigma + \lg N = 23,73 \end{cases};$$

$$\begin{cases} \frac{\sigma}{84,64} + \lg N = 7,30 \\ \frac{\sigma}{82,56} + \lg N = 7,51 \end{cases}, \begin{cases} \frac{\sigma}{85,48} + \lg N = 8,79 \\ \frac{\sigma}{82,65} + \lg N = 9,16 \end{cases};$$

$$\left\{ \begin{array}{l} 1,15 \lg(\sigma - \sigma_R) + \lg N = 7,38 \\ 1,09 \lg(\sigma - \sigma_R) + \lg N = 7,33 \end{array} \right. \left\{ \begin{array}{l} 1,14 \lg(\sigma - \sigma_R) + \lg N = 7,70 \\ 0,99 \lg(\sigma - \sigma_R) + \lg N = 7,52 \end{array} \right.$$

В результаті отримуємо:

- для степеневого рівняння при  $\sigma_R = 100$  МПа  $\lg N_{C100} = 2,88$ , при  $\sigma_R = 200$  МПа  $\lg N_{C200} = 2,25$ ;
- для показникового рівняння при  $\sigma_R = 100$  МПа  $\lg N_{I100} = -0,21$ , при  $\sigma_R = 200$  МПа  $\lg N_{I200} = -0,93$ ;
- для рівняння Вейбулла при  $\sigma_R = 100 = 100$  МПа  $\lg N_{W100} = 6,46$ , при  $\sigma_R = 200$  МПа  $\lg N_{W200} = 6,31$ .

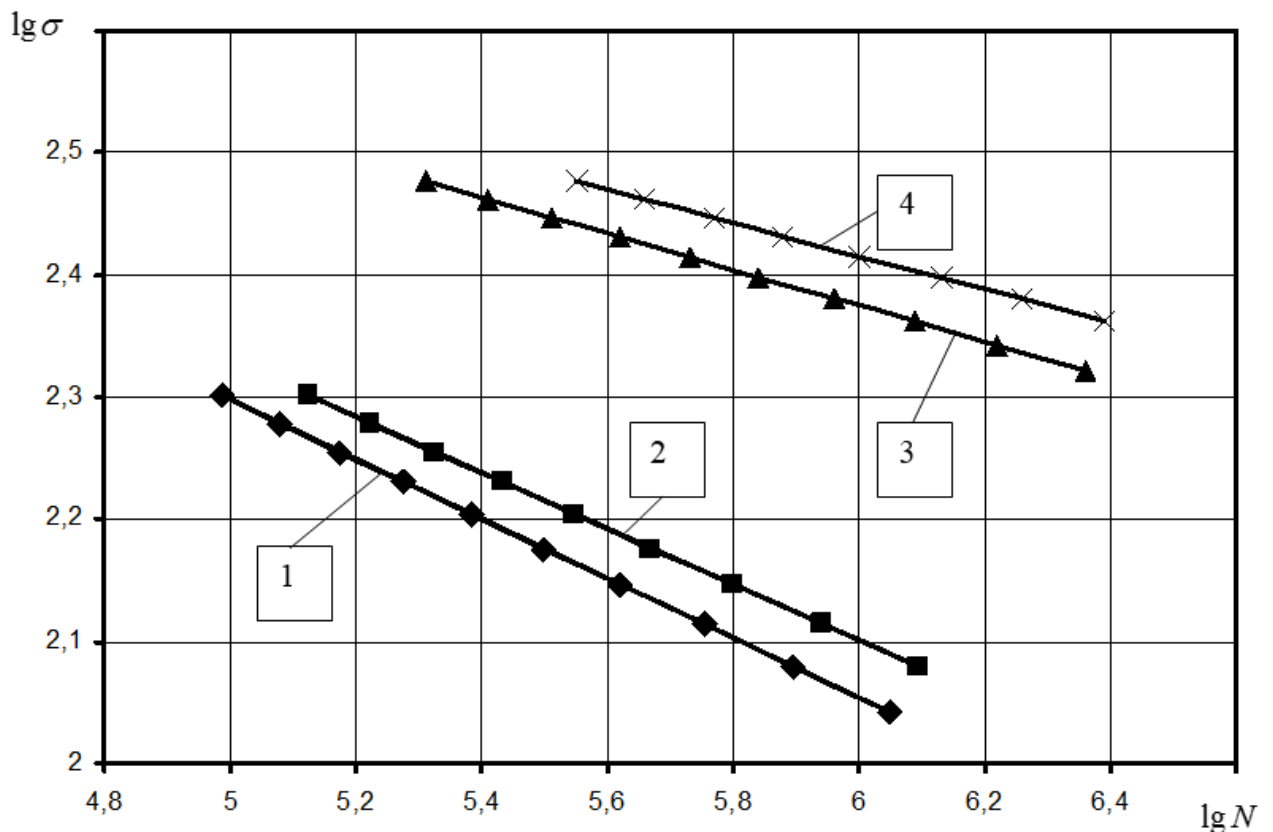


Рисунок 3.1 – Взаємне розташування похилих ділянок кривих втоми підпорядкованих степеневому рівнянню для значень границь витривалості, що дорівнюють: 1 –  $\sigma_R = 100$  МПа; 2 –  $\sigma_R = 110$  МПа; 3 –  $\sigma_R = 200$  МПа; 4 –  $\sigma_R = 220$  МПа;

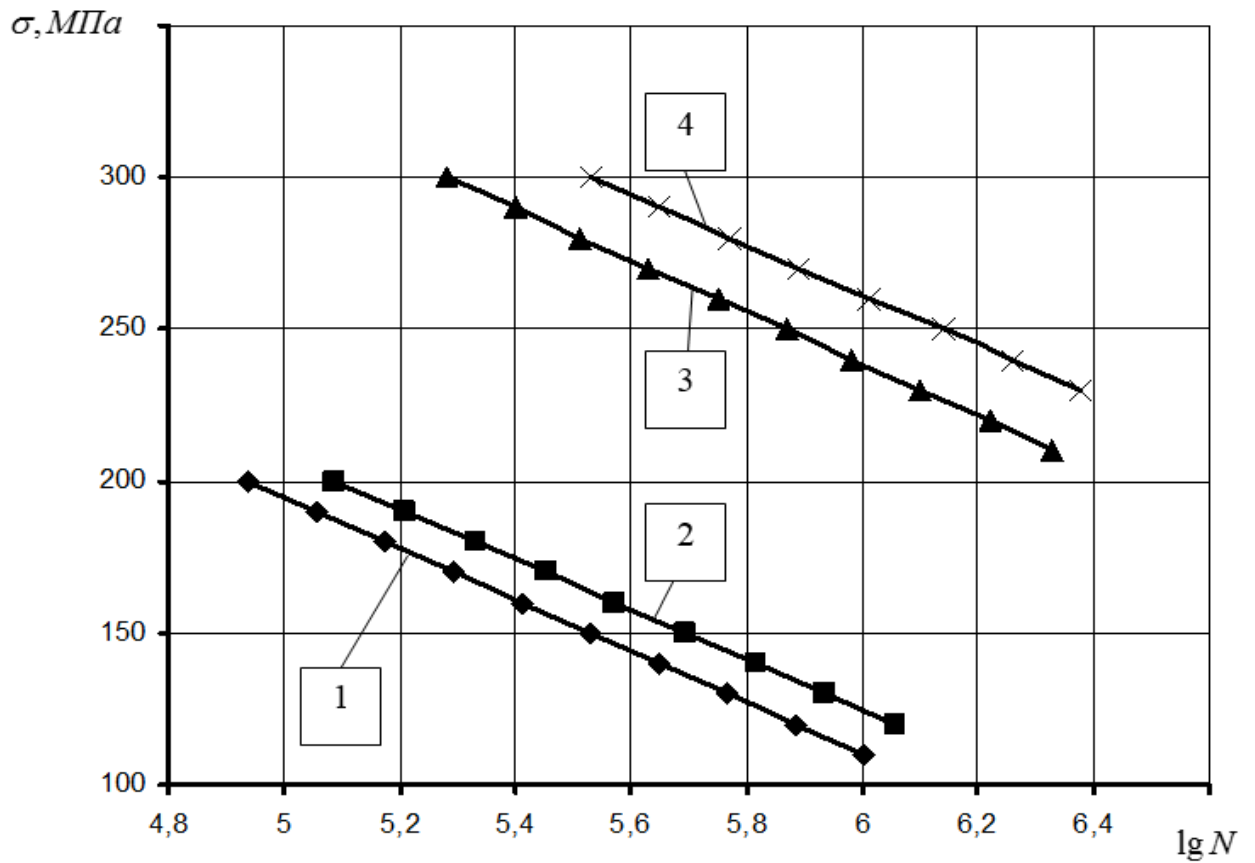


Рисунок 3.2 – Взаємне розташування похилих ділянок кривих втоми підпорядкованих показниковому рівнянню для значень границь витривалості, що дорівнюють:

1 –  $\sigma_R=100$  МПа; 2 –  $\sigma_R=110$  МПа;

3 –  $\sigma_R=200$  МПа; 4 –  $\sigma_R=220$  МПа



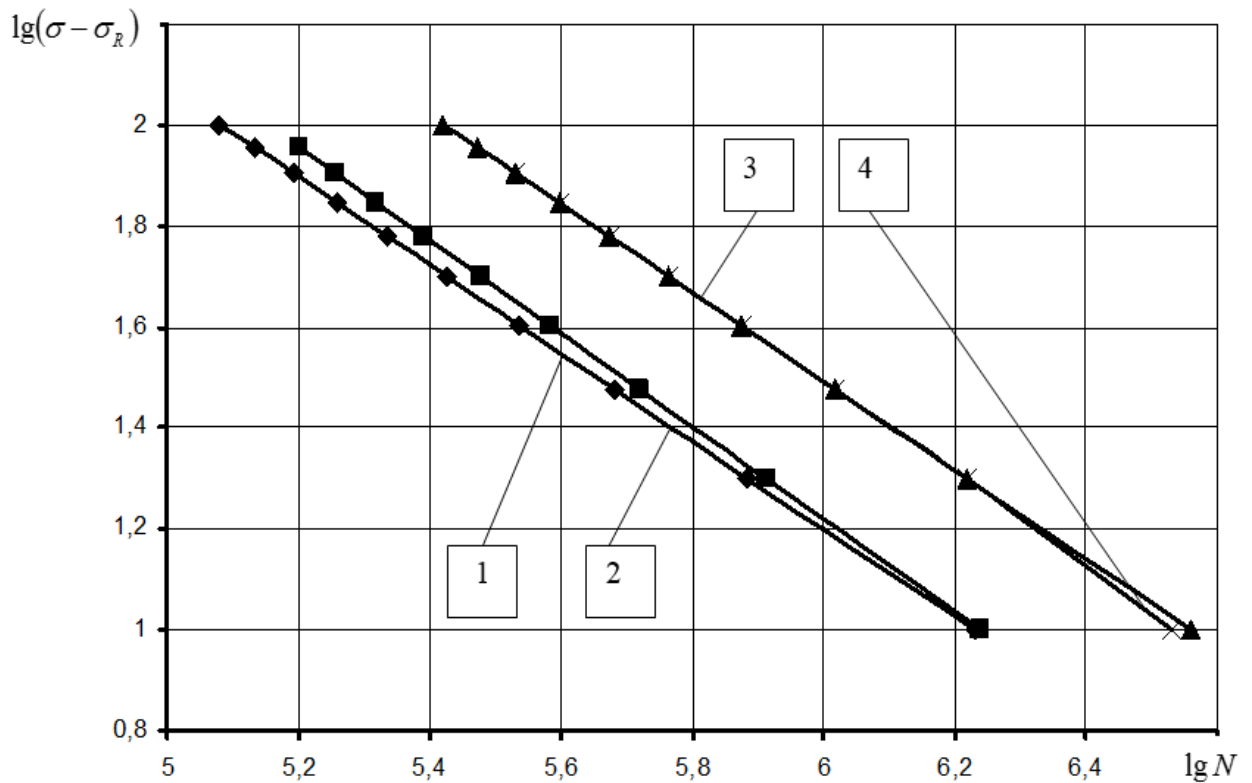


Рисунок 3.3 – Взаємне розташування похилих ділянок кривих втоми підпорядкованих рівнянню Вейбулла для значень границь витривалості, що дорівнюють:

1 –  $\sigma_R=100$  МПа; 2 –  $\sigma_R=110$  МПа;

3 –  $\sigma_R=200$  МПа; 4 –  $\sigma_R=220$  МПа.

Розрахункові значення похибок визначення коефіцієнта відносної довговічності в залежності від рівня напружень для трьох розглянутих рівнянь кривої втоми представлені на рис. 3.4 і 3.5.

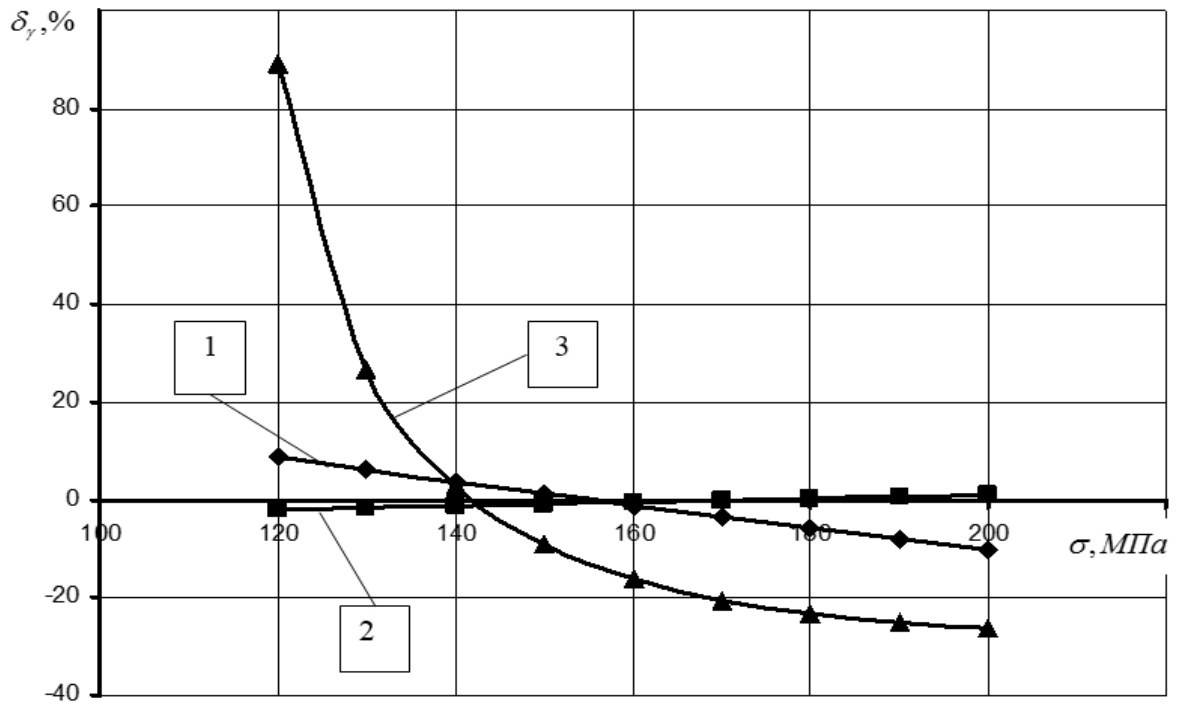


Рисунок 3.4 – Погрішності визначення коефіцієнта відносної довговічності, обумовлені вибором моделі кривої втоми (для значень  $\sigma_R=100$  МПа):  
1 – степеневе рівняння; 2 – показникове рівняння; 3 – рівняння Вейбулла

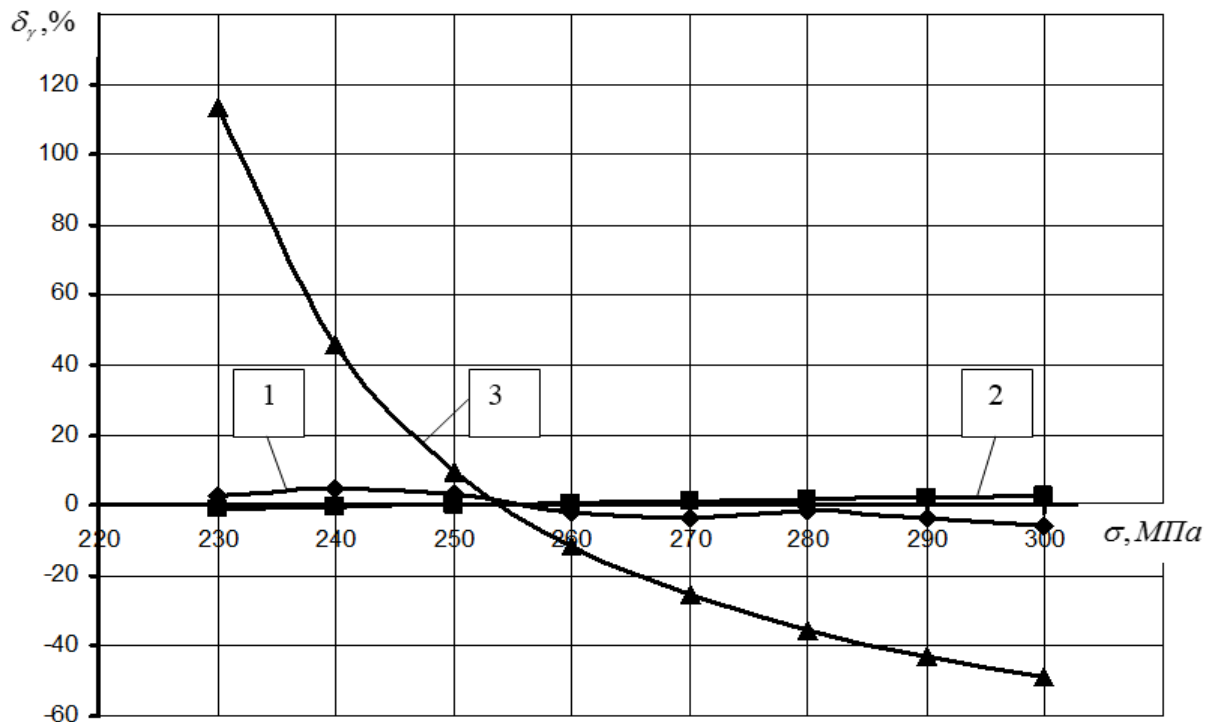


Рисунок 3.5 – Погрішності визначення коефіцієнта відносної довговічності, обумовлені вибором моделі кривої втоми (для значень  $\sigma_R=200$  МПа):  
1 – степеневе рівняння; 2 – показникове рівняння; 3 – рівняння Вейбулла

Наведені на рисунках 3.4 і 3.5 графіки, дозволяють зробити висновок про те, що систематична похибка визначення коефіцієнта відносної довговічності істотно залежить від вибору моделі кривої втоми. Показано, що використання рівняння Вейбулла в якості моделі кривої втоми не тільки призводить до великих погрешностей його визначення, але також ускладнює реалізацію методу, викладеного в п. 2.2. Проблема полягає в тому, що при порівнянні довговічностей до руйнування моделей гребних валів при переході через точку перетину цих кривих змінюється знак коефіцієнта  $k_\gamma$ , що суперечить його фізичному змісту.

Показникове і степеневе рівняння кривої втоми приблизно в рівній мірі можуть бути використані для визначення коефіцієнта  $k_\gamma$ . Перше з них можна навіть вважати кращим, оскільки воно призводить до менших похибок його визначення, і в самому гіршому випадку не перевищує 3 %.

### **3.2. Оцінка систематичної похибки визначення коефіцієнта відносної довговічності, пов'язаної з рівнем напружень і циклічною міцністю моделей гребних валів**

Поряд з видом моделі кривої втоми на систематичну похибку визначення коефіцієнта  $k_\gamma$  можуть впливати також рівень міцності об'єктів, що характеризується в даному випадку границею витривалості, і рівень напружень при випробуваннях стаціонарним навантаженням

Для проведення дослідження приймемо в якості моделі кривої втоми степеневе рівняння, а також будемо використовувати кореляційні залежності між параметрами похилої ділянки кривої втоми  $m$  і  $C$  від границі витривалості  $\sigma_R$  (2.2) – (2.3). Для повної картини розглянемо весь реальний діапазон зміни границі витривалості (100 – 500 МПа). Для цього діапазону значень  $\sigma_R$  визначимо за допомогою формули (2.1) коефіцієнт  $k_\gamma$  в залежності від рівня напружень  $\sigma$ . Будемо також вважати, що максимальне відхилення

границь витривалості порівнюваних валів не перевищує 20 МПа для всіх прийнятих значень  $\sigma_R$  (табл. 3.4 – 3.8).

Таблиця 3.4 – Розрахунки значень  $\lg N$ ,  $k_\gamma$  і  $\delta_{k_\gamma}$  при  $\sigma_R = 100$  МПа

$\sigma_R = 100$ МПа; $m_C = 4,10; C_C = 14,29$		$\sigma_R = 120$ МПа; $m_C = 4,64; C_C = 15,78$		$k_\gamma$	$\delta_{k_\gamma}, \%$
$\sigma$ , МПа	$\lg N$	$\sigma$ , МПа	$\lg N$	$\bar{k}_\gamma = 0,056$	$ \bar{\delta}_{k_\gamma}  = 5,6$
130	5,62	130	5,97	0,062	11,2
140	5,49	140	5,82	0,060	7,3
150	5,37	150	5,68	0,058	3,1
160	5,25	160	5,55	0,057	2,0
170	5,15	170	5,43	0,054	-2,9
180	5,04	180	5,32	0,056	0
190	4,95	190	5,21	0,053	-6,2
200	4,86	200	5,10	0,049	-11,8

Таблиця 3.5 – Розрахунки значень  $\lg N$ ,  $k_\gamma$  і  $\delta_{k_\gamma}$  при  $\sigma_R = 200$  МПа

$\sigma_R = 200$ МПа; $m_C = 6,80; C_C = 22,15$		$\sigma_R = 220$ МПа; $m_C = 7,34; C_C = 23,73$		$k_\gamma$	$\delta_{k_\gamma}, \%$
$\sigma$ , МПа	$\lg N$	$\sigma$ , МПа	$\lg N$	$\bar{k}_\gamma = 0,048$	$ \bar{\delta}_{k_\gamma}  = 3,0$
230	6,09	230	6,39	0,0493	2,6
240	5,96	240	6,26	0,0503	4,9
250	5,84	250	6,13	0,0497	3,5
260	5,73	260	6,00	0,0471	-1,8
270	5,62	270	5,88	0,0462	-3,6
280	5,51	280	5,77	0,0472	-1,7
290	5,41	290	5,66	0,0462	-3,7
300	5,31	300	5,55	0,0452	-5,8

Таблиця 3.6 – Розрахунки значень  $lg N$ ,  $k_\gamma$  і  $\delta_{k_\gamma}$  при  $\sigma_R = 300$  МПа

$\sigma_R = 300$ МПа; $m_C = 9,50; C = 29,93$		$\sigma_R = 320$ МПа; $m_C = 10,04; C_C = 31,57$		$k_\gamma$	$\delta_{k_\gamma}, \%$
$\sigma$ , МПа	$lg N$	$\sigma$ , МПа	$lg N$	$\bar{k}_\gamma = 0,046$	$ \bar{\delta}_{k_\gamma}  = 0,6$
330	6,00	330	6,28	0,047	1,4
340	5,88	340	6,15	0,046	0
350	5,76	350	6,03	0,046	0
360	5,65	360	5,90	0,046	0
370	5,53	370	5,79	0,046	0
380	5,42	380	5,67	0,046	0
390	5,31	390	5,56	0,045	-1,5
400	5,21	400	5,45	0,045	-2,0

Таблиця 3.7 – Розрахунки значень  $lg N$ ,  $k_\gamma$  і  $\delta_{k_\gamma}$  при  $\sigma_R = 400$  МПа

$\sigma_R = 400$ МПа; $m_C = 12,20; C = 38,25$		$\sigma_R = 420$ МПа; $m_C = 12,74; C_C = 39,94$		$k_\gamma$	$\delta_{k_\gamma}, \%$
$\sigma$ , МПа	$lg N$	$\sigma$ , МПа	$lg N$	$\bar{k}_\gamma = 0,044$	$ \bar{\delta}_{k_\gamma}  = 0$
430	6,12	430	6,39	0,044	0
440	6,00	440	6,26	0,044	0
450	5,88	450	6,14	0,044	0
460	5,76	460	6,02	0,044	0
470	5,65	470	5,90	0,044	0
480	5,54	480	5,78	0,044	0
490	5,43	490	5,67	0,044	0
500	5,32	500	5,56	0,044	0

Таблиця 3.8 – Розрахунки значень  $\lg N$ ,  $k_\gamma$  і  $\delta_{k_\gamma}$  при  $\sigma_R = 500$  МПа

$\sigma_R=500$ МПа; $m_C=14,90; C=46,80$		$\sigma_R=520$ МПа; $m_C=15,44; C_C=48,54$		$k_\gamma$	$\delta_{k_\gamma}, \%$
$\sigma, \text{МПа}$	$\lg N$	$\sigma, \text{МПа}$	$\lg N$	$\bar{k}_\gamma=0,044$	$ \bar{\delta}_{k_\gamma} =0,3$
530	6,21	530	6,48	0,043	-2,3
540	6,09	540	6,35	0,043	-2,3
550	5,97	550	6,23	0,044	0
560	5,85	560	6,11	0,044	0
570	5,74	570	5,99	0,044	0
580	5,62	580	5,87	0,044	0
590	5,51	590	5,76	0,045	2,3
600	5,41	600	5,65	0,044	0

Отримані результати представлені на рис. 3.6, 3.7.

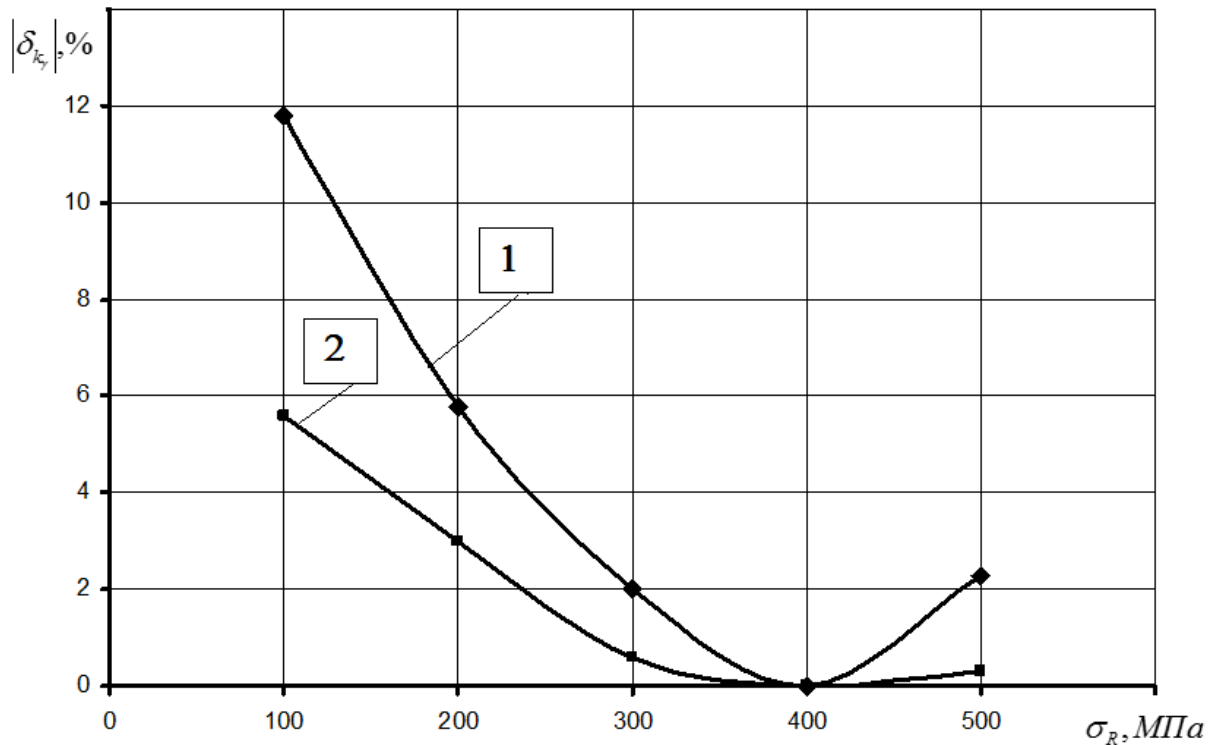


Рисунок 3.6 – Залежність модуля максимальної (крива 1) і середньої (крива 2) похибки коефіцієнта відносної довговічності  $k_\gamma$  від рівня міцності об'єктів  $\sigma_R$

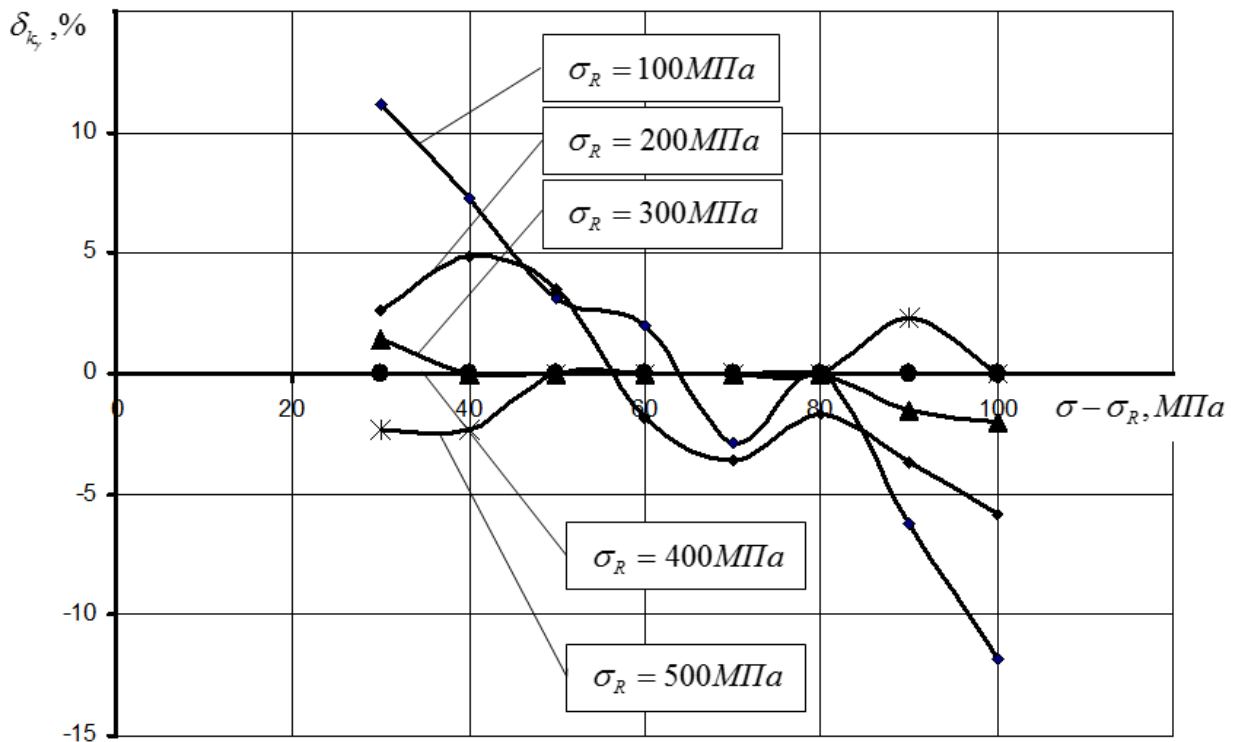


Рисунок 3.7 – Залежності похибки визначення коефіцієнта  $k_\gamma$  від різниці напружень  $\sigma - \sigma_R$  для значень границі витривалості 100, 200, 300, 400, 500 МПа

За результатами розрахунків на рис. 3.6 і 3.7 показані залежності модуля максимальної і середньої похибки коефіцієнта відносної довговічності  $k_\gamma$  від циклічної міцності об'єктів (в даному випадку від границі витривалості), а також відносні відхилення цього коефіцієнта в залежності від різниці напружень  $\sigma - \sigma_R$  для прийнятого інтервалу значень границі витривалості.

Дослідження показали, що похибка визначення коефіцієнта відносної довговічності  $k_\gamma$  має тенденцію до зменшення зі збільшенням границі витривалості до 400 МПа, а потім незначно зростає. Максимальне її значення не перевищує 12 % і відповідає найнижчому з прийнятих значень границі витривалості. Залежно від різниці напружень  $\sigma - \sigma_R$  похибка цього коефіцієнта змінюється стрибкоподібно, приймаючи як додатні, так і від'ємні значення. При цьому максимальні значення коефіцієнта відносної довговічності  $k_\gamma$

відповідають межах інтервалу  $\sigma - \sigma_R$ . У середній же частині цього інтервалу його величина не перевищує 5 %.

Якщо взяти до уваги, що границі витривалості відновлених гребних валів, як було зазначено вище, знаходяться в обмеженому інтервалі напружень (100 – 200 МПа), то можна конкретизувати отримані результати. Зокрема, можна констатувати, що похибки  $\delta_{k_\gamma}$  для цього діапазону значень напружень не опускаються нижче 3% і 6% відповідно для максимальних і середніх значень коефіцієнта  $k_\gamma$ .

### 3.3 Оцінка випадкової похибки визначення коефіцієнта відносної довговічності

Випадкова похибка оцінки коефіцієнта відносної довговічності, як видно з формули (2.1) обумовлена розсіюванням довговічності до руйнування. Це дозволяє оцінити його похибку опосередковано, за величинами  $N$ , узятим з експерименту. При цьому слід мати на увазі, що її необхідно визначати як для моделей гребних валів, втомну міцність яких оцінюють, так і для моделей щодо яких здійснюють порівняння. Для вирішення цього завдання скористаємося залежністю, яка пов'язує кількість об'єктів з похибкою оцінки дисперсії довговічності до руйнування [92].

$$n = 1,5 + \frac{z_{1-\alpha/2}^2}{2\Delta_N^2}, \quad (3.1)$$

де  $z_{1-\alpha/2}$  – квантиль рівня значущості  $\alpha$ ;  $\Delta_N$  – максимальна відносна похибка, яка приймається як допуск оцінки відхилення довговічності до руйнування.

Значення  $\Delta_N$  залежить від вимог до точності оцінки довговічності до руйнування  $N$ . Для низької точності його приймають рівним  $\Delta_N = 0,4 \dots 0,5$ ; для середньої –  $\Delta_N = 0,25 \dots 0,35$ ; для високої точності –  $\Delta_N = 0,1 \dots 0,2$  [92]. Залежність мінімальної кількості об'єктів від величини  $\Delta_N$  при рівні



значущості  $\alpha = 0,1$ , розрахована за допомогою залежності 3.1, представлена на рис. 3.8 [28].

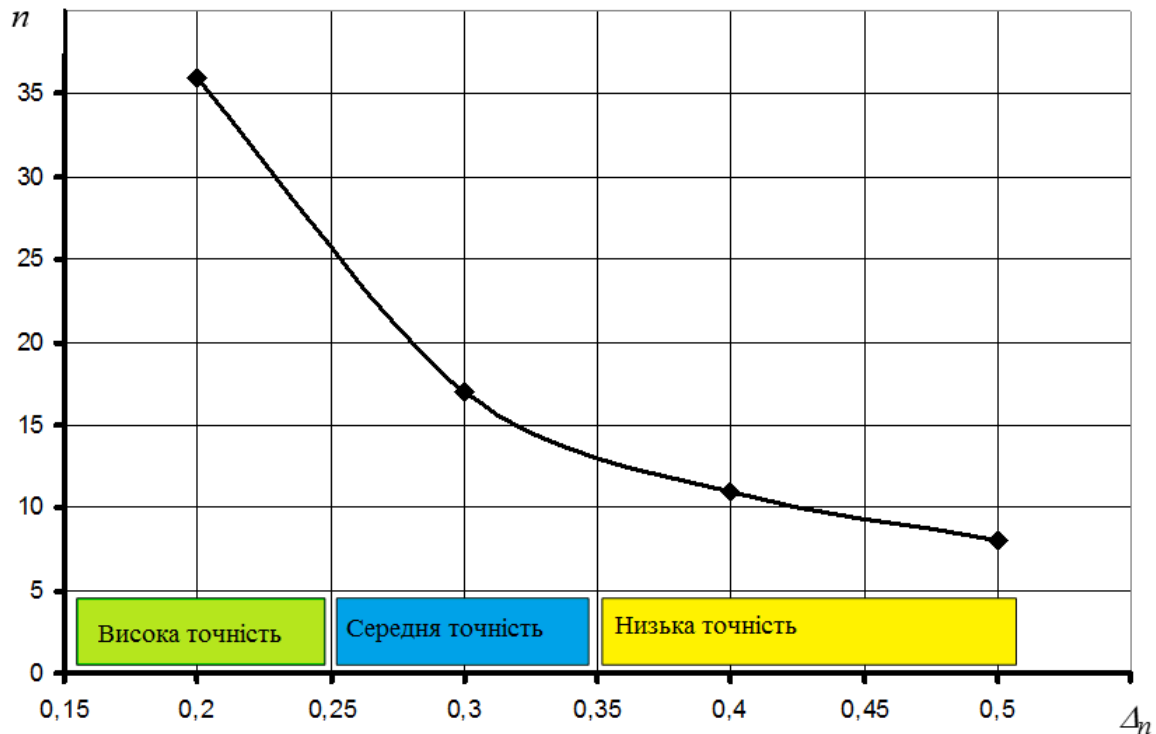


Рисунок 3.8 – Залежність необхідної для випробувань кількості моделей гребних валів  $n$  від максимальної відносної похибки, прийнятої в якості допуску оцінки середнього квадратичного відхилення довговічності до руйнування  $\Delta_N$

Для побудови вихідної кривої втомі необхідно випробувати до руйнування по 4 - 5 моделей на кожному з 4 - 5 рівнів напружень. В цьому випадку для досягнення низької, середньої і високої точності оцінки довговічності до руйнування, необхідно випробувати відповідно 8, 17 і 36 об'єктів.

Кількість моделей гребних валів, втомну міцність яких необхідно оцінити, в граничному випадку дорівнює одній. При статистичній оцінці їх кількість можна визначити за допомогою рис. 3.8. Зокрема, для досягнення низької, середньої і високої точності оцінки довговічності до руйнування, необхідно випробувати відповідно 32 - 40, 68 - 85 і 140 - 175 об'єктів.

### 3.4 Висновки за розділом 3

1. Основний вплив на величину коефіцієнта відносної довговічності надає вибір рівняння кривої втоми. Дослідження, проведені за допомогою кореляційних зв'язків між параметрами похилої ділянки кривої втоми і границею витривалості, показали, що степеневе і показникове рівняння приблизно в рівній мірі можуть бути використані для визначення даного коефіцієнта. Використання рівняння Вейбулла призводить до значних похибок оцінки  $k_\gamma$  і, крім того, вносить протиріччя в запропонований метод порівняльної оцінки втомної міцності моделей відновлених суднових гребних валів.

2. На величину коефіцієнта відносної довговічності впливає вибір рівня напружень, іншими словами, різниця величин  $\sigma - \sigma_R$ . Цей фактор впливає на величину  $k_\gamma$  в значно меншій мірі, ніж перший, проте він вносить свою частину в загальну похибку методу оцінки характеристик опору втоми і повинен враховуватися.

3. Випадкова похибка методу пов'язана з кількістю випробуваних моделей гребних валів і може регулюватися в залежності від необхідної точності отримання результату. При цьому висока, середня або низька точність оцінки величини  $k_\gamma$  повинна вибиратися однаковою для моделей за результатами випробувань яких будується вихідна крива втоми, і моделей, характеристики опору втоми яких необхідно оцінити.

Матеріали розділу представлені в роботах [30, 37, 38, 40, 41].

## РОЗДІЛ 4

### ПЕРЕВІРКА РОЗРОБЛЕНОГО МЕТОДУ ОЦІНКИ ХАРАКТЕРИСТИК ОПОРУ ВТОМІ ВІДНОВЛЕНИХ СУДНОВИХ ГРЕБНИХ ВАЛІВ

#### 4.1 Перевірка розробленого методу на зразках з різними теоретичними коефіцієнтами концентрації напружень

Перевірку розробленого методу оцінки характеристик опору втомі спочатку проведемо на зразках, конструктивні форми яких представлені на рис. 4.1 [28]. Необхідність перевірки методу саме на зразках продиктована тим, що при їх виготовленні дуже жорстко витримують технологію виготовлення. Це істотно знижує розсіювання експериментальних результатів і дає можливість максимально виключити випадкову складову похибки методу. Зразки на відміну від моделей гребних валів виготовлялися без наплавлення. Такий підхід допустимий і виправданий, оскільки, по-перше, він дає можливість оцінити точність запропонованого методу при мінімальних матеріальних витратах і, по-друге, дозволяє перенести результати експерименту на відновлені гребні вали.

Для виготовлення зразків бралися прутки однієї плавки. Заготовки піддавалися термообробці згідно з режимами, наведеними в роботі [13]. Остаточною операцією було шліфування, при якому глибина і швидкість різання витримувалися мінімальними. Завдяки цьому забезпечувалася ідентичність виготовлення кожної партії зразків.

Зразки без концентратора напружень в робочій частині мали форму тора, а зразки з концентратом напружень – кільцеву виточку. Теоретичний коефіцієнт концентрації напружень визначався за залежністю Г. Нейбера

$$\alpha_{\sigma} = 1 + (\alpha_f - 1)(\alpha_t - 1) / \sqrt{(\alpha_f - 1)^2 + (\alpha_t - 1)^2}, \quad (4.1)$$

$$\text{де } \alpha_f = 1 = 2\sqrt{t/\rho} \quad \text{і} \quad \alpha_t = \frac{3(1 + \sqrt{a/\rho + 1})(3a/\rho + 4,3 - 0,4\sqrt{a/\rho + 1})}{4[3(a/\rho + 1) + 2,2\sqrt{a/\rho + 1} + 1,3/(1 + \sqrt{a/\rho + 1})]}$$

теоретичні коефіцієнти концентрації напружень при згині циліндричних зразків з дрібною і глибокою кільцевими виточками відповідно;  $t$  – глибина надрізу;  $a = 0,5d$  – половина діаметру робочого перетину. У поздовжньому перетині кільцевої виточки зразки з концентраторами напружень мали  $v$  – подібний профіль, еквівалентний гіперболічному з різними кутами розкриття  $\omega$  і радіусами заокруглень на дні виточки  $R$ . Співвідношення  $R/\rho$  приймалося постійним для всіх зразків ( $R/\rho = 1,05$ ).

Кути розкриття концентратора напружень визначалися за формулою

$$\omega = \arcsin \frac{\sqrt{E^2 + (E^2 + F)(F - 1)} - E}{E^2 + F}, \quad (4.2)$$

де  $E = t/R - 1$ ;  $F = \rho t(2a + t)/aR^2$ .

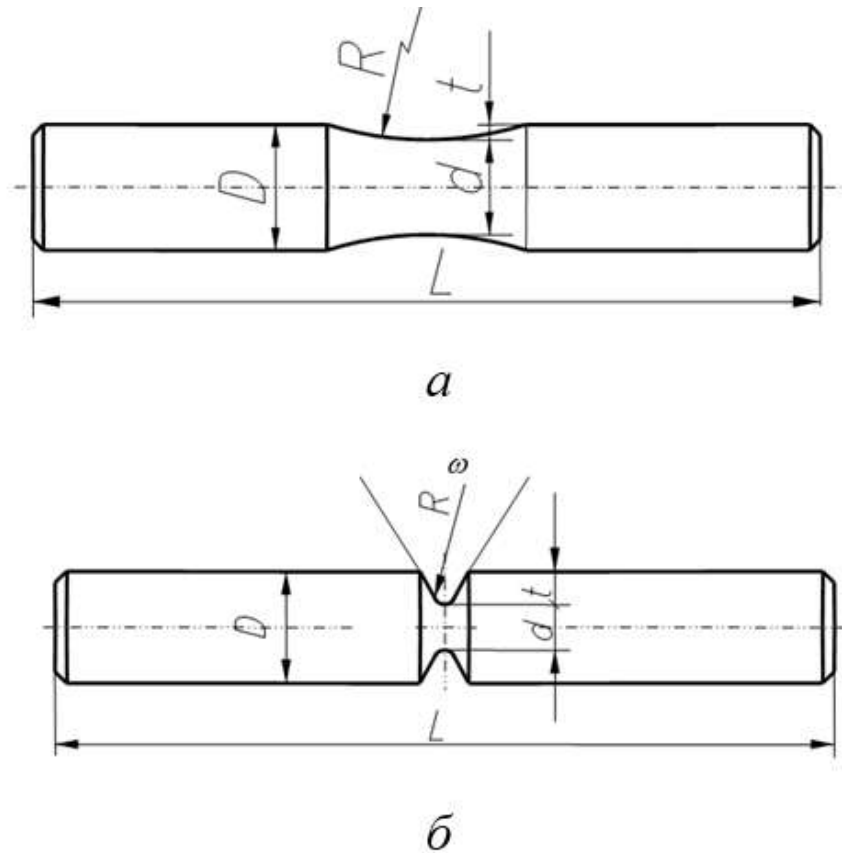


Рисунок 4.1 – Конструкції зразків: а – гладкий зразок; б – зразок з надрізом

Контроль форми виточки здійснювали за допомогою інструментального мікроскопу, що забезпечувало необхідну точність (допустиме відхилення розмірів не перевищувало 5 мкм.). Групування зразків по партіях здійснювалася за твердістю таким чином, щоб відхилення не перевищували  $\pm 2HRB$ . Всього було сформовано 4 партії зразків, параметри яких наведені в табл. 4.1 [72].

Таблиця 4.1 – Групування зразків по партіях

Тип зразка	Форма робочої частини	Розміри, мм					$\omega$
		L	D	d	t	R	
I	гладкий	130	18	10	4	30	-
III	гладкий	130	18	15	1,5	75	-
IV	з надрізом	130	18	15	1,5	0,3	55°28'
V	з надрізом	226	12	7,5	2,25	1,0	80°08'

#### 4.1.1 Планування об'єму експерименту

Для реалізації розробленого методу визначення характеристик опору втомі проводять випробування в два етапи. Спочатку випробовують дві партії ідентичних зразків для побудови горизонтальної і похилої ділянок вихідної кривої втоми, а потім – деяку їх кількість для проведення порівняльного аналізу на основі коефіцієнта відносної довговічності. При цьому вважають, що ті і інші зразки мають однакові геометричні характеристики, вони виготовлені за єдиною технологією і з одного матеріалу. Однак їх границі витривалості можуть бути різні, наприклад, з причини неоднакової твердості поверхні. Переносячи ці міркування на відновлені гребні вали, можна сказати, що в цьому випадку необхідно випробувати при стаціонарному навантаженні дві партії моделей цих валів, відновлених за різними технологіями. Можна

також прийняти, що одні моделі виготовлені без відновлення, а другі – відновлені.

Визначимо кількість зразків, які необхідно випробувати для забезпечення необхідної точності і статистичної надійності отримання результату. Для цього скористаємося рекомендаціями, викладеними в роботі [92]. Кількість зразків, необхідних для забезпечення заданої точності визначимо в припущенні нормального закону розподілу за формулою

$$n = V_N^2 U_{1-\alpha/2}^2 / \Delta_N^2, \quad (4.3)$$

де  $\Delta_N$  – відносна похибка, яка приймається як допуск оцінки середнього значення довговічності до руйнування;  $U_{1-\alpha/2}$  – квантиль рівня ймовірності  $P$ , іншими словами це статистична надійність, що представляє собою ймовірність неперевищення фактичної похибки при оцінці середнього значення довговічності до руйнування допуску  $\Delta_N$ ;  $\alpha$  – рівень значущості.

Задаємося значеннями  $V_N$ ,  $\Delta_N$  і  $\alpha$ , прийнявши їх за рекомендаціями [92], відповідно рівними 0,02; 0,02 і 0,05, визначимо за формулою (4.3) необхідну кількість зразків ( $n=4$ ). Враховуючи те, що кількість рівнів напружень зазвичай приймають рівним 4 - 5 [91], то загальна кількість зразків, необхідна для побудови похилої ділянки кривої втоми складе 16 – 20 штук.

Границі витривалості зразків визначали методом «вгору – вниз» [91]. Обсяг експерименту, необхідний для реалізації даного методу визначали з урахуванням наступних формул [91]

$$\delta_{\sigma_R} = \frac{S_{\sigma_R}}{\sqrt{L}} G; \quad (4.4)$$

де  $\delta_{\sigma_R}$  – середня квадратична похибка оцінки границі витривалості (зазвичай приймають  $\delta_{\sigma_R} = (0,25...0,35)S_{\sigma_R}$  [91]);  $S_{\sigma_R}$  – середньоквадратичне відхилення границі витривалості;  $L$  – кількість зруйнованих (незруйнованих) зразків;  $G$  і  $H$  – деякі функції, що залежать від відношення  $d/S_{\sigma_R}$  (де  $d$  – різниця між найближчими рівнями напружень при випробуваннях за методом «вгору – вниз»). Задаючись відношенням  $d/S_{\sigma_R} = 1,0$ , по табл. 6.17 [91]

знаходимо для  $B = 0,5$ ,  $G = 1,004$  і  $H = 1,385$ . Підставляючи ці значення в формулу (4.4), і враховуючи, що  $n \approx 2L$ , знаходимо необхідну кількість об'єктів для визначення середньомовірного значення границі витривалості з урахуванням формули 4.4 дорівнюватиме

$$n = 2L = \frac{2S_{\sigma_R}^2 G^2}{\delta_{\sigma_R} S_{\sigma_R}^2} = \frac{2(1,004)^2}{0,35^2} = 16$$

При проведенні експерименту кількість об'єктів приймали в середньому 15 - 20 штук.

#### **4.1.2 Експериментальна установка і методика проведення випробувань**

Випробування зразків на опір втомі при стаціонарному навантаженні проводились на випробувальній установці, схема якої приведена на рис. 4.2.

Зразок 3 закріплювався своїми кінцями в патрони двох шпинделів 2, які, обертаючись від електродвигуна 1, можуть одночасно повертатися щодо опор 4. Навантажування зразка здійснюється шляхом підвішування тягарців 8 на важіль 7 з шарнірною опорою 6. Вага тягарців передається через систему важелів (з мінімальним тертям в шарнірах) на обертову систему, створюючи в зразку необхідні напруження. Регулювання навантаження досягається зміною ваги тягарців або їх положення на важелі 7. Частота навантаження становить 3000 циклів/хв. Цикли напружень в кожній точці робочої частини зразка синусоїдальні. Схема передачі зусилля характеризується тим, що заданою величиною є навантаження, яке не залежить від жорсткості зразка і від його зміни в період розвитку втомної тріщини (м'яке навантаження). Випробування зразка вважалось закінченим після його руйнування і спрацьовуванні кінцевого вимикача. Кількість циклів до руйнування фіксувалася лічильником.

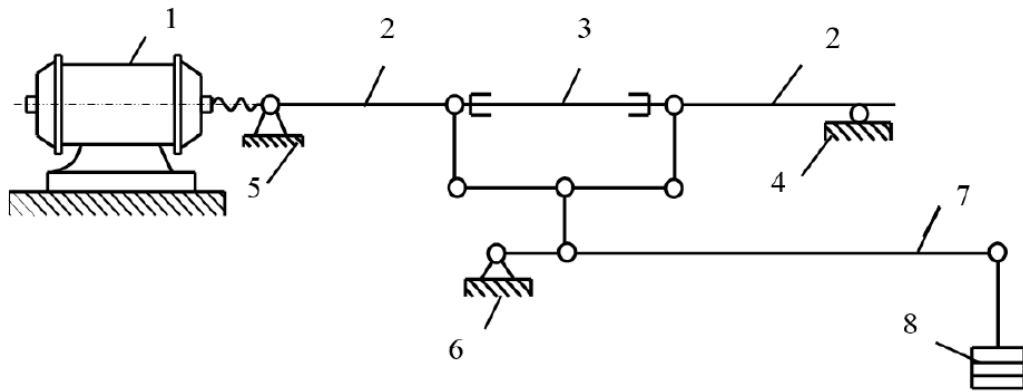


Рисунок 4.2 – Кінематична схема установки для випробувань на опір втоми при симетричному згині обертових зразків

Для побудови горизонтальної ділянки кривої втоми (з метою визначення границі витривалості) використовували метод «вгору – вниз» [91]. Відповідно до даного методу випробування проводили на кількох рівнях напружень, при цьому перший зразок випробовували при напруженнях, близьких до очікуваної границі витривалості. За базове число циклів брали довговічність, рівну  $10^7$  циклів. Якщо зразок при цій базі не руйнувався, то для наступного зразка навантаження підвищували на 5 – 10 МПа відповідно до рекомендацій, наведених в роботі [91]. Якщо ж зразок руйнувався, то рівень напружень знижували на таку саму величину. Для кожної партії об'єктів визначали загальну кількість руйнувань і незруйнувань. Середньомовірне значення границі витривалості визначали за залежністю

$$\sigma_R = \sigma_0 + d \left( \frac{\sum_{i=1}^p i^2 n_i}{L} \pm 0,5 \right), \quad (4.5)$$

де  $\sigma_0$  – мінімальний з рівнів напружень;  $p$  – кількість рівнів напружень;  $i$  – порядковий номер рівня напружень;  $n$  – кількість зразків, які зруйнувалися (не зруйнувалися) на кожному з рівнів напружень. Величини  $L$  і  $d$  – обумовлені вище.



Знак «+» у формулі (4.5) ставили в разі, коли число руйнувань перевищувало число незруйнувань і навпаки.

Похилі ділянки кривих втоми будували в логарифмічних координатах, використовуючи метод найменших квадратів. Результати випробувань за методом «вгору – вниз» представлені в табл. 4.2 і показані на рис. 4.3

Таблиця 4.2 – Результати випробувань зразків за методом «вгору – вниз» [72]

№ зраз.	$\sigma$ , МПа	$N \cdot 10^{-3}$ , цикл.	№ зраз.	$\sigma$ , МПа	$N \cdot 10^{-3}$ , цикл.	№ зраз.	$\sigma$ , МПа	$N \cdot 10^{-3}$ , цикл.
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Сталь 45								
Зразки I типу								
1	245	4503	11	255	2396	21	245	10000*
2	240	10000*	12	250	10000*	22	250	10000*
3	245	10000*	13	255	10000*	23	255	1809
4	250	10000*	14	260	1834	24	250	1215
5	255	1000	15	255	10000*	25	245	10000*
6	250	1155	16	250	1020	26	250	10000*
7	245	10000*	17	255	2716	27	255	866
8	250	10000*	18	250	1069	28	250	2109
9	255	1590	19	245	2141	29	245	1206
10	250	10000*	20	240	10000*	30	240	10000*
Зразки II типу								
1	190	10000*	11	200	10000*	21	190	10000*
2	195	10000*	12	205	10000*	22	195	10000*
3	200	10000*	13	210	10000*	23	200	10000*
4	205	10000*	14	215	10000*	24	205	10000*
5	210	1800	15	220	996	25	210	982

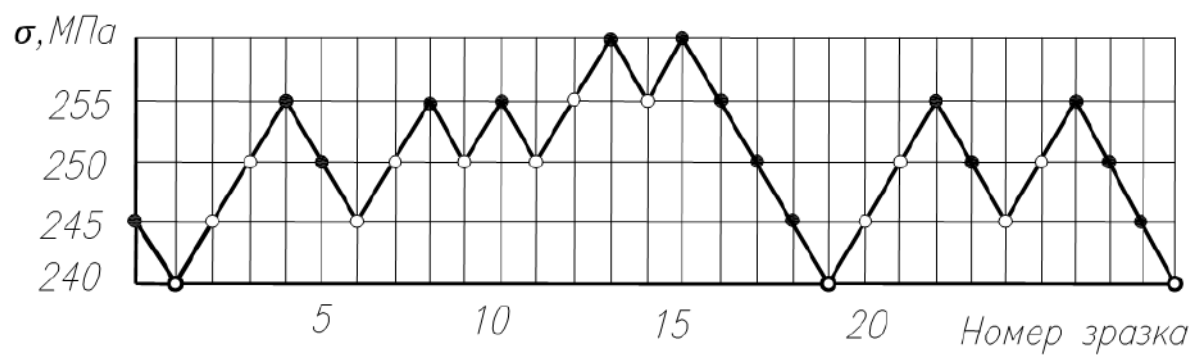
Продовження таблиці 4.2

1	2	3	4	5	6	7	8	9
6	205	1420	16	215	703	26	205	1341
7	200	1710	17	210	2105	27	200	10000*
8	195	2431	18	205	1730	28	205	10000*
9	190	10000*	19	200	1803	29	210	3062
10	195	10000*	20	195	2306	30	205	2310
Зразки IV типу								
1	130	10000*	11	150	10000*	21	150	3241
2	140	10000*	12	160	3427	22	140	10000*
3	150	5124	13	150	10000*	23	150	2936
4	140	10000*	14	160	4224	24	140	3693
5	150	3783	15	150	2470	25	130	10000*
6	140	10000*	16	140	3261	26	140	10000*
7	150	4194	17	130	10000*	27	150	10000*
8	140	10000*	18	140	10000*	28	160	4211
9	150	4331	19	150	5106	29	150	3630
10	140	10000*	20	140	10000*	30	140	10000*
Сталь 40X								
Зразки I типу								
1	280	2100	11	280	1773	21	280	10000*
2	270	10000*	12	270	10000*	22	270	10000*
3	280	1921	13	280	992	23	280	1116
4	270	2011	14	270	10000*	24	270	1370
5	260	10000*	15	280	849	25	260	10000*
6	270	1739	16	290	938	26	270	1429
7	260	10000*	17	280	10000*	27	260	10000*
8	270	1415	18	290	1366	28	270	10000*

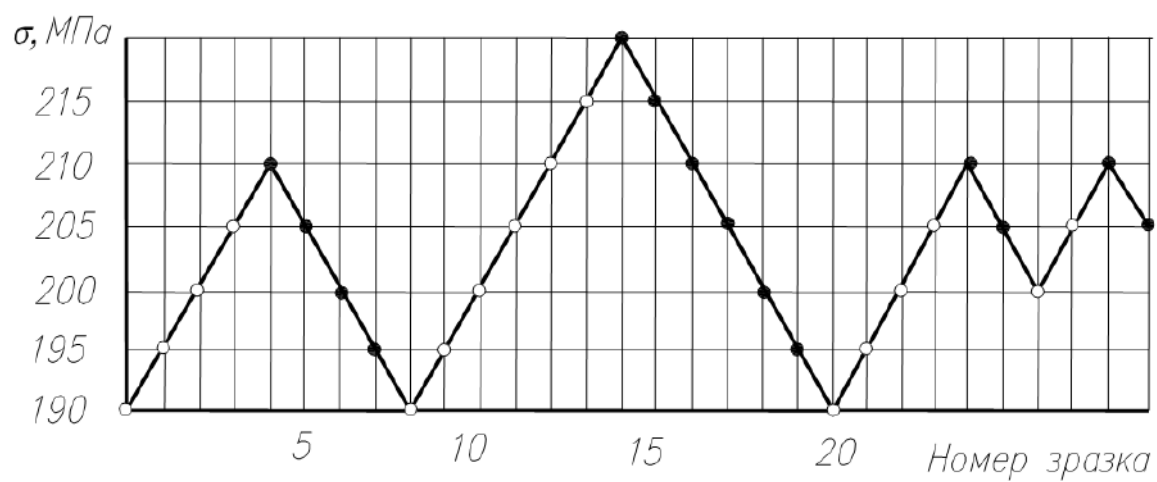
Продовження таблиці 4.2

1	2	3	4	5	6	7	8	9
9	260	10000*	19	280	10000*	29	280	1936
10	270	10000*	20	290	1931	30	270	10000*
Зразки III типу								
1	150	1481	11	160	1002	21	150	1229
2	145	10000*	12	155	10000*	22	145	10000*
3	150	10000*	13	160	10000*	23	150	1904
4	155	10000*	14	165	10000*	24	145	1883
5	160	10000*	15	170	934	25	140	10000*
6	155	932	16	165	896	26	145	10000*
7	150	10000*	17	160	10000*	27	150	10000*
8	155	1443	18	165	2001	28	155	1515
9	150	10000*	19	160	1104	29	150	10000*
10	155	10000*	20	155	802	30	155	2100
Зразки IV типу								
1	155	10000*	11	155	3061	21	155	10000*
2	160	1783	12	150	10000*	22	160	10000*
3	155	10000*	13	155	2037	23	165	10000*
4	160	1242	14	150	1421	24	170	3607
5	155	10000*	15	145	10000*	25	165	1841
6	160	10000*	16	150	10000*	26	160	10000*
7	165	3724	17	155	10000*	27	165	2921
8	160	10000*	18	160	3019	28	160	10000*
9	165	3005	19	155	10000*	29	165	2324
10	160	2103	20	160	1963	30	160	1563

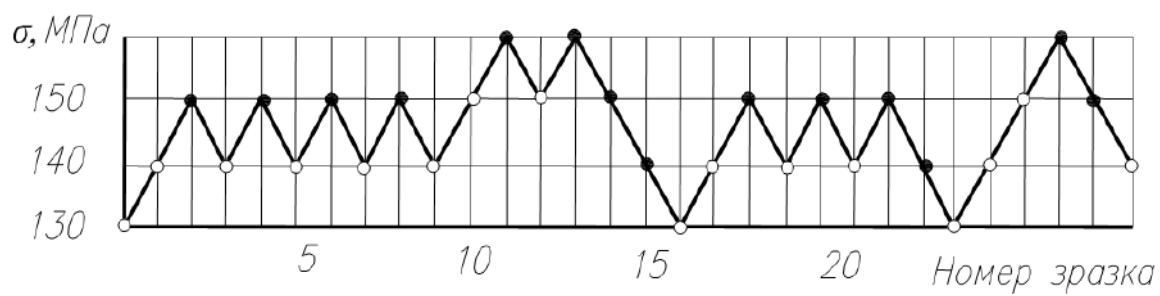
\* Зразки не зруйнувалися



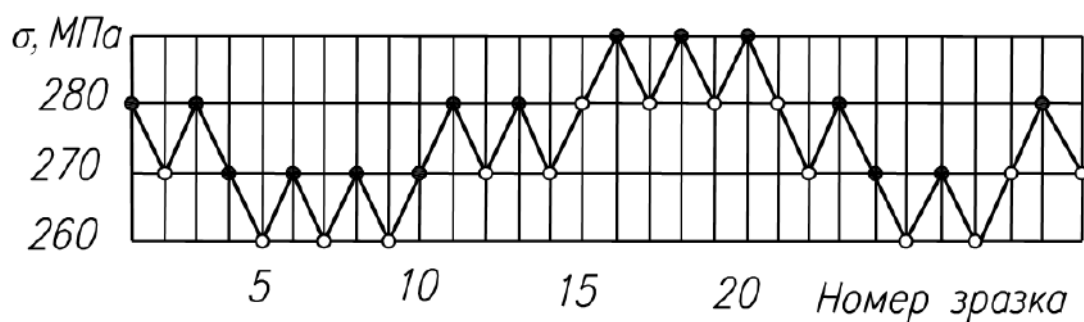
а



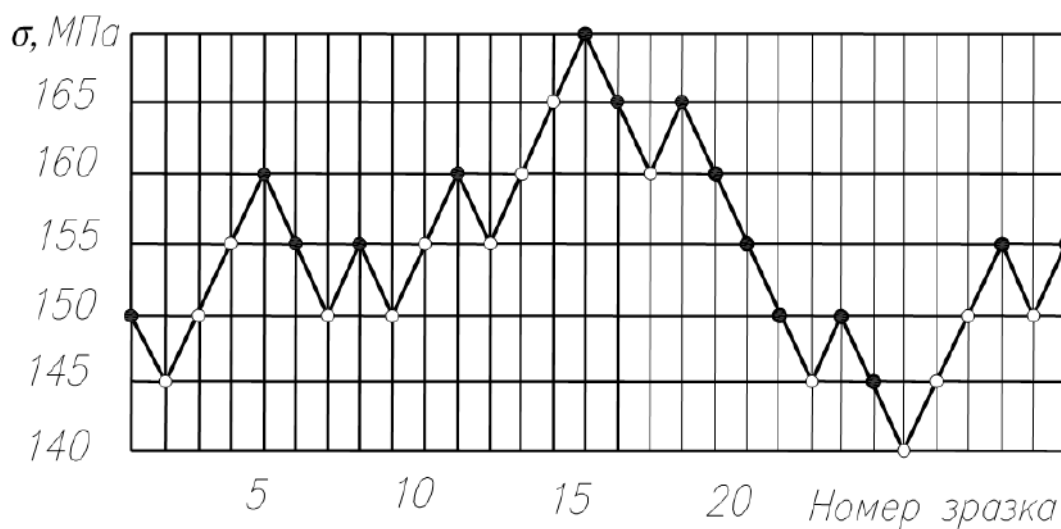
б



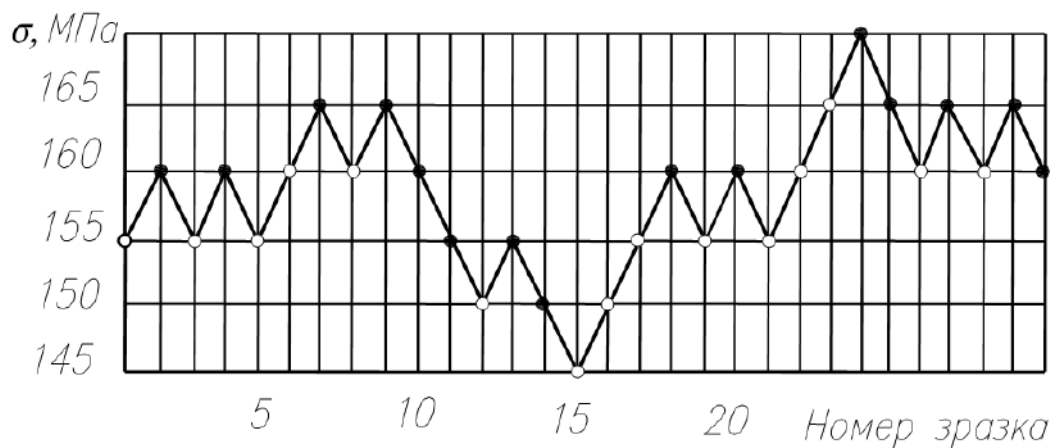
в



г



д



е

Рисунок 4.3 – Результати випробувань зразків за методом «вгору – вниз»

а, б, в – зразки зі сталі 45 відповідно I, II і IV типів;

г, д, е – зразки зі сталі 40X відповідно I, III і IV типів;

● – зразок зруйнувався; ○ – зразок не зруйнувався

Випробування зразків при регулярному навантаженні проводили на 3 - 4 рівнях напружень, інтервали між якими становили 15 - 25 МПа (табл. 4.3)

Таблиця 4.3 – Результати випробувань зразків при регулярному навантаженні [72]

№ зразка	$\sigma$ , МПа	$N$ , Цикл.	$lg \sigma$	$lg N$
1	2	3	4	5
Сталь 45, зразки I типу				
Параметри степеневого рівняння кривої втоми: $m_c = 18,018$ ; $C_c = 49,605$ ; $\bar{\sigma}_R = 250$ МПа; $R^2 = 0,795$				
1	300	77200	2,477	4,8585
2		86200		4,9355
3		98300		4,9926
4		113300		5,0542
5		199200		5,2993
6	285	206800	2,455	5,3156
7		206800		5,3156
8		299100		5,4758
9		308900		5,4898
10		394400		5,5959
11	270	336600	2,431	5,5271
12		362400		5,5592
13		547100		5,7381
14		602600		5,7800
15		703600		5,8473

Продовження таблиці 4.3

1	2	3	4	5
Сталь 45, зразки II типу				
Параметри степеневого рівняння кривої втоми: $m_C=13,038$ ; $C_C=36,674$ ; $\bar{\sigma}_R=204$ МПа; $R^2 = 0,934$				
1	270	77300	2,431	4,8882
2		87300		4,9410
3		103000		5,0128
4		115900		5,0641
5		146900		5,1670
6	250	197100	2,398	5,2947
7		232900		5,3672
8		262300		5,4188
9		304400		5,4834
10		370300		5,5686
11	230	588700	2,362	5,7699
12		708800		5,8505
13		740700		5,8696
14		835100		5,9217
15		1100500		6,0416
16	210	1237700	2,3222	6,0926
17		1240200		6,0935
18		2784800		6,4448
19		2806300		6,4481
20		3931800		6,5946

Продовження таблиці 4.3

1	2	3	4	5
Сталь 45, зразки IV типу				
Параметри степеневого рівняння кривої втоми: $m_c = 6,645$ ; $C_c = 20,942$ ; $\bar{\sigma}_R = 145$ МПа; $R^2 = 0,939$				
1	250	98100	2,398	4,9917
2		111300		5,0465
3		124800		5,0962
4		135000		5,1303
5	225	165200	2,352	5,2180
6		212500		5,3274
7		215900		5,3343
8		261800		5,4180
9	200	244400	2,301	5,3881
10		344900		5,5377
11		457200		5,6601
12		491700		5,6917
13	175	896900	2,243	5,9527
14		1166000		6,0667
15		1172500		6,0691
16		1303800		6,1152
Сталь 40X, зразки I типу				
Параметри степеневого рівняння кривої втоми: $m_c = 18,382$ ; $C_c = 51,143$ ; $\bar{\sigma}_R = 274$ МПа; $R^2 = 0,882$				
1	330	56300	2,519	4,7482
2		69800		4,8439
3		73600		4,8692
4		76600		4,8865



Продовження таблиці 4.3

1	2	3	4	5
5		80600		4,9085
6		104800		5,0204
7		111500		5,0492
8	310	110500	2,491	5,0453
9		183000		5,2625
10		184700		5,2672
11		275700		5,4409
12		304000		5,4829
13		318600		5,5038
14	290	335600	2,462	5,5263
15		484100		5,6849
16		692100		5,8401
17		743600		5,8716
18		785500		5,8954
19		842000		5,9253
20		1121700		6,0492
Сталь 40X, зразки III типу				
Параметри степеневого рівняння кривої втоми: $m_c = 7,949$ ; $C_c = 23,982$ ; $\bar{\sigma}_R = 154$ МПа; $R^2 = 0,841$				
1	240	86100	2,380	4,9350
2		109500		5,0394
3		111700		5,0481
4		125700		5,0993
5	220	199400	2,342	5,2997
6		233200		5,3677
7		419800		5,6230
8		735400		5,8665

Продовження таблиці 4.3

1	2	3	4	5
9	200	360200	2,301	5,5565
10		469000		5,6712
11		604800		5,7816
12		653400		5,8152
13	165	926300	2,217	5,9668
14		1368100		6,1361
15		2100000		6,3222
16		2236200		6,3495
Сталь 40Х, зразки IV типу				
Параметри степеневого рівняння кривої втоми: $m_c = 7,704$ ; $C_c = 23,032$ ; $\bar{\sigma}_R = 159$ МПа; $R^2 = 0,896$				
1	230	70800	2,362	4,8500
2		84700		4,9279
3		89600		4,9523
4		94600		4,9759
5	200	145100	2,301	5,1614
6		152400		5,1818
7		169700		5,2305
8		207700		5,3181
9	184	260000	2,265	5,4150
10		360000		5,5563
11		459500		5,6628
12		720000		5,8572
13	170	467000	2,230	5,6993
14		542600		5,7348
15		750000		5,8751
16		800000		5,9031

Результати випробувань зразків, наведені в табл. 4.3, опрацюємо двома методами. Спочатку визначимо коефіцієнт відносної довговічності  $k_\gamma$  без уточнення положення точки перетину похилих ділянок кривих втоми за залежністю (2.1) вважаючи, що воно відбувається на осі ординат, а потім – з уточненням за формулою (2.12) коли є її зміщення. За знайденим значенням  $k_\gamma$  розрахуємо довговічності до руйнування  $N$  для вихідних зразків, а також відносні похибки довговічності до руйнування  $\delta_N$ . При проведенні порівняльного аналізу в якості порівнювальної довговічності до руйнування приймемо одне зі значень довговічності, що відповідає максимальному відхиленню від середньомірної довговічності по кривій втоми (в табл. 4.5 і 4.6 позначено зірочкою). На інших рівнях напружень величину  $N$  визначимо за знайденим значенням  $k_\gamma$  за формулами (2.1) і (2.12).

Величини  $\Delta\sigma$ ,  $\lg N$ ,  $\Delta \lg N$ , а також параметри  $m_C$  і  $C_C$  при зміщенні кривих втоми визначимо для кожного типу зразків:

– сталь 45, зразки I типу:

$$\Delta\sigma = \sigma - \left( \frac{10^{C_C}}{N} \right)^{\frac{1}{m_C}} = 300 - \left( \frac{10^{49,605}}{72200} \right)^{\frac{1}{18,018}} = -4,39 \text{ МПа};$$

(Знак мінус вказує, що зсув кривої необхідно здійснювати вниз).

Параметри похилої ділянки зміщеної кривої втоми:  $m_C = 17,706$ ;  $C_C = 48,477$ .

Величину зміщення  $\Delta \lg N$  визначаємо, вирішуючи спільно два наступних рівняння

$$\begin{cases} m_{C1}\sigma + \Delta \lg N = C_{C1} = 17,706\sigma + \Delta \lg N = 48,477 \\ m_{C2}\sigma + \Delta \lg N = C_{C2} = 18,018\sigma + \Delta \lg N = 49,605 \end{cases};$$

звідки  $\Delta \lg N = -15,823$

За формулою (2.12) визначаємо коефіцієнт відносної довговічності  $k_\gamma$

$$k'_\gamma = \frac{\lg N - \lg \bar{N}}{\lg \bar{N} - \Delta \lg N} = \frac{4,859 - 4,972}{4,972 + 15,823} = -0,0054$$

Логарифми довговічності  $lg N$  для уточненого значення коефіцієнта відносної довговічності складуть:

$$lg N_1 = lg \bar{N} - k_\gamma lg \bar{N} = 4,972 - 0,0054 \cdot 4,972 = 4,945$$

$$lg N_2 = lg \bar{N} - k_\gamma lg \bar{N} = 5,374 - 0,0054 \cdot 5,374 = 5,345$$

$$lg N_3 = lg \bar{N} - k_\gamma lg \bar{N} = 5,797 - 0,0054 \cdot 5,797 = 5,766$$

– сталь 45, зразки II типу:

$$\Delta\sigma = \sigma - \left( \frac{10^{C_c}}{N} \right)^{\frac{1}{m_c}} = 210 - \left( \frac{10^{36,674}}{1237700} \right)^{\frac{1}{13,038}} = -11,611 \text{ МПа};$$

Параметри похилої ділянки зміщеної кривої втоми:  $m_c = 12,453$ ;  $C_c = 35,013$ ;

Зміщення  $\Delta lg N$  знаходимо з системи рівнянь

$$\begin{cases} m_{c1}\sigma + \Delta lg N = C_{c1} = 13,038\sigma + \Delta lg N = 36,674 \\ m_{c2}\sigma + \Delta lg N = C_{c2} = 12,453\sigma + \Delta lg N = 35,013 \end{cases};$$

звідки  $\Delta lg N = -0,340$ ;

коефіцієнт відносної довговічності  $k_\gamma$ :

$$k'_\gamma = \frac{lg N - lg \bar{N}}{lg \bar{N} - \Delta lg N} = \frac{6,093 - 6,397}{6,397 + 0,340} = -0,0451$$

– сталь 45, зразки IV типу:

$$\Delta\sigma = \sigma - \left( \frac{10^{C_c}}{N} \right)^{\frac{1}{m_c}} = 200 - \left( \frac{10^{20,942}}{244400} \right)^{\frac{1}{6,645}} = -15,320 \text{ МПа}$$

параметри похилої ділянки зміщеної кривої втоми:  $m_c = 6,151$ ;  $C_c = 19,589$ ;

Зміщення  $\Delta lg N$ :

$$\begin{cases} m_{c1}\sigma + \Delta lg N = C_{c1} = 6,645\sigma + \Delta lg N = 20,942 \\ m_{c2}\sigma + \Delta lg N = C_{c2} = 6,151\sigma + \Delta lg N = 19,589 \end{cases};$$

звідки  $\Delta lg N = 2,750$ ;

коефіцієнт відносної довговічності  $k_\gamma$ :

$$k'_\gamma = \frac{\lg N - \lg \bar{N}}{\lg \bar{N} - \Delta \lg N} = \frac{6,093 - 6,397}{6,397 - 2,750} = 0,0451$$

– сталь 40X, зразки I типу:

$$\Delta \sigma = \sigma - \left( \frac{10^{C_c}}{N} \right)^{\frac{1}{m_c}} = 290 - \left( \frac{10^{51,143}}{1121700} \right)^{\frac{1}{18,382}} = 6,165 \text{ МПа};$$

параметри похилої ділянки зміщеної кривої втоми:  $m_c = 19,569$ ;  $C_c = 54,301$ ;  
Зміщення  $\Delta \lg N$ :

$$\begin{cases} m_{c1} \sigma + \Delta \lg N = C_{c1} = 18,382 \sigma + \Delta \lg N = 51,143 \\ m_{c2} \sigma + \Delta \lg N = C_{c2} = 19,569 \sigma + \Delta \lg N = 54,301 \end{cases};$$

звідки  $\Delta \lg N = 2,230$ ;

коефіцієнт відносної довговічності  $k_\gamma$ :

$$k'_\gamma = \frac{\lg N - \lg \bar{N}}{\lg \bar{N} - \Delta \lg N} = \frac{6,050 - 5,879}{5,879 - 2,230} = 0,0469$$

– сталь 40X, зразки III типу:

$$\Delta \sigma = \sigma - \left( \frac{10^{C_c}}{N} \right)^{\frac{1}{m_c}} = 220 - \left( \frac{10^{23,982}}{735400} \right)^{\frac{1}{7,949}} = 28,332 \text{ МПа};$$

параметри похилої ділянки зміщеної кривої втоми:  $m_c = 8,084$ ;  $C_c = 24,720$ ;  
Зміщення  $\Delta \lg N$ :

$$\begin{cases} m_{c1} \sigma + \Delta \lg N = C_{c1} = 7,949 \sigma + \Delta \lg N = 23,982 \\ m_{c2} \sigma + \Delta \lg N = C_{c2} = 8,084 \sigma + \Delta \lg N = 24,720 \end{cases};$$

звідки  $\Delta \lg N = -19,118$ ;

коефіцієнт відносної довговічності  $k_\gamma$ :

$$k'_\gamma = \frac{\lg N - \lg \bar{N}}{\lg \bar{N} - \Delta \lg N} = \frac{5,867 - 5,362}{5,362 + 19,118} = 0,0206$$

– сталь 40X, зразки IV типу:

$$\Delta\sigma = \sigma - \left( \frac{10^{C_C}}{N} \right)^{\frac{1}{m_C}} = 184 - \left( \frac{10^{23,032}}{720000} \right)^{\frac{1}{7,704}} = 13,114 \text{ МПа};$$

параметри похилої ділянки зміщеної кривої втоми:  $m_C = 8,258$ ;  $C_C = 24,539$ ;  
Зміщення  $\Delta \lg N$ :

$$\begin{cases} m_{C1}\sigma + \Delta \lg N = C_{C1} = 7,704\sigma + \Delta \lg N = 23,032 \\ m_{C2}\sigma + \Delta \lg N = C_{C2} = 8,258\sigma + \Delta \lg N = 24,539 \end{cases};$$

звідки  $\Delta \lg N = 2,074$ ;

коефіцієнт відносної довговічності  $k_\gamma$ :

$$k'_\gamma = \frac{\lg N - \lg \bar{N}}{\lg \bar{N} - \Delta \lg N} = \frac{5,857 - 5,584}{5,584 + 2,074} = 0,0356$$

Результати розрахунку зведені в табл. 4.4

Таблиця 4.4 – Результати розрахунку довговічностей до руйнування моделей гребних валів і їх відносних відхилень для значень  $k_\gamma$ ,  $k'_\gamma$  знайдених за залежностями (2.1) і (2.12)

$\sigma$ , МПа	$\lg N$ формула 2.1 (розрахунок за значенням $k_\gamma$ )	$\lg \bar{N}$ (за степеневим рівнянням кривої втоми)	$k_\gamma$ (формула 2.1)	$k'_\gamma$ (формула 2.12)	$\lg N'$ формула 2.1, (розрахунок за уточненим значенням $k'_\gamma$ )	$\delta_{\lg N}$ , %
1	2	3	4	5	6	7
Сталь 45, зразки I типу						
300	4,859*	4,972	-0,0227	-0,0054	4,945	-1,74
285	5,252	5,374			5,345	-2,00
270	5,665	5,797			5,766	-1,75
Сталь 45, зразки II типу						
270	4,738	4,974	-0,0475	-0,0451	4,750	-2,50
250	5,153	5,410			5,166	-0,25
230	5,603	5,882			5,617	-0,25
210	6,093*	6,397			6,108	-0,25

Продовження таблиці 4.4

1	2	3	4	5	6	7
Сталь 45, зразки IV типу						
250	4,774	5,008	- 0,0467	-0,0910	4,552	4,88
225	5,064	5,312			4,829	4,87
200	5,388*	5,652			5,138	4,87
175	5,755	6,037			5,488	5,23
Сталь 40X, зразки I типу						
330	4,989	4,848	0,0290	0,0469	5,075	-1,69
310	5,502	5,347			5,598	-1,71
290	6,050*	5,879			6,154	-1,69
Сталь 40X, зразки III типу						
240	5,539	5,062	0,0942	0,0206	5,166	7,22
220	5,867*	5,362			5,472	7,22
200	6,227	5,691			5,808	7,21
165	6,954	6,355			6,486	7,22
Сталь 40X, зразки IV типу						
230	5,074	4,837	0,0490	0,0356	5,009	1,30
200	5,565	5,305			5,494	1,30
184	5,857*	5,584			5,783	1,30
170	6,136	5,849			6,057	1,30

На рисунку 4.4 результати розрахунку представлені у вигляді залежності похибки  $\delta_{lg N}$  від номера рівня напружень, нумерація якого для всіх типів зразків починалася з самого нижнього рівня, що перевищує границю витривалості.

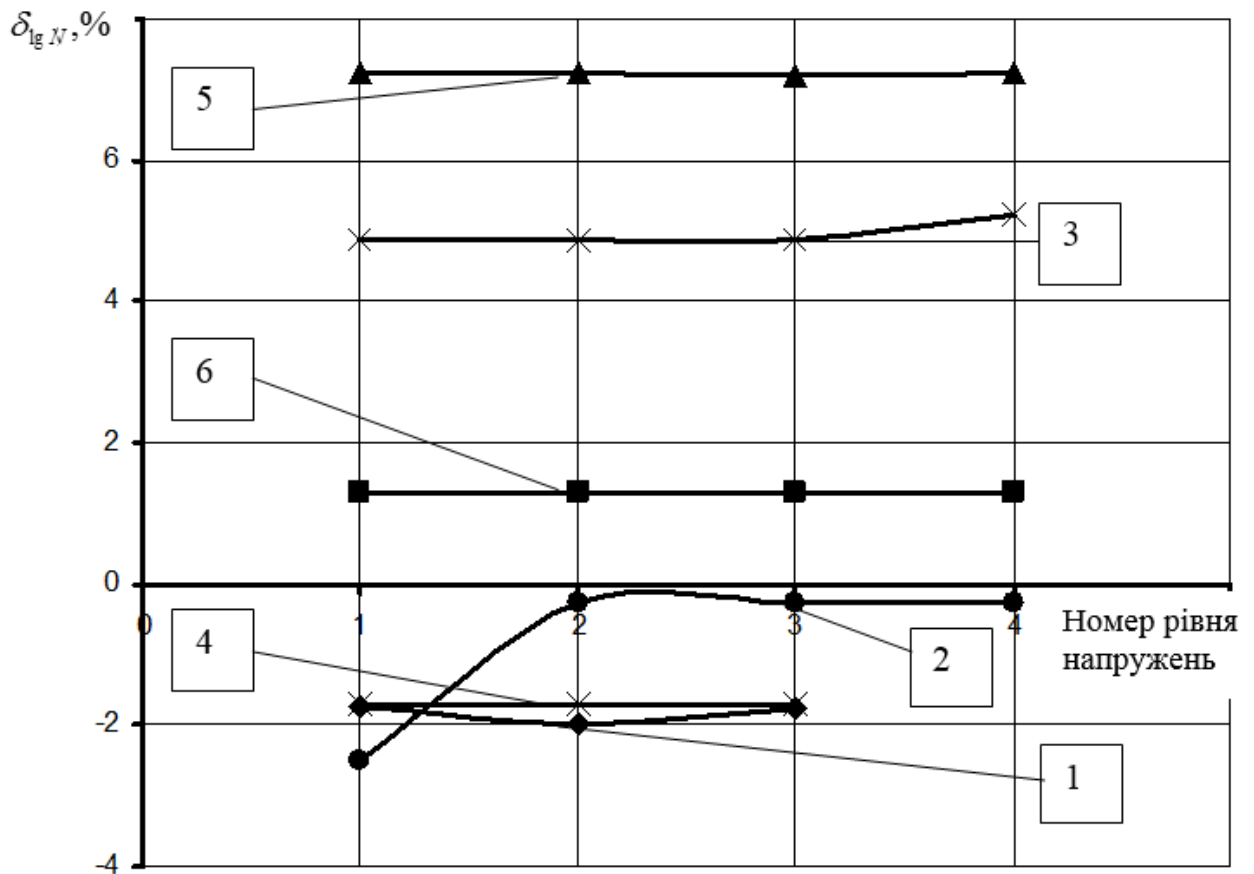


Рисунок 4.4 – Залежність похибки  $\delta_{lgN}$  від номера рівня напружень:

- 1 – сталь 45, I тип; 2 – сталь 45, II тип;
- 3 – сталь 45, IV тип; 4 – сталь 40X, I тип;
- 5 – сталь 40X, III тип; 6 – сталь 40X, IV тип

Результати обробки експериментальних даних всіх типів зразків показали, що навіть при знаходженні довговічностей до руйнування в єдиній зоні розсіювання можна проводити порівняльний аналіз втомної міцності зразків на будь-якому з рівнів напружень, користуючись уточненими значенням коефіцієнта  $k'_\gamma$ . При цьому уточнення абсолютних їх значень, як показано на рис. 4.4, може досягати 8%. Це уточнення може бути ще більш істотним, в тому випадку, коли характеристики міцності зразків матимуть великі відмінності.



#### 4.2. Перевірка запропонованого методу за результатами випробувань моделей відновлених гребних валів з облицюванням.

Перевірка розробленого методу порівняльної оцінки характеристик опору втомі була проведена за результатами випробувань моделей гребних валів з облицюванням, наведених в роботі [52]. Моделі були виготовлені зі сталі 35 і мали діаметр в робочій частині 75 мм (рис. 4.5). З одного боку у всіх моделей конічна частина під захоплювач виконувалася знімною (на рисунку не показано) для того, щоб була можливість встановити облицювання.

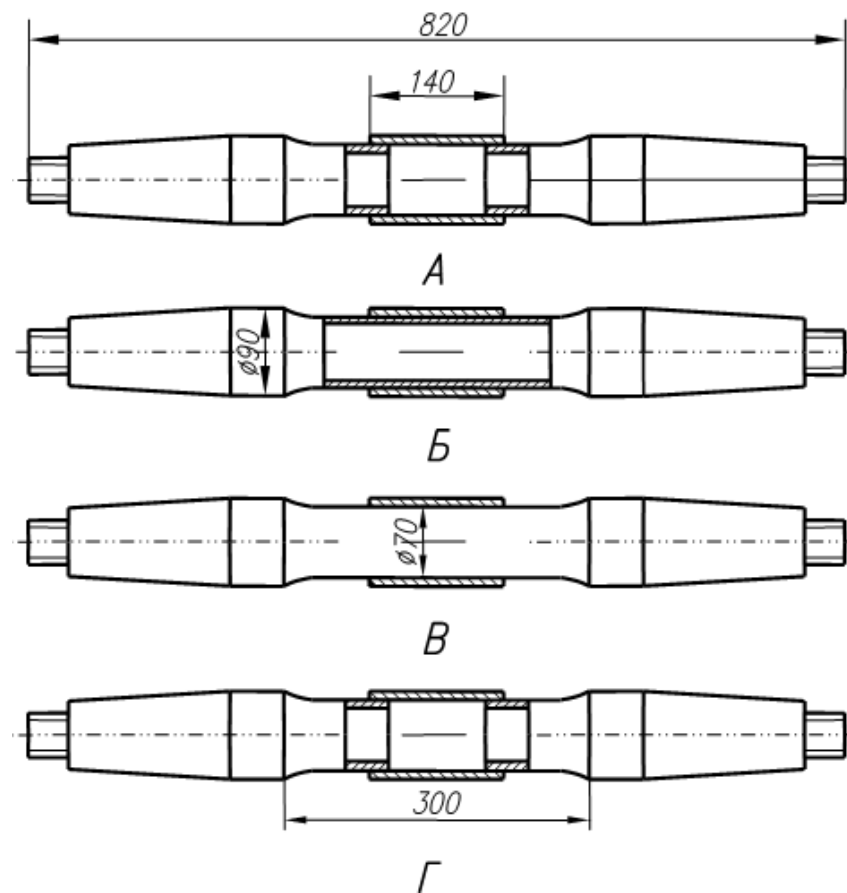


Рисунок 4.5 – Моделі гребних валів з облицюванням: *a* – кільцеве наплавлення; *б* – суцільне наплавлення стрічкою 08кп; *в* – гладка модель з насадкою; *г* – кільцеве наплавлення дротом Св-06Х19Н9Т

Випробування таких моделей дозволяє оцінити спільний вплив наплавлення і облицювання на їх опір втомі. Облицювання встановлюється з натягом і тому є основним концентратором напружень. Незважаючи на це

руйнування валу у кормового зрізу облицювання відбуваються вкрай рідко (в 2 % випадків). У середній же частині валу під облицюванням руйнування відбуваються значно частіше.

Заготовки моделей перед наплавленням піддавали нормалізації при 850°C. Надалі здійснювали відпуск при температурі 650°C. Моделі серії А наплавляли тільки у торців насадки на довжині 30 мм, щоб оцінити вплив кінцевого ефекту наплавлення. Ці моделі наплавляли електродної стрічкою перетином 0,1×30мм зі сталі 08кп під флюсом АН348А. Моделі серії Б наплавляли по всій робочій частині аналогічної стрічкою, щоб виключити вплив кінцевого ефекту наплавлення. Режими наплавлення були аналогічні, як і для моделей А. Крок наплавлення становив 24 мм. Моделі серії В не наплавляли. Вони мали лише насадки, аналогічні насадкам моделей А і Б. Моделі серії Г наплавляли електродним дротом марки Св-06Х19Н9Т під флюсом ОФ-10. Використання зазначеного дроту давало можливість оцінити спільний вплив насадки і гарячих тріщин в наплавленому металі. Крок наплавлення становив 6 мм.

Товщина наплавленого шару для кожного типу моделей становила 3 мм на сторону. Після наплавлення всі моделі були піддані зміцненню обкаткою роликками з профільним радіусом 5,5 мм. Моделі без наплавлення не зміцнювали. Насадки, виготовлені з бронзи БрОЦ10-2, запресовували після механічної обробки і обкатки робочої частини моделі. Товщина насадки становила 11 мм, її довжина була прийнята рівною подвійному діаметру робочої частини моделі (140 мм).

Руйнування моделей з кільцевими наплавленнями (моделі А і Г) руйнувалися на відстані 10-15 мм від торця насадки. Руйнування моделей типу Б відбувалося на початку або в кінці наплавлення. Зразки типу Г руйнувалися у торця насадки.

Результати випробувань моделей гребних валів представлені в табл. 4.6.

Таблиця 4.6 – Результати випробувань моделей гребного валу ( $d = 70$  мм) на опір втомі при вигині з обертанням

№ зразка.	$\sigma$ , МПа	$\lg \sigma$	$N$ , цикл.	$\lg N$	$m_C$	$C_C$	$\sigma_R$ , МПа
Гладка модель з насадкою							
1	180	2,255	823000	5,915	6,592	20,783	120
2	180	2,255	856300	5,933			
3	160	2,204	1722000	6,236			
4	140	2,146	4412100	6,645			
Кільцеве наплавлення стрічкою зі сталі 08кп							
1	190	2,279	2122500	6,327	5,917	19,738	150
2	180	2,255	2111400	6,325			
3	170	2,230	3501200	6,544			
Суцільне наплавлення стрічкою зі сталі 08кп							
1	190	2,279	1713400	6,234	4,873	17,234	145
2	180	2,255	1453200	6,162			
3	170	2,230	2353200	6,372			
4	160	2,204	2912400	6,464			
Кільцеве наплавлення дротом Св-06Х19Н9Т							
1	180	2,255	605000	5,782	3,036	12,603	80
2	150	2,176	1322300	6,121			
3	140	2,146	913700	5,961			
4	120	2,079	2010200	6,302			
5	100	2,000	3122100	6,494			

Як і в випадку зі зразками, аналогічним чином визначимо коефіцієнти,  $k_\gamma$ ,  $k'_\gamma$  і  $\delta_{\lg N}$  для моделей гребних валів, результати випробувань яких наведені в табл. 4.6. (Табл. 4.7).

Таблиця 4.7 – Результати розрахунку довговічності до руйнування моделей гребних валів і їх відносних відхилень для значень  $k_\gamma$ ,  $k'_\gamma$  знайдених за залежностями (2.1) і (2.12)

$\sigma$ , МПа	$lg N$ формула 2.1 (розрахунок за значенням $k_\gamma$ )	$lg \bar{N}$ (за степеневим рівнянням кривої втоми)	$k_\gamma$ (формула 2.1)	$k'_\gamma$ (формула 2.12)	$lg N'$ формула 2.1, (розрахунок за уточненим значенням $k'_\gamma$ )	$\delta_{lg N}$ , %
Гладка модель з насадкою						
180	5,915	5,916	-	-	-	-
180	5,933	5,916				
160	6,236	6,253				
140	6,645	6,636				
Кільцеве наплавлення стрічкою зі сталі 08кп						
190	6,159	5,761	0,0691	0,145	6,596	-6,63
180	6,325*	5,916			6,744	-6,21
170	6,500	6,080			6,962	-6,64
Суцільне наплавлення стрічкою зі сталі 08кп						
190	6,001	5,761	0,0416	0,088	6,268	-4,26
180	6,162*	5,916			6,437	-4,27
170	6,333	6,080			6,615	-4,26
160	6,494	6,253			6,803	-4,54
Кільцеве наплавлення дротом Св-06Х19Н9Т						
180	5,782*	5,916	-0,0227	-0,048	5,632	2,66
150	6,292	6,438			6,129	2,66
140	6,485	6,636			6,317	2,66
120	6,916	7,077			6,737	2,66
100	7,427	7,599			7,234	2,67

Розрахунки величин  $k_\gamma$ ,  $k'_\gamma$  і  $\delta_{lg N}$ , для кільцевого наплавлення стрічкою зі сталі 08кп, суцільного наплавлення стрічкою зі сталі 08кп і кільцевого наплавлення дротом Св-06Х19Н9Т представлені нижче.

- кільцеве наплавлення стрічкою зі сталі 08кп:

$$\Delta\sigma = \sigma - \left( \frac{10^{C_c}}{N} \right)^{\frac{1}{m_c}} = 180 - \left( \frac{10^{20,783}}{2111400} \right)^{\frac{1}{6,592}} = 22,355 \text{ МПа};$$

параметри похилої ділянки зміщеної кривої втоми:  $m_c = 7,485$ ;  
 $C_c = 23,180$ .

Величину зміщення  $\Delta lg N$  визначимо, вирішуючи спільно два наступних рівняння

$$\begin{cases} m_{c1}\sigma + \Delta lg N = C_{c1} = 6,592\sigma + \Delta lg N = 20,783 \\ m_{c2}\sigma + \Delta lg N = C_{c2} = 7,485\sigma + \Delta lg N = 23,180 \end{cases};$$

звідки  $\Delta lg N = 3,092$ ;

коефіцієнт відносної довговічності  $k_\gamma$

$$k'_\gamma = \frac{lg N - lg \bar{N}}{lg \bar{N} - \Delta lg N} = \frac{6,325 - 5,916}{5,916 - 3,092} = 0,145.$$

Величини  $lg N$  для уточненого значення коефіцієнта відносної довговічності складуть:

$$lg N_1 = lg \bar{N} - k_\gamma lg \bar{N} = 5,761 + 0,145 \cdot 5,761 = 6,596;$$

$$lg N_2 = lg \bar{N} - k_\gamma lg \bar{N} = 5,916 + 0,145 \cdot 5,916 = 6,744;$$

$$lg N_3 = lg \bar{N} - k_\gamma lg \bar{N} = 6,080 + 0,145 \cdot 6,080 = 6,962.$$

- Суцільне наплавлення стрічкою зі сталі 08кп

$$\Delta\sigma = \sigma - \left( \frac{10^{C_c}}{N} \right)^{\frac{1}{m_c}} = 180 - \left( \frac{10^{20,783}}{1453200} \right)^{\frac{1}{6,592}} = 13,144 \text{ МПа};$$

параметри похилої ділянки зміщеної кривої втоми:  $m_c = 6,139$ ;  
 $C_c = 19,600$ .

Величину зміщення  $\Delta \lg N$  визначимо, вирішуючи спільно два наступних рівняння

$$\begin{cases} m_{c1}\sigma + \Delta \lg N = C_{c1} = 6,592\sigma + \Delta \lg N = 20,783 \\ m_{c2}\sigma + \Delta \lg N = C_{c2} = 6,139\sigma + \Delta \lg N = 19,600 \end{cases};$$

звідки  $\Delta \lg N = 3,554$ ;

коефіцієнт відносної довговічності  $k_\gamma$

$$k'_\gamma = \frac{\lg N - \lg \bar{N}}{\lg \bar{N} - \Delta \lg N} = \frac{6,162 - 5,916}{5,916 - 3,117} = 0,088.$$

Величини  $\lg N$  для уточненого значення коефіцієнта відносної довговічності складуть:

$$\lg N_1 = \lg \bar{N} - k_\gamma \lg \bar{N} = 5,761 + 0,088 \cdot 5,761 = 6,268;$$

$$\lg N_2 = \lg \bar{N} - k_\gamma \lg \bar{N} = 5,916 + 0,088 \cdot 5,916 = 6,437;$$

$$\lg N_3 = \lg \bar{N} - k_\gamma \lg \bar{N} = 6,080 + 0,088 \cdot 6,080 = 6,615;$$

$$\lg N_4 = \lg \bar{N} - k_\gamma \lg \bar{N} = 6,253 + 0,088 \cdot 6,253 = 6,803.$$

- Кільцеве наплавлення дротом Св-06Х19Н9Т

$$\Delta \sigma = \sigma - \left( \frac{10^{C_c}}{N} \right)^{\frac{1}{m_c}} = 180 - \left( \frac{10^{20,783}}{605000} \right)^{\frac{1}{6,592}} = -10,629 \text{ МПа};$$

параметри похилої ділянки зміщеної кривої втоми:  $m_c = 7,107$ ;

$C_c = 22,163$ .

Величину зміщення  $\Delta \lg N$  визначимо, вирішуючи спільно два наступних рівняння

$$\begin{cases} m_{c1}\sigma + \Delta \lg N = C_{c1} = 6,592\sigma + \Delta \lg N = 20,783 \\ m_{c2}\sigma + \Delta \lg N = C_{c2} = 7,107\sigma + \Delta \lg N = 22,163 \end{cases};$$

звідки  $\Delta \lg N = 3,117$ ;

коефіцієнт відносної довговічності  $k_\gamma$

$$k'_\gamma = \frac{\lg N - \lg \bar{N}}{\lg \bar{N} - \Delta \lg N} = \frac{5,782 - 5,916}{5,916 - 3,117} = -0,048.$$

Величини  $\lg N$  для уточненого значення коефіцієнта відносної довговічності складуть:

$$\lg N_1 = \lg \bar{N} - k'_\gamma \lg \bar{N} = 5,916 + 0,048 \cdot 5,916 = 5,632;$$

$$\lg N_2 = \lg \bar{N} - k'_\gamma \lg \bar{N} = 6,438 + 0,048 \cdot 6,438 = 6,129;$$

$$\lg N_3 = \lg \bar{N} - k'_\gamma \lg \bar{N} = 6,636 + 0,048 \cdot 6,636 = 6,317;$$

$$\lg N_4 = \lg \bar{N} - k'_\gamma \lg \bar{N} = 7,077 + 0,048 \cdot 7,077 = 6,737;$$

$$\lg N_5 = \lg \bar{N} - k'_\gamma \lg \bar{N} = 7,599 + 0,048 \cdot 7,599 = 7,234.$$

За результатами розрахунків, наведених в табл. 4.7, побудовані залежності похибки  $\delta_{\lg N}$  від номера рівня напружень (рис. 4.6).

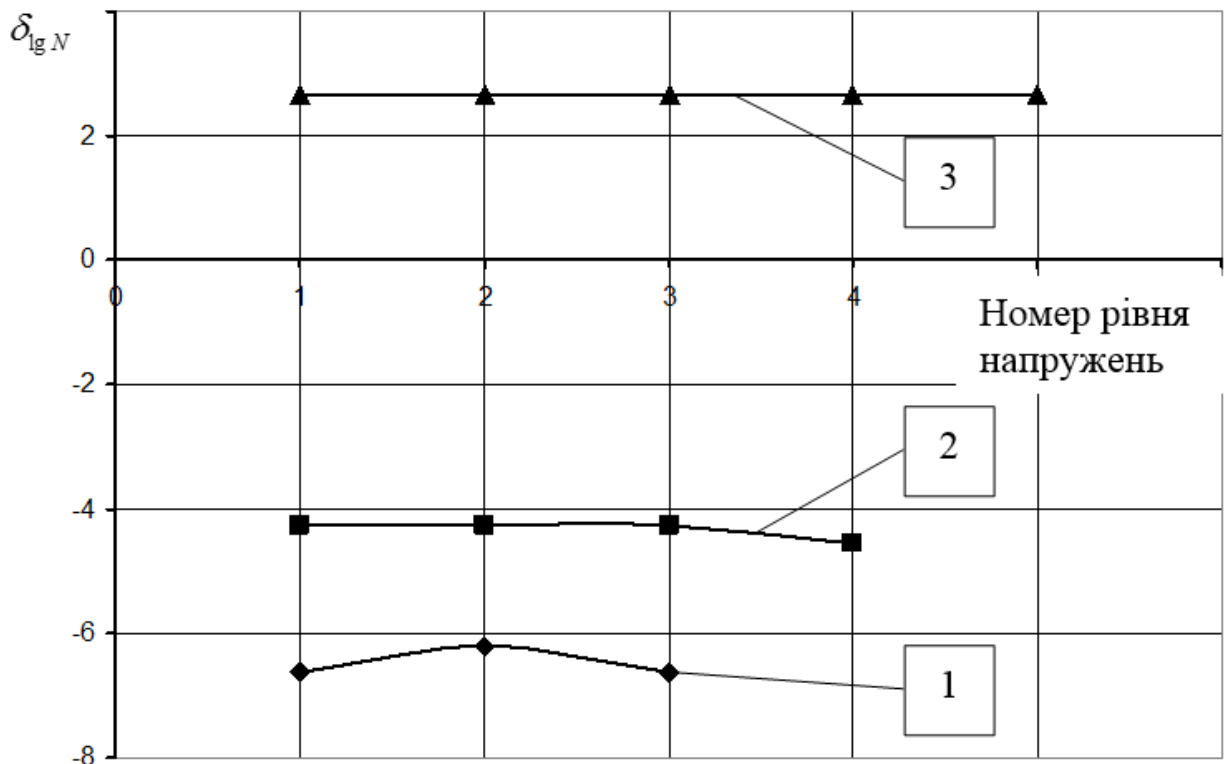


Рисунок 4.6 – Залежності похибки  $\delta_{\lg N}$  від номера рівня напружень:

- 1 – кільцеве наплавлення стрічкою зі сталі 08кп;
- 2 – суцільне наплавлення стрічкою зі сталі 08кп;
- 3 – кільцеве наплавлення дротом Св-06Х19Н9Т

Порівняння графіків, зображених на рисунках 4.5 і 4.6 свідчить про те, що похибки довговічність до руйнування як лабораторних зразків, так і моделей гребних валів мало залежать від рівня напружень. При цьому їх величини по модулю не перевищують 8 %.

#### **4.3. Перевірка запропонованого методу за результатами випробувань моделей відновлених гребних валів без облицювання**

В місцях посадки маточини гребного гвинта на вал, а також в місцях посадки облицювань, як вказувалося в першому розділі, часто спостерігається фреттинг-корозія, що призводить до пошкодження посадочних поверхонь у вигляді втомних тріщин і раковин. У зв'язку з цим останнім часом гребні вали стали частіше виготовляти без облицювання.

З метою перевірки розробленого методу порівняльної оцінки втомної міцності на основі уточненого коефіцієнта відносної довговічності нижче в табл. 4.8 представлені результати випробувань моделей великогабаритних гребних валів (діаметр в робочій частині становив 200 мм.), наплавлених сталлю 05X13H5B11Г4 під флюсом АН-26ПУ-1 [52]. Конструкція зразків наведена на рис. 4.7 [52].

Таблиця 4.8 – Результати випробувань моделей гребного валу без облицювання ( $d = 200$  мм) на опір втомі при вигині з обертанням

№	$\sigma$ , МПа	$\lg \sigma$	$N$ , цикл.	$\lg N$	$m_c$	$C_c$	$\sigma_R$ , МПа
1	150	2,176	502000	5,700	5,084	16,747	80
2	120	2,079	2705000	6,432			
3	100	2,000	2305000	6,362			
4	100	2,000	3407000	6,532			



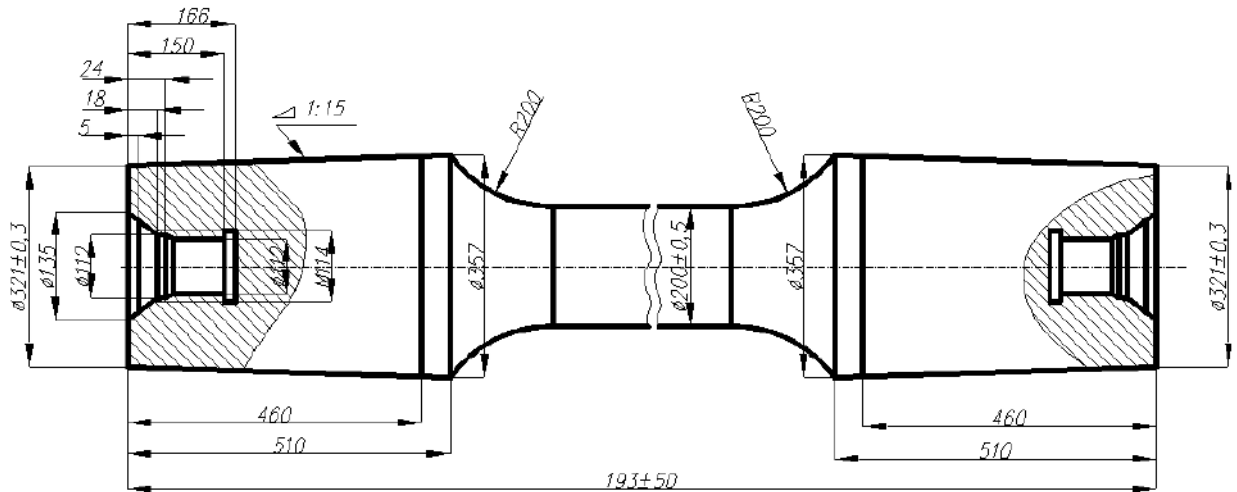


Рисунок 4.7 – Форма і розміри великогабаритних моделей відновлених гребних валів без облицювання

Як і в попередніх випадках зі зразками і моделями гребних валів з облицюванням визначимо коефіцієнти  $k_\gamma$ ,  $k'_\gamma$  і  $\delta_{lg N}$ . (табл. 4.9).

Таблиця 4.9 – Результати розрахунку довговічності до руйнування моделей гребних валів без облицювання та їх відносних відхилень для значень  $k_\gamma$ , знайдених за залежностями (2.1) і (2.12)

$\sigma$ , МПа	$lg N$ формула 2.1 (розрахунок за значенням $k_\gamma$ )	$lg \bar{N}$ (за степеневим рівнянням кривої втоми)	$k_\gamma$ (формула 2.1)	$k'_\gamma$ (формула 2.12)	$lg N'$ формула 2.1, (розрахунок за уточненим значенням $k'_\gamma$ )	$\delta_{lg N}$ , %
150	5,920	5,684	0,0415	0,1099	6,309	-6,17
120*	6,432	6,176			6,855	-6,17
100	6,852	6,579			7,302	-6,17
100	6,852	6,579			7,302	-6,17

Визначимо значення  $lg \bar{N}$  для кожного з прийнятих значень напружень  $\sigma$

$$lg \bar{N}_1 = C_c - mlg \sigma_1 = 16,747 - 5,084lg 150 = 5,684$$

$$lg \bar{N}_2 = C_c - mlg \sigma_2 = 16,747 - 5,084lg 120 = 6,176$$

$$lg \bar{N}_3 = C_c - mlg \sigma_3 = 16,747 - 5,084lg 100 = 6,579$$

$$\lg \bar{N}_4 = C_C - m \lg \sigma_4 = 16,747 - 5,084 \lg 100 = 6,579$$

Значення коефіцієнта  $k_\gamma$  знаходимо за залежністю 2.1

$$k_\gamma = \frac{\lg N - \lg \bar{N}}{\lg \bar{N}} = \frac{6,432 - 6,176}{6,176} = 0,0415.$$

Визначаємо величину зміщення  $\Delta\sigma$

$$\Delta\sigma = \sigma - \left( \frac{10^{C_C}}{N} \right)^{\frac{1}{m_c}} = 120 - \left( \frac{10^{16,747}}{2705000} \right)^{\frac{1}{5,084}} = 13,112 \text{ МПа}.$$

Значення довговічностей і відповідних їм напружень зміщеної кривої втоми представлені в табл. 4.10

Таблиця 4.10 – Значення  $\sigma$ ,  $\lg \sigma$ ,  $N$  і  $\lg N$ , що відповідають зміщеній кривій втоми

$\sigma$ , МПа	163,112	133,112	113,112	113,112
$\lg \sigma$	2,212	2,124	2,054	2,054
$N$ , цикл	502000	2705000	2305000	3407000
$\lg N$	5,700	6,432	6,362	6,532

Параметри похилої ділянки зміщеної кривої втоми, отримані на підставі даних табл. 4.10, знайдені за методом найменших квадратів:  $m_c = 5,653$ ;  $C_C = 18,191$ .

Величину зміщення  $\Delta \lg N$  визначимо, вирішуючи спільно два наступних рівняння

$$\begin{cases} m_{c1} \sigma + \Delta \lg N = C_{c1} = 5,084 \sigma + \Delta \lg N = 16,747 \\ m_{c2} \sigma + \Delta \lg N = C_{c2} = 5,653 \sigma + \Delta \lg N = 18,191 \end{cases};$$

звідки  $\Delta \lg N = 3,846$ .

коефіцієнт відносної довговічності  $k_\gamma$

$$k_\gamma = \frac{\lg N - \lg \bar{N}}{\lg \bar{N}} = \frac{6,432 - 6,176}{6,176 - 3,846} = 0,1099.$$

Логарифми довговічності  $lg N$  для уточненого значення коефіцієнта відносної довговічності складуть:

$$lg N'_1 = lg \bar{N} - k'_\gamma lg \bar{N} = 5,684 + 0,1099 \cdot 5,684 = 6,309;$$

$$lg N'_2 = lg \bar{N} - k'_\gamma lg \bar{N} = 6,176 + 0,1099 \cdot 6,176 = 6,855;$$

$$lg N'_3 = lg \bar{N} - k'_\gamma lg \bar{N} = 6,579 + 0,1099 \cdot 6,579 = 7,302;$$

$$lg N'_4 = lg \bar{N} - k'_\gamma lg \bar{N} = 6,579 + 0,1099 \cdot 6,579 = 7,302;$$

Коефіцієнт відносної довговічності  $k'_\gamma$

$$k'_\gamma = \frac{lg N - lg \bar{N}}{lg \bar{N} - \Delta lg N} = \frac{5,782 - 5,916}{5,916 - 3,117} = -0,048.$$

Результати розрахунку показують, що, по-перше, похибки  $\delta_{lg N}$  не залежать від рівня напружень, і, по-друге, їх значення близькі до результатів розрахунку для відновлених валів з облицюванням.

#### 4.4 Висновки за розділом 4

1. Перевірка розробленого методу на зразках з різною геометрією робочої частини показала, що уточнення коефіцієнта відносної довговічності дозволило підвищити точність визначення величин  $lg N$  для порівнюваних об'єктів до 8%.

2. Оцінка точності методу може бути проведена як на лабораторних зразках, так і на моделях гребних валів, що дозволяє звести до мінімуму матеріальні витрати при проведенні експерименту.

3. Визначення довговічності до руйнування за уточненим коефіцієнтом  $k'_\gamma$  дозволяє проводити порівняльний аналіз характеристик опору втомі при меншій кількості зразків або моделей, оскільки відпадає необхідність проводити випробування за методом «вгору - вниз» з метою визначення середньомовірного значення границі витривалості.

Матеріали розділу представлені в роботах [35, 36].

## ВИСНОВКИ

В результаті проведеного дисертаційного дослідження вирішена задача оперативної оцінки довговічності відновлених суднових гребних валів при відпрацюванні технологій їх ремонту. Її рішення базується на використанні уточненого коефіцієнта відносної довговічності, який був запропонований в якості однієї з характеристик опору втомі.

Головні висновки, наукові та практичні результати роботи:

1. На основі використання кореляційних залежностей між границею витривалості і параметрами похилої ділянки кривої втоми, обґрунтована можливість використання довговічності до руйнування як характеристики при оперативному порівняльному оцінюванні втомної міцності моделей відновлених суднових гребних валів. Показано, що чутливість цієї характеристики в порівнянні з границею витривалості приблизно на порядок вище. Обґрунтовано використання коефіцієнту відносної довговічності для оперативної оцінки опору втомі моделей відновлених суднових гребних валів.

2. Запропоновано і обґрунтовано принцип уточнення коефіцієнта відносної довговічності на основі використання кореляційних залежностей між параметрами похилої ділянки кривої втоми і границею витривалості. Його уточнення, згідно з розрахунками, склало приблизно 10%.

3. Розроблено метод оперативної порівняльної оцінки опору втомі моделей відновлених суднових гребних валів на основі використання уточненого значення коефіцієнта відносної довговічності. Показано, що при відсутності загального діапазону напружень у порівнюваних моделях цей коефіцієнт дозволяє визначати їх границі витривалості. Метод є прискореним і дозволяє економити час експерименту до 10 разів (у порівнянні з традиційним). При цьому мінімальна кількість моделей може дорівнювати одній. На основі результатів дисертаційного дослідження складена конкретна методика визначення характеристик опору втомі для впровадження у виробництво.

4. Проведено оцінку точності розробленого методу з урахуванням впливу вибору рівняння кривої втоми, рівня напружень, а також випадкової і систематичної похибок визначення коефіцієнта відносної довговічності.

5. Проведена перевірка точності розробленого методу на стандартних лабораторних зразках і моделях відновлених суднових гребних валів за наведеними в літературних джерелах результатами випробувань. При цьому як для зразків, так і для моделей точність оцінки логарифма довговічності до руйнування вдалося підвищити до 8% (за рахунок уточнення коефіцієнта відносної довговічності).

Результати дисертаційного дослідження впроваджені на ПРАТ «Іллічівський судноремонтний завод», ТОВ «Trust Ship Service», ТОВ «ГРАНІ», а також в навчальний процес в Одеському національному морському університеті.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бабаев А.Н. Остаточная напряжённость, возникающая в валах из конструкционной углеродистой стали после автоматической наплавки их поверхности сталью 1Х13 // Труды ЛКИ. – 1974. – Вып. 92. – С. 69 -73.
2. Балацкий Л.Т. Прочность прессовых соединений. – К.: Техніка, 1982. – 152 с.
3. Балацкий Л.Т., Филимонов Г.Н. Повреждение гребных валов М.: Транспорт, 1970. – 144 с.
4. Балацкий Л.Т. Ремонт гребных валов. Одесса.: Маяк, 1970. – 58 с.
5. Бенуа Ф.Ф., Богданов А.М. Электродуговая сварка и наплавка судовых валов. Л.: Судпромгиз. – 1957. – 230 с.
6. Бочманов Д.Н., Романенков З.К. Автоматическая наплавка гребных валов рыбопромысловых судов // Судоремонт флота рыбной промышленности. – 1968. – № 9. – С. 20 - 23.
7. Вайнерман А.Е., Гайдай П.И., Филимонов Г.Н. Усталостная прочность деталей с наплавленным слоем покрытия. – В сборнике: Сварка. – Л.: Судостроение. – 1971. – № 14. – С. 168-183.
8. Вайнерман А.Е. и др. Усталостная и коррозионно-усталостная прочность наплавленных валов // ФХММ. – 1978. – № 2. – т. 14. – С. 80-84.
9. Вейнгартен А.М., Усталостная прочность гребных валов // Технология судостроения. – 1973. – № 3. – С. 49-53.
10. Вейнгартен А.М., Гринвальд И.И. Изыскание высокопрочных нержавеющей сталей для судовых валов, работающих в морской воде // Технология судостроения. – 1967. – № 5. – с. 54-59.
11. Вольчев О.В., Конопльов А.В. Розрахунки конструкцій пресових з'єднань на стадії конструювання // II Міжнародна науково-практична конференція. «Сучасні наукові дослідження – 2006» (Дніпропетровськ, 20 – 28 лютого 2006 року). – Дніпропетровськ: Наука і освіта, 2006. – Том 16. – С. 115-119.

12. Гарф М.Э. Испытания на усталость применительно к задачам оптимизации конструкций. – К.: Наукова думка, 1985. – 176 с.
13. Каменский И.С. Спутник термиста. – К.: Техника. – 1978. – 230 с.
14. Гликман и др. Усталостная прочность и остаточная напряжённость стальных образцов, наплавленных хромистой сталью 1X13. – В сборнике: Свойства материалов, применяемых в турбостроении и методы их испытаний. – М.: Машгиз. – 1962. – С. 138-151.
15. Деев В.А. Повышение выносливости стальных наплавленных валов // Сварочное производство. – 1973. – № 6. – С. 37-39.
16. Елин И.А., Шеховцев Е.Д. О причинах повреждения гребных валов // Судостроение за рубежом. – 1966. – № 6. – С. 51-53.
17. Ибрагимов В.С. Повышение усталостной прочности при восстановлении деталей автоматической наплавкой в углекислом газе // Сварочное производство. – 1962. – № 5. – С. 13-16.
18. Какуевицкий В.А., Рагуцкий И.В. Влияние остаточных напряжений на усталостную прочность коленчатых валов, восстановленных наплавкой // Сварочное производство. – 1967. – № 2. – С. 24-27.
19. Кириченко В.А. Ремонт гребных валов с применением наплавки и сварки. – В сборнике «Передовой опыт сварки и наплавки в судоремонте». – ЦБНТИ ММФ. – 1974. – С. 104-106.
20. Колодяжный Е.С. Опыт эксплуатации судовых валов из нержавеющей стали 07X17H7Ю // Технология судостроения. – 1974. – № 2. – С. 84-85.
21. Кохан Н.М., Друт В.И. Ремонт валопроводов морских судов. – Л.: Морской транспорт, 1959. – 33 с.
22. Колодяжный Е.С., Вейнгартен В.М. Требования к материалам для валов скоростных судов // Труды ЦНИИТС. – 1974. – Вып. 141. – С. 66-70.
23. Кобрин М.М., Дехтярь Л.И. Зависимость усталостной прочности стали от её свойств и остаточных напряжений в наплавленном металле // Автоматическая сварка. – 1963. – №9. – С. 19-25.

24. Коноплёв А.В. Повышение точности построения кривой усталости при использовании трехпараметрического уравнения Вейбулла // Вісник ОНМУ. – 2007. – № 22. – С. 131-136.

25. Коноплёв А.В. Определение индивидуальных характеристик сопротивления усталости // Вісник ОНМУ. – 2007. – № 21. – С. 89-96.

26. Коноплёв А.В. Метод контроля предела выносливости, основанный на использовании параметров кривой усталости // Вісник ОНМУ. – 2008. – № 25. – С. 184-191.

27. Коноплёв А.В. Работа трения как критерий оценки долговечности прессовых соединений // Моделирование в прикладных научных исследованиях: Тезисы докладов IV семинара. – Одесса: ОГПУ, 1997. – С. 100-101.

28. Коноплёв А.В. Экспериментально-расчётные методы определения предела выносливости деталей машин. Создание их единой классификации: Дис. доктора техн. наук. – К.: 2013. – 301 с.

29. Коноплёв А.В. Распределение напряжений в прессовом цилиндрическом соединении, передающем вращающий момент // Вісник ОНМУ. – 2005. – № 15. – С. 62-67.

30. Коноплёв А.В., Галевский В.В., Кононова О.Н., Рожко Е.К. Экспериментальная проверка метода ускоренной оценки долговечности судовых гребных валов // Тези доповідей другої міжнародної науково-технічної конференції «Перспективні технології для забезпечення безпеки життєдіяльності та довголіття людини». – Одеса: ОНМУ, 2019. – С. 45-49

31. Коноплёв А.В., Евдокимов В.Д. К вопросу конструирования деталей с демпфирующими свойствами // Проблемы техники. – 2007. – № 4. – С. 20-26.

32. Коноплёв А.В., Кибаков А.Г. Распределение вращающего момента по длине прессового цилиндрического соединения // Нові технології навчання в навчальних закладах України. – Одеса: Друк, 2003. – Вип. 9. – С. 149-155.



33. Коноплёв А.В., Кибаков А.Г., Кононова О.Н., Рожко Е.К. Использование долговечности до разрушения в качестве основной характеристики при проведении сравнительных испытаний на сопротивление усталости // Тези доповідей першої міжнародної науково-технічної конференції «Перспективні технології для забезпечення безпеки життєдіяльності та довголіття людини». Одеса: ОНМУ, 2018. – С. 46-50.

34. Коноплёв А.В., Кононова О.Н. Повышение точности построения кривых усталости // Вісник ОНМУ. – 2010. – № 30. – С. 117-122.

35. Коноплёв А.В., Кононова О.Н. Оценка сопротивления усталости восстановленных деталей судовых машин и механизмов // Вісник ОНМУ. – 2018. – № 55. – С. 68-74.

36. Коноплёв А.В., Кононова О.Н. Косвенная проверка гипотезы о равенстве функций распределения долговечности до разрушения и предела выносливости // Тези доповідей VI Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні порти – проблеми та рішення» 2014, Іллічівськ, С. 39-42.

37. Коноплёв А.В., Кононова О.Н., Иоргачёв В.Д. Анализ точности метода ускоренной оценки предела выносливости // Проблемы техники. – 2014. – №4. – С. 28-32.

38. Коноплёв А.В., Кононова О.Н., Евдокимов В.Д. Анализ точности метода ускоренного определения предела выносливости // Проблемы техники. – 2014. – № 3. – С. 17-25.

39. Коноплёв А.В., Кононова О.Н., Иоргачёв В.Д. Анализ точности метода ускоренной оценки предела выносливости // Проблемы техники. – 2014. – №4. – С. 28-32.

40. Коноплёв А.В., Кононова О.Н., Кибаков А.Г. Сравнительная оперативная оценка долговечности новых и восстановленных деталей // Вісник ОНМУ. – 2017. – № 50. – С. 92-99.

41. Коноплёв А.В., Кононова О.Н., Кибаков А.Г. Уточнение коэффициента относительной долговечности для объектов с низкими пределами выносливости // Вісник ОНМУ. – 2018. – № 3 (56). – С. 197-205.

42. Коноплёв А.В., Кононова О.Н., Рожко Е.К. Оценка систематической погрешности коэффициента относительной долговечности // Вісник ОНМУ. – 2018. – № 54. – С. 99-105.

43. Коноплёв А.В., Кононова О.Н., Чередарчук Н.И., Сологуб В.О., Рожко Е.К. Обзор и анализ способов восстановления гребных валов // Вісник ОНМУ. – 2018. – № 57. – С. 143-149.

44. Коноплёв А.В., Кононова О.Н., Чередарчук Н.И., Сологуб В.О. Использование уточнённого коэффициента относительной долговечности при оценке усталостной прочности восстановленных гребных валов. // Тези доповідей другої міжнародної науково-технічної конференції «Перспективні технології для забезпечення безпеки життєдіяльності та довголіття людини» Одеса: ОНМУ. – 2019 р., С. 38-41.

45. Коноплёв А.В., Селюкова Е.В. Определение предела выносливости деталей машин методом Про с учётом взаимосвязи между его параметрами // Детали машин: Респ. межвед. науч.-техн. сб. – 1988. – Вып. 40. – С. 102-104.

46. Коноплёв А.В., Стальниченко О.И. Проверка статистической гипотезы о законе распределения долговечностей до разрушения при стационарном режиме испытаний // Les problemes contemporains du technosphere et de la formation des cfdres d'ingenieurs: Тезисы доклада VI Международной научно-методической конференции. Джерба (Тунис). – 2012. – С. 153-157.

47. Коноплёв А.В., Стариков М.А. О корреляционных зависимостях между параметрами кривых сталости // Вісник ОНМУ. – 2008. – № 24. – С. 115-122.

48. Коноплёв А.В., Субботина М.И. Профилирование наружной поверхности втулки в соединении вал – втулка, нагруженном вращающим моментом. // The science: theory and practice: Тезисы международной научно-

практической конференции. Днепропетровск: Руснаучкнига. – 2005. – Т. 26. – С. 28-30.

49. Кравцов Т.Г. Применение нержавеющей электродной ленты // Морской флот. – 1969. – № 3. – С. 27.

50. Кравцов Т.Г., Волков Г.С. Широкослойная наплавка судовых валов ленточным электродом. – В сборнике «Передовой опыт сварки и наплавки в судоремонте». – ЦБНТИ ММФ. – 1977. – С. 44-46.

51. Кравцов Т.Г. и др. Выбор режимов наплавки судовых цилиндрических деталей ленточным электродом // Судоремонт флота рыбной промышленности. – 1974. – № 25. – С. 24-27.

52. Кравцов Т.Г., Стальниченко О.И., Олейник Н.В. Восстановление деталей наплавкой и оценка их прочности. – Киев: Вища школа, 1994. – 250 с.

53. Кравцов Т.Г., Рыжов Н.Ф., Соляник Н.Х. Сопротивление усталости моделей валов, наплавленных аустенитно-ферритной сталью // автоматическая сварка. – 1986. – № 11. – С. 14-19.

54. Красильников А.М., Коноплев А.В., Гайошко Л.А. Эффект выносливости или демпфирующие соединения, передачи, детали. – Одесса: Астропринт. – 2006. – 424 с.

55. Кудрявцев И.В. Внутренние напряжения как резерв прочности в машиностроении. М.: Машгиз, 1951. – 278 с.

56. Кудрявцев И.В. Наумченков Н.Е. усталость сварных конструкций. М.: Машиностроение. – 1976. – 270 с.

57. Кудрявцев И.В., Савина Н.М., Плишкин Н.Н. Усталостная прочность моделей гребных валов // Судостроение. – 1966. – № 4. – С. 43-46.

58. Лисевич В.И. Гребные валы с облицовками, наплавленными нержавеющей сталью // Судоремонт флота рыбной промышленности. – 1970. – № 13. – С. 19-25.

59. Луценко В.Т. Повреждаемость и ремонт гребных валов и дейдвудных устройств // Судостроение. – 1980. – № 7. – С. 39-42.

60. Миронов Л.И. Повышение усталостной прочности при восстановлении деталей автоматической наплавкой в углекислом газе // Сварочное производство. – 1978. – № 4. – С. 28-29.

61. Наумченков Н.Е. Масштабный эффект в усталостной прочности сварных соединений. – В сборнике: исследование конструкционной прочности машиностроительных материалов и деталей машин. – Труды ЦНИИТМАШ. – 1967. – вып. 109. – С. 56-73.

62. Новиков В.И., Авдеев В.А. Опыт наплавки судовых гребных валов в среде углекислого газа // Судоремонт флота рыбной промышленности. – 1972. – № 20. – С. 22-24.

63. Олейник В.Н. Определение характеристик усталости деталей машин расчётным путём // Детали машин: Респ. межвед. науч.-техн. сб. – 1986. – Вып. 43. – С. 100-106.

64. Олейник Н.В. Выносливость деталей машин. – К.: Техніка, 1979. – 200 с.

65. Олейник Н.В. Высокопроизводительные испытания на усталость и оценка индивидуальных характеристик сопротивления. – Одесса: Астропринт, 1999. – 182 с.

66. Олейник Н.В., Балацкий Л.Т., Бабинец В.И. Сопротивление усталости осей и валов в составе соединений с гарантированным натягом // Физ.-хим. механика материалов. – 1984. – № 4. – С. 100-102.

67. Олейник Н.В. Несущая способность элементов конструкций при циклическом нагружении. – К.: Наук. думка, 1986. – 240 с.

68. Олейник Н.В., Кибаков А.Г. Оперативная оценка сопротивления усталости материалов и деталей. – Одесса: Астропринт, 1998. – 142 с.

69. Олейник Н.В., Коноплёв А.В. Ускоренное определение характеристик сопротивления усталости материалов и деталей // Заводская лаборатория. – 1994. – № 11. – С. 54-57.

70. Олейник Н.В., Коноплёв А.В. Определение предела выносливости восстановленных при ремонте деталей методом ступенчатого нагружения //

Одес. ин-т инж. мор. флота. – Одесса, 1988. – 18 с. – Деп. в «Мортехинформреклама», № 858 – МФ 88.

71. Олейник В.Н., Коноплёв А.В. О связях между параметрами различных моделей кривых усталости // Надёжность и долговечность машин и сооружений: Респ. межвед. сб. – 1991. – Вып. 19. – С. 40-48.

72. Олейник Н.В., Какуевицкий В.А., Коноплёв А.В. Ускоренная оценка предела выносливости новых и восстановленных коленчатых валов // Заводская лаборатория. – 1991. – № 6. – С. 49-50.

73. Олейник Н.В., Коноплёв А.В., Кобаков А.Г. Методы ускоренного определения характеристик сопротивления усталости в практических приложениях. – Одесса: Астропринт, 2000. – 138 с.

74. Олейник Н.В., Курочкин Л.Я. Сопротивление усталости стальных конструкций в морской воде. – Одеса: Астропринт, 1999. – 166 с.

75. Олейник Н.В., Магденко А.Н., Скляр С.П. Сопротивление усталости материалов и деталей машин в коррозионных средах. – К.: Наук. думка, 1987. – 200 с.

76. Олійник М.В., Омельченко Ю.М., Немчук О.О. Конструкційна міцність деталей за результатами випробувань і розрахунків. – Одесса: Астропринт, 1999. – 152 с.

77. Олійник М.В., Севрюков В.В., Стальніченко О.І. Конструкційна міцність і відновлення деталей – Одесса: Аудиторія, 2000. – 192 с.

78. Олейник Н.В., Скляр С.П. Ускоренные испытания на усталость. – К.: Наук. думка, 1985. – 304 с.

79. Олійник М.В., Стальніченко О.І., Шемшур М.А. Визначення опору втомленості відновлених судових деталей. – Одеса: Астропринт, 1998. – 176 с.

80. Олейник Н.В., Степуренко Ю.В., Курочкин Л.Я. Сопротивление усталости конструкционных сталей в различных рабочих средах. – Одеса: Астропринт, 2000. – 278 с.

81. Олейник Н.В., Сторожев В.П. Ускоренные испытания восстановленных деталей судовых технических средств // Морской транспорт. Сер. «Судоремонт». 1991. – Вып. 5(636) – 24 с.

82. Плишкин Н.Н. Автоматическая наплавка судовых гребных валов. – Л.: ЛДНТП, 1970. – 20 с.

83. Плишкин Н.Н., Новиков Н.А. Наплавка гребного вала нержавеющей проволокой непосредственно по телу вала диаметром 520 мм. – В сборнике: Передовой опыт сварки и наплавки в судоремонте. – ЦБНТИ. – 1979. – С. 53-54.

84. Почтенный Е.К. Прогнозирование долговечности и диагностика усталости деталей машин. – Минск: Наука и техника, 1983. – 246 с.

85. Решетов Д.Н. Работоспособность и надёжность деталей машин. М.: Высшая школа. – 1974. – 206 с.

86. Росошанский М.С. Влияние электродного материала на усталостную прочность стали при наплавке в углекислом газе // Сварочное производство. – 1965. – № 6. – С. 11-13.

87. Рябов Б.А., Бишко М.Д. Связь между параметрами кривых усталости в логарифмических и полулогарифмических координатах // Детали машин: Респ. межвед. науч. – техн. сб. – 1990. – Вып. 50. – С. 57-60.

88. Ситник Б.А., Коньков Ю.Д., Бомко М.К. Выбор материалов для наплавки судовых гребных валов и баллеров. – В сборнике: Коррозионностойкие наплавки и их применение в промышленности. – ЛЦНТИ. – 1975. – С. 17-22

89. Стальниченко О.И., Иоргачёв Д.В., Иоргачёв В.Д. Восстановление деталей судов. К.: ДП НВЦ «Пріоритети», 2014. – 290 с.

90. Стальниченко О.И., Иоргачёв Д.В., Иоргачёв В.Д. Технологии восстановления и упрочнения деталей судов технического флота. – Одесса: Изд-во ОНМУ. – 2019. – 240 с.

91. Сторожев В.П., Коваленко Н.И., Стольниченко Е.Б. Выбор способа наплавки для восстановленных гребных валов // Одес. ин-т инж. мор. флота. – Одесса, 1993. – 12 с. – Деп. в РГАСНТИ, № 55.09.33.

92. Степнов М.Н. Статистические методы обработки результатов механических испытаний: Справочник. – М.: Машиностроение, 1985. – 232 с.

93. Сютъев А.Н., Вайнерман А.Е., Веселков В.Д. Опыт промышленного применения наплавки плазменной струёй с токоведущей присадочной проволокой медных сплавов и нержавеющей сталей // Л.: ЛДНТП. – 1973. – 20 с.

94. Трощено В.Т. Деформирование и разрушение металлов при многоцикловом нагружении // К.: Наукова думка, 1981 – 344 с.

95. Трощенко В.Т. Прочность металлов при переменных нагрузках. – Киев: Наук. Думка, 1978. – 174 с.

96. Шадричев В.А., Сидоркин В.И., Смирнов М.А. Влияние наплавки в углекислом газе на усталостную прочность восстановленных деталей // Сварочное производство. – 1974. - № 3. – С. 30-31.

97. Шадричев В.А., Смирнов М.А., Сидоркин В.И. Исследование внутренних остаточных напряжений в образцах из стали 45, наплавленных в углекислом газе проволокой 2Х13 // Сварочное производство. – 1973. – № 5. – С. 32 – 33.

98. Шумило А.Н., Кононова О.Н. Оценка циклической прочности деталей судовых машин по уравнениям подобия усталостного разрушения // Проблеми техніки. – 2009. – № 2. – С. 108-113.

99. Шумило О.М., Кононова О.М., Вітюк Л.С. Технічна експертиза зруйнування суднового гребного валу // Вісник ОНМУ. – 2018. – № 57. – С. 73-92.

100. Шумило О.М., Кононова О.М. Обґрунтований вибір матеріалу для деталей машин, що підлягають в експлуатації циклічному навантаженню // Тези доповідей I Міжнародної науково-практичної конференції «Європейська

наука XXI століття: Стратегія і перспективи розвитку – 2006». – Том 22. Технічні науки. – Дніпропетровськ: Наука і освіта, 2006. – С. 80-85.

101. Шумило О.М., Кононова О.М. Визначення запасів втомної міцності валів і осей в ймовірнісному аспекті // Основні результати наукової діяльності південного наукового центру. Збірний наукових праць Південного наукового центру – 2017. – С.180-192.

102. Шумило А.Н., Кононова О.Н. Внедрение аналитических методов расчета судовых конструкций и деталей по критерию сопротивления усталости // Тези доповідей Матеріали міжнародної науково-практичної конференції, присвяченої пам'яті професорів Фоміна Ю.Я. і Семенова В.С. Одеса: 2019. – С. 244-247.

103. Aviles R. Analisis de Fatiga en Maquinas. – Bilbao: Paraninfo, 2005. – 445 p.

104. Ailes A.S. Reclaiming propeller shafts by welding // The Syren and Shipp. – 1963. – № 9. – P. 9-17.

105. Brand A., Faure L. Accelerated fatigue tests of gear teeth. – In: Proc. Int. symp. gear. and power transm. (Tokyo, Aug. 30 – Sept. 3 1981). 1981. – S.1. S. a. vol. 1. – P. 413-420.

106. Dengel D., Harig H. Estimation of the fatigue limit by progressive lyincreasing load tests // Fatigue Eng. Mater. and struct. – 1980. – № 2. – P. 113-128.

107. Derringer George C. Consideration in single and multiple stress accelerated life testing. // J. Qual. Technol. – 1982. – № 3. – P. 130-134.

108. Gregor V. Lom klukoveho hriadele opraveneho zvaranim // Zvaranie. – 1965. - №6. – P. 188-190.

109. Grigorov O. V., Konoplev A. V. Individual fatigue limits definition using modernized Weibull equation parameters // Annals of the University of Petrosani, Mechanical Engineering. – № 13. – 2011. – P. 51-54.



110. Harry R. Joubert F., Goma A. Measuring the actual endurance limit of one specimen using a nondestructive method // *Trans. ASME, J. Eng. Mater. and Technol.* – 1981. – № 1. – P. 71-76.

111. Curney T.R., Smith C.C. Fatigue tests on 1,5 in thick transverse butt welds containing slag inclusions // *British Welding Journal.* – 1967. – v. 14. – № 1. – P. 17-38.

112. Daves M.G. Fatigue strength of ferric steel shafts reclaimed by welding and metal spraying // *British Welding Journal.* – 1963/ - № 8. – P. 418-427.

113. Golovan, A. & Rudenko, S., Gritsuk, I., Shakhov, A., Vychuzhanin, V., Mateichyk, V., Kononova, O., Kuric, I., Mllan Saga (2018) Improving the Process of Vehicle Units Diagnosis by Appiying Harmonic Analysis to the Processing of Discrete Signals. SAE Technical Paper 2018-01-1774, 2018, 2-11. - ISSN 0148-7191 / - DOI: 10.4271/2018-01-1774.

114. Масумото Исао, Томаки Корэаки, Иинума Кацухино. The effect of the welt deposited layer on the fatigue strength of a medium carbon steel // *Есецу гаккайси.* – 1970. – v. 39. – № 5. – P. 127-137.

115. Tribe E.J. Reclamation of propeller Shafts by submerged arc welding // *The Welder.* – 1962/ – v. 31. – №150/ P/ 74 – 84.

116. Yung-Li Lee, Jwo Pan, Richard Hathaway, Mark Barkey. Fatigue testing and analysis. – Elsevier. – 2005. – 402 p.

117. О.М. Shumylo, О.М. Kononova Assessment of average resource of ship's shafting // *Вісник ОНМУ.* – 2016. – № 48. – С. 173-180.

## ДОДАТОК А

Міністерство освіти і науки України  
Одеський національний морський університет



ЗАТВЕРДЖУЮ:

Проректор з наукової роботи

доц. Немчук О.О.

« 09 » 2019 г.

### МЕТОДИКА

**Визначення характеристик опору втомі на основі уточненого  
коефіцієнта відносної довговічності**

**(Розроблена в рамках виконання дисертаційної роботи)**

Розглянуто і схвалено на засіданні  
науково-технічної ради НИИФІПІ  
ОНМУ Протокол № « 8 » від  
« 14 » квітня 2019 г.

Одеса - 2019

Методика розроблена в Одеському національному морському університеті ст. викладачем Коновою О.М.

## **1. Загальні положення**

1.1. Справжню методику слід застосовувати для проведення порівняльних випробувань на опір втомі моделей нових і відновлених суднових гребних валів при:

- симетричному згині моделей, що обертаються;
- нормальній температурі навколишнього середовища 15 - 25<sup>0</sup>С;
- різної механічної, термічної і термомеханічної обробці;
- випробуванні моделей, як з облицюванням, так і без нього;

1.2. Методика дозволяє прискорено визначати довговічності до руйнування при будь-якому значенні напружень, а також індивідуальні значення границі витривалості відновлених моделей гребних валів на основі уточненого коефіцієнта відносної довговічності

## **2. Терміни, визначення та позначення**

2.1. Терміни, визначення та позначення, які є загальними для всіх методів випробувань на опір втомі згідно ДСУ 2444 - 94 «Опір втомі (терміни та визначення)».

2.2. Позначення величин, необхідних для визначення довговічності до руйнування моделей відновлених гребних валів наведені в таблиці.

Найменування величини	Позначення	Одиниця виміру	Примітка
Середнємовірне число циклів до руйнування на вихідній кривій втоми	$N_u$	Цикл.	Рис.1
Число циклів до руйнування гребних валів	$N_1, N_2$	Цикл.	Рис.1
Абсциса точки перелому кривої втоми	$\lg N_{GC}$	-	Рис.1
Границя витривалості для вихідних моделей гребних валів	$\sigma_u$	МПа	Рис.1
Напруження, при яких проводяться випробування моделей	$\sigma_{12}$	МПа	Рис.1
Зміщення точки перетину кривих втоми уздовж осі абсцис	$\Delta \lg N$	МПа	Рис.1
Зміщення експериментальних точок уздовж осі ординат для побудови кривої втоми відновлених моделей гребних валів	$\Delta \sigma$	МПа	Рис.2

2.3. Для моделей з облицюванням всі вказані в таблиці напруження виражаються в номінальних величинах.

### 3. Форма, розміри і виготовлення зразків і моделей

3.1. Форма, розміри і вимоги до технологічних процесів виготовлення стандартних зразків згідно ГОСТ 2860 - 85.

3.2. Вимоги до форми, розмірів і виготовлення спеціальних моделей гребних валів визначаються завданнями досліджень.

### 4. Проведення випробувань

4.1. На 4 - 5 рівнях напружень, що відповідають зоні багатоциклової втоми, випробовують по 4 - 5 моделей.

4.2. Випробовуюють одну модель, що піддана операції відновлення і фіксують довговічність до руйнування.

4.3. Частота циклів і критерії руйнування моделей - згідно ГОСТ 2860 – 85.

## 5. Обробка результатів випробувань

5.1. Будують середніймовірну криву втоми для моделей, виготовлених без операцій відновлення, і визначають її параметри  $m_{C1}$  і  $C_{C1}$

5.2. Шляхом зміщення експериментальних точок вихідної кривої втоми на величину  $\Delta\sigma$  (Рис. 2) визначають параметри  $m_{C2}$  и  $C_{C2}$

5.3. Визначають коефіцієнт відносної довговічності  $k_\gamma$  за формулою

$$k_\gamma = \frac{\lg N_1 - \lg N_2}{\lg N_2 - \frac{m_{C1}C_{C2} - m_{C2}C_{C1}}{m_{C1} - m_{C2}}}. \quad (1)$$

5.4. У разі відсутності загального діапазону напружень в області багатоциклової втоми визначають границю витривалості за формулою

$$\sigma_{R2} = 10^{\frac{C_H - k_\gamma(\lg N_{G2} - \Delta \lg N) - \lg N_{G2}}{m_{C1}}}. \quad (2)$$

5.5. Проводять порівняння довговічностей на будь-якому з рівнів напружень або порівнюють границі витривалості вихідних і відновлених моделей гребних валів (у разі відсутності загального діапазону напружень в області багатоциклової втоми).

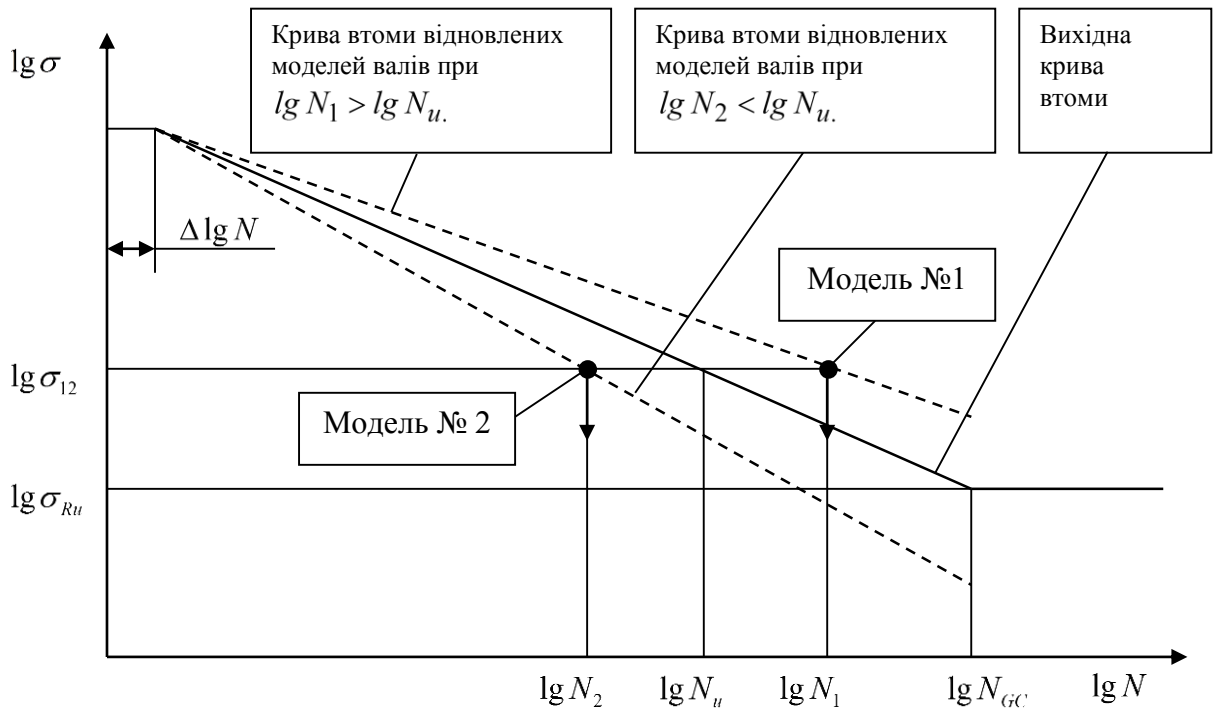


Рис. 1 Схема можливого взаємного розташування похилих ділянок вихідної кривої і кривих втоми моделей відновлених гребних валів

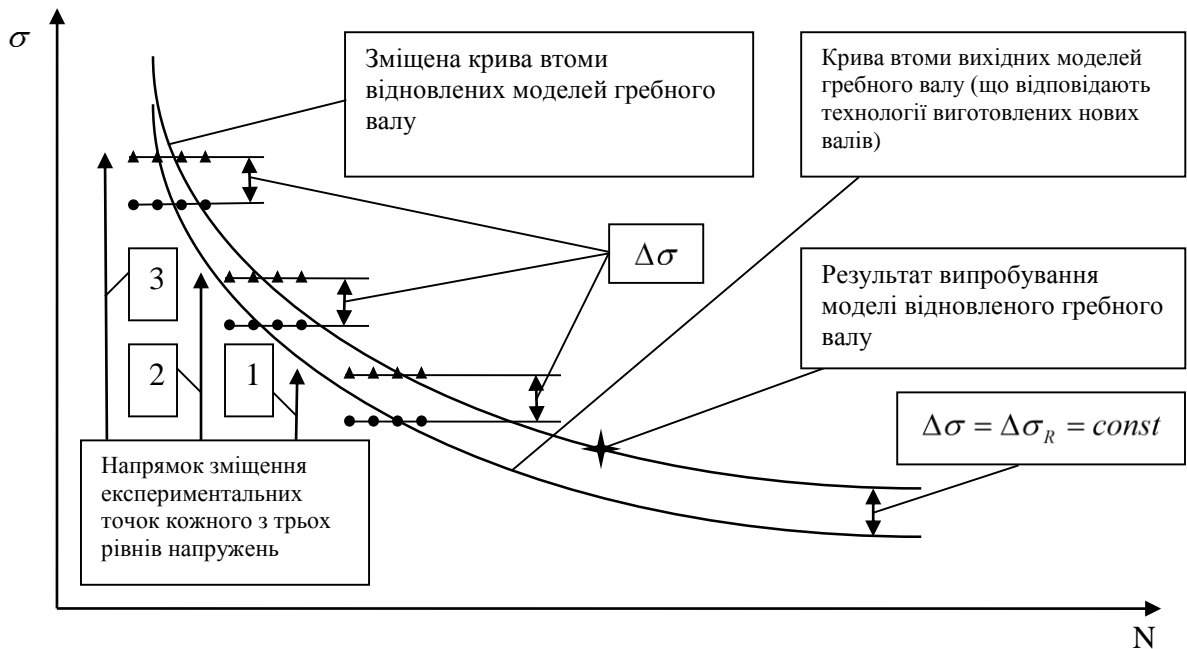


Рис. 2. Схема до визначення параметрів  $m_{c2}$  і  $C_{c2}$  зміщеної кривої втоми для моделей відновленого гребного валу

## ДОДАТОК Б

ЗАТВЕРДЖУЮ  
Проректор з наукової роботи  
Одеського національного морського університету  
к.т.н., доц. О.О.Немчук  
« 25 » 09 2019р.



**АКТ ВИКОРИСТАННЯ  
РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЙНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ  
КОНООВОЇ ОЛЬГИ МИКОЛАЇВНИ  
В НАВЧАЛЬНОМУ ПРОЦЕСІ  
ОДЕСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО МОРСЬКОГО УНІВЕРСИТЕТУ**

Цей акт підтверджує, що результати дисертаційного дослідження старшого викладача кафедри «Машинознавство» Конової Ольги Миколаївни, яке представлено до захисту на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.22.20 - Експлуатація та ремонт засобів транспорту, використовуються при проведенні лекційних і практичних занять з дисциплін «Технічне обслуговування і ремонт суднових технічних засобів», «Організація та технологія судноремонту» в процесі підготовки бакалаврів і в дипломному проєтуванні магістрів Навчально-наукового інституту морського флоту за спеціальністю 271 Річковий та морський транспорт.

Узгоджено  
директор навчально-наукового  
інституту морського флоту  
к.т.н., доцент



О.М. Шумило

Завідувач кафедри ТОРС  
к.т.н., доцент



Ю.О. Никифоров

## ДОДАТОК В



ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор з наукової роботи

Одеського національного морського університету

к.т.н., доц. О.О.Немчук

« 05 » 09 2019р.

## Довідка

Про використання в навчальному процесі Одеського національного морського університету (м.Одеса) результатів і розробок одержаних в процесі виконання дисертаційного дослідження Кононової Ольги Миколаївни, на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.22.20 - Експлуатація та ремонт засобів транспорту.

Отримані результати наукових досліджень здобувача старшого викладача кафедри «Машинознавство» Кононової О.М. використовуються при викладанні дисциплін «Прискорені методи випробувань деталей машин на опір втомі», «Експериментальні методи випробувань деталей машин на опір втомі» при підготовці докторів філософії (PhD) за спеціальністю 131 Прикладна механіка.

Декан факультету портового інжинірингу  
к.т.н., доцент

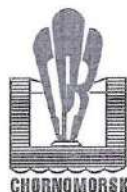
О.Г. Кібаков



## ДОДАТОК Г

**ПРИВАТНЕ АКЦІОНЕРНЕ  
ТОВАРИСТВО «ІСРЗ»**

Україна, 68093, Одеська обл., м. Чорноморськ,  
с. Малодолінське, вул. Космонавтів, 59-Б  
Ідентифікаційний код 32333962  
Тел.: +38 048 712 65 65  
Факс: +38 048 717 58 70  
E-mail: market@isrz.net  
www.isrz.net


**PRIVATE STOCK COMPANY  
«ISRY»**

Ukraine, 68093, Odesa region, Chornomorsk,  
Malodolynske village, 59-B, Kosmonavtiv Street  
Identification code 32333962  
Tel.: +38 048 712 65 65  
Fax: +38 048 717 58 70  
E-mail: market@isrz.net  
www.isrz.net

## АКТ

використання результатів дисертаційної роботи О.М. Конової  
«Метод оперативної оцінки опору втомі відновлених суднових гребних валів» у  
виробничу діяльність

ПРАТ «ІСРЗ», в особі заступника голови правління Жолтикова Є.І., даним актом підтверджує, що при виборі технології відновлення зношеної поверхні гребного валу, як складової технологічного процесу ремонтних робіт суднового валопроводу, використання методики визначення характеристик опору втомі на основі уточненого коефіцієнта відносної довговічності, що розроблена О.М. Коновою в рамках дисертаційної роботи є ефективним.

Застосування методики для проведення порівняльних випробувань на опір втомі моделей нових та відновлених гребних валів дозволяє: прискорено визначати довговічності до руйнування при будь якому значенні напружень в області багатоциклової втомі, а також індивідуальні значення границі витривалості; підвищити точність оцінки довговічності до 8%, істотно скоротити час випробувань та мінімізувати кількість випробовуваних об'єктів (моделей).

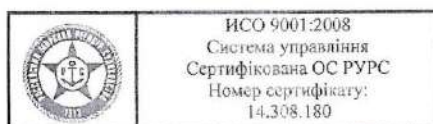
Запропонований метод, заснований на уточненому коефіцієнті відносної довговічності, дозволяє оперативно оцінювати втомну міцність відновлених моделей і, таким чином, здійснювати вибір найбільш раціональних технологій ремонту суднових гребних валів.

Заступник голови правління  
ПРАТ «ІСРЗ»,



Жолтиков Є.І.

«31» 07 2019 р.



## ДОДАТОК Д



# TRUST SHIP SERVICE

УКРАЇНА

ОДЕССА

КОД ЄДРПОУ 42337625 ІПН 423376215540 № СВ. ПДВ 1815544500166

e-mail: TSService.ODESSA@gmail.com МОБ.ТЕЛ.: +38 (095) (098) 474 88 77

## АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

результатів дисертаційної роботи О.М. Конової

« МЕТОД ОПЕРАТИВНОЇ ОЦІНКИ ОПОРУ ВТОМІ ВІДНОВЛЕНИХ  
СУДНОВИХ ГРЕБНИХ ВАЛІВ »

Даний акт підтверджує, що підприємству «TRUST SHIP SERVICE» передана для впровадження методика оперативної оцінки опору втомі відновлених суднових гребних валів, яка розроблена О.М. Коновою в рамках виконання дисертаційної роботи. Методика дозволяє прискорено визначати довговічності до руйнування при будь-якому значенні напружень, а також індивідуальні значення границі витривалості відновлених моделей гребних валів на основі уточненого коефіцієнта відносної довговічності.

Результати даних досліджень використовуються при порівняльних випробуваннях і контролі якості відновлення гребних валів методом наплавки.

Даний акт не є підставою для отримання будь – яких фінансових коштів з фонду виробництва.

Директор

 О.В. Жураковський

« 09 » вересня 2019 р.



## ДОДАТОК Е

ТОВ «ГРАНІ»

GRANI LTD



№ 56/01

від «20» вересня 2019р

## АКТ

**використання результатів дисертаційної роботи О.М. Конової  
«Метод оперативної оцінки опору втомі відновлених суднових гребних валів»**

Результати дисертаційної роботи Конової Ольги Миколаївни були впроваджені в суднобудівній компанії ТОВ «ГРАНІ» для прискореного експериментального визначення довговічності до руйнування відновлених гребних валів і відпрацювання нових технологій їх ремонту.

Методика передбачає проведення порівняльних випробувань моделей на стандартному випробувальному обладнанні. Визначення довговічності на основі уточненого коефіцієнта відносної довговічності дає можливість оперативно та з високою точністю здійснювати порівняльну оцінку опору втомі моделей на основі результатів їх випробувань.

Даний акт не є підставою для отримання грошових коштів з фінансового фонду підприємства.

Директор



В.С.Боголюбов

65067, м. Одеса, Французький бульвар, 52  
Тел/факс: (38-048) 728-79-69 (5-лін.)  
Телекс: 232105 GRANT UX  
E-mail: [grani@te.net.ua](mailto:grani@te.net.ua); [grancrew@te.net.ua](mailto:grancrew@te.net.ua)



52, blv. Frantsuzskiy, 65067, Odessa, Ukraine  
Tel/Fax +380 48 7287969 (5-line)  
Telex 232105 GRANT UX  
E-Mail [grani@te.net.ua](mailto:grani@te.net.ua); [grancrew@te.net.ua](mailto:grancrew@te.net.ua)