

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**

**КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БУДІВНИЦТВА І  
АРХІТЕКТУРИ**

**Порівняльні дослідження працездатності деталей  
будівельних машин методом фізичного моделювання**

Методичні вказівки

до виконання лабораторно-дослідницької роботи з курсу «Експлуатація і ремонт машин» для студентів спеціальності „Підйомно-транспортні, будівельні, дорожні, меліоративні машини і обладнання”

КИЇВ 2010

Укладачі: В.І.Лесько, доцент  
І.В.Космінський І.В., асистент

Рецензент: А.Т.Свідерський, к.т.н., доцент

Відповідальний за випуск: І.І.Назаренко, д.т.н., професор, зав.  
кафедрою машин та обладнання технологічних процесів.

Затверджено на засіданні кафедри машин та обладнання  
технологічних процесів, протокол № від .2010 року.

**Порівняльні дослідження** працездатності деталей будівельних машин методом фізичного моделювання. Методичні вказівки до виконання лабораторно-дослідницької роботи з курсу «Експлуатація і ремонт машин»/ Укладачі: В.І.Лесько, І.В.Космінський – К.:КНУБА, 2010. – 32с.

Розглянуто методи дослідження працездатності нових і відновлених деталей будівельних машин методом фізичного моделювання на лабораторних машинах

Призначено для студентів денної та заочної форм навчання за напрямками освітньої підготовки 6.050502 “Інженерна механіка” спеціальності „Підйомно-транспортні, будівельні, дорожні, меліоративні машини і обладнання”

## Загальні вказівки

Мета виконання студентами лабораторно-дослідницької роботи з курсу «Експлуатація і ремонт машин»:

- вивчити методи дослідження працездатності нових і відновлених деталей будівельних машин;
- закріпити знання про фізичний зміст процесів руйнування від втоми та зношування деталей машин;
- вивчити відповідні методи випробування деталей машин на втому та зносостійкість;
- вивчити конструкцію та принцип роботи лабораторних машин для випробувань на втому та зносостійкість;
- набути навичок роботи на випробувальних машинах;
- вивчити методичку математичної обробки експериментальних даних.

-

До початку занять студент повинен ознайомитися з даними методичними вказівками, з відповідними розділами конспекту лекцій з даної дисципліни, з додатковою літературою, яку рекомендує викладач, і скласти залік. Під час ознайомлення з методичними вказівками слід звертати увагу на вимоги техніки безпеки.

Робота в лабораторії виконується студентами самостійно під контролем викладача та учбового майстра.

Дана робота включає в себе порівняльні лабораторні дослідження нових і відновлених різними металопокриттями деталей, вибір з декількох конкуруючих варіантів технологічних процесів відновлення деталей оптимального, що забезпечить вимоги до працездатності, найбільшу довговічність і найменшу собівартість відновлення деталі. Дослідження виконуються методом фізичного моделювання на лабораторних машинах.

# 1. Методи дослідження працездатності нових і відремонтованих деталей машин

## 1.1. Методи порівняльної оцінки працездатності нових і відремонтованих деталей будівельних машин.

Під час вибору раціонального способу відремонтування зношених деталей будівельних машин доводиться розглядати ряд конкуруючих технологічних процесів, які характеризуються різною продуктивністю і собівартістю відремонтування і забезпечують різне поєднання властивостей відремонтованих деталей: твердості поверхневого шару, зносостійкості, пластичності, стійкості до корозії, опору втоми і т. і.

Практика експлуатації і ремонту будівельних машин свідчить, що найчастіше причиною поломки деталей машин є неприпустиме зношення або руйнування від втоми. Таким чином, під час вибору способу відремонтування деталей будівельних машин інженер технолог повинен намагатися забезпечити довговічність відремонтованої деталі, а точніше — її високу зносостійкість і опір втоми. Необхідно також враховувати продуктивність і собівартість обраного способу.

Для оцінки працездатності відремонтованих деталей використовують ряд методів випробувань, в тому числі *фізичне моделювання*, коли замість реальних машин і деталей досліджують спеціальні зразки (фізичні моделі деталей), матеріал і термообробка яких відповідають новим і відремонтованим деталям, а форма і геометричні розміри відрізняються.

Такі випробування проводяться в лабораторних (камерних) умовах на універсальних машинах для випробувань на втому та зносостійкість. Перевага таких випробувань – їх простота, зручність й економічність, а також можливість випробування різноманітних зразків в ідентичних умовах і невелика тривалість у порівнянні з іншими видами випробувань. Недоліком їх є необхідність врахування масштабного фактору і істотна відмінність умов лабораторних від реальних.

*Стендові випробування* – інший різновид лабораторних випробувань. Деталь випробовується на спеціальному стенді, як правило, у складі складальної одиниці, до якої вона належить. На стенді створюються навантаження й інші умови, що імітують реальні умови роботи. Стендові випробування найбільш наближені до реальних, але для їх проведення необхідні спеціальні стенди, як правило вони універсальні.

*Полігонні випробування* максимально наближені до реальних умов експлуатації — на обмеженій території створюють досить різноманітний рельєф місцевості, що відображує різноманітність умов, в яких працюють машини. Дані випробування можуть проводитися цілодобово, що суттєво скорочує їх тривалість у порівнянні з експлуатаційними випробуваннями. Однак при цьому машини знаходяться під впливом ряду випадкових факторів, що викликані погодними умовами, кваліфікацією оператора, якістю

виготовлення або ремонту машин, що випробовуються і т.д. Для усунення впливу цих факторів і отримання достовірних результатів доводиться збільшувати число машин, що одночасно випробовуються до 25 і більше одиниць. При цьому збільшується достовірність результатів випробувань, але значно зростає їх вартість.

Експериментальні дослідження завершуються *експлуатаційними випробуваннями*, які проводяться на будівельних машинах в реальних умовах експлуатації. При цьому на машини встановлюється додаткова контрольно-вимірвальна та реєстраційна апаратура, що дозволяє фіксувати навантаження в окремих частинам машини, режим і техніко-експлуатаційні показники роботи.

Експлуатаційні випробування проводять в умовах, коли випадкових факторів більше, ніж полігонних, тому тут одночасно повинна випробовуватись велика партія машин (25 одиниць і більше). Ці випробування, як правило, підтверджують результати попередніх етапів експериментальних випробувань, тому за допомогою лабораторних досліджень зносостійкості та опору втомі зразків з різними металопокриттями, що застосовуються для відновлення зношених деталей, можна швидко і при невеликих витратах обрати такі способи відновлення деталей, що забезпечують їм необхідну працездатність та довговічність.

## **1.2. Методика випробувань деталей будівельних машин на втому.**

*Руйнування від втоми*, що є результатом дії знакозмінних (циклічних) навантажень (*рис.1*), — один з розповсюджених видів руйнування деталей будівельних машин.

Руйнування від втоми зазнають деталі, що сприймають знакозмінні навантаження — колінчаті вали, вали реверсу лебідок, вертикальні вали механізму повороту екскаваторів, зубчаті колеса та ін.

Важливою особливістю процесу руйнування від втоми є те, що воно відбувається після певного числа циклів напружень, номінальна величина яких не перевищує статичної межі пружності. Тому у випадку циклічного навантаження деталей для розрахунку їх геометричних розмірів не можна використовувати характеристики міцності, які отримані при статичних випробуваннях, наприклад, межу текучості або тимчасовий опір. Необхідно проводити випробування на втому, під час яких визначають кількісні характеристики опору втомі: ***межа витривалості, циклічна довговічність, криву втоми, втомлювальну довговічність і т.д.***

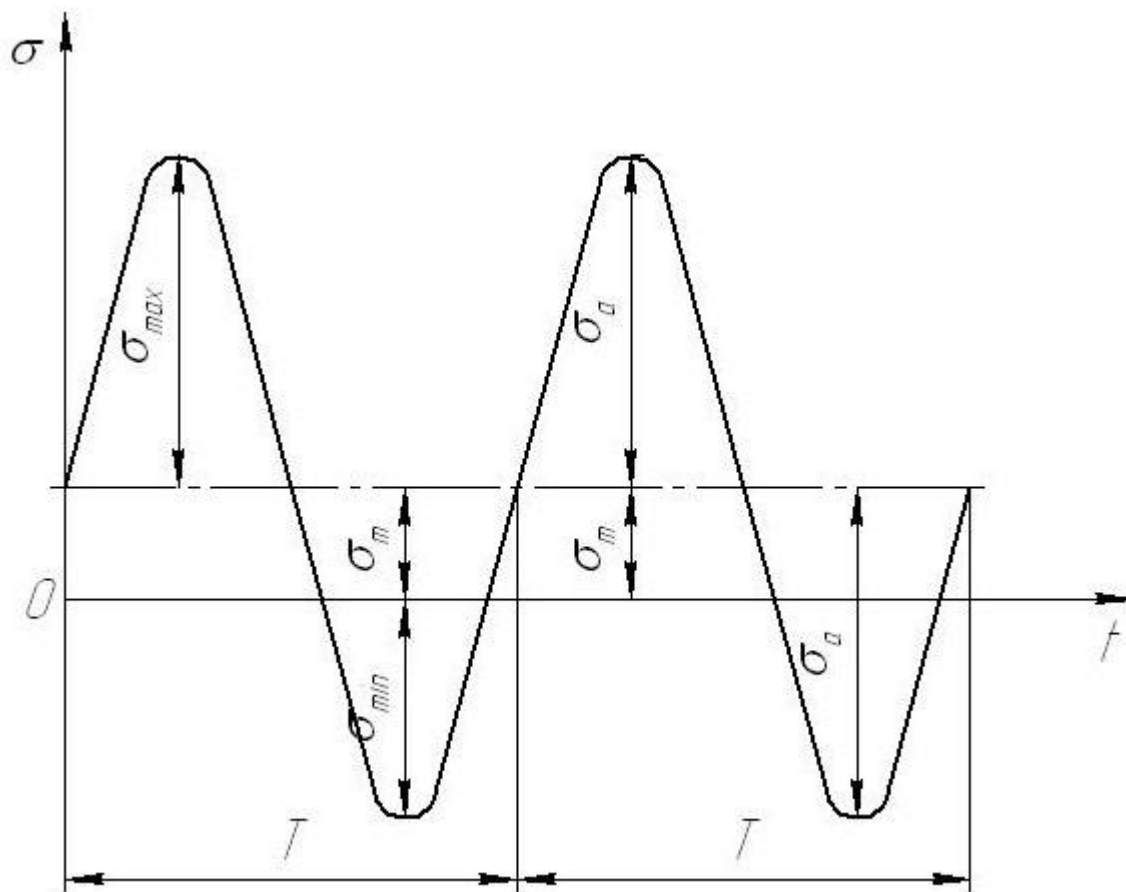


Рис. 1 – Цикл напружень:  $\sigma$  – напруження;  $t$  – час;  $\sigma_{max}$  – максимальне напруження циклу;  $\sigma_{min}$  – мінімальне напруження циклу;  $\sigma_m$  – середнє напруження циклу;  $\sigma_a$  – амплітуда напруження циклу;  $T$  – період циклу.

Основна мета випробувань на втому — визначити межу витривалості та циклічної довговічності зразків. За результатами досліджень на втому може бути побудована **крива втоми** — графік, що характеризує залежність між максимальними напруженнями (деформаціями) або амплітудами циклу та циклічною довговічністю однакових зразків.

Криву втоми будують у напівлогарифмічних координатах ( $\sigma_{max}$ ,  $\lg N$  або  $\sigma_a$ ,  $\lg N$ ) або в подвійних логарифмічних координатах ( $\lg \sigma_{max}$ ,  $\lg N$  або  $\lg \sigma_a$ ,  $\lg N$ ). Крива втоми може бути побудована [1] і в координатах  $\sigma - N$  (рис. 2).

Схему навантаження під час випробувань на втому обирають таким чином, щоб створити в зразках напружений стан, характерний для експлуатаційних умов роботи деталей і відтворити злом експлуатаційного вигляду. Основними типами навантаження є: **чистий згин при обертанні** (рис. 3, а) і **поперечний згин при обертанні** консольних круглих зразків (рис. 3, б).

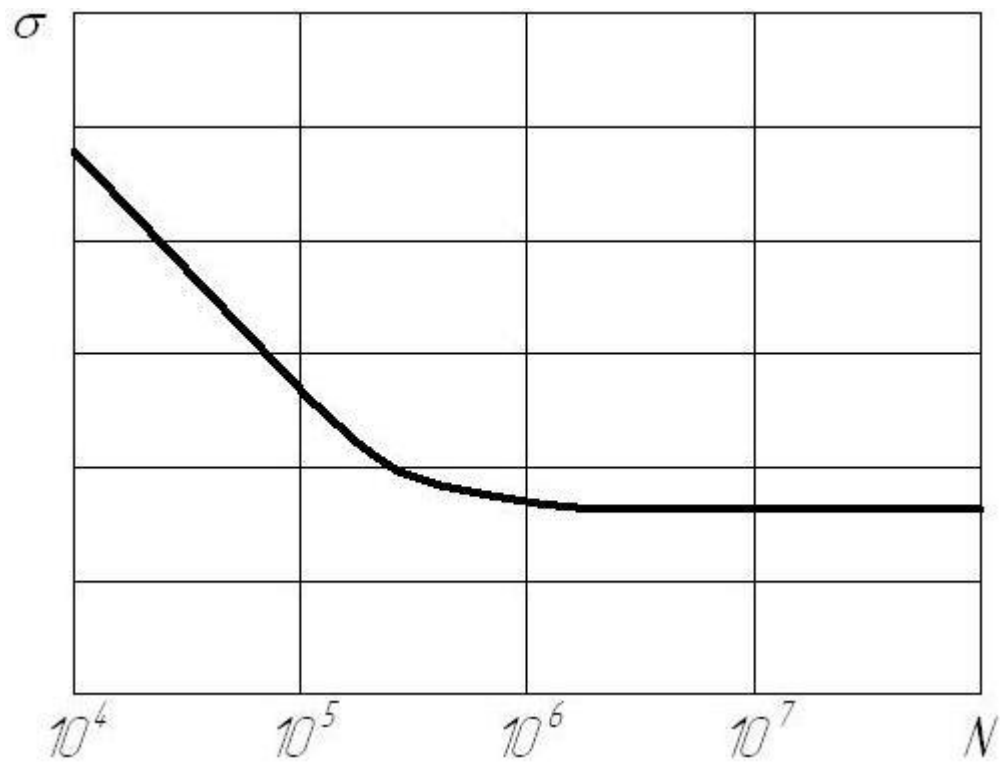
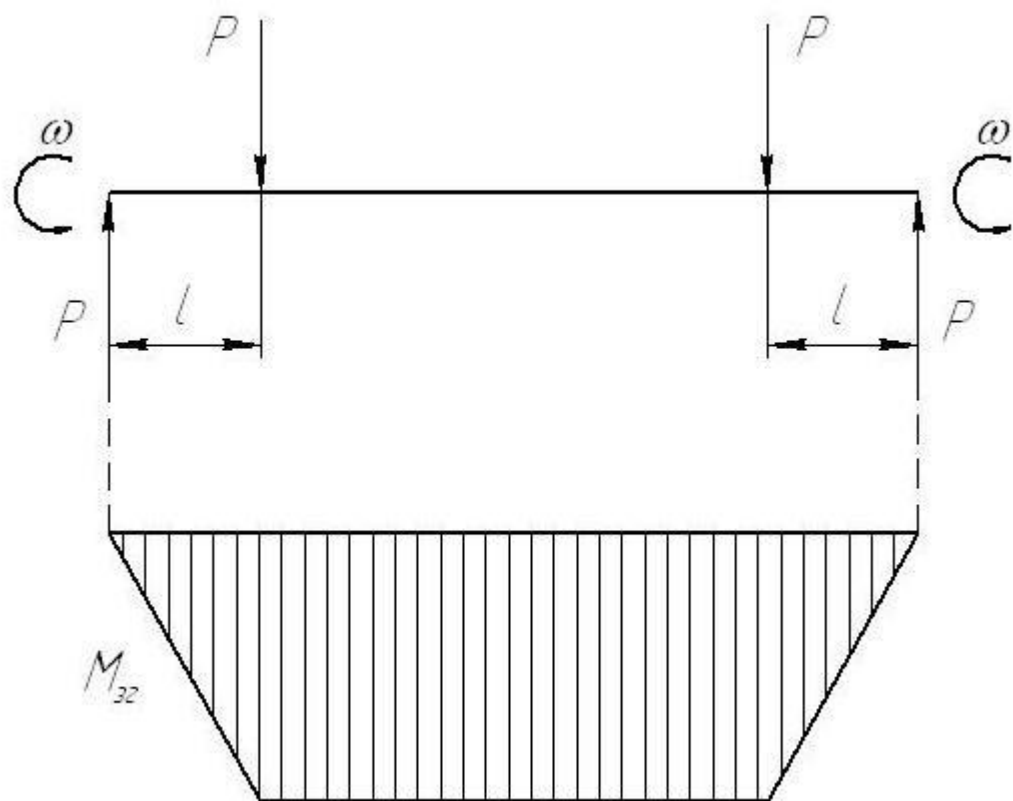
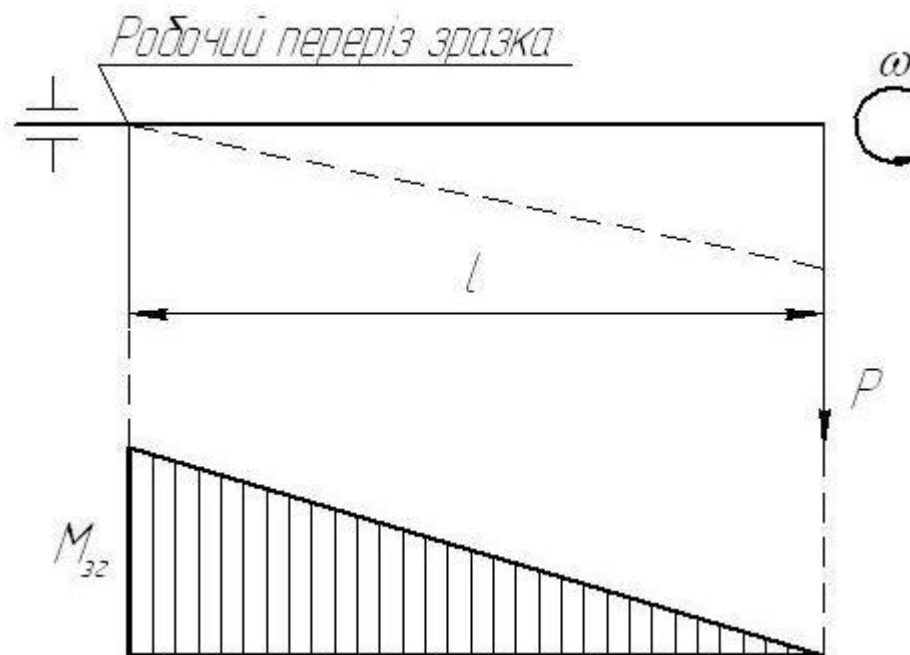


Рис. 2 — Крива втоми



*a*



б

Рис. 3 — Схема напруження і епюри згинальних моментів під час випробування зразків на втому: *a* – чистий згин при обертанні круглого зразка; *б* – поперечний згин при обертанні консольного круглого зразка.

Згинальний момент  $M_{32} = P \cdot l$ ; номінальне напруження  $\sigma_{32} = \frac{M_{32}}{W}$ ; осьовий момент опору розрахункового поперечного перерізу зразка  $W = \frac{\pi \cdot d^3}{32}$ .

Для порівняльних лабораторних випробувань на втому відбирають декілька серій зразків матеріал і термообробка першої (еталонної) серії зразків повинні відповідати технічним умовам на нову деталь. Наступні серії зразків виготовляють у відповідності до прийнятих конкуруючих методів відновлення деталей. Наприклад, друга серія — зразки з металопокриттями, отримані автоматичним дуговим наплавленням дротом Св-08А та флюсом АНК-18, третя серія – з покриттями, отриманими електрохімічним залізненням і т.д.

Зразки кожної серії для порівняльних випробувань повинні виготовлятися в ідентичних умовах (параметри процесів металопокриття, механічної обробки та ін.). Кожна серія повинна складатися з 10-16 однакових зразків. База випробувань для чорних металів і сплавів приймається рівною  $10 \cdot 10^6$  циклів.



Обробку результатів випробувань необхідно проводити з урахуванням випадкового характеру показників опору втомі деталей і зразків, зумовленого кількома причинами:

- структурною неоднорідністю основного металу і металопокриття (різні розміри, форма і орієнтація зерен, викривлення кристалічної ґратки, мікро- і макроскопічні вкраплення;

- відхиленням в режимах механічної і термічної обробки під час виготовлення зразків і деталей, через які можуть змінюватися характеристики окремих зразків (шорсткість поверхні, розміри, твердість) або їх поверхневих шарів;

- впливом умов випробувань (різні точності встановлення зразків при затисканні, під час призначення навантажень, вплив конструктивних особливостей випробувальної машини).

У зв'язку з цим випробування на втому неминуче пов'язані із значним розсіюванням результатів. Циклічна довговічність зразка під час випробувань на втому – величина випадкова, а залежність між циклічною довговічністю і напруженням не функціональна, а кореляційна. Задача обробки результатів полягає в аналітичному виведенні шуканої залежності між напруженням і циклічною довговічністю, тобто у підборі формули кривої втоми, що описує результат експерименту.

Багатьма експериментальними дослідженнями встановлений загальний вигляд залежності між циклічною довговічністю і напруженням зразка:

$$\sigma^m N = const \quad (1)$$

або

$$m \lg \sigma + \lg N = const, \quad (2)$$

де  $m$  – показник степеня, що характеризує нахил лівої гілки кривої втоми до осі циклів, яка в координатах  $\lg \sigma - \lg N$  має вигляд прямої; величина  $m$  залежить від складу матеріалу, режиму термообробки і виду напруженого стану;  $\sigma$  – напруження циклу ( $H/m^2$ ;  $кг/мм^2$ );  $N$  – циклічна довговічність (число циклів).

Рівняння (2) є лінійним рівнянням виду:

$$y = ax + b, \quad (3)$$

у якому функція  $y$  залежить не тільки від аргументу  $x$ , але й від параметрів  $a$  і  $b$ ;

$$y = f(x; a; b). \quad (4)$$

Приймаючи у формулі (2) у якості функцій логарифм циклічної довговічності  $\lg N$ , а аргументом – логарифм напруження зразка і позначивши параметри рівняння через  $a$  і  $b$ , отримуємо рівняння кривої втоми:

$$\lg N = a \lg \sigma + b. \quad (5)$$

Завдання зводиться до визначення параметрів  $a$  і  $b$  у той час, коли вигляд формули відомий.

Оцінки параметрів  $a$  і  $b$  можна отримати *методом найменших квадратів* [3] і методом Митропольського–Шашина, що дозволяє статистичною обробкою малої кількості величин отримати кореляційну залежність між циклічною довговічністю і напруженням зразків з оцінкою розсіювання результатів випробувань.

Суть методу найменших квадратів під час визначення кривої втоми зводиться до того, що шукані параметри з формули (5) повинні визначатися з умови, що сума квадратів відхилень виміряних значень функцій від теоретичних (або розрахункових) приймала найменше значення:

$$S = \sum_{i=1}^n (\lg N_e - \lg N_T)^2 = \sum_{i=1}^n [\lg N_e - f(\lg \sigma; a; b)]^2 \longrightarrow \min,$$

де  $N_e$  – значення циклічної довговічності, отримане експериментальним шляхом;  $N_T$  – значення циклічної довговічності за теоретичним розподілом (експериментальна точка по кривій, що вирівнює). Знаходження параметрів  $a$  і  $b$ , за яких функція  $S$  досягає мінімуму, зводиться до рішення системи рівнянь:

$$\frac{dS}{da} = 0, \quad \frac{dS}{db} = 0. \quad (7)$$

Оскільки в емпіричну формулу (5) параметри входять лінійно, то система рівнянь (7) також буде лінійною.

Метод найменших квадратів дозволяє перетворювати загальний вигляд формули кривої втоми (5) в рівняння зв'язку або лінію регресії, що пов'язує циклічну довговічність і напруження:

$$\lg N_i = \lg \bar{N} + r \frac{S_N}{S_\sigma} \lg \sigma_i - r \frac{S_N}{S_\sigma} \lg \bar{\sigma}, \quad (8)$$

де  $\lg N_i$  – логарифм циклічної довговічності при  $i$ -му випробуванні;  $i$  – номер випробувального зразку,  $i = 1, 2, \dots, n$ ;  $n$  – кількість випробувань;  $\lg \bar{N}$  – математичне очікування (перший початковий момент) величин  $\lg N_i$ ;  $r$  – коефіцієнт кореляції, що характеризує ступінь щільності лінійної залежності

між випадковими величинами  $N$  і  $\sigma$ . При  $r = 0$  випадкові величини називаються некорельованими, при  $r = \pm 1$  величини зв'язані точною лінійною залежністю. В загальному випадку  $-1 \leq r \leq +1$ ;  $S_N$  і  $S_\sigma$  – середньоквадратичне відхилення експериментальних значень випадкових величин  $N$  і  $\sigma$ ;  $\lg \sigma_i$  - логарифм напруження зразка під час  $i$ -го випробування;  $\lg \bar{\sigma}$  - математичне очікування (перший початковий момент величини  $\lg \sigma_i$  .

В рівнянні (8) прийнято

$$a = r \frac{S_N}{S_\sigma} \quad (9)$$

$$b = \lg \bar{N} - r \frac{S_N}{S_\sigma} \lg \bar{\sigma} . \quad (10)$$

Під час побудови кривої втоми в подвійних логарифмічних координатах значення коефіцієнта наближеної регресії  $a$  визначає показник нахилу кривої втоми до осі циклів.

Розрахунок параметрів кривої втоми необхідно виконувати за наступними формулами теорії імовірності і математичної статистики:

$$\lg \bar{N} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \lg N_i \quad (11)$$

$$\lg \bar{\sigma} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \lg \sigma_i \quad (12)$$

$$S_N = \sqrt{D_N} \quad (13)$$

$$S_\sigma = \sqrt{D_\sigma} , \quad (14)$$

де  $D_N$  і  $D_\sigma$  – емпіричні дисперсії (або емпіричні центральні моменти другого порядку) випадкових величин  $N$  і  $\sigma$ .

$$D_N = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\lg N_i - \lg \bar{N})^2 \quad (15)$$

$$D_\sigma = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\lg \sigma_i - \lg \bar{\sigma})^2 . \quad (16)$$

При обмеженому об'ємі експерименту ( $n \leq 30$ ) визначення емпіричних дисперсій за формулами (15) і (16) призводить до систематичної похибки. З метою усунення похибок в ці формули вводиться поправочний множник  $\frac{n}{n-1}$  (поправка Бесселя):

$$D_N = \frac{n}{n-1} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\lg N_i - \lg \bar{N})^2 \quad (17)$$

$$D_\sigma = \frac{n}{n-1} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\lg \sigma_i - \lg \bar{\sigma})^2 \quad (18)$$

Коефіцієнт кореляції визначають за формулою

$$r = \frac{K_{N\sigma}}{S_N S_\sigma}, \quad (20)$$

де  $K_{N\sigma}$  – змішаний перший центральний момент, який з урахуванням Бесселя визначається за формулою

$$K_{N\sigma} = \frac{n}{n-1} \sum_{i=1}^n (\lg N_i - \lg \bar{N})(\lg \sigma_i - \lg \bar{\sigma}). \quad (20)$$

Розрахунок рівняння кривої втомі рекомендується виконувати за блок-схемою алгоритма (рис. 4).

Примітка: результати розрахунків по блокам №2-8 вносять в таблицю (див. дод.4).

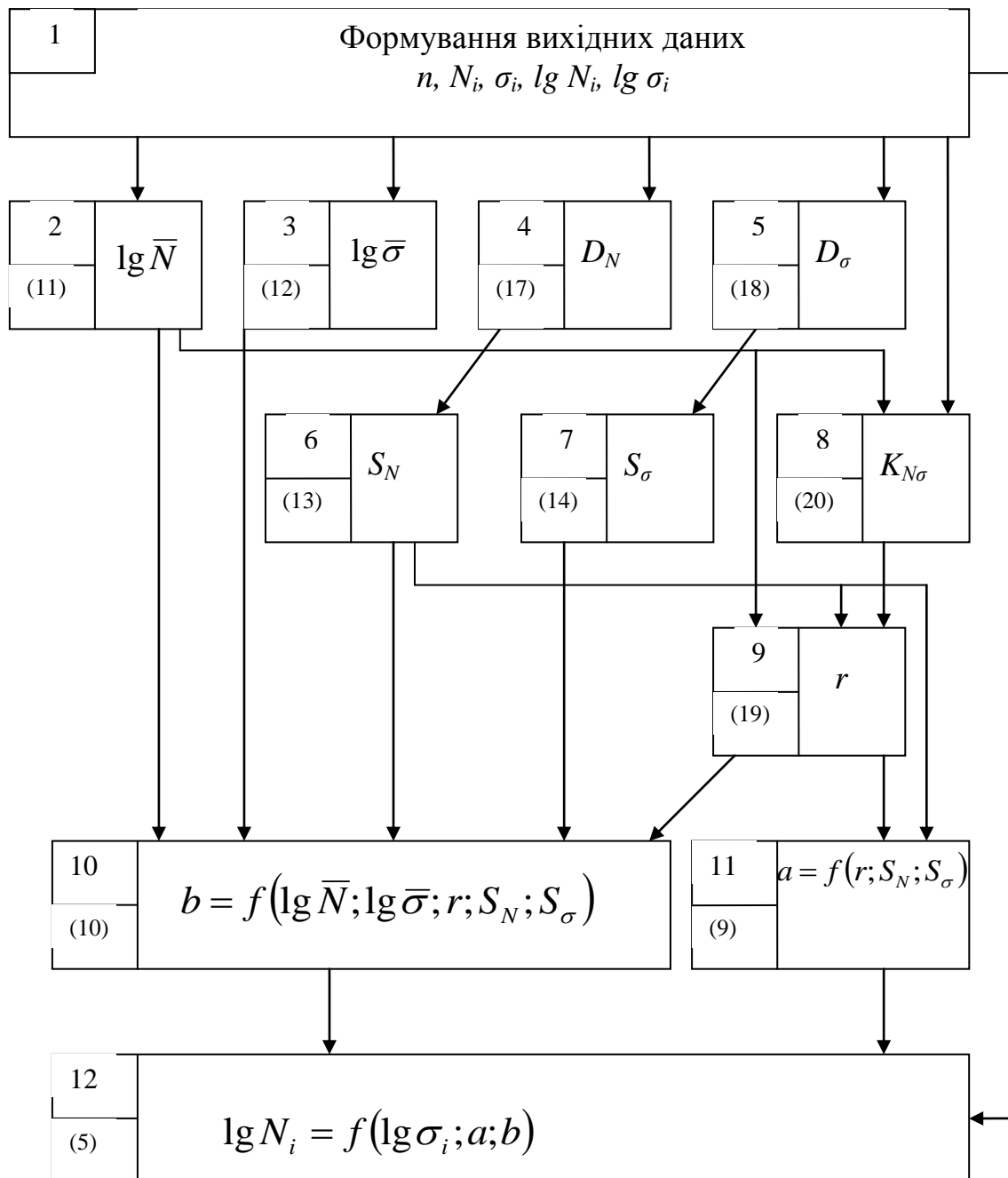


Рис. 4. Блок-схема алгоритму розрахунку кривої втоми.

### 1.3. Методика випробування деталей будівельних машин на зношування.

Тертя і зношування обумовлені взаємодією деталей, що контактують, що знаходяться під дією навантаження і переміщуються одна відносно іншої. Деталі будівельних машин працюють в умовах тертя кочення і тертя ковзання, тертя спокою і тертя руху, тертя зі змащувальними матеріалами і без них [4].

В будівельних машинах мають місце всі три різновиди зношування – механічне (в тому числі найбільш розповсюджений вид зношування – абразивний, а також ерозійне, кавітаційне, зношування від втоми та інші), корозійно-механічне (окислювальне і зношування під час фреттінг-корозії) і зношування при дії електричного струму (електроерозійне).

*Випробування деталей будівельних машин на зношування* проводять з метою визначення кількісних характеристик процесу зношування, його швидкості й інтенсивності, на основі яких може бути визначена відносна зносостійкість деталей, відновлених різними методами. При цьому матеріал і термообробку нової деталі слід приймати за еталон.

Зразки для випробувань обирають за принципом *фізичного моделювання* нових і відновлених деталей.

Для проведення випробувань відбирають декілька серій зразків, в кожній серії не менше трьох зразків. У межах однієї серії випробувань технологія виготовлення зразків, включаючи технологію отримання металопокриття, повинна бути однаковою. Наприклад, перша серія зразків – еталонна, матеріал і термообробка у зразків ідентичні новій деталі, друга – з покриттям, що отримане автоматичним дуговим наплавленням під шаром флюсу АНК-18 проволокою Св.-08А, третя серія – зразки з покриттям, що отримане електрохімічних хромуванням при визначеному режимі і т.д. Еталонні зразки і заготовки під зразки інших серій повинні бути виготовлені з того ж матеріалу, як і нова деталь.

*Режими випробувань* зразків на зношування на лабораторних машинах повинні моделювати експлуатаційні умови або бути наближеними до них. Вид тертя, вид зношування, вид змащення, тиск на зразки, що створює випробувальна машина, повинні бути такими ж, як на будівельній машині в умовах експлуатації.

В процесі випробування кожної серії зразків визначається їх **знос**, розраховується **інтенсивність зношування** у різні періоди випробувань або за результатами випробувань в цілому, після чого будують графіки залежності зносу від часу випробувань або від шляху тертя. При цьому на осі абсцис відкладають час випробувань або шлях тертя, а по осі ординат – лінійний або масовий знос зразка. Шляхом співставлення кривих для різноманітних серій зразків з металопокриттями і для еталонних зразків порівнюють їх зносостійкість.

## **2. Обладнання для лабораторних випробувань зразків на втому та зношування**

В лабораторії кафедри для випробування зразків на втому є дві випробувальні машини МУИ-6000 і одна машина УКИ-10М, а для випробувань зразків на зношування — дві машини тертя СМЦ-2 і одна машина МИ-ІМ.

Крім того, в лабораторії випробувань на втому та зношування повинні бути:

- вимірювальні прилади і апарати: твердомір, мікротвердомір, профіломір, профілограф, аналітичні ваги, індикаторна головка зі штативом;
- інструменти і прилади: зразковий динамометр, мікрометри 0...25 і 25...50 мм, лінійка металічна 0...250 мм, контрольні оправки, шабери, калькулятори;
- матеріали: шліфувальний папір, притир очна паста, фарба, логарифмічний папір;
- технічна документація: кінематичні схеми і інструкції з експлуатації випробувальних машин, ГОСТи, ДСТУ, таблиці логарифмів.

### **Короткі характеристики випробувального обладнання лабораторії**

**Машина МУИ-6000** *призначена для випробування зразків з металів і їх сплавів під дією регулярного навантаження з симетричним циклом навантаження з метою визначення циклічної довговічності і межі витривалості зразків.*

Машина розрахована на одночасне випробування одного зразка **в умовах чистого згину** при частоті обертання 6000 об/хв.. Навантаження на зразок може змінюватись у межах від 100 до 1000 Н (10...100 кгс), максимальний згинальний момент – 50 Н·м (500 кгс·см). Найбільше напруження, що створюється у зразку з робочою частиною діаметром 10 мм складає 615 МПа (61,5 кгс/мм<sup>2</sup>). Зразки, що випробовуються на машині, повинні відповідати ГОСТ 25.502-79. Схема навантаження зразків на машині показана на рис. 3,а.

Усі механізми машини змонтовані на литій чавунній станині, що складається з нижньої частини – цоколя, і верхньої – корпусу. Машина складається з двох шпindelних бабок з приводом і лічильників циклів і механізму навантаження.

Шпindelні бабки слугують для кріплення зразка і передачі на нього навантаження. В корпусах бабок вмонтовані шпindelі, обертання яких разом із зразком здійснюється від електродвигуна через клинопасову передачу. Зразок, що випробовується кріпиться в шпindelях за допомогою цангових затискачів. Для реєстрації числа циклів навантаження встановлено лічильник імпульсного типу.

#### ***Порядок роботи на машині:***

- зразок встановлюють в шпindelні бабки і щільно затискають в цангових замках;
- за індикатором перевіряють биття зразка (воно не повинно перевищувати 0,03 мм);
- розміщуючи змінні вантажі на підвіску і обертаючи маховик, встановлюють необхідне навантаження, скидаючи на нуль покази лічильника і вмикають машину;

- прикладають навантаження до зразку, натиснувши кнопку «ПУСК» і обертаючи маховик до співпадіння стрілки покажчика навантаження с рискою таблиці;

- випробовують зразок до руйнування або до досягнення бази випробувань.

**Машина УКИ-10М** призначена для випробування зразків з металу і його сплавів з метою визначення їх циклічної довговічності і межі витривалості в умовах регулярного навантаження з симетричним циклом напруження.

Машина дозволяє випробовувати зразки **в умовах консольного згину** при частоті обертання 3000 або 6000 об/хв.. Схема навантаження зразків показана на рис. 3, б. Граничні значення навантаження, що прикладене до зразку, складає 10...600 Н (1-60 кгс). Машина розрахована на випробування зразків з розрахунковою довжиною 100 мм і діаметром робочої ділянки 10 мм.

За способом збудження сил, що деформують зразок, УКИ-10М відноситься до випробувальних машин з збудженням навантаження безпосередньо вантажем. Машина являє собою двосекційну установку з окремим керуванням кожною секцією, що дозволяє одночасно проводити випробування двох зразків у незалежних умовах навантаження.

Машина складається з наступних основних частин: станини, пристрою для кріплення зразка, механізму обертання зразка, лічильника числа циклів імпульсного типу, механізму навантаження з вантажною підвіскою, панелі керування.

Зразки, що випробовуються, встановлюються в шпindelльні бабки, в корпусі яких на підшипниках встановлені пустотілі шпindelлі. На одному кінці кожного шпindelля встановлено захват, а на іншому закріплений привідний шків. Шпindelль обертається двошвидкісним електродвигуном через клинопасову передачу. Керування двигуном відповідної секції здійснюється з панелі керування.

Випробувальне навантаження прикладається до вільного кінця зразка за допомогою вантажної підвіски з набором змінних вантажів. Механізм навантаження кожної секції складається з черв'ячної пари і ходового гвинта. Конструкція машини містить пристрій для вимкнення двигуна при руйнування зразка.

Порядок роботи на машині УКИ-10М:

- встановити зразок в цангу захвату і попередньо затиснути, перевірити биття за допомогою індикатора і затиснути повністю;

- визначити необхідну масу вантажів у відповідності з потрібним навантаженням і встановити їх на підвіску;

- встановити на кінець зразка підшипник верхньої частини вантажної підвіски і приєднати до неї вантажну штангу;

- встановити необхідну частоту обертання, ввімкнути привідний електродвигун і прикласти навантаження до зразка;



- випробувати зразок до руйнування або досягнення бази випробувань.

Машина МІ-ІМ призначена для дослідження зразків матеріалів на тертя і зношування в умовах кочення або ковзання. Дозволяє випробовувати зразки (диски) діаметром 30...50 мм, шириною 10 мм. Під час випробувань в умовах кочення в контакті знаходяться диски, а в умовах ковзання – диски і колодка. Для випробування зразків в різних середовищах існує спеціальна камера. Засоби виміру зносу зразків в машині не передбачені.

Машина складається з наступних складових частин: корпусу з валом нижнього зразка, поворотної каретки з валом верхнього зразка, механізму навантаження, трансмісії для передачі обертання від електродвигуна до випробувальних зразків, лічильника числа обертів і механізму реєстрації.

Вал нижнього зразка приводиться до руху від електродвигуна через циліндричні шестерні з зовнішнім і внутрішнім зачепленням. Момент тертя реєструється маятниковим пристроєм і записується на барабані. Обертання на вал верхнього зразка передається через шестерні, вал і пару змінних шестерень, якими можна створити різницю частоти обертання валів верхнього і нижнього зразків на 10, 15, 20%. Привід лічильника обертів здійснюється від ексцентрика, встановленого на валу нижнього зразка.

Механізм навантаження зразків – пружинного типу. Навантаження на зразки створюється як власною масою каретки, так і спеціальною навантажувальною пружиною, сила стиску якої регулюється навантажувальним гвинтом. Навантаження фіксується рухомою шкалою, що кінематично пов'язана з пружиною.

### **Порядок роботи на машині МІ-ІМ:**

- на машину встановлюють і закріплюють випробувальні зразки;
- обирають шкалу моментів тертя, встановлюють на маятник відповідні вантажі (див. таблицю в інструкції по експлуатації машини);
- відхиляють маятник від себе до упору і, утримуючи його в даному положенні, вмикають машину за допомогою перемикача;
- навантажують зразки, контролюючи навантаження за шкалою лінійки або за допомогою самописця, скидають на нуль покази лічильника і випробовують зразки протягом встановленого часу.

В ході випробувань момент тертя на зразках відмічається візуально по одній із шкал лінійки і записується самописцем на діаграмі. Роботу тертя можна визначити за показами лічильника нижнього зразка і лічильника інтегратора.

Машина СМЦ-2 призначена для вивчення антифрикційних властивостей матеріалів, а також процесів тертя і зношування під час тертя кочення і тертя ковзання і дозволяє випробовувати наступні пари тертя: диск по диску при коченні і коченні з проковзуванням, диск-колодка під час тертя ковзання, втулка-вал під час тертя ковзання.

діапазон навантажень складає від 50 до 5000 Н на зразки вал-втулка і від 200 до 2000 Н на круглі зразки і зразки диск-колодка. Максимальний

момент тертя при коченні диска по диску – 15 Н·м і 10 Н·м при терті за двома іншими схемами.

Машина СМЦ-2 може працювати за двома кінематичними схемами. Перша схема із замкненим кінематичним контуром при фіксованому значенні коефіцієнта проковзування зразків (диска по диску). Ця схема відповідає схемі машини МІ-ІМ, яку СМЦ-2 повністю замінює. Друга схема – з відкритим кінематичним контуром, коли один із зразків нерухомий (зокрема за схемою вал-втулка).

Машина складається з наступних основних частин: каретки, механізму навантаження, бабки нижнього зразка, індуктивного датчика, редуктора та електрошафи. Машина укомплектована камерами і спеціальними засобами для випробування зразків в рідких середовищах.

Шляхом перестановки ременів клинопасової передачі частота обертання нижнього зразка встановлюється рівною 300, 500 або 1000 об/хв. Частота обертання верхнього зразка відносно нижнього може бути змінена шляхом заміни змінних зубчатих коліс.

При випробуваннях на тертя кочення число зубців змінних зубчатих коліс підбирається виходячи з необхідності забезпечення потрібного проковзування зразків. При необхідності 100%-го проковзування муфта роз'єднується, а вал верхнього зразка стопориться від обертання. При цьому обертається нижній зразок.

Лічильник обертів нижнього зразка складається без посередньо лічильника і датчика, кінематично зв'язаного з нижнім валом. Момент тертя вимірюється індуктивним датчиком.

Механізм навантаження містить тарировану пружину з сережкою. Зміна навантаження здійснюється шляхом обертання гвинта, встановленого на різьбі в сережці, яка при цьому переміщується і тягою з п'ятою стискає пружину. Рух тяги кінематично пов'язаний з переміщенням шкали-шестерні, що показує навантаження.

Порядок роботи на машині СМЦ-2:

визначають потрібний режим випробувань зразків;

на машину встановлюють зразки і відповідну пару змінних зубчатих коліс. Шкали усіх приладів встановлюють на нуль;

перевіряють, чи вільно обертається оправка нижнього зразка. У разі випробувань при терті ковзання перевіряють чи роз'єднана муфта і застопорений вал верхнього зразка;

вмикають машину за допомогою пакетного вимикача і кнопки «ПУСК»;

навантажують зразки, повільно обертаючи гвинт навантаження і контролюючи момент тертя за шкалою потенціометра;

випробовують зразки згідно прийнятої методики випробувань.

### **3. Зміст і послідовність виконання лабораторно-дослідної роботи**

Після перевірки знань студентів, отриманих при підготовці до виконання роботи, навчальна група перед початком занять за вказівкою викладача розбивається на бригади за кількістю робочих місць у лабораторії.

За час, відведений для лабораторних занять, кожна бригада студентів зобов'язана виконати випробування однієї серії зразків на втому і однієї серії на зносостійкість. Завдання кожній бригаді і зразки для лабораторних досліджень надає викладач або учбовий майстер.

На робочих місцях студенти під керівництвом викладача і учбового майстра вивчають конструкцію машини, порядок роботи на ній і виконують розрахунок навантажень.

Ввімкнення машини дозволяється тільки у присутності викладача або учбового майстра.

Після закінчення випробування і виконання необхідних вимірювань, бригада студентів обробляє і обговорює результати випробувань, які після цього подаються викладачу на затвердження.

Бригади обмінюються результатами випробувань. Кожний студент доповнює свій звіт результатами випробувань інших бригад, після чого робить узагальнюючий висновок про те, який із конкуруючих варіантів технологічних процесів відновлення деталі є оптимальним за критеріями опору втомі та зносостійкості.

#### ***Випробування на втому слід виконувати у такій послідовності.***

1. Отримати у викладача серію зразків, записати в протокол випробування зразка і у вільний протокол (див. дод. 2,3) усі необхідні дані про них. Виміряти геометричні розміри зразків, визначити точність їх виготовлення, параметри шорсткості і твердості поверхні. Співставити отримані результати з вимогами ГОСТ 25.502-79 і внести їх до протоколу випробувань і у загальний протокол.

2. Скласти розрахункову схему навантаження і креслення зразка, визначити напруження для першого зразка, рівне приблизно  $2/3$  тимчасового опору  $\sigma_b$  і відповідну масу вантажів. Результати розрахунків внести до у вільний протокол (дод.3).

3. Підготувати випробувальні машини. В машинах УКИ-10М і МУИ-6000 перевірити биття шпинделів за контрольною відправкою. Биття відправки за індикатором з ціною поділки 0,01 мм не повинно перевищувати 0,03 мм.

Машину МУИ-6000 перед початком випробувань перевірити на точність показників зразковим динамометром 3-го розряду. Навантаження на шпиндельні бабки машини створюються спеціальних гвинтовим засобом і контролюються зразковим динамометром. Перевірка проводиться при навантаженнях, що відповідають нижній і верхній границі вимірювань шкалі машини (98 і 980 Н), а також у точках, що відповідають 0,1; 0,2; 0,5 і 0,8

верхньої границі вимірювань шкали при прямому і зворотному ходах. В усіх точках перевірка проводиться не менше трьох разів. Регулювання полягає у переміщенні противаги с таким розрахунком, що після знаття навантаження показник шкали на машині повертався в первинне положення з відхиленням, що не перевищує 0,5 поділки шкали.

4. Встановити зразки в затискачах шпindelьних бабок. Биття зразків не повинно перевищувати 0,03мм. Навантаження зразків проводити при на увімкненій машині. Машину вмикати тільки з дозволу викладача або учбового майстра.

5. Випробувати перший зразок до руйнування або до завданої бази випробувань. Для кожного наступного зразка напруження зменшувати га 20-40 МН/м<sup>2</sup> в залежності від числа зразків, що випробовуються і швидкості руйнування попереднього зразка. В наслідок зменшення напруження, при якому випробовується кожний наступний зразок, число циклів до руйнування зразків буде збільшуватись.

Прийнято вважати, що межа витривалості є визначеною тоді, коли різниця напружень зразків що зруйнувалися і незруйнованих після досягнення прийнятої бази випробувань не перевищує 10МПа (1 кг/мм<sup>2</sup>).

6. Опрацювати результати випробувань згідно зі схемою алгоритму розрахунку, що наведена в §1.2 і отримані дані внести до таблиці (див. дод. 4). За результатами випробувань кожної серії зразків вивести рівняння і побудувати графічну криву втоми, що спочатку спадає різко донизу, а далі стає більш пологою, асимптотично наближаючись до осі циклів. Постійне за величиною напруження і буде межою витривалості. Співставити межі витривалості зразків різних серій і обговорити результати випробувань.

***Випробування на знос рекомендовано виконувати в наступному порядку.***

1. Отримати у викладача чотири пари зразків, що складаються з дисків та колодок і підготувати їх до випробувань: зовнішню поверхню дисків відшліфувати і відполірувати, а чавунні колодки підігнати до дисків шабруванням чи притиркою так, щоб прилягання контактної поверхні при перевірці по фарбі складало 75% площі колодки. Притирка може бути виконана на спеціальному верстаті або на машині тертя. Шабрування проводиться тригранними шаберами тільки тих місць робочої колодки, на яких залишається фарба після контактування з робочою поверхнею ролика. Для притирки на поверхню диска наноситься притир очна паста (суміш машинного мстила з абразивними дрібними порошками або пастою ГОИ). Дати схему навантаження і креслення співставлених зразків.

2. Виміряти в 3-5 точкам мікротвердість робочої поверхні ролика на приладі ПМТ-3, визначити середнє значення і занести до протоколу випробування зразка (див. дод. 5). Мікротвердість визначається вдавлюванням алмазної піраміди з завданім зусиллям у випробувальну поверхню, вимірюванням діагоналі відбитка і знаходженням твердості з перехідних таблиць, що комплектуються з приладом ПМТ-3.

3. Визначити на аналітичних вагах з точністю до четвертого знаку після коми масу обох зразків, визначити їх геометричні розміри, параметри шорсткості поверхні. Результати занести до протоколу (дод. 5).

4. Перевірити і підготувати до роботи машину тертя.

Режим випробування зразків на зношування на машині тертя обрати за принципом фізичного моделювання – з врахуванням реальних умов роботи співставлених деталей на будівельній машині.

В учбових цілях на машині тертя МИ-ІМ можна прийняти наступний режим: вид тертя – ковзання, навантаження – 500 Н (50 кгс), інтенсивність змащування 1...2 краплини масла на 500 м шляху тертя, швидкість ковзання – 0,4...0,5 м/с, шлях тертя – 1000 м.

5. Випробувати зразки на знос. Масу зразків для контролю їх зносу визначати через кожну годину випробувань. Впродовж першої години випробувань через 10, 30 і 60 хв, а після через кожну годину випробувань записувати момент тертя і температуру. Результати вимірювань заносити до протоколу (дод. 5). Результати випробувань всіх зразків занести до зведених протоколів (дод. 6 і 7).

6. Обробити результати випробувань: визначити сполучність при терті, побудувати криві зносу (залежність зносу від напрацювання), визначити період припрацювання, значення припрацювання і граничного зносу, побудувати діаграми зносу зразків різних серій, визначити інтенсивність і швидкість зносу, відносну зносостійкість.

7. Співставити дані, отримані по всім випробувальним серіям зразків, зробити висновок щодо доцільності застосування того чи іншого металопокриття для відновлення зношених деталей.

8. Оформити звіт і представити його для затвердження викладачем.

### ***Схема звіту про виконання роботи***

1. Призначення і зміст роботи. (Навести короткий опис відомих методів порівняльних випробувань зразків, деталей, збірних одиниць і машин для вибору оптимального методу відновлення деталей з-поміж декількох конкуруючих методів за критеріями опору втомі і зносу).

2. Випробування зразків на опір втомі.

2.1. Перерахувати серії зразків, що були випробувані з вказівками основних їх характеристик: матеріал заготовки зразка, спосіб отримання металопокриття, його твердість, товщина шару та ін.

2.2. Навести схему навантаження зразків, епюру згинальних моментів, графік циклів напружень, розрахунок навантажень.

2.3. Заповнити протокол випробування зразка і зведений протокол випробування серії зразків.

2.4. Обробити результати випробувань, заповнити таблицю розрахунку кривої втомі, вивести рівняння і побудувати криву втомі, визначити межу витривалості зразків серії, що випробовується і співставити його з межами витривалості зразків інших серій.

2.5. Зробити висновок щодо оптимального способу відновлення деталей.

3. Випробування зразків на знос.

3.1. Дати характеристики зразків аналогічно тому, як вказано для випробувань на втому.

3.2. Навести схему випробувань зразків. Обґрунтувати вибір режиму випробування.

3.3. Заповнити протокол випробування зразка і зведений протокол випробування серії зразків.

3.4. Обробити результати випробувань. Побудувати криві і діаграми зносу, криві зміни моменту тертя, мікротвердості і температури зразка в залежності від напрацювання (часу випробувань або шляху тертя) і т.д.

3.5. Дати порівняльну оцінку різним металопокриттям.

#### **Вимоги техніки безпеки при виконанні роботи.**

1. Перед початком роботи на машинах необхідно уважно ознайомитися з даними методичними вказівками, вивчити будову і порядок роботи на випробувальних машинах, а також вимоги техніки безпеки.
2. Категорично забороняється вмикати машини без дозволу викладача або учбового майстра.
3. Перед ввімкненням машини необхідно продивитись її і впевнитись у відсутності видимих пошкоджень і в тому, що всі захисні кожухи, кришки встановлені на машині.
4. Забороняється спиратися на машину при її запуску та під час роботи.
5. Для зняття або встановлення зразків необхідно зупинити машину і вимкнути її з мережі. Забороняється проводити будь-які роботи по регулюванню або перевірці машини при ввімкненій напрузі.
6. При роботі машини категорично забороняється торкатися будь-яких рухомих частин, а також знімати кришки, кожухи і т.д.
7. Перед випробуванням зразків на тертя кочення на машині СМЦ-2 слід переконатися в тому, що спеціальний штифт, що слугує для фіксації верхнього валу знятий.
8. Перед випробуванням зразків на тертя ковзання на машині СМЦ-2 необхідно перевірити, чи роз'єднана муфта і після чого застопорити вал верхнього зразка спеціальним штифтом. Невиконання цих вимог може призвести до пошкодження машини.
9. Для запобігання нещасних випадків і пошкодження випробувального обладнання при підготовці і проведенні випробувань треба суворо дотримуватись порядку роботи на машинах, що викладений у відповідних розділах даних методичних вказівок.

**Протокол**

випробування на втому зразка № \_\_\_\_\_ серії № \_\_\_\_\_

(додаток до зведеного протоколу № \_\_\_\_\_)

Основний матеріал зразка \_\_\_\_\_

Термічна обробка і твердість основного матеріалу зразка \_\_\_\_\_

Металопокриття (спосіб отримання і товщина шару) \_\_\_\_\_

Термічна обробка зразка з металопокриттям \_\_\_\_\_

Твердість металопокриття \_\_\_\_\_

Розміри робочої частини зразка: діаметр \_\_\_\_\_ довжина \_\_\_\_\_

радіус галтелі \_\_\_\_\_

Точність виготовлення робочої частини зразка \_\_\_\_\_

Шорсткість робочої частини зразка \_\_\_\_\_

Точність встановлення (биття) зразка \_\_\_\_\_

Призначення випробування \_\_\_\_\_

Машина: тип \_\_\_\_\_, № \_\_\_\_\_

Навантаження \_\_\_\_\_ напруження \_\_\_\_\_

Покази лічильника (дата і час):

на початку випробування \_\_\_\_\_

в кінці випробування \_\_\_\_\_

Число пройдених циклів \_\_\_\_\_

Частота навантаження \_\_\_\_\_

Випробування проводили: \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_



**Зведений протокол № \_\_\_\_\_**  
випробувань на втому зразків серії № \_\_\_\_\_

Основний матеріал зразка, його термічна обробка і твердість \_\_\_\_\_

Металопокриття (спосіб отримання, термообробка, твердість, товщина) \_\_\_\_\_

Умови випробувань:

вид навантаження \_\_\_\_\_

база випробувань \_\_\_\_\_

частота навантаження \_\_\_\_\_

Тип зразків і розміри їх робочої частини \_\_\_\_\_

Точність виготовлення і стан поверхні зразків \_\_\_\_\_

Випробувальна машина: тип \_\_\_\_\_ № \_\_\_\_\_

Номер зразка	Напруження, кг/мм <sup>2</sup> (Н/м <sup>2</sup> )	Число циклів до руйнування	Примітка

Відповідальний за випробування серії зразків \_\_\_\_\_

Дослідники: \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

## Статистична обробка експериментальних даних і розрахунок кривої втоми

(за результатами випробувань зразків серії № \_\_\_\_\_)

Номер зразка	$\sigma_i$	$\lg \sigma_i$	$N_i$	$\lg N_i$	$\lg \sigma_i - \lg \bar{\sigma}$	$(\lg \sigma_i - \lg \bar{\sigma})^2$	$\lg N_i - \lg \bar{N}$	$(\lg N_i - \lg \bar{N})^2$	$(\lg N_i - \lg \bar{N})(\lg \sigma_i - \lg \bar{\sigma})$
Сума		$\sum_{i=1}^n \lg \sigma_i$		$\sum_{i=1}^n \lg N_i$		$\sum_{i=1}^n (\lg \sigma_i - \lg \bar{\sigma})^2$		$\sum_{i=1}^n (\lg N_i - \lg \bar{N})^2$	$\sum_{i=1}^n (\lg N_i - \lg \bar{N})(\lg \sigma_i - \lg \bar{\sigma})$

Протокол № \_\_\_\_\_

випробування зразка на знос

Серія зразків № \_\_\_\_\_

Зразок № \_\_\_\_\_

Ролик: основний метал \_\_\_\_\_  
 термообробка \_\_\_\_\_  
 покриття \_\_\_\_\_  
 товщина шару покриття \_\_\_\_\_  
 термообробка зразка з покриттям \_\_\_\_\_  
 Колодка: матеріал \_\_\_\_\_  
 термообробка \_\_\_\_\_

Дата	Час		Покази лічильника обертів, $N$	Навантаження $P$ , кг	Момент тертя, $M_{тр}$ , кг·см	Робота тертя $A$	Диск				Колодка	
	год	хв					Маса $Y_0$	Мікротвердість $H_{\mu 100}$ , кг/мм	Шорсткість $R_a$	Діаметр, мм	Маса $Y_k$	Температура $t$ , °C

Досліди виконували: \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_



Зведений протокол № \_\_\_\_\_

випробування зразків на знос

Номер серії	Номер зразка	Мікротвердість $H_{\mu 100}$ , кг/мм <sup>2</sup>					Момент тертя $M$ , кг·см							Температура $t$ , °C							
		До випр.	1 год	2 год	3 год	4 год	1 год				2 год	3 год	4 год	1 год				2 год	3 год	4 год	
							0	10	30	60				0	10	30	60				

Досліди виконували: \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

## Література

1. ГОСТ 28207-78. Сопротивление усталости. Основные термины, определения и обозначения.
2. ГОСТ 25.502-79. Методы механических испытаний металлов. Методы испытаний на усталость.
3. Е.С. Вентцель. Теория вероятностей. Изд. 2-е. – М.: Физматгиз, 1962.
4. ГОСТ 23.002-78. Обеспечение износостойкости изделий. Трение, изнашивание и смазка. Термины и определения.

## Зміст

Загальні вказівки.....	
1. Методи дослідження працездатності нових і відновлених деталей машин.....	
1.1. Методи порівняльної оцінки працездатності нових і відновлених деталей будівельних машин.....	
1.2. Методика випробувань деталей будівельних машин на втому.....	
1.2. Методика випробувань деталей будівельних машин на знос.....	
2. Обладнання для лабораторних випробувань зразків на втому та зношування.....	
3. Зміст і послідовність виконання лабораторно-дослідної роботи.....	
Додатки.....	
Література.....	

Навчально-методичне видання

**Порівняльні дослідження працездатності деталей,  
відновлених металопокриттями методом фізичного  
моделювання.**

Методичні вказівки  
до виконання лабораторно-дослідницької роботи з курсу  
«Експлуатація і ремонт машин» для студентів спеціальності  
„Підйомно-транспортні, будівельні, дорожні,  
меліоративні машини і обладнання”

Укладачі: **ЛЕСЬКО** Віталій Іванович  
**Космінський** Ігор Владленович