

Міністерство освіти і науки України

Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Методичні вказівки до самостійної роботи  
студентів з дисципліни

**"Основи теорії тертя та зношування"**

за спеціальністю 015.20 «Професійна освіта» (Транспорт),  
освітньо-кваліфікаційний рівень – бакалавр

Харків 2019

Міністерство освіти і науки України

Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Методичні вказівки до самостійної роботи  
студентів з дисципліни  
"Основи теорії тертя та зношування"  
за спеціальністю 015.20 «Професійна освіта» (Транспорт),  
освітньо-кваліфікаційний рівень – бакалавр

Затверджено  
методичною радою університету,  
протокол № від 20 р.

Харків 2019

Укладач: ЦИБУЛЬСЬКИЙ Вадим Анатолійович

Кафедра технології машинобудування і ремонту машин

Ці методичні вказівки є посібником із самостійної роботи студентів автомобільного факультету, які навчаються за спеціальністю «Професійна освіта» (Транспорт), галузь знань – 01 «Освіта». Робоча програма з дисципліни "Основи теорії тертя та зношування" передбачає наступні види навантаження для студентів: лекції, лабораторні роботи, практичні заняття, виконання домашніх завдань в межах самостійної роботи. Інтегральна оцінка засвоєння матеріалу студентом виконується викладачем за підсумками його роботи на лекціях, лабораторних і практичних заняттях, за результатами самостійної роботи, а також модульного контролю (тестів).

Студентам рекомендуються наступні види самостійної роботи:

- а) вивчення лекційного матеріалу, а також відповідних розділів рекомендованої літератури;
- б) підготовка до лабораторних робіт;
- в) виконання домашніх завдань;
- г) ознайомлення з запитаннями до модульних тестів;
- д) пошук відповідних джерел інформації і підготовка відповідей на запитання модульних тестів.

МВ містять наступні матеріали:

- виписки з робочого плану вивчення дисципліни;
- основні поняття й визначення дисципліни;
- теми й короткий зміст домашніх завдань;
- запитання до модульних тестів;
- приклади варіантів модульних тестів;
- список рекомендованої основної та додаткової літератури.

При виконанні домашніх завдань студенти керуються рекомендаціями викладача, за необхідності отримують від нього необхідні консультації, уточнюють зміст, порядок виконання завдань тощо.

Самостійна робота студента є однією з важливіших складових загального процесу навчання, оскільки уявляє собою найбільш цінну складову всього ланцюга в системі освіти. Саме самостійна робота дозволяє студенту отримати і закріпити необхідні йому знання, продемонструвати здатність самостійно розв'язувати завдання, проявити свої здібності і ліквідувати, при їх наявності, прогалини в своїх знаннях і вміннях.

# 1. РОБОЧИЙ ПЛАН ДИСЦИПЛІНИ

№ теми	Тема і короткий зміст лекційного матеріалу	Література
1	2	3
1	<b>Вступ. Мета, задачі, загальна структура та зміст дисципліни.</b> Історія розвитку науки про тертя. Трибологія, її складові частини та їх загальна характеристика. Основні поняття, на яких базується дисципліна.	[1, 2]
2	<b>Зносостійкість і довговічність машин.</b> Конструкційна зносостійкість. Закономірності зношування деталей машин. Модель зношування за Лоренцом. Рівностійкість машин. Критерії рівностійкості.	[1, 2, 3]
3	<b>Моніторинг теорій тертя і їх коротка характеристика. Основні положення молекулярно-механічної теорії тертя.</b> Вплив основних факторів на зношування.. Критерії зносостійкості.. Молекулярна і механічні складові. Втомлювальна теорія зношування. Втомний механізм зношування згідно молекулярно-механічної теорії тертя та втомного зношування (за проф. Крагельським І.В.)	[1, 4] [4, 5]
4	<b>Структурно-енергетична теорія тертя.</b> Загальні положення структурно-енергетичної теорії тертя. Вторинні структури, їх типи і будова. Види зносу згідно з структурно-енергетичною теорією тертя. Поняття пошкоджуваності. Механізм видікремлювання часток зносу згідно з структурно-енергетичною теорією тертя.	[1, 7, 8]
5	<b>Види зношування і їх класифікація.</b> Механізм зношування поверхонь деталей пар тертя. Класифікація і характеристика видів зношування. Ефект не зношуваності деталей машин та вибіркового переносу.	[9]
6	<b>Режими мащення.</b> Класифікація мастильних матеріалів за різними ознаками. Режими мащення і їх характеристика.	[1-8]
7	<b>Конструктивні засоби підвищення зносостійкості деталей машин.</b> Класифікація пар тертя на прямі і зворотні. Зносостійкість прямих і зворотніх пар тертя. Коефіцієнт взаємного перекриття і його фізична сутність. Класифікація пар тертя на вищі і нижчі. Принципи вибору матеріалів для елементів пар тертя.	[1, 10]
8	<b>Технологічні засоби підвищення зносостійкості деталей машин.</b> Технологічні чинники впливу на зносостійкість. Вплив способу отримання заготовок на зносостійкість. Вплив технології обробки і послідовності технологічних операцій. Легування матеріалу і його вплив на зносостійкість. Вплив різних методів зміцнення на зносостійкість. Нанесення зносостійких покриттів напилюванням, електролітичним, хімічним способами, наплавлення зносостійкого шару.	[1-3]

1	2	3
8	<b>Експлуатаційні засоби підвищення зносостійкості деталей машин.</b> Функції і види мастильних матеріалів. Склад оливо та присадки до них. Властивості та якість змащувальних матеріалів. Рідкі мастильні матеріали. Класифікація моторних оливо і їх позначення. Загальна характеристика режимів мащення.	[1-3]
9	<b>Моделювання процесів тертя і зношування. Випробування на тертя та зношування.</b> Класифікація випробувань. Лабораторні випробування, їх призначення і мета. Устаткування для випробувань на тертя та зношування.	[1-3, 10]
10	<b>Методи визначення зносу, температури елементів пари тертя при зношуванні, коефіцієнта тертя, вибір критерію для оцінки зносостійкості.</b> Характеристика поверхневих шарів. Методи мікрометрирування, ваговий, штучних баз, радіоактивних ізотопів. Визначення температури контактними і безконтактними методами. Визначення коефіцієнту тертя. Питання щодо вибору критерію зносостійкості матеріалів.	[1-3, 10]
11	<b>Перспективи щодо подальшого розвитку науки про тертя.</b> Підвищення зносостійкості поверхневих шарів матеріалів деталей в результаті поверхнево-пластичного деформування, променевих методів обробки, використання нових матеріалів.	

## **2. ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ Й ВИЗНАЧЕННЯ, ЩО СТОСУЮТЬСЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ, ЗНОСОСТІЙКОСТІ І ДОВГОВІЧНОСТІ МАТЕРІАЛІВ**

### 2.1. Фактори, що зумовлюють надійність виробів

*Надійність* – властивість об'єкта зберігати у часі в установлених межах значення всіх параметрів, які характеризують здатність виконувати потрібні функції в заданих режимах та умовах застосування, технічного обслуговування, зберігання та транспортування. Надійність є комплексною властивістю, яка залежно від призначення об'єкта та умов його застосування може містити в собі *безвідмовність, довговічність, ремонтпридатність та збережуваність чи певні поєднання цих властивостей* (ДСТУ 2860–94). Термін “надійність” використовують для загального не кількісного опису вказаних показників. Надійність характеризує ймовірність того, що протягом заданого *напрацювання* не виникне

*відмова*, тобто порушення працездатного стану об'єкта внаслідок деформації, зношування, корозії, руйнування тощо.

Відмови можна поділити на *поступові* й *раптові*. *Поступова відмова* є результатом накопичення пошкоджень протягом певного часу. В цьому разі деталі можна вчасно замінити, не допустивши аварійного стану. До поступових відмов належать різні види зношування, змінання (наприклад, скручування шліців, невелике сколювання зубців шестерень), корозійні пошкодження тощо.

*Раптова* – це така відмова, яку неможливо передбачити попередніми дослідженнями чи технічним оглядом. До цього виду відмов належить *руйнування*.

При розгляді впливу властивостей матеріалу на надійність найважливішими є такі показники як *безвідмовність* та *довговічність*

*Безвідмовність* – це властивість об'єкта виконувати потрібні функції (тобто працювати без відмови) в певних умовах протягом заданого інтервалу часу чи напрацювання.

*Довговічність* – це властивість об'єкта виконувати потрібні функції до переходу у граничний стан при встановленій системі технічного обслуговування та ремонту. Інакше кажучи, це властивість об'єкта зберігати працездатність до стану, коли подальша експлуатація виробу неприпустима або недоцільна за різних причин.

Довговічність характеризується *напрацюванням*, або *ресурсом*.

*Напрацювання* – тривалість чи обсяг роботи об'єкта; вимірюється у різних одиницях (кілометрах, циклах, годинах, тоннах).

*Ресурс* – це сумарне напрацювання об'єкта від початку його експлуатації чи поновлення після ремонту до переходу в граничний стан, обумовлений технічною документацією.

Довговічність є однією з характеристик надійності. Разом з цим, розглядаючи надійність з точки зору впливу на неї властивостей матеріалу, слід відзначити, що за своєю суттю довговічність і надійність – це різні показники. Довговічність характеризує властивість виробу протистояти поступовій відмові, тоді як надійність – раптовій відмові внаслідок руйнування, яке часто викликає аварію. Така відмова може утворитися при виникненні піків напружень, наприклад, під час перевантажень, випадкових ударів тощо. Отже, можна вважати, що надійність зумовлюється здатністю конструкції працювати, як правило,

короткочасно, поза розрахунковою ситуацією. Тому в процесі подальшого викладення матеріалу ці показники не будуть ототожнюватися, а розглядатимуться окремо.

## 2.2. Властивості матеріалу

Залежно від умов роботи, матеріал деталей повинен мати певні фізичні, хімічні, технологічні та експлуатаційні властивості.

*Фізичні властивості металів* – це густина, теплоємність, теплопровідність, теплове розширення, електропровідність, магнітна проникність, температура плавлення та ін.

До *хімічних властивостей* належать стійкість проти окиснення і розчинення в різних агресивних середовищах, здатність до утворення хімічних сполук тощо.

*Технологічні властивості* зумовлюють можливість виготовлення заготовок або деталей за певною технологією при забезпеченні найкращої якості і найменших відходів металу, про що йшлося раніше. До технологічних відносять ливарні властивості (рідкотекучість, усадка, ліквация – неоднорідність розподілу елементів в сплаві, газопоглинання), деформівність (здатність до деформування в холодному та гарячому стані), зварюваність, оброблюваність різанням. Ці властивості необхідно враховувати при опрацюванні технології виготовлення того чи іншого виробу.

*Експлуатаційними* називають властивості, які впливають на поведінку виробу в процесі його експлуатації. Їх поділяють на дві групи – *загальні та спеціальні*.

*Загальні* – це властивості, що враховуються для будь-яких виробів незалежно від умов експлуатації. До загальних належать стандартні механічні властивості, які визначаються випробуваннями матеріалів відповідно до державних стандартів.

*Спеціальні* експлуатаційні властивості є визначальними лише в певних умовах експлуатації деталей машин. До них належать зносостійкість, корозійна стійкість, жаростійкість, жароміцність та ін. До цієї групи інколи відносять холодостійкість, але для нашої країни, де взимку температура може знижуватися до  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ , цей показник можна вважати загальною властивістю.



### 2.3. Механічні властивості металів та сплавів

Механічні властивості зумовлюють поведінку виробу під впливом зовнішніх навантажень, які можуть значно змінюватися залежно від умов експлуатації. До механічних властивостей належать міцність, пластичність, твердість і в'язкість.

*Міцність* – здатність матеріалу чинити опір деформуванню та руйнуванню.

*Деформація* – зміна розмірів та форми виробу (заготовки) під впливом зовнішніх сил або внутрішніх напружень. Деформацію поділяють на пружну та пластичну. Пружна – це деформація, яка зникає, а пластична – яка залишається після усунення причини, що її викликала. Здатність матеріалу повністю відновлювати свої розміри та форму після зняття навантаження називають пружністю.

*Пластичність* – це властивість матеріалу необоротно змінювати свої розміри і форму (тобто пластично деформуватися) без руйнування.

*Твердість* – це здатність матеріалу чинити опір проникненню в нього тіла з більшою твердістю, яке називається індентором.

*В'язкість* – здатність матеріалу поглинати енергію, прикладену до тіла, до моменту його руйнування.

*Напруження*  $\sigma$  – це сила, віднесена до площі поперечного перетину зразка

$$\sigma = \frac{P}{F}. \quad (2.1)$$

При пружній деформації існує лінійна залежність між напруженням  $\sigma$  і відносним подовженням  $\varepsilon$ , яка відповідає закону Гука

$$\sigma = E \cdot \varepsilon, \quad (2.2)$$

де  $E$  – модуль нормальної пружності (*модуль Юнга*);

$\varepsilon$  – відносне подовження зразка при розтяганні, %.

*Відносне подовження (видовження)*  $\varepsilon$  – відношення абсолютного подовження  $\Delta l$  у даний момент навантаження до

початкової довжини зразка  $l_0$ .

### 2.3.1 Показники міцності

При статичних випробуваннях показниками міцності є:

$$\sigma_{\text{пц}}, \sigma_{0,05} (\sigma_{0,005}), \sigma_T (\sigma_{0,2}), \sigma_B, S_K.$$

$\sigma_{\text{пц}}$  – *границя пропорційності* – те максимальне напруження, яке ще не викликає пластичної деформації. За своїм фізичним сенсом це і є границя пружності. Експериментально точно визначити цей показник важко. Тому на практиці визначають умовні значення границі пружності  $\sigma_{0,05}$  або  $\sigma_{0,005}$  і  $\sigma_{\text{пц}}$  ототожнюють з цими показниками;

$\sigma_{0,05}$  та  $\sigma_{0,005}$  – *умовна границя пружності* – напруження, що спричиняє залишкову деформацію рівну відповідно 0,05 або 0,005 %

$$\sigma_{0,05} = \frac{P_{0,05}}{F_0}; \quad \sigma_{0,005} = \frac{P_{0,005}}{F_0}; \quad (2.3)$$

$\sigma_T$  – *фізична границя текучості* – напруження, при якому зразок деформується без збільшення навантаження

$$\sigma_T = \frac{P_T}{F_0}; \quad (2.4)$$

$\sigma_{0,2}$  – *умовна границя текучості* – напруження, що спричиняє залишкову деформацію рівну 0,2 %

$$\sigma_{0,2} = \frac{P_{0,2}}{F_0}; \quad (2.5)$$

$\sigma_B$  – *тимчасовий опір* – максимальне напруження, що витримує матеріал при випробуванні

$$\sigma_B = \frac{P_{\text{max}}}{F_0}, \quad (2.6)$$

де  $F_0$  – площа поперечного перерізу зразка у вихідному стані (до випробування). Для крихких матеріалів цей показник називається *границею міцності*;

$S_K$  – *дійсний опір руйнуванню*

$$S_K = \frac{P_p}{F_k}, \quad (2.7)$$

де  $F_k$  – площа поперечного перерізу зразка в місці руйнування;  
 $P_p$  – зусилля, при якому відбувається руйнування

Показники  $\sigma_{0,005}$ ,  $\sigma_{0,05}$ ,  $\sigma_T$ ,  $\sigma_{0,2}$  характеризують опір матеріалу деформації,  $\sigma_B$  і  $S_k$  – опір матеріалу руйнуванню. Тимчасовий опір  $\sigma_B$  – це умовне (номінальне) напруження,  $S_k$  – дійсне напруження.

Показники  $\sigma_{0,05}$  і  $\sigma_{0,005}$  можуть бути визначені тільки при прецизійних випробуваннях, які дозволяють вірогідно фіксувати малі залишкові деформації (0,05 %, 0,005 %). При проектуванні конструкцій і деталей машин допустиме напруження, як правило, розраховують відносно границі текучості – воно має бути приблизно в 1,5 рази меншим, ніж  $\sigma_{0,2}$  ( $\sigma_T$ ).

### 2.3.2. Показники пластичності

Основними показниками пластичності є *відносне подовження*  $\delta$  і *відносне звуження*  $\psi$

$$\delta = \frac{\ell_k - \ell_0}{\ell_0} \cdot 100 \% ; \quad (2.8)$$

$$\psi = \frac{F_0 - F_k}{F_0} \cdot 100 \% , \quad (2.9)$$

де  $\ell_0$  і  $F_0$  – відповідно довжина і площа поперечного перетину зразка до випробування,  $\ell_k$  і  $F_k$  – ті ж показники після випробування ( $F$  – площа перетину зразка в місці руйнування).

Їх визначають, вимірюючи на зразках початкові довжину і діаметр і ті ж розміри на зруйнованому зразку. Показники  $\delta$ ,  $\psi$  мають велике значення: чим вони вище, тим менше схильність матеріалу до крихкого руйнування і тим вища надійність виробу. Особливо важливим є відносне звуження, яке чутливіше до зміни структури металу.

### 2.3.3 Визначення твердості і її показники

Вимірювання твердості – самий доступний і неруйнівний метод механічних випробувань матеріалів, який використовують і в дослідницьких цілях і як засіб контролю в багатьох галузях промисловості. В заводській практиці це найпоширеніший метод механічних випробувань. Це пояснюється простотою й швидкістю вимірювань, які дозволяють здійснити стовідсотковий контроль

деяких видів продукції. Особливо зручний цей метод для контролю якості поверхневої термічної та хіміко-термічної обробки.

Частіше за все визначення твердості здійснюється за методами Брінеля, Роквела і Вікерса (НВ, НР, НV відповідно). Існує також метод вимірювання мікротвердості, який дозволяє оцінити твердість окремих структурних складових та тонких поверхневих шарів.

*Вимірювання твердості за Брінелем* полягає у втискуванні сталевій загартованій кульки діаметром  $D$  в поверхню зразка (виробу) навантаженням  $F$ , яке прикладається протягом певного часу. Після зняття навантаження вимірюють діаметр відбитка  $d$ , що залишається на поверхні зразка. Діаметр відбитка визначають за допомогою спеціального мікроскопу типу МБП-2.

У разі, коли  $F$  виражено в кгс, твердість визначається за формулою

$$HB = \frac{F}{A} = \frac{2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}. \quad (2.10)$$

Згідно з формулою (1.10) число твердості визначають відношенням навантаження  $F$  до площі поверхні відбитка  $A$ , тому твердість за Брінелем має розмірність напруження (кгс/мм<sup>2</sup>, Н/мм<sup>2</sup>, або МПа)

Якщо навантаження  $F$  виражене у Н, твердість визначається за формулою

$$HB = \frac{0,102 \cdot F}{A} = \frac{0,102 \cdot 2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (2.11)$$

Якщо  $F$  виражене у кгс, твердість визначається за формулою

$$HB = \frac{F}{A} = \frac{2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}, \quad (2.12)$$

На практиці для визначення твердості НВ користуються таблицями, створеними за розрахунками відповідно з формулами (1.11), (1.12). Твердість позначають числом, що її характеризує, і

літерами НВ, наприклад, 400 НВ без зазначення розмірності. З врахуванням коефіцієнта 0,102 (перехід від кгс/мм<sup>2</sup> до Н/мм<sup>2</sup>) числове значення твердості однакове при вимірюванні навантаження у кгс та Н.

Верхня границя вимірювання твердості за Брінелем дорівнює 450 НВ. При вищій твердості матеріалів відбувається неприпустима деформація кульки.

*Твердість за Роквелом* виражається у відносних безрозмірних одиницях і може бути переведена в НВ за допомогою спеціальних таблиць.

Залежно від індентора, який використовується при випробуванні, і прикладеного навантаження твердість за Роквелом вимірюють за трьома шкалами – А, В, С. Для визначення твердості НRV використовують сталеву загартовану кульку діаметром 1,588 мм, яка втискується у матеріал під навантаженням 981 Н (~100 кгс). Цей метод вимірювання твердості застосовується для м'яких матеріалів, в тому числі сталей після відпалу або нормалізації.

Для твердих матеріалів (загартованих сталей) твердість вимірюється алмазним конусом з кутом при вершині 120 ° під навантаженням 1471 Н (~ 150 кгс) і позначається HRC.

Для надтвердих матеріалів або дуже тонких шарів вимірюють твердість HRA. В цьому випадку використовується також той самий алмазний конус, але при навантаженні 588 Н (~ 60кг)

*Вимірювання твердості за Вікерсом* полягає у втискуванні в поверхню зразка (виробу) чотиригранної піраміди з квадратною основою. Після зняття навантаження вимірюють обидві діагоналі відбитка.

Твердість за Вікерсом HV визначають відношенням навантаження до площі бокової поверхні відбитка, тобто вона має розмірність напруження.

Як і для твердості за Брінелем, для визначення HV використовують таблиці.

Числа HV і НВ достатньо добре співпадають в інтервалі від самих низьких значень до 450 НВ. Використання алмазної піраміди дозволяє розширити межі вимірювання до 1000 одиниць, що відповідає дуже твердим матеріалам. Оскільки навантаження при використанні методу Вікерса невеликі (від 50 до 1000 МПа), стає можливим визначення твердості тонких зразків або шарів.

*Вимірювання мікротвердості* принципово не відрізняється від

визначення твердості за Вікерсом (втискування алмазної пірамідки), але внаслідок значно менших навантажень (від 0,05 до 5 МПа) цей метод дозволяє досліджувати твердість в дуже малих ділянках поверхні зразка і характеризувати властивості окремих фаз, структурних складових, зерен.

#### 2.3.4 Показники в'язкості

Головним показником в'язкості є *ударна в'язкість*, яка визначається при випробуваннях на ударний згин стандартних зразків. Для більшості матеріалів використовують зразки з концентратором напружень у вигляді надрізу певної форми. Лише для крихких матеріалів типу сірого чавуну ударна в'язкість визначається на гладких зразках без надрізу. Випробування здійснюють на маятникових копрах, які дозволяють вимірювати роботу удару, витрачену на руйнування зразка при падінні маятника.

Для випробувань на ударний згин використовують зразки з концентраторами трьох видів: *U*-подібним з радіусом надрізу  $R = 1$  мм (рис. 1.5, а), *V*-подібним з  $R = 0,25$  мм (рис. 1.5, б) та *T*-подібним – *V*-подібним надрізом з втомною тріщиною (рис. 1.5, в).

*Ударна в'язкість* – це питома (тобто віднесена до одиниці площі) робота руйнування матеріалу при прикладанні динамічного навантаження. Цей показник позначається *КС*

$$КС = \frac{K}{S_0}, \quad (2.13)$$

де  $K$  – робота руйнування (Дж, МДж),  $S_0$  – площа перерізу зразка в місці надрізу ( $\text{см}^2$ ,  $\text{м}^2$ ). Таким чином, розмірність ударної в'язкості – (Дж/ $\text{см}^2$ , МДж/ $\text{м}^2$ ).

Залежно від форми надрізу ударна в'язкість позначається  $КС_U$ ,  $КС_V$  і  $КС_T$ .

Ударна в'язкість  $КС$  є інтегральною характеристикою, яка складається з *роботи зародження тріщини*  $КС_3$  і *роботи її розвитку*  $КС_p$

$$КС = КС_3 + КС_p. \quad (2.14)$$

Що вища ударна в'язкість, то менша схильність металу до крихкого руйнування і тим трудніше зруйнувати виріб, виготовлений з даного матеріалу, тобто більше його надійність.

Особливо велике значення має складова  $K_{Cp}$ , оскільки вона характеризує опір матеріалу руйнуванню за наявності у ньому тріщини, тобто здатність металу гальмувати руйнування, яке вже почалося. При випробуванні ударної в'язкості на зразках з тріщиною безпосередньо визначається складова  $K_{Cp}$ .

Для більшості сталей ударна в'язкість і її складові при охолодженні нижче певної температури більш чи менш різко знижуються. Властивість матеріалу втрачати в'язкість і крихко руйнуватися при зниженні температури отримала назву *холодноламкість*, а температура, при якій матеріал окрихчується, – *поріг холодноламкості*  $T_{кр}$ . Здатність матеріалу чинити опір руйнуванню при низьких температурах називається *холодостійкістю*. Перехід від в'язкого стану матеріалу до крихкого здійснюється в інтервалі температур (*інтервал в'язко-крихкого переходу*).

### 2.3.5 Опір втомі

Більшість виробів (вали, шестірні, осі, колеса, рейки, котки, бігунки тощо) працюють в умовах циклічного навантаження.

Прикладання навантажень, які змінюються циклічно (за величиною, знаком), викликає в металі процес поступового накопичення пошкоджень, які призводять до утворення піків напружень і зрештою до руйнування виробу. Таке явище називається *втомою* (*втомленістю*), а властивість матеріалу протистояти втомному руйнуванню – *опором втомі* (*втомною міцністю*).

Слід підкреслити, що втома розвивається під напруженнями, нижчими за границю текучості. Наслідком втоми є зниження експлуатаційної стійкості конструкцій.

Для визначення опору матеріалу втомі, згідно з ДСТУ 2444–94 (ГОСТ 23207–78), проводять випробування, при яких напруження змінюється за синусоїдальним законом (рис. 2.1).

Синусоїдальний цикл напружень описується кількома параметрами:

– максимальним  $\sigma_{max}$ , мінімальним  $\sigma_{min}$  і середнім  $\sigma_m$  напруженнями циклу;

- періодом  $T$  або частотою циклів  $f = \frac{1}{T}$ ;
- амплітудою напружень  $\sigma_a$ ;
- асиметрією циклу, яка характеризується коефіцієнтом асиметрії  $R$ .

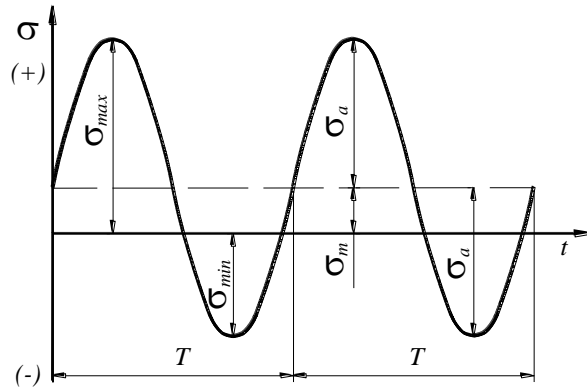


Рисунок 2.1 – Основні характеристики циклічних напружень, які змінюються за законом синусоїди

Значення перелічених параметрів видні з рис. 2.1 і формул (2.15) – (2.17).

$$\sigma_m = \frac{1}{2} (\sigma_{\max} + \sigma_{\min}); \quad (2.15)$$

$$\sigma_a = \frac{1}{2} (\sigma_{\max} - \sigma_{\min}); \quad (2.16)$$

$$R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}. \quad (2.17)$$

Циклічне навантаження може бути *знакосталим* (знакопостійним) і *знакозмінним*. Якщо максимальне напруження циклу дорівнює за абсолютним значенням мінімальному, то цикл називають *симетричним*, а  $R = -1$ . У цьому разі  $\sigma_{\max} = \sigma_{\min} = \sigma_a$ .

Опір матеріалу втомному руйнуванню характеризується декількома показниками. Найважливішим з них є *границя витривалості*. Для її визначення проводять випробування серії зразків при різних значеннях максимальних (за абсолютною величиною) напружень циклу. Випробування починають з високих напружень ( $\sim 0,67 \sigma_B$ ) і поступово їх знижують. При кожному напруженні зразок доводять до руйнування і визначають кількість циклів, яка до нього призвела. Зрозуміло, що при зниженні



напруження циклу кількість циклів до руйнування збільшується.

За отриманими експериментальними даними будують криві, на яких по ординаті відкладають максимальну величину напруження циклу, а по абсцисі – кількість циклів, яка при даному напруженні викликала руйнування. Такі криві одержали назву *кривих втоми*.

2.4 Поняття зносу і зношування. Визначення основних характеристики зношування і класифікація видів зношування поверхонь тертя

#### 2.4.1 Поняття зносу, зношування і зносостійкості

Відповідно до ДСТУ 2823–94 *зносостійкість* – це властивість матеріалу чинити опір *зношуванню*, під яким розуміють процес відокремлення матеріалу з поверхні твердого тіла та (або) збільшення його залишкової деформації при терті. Зношування проявляється в поступовій зміні розмірів тіла та (або) його форми. Результатом зношування є *знос*  $I$ , який може вимірюватися зміною розмірів виробу (*лінійний знос*, м), його об'єму (*об'ємний знос*, м<sup>3</sup>) або маси (*масовий знос*, г). Зносостійкість оцінюють величиною, оберненою до *швидкості* або *інтенсивності зношування*.

#### 2.4.2 Характеристики зношування поверхонь тертя

Швидкість зношування  $V_{\text{зн}}$  – це відношення зносу (лінійного, об'ємного або масового) до інтервалу часу, протягом якого він виник (м /год, м<sup>3</sup>/год, г/год).

*Інтенсивність зношування*  $I_{\text{зн}}$  – відношення зносу  $I$  до шляху, на якому відбувалося зношування. При лінійному зносі це безрозмірна величина, при об'ємному – м<sup>2</sup>, при масовому – г/м.

При оцінці зносостійкості через швидкість зношування ( $I = \frac{1}{V_{\text{зн}}}$ ) вона має розмірність год/м, год/м<sup>3</sup>, год/г. З фізичної точки зору це той час, протягом якого знос досягає 1 м, 1 м<sup>3</sup> або 1 г. Якщо зносостійкість оцінюють через інтенсивність зношування ( $I = \frac{1}{I_{\text{зн}}}$ ), при лінійному зносі це безрозмірна величина, при об'ємному її розмірність 1/м<sup>2</sup>, при масовому – м/г.

Слід відрізнити *деталі тертя* і *пари тертя*. *Деталі тертя* – це робочі органи різних машин і обладнання, які зношуються при

зовнішньому терті об ґрунт (робочі органи екскаваторів, бульдозерів, землерийних машин, гусениці тракторів та ін.). Втрати металу внаслідок їх зносу можуть сягати 10-50 % від їх маси. *Пари тертя* – це різні спряження рухомих з'єднань (шестірні, підшипники кочення, вали, вкладні тощо). Їх знос незначний – від 0,1 до 1 % за масою. І саме такий незначний знос призводить до необхідності заміни зношених деталей.

#### 2.4.3 Класифікація видів зношування поверхонь тертя

Класифікація видів зношування досить умовна, оскільки за реальних умов експлуатації важко виділити який-небудь один вид. Відповідно до ДСТУ 2823–94 розрізняють такі види зношування:

– *механічне*, яке виникає внаслідок механічної дії на поверхню тертя;

– *механохімічне*, яке відбувається внаслідок механічної дії, що супроводжується хімічною та (або) електрохімічною взаємодією матеріалу з середовищем;

– *електроерозійне* – зношування під дією електричних розрядів.

Механічне зношування може відбуватися за різних умов:

– *абразивне*, яке відбувається в результаті різальної дії вільних чи закріплених твердих частинок;

– *гідро-* та *газоабразивне*, при якому абразивні частинки захоплюються потоком рідини (газу) і спричиняють зношування поверхні виробу;

– *кавітаційне*, яке виникає при роботі виробу в рідині внаслідок кавітації (виникнення миттєвих піків напружень при трісканні газових бульбашок, що виникають в рідині під час її руху). Таке зношування ще називають *гідроерозійним*;

– *втомне*, яке відбувається в результаті накопичення в поверхневому шарі пошкоджень, що призводять до руйнування поверхневого шару виробу. Цей вид зношування супроводжується появою на поверхні дрібних пошкоджень типу віспин – так званого *піттингу*;

– *адгезійне*, або зношування *при заїданні*, яке відбувається внаслідок локального схоплювання поверхонь за рахунок виникнення адгезійних зв'язків в окремих місцях. Цей вид зношування супроводжується глибинним вириванням матеріалу,

перенесенням його на іншу контактну поверхню, різким зростанням коефіцієнта тертя та спричиняє аварійний стан спряжень;

– зношування *при фретингу* (від англ. *fret* – роз’їдати); таке зношування спостерігається на спряжених поверхнях при малих коливаннях відносних переміщень.

До механохімічного зношування належать:

– *окиснювальне*, при якому основний вплив на руйнування поверхні виробів чинить взаємодія металу з навколишнім окиснювальним середовищем;

– зношування *при фретинг-корозії*, яке виникає внаслідок циклічного взаємного переміщення двох поверхонь, що контактують, в окиснювальному середовищі.

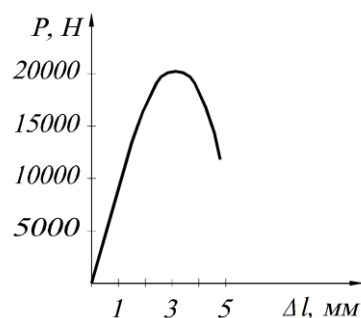
### 3. ТЕМИ, ДОМАШНІ ЗАВДАННЯ І ПРИКЛАДИ ЇХ ВИКОНАННЯ

3.1 **Тема:** Механічні властивості матеріалів. Визначення характеристик матеріалів.

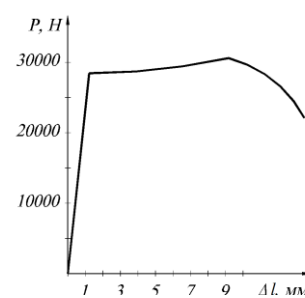
**Завдання 1.** При випробуванні на розтяг зразків двох марок сталі отримані діаграми  $P = f(\Delta \ell)$  (рис. а і б). Знайдіть, користуючись цими діаграмами, показники  $\sigma_B$ ,  $\sigma_{0,2}$  ( $\sigma_T$ ),  $S_k$ ,  $\delta$ ,  $\psi$ . Дати визначення кожному показнику. Порівняйте властивості та пояснити, чим обумовлена різниця у вигляді кривих. Для першого зразка (рис. а)  $d_0 = 5,85$  мм,  $\ell_0 = 30$  мм,  $d = 4,2$  мм, для другого (рис. б)  $d_0 = 10$  мм,  $\ell_0 = 50$  мм,  $d = 6,6$  мм.

**Завдання 2.** За даними задачі 1 оцінити твердість обох матеріалів.

**Завдання 3.** Оцініть значення тимчасового опору сталі, якщо її твердість НВ дорівнює 1400 МПа.



а



б

**Завдання 4.** На підставі даних випробувань при різних температурах зразків на ударну в'язкість було отримано значення КСУ. Визначити поріг холодноламкості, приймаючи за  $T_{кр}$  температуру, при якій  $КСУ = 20 \text{ Дж / см}^2$ .

$t_{випр}, ^\circ\text{C}$	+300	+200	+100	+20	0	-20	-40	-60	-70
КСУ, Дж / см <sup>2</sup>	220	220	200	140	120	70	11	6	6

**Завдання 5.** Дві однакові деталі виготовлені з матеріалів з ударною в'язкістю 50 та 80 Дж/см<sup>2</sup>. Яка з них більш надійна в роботі? Обґрунтуйте свою відповідь.

**Завдання 6.** Визначити роботу зародження тріщини, якщо відомі значення ударної в'язкості  $КСУ = 280 \text{ Дж/см}^2$  та  $КСТ = 210 \text{ Дж/см}^2$ .

### 3.2 Тема: Випробування на втомну міцність

**Завдання 1.** Знайдіть середнє напруження, амплітуду напружень і коефіцієнт асиметрії циклу, якщо  $\sigma_{max} = 400 \text{ МПа}$ ,  $\sigma_{min} = 200 \text{ МПа}$ .

**Завдання 2.** Дві однакові деталі з одного й того ж матеріалу мають різну шорсткість поверхні –  $R_a = 4,8 \text{ мкм}$  і  $R_a = 0,63 \text{ мкм}$ . Поясніть, яка з деталей матиме вищу втомну міцність і чому.

**Завдання 3.** Оцініть границю контактної витривалості виробу, твердість поверхні якого НВ 500 кгс/мм<sup>2</sup> (5000 МПа).

**Завдання 4.** Дві однакові деталі з однієї і тієї ж марки сталі експлуатуються в умовах циклічного навантаження в різних середовищах – одна на повітрі, друга у воді. Поясніть, як впливає середовище на втомну міцність.

**Завдання 5.** При випробуванні стандартних зразків сталі значення  $\sigma_{-1}$  дорівнює 500 МПа. З цього матеріалу виготовлений болт, і значення  $\sigma_{-1}$  знизилося до 340 МПа. Поясніть, що таке  $\sigma_{-1}$  і причини зниження цього показника для болта.

**Завдання 6.** Оцініть  $\sigma_{-1}$  для сталі, якщо відомі показники механічних характеристик при стандартних випробуваннях на розтяг:  $\sigma_B = 900 \text{ МПа}$ ,  $\sigma_{0,2} = 750 \text{ МПа}$ ,  $\psi = 28 \%$ .

### 3.3 Визначення триботехнічних характеристик матеріалів

#### *Приклади задач та порядок їх розв'язання*

**Задача 1.** Під час проведення лабораторних випробувань циліндричних зразків (роликів) діаметром 40 мм, висотою  $h=10$  мм втрата маси за 1 годину склала 60 мг. Частота обертання зразків  $400 \text{ хв}^{-1}$ . Визначити інтенсивність зношування зразків.

#### *Порядок виконання*

1. Визначимо шлях тертя, який проходить зразок за час випробування

$$L = \vartheta_3 \cdot \tau = \frac{\pi \cdot d \cdot n}{1000} = \frac{3,14 \cdot 40 \cdot 400}{1000} = 3014,4 \text{ м.}$$

2. Визначимо номінальну площу тертя

$$A_a = \pi \cdot d \cdot h = 3,14 \cdot 0,04 \cdot 0,01 = 0,0013 \text{ м}^2.$$

3. Використовуючи формулу (6), визначаємо інтенсивність зношування

$$I_g = \frac{g}{A_a \cdot L} = \frac{60}{0,0013 \cdot 3014,4} = 15,3 \text{ мг/м}^3.$$

**Задача 2.** Встановити, чи задовольняє вимогам елемент вузла тертя за критерієм його зносостійкості, якщо відомо, що швидкість зношування елемента дорівнює  $0,002 \text{ мм/год}$ . Допустимий ресурс вузла 2000 годин. Допустима величина зносу  $[U]=6 \text{ мм}$ .

#### *Порядок виконання*

1. Використовуючи формулу (1), знаходимо, що згідно з припущеним ресурсом величина зносу елемента складе

$$U = \vartheta_3 \cdot \tau = 0,002 \cdot 2000 = 4 \text{ мм.}$$

2. Виконуємо порівняння отриманої величини зносу з допустимою

$$U = 4 \text{ мм} \leq [U] = 6 \text{ мм.}$$

Отже, елемент вузла тертя за критерієм зносостійкості задовольняє вимогам.

**Задача 3.** Відомо, що деталь має глибину цементованого шару 0,8 мм, а граничний знос  $U_{\max}$  становить 0,65 мм (80 % від глибини шару). Встановити, чи є потреба ремонтувати деталь, якщо під час її обмірювання під час третього періодичного ремонту знос становив 0,55 мм?

#### *Порядок виконання*

1. Визначимо  $U_{\text{доп}}$  за формулою (5)

$$U_{\text{доп}} = U_{\max} \cdot \frac{k}{1+k} = 0,65 \cdot \frac{3}{3+1} = 0,49 \text{ мм.}$$

2. Порівняємо зноси граничний і фактичний

$$U_{\max} \geq U_{\text{доп}}.$$

Отже, деталь потрібно ремонтувати.

**Задача 4.** За умов функціонування виробу визначено максимальний знос  $U_{\max} = 10$  мкм. З випробувань зразків при середніх режимах експлуатації звісно, що за 100 годин роботи середній знос становив 2 мкм. Визначити середній термін служби виробу.

#### *Порядок виконання*

1. Середня швидкість зношування визначається як

$$v_3 = \frac{U_{\max}}{\tau} = \frac{2}{100} = 0,02 \text{ мкм/год.}$$

2. Середній термін служби виробу визначасмо за формулою (1)

$$T = \frac{U_{\max}}{v_3} = \frac{10}{0,02} = 500 \text{ год.}$$

**Задача 5.** На підприємстві експлуатується три машини А, В і С одного класу різних марок. Відомо, що вони мають однаковий термін служби  $T_A = T_B = 12$  років. Вартість машин А і В, відповідно, 60000 грн. і 67000 грн. Дефіцит ресурсу машини А складає 24000 грн., а машини В – 21000 грн. Яку з цих машин слід вважати більш довговічною?

*Порядок виконання*

1. За формулою визначимо індекс рівності для машини А

$$I_{pA} = \frac{C_M}{C_M + D_p} = \frac{60000}{60000 + 24000} = 0,71.$$

2. За формулою визначимо індекс рівності для машини В

$$I_{pB} = \frac{C_M}{C_M + D_p} = \frac{67000}{67000 + 21000} = 0,76.$$

Отже,  $I_{pA} < I_{pB}$ , і таким чином, більш довговічною треба вважати машину В.

**Задача 6.** Визначити потрібну кількість запасних частин даного найменування на весь термін служби машини, якщо нормативний термін служби машини складає 10 років, термін служби деталі 1,5 років. Кількість однакових деталей даного найменування для однієї машини складає 2 штуки.

*Порядок виконання*

1. Потрібну кількість запасних частин визначимо за формулою

$$N_3 = d \cdot \left( \frac{T_{MH}}{T_D} - 1 \right) = 2 \cdot \left( \frac{10}{1,5} - 1 \right) = 12 \text{ шт.}$$

#### 4. ПЕРЕЛІК ЗАПИТАНЬ ДО МОДУЛЬНОГО КОНТРОЛЮ ЗНАНЬ СТУДЕНТІВ

- 1 Основные понятия, термины, законы, на которых базируется дисциплина.
- 2 Трибология как наука. Составные части трибологии.
- 3 Краткая характеристика составных частей трибологии.
- 4 Равностойкость машин. Диаграмма равностойкости.
- 5 Понятие ремонтпригодности машин. Показатели ремонтпригодности.
- 6 Закономерности динамики изнашивания машин.
- 7 Общая картина молекулярно-механического взаимодействия поверхностей трения.
- 8 Понятие фрикционной связи. Виды нарушения фрикционных связей.
- 9 Молекулярное (адгезионное) взаимодействие поверхностей трения.
- 10 Механическое (деформационное) взаимодействие поверхностей трения.
- 11 Изменение свойств поверхностных слоев при трении. Понятие «третьего тела» и его значение в обеспечении износостойкости пар трения.
- 12 Механизм изнашивания поверхностей трения согласно теории усталостного изнашивания.
- 13 Основные закономерности контактного взаимодействия согласно молекулярно-механической теории трения.
- 14 Правило положительного градиента механических свойств, как условие реализации внешнего трения.
- 15 Общие положения структурно-энергетической теории трения.
- 16 Активация и пассивация поверхностей трения. Сущность явления структурной приспособляемости материалов при трении.
- 17 Вторичные структуры, их типы и строение.
- 18 Виды износа согласно структурно-энергетической теории трения. Понятие повреждаемости. Привести примеры.
- 19 Механизм отделения частиц износа согласно структурно-энергетической теории трения.
- 20 Характеристика адгезионного изнашивания.
- 21 Характеристика усталостного изнашивания.



- 22 Окислительное, коррозионно-механическое изнашивание.
- 23 Характеристика абразивного изнашивания.
- 24 Режимы смазки. Кривая Штрибека.
- 25 Гидродинамический режим смазки. Условия реализации гидродинамического режима.
- 26 Упруго-гидродинамический режим смазки.
- 27 Граничная смазка. Привести примеры пар трения с граничной смазкой.
- 28 Конструктивные средства повышения долговечности и износостойкости, анализ кинематических схем контакта узлов трения.
- 29 Коэффициент взаимного перекрытия узлов трения. Физический смысл коэффициента взаимного перекрытия.
- 30 Классификация пар трения на прямые и обратные.
- 31 Сравнительный анализ износостойкости прямых и обратных пар трения.
- 32 Масштабный фактор пар трения и его влияние на износостойкость и потери на трение. Коэффициент формы.
- 33 Пути исключения внешнего трения в конструкциях узлов трения.
- 34 Влияние шероховатости поверхностей трения на процесс приработки. Оптимальная (равновесная) шероховатость.
- 35 Повышение износостойкости деталей машин химико-термической обработкой.
- 36 Повышение долговечности деталей машин нанесением износостойких покрытий методами электролитического осаждения из растворов.
- 37 Получение износостойких покрытий наплавкой.
- 38 Применение плазменного и детонационного напыления для повышения износостойкости деталей.
- 39 Применение ионно-плазменного напыления и лазерного упрочнения поверхностей трения для повышения долговечности деталей.
- 40 Требования, предъявляемые к моторным маслам и их присадкам.
- 41 Классификация моторных масел по вязкости и по эксплуатационным свойствам.
- 42 Правила подбора масел для двигателей.

43 Назначение, деление и классификация трансмиссионных масел. Примеры обозначений.

44 Правила подбора трансмиссионных масел.

45 Гидравлические масла и их классификация. Примеры обозначений.

46 Виды испытаний на изнашивание. Цель и назначение лабораторных испытаний на трение и износ.

47 Методы измерения износа и сил трения.

48 Оборудование для испытания на трение и износ, особенности применения и схемы испытаний.

49 Физическое моделирование процессов в узлах трения.

50 Математическое моделирование процессов трения и изнашивания.

## 5. ТЕСТЫ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ МОДУЛЬНОГО КОНТРОЛЮ ЗНАНЬ

### Модульный тестовый контроль №2( вар. 2)

1 В формуле  $F = \mu \cdot N + A$ , предложенной Ш. Кулоном, величина  $A$  – это

А. Некоторая постоянная.

Б. Составляющая, учитывающая способность материалов к взаимному слипанию (сцеплению).

В. Составляющая, являющаяся характеристикой механического взаимодействия поверхностей трения (зацепление неровностей).

2 Процесс разрушения и отделения материала с поверхности твердого тела и (или) накопления его остаточной деформации при трении, проявляющийся в постепенном изменении размеров и (или) формы тела, называется

А. Износом

Б. Износостойкостью

В. Изнашиванием

3 Свойство материала оказывать сопротивление изнашиванию в определенных условиях трения, оцениваемое величиной, обратной скорости изнашивания или интенсивности изнашивания, называется

- А. Трением скольжения
- Б. Трением качения
- В. Износостойкостью

4 Какая из характеристик изнашивания материалов может быть безразмерной величиной?

- А. Скорость изнашивания
- Б. Сила трения
- В. Интенсивность изнашивания

5 Трение движения двух твердых тел, при котором скорости тел в точках касания одинаковы по величине и направлению, называется

- А. Трением скольжения
- Б. Трением качения
- В. Трением качения с проскальзыванием

6 Коэффициент трения качения

- А. Есть величина безразмерная
- Б. Имеет размерность длины
- В. Имеет размерность давления

7 Возникновение молекулярной связи между поверхностными слоями соприкасающихся разнородных (твердых, жидких) тел, называют

- А. Адсорбцией
- Б. Когезией
- В. Адгезией

8 Коэффициент взаимного перекрытия – это

- А. Отношение номинальных площадей элементов пары трения
- Б. Отношение фактических площадей элементов пары трения
- В. Отношение контурных площадей элементов пары трения

9 Для низших кинематических пар коэффициент взаимного перекрытия стремится

- А. к нулю
- Б. к единице
- В. к 0,5

10 Коэффициент взаимного перекрытия оказывает влияние

А. на продолжительность контактирования трущихся между собой поверхностей

Б. на продолжительность контактирования трущихся между собой поверхностей и процессы отвода теплоты

В. на скорость протекания физико-химических процессов в зоне трения

11 При выборе соотношения площадей трения в случае сочетания материалов «твердый – мягкий» необходимо стремиться к

- А.  $K_{вз} = 1,0$
- Б.  $K_{вз} = 0,5$
- В.  $K_{вз} = 2,0$

12 Сочетание материалов «твердый – твердый» применимо лишь

- А. на высших кинематических парах
- Б. на низших кинематических парах
- В. не допустимо

13 Сколько условий существования пар трения можно выделить?

- А. Четыре
- Б. Пять
- В. Три

14 Какое из условий соответствует обратной паре по геометрии?

- А.  $H_{п} > H_{н}, A_{п} > A_{н}$
- Б.  $H_{п} > H_{н}, A_{п} < A_{н}$
- В.  $H_{п} < H_{н}, A_{п} > A_{н}$

15 Наименьшую интенсивность изнашивания имеют

- А. прямые пары
- Б. обратные пары по материалам
- В. обратные пары по геометрии

16 Наиболее слабым звеном в конструкциях гидромашин следует считать

- А. прямые пары
- Б. обратные пары по материалам и геометрии одновременно
- В. обратные пары по геометрии

17 Какая из триботехнических характеристик может иметь размерность мкм, мм, мг, мм<sup>3</sup>, м<sup>3</sup>

- А. Износостойкость
- Б. Износ
- В. Интенсивность изнашивания

18 Вторичным структурам (ВС) какого типа соответствует характеристика: «ВС представляют собой химические соединения окислителей Р, S, Cl, имеют матовый цвет, гетерогенны, имеют кристаллическое строение, очень твердые и поэтому хрупкие»

- А. I типа.
- Б. II типа.
- В. III типа.

19 Третье тело –

А. Зона фрикционного взаимодействия, которая рассматривается как некое физическое тело, имеющее малую толщину и обладающее особыми свойствами, отличными от свойств исходных тел.

Б. Это смазочный материал, находящийся между трущимися поверхностями.

В. Это дополнительный элемент – деталь, опора и т.п.

20 По наличию относительного движения различают

- А. Трение покоя и трение движения
- Б. Трение скольжения и трение качения
- В. Трение скольжения, качения и качения с проскальзыванием

21 Необходимое условие реализации процесса внешнего трения состоит в том, что прочность на сдвиг должна

А. Уменьшаться по мере удаления от поверхности трения вглубь тела.

Б. Растти по мере удаления от поверхности трения вглубь тела.

В. Быть какой угодно.

22 Для сферической модели неровностей установлен порог внешнего трения в следующем виде:

А.  $\frac{\partial \tau}{\partial z} > 0$

Б.  $(h / R) \geq \frac{1}{2} \left(1 - \frac{2\tau}{\sigma_T}\right)$

В.  $h / R = 0$

23 В молекулярно-механической теории трения различают

А. Три вида нарушения фрикционных связей.

Б. Четыре вида нарушения фрикционных связей.

В. Пять видов нарушения фрикционных связей (три характеризуют механическое взаимодействие и два – молекулярное).

24 Молекулярная составляющая силы трения определяется выражением

А.  $F_{\text{тр.адг.}} = \sum_{i=1}^n \tau_i \cdot S_i$ .

Б.  $\frac{\partial \tau}{\partial z} > 0$ .

В.  $F = \mu \cdot N$ .

25 Питтинг, контактно-фрикционная усталость – это

А. Разрушения, приводящие к образованию на поверхностях деталей углублений и ямок.

Б. Различные по механизму протекания процессы.

В. Коррозионные процессы.

## 6. РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

### Основна

1. Основи трибології: Підручник / Антипенко А.М., Белас О.И., Войтов В.А. та ін. / За ред. Войтова В.А. – Харків: ХНТУСГ, 2008. – 342 с.
2. Гаркунов Д.Н. Триботехника: Учеб. для вузов / Д.Н. Гаркунов. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во МСХА, 2001. – 424 с.
3. Гаркунов Д.Н. Триботехника / Д.Н. Гаркунов. – М.: Машиностроение, 1985. – 614 с.
4. Тененбаум М.М. Сопротивление абразивному изнашиванию. – М.: Машиностроение, 1976. – 271 с.
5. Жарский Н.М. Технологические методы обеспечения надежности деталей машин: Учеб. пособие / Н.М. Жарский и др. – Мн.: Высш. шк., 2005. – 299 с.
6. Чернетко В.С. Променеві методи обробки: Навч. посібник / В.С. Чернетко, М.В. Кіндрачук, О.І. Дудка – К.: Кондор, 2004. – 166 с .

### Додаткова

7. Крагельский И.В. Трение и износ / И.В. Крагельский – М.: Машиностроение, 1968. – 480 с.
8. Польцер Г., Майсснер Ф. Основы трения и изнашивания / Пер. с нем. О.Н.Озерского, В.Н.Пальянова; Под ред. М.Н. Добычина. – М.: Машиностроение, 1984. – 264 с.
9. Костецкий Б.И. Трение, смазка и износ в машинах / Б.И. Костецкий – Киев: Техника, 1970. – 396 с.
10. Справочник по триботехнике: В 3 т., Т.2: Смазочные материалы, техника, смазки, опоры скольжения и качения / Под ред. М. Хебды, А.В. Чичинадзе. – М.: Машиностроение, 1990. – 416 с.
11. Ясь Д.С. Испытания на трение и износ. Методы и оборудование / Д.С. Ясь, В.Б. Подмоков, Н.С. Дяденко – Киев: Техника, 1971. – 140 с.
12. Гаркунова Д.Н. Избирательный перенос тяжело нагруженных узлов трения./ Под ред. Д.Н. Гаркунова. – М.: Машиностроение, 1972. – 207 с.

13. Родин Ю.А., Суслов П.Г. Безизносность деталей машин при трении. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отделение, 1989. – 229 с.

### **Інформаційні ресурси**

14. Офіційний сайт Харківського національного автомобільно-дорожнього університету [Електронний ресурс]. – 2017. – Режим доступу: khadi.kharkov.ua



Методичні вказівки  
до самостійної роботи студентів  
з дисципліни «Основи теорії тертя та зношування»  
для студентів за спеціальністю 015.20 «Транспорт»,  
освітньо-кваліфікаційний рівень – бакалавр

Упорядник: ЦИБУЛЬСЬКИЙ Вадим Анатолійович

Відповідальний за випуск Подригало М.А.

Редактор

Підписано до друку    Формат 60x84 1/16. Папір тип. №  
Віддруковано на ризографі    Умовн.друк.арк 2,0 Обл.вид.арк. 1,2  
Замовлення №    Тираж 25 прим.

Адреса редакції видавця та поліграфпідприємства  
ХНАДУ, 61002, Харків, вул. Ярослава Мудрого, 25

---

Віддруковано видавництвом Харківського національного  
автомобільно-дорожнього університету