

**МІНІСТЕРСТВО ВНУТРІШНІХ СПРАВ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ВНУТРІШНІХ СПРАВ
КРЕМЕНЧУЦЬКИЙ ЛЬОТНИЙ КОЛЕДЖ**

Циклова комісія природничих дисциплін

ТЕКСТ ЛЕКЦІЇ

навчальної дисципліни «Матеріали та деталі»
обов'язкових компонент
освітньо-професійної програми
першого (бакалаврського) рівня вищої освіти
Аеронавігація

тема — Осі та вали

Вінниця 2023

ЗАТВЕРДЖЕНО

Науково-методичною радою
Харківського національного
університету внутрішніх справ
Протокол від 30.08.2023 № 7

СХВАЛЕНО

Методичною радою Кременчуцького
льотного коледжу Харківського
національного університету
внутрішніх справ
Протокол від 28.08.2023 № 1

ПОГОДЖЕНО

Секцією науково-методичної ради
ХНУВС з технічних дисциплін
Протокол від 29.08.2023 № 7

Розглянуто на засіданні циклової комісії природничих дисциплін, протокол від
28.08.2023 № 1

Розробник: викладач циклової комісії природничих дисциплін, спеціаліст вищої
категорії, викладач-методист Грибанова С.А.

Рецензенти:

1. Доцент кафедри автомобілів та тракторів Кременчуцького національного
університету імені Михайла Остроградського, кандидат технічних наук,
доцент Черниш А.А.

2. Начальник відділу організації наукової роботи та гендерних питань, к.т.н.,
спеціаліст вищої категорії, викладач-методист Владов С.І.

План лекції:

1. Призначення валів і осей.
2. Класифікація валів.
3. Основні конструктивні елементи валів.
4. Умови роботи, види відмов, матеріали валів.
5. Розрахунки валів на міцність.
6. Уточнений розрахунок валів на витривалість.
7. Розрахунок валів на жорсткість.
8. Розрахунок валів на вібростійкість.

Рекомендована література:

Основна

1. Більченко О.В., Дудка О.І., Лобода П.І. Матеріалознавство. Навчальний посібник, Київ, К.Кондор, 2009 – 152 с.
2. Хільчевський В.В., Кондратюк С.Є, Степаненко В.О., Лопатько К.Г. Матеріалознавство і технологія конструкційних матеріалів, Навчальний посібник, Київ, «Либідь», 2002 – 327 с.
3. Животовська К.О, Мамлюк О.В. Авіаційні матеріали та їх обробка. Навчальний посібник, Київ, "Вища освіта", 2003 – 303 с.
4. Гарнець В.М. Матеріалознавство Підручник. Київ, К.Кондор, 2009
5. Попович В. Технологія конструкційних матеріалів і матеріалознавство Навчальний посібник, Львів, 2002. – 264 с.
6. Коновалюк Д.М., Ковальчук Р.М., Байдула В.О., Товстушко М.М. Деталі машин. Практикум. Навч. посіб. К.: Кондор, 2009. – 278 с.
7. Павлице В.Т. Основи конструювання та розрахунок деталей машин: Підручник. — Львів: Афіша, 2003. — 557 с.
8. Коновалюк Д. М. Деталі машин: підручник / Д. М. Коновалюк, Р. М. Ковальчук. - К.: Кондор, 2004. - 584 с

Додаткова

9. Малащенко В.О., Янків В.В. Деталі машин. Курсове проектування: Навч. посіб. – 3-тє вид., стереотипне. –Львів: “Новий Світ – 2000”, 2007. 252с.
10. Малащенко В.О., Павлице В.Т. Деталі машин. Збірник завдань та прикладів розрахунків. Львів: Видавництво Новий Світ – 2000, 2009. – 136 с.
11. Мархель І.І. Деталі машин. Навчальний посібник. — Видавництво Алерта, 2016. — 368 с.
12. Дмитро Коновалюк, Рю Ковальчук, В. Байбула, М. Товстушко. Деталі машин. Практикум. – Видавництво Кондор, 2009 – 278с.

13. Анурьев В.І. Довідник конструктора-машинобудівника. - В 3 т. - М.: Машинобудування, 2001. – 859 с.

14. Міняйло А.В., Тіщенко Л.М., Мазоренко Д.І. та ін. Деталі машин: Підручник. – К.: Агроосвіта, 2013. – 448 с.

15. Гайдамака А. В. Деталі машин. Основи теорії та розрахунків: навчальний посібник для студентів машинобудівних спеціальностей усіх форм навчання / А. В. Гайдамака. – Харків: НТУ «ХПІ», 2020. – 275 с.

16. Малащенко В.О. Муфти приводів. Конструкції та приклади розрахунків. Навч. посіб. — Львів: НУ «Львівська політехніка», 2006. — 196 с., 2009. — 208 с.

17. Павлице В.Т., Данило Я.Я. Різьби, різьбові з'єднання та кріпильні деталі: Довідник. — Львів: Інтелект-Захід, 2001. – 239 с.

Текст лекції

1. Призначення валів і осей

Вали та осі служать для закріплення посаджених на них деталей і забезпечують геометричну вісь обертання цих деталей. При цьому вали сприймають сили, які діють на деталі, і передають їх на опори.

Навідміну від валів осі передають корисного обертального моменту і зазнають лише деформації згину, авали – деформації як згину, так і кручення. Осі є окремим випадком валів і можуть бути рухомими та нерухомими, вали – лише рухомими.

2. Класифікація валів

Вали поділяються за конструкцією та формою на:

- 1) прямі (вивчаються в курсі деталей машин);
- 2) колінчасті (наприклад, для поршневих машин);
- 3) гнучкі (в зуболікувальному обладнанні, для спідометрів автомобілів).

Вали поділяються за формою поперечного перерізу на:

- 1) гладкі суцільного перерізу;
- 2) порожнисті (вали карданних передач, шпинделі токарних верстатів);
- 3) шліцьові.

Прямі вали поділяються на:

- 1) гладкі циліндричні (сталого перерізу);
- 2) ступінчасті;
- 3) вали-шестерні;
- 4) вали-черв'яки;
- 5) фланцеві.

Для з'єднання вузлів і агрегатів між собою (наприклад, у прокатному обладнанні, текстильних машинах) використовуються **торсійні вали**, які передають моменти і не несуть на собі ніяких закріплених деталей.

У ряді машин (дорожно-будівельні, прядильні) для передачі моменту від одного двигуна до декількох виконавчих органів застосовуються довгі складені вали, їх називають **трансмісійними**.

Вали редукторів і інших механізмів, як правило, є ступінчастими, що дає змогу:

- 1) наблизити форму вала до бруса однакового опору;
- 2) легко складати та розбирати деталі, посаджені на вал;
- 3) виконувати осьову фіксацію деталей;
- 4) поділити та реалізувати технічні вимоги на виготовлення вала за поверхнями щодо точності та шорсткості.

12.3. Основні конструктивні елементи валів

Конструктивна форма будь-якого вала зумовлена:

- 1) розмірами та типом деталей, посаджених на нього;
- 2) величиною і напрямом навантажень;
- 3) способами закріплення деталей на валах;
- 4) умовами складання та виготовлення.

Діаметри валів визначають з розрахунків на міцність, жорсткість, вібробійкість або за конструктивними міркуваннями, потім округлюють до стандартних значень.

Основні конструктивні елементи валів (рис. 1):

- 1 – **галтель** – плавний перехід із радіусом r ($r > 0,1d$) між двома циліндричними поверхнями з різними діаметрами ($d < D$);
- 2 – шпонковий паз, в який вставляють шпонку;
- 3 – кільцева проточка – канавка (за ГОСТ) для виходу різального інструмента, шліфувального круга тощо;
- 4 – конічна посадочна поверхня і різь (стандартні);
- 5 – **цапфа** – опорна поверхня вала;
- 6 – **п'ята** – опорна поверхня вала, яка сприймає лише осьову силу і взаємодіє з опорою – **підп'ятником**;
- 7 – центрові отвори, лиски, шліцьові пази, фаски та інші.

Усі ці елементи – це місця різкої зміни форми і зони максимального напруження в перерізі вала, тому їх називають **концентраторами напружень**.

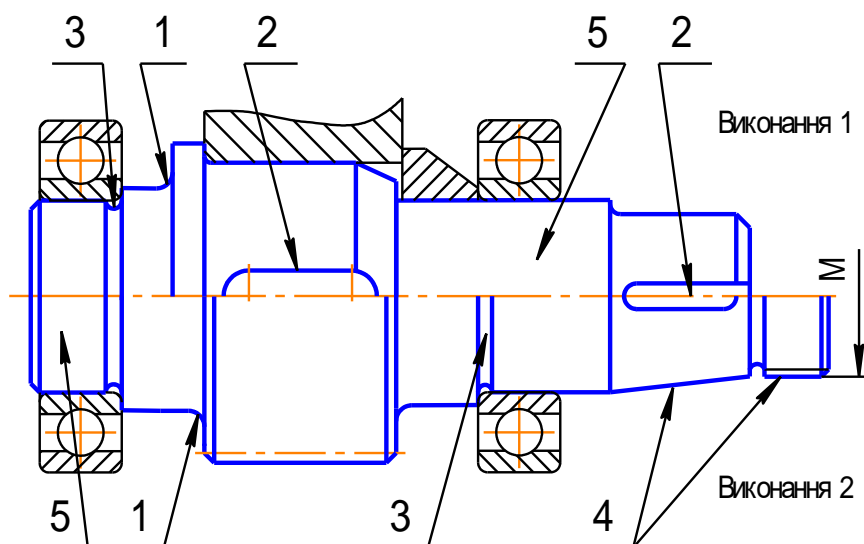


Рисунок 1 – Прямий ступінчастий вал і його конструктивні елементи
4. Умови роботи, види відмов, матеріали валів

Вали сприймають сили з боку передач і зазнають складної деформації: згин, кручення, розтяг, стискання. У процесі роботи можливі поломки статичні та утомні, а також деформації неприпустимих значень.

У зв'язку з цим основними критеріями працездатності є міцність, жорсткість і вібронестійкість. У валів, які працюють у парі з підшипниками ковзання, важливо забезпечити зносостійкість цапф.

Практикою встановлено, що руйнування валів і осей швидкохідних машин у більшості випадків має утомний характер, тому основним для валів є розрахунок на опір втоми. Крім того, їх розраховують на жорсткість і вібронестійкість.

Для виготовлення валів (осей) використовують сталі вуглецеві (переважно 30, 40, 45 і 50) і леговані (40Х, 40ХН, 40ХНМА та ін.) у вигляді прокату або поковок. Вид термічної обробки – покращання. Вали, які працюють у парі з підшипниками ковзання, а також шліцьові вали виготовляють зі сталей марок 20Х, 20ХН із цементацією і подальшим загартуванням.

5. Розрахунки валів на міцність

Розрахунки валів на міцність виконують у кілька етапів.

На першому етапі (орієнтовний розрахунок), коли відомий тільки обертальний момент T на валу, але невідома довжина вала, а отже, і згинальні моменти на ділянках, орієнтовно визначають мінімальний діаметр вала d_{\min} з умови міцності його тільки на кручення при знижених допустимих напруженнях $[\tau] = 15 - 25 \text{ МПа}$:

$$d_{\min} \geq \sqrt[3]{16T / (\pi [\tau])}.$$

Мінімальний діаметр вала потрібний для подальшого виконання його ескізу та визначення діаметрів усіх ділянок вала з урахуванням конструктивних і технологічних факторів.

Другий етап – проектний розрахунок із таким алгоритмом.

1. Згідно з результатами орієнтовного розрахунку komponують проєктований вузол.

2. Складають розрахункову схему вала з урахуванням типу опор і сил, які діють на вал.

3. Будують епюри внутрішніх силових факторів – згинальних M_x, M_y і крутного $M_{кр}$ моментів.

4. Проаналізувавши епюри, встановлюють характерні (небезпечні) перерізи вала, для яких визначають еквівалентні моменти M_E , а потім з умови міцності на згин і діаметри d_b :

$$d_b \geq \sqrt[3]{M_E / (0,1 [\sigma_{зг}])},$$

де $[\sigma_{зг}]$ – допустиме напруження згину для матеріалу вала.

5. Отримані значення d_b округлюють до найближчого числа за стандартом. Остаточні діаметри небезпечних та інших перерізів, довжину ділянок вала установлюють при komponуванні з урахуванням конструктивних і технологічних особливостей вузла.

Третій етап – уточнений (основний, перевірний) розрахунок небезпечних перерізів вала. Такий розрахунок називають розрахунком на витривалість і в ньому враховують характер зміни напружень, характеристики опору втомленості матеріалів, концентрацію напружень, вплив абсолютних розмірів, шорсткості поверхні й поверхневого зміцнення.

6. Уточнений розрахунок валів на витривалість

Уточнений розрахунок валів на витривалість зводиться до визначення запасу втомної міцності S , який ще називають коефіцієнтом безпеки за опором втоми, і порівняння його з допустимим $[S]$:

$$S = S_\sigma S_\tau / \sqrt{S_\sigma^2 + S_\tau^2} \geq [S],$$

де S_σ – запас втомної міцності за нормальними напруженнями, тобто при дії тільки згину в припущенні, що $\tau = 0$;

S_τ – запас втомної міцності за дотичними напруженнями, тобто при дії тільки кручення в припущенні, що $\sigma = 0$;

$$S_\sigma = \sigma_{-1} / (K_{\sigma D} \sigma_a + \psi_\sigma \sigma_m); S_\tau = \tau_{-1} / (K_{\tau D} \tau_a + \psi_\tau \tau_m),$$

де σ_{-1} , τ_{-1} – межі витривалості матеріалу вала відповідно при симетричному циклі зміни напружень згину і кручення (вибирають за довідковими таблицями);

$K_{\sigma D}$, $K_{\tau D}$ – сумарні коефіцієнти, що враховують вплив усіх конструктивних і технологічних факторів на опір втоми вала в конкретному перерізі відповідно при згині й крученні (вибирають за довідковими таблицями);

ψ_σ, ψ_τ – коефіцієнти, що характеризують чутливість матеріалу вала до асиметрії циклу напружень при згині й крученні (розраховують за формулами або вибирають за рекомендаціями);

σ_a, τ_a – амплітуди циклів зміни напружень відповідно при згині й крученні;

σ_m, τ_m – середні напруження за цикл.

Оскільки напруження згину у валу і осі, що обертається, змінюється за синусоїдальним законом (знакозмінний цикл), а напруження кручення за пульсуючим циклом, то амплітудні та середні значення напружень визначаються таким чином:

$$\sigma_a = M_{зг} / (0,1 d^3), \quad \sigma_m = 0, \quad \tau_a = \tau_m = 0,5 T / (0,2 d^3),$$

де d – діаметр небезпечного перерізу вала;

$M_{зг}, T$ – згинальний і крутний моменти у цьому перерізі.

Допустимий запас міцності $[S]$ залежить від точності складання розрахункової схеми, ступеня відповідальності вала та однорідності матеріалу. Як правило, $[S] = 1,5 - 2,5$.

7. Розрахунок валів на жорсткість

Мета розрахунку – визначити пружні переміщення, які відповідають виду деформації, і порівняти їх із допустимими значеннями, тобто перевірити забезпечення умов жорсткості вала:

$$f \leq [f], \theta \leq [\theta], \varphi \leq [\varphi].$$

Вали зазнають згинальних і крутильних деформацій. Переміщення (лінійні та кутові) при цих деформаціях впливають на роботу підшипників і передач (більшою мірою зубчастих, черв'ячних і меншою – ланцюгових, пасових).

Переміщення: прогини f ; кути повертання перерізів θ (при згині); кути скручування φ (при крученні) – потрібно визначати звичайними методами опору матеріалів.

Допустимі пружні переміщення залежать від конкретних вимог до конструкції і визначаються у кожному окремому випадку.

8. Розрахунок валів на вібростійкість

Коливання валів пов'язані з періодичними змінами жорсткості опор і деталей передач, а також навантаження, що передається; невірноваженістю обертових мас; нерівномірністю розподілу сил у зоні з'єднання валів з іншими деталями.

Найхарактернішими коливаннями валів є поперечні згинальні, крутильні та згинально-крутильні.

Задача розрахунку на вібростійкість зводиться до визначення діапазону робочих кутових швидкостей валів, при яких амплітуди коливань A не будуть перевищувати допустимі $[A]$:

$$A \leq [A].$$

Іншими словами, задача розрахунку на вібростійкість зводиться до визначення критичних, резонансних частот обертання вала, при яких його експлуатація заборонена.

Теми для додаткового самостійного вивчення

1. Розрахунки валів та осей на міцність.
2. Конструктивні та технологічні способи підвищення опору втоми та жорсткості валів.