

## 3 ШПИНДЕЛЬНІ ВУЗЛИ

### 3.1 Вимоги до шпиндельних вузлів

Шпиндельний вузол верстата складається із шпинделя, його опор та приводного елемента. У шпинделі виділяють передній кінець, що утримує інструмент чи пристосування, міжопорну ділянку, виліт переднього кінця.

На шпиндель діють навантаження від сил різання, сил на приводному елементі (шків, зубчасте колесо), а також відцентрових сил, які виникають від неврівноваженості деталей самого шпинделя, що обертаються.

Проектування вузла передбачає вибір типу привода, опор, пристроїв для їх змащення та захисту від забруднень, визначення діаметральних розмірів ділянок шпинделя, відстані між опорами та розробку конструкції з усіма необхідними елементами. При проектуванні шпинделя потрібно враховувати ряд вимог, що забезпечують задані параметри технічної характеристики верстата.

Головні вимоги до шпиндельних вузлів.

1. Точність обертання шпинделя, яка характеризується радіальним та осьовим биттям переднього кінця, найбільше впливає на точність оброблюваних деталей. Допустиме биття шпинделя універсальних верстатів повинно відповідати державним стандартам. Биття шпинделя спеціальних верстатів не повинно бути більшим 1/3 допуску на лімітований розмір оброблюваної на верстаті деталі.

2. Жорсткість шпиндельного вузла характеризується його деформаціями від дії навантажень. Допустима мінімальна жорсткість верстатів нормального класу точності складає 200 Н/мкм, прецизійних — 400 Н/мкм. Допустимий кут повороту шпинделя у передній опорі через нерівномірний розподіл навантаження між тілами кочення підшипників приймається в межах 0,0001...0,00015 рад. Кут повороту шпинделя під приводним зубчастим колесом допускається від 0,00008 до 0,0001 рад, а вигин у цьому місці не повинен перевищувати 0,01m (m — модуль зубчастого колеса).

Вимоги до жорсткості шпинделя можна подати інакше. Для забезпечення працездатності шпиндельних підшипників необхідно забезпечити таке співвідношення між діаметром **d** шпинделя та міжопорною відстанню **l**:

$$d \geq \sqrt[4]{(0,05...0,1)l^3}.$$

Допустиме радіальне зміщення переднього кінця шпинделя від дії робочих навантажень не повинно перевищувати 1/3 допуску на розмір оброблюваної на верстаті деталі.

3. Високі динамічні якості (вібростійкість) характеризуються амплітудою коливань переднього кінця шпинделя та частотою власних коливань. Вібрації, що виникають у шпиндельному вузлі, негативно позначаються на точності та чистоті оброблюваних поверхонь, стійкості інструменту та продуктивності верстата. Бажано, щоб власна частота коливань шпинделя була не нижче 500...600 Гц.

4. Температурні деформації шпиндельного вузла впливають на точність обробки та працездатність опор. В залежності від класу точності верстата встановлено обмеження на допустимий нагрів зовнішнього кільця підшипника (таблиця 3.1).

5. Довговічність шпиндельних вузлів залежить від довговічності опор шпинделя, яка у свою чергу залежить від ефективності системи змащення, ущільнень, частоти обертання, величини попереднього натягу у підшипниках кочення та інших параметрів. Довговічність шпиндельних вузлів не регламентується, її визначають за втомлюваністю, зносом деталей підшипника або втратою змащувальних властивостей масла. Діаметр шийки шпинделя вибирають за критерієм жорсткості, що звичайно забезпечує довговічність підшипників до  $L = (12...13) \cdot 10^3$  год. При застосуванні безконтактних опор (гідростатичних, гідродинамічних, газостатичних) довговічність теоретично вважають необмеженою.

**Таблиця 3.1 — Допустимий нагрів зовнішнього кільця підшипника**

Клас точності верстата	Н	П	В	А	С
Допустима температура зовнішнього кільця, °С	70	50...55	40...45	35...40	28...30

### 3.2 Приводи шпинделів

Для передачі крутного моменту на шпиндель застосовують зубчасті передачі, пасові, інерційний привод, а також спеціальні пристрої, наприклад, високочастотні асинхронні електрошпинделі. Тип приводного елемента вибирають в залежності від частоти обертання шпинделя, крутного моменту, що потрібно передавати, компоновання верстата та вимог до плавності обертання шпинделя.

Найбільшого поширення набули зубчасті та пасові передачі, а також муфти на задньому консольному кінці шпинделя. Кожний з пристроїв має свої переваги, недоліки та сфери застосування.

**Зубчасті передачі** здатні передавати великі крутні моменти, прості за конструкцією, компактні. Але похибки виготовлення передачі знижують плавність обертання шпинделя та викликають додаткові динамічні навантаження у приводі. Зубчасту передачу звичайно застосовують, коли

частота обертання шпинделя не перевищує 2000...3000 хв<sup>-1</sup>. При високій точності виготовлення та монтажу передачі вона може бути застосована і при більш високих частотах обертання. Положення приводного зубчастого колеса на шпинделі впливає на вигин переднього кінця. На рисунку 3.1 зображено дві можливі схеми з найбільшим взаємним впливом сили у зубчастому зачепленні (**Q**) та сили різання (**P**): схема **а** — обидві сили направлені у одному напрямку; схема **б** — сили різання та у зубчастому зачепленні мають протилежні напрямки. З аналізу наведених схем видно, що реакція у передній опорі більша у першому випадку ( $R_{1 I} > R_{1 II}$ ), а вигин переднього кінця більший у другому випадку ( $\delta_I < \delta_{II}$ ). Привод за схемою **а** рекомендується для точних верстатів, за схемою **б** — для верстатів, що виконують чорнову обробку. З метою підвищення точності обертання шпинделя часто його роблять розвантаженим від дії сил у зубчастому зачепленні. Для цього приводне зубчасте колесо, що знаходиться на шпинделі, розміщують на окремій втулці з власними підшипниками, а крутний момент на шпиндель передається шліцьовим з'єднанням. Інший шлях зменшення впливу сил у зубчастому зачепленні на вигин переднього кінця шпинделя полягає у розміщенні зубчастого колеса ближче до передньої опори.

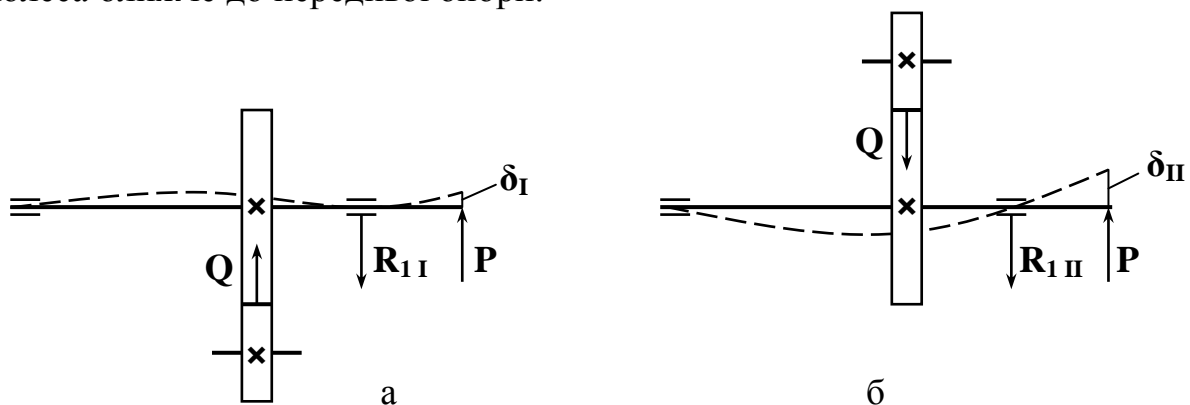


Рисунок 3.1 — Схеми розташування приводного зубчастого колеса на шпинделі верстата: **а** — сила різання та сила у зачепленні направлені у одну сторону; **б** — сила різання та сила у зачепленні направлені протилежно; **P** — сила різання; **Q** — сила у зачепленні; **R<sub>1 I</sub>**; **R<sub>1 II</sub>** — реакції у опорі;  $\delta_I$ ;  $\delta_{II}$  — вигин переднього кінця шпинделя.

**Пасові передачі** забезпечують плавне обертання шпинделя, знижують динамічні навантаження у приводі верстата, коли проводиться переривчасте різання. Але ці передачі мають порівняно великі габарити, оскільки для підвищення точності обертання шпиндельного вузла та зниження навантажень на опори шпинделя від сили на тяжіння паса шків роблять розвантаженим. Пасову передачу застосовують при різних частотах обертання шпинделя, у тому числі і при відносно високих (6000 хв<sup>-1</sup> і більше), коли колова швидкість паса досягає 60...100 м/с.

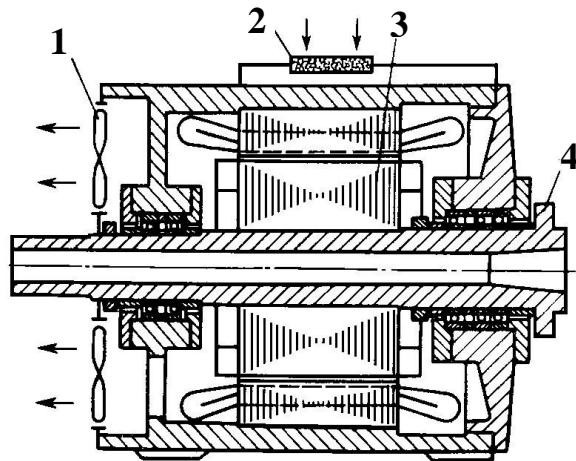


Рисунок 3.2 — Конструктивна схема мотор-шпинделя

У верстатах застосовують так звані мотор-шпинделі. Конструктивна схема одного з таких шпинделів зображена на рисунку 3.2. До його складу входить асинхронний електродвигун, ротор 3 якого закріплений на шпинделі 4 між передньою та задньою опорами, система примусового охолодження з блоком електровентиляторів 1 та фільтрами 2 для очищення охолоджувального повітря, вузол вмонтованого теплового захисту, а також вимірювальний перетворювач кутового положення шпинделя. Розроблені мотор-шпинделі для токарних верстатів, що не мають важких режимів різання при роботі у нижній частині діапазону частот обертання шпинделя. Одна з конструкцій такого мотор-шпинделя має номінальну потужність 6,5 кВт при максимальній частоті обертання  $5200 \text{ хв}^{-1}$ . У мотор-шпинделях, призначених для роботи у широкому діапазоні частот обертання, між валом двигуна та шпинделем встановлюють механічні передачі, наприклад, планетарні редуктори. Мотор-шпиндель у комплекті з електронним перетворювачем частоти обертання являє собою уніфікований електропривод головного руху. При розробці ряду мотор-шпинделей передбачають можливість вмонтовування їх у головні приводи токарних, токарно-револьверних, багатоцільових, вертикальних та поздовжньо-фрезерувальних верстатів з ЧПК. Застосування таких мотор-шпинделей дозволяє зменшити масу верстата, втрати енергії у головному приводі, рівні шуму та вібрацій.

У особливо високоточних верстатах застосовують головний привод з відокремленим від шпиндельної бабки регульним електродвигуном, вал якого з'єднують зі шпинделем еластичною муфтою, що містить теплоізолювальний елемент. У верстатах нормальної точності електродвигун та шпиндель з'єднують жорсткою муфтою.

З метою повного усунення передачі збурень від електродвигуна на шпиндель застосовують інерційний привод. Шпиндель з'єднується з джерелом енергії, розганяється до робочої швидкості, а потім

від'єднується від приводу. Обробка деталі проводиться після вимикання двигуна. Для збільшення запасу кінетичної енергії на шпindel ь іноді встановлюють маховик.

### 3.3 Конструкції переднього кінця шпинделя

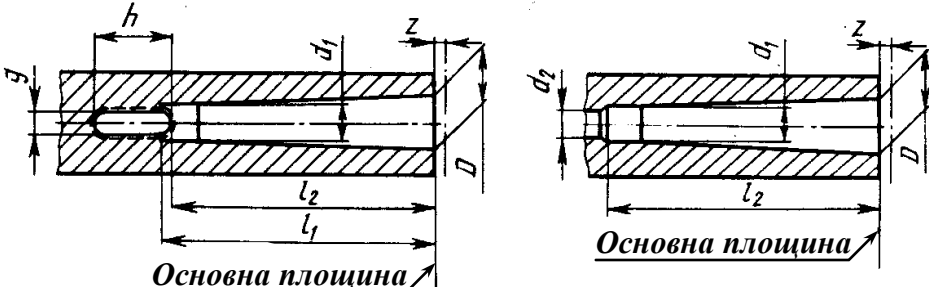
Передній кінець шпинделя призначений для базування та закріплення ріжучого інструменту, оброблюваної деталі чи пристосування. Конструкції та розміри передніх кінців шпинделів стандартизовані. В усіх шпинделях точне центрування та жорстке спряження інструменту із шпинделем забезпечує конічне з'єднання з різною конусністю, в залежності від типу верстата. Так у випадку ручної заміни інструменту застосовують конуси Морзе та метричний (позначення та номінальні розміри наведені у таблиці 3.2). У верстатах з ЧПК, де інструмент замінюється автоматично, застосовують конуси з конусністю 7:24 (таблиця 3.3), шпинделі шліфувальних верстатів мають конусність 1:3.

Шпинделі малих токарних верстатів звичайно виготовляють з нарізним переднім кінцем (таблиця 3.4), середніх та великих — фланцевими під поворотну шайбу (таблиця 3.5), точних токарних верстатів — фланцевими без поворотної шайби.

Застосування фланцевих кінців під поворотну шайбу дозволяє швидко закріплювати та знімати патрони без згвинчування гайок. При використанні фланцевих кінців без поворотної шайби виліт шпинделя зменшується, але трудомісткість встановлення та зняття патрона зростає.

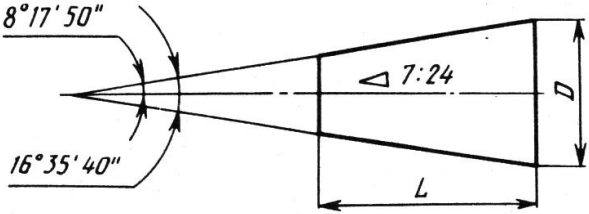
Кінці шпинделів свердлильних, розточувальних та фрезерувальних верстатів виконують за відповідними стандартами. Шпинделі з конусністю отвору 7:24 виготовляють чотирьох виконань. Виконання 5 з конусами від 30 до 70 застосовують у свердлильних та розточувальних верстатах, з конусами 30, 40, 45, 50 — на фрезерувальних верстатах, виконання 6 з конусами 50, 55 та 60, а також 7 з конусом 70 застосовують на розточувальних та фрезерувальних верстатах (таблиця 3.6). Перший та другий ряди діаметрів у таблиці 3.6 призначені для свердлильних та розточувальних верстатів, третій — для фрезерувальних, четвертий — у окремих випадках за погодженням із замовником. З конусами Морзе та метричними виготовляють шпинделі трьох виконань. Виконання 1 застосовують у свердлильних та розточувальних верстатах при встановленні інструментів, що мають хвостовик з лапкою, виконання 2 — у тих же верстатах для встановлення хвостовиків інструментів з різьбовим отвором (таблиця 3.7). Шпинделі виконання 3 з метричним конусом та торцевою шпонкою застосовують у розточувальних верстатах.

**Таблиця 3.2 — Розміри інструментальних конусів Морзе та метричних (за СТ СЭВ 147 – 75), мм**



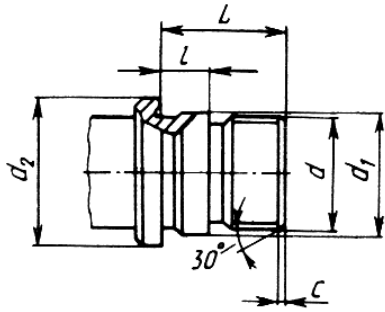
Позначення конуса	$D$	$d_1$	$d_2$	$l_{1min}$	$l_2$	$g$	$h$	$z$
Морзе:								
0	9,045	6,7	—	52	49	3,9	15	1
1	12,065	9,7	7	56	50	5,2	19	1
2	17,78	14,9	11,5	67	62	6,3	22	1
3	23,825	20,2	14	84	78	7,9	27	1
4	31,267	26,5	18	107	98	11,9	32	1,5
5	44,399	38,2	23	135	125	15,9	38	1,5
6	63,348	54,6	27	188	177	19	47	2
Метричний:								
4	4	3	—	25	21	2,2	8	0,5
6	6	4,6	—	34	29	3,2	12	0,5
80	80	71,5	33	202	186	26	52	2
100	100	90	39	240	220	32	60	2

**Таблиця 3.3 — Розміри внутрішніх та зовнішніх конусів з конусністю 7:24 (за ГОСТ 15945 – 82), мм**



Позначення конуса	$D$	$L$	Позначення конуса	$D$	$L$
10	15,87	21,8	50	69,85	103,7
15	19,05	26,9	55	88,90	132
25	25,4	39,8	60	107,95	163,7
30	31,75	49,2	65	133,35	200
35	38,1	57,2	70	165,1	247,5
40	44,45	65,6	75	203,2	305,8
45	57,15	84,8	80	254	390,8

Таблиця 3.4 — Різьбові кінці шпинделів (за ГОСТ 16868–71), мм



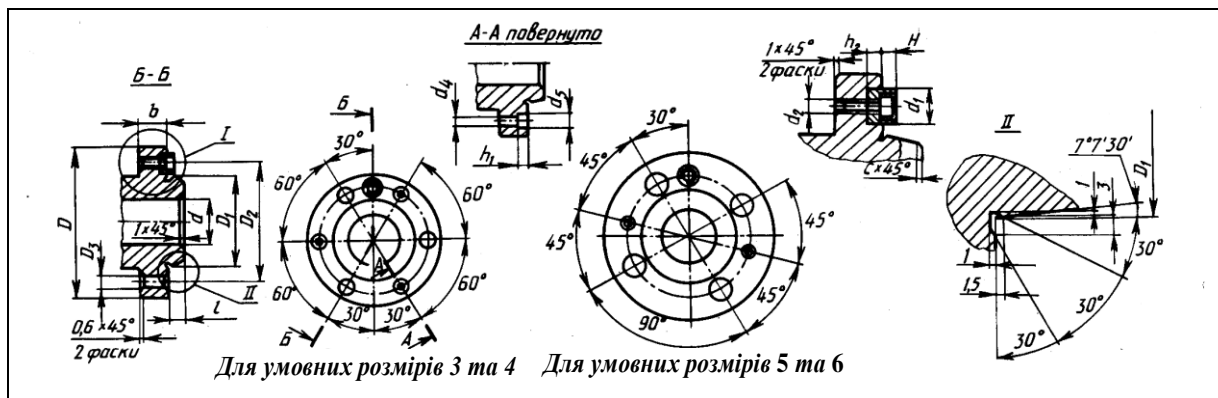
Нарізка		d <sub>1</sub>	d <sub>2</sub>	L	l	c
d	Крок					
M39	4	40	50	35	14	2
M45	4,5	48	60	40	15	2

Примітки.

1. Різь — за СТ СЕВ 182-75. Допуски на різь по середньому класу точності з посадкою 6g — за ГОСТ 16093-81.

2. Проточка типу 1 вузька — за ГОСТ 10549-80.

Таблиця 3.5 — Фланцеві кінці шпинделів під поворотну шайбу, мм



Умовний розмір кінця шпинделя	D	D <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>	d, не більше			d <sub>1</sub>	d <sub>2</sub>
				Циліндричний отвір	Конус Морзе	Конус метричний		
3	102	53,975	75	Не регламентується	4	—	—	—
4	112	63,513	85		4	—	14	M6
5	135	82,563	104,8		5	—	16	M6
6	170	106,375	133,4		6	80	19	M8

Продовження таблиці 3.5

Умовний розмір кінця шпинделя	d <sub>3</sub>	d <sub>4</sub>	d <sub>5</sub>	l	b	H	h <sub>1</sub>	h <sub>2</sub>	c	Гвинт
3	17	7	11	11	16	—	—	10	1	—
4	17	7	11	11	20	5	5	10	1	M6x14
5	21	7	11	13	22	5	6	10	1	M6x14
6	23	9	14	14	25	5	8	11	1,2	M8x20

**Таблиця 3.6 — Кінці шпинделів свердлильних, фрезерувальних та розточувальних верстатів (за ГОСТ 24644–81), мм**

Позначення конуса кінця шпинделя	$D_1$				$D_2$	$e$	$d$	$d_1$ , не менше	$d_2$
	1-й ряд	2-й ряд	3-й ряд	4-й ряд					
30	—	50	70	69,832	54	0,15	17,4	17	M10
40	80	65; 90	90	88,882	66,7	0,15	25,3	17	M12
45	80; 100	90	100	101,6	80	0,15	32,4	21	M12
50	100; 125	110	125	128,57	101,6	0,2	39,6	27	M16
55	160	—	150	152,4	120,6	0,2	50,4	27	M20
60	200	220	220	221,44	177,8	0,2	60,2	35	M20
70	250	—	335	335	265	0,25	92,9	42	M24

**Продовження таблиці 3.6**

Позначення конуса кінця шпинделя	$d_3$	$L$ , не менше	$l_2$ , не менше	$l_3$	$c$	$m$ , не менше	$n$	$E/2$	$b$	Гвинт	$v$
30	M6	73	16	9	8	12,5	8,0	16,5	15,9	M6x16	0,03
40	M6	100	20	9	8	16	8,0	23	15,9	M8x20	0,03
45	M8	120	20	13	9,5	18	9,5	30	19	M8x20	0,03
50	M10	140	25	18	12,5	19	12,5	36	25,4	M10x30	0,04
55	M10	178	30	18	12,5	25	12,5	48	25,4	M10x30	0,04
60	M10	220	30	18	12,5	38	12,5	61	25,4	M10x30	0,04
70	M12	315	36	24	20	50	20,0	90	32	M12x45	0,04

Примітки:

1. Розмір  $D$  — за ГОСТ 15945-82.
2. 1-й та 2-й ряди — для свердлильних та розточувальних верстатів, 3-й — для фрезерувальних верстатів, 4-й ряд використовується за погодженням із замовником.



3. Для 1-го та 2-го рядів  $d_3$  не регламентується.
4. Значення  $D_2$  наведені для 3-го ряду. Для 1-го та 2-го рядів  $D_2$  вибирають за конструктивними міркуваннями з таблиці 3.6.
5. Для верстатів з ЧПК різьбові отвори  $d_2$  допускається не виготовляти.
6. Допускається виготовляти шпинделі з одним або двома виступами, що мають розміри  $n$  та  $b$ .
7. Допускається збільшувати довжину гвинта та розміри  $c$  та  $l_3$ .

**Таблиця 3.7 – Кінці шпинделів свердлильних та розточувальних верстатів (за ГОСТ 24644 – 81), мм**

Позначення конуса	$D_1$		$l$	$h_1$	$g_1$
	1-й ряд	2-й ряд			
Морзе:					
1	25	—	—	—	—
2	35	—	—	—	—
3	45	50	28,5	36,5	8,3
4	60	65	28,5	39,5	8,3
5	80	90	28,5	44,5	13
6	100	110	28,5	38,5	16,3
6	125	—	28,5	38,5	16,3
метричний:					
60	125	—	30	44	19
80	160	—	30	44	19
100	200	—	30	52	26
120	250	220	30	60	32
160	320	—	40	76	38

Примітки:

3. Розміри  $D$ ,  $d_5$ ,  $d_6$ ,  $l_5$ ,  $l_6$ ,  $g$ ,  $h$ ,  $z$  – за СТ СЕВ 147-75 (див. табл. 3.2).
4. Значення граничних відхилень  $g_1$  — за ГОСТ 24644-81.