

Vřetena obráběcích strojů

Úlohou vřetena je zaručit obrobku (u soustruhů) nebo nástroji (u frézky, vrtačky, brusky) přesný otáčivý pohyb, tj. takový, při němž se dráhy jednotlivých bodů obrobků nebo nástroje liší od kružnice jen v přípustných mezích. Funkce vřetena je zde shodná s funkcí kruhového vedení a vřeteno se od něho liší pouze tvarem. Jeho skladbu ukazuje obr. 5.33.

Vřeteno je u CNC obráběcích strojů ukládáno z 99 % do valivých ložisek. Zbývajících 1 % vřeten je ukládáno do rotačních hydrostatických ložisek. V dalším budou dále rozzebírána pouze valivá ložiska. Vřeteno obráběcího stroje je uloženo např. ve dvou radiálních a v jednom nebo dvou axiálních ložiskách. Konec vřetena, který vyčnívá ze skříně vřeteníku, se nazývá přední konec; je vhodně upraven pro nasazení nebo upnutí obrobku či nástroje. Úprava předního konce vřetena závisí na druhu stroje a je normalizována. Ložisko bližší přednímu konci vřetena se nazývá přední nebo hlavní a má rozhodující vliv na přesnost otáčivého pohybu vřetena [1].

Vřeteno obráběcího stroje

Způsob zástavby	Typ uspořádání valivého ložiska	Utěsnění	Náhon	Upínací kužel
• vřeteník • tubus	• kosoúhlé • válečkové • obousměrné axiální i kuželíkové	• dotykové • bezdotykové	• vložený převod • el. vřetena • přímý náhon	• ISO (SK) • HSK • Coromant Capto

Obr. 5.33. Morfologie vřetena

Vřeteno představuje velmi důležitý prvek ve skladbě obráběcích strojů, a proto jsou na konstrukční provedení kladeny náročné požadavky:

- přesnost chodu – je určena velikost tzv. radiálního a axiálního házení;
- dokonalé vedení – vřeteno nesmí měnit polohu v prostoru, mění-li jeho zatížení směr a smysl;
- v uložení vřetena musí být možno vymezovat vůli vzniklou opotřebením;
- ztráty v uložení vřetena musí být co nejmenší (účinnost, oteplování a tepelná dilatace, změna polohy a funkce);
- vřeteno musí být tuhé – jeho deformace spolu s přesností chodu má rozhodující vliv na přesnost práce obráběcího stroje.

Přesnost chodu vřetena se kontroluje na předním konci vřetena na té ploše, která má přímý vliv na přesnost otáčení obrobku (upínací kužel pro soustružnický hrot; plo-

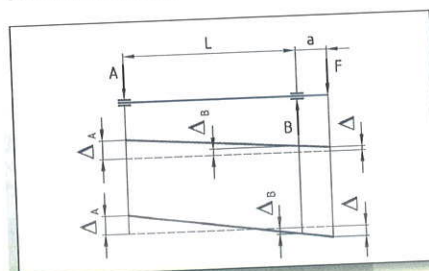
cha pro upevnění upínací desky či sklídkla apod.) nebo nástroje.

Radiální házení je dáno:

- nepřesností otáčení vřetena, kdy osa vřetena mění během jedné otáčky svou polohu mezi dvěma krajními body; příčinou je, že jedno nebo obě ložiska hází;
- nesouosostí plochy, na níž měříme, s osou otáčení;
- neokrouhlým tvarem příslušné plochy.

Výsledné radiální házení naměřené úchylnoměrem je tedy složeno z těchto tří dílčích házení. Poslední dvě příčiny omezíme zvýšením přesnosti při obrábění (zmenšením

přípustných výrobních tolerancí). Nepřesnost otáčení vřetena (příčina první) je způsobena radiálním házením ložisek [1].



Obr. 5.34. Vliv házení ložisek na přesnost chodu [1]

Vliv radiálního házení ložisek na radiální házení předního konce vřetena je závislý na poměru délky vyložení a ke vzdálenosti ložisek L a na velikosti a směru házení obou ložisek. Je-li házení předního ložiska Δ_B a zadního Δ_A stejného směru a smyslu, platí podle obr. 5.34:

(5.22)

$$\frac{\Delta_A - \Delta}{\Delta_B - \Delta} = \frac{L + a}{a}$$

a z toho

$$\Delta = \frac{\Delta_B (a + L) - \Delta_A a}{L} = \Delta_B + \frac{a}{L} (\Delta_B - \Delta_A)$$

Bude-li

$$\frac{\Delta_A}{\Delta_B} = \frac{L + a}{a}$$

bude $\Delta = 0$ a vřeteno nebude na volném konci házet.

V praxi ovšem nelze s tímto případem počítat. Obecně však platí pravidlo pro volbu a montáž uložení vřeten obráběcích strojů. Aby radiální házení předního konce vřetena bylo co nejmenší, je třeba zvolit přední ložisko (hlavní) přesnější, tj. s menším házením než zadní, a montovat je tak, aby obě házela v jedné rovině ve stejném smyslu. Pro hlavní ložisko se použije valivé ložisko se zvýšenou přesností chodu a pro zadní ložisko se použije ložisko běžné přesnosti. Bude-li házení obou ložisek v jedné rovině opačných smyslů, bude výsledné házení na předním konci vřetena největší dle vztahu [1]:

$$\Delta = \Delta_B + \frac{a}{L} (\Delta_B + \Delta_A)$$

Axiální házení se měří na čelní ploše vřetena a je způsobeno axiálním házením ložiska či nedokonalou kolmostí čelní plochy k ose otáčení. Axiální házení příruby (nebo upínací desky) se zčásti odstraní, obrobí-li se příslušná plocha po montáži na vlastním stroji.

Tuhost vřetena má značný vliv na přesnost práce i na dynamickou stabilitu obráběcího stroje. Obvykle se udává tuhost vřetena na jeho předním konci, na němž se upevňuje upínací zařízení s obrobkem nebo nástroj, neboť deformace v tomto místě má přímý vliv na jakost práce.

Celková deformace vřetena je dána dle obr. 5.35 součtem dílčích deformací vřetena, ložisek a skříně:

$$\delta = \delta_v + \delta_L + \delta_s$$

Jednotlivé složky deformace lze matematicky definovat a pro dané podmínky určit.

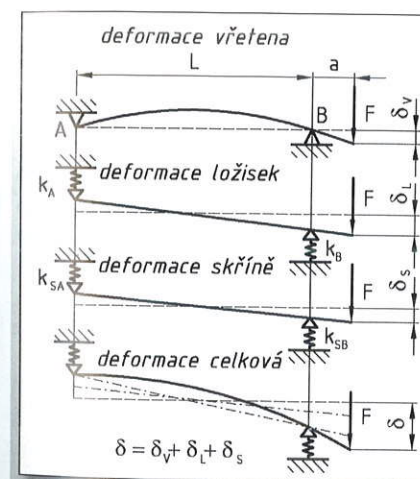
Velikost dílčí deformace vřetena δ_v můžeme definovat (za předpokladu dokonale tuhých ložisek) dle obr. 5.36.

Vřeteno se rozdělí na dvě části – na část mezi ložisky o délce L a momentu setrvačnosti J_1 a na převislý konec o délce a a momentu setrvačnosti J_2 . Průhyb na konci převislého konce vřetena způsobený silou F (v tomto místě působící) je:

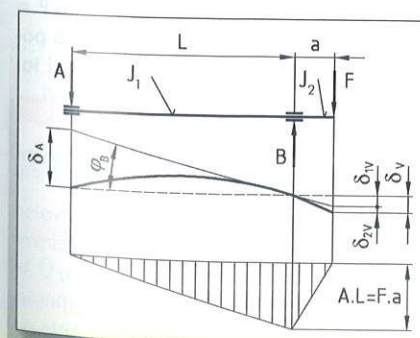
(5.25)

$$\delta_v = \delta_{v1} + \delta_{v2}$$

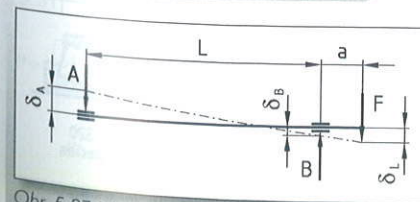
Zde je složka δ_{v1} složka průhybu způsobená deformací vřetena mezi ložisky a δ_{v2} je průhyb převislého konce vřetena. Dále δ_A je



Obr. 5.35. Deformace vřetena – vliv tuhosti vřetena, ložisek, skříně [1]



Obr. 5.36. Vliv poddajnosti vřetena [1]



Obr. 5.37. Vliv poddajnosti ložisek [1]

myšlený průhyb části vřetena mezi ložisky pro případ, že by tato část byla v ložisku B velknota a na konci A zatížena reakcí ložiska A. Výsledný průhyb vřetena na jeho konci v místě působení síly F pak bude:

(5.26)

$$\delta_v = \frac{F \cdot a^2}{3E} \left(\frac{L}{J_1} + \frac{a}{J_2} \right)$$

Tuhost vřetena je dále ovlivněna tuhostí uložení, tj. deformacemi obou ložisek způsobenými reakcemi. Známe-li tuhost ložiska k_A , k_B nebo jejich poddajnost C_A , C_B , můžeme vyjádřit vliv jejich deformace na úhrnnou deformaci vřetena podle obr. 5.37 (za předpokladu dokonale tuhého vřetena):

(5.27)

$$\delta_L = \frac{F}{L^2} \left[a^2 \cdot C_A + (a+L)^2 \cdot C_B \right]$$

Poslední část celkové deformace, způsobená poddajností skříně (tělesa vřeteníku) δ_s , může být rovněž matematicky definována. Vztahy musí být odvozeny vždy pro daný konkrétní případ, výpočet je poměrně složitý a vhodný pro účelné využití metody konečných prvků.

Výsledná deformace na konci vřetena způsobená poddajností vřetena a ložisek bude:

(5.28)

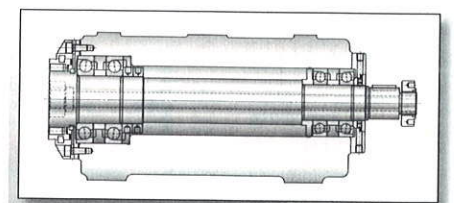
$$\delta = \delta_v + \delta_L$$

a dosazením

$$\delta = \frac{F \cdot a^2}{3E} \left(\frac{L}{J_1} + \frac{a}{J_2} \right) + \frac{F}{L^2} \left[a^2 \cdot C_A + (a+L)^2 \cdot C_B \right]$$

Z výrazu pro δ_v vyplývá, že tato deformace se zmenšuje se zmenšující se vzdáleností ložisek L. Naproti tomu se zmenšující vzdálenosti ložisek L se deformace δ_L zvětšuje. Bude tedy pro každé vřeteno a jeho uložení existovat určitá vzdálenost ložisek L_v , již bude příslušet nejmenší úhrnná deformace na konci vřetena. Její určení je individuální dle typu a způsobu uložení.

Pracovní přesnost je vedle výrobnosti hlavním parametrickým ukazatelem kvality obráběcího stroje. Tato je potom v rozhodující míře ovlivněna zejména pracovní přesností vřetena – jeho přesností chodu (radiální a axiální), tuhostí statickou i dynamickou a teplotními vlastnostmi během pracovního provozu. Široké spektrum těchto vlivů a jejich vzájemné souvislosti vyznačuje přehled na obr. 5.38. Je z něho zřejmé, že konstrukci pracovního vřetena včetně jeho uložení je nutno věnovat náležitou pozornost.

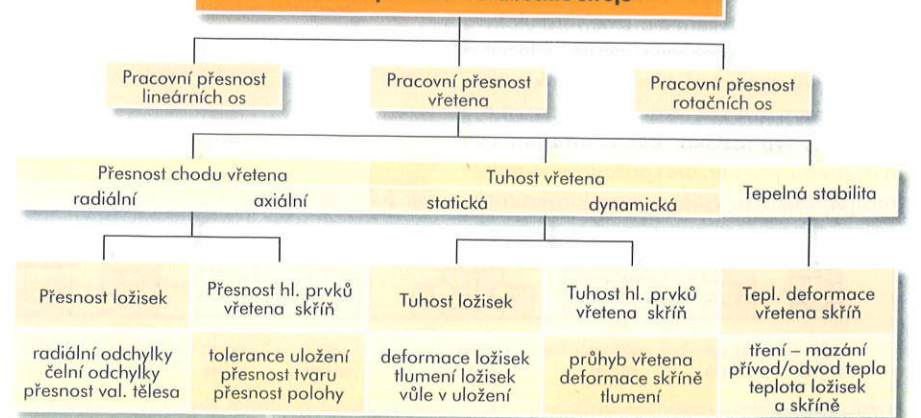


Obr. 5.39. Skříň vřetena (NSK)

Je nutno posuzovat všechny otázky komplexně z hlediska přesnosti, tuhosti, teplotní stability apod. Nutno mít na zřeteli, že radiální i axiální deformace ovlivňují přímo pracovní přesnost vřeteníku.

I přes rozličné konstrukční varianty existují dva základní způsoby zástavby vřetena do nosné struktury (vřeteníku) stroje. Prvním

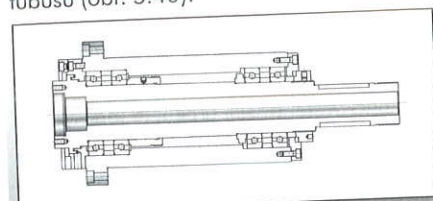
Pracovní přesnost obráběcího stroje



Obr. 5.38. Vlivy na pracovní přesnost obráběcího stroje

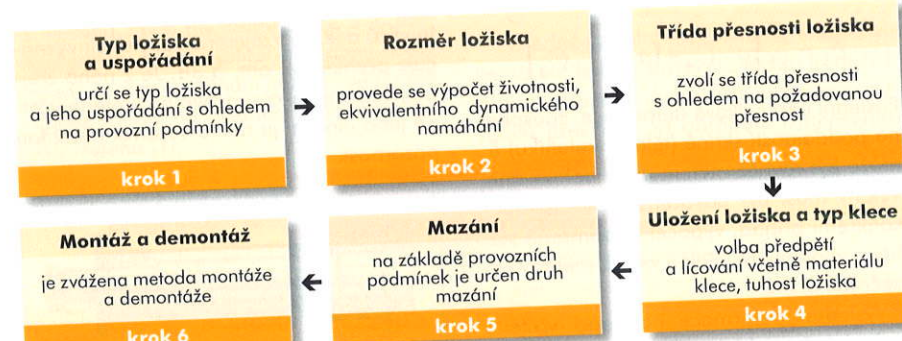
5.2 Vřetena obráběcích strojů

z nich je zástavba tělesa skříňového tvaru (obr. 5.39). Pokud bude vřeteno zastavěno do tělesa rotačního tvaru, hovoříme o tzv. tubusu (obr. 5.40).



Obr. 5.40. Tubus vřetena (NSK)

Při návrhu valivého uložení vřetena CNC obráběcího je nutné dodržet postup prezentovaný šesti kroky dle obr. 5.41.



Obr. 5.41. Etapy návrhu uložení vřetena

Krok 1: Typ ložiska a jeho uspořádání

Pro valivé uložení vřetena je kritickým faktorem jeho tuhost a s tím související průměr hřídele. Pokud stanovíme potřebné průměry hřídele vřetena, pak nám automaticky vychází i průměr otvoru vzhledem k různým typům valivých ložisek (obr. 5.42).

Volba typu ložiska je věcí kompromisu mezi tuhostí a možností zástavbového prostoru. Obecně platí, že nejmenší jsou ložiska s kosoúhlým stykem a pro největší uložení jsou užívána kuželíková ložiska, válečková jsou pak uprostřed. Limitujícím faktorem pak nemusí být tzv. otáčkový faktor $n \cdot d_n$ pro daný typ ložiska, kde n jsou otáčky a d_n střední průměr, ale i požadovaná přesnost uložení. Ne všechny typy ložiska mo-

hou být vyráběny v požadované přesnosti. Vliv na přesnost chodu má také způsob mazání, materiál klece atd. – co je možné u jednoho typu ložiska (např. mazání olejem nebo tukem) nemusí být možné u druhého. Při výběru uspořádání dle tab. 5.6 je nutné zvážit:

- provozní otáčky – faktor $n \cdot d_n$;
- požadovanou přesnost chodu;
- zatížení vřetena od řezných sil;
- způsob mazání;
- požadovanou tuhost.

Uspořádání znázorněná v tab. 5.6 reprezentují malé množství z možných kombinací, které se vyskytují ve stavbě obráběcích

ložiska mohou být zhotovena celocelová nebo tzv. hybridní (s keramickými valivými elementy Si_3N_4). Důvodem použití je možnost dosažení vyšších otáček, i přesto, že jsou ložiska dražší. Valivé elementy mají nižší hmotnost (tab. 5.7), a tím dochází i ke vzniku menších odstředivých sil, dále je i menší tepelná vodivost, čímž nedochází k přenosu tepla mezi vnitřním a vnějším kroužkem. Keramika není magnetická a je odolná proti korozi.

Krok 2: Rozměr ložiska

Vřeteno CNC obráběcího stroje musí zaručit prostorovou stabilitu osy a přenášet zatížení mnohdy při velmi vysokých otáčkách.

Všeobecně v aplikacích obráběcích strojů je velikost ložiska ovlivněna zatížením, které má přenést, a požadavky na životnost a spolehlivost. Pro vřetena je podobně určujícím faktorem tuhost, přesnost chodu a dlouhá životnost.

Vřetenová ložiska přenáší kombinované radioaxiální zatížení. Při výpočtu zvoleného druhu uložení provádíme jeho přepočtení na tzv. ekvivalentní dynamické zatížení: (5.30)

$$P = X \cdot F_R + Y \cdot F_A$$

kde F_R – radiální síla
 X – radiální koeficient
 F_A – axiální síla
 Y – axiální koeficient

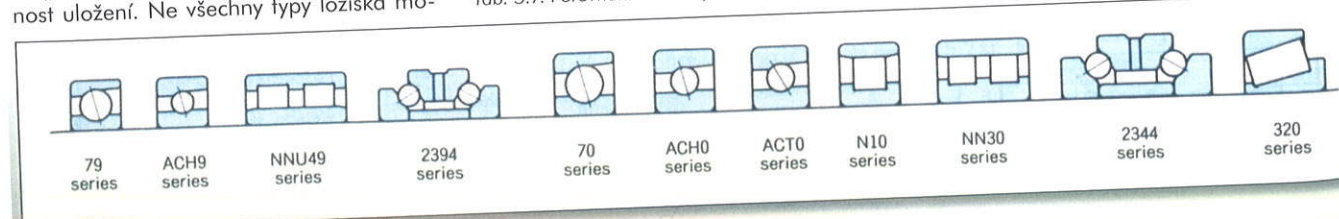
Pro válečkové ložisko přenášející pouze radiální síly je ekvivalentní zatížení dáno $P = X \cdot F_R$. Koeficienty X a Y jsou závislé na poměru F_A/F_R a jsou jednotlivými výrobci ta-

strojů. Zde jsou rozdělena uspořádání do čtyř základních skupin podle předního ložiska na:

- uložení s dvouradým válečkovým ložiskem;
- uložení v ložiskách s kosoúhlým stykem;
- uložení v ložiskách kuželíkových;
- uložení vřeten s průvlakovým motorem (elektrovřeteno).

Vlastnost	Silikon nitrid Si_3N_4	Ocel
hustota $[\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}]$	3,19	7,8
teplotní roztažnost $[10^{-6} \cdot \text{C}^{-1}]$	3,2	11
modul pružnosti $[\text{kN} \cdot \text{mm}^{-2}]$	315	210
Poissonova konstanta μ	0,26	0,3
tvrdost HV10	1700	700
teplotní vodivost $[\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{C}^{-1}]$	30 – 40	40 – 50
limitní teplota $[^\circ\text{C}]$	1000	300

Tab. 5.7. Porovnání keramiky a oceli



Obr. 5.42. Rozměrová řada ložisek [Koyo]

Typ	Uspořádání ložisek	Charakteristika [%]					Užití
		Axiální tuhost	Radiální tuhost	Otáčky	Přesnost	Radiální zatížení	
I.		100	100	100	100	100	• soustruhy • frézky • vrtačky • obráběcí centra
		66	100	118	100	100	
II.		57	85	155	160	100	• soustruhy • frézky • obráběcí centra
		81	58	155	160	110	
		81	66	180	160	100	• vrtačky • obráběcí centra
		60	61	230	160	85	
III.		21	55	360	160	50	• brusky
		120	120	100	90	100	• velké soustruhy • obráběcí centra
IV.		50	60	300	160	80	• obráběcí centra

Tab. 5.6. Uspořádání ložisek [obrázky uložení Koyo]

belovány stejně jako případné modifikace rovnice pro ekvivalentní dynamické zatížení. U uložení, kde dochází ke změně ekvivalentního dynamického zatížení v závislosti na otáčkách, vypočítává se ekvivalentní dynamické zatížení následovně: (5.31)

$$P = \sqrt[3]{P_1^3 \cdot \frac{n_1}{n_m} \cdot \frac{q_1}{100} + P_2^3 \cdot \frac{n_2}{n_m} \cdot \frac{q_2}{100} + \dots + P_i^3 \cdot \frac{n_i}{n_m} \cdot \frac{q_i}{100}}$$

$$n_m = n_1 \cdot \frac{q_1}{100} + n_2 \cdot \frac{q_2}{100} + \dots + n_i \cdot \frac{q_i}{100}$$

kde:

$i = 1 \dots n$
 počet provozních otáčkových stupňů
 $P_1, P_2 \dots P_i$
 ekvivalentní dynamické zatížení [N]
 $q_1, q_2 \dots q_i$
 podíl jednotlivého otáčkového stupně na celkové době zatěžování [%]
 $n_1, n_2 \dots n_i$
 otáčky v jednotlivých stupních $[\text{min}^{-1}]$
 $n_m \dots$
 střední otáčky $[\text{min}^{-1}]$

Pro výpočet hodinové trvanlivosti ložiska se užije následující vztah:

(5.32)

$$L_{h10} = \left(\frac{C}{P} \right)^p \cdot \frac{10^6}{60 \cdot n_m} \quad [\text{hod}]$$

kde:
 P – ekvivalentní dynamické zatížení [N]
 C – dynamická únosnost ložiska [N]
 p – mocnitél – pro kuličková ložiska $p = 3$
 – pro válečková ložiska $p = 10/3$
 n_m – střední otáčky ložiska $[\text{min}^{-1}]$

Jednotliví výrobci vřetenových ložisek, jako je zejména INA (FAG) a SKF, přišli s modi-