

KEGA 015ŽU-4/2023

KEGA 015ŽU-4/2023

Frézovanie

Modernizácia výučby trieskových technológií s prvkami informačných technológií na báze
zosieťovaných virtuálnych laboratórií KEGA 015ŽU-4/2023



ŽILinskÁ UNIVERZITA V ŽILINE
Strojnícka
fakulta

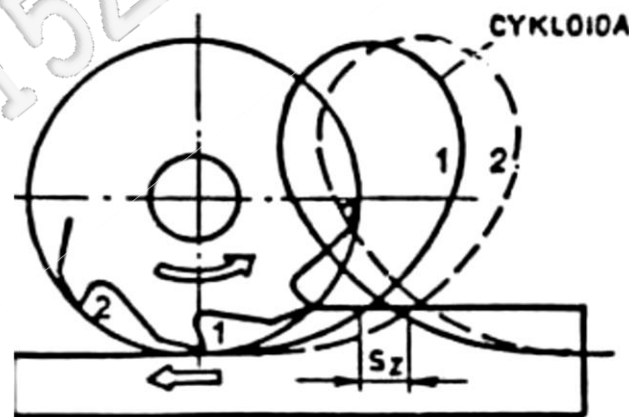
Frézovanie

Frézovanie je operácia trieskového obrábania, pri ktorom je z obrobku odoberaná vrstva materiálu vo forme jednotlivých drobných triesok rotačným viaczubým nástrojom - frézou. Fréza sa pri práci otáča okolo svojej osy a svojimi zubami po obvode sa postupne zarezáva do obrobku, ktorý sa proti nástroji súčasne posúva. Každý zub frézy postupne odrezáva z obrábaného materiálu krátke triesky rôznej hrúbky, takže proces rezania je prerušovaný

Frézovanie je metóda, ktorej využitie je mnohostranné. Pomocou nej možno obrábať plochy rovinné, tvarové i rotačné, je možné frézovať drážky rôznych profilov, a aj závitý a ozubení. Ide o veľmi rozšírenú metódu obrábania.

Podstata frézovania

Obrobok pevne upnutý na pracovnej stoličke rezky vykonáva smerom k nástroju súvislý pohyb - pracovní posuv - pohyb vedľajší. V niektorých prípadoch (napr. pri výrobe ozubení odvaľovacím spôsobom) sa miesto obrobku posúva otáčajúci sa rátiť. Každá čepel frézy vykonáva behom rezania okrem otáčavého pohybu vo vzťahu k obrobku relatívne tiež pohyb posuvný. Z toho plynie, že záberová dráha každého zubu nie kruhová, ale v skutočnosti táto dráha má tvar cykloidy. Ide o rezný pohyb zubu - pohyb hlavný

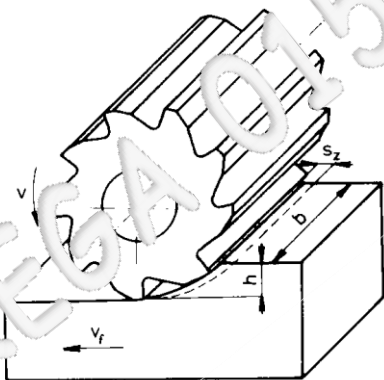


Popis operácie, jej možnosti – základné pojmy

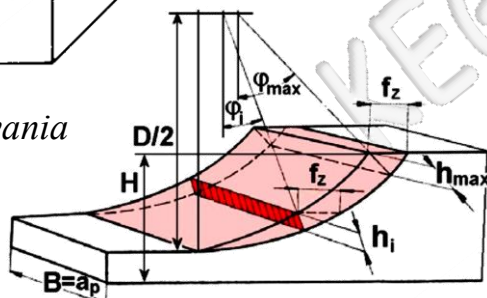
- Hlavný pohyb pri frézovaní je rotačný, ktorý vykonáva nástroj – fréza.
- Vedľajší pohyb – posuv vykonáva obrobok umontovaný na stole stroja. Pri pohybe bod reznej hrany nástroja relatívne opisuje cykloиду.

Podľa polohy osi nástroja k obrábanej ploche je možné rozlišovať frézovanie:

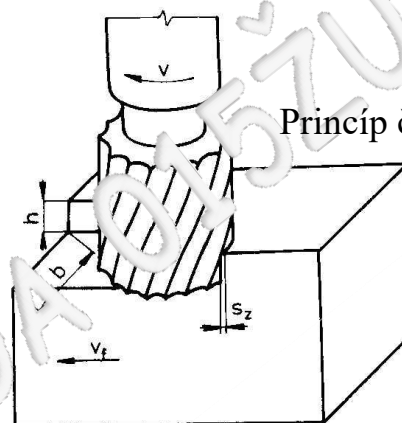
- « obodom nástroja - valcové frézovanie – os nástroja je rovnobežná s obrábanou plochou. Hĺbka rezu sa nastavuje v rovine kolmej na os frézy,
- « čelom nástroja – čelné frézovanie, pri ktorom je os nástroja kolmá na obrábanú plochu. Hĺbka rezu sa nastavuje v smere osi nástroja



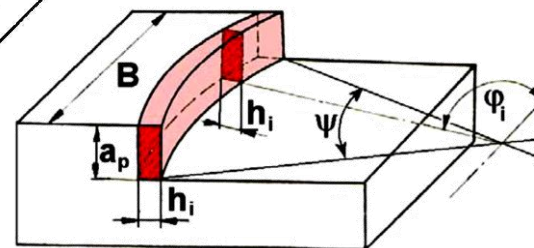
Princíp valcového frézovania



Prierez triesky pri valcovom frézovaní



Princíp čelného frézovania



Prierez triesky pri čelnom frézovaní

Pri súbežnom frézovaní sa skutočná hrúbka odrezávanej vrstvy mení z maximálnej hrúbky do nuly. Pri protibežnom frézovaní je to opačne. Metóda súbežného frézovania má niektoré prednosti:

- výsledná rezná sila smeruje do materiálu, čo umožňuje znižovať upínacie sily,
- znižuje sa možnosť chvenia.

Plynulý chod frézovania je potrebné zabezpečiť vymedzením vôle v posuvových mechanizmoch nástroja.

Za reznú rýchlosť sa považuje obvodová rýchlosť nástroja „ v “

$$v = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} ,$$

kde D - priemer nástroja (mm),

n - otáčky nástroja (min^{-1}).

Posuv sa určuje:

- posuvom na zub - f_z ,
- posuvom na otáčku - f_{ot} ,
- posuvom za minútu - v_f

a platí:

$$v_f = f_{ot} \cdot n = f_z \cdot z \cdot n ,$$

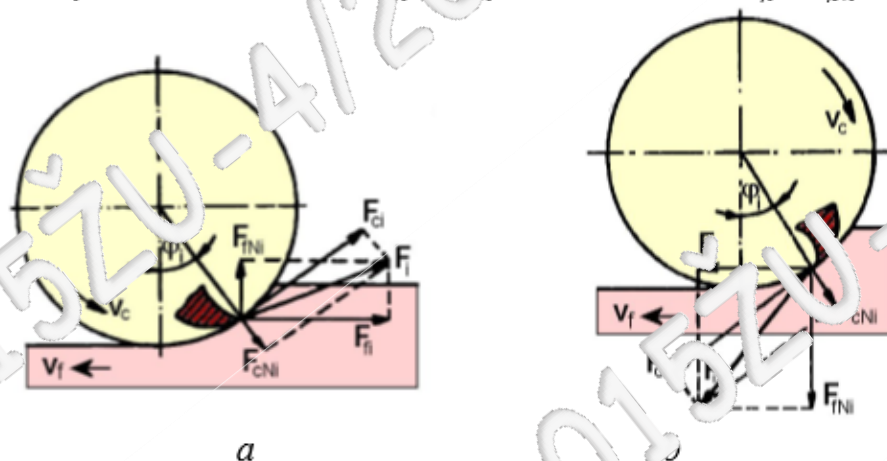
kde z - počet zubov nástroja.

Hĺbka rezu a_p je daná hrúbkou odrezávanej vrstvy materiálu pri jednom zábere frézy.

Pri frézovaní je zub nástroja v zábere iba časť otáčky, zostatok je beh zuba na prázdno. Ide teda o prerušovaný rez. Pri behu na prázdno sa zub nástroja ochladzuje.

3.2 Rezné sily

Pri špecifikácii rezných síl pri frézovaní sa vychádza zo silových pomerov na jednej reznej hrane, ktorá je v polohe určenej uhlom ϕ_i . Pre valcové frézovanie nástrojom s priamymi zubmi sa celková rezná sila pôsobiaca na reznej hrane F_i rozkladá na zložky F_{ci} a F_{fi} resp. na zložky F_{ci} a F_{fNi} - obr.3.4.



obr. 3.4. Základné schémy valcového frézovania a) protiběžné frézovanie, b) súbežné,
 F_i - celková rezná sila, F_{ci} - rezná sila, F_{fNi} - kolmá rezná sila, F_{fi} - posuvová sila, F_{fNi} - kolmá posuvová sila

Rezná sila F_{ci} sa vyjadří

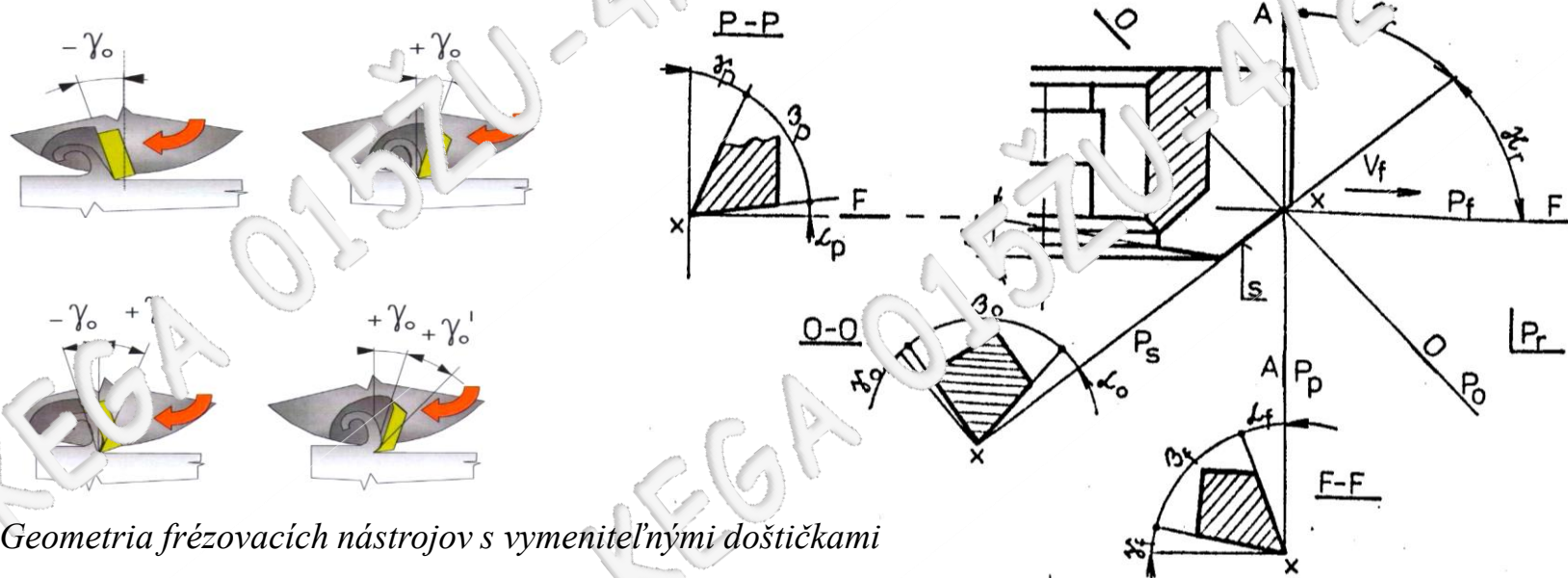
$$F_{ci} = C_{Fc} \cdot a_p \cdot f_z^x \cdot \sin^x \phi_i \quad [\text{N}].$$

Pri čelnom frézovaní sa rezná sila F_{ci} vyjadří obdobným spôsobom:

$$F_{ci} = C_{Fc} \cdot a_p \cdot f_z^x \cdot \sin^{(x-1)} \kappa_r \cdot \sin^x \phi_i \quad [\text{N}].$$

Geometria frézovacích nástrojov

Pri určení geometrie frézovacieho nástroja možno vychádzať z ponatkov o sústružníckych nožoch. Na obr. 3.5 je zobrazená geometria čelnej – valcovej frézy so zubami v skrutkovici. Podobne ako u nožov, základná rovina P_r prechádza uvažovaným bodom reznej hrany K osou nástroja ($P_r \parallel v$). Rovina bočná P_f je rovnobežná s predpokladaným smerom posuvného pohybu v_f a je kolmá na P_r atď. Podobne ako u nožov je uhol sklonu hrany definovaný, ako uhol medzi reznou hranou „s“ a základnou rovinou „ P_r “.



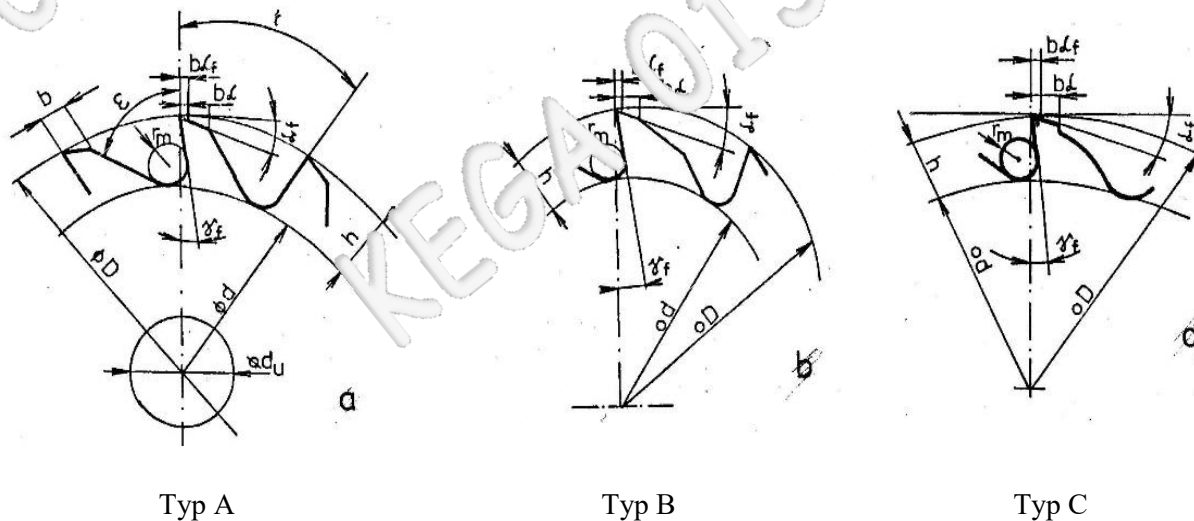
Geometria frézovacích nástrojov s vymeniteľnými dosťičkami

Konštrukcia fréz so zubami frézovanými

Frézy z RO majú rôznu konštrukciu tvaru zubov. Na obr. 3.7 sú používané tvary a ich základné konštrukčné parametre. Frézované zuby podľa obr. 3.7 tvar A sa používajú pre jednoduché nástroje určené pre menší výkon obrábania pre hrúbky odoberanej triesky do 10 mm, pre jemnozubé nástroje so sklonom $\lambda_s = 10^\circ - 20^\circ$. Tvar B zubov je vhodný pre vyšší výkon, pre hrúbky triesky nad 10 mm. Uplatňuje sa u polohrubozubých fréz so sklonom skrutkovice zubov $\lambda_s = 20^\circ - 30^\circ$ a pre hrubozubé s $\lambda_s = 30^\circ - 60^\circ$. Tvar zubov C sa používa pre hrubovacie zuby. Vyznačujú sa vysokou pevnosťou zubov. Tvar paraboly pre chrbtovú rúbču vyhovuje a je charakterizovaný ako nosník o rovnakej pevnosti. Tvar paraboly sa z výrobných dôvodov nahradza kružnicou o polomere $r = (0,3 - 0,45) \cdot D$, kde D je priemer frézy. Bežne sa vyrábajú v sériovej výrobe nástrojov. Ich použitie možno doporučiť pri hrúbkach triesky nad 10 mm.

Podobne možno hodnotiť aj tvar B, pretože tvarom sa približuje k tvaru C a preto má odpovedajúco výhodné pevnostné charakteristiky. Z hľadiska pohľadu je najmenej vhodný tvar A, ktorý umožňuje iba nevelké zaťaženie.

Frézy sú vyrábané frézovaním pomocou uhlových fréz. Ostrenie frézy sa vykonáva na chrbte nástroja, čím sa šírka chrbta zväčšuje



3.4.2 Konštrukcia fréz so zubami pod sústruženými

Základnou prednosťou pod sústružených fréz je, že dávajú nezmenený profil obrobku počas celej svojej životnosti. Určené sú pre obrábanie tvarových plôch. Nemennosť profilu po ostrení sa dosiahne vytvorením chrbta zuba v tvare špirály. Z technologického hľadiska je vhodná špirála Archimedova, ktorú možno zhotoviť jednoduchšie, ako napr. špirálu logaritmickú. Krivku z geometrického hľadiska dostaneme zložením dvoch rovnomerných pohybov – otáčavého a postupného. Krivka síce nezabezpečuje stálosť uhla chrbta, ale jej zmena je v dovolených medziach.

Z hľadiska nemennosti profilu má malý vplyv na to, po ktorej sa podtáčanie realizuje tieto vlastnosti:

- výška profilu frézy musí byť v každom radiálnom reze zubom frézy - rovnaká (rez 1 - 2 - 3 - obr. 3.8),
- zub frézy po preostrení má mať pôvodný uhol chrbta.

Rovnica Archimedovej špirály v polárnych súradniciach má tvar:

$$\rho = k \cdot \varphi,$$

kde ρ - polohový vektor daného bodu od pólu,

φ - orientovaný uhol polohového vektora daného bodu s polárou,

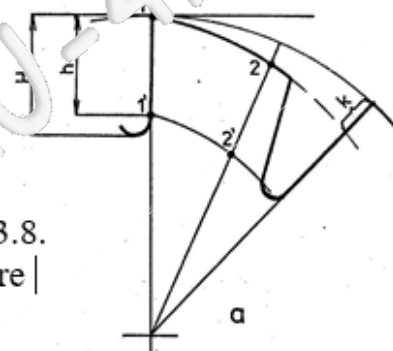
k - konštanta úmernosti, ktorá charakterizuje rozmer špirály, obr. 3.8.

Pri použití vzťahov z diferenciálnej geometrie možno odvodiť vzťah pre veľkosť odchýlky „ k “

$$k = \frac{\pi \cdot D}{z} \cdot \operatorname{tg} \alpha_{FH},$$

kde z - počet zubov frézy,

α_{FH} - bočný nástrojový uhol chrbta na hlave zuba.



Obr. 3.8.

Pod sústruženie do tvaru špirály sa vykonáva na sústruhoch k tomu určených (podtácačí sústruh). Samotný podtácačí pohyb sa uskutočňuje pomocou vačky, ktorej zdvih je rovný veľkosti pod sústruženia - „ k “. Vačka pri tejto operácii ovláda pohyb tvarového sústružníckeho noža k tomu určeného.

Frézovacie nástroje

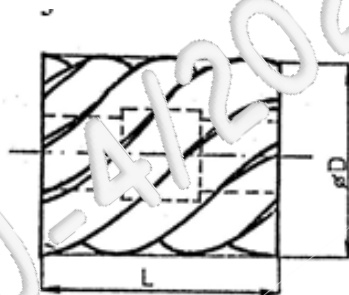
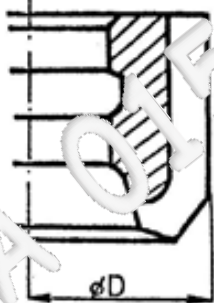
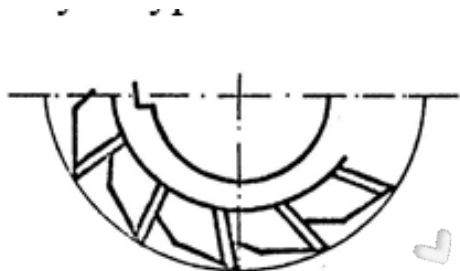
Frézovacie nástroje sú v porovnaní s nožmi značne zložitejšie, preto aj drahšie. Ide o mnohorezný nástroj (viacklinový), kde rezné klíny sú umiestnené na valcovej, kužeľovej, čelnej alebo inej tvarovej ploche. Frézovacie operácie v prevádzkach sú veľmi časté, čo dokumentuje aj skutočnosť, že približne do 20% strojného parku tvoria frézovacie stroje. Táto časť obsahuje najdôležitejšie konštrukčné zásady, ktoré treba rešpektovať pri návrhoch frézovacích nástrojov. Tieto nástroje sú tvarovo aj rozmerovo najrozsiahlejšou skupinou nástrojov. Používajú sa k obrábaniu plôch rovinných, valcových, tvarových a to vnútorných i vonkajších. Hlavný rezný pohyb vykonáva nástroj.

Nástroje možno rozdeliť podľa niekoľkých kritérií. V zásade možno všetky nástroje rozdeliť na 3 základné skupiny:

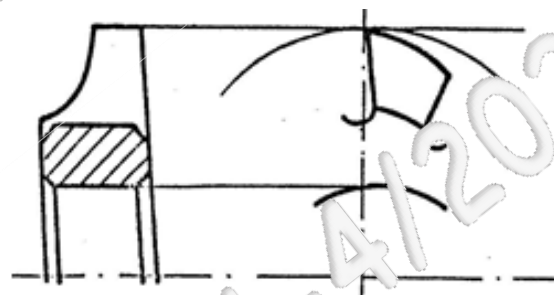
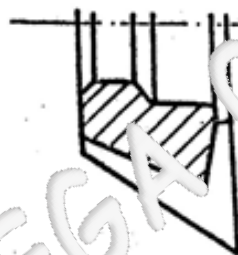
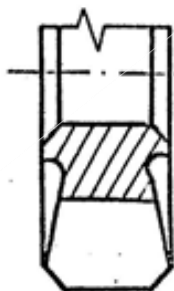
- frézy pre frézovanie rovinných a tvarových plôch,
- frézovacie hlavy - určené pre rovinné frézovanie,
- pilové kotúče - určené pre delenie materiálov.

Samotné frézy delíme podľa nasledovných kritérií:

- podľa zmyslu otáčania: - ľavorezné,
- ~~pravorezné~~,
smer otáčania sa určuje pri pohľade od vretena ku obrobku,
- podľa spôsobu upínania: - so skrutkami (obyčajne u malých priemerov),
- ~~nástročné~~,
- podľa spôsobu výroby: - so zubami frézovanými,
- so zubami ~~podsuštruzenými~~ (tvarové),
- frézy odlievané
- podľa počtu zubov k priemeru: - ~~jemnozubé~~, ak $z = (1,25 \text{ až } 1,5) \sqrt{D}$,
- ~~polohrubozubé~~, ak $z = (0,8 \text{ až } 1,25) \sqrt{D}$,
- ~~hrubozubé~~, ak $z = (0,5 \text{ až } 0,8) \sqrt{D}$,
kde D je priemer frézy.
Počtom zubov je ovplyvnená hlavne dynamika procesu frézovania.
- podľa počtu dielov nástroja: - frézy monolitické,
- frézy s plavcami a) spájkované,
b) ~~mechan.~~ upínané,
- frézy ~~uholové~~,
- frézy ~~zložené~~,
- podľa umiestnenia rezných hrán: - frézy valcové,
- frézy valcové čelné,
- frézy kotúčové,
- frézy uhlové,
- podľa sklonu zubov: - so zubami priamymi,
- so zubami v skrutkovici,
- so zubami striedavo sklonenými.

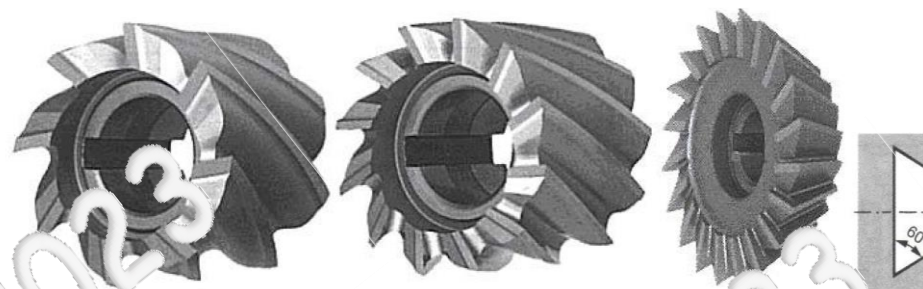


b



- a) čelná – valcová fréza,
- b) valcová fréza,
- c) tvarová fréza zaobľovacia,
- d) kotúčová fréza,
- e) uhlová fréza,

Vybrané druhy monolitných fréz



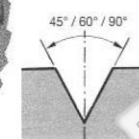
a3, b1, c1, d2, e2, f1, g1, h1, i1

a3, b1, c1, d1, e1, f1, g3, h1, i1

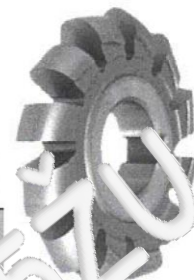


a3, b1, c1, d2, e2, f1, g4, h2, i1

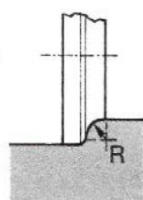
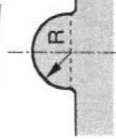
a3, b2, c1, d2, e3, f1, g5, h2, i1



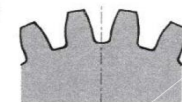
d1, e2, f1, g3, h1, i2



a1, b1, c2, d1, e2, f1, g6, h1, i2



a1, b1, c2, d1, e2, f1, g6, h1, i2



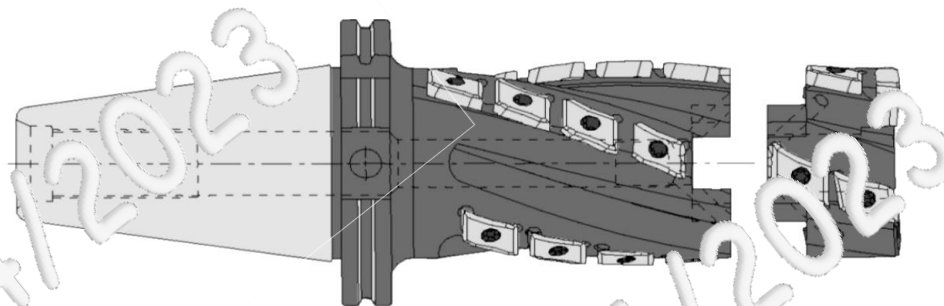
a1, b1, c2, d1, e2, f1, g7, h1, i2

Druhy frézovania

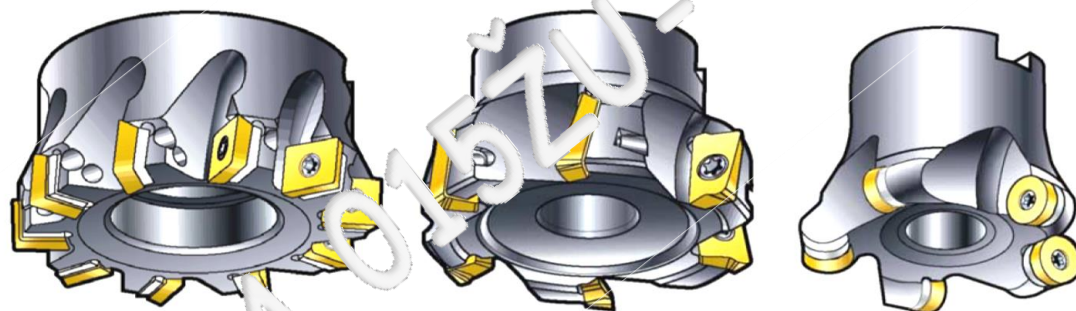
Podľa polohy osy nástroje k obrábaniu plochy môžeme frézovanie rozdeliť do týchto štyroch skupín:

1. valcové frézovanie,
2. čelné frézovanie,
3. okružné frézovanie,
4. planétové frézovanie.

Druhy fréz s vymeniteľnými platničkami

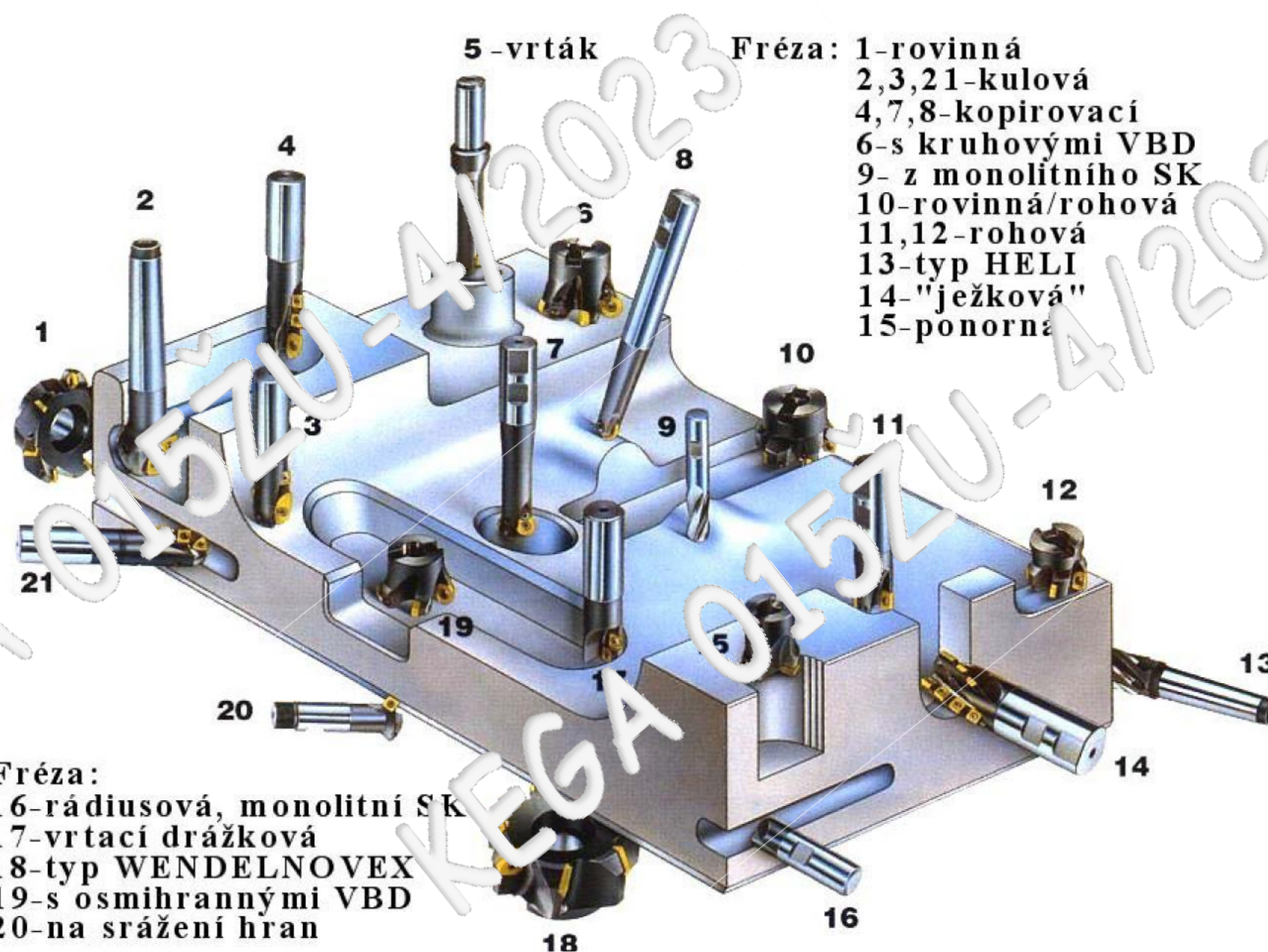


a3, b2, c-, d2, e3, f3, g-, h3, i1



a2, b2, c-, d1, e2, f3, g-, h1, i1 a2, b2, c-, d2, e3, f3, g-, h1, i1 a2, b2, c-, d1, e3, f3, g-, h1, i1

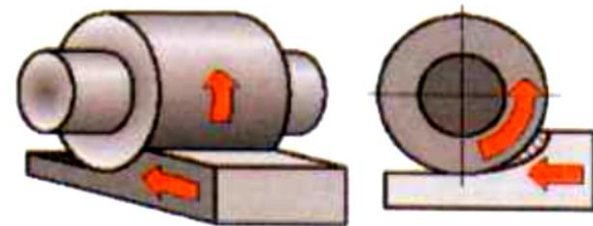
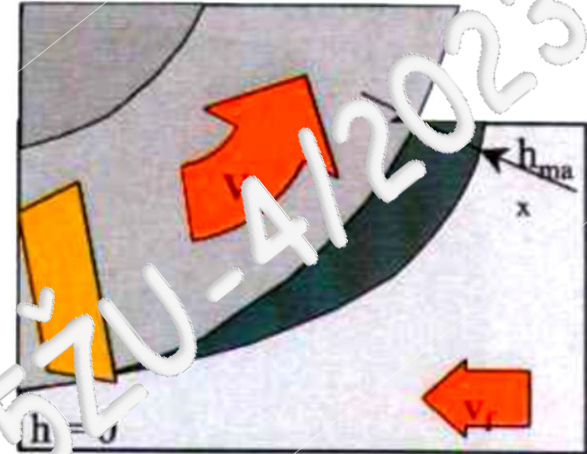
Použitie fréz



1. Valcové frézovanie - používa sa prevažne pri práci s valcovými a tvarovými frézami. Zuby sú vytvorené len na valcovom obvode nástroje. Hĺbka rezu sa nastavuje kolmo na osu frézy a smer posuvu. Obrobená plocha je rovnobežná s osou otáčania frézy. Spôsob vytvárajú takéto plochy a priebeh vytvárajú triesky závisí na zmysle otáčania frézy v smere posuvu obrobku.

a) Protibežné frézovanie

fréza sa otáča proti smeru posuvu obrobku. Vznikajúci prierez sa mení od nuly do konečnej maximálnej hodnoty. Nevýhodou je, že profil zubu frézy na začiatku rezu kĺže po už obrobenej ploche predchádzajúcim profilom, čo má za následok opotrebenie čepele a jeho otupovanie a tým zhoršuje akosť tejto obrobenej plochy. Rezná sila pôsobí smerom k nástroji a tým nepriaznivo ovplyvňuje upnutý obrobok. Výhodou tohto spôsobu je, že práca frézy je pokojná, bez rázu. Je výhodný pre frézovanie obrobkov s tvrdou povrchovou vrstvou (výkovky, odliatky) - čepele na tvrdé vrstvy vnikajú zospodu potom ju odlamujú, čo sa prejaví v tom, že sa čepele tak rýchle neotupujú.



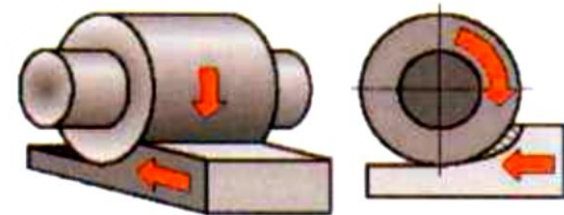
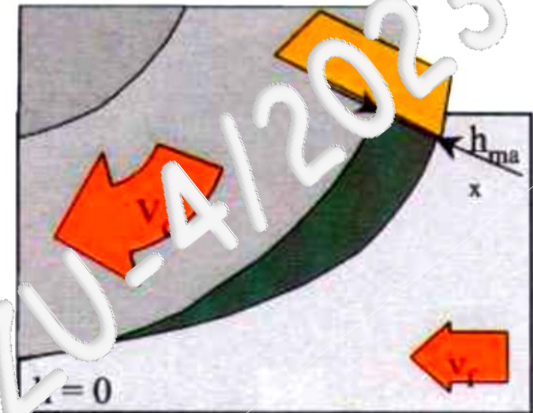
b) Súbežné frézovanie

zmysel otáčania frézy je zhodný s posuvom obrobku. Nevýhodou je, že čepeľ vnika do materiálu

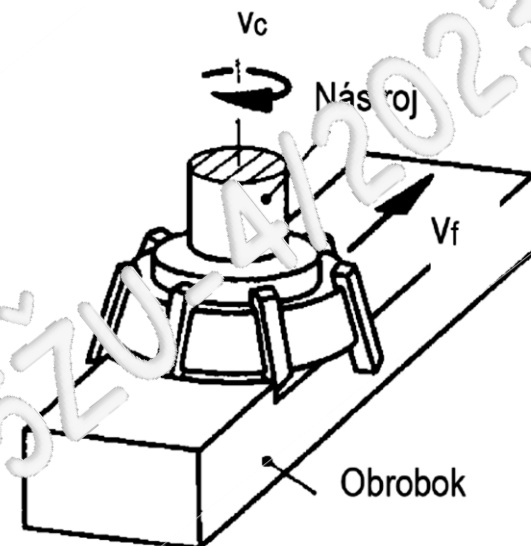
v najväčšej hrúbke triesky. Hrúbka triesky sa pri rezaní menší a oddeľuje sa od materiálu

v najslabšom mieste, kedy čepeľ vychádza zo zberu. Tento spôsob frézovania môžeme použiť len na stroji, ktorý má v stole vymedzenú vôľu medzi maticou a pohybovou skrutkou, aby pri zábere frézy nedošlo vplyvom vôle k vŕhovaniu obrobku pod frézu, čo by malo za následok poškodenie čepele frézy. Preto nie je vhodný pre frézovanie materiálom s nečistým povrchom a s tvrdou povrchovou vrstvou.

Výhodou je, že rezná sila tlačí obrobok do upínača, čo dovoľuje práci pri vyššej reznej rýchlosti a hĺbke rezu. Čepele frézysa s už obrobenou plochou nestýkajú, nedochádza k ich zahrievaniu a otupovaniu, obrobená plocha je kvalitnejšia. Je vhodné pre obrábanie húževnatých a mäkkých materiálov. Používa sa u frézok CNC, pretože pohybovou skrutkou sú vedené bez vôle. Pre obvodové frézovanie platí, že sa smie používať frézu o najväčšieho priemeru (s prihliadnutím na odporúčajúcu hodnotu nábehu a priebehu vzhľadom na obrobok). S rastúcim priemerom nástroje sa znižuje jeho maximálny uhol zábere a zväčšuje sa dĺžka triesky na úkor ich hĺbky, a teda tiež sa zväčšuje merný rezný odpor a hodnoty pružných deformácií. Pretože u silnejších triesky sa pružné deformácie znižujú a tiež klesá merný rezný odpor i teplota pri rezaní, dovoľuje nám väčší priemer frézy pracovať s väčším pracovným posuvom obrobku. K výhodám väčšieho priemeru nástroja patrí tiež pokojnejší chod a väčší počet zubov v zábere, umožňujúci zvýšenie posuvu na jeden zub.

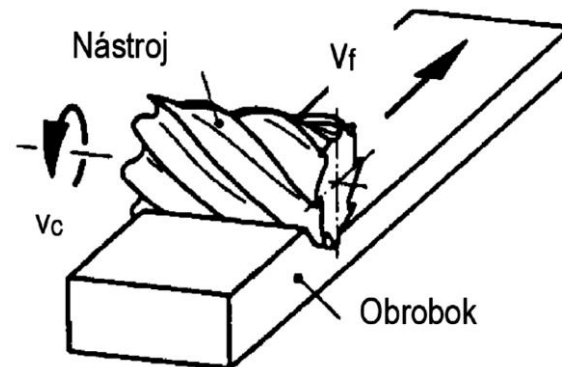


2. čelné frézovanie je príznačné hlavne pre frézy valcové, u ktorých pri odrezávaní triesok pracujú čepele na obvode frézy, ale tiež čiastočne čepele na čelnej ploche, ktoré obrábanu plochu vyhladzujú. Hĺbka rezu sa nastavuje v smere osy otáčania frézy. Obrobená plocha je kolmá na osu otáčajú nástroje. Pri každom otočení frézy o 60 stupňov sa obrobok posune o dráhu, ktorej dĺžka zodpovedá hodnote posuvu na otáčku. Hrúbka triesky sa pritom postupne od vstupu čepele frézy k stredu odrezávanej vrstvy zväčšuje, a naopak od stredu k miestu výstupu klinu z materiálu dochádza k postupnému znižovaniu hrúbky triesky.

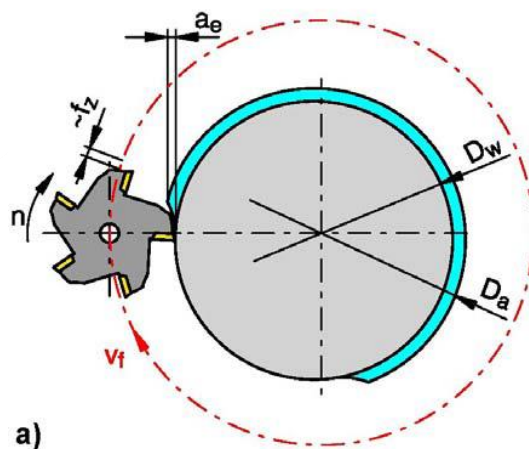


Jej hodnoty sú závislé na vzájomnom pomere šírky obrábanej plochy, priemeru použitej frézy a tiež na polohe osy nástroja k osi obrobku (súmerné a nesúmerné frézovanie - asymetria). Čelné frézovanie je výkonnejšie než frézovanie obvodové, pretože pri ňom zaberá viac zubov súčasne, čo dovoľuje pracovať s väčším posuvom obrobku.

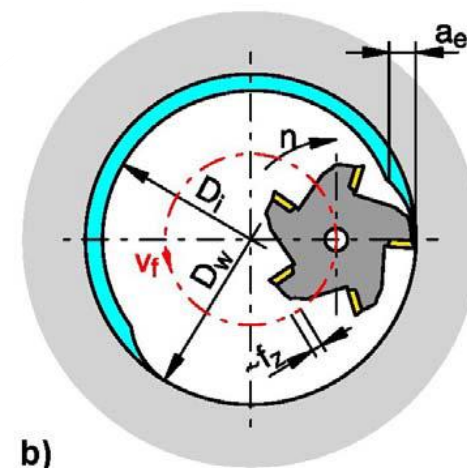
3. Okružné frézovanie sa používa pri obrábaní dlhých valcových tyčí a pri výrobe závitov. ako nástroj slúži frézovacia hlava osadená niekoľkými nožmi. Pri frézovaní tyčí sa frézovacia hlava otáča i posúva, pri frézovaní závitov sa len otáča. Zostávajúce pohyby nutné k obrábaniu vykonáva obrobok.



4. Planétové frézovanie sa uplatňuje u číslicovo riadených strojov a obrábacích centier, vybavených kruhovou interpoláciou dráhy nástroja 1), ktorého pohyb môže byť prevedený po kružnici, čo umožňuje frézovať celé rotačné plochy alebo ich časti.



a)

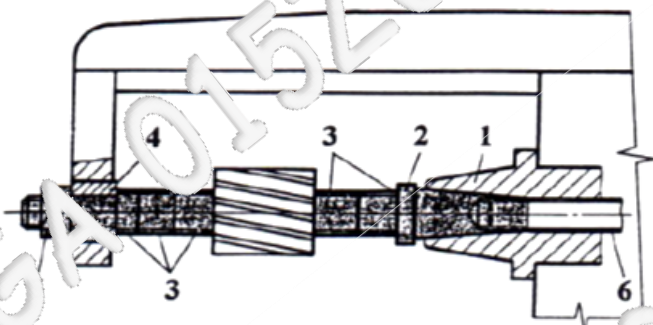


b)

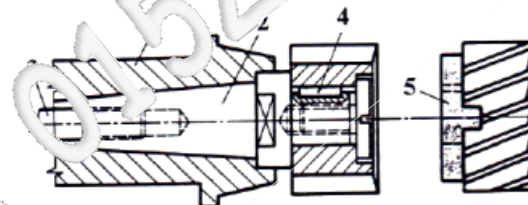
Planétové frézovanie a) vonkajšie b) vonkajšie

Upínanie nástrojov

Pre upínanie nástrčných fréz na frézoch sa používajú frézovacie tŕne. Upínací kužeľ frézovacích tŕňov a pracovného vretena môže byť buď metrický s kužeľovým pomerom 1:20, alebo Morse 1:19 až 20, alebo strmý 1:3,5. Metrický a Morse kužeľ sú samosvorné a môžu prenášať krútiaci moment z vretena na frézovacie tŕne. Aby prenos krútiaceho momentu bol dokonalý, má koniec vretena obdĺžnikové vybrania, do ktorého zapadá sploštený nákrúžok na konci frézovacieho tŕňa. Strmý kužeľ je v strede tŕňa v pracovnom vretene, krútiaci moment sa prenáša dvoma kameňmi upevnenými na čele vretena, ktoré zapadajú do vybrania na nákrúžku frézovacieho tŕňa.



Obr.3.20. Dlouhý frézovací trn
1 - vřeteno, 2 - trn, 3 - rozpěrné kroužky,
4 - podpěrné ložisko, 5 - upínací matice,
6 - upínací šroub



Obr.3.21. Krátký frézovací trn
1 - vřeteno, 2 - trn, 3 - upínací šroub
4 - podélné pero, 5 - příčné pero

Frézy s kuželovou stopkou sa upínajú pomocou redukčných puzdier priamo do upínacieho kužela vo vretene frézy. Redukčné puzdro sa použije aj vtedy, ak sa nezhoduje kužel frézovacieho trňa s kuželom vretena. Frézy s valcovou stopkou sa upínajú do vretena frézy pri použití skľučovadla s upínacími puzdrom.

Frézy s valcovou stopkou s priemerom 3 - 50 mm sa v súčasnej dobe veľmi často upínajú pomocou špeciálnych tepelných alebo hydraulických upínačov. V tepelnom upínaní je nástroj vložený do telesa upínača a potom spolu s ním ohrievaný v špeciálnom zariadení pomocou magnetického poľa cievky vyvolanej frekvenčným generátorom. Priebeh ohrevu je tak rýchly, že zvýšenie teploty nástroja v dôsledku vedenia tepla je minimálna. Potom je upnutý nástroj ochladený prúdom vzduchu (ku skráteniu doby ochladzovania sa používajú hliníkové telesá s rebrovaním, ktorá obopínajú upínací nástroj, a vstavaný ventilátor) a v dôsledku zmrštenia materiálu upínacích spoľahlivo upnutý. Ohľadnenie nástroja sa vykoná ohrevom v tomto zariadení.

Upínacia sa hydraulického upínača je vytvorená pomocou skrutky 4, ktorá pri zaskrutkovaní posúva plesť 5 s tesnením 6. Tým sa zvyšuje tlak oleja v dutine upínača 3 a mierne deformované puzdro 2 pevne obopne valcovou stopkou nástroja 1. Drážky 7 slúži na odvedenie prípadných masťô zo stopky nástroja a napomáhajú, tak k zabezpečeniu spoľahlivého prenosu vysokých hodnôt krútiaceho momentu.

Upínanie obrobkov

Súčasným záberom niekoľkých zubov vznikajú pri frézovaní veľké rezné sily, takže obrobok musí byť riadne upnutý. Je dôležité, aby obrobok nebol pri upínaní deformovaný a aby bola obrábaná aj upínacia plocha čo najbližšie vretena. Menšie obrobky sa obvykle upínajú do bežných strojných zverákov otočných a sklopných zverákov, špeciálnych zverákov pre upínanie valcových súčastí (obr.3.26) apod. Uvedené zveráky môžu byť ovládané ručne, pneumaticky alebo hydraulicky.



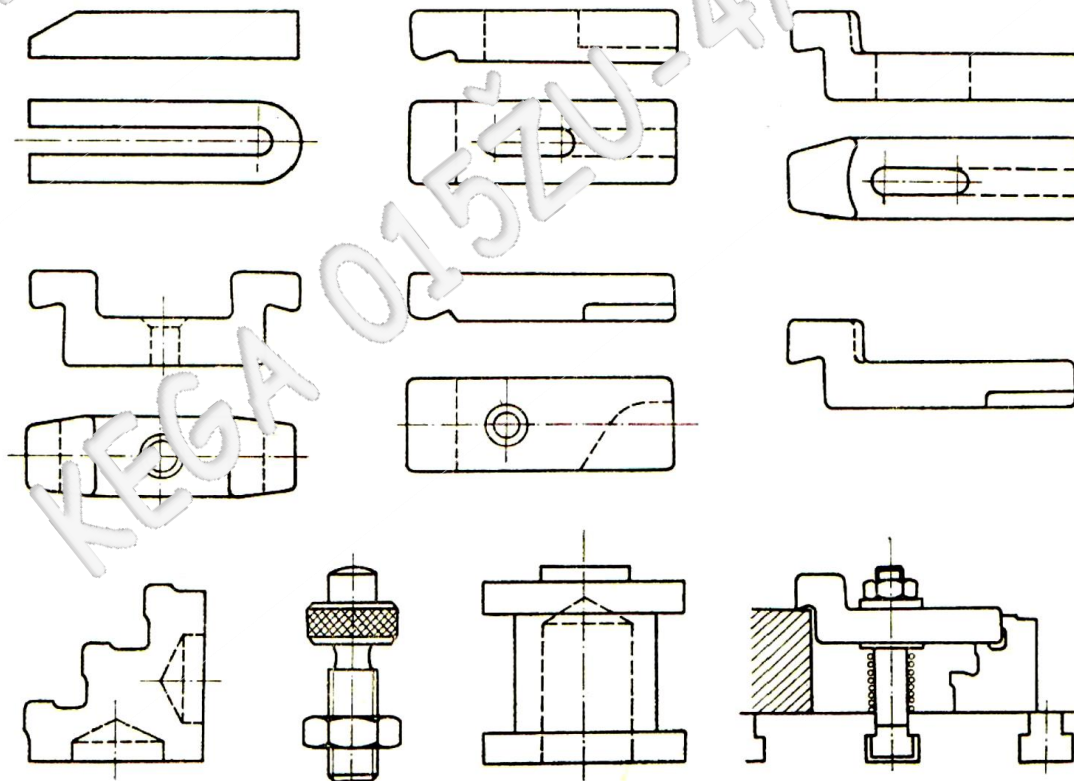
Obr.3.25. Otočný sklopný zverák



Obr.3.26 Samostrediaci zverák pre upínanie valcových súčastí

K upínaniu väčších obrobkov sa používajú rozličné upínacie pomôcky, ako sú úpinčky, opierky, podpery, a pod. Všetky tieto upínacie pomôcky sú upevňované do T-drážok stola frézky pomocou špeciálnych skrutiek s štvorcovou hlavou.

Pre upínanie presných obrobkov na číslícovom riadení sa v frézových strediskách slúžia technologické palety, s ktorými sa obrobok podľa požiadaviek technologického postupu môže pohybovať medzi jednotlivými obrábacími strojmi. Paleta má na stroji presne vymedzenú polohu, v ktorej sa pred vlastným obrábaním zafixuje (tým odpadá niekoľko krokov upínania a nastavovania polohy obrobku).



3.8 Frézovacie stroje

Vyrábajú sa vo veľkom počte rôznych typov, veľkostí a aj výkonov. Možno ich rozdeliť do troch základných skupín:

- konzolové frézky,
- rovinné frézky,
- špeciálne frézky.

Veľkosť stroja určuje šírka a dĺžka upínacej plochy stola. Ďalšie dôležité technické parametre stroja sú maximálne dĺžky pohybu stola, rozsah otáčok vretena a posuvový výkon elektromotora pre hlavný pohyb, tvar a veľkosť konca vretena, hmotnosť stroja.

Šírky upínacích plôch stola sú normalizované. U konzolových frézok býva pomer dĺžky stola L k šírke B

$$\frac{L}{B} = 4 \text{ až } 5, \quad \text{u rovinných frézok býva väčší.}$$

Konzolové frézky

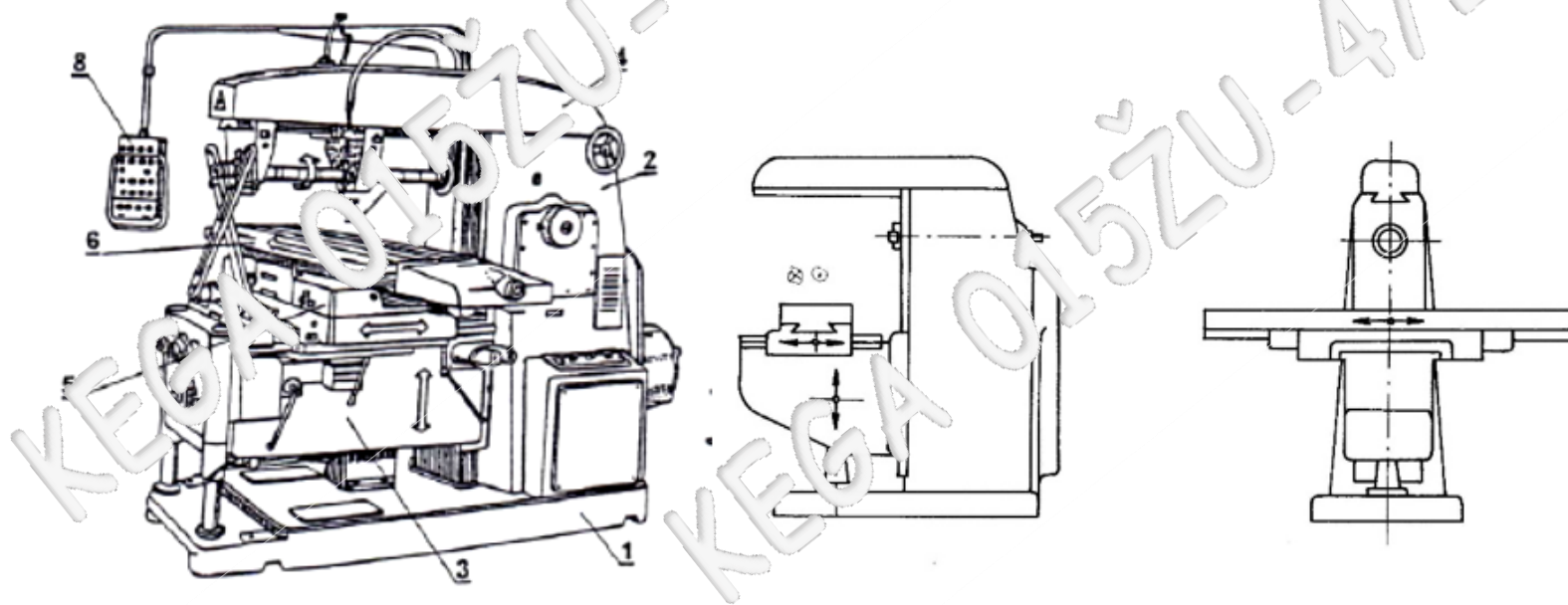
Sú najrozšírenejšie stroje. Hlavnou časťou je konzola, ktorá je prestaviteľná v zvislom smere po vedení stojanu stroja. Používané sú pre obrábanie rovinných aj tvarových plôch malých až stredne veľkých obrobkov. Na konzole stroja sa nachádzajú priečne sane a pozdĺžny stôl. Podľa polohy vretena sú známe:

- vodorovné konzolové frézky,
- zvislé konzolové frézky,
- univerzálne konzolové frézky.

Sú využiteľné v kusovej a malosériovej výrobe.

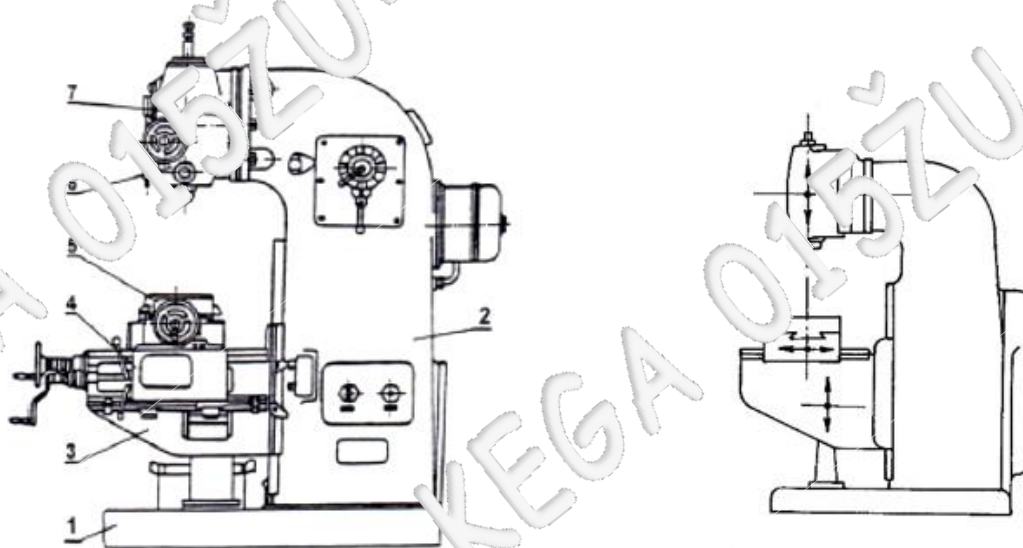
Charakteristickou časťou týchto strojov je výškovo prestaviteľná konzola, ktorá sa pohybuje po vedení stojanu. Na konzole je pohyblivý priečny stôl s pozdĺžnym pracovným stolom. Táto kombinácia pohybov umožňuje prestavovanie obrobku upnutého na pracovnom stole v troch pravouhlých súradniciach vzhľadom k nástroju. Konzolové frézky sú vhodné pre frézovanie rovinných a tvarových plôch u menších a stredne veľkých obrobkov v kusovej a malosériovej výrobe.

Konzolové frézky vodorovné majú os pracovného vretena vodorovnú, rovnobežnú s plochou pozdĺžneho stola a kolmú na smer pohybu pozdĺžneho stola. Frézujú sa na nich prevažne plochy rovnobežné s upínacou plochou stola, drážky a tvarové plochy. Pracuje sa na nich najčastejšie valcovými a kotúčovými frézami a frézami tvarovými. Frézovacie trň môže byť podopretý v jednom alebo v dvoch oporných ložiskách. Obmedzene sa u nich používajú frézy s kužeľovou stopkou a frézovanie hlavy upnuté do kužeľa pracovného vretena. Konzolové frézky univerzálne sa od vodorovných frézok líšia tým, že ich pozdĺžny stôl je vo vodorovnej rovine otočný okolo zvislej osi o $\pm 45^\circ$.



Obr. 3.28. Schéma vodorovnej konzolovej frézky 1 - základňa, 2 - stojan, 3 - konzola, 4 - rameno, 5 - priečny stôl, 6 - pozdĺžny pracovný stôl, 7 - vreteno, 8 - ovládací panel

Konzolové frézky zvislé majú os pracovného vretena kolmú k upínacej ploche stola. Pracovné vreteno je uložené buď vo zvislej hlave, pripevnené na stojane frézky, alebo priamo v stojane. Zvislá hlava sa dá natáčať o $\pm 45^\circ$, vreteno býva zvisle prestaviteľné. Na zvislých konzolových frézkach sa frézujú najmä rovinné plochy rovnobežné s upínacou plochou stola, drážky v týchto plochách a tvarové plochy. Používajú sa k tomu číselné frézy upnuté na krátkom trní, alebo frézy s kužeľovou stopkou, upínanej priamo do kužeľa vretena, alebo s valcovou stopkou, upnuté do skľučovadla. Na väčších zvislých konzolových frézkach sa používajú aj frézovacie hlavy.



Obr. 3.29. Schéma zvislej konzolovej frézky 1 - základňa, 2 - stojan, 3 - konzola, 4 - priečny stôl, 5 - pozdĺžny pracovný stôl, 6 - naklápací vreteník, 7 - kruhová základňa vreteníka

Vodorovné konzolové frézy - majú vodorovnú os pracovného vretena rovnobežnú s plochou pozdĺžneho stola. Frézovací trň, na ktorom je upnutý nástroj môže byť podporený v oporných ložiskách.

Zvislé konzolové frézy - majú os vretena kolmú k upínacej ploche stola. Vreteno je uložené v zvislej hlave pripevnenej na stojane frézy.

Univerzálne konzolové frézy - majú výsuvné rameno pre upínanie trňov s valcovou frérou a tiež zvislú hlavu pre upínanie čelných fréz a frézovacích hláv. Pracovný stôl je možné natáčať okolo zvislej aj vodorovnej osi.

Pracovné možnosti konzolových frézok sa rozširujú doplnkovým príslušenstvom: otočný stôl, deliaci prístroj, univerzálna a zvislá frézovacia hlava. Nedostatkom konzolových frézok je nízká tuhosť konzoly, ktorá má vplyv na výkon a presnosť práce.

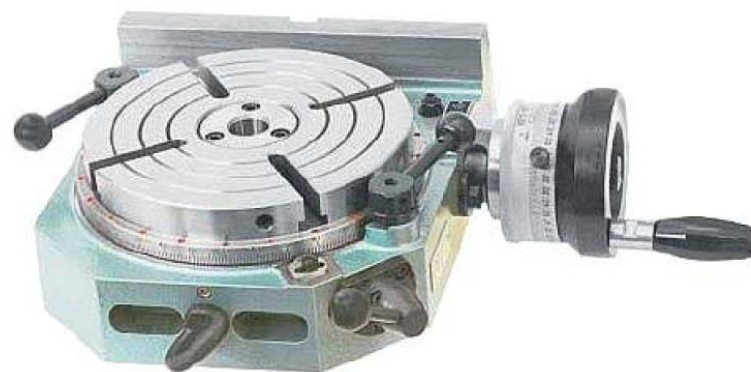
Príslušenstvo konzolových frézok

Univerzálnosť použitia konzolových frézok je významne rozšírená zvláštnym príslušenstvom, ako sú rôzne hlavy, otočné stoly, deliace prístroje a pod.

Univerzálna hlava sa pripevňuje na čelnú plochu stojana univerzálnej vodorovnej frézky. Dá sa natáčať okolo dvoch osí, takže frézu možno nastaviť do ľubovoľnej polohy vzhľadom k obrobku. Pohon frézovacieho vretena hlavy je odvodený od hlavného vretena stroja. Univerzálna hlava sa používa pri frézovaní ťažko prístupných, najmä šikmých plôch. Používa sa tiež na frézovanie ozubených hrebeňov, kde je potrebné, aby os vretena bola rovnobežná so smerom pozdĺžneho posuvu stola. Rozstup zubov sa v tomto prípade nastavuje pomocou prístroja pre pozdĺžne delenie.

Zvislá frézovacia hlava sa používa aj na univerzálnych vodorovných frézkach. Hlava je otočná okolo osi pracovného vretena, z ktorého sa prenáša krútiaci moment v podstate rovnakým spôsobom akú univerzálne hlavy. Pri použití zvislé frézovacie hlavy možno na vodorovných frézkach pracovať so stopkovými frézami, a vykonávať práce, ktoré by inak vyžadovali zvislé frézky.

Otočný sa pripevňuje na pracovný stôl frézky. Otáča sa buď ručne, alebo je otáčanie odvodené od pozdĺžneho pohybu pracovného stola skrutkovým teleskopickým hriadeľom. Otočné stoly umožňujú frézovať rôzne rotačné tvary, vachky, segmenty, drážky pod. Stopkovými frézami. Užívajú sa tiež pre deliace práce, ak nemožno obrobok pre jeho veľké rozmery upnúť na bežnom deliacom prístroji. K tomu účelu potom majú otočné stoly najčastejšie zariadení pre priame, prípadne nepriame delenie.

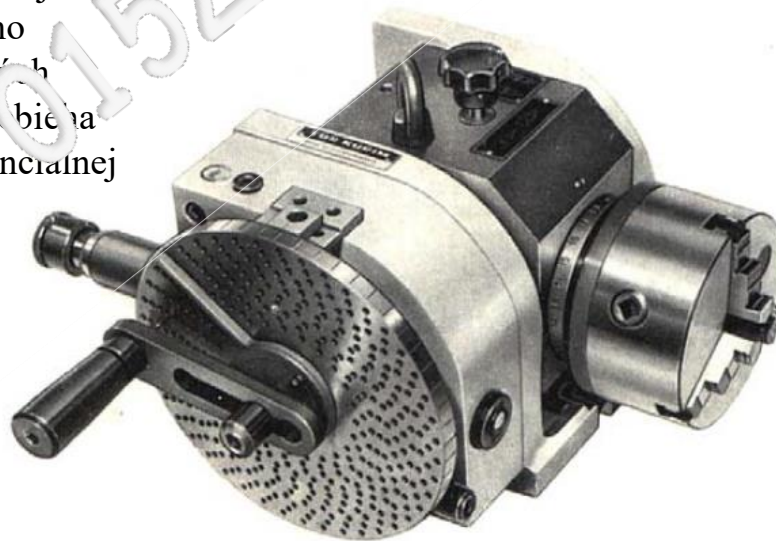


Obrážacia hlava sa upína obdobne ako zvislá frézovacia hlava, dá sa tiež pootáčať, takže umožňuje odrážať v smere zvislom, vodorovnom alebo šikmom. Pohyb sa na kľukový mechanizmus hlavy prenáša z pracovného vretena stroja. Obrážacia hlavy sa používajú ako doplnkové zariadenie univerzálnych vodorovných frézok.

Deliace prístroje umožňujú pootáčanie obrobku o určitý uhol alebo rozstup pri frézovaní štvorhranov a šesťhranov, viacdrážkových hriadelov, ozubených kolies, viaczubých nástrojov, zárezov na čelných plochách a pod. Používajú sa dva druhy deliacich prístrojov a to jednoduchého a univerzálneho.

Jednoduché deliace prístroje majú vreteno s kužeľovou dierou pre hrot alebo kužeľ držiaka skľučovadla. Pre delenie obvodu obrobku u nich slúži deliaci kotúč, ktorý má na svojom obvode zárezy alebo diery. Vlastné delenie prebieha metódou priameho delenie, tj. Pootočením vretena deliaceho prístroja o požadovaný diel obvodu a zaistenie polohy buď západkou do zárezu deliaceho kotúča, alebo kolíkom do diery deliaceho kotúča. Podľa počtu zárezov na kotúči je možné týmto spôsobom deliť obvod obrobku na násobky $1/24$, $1/36$ alebo $1/48$ obvodu. Jednoduché deliace prístroje sa vyrábajú tiež so zvislou osou. Uplatňujú sa najmä pri obrábaní drážok a zubov na čelných plochách. Obrobky sa na nich upínajú buď na dosku s upínacími drážkami, alebo do univerzálneho skľučovadla.

Univerzálna deliaca prístroj (obr. 3.31) sa používa sa pre priame, nepriame a diferenciálne delenie. Pre priame delenie má prístroj deliaci kotúč nasadený a upevnený na prednom konci deliaceho vretena. V kotúči sú vyvŕtá 24, 36, popr. 48 otvorov, do ktorých zapadá príslušný kolík, uložený v telese prístroja. Delenie prebieha ako u jednoduchého deliaceho prístroja. Pre nepriame a diferenciálne delenie slúži kotúč, ktorý má na čelnej ploche v súradniciach rôzne počty diery, ako napr. 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 23, 27, 31, 33, 37, 39, 41, 43, 47, 49. Vreťo prístroja sa pootáča kľukou cez ozubené súkolia z_1 , z_2 prevodom $1:1$ a cez slimákovi prevod, spravidla $1:40$.



Stolové frézky

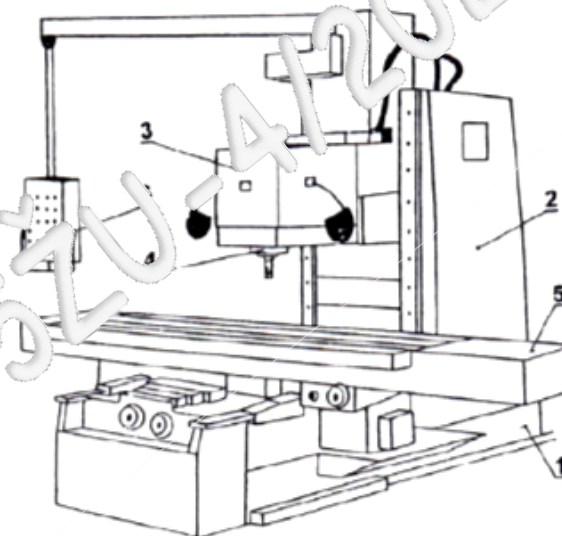
Z dôvodu nevýhod konzolových frézok (nízka tuhosť) sú konštruované frézky väšších rozmerov (šírka stola 400 mm i viac) ako frézky stolové. Tieto sú známe ako:

- zvislé stolové frézky (obr. 3.32),
- vodorovné stolové frézky.

Stolové frézky nemajú konzolu a majú zvyčajne pozdĺžny a priečny stôl. Pohyb sa zvislým smerom pre nastavenie nástroja vzhľadom k obrobku je zaistený premiestňovaním frézovacieho vreteníka po vedení stroja (obr. 3.32).

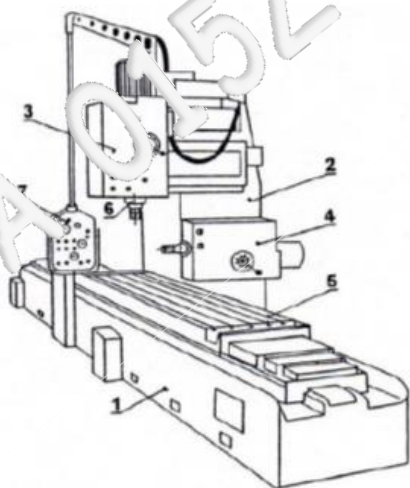
Na stolových frézkach možno kvalitne a produktívne obrábať rozmernejšie a ťažšie súčiastky. Vyrábajú sa ako v prevedení zvislom, tak i vodorovnom.

Obr. 3.32. Svislá stolová frézka 1- základní deska, 2 - stôl, 3 - vřeteník, 4 - vřeteno, 5 - pracovní stůl, 6 - ovládací panel

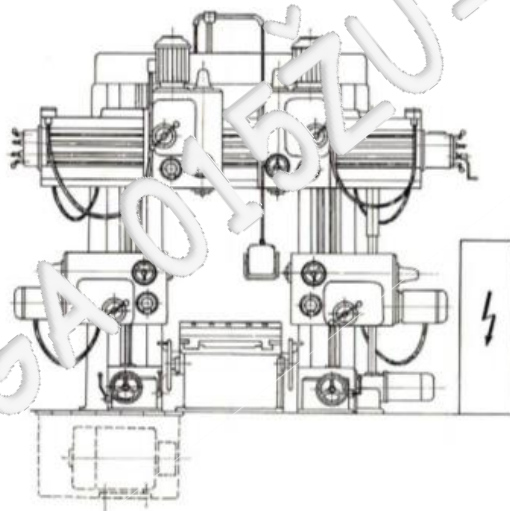


Sú podľa účelu rovnaké ako frézky stolové, konštrukčne sa líšia kinematikou stola a vreteníka. Stolová frézka má priečny aj pozdĺžny stôl, u rovinných frézok je iba jeden pracovný stôl pohybujúci sa pozdĺžne. Rovinná frézka môže mať viac pracovných vreteníkov. Sú umiestnené na stojanoch a u veľkých frézok (portálových) aj na priečniku. Stroje sú často riešené stavebnicovo.

Patrí medzi najvýkonnejšie druh frézok. Majú robustnú konštrukciu a umožňujú obrábať ťažké a rozmerné obrobky. Sú vhodné pre kusovú a malosériovú výrobu, dobre sa však uplatňujú aj v sériovej výrobe. Pracuje sa na nich najčastejšie frézovacími hlavami pri obrábaní vodorovných, zvislých a šikmých plôch a stopkovými frézami pri frézovaní úzkych plôch a drážok. U rovinných frézok má pracovný stôl jeden stupeň voľnosti, pohybuje sa len v jednom vodorovnom smere. Rovinné frézky môžu mať viac vreteníkov (vodorovné aj zvislé), niekedy sú konštruované ako portálové



Obr. 3.33. Rovinná frézka 1 - lôžko, 2 - stojan,
3 - zvislý vreteník, 4 - vodorovný vreteník;
5 - pracovný stôl, 6 - vreteno, 7 - ovládací panel



Obr. 3.34. Rovinná portálová frézka

Špeciálne frézky

Sem možno zahrnúť všetky ostatné frézky napr.:

- frézky nástrojárske,
- frézky na ozubenie,
- frézky na záhlavy,
- kopírovacie frézky.

Frézky sa konštruujú a vyrábajú buď pre manuálnu obsluhu, alebo pre programové riadenie. Patia sem aj číslícovo riadené obrábacie centrá.

Trendy rozvoja strojov pre opracovanie nerotačných obrobkov

Tak ako už bolo uvedené do tejto skupiny patria stroje:

- konvenčné frézky a frézky CNC,
- obrábacie centrá so zvislou i horizontálnou osou pracovného vretena.

U CNC frézovacích strojov je možné sledovať nasledovné trendy pri stavbe a konštrukcii:

- ✓ nasadzovanie technológie vysokýchlostného obrábania (HSC) a s tým súvisiace použitie konštrukčných prvkov pri stavbe obrábacích strojov (pohony, vedenia a pod.),
- ✓ znižovanie vedľajších časov a to hlavne zabezpečenie krátkych časov výmeny nástrojov a obrobkov,
- ✓ aplikácia viacosťnásobného obrábania,
- ✓ nástup suchého obrábania.

S týmito odrazami súvisí aj zmena v koncepcii a stavbe obrábacích strojov. Stále častejšie sú využívané v stavbe strojov moderné prvky ako elektrovretená, lineárne pohony, netradičné uloženie rotujúcich častí. Nasadenie týchto komponentov je nutné preto, aby boli dodržané náročné technické požiadavky, ktoré HSC vyžadujú. Ďalej je možné pozorovať snahu o úplnú automatizáciu, hlavne pri výrobe súčiastok malých rozmierov.

Možno teda badať dva smery v konštrukcii obrábacích strojov na obrábanie nerotačných súčiastok:

- stroje určené pre HSC technológiu,
- stroje určené pre konvenčnú technológiu.

Istým prechodom sú stroje pre konvenčnú technológiu vybavené prvkami umožňujúcimi HSC obrábanie. V obidvoch prípadoch je možné hovoriť o podstatnom znižovaní vedľajších časov na minimum.

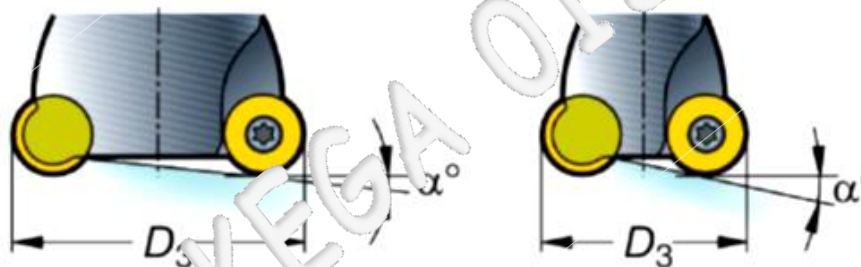
Špeciálne metódy frézovania

Lineárne zahlbovanie (2-osé)

Lineárne zahlbovanie sa zvyčajne využíva ako účinný spôsob pre vstup do obrobku pri obrábaní uzavretých drážok/dutín/káps. Eliminuje potrebu použitia vrtákov.

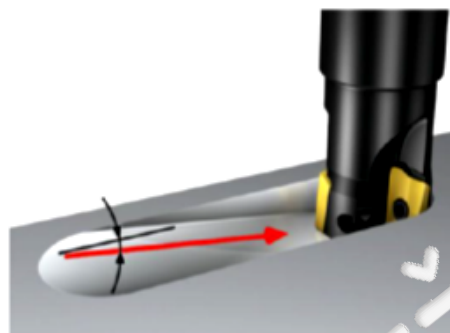


Lineárne zahlbovanie je definované ako súčasný posuv nástroja v axiálnom smere (Z) a v jednom z radiálnych smerov (X alebo Y), tzv. 2-osé postupné lineárne zahlbovanie.



Lineárne 2-osé zahlbovanie- graf|

Dvojosé postupné zahlbovanie – lineárne



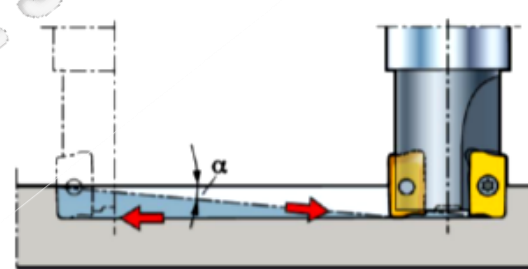
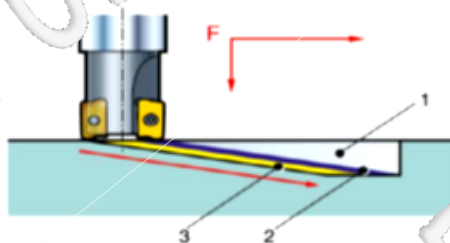
Náročný obrábací postup

Behom šikmého zahlbovania sa súčasne uplatňujú tri rôzne spôsoby rezu.

- 1) Rezanie obvodom nástroja - predné VBD.
- 2) Rezanie čelom nástroja - predné VBD.
- 3) Rezanie čelom nástroja - zadné VBD.

Lineárne 2-osé postupné zahlbovanie

Rezné sily sú aj radálne, aj axiálne. Na nástroj navyše ešte pôsobí ďalšie namáhanie v dôsledku obojstranného obrábania drážky, čo znamená, že pri $a_e = D_c$, vznikajú veľké radálne rezné sily a dlhé triesky.



Postupné zahlbovanie- obrábací postup

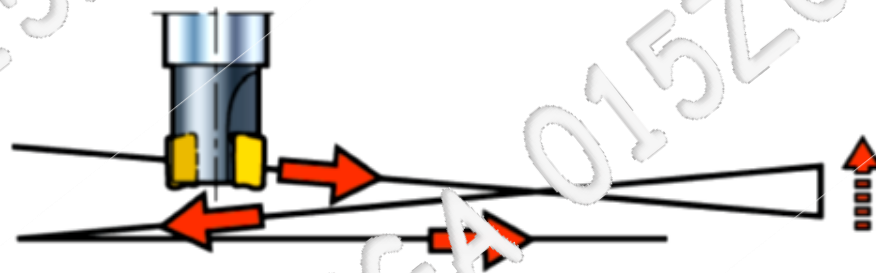
Jednoduché postupné zahlbovanie- jeden chod

Progresívne šikmé zahlbovanie

Pri obrábaní hlbokých drážok pomocou šikmého zahlbovania možno ľahko zvýšiť produktivitu vďaka zahlbovaniu v oboch smeroch (progresívne šikmé zahlbovanie) namiesto zahlbovania len v jednom smere (jednoduché šikmé zahlbovanie).

Poznámka: Ak fréza zostupuje s maximálnym možným uhlom šikmého zahlbovania, musí byť pred akoukoľvek zmenou smeru zmenená hĺbka o vzdialenosť h . Stredová časť tela frézy je tak chránená pred poškodením.

Polomer reznej dosťičky má vplyv na maximálny uhol šikmého zahlbovania



Progresívne šikmé zahlbovanie pri maximálnom uhle zostupu.

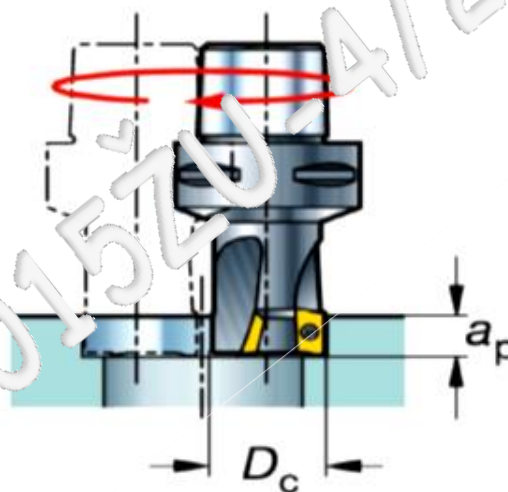
Frézovanie kruhovou interpoláciou (2-osé)

Frézovanie pomocou kruhovej interpolácie je alternatívna metóda tradične používaným vyvrtávacích nástrojov.

Frézovanie kruhovou interpoláciou sa v súčasnosti realizuje pomocou fréz s uhlom nastavenom 90 stupňov pohybom nástroja po kruhovej dráhe. Použitie lineárneho zahlbovania pre vytvorenie uzavretej drážky.



Frézovanie kruhovou interpoláciou



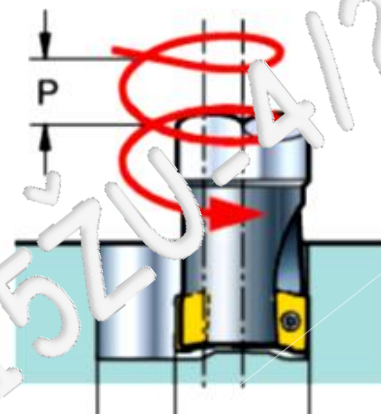
Frézovanie kruhovou interpoláciou

Frézovanie skrutkovicovou interpoláciou

Posun frézy po kruhovej zostupnej dráhe prebieha súčasne v smere osi X, Y aj Z. Veľmi často sa používa pre vytvorenie dutiny, alebo kapsy. Ide o ďalšiu alternatívnu metódu pre výrobu dier, umožňujúcu nahradiť vŕtanie a vyvŕtavanie.



 Zahlbovanie skrutkovicovou interpoláciou
v celistvom obrobku



Zahlbovanie skrutkovicovou interpoláciou
v celistvom obrobku

Zahlbovanie pomocou skrutkovitovej interpolácie - výroba dier



Pri zahlbovaní pomocou skrutkovitovej interpolácie je treba uvažovať tri hlavné faktory -

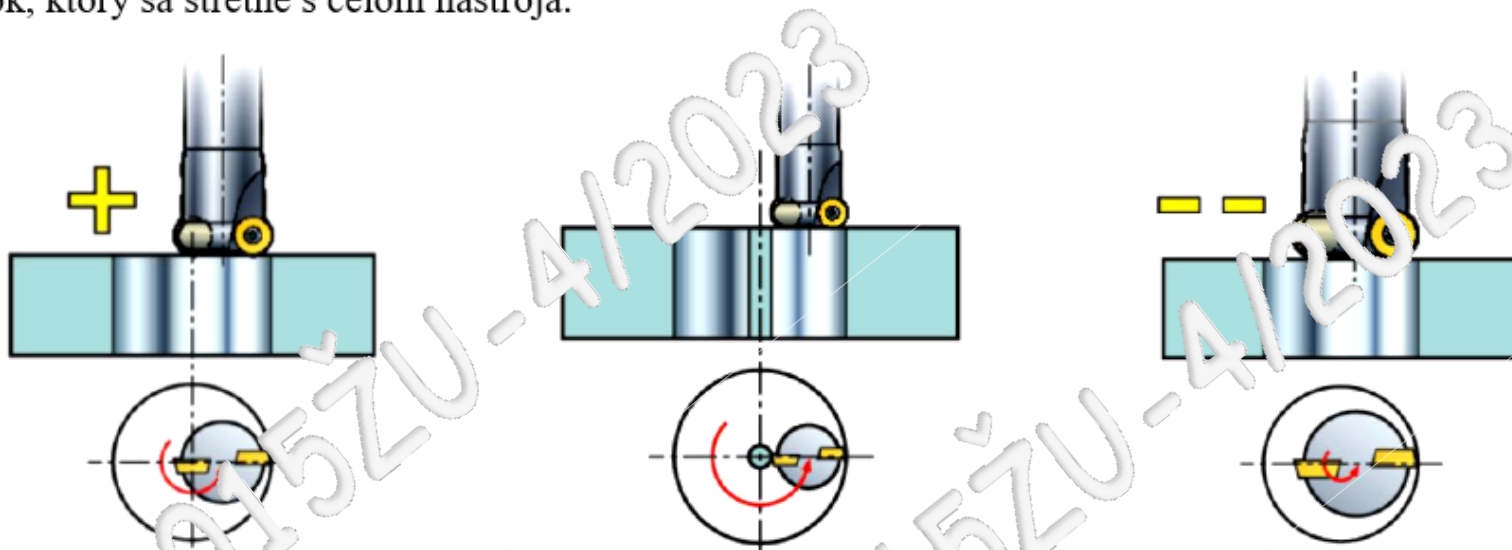
1. vhodná veľkosť frézy pre daný priemer diery,
 2. stúpanie na otáčku,
 3. rýchlosť posuvu,
- nesprávny výber spôsobí problémy.

Vhodná veľkosť (priemer) frézy je veľmi dôležitá v prípade použitia fréz, ktoré nemajú stredové čepele. Priemer frézy

Zahlbovanie skrutkovitou interpoláciou - výroba dier

Ak je priemer frézy príliš malý a v osi diery zostáva jadro - podobne ako pri vŕtaní jadrovým vrtákom. To je prípustné len u značne veľkých otvorov (samčie diery), ale jadro je nutné podoprieť, pretože ... naklonia.

Pokiaľ je priemer frézy príliš veľký, dráha reznej dosťičky neprechádza osou diery a bude sa tvoriť výčnelok, ktorý sa stretne s čelom nástroja.



Zahlbovanie skrutkovicovou
interpoláciou- výroba dier

Zahlbovanie skrutkovicovou
interpoláciou- výroba dier- príliš
malý priemer frézy

Zahlbovanie skrutkovicovou
interpoláciou- výroba dier- príliš
veľký priemer frézy

Zahlbovanie pomocou skrutkovicovej interpolácie je nutné vždy preferovať pred priamym zahlbovaním (frézovaním drážky do plného materiálu), pretože veľkosť radiálneho záberu je významne obmedzená a tým je umožnené čisto súbežné frézovanie a lepšie odvádzanie triesok. Súbežné frézovanie sa dosiahne stanovením dráhy nástroja proti smeru hodinových ručičiek (SANDVIK COROMANT, 2005)

Frézy, ktoré sú vhodné pre lineárne zahlbovanie, umožňujú tiež zahlbovanie pomocou skrutkovitovej interpolácie.

Ponorné frézovanie

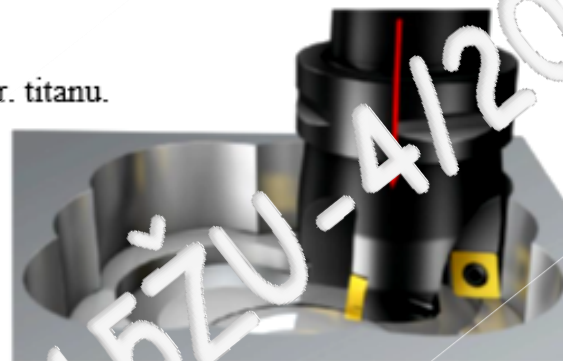
Pri ponornom frézovaní prebieha rez na čele nástroja namiesto na obvode, čo je výhodné vzhľadom k zmene charakteru rezných síl z prevažne radiálnych na axiálne. Všeobecne možno povedať, že ponorné frézovanie je alternatívna metóda vhodná v prípade, že frézovanie obodom nie je možné použiť vzhľadom k vzniku vibrácií.

Napríklad:

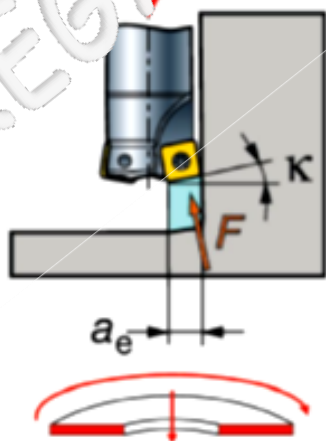
- ak vyloženie nástrojov presahuje 40-70 %
- v prípade zlej stability,
- pre polodokončovacie operácie v rohoch,
- pre obrábanie ťažko obrobitelných materiálov, napr. titanu.

Môže predstavovať vhodnú alternatívu v prípade, že existuje obmedzenie z hľadiska výkonu stroja, alebo jeho krútiaceho momentu.

Poznámka: V prípade priaznivých podmienok sa ponorné frézovanie nehodnotí ako prvá voľba, vzhľadom k nízkym rýchlostiam úberu kovu.



Ponorné frézovanie



Ponorné frézovanie výrazne odlišuje od tradičných metód frézovania. Pre rez na čele nástroja namiesto jeho obvodu, čo priaznivým spôsobom mení smer pôsobenia rezných síl z prevažne radiálnych na axiálne. Možno ho prirovnať k rotácijným operáciám s prerušovaným rezom.

Hlučnosť i nároky na výkon stroja sú nízke.

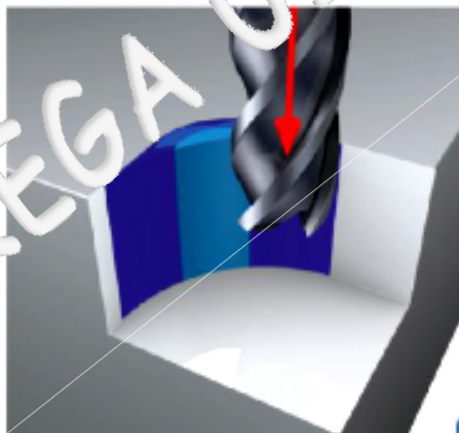
Drážky

- Ponorné frézovanie je efektívna technika pre obrábanie hlbokých a úzkych drážok.
- Zásadný význam má dobré odvádzanie triesok. Horizontálne usporiadanie a použitie reznej kvapaliny alebo stlačeného vzduchu tomuto procesu napomáha.
- Pre hlboké a úzke drážky je doporučené použitie vrátkov, pretože je možné dosiahnuť najlepšieho možného

Dutiny/kapsy

- Odvádzanie triesok predstavuje, rovnako ako pri frézovaní uzavretých drážok, kritické problémy.
- Používajte horizontálne usporiadanie reznej kvapaliny alebo stlačený vzduch.
- Odvádzanie triesok je možné ďalej zlepšiť vyvŕtaním, čo možno najväčšej počítacnej diery.
- Pri prvých dvoch ponorných hĺbkach rýchlota posuvu.
- Postupujte do strán, snažte sa vyhnúť obojstrannému frézovaniu drážok.

Rohy



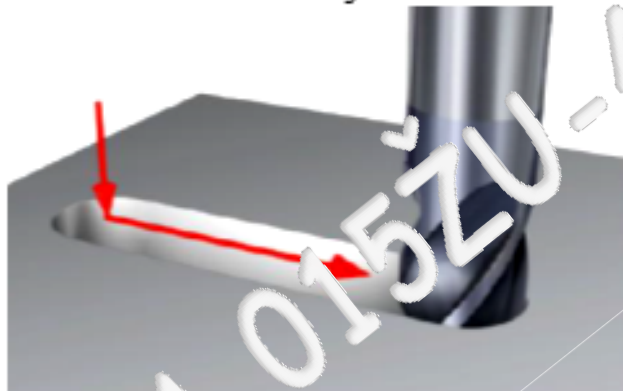
Ponorné frézovanie nedobraného materiálu (odfrézovanie zvyškovej vrstvy) nasledujúce po hrubovacích operáciách v hlbokých 90° rohoch môže byť veľmi prospešné.

Obrábanie rohov

Zavrtávacie frézovanie

Zavrtávacie frézovanie predstavuje, pokiaľ ide o vytvorenie dutiny v celistvom materiálu, alternatívu k postupnému zahlbovaniu. Bohužiaľ je potrebné nezmene veľký výkon, tvoria sa dlhé triesky a vznikajú nežiaduce rezné sily pôsobiace na nástroj. Z toho dôvodu je použitie tejto metódy vhodné len v prípade, že:

- stroj neumožňuje použitie metódy postupného zahlbovania
- obrábaná drážka je uzavretá a veľmi úzka



Frézy s stredovými čepeľami - vŕtacie frézy (stopkové vŕtacie frézy) Vŕtaná hĺbka je u stopkových fréz so stredovými čepeľami obmedzená dĺžkou drážok pre odvod triesok a také schopností odvádzať triesky. Pre hlbšie drážky používajte cyklus zavŕtanie a rozšírení drážky. Pri zavŕtaní používajte nízke rýchlosti posuvu: cca. 50% z hodnoty posuvu doporučeného pre frézovanie.

Zavrtávacie frézovanie

Metódy odrezávania tenkých vrstiev

Tieto metódy frézovania boli pôvodne navrhnuté pre zahlbovanie a polodokončovanie ťažkých a tvrdých materiálov, napríklad tvrdých ocelí, ISO H, nerezových ocelí HRSA alebo ISO S, ale ich použitie je možné tiež pre ostatné materiály, a to najmä v aplikáciách citlivých na vibrácie. (www.scribd.com)

Metódy odrezávania tenkých vrstiev



Trochoidálne frézovanie

Vynikajúca metóda pre frézovanie drážok v prípade problémov s vibráciami; je ale vhodná také pre hĺbovanie frézovanie úzkych, uzavretých dutín, káps a iných.

Trochoidálne frézovanie je možné definovať ako frézovanie pomocou kruhovej interpolácie so súčasným posúvaním vpred. Fréza opakovane odoberá "tenké plátky" materiálu, pričom v radiálnom smere neustále postupuje po špirálovej dráhe.

Je nutné použiť špeciálne techniky programovania a strojov splňujúcich potrebné predpoklady.



Metódy odrezávania tenkých vrstiev – frézovanie rohov



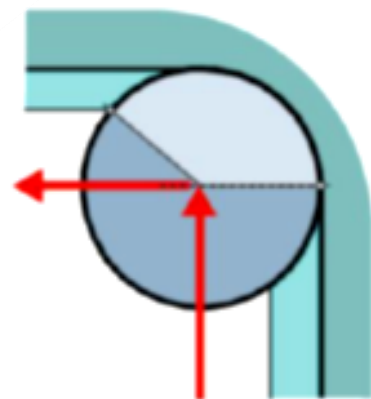
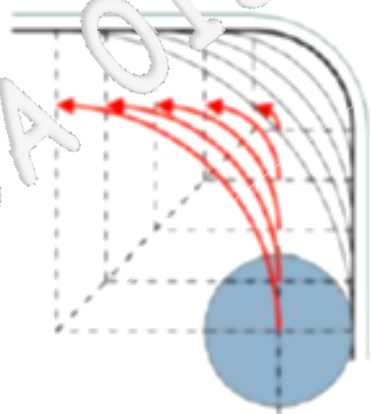
Frézovanie metódou tenkých rezov je polo-dokončovacou technikou obrábania, ktorá sa uplatňuje pri frézovaní rohov kam väčší stroj použitý pri predchádzajúcej operácii nemohol dosiahnuť.

Na rozdiel od trochoidálneho frézovania nie je nutný odvažovací nájazd alebo výjazd z rezu, pretože radiálna hĺbka rezu narastá od nuly do maxima uprostred a potom opäť klesá späť k nule.

Metóda odrezávania tenkých vrstiev- frézovanie rohov

Viačerostranné priechody umožňujú postupné odobratie materiálu, je zaistená trvale nízka hodnota radiálneho vnorenia uhla záberu a nízke radové sily.

metóda odrezávania tenkých vrstiev- frézovanie rohov-technologický postup



Ďakujem za pozornosť