



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní



SOUČASNÉ TRENDY V OBRÁBĚNÍ OZUBENÝCH KOL

Učební text

doc. Dr. Ing. Ivan Mrkvica

Ostrava 2011



Tyto studijní materiály vznikly za finanční podpory Evropského sociálního fondu (ESF) a rozpočtu České republiky v rámci řešení projektu OP VK CZ.1.07/2.3.00/09.0147 „Vzdělávání lidských zdrojů pro rozvoj týmů ve vývoji a výzkumu“.

Název: Současné trendy v obrábění ozubených kol

<Autor/Autoři>: doc. Dr. Ing. Ivan Mrkvica,

Vydání: první, 2011

Počet stran: 120

Náklad: 60

Studijní materiály pro studijní obor Strojírenská technologie Fakulty strojní

Jazyková korektura: nebyla provedena.



Tyto studijní materiály vznikly za finanční podpory Evropského sociálního fondu a rozpočtu České republiky v rámci řešení projektu Operačního programu Vzdělávání pro konkurenceschopnost.



Název: Vzdělávání lidských zdrojů pro rozvoj týmů ve vývoji a výzkumu
Číslo: CZ.1.07/2.3.00/09.0147
Realizace: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava

© doc. Dr. Ing. Ivan Mrkvica

© Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava

ISBN 978-80-248-2724-7

POKYNY KE STUDIU

SOUČASNÉ TRENDY V OBRÁBĚNÍ OZUBENÝCH KOL

Pro předmět 1. a 2. semestru oboru strojírenská technologie jste obdrželi studijní balík obsahující:

- integrované skriptum pro distanční studium obsahující i pokyny ke studiu,
- přístup do e-learningového portálu obsahující doplňkové animace vybraných částí kapitol,
- <CD-ROM s doplňkovými animacemi vybraných částí kapitol,>
- <harmonogram průběhu semestru a rozvrh prezenční části,>
- <rozdělení studentů do skupin k jednotlivým tutorům a kontakty na tutorů.>

Prerekvizity

Pro studium této opory se předpokládá znalost na úrovni absolventa bakalářského studia.

Cílem předmětu

Cílem je seznámení se základními pojmy z oblasti výroby ozubených kol. Po prostudování modulu by měl student být schopen orientovat se v současných možnostech pro výrobu ozubení včetně volby vhodného stroje a nástroje.

Dalším cílem je seznámit studenty s návrhem konstrukce speciálních nástroje pro obrábění čelních ozubených kol. Po prostudování modulu bude student schopen samostatného návrhu nástroje pro obrábění čelních ozubených kol odvalovacím způsobem, a to jak obrážením, tak frézováním.

Pro koho je předmět určen

Modul je zařazen do magisterského studia oboru strojírenská technologie studijního programu strojní inženýrství, ale může jej studovat i zájemce z kteréhokoliv jiného oboru, pokud splňuje požadované prerekvizity.

Skriptum se dělí na části, kapitoly, které odpovídají logickému dělení studované látky, ale nejsou stejně obsáhlé. Předpokládaná doba ke studiu kapitoly se může výrazně lišit, proto jsou velké kapitoly děleny dále na číslované podkapitoly a těm odpovídá níže popsaná struktura.

Při studiu každé kapitoly doporučujeme následující postup:



Čas ke studiu: xx hodin

Na úvod kapitoly je uveden čas potřebný k prostudování látky. Čas je orientační a může vám sloužit jako hrubé vodítko pro rozvržení studia celého předmětu či kapitoly. Někomu se čas může zdát příliš dlouhý, někomu naopak. Jsou studenti, kteří se s touto problematikou ještě nikdy nesetkali a naopak takoví, kteří již v tomto oboru mají bohaté zkušenosti.



Cíl: Po prostudování tohoto odstavce budete umět

-  Popsat ...
-  Defínovat ...
-  Vyřešit ...

Ihned potom jsou uvedeny cíle, kterých máte dosáhnout po prostudování této kapitoly – konkrétní dovednosti, znalosti.



Výklad

Následuje vlastní výklad studované látky, zavedení nových pojmů, jejich vysvětlení, vše doprovázeno obrázky, tabulkami, řešenými příklady, odkazy na animace.



Shrnutí pojmů

Na závěr kapitoly jsou zopakovány hlavní pojmy, které si v ní máte osvojit. Pokud některému z nich ještě nerozumíte, vraťte se k nim ještě jednou.



Otázky

Pro ověření, že jste dobře a úplně látku kapitoly zvládli, máte k dispozici několik teoretických otázek.



Úlohy k řešení

Protože většina teoretických pojmů tohoto předmětu má bezprostřední význam a využití v praxi, jsou Vám nakonec předkládány i praktické úlohy k řešení. V nich je hlavním významem předmětu schopnost aplikovat čerstvě nabyté znalosti pro řešení reálných situací.



Klíč k řešení

Výsledky zadaných příkladů i teoretických otázek jsou uvedeny v závěru učebnice v Klíči k řešení. Používejte je až po vlastním vyřešení úloh, jen tak si samokontrolou ověříte, že jste obsah kapitoly skutečně úplně zvládli.

Úspěšné a příjemné studium s tímto učebním textem Vám přeje autor.

doc. Dr. Ing. Ivan Mrkvica

OBSAH

1	ÚVOD.....	9
2	ODVALOVACÍ OBRÁŽENÍ HŘEBENOVÝM OBRÁŽECÍM NOŽEM.....	11
2.1	Princip metody a používané stroje	11
2.2	Postup výpočtu hřebenového obrážecího nože.....	13
2.2.1	Rovnice hřbetu zubu hřebenového obrážecího nože	14
2.2.2	Rovnice čela zubu hřebenového obrážecího nože.....	17
2.2.3	Ostří na levém a pravém boku zubu hřebenového nože	17
2.2.4	Ustavení hřebenového obrážecího nože na obrážecce.....	20
2.2.5	Základní profil hřebene vytvořený ostřím nože.....	21
2.2.6	Výpočet úhlu sklonu hřbetu zubu k seřízení broušící kolébky.....	23
2.2.7	Úhel čela nože v jeho normálové rovině.....	25
2.2.8	Úhly hrany zubu v normálové rovině nože.....	26
2.2.9	Úhly hrany zubu v ustavovací rovině nože Pr	29
2.2.10	Výšky zubu a zubové rozteče.....	30
2.3	Přímé měření ostří na zubu hřebenového nože.....	31
3	ODVALOVACÍ FRÉZOVÁNÍ.....	33
3.1	Charakteristika metody.....	33
3.2	Stroje pro odvalovací frézování	34
3.2.1	Kompaktní provedení stroje.....	35
3.2.2	Koncepce konstrukčních a stavebnicových řad strojů.....	35
3.2.3	Frézovací hlava.....	36
3.2.4	Uspořádání unášecího vřetene obrobku.....	36
3.2.5	Automatizace a systém nakládání a vykládání obrobků.....	36
3.2.6	Základní konstrukce odvalovací frézy.....	37
3.2.7	Kompletní obrábění.....	38
3.3	Nástroje pro odvalovací frézování.....	38
3.3.1	Ekonomické předpoklady konstrukce nástroje.....	38
3.3.2	Druhy a zásady navrhování odvalovacích fréz.....	40
3.3.3	Řezná geometrie odvalovacích fréz.....	45
3.3.4	Materiály odvalovacích fréz.....	46
3.3.5	Formy opotřebení a jeho příčiny	53
3.4	Výpočet parametrů odvalovací frézy s využitím programu NNEON.....	56

3.4.1	Možnosti podprogramu "Odvalovací fréza"	57
3.4.2	Výpočet parametrů odvalovací frézy.....	58
4	LOUPACÍ ODVALOVACÍ FRÉZOVÁNÍ.....	62
4.1	Charakteristické znaky metody a oblast jejího použití	62
4.2	Stroje a nástroje pro loupací odvalovací frézování.....	65
4.3	Příprava obrobku před loupacím odvalovacím frézováním	68
5	ODVALOVACÍ OBRÁŽENÍ KOTOUČOVÝM OBRÁŽECÍM NOŽEM.....	71
5.1	Princip metody.....	71
5.1.1	Podmínky záběru pro nástroj a obrobek.....	72
5.1.2	Standardizace ozubení.....	73
5.1.3	Obrázení šikmého ozubení.....	73
5.1.4	Odvalovací obrázení ozubení s různoběžnými osami	74
5.1.5	Výrobní možnosti odvalovacích obrázeček.....	75
5.2	Konstrukce strojů	75
5.3	Nástroje pro odvalovací obrázení kotoučovým nožem	78
5.3.1	Přestřované obrázeční kotoučové nože.....	78
5.3.2	Nástroje na jedno použití.....	80
5.4	Inovativní aplikace metody a její kombinace s jinými metodami obrábění.....	81
5.4.1	Odvalovací obrázení polohově orientovaného šikmého ozubení.....	81
5.4.2	Ozubení s nadměrnou šířkou a omezeným výběhem nástroje (SSM-metoda).....	82
5.4.3	Spirální najíždění s degresivním radiálním přísuvem (metoda CCP).....	83
5.4.4	Kombinace odvalovacího frézování a odvalovacím obrázením.....	84
5.4.5	Kombinace odvalovacího obrázení a zkosení hrany.....	85
6	PŘÍLOHY	87
6.1	Přehled vstupních a výstupních parametrů podprogramu "Odvalovací fréza"	87
6.2	Přehled vstupních a výstupních parametrů podprogramu "Loupací odvalovací fréza"	89
6.3	Přehled vstupních a výstupních parametrů podprogramu "Dokončovací kotoučová a čepová modulová fréza".....	91
6.4	Příklad výstupu programu na obrazovku počítače pro podprogram "Odvalovací fréza"	93

6.4.1	Zadání vstupních parametrů.....	93
6.4.2	Výpočet základních údajů profilu zubu nástroje a základních konstrukčních parametrů.....	93
6.4.3	Vyobrazení nástroje.....	94
6.5	Příklad výstupu programu na obrazovku počítače pro podprogram "Loupací odvalovací fréza".....	95
6.5.1	Zadání vstupních parametrů a výpočet parametrů profilu nástroje.....	95
6.5.2	Obrázek býstroje s vyznačením základních konstrukčních parametrů.....	95
Další zdroje (Použitá a doporučená literatura k dalšímu studiu).....		96

1 ÚVOD

Mezi nejdůležitější fenomény konce 20. a začátku 21. století nepochybně patří široké uplatnění počítačů téměř ve všech sférách lidské činnosti, od aplikací spjatých s průmyslem, přes služby a zábavu, až třeba po zmapování genomu člověka.

Ve strojírenství umožnila výpočetní technika zvýšit pružnost a efektivnost celého výrobního procesu zavedením nových metod a urychlením stávajících postupů v projekčních a konstrukčních činnostech, v technologiích výroby a v neposlední řadě také při řízení jakosti. Všechny tyto změny se samozřejmě promítají i do oblasti konstrukce a výroby ozubení.

Ozubená kola určitým způsobem symbolizují strojírenství, o čemž svědčí i to, že se stala součástí loga řady institucí, společností a veletrhů spojených se strojírenstvím. Převody ozubenými koly jsou nejčastěji používané převody a představují jednu z možností uskutečnění přenosu a transformace mechanické energie a pohybu ve strojích. Neustále rostoucí požadavky na zvyšování únosnosti a na snižování hlučnosti ozubení vedou k přijetí řady opatření při konstrukci a vlastní výrobě. Na veškeré změny konstrukce ozubeného kola musí reagovat konstruktér nástroje pro výrobu tohoto kola. Při návrhu všech nástrojů na ozubení je nutno spočítat celou řadu parametrů, jejichž výpočet i s použitím kalkulátoru je značně zdoluhavý a proto je na místě celou úlohu výpočtu algoritmizovat a převést do řeči počítače. Tím je možné věnovat více času činnostem tvůrčím namísto činností rutinních. Součástí tohoto učebního textu je seznámení studentů s možnostmi usnadnění výpočtu charakteristických parametrů profilu bříty a základních konstrukčních rozměrů nástrojů pro odvalovací způsob výroby evolventního ozubení.

Vysoký nárůst výkonu počítačů umožnil nejen algoritmizovat rutinní úlohy, ale přispěl i k zavedení řady progresivních návrhových a optimalizačních metod do průmyslové praxe. Mezi tyto metody patří zejména metoda konečných prvků, která se stále častěji používá i při vývoji řezných nástrojů a analýze procesu obrábění. Modelováním řezného procesu je možné získat představu o průběhu napětí, deformací a teplot v nástroji i obrobku a tyto poznatky lze pak využít při konstrukci nástroje.

Rozvoj samotné technologie obrábění je podmíněn vývojem a aplikací nových nástrojových materiálů a povlaků, progresivními konstrukcemi nástrojů a obráběcích strojů a dále stupněm vyspělosti ostatních technických oborů. Vývoj v oblasti výroby ozubených kol obráběním úzce souvisí se směry, kterými se ubírá vlastní technologie obrábění, což je patrné například na aplikaci vysokorychlostního, suchého a tvrdého obrábění v odvalovacím frézování ozubených kol.

V následující tabulce můžeme vidět nejčastěji používané technologie výroby ozubení, a to jak pro hrubování, tak pro dokončování boků zubů. Je v nich zahrnuta více než stoletá zkušenost konstruktérů a technologů tohoto oboru. Na následujících stránkách se budeme věnovat dnes nejčastěji používaným metodám pro hrubování ozubení, a to metodám odvalovacím.

Tab. 1 Přehled nejdůležitějších metod pro výrobu čelních ozubených kol obráběním

Hrubovací metody	Dělicí způsob (tvarové obrábění)		Frézování tvarovými frézami	
			Protahování	
	Odvalovací způsob		Odvalování přerušované (s dělením):	
			odvalovací obrážení hřebenovým obrážecím nožem	
			Odvalování plynulé:	
			odvalovací frézování	
		odvalovací obrážení kotoučovým obrážecím nožem		
		Ševingování		
		Loupací odvalovací frézování a obrážení		
Dokončovací metody		Honování a lapování		
		Broušení		
		- dělicí broušení odvalem - dělicí profilové broušení - plynulé odvalování		

2 ODVALOVACÍ OBRÁŽENÍ HŘEBENOVÝM OBRÁŽECÍM NOŽEM

Mezi jednu z nejčastěji používaných metod pro výrobu čelního ozubení odvalem patří metoda, při které je jako nástroj použit hřebenový obrážecí nůž. Tato metoda je známá ve strojařském světě především jako metoda MAAG a hlavní oblast jejího použití v současné době spadá do oblasti kusové výroby, především ozubených kol velkých modulů a průměrů.



Čas ke studiu: 10 hodin



Cíl: Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- ✚ Popsat metodu výroby ozubení ozubených kol s využitím hřebenového obrážecího nože.
- ✚ Určit profil obrážecího hřebenového nože pro výrobu libovolného čelního ozubeného kola.
- ✚ Vypočítat ostatní konstrukční rozměry hřebenového obrážecího nože a konfrontovat je s výsledky dosaženými při využití výpočetního programu HŘEBEN



Výklad

2.1 Princip metody a používané stroje

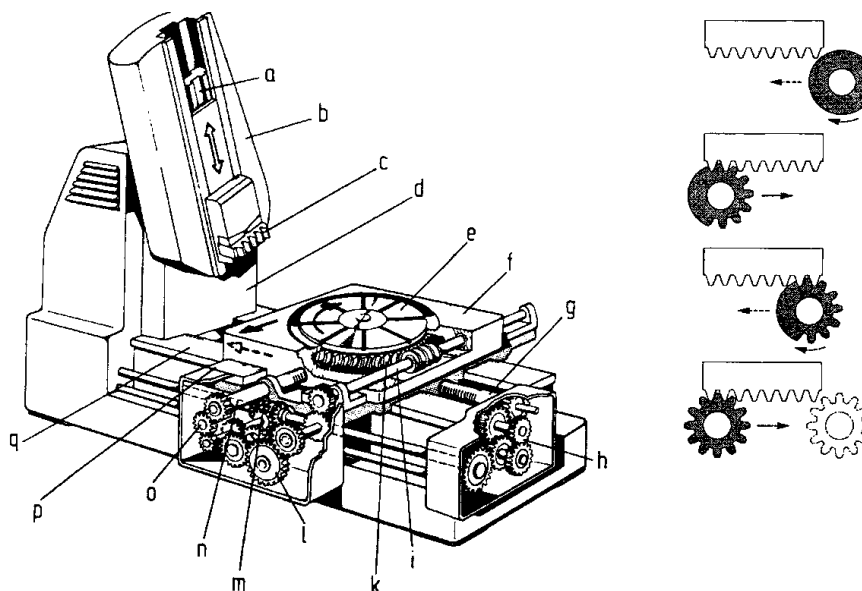
Max Maag se zabýval metodami odvalovacího obrážení vyvinutými Němcem Hagen-Tornem v roce 1872 a Američany Bilgramem (1882) a Grantem (1887), aby mohl vyrobit jednoduchým nástrojem ozubení MAAG. V roce 1909 přihlásil v Německu k patentování stroj na obrážení válcových ozubených kol s přímými a šikmými zuby a v roce 1912 nechal vyrobit za použití anglické licence první obrážedku [1].

Odvalovací obrážení hřebenovým nožem představuje valení čelního kola po ozubené tyči, **obr. 2.1-1**. Odtud se odvíjí jednoduchá geometrie nástroje a jednoduchá kinematika stroje. Nesmí nás proto překvapit, že tato metoda, která zahájila éru strojního obrábění ozubení, se dodnes používá.

Nástroj ve tvaru ozubené tyče, tzv. obrážecí hřebenový nůž (c), má zpravidla méně zubů než vyráběné kolo, takže obrobek se musí několikrát odvalovat po sektorech podél aktivní délky hřebene. Řezný pohyb vzniká při pohybu hřebene dolů, při zpětném zdvihu je hřeben od obrobku odtlačován, aby se zbytečně netřel po obrobku a tím neopotřeboval.

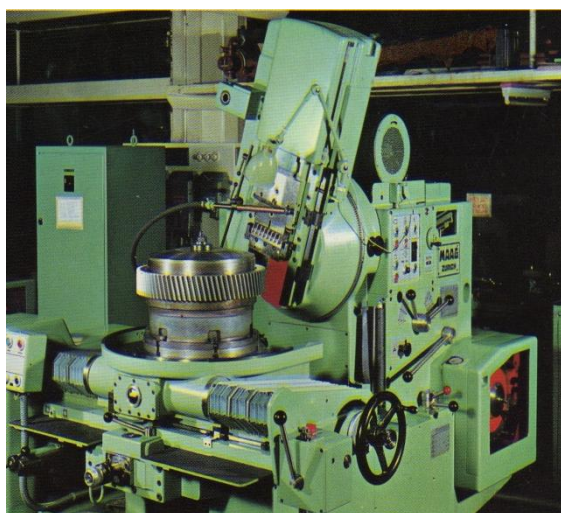
Odvalovací pohyb je vykonáván tehdy, když se příčné saně (f) přesouvají pomocí vodícího šroubu podél nástroje tangenciálně vůči obrobku a současně vykonává kruhový upínací stůl s obrobkem otáčivý pohyb přes šnekový převod (i, k). Po obrobení skupiny zubů

vyjede obrobek díky podélným spodním saním ze záběru a příčné saně se vrátí do výchozí polohy. Přisuv, odval a zpětný pohyb se opakují tak dlouho, až je vytvořeno ozubení na celém povrchu kola.



Obr. 2.1-1 Obrážčky na principu MAAG

Obálkové řezy přímkového břitů nástroje tvarují evolventní boky zubů tím přesněji, čím menší je odvalovací posuv. Odvalovací posuv a řezná rychlost mohou být voleny nezávisle na sobě.



Obr. 2.1-2 Obrážčky na principu MAAG typu SH-75K (vlevo) a SH-600/735SE (vpravo) pro průměry kol 0,75 m, resp. 7,35 m

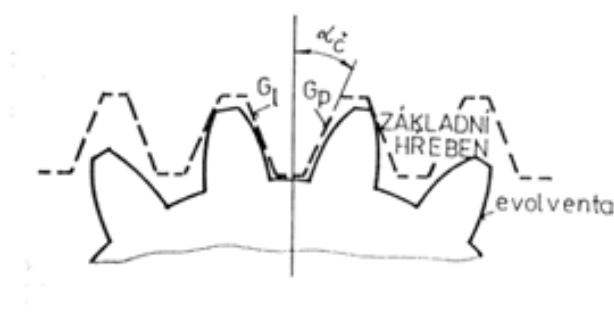
Jeden obrážecí hřeben slouží k obrábění jak ozubených kol s přímými zuby, tak pravých či levých šikmozubých kol, normálních i stromečkových, korigovaných i nekorigovaných, pro daný modul nezávisle na úhlu sklonu zubu a na počtu zubů kola, avšak pouze pro vnější ozubení. V určitých případech má obrážecí hřeben dva nebo jen jeden zub. Porovnáme-li hřebenové nože s jinými nástroji na ozubení, jsou nejjednodušší jak z hlediska výrobního, tak i pokud jde o jejich ostření. Přímé boky zubů nástroje mohou být frézovány, pro výjimečnou přesnost tvaru podbrušovány nebo řezány drátem. Při přeastřování hřebene nevykazují profil, výška zubu a přesnost žádných změn, protože jsou přebroušována pouze čela a takto vzniklá prodloužení základního profilu jsou vyrovnána přísuvem k obrobku. Hřebenové nože patří mezi nejpřesnější zubořezné nástroje jak se zřetelem na přesnost profilu kola, tak i s ohledem na jakost obrobeného povrchu boku zubového [2].

Obrážecí MAAG byly konstruovány v Curychu v různých typových řadách a velikostech až do průměru kola 14 m, malé obráběcí stroje od roku 1972 do roku 1982 také ve firmě Lorenz v Ettlingenu. Nevýhodou metody je menší produktivita práce stroje. V současné době se s nimi můžeme setkat v údržbářských provozech a v menších firmách, které se zabývají především kusovou výrobou.

2.2 Postup výpočtu hřebenového obrážecího nože

Výpočet je proveden pro nástroj na čelní ozubené kolo se šikmými zuby. Do výpočtu zavedeme zvolené úhly upnutí nástroje na obrážecce, řeznou geometrii nože a charakteristiky ozubení. Celý výpočet je proveden pro evolventní ozubení a sestavy rovnic lze použít i pro jiné typy hřebenů [3].

Hřebenový obrážecí nůž musí být konstrukčně řešen tak, aby po upnutí do smýkadla obrážecího a jeho pohybem ve směru obrážení vytvářelo ostří zubu nože obálkovou evolventu boku zubu kola. Právě S_p a levé S_l ostří vytváří v čelní rovině kola profil základního hřebene. Na **obr. 2.2.-1** je tento profil vyznačen čerchovaně přímkami G_p a G_l a úhlem záběru α_c .



Obr. 2.2-1 Čelní rovina ozubeného kola s vyznačeným profilem základního hřebene

Tento záběrový úhel v čelní rovině určíme z úhlu záběru v normálové rovině α_n a úhlu sklonu zubu kola β_o :

$$\tan \alpha_c = \frac{\tan \alpha_n}{\cos \beta_o} . \quad (2.1)$$

U ozubení s přímými zuby je $\beta_o = 0$ a $\tan \alpha_c = \tan \alpha_n$. Při výpočtu vztahů mezi profilem zubu nože, profilem zubu základního hřebene a ozubeného kola můžeme ozubené kolo vynechat a využít jen vztahů mezi ostřím S_p a S_l nože a přímkami G_p a G_l základního hřebene.

2.2.1 Rovnice hřbetu zubu hřebenového obrážecího nože

Tělesu hřebenového nože přiřadíme kartézský souřadný systém $x_1-y_1-z_1$ s počátkem na hlavě zubu. Rovina x_1-y_1 je pro nůž nástrojovou rovinou základní P_r . Hřbet zubu na hlavě nože svírá s osou z_1 úhel α_{ap} , představuje nástrojový zadní úhel hřbetu a u nožů systému Maag se volí 12° . Hřbetní ploše přiřadíme další souřadný systém 2, který vznikne otočením okolo osy $x_1 = x_2$ o úhel α_{ap} . Pro usnadnění záznamu přechodu systému 1 do systému 2 nahradíme označení úhlu hřbetu $\alpha_{ap} = \alpha_{12}$, jak je znázorněno na **obr. 2.2-2**.

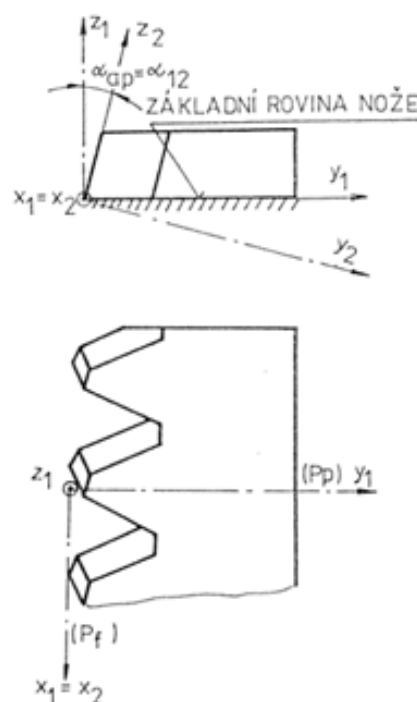
Mezi souřadnicemi systému 1 a 2 platí transformační rovnice:

$$\begin{aligned} x_2 &= x_1 \cdot \cos 0^\circ \cdot \cos 90^\circ + z_1 \cdot \cos 90^\circ \\ y_2 &= x_1 \cdot \cos 90^\circ + y_1 \cos \alpha_{12} + z_1 \cdot \cos(90^\circ + \alpha_{12}) = \\ &= y_1 \cdot \cos \alpha_{12} - z_1 \cdot \sin \alpha_{12} \\ z_2 &= x_1 \cdot \cos 90^\circ + y_1 \cdot \cos(90^\circ - \alpha_{12}) + z_1 \cdot \cos \alpha_{12} = \\ &= y_1 \cdot \sin \alpha_{12} + z_1 \cdot \cos \alpha_{12} \end{aligned} \quad (2.2)$$

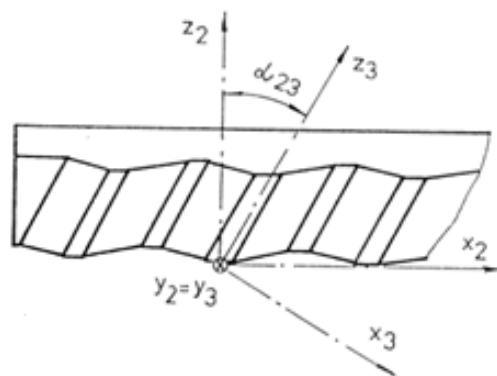
Transformační rovnice odpovídají matici M_{21} :

$$M_{21} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha_{12} & -\sin \alpha_{12} \\ 0 & \sin \alpha_{12} & \cos \alpha_{12} \end{pmatrix}$$

Obr. 2.2-2 Transformace soustavy 1 do soustavy 2
otočením okolo osy $x_1 = x_2$ o úhel α_{12}



Šikmost zubu nože je znázorněna na **obr. 2.2-3** v souřadném systému 3. Úhel α_{23} mezi z_2 a z_3 odpovídá úhlu nastavení upínací kolébky brusky – **obr. 2.2-4**. Bude, jak poznáme dále, závislý na charakteristice obráběného kola, geometrii nástroje a na vychýlení nože ve smýkadle stroje.



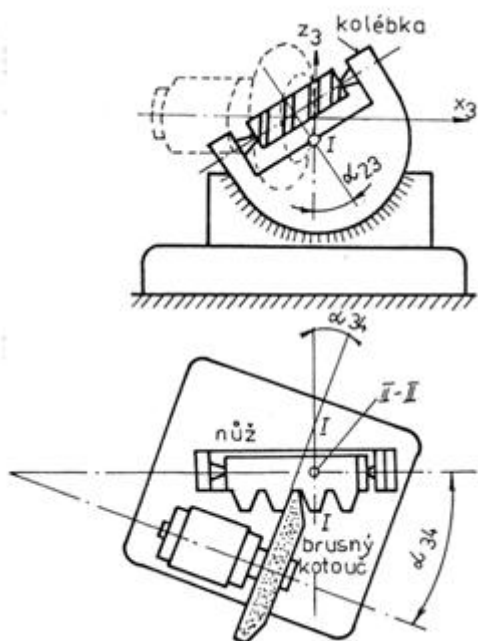
Obr. 2.2-3 Transformace soustavy 2 do soustavy 3 otočením okolo osy $y_2 = y_3$ o úhel α_{23}

Transformační rovnice mezi systémy 2 a 3 budou mít tvar:

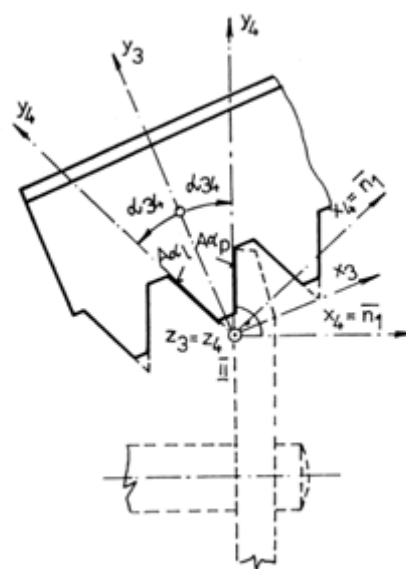
$$\begin{aligned} x_3 &= x_2 \cdot \cos \alpha_{23} + y_2 \cdot \cos 90^\circ + z_2 \cdot \cos(90^\circ + \alpha_{23}) = x_2 \cdot \cos \alpha_{23} - z_2 \sin \alpha_{23} \\ y_3 &= x_2 \cdot \cos 90^\circ + y_2 \cdot \cos 0^\circ + z_2 \cdot \cos 90^\circ = y_2 \\ z_3 &= x_2 \cdot \cos(90^\circ - \alpha_{23}) + y_2 \cdot \cos 90^\circ + z_2 \cdot \cos \alpha_{23} = x_2 \cdot \sin \alpha_{23} + z_2 \cdot \cos \alpha_{23} \end{aligned} \quad (2.3)$$

a udávají matici M_{32} :

$$M_{32} = \begin{pmatrix} \cos \alpha_{23} & 0 & -\sin \alpha_{23} \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \alpha_{23} & 0 & \cos \alpha_{23} \end{pmatrix}$$



Obr. 2.2-4 Upnutí nože v kolébce brusky



Obr. 2.2-5 Transformace soustavy 3 do soustavy 4 otočením okolo osy $z_3 = z_4$ o úhel α_{34}

Abychom mohli brousit boční hřbet zubu nože rovinnou plochou kuželového brousícího kotouče, musíme kolébku otočit okolo osy II o úhel α_{34} – **obr. 2.2-5**. Osa II je rovnoběžná se souřadnicí z_3 . Transformační vztahy mezi systémy 3 a 4 budou různé pro pravou a levou hřbetní plochu zubu nože.

Pro pravou hřbetní plochu:

$$\begin{aligned}x_4 &= x_3 \cdot \cos \alpha_{34} + y_3 \cdot \cos (90^\circ + \alpha_{34}) + z_3 \cdot \cos 90^\circ = x_3 \cdot \cos \alpha_{34} - y_3 \sin \alpha_{34} \\y_4 &= x_3 \cdot \cos(90^\circ - \alpha_{34}) + y_3 \cdot \cos \alpha_{34} + z_3 \cdot \cos 90^\circ = x_3 \cdot \sin \alpha_{34} + y_3 \cdot \cos \alpha_{34} \\z_4 &= x_3 \cdot \cos 90^\circ + y_3 \cdot \cos 90^\circ + z_3 \cdot \cos 0^\circ = z_3\end{aligned}\quad (2.4)$$

což udává matici pro pravý bok M_{43p} :

$$M_{43p} = \begin{pmatrix} \cos \alpha_{34} & -\sin \alpha_{34} & 0 \\ \sin \alpha_{34} & \cos \alpha_{34} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Pro levou hřbetní plochu:

$$\begin{aligned}x_4 &= x_3 \cdot \cos \alpha_{34} + y_3 \cdot \cos(90^\circ - \alpha_{34}) + z_3 \cdot \cos 90^\circ = x_3 \cdot \cos \alpha_{34} + y_3 \sin \alpha_{34} \\y_4 &= x_3 \cdot \cos(90^\circ + \alpha_{34}) + y_3 \cdot \cos \alpha_{34} + z_3 \cdot \cos 90^\circ = -x_3 \cdot \sin \alpha_{34} + y_3 \cdot \cos \alpha_{34} \\z_4 &= x_3 \cdot \cos 90^\circ + y_3 \cdot \cos 90^\circ + z_3 \cdot \cos 0^\circ = z_3\end{aligned}\quad (2.5)$$

což udává matici pro levý bok M_{43l} :

$$M_{43l} = \begin{pmatrix} \cos \alpha_{34} & \sin \alpha_{34} & 0 \\ -\sin \alpha_{34} & \cos \alpha_{34} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

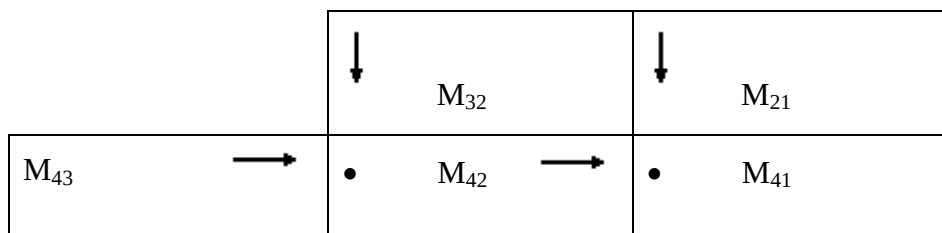
Dáme-li obě tyto matice do jedné, dostaneme závislost mezi systémy 4 a 3, kdy v případě volby znaménka platí vždy horní pro pravý a dolní pro levý bok zubu nože.

$$M_{43p/l} = \begin{pmatrix} \cos \alpha_{34} & \mp \sin \alpha_{34} & 0 \\ \pm \sin \alpha_{34} & \cos \alpha_{34} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Normála na hřbety zubů A, případně A_{al} je určena osou x_4 . Rovnice normály v systému 1, tedy k tělesu nože a jeho základní rovině x_1 - y_1 se získá součinem jednotlivých matic:

$$M_{41} = M_{43} \bullet M_{32} \bullet M_{21}, \quad (2.6)$$

který provedeme podle schématu:



$$\begin{aligned}
M_{42} &= M_{43} \cdot M_{32} = \\
&= \begin{pmatrix} \cos \alpha_{34} & \mp \sin \alpha_{34} & 0 \\ \pm \sin \alpha_{34} & \cos \alpha_{34} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \cos \alpha_{23} & 0 & -\sin \alpha_{23} \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \alpha_{23} & 0 & \cos \alpha_{23} \end{pmatrix} = \\
&= \begin{pmatrix} \cos \alpha_{32} \cdot \cos \alpha_{23} & \mp \sin \alpha_{34} & -\sin \alpha_{23} \cdot \cos \alpha_{34} \\ \mp \sin \alpha_{34} \cdot \cos \alpha_{23} & \cos \alpha_{34} & \mp \sin \alpha_{23} \cdot \sin \alpha_{34} \\ \sin \alpha_{23} & 0 & \cos \alpha_{23} \end{pmatrix} = M_{42} \quad (2.7)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
M_{41} &= M_{42} \cdot M_{21} = \\
&= \begin{pmatrix} \cos \alpha_{32} \cdot \cos \alpha_{23} & \mp \sin \alpha_{34} & -\sin \alpha_{23} \cdot \cos \alpha_{34} \\ \mp \sin \alpha_{34} \cdot \cos \alpha_{23} & \cos \alpha_{34} & \sin \alpha_{23} \cdot \sin \alpha_{34} \\ \sin \alpha_{23} & 0 & \cos \alpha_{23} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha_{12} & -\sin \alpha_{12} \\ 0 & \sin \alpha_{12} & \cos \alpha_{12} \end{pmatrix} \quad (2.8)
\end{aligned}$$

Protože hledáme jen souřadnici x_4 , není třeba řešit celou matici M_{41} . Vynecháme tedy druhý řádek y_4 a třetí řádek z_4 . Z prvního řádku matice M_{41} dostaneme normálu k boční hřbetní ploše zubu nože v systému 1:

$$\begin{aligned}
x_4 = \bar{n}_1 &= \cos \alpha_{23} \cdot \cos \alpha_{34} \cdot \bar{i} + (\pm \cos \alpha_{12} \cdot \sin \alpha_{34} - \sin \alpha_{12} \cdot \sin \alpha_{23} \cdot \cos \alpha_{34}) \cdot \bar{j} + \\
&+ (\pm \sin \alpha_{12} \cdot \sin \alpha_{34} - \cos \alpha_{12} \cdot \sin \alpha_{23} \cdot \cos \alpha_{34}) \cdot \bar{k} = A_1 \cdot \bar{i} + B_1 \cdot \bar{j} + C_1 \cdot \bar{k},
\end{aligned}$$

kdy horní znaménko opět znamená normálu k pravé a dolní normálu k levé hřbetní ploše zubu hřebenového nože.

Rovinnou hřbetní plochu zubu hřebene A_{ap} (A_{al}) dostaneme ze skalárního součinu vektoru tečného ($\bar{r}_1 = x_1 \cdot \bar{i} + y_1 \cdot \bar{j} + z_1 \cdot \bar{k}$) a normálového ($\bar{n}_1 = A_1 \cdot \bar{i} + B_1 \cdot \bar{j} + C_1 \cdot \bar{k}$). Jestliže $\bar{r}_1 \cdot \bar{n}_1 = 0$, pak po dosazení a úpravě dostaneme výraz:

$$A_1 x_1 + B_1 y_1 + C_1 z_1 = 0, \quad (2.9)$$

kde jednotlivé substituční vztahy vyjádříme:

$$\begin{aligned}
A_1 &= \cos \alpha_{23} \cdot \cos \alpha_{34} \\
B_1 &= \mp \cos \alpha_{12} \cdot \sin \alpha_{34} - \sin \alpha_{12} \cdot \sin \alpha_{23} \cdot \cos \alpha_{34} \\
C_1 &= \pm \sin \alpha_{12} \cdot \sin \alpha_{34} - \cos \alpha_{12} \cdot \sin \alpha_{23} \cdot \cos \alpha_{34}.
\end{aligned}$$

Znaménková konvence je jako u předchozích výpočtů, tedy horní znaménka pro pravý a dolní pro levý bok zubu hřebenového nože.

2.2.2 Rovnice čela zubu hřebenového obrážecího nože

K broušení šikmého čela nástroje musíme mít pro ustavení nože na brusce k dispozici další dva úhly – viz **obr. 2.2-6**:

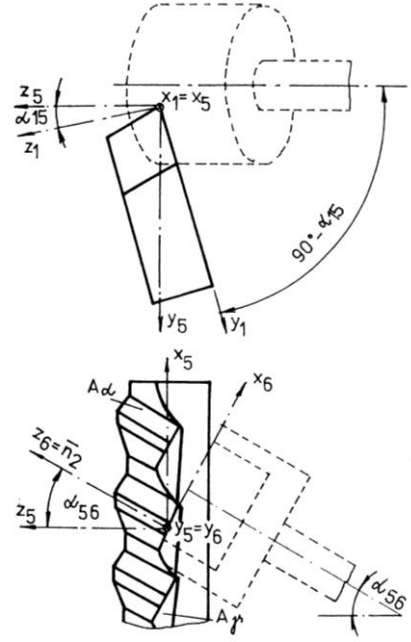
- úhel α_{15} – mezi základním systémem 1 a osou kotouče
- úhel α_{56} – mezi šikmým čelem a systémem 5.

Transformační rovnice mezi systémy 5 a 1 pak dostanou následující podobu:

$$\begin{aligned}
 x_5 &= x_1 \cdot \cos 0^\circ + y_1 \cdot \cos 90^\circ + z_1 \cos 90^\circ = x_1 \\
 y_5 &= x_1 \cdot \cos 90^\circ + y_1 \cdot \cos \alpha_{15} + z_1 \cdot \cos(90^\circ - \alpha_{15}) = \\
 &= y_1 \cdot \cos \alpha_{15} + z_1 \cdot \sin \alpha_{15} \\
 z_5 &= x_1 \cdot \cos 90^\circ + y_1 \cdot \cos(90^\circ + \alpha_{15}) + z_1 \cdot \cos \alpha_{15} = \\
 &= -y_1 \cdot \sin \alpha_{15} + z_1 \cdot \cos \alpha_{15}
 \end{aligned}
 \tag{2.10}$$

což dává tvar matici M_{51} :

$$M_{51} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha_{15} & \sin \alpha_{15} \\ 0 & -\sin \alpha_{15} & \cos \alpha_{15} \end{pmatrix}.$$



Obr. 2.2-6 Transformace mezi systémy 5 a 1 a soustavami 6 a 5

Mezi systémy 6 a 5 budou platit následující transformace:

$$\begin{aligned}
 x_6 &= x_5 \cdot \cos \alpha_{56} + y_5 \cdot \cos 90^\circ + z_5 \cdot \cos(90^\circ + \alpha_{56}) = x_5 \cdot \cos \alpha_{56} - z_5 \cdot \sin \alpha_{56} \\
 y_6 &= x_5 \cdot \cos 90^\circ + y_5 \cdot \cos 0^\circ + z_5 \cdot \cos 90^\circ = y_5 \\
 z_6 &= x_5 \cdot \cos(90^\circ - \alpha_{56}) + y_5 \cdot \cos 90^\circ + z_5 \cdot \cos \alpha_{56} = x_5 \cdot \sin \alpha_{56} + z_5 \cdot \cos \alpha_{56}
 \end{aligned}
 \tag{2.11}$$

a matice M_{65} tak bude mít tvar:

$$M_{65} = \begin{pmatrix} \cos \alpha_{56} & 0 & -\sin \alpha_{56} \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \alpha_{56} & 0 & \cos \alpha_{56} \end{pmatrix}.$$

Osa z_6 je normálou k rovině čela nože, $z_6 = \bar{n}_2$, její směrové kosiny v systému 1 získáme skalárním součinem matic M_{51} a M_{65} .

$$M_{61} = M_{65} \cdot M_{51} =$$

$$\begin{aligned}
 &= \begin{pmatrix} \cos \alpha_{56} & 0 & -\sin \alpha_{56} \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \alpha_{56} & 0 & \cos \alpha_{56} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha_{15} & \sin \alpha_{15} \\ 0 & -\sin \alpha_{15} & \cos \alpha_{15} \end{pmatrix} = \\
 &= \begin{pmatrix} \cos \alpha_{56} & \sin \alpha_{15} \cdot \sin \alpha_{56} & -\sin \alpha_{56} \cdot \cos \alpha_{15} \\ 0 & \cos \alpha_{15} & \sin \alpha_{15} \\ \sin \alpha_{56} & -\sin \alpha_{15} \cdot \cos \alpha_{56} & \cos \alpha_{15} \cdot \cos \alpha_{56} \end{pmatrix}.
 \end{aligned}
 \tag{2.12}$$

Z této vyřešené matice M_{61} použijeme jen třetí řádek, takže

$$z_6 = \bar{n}_2 = \sin \alpha_{56} \cdot \bar{i} - \sin \alpha_{15} \cdot \cos \alpha_{56} \cdot \bar{j} + \cos \alpha_{15} \cdot \cos \alpha_{56} \cdot \bar{k} = A_2 \cdot \bar{i} + B_2 \cdot \bar{j} + C_2 \cdot \bar{k}.$$

Rovinnou čelní plochu nože stanovíme ze skalárního součinu vektoru tečného ($\vec{r}_1 = x_1 \cdot \vec{i} + y_1 \cdot \vec{j} + z_1 \cdot \vec{k}$) a normálového ($\vec{n}_2 = A_2 \cdot \vec{i} + B_2 \cdot \vec{j} + C_2 \cdot \vec{k}$), kde jednotlivé substituce:

$$A_2 = \sin \alpha_{56}$$

$$B_2 = -\sin \alpha_{15} \cdot \cos \alpha_{56}$$

$$C_2 = \cos \alpha_{15} \cdot \cos \alpha_{56}$$

Po vynásobení $\vec{r}_1 \cdot \vec{n}_1 = 0$ dostaneme výraz

$$(x_1 \cdot \vec{i} + y_1 \cdot \vec{j} + z_1 \cdot \vec{k}) \cdot (A_2 \cdot \vec{i} + B_2 \cdot \vec{j} + C_2 \cdot \vec{k}) = 0, \quad (2.13)$$

takže rovnice čela bude mít tvar

$$A_2 x_1 + B_2 y_1 + C_2 z_1 = 0 \quad (2.14)$$

2.2.3 Ostří na levém a pravém boku zubu hřebenového nože

Ostří na zubu nože dostaneme jako průsečnici hřbetu a čela zubu. Boční hřbet jsme určili rovnicí (2.9) $A_1 x_1 + B_1 y_1 + C_1 z_1 = 0$, čelo $A_2 x_1 + B_2 y_1 + C_2 z_1 = 0$ pak z rovnice (2.13). V souřadném systému $x_1-y_1-z_1$ jsou směrové kosiny přímkového ostří dány výrazy:

$$\cos \alpha_1 = \frac{p_1}{\sqrt{p_1^2 + q_1^2 + r_1^2}}$$

$$\cos \beta_1 = \frac{q_1}{\sqrt{p_1^2 + q_1^2 + r_1^2}}$$

$$\cos \gamma_1 = \frac{r_1}{\sqrt{p_1^2 + q_1^2 + r_1^2}}$$

ze kterých v dalším postupu využijeme jen členů p_1 , q_1 a r_1 . Odmocnina ve jmenovateli nemá vliv na řešení, a proto ji zanedbáme. Poloha levého a pravého ostří zubu hřebene nože v systému 1 je pak vektorovým součinem normálových vektorů rovin bočního hřbetu a čela zubu, a proto je třeba vyjádřit ji jako:

$$\begin{vmatrix} p_1 & q_1 & r_1 \\ A_1 & B_1 & C_1 \\ A_2 & B_2 & C_2 \end{vmatrix}, \text{ odkud } p_1 = B_1 C_2 - C_1 B_2, q_1 = A_2 C_1 - A_1 C_2 \text{ a } r_1 = A_1 B_2 - A_2 B_1.$$

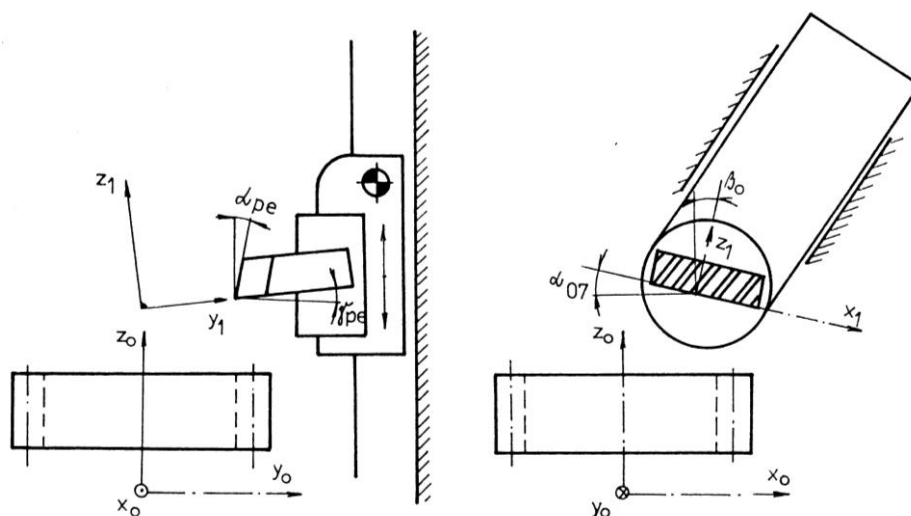
Po dosazení a úpravě dostaneme soustavu rovnic I polohy ostří zubu nože v systému 1:

$$\begin{aligned} p_1 &= \cos \alpha_{56} [\mp \cos(\alpha_{12} + \alpha_{15}) \cdot \sin \alpha_{34} - \sin(\alpha_{12} + \alpha_{15}) \cdot \sin \alpha_{23} \cdot \cos \alpha_{34}] \\ q_1 &= \sin \alpha_{56} (\pm \sin \alpha_{12} \cdot \sin \alpha_{34} - \cos \alpha_{12} \cdot \sin \alpha_{23} \cdot \cos \alpha_{34}) - \\ &\quad - \cos \alpha_{23} \cdot \cos \alpha_{34} \cdot \cos \alpha_{15} \cdot \cos \alpha_{56} \\ r_1 &= \sin \alpha_{56} (\sin \alpha_{12} \cdot \sin \alpha_{23} \cdot \cos \alpha_{34} \pm \cos \alpha_{12} \cdot \sin \alpha_{34}) - \\ &\quad - \sin \alpha_{15} \cdot \cos \alpha_{23} \cdot \cos \alpha_{34} \cdot \cos \alpha_{56} \end{aligned} \quad \text{I} \quad (2.15)$$

2.2.4 Ustavení hřebenového obrážecího nože na obrážece

Upnutím nože v otočném držáku se mění poloha ostří vzhledem k vypočteným vztahům v systému 1. Při výrobě čelního šikmozubého kola vykláníme někdy nůž spolu se smýkadlem o úhel $\beta_0 = \alpha_{07}$. U krátkých zápichů je naopak nutno omezit výběh nástroje, proto bývá $\alpha_{07} = 0$. Při obecném výpočtu volíme úhel α_{07} dle konstrukce ozubení a dle možností obráběcího stroje.

Nezávisle na tomto vychýlení o úhel α_{07} je nůž ještě vykloněn v čelní rovině o úhel α_{17} , který u obrážecího systému Maag činí $\alpha_{17} = 6^\circ 30'$ a odpovídá to pracovnímu úhlu čela nástroje γ_{pe} . Uvedené okolnosti jsou znázorněny na **obr. 2.2-7**.



Obr. 2.2-7 Transformace mezi systémy 7 a 1 a soustavami 0 a 7

Abychom stanovili polohy obou ostří S_p a S_l v souřadném systému obráběného kola $x_0-y_0-z_0$, musíme otočit systém 1 o úhel α_{07} a α_{17} . Dostaneme tak tyto transformační vztahy:

$$x_7 = x_1 \cdot \cos 0^\circ + y_1 \cdot \cos 90^\circ + z_1 \cdot \cos 90^\circ = x_1$$

$$y_7 = x_1 \cdot \cos 90^\circ + y_1 \cdot \cos \alpha_{17} + z_1 \cdot \cos(90^\circ + \alpha_{17}) = y_1 \cdot \cos \alpha_{17} - z_1 \cdot \sin \alpha_{17}$$

$$z_7 = x_1 \cdot \cos 90^\circ + y_1 \cdot \cos(90^\circ - \alpha_{17}) + z_1 \cdot \cos \alpha_{17} = y_1 \cdot \sin \alpha_{17} + z_1 \cdot \cos \alpha_{17}, \quad (2.16)$$

tedy matice M_{71} bude mít tvar:

$$M_{71} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha_{17} & -\sin \alpha_{17} \\ 0 & \sin \alpha_{17} & \cos \alpha_{17} \end{pmatrix}.$$

Mezi systémy 7 a 0 budou platit tyto závislosti:

$$\begin{aligned}x_0 &= x_7 \cdot \cos \alpha_{07} + y_7 \cdot \cos 90^\circ + z_7 \cdot \cos(90^\circ - \alpha_{07}) = x_7 \cdot \cos \alpha_{07} + z_7 \cdot \sin \alpha_{07} \\y_0 &= x_7 \cdot \cos 90^\circ + y_7 \cdot \cos 0^\circ + z_7 \cdot \cos 90^\circ = y_7 \\z_0 &= x_7 \cdot \cos(90^\circ + \alpha_{07}) + y_7 \cdot \cos 90^\circ + z_7 \cdot \cos \alpha_{07} = -x_7 \cdot \sin \alpha_{07} + z_7 \cdot \cos \alpha_{07} \quad (2.17)\end{aligned}$$

A odtud matice M_{07} ve tvaru:

$$M_{07} = \begin{pmatrix} \cos \alpha_{07} & 0 & \sin \alpha_{07} \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \alpha_{07} & 0 & \cos \alpha_{07} \end{pmatrix}.$$

Mezi systémy 0 a 1 pak platí vztahy, které získáme skalárním součinem matic M_{07} a M_{71} . Pak matice M_{01} bude:

$$\begin{aligned}M_{01} &= M_{07} \cdot M_{71} = \begin{pmatrix} \cos \alpha_{07} & 0 & \sin \alpha_{07} \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \alpha_{07} & 0 & \cos \alpha_{07} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha_{17} & -\sin \alpha_{17} \\ 0 & \sin \alpha_{17} & \cos \alpha_{17} \end{pmatrix} = \\&= \begin{pmatrix} \cos \alpha_{07} & \sin \alpha_{07} \cdot \sin \alpha_{17} & \sin \alpha_{07} \cdot \cos \alpha_{17} \\ 0 & \cos \alpha_{17} & -\sin \alpha_{17} \\ -\sin \alpha_{07} & \sin \alpha_{17} \cdot \cos \alpha_{07} & \cos \alpha_{17} \cdot \cos \alpha_{07} \end{pmatrix}. \quad (2.18)\end{aligned}$$

Vyjádřením této matice dostaneme transformační rovnice:

$$\begin{aligned}x_0 &= \cos \alpha_{07} \cdot x_1 + \sin \alpha_{07} \cdot \sin \alpha_{17} \cdot y_1 + \sin \alpha_{07} \cdot \cos \alpha_{17} \cdot z_1 \\y_0 &= 0 \cdot x_1 + \cos \alpha_{17} \cdot y_1 - \sin \alpha_{17} \cdot z_1 \\z_0 &= -\sin \alpha_{07} \cdot x_1 + \sin \alpha_{17} \cdot \cos \alpha_{07} \cdot y_1 + \cos \alpha_{07} \cdot \cos \alpha_{17} \cdot z_1. \quad (2.19)\end{aligned}$$

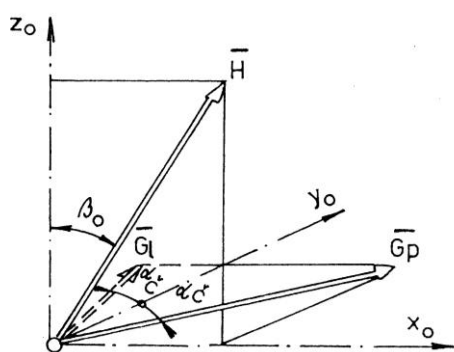
Tyto rovnice nám umožní převést výrazy p_1, q_1, r_1 ze soustavy rovnic **I** do souřadného systému 0 (x_0 - y_0 - z_0), čímž dostaneme směry ostří zubu nože při jeho ustavení do držáku smýkadla obrážky:

$$\begin{aligned}p_0 &= p_1 \cdot \cos \alpha_{07} + q_1 \cdot \sin \alpha_{17} \cdot \sin \alpha_{07} + r_1 \cdot \sin \alpha_{07} \cdot \cos \alpha_{17} \\q_0 &= q_1 \cdot \cos \alpha_{17} - r_1 \cdot \sin \alpha_{17} \\r_0 &= -p_1 \cdot \sin \alpha_{07} + q_1 \cdot \sin \alpha_{17} \cdot \cos \alpha_{07} + r_1 \cdot \cos \alpha_{17} \cdot \cos \alpha_{07} \quad (2.20)\end{aligned}$$

2.2.5 Základní profil hřebene vytvořený ostřím nože

Při kmitavém pohybu vytváří nůž ve vychýleném smýkadle a jeho ostří v čelní rovině kola profil základního hřebene, jež je uvedeno na **obr. 2.2-1** úhlem α_ξ . Bok zubu kola je při pracovním zdvihu smýkadla obrážky utvářen pravým ostřím S_p a levým ostřím S_l zubu hřebenového nože. Směr zdvihu smýkadla v rovině x_0 - z_0 je určen vektorem $\bar{H} = \sin \beta_0 \cdot \bar{i} + \cos \beta_0 \cdot \bar{k}$. Přímkou pravého (G_p) a levého (G_l) boku základního profilu jsou nahrazeny vektory:

$\bar{G}_p = \sin \alpha_\xi \cdot \bar{i} + \cos \alpha_\xi \cdot \bar{j}$ a $\bar{G}_l = -\sin \alpha_\xi \cdot \bar{i} + \cos \alpha_\xi \cdot \bar{j}$, zdvih H a přímka G_p utváří pravou boční plochu zubu kola, podobně jako zdvih H a přímka G_l levou boční plochu zubu kola.



Na **obr. 2.2-8** je perspektivně znázorněn souřadný systém x_0 - y_0 - z_0 . Základní profil G_p a G_l leží v rovině x_0 - y_0 a svírá s osou y_0 úhel α_χ . Kmitající smýkadlo leží v rovině x_0 - z_0 a svírá s osou z_0 úhel β_0 . Základní profil, definovaný vektory $\vec{G}_p$, příp. $\vec{G}_l$ a směr pohybu smýkadla $\vec{H}$ tvoří rovinu, jejíž normála se určí vektorovým součinem $\vec{G}_p \times \vec{H}$, resp. $\vec{G}_l \times \vec{H}$. Ostří nože S_p a S_l jsou v systému x_0 - y_0 - z_0 určeny směrovými kosiny p_0, q_0, r_0 . Smíšený součin vektorů je pak roven nule:

Obr. 2.2-8 Souřadný systém 0 $(p_0 \cdot \vec{i} + q_0 \cdot \vec{j} + r_0 \cdot \vec{k}) \bullet (\vec{G}_p \times \vec{H}) = 0$. (2.21)

Vynásobením dostaneme důležitou rovnici, která určuje souvislost mezi úhlem sklonu šroubovice zubu kola β_0 , polohou ostří nože (p_0, q_0, r_0) při ustavení na obrážece a úhlem profilu základního hřebene v čelní rovině kola.

Pro pravý bok zubový bude platit:

$$\begin{vmatrix} p_0 & q_0 & r_0 \\ \sin \alpha_\chi & \cos \alpha_\chi & 0 \\ \sin \beta_0 & 0 & \cos \beta_0 \end{vmatrix} = 0, \quad (2.22)$$

odtud

$$p_0 \cdot \cos \alpha_\chi \cdot \cos \beta_0 - r_0 \cdot \sin \beta_0 \cdot \cos \alpha_\chi - q_0 \cdot \sin \alpha_\chi \cdot \cos \beta_0 = 0 \quad (2.23)$$

$$\cos \alpha_\chi (p_0 \cdot \cos \beta_0 - r_0 \cdot \sin \beta_0) = q_0 \cdot \sin \alpha_\chi \cdot \cos \beta_0 / \frac{1}{\cos \alpha_\chi \cdot \cos \beta_0}$$

$$\tan \alpha_\chi = \frac{p_0 - r_0 \cdot \tan \beta_0}{q_0}$$

a pro levý bok zubový:

$$\begin{vmatrix} p_0 & q_0 & r_0 \\ -\sin \alpha_\chi & \cos \alpha_\chi & 0 \\ \sin \beta_0 & 0 & \cos \beta_0 \end{vmatrix} = 0, \quad (2.24)$$

odtud

$$p_0 \cdot \cos \alpha_\chi \cdot \cos \beta_0 - r_0 \cdot \sin \beta_0 \cdot \cos \alpha_\chi + q_0 \cdot \sin \alpha_\chi \cdot \cos \beta_0 = 0 \quad (2.26)$$

$$\cos \alpha_\chi (p_0 \cdot \cos \beta_0 - r_0 \cdot \sin \beta_0) = -q_0 \cdot \sin \alpha_\chi \cdot \cos \beta_0 / \frac{1}{\cos \alpha_\chi \cdot \cos \beta_0}$$

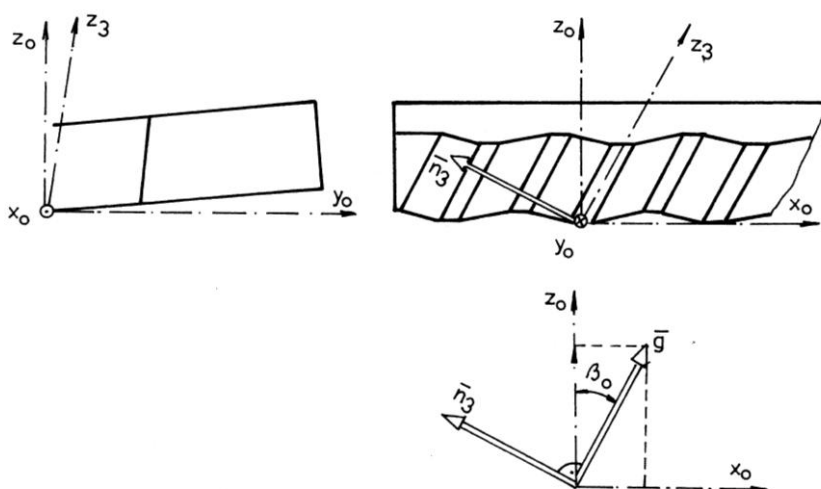
$$\tan \alpha_\chi = -\frac{p_0 - r_0 \cdot \tan \beta_0}{q_0}$$

Spojením obou vztahů v jeden dostaneme rovnici **III**, u které horní znaménko přísluší opět pravé a dolní levé hraně zubu hřebenového nože.

$$\tan \alpha_{\xi} = \pm \frac{p_0 - r_0 \cdot \tan \beta_0}{q_0} \quad (2.27) \text{ III}$$

2.2.6 Výpočet úhlu sklonu hřbetu zubu k seřízení brousící kolébky

Úhel hřbetu α_{23} není volitelný, je závislý na úhlu β_0 a na úhlech α_{07} a α_{17} . Jak je vidět na **obr. 2.2-9**, průmět zubu hřebenového nože do roviny x_0 - z_0 musí být odkloněn od osy z_0 pod úhlem β_0 .



Obr. 2.2-9 Určení úhlu sklonu zubu pro nastavení nože na broucích zařízení

Osa y_0 s osou z_3 vytváří rovinu, jejíž normálu určíme ze vztahu $\bar{n}_3 = \bar{y}_0 \times \bar{z}_3$. Směr osy z_3 v souřadném systému 0 obdržíme se součinu matic:

$$M_{30} = M_{32} \cdot M_{21} \cdot M_{17} \cdot M_{70} \quad (2.28)$$

Tento součin řešíme postupně:

$$\begin{aligned} M_{31} &= \begin{pmatrix} \cos \alpha_{23} & 0 & -\sin \alpha_{23} \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \alpha_{23} & 0 & \cos \alpha_{23} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha_{12} & -\sin \alpha_{12} \\ 0 & \sin \alpha_{12} & \cos \alpha_{12} \end{pmatrix} = \\ &= \begin{pmatrix} \cos \alpha_{23} & -\sin \alpha_{23} \cdot \sin \alpha_{12} & -\sin \alpha_{23} \cdot \cos \alpha_{12} \\ 0 & \cos \alpha_{12} & -\sin \alpha_{12} \\ \sin \alpha_{23} & \sin \alpha_{12} \cdot \cos \alpha_{23} & \cos \alpha_{12} \cdot \cos \alpha_{23} \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (2.29)$$

$$M_{37} = M_{31} \cdot M_{17} = M_{31} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha_{17} & \sin \alpha_{17} \\ 0 & -\sin \alpha_{17} & \cos \alpha_{17} \end{pmatrix} \text{ a konečně } M_{30} = M_{37} \cdot M_{70} =$$

$$= M_{37} \cdot \begin{pmatrix} \cos \alpha_{07} & 0 & -\sin \alpha_{07} \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \alpha_{07} & 0 & \cos \alpha_{07} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x & x & x \\ x & x & x \\ A_3 & B_3 & C_3 \end{pmatrix}.$$
 Jelikož nás zajímá pouze třetí řádek (z_3), můžeme celou matici zjednodušit zavedením substitučních výrazů, které po rozepsání budou mít následující tvar:

$$\begin{aligned} A_3 &= \sin \alpha_{23} \cdot \cos \alpha_{07} + \sin \alpha_{07} \cdot \cos \alpha_{23} \cdot \cos(\alpha_{12} - \alpha_{17}) \\ B_3 &= \cos \alpha_{23} \cdot \sin(\alpha_{12} - \alpha_{17}) \\ C_3 &= \cos \alpha_{07} \cdot \cos \alpha_{23} \cdot \cos(\alpha_{12} - \alpha_{17}) - \sin \alpha_{07} \cdot \sin \alpha_{23} \end{aligned} \quad (2.30)$$

Normálu dostaneme z vektorového součinu:

$$\bar{n}_3 = \bar{y}_0 \times \bar{z}_3 = \begin{vmatrix} \bar{i} & \bar{j} & \bar{k} \\ 0 & 1 & 0 \\ A_3 & B_3 & C_3 \end{vmatrix} = C_3 \cdot \bar{i} - A_3 \cdot \bar{k}. \quad (2.31)$$

Rovina y_0 - z_3 proniká rovinou smýkadla pod úhlem β_0 , což se dá dle **obr. 2.2-9** vyjádřit vektorově: $\bar{g} = \sin \beta_0 \cdot \bar{i} + \cos \beta_0 \cdot \bar{k}$. Klíčem ke stanovení hledaného úhlu sklonu hřbetu nože je skalární součin obou vektorů $\bar{n}_3 \cdot \bar{g} = 0$. Dosazením do tohoto vztahu bude:

$$C_3 \cdot \sin \beta_0 = A_3 \cdot \cos \beta_0 \quad (2.32)$$

$$\frac{\sin \beta_0}{\cos \beta_0} = \frac{A_3}{C_3} = \tan \beta_0$$

dosazením substitučních vztahů a úpravou dostáváme:

$$\tan \beta_0 = \frac{\sin \alpha_{23} \cdot \cos \alpha_{07} + \sin \alpha_{07} \cdot \cos \alpha_{23} \cdot \cos(\alpha_{12} - \alpha_{17})}{\cos \alpha_{07} \cdot \cos \alpha_{23} \cdot \cos(\alpha_{12} - \alpha_{17}) - \sin \alpha_{07} \cdot \sin \alpha_{23}}$$

$$\tan \beta_0 = \frac{\tan \alpha_{23} + \tan \alpha_{07} \cdot \cos(\alpha_{12} - \alpha_{17})}{\cos(\alpha_{12} - \alpha_{17}) - \tan \alpha_{07} \cdot \tan \alpha_{23}}$$

$$\tan \alpha_{23} = \frac{\cos(\alpha_{12} - \alpha_{17}) \cdot (\tan \beta_0 - \tan \alpha_{07})}{1 + \tan \beta_0 \cdot \tan \alpha_{07}}$$

odkud s použitím známého výrazu:

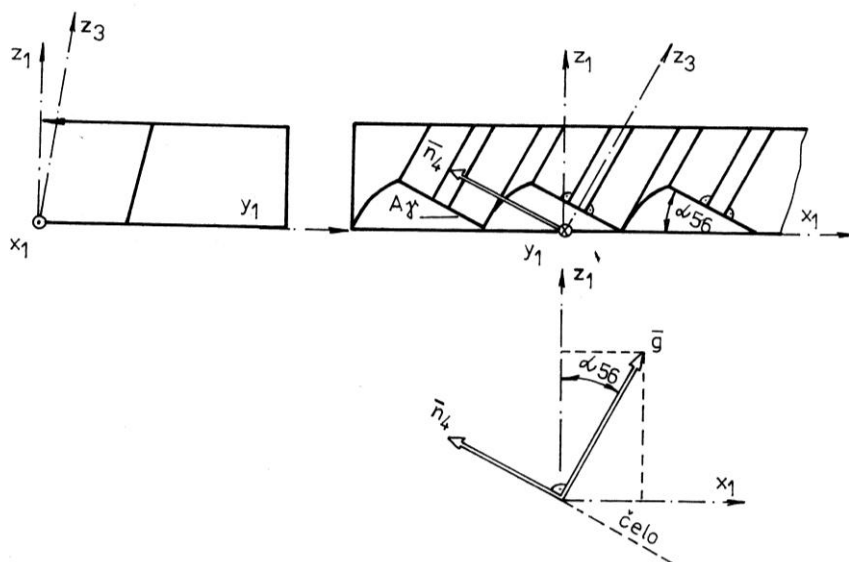
$$\tan(x \pm t) = \frac{\tan x \pm \tan t}{1 \mp \tan x \cdot \tan t}$$

obdržíme výsledný vztah

$$\tan \alpha_{23} = \cos(\alpha_{12} - \alpha_{17}) \cdot \tan(\beta_0 - \alpha_{07}) = \cos \alpha_{27} \cdot \tan(\beta_0 - \alpha_{07}). \quad (2.33)$$

2.2.7 Úhel čela nože v jeho normálové rovině

Při volbě nastavení brousícího kotouče k broušení čela zubu nože nejsme vázáni na obráběné ozubení, jak tomu bylo v předchozím případě u úhlu. Nůž se snadno brousí, když je úhel $\alpha_{15} = 0$. Čelo je pak otočeno od základní roviny jen o úhel α_{56} . Tento úhel je možno volit libovolně dle možností použitého brousícího zařízení. Zvolíme-li ale úhel α_{56} tak, aby čelo nože bylo kolmé na zešíkmený zub, vyrovnají se úhly ostří na levém a pravém boku zubu nože, **obr. 2.2-10**.



Obr. 2.2-10 Výpočet úhlu α_{56} při realizace čela kolmého na skloněný zub

Při výpočtu tohoto úhlu budeme postupovat obdobně jako v předchozím případě. Osy z_3 a y_1 tvoří rovinu, jejíž normála se určí ze vztahu $\bar{n}_4 = \bar{y}_1 \times \bar{z}_3$. Osu z_3 v systému 1 určíme z matice $M_{31} = M_{32} \cdot M_{21}$

$$M_{31} = \begin{pmatrix} \cos \alpha_{23} & 0 & -\sin \alpha_{23} \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \alpha_{23} & 0 & \cos \alpha_{23} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha_{12} & -\sin \alpha_{12} \\ 0 & \sin \alpha_{12} & \cos \alpha_{12} \end{pmatrix} =$$

$$= \begin{pmatrix} \cos \alpha_{23} & -\sin \alpha_{23} \cdot \sin \alpha_{12} & -\sin \alpha_{23} \cdot \cos \alpha_{12} \\ 0 & \cos \alpha_{12} & -\sin \alpha_{12} \\ \sin \alpha_{23} & \cos \alpha_{23} \cdot \sin \alpha_{12} & \cos \alpha_{12} \cdot \cos \alpha_{23} \end{pmatrix}. \quad (2.34)$$

Odtud $z_3 = \sin \alpha_{23} \cdot x_1 + \cos \alpha_{23} \cdot \sin \alpha_{12} \cdot y_1 + \cos \alpha_{12} \cdot \cos \alpha_{23} \cdot z_1$.

$$\text{Normála } \bar{n}_4 = \bar{y}_1 \times \bar{z}_3 = \begin{vmatrix} \bar{i} & \bar{j} & \bar{k} \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \alpha_{23} & \cos \alpha_{23} \cdot \sin \alpha_{12} & \cos \alpha_{12} \cdot \cos \alpha_{23} \end{vmatrix} =$$

$$= \cos \alpha_{12} \cdot \cos \alpha_{23} \cdot \bar{i} - \sin \alpha_{23} \cdot \bar{k} \quad (2.35)$$

Rovina y_1 - z_3 protíná rovinu y_1 - z_1 v průsečnici označené vektorem $\bar{g} = \sin \alpha_{56} \cdot \bar{i} + \cos \alpha_{56} \cdot \bar{k}$. Osa z_1 a vektor $\bar{g}$ svírají úhel α_{56} . Použijeme-li opět skalárního součinu $\bar{n}_4 \cdot \bar{g} = 0$, dostaneme:

$$(\cos \alpha_{12} \cdot \cos \alpha_{23} \cdot \bar{i} - \sin \alpha_{23} \cdot \bar{k}) \bullet (\sin \alpha_{56} \cdot \bar{i} + \cos \alpha_{56} \cdot \bar{k}) = 0 \quad (2.36)$$

a vynásobením získáme:

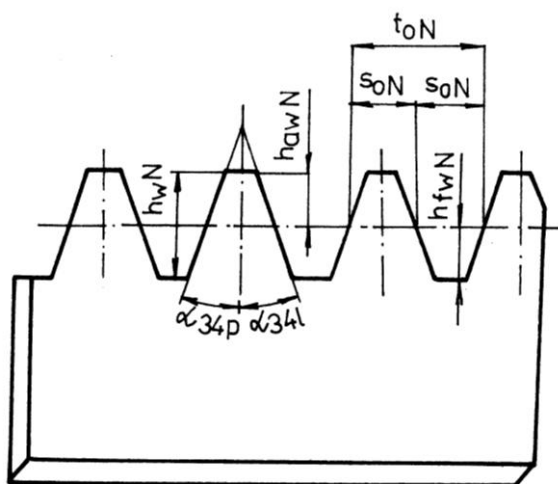
$$\sin \alpha_{56} \cdot \cos \alpha_{12} \cdot \cos \alpha_{23} - \sin \alpha_{23} \cdot \cos \alpha_{56} = 0 \quad (2.37)$$

Matematickou úpravou dosáhneme výsledného vztahu (2.38)

$$\tan \alpha_{56} = \frac{\tan \alpha_{23}}{\cos \alpha_{12}} = \frac{\tan \alpha_{27} \cdot \tan(\beta_0 - \alpha_{07})}{\cos \alpha_{12}}$$

2.2.8 Úhly hrany zubu v normálové rovině nože

Ze všech úhlů, se kterými jsme se doposud v souvislosti s výrobou čelních ozubených kol se šikmými zuby seznámili, zůstává jediný, který dosud nebyl definován ani jako úhel, který při výrobě zadáváme, jako jsou úhly α_{12} , α_{17} , α_{15} , α_{07} , ani jako úhly, které na základě zadaných hodnot vypočteme - α_{23} a α_{56} . Tímto úhlem je úhel hrany zubu v normálové rovině nože α_{34} viz **obr. 2.2-11**, který se bude lišit svou polohou na pravém a levém boku zubu nože.



Obr. 2.2-11 Pohled do normálové (výrobní) roviny hřebenového obrážecího nože

Jeho velikost určíme řešením soustav rovnic **I**, **II** a dosazením do rovnice **III**. Výpočet provedeme nejprve pro pravou hranu nože, poté pro levou a závěrem vypočtené hodnoty nesumarizujeme. Pro přehlednost výpočtu uvádím pouze výchozí a konečné tvary rovnic. Studenti si mohou jednotlivé kroky odvození vztahů provést samostatně a výsledné výrazy porovnat [4].

Pro pravou hranu v systému 1 platí soustava rovnic **I**:

$$p_1 = \cos \alpha_{56} [-\cos(\alpha_{12} + \alpha_{15}) \cdot \sin \alpha_{34} - \sin(\alpha_{12} + \alpha_{15}) \cdot \sin \alpha_{23} \cdot \cos \alpha_{34}]$$

$$q_1 = \sin \alpha_{56} (\sin \alpha_{12} \cdot \sin \alpha_{34} - \cos \alpha_{12} \cdot \sin \alpha_{23} \cdot \cos \alpha_{34}) - \cos \alpha_{23} \cdot \cos \alpha_{34} \cdot \cos \alpha_{15} \cdot \cos \alpha_{56} \quad \text{I}$$

$$r_1 = \sin \alpha_{56} (\sin \alpha_{12} \cdot \sin \alpha_{23} \cdot \cos \alpha_{34} + \cos \alpha_{12} \cdot \sin \alpha_{34}) - \sin \alpha_{15} \cdot \cos \alpha_{23} \cdot \cos \alpha_{34} \cdot \cos \alpha_{56}$$

Dosazením do soustavy rovnic **II** dostaneme:

$$p_0 = p_1 \cdot \cos \alpha_{07} + q_1 \cdot \sin \alpha_{17} \cdot \sin \alpha_{07} + r_1 \cdot \sin \alpha_{07} \cdot \cos \alpha_{17} = \mathbf{a} \cdot \sin \alpha_{34} + \mathbf{b} \cdot \cos \alpha_{34},$$

kde

$$\begin{aligned} \mathbf{a} &= \sin \alpha_{07} \cdot \sin \alpha_{56} \cdot \cos \alpha_{27} - \cos \alpha_{07} \cdot \cos \alpha_{56} \cdot \cos(\alpha_{12} + \alpha_{15}) \\ \mathbf{b} &= \sin \alpha_{07} \cdot \sin \alpha_{23} \cdot \sin \alpha_{56} \cdot \sin \alpha_{27} - \sin \alpha_{07} \cdot \cos \alpha_{23} \cdot \cos \alpha_{56} \cdot \sin(\alpha_{17} + \alpha_{15}) - \\ &\quad - \cos \alpha_{56} \cdot \cos \alpha_{07} \cdot \sin \alpha_{23} \cdot \sin(\alpha_{12} + \alpha_{15}) \end{aligned} \quad (2.39)$$

$$q_0 = q_1 \cdot \cos \alpha_{17} - r_1 \cdot \sin \alpha_{17} = \mathbf{c} \cdot \sin \alpha_{34} - \mathbf{d} \cdot \cos \alpha_{34}$$

kde

$$\begin{aligned} \mathbf{c} &= \sin \alpha_{56} \cdot \sin \alpha_{27} \\ \mathbf{d} &= \cos \alpha_{23} \cdot \cos \alpha_{56} \cos(\alpha_{17} + \alpha_{15}) + \sin \alpha_{23} \cdot \sin \alpha_{56} \cdot \cos \alpha_{27} \end{aligned} \quad (2.40)$$

konečně:

$$r_0 = -p_1 \cdot \sin \alpha_{07} + q_1 \cdot \sin \alpha_{17} \cdot \cos \alpha_{07} + r_1 \cdot \cos \alpha_{17} \cdot \cos \alpha_{07} = \mathbf{e} \cdot \sin \alpha_{34} + \mathbf{f} \cdot \cos \alpha_{34}$$

kde

$$\begin{aligned} \mathbf{e} &= \sin \alpha_{07} \cdot \cos \alpha_{56} \cdot \cos(\alpha_{12} + \alpha_{15}) + \cos \alpha_{07} \cdot \sin \alpha_{56} \cdot \cos \alpha_{27} \\ \mathbf{f} &= \sin \alpha_{07} \cdot \cos \alpha_{56} \cdot \sin \alpha_{23} \cdot \sin(\alpha_{12} + \alpha_{15}) + \cos \alpha_{07} \cdot \sin \alpha_{56} \cdot \sin \alpha_{23} \cdot \sin \alpha_{27} - \\ &\quad - \cos \alpha_{07} \cdot \cos \alpha_{23} \cdot \cos \alpha_{56} \cdot \sin(\alpha_{17} + \alpha_{15}). \end{aligned} \quad (2.41)$$

Dosazením těchto výrazů do rovnice **III** obdržíme:

$$\tan \alpha_{\xi} = \frac{p_0 - r_0 \cdot \tan \beta_0}{q_0} = \frac{a \cdot \sin \alpha_{34} + b \cdot \cos \alpha_{34} - \tan \beta_0 (e \cdot \sin \alpha_{34} + f \cdot \cos \alpha_{34})}{c \cdot \sin \alpha_{34} - d \cdot \cos \alpha_{34}} \quad (2.42)$$

Matematickou úpravou získáme výraz pro výpočet neznámé, tedy úhlu α_{34} :

$$\tan \alpha_{34} = \frac{b + d \cdot \tan \alpha_{\xi} - f \cdot \tan \beta_0}{c \cdot \tan \alpha_{\xi} - a + e \cdot \tan \beta_0}$$

a vzhledem k tomu, že podle (2.1) $\tan \alpha_{\xi} = \frac{\tan \alpha_n}{\cos \beta_0}$, můžeme po úpravě pro úhel α_{34} na pravé hraně zubu nože psát výsledný výraz

$$\tan \alpha_{34p} = \frac{b \cdot \cos \beta_0 + d \cdot \tan \alpha_n - f \cdot \sin \beta_0}{c \cdot \tan \alpha_n - a \cdot \cos \beta_0 + e \cdot \sin \beta_0}$$

Při zkoumání úhlu levé hrany α_{34l} vycházíme z hodnot:

$$\begin{aligned}
 p_1 &= \cos \alpha_{56} [\cos(\alpha_{12} + \alpha_{15}) \cdot \sin \alpha_{34} - \sin(\alpha_{12} + \alpha_{15}) \cdot \sin \alpha_{23} \cdot \cos \alpha_{34}] \\
 q_1 &= \sin \alpha_{56} (-\sin \alpha_{12} \cdot \sin \alpha_{34} - \cos \alpha_{12} \cdot \sin \alpha_{23} \cdot \cos \alpha_{34}) - \\
 &\quad - \cos \alpha_{23} \cdot \cos \alpha_{34} \cdot \cos \alpha_{15} \cdot \cos \alpha_{56} \\
 r_1 &= \sin \alpha_{56} (\sin \alpha_{12} \cdot \sin \alpha_{23} \cdot \cos \alpha_{34} - \cos \alpha_{12} \cdot \sin \alpha_{34}) - \\
 &\quad - \sin \alpha_{15} \cdot \cos \alpha_{23} \cdot \cos \alpha_{34} \cdot \cos \alpha_{56}
 \end{aligned} \tag{I}$$

A dosazením do rovnic soustavy **II** obdržíme výrazy za použití substitučních vztahů uvedených u pravé hrany (**a, b, c, d, e, f**) ve tvaru:

$$\begin{aligned}
 p_0 &= -\mathbf{a} \cdot \sin \alpha_{34} + \mathbf{b} \cdot \cos \alpha_{34} \\
 q_0 &= -\mathbf{c} \cdot \sin \alpha_{34} - \mathbf{d} \cdot \cos \alpha_{34} \\
 r_0 &= -\mathbf{e} \cdot \sin \alpha_{34} + \mathbf{f} \cdot \cos \alpha_{34}
 \end{aligned} \tag{2.44}$$

Tyto výrazy pak dosadíme do rovnice **III** pro levý bok zubu

$$\tan \alpha_{\xi} = -\frac{p_0 - r_0 \cdot \tan \beta_0}{q_0}$$

a dostaneme:

$$\tan \alpha_{\xi} = -\frac{-\mathbf{a} \cdot \sin \alpha_{34} + \mathbf{b} \cdot \cos \alpha_{34} - \tan \beta_0 (-\mathbf{e} \cdot \sin \alpha_{34} + \mathbf{f} \cdot \cos \alpha_{34})}{-\mathbf{c} \cdot \sin \alpha_{34} - \mathbf{d} \cdot \cos \alpha_{34}} \tag{2.45}$$

Matematickou úpravou získáme výraz pro výpočet požadované neznámé, tedy úhlu α_{34l} :

$$\tan \alpha_{34l} = \frac{\mathbf{b} - \mathbf{d} \cdot \tan \alpha_{\xi} - \mathbf{f} \cdot \tan \beta_0}{\mathbf{c} \cdot \tan \alpha_{\xi} + \mathbf{a} - \mathbf{e} \cdot \tan \beta_0}$$

Shrňme-li tyto úvahy do jednoho vztahu, můžeme rovnice psát ve tvaru:

$$\begin{aligned}
 p_0 &= \pm \mathbf{a} \cdot \sin \alpha_{34} + \mathbf{b} \cdot \cos \alpha_{34} \\
 q_0 &= \pm \mathbf{c} \cdot \sin \alpha_{34} - \mathbf{d} \cdot \cos \alpha_{34} \\
 r_0 &= \pm \mathbf{e} \cdot \sin \alpha_{34} + \mathbf{f} \cdot \cos \alpha_{34}
 \end{aligned}$$

úhel hrany zubu v normálovém řezu pak bude: (2.46)

$$\tan \alpha_{34p/l} = \frac{\mathbf{b} \cdot \cos \beta_0 \pm \mathbf{d} \cdot \tan \alpha_n - \mathbf{f} \cdot \sin \beta_0}{\mathbf{c} \cdot \tan \alpha_n \mp \mathbf{a} \cdot \cos \beta_0 \pm \mathbf{e} \cdot \sin \beta_0}$$

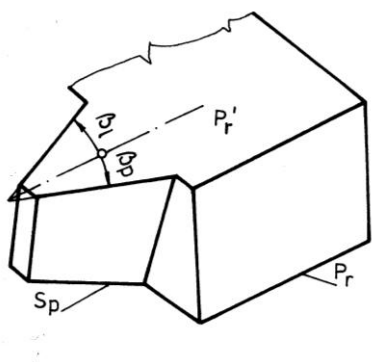
Výrazy typu $\pm$ a $\mp$ znamenají, že horní znaménko přísluší pravé a dolní levé hraně zubu nože. Substituční vztahy **a-f** jsou u obou hran vyjádřeny stejně a jsou uvedeny v (2.39) až (2.41).

2.2.9 Úhly hrany zubu v ustavovací rovině nože P_r

Šikmost hrany zubu hřebenového nože se měří při výrobě nejjednodušší v základní rovině nože P_r , jak je znázorněno na **obr. 2.2-12**. Měřené hrany jsou stopami rovin hřbetů s rovinou x_1-y_1 . Normálami k hřbetním plochám A_{ap} a A_{al} jsou osy x_4 z **kapitoly 2.2.1**.

$x_4 = \bar{n}_1 = \begin{cases} n_{1x} \\ n_{1y} \\ n_{1z} \end{cases}$, kde jednotlivé souřadnice normál budou mít v duchu předchozí znaménkové konvence tvar:

$$\begin{aligned} n_{1x} &= \cos \alpha_{23} \cdot \cos \alpha_{34} \\ n_{1y} &= \mp \cos \alpha_{12} \cdot \sin \alpha_{34} - \sin \alpha_{12} \cdot \sin \alpha_{23} \cdot \cos \alpha_{34} \\ n_{1z} &= \pm \sin \alpha_{12} \cdot \sin \alpha_{34} - \cos \alpha_{12} \cdot \sin \alpha_{23} \cdot \cos \alpha_{34} . \end{aligned} \quad (2.47)$$



Normála k základní rovině P_r :

$$\bar{n}_2 = \begin{cases} n_{2x} = 0 \\ n_{2y} = 0 \\ n_{2z} = 0 \end{cases} \quad (2.48)$$

Stopy uvedených rovin, vektory $\bar{n}_1$ a $\bar{n}_2$ určují hrany na levé β_l a na pravé β_p straně. S pomocí

$$\text{determinantu } \begin{vmatrix} p & q & r \\ n_{1x} & n_{1y} & n_{1z} \\ n_{2x} & n_{2y} & n_{2z} \end{vmatrix}$$

Obr.2.2-12 Úhly hran v základní rovině P_r

vyčíslením podle prvního řádku určíme potřebné úhly hran v základní rovině.

$$\tan \beta_{p/l} = \frac{p}{q} = \frac{n_{1y} \cdot n_{2z} - n_{2y} \cdot n_{1z}}{n_{2x} \cdot n_{1z} - n_{1x} \cdot n_{2z}} = -\frac{n_{1y}}{n_{1x}}$$

Po úpravách

$$\tan \beta_{p/l} = \pm \frac{\cos \alpha_{12} \cdot \sin \alpha_{34} + \sin \alpha_{12} \cdot \sin \alpha_{23} \cdot \cos \alpha_{34}}{\cos \alpha_{23} \cdot \cos \alpha_{34}}$$

$$\tan \beta_{p/l} = \pm \frac{\cos \alpha_{12}}{\cos \alpha_{23}} \cdot \tan \alpha_{34} + \sin \alpha_{12} \cdot \tan \alpha_{23}$$

dostáváme vztah pro pravý bok zubu: (2.49)

$$\tan \beta_p = \sin \alpha_{12} \cdot \tan \alpha_{23} + \frac{\cos \alpha_{12}}{\cos \alpha_{23}} \cdot \tan \alpha_{34}$$

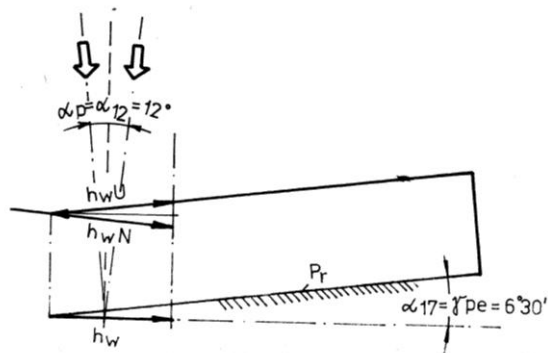
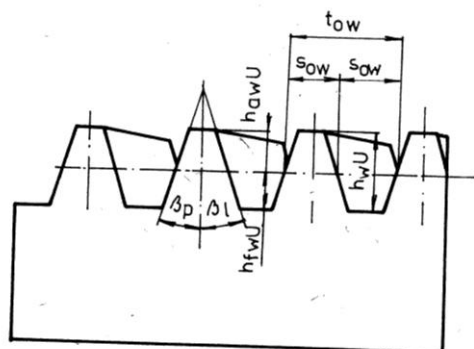
a pro levý bok zubu hřebenového nože (2.50)

$$\tan \beta_l = \sin \alpha_{12} \cdot \tan \alpha_{23} - \frac{\cos \alpha_{12}}{\cos \alpha_{23}} \cdot \tan \alpha_{34}$$

2.2.10 Výšky zubu a zubové rozteče

Pro výrobu hřebenových obráběcích nožů je nutná znalost jednotlivých výšek zubu a zubových roztečů. Na **obr. 2.2-13** jsou vyznačeny jednotlivé výšky zubu a rozteč v základní rovině x_1-y_1 . Na **obr. 2.2-11** jsou obdobné hodnoty v rovině normálové.

Vycházíme z hodnot v čelní rovině kola.



Výška hlavy zubu:

$$h_{aw} = \frac{m_n}{\cos \beta_0} + 0,25 \cdot m \quad (2.51)$$

a výška zubu

$$h_w = 2 \cdot \frac{m_n}{\cos \beta_0} + 0,25 \cdot m + c_f \quad (2.52)$$

kdy hodnotu c_f volíme s ohledem na velikost m_n . Někdy je ve výpočtu možno zanedbat úhel β_0 .

Jednotlivé výšky v rovině základní P_r budou: (2.53) a (2.54)

$$h_{awU} = \frac{h_{aw}}{\cos \alpha_{17}} \quad a \quad h_{wU} = \frac{h_w}{\cos \alpha_{17}}$$

a v normálové rovině nože: (2.55) a (2.56)

$$h_{awN} = \frac{h_{aw}}{\cos \alpha_{17}} \cdot \cos \alpha_{12}$$

$$h_{wN} = \frac{h_w}{\cos \alpha_{17}} \cdot \cos \alpha_{12}$$

Obr. 2.2-13 Pohled do základní roviny hřebenového nože

Rozteč v základní rovině P_r (x_1-y_1): (2.57)

$$t_{ow} = 2 \cdot \frac{\pi \cdot m_n}{4 \cdot \tan \alpha_n} \cdot \frac{1}{\cos \alpha_{17}} \cdot (\tan |\beta_p| + \tan |\beta_l|)$$

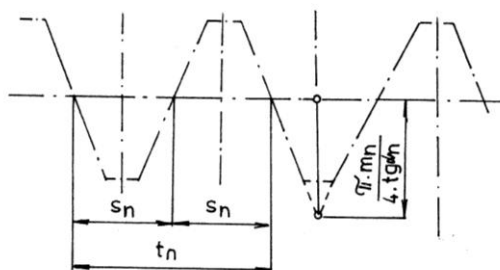
a rozteč v normálové rovině: (2.58)

$$t_{oN} = 2 \cdot \frac{\pi \cdot m_n}{4 \cdot \tan \alpha_n} \cdot \frac{\cos \alpha_{12}}{\cos \alpha_{17}} \cdot (\tan \alpha_{34p} + \tan \alpha_{34l})$$

kde výraz

$$\frac{\pi \cdot m_n}{4 \cdot \tan \alpha_n}$$

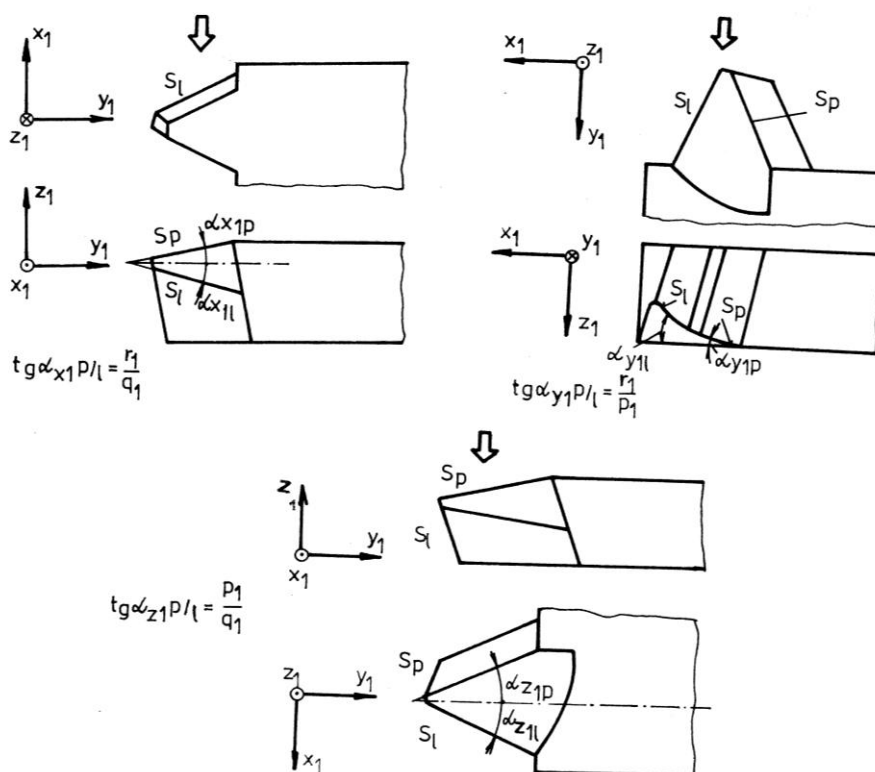
vyplývá z **obr. 2.2-14**.



Obr. 2.2-14 Základní profil hřebene pro určení jeho roztečí

2.3 Přímé měření ostří na zubu hřebenového nože

Přímé měření ostří nože pod dílenským mikroskopem patří mezi nejpřesnější metodu kontroly. Ostří zaměříme nitkovým křížem mikroskopu a úhly pak proměříme ve vztahu k souřadnému systému 1, tedy x_1 - y_1 - z_1 . Na **obr. 2.3-1** jsou znázorněny úhly ostří ve vztahu k jednotlivým rovinám. K úhlům jsou přiřazeny indexy, které souvisí s příslušnou souřadnou osou. Například úhly α_{x1p} a α_{x1l} jsou kontrolní úhly pro pravé a levé ostří při pohledu ve směru x_1 , tedy kolmo na y_1 - z_1 .



Obr. 2.3-1 Úhly ostří pro kontrolu hřebenového nože

Prakticky se vyžaduje kontrola jen dvou úhlů, třetí se získá výpočtem z obou naměřených. Při jeho dodatečném měření nám poslouží naměřené hodnoty k prověření přesnosti měření. Platí vztahy:

$$\tan \alpha_x = \tan \alpha_y \cdot \tan \alpha_z, \quad \tan \alpha_y = \frac{\tan \alpha_x}{\tan \alpha_z} \quad a \quad \tan \alpha_z = \frac{\tan \alpha_x}{\tan \alpha_y}$$



Shrnutí pojmů

V předchozím textu byl uveden princip výpočtu konstrukčních a výrobních parametrů obrážecích hřebenových nožů.

V rovnicích jsou obsaženy všechny úhly, které jsou potřebné k výrobě (včetně broušení) i kontrole hřebenového nože. Úhly α_{12} , α_{17} a α_{27} volíme podle technologických podmínek obrábění. Podle ČSN 220011 úhel α_{12} odpovídá nástrojovému úhlu hřbetu α_{ap} na hlavě zubu hřebenového nože, úhel α_{17} představuje pracovní zadní úhel čela γ_{pe} a úhel α_{27} je pracovním zadním úhlem hřbetu úhlem α_{ape} na hlavě zubu nože.

Výpočet byl veden tak, aby mohl být výchozím bodem pro počítačové zpracování. Úvahy, uvedené v této kapitole, lze aplikovat při výpočtu profilu hřebenového nože pro výrobu kol se šikmými i přímými zuby libovolných parametrů.



Kontrolní otázky

1. Jaké jsou výhody použití hřebenových obrážecích nožů?
2. Jaké jsou nevýhody použití hřebenových obrážecích nožů?
3. Kdy použijeme obrážecích hřebenových nožů se šikmými zuby a proč?
4. Které úhly ovlivňují výpočet profilu obrážecího hřebenového nože? Popište, vysvětlete a nakreslete.
5. Které z těchto úhlů můžete při konstrukci obrážecího hřebenového nože volit a které musíte vypočítat?
6. Ve které rovině je nejdůležitější znalost profilu (výrobní rovina) pro výrobu hřebenového obrážecího nože?
7. Jak provádíme ostření obrážecího hřebenového nože?



Úlohy k řešení

1. Vypočítejte profily hřebenového obrážecího nože Maag, ($\alpha_{12}=12^\circ$, $\alpha_{17}=6^\circ30'$) pro výrobu ozubení s parametry: $m_n=2,5$, $\alpha_n=20^\circ$, $\beta_0=25^\circ30'$ a nakreslete výkres nástroje.
2. Vypočítejte profily hřebenového obrážecího nože Maag, ($\alpha_{12}=12^\circ$, $\alpha_{17}=6^\circ30'$) pro výrobu ozubení s parametry: $m_n=3$, $\alpha_n=20^\circ$, $\beta_0=30^\circ52'12''$ a nakreslete výkres nástroje.
3. Vypočítejte profily hřebenového obrážecího nože Maag, ($\alpha_{12}=12^\circ$, $\alpha_{17}=6^\circ30'$) pro výrobu ozubení s parametry: $m_n=4$, $\alpha_n=20^\circ$, $\beta_0=21^\circ$ a nakreslete výkres nástroje.
4. Vypočítejte profily hřebenového obrážecího nože Maag, ($\alpha_{12}=12^\circ$, $\alpha_{17}=6^\circ30'$) pro výrobu ozubení s parametry: $m_n=5$, $\alpha_n=20^\circ$, $\beta_0=10^\circ$ a nakreslete výkres nástroje.

3 ODVALOVACÍ FRÉZOVÁNÍ

Odvalovací frézování je už více než 100 let nejproduktivnější metodou pro výrobu ozubených kol. Jako všechny ostatní metody frézování se vyznačuje přerušovaným řezem během otáčení nástroje a nerovnoměrnou tloušťkou třísky podél záběru. Přerušovaná tvorba třísky ve srovnání s proměnlivou řeznou geometrií podél ostří během vytváření zubové mezery odlišuje odvalovací frézování od ostatní frézovacích metod a dělá ji komplikovanější.



Čas ke studiu: 12 hodin



Cíl: Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- Popsat metodu výroby ozubení ozubených kol s využitím odvalovací frézy obrázcího nože z hlediska kinematiky a popsat obráběcí stroje využívané touto metodou.
- Charakterizovat odvalovací frézu z hlediska její konstrukce, použitého nástrojového materiálu, geometrie i parametrů opotřebení.
- Vypočítat konstrukční parametry odvalovací frézy a konfrontovat je s výsledky dosaženými při využití výpočetního programu NNEON.



Výklad

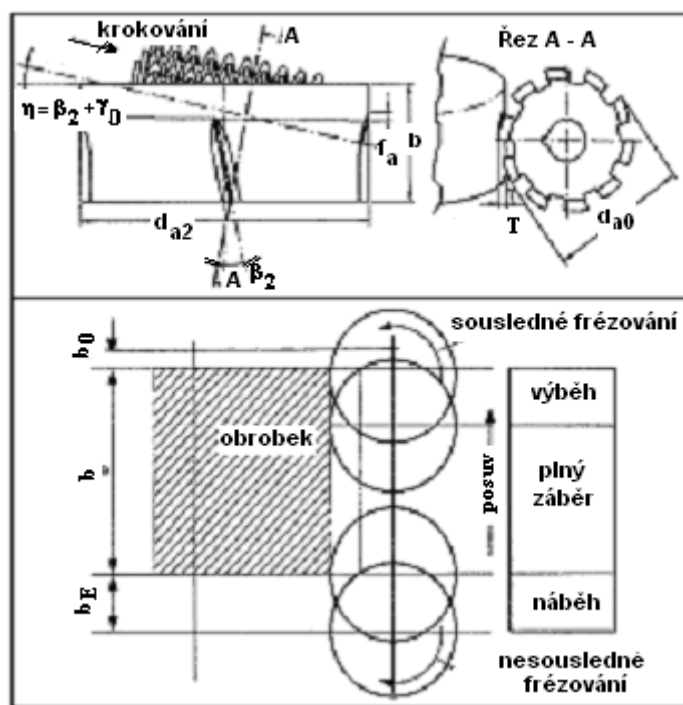
3.1 Charakteristika metody

Odvalovací frézování může sloužit jako metoda obrábění pro:

- následné operace jako ševingování, broušení nebo honování ozubení,
- dokončovací obrábění velkých ozubení, která jsou např. předfrézována kotoučovou frézou,
- následné loupací odvalovací frézování.

Průběh odvalovacího frézování s jeho rotačními a posuvovými pohyby stroje znázorňuje **obr. 3.1-1**. Odvalovací fréza a ozubené kolo představují soukolí tvořené šnekem a šnekovým kolem, čemuž odpovídá i jejich značení. Podélné (řezné) drážky na odvalovací fréze přerušují závit šneku a vytvářejí břity nástroje. Každý břit přímkového ostří odvalovací frézy obaluje bok zubu. Dokonalost tvaru evolventy je tedy závislá na počtu těchto obálkových řezů.

V sériové výrobě se z různých variant odvalovacího frézování používá především axiální frézování, kdy se odvalovací fréza přesouvá podél osy vyráběného kola.



Obr. 3.1-1 Princip odvalovacího frézování

Odvalovací fréza o průměru d_{a0} je vykloněna o úhel stoupání γ_0 . U ozubených kol se šikmými zuby a průměry d_{a2} musí být brán ohled i na úhel sklonu zubu β_2 . Při stejném smyslu stoupání odvalovací frézy a obrobku bude výsledný úhel natočení $\eta = \beta_2 - \gamma_0$, při opačném smyslu stoupání bude $\eta = \beta_2 + \gamma_0$. Z pohybu podél osy obrobku je odvozena jedna z nejdůležitějších veličin procesu, posuv na otáčku obrobku f_a (mm. otáčka obrobku⁻¹). Ze svého základního postavení prochází odvalovací fréza postupně oblastmi náběhu (délka b_E), plného záběru (b) a výběhu (b_0). Jednotlivé oblasti se od sebe výrazně liší s ohledem na tvorbu třísky a tím i na zatížení nástroje. U ozubených kol s malou šířkou ozubení se plného záběru často nedosáhne a vřezání nástroje do obrobku přechází rychle do oblasti výběhu nástroje z obrobku. Tato skutečnost výrazně zesiluje opotřebení na ostří nástroje.

3.2 Stroje pro odvalovací frézování

Zavedením vysoce výkonného odvalovacího frézování se výkon pohonů odvalovacích frézek téměř zdvojnásobil. Při současném ústupu procesních kapalin může být ohrožena tepelná rovnováha stroje. Jako potřebné se jeví rychlé odvedení horké třísky z místa řezu. Obnovit tepelnou stabilitu lze pomocí lišt pro vedení třísek, dopravníků třísek a částečně také dodatečným odsáváním třísek a kovového prachu. Při obrábění za sucha je možné v konečném důsledku podle řezných podmínek a geometrie obrobku součást ohřát až o 30 až 50 °C. Správná volba radiálního přísmu umožňuje snížit tuto teplem vyvolanou odchylku tloušťky a sklonu zubu.

Moderní odvalovací frézky vykazují následující znaky:

- otáčky frézy a stolu, které umožňují realizovat v současnosti řezné rychlosti do 500 m.min^{-1} , v budoucnu až 1000 m.min^{-1} ,
- rychloposuv do 10 m.min^{-1} pro dosažení krátkých vedlejších časů,
- volitelné provedení frézovacího vřetene jak pro stopkové, tak pro nástrčné frézy,
- tepelnou stabilitu i při obrábění za sucha,
- valivé vedení bez vůlí pro všechny lineární osy,
- integrovaný mazací a chladicí hydraulický systém,
- integrace stanice pro odstranění otřepů zubových hran,
- neomezená přesnost, hospodárnost a použitelnost po celou dobu nasazení.

3.2.1 Kompaktní provedení stroje

Aby se výrobní haly využily co nejvíce, snižuje se zastavěná plocha stroje a celková koncepce včetně periferií je kompaktnější. Přispívají k tomu nové pohony, nová vedení, nové elektrické, elektronické a hydraulické prvky.

Kompaktní stroj ve standardním provedení se dá realizovat ekonomicky velmi výhodně, pokud se uživatel zřekne speciálních požadavků. Do výpočtu nákladů je třeba zahrnout vedle nižší potřeby místa a podstatně nižších investičních nákladů také jednoduché a rychlé zprovoznění kompaktního stroje. Kompaktní uspořádání jednotky pro automatickou výměnu obrobku umožňuje zvýšit produktivitu jak jednotlivého stroje, tak její integraci do celého výrobního systému.

3.2.2 Koncepce konstrukčních a stavebnicových řad strojů

Konstrukční řady odvalovacích frézek lze rozdělit podle počtů zubů kol a jejich průměrů do čtyř oblastí:

- automobilový průmysl a elektromotory (m = 1 ... 3 mm)
- užitková motorová vozidla a pracovní vozidla všeho druhu (m = 3 ... 6 mm)
- obecná strojní a konstrukční zařízení (m = 6 ... 12 mm)
- velká ozubení v kusové nebo malosériové výrobě (m > 12 mm).

Trendem u všech výrobců strojů je stavebnicová koncepce. Univerzální použití např. lože stroje pro odvalovací frézky, obrážecíky a pro brusky na ozubení vedou ke snižování výrobních nákladů. Další výhody tohoto systému jsou [5]:

- optimalizace konstrukce všech komponentů,
- cenově výhodná sériová výroba těchto jednotek při zachované vysoké kvalitě,
- zkrácení dodacích a náběhových lhůt,
- použití praxí prověřených jednotných dílů,

- nejrychlejší zajištění náhradních dílů,
- snížení nákladů na školení obslužného a údržbářského personálu,
- rychlejší amortizace nákladů na vývoj.

3.2.3 Frézovací hlava

Technologické požadavky na řeznou rychlost a krouticí moment stanovuje pro různé metody a velikosti stroje konstrukce frézovací hlavy.

Požadavky na odvalovací frézky pro automobilový průmysl jsou dány nástrojem s malým průměrem a současně vysokou řeznou rychlostí. Z toho vyplývají požadavky na vysoké otáčky a krouticí moment vřetena. Tyto požadavky jsou plněny přímými pohony frézovacích hlav s vysokým výkonem až 22 kW a otáčkami do 9 000 za minutu, které nabízejí i v budoucnu dostatečnou rezervu pro nasazení moderních řezných nástrojů.

3.2.4 Uspořádání unášecího vřetene obrobku

Na základě spektra obrobků, které se skládá v převážné míře z obrobků ve tvaru kotouče, je dávana u unášecích vřeten přednost svislému provedení. Toto uspořádání se vyznačuje dobrou manipulací a přesností upnutí, protože, na rozdíl od horizontálního upnutí, tíhová síla napomáhá při upínání obrobku. Při obrábění dlouhých hřídelů (> 800 mm) může být dána přednost horizontálnímu umístění osy obrobku.

Otázkou další konstrukce stroje zůstává, zda nosič nástroje nebo stůl s obrobkem mají zůstat na místě nebo se pohybovat. S ohledem na pevnou předávací pozici obrobku při automatickém cyklu představuje nehybný stůl nejvhodnější řešení. Z minimálně šesti řízených os stroje připadá vždy pět na nástroj a šestá na stůl stroje **obr. 3.2-1**.

V závislosti na požadovaných otáčkách a výkonu nalézají uplatnění u stolu obrobku převody s čelními koly, šnekové převody a přímé pohony. Jen u konstrukcí stolů pro velká ozubení zůstává z ekonomických důvodů u určitých pohonů nadále šnekový pohon bez vůle.

3.2.5 Automatizace a systém nakládání a vykládání obrobků

Existuje celá řada systémů pro nakládání a vykládání součástí a stupeň jejich automatizace.

Prstencové a otočné nakladače mohou provádět úkoly související s transportem, případně s uchopením polotovarů a hotových dílů. Výměna polotovaru a hotové součásti chapadlem a jeho přesun do systému uskladnění je možné uskutečnit současně s obráběním. Předávací pozice v přední oblasti stroje je volena tak, aby došlo k bezproblémovému napojení na transportní pás. Uložení s využitím kruhového nakladače trvá necelé čtyři sekundy.

Aby se doba nakládky ještě snížila, mohou být nasazovány otočné nakládací systémy s malou oběžnou kružnicí integrované do pracovního prostoru. Externí automatizace pak musí být rovněž zavedena do pracovního prostoru. Pak jsou realizovány časy menší než dvě sekundy. Díky uspořádání systému v pracovním prostoru jsou ale především u obrábění za sucha kladeny velmi vysoké nároky na bezporuchovou funkci chapadel obrobků.

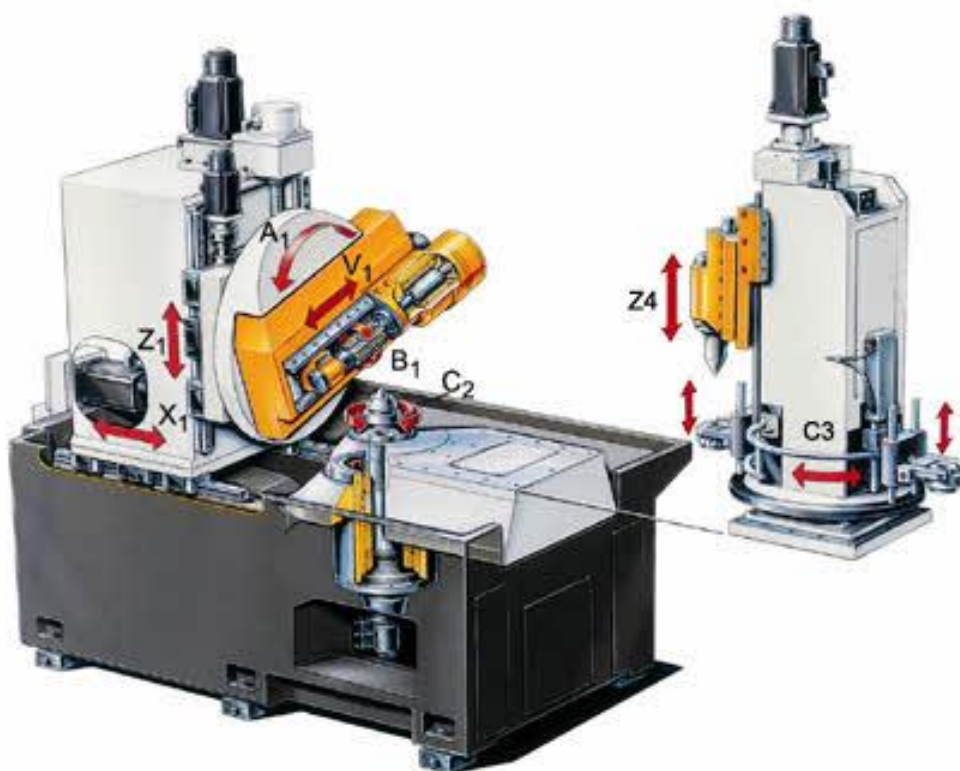
Roboty a portály mohou představovat další variantu pro automatické vkládání přímo do místa obrábění. Protože není možné ponechat úchopný systém v pracovním prostoru během obrábění, vyžaduje tato automatická manipulace s obrobkem více než sedm sekund. Systémy se ale nabízejí tam, kde jsou obrobky pro prstencový systém příliš velké nebo těžké a kdy mohou doplnit systém vkládání o dodatečné externí funkce.

Plastové řetězové pásy slouží jako zásobník obrobků. Do tohoto zásobníku mohou být integrovány doplňkové funkce jako odstředování, označování a měření.

Zásobník palet s paletovacím zařízením nabízí pro standardní nosiče obrobků rozšířenou kapacitu pro uskladnění. Podle velikosti obrobku je možné do palety umístit až 400 dílů. Stohování palet je prováděno pomocí tzv. „pásového mandlu“ a umožňuje tak obohatit stroj o další postupnou operaci. Tyto systémy se dnes uplatňují hlavně v sériové a hromadné výrobě. Nelze totiž zanedbat celkové náklady na podíl automatizace.

3.2.6 Základní konstrukce odvalovací frézky

Na **obr. 3.2-1** je znázorněna základní koncepce odvalovací frézky. Stroj využívá vysokorychlostního obrábění, které zvyšuje produktivitu práce spolu s nasazením technologie suchého obrábění. Svislá koncepce stroje umožňuje navodit výhodné podmínky pro zatížení jednotlivých částí stroje a bezpečné upnutí obrobku. Taktéž je usnadněn odvod třísek z pracovního prostoru. Hlava pro upnutí frézovacího nástroje je poháněna AC servopohonem. Při zvláště těžkém obrábění je možné přeradit mezi vřeteno a AC motor převodovku [6].



Obr. 3.2-1 Základní koncepce a kinematika odvalovací frézky

Nástroj lze přesouvat v tangenciálním směru V (stavění vůči obrobku) a naklápět A1 (šikmé ozubení). Jako upínací kužel je použit typ HSK. Pro podepření hřídelové součásti je aplikován vertikálně přemístitelný koník (Z4). Celou věž, na kterou je umístěno vedení koníku, lze použít jako nakladač (manipulátor) obrobků. Podle výšky obrobků lze celý vřeteník přesouvat po stojanu svisle (Z1) a případně přesouvat celý stojan ve směru X1. Jako vedení je užito profilové valivé vedení. Koník (manipulátor) a přesouvatelný stojan včetně vřeteníku mají společné lože, což usnadňuje manipulaci se strojem. Na stroj lze též instalovat mechanismus pro odjehlování zubů a srážení hran.

3.2.7 Kompletní obrábění

Celosvětově sledovaný trend k menším výrobním dávkám, podmíněný větším počtem variant a požadavkem zákazníků po kratších dodacích lhůtách, inicioval změnu v myšlení výrobců. Potřebné snížení výrobních nákladů díky průběžným časům už většinou nelze v současné době dosáhnout při strategii rozdělené práce. Do popředí zájmu se dostává vedle optimalizace procesu obrábění i zlepšení flexibility a rychlosti celého vyřízení zakázky. U konvenčních metod výroby vyžaduje každý stupeň obrábění transport. Každý transport a dílčí proces mají zase administrativní zdržení. Z toho důvodu jsou nutné stroje pro kompletní obrábění, jejichž cílem je provádět obrábění na jedno upnutí obrobku. To sníží časové ztráty a nepřesnosti, které vznikají při přepínání obrobku a umožní lepší kvalitu a zjednoduší vnitropodnikovou logistiku.

Jako přednosti kompletního obrábění je třeba jmenovat [7]:

- zkrácení výrobního řetězce, čímž se docílí snížení vedlejších a přípravných časů až o 50 %,
- snížení chyb, ke kterým dochází při uložení při rozdílném upínání,
- snížení zmetkovitosti a potřebných oprav,
- snížení nákladů na řízení výroby,
- snížení jednotkových nákladů při malých a středních sériích,
- snížení oběhových a skladových zásob,
- zkrácení dodacích lhůt a snazší dodržení dodacích termínů.

Pro realizaci komplexního obrábění jsou nezbytné investice do nových strojů. Vyčíslení těchto investic se liší od běžných výpočtů, neboť ty počítají pouze s investičními a provozními náklady.

3.3 Nástroje pro odvalovací frézování

3.3.1 Ekonomické předpoklady konstrukce nástroje

Náklady na nástroj jsou vedle strojních nákladů nejdůležitější položkou výrobních nákladů a představují od 8 do 12 % pro odvalovací frézy z RO a 18 až 22 % (v extrémních případech až 33 %) u nástrojů ze SK včetně povlakování. Proto je ohnisko zájmu namířeno nejprve na strojní náklady. Často se však inovace týkají jen otázek zvyšování rezných

podmínek pro dosažení stále kratších strojních časů. Spíše by se měly tyto otázky ale týkat vhodného nástroje. A zde se otevírá pole pro výzkum nástrojového materiálu, povlaků a řezné geometrie [8].

Vzorce pro výpočet času obrábění říkají, že strojní čas je nejkratší při vysokých řezných podmínkách a u vícechodých fréz malých průměrů. Větší počet chodů čas obrábění zkracuje tím, že otáčky obrobku vůči fríze a tím i posuvová rychlost musí být vyšší. Menší průměr frézy (pro stejnou řeznou rychlost se zvýší otáčky frézy) zkracuje dobu obrábění jak díky vyšší posuvové rychlosti, tak pro menší dráhu náběhu a výběhu. Pokud je vedle parametrů ozubení stálá i geometrie frézy, zůstávají řezná a posuvová rychlost jedinými volnými parametry, ovlivňujícími výrobní náklady.

S rostoucími řeznými parametry se čas obrábění snižuje a tím i na čase závislé náklady. Naproti tomu s rostoucí řeznou rychlostí narůstají i náklady na nástroj. Optimum u odvalovacího frézování leží tam, kde má celkový součet výsledných nákladů (strojních, mzdových a na nástroj) své minimum.

Opatření pro snížení časově závislých strojních nákladů:

- zvýšení řezné rychlosti a posuvu,
- zvýšení počtu chodů frézy,
- snížení času pro upnutí a uvolnění obrobku.

Opatření ke snížení nákladů na nástroje jsou:

- redukce řezné rychlosti,
- redukce posuvu,
- zvětšení počtu hřebenů a průměru frézy,
- povlakování čelní a hřbetní plochy.

Z uvedeného je jasné, že jednotlivá opatření působí proti sobě a je tedy potřebná jejich koordinace.

Ke zjištění nákladů na pořízení a úpravu nástrojů byly v rámci průzkumu zjišťovány ceny zvolených PM-RO a SK odvalovacích fréz u významných evropských výrobců nástrojů [9]. Jako základ pro porovnání byly zvoleny odvalovací frézy pro sériové nasazení, s přímými drážkami a s možností krokování až 150 mm. Vyhodnocovány byly u odvalovacích fréz pořizovací cena a náklady na přeoštění a povlakování. Závislost je možno považovat za lineární, přičemž náklady na povlakování jsou závislé na vnějším průměru frézy a přeoštění ovlivňuje hlavně počet řezných hřebenů. Průzkum potvrdil, že pro nasazení odvalovací frézy ze slinutého karbidu je třeba kalkulovat s přibližně trojnásobnou pořizovací cenou ve srovnání s odvalovací frézou z práškové rychlořezné oceli. Renovace (spočívající v přeoštění, odpovlakování a opětovného napovlakování) je u SK frézy asi o 50 procent dražší. Tyto vyšší náklady mají za následek to, že odvalovací frézy ze slinutých karbidů musí pro hospodárné obrábění vykazovat podstatně kratší časy obrábění a/nebo větší trvanlivost než nástroje z rychlořezné oceli.

3.3.2 Druhy a zásady navrhování odvalovacích fréz

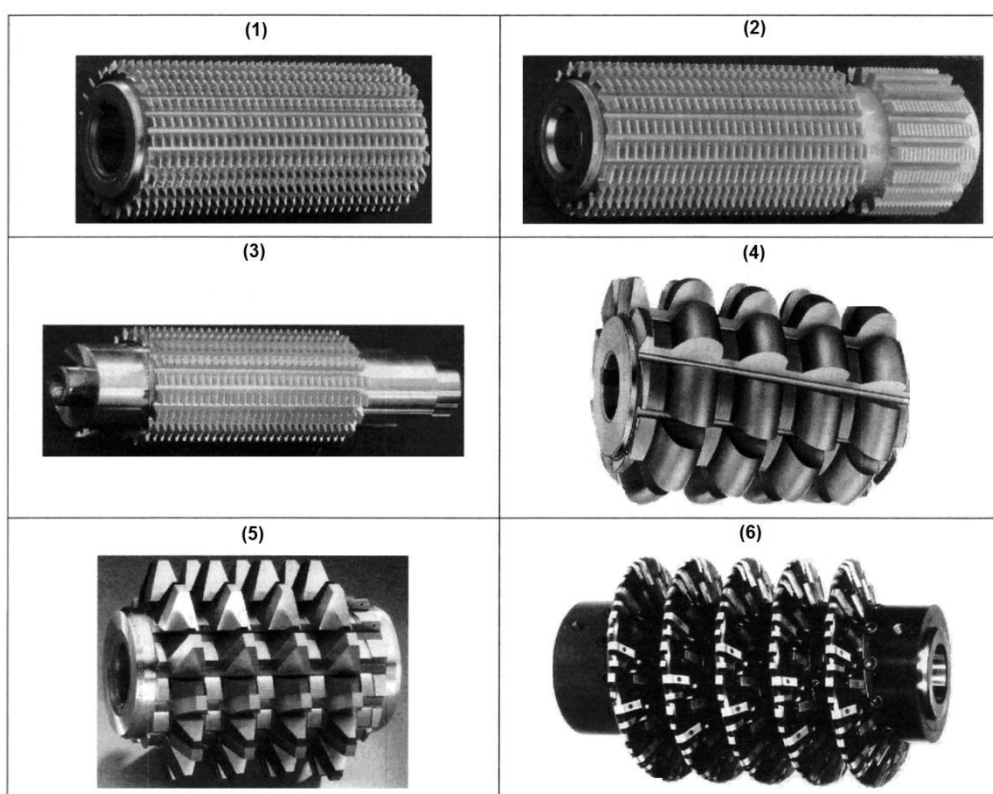
Druhy odvalovacích fréz

Podle konstrukce nástroje lze odvalovací frézy rozdělit do dvou hlavních skupin:

- monolitní odvalovací frézy a
- odvalovací frézy se vsazenými řeznými tělesy.

Posledně jmenované se dále rozdělují na:

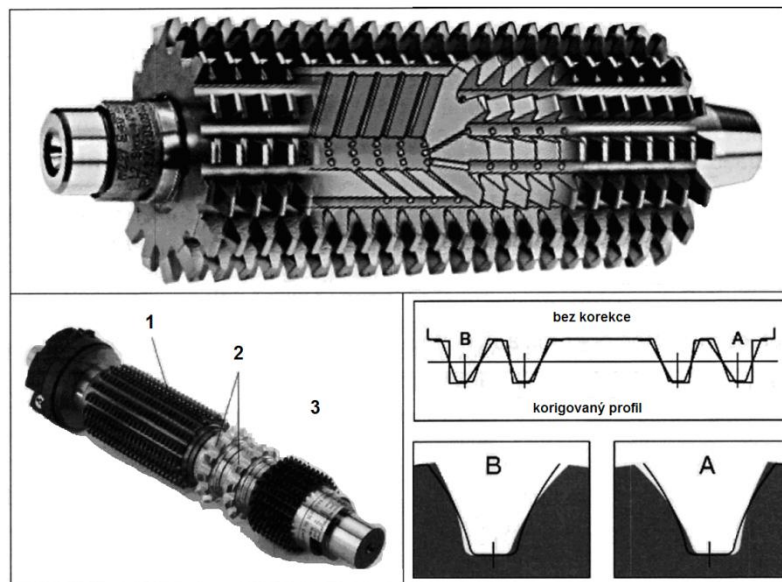
- odvalovací frézy se vsazenými hřebeny a
- odvalovací frézy s přišroubovanými nebo připájenými břitovými destičkami, viz **obr. 3.3-1**.



Obr. 3.3-1 Typy odvalovacích fréz: (1) monolitní fréza z RO, (2) tandemová fréza, (3) stopková odvalovací fréza, (4) odvalovací fréza na řetězová kola, (5) loupací odvalovací fréza s připájenými SK destičkami, (6) odvalovací fréza s našroubovanými řeznými destičkami

Dosavadní konstrukce rozšířila firma Fette o odvalovací frézy s vnitřním přívodem oleje nebo vzduchu – **obr. 3.3-2**. Pokud se použije jako procesní kapalina olej, je možné v pracovním prostoru cíleně mazat, chladit a odvádět třísky. U suchého obrábění je ve vnitřních kanálcích nástroje stlačen vzduch, aby zajistil funkci chlazení a odfuku třísek. Chlazení vzduchem může navíc minimalizovat nalepování třísky na plochy čel nástroje

a zabránit opětovnému vstupu třísek do oblasti řezu a poškození boku zubu kola. Inovace uvnitř nástroje řídí proudění vzduchu tak, aby tento vycházel pouze do pracovního prostoru, čímž stoupá efektivita při malé potřebě stlačeného vzduchu [10].



Obr. 3.3-2 Konstrukce odvalovacích fréz, (nahore) odvalovací fréza s vnitřním příívodem oleje nebo vzduchu, (dole) Triplex- frézy k předfrézování (1), sražení hran (2) a k dokončení s cíleným rozšířením na boku zubu (3)

Další inovovanou koncepci nástroje prezentovala firma Fette na EMO 2005 jako frézu Triplex – **obr. 3.3-2** dole. Na jednom trnu jsou upevněny: konvenční hrubovací odvalovací fréza, dvě frézy pro odstraňování otřepů a dokončovací odvalovací fréza. Tato kombinace zkracuje frézovací řetězec a celkový průběžný čas a zlepšuje kvalitu ozubení tím, že místo původně přerušovaného pracovního procesu na různých strojích je nyní možno vše provést na jedno upnutí [11].

Monolitní ocelové nástroje

nazývané také celistvé odvalovací frézy jsou vyráběny z polotovaru, u rychlořezné oceli do průměru 500 mm, ze slinutého karbidu do 140 mm. Od roku 1985 jsou u téměř všech provedení monolitních odvalovacích fréz aplikovány povlaky z tvrdých materiálů. Hlavní příčiny jejich aplikace jsou ve srovnání s frézami s vyměnitelnými hřebeny:

- větší počet drážek pro odvod třísky a tím lepší kvalita ozubení,
- menší zatížení ostří díky dobrému utváření třísky a tím vyšší trvanlivost.

Vysoce výkonné rychlořezné oceli se staly v posledních desetiletích homogennější a stále výkonnější díky novým postupům tavení. Kvalitativního skoku v oblasti odvalovacího frézování ale bylo dosaženo teprve povlakováním nástrojů tvrdými vrstvami na bázi TiN a vyššími počty hřebenů.

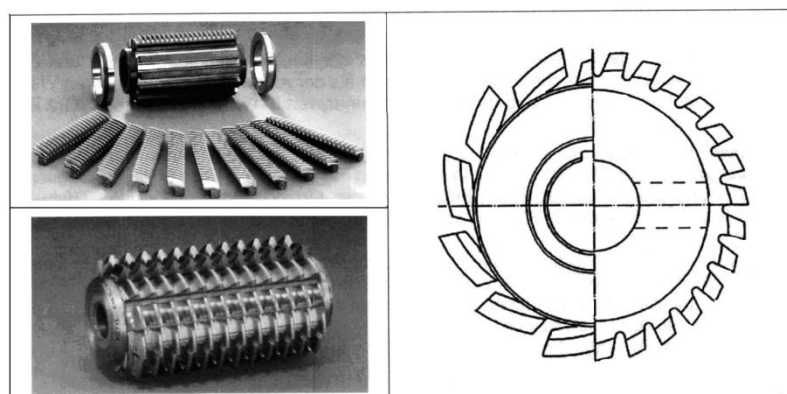
Rostoucí podíl na trhu oproti odvalovacím frézám z SK si získávají odvalovací frézy z rychlořezné oceli vyráběné práškovou metalurgií. Tato metoda umožňuje kombinovat legury, u kterých to dosud nebylo možné. Odvalovací frézy ze slinutého karbidu a z práškové rychlořezné oceli jsou na rozdíl od odvalovacích fréz z tvářených polotovarů vhodné pro obrábění za sucha.

Stále více jsou nasazovány odvalovací frézy ve stopkovém provedení, aby se zlepšila přesnost upínání a zkrátily vedlejší časy.

Odvalovací frézy s výměnnými hřebeny

mají základní těleso z konstrukčního materiálu a ozubené hřebeny z výkonného a dražšího materiálu nástrojového – **obr. 3.3-3**. Mezi zvláštní vlastnosti patří:

- velký úhel hřbetu na bocích zubů díky velkému úhlu hřbetu na hlavě,
- velká délka frézovacích zubů a tím větší počet řezů,
- větší tloušťka třísek na hlavě a vyšší posuvy díky větším hodnotám úhlů hřbetu na bocích zubů.



Obr. 3.3-3 *Odvalovací frézy se vsazenými hřebeny, (vlevo) odděleně zhotovené řezné hřebeny, základní těleso s drážkami a upínacími kroužky, (vpravo) srovnání hřebenové a monolitní odvalovací frézy*

Hřebeny jsou vlisovány do ohřátého základního tělesa opatřeného drážkami. Hřebeny jsou navíc drženy z obou stran kroužky. Vývoj hřebenových odvalovacích fréz od roku 1940 byl vyvolán úkolem ušetřit drahé a zároveň vzácné legující prvky typu wolfram a vyrábět proto základní tělesa z cenově výhodných zušlechťených ocelí. Hřebeny (většinou v počtu 12) byly kovány příp. profilově válcovány z tyčí, které měly vysoký podíl karbidů. Ve zvláštních brousicích přípravcích byly hřebeny broušeny ve sklopené poloze jako šneky brusnými kotouči o průměrech od 300 do 400 mm. Ve sklopené poloze bylo dosaženo průběžného profilu od začátku do konce délky zubu, tzn. bez sedla na hřbetě zubu. (Na rozdíl

od podbroušené monolitní odvalovací frézy, kdy vzniká neprofilovaný konec zubu i tehdy, když se použije brusný kotouč s malým průměrem).

Hřebenové frézy mají úhel hřbetu na hlavě zubu od 13 do 18°, podbroušené monolitní frézy naopak zpravidla 10 až 12°. S rostoucím úhlem hřbetu na hlavě zubu vznikají větší úhly hřbetu na bocích zubů, což příznivě ovlivňuje proces frézování a zvyšuje trvanlivost frézy. Je třeba dbát ale omezení s ohledem na počet řezných drážek, úhel stoupání a osovou rovnoběžnost.

Při opětovném povlakování mohlo dojít k uvolnění upevněných hřebenů. Tato přítěžující okolnost a obtížné čištění nástroje pro opětovné povlakování urychlily konec odvalovacích fréz s naklápěcími hřebeny.

Odvalovací frézy s vyměnitelnými destičkami

se skládají stejně jako hřebenové frézy se sklopnými hřebeny z cenově výhodného základního tělesa a vsazených břitových destiček. Velikost konstrukce se pohybuje mezi 200 až 500 mm. Oblast použití leží převážně v oblasti modulů nad 15 mm. Přišroubované destičky ze slinutých karbidů je možné až čtyřikrát použít a přitom nepřeostřovat.

Obecné navrhování odvalovací frézy

Konstrukce (návrh) odvalovací frézy vychází z [3]:

- celkové délky a délky s řeznými zuby,
- vnějšího průměru a průměru vrtání,
- počtu chodů,
- počtu hřebenů (počtu řezných drážek),
- úhlu stoupání drážek,
- úhlu hřbetu na hlavě zubu,
- základního profilu (modul, úhel záběru odpovídající profilu zubu).

Délka

Přání, aby byla fréza co nejdelší, vychází ze snahy o co největší trvanlivost. Každý propočet dokazuje, že častá výměna nástroje a ostření odvalovací frézy vyžaduje vyšší náklady než příplatek za delší frézu. Pro malosériovou výrobu jsou běžné délky do 140 mm, pro velkosériovou do 220 mm.

Vnější průměr

Průměr odvalovací frézy může být občas omezen vnějšími vlivy jako např. velikostí frézovací hlavy nebo vrtáním použitého frézovacího trnu, popř. u obrobků s nákrůžkem nebo druhým ozubením.

Potřebná výška zubu může omezit průměr frézy směrem dolů. Menší průměr frézy umožňuje na obrobku vytvořit kratší záběrové oblouky, omezuje ale maximálně možné množství řezných drážek. Rovněž je třeba dodržet maximální hodnotu úhlu stoupání na 7°

u řezných drážek rovnoběžných s osou. Vliv průměru frézy je významný především pro volbu řezných parametrů a z nich vyplývajících nákladů na obrábění.

Počet chodů

Frézovat více chody je alternativa, jak zvýšit výkonnost ve srovnání se zvýšením posuvu u jednochodých fréz. Zdvojnásobením posuvu by se zvýšil i počet stop po posuvu téměř čtyřikrát, proto by bylo vhodnější redukovat počet obálkových řezů zavedením dvouchodé frézy a posuv na otáčku obrobku zachovat.

Počet otáček obrobku se zvyšuje v poměru k počtu chodů. Vychází se při tom z redukce pracovního úhlu hřbetu, což může být kritické u kol s malým počtem zubů.

U odvalovacích fréz s přímými řeznými drážkami je třeba dbát na to, aby zvětšením počtu chodů neklesl úhel stoupání pod 7° .

Počet řezných drážek (hřebenů)

V závislosti na průměru frézy určuje zvolený počet řezných drážek maximální délku zubů odvalovací frézy a tím i možný počet jejich přestřžení. Je při tom třeba respektovat potřebný prostor pro třísku. Jestliže je tento prostor příliš malý, tříska se vzpříčí a může to vést k totálnímu poškození odvalovací frézy.

Rozhodujícím způsobem přispělo ke zvýšení trvanlivosti zvýšení počtu řezných drážek z dřívějších 12 na dvoj- až trojnásobek [12]. Obráběný objem se rozdělí na více zubů frézy a tloušťka třísky na hlavě zubu se zmenší. Menší třísky na hlavě zubu vyžadují menší řezné síly, které méně zatěžují ostří frézy a vytvářejí menší opotřebení. Odvalovací frézy s 20 až 30 řeznými drážkami a délkami zubů umožňujícími až deset přestřžení dobyly trh jako tzv. vícezubé odvalovací frézy.

Úhel hřbetu na hlavě zubu

Na monolitních odvalovacích frézách nelze libovolně zvyšovat nástrojový úhel hřbetu na hlavě zubu a jeho smysluplné maximum představuje 12° . Nástrojový úhel se snižuje superpozicí posuvu nástroje a valivého pohybu. Protože na hlavě zubu je úhel hřbetu výrazně větší než na obou bocích zubů, není nikdy opotřebení na hřbetě zubu kritériem trvanlivosti celého nástroje.

Upnutí

Daleko nejrozšířenějším způsobem upnutí pro odvalovací frézu je podélná drážka v otvoru frézy. Geometrické požadavky dovolují také provedení s jedno- nebo oboustrannou příčnou drážkou. Odvalovací frézy ze slinutých karbidů jsou vyráběny výhradně s jedno- nebo oboustrannou příčnou drážkou a vždy ve zkráceném provedení. Především v sériové výrobě jsou ve stále rostoucí míře používány odvalovací frézy s krátkými válcovými stopkami na obou stranách. Jako přednosti jsou u tohoto provedení jmenovány rychlá výměna nástroje a velmi vysoká oběhová přesnost.

3.3.3 Řezná geometrie odvalovacích fréz

Úhel hřbetu na boku zubu

Úkolem úhlu hřbetu na zubu odvalovací frézy je snižovat tření a tím opotřebení nástroje. Při přestřování na čele se nebude měnit základní profil, pokud bude vztah mezi úhly hřbetu na boku zubu φ_{fx} , na hlavě zubu φ_{as} a úhlem základního profilu α_0 dán rovnicí:

$$\tan \varphi_{fx} = \tan \varphi_{as} \tan \alpha_0 \quad (3.1)$$

Pro zvětšení úhlu hřbetu na výběhovém boku zubu se nabízejí následující možnosti:

- zvětšení úhlu hřbetu na hlavě,
- zvětšení úhlu záběru základního profilu,
- zmenšení úhlu hřbetu na náběhovém boku zubu při současném zvětšení úhlu hřbetu na výběhovém boku zubu frézy.

Význam úhlu hřbetu byl dokázán už Hoffmeisterem, který vyostřil zkušební jednozubou frézu tak, aby byl pracovní (skutečný) úhel hřbetu na obou bocích zubů frézy srovnatelný [13]. Při shodně působících úhlech hřbetu byla šířka otřené plochy na výběhovém i náběhovém boku zubu frézy přibližně stejná. Při rozdílných úhlech hřbetu vzniká vždy na boku zubu frézy s menším úhlem hřbetu větší opotřebení.

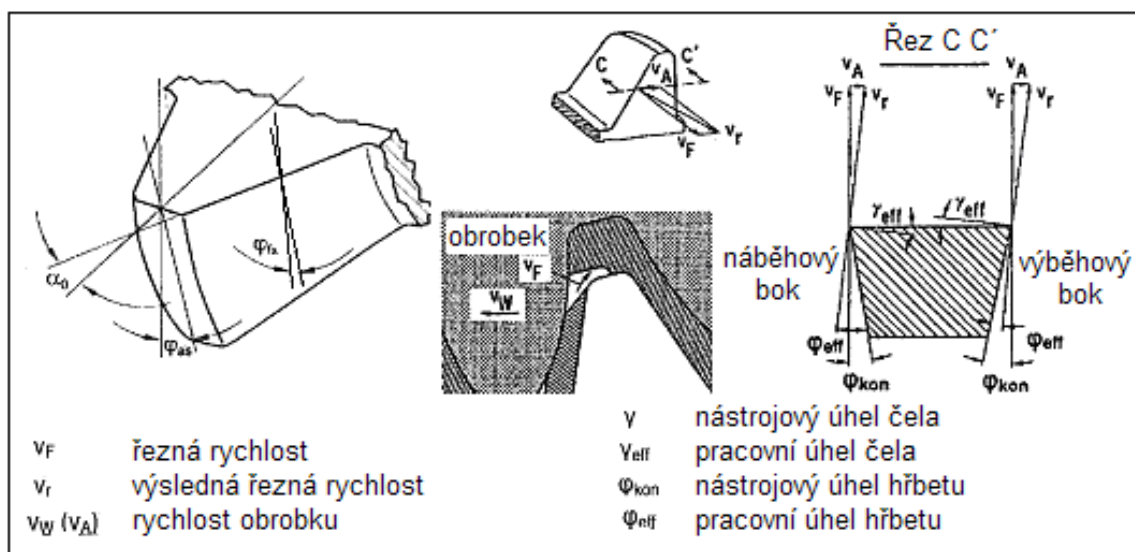
Důvod pro změnu nástrojového úhlu hřbetu vysvětluje **obr. 3.3-4**. Zub frézy se otáčí rychlostí v_F v zubové mezeře, zatímco obrobek se dle valivého pohybu otáčí rychlostí v_W , resp. (v_A). Z obou těchto složek se skládá výsledná řezná rychlost v_r . Výběhový bok zubu tak zasahuje více do odebíraného materiálu než bok náběhový.

Z toho vyplývá zmenšení nástrojového úhlu hřbetu φ_{kon} na výběhovém a zvětšení tohoto úhlu na náběhovém boku zubu. Podobně se mění i úhel čela γ , což ale nemá na opotřebení žádný měřitelný dopad. Jak ukázaly mnohé pokusy, nejnebezpečnější místo z hlediska opotřebení břitů leží na přechodu mezi hlavou a bokem zubu. Souvisí to jednak s tloušťkou a tvarem třísek, jednak s úhlem hřbetu, jehož pracovní hodnota může v extrémním případě představovat 20° na jednom boku, ale jen 4° na boku druhém.

Velmi malé pracovní úhly hřbetu na bocích zubů φ_{eff} vedou i u povlakovaných odvalovacích fréz pro vyšší zatížení třením k rychlému odstranění tvrdé povlakované vrstvy. Následující tření a současně vyšší dotyková plocha vede k většímu tepelnému zatížení substrátu. Nárůst teploty řezání vysvětluje progresivní nárůst opotřebení.

V literatuře byla prověřována a počítána změna úhlu hřbetu v závislosti na nejrozličnějších variantách frézování [14]. Bylo dokázáno, že nejméně vhodné pracovní úhly hřbetu vznikají u stejnosměrného nesousledného a u nestejnosměrného sousledného frézování. Naopak nejlepší podmínky pro pracovní úhly hřbetu vytvářejí kombinace nesousměrného nesousledného a sousměrného sousledného frézování. Při sousledném frézování je třeba vyzvednout skutečnost, že u této varianty vzniká na začátku řezání tlustá tříška, zatímco u nesousledného se začíná s minimální tloušťkou třísky. To může vést ke

klouzáni ostří na začátku řezu, aniž by došlo k odřezávání, což vyvolává vyšší opotřebení nástroje.



Obr. 3.3-4 Nástrojové a pracovní úhly na zubu odvalovací frézy

Závěrem je třeba říci, že rozhodující význam pro navrhování frézy mají jak vhodná volba varianty frézování, tak dostatečně velký nástrojový úhel hřbetu. Platí to především u ozubení s malým počtem zubů nebo u odvalovacích fréz s protuberancí. Minimální úhly hřbetu mohou vzniknout nejen na přechodu mezi výběhovým bokem a hlavou, ale také na náběhovém boku nebo na patě zubu.

Úhel čela

Praktická pozorování ukázala, že kladný úhel čela okolo 5° vykazuje pozitivní účinky na tvorbu třísky a ulehčuje její odvádění. Nevýhodou je náročnější ostření odvalovací frézy. Mimo to klade taková fréza i vyšší požadavky na měření.

3.3.4 Materiály odvalovacích fréz

Pro rozdílné tloušťky a délky třísek, kterými se vyznačuje proces odvalovacího frézování, musí materiály odvalovacích fréz ve velké míře sjednocovat protichůdné vlastnosti – houževnatost a tvrdost. Například při náběhu nástroje a jeho vřezávání musí břity zvládnout velké tloušťky třísek a vyžaduje se tedy vysoká houževnatost materiálu. Při výstupu nástroje a na výběhových bocích jsou odstraňovány tenké třísky, které vyvolávají tření a přechování, vyžadována je proto vysoká odolnost ostří proti abrazivnímu opotřebení. Je snaha tyto vlastnosti spojit realizací houževnatého materiálu substrátu a tvrdé povrchové vrstvy.

Odvalovací frézy z RO

Rychlořezné oceli obsahují jako základní legující prvky wolfram (W), molybden (Mo), vanad (V) a kobalt (Co) – **tab. 3.3-1**. Na rozdíl od ostatních nástrojových ocelí se vyznačují vyšší tvrdostí (od 65 do 70 HRC) a vysokou odolností proti popuštění. Tvrdost je ovlivněna množstvím a rozdělením jmenovaných legur, které vytvářejí s uhlíkem (C) karbidy.

Vložené karbidy a popuštěný martenzit zvyšují tvrdost a otěruvzdornost dolegováním chromem.

Rychlořezné oceli jsou kaleny těsně pod jejich teplotou tavení, tedy podle chemického složení mezi 1180° až 1300 °C. Čím větší je teplota kalení, tím více legujících prvků se rozpustí v základní hmotě, současně se tím může zvýšit i sekundární tvrdost při následném popouštění díky precipitaci nanokarbidů. Převážně používaná rychlořezná ocel 19 852 (1.3243) má tvrdost po popouštění 65 až 66 HRC a teplotu popouštění od 550° do 570°C.

Použitím tvrdých, otěru a teplotě odolných vrstev na současně houževnatý podklad z rychlořezné oceli byly získány nástroje, které mají podstatně vyšší výkonnostní možnosti a tím také širší spektrum použití než nepovlakované nástroje z RO. Titanitrid (TiN) je dnes nejčastěji používaný materiál pro povlakování obráběcích nástrojů z RO.

Odvalovací frézy z PM-RO

PM-RO materiály jsou vyráběny práškovou metalurgií. Mají ve srovnání s rychlořeznými ocelmi tavenými vyšší podíl legujících prvků.

Předností je jemnost zrna, vyšší stupeň čistoty (ovlivňující houževnatost), rovnoměrné rozdělení karbidů a volnost usazování. Rozprášením taveniny v inertní atmosféře dusíku a zapouzdřením prášku v kovovém válcí za tepla, ve kterém je spojen a následně izostaticky lisován, je vyroben vysoce výkonný polotovár nástroje.

Pro potřeby obrábění za sucha je důležitý vyvážený podíl uhlíku, který na jedné straně zvyšuje tvrdost a otěruvzdornost, na straně druhé ale snižuje houževnatost. Právě u odvalovacího frézování, které se vyznačuje rázy na vstupu i výstupu a s tím souvisejícím proměnlivým tepelným zatížením, hraje houževnatost břitů rozhodující roli.

Existuje celá řada PM-RO materiálů různých výrobců s rozdílnými výkonnostními parametry – viz **tab. 3.3-1**. V současné době je omezujícím faktorem výroby stlačení prášku, a proto se odvalovací frézy z PM-RO vyrábějí do průměru 250 mm.

Tab. 3.3-1 *Chemické složení jednotlivých druhů rychlořezných ocelí*

Číslo mater.	Obchodní označení	Podíl jednotlivých prvků v %					
		C	Co	W	Mo	V	Cr
konvenčně taveno							
1.3202	19858 (S12-1-4-5)	1,37	4,8	12	0,8	3,8	4,3
1.3207	19861 (S10-4-3-10)	1,27	10	9,5	3,5	3,5	4,3
1.3243	19852 (S6-5-2-5)	0,92	4,8	6,4	5	1,9	4,2
vyrobeno práškovou metalurgií							
1.3344	ASP2023 (S6-5-3)	1,3	8	6,4	5	3,1	4,1
	ASP2030 (S6-5-3-9)	1,3	8,5	6,4	5	3,1	4,2
1.3241	S390PM (S11-2-5-8)	1,6	8	10,8	2	5	4,8
	ASP2080 (S11-5-6-16)	2,5	15,8	11,5	5,1	6,4	4,2

Argumenty pro nasazení povlakovaných PM-RO odvalovacích fréz jsou tyto:

- vysoká spolehlivost procesu,
- malé náklady na nástroj,
- jednoduchá údržba (možnost chemického odpovlakování),
- opakovatelná trvanlivost,
- lepší obrobitelnost RO substrátu a lepší použitelnost ve srovnání se slinutým karbidem.

SK odvalovací frézy

Slinutými karbidy (SK) jsou nazývány materiály, které jsou vyráběny z kovových tvrdých materiálů, karbidů a z houževnatých pojivových kovů. Důležitými materiály jsou: wolframkarbid (WC), titankarbid (TiC), tantalkarbid (TaC). Jako pojivo se používá kobalt (Co).

Argumenty pro nasazení odvalovacích fréz ze slinutých karbidů:

- krátké časy obrábění díky vysoké řezné rychlosti,
- velmi dobré povrchy obrobků,
- vhodné pro obrábění za sucha pro vysokou otěruvzdornost za tepla,
- vysoká pevnost ostří v tlaku.

Argumenty proti nasazení odvalovacích fréz ze slinutých karbidů jsou naopak:

- cenově náročnější pořízení a údržba nástroje,
- kritická manipulace (citlivé na nárazy),
- často problematická provozní bezpečnost,
- většinou povlakovány pro nebezpečí difuze,
- SK nelze bezproblémově odpovlakovávat chemicky za mokra.

Srovnání vlastností a oblastí použití RO a SK substrátů představuje **tabulka 3.3-2**. Vysoká tvrdost např. 1600HV10 odpovídá podle tabulky malé ohybové pevnosti 1700 MPa a naopak pevnost 2500 MPa odpovídá tvrdosti 1200HV10.

Tab. 3.3-2 *Vlastnosti rychlořezných ocelí a slinutých karbidů*

Vlastnost		RO	SK	
			zrno < 2 μm	zrno < 0,7 μm
Tvrdost	HV10	800...900	1200...1600	1600...2100
Ohybová pevnost	MPa	5000	1700...2500	2500...4000
Modul pružnosti	kN/mm ²	217	480...560	560...650
Součinitel tepelné roztažnosti	μm/m°C	10...13	5...7	5...7
Součinitel tepelné vodivosti	W/m°C	19	30...100	30...100
Hustota	g/cm ³	8...8,3	11...15	11...15
Mezní teplota použití	°C	500	1000	1000

Pro označení slinutých karbidů neexistuje klasifikace jako u rychlořezných ocelí. Jsou podle normy ISO 513 rozděleny podle uživatelských skupin označených P, M, K a číslem. Číslo odkazuje na houževnatost a otěruvzdornost. Uvnitř jednotlivých skupin představuje vyšší číslo rostoucí houževnatost, viz **tab. 3.3-3**.

Z uvedených druhů slinutých karbidů vykazuje skupina P nejvyšší tvrdost a skupina K nejvyšší houževnatost. Tato skupina využívá vedle hlavního podílu WC pouze kobalt. Vyšší podíl kobaltu snižuje tvrdost, ale zvyšuje houževnatost. Použitelný obsah kobaltu leží u materiálů K10 až K40 mezi šesti až dvanácti procenty. K40 reflektuje na přání po nejvyšší možné houževnatosti ve spojení s akceptovatelnou tvrdostí.

Tab. 3.3-3 Standardizace slinutých karbidů podle ISO 513 a fyzikální vlastnosti slinutých karbidů typu K

Druh	Chemické složení			Oblast použití
K (zrno < 0,7 μm)		WC (%)	Co (%)	obrábění litiny (stále více pro ozubená kola)
	K10	92,5	6	
	K20	92,0	7,5	
	K30	89,5	10,0	
	K40	86,5	12,0	
M	WC, TiC, TaC, NbC, Co			austenitická ocel
P	WC, TiC, TaC, NbC, Co (P20=69,5%WC + 10%Co)			obrábění oceli a litiny
	tvrdost (HV30)	Pevnost v ohybu (MPa)		modul pružnosti (kN/mm ²)
K10	1850	3300		650
K20	1720	3500		620
K30	1550	3600		590
K40	1460	3700		580

Slinuté karbidy skupiny P se vyznačují vysokým podílem směsných karbidů. Titankarbid je ve srovnání s wolframkarbidem podstatně tvrdší a méně tuhý. Je navíc v oceli hůře rozpustný a méně náchylný k difuzi. Tantalkarbid zvyšuje odolnost proti opotřebení za tepla, rovněž však snižuje houževnatost. U odvalovacích fréz jsou tyto směsné substráty typu P používány také pro frézy přebrušované na čele. Na rozdíl od druhů K přitom nedochází k nalepování třísky.

Dalšími rozdílnými znaky obou druhů jsou:

- P-druhy nemusí být nutně opětovně povlakovány, tzn. relativně nižší náklady na údržbu, tím rychlejší použitelnost a méně nástrojů v oběhu (ale většinou ztráta trvanlivosti proti prvnímu povlaku),
- K-druhy mají vyšší pevnost v tlaku na ostří, vyšší houževnatost a tvrdost, čímž je možné dosáhnout vyšší trvanlivosti.

Hlavní problém slinutých karbidů je možné částečně vyřešit snížením velikosti karbidického zrna. Rozdělení zrnitosti je možné provést na: standard (0,9-1,4 μm), jemná

(0,6-0,7 μm), ultrajemná (0,4-0,5 μm) a superjemná (0,2-0,3 μm). Jemnozrnné slinuté karbidy se vyznačují vysokou tvrdostí při současně dobré ohybové pevnosti [15].

Kobalt je kritickým elementem, neboť může dojít při obrábění popř. při ostření k jeho uvolňování z důvodu chemické reakce s olejem. Tzv. „vyplavování kobaltu“ mohou zabránit řezné a brusné oleje s malou afinitou na kobalt. Porušená struktura slinutého karbidu se projeví ve formě kráteru hloubky až 50 μm a tvoří východisko pro vznik vydrolenin v průběhu odvalovacího frézování. Z toho vyplývá požadavek nasazovat SK odvalovací frézy vždy v povlakovaném stavu.

Odvalovací frézy z cermetu

Pojmem cermet (z anglického Ceramic a Metal) označujeme směs skládající se z kovu a vložených keramických částic. Dnes jsou jako cermet označovány takové materiály, které v převážné míře obsahují titankarbonitrid. Navíc mohou obsahovat určité množství molybdenu, wolframu, tantalu, niobu a vanadu. Pojivová fáze cermetů se skládá z niklu a kobaltu s podílem titanu, molybdenu, wolframu a dalších kovů v tuhém roztoku.

Ve srovnání s konvenčními slinutými karbidy na bázi WC vykazují cermety vysokou tvrdost a otěruvzdornost včetně vysoké stability řezné hrany. To vede ke stálosti tvaru a rozměru nástroje a ke kvalitnímu povrchu obrobku při malé tvorbě ostřin.

Dobrá stabilita řezné hrany umožňuje nasazení tohoto materiálu u nástrojů s ostrými řeznými hranami, bez ochranných fazetek a zaoblení. Současně je houževnatost a pevnost cermetů srovnatelná s konvenčním slinutým karbidem typu P.

Slabá afinita k železu, malý sklon k oxidaci a vysoká tepelná odolnost zabraňují difuznímu otěru a tvorbě žlábků a nabízejí tak možnost použití odvalovací frézy z cermetu při vysokých teplotách řezání a vysokých řezných rychlostech.

Nízká tepelná vodivost cermetů (asi třetinová ve srovnání s WC) a větší tepelná roztažnost (délková roztažnost asi o 80% větší než u WC) ale přispívá k podstatně vyššímu sklonu cermetů k tvorbě trhlin, především v souvislosti s malou tepelnou vodivostí při nasazení v přerušovaných řezech. Proto je cermet používán převážně při frézování za sucha. Malá tepelná vodivost cermetu vede dále při obrábění k vysokým teplotám v kontaktních oblastech, ale minimalizuje ohřátí oxidačně stálých řezných částí.

Výzkumné práce ukázaly, že parametry, používané při nasazení cermetů pro soustružení, nelze obecně přenést na odvalovací frézování [16].

Zaoblení břitů odvalovacích fréz pro zabránění poruch díky zvýšené stabilitě ostří není cesta k cíli. Trhliny, tvořící se u těchto materiálů a představující kritérium opotřebení, nevyplývají z nestabilní řezné hrany a nevznikají proto náhodně. Jsou většinou výsledkem poškození struktury. Zaoblení ostří má za následek zvýšení řezných sil, což vede k předčasnému poškození čela a snížení trvanlivosti. Produktivitu odvalovacího frézování se dosud nasazením cermetů místo slinutých karbidů nepodařilo ekonomicky zvýšit. Slinutý karbid převyšuje cermet z hlediska trvanlivosti, takže cermet nelze v současné době pro odvalovací frézování hospodárně použít.

Povlaky na odvalovacích frézách

Podle chemické vazby jsou tvrdé materiály rozdělovány do skupin s vazbou:

- kovalentní (C, CBN, B₄C, SiC, ...),
- kovovou (TiN, CrN, TiAlN, WC, ...),
- iontovou (Al₂O₃, TiO₂, ...).

Nejvyšší tvrdost mají diamant (C), kubický nitrid boru (CBN) nebo karbid boru (B₄C). Za to, že se tyto materiály dosud neprosadily jako ochrana proti opotřebení, může nedostatečná přilnavost na kovový substrát. Jsou navíc krystalicky vylučovány při velmi vysokých teplotách, které leží nad popouštěcími teplotami pro ocel.

Pokud pokládáme za nejdůležitější kritérium pro použitelnost povlaku přilnavost, pak jsou pro kovové substráty nejvhodnější materiály s kovovou chemickou vazbou. Nitridy a karbidy titanu, hliníku a chromu, které patří do této skupiny, dosáhly v oblasti povlakování nástrojů velkého uplatnění. Nižší tvrdost (ve srovnání s materiály s kovalentní vazbou) se díky lepší přilnavosti více než srovná.

Vrstvy **TiN** mají kubickou krystalickou strukturu. Atomy kovů tvoří kubickou plošně středěnou mřížku, atomy dusíku jsou vkládány do mezer v kovové nosné mřížce. Díky silné interakci mezi atomy kovu a dusíku má toto spojení vysokou stabilitu. Vlastnosti titankarbidu jsou závislé na poměru počtu kovových a nekovových atomů.

Povlak TiN se od svého praktického použití od roku 1980 vyznačuje především:

- vysokou tvrdostí při dobré houževnatosti,
- vysokou odolností proti opotřebení,
- nízkým koeficientem tření ve srovnání s ocelí,
- dobrou chemickou stálostí,
- vysokou odolností proti teplotě (oxidační stálostí),
- dobrou přilnavostí.

Přednost titanaluminiumnitridových povlaků spočívá ve vysoké odolnosti proti oxidaci při současné velmi vysoké tvrdosti a menší tepelné vodivosti. **TiAlN** má podobně jako TiN kubickou plošně středěnou mřížku, ve které jsou atomy titanu částečně nahrazeny atomy hliníku. Z toho vyplývá zesílení spojení a velmi vysoká stabilita TiAlN vrstvy.

Na rozdíl od ostatních systémů povlaků se povlak TiAlN vyznačuje tvorbou povrchové vrstvy Al₂O₃ při tribologickém zatížení nad 800 °C. Tato skutečnost, která je vyvolána vysokým obsahem hliníku, je dobrým předpokladem pro vysokou odolnost proti opotřebení při obrábění za sucha.

Povlaky titankarbonitridů s vysokou tvrdostí (až 3000 HV) při dostatečné houževnatosti jsou vhodné pro obrábění těžkoobrobitelných a vysoce pevných materiálů. Nezbytným předpokladem pro zvýšení trvanlivosti s použitím **TiCN** povlaků je nasazení

procesních kapalin. Pro nízkou odolnost proti teplotám není tento povlak vhodný pro obrábění za sucha. Všichni výrobci povlaků PVD vytvářejí TiCN vrstvy jako gradientní, tzn. že začínají na povrchu nástroje nejprve vrstvou TiN a pak postupně zvyšují podíl uhlíku ve vrstvě. Takto je možné stanovit i vlastnosti vrstvy.

Aluminiumchromniklový povlak (**AlCrN**) je povlak nové generace bez titanu, který nově vyvinula firma Balzers. Jeho uplatnění se předpokládá především v oblasti tzv. vysocevýkonného odvalovacího frézování.

S ohledem na optimalizaci nákladů při použití substrátů a povlakovacích vrstev jsou v **tabulce 3.3-4** uvedeny maximální teploty, které nesmí být v procesu obrábění překročeny.

Tab. 3.3-4 Maximální použitelné teploty pro substráty a povlaky s ohledem na hospodárnost

Materiál (substrát)	RO	PKD	SK	CBN	Keramika
Použitelná teplota	< 500°C	< 700°C	< 1000°C	< 1200°C	< 1500°C
Povlak	TiC	TiCN	TiN	TiAlN	AlCrN
Použitelná teplota	< 300°C	< 400°C	< 600°C	< 800°C	< 1100°C

Zmiňované povlaky, nanášené metodou PVD (**P**hysical **V**apor **D**eposition) se liší nejen chemickým složením, ale i stavbou vrstev. Existují tři základní typy vrstev, a to monovrstvy, multivrstvy a gradientní vrstvy. K tomuto rozdělení se v poslední době stále ve větší míře přidávají i tzv. nanokompozitní vrstvy, u kterých dochází ke spojení nanokrystalických TiAlN vrstev s amorfni matricí Si₃N₄.

Doporučované tloušťky povlaků jsou u odvalovacího frézování 10 µm pro hrubování a 3 µm pro dokončování [17]. 10 µm tlustý povlak na čele snižuje přenos tepla do čela nástroje a tím i tvorbu žlábků natolik, že trvanlivost je dána opotřebením na hřbetě (je ale čtyřnásobné ve srovnání s TiAlN povlakem tloušťky 3 µm). V důsledku toho by bylo optimálním řešením 10 µm na čele a 5 µm na hřbetě. Technologie povlakování toto řešení ale dosud nenabízí. Možností by bylo vytvoření souvislé vrstvy o tloušťce 5 µm, do které by byly cíleně vkládány izolační materiály [18].

Také u odvalovacích fréz ze slinutých karbidů nepřináší nárůst tloušťky vrstvy, např. nad 8 µm, potřebný nárůst trvanlivosti. Pro vysokou tepelnou odolnost SK substrátu není kritériem trvanlivosti opotřebením žlábkem, jak je běžné u substrátů z PM-RO, ale opotřebením na hřbetě na bocích zubů. Z výzkumů [19] vyplývá, že oblast optimálních tlouštěk vrstev leží mezi 4 a 5 µm. Menší i větší tloušťky vedou k výraznému snížení trvanlivosti. Lze se domnívat, že příčinou mohou být rostoucí vnitřní a smyková napětí při rostoucích tloušťkách vrstvy, což urychluje jejich odlupování a drcení.

3.3.5 Formy opotřebení a jeho příčiny

Formy opotřebení

Při každém obrábění, tedy i u odvalovacího frézování, dochází na základě tepelného a mechanického zatížení břitu k vzniku opotřebení, které je rozdílné.

Vliv na způsob a velikost opotřebení mají:

- typ nástroje,
- obráběný materiál,
- technologie obrábění.

Pod pojmem opotřebení je třeba vidět především změnu tvaru ostří a řezných ploch, které jsou doprovázeny úbytkem nástrojového materiálu.

Velikost opotřebení je především závislá na tvrdosti, otěruvzdornosti, tepelné odolnosti a houževnatosti obrobku a řezného materiálu, závisí ale také na povrchu břitu, tření a na mazacích účincích použitých olejů. V současnosti jsou prováděny pokusy o zmírnění opotřebení působením aditiv jako součástí procesních kapalin.

Na břitech odvalovacích fréz rozlišujeme formy opotřebení, které jsou znázorněny na **obr. 3.3-5**. Nevystupují najednou a na opotřebení frézy se nepodílí se stejnou intenzitou:

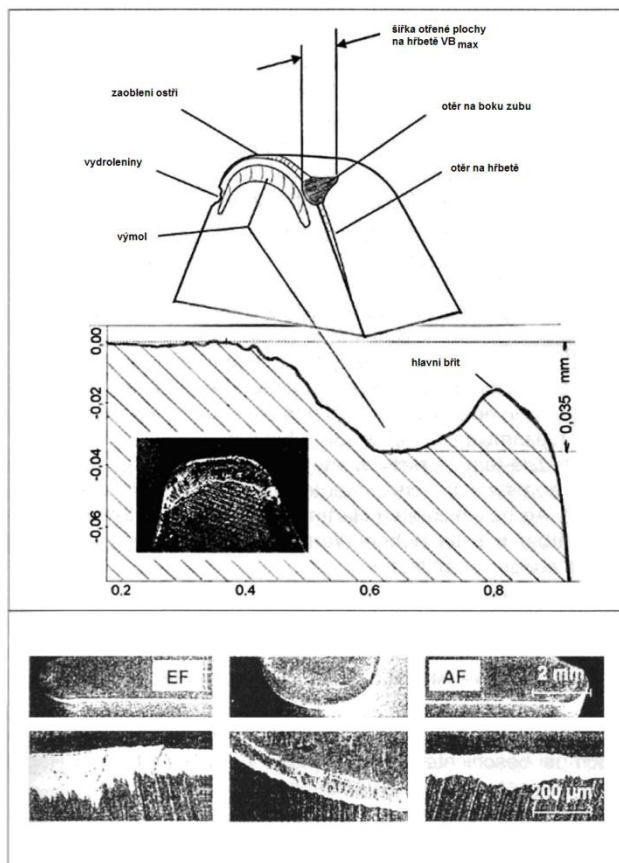
- opotřebení na hřbetě na boku zubu, vyznačující se maximální tloušťkou otřené plochy $VB_{\max}$,
- opotřebení výmolem na čele,
- trhliny a vydroleniny na ostří,
- nalepování a navařování materiálu.

Na povlakovaných odvalovacích frézách je pod světelným nebo rastrovacím elektronovým mikroskopem možné analyzovat další detaily:

- hřebenové a příčné trhliny,
- tvorbu oxidických obalů, mikrosvary,
- odlupování vrstvy.

Otěr na hřbetě VB je rovnoměrné odebrání řezného materiálu na boku zubu způsobené třením. Měření VB je prováděno vždy rovnoběžně s ostřím a jednotlivé vytržené části se označují $VB_{\max}$.

Trhliny jsou následkem silně proměnlivého zatížení. Během záběru nástroje je ostří rychle zahřáto na vysokou teplotu a po výjezdu z obrobku zase rychle ochlazen. Rozdíl teplot je závislý na řezných podmínkách a na druhu záběru. Trhliny, které jsou orientovány kolmo na ostří se označují jako **hřebenové**.



Obr. 3.3-5 Opotřebení odvalovací frézy, (nahore) formy opotřebení na zubu frézy, (uprostřed) opotřebení na čele s hloubkou výmolu 35 μm , (dole) ukázky opotřebení na zubu frézy (EF, AF: náběhový a výběhový zub)

Odloupnutím nazýváme setření materiálu, který vytváří tvrdou vrstvu povlaku, ze substrátu. Dochází k němu, pokud přilnavost substrátu a vrstvy povlaku není dostatečná, případně pokud dojde k oddělení povrchové vrstvy substrátu.

Vydroleniny vznikají lokálním přetížením ostří působením příliš vysokých řezných sil. Dochází k nim tehdy, když je řezný klín příliš malý, nebo při použití křehkého řezného materiálu. Při obrábění houževnatých materiálů mohou na ostří ulpívat třísky a při následném zatížení ostří může dojít k jeho porušení [20].

Oxidické povlaky vznikají oxidací materiálu za vysokých teplot. Mohou tepelně a mechanicky odlehčit nástrojovému ostří.

Zaoblení ostří vzniká v největší míře při začátku opotřebení působením adhezních a abrazivních mechanismů. U řezných materiálů s malým odporem proti změně tvaru a vysokou houževnatostí může vést vysoké mechanické a tepelné zatížení k plastické deformaci.

Výmol (žlábek) je opotřebení na čele ve tvaru prohlubně, který vzniká, když odcházející třísky vnášejí do povrchové oblasti vysoké teplo, přičemž dochází k překročení tepelné odolnosti řezného materiálu. Další opotřebení ve formě výmolu je zapříčiněno vedle tření i difusí povrchu nástroje do žhavé třísky. Vznikající teplo je závislé na řezné rychlosti (teplota), délce třísky (trvání účinku), charakteru čelní plochy (tření) a izolačním účinku povlaku. Opotřebení výmolem se snižuje redukcí posuvu, zmenší se ale také vzdálenost středu prohlubně od ostří, takže v extrémním případě může dojít k přechodu od opotřebení žlábkem

k opotřebení třením. U povlakovaných SK odvalovacích fréz se otěr ve tvaru výmolu zpravidla netvoří, důvodem je vysoká odolnost proti teplotě, malé tření a krátký kontakt třísky s plochou čela [9].

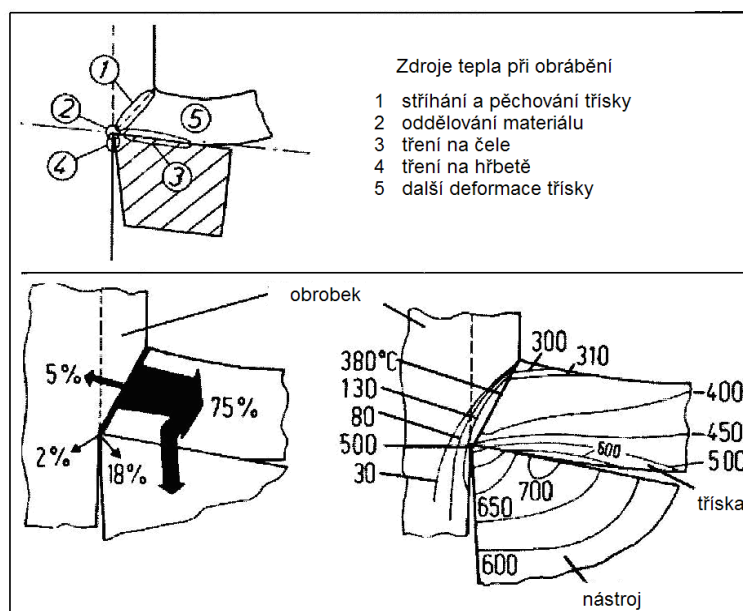
Nalepování materiálu (mikrosvary) vznikají tehdy, když vysoký tlak při obrábění vyvolá tak silné adhezní pojící síly, že se materiál obrobku v kontaktních místech slepí s nástrojem. Při usmýknutí toho materiálu je oddělován zároveň i materiál substrátu nástroje.

Příčiny opotřebení

Pro lepší pochopení vzniku opotřebení je třeba blíže vysvětlit průběh obrábění a s ním spojené rozdělení teploty a tepla na břitu nástroje, jak ukazuje **obr. 3.3-6**. Zdroje tepla, které vedou k růstu teploty, jsou:

- V oblasti primárních plastických deformací před břitem nástroje dochází v obrobku a v tříске k pěchování materiálu. Energie, potřebná pro plastickou deformaci, se mění z velké části na teplo (asi 60 %).
- Při odchodu třísky tato tříska tře o plochu čela a tímto třením se vytváří další teplo (asi 20 %).
- Tření mezi obrobkem a hřbetem nástroje představuje zbývajících 20 % přeměněné energie.

Největší podíl tepla je odveden třískou (asi 75 %). Určitý podíl (10-20 %) přechází do nástroje, zbytek pak do obrobku a procesní kapaliny.



Obr. 3.3-6 Rozdělení teploty a tepla na ostří nástroje

Teplota procesu má rozhodující vliv na postup opotřebení, neboť s rostoucí teplotou se odolnost nástrojového materiálu proti opotřebení prudce snižuje. Uvedené rozdělení teplot se týká obecně obrábění, např. soustružení oceli pevnosti 850 MPa nástrojem ze slinutého karbidu, řeznou rychlostí 60 m.min⁻¹ při hloubce řezu 0,32 mm [21]. Maximální teploty

vznikají v místech, kde dochází k největšímu zatížení třením, lámáním třísky, abrazi a adhezí. U nepovlakovaných zubů frézy je tímto místem místo s největším opotřebením výmolem. U odvalovacího frézování je při přerušovaném řezu a rychlosti do 300 m.min^{-1} možné zpravidla počítat s teplotou do $600 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

3.4 Výpočet parametrů odvalovací frézy s využitím programu NNEON

Program, nazvaný NNEON (NÁSTROJE NA EVOLVENTNÍ OZUBENÍ), je naprogramován v programovacím jazyce Visual Basic 6.0 Learning Edition. Algoritmus výpočtu by se dal zpracovat i v programech jako MS Excel nebo MathCAD, avšak vzhledem k vysoké univerzálnosti těchto programů by měl výsledný produkt řadu omezení.

Softwarové a hardwarové požadavky programu:

- operační systém Windows 95/98
- min. Pentium 60 MHz
- 10 MB volného místa na pevném disku
- min. 4 MB operační paměti
- program je optimalizován pro rozlišení 800 x 600



Obr. 3.4-1 Úvodní obrazovka programu NNEON

Program NNEON se skládá ze čtyř samostatných podprogramů:

- Odvalovací fréza
- Loupací odvalovací fréza
- Dokončovací kotoučová modulová fréza
- Dokončovací čepová modulová fréza

Výstup programu tvoří dostatečný a rychle získaný podklad pro výrobní výkres konkrétního nástroje. Vedle využití programu pro konstrukci nástrojů je možné program uplatnit rovněž při výuce studentů, kde lze názorně na konkrétních příkladech ukázat vzájemnou vazbu mezi jednotlivými parametry. Program se dá v neposlední řadě využít i k usnadnění kontroly studentských prací .

Vstupní i výstupní data ze všech podprogramů je možné uložit do textového souboru, který lze otevřít v jakémkoliv textovém editoru (MS Word, WordPad, Poznámkový blok, PC Suit 602 apod.). Snadno se pak dají získané výsledky výpočtů vkládat přímo do textu nejrůznějších dokumentů (odborné články, technická dokumentace atd.). Rovněž je možné veškerá vstupní a výstupní data vytisknout přímo z programu, bez nutnosti vkládání do textového editoru, včetně vysvětlujících obrázků a schémat.

3.4.1 Možnosti podprogramu „Odvalovací fréza“

Po zadání vstupních parametrů vyráběného ozubeného kola, základních parametrů nástroje nutných pro výpočet a doplňujících údajů (profil, smysl stoupání šroubovice, materiál obrobku, přesnost odvalovací frézy apod.) program provede:

- výpočet základních parametrů obráběného kola
- výpočet základních údajů profilu zubů frézy
- výpočet nebo přiřazení dalších základních konstrukčních parametrů nástroje
- kontrolu geometrie nástroje
- zobrazení příslušných mezních úchylek

Výstup podprogramů na obrazovku dokumentován v **příloze 6.4**. Přehled všech vstupních a výstupních parametrů včetně vztahů, podle kterých se počítají je zachycen v **přílohách 6.1 a 6.3**. Jádrem programu vychází z vývojových diagramů, uvedených v [22], které byly doplněny s cílem rozšířit možnosti programu.

3.4.2 Výpočet parametrů odvalovací frézy

Potřebné vstupní údaje pro výpočet parametrů nástroje jsou uvedeny v následující tabulce:

Tab. 3.4-1 Vstupní údaje pro výpočet parametrů odvalovací frézy

Základní údaje kola		Základní údaje nástroje	
modul	m	velký (hlavový) průměr nástroje	d_{hn}
počet zubů vyráběného kola	z	úhel hřbetu na hlavě zubu v rovině boční	α_{fA}
úhel záběru	α	počet chodů	i_n
druh materiálu		profil, přesnost, smysl stoupání šroubovice	
Doplňující údaje			
	modul pružnosti v tahu materiálu upínacího trnu	E	
	přípustný průhyb upínacího trnu	y_p	
	posuv frézy	s_s	
	poloměr brusného kotouče	R_k	

Kromě výše uvedených údajů vyžaduje program ještě u korigovaných kol zadání jednotkového posunutí x pro výpočet základních parametrů obráběného kola. Na parametry nástroje však tato hodnota nemá vliv.

Komplexní výpočet odvalovacích fréz zahrnuje řadu parametrů a s ohledem na omezený rozsah není možné se všemi detailně zabývat, proto budou v následujícím textu zmíněny pouze ty nejzákladnější. Přehled všech vstupních a výstupních parametrů odvalovacích fréz, které program umožňuje počítat, je v **příloze 6.1**.

Mezi nejdůležitější parametry odvalovacích fréz patří:

- velký průměr (označovaný též vnější nebo hlavový)
- průměr upínacího otvoru
- délka odvalovací frézy
- počet hřebenů a tvar drážek
- počet chodů

Velký průměr

Použitím odvalovacích fréz větších průměrů se dosáhne menšího opotřebení nástroje, roste životnost a rovněž i přesnost práce [23]. Navíc větší průměr odvalovací frézy dovoluje frézovací trn většího průřezu a tím se zvyšuje tuhost upnutí a rovněž dovoluje větší počet hřebenů (tím klesá posuv na zub, roste trvanlivost břitů a je možné zvýšit i zdvih vačky a získat tak příznivější úhly hřbetu, zejména na bocích zubů). Jediný negativní vliv velkého

průměru frézy je na hlavní čas řezání, který narůstá [3]. Vnější průměr se volí z ČSN 22 25 51 dle modulu.

Průměr upínacího otvoru

Průměr upínacího otvoru d_{un} lze stanovit výpočtem (vychází se ze vztahu pro průhyb upínacího trnu) podle rovnice [22]:

$$d_{un} = \sqrt[4]{\frac{F_p \cdot L_t^3}{5,27 \cdot y_p \cdot E}} \quad (3.2)$$

kde: F_p pasivní složka síly obrábění

L_t délka upínacího trnu mezi opěrami

Pro pasivní složku síly obrábění platí vztah:

$$F_p = 0,4 \cdot F_c = 0,4 \cdot c_c \cdot m^{x_c} \cdot s_s^{y_c} \quad (3.3)$$

kde: F_c řezná složka síly obrábění

c_c konstanta pro výpočet řezné složky síly obrábění

x_c, y_c exponenty pro výpočet řezné složky síly obrábění

Upínací drážka se umísťuje proti zubové mezeře, aby její hrany nezeslabily těleso frézy [24]. Unášení nástroje se může realizovat příčnou nebo podélnou drážkou, příčná drážka ovšem umožňuje práci s menšími odchylkami [25]. Je-li tloušťka tělesa frézy v nejslabším místě menší než $0,3 \cdot d_{un}$ je nutno použít frézu se stopkou, nebo s čelním upínáním (toto upínání je výhodné, a proto se používá i u fréz, které to nevyžadují z hlediska malé tloušťky tělesa frézy)

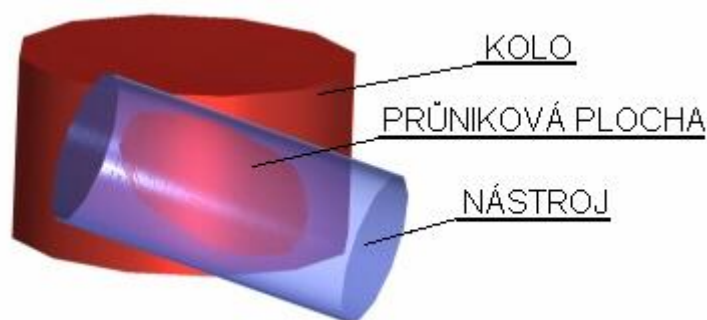
Délka odvalovací frézy

Délka frézy L_n je tvořena délkou závitové části L_{zn} a dvěma nákrůžky L_{kn} , které slouží pro kontrolu házení číselníkovým úchylkoměrem. Délka závitové části má teoreticky odpovídat průmětu čáry záběru nástroje s obrobkem na roztečnou přímku základního hřebene frézy, a aby bylo umožněno krokování, tak se tato délka navrhuje o něco větší a počítá se z empirického vztahu [25]:

$$L_{zn} = (4 \div 5) \cdot \pi \cdot m + (10 \div 15) \text{ mm} \quad (3.4)$$

(V programu se délka počítá dle vztahu z [22]: $L_{zn} = 4,5 \cdot \pi \cdot m + 12 \text{ mm}$).

Přesné stanovení délky pracovní části odvalovací frézy je dosti složité a vychází se při něm ze znalosti tzv. průnikové křivky (má přibližně tvar elipsy) [3], kterou obdržíme jako průmět křivky ohraničující prostorovou průnikovou plochu mezi válcovou plochou nástroje a válcovou plochou kola do roviny rovnoběžné s osami nástroje a obrobku.



Obr. 3.4-2 Zjednodušené schéma záběru mezi nástrojem a obrobkem

Počet hřebenů a tvar drážek

Drážky mezi hřebenů musí být dostatečně velké pro odvod třísek a výběh podtáčecího nástroje, šířka hřebenů zubů u paty musí zajišťovat dostatečnou pevnost a velký počet přeoštění. Větší počet drážek vytváří v důsledku většího počtu ostří dokonalejší profil obáلكové evolventy [3,24].

Počet hřebenů se zjistí ze vztahu [22,24]:

$$z_n = \frac{360}{\varphi_{zn}} \quad (3.5)$$

$$\text{kde: } \varphi_{zn} = \arccos\left(\frac{d_{dn}}{d_{hn}}\right) \quad (3.6)$$

$$d_{dn} = 1,7 \cdot d_{un} \quad (3.7)$$

Hodnota získaná výpočtem se zaokrouhlí na nejbližší vyšší celé číslo (počet zubů nástroje se snižuje, jestliže kontrolní poloměr pro podbrušování R_z je menší než poloměr brusného kotouče R_k – v programu je tento úkon realizován podle postupu uvedeném v [22]).

Počet chodů

Jednochodé frézy jsou nejpoužívanější a rovněž mají i vyšší přesnost, vícechodé frézy umožňují kratší doby frézování díky vyšším otáčkám obrobku. Pro zlepšení přesnosti kola je třeba volit počet chodů frézy tak, aby počet zubů obrobku nebyl dělitelný počtem chodů a aby nejmenší společný násobek počtu chodů a počtu zubů byl součinem obou čísel. Po každé otáčce obrobku je pak zubní mezera obráběna jiným chodem frézy a to tak, že se všechny chody frézy na celé délce zubu pravidelně střídají. [3].

Dále pro konstrukci nástroje musíme znát údaje týkající se profilu a geometrie nástroje. Vztahy pro výpočet parametrů profilu a úhlů hřbetu jsou rovněž uvedeny v **příloze 6.1**. Při výpočtu odvalovací frézy se uvažují nulové úhly čela a sklonu ostří. Ty se zpravidla volí u dokončovacích nástrojů, kdy chceme přesně zachovat rozměry a tvar obráběné plochy.



Shrnutí pojmů

V této kapitole jste se dověděli základní informace o nejpoužívanější metodě výroby čelních ozubených kol - odvalovacím frézováním. Byla popsána základní kinematika celého procesu odvalování s vyznačením jednotlivých pohybů nástroje a obrobku. Tyto pohyby realizuje obráběcí stroj, jehož konstrukci byla věnována samostatná kapitola.

V dalším textu byla pozornost zaměřena na nástroje, které se při obrábění odvalovacím frézováním používají – ona odvalovací frézy. Tyto nástroje byly charakterizovány z hlediska jejich zásad pro konstrukci, použitelného nástrojového materiálu a řezné geometrie. Byla věnována pozornost také možnostem opotřebení tohoto nástroje v procesu obrábění.

Závěr kapitoly je věnován počítačovému programu NNEON, který umožňuje stanovit základní parametry odvalovací frézy pro její výrobu a vytváří nezbytnou základnu pro realizaci výkresové dokumentace tohoto nástroje.



Kontrolní otázky

1. Proč je odvalovací frézování nejpoužívanější metodou pro výrobu čelního ozubení?
2. Co je výchozím výrobním povrchem u odvalovacích fréz a jaké mohou být jeho možnosti?
3. Které konstrukční prvky jsou důležité pro výrobu odvalovacích fréz?
4. Jakým způsobem jsou vytvářeny na odvalovacích frézách úhly čela?
5. Jaké způsoby podsoustružení mohou být realizovány na odvalovacích frézách?
6. Jak označujeme odvalovací frézy podle kvality a co je jejich měřítkem?



Úlohy k řešení

1. Navrhněte a vypočítejte odvalovací frézu pro výrobu ozubení s parametry: $m_n=2,5$, $\alpha_n=20^\circ$, $\beta_0=25^\circ30'$ a nakreslete výkres nástroje.
2. Navrhněte a vypočítejte odvalovací frézu pro výrobu ozubení s parametry: $m_n=3$, $\alpha_n=20^\circ$, $\beta_0=30^\circ52'12''$ a nakreslete výkres nástroje.
3. Navrhněte a vypočítejte odvalovací frézu pro výrobu ozubení s parametry: $m_n=4$, $\alpha_n=20^\circ$, $\beta_0=21^\circ$ a nakreslete výkres nástroje.
4. Navrhněte a vypočítejte odvalovací frézu pro výrobu ozubení s parametry: $m_n=5$, $\alpha_n=20^\circ$, $\beta_0=10^\circ$ a nakreslete výkres nástroje.

4 LOUPACÍ ODVALOVACÍ FRÉZOVÁNÍ

Loupací odvalovací frézování (**obr.4.1-1**) je dokončovací metoda odvalovacího frézování pro obrobení kalených boků zubů ozubených kol [26-29]. Od dokončovacího odvalovacího frézování nekalených ozubení se tato metoda liší pouze materiálem nástroje, geometrií zubů (negativní úhel čela na hlavě zubu) a technologickými podmínkami. Také u loupacího odvalovacího frézování se tak prosazují řezné rychlosti, které přibližně odpovídají obvodové rychlosti nástroje.



Čas ke studiu: 6 hodin



Cíl: Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- Charakterizovat metodu loupacího odvalovacího frézování a určit oblast jejího použití.
- Popsat nástroje pro aplikaci při loupacím odvalovacím frézování a vyjádřit rozdíly v jejich konstrukci ve srovnání s „klasickými“ odvalovacím frézami.
- Navrhnou a vypočítat potřebné parametry loupací odvalovací frézy s využitím programu NNEON.



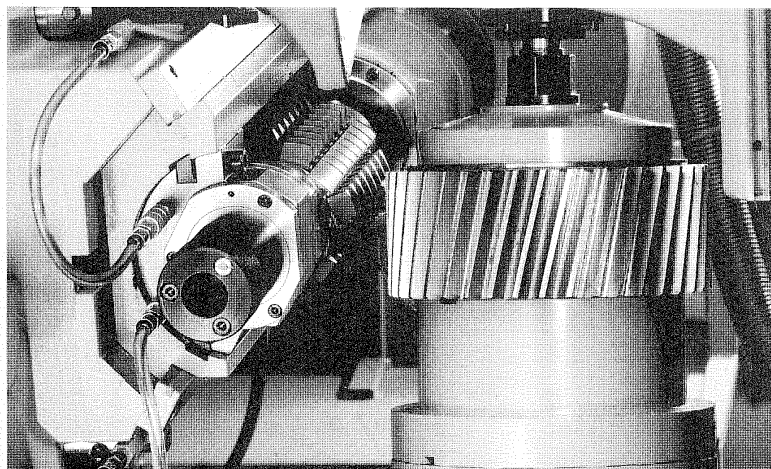
Výklad

4.1 Charakteristické znaky metody a oblast jejího použití

Mezi charakteristické znaky loupacího odvalovacího frézování je možné zařadit následující:

- Metoda patří do skupiny plynulých odvalovacích metod s „bodovým kontaktem“. Pro vysvětlenou: Pojem „bodový kontakt“ se vztahuje ke kontaktu mezi nástrojem a na hotovo obráběným kolem.
- Výrobní dotyková čára (charakteristika) mezi nástrojem a obrobkem je na všech bocích zubů vytvořena prakticky současně při axiálním pohybu.
- Vytvoření modifikace na bocích zubů
 - profil: modifikovaný nástroj
 - sklon zubu: modifikovaný pohyb stroje.
- Nástroje s definovanou geometrií bříty
 - nástroj přímo měřitelný
 - malá drsnost povrchu na bocích zubů obrobku

- aktivní pouze boky zubů, nikoliv hlavy zubů.
- Nástrojovým materiálem je v současné době jemnozrný slinutý karbid
 - lze obrábět za sucha
 - tvrdost obrobku maximálně 800 HV10
 - trvanlivost nástroje často nedostačující
 - povlakování nástroje dosud málo úspěšné.
- Realizovatelné pouze malé úhly hřbetu.
- Vhodná struktura povrchu z hlediska vzniku hluku.
- Podobné požadavky na předchozí obrobení součásti.



Obr. 4.1-1 Poloha nástroje a obrobku při loupacím odvalovacím frézování

Oblasti použití u loupacího odvalovacího frézování lze charakterizovat následujícím způsobem:

- pro střední až vysokou kvalitu,
- dokončovací obrábění: pastorkové hřídele, ozubení spojek a kol pro
 - zemědělské stroje
 - stavební stroje
 - obecné strojírenství,
- hrubování: pro odvalovací broušení dělicím způsobem (střední moduly) a pro ševingování a broušení (malých modulů).

Tabulka 4.1-1 interpretuje nejdůležitější odlišnosti loupacího odvalovacího frézování a tvrdého loupání, které se rovněž uplatňuje při obrábění kalených ozubení. Je třeba vyzdvihnout hlavně:

- Při loupacím odvalovacím frézování lze obrábět jedním nástrojem všechny obrobky stejného základního profilu. To platí striktně pouze v případě, že na obrobku nejsou požadovány žádné profilové modifikace (tedy žádné vypouklé profily ani hlavové korekce). U obrobků, které modifikaci vyžadují, je možné vyzkoušet, např. simulací výrobního procesu, zda se dotyčný nástroj pro obrábění hodí, nebo ne.
- U tvrdého loupání jsou nástroje obecně „spojeny s obrobkem“. To znamená např.: Pro obrobek s rozdílným počtem zubů jsou potřebné vždy nástroje rozdílné geometrie, i když obrobky nevyžadují profilovou modifikaci a vykazují tentýž základní profil.

Tab. 4.1-1 Výrazné rozdíly mezi metodami loupacího odvalovacího frézování a tvrdého loupání

Charakteristický znak	Loupací odvalovací frézování	Tvrdé loupání
Parametry obrobků: m d β	1...20 mm (40mm) 10...3000 mm „libovolný“	1...3 mm 10...200 mm 15°...40°
Velikost dávky	kusová až velkosériová výroba	velkosériová výroba
Kombinace nástroj/obrobek	jeden nástroj pro všechny obrobky se stejným základním profilem	nástroj je „spojen s obrobkem“
Výchozí povrch nástroje	šnek	není k dispozici
Počet zubů (chodů) nástroje	1...3	ca. 30...100
Ostření nástroje	na zvláštním stroji	na loupacím stroji
Úhel čela, úhel sklonu ostří	-10...-30°	0°
Tvar třísek při konstantním přídávku na obrábění při plném záběru	větší počet třísek rozdílného tvaru a rozměrů	pouze jeden tvar třísky podle boku zubu
Pracovní metoda	převážně sousledně	možné jen nesousledně
Řezná rychlost	70...100 m/min pro m 3...5 mm 50...70 m/min pro m = 20 mm	40...90 m/min
Axiální posuv	1...2,5 mm, příp. 2...5 mm	0,1...0,25 mm
Přídavek na ostření	0,05...0,1 mm (0,15 mm)	0,02...0,06 mm
Čas obrábění (relativní)	1	1/2...1/3
Krokování	běžné	není možné

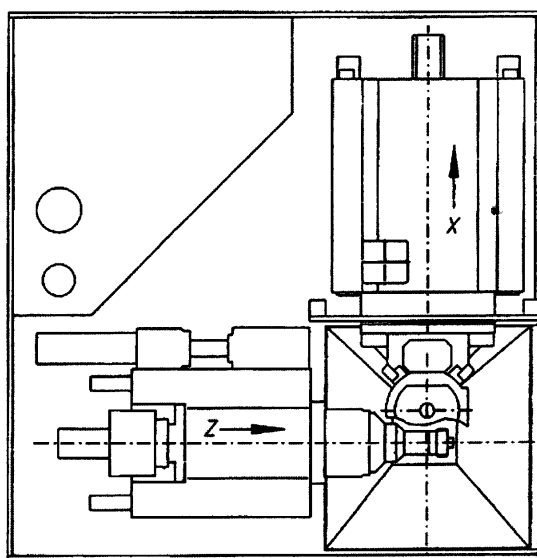
Cílem tvrdého dokončovacího obrábění boků zubů je zabezpečit příznivé vlastnosti vyráběných dílů při současném dodržení nízkých výrobních nákladů. Pokud se při obrábění použije nevhodných technologických podmínek, vzniká nebezpečí nadměrného opotřebení nástroje a také ovlivnění struktury obrobku. To se může projevit poklesem povrchové tvrdosti, popuštěním okrajové struktury a novým zpevněním s tenkými, velmi tvrdými „bílými vrstvami“.

Strukturu lze ovlivnit množstvím přivedeného tepla během tvoření třísky a následným ochlazením příslušné povrchové oblasti. Množství přivedeného tepla narůstá s řeznou rychlostí a především s nárůstem opotřebení nástroje. To má řadu příčin, které se navzájem ovlivňují v míře, kterou v současné době ještě nelze přesně určit. Na základě praktických pokusů lze ale stanovit, že při použití hodnot řezných rychlostí, axiálních posuvů a přídavek na ostření, které jsou uvedeny v **tab. 4.1-1**, může být dosaženo dobrých výsledků. Musí přitom být použity vhodné nástroje a rovněž obrobky musí být vhodným způsobem opracovány v předchozích pracovních operacích.

4.2 Stroje a nástroje pro loupací odvalovací frézování

Na stejné odvalovací frézce je možné obrábět nekalená i kalená ozubená kola. Pro úspěšné tvrdé obrábění boku zubů ozubených kol je ale třeba dodržet určité body. Na tvrdě obráběná ozubená kola jsou často kladeny vyšší požadavky na přesnost než u kol nekalených. Navíc jsou při loupacím odvalovacím frézování běžné vyšší síly řezání než při dokončovacím odvalovacím frézování nekalených kol. Stroje tak musí být pro konkrétní úkol obrábění staticky, dynamicky i tepelně dostatečně tuhé s odpovídající geometrickou a kinematickou přesností [30]. Navíc mají stroje pro loupací odvalovací frézování téměř bez výjimky zařízení pro automatické vystředění předhrubovaného obrobku vůči nástroji.

Loupací odvalovací frézování lze realizovat i za sucha. Protože ale v tomto případě nejsou k dispozici procesní kapaliny, je potřebné provést zvláštní opatření k odstranění třísek a k zamezení nárůstu vnitřních zdrojů tepla ve stroji, např. v ložiskách pracovního vřetene.

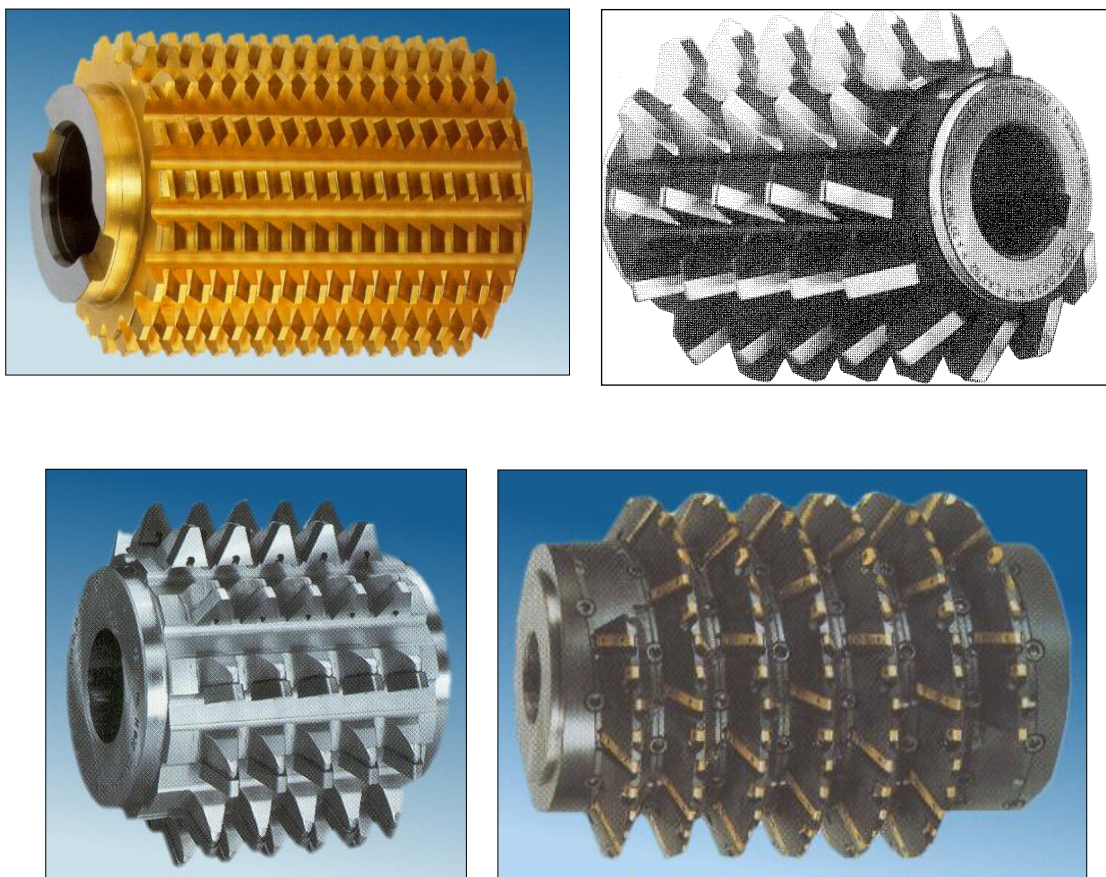


Obr. 4.2-1 Odvalovací frézka P 100
(přodorys)

Velmi dobré řešení tohoto úkolu je realizováno u strojů na principu konstrukce stroje P 100 (**obr. 4.2-1**). Stroj má horizontální umístění osy obrobku, axiální posuvový pohyb (Z) je prováděn obrobkem, radiální přísuv (X) nástrojem. Pracovní prostor je obložen plechy z ušlechtilé oceli. Stěny jsou umístěny vertikálně nebo pod velkým sklonem tak, aby třísky, které se při suchém frézování „rozstříkují“ prakticky všemi směry, klouzaly spolehlivě přes

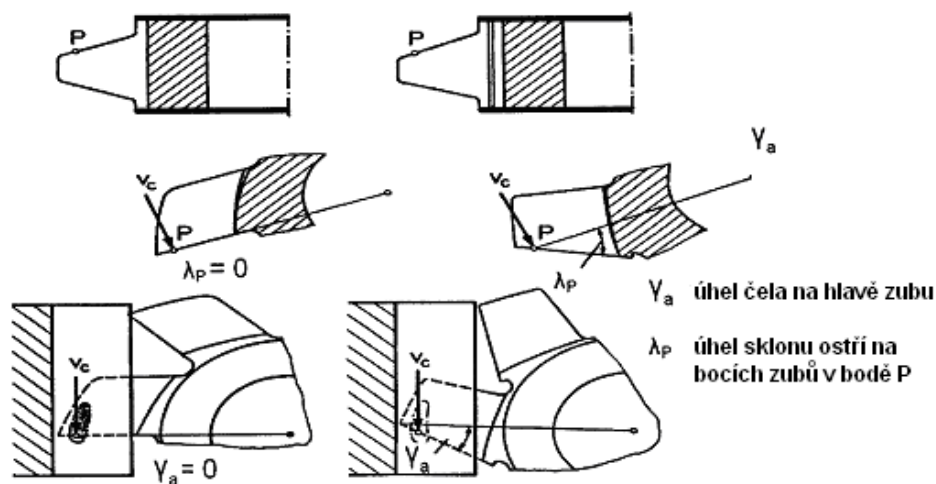
násypku na dopravník třísek. V pracovním prostoru se nachází pouze frézovací hlava a přední konec vřetene s obrobkem. Všechny ostatní konstrukční skupiny stroje jsou tepelně odděleny od pracovního prostoru a vhodně utěsněny proti třískám. Nástrojové i unášecí vřeteno má přímý pohon. Motory, uložení vřeten a lože jsou tepelně stabilizovány chladicí kapalinou s nuceným oběhem.

Loupací odvalovací frézy jsou vyráběny v nejrůznějších typech, existují monolitní frézy ze slinutých karbidů, frézy s připájenými nebo přilepenými břity ze slinutých karbidů, frézy s ozubenými hřebeny a frézy s vyměnitelnými SK destičkami nebo nožovými lištami. Obrázek 4.2-2 ukazuje příklady takových nástrojů. Loupací odvalovací frézy s vyměnitelnými SK destičkami a nožovými lištami se používají u obrobků s hrubší tolerancí profilu.



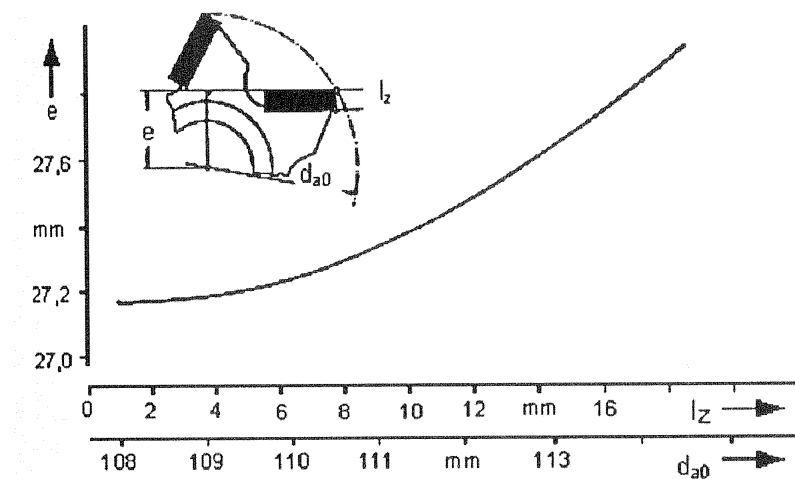
Obr.4.2-2 Konstrukce loupacích odvalovacích fréz

Pro loupací odvalovací frézování je charakteristický negativní úhel čela na hlavě zubu (**obr. 4.2-3**). Tento úhel způsobuje „loupací řez“. Dobré výsledky lze dosáhnout s úhly čela v rozmezí od -30° do -20° [31,32]. Pro loupací odvalovací frézy stejného modulu, průměru a počtu hřebenů platí: čím větší je úhel čela, tím menší je dynamicky buzené kmitání během obrábění. Snižuje se ale celkový využitelný přírůstek na ostření.



Obr. 4.2-3 Loupací řez u loupacích odvalovacích fréz

Loupací odvalovací frézy se ostří na čele. Přitom je třeba dbát na to, aby se excentricita e čela, tedy vzdálenost čela od osy frézy, při narůstajícím obroušení měnila v souladu s podklady výrobců nástrojů. Tyto podklady mohou být k dispozici ve formě diagramu (**obr. 4.2-4**) nebo tabulek pro ostření. Jestliže nejsou tyto souvislosti při ostření respektovány, vznikají při obrábění úhlové odchylky profilu.



Obr. 4.2-4 Diagram pro ostření loupacích odvalovacích fréz

Povlakované materiály byly dosud úspěšně použity jen v několika případech, a to při loupacím odvalovacím frézování [33, 34]. Ultrajemnozrné slinuté karbidy dosud ve srovnání s jemnozrnými nepřinesly podstatné zlepšení z hlediska opotřebení nástroje. Lze ale očekávat, že díky povlakování ultrajemnozrných slinutých karbidů (např. povlakem TiAlN) bude možné docílit podstatně příznivějších hodnot opotřebení, než je tomu dosud [35, 36].

Vedle „klasických odvalovacích fréz umožňuje program NNEON počítat i parametry loupacích odvalovacích fréz. Po zadání vstupních parametrů vyráběného ozubeného kola a základních parametrů nástroje nutných pro výpočet program provede:

- výpočet základních parametrů kola,
- výpočet parametrů profilu zubů,
- výpočet nebo přiřazení dalších základních konstrukčních parametrů nástroje.

Při výpočtu parametrů profilu těchto nástrojů bylo vycházeno z literatury [37,38], základní konstrukční parametry byly stanoveny na základě údajů uvedených v [39]. Parametry jsou shrnuty v **příloze 6.2**, výstup podprogramu na obrazovku je dokumentován v **příloze 6.5**.

4.3 Příprava obrobku před loupacím odvalovacím frézováním

Dobrá příprava obrobku před loupacím odvalovacím frézováním je základním předpokladem úspěšného tvrdého obrábění boků zubových. Zvláštní pozornost je třeba věnovat přídavku na bok zubu, přesnosti předchozích obráběcích operací, realizaci vodících ploch a tvrdosti obrobku. Navíc je třeba obrobky na obráběcím stroji bezvadně upnout a nasadit správně upnuté a vyrobené nástroje.

Přídavek na bok zubu by na jedné straně neměl být příliš velký, aby nedocházelo k velkým nákladům na nástroje a k velkým řezným silám. Na druhé straně musí být boky zubů čisté, i když kola vykazují před obráběním relativně velké odchylky na ozubení.

Skutečný přídavek na obrábění, který je potřeba při tvrdém obrábění odebrat, není konstantní. Mění se díky kolísání přídavku kolo od kola, mění se dále kvůli odchylce rozteče na obvodu obrobku, na základě odchylky sklonu zubu podél šířky zubu a kvůli odchylce profilu podél valivé dráhy. Při nepřesném vystředění ozubení vůči nástroji je pak zapotřebí odebrat rozdílné množství materiálu z pravého a levého boku zubu.

Dosedací plochy (vrtání, čelní plochy, hroty u hřídelových obrobků) bývají často pro tvrdé obrábění boků zubů realizovány tvrdým soustružením nebo broušením. Obrobky je třeba pro tyto operace polohovat tak, aby osa otáčení pokud možno odpovídala ose ozubení. Špatné polohování u těchto operací vede k odchylkám ozubení. Tyto odchylky sice většinou prakticky neovlivní pozdější chování kola v převodu, mohou ale vést k tomu, že jsou překročeny požadované dovolené odchylky ozubení a kolo je tak považováno za vadné.

Mnohdy je opotřebení nástroje silně ovlivněno tvrdostí obrobku. Tvrdost se mění se vzdáleností od povrchu obrobku. U výkresů většiny kol je požadovaná tvrdost udávána v jednotkách Rockwella (HRC). U těchto metod se pracuje se zkušebním zatížením 1500 N. Přitom jsou zjišťovány hodnoty tvrdosti, které zachycují i takové partie obrobku, které leží daleko od oblasti, ve které se má obrábět. Doporučuje se stanovovat tvrdost obrobku v tomto případě v jednotkách Vickerse. Při HV10 (HV 30) je zkušební zatížení jen 100 N (300 N).

Tvrdé dokončovací obrábění nástrojem ze slinutého karbidu je dnes možné realizovat pouze do maximální tvrdosti obrobku 800 HV 10. Jestliže je tato hranice překročena, hrozí nebezpečí, že se ostří vydrolí, nebo že na čele vzniknou trhliny lasturovitého tvaru. K zvláště

nevhodným poměrům s ohledem na tvrdost obrobku dochází tehdy, když obrobky nejsou vůbec, nebo jsou nesprávně zbaveny otřepů. V oblastech takovýchto primárních, příp. sekundárních otřepů dosahují hodnoty tvrdosti zpravidla podstatně vyšších hodnot než v ostatních místech na povrchu obrobku. Ještě méně příznivé poměry lze očekávat tehdy, když je před dokončovací obráběním proveden požadovaný proces kuličkování ozubení (zpevňovací otryskávání).

Na základě výše uvedených skutečností je třeba doporučit dokonalé odstranění ostřin, čisté provedení kalící operace a zpevňovací otryskávání neprovádět před tvrdým dokončováním. Tato opatření se příznivě projeví na nákladech na nástroj a na kvalitě obrobku.

Pro tvrdé dokončovací obrábění existují kritická a nekritická ozubení. Těžko obrobitelná jsou ozubení, u kterých se kružnice představující výběh hlavy nástroje vyskytuje v blízkosti patní, popřípadě základní kružnice. Hrubovací nástroj musí být dimenzován tak, aby potřebný přírůstek na bok zubu odpovídal výkresovým údajům. Podle okolností je třeba předepsat úzké tolerance pro výšku hlavy a velikost protuberance. Takový nástroj musí být nasazen za takových podmínek, pro jaké byl vytvořen. Jestliže je nástroj vytvořený pro určitou hodnotu přírůstku na bok zubu nasazen pro zhotovení jiného přírůstku, existuje nebezpečí, že patní kružnice, případně požadované sražení na hlavě zubu nebude odpovídat výkresu.

Podoba patní oblasti na obrobku při hrubovací operaci ovlivňuje nejen podmínky následného dokončovacího tvrdého obrábění, ale také provozního chování kol. Při dimenzování procesu je třeba sladit nástroje pro hrubování a pro obrábění na hotovo. Je třeba přezkoušet, zda nástroj v novém stavu nebo v konečném využitelném stavu nemůže způsobit nedovolené vruby nebo kolize hlavy s protikolem v převodu. Kontrola kolize v převodech musí zahrnovat tolerance nástrojů pro hrubování i dokončování, míru přes zuby hrubovaného i dokončeného ozubení a nejmenší vzdálenost os v převodu při největších průměrech hlavových kružnic. Pokud není tato kontrola provedena zodpovědně, je nutno v kritických případech počítat s problémy při záběrech kol převodů.



Shrnutí pojmů

V této kapitole jste se krátce seznámili s metodou dokončování ozubených kol, nejčastěji v zakaleném stavu. Jedná se o technologii loupacího odvalovacího frézování, která bude v budoucnu stále více konkurovat dnes daleko více zavedeným technologiím broušení.

Mezi základní výhody této technologie patří možnost obrábět ozubení na stejném stroji jako hrubování (odvalovací frézce) a díky nástroji s geometricky definovaným břitem je možno tuto metodu provádět i bez přítomnosti procesní kapaliny (což při procesech broušení nelze).

Nástrojem pro jmenovanou metodu je loupací odvalovací fréza, která se vyrábí ze slinutého karbidu a od běžných loupacích fréz se liší především zápornou geometrií na čelech

nástrojů. To umožňuje plynulý průnik nástroje do tvrzeného povrchu obrobku, čímž dochází k citlivějšímu záběru nástroje s ohledem na jeho opotřebení.



Kontrolní otázky

1. Kdy je možné u nástrojů na odvalovací frézování čelních ozubených kol použít jako nástrojový materiál slinutý karbid?
2. Co mají společného a čím se liší nástroje pro odvalovací frézování a pro loupací odvalovací frézování?



Úlohy k řešení

1. Navrhněte a vypočítejte loupací odvalovací frézu pro výrobu ozubení s parametry: $m_n=2,5$, $\alpha_n=20^\circ$, $\beta_0=25^\circ30'$ a nakreslete výkres nástroje.
2. Navrhněte a vypočítejte loupací odvalovací frézu pro výrobu ozubení s parametry: $m_n=3$, $\alpha_n=20^\circ$, $\beta_0=30^\circ52'12''$ a nakreslete výkres nástroje.
3. Navrhněte a vypočítejte loupací odvalovací frézu pro výrobu ozubení s parametry: $m_n=4$, $\alpha_n=20^\circ$, $\beta_0=21^\circ$ a nakreslete výkres nástroje.
4. Navrhněte a vypočítejte loupací odvalovací frézu pro výrobu ozubení s parametry: $m_n=5$, $\alpha_n=20^\circ$, $\beta_0=10^\circ$ a nakreslete výkres nástroje.

5 ODVALOVACÍ OBRÁŽENÍ KOTOUČOVÝM OBRÁŽECÍM NOŽEM

Odvalovací a profilové (tvarové) obrážení je jednou z nejuniverzálnějších metod pro obrábění ozubení a profilů. Je nezastupitelnou metodou nejen pro výrobu ozubení tradičních tvarů, jako u vnitřního ozubení, ale i pro zvláštní použití u nekruhových součástí. Přes omezenou produktivitu ve srovnání s jinými metodami, jako např. odvalovacím frézováním, existuje v oblasti technologie, strojů i nástrojů celá řada vývojových inovací, jejichž cílem je podstatně zlepšit hospodárnost a kvalitu metody.



Čas ke studiu: 8 hodin



Cíl: Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- ✚ Charakterizovat metodu odvalovacího obrážení s využitím obrážecího kotoučového nože určit oblast jejího použití.
- ✚ Popsat nástroje pro aplikaci této metody.
- ✚ Charakterizovat stroje pro obrážení ozubení pomocí obrážecího kotoučového nože včetně inovací v oblasti této metody

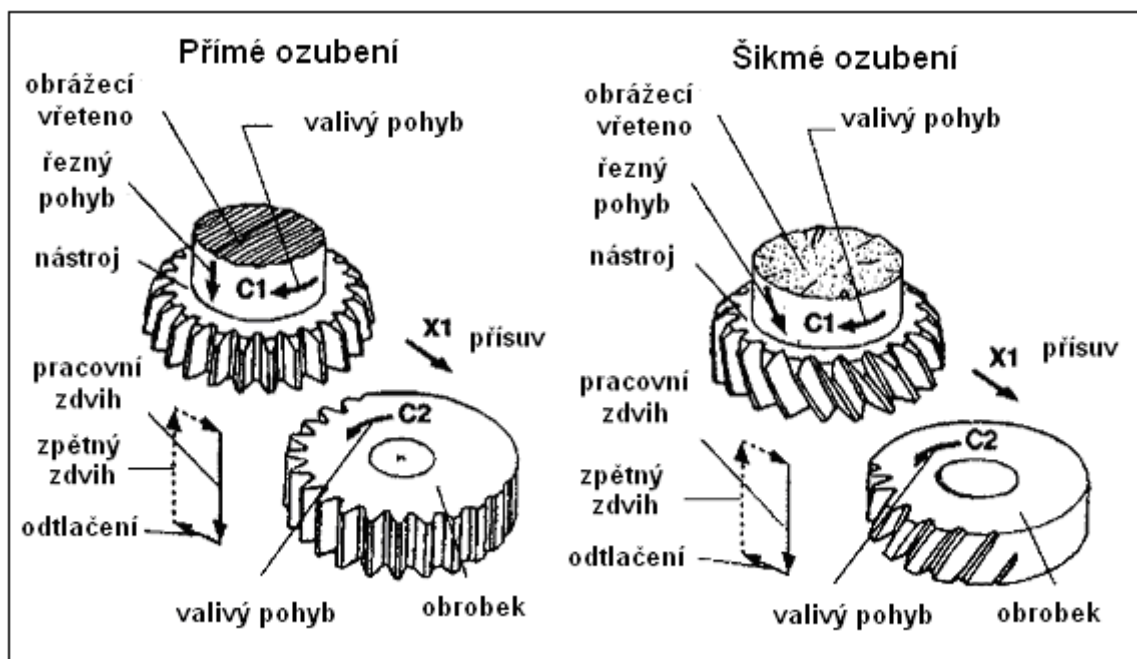


Výklad

5.1 Princip metody

U známých metod obrážení je hlavní řezný pohyb realizován pomocí lineární oscilace nástroje. Obrábění materiálu obrobku je přitom realizováno pouze při tzv. pracovním zdvihu, zatímco zpětný zdvih je uskutečňován bez kontaktu nástroje s obrobkem. Metoda odvalovacího obrážení je tak charakterizována posuvovým a přísuvovým pohybem, kdy dochází k současnému valivému pohybu obrobku a nástroje, který je mechanicky nebo elektronicky spojen. **Obr. 5.1-1** znázorňuje základní pohyby procesu odvalovacího obrážení pro případ přímo- a šikmозubého ozubení. Dodatečné otočení nástroje, potřebné pro výrobu šikmých zubů, se uskutečňuje vlastním vedením, které může být pevné mechanické, nebo také proměnlivé elektronické.

Kvalita výroby je ovlivněna vedle geometrie nástroje především synchronizací rychlostního poměru shora jmenovaných pohybů stroje. U moderních CNC řízených strojů je toto tzv. valivé spojení uskutečněno elektronicky řízením pohonů os.



Obr. 5.1-1 Princip odvalovacího obrázení ozubení s přímými a šikmými zuby [41]

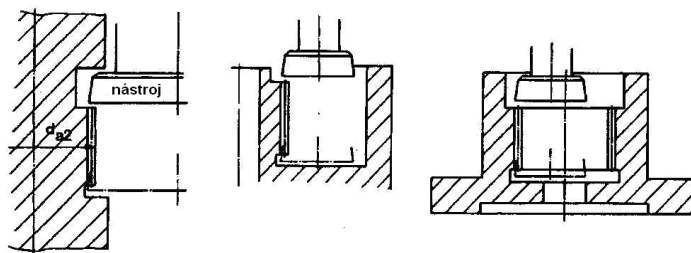
Vedle zobrazených hlavních funkcí existují u odvalovacích obrážecích přídavné funkce, které mohou být uváděny do činnosti podle provedení stroje manuálně, nebo na základě CNC řízení. Stroje pro hromadnou výrobu mají přitom zpravidla menší potřebu přestavování než stroje pro malosériovou výrobu, u kterých je často požadována vyšší „flexibilita automatizace“.

5.1.1 Podmínky záběru pro nástroj a obrobek

Při dimenzování procesu odvalovacího obrázení je třeba dbát na to, aby nedošlo na základě nevhodných geometrických poměrů mezi obrobkem a obrážecím kotoučovým nožem a nevhodně zvolených řezných podmínek k nechtěnému porušení procesu. Především u vnitřního ozubení jsou častým důsledkem špatně zvolených parametrů vysoký otěr nástroje, nedostatečná kvalita ozubení, nebo dokonce poškození obrobku a stroje.

Ve srovnání s jinými současnými metodami třískového obrábění potřebuje obrázení jen relativně malý výběh nástroje. Ozubení tak může být ohraničeno zápichem nebo nákrůžkem. Výběh nástroje se udává z potřebného přejezdu při změně směru zdvihového pohybu a z geometrie čela nástroje. Je třeba vždy dodržet dostatečně volný prostor pro odchod třísky.

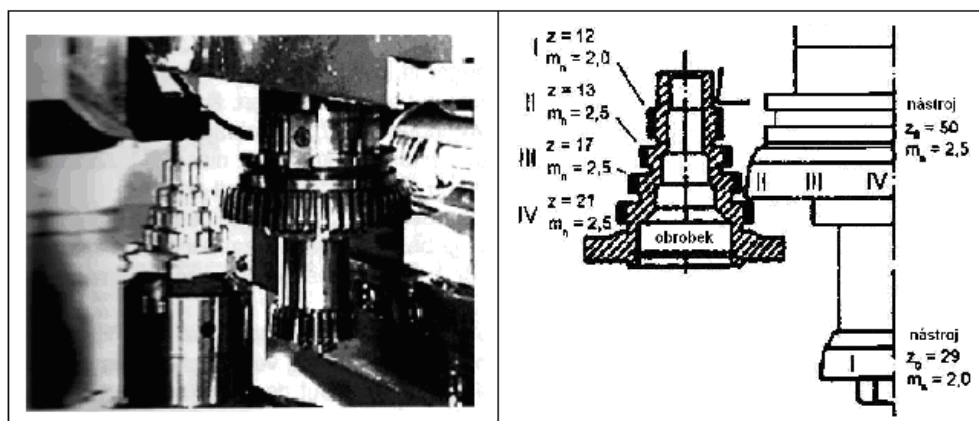
Odvalovací obrázení je vhodná metoda i pro obrábění ozubení, která leží uvnitř obrobku. Tato tzv. „hluboko položená“ ozubení jsou znázorněna na **obr. 5.1-2**. Čelní rovina ozubení přitom leží u vnitřního ozubení pod hranou obrobku. Analogicky jako u vnějšího ozubení, kdy je hlavový průměr menší než obrys obrobku. Takové ozubení lze velmi výhodně obrážet stopkovým nebo miskovým nástrojem. Už při navrhování součásti je třeba pamatovat také na vhodný odvod třísek a procesních kapalin.



Obr. 5.1-2 Hluboko umístěné ozubení pro odvalovací obrážení

5.1.2 Standardizace ozubení

Moderní CNC odvalovací obrážečky nabízejí zajímavou možnost zhotovovat v automatickém procesu obrábění rozdílná ozubení na jedno upnutí. Na **obr. 5.1-3** jsou na jedno upnutí obráběna čtyři ozubení. Jsou přitom použity dva nástroje, které jsou montovány na společný trn. To je možné provést tehdy, když tři ze čtyř ozubení vykazují stejný modul a jsou tak obráběny stejným nástrojem. Takové řešení lze aplikovat jak na podobné ozubení na stejných, tak na rozdílných obrobcích [41].



Obr. 5.1-3 Standardizace ozubení pro sdružené nástroje

U obrábění kol s podobnými parametry je na místě vždy otázka sdruženého nástroje. Vedle snížení počtu nástrojů a nákladů na tyto nástroje mohou být pozitivně ovlivněny průběh výroby a výrobní náklady. Po předběžné volbě profilu ozubení se tak konstrukce mění jen v závislosti na počtu zubů a posunutí profilu. Poté je však třeba provést pečlivou kontrolu ozubených soukolí, především s ohledem na patní a další užitečné průměry, hlavové a patní vřule, atd. vyrobené tímto nástrojem. Otázky optimalizace by měly být přednostně řešeny výrobcem nástrojů, aby mohlo být nalezeno nejlepší sladění mezi strojem a nástrojem.

5.1.3 Obrážení šikmého ozubení

Pro výrobu šikmého ozubení vyžadují odvalovací obrážečky speciální „šroubové vedení“, jehož výška a směr stoupání jsou totožné s nástrojem. V hromadné výrobě je zpravidla šroubové vedení pevně dáno podle obráběcích dat a podle použitého nástroje. Vedle relativně vysokých pořizovacích nákladů jsou šroubová vedení příčinou podstatných

výdajů i za seřízení a uložení. Snížení těchto nákladů a možnosti zajímavého vícenásobného obrábění je možné dosáhnout použitím „společného šroubového vedení“ [42].

Nevýhodná mechanická šroubová vedení jsou nahrazována novými konstrukčními přístupy ve směru plynule přestavitelného vedení. Všechna známá řešení jsou ale spojena s výrazným poklesem produktivity. To je odvozeno v první řadě z podstatného omezení maximálního počtu zdvihů a z toho vyplývajícího poklesu kvality ozubení. Kvůli těmto omezením nezískaly plynule přestavitelná vedení významné uplatnění pro výrobní stroje, jejich nasazení se omezuje na stroje pro výrobu malých dávek.

5.1.4 Odvalovací obrážení ozubení s různoběžnými osami

Odvalovací obrážecí stroje je možné pokládat za speciální stroje pro měkké obrábění ozubení. Lze jich použít nejen pro nasazení ve dříve uvedených případech, ale i pro výrobu ozubení se speciální geometrií. Mezi ně patří:

- kuželová ozubení s volným výběhem nástroje,
- složená ozubení,
- korekce ozubení.

Pro ozubení spojek a řazení, hřídele a náboje jsou často používána kuželová vnitřní a vnější ozubení. Boky zubů jsou odkloněny od osy podobně jako u pravých nebo levých šikmозubých ozubení. Taková ozubení je možno provádět s patou zubu rovnoběžnou s osou, nebo s patou kuželovou.

Výroba kuželového ozubení s kuželovou patou zubu je možné provést následujícím způsobem:

- šikmým umístěním osy nástroje pomocí výkyvného stojanu,
- šikmým nastavením osy obrobku pomocí výkyvného stolu,
- použitím speciální zvedací vačky.

Kuželová ozubení s rovnoběžnými patami zubů lze vyrábět přerušovaným obrážením pravých a levých boků zubů dvěma šroubovými vedeními. Nezbytná výměna šroubového vedení, použití dvou šikmých obrážecích nožů a fixace obrobku během obrážení druhého boku tak činí tuto výrobu velmi nákladnou. Je ale dosaženo vysoké kvality ozubení.

U složených ozubení jsou změny ozubení potřebné jen v úzké oblasti. Většinou se jedná o ozubení řazení, které jsou uložena rovnoběžně nebo kuželově vůči ose. Zvláštností je, že se výběh nástroje uskutečňuje uvnitř ozubení.

Chybějící volný výběh nástroje může mít za následek problémy při dodržení výkresových rozměrů a být příčinou nižší trvanlivosti nástroje a tvorby ostřin. Způsob výběhu na konci záběru je závislý na průběhu nástroje. Různá opatření, především použití speciální zvedací vačky, umožňují přiblížit se požadovanému tvaru výběhu při vysokém výkonu. Funkce obrobku nebo hrubování pro následné dokončení, např. po tepelném zpracování, způsobují náhodné korekce ozubení. V omezené míře a při splnění předpokladů ze strany stroje je odvalovací obrážecí stroj schopna obrážet ozubení s podélnou korekcí zubů.

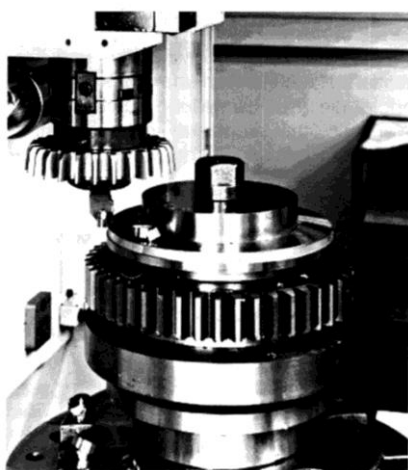
Takové korekce, tedy soudečkovitost nebo sražení hran na koncích zubů, je dosaženo řízeným radiálním pohybem nástroje pomocí speciální vačky. Maximální velikost korekce je ale omezena, protože excentricita vačky nemůže překročit určitou hodnotu.

5.1.5 Výrobní možnosti odvalovacích obrážecích

CNC-řízené odvalovací obrážecíky umožňují provádět jednotlivé osové pohyby navzájem odděleně, nebo ve vzájemné interpolaci. Vedle klasické odvalovací metody s kmitavým řezným pohybem nástroje jsou možné i jiné varianty. Spektrum obrážecích metod pro výrobu profilů a ozubení zasahuje daleko větší oblast než jen odvalovací obrážení ozubení. Metody lze obecně rozdělit do dvou skupin, a to na metody s kmitajícím vřetenem jako hlavním řezným pohybem a na obrábění s nekmitajícím vřetenem.

V oblasti kmitavého řezného pohybu můžeme rozlišovat další varianty:

- obrábění dlouhých profilů dlouhými zdvihy nebo po krocích zdvihy kratšími (metoda SSM – Shuttle Stroking Metod),
- možnost volby technologie „obrážení“ nebo „protahování“,
- rozdělení do jedné ze tří skupin: „odvalovací, odvalovací s dělením, profilová“, kdy dochází vždy k omezenému pohybu C1 nebo C2 dle **obrázku 5.1-1** [43]
- konstantní nebo proměnný poměr valivého spojení.



U metod bez kmitavého řezného pohybu vřetene s nástrojem mohou být řezné pohyby nástroje prováděny libovolně s využitím rotačních os C1, příp. C2, nebo lineárních os X1, resp. X2. Za předpokladu použití vhodného nástroje tak lze docílit obráběcích procesů srovnatelných se soustružením, frézováním nebo obrážením drážek – viz **obr. 5.1-4**.

Obr. 5.1-4 Soustružení na odvalovací obrážecce [41]

5.2 Konstrukce strojů

Uspořádání uzlů na odvalovacích obrážecích znázorňují obrázky 5.2-1 a 5.2-2. Charakteristické pro konstrukci moderních odvalovacích obrážecích obou variant je umístění lože stroje a radiálně přestavitelný stojan. Konvenční konstrukce bez saní obrážecí hlavy, tedy stroj pro nasazení v hromadné výrobě, je uvedena na **obr. 5.2-1**. Konstrukce stroje, opatřeného vedením obrážecí hlavy, která je vhodná pro použití s vyššími nároky na flexibilitu, je znázorněna na **obr. 5.2-2**.

Varianta s vedením obrážecí hlavy získává svou flexibilitu oddělením nastavitelných funkcí přestavení polohy zdvihu a délky zdvihu. U konvenčního stroje jsou obě tyto funkce uskutečněny jedním „prodloužením“ nebo posunutím zdvihacího vřetene v pracovním

prostoru, obrážecí hlava samotná přitom nemění polohu. Maximální hodnoty nastavení polohy a délky zdvihu se u této konstrukce navzájem omezují.

Použitím vedení obrážecí hlavy prostřednictvím saní se otevírají nové možnosti pro obrábění. Technicky je realizováno vedení obrážecí hlavy dodatečnou lineární osou ve směru osy Z, pomocí které je možné přemísťování celé obrážecí hlavy do pracovního prostoru. Díky velké přestavitelné dráze je možné realizovat velké zdvihy a vyrábět tak sdružená ozubení na jedno upnutí při odpovídajícím snížení nákladů na přípravky.



Obr. 5.2-1 Konstrukce obrážecky bez saní obrážecí hlavy [44]

Kvůli nezávislosti nastavení polohy a délky zdvihu je k dispozici celý prostor, který nabízejí rozměry stroje. Na základě vzniklého zkrácení délky vyložení obrážecího vřetene je možné pracovat s vyššími řeznými parametry.

Vedle technických předností, které s sebou přináší realizace saní pro obrážecí hlavy, vznikají také ekonomické výhody snížením vedlejších časů, menšími náklady na přestavení, konstrukci přípravků a přepínání obrobků.

Moderní odvalovací obrážecky mají vlastní pohon pro otáčení obrobku i nástroje. Synchronizace obou těchto valivých pohybů přebírá elektronický převod. Toto elektronické valivé spojení je potřebné pro realizaci dříve uvedených pracovních postupů a pro realizaci speciálních úkolů, o kterých bude ještě hovořeno. Často jsou v konstrukcích strojů používány ještě šnekové převody, ale i zde se pomalu prosazují přímé pohony, jak je vidět u stolu na **obr. 5.2-1**.

Na obrázcích jsou znázorněny další důležité strojní uzly odvalovací obrážecky. Patří sem stůl stroje, ve kterém je umístěn stůl pro upnutí obrobku, radiálně přestavitelný stojan s vedením a případně s vertikálně přestavitelnými saněmi obrážecí hlavy, v nichž je tato hlava pohyblivá. Obrážecí hlava získává vedle dělicího mechanismu pro valivý pohyb obrobku

i pohon pro zdvih pro realizaci rotačního pohybu spolu s lineárním vratným zdvihovým pohybem obrážecího vřetene. Tato skutečnost je u malých konstrukcí strojů realizována posuvovým pohonem. U velkých strojů je pohon zdvihu realizován hydraulicky. Obrážecí vřeteno je u všech typů strojů uloženo hydrostaticky.



Obr. 5.2-2 Konstrukce obrážecky se saněmi obrážecí hlavy [44]

V poslední době byly podniknuty důležité kroky k podpoře ekonomického nasazení odvalovacího obrážení. Jsou nabízeny stroje, které mohou obrábět úzká ozubení s frekvencí až 3000 zdvihů za minutu, tedy 50 Hz bez ztráty kvality [45]. Pomocí výkyvného stojanu nebo stolu jsou vyrobitelná kuželová ozubení. Mohou být dále použity výsuvné vícenásobné zdvihové vačky, aby bylo možné obrážet rozdílná ozubení, např. vnější a vnitřní na jedno upnutí. Výměnou vačky je tak možno měnit automaticky směr zdvihu.

Prudký vývoj řídicí techniky a pohonů spolu s výkonnými elektronickými převody vedly k tomu, že byla další mechanická spojení nahrazena elektronickými. Zdvihové vačky jsou tak dnes obecně opatřeny vlastními pohony a nezbytná synchronizace se zdvihovým pohybem realizována čistě elektronicky.

Pro obrábění větších šířek ozubení je nabízena funkce „zrychleného zdvihu naprázdno“, aby se co nejvíce zkrátil neproduktivní čas obrábění. Díky opatřením ze strany řízení a pohonů je možné docílit u zpětného zdvihu až čtyřikrát vyšší rychlosti než u zdvihu pracovního.

Odvalovací obrážecky jsou konstruovány pro rozdílné rozměry a velikosti obrobků. Pokud je to možné a vhodné, jsou používány základní skupiny i periferie tak, aby pokryly rozdílné kategorie strojů. Vzniká tak stavebnicová koncepce, která přináší přednosti při výrobě a servisu takových strojů.

Možnost kombinace přináší nejen přednost při použití stejných základních konstrukčních skupin pro rozdílné technologie, ale umožňuje používat menších obráběcích hlav ve větších strojích. Tak je možné např. hospodárněji vyrábět úzká ozubení na velkých průměrech obrobků, než bylo možné s původní koncepcí. Na **obr. 3.2-1** a **5.2-1** jsou znázorněny odvalovací frézka a obrážčečka, které jsou s výjimkou obráběcích hlav konstruovány z identických konstrukčních skupin.

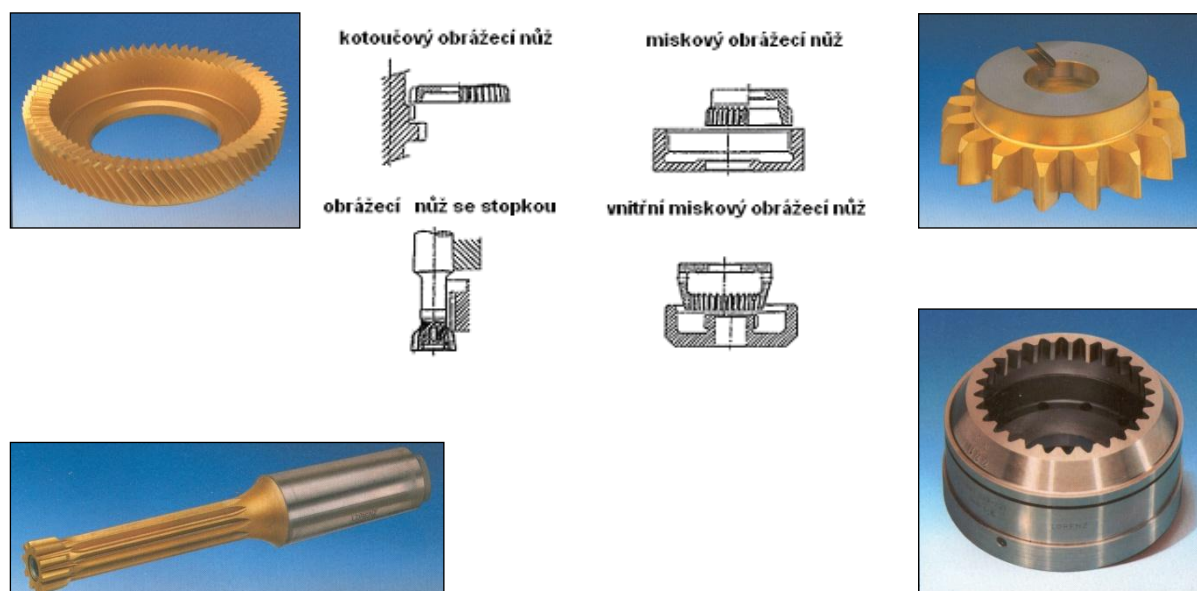
5.3 Nástroje pro odvalovací obrážení

Pro optimální výsledek obrábění má při odvalovacím obrážení rozhodující vliv nástroj. Záleží přitom nejen na správné volbě řezné geometrie, ale např. také na kvalitním a tuhém upnutí a na stavu a seřízení nástroje. Na **obr. 5.3-1** a **5.3-2** je přehled nástrojů, které jsou pro tuto metodu k dispozici. Prakticky všechny nové nástroje jsou opatřeny tvrdými povlaky, které mnohonásobně prodlužují jejich životnost. Přeastřované nástroje jsou pak po ostření částečně znovu povlakovány. Nedojde-li po ostření k opětovnému napovlakování na čele, trvanlivost nástroje prudce poklesne.

Vedle základních typů nástrojů, které se od sebe liší hlavně geometrií, existují odlišné znaky, jako například obrážecí kotoučové nože s přímými nebo šikmými zuby, dělené obrážecí kotoučové nože s rozdílnou tloušťkou zubu a výškou hlavy zubu na obvodu, nebo obrážecí kotoučové nože s bloky zubů nebo mezer.

5.3.1 Přeastřované obrážecí kotoučové nože

Obr. 5.3-1 znázorňuje nejčastější typy ostřitelných odvalovacích kotoučových nožů a jejich nasazení v typických situacích. Kritérium pro jejich nasazení se dá shrnout následovně.



Obr. 5.3-1 Obrážecí kotoučové nože vhodné pro přeastření

Obrážecí kotoučové nože jsou nejpoužívanějším typem nástroje pro tuto technologii. Pro normalizovaný úhel záběru 20° jsou hlavní rozměry obrážecích nožů s přímými zuby normovány včetně dovolených tolerancí jednotlivých veličin pro zařazení do rozdílných tříd kvality.

Obrážecí kotoučové nože nejvyšší kvality AA by měl být pro kontrolu kvality opatřeny i nákrůžkem pro obvodové házení. Jako všechny ostřitelné nástroje mohou být i obrážecí kotoučové nože přebrušovány na čele. Pokud neexistuje žádný zvláštní předpis pro nástroj, činí velikost úhlu čela 5° . Obrážecí nože s přímými zuby jsou ostřeny na čele jako plocha kuželová, u šikmých zubů se jedná o čela stupňovitá.

Miskové obrážecí kotoučové nože s přímými zuby se používají tehdy, když upevňovací matice obrážecího nože nesmí přecházet přes ostří nástroje. Typickými případy použití jsou proto přírubová kola nebo vnitřní ozubení s dny. Tvar nástroje je vytvořen tak, aby ani v pracovní poloze upevňovací matice nepřecházela.

Stopkové obrážecí kotoučové nože jsou nože s velmi malým jmenovitým průměrem, které už nelze vyrobít s upínacím otvorem. Z toho důvodu jsou nástroje opatřeny upínacím kuzelem. Délky nástrojů jsou stanoveny tak, aby také u opotřebeného nástroje byla k dispozici potřebná užitečná délka. Pracovní přesnost stopkových obrážecích kotoučových nožů se s rostoucí celkovou délkou zmenšuje. Délky nástrojů tak mohou být pouze takové, jak je pro danou situaci nezbytně nutné.

Vnější ozubení, které se nalézá uvnitř obrysu obrobku, se dá často jen velmi těžko vyrobít, přičemž lze použít pouze malý stopkový nůž. Pro jeho malý počet zubů je ale toto provedení nástroje nevhodné. Požadovaný tvar zubu nelze vždy vytvořit a náklady na nástroje jsou relativně velké. Vhodnou alternativou může být miskový nůž s vnitřním ozubením. Při jeho nasazení ale musí být respektována určitá omezení. Přestřovatelné vnitřní miskové kotouče mají požadovaný profil pouze jako nové, a mohou být opotřebené jen do určité míry. Neostřené vnitřní nože jsou vyrobitelné jen s omezenou přesností.

Pro obrábění přímých zubových mezer a klínových drážek s paralelními boky mohou být použity nástroje s jedním zubem (tvarové nože). Podle konstrukce mohou pracovat dělicím nebo odvalovacím způsobem. U dělicí metody se nástroj během zdvihového pohybu radiálně přisouvá až do dosažení plné hloubky zubu. Následuje dělení (otočení stolu) a celý proces se opakuje. Tento pracovní postup je možný na každém CNC stroji bez dodatečného zařízení a nabízí se jako kombinovaná metoda obrábění tehdy, když na obrobku kromě ozubení má být obrobena ještě drážka nebo jiný prvek. Do obrážecího vřetene je v takovém případě upnut kombinovaný nástroj (obrážecí kotoučový nůž a tvarový nůž).

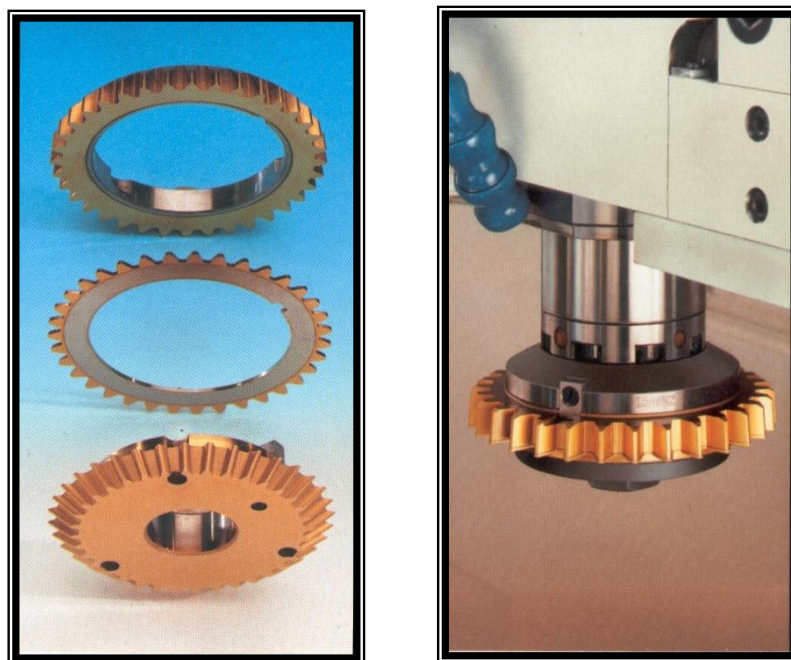
Ve zvláštním případě je možné jednozubového nástroje použít i při odvalovací metodě. Zub nástroje se po opracování zubové mezery odsune o zubovou rozteč a v další zubové mezeře se proces opakuje. Tuto metodu lze použít, pokud existují extrémní problémy s místem nebo zvýšené požadavky na kvalitu. Na obvodu nástroje může být umístěno více zubů. Po dosažení kritéria opotřebení zubu se nástroj otočí a do záběru se dostane další neopotřebený zub.

5.3.2 Nástroje na jedno použití

Při odvalovacím obrázení se přednostně používají povlakované obrážecí kotoučové nože, u kterých stále převládá povlak TiN. Dosažitelná trvanlivost ale po prvním ostření opotřebovaného nástroje výrazně klesá, pokud po ostření zůstanou čela nepovlakovaná. Aby se tento nedostatek odstranil, jsou nasazovány nástroje na jedno použití, které jsou povlakovány na všech funkčních plochách a po dosažení kritéria opotřebení se už nepřeostřují [46].

Pokud nebudou tyto nástroje přeastřovány, mohou být vyrobeny levněji a úhly hřbetu mohou být voleny bez ohledu na odchylky profilu, které by nastaly při ostření. Břity nástroje se nacházejí vždy ve stejné poloze, čímž odpadá přestavování zdvihu po výměně nástroje.

Rozšířeným typem nástroje na jedno použití jsou tzv. odvalovací nože Wafer. Skládají se z opěrného, pracovního a upínacího kroužku (**obr. 5.3-2**).



Obr. 5.3-2 Planžetový nástroj pro odvalovací obrázení

Wafer je tenká RO destička s TiN povlakem, která se upíná mezi ochranný a upínací kroužek tak, aby na spodní straně vznikl úhel čela cca 5°. Pro každý rozměr planžety se používá zvláštní opěrný kroužek, který podpírá planžetu v celém profilu zubu. Planžetový nástroj se ve smontovaném stavu upíná do obrážecího vřetene jako konvenční obrážecí kotoučový nůž. Tloušťka zubu a průměr každého planžetového nástroje jsou zhotovovány v úzkých tolerancích. Při výměně nástroje proto odpadá seřizování osové vzdálenosti a přestavování zdvihu.

Planžetové nástroje mají zřetelné výhody i nevýhody. K výhodám patří:

- vždy plně povlakované plochy na pracovní části nástroje,
- není nutné přestavování zdvihu po výměně nástroje,

- není nutná korekce radiálního přísuvu při výměně nástroje,
- profil zubu kola je konstantní i po výměně nástroje.

Nevýhody planžetových nástrojů jsou:

- jsou vhodné pouze pro přímé zuby,
- místo pro opěrný kroužek nelze zmenšit,
- planžetami nelze osadit zpravidla miskové obrážecí nože.

Výhod planžetových nástrojů využívá a nevýhody podle možností odstraňuje planžetový nástroj s větší šířkou ozubení nazývaný Solid Wafer. Jsou schopny vyrábět i šikmé zuby a nahradit přestřovatelné miskové nože. Solid Wafer je kotoučový nástroj tloušťky asi 8 mm, který svou geometrií odpovídá plně vyostřenému kotoučovému obrážecímu noži a po ukončení trvanlivosti se již neostří. U tohoto nástroje nejsou nutné speciální elementy jako upínací a opěrné kroužky. Držák nože ale musí nástroj dostatečně vyztužit. U velkých výšek zubů se tak doporučuje pro zvýšení spolehlivosti nástroje použít ozubeného držáku nebo opěrného kroužku.

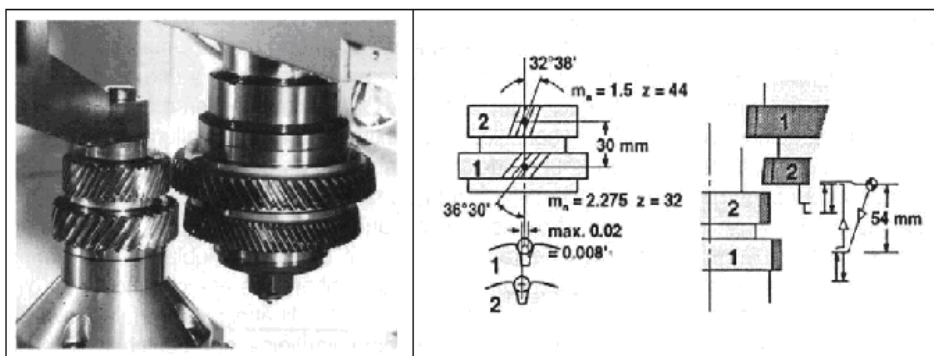
5.4 Inovativní aplikace metody a její kombinace s jinými metodami obrábění

Moderní odvalovací obrážecíky s CNC řízením umožňují obrábět nejrůznější profily obrobků. Vedle standardního nasazení pro odvalovací obrázení rotačně symetrických profilů mohou být z hlediska hospodárnosti v mnoha případech zajímavé sdružené nebo kompletní obrobení součásti na jedno upnutí. V následujícím textu budou uvedeny některé příklady použití. Jejich volba má ukázat jednak mnohostrannost metody odvalovacího obrázení, jednak ukázat na skutečnost, že na odvalovací obrážecíky je nutné pohlížet jako na speciální stroje pro měkké třískové obrábění [47].

5.4.1 Odvalovací obrázení polohově orientovaného šikmého ozubení

Mnoho obrobků vyžaduje pro svou funkci a montáž polohově orientované vzájemné ozubení, nebo vůči referenčnímu místu na obrobku. Při výrobě je nutná zásadní polohová orientace obrobku a nástroje vůči definovanému referenčnímu bodu. Příklad pro požadavek vzájemné polohové orientace většího počtu ozubení je uveden na **obr. 5.4-1**. Jsou vyráběna dvě rozdílná šikmá ozubení se stejným úhlem stoupání [43]. Pro rovnoměrný přenos sil planetovými koly smí být relativní úhel vyosení ozubení jen několik minut. Požadované extrémní přesnosti je dosaženo na CNC odvalovací obrážecce s automatizovaným sledem operací, to znamená, že obrobek bude opracován kompletně na jedno upnutí. Předseřizené nástroje jsou proměřeny a data přenesena do NC řízení stroje. Bez dalšího ustavování mohou být obě ozubení obrobena na jednom místě.

Vhodnou volbou počtu zubů nástroje je možné v tomto případě použít společného šroubového vedení. Během procesu obrázení jsou nástroje prostřednictvím automatického přestavení zdvihu (osa Z1) přivedeny po sobě do záběru. Elektronické valivé spojení realizuje valivý převod a dbá na exaktní nastavení polohy. Ve srovnání s dřívější výrobou rozdílnými technologiemi na různých strojích je možné zkrátit čas obrábění a zvýšit jeho přesnost.



Obr. 5.4-1 Polohově orientované šikmé ozubení na dvojitém planetovém kole

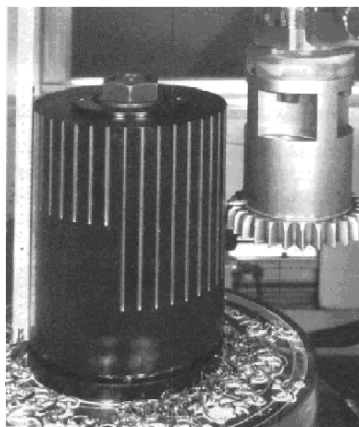
5.4.2 Ozubení s nadměrnou šířkou a omezeným výběhem nástroje (SSM-metoda)

Šířka zápichu na konci zdvihu stroje závisí při procesu obrábění zpravidla na šířce ozubení obrobku. Podstatné zmenšení šířky zápichu, případně jeho úplnou absenci, tzn. výběh nástroje uvnitř ozubení, umožňuje metoda SSM. Tento název je zkratkou metody Schuttle-Stroke-Method. Touto zkratkou jsou označovány postupy, kdy jsou výběh nástroje a šířka zápichu nezávislé na šířce ozubení.

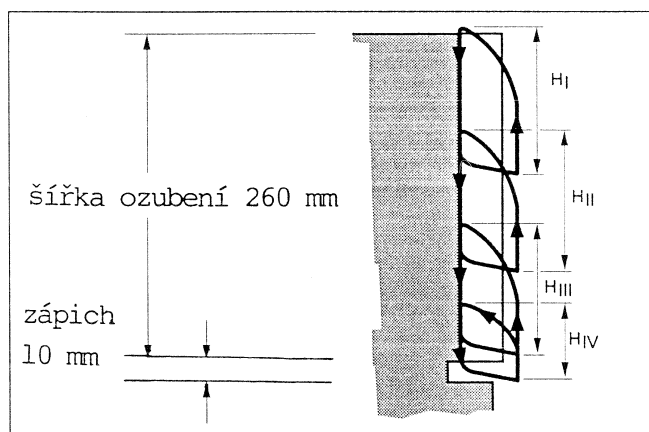
U metody SSM se obrábění libovolného profilu uskutečňuje rozdělením délky profilu do „dílčích délek“ a hloubky profilu do „dílčích hloubek“ (**obr. 5.4-2**). Dílčí délky jsou voleny podle šířky ozubení, způsobu výběhu nástroje a na základě technologických hledisek. Potřebné dílčí hloubky se odvozují od hloubky profilu a požadované kvality obrobení. Speciální zdvihová vačka umožňuje vhodné řezné podmínky na výběhu nástroje při maximálním přísuvu 2,5 mm na jeden obráběcí krok. Celkové rozdělení řezu se uskutečňuje automaticky podle zadaných veličin. Při omezeném výběhu nástroje, např. při úzkém zápichu na konci ozubení, může být během procesu uskutečněno více změn délek zdvihů. Je tak možné dosáhnout i dostatečného překrytí oblastí dílčích délek a zabránit tak kolizi v místech výběhů nástroje (**obr. 5.4-3**). Podobným způsobem je možné vyrobit výběh ozubení bez dříve potřebného zápichu ve srovnání s odvalovacím frézováním je tak dosaženo velmi krátkých výběhových délek.

Pro realizaci metody SSM je nezbytným předpokladem použití CNC odvalovací obrážecí s vedením saní obrážecího vřetena. Pro obrábění jsou uváděny následující možnosti a výhody metody [48]:

- obrábění ozubení s nadměrnou šířkou, která přesahuje pracovní rozsah stroje,
- obrábění „prodloužených“ profilů vyšší řeznou rychlostí,
- obrábění obrobků s minimálním výběhem nebo bez volného výběhu nástroje, nezávisle na šířce ozubení,
- podstatné zvýšení řezných podmínek a zkrácení výrobních časů.



Obr. 5.4-2 Metoda SSM



Obr. 5.4-3 Rozdělení šířky ozubení na dílčí délky

Na **obr. 5.4-3** je znázorněn postup obrážení přímého ozubení s nadměrnou šířkou, která činí 260 mm. Ozubení je ohraničeno zápichem o šířce 10 mm. U konvenčních strojů odpovídá této šířce ozubení potřebná délka zdvihu asi 295 mm. Tak velkou délku zdvihu mají jen poměrně velké a drahé stroje s nižším rozsahem počtu zdvihů. Opracování malých obrobků s nadměrnou šířkou ozubení je tak na těchto strojích značně neefektivní.

Rovněž malá šířka zápichu neodpovídá obvykle požadované velikosti výběhu nástroje, protože při vysokých výkonech potřebují velké konvenční obrážečky dostatečný prostor pro odebírané třísky. Šířka zápichu by v takovém případě měla činit minimálně 25 mm. Zmenšení prostoru pro odebírané třísky by znamenalo výrazné snížení výkonu při obrážení.

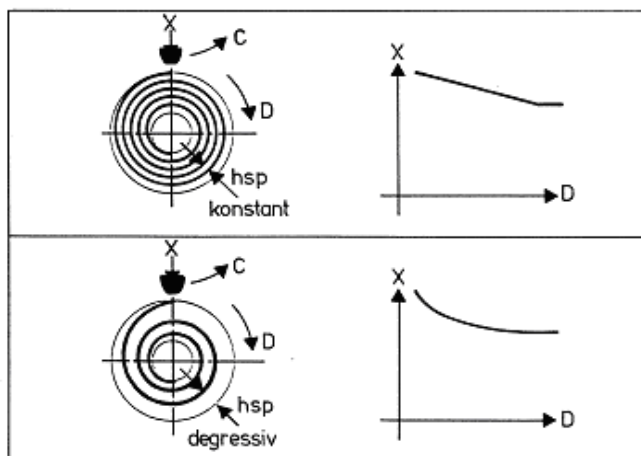
Pomocí metody SSM lze ozubení efektivně opracovat na hotovo v plně automatickém pracovním cyklu. Tento cyklus je rozdělen na 36 jednotlivých kroků, při kterých se šířka ozubení rozdělí do čtyř dílčích délek a výška zubu do devíti dílčích hloubek. Postupnými řezy v dílčích délkách a odpovídajících dílčích hloubkách se ozubení opracuje na hotovo v celé šířce 260 mm. V důsledku překrytí obou délek zdvihu H_{III} a H_{IV} vznikají při obrážení třísky s malým průřezem, které vyžadují pouze malý zápich. Zvolená relativně malá délka zdvihu H_{IV} dovoluje obrážet ozubení s krátkým výběhem nástroje, přičemž je současně omezena možnost vzniku hran na konci ozubení. Postupem Shuttle-Stroke Metod (SSM) lze tento obrobek opracovat na hotovo s vysokou produktivitou a efektivností v 8. jakostní třídě podle DIN 3962 [42].

5.4.3 Spirální najíždění s degresivním radiálním přísuvem (CCP)

Při spirálním najíždění nástroje s degresivním radiálním přísuvem (Controlled Cutting Process – CCP) se rychlost radiálního přísuvu postupně zmenšuje, přičemž objem odebírané třísky zůstává během procesu obrážení přibližně konstantní. Na rozdíl od spirálního najíždění s konstantním radiálním přísuvem, kdy se v závislosti na rostoucí hloubce zubové mezery zvětšuje i objem odebrané třísky a plynule tak roste zatížení stroje a nástroje až do dosažení požadované hloubky zubové mezery, je výsledkem procesu CCP obrážení s konstantní řeznou silou a neměnným napružením celého kinematického řetězce. To vede k lepšímu využití nástrojů a k zvýšení kvality povrchu obráběného ozubení [49].

Obr. 5.4-4

Spirálové najíždění s konstantním a degressivním radiálním přísvem



Postupem CCP lze několika málo obrážecími zdvihy docílit vytvoření zubové mezery, přičemž průřezy třísek budou nejen větší, ale především symetrické mezi nabíhajícími a vybíhajícími boky zubů. Porovnání konvenčního způsobu obrážení s postupem CCP je na **obr. 5.4-5**. Postupem CCP lze geometrickým parametrům obrobků a nástrojů přizpůsobit velmi vysoké kruhové posuvy a jím odpovídající radiální přísuvy. Následné obrážení na čisto s maximálními kruhovými posuvy a řeznými rychlostmi až $130 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ vede k velmi krátkým dokončovacím časům a tím i ke zkrácení celkového času obrážení [50].

Obr. 5.4-5

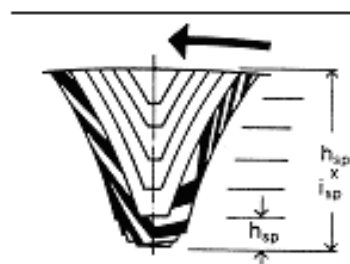
Konvenční způsob obrážení (průřezy třísek jsou mezi nabíhajícími a vybíhajícími boky zubů rozloženy nerovnoměrně).



Postup spirálního najíždění s degressivním radiálním přísvem (průřezy třísek jsou mezi nabíhajícími a vybíhajícími boky zubů rozloženy symetricky)

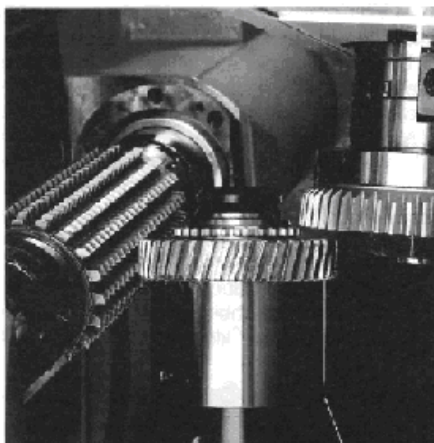
h_{sp} ... radiální přísv za 1 otáčku obrobku

i_{sp} ... počet otáček obrobku do dokončení hrubování



5.4.4 Kombinace odvalovacího frézování s odvalovacím obrážením

Jak už bylo možné vidět dříve, lze na odvalovacích obrážecích doplnit základní proces o vedlejší metody. Nápomocné jsou při tom nejrůznější stavebnicové a plošinové konstrukce. **Obr. 5.4-6** představuje pracovní prostor kombinovaného stroje pro frézování a obrážení odvalovacím způsobem, na kterém lze současně frézovat šikmé ozubení hnaného kola a obrážet přímé ozubení spřaženého kola.

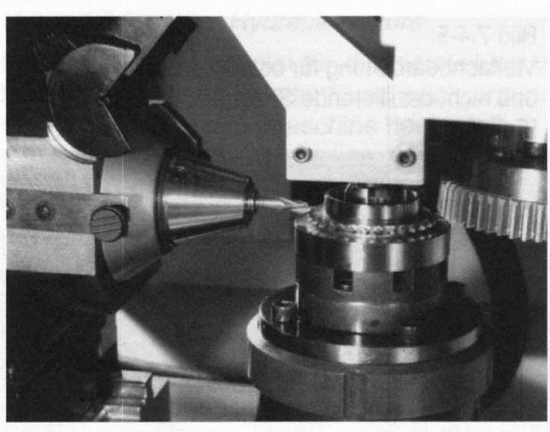


Obr. 5.4-6 *Kombinace odvalovacího frézování a obrážení na jednom stroji*

U koncepcí tohoto druhu má velký význam vhodné sladění rozdílných technologií odvalovacího frézování a obrážení, protože obě metody mají k dispozici společný počet otáček obrobku. Pro optimalizaci procesu nabízí nejlepší možnosti výkonné obrážecí jednotky s velkou rezervou v počtu zdvihů [45].

5.4.5 Kombinace odvalovacího obrážení a zkosení hrany

Další doplnění odvalovacích obrážecích představuje použití zařízení pro srážení hran. Spřažená ozubení u ručních převodovek vyžadují pro bezvadný průběh řazení speciálně vyostřené prizmatické zuby. V mnoha případech jsou používány pro vyostření zubů speciální stroje.



Obr. 5.4-7 *Kombinace odvalovacího obrážení a zkosení na jednom stroji [45]*

Obr. 5.4-7 ukazuje pracovní prostor odvalovací obrážecí s integrovaným úkosovým zařízením. Obrys obrobku vzniká fázovým překrytím výhradně vertikálního zdvihového pohybu frézovacího vřetene s otáčivým pohybem obrobku. Synchronizace těchto pohybů se uskutečňuje pomocí vhodného elektronického převodu. Programovou změnou převodových parametrů je možné libovolně měnit úhel sražení nebo vytvářet kruhové zkosené tvary.



Shrnutí pojmů

V této kapitole jste se seznámili s metodou odvalovacího obrážení s využitím obrážecího kotoučového nože. Jedná se o metodu, používanou přednostně pro obrábění vnitřního ozubení a vnějšího ozubení s omezeným výběhem nástroje. Ve srovnání s metodou odvalovacího obrážení s využitím hřebenového obrážecího nože jde o metodu produktivnější.

Dozvěděli jste se dále základní informace o konstrukci strojů pro realizaci této metody včetně nejčastěji používaných nástrojů.

Obsáhle se kapitola věnuje inovacím v technologii obrážení ozubení, především s ohledem na novinky v oblasti konstrukce nástroje a pak především s inovacemi za účelem zvýšení univerzálnosti metody a zkrácení výrobních časů.



Kontrolní otázky

1. Pro jaká ozubená kola se používají přednostně jako nástroje obrážecí kotoučové nože?
2. Jakými geometrickými plochami jsou hřbetní plochy na bocích zubů obrážecích kotoučových nožů?
3. Jakými plochami jsou plochy čela obrážecích kotoučových nožů?
4. Jakým způsobem byste ostřili obrážecí kotoučový nůž?



Úlohy k řešení

1. Obrážecí kotoučový nůž simuluje při obrážení záběr ozubeného kola. Čím se liší tento nástroj od skutečného ozubeného kola s ohledem na jeho parametry?
2. Jaký bude úhel hřbetu v normálové rovině v kterémkoliv bodě profilu zubu obrážecího kotoučového nože co do velikosti a čemu bude roven?
3. Ve které rovině nástrojové geometrie bude úhel čela obrážecího kotoučového nože nulový?
4. O novém obrážecím kotoučovém noži můžeme hovořit jako o „ozubeném kole“ korigovaném, nebo nekorigovaném?

6 PŘÍLOHY

6.1 Přehled vstupních a výstupních parametrů podprogramu „Odvalovací fréza“

VSTUPNÍ PARAMETRY			
Parametry obráběného kola		Parametry nástroje	
m, z, α, x ,druh materiálu (charakterizovaný konstantami c_c, x_c, y_c)		profil, přesnost, $s_{s\dot{s}r}, d_{hn}, E, y_p, s_s, \alpha_{fA}, R_k, i_n$	
VÝSTUPNÍ PARAMETRY			
Základní parametry obráběného ozubeného kola			
viz Příloha 6.3			
Parametry profilu			
Závisí na druhu profilu (viz Příloha 6.3)			
Konstrukční parametry			
L_{zn}	$L_{zn} = 4,5 \cdot t_n + 12$	H_{dn}	$H_{dn} = \frac{\pi \cdot d_m}{\tan \beta_{zn}}$
L_{kn}	$L_{kn} = 2,48 \cdot m^{0,203}$		
L_n	$L_n = L_{zn} + 2 \cdot L_{kn}$		
L_t	$L_t = 2 \cdot L_n$	α_{Bn}	$\alpha_{Bn} = \arctan(\tan \alpha_{fA} \cdot \sin \alpha)$
d_{un}	$d_{un} = \sqrt[4]{\frac{0,4 \cdot c_c \cdot m^{x_c} \cdot s_s^{y_c} \cdot L_t^3}{5,27 \cdot y_p \cdot E}}$	k_1	$k_1 = 1,8 \cdot k$
		d_{hn1}	$d_{hn1} = d_{hn} + k_1 - k$
		α_{CE}	$\alpha_{CE} = \arctan\left(\frac{\tan \alpha}{\sin \beta_{zn}}\right)$
d_{dn}	$d_{dn} = 1,7 \cdot d_{un}$		
h_{dn}	$h_{dn} = 0,5 \cdot (d_{hn} - d_{dn})$		
d_{kn}	$d_{kn} = 1,6 \cdot d_{un}$	r_{zn}	$r_{zn} = 0,5 \cdot d_m \cdot \cos \alpha_{ce}$
s_{sr}	$s_{sr} = 0,2 \cdot m$	α_{CA}	Pro $\beta_{dn} \geq 4^\circ$: $\alpha_{CA} = \arctan\left(\frac{i_n \cdot m \cdot (\operatorname{inv} \alpha_A - \operatorname{inv} \alpha_B)}{2 \cos \beta_{dn} \cdot (h_{pm} + m + 0,5k)}\right)$ $\alpha_A = \arccos\left(\frac{r_{zn}}{0,5 \cdot d_m + h_a}\right)$ $\alpha_B = \arccos\left(\frac{r_{zn}}{0,5d_m - (h_{pm} + 0,5k)}\right)$ h_{pm} je nenulové pouze u profilu IId
L_{1n}	$L_{1n} = 0,3 \cdot L_n$		
L_{2n}	$L_{2n} = 0,5 \cdot (L_n - L_{1n})$		
d_{1n}	$d_{1n} = d_{un} + 1$		
r_v	$r_v = 0,5 \cdot m$		
z_n	$z_n = \frac{360}{\varphi_{zn}}, \quad \varphi_{zn} = \arccos\left(\frac{d_{dn}}{d_{hn}}\right)$		
r_{fdn}	$r_{fdn} = \frac{d_{hn} - 2 \cdot h_{dn}}{10 \cdot z_n}$		
r_{pd}	$r_{pd} = 0,5 \cdot d_{hn} \cdot \sin \alpha_{fA}$		

ϑ_{dn}	Volí se podle z_n : Pro $z_n = 1 \div 8$ je $\vartheta_{dn} = 32^\circ$ Pro $z_n = 9 \div 10$ je $\vartheta_{dn} = 22^\circ$ Pro $z_n > 10$ je $\vartheta_{dn} = 18^\circ$		Pro $\beta_{dn} < 4^\circ$: $\alpha_{CA} = \arctan\left(\frac{\tan \alpha}{\cos \beta_{dn}}\right)$
k	$k = \frac{\pi \cdot d_{hn}}{z_n} \cdot \tan \alpha_{fA}$	α_{np}	$\alpha_{np} = \operatorname{arccot}\left(\cot \alpha_{CA} - \frac{s_{s\ddot{s}r} \cdot k \cdot z_n}{H_{dn}}\right)$
d_{rn}	$d_{rn} = d_{hn} - 2 \cdot h_{hn} - 0,5 \cdot k$	α_{nl}	$\alpha_{nl} = \operatorname{arccot}\left(\cot \alpha_{CA} + \frac{s_{s\ddot{s}r} \cdot k \cdot z_n}{H_{dn}}\right)$
β_{zn}	$\beta_{zn} = \arcsin\left(\frac{i_n \cdot m}{d_m}\right)$		
β_{dn}	Pro $m \leq 1,5$ se volí $\beta_{dn} = 0^\circ$ Pro $m > 1,5$ se volí $\beta_{dn} = \beta_{zn}$	t_{cn}	$t_{cn} = \frac{\pi \cdot m}{\cos \beta_{zn}}$
H_{zn}	$H_{zn} = \pi \cdot d_{rn} \cdot \tan \beta_{zn}$	s_{rc}	$s_{rc} = \frac{s_{no}}{\cos \beta_{zn}}$
h_k	$h_k = 0,5 \cdot d_{hn} - h_o - k - r_{fdn}$		
B_{dn}, L_{dn}, R_{max} dle doporučených hodnot z [15]			
Kontrola geometrie nástroje			
α_{as}	$\alpha_{as} = \arctan(\tan \alpha_{fA} \cdot \cos \beta_{zn})$	α_o	$\alpha_o = \arctan(\tan \alpha_f \cdot \cos \alpha)$
α_f	$\alpha_f = \arctan(\tan \alpha_{as} \cdot \tan \alpha)$		

6.2 Přehled vstupních a výstupních parametrů podprogramu „Loupací odvalovací fréza“

VSTUPNÍ PARAMETRY			
Parametry obráběného kola		Parametry nástroje	
m, z, α, χ		$d_{wf}, L, k, y, g_w, l_{wn}, l_{on}, r_n, s_{s\dot{s}r}$	
VÝSTUPNÍ PARAMETRY			
Základní parametry obráběného ozubeného kola			
viz Příloha 6.3			
Parametry profilu			
γ_{fw}	$\gamma_{fw} = \arcsin\left(\frac{2 \cdot L}{d_{wf}}\right)$	γ_{fr1}	$\gamma_{fr1} = \arcsin\left(\frac{d_{wf} \cdot \sin \gamma_{fw}}{2 \cdot r'_r}\right)$
t_n	$t_n = k \cdot \pi \cdot m$	K_{r1}	$K_{r1} = \frac{\sqrt{r_r'^2 - r_{zfe}^2}}{\tan \mu}$
h_{gf}	$h_{gf} = y \cdot m + l_{wn}$		
r_{pf}	$r_{pf} = 0,5 \cdot (d_{wf} - 2 \cdot h_{gf})$		
γ_p	$\gamma_p = \arcsin\left(\frac{k \cdot m}{2 \cdot r_{pf}}\right)$	r_r''	$r_r'' = r_{pf} - m$
		φ_{r2}	$\varphi_{r2} = \arccos\left(\frac{r_{zfe}}{r_r''}\right)$
t_o	$t_o = \frac{t_n}{\cos \gamma_p}$	γ_{fr2}	$\gamma_{fr2} = \arcsin\left(\frac{d_{wf} \cdot \sin \gamma_{fw}}{2 \cdot r_r''}\right)$
α_c	$\alpha_c = \arctan\left(\frac{\tan \alpha}{\sin \gamma_p}\right)$		
r_{zfe}	$r_{zfe} = r_{pf} \cdot \cos \alpha_c$	K_{r2}	$K_{r2} = \frac{\sqrt{r_r''^2 - r_{zfe}^2}}{\tan \mu}$
μ	$\mu = \arctan\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot r_{zfe}}{t_o}\right)$		
K_o	$K_o = \frac{\sqrt{r_{pf}^2 - r_{zfe}^2}}{\tan \mu}$	x'_{BP}	$x'_{BP} = -M + [(\varphi_p \pm \gamma_p) - (\varphi_{r2} \pm \gamma_{fr2})] \cdot \frac{t_o}{2 \cdot \pi} + K_{r2}$
g_{nf}	$g_{nf} = 0,5 \cdot \pi \cdot m + g_w + 0,5 \cdot l_{on}$	x'_{AL}	$x'_{AL} = M - [(\varphi_p \mp \gamma_p) - (\varphi_{r1} \mp \gamma_{fr1})] \cdot \frac{t_o}{2 \cdot \pi} - K_{r1}$
g_{of}	$g_{of} = \frac{g_{nf}}{\cos \gamma_p}$		
M	$M = K_o + 0,5 \cdot g_{of}$		

φ_p	$\varphi_p = \arccos\left(\frac{r_{zfe}}{r_{pf}}\right)$	x'_{BL}	$x'_{BL} = M - [(\varphi_p \mp \gamma_{fp}) - (\varphi_{r2} \mp \gamma_{fr2})] \cdot \frac{t_o}{2 \cdot \pi} - K_{r2}$
γ_{fp}	$\gamma_{fp} = \arcsin\left(\frac{d_{wf} \cdot \sin \gamma_{fw}}{2 \cdot r_{pf}}\right)$	$y'_{AP,AL}$	$y'_{AP,AL} = r'_r \cdot \cos \gamma_{fr1} - r_{pf} \cdot \cos \gamma_{fp}$
		$y'_{BP,BL}$	$y'_{BP,BL} = r''_r \cdot \cos \gamma_{fr2} - r_{pf} \cdot \cos \gamma_{fp}$
		$y''_{AL,BP}$	$y''_{AL,BP} = 0,5 \cdot d_{wf} \cdot \cos \gamma_{fw} - r_{pf} \cdot \cos \gamma_{fp}$
h_{rf}	$h_{rf} = h_{gf} - r_n \cdot (1 - \sin \alpha)$	α_p	$\alpha_p = \arctan\left(\frac{x'_{AP} - x'_{BP}}{y'_{AP} - y'_{BP}}\right)$
r'_r	$r'_r = r_{pf} + h_{rf}$		
φ_{r1}	$\varphi_{r1} = \arccos\left(\frac{r_{zfe}}{r'_r}\right)$	α_L	$\alpha_L = \arctan\left(\frac{x'_{BL} - x'_{AL}}{y'_{AL} - y'_{BL}}\right)$
		Δ_{Lmax}	$\Delta_{Lmax} = 0,5 \cdot g_{of} - x'_{AL} - y'_{AL} \cdot \tan \alpha_L$
		Δ_{Pmax}	$\Delta_{Pmax} = 0,5 \cdot g_{of} + x'_{AP} - y'_{AP} \cdot \tan \alpha_p$
Základní konstrukční parametry			
d_{un}, l_1, l_2, n dle doporučených hodnot z [x]			

Pozn.: V rovnicích pro x'_{AP} , x'_{BP} , x'_{AL} , x'_{BP} platí horní znaménka při $s_{s\dot{s}r} = -1$ (levá šroubovice), spodní znaménka při $s_{s\dot{s}r} = 1$ (pravá šroubovice)

6.3 Přehled vstupních a výstupních parametrů podprogramu „Dokončovací kotoučová a čepová modulová fréza“

VSTUPNÍ PARAMETRY			
Parametry obráběného kola		Parametry nástroje	
$m, z, \alpha, x, \Delta s$		d_{hn} (KF,U/ČSN), s_{Fn} (KF,U/ČSN), z_n (U/ČSN), α_{fA} , d_{Fn} (ČF), druh podtáčení (KF jen radiální), τ_s (jen u šikmého podtáčení)	
Parametry výpočtu			
KV, PK			
VÝSTUPNÍ PARAMETRY			
Základní parametry obráběného ozubeného kola			
r	$r = \frac{m \cdot z}{2}$	α_w	$\alpha_w = \frac{r \cdot \cos \alpha}{r_w}$
r_b	$r_b = r \cdot \cos \alpha$	h_a	$h_a = m \cdot (1 + x)$
r_a	$r_a = r + m \cdot (1 + x)$	h_f	$h_f = m \cdot (1 + c_a - x)$
r_f	$r_f = r - m \cdot (1 + c_a - x)$	h	$h = h_a + h_f$
r_w	$r_w = r + m \cdot x$		
Parametry profilu			
r_x	Volí uživatel	α_{fx}	Závisí na druhu podtáčení
α_x	$\alpha_x = \arccos\left(\frac{r_b}{r_x}\right)$	Při radiálním podtáčení: $\alpha_{fx} = \arctan\left(\frac{k \cdot z_n}{\pi \cdot d_{xn}}\right)$	
ν_x	$\nu_x = \nu_b + \text{inv} \alpha_x$ $\nu_b = \nu_t - \text{inv} \alpha$ $\nu_t = \frac{\pi}{2 \cdot z} + \frac{\Delta s}{m \cdot z} - \frac{2 \cdot x \cdot \text{tg} \alpha}{z}$	$d_{xn} = d_{hn} - 2 \cdot y_x$ (KF) $d_{xn} = 2 \cdot x_x$ (ČF)	
x_x	$x_x = r_x \cdot \sin \nu_x$	Při osovém podtáčení: $\alpha_{fx} = \arctan\left(\frac{k \cdot \tan \kappa_x \cdot z_n}{2 \cdot \pi \cdot x_x}\right)$	
y_x	$y_x = r_x \cdot \cos \nu_x - r_f$	Při šikmém podtáčení: $\alpha_{fx} = \arctan\left(\frac{k \cdot z_n (\sin \tau_s + \tan \tau_s \cdot \cos \kappa_x)}{2 \cdot \pi \cdot x_x}\right)$	
κ_x	$\kappa_x = \alpha_x + \nu_x$		
α_{nx}	$\alpha_{nx} = \arctan(\tan \alpha_{fx} \cdot \sin \kappa_x)$ KF $\alpha_{nx} = \arctan(\tan \alpha_{fx} \cdot \cos \kappa_x)$ ČF		
Parametry patní přechodové křivky			
$x_T, y_T, x_D, y_D, x_{Oz}, y_{Oz}$		r_f'	$r_f' = k_{rf} \cdot m$
Pro $r_f < r_b$		Pro $r_f > r_b$	
$x_T = r_f \cdot \tan \nu_b + y_T \cdot \tan \nu_b$	$y_T = r_f' \cdot (1 - \sin \nu_b)$	$x_T = r_f \cdot \tan \nu_T + y_T \cdot \tan \nu_T$ $y_T = r_f' \cdot (1 - \sin \nu_T)$ $\nu_T = \nu_b + \text{inv} \left(\arccos \left(\frac{r_b}{r_f + r_f'} \right) \right)$	
$x_D = x_T - r_f' \cdot \cos \nu_b$	$y_D = 0$	$x_D = x_T - r_f' \cdot \cos \nu_T$	$y_D = 0$
$x_{Oz} = x_D, y_{Oz} = r_f'$			

Základní konstrukční parametry	
Kotoučová modulová fréza	Čepová modulová fréza (parametry z [x])
d_n (ČSN), b_{dn} , (ČSN), k $k = \frac{\pi \cdot d_{hn}}{z_n} \cdot \tan \alpha_{fA}$	$S, l_s, d_n, d_{1n}, d_{2n}, d_{3n}, l_{un}, b_{2n}, d_{3n}, b_{un}, D_2, D_3, D_4, D_5, d_4, l_2, l_3, l_4, h_{dn}, r_{fdn}, \varphi_n, \omega_{dn}, \varphi_{dn}, R_{dn}, k$ (u radiálního podtáčení stejně jako u KF, u osového a šikmého z rovnice pro α_{fx})

ČSN údaj převzat z ČSN 222510

U/ČSN uživatel může zadat údaj, nebo potvrdit hodnotu z ČSN 222510

KF platí pro kotoučovou modulovou frézu

ČF platí pro čepovou modulovou frézu

6.4 Příklad výstupu programu na obrazovku počítače pro podprogram „Odvalovací fréza“

6.4.1 Zadání vstupních parametrů

Odvalovací fréza

Zadejte základní parametry ozubení:

$m = 3,5$ mm
 $z = 40$
 $\alpha = 20^\circ$
 $x = 0$

OK Zpět

Otevřít Uložit

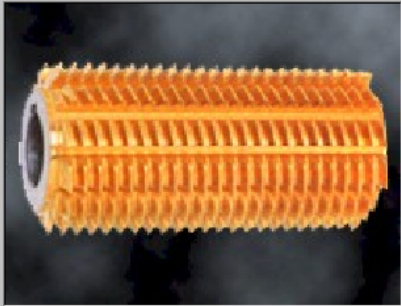
Zadejte doplňující údaje:

II (ČSN 22 2501) A
 Uhlíková ocel Rm do 800 MPa pravá šroubovice

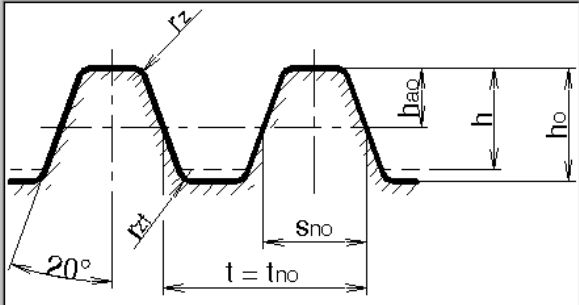
$c_c = 300$ $x_c = 1,02$ $y_c = 0,75$

$d_{hn} = 80$ mm
 $E = 210000$ MPa
 $y_p = 0,001$ mm
 $s_s = 0,66$ mm/ot
 $\alpha_{fA} = 10^\circ$
 $R_k = 20$ mm
 $i_n = 1$

Výpočet



Základní profil pro odvalovací frézy dokončovací



6.4.2 Výpočet základních údajů profilu zubů nástroje a základních konstrukčních parametrů

Odvalovací fréza

Vstupní údaje

$m = 3,5$ mm
 $z = 40$
 $\alpha = 20^\circ$
 $x = 0$
 profil: II
 přesnost: A
 šroubovice: pravá

materiál: uhlíková ocel Rm do 800 MPa
 $c_c = 300$
 $x_c = 1,02$
 $y_c = 0,75$
 $d_{hn} = 80$ mm
 $E = 210000$ MPa

$y_p = 0,001$ mm
 $s_s = 0,66$ mm
 $\alpha_{fA} = 10^\circ$
 $R_k = 20$ mm
 $i_n = 1$

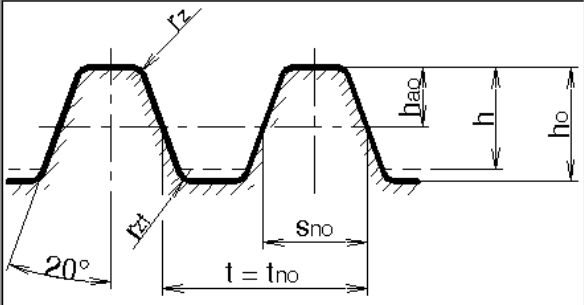
Vypočtené údaje obráběného kola

$r = 70,000$ mm
 $r_b = 65,778$ mm
 $r_a = 73,500$ mm
 $r_f = 65,625$ mm
 $r_w = r$
 $\alpha_w = \alpha$

$h_a = 3,500$ mm
 $h_f = 4,375$ mm
 $h = 7,875$ mm

Základní údaje profilu zubu frézy

$h_0 = 8,623$ mm
 $h_{a0} = 4,375$ mm
 $h = 7,875$ mm
 $s_{no} = 5,498$ mm
 $t_{no} = 10,996$ mm
 $r_z = 0,875$ mm
 $r_{zf} = 0,5$ mm



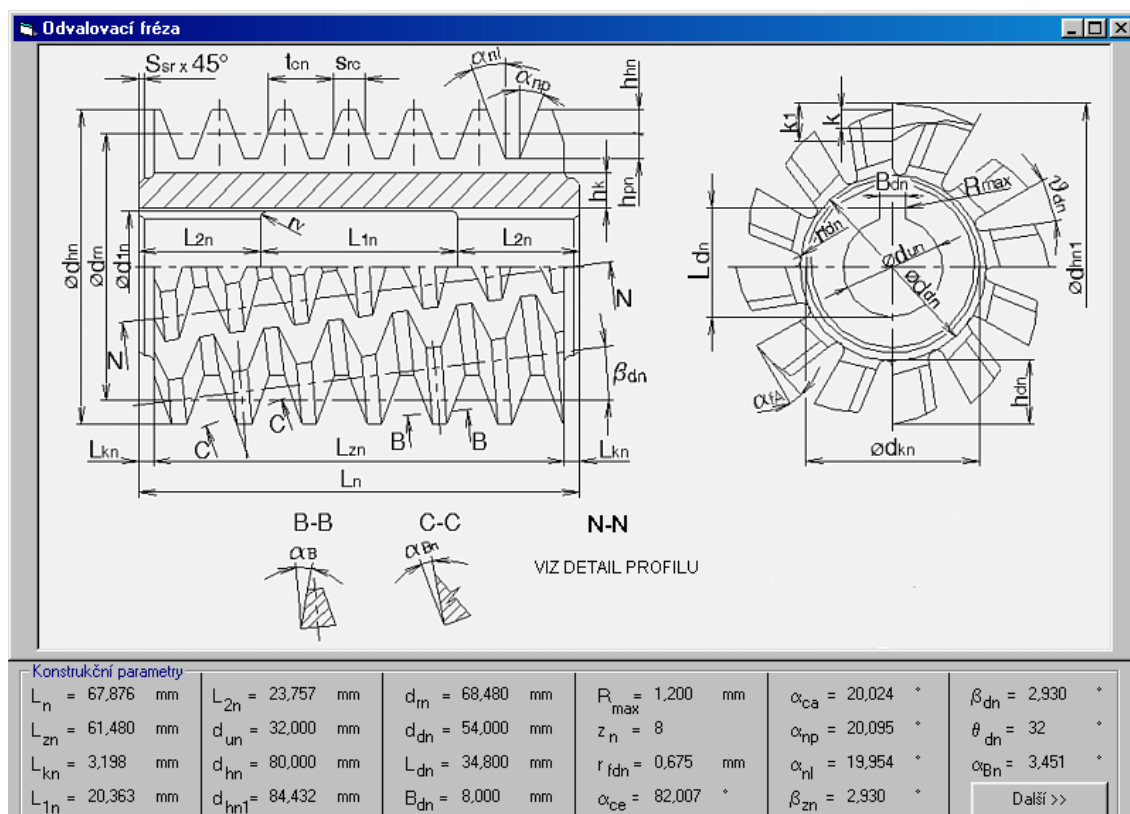
Obrázek nástroje
 Mezní úchytky
 Obrázek profilu
 Tisk
 Uložit
 Zpět

Konstrukční parametry

$L_n = 67,876$ mm	$L_{2n} = 23,757$ mm	$d_m = 68,480$ mm	$R_{max} = 1,200$ mm	$\alpha_{ca} = 20,024^\circ$	$\beta_{dn} = 2,930^\circ$
$L_{zn} = 61,480$ mm	$d_{un} = 32,000$ mm	$d_{dn} = 54,000$ mm	$z_n = 8$	$\alpha_{np} = 20,095^\circ$	$\theta_{dn} = 32^\circ$
$L_{kn} = 3,198$ mm	$d_{hn} = 80,000$ mm	$L_{dn} = 34,800$ mm	$r_{fdn} = 0,675$ mm	$\alpha_{nl} = 19,954^\circ$	$\alpha_{Bn} = 3,451^\circ$
$L_{1n} = 20,363$ mm	$d_{hn1} = 84,432$ mm	$B_{dn} = 8,000$ mm	$\alpha_{ce} = 82,007^\circ$	$\beta_{zn} = 2,930^\circ$	

Další >>

6.4.3 Vyobrazení nástroje



6.5 Příklad výstupu programu na obrazovku počítače pro podprogram „Loupací odvalovací fréza“

6.5.1 Zadání vstupních parametrů a výpočet parametrů profilu nástroje

Loupací odvalovací fréza

Zadejte základní parametry ozubení:

$m = 6$ mm
 $z = 30$
 $\alpha = 20^\circ$
 $x = 0$

Vypočtené údaje obráběného kola

$r = 90,000$ mm	$\alpha_w = \alpha$
$r_b = 84,572$ mm	$h_a = 6,000$ mm
$r_a = 96,000$ mm	$h_f = 7,500$ mm
$r_f = 82,500$ mm	$h = 13,500$ mm
$r_w = r$	

OK Zpět

Otevřít Uložit



Zadejte doplňující údaje:

$d_{wf} = 174$ mm
 $L = -22$ mm
 $k = 1$ mm
 $y = 1$ mm
 $g_w = 0$ mm
 $l_{wn} = 1,5$ mm
 $l_{on} = 0,25$ mm
 $r_n = 1$ mm

levá

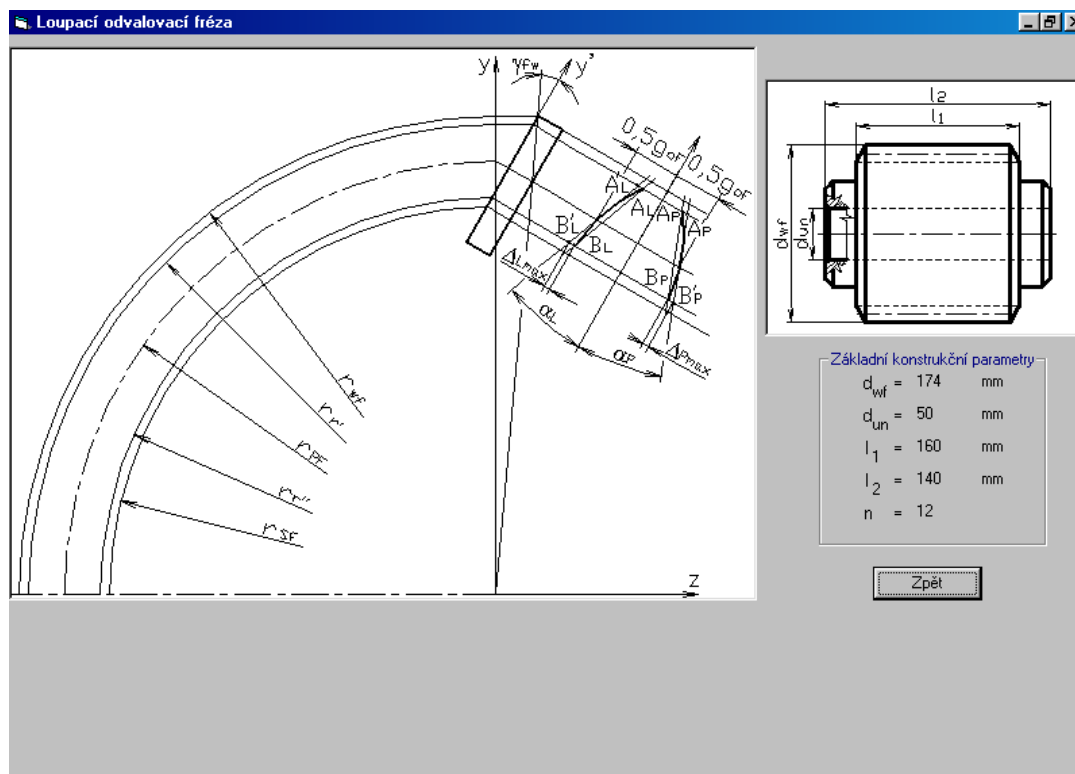
Vypočet

Obrázek Tisk Uložit

Vypočtené údaje nástroje

$\gamma_{fw} = -14,648^\circ$	$K_o = 28,956$ mm	$\gamma_{fr1} = -14,762^\circ$	$x'_{BL} = 7,034$ mm
$t_n = 18,850$ mm	$g_{nF} = 9,550$ mm	$K_{r1} = 31,474$ mm	$y'_{AP} = y'_{AL} = 7,097$ mm
$h_{gF} = 7,500$ mm	$g_{oF} = 9,557$ mm	$r''_r = 73,500$ mm	$y'_{BP} = y'_{BL} = -6,265$ mm
$r_{pF} = 79,500$ mm	$M = 33,735$ mm	$\phi_{r2} = 83,596^\circ$	$y'_{AL} = y'_{BP} = 7,777$ mm
$\gamma_p = 2,163^\circ$	$\phi_p = 84,081^\circ$	$\gamma_{fr2} = -17,417^\circ$	$\alpha_p = 18,760^\circ$
$t_o = 18,863$ mm	$\gamma_{fp} = -16,065^\circ$	$K_{r2} = 26,746$ mm	$\alpha_L = 19,823^\circ$
$\alpha_c = 84,081^\circ$	$h_{rF} = 6,842$ mm	$x'_{AP} = -2,353$ mm	$\Delta_{Lmax} = 0,0032$ mm
$r_{zFe} = 8,198$ mm	$r'_r = 86,342$ mm	$x'_{BP} = -6,892$ mm	$\Delta_{Pmax} = 0,0144$ mm
$tg \mu = 2,731$	$\phi_{r1} = 84,551^\circ$	$x'_{AL} = 2,217$ mm	

6.5.2 Obrázek nástroje s vyznačením základních konstrukčních parametrů





Další zdroje (Použitá a doporučená literatura k dalšímu studiu)

- [1] MAAG: *Firma MAAG Taschenbuch*, Maag-Zahnräder AG, 1963.
- [2] MRKVICA, I. *Speciální technologie, Výroba ozubených kol I*. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2009, 101 s. ISBN 978-80-248-1931-0.
- [3] MRKVICA, M. *Konstrukce a výroba obráběcích nástrojů*. Ostrava: VŠB Ostrava, 1986, 215 s.
- [4] MRKVICA, I. *Návrh výpočtu a kontroly rozměrů obrážecího hřebenového nože MAAG pro obrábění libovolného čelního ozubeného kola se šikmými zuby*. Výzkumná zpráva, Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 1992, 42 s.
- [5] LVT, *Firma: Verzahntechnik – Informationen für die Praxis*, Liebherr-Verzahntechnik GmbH, Kempten, 2003. ISBN 3-00-012480-2.
- [6] MAREK, J. *Konstrukce CNC obráběcích strojů, MM Průmyslové spektrum – speciální vydání*, 2006, 282 s. ISSN 1212-2572.
- [7] MÖLLER, K. Komplettbearbeitung von Zahnradpaaren in den drei Arbeitsschritten Weichbearbeitung – Wärmebehandlung – Hartfeinbearbeitung, *FVA*, Heft 718, 2003.
- [8] PFEIFFER, K. Gesichtspunkte zur Auslegung von Wälzfräsern, *TAE-Lehrgang: Die wirtschaftliche Herstellung von Stern- und Kegelrädern*, Dresden, 2000.
- [9] WINKEL, O. Möglichkeiten der Softwareunterstützung bei der Wälzfräserauslegung, Tagungsband: 45. *Arbeitstagung Zahnrad- und Getriebeuntersuchung*, WZL, RWTH Aachen, 2004.
- [10] WOLF, A. Neues Rolleverständnis, *Werkstatt und Betrieb*, 139 (2006) 3, S. 68-70. ISSN 0043-2792.
- [11] *Fette, Firma: Firmenschrift der Firma Fette*, Schwarzenbeck.
- [12] THESIS, S. Wälzfräser – das wichtigste Werkzeug zum Verzahnen, *HDT-Lehrgang: Das Zahnrad, Grundlagen Theorie und Praxi*, Essen, 1999.
- [13] HOFFMEISTER, B. *Über den Verschleiß am Wälzfräser*, Dissertation, RWTH Aachen, 1970, 124 S.
- [14] KNÖPPEL, D. *Trockenbearbeitung beim Hochgeschwindigkeitswälzfräsen mit beschichteten Hartmetall-Werkzeugen*, Dissertation RWTH Aachen, 1996, 97 S.
- [15] DREYER, K. und BERG van den, H. Feinst- und Ultrafeinstkornhartmetalle, *VDI-Z Spezial Werkzeuge*, 4/1999, S. 46-49.
- [16] SCHALASTER, R. Einsatzpotentiale von Cermets beim Wälzfräsen, Tagungsband: 46. *Arbeitstagung Zahnrad- und Getriebeuntersuchung*, WZL, RWTH Aachen, 2005.
- [17] WEIGEL, U. Wälzfräser für die Trockenbearbeitung – Auslegungskriterien, Substrate und Beschichtung, in *ADITEC: Trockene Zahnradvorbereitung*, Aachen, 2002.
- [18] KLEINJANS, M. *Einfluß der Randzoneneigenschaften auf den Verschleiß von beschichteten Hartmetallwälzfräsern*, Dissertation RWTH Aachen, Band 18/2003, Shaker Verlag.
- [19] WINKEL, O. Hartmetallwerkzeuge zum Hochleistungswälzfräsen – Leistungsunterschied unterschiedlicher Substrate, Tagungsband: 44. *Arbeitstagung Zahnrad- und Getriebeuntersuchung*, WZL, RWTH Aachen, 2004.

- [20] MRKVICA, I. *Využití progresivních nástrojových materiálů při obrábění ozubených kol*, Disertační práce VŠB-TU Ostrava, 1997, 82 s.
- [21] SPUR, G. und STÖFERLE, Th. *Handbuch der Fertigungstechnik*, Band 3/1 und 3/2 Spanen, München, Carl Hanser, 1979/80. ISBN 3-446-12534-5.
- [22] SEIDL, O. *Návody ke cvičení z řezných nástrojů*. Praha: ČVUT Praha, 1976, 134 s.
- [23] NĚMEC, D. *Strojírenská technologie 3 – Strojní obrábění*. Praha: SNTL Praha, 1982, 320 s.
- [24] ŠVEC, S. *Konstrukce nástrojů pro výrobu čelních ozubených kol*. Praha: SNTL Praha, 1965, 143 s.
- [25] *VDI 3333: Wälzfräsen von Stirnrädern mit Evolventenprofil*. Beuth Verlag, Berlin, 1990.
- [26] FAULTISCH, I. Schälwälzfräsen gehärteter Zylinderräder. In BAUSCH, T. *Zahradfertigung Teil B*, Sindelfingen: expert verlag, 1986, S. 365-382. ISBN 3-8169-0053-4
- [27] KAISER, K.M. *Grundlageuntersuchungen zur Technologie der Feinbearbeitung einsatzgehärteter Verzahnungen mit definierter Schneide*. Dissertation, RWTH Aachen, 1992, 141 S.
- [28] RAUTENBACH, W. *Untersuchungen zum Bauteilverhalten schälwälzgefräster Zahnräder*. Dissertation, RWTH Aachen, 1988, 121 S.
- [29] ROOS, V. *Schälwälzfräsen als Feinbearbeitungsverfahren einsatzgehärteter Zylinderräder*. Dissertation, RWTH Aachen, 1983, 134 S.
- [30] HAGENLOCHER, O. Ein kleiner Kopf bewegt Großes. *Werkstatt und Betrieb*. 139 (2008), Nr. 11, S. 28-30. ISSN 0043-2792.
- [31] MRKVICA, I. *Využití progresivních nástrojových materiálů při obrábění ozubených kol*. Disertační práce. Ostrava : VŠB-TU Ostrava, 1997, 82 s.
- [32] MRKVICA, I. *Příspěvek k aplikaci technologie obrábění za sucha při výrobě čelního ozubení*. Habilitační práce, Ostrava : VŠB-TU Ostrava, 2001, 110 s.
- [33] MRKVICA, I. Mit Feinstkornhartmetall Zahnräder bearbeiten. *Werkstatt und Betrieb. Industrielle Metallbearbeitung. Special: Präzisionswerkzeuge*, 137 (2004), Nr. 3, S. 50-55. ISSN 0043-2792,
- [34] MRKVICA, I. Neue Beschichtung für die Zahnrاد-Bearbeitung. *VDI-Z*, 145 (2003), Nr. 11/12, S. 46-49. ISSN 0042-1766.
- [35] MRKVICA, I. Application of Coated Cemented Carbides at Hardened Gear Cutting. In *The International Congress MATAR PRAHA 2004, Section 4 Machining and forming processes*. Praha : ČVUT Praha, 2004, s. 213-216. ISBN 803421-4-0.
- [36] MRKVICA, I. Applikation der neuen MARWIN MT- Beschichtung bei der Bearbeitung von einsatzgehärteten Verzahnungen. In *Science Report Project PL-127 Measuring Technology in Advanced Machine Manufacturing Systems*. Kielce: Kielce University of Technology, 2004, p. 99-106. ISBN 83-88906-65-8.
- [37] HEJNA, A. *Skonstruować frez ślimakowy składany z ostrzami z węglików spiekanych przeznaczonych do obróbki kół zębatych o modułach $m=4-6$* . Praca dyplomowa, Politechnika Śląska, Gliwice, 1996, 40 s.

- [38] KOŻUCH, P. *Skonstruować frez ślimakowy składany z ostrzami z węglikow spiekanych przeznaczonych do obróbki kół zębatych o modulach $m=2-3$* . Praca dyplomowa, Politechnika Śląska, Gliwice, 1996, 39 s.
- [39] FETTE: *Katalog řezných nástrojů firmy FETTE*, 2000.
- [40] FELTEN, K. *Verzahntechnik – Das aktuelle Grundwissen über Herstellung und Prüfung von Zahnrädern*, Renningen: expert-verlag, 1999, 264 S.
- [41] FELTEN, K und BERENDS, P. CNC-Steuerung optimiert Wälzstoßen, *Werkstatt und Betrieb*, 121 (1988) 6, S. 509-511.
- [42] Lorenz. *Verzahnwerkzeuge*, G. Braun GmbH, Karlsruhe, 1977.
- [43] HIELSCHER, K. D. CNC-Wälzstoßen eröffnet neue Möglichkeiten, *Werkstatt und Betrieb*, 123 (1990) 8, S. 619-622.
- [44] *Liebher. Prospektmaterial Liebherr Verzahntechnik GmbH*, 2001.
- [45] FELTEN, K. Produktivität des Wälzstoßens erhöht, *Werkstatt und Betrieb*, 129 (1996) 7-8, S. 702-706.
- [46] LOO van der H. und BAUMSTARK, M. Höhere Verzahnqualität und größere Standmengen beim Wälzstoßen mit Wafer-Schneidrädern, *Werkstatt und Betrieb*, 122 (1989) 8, S. 669-671.
- [47] MEON, P. Sonderanwendungen beim Wälzstoßen, *Tagungsband Karlsruher Kolloquium*, 1996.
- [48] KRÄMER, H. Etappenweise Stoßen, *Werkstatt und Betrieb*, 125 (1992) 3, S. 211-214.
- [49] BERENDS, P. CNC-Wälzstoßen erschließt neue Verfahrensmöglichkeiten, *Werkstatt und Betrieb*, 122 (1989) 9, S. 774-778.
- [50] FELTEN, K und BERENDS, P. Optimales Wälzstoßen, *Werkstatt und Betrieb*, 121 (1988) 4, S. 301-304.