

Ministerstvo školství ČSR
Vysoká škola strojní a textilní v Liberci
nositelka Řádu práce

Fakulta strojní

Ing. Robert K v a p i l

KONSTRUKČNÍ A TECHNOLOGICKÉ PARAMETRY ODVALOVACÍCH FRÉZ

Kandidátská dizertace

Vědní obor: 23-07-9a - strojírenská technologie

Školitel: Prof. Ing. Jaroslav Draský CSc.

Liberec, únor 1979

ANOTACE

D.T 621.9.025.11
621.9.02
681.3.06

Autor: Robert KVAPIL

KONSTRUKČNÍ A TECHNOLOGICKÉ PARAMETRY ODVALOVACÍCH FRÉZ

Práce uvádí teorii výpočtů výchozích povrchů, profilů ostří, geometrie břitu, hlavních konstrukčních rozměrů, záběrových poměrů, pracovních rozsahů, průřezů třísek a optimálních řezných podmínek odvalovacích fréz různých profilů a konstrukcí včetně technologického postupu jejich výroby. Je určena jako podklad pro použití číslicového počítače při návrhu konstrukčních, výrobních i provozních parametrů odvalovacích fréz pro automatizovanou technickou přípravu výroby. K matematickému zpracování je použito vektorového a tenzorového počtu, diferenciální geometrie a matematického programování. Na základě předložené teorie byly sestaveny algoritmy výpočtu, jejich vývojové diagramy a matematicko-logické modely.

Práce byla vypracována
na katedře obrábění
a ekonomiky Vysoké školy
strojní a textilní
v Liberci

Počet stran: 150
Počet tabulek: 47
Počet diagramů: 16
Počet obrázků: 77

Školitel: Prof.Ing. Jaroslav Draský CSc.

SEZNAM SYMBOLŮ

$A_a^c, A_a^t, A_a^{pt}, A_n^z, A_n^y, A_n^\sigma$	- tenzory otočení
$(A_a^t)^{-1}$	- tenzor reciproký
$(A_a^t)^*$	- tenzor transponovaný
$A_s^t, (A_n^{pt})$	- tenzor otočení kolem osy součásti σ_s (nástroje σ_n) o úhel t (o úhel pt)
$A_1, A_2, \dots, A_6$	- matice proměnných
$A_\alpha, (A_\gamma)$	- hřbet (čelo)
a^o	- jednotkový vektor v ose rotace
a_1, a_{-1}, a_p	- vektory
a_1^o, a_{-1}^o	- jednotkové vektory
a_1, a_2, a_3	- složky vektoru
a_e	- délka vedlejší poloosy elipsy
a_f	- vzdálenost působistiště síly
a_i	- matice
a_{ij}	- tenzor
$B_n, (B_s)$	- vektor pohybu bodu M kolem osy σ_n (σ_s)
B_{ij}	- transformační matice
b_1, b_{-1}	- vektory bodu na válcové ploše
b	- šířka frézovaného kola
$b_1, b_2, \dots, b_q$	- konstanty omezujících podmínek
b_e	- délka hlavní poloosy elipsy
C	- parametr šroubové plochy
c	- úhel otočení
C_e	- vedlejší poloosa elipsy
C_g	- konstanta počtu chodů frézy
C_T, C_V	- konstanty charakterizující podmínky obrábění

C_w	- konstanta materiálu obrobku
$D_{fr} (R_{fr})$	- průměr (poloměr) frézy
$D_h (R_h)$	- průměr (poloměr) hlavové kružnice frézy
D_{h1}, D_{h2}	- průměry - malý a velký - kuželové odvalovací frézy
$D_k (R_k)$	- průměr (poloměr) brusného kotouče
D_{k1}, D_{k2}	- průměry nákrůžků kuželové frézy
D_n	- průměr upínacího otvoru
D_{n1}	- průměr odlehčené části otvoru
D_{om}	- průměr polotovaru monolitní frézy
$D_p (R_p)$	- průměr (poloměr) paty podélných drážek
$D_r (R_r)$	- průměr (poloměr) roztečného válce frézy
$D_x (D_z)$	- vzdálenost roviny (radiálního řezu) od počátku
d	- průměr vřetene frézy
d_e	- hlavní poloosa elipsy
$d_h (r_h)$	- hlavový průměr (poloměr) součásti (kola)
$d_p (r_p)$	- patní průměr (poloměr) součásti (kola)
$d_{rs} (r_{rs})$	- střední průměr (poloměr) profilu součásti
$d_v (r_v)$	- valící průměr (poloměr) součásti (kola)
$d_r (r_r)$	- roztečný průměr (poloměr) součásti (kola)
E	- jednotkový tenzor
E	- modul pružnosti
e	- vektor bodu elipsy
F_v	- složka řezné síly ve směru řezné rychlosti
F_r	- radiální složka řezné síly
$f(x)$	- vektorová funkce vektorového argumentu
f^o	- jednotkový vektor ve směru osy y
$\tilde{f}$	- matice derivace vektorové funkce

G, H, L	- úhly seřízení
G_{om}	- hmotnost polotovaru momentální frézy
g_{ij}	- první základní tenzor plochy
H_d	- stoupání šroubovice drážek
H_f	- vyklonění středu frézy
H_{pm}	- výška paty zubu k počátku modifikace
H_z	- stoupání šroubovice zubů základního šneku
h_a	- délka rovinné části profilu drážky
h_h	- výška hlavy zubu kola
h_{ij}	- druhý základní tenzor plochy
h_n	- výška zubu hřebene frézy
h_p	- výška paty zubu kola
h_z	- výška zubu kola
I	- moment setrvačnosti
i, j, k	- jednotkové vektory
i	- první hodnota kroku , imaginární jednotka
i_n	- počet chodů frézy
i_p	- pořadové číslo plochy n-hranu
i_s	- počet ploch n-hranu
j	- počet úseků mezi řezovými rovinami
K, K_1, K_2	- vektory bodu na ploše
K_i, K_{1i}, K_{2i}	- parciální derivace podle parametrů u, v, t
K_1, K_2	- konstanty dané způsobem obrábění a podmínkami
k	- vektor kružnice kola
k	- zdvih vačky
k_a	- axiální zdvih vačky

k_b	- poloha počátku souřadnicových soustav frézy a kola podél jeho osy
k_F	- koeficient rozdělení složek síly
k_j	- pořadové číslo zubu
k_{kk}	- posuv vačky kolmo na podtáčený kužel
$k_p (k_i)$	- délka přechodového povrchu (v libovolném řezu)
k_t	- násobek strojního času (celé číslo)
k_v	- výsledný posuv vačky
$L_a, (L_{ax})$	- délka frézování (s radiálním přísuvem)
L_v	- vzdálenost vrcholu kužele frézy od středu stroje
L	- délka ozubené části čepu
L_c	- celková délka pracovního rozsahu odvalovací frézy
L_f	- délka frézy
L_k	- délka kužele kuželové části frézy
L_{kn}	- délka nákrůžku frézy
L_n	- délka náběhu frézy
L_{nb}	- bezpečná délka při náběhu frézy
L_{om}	- délka polotovaru frézy
L_p	- délka přeběhu frézy
L_{pb}	- bezpečná délka při přeběhu frézy
L_t	- vzdálenost ložisek upínacího trnu
L_v	- délka záběru odchodné části frézy
L_z	- délka náběhové části frézy
L_{zf}	- délka závitů frézy
L_{zp}	- délka záběrového pole

M	- matice soustavy rovnic
$M_s, (M_o)$	- mzdový hodinový tarif dělníka v obrobě (v ostřírně)
M_{TKK}	- mzdový hodinový tarif druhu operace dle TKK
m	- polohový vektor bodu
m^o	- jednotkový vektor polohového vektoru
m	- modul
m_n	- modul normální
$1/m$	- exponent obrábění
N	- plocha nástroje
N_{cj}	- vlastní náklady na jednici výroby
$N_{G1}, (N_{G1})$	- celková (jednotková) cena materiálu polotovaru frézy
N_h	- cena nástroje
N_u	- cena úkonu
$n_{o'} (n^o)$	- vektor (jednotkový) normály
n_i	- parciální derivace vektoru normály dle parametru
$n_{\alpha}, (n_{\gamma})$	- normála hřbetu (čela) nástroje
$n_k (n_n)$	- otáčky kola (nástroje)
$n_{maxf}, (n_{minf})$	- maximální (minimální) otáčky dosažitelné na frézce
n_o	- počet přeostření
n_{op}	- optimální otáčky frézy
OB, OB_1, OB_2	- vektory popisující bod na obalové ploše
$\sigma_n (\sigma_\sigma)$	- vektor ostří v nástrojové (ortogonální) soustavě
$\sigma_n^o (\sigma_s^o)$	- jednotkový vektor v ose nástroje (součástí)

$\sigma_n (\sigma_s)$	- osa nástroje (součásti)
P	- vektor
P	- příkon motoru obráběcího stroje
$P_n (P_{ne})$	- nástrojová (pracovní) rovina normálová
$P_o (P_{oe})$	- nástrojová (pracovní) rovina ortogonální
$P_f (P_{fe})$	- nástrojová (pracovní) rovina boční
$P_p (P_{pe})$	- nástrojová (pracovní) rovina zadní
$P_r (P_{re})$	- nástrojová (pracovní) rovina základní
p_n	- vektor průsečnice $A_\gamma - P_n$
p_o	- vektor průsečnice $A_\gamma - P_o$
p	- převodový poměr
p_i	- vzdálenost středu elipsy od počátku souřadné soustavy ve směru osy z
Q, q	- vektory
R	- vektor
$R(\alpha^\circ), R(\sigma_n^\circ), R(\sigma_s^\circ)$	- antisymetrické tenzory
$R_o (R_s)$	- režie ostřířny (obročky)
$r, r(u, v), r_1(u, v), r_2(u, v)$	- polohové vektory bodu plochy
r_u, r_v	- parciální derivace vektoru $r(u, v)$ podle parametrů u, v
r_{fd}	- poloměr zaoblení paty drážek
r_i	- poloměr libovolného bodu profilu
Δr_i	- přírůstek poloměru
r_{vmax}, r_{vmin}	- maximální a minimální výpočetní hodnota poloměru valíčního válce
r_{pd}	- poloměr pomocné kontrolní kružnice
SP	- vektor šroubové plochy

S	- plocha součástí
S_c	- vzdálenost středu kružnice a elipsy
s, z, u, v	- parametry plochy
s_d	- diagonální posuv
s_{minf}	- minimální posuv dosažitelný na frézce
s_o	- posuv na otáčku kola
s_p	- šířka zubu hřebene u paty
s_{op}	- optimální posuv
s_{Ra}	- posuv z hlediska drsnosti povrchu
s_t	- posuv tangenciální
s_z	- posuv na zub frézy
s_x	- posuv radiální
s_y	- posuv axiální

$T_1(t), T_2(t)$	- substituce
$T_1 (T_{op})$	- trvanlivost nástroje (optimální)
T_v	- volitelná trvanlivost nástroje
$T(\lambda_s), (T(-\lambda_s)), \dots$	- transformační matice pro převod úhlů (inverzní)

t	- tečný vektor elipsy
t	- parametr plochy
t_c	- celkový čas na úkon
t_{ce}	- osová rozteč zubů frézy
t_{cn}	- osová rozteč na roztečné přímce před kalením
$t_h (t_v)$	- čas hlavní (vedlejší)
t_o	- čas na ostření nástrojů
t_{pz}	- čas na výměnu a seřízení nástroje
t_s	- strojní čas
t_u	- hloubka úběru

t_z	- rozteč zubů drážkového profilu
t_x	- čas oddechu a obeluhy
u_v, v_v	- pomocné parametry
v	- rychlost hlavního řezného pohybu (řezná rychlost)
v_{op}	- optimální řezná rychlost
v_s	- substituce
W	- parametr součásti ve směru její osy
z_f	- počet zubových hřebenů frézy
z_k	- počet zubů kola
z_{nP}, z_{nS}	- souřadnice základních bodů záběrového pole odvalovací frézy
z_u, z_v	- parciální derivace podle parametrů u, v
X	- vektor bodu na ploše
X_a	- vektor v ose a
X_b	- vektor kolmý na X_k
X_k	- vektor kolmý na osu a
$X(t)$	- vektor potočený o úhel t
X_1, X_2	- tečné vektory
X_u, X_v, X_t	- parciální derivace vektoru X podle parametrů u, v, t
x, y, z	- proměnné
x_f	- korekce profilu
x_{ij}	- vektorová funkce
x_1, x_2, x_3	- složky vektoru
$x_{11}, x_{12}, x_{21}, x_{22}$	- složky 2. základního tenzoru plochy
xyz	- pravouhlá souřadnicová soustava

$x_f y_f z_f (x_{fe} y_{fe} z_{fe})$	- nástrojová (pracovní) pravouhlá souřadnicová soustava
$x_m y_m z_m$	- strojová souřadnicová soustava
$x_n y_n z_n (x_{ne} y_{ne} z_{ne})$	- nástrojová (pracovní) pravouhlá souřadnicová soustava normálová
$x_n y_n z_n$	- souřadnicová soustava nástroje
$x_o y_o z_o (x_{oe} y_{oe} z_{oe})$	- nástrojová (pracovní) pravouhlá souřadnicová soustava ortogonální
$x_s y_s z_s$	- souřadnicová soustava součástí
$Y, Y(n), Y(s, z), Y(\sigma), Y(\varphi)$	- roviny řezu obálkou
y_A, y_B, y_C	- souřadnice bodů profilu
y_{fr}	- průhyb vřetene odvalovací frézy
y_u, y_v	- parciální derivace složek vektoru podle parametrů u, v
α	- úhel záběru
α_c	- úhel profilu evolventního šneku
α_{CA}	- úhel profilu Archimedova šneku
$\alpha_f (\alpha_{fe})$	- nástrojový (pracovní) boční úhel hřbetu
$\alpha_L (\alpha_p)$	- úhly profilu na levé (pravé) straně zubu
$\alpha_n (\alpha_{ne})$	- nástrojový (pracovní) úhel hřbetu normálový
$\alpha_o (\alpha_{oe})$	- nástrojový (pracovní) ortogonální úhel hřbetu
$\alpha_p (\alpha_{pe})$	- nástrojový (pracovní) zadní úhel hřbetu
α_r	- úhel hřbetu v radiálním směru
α_t	- úhel záběru čelní
α_v	- úhel profilu zubu
β_{dn}	- úhel stoupání šroubovice drážky
$\beta_{hn} (\beta'_{hn})$	- úhel stoupání šroubovice frézy na hlavovém průměru frézy (axiálně podtočených fréz)

$\beta_{zn}, (\beta_{zs})$	- úhel stoupání šroubovice frézy (zubů kola)
β_v	- úhel profilu drážky
γ	- úhel výseče zakřiveného profilu
$\gamma_f (\gamma_{fe})$	- nástrojový (pracovní) boční úhel čela
$\gamma_n (\gamma_{ne})$	- nástrojový (pracovní) normálový úhel čela
$\gamma_o (\gamma_{oe})$	- nástrojový (pracovní) ortogonální úhel čela
$\gamma_p (\gamma_{pe})$	- nástrojový (pracovní) zadní úhel čela
σ	- úhel nastavení frézy
σ_s	- tolerance tloušťky zubu na roztečné kružnici
$\sigma_1, \dots, \sigma_n$	- pomocné úhly
ε	- požadovaná přesnost výpočtu
η	- účinnost převodů stroje
ϑ	- úhel otočení roviny čela
ϑ_d	- úhel drážky frézy
$\bar{\kappa}$	- normální křivost křivky na ploše
$\kappa_r (\kappa_{re})$	- nástrojový (pracovní) úhel nastavení
$\lambda_s, (\lambda_{se})$	- nástrojový (pracovní) úhel sklonu ostří
ϱ	- radiusvektor
ρ_c	- poloměr středů kružnic válcové plochy
ρ_k	- poloměr zaoblení válcové části
ρ_v	- poloměr křivosti v uvažovaném bodě
$\rho_1, \dots, \rho_n$	- roviny řezu
θ	- úhel otočení roviny čela
φ	- úhel připadající na jeden zub s mezerou
φ_{ij}	- úhly pootočení ze soustavy i do soustavy j
$\varphi_k, (\varphi_n)$	- úhel pootočení kola (nástroje) úměrný úhlové rychlosti

φ_z	- úhel pootočení hřebenů zubů
$\varphi_1, (\varphi_2)$	- první (druhá) základní forma plochy
$\psi_r, (\psi_{re})$	- nástrojový (pracovní) úhel nastavení doplňkový
ω_k	- úhel kužele kuželové části frézy
$\omega_n, (\omega_s)$	- úhlová rychlost nástroje (součásti)

ÚVOD

Ozubená kola jsou v současné době jedny z nejpoužívanějších součástí tam, kde je požadována transformace rychlosti nebo výkonu. Významné místo zaujímají čelní ozubená kola. Nejproduktivnější a nejrozsáhlejší metodou výroby čelních ozubených kol je výroba frézováním odvalovacím způsobem. Je tak rozšířena proto, že nástroj, tj. odvalovací frézu s obrobkem si lze zjednodušeně při obrábění představit jako záběr evolvutního šneku s kolem, takže zuby kola jsou v záběru nepřetržitě a obrábění probíhá plynule bez reverzačních časů. Jednou frézou lze vyrobit ozubená kola stejného modulu s libovolným počtem zubů korigovaná i nekorigovaná.

Odvalovací frézy lze s výhodou použít i pro výrobu jiných druhů součástí. Jsou to zejména hřídele s drážkovým profilem různého provedení, řetězová kola, rohatková kola i součástí s plochou šroubovou.

Přesto, že odvalovací frézy se používají již jedno století (poprvé firma Pfauter v Německu), nebyly zatím plně vyřešeny všechny problémy této progresivní technologie. Je to dáno také tím, že s přibývajícimi poznatky v různých oblastech vědy je nutno revidovat i dosavadní principy konstruování i technologií výroby. Během této doby vznikly rozmanité konstrukce odvalovacích fréz a jejich tvůrci neustále zvyšovali jejich výkonnost. Zvyšování výkonu obrábění probíhalo v několika směrech. Jedním ze směrů je používání kvalitnějších vysokovýkonných řezných materiálů. Od uhlíkových a legovaných ocelí se přes oceli rychlořezné přešlo k slinutým karbidům. V současné době se dokonce používají i syntetické velmi tvrdé materiály na bázi kubického nitridu bóru, které jsou schopny obrábět i zakalená ozubená kola. Použití nových materiálů podmiňuje i změnu konstrukce odvalovacích fréz. Od celistvých fréz se z úsporných důvodů přešlo na frézy skládané, kde těleso frézy je z levnější konstrukční oceli a břity z vysoce kvalitní oceli rychlořezné nebo ze slinutých karbidů. Změna konstrukce vedla též ke změně vlastností těchto fréz.

Druhý směr, kterým se ubírá vývoj, vycházel ze snahy o zlepšení záběrových poměrů při frézování. Za tím účelem byly vyvinuty frézy s kladným úhlem čela, frézy s rovnoměrnějším rozdělením třísky na jednotlivé břity odvalovacích fréz tzv. Progress

frézy v SSSR /73/, nebo frézy Fette z NSR, frézy PWS z NDR, kuželové frézy ze SSSR /9/ nebo frézy s náběhovým kuzelem.

Vyšších výkonů frézování ozubení lze dosáhnout i například použitím vícechodých fréz, frézováním diagonálním, krokováním odvalovacích fréz, a dále konstrukčními úpravami jako jsou zvětšení průměru nebo délky odvalovací frézy.

V dialektické jednotě s vývojem odvalovacích fréz se vyvíjely i odvalovací frézky. Výkonnější nástroje vyžadují tužší a výkonnější stroje a pokud nejsou k dispozici výkonné stroje není možné použití výkonných řezných nástrojů.

V současné době, kdy je hospodárná pouze výroba velkosériová nebo hromadná nebo dobře organizovaná výroba malosériová nebo kusová, která předpokládá použití NC obráběcích strojů, obráběcích center, nebo integrovaných výrob, se v konstrukci řezných nástrojů a tedy i odvalovacích fréz uplatní pouze metody, které včas reagují na požadavky výrobců a výroby. Dalším požadavkem je volba nejhospodárnější technologie výroby. Splnění těchto požadavků předpokládá teoretické zvládnutí řešené problematiky a ověření v praxi. Na základě teoretických a praktických podkladů a s využitím výpočetní techniky je možné provést optimální návrh odvalovacích fréz včetně technologických podkladů pro výrobu ozubení. Odvalovací fréza je jedním z nejsložitějších a nejdražších řezných nástrojů. Například cena speciální odvalovací frézy s předem rozdělenou třískou pro hrubování ozubení s hodnotou modulu 30 mm výrobce firma Fette (NSR) se pohybuje kolem 35 tisíc marek. Je proto nutné snižovat náklady na konstrukci a výrobu, ale také věnovat pozornost ekonomickému využití takových nástrojů.

Na druhé straně by bylo ekonomicky výhodné, už vzhledem k velmi dobré hutní základně (Poldi) takovéto nástroje vyrábět ve specializovaném závodě. Potřeba řešení této problematiky vycházela z požadavku vývojového oddělení technologie ZTS v Dubnici nad Váhom navrhnout tzv. optimální konstrukci odvalovací frézy a sestavit výpočetní vztahy pro možnost použití na číslicovém počítači. Při výpočtu vycházet z tvaru součástí a vypočítat výchozí povrch odvalovací frézy, geometrické rozměry řezné a upínací části a provést pevnostní kontrolu nástroje. Autor k této problematice přistoupil z poměrně širokého hlediska, vycházející z obdobné praxe některých zahraničních

firem, které provádí komplexní řešení konstrukce řezného nástroje, ale i souvisejících problémů.

Firma Renault /61/ využívá například komplexní program pro navrhování ozubených kol převodovek a řezných nástrojů na výrobu ozubení s cílem optimalizace požadavků zejména provozních (vysoká životnost, nehlučnost, tuhostní parametry, nízká cena). Příprava výroby ozubených kol probíhá současně a za spolupráce oddělení konstrukce převodovek a oddělení konstrukce nástrojů na ozubení.

Cílem tohoto oddělení je ve spolupráci s konstrukcí převodovek připravit takové ozubení, které by zabezpečovalo nejekonomičtější technologické toky jejich výroby, maximální výrobnosti a minimální deformace kol cestou volby materiálu, způsobu kování, tepelného zpracování i hrubování zubů.

Při správně navržených profilech zubů odvalovací frézy může být výrobnost hrubování zvýšena cestou použití vyšších posuvů za předpokladu použití tuhých strojů. Výzkumy ukazují, že tvar zubů odvalovací frézy má vliv na životnost převodovek. Při komplexním navrhování kol i řezného nástroje se provádí analýza několika variant ozubení : záběr soukolí; záběr každého kola s hrubovací odvalovací frézou s novým i přeostřeným profilem; záběr s ševingovacím nástrojem novým i přeostřeným. Po odzkoušení převodovek ve zkušebně i na silnici se stanoví profil, který slouží jako základní pro konstrukci řezných nástrojů. Při společných pracích obou konstrukčních oddělení na složitých i opakovaných výpočtech i zpracování informací se používají číslicové počítače. Pro sestrojování křivek kreslicí zařízení a pro porovnávání sestrojených křivek katodové obrazovky. Sestavení takových programů optimalizace vyžaduje kvalifikovaný personál, pravidelné informace o trendu rozvoje obráběcích strojů, metod výroby nástrojů apod.

Program výpočtu ozubených kol a nástrojů na ozubení pomocí počítače u fy Renault s cílem optimalizace tvaru zubu kol sestává z těchto kroků.

1. Výpočet geometrických parametrů ozubených kol.
2. Určení profilu zubů ozubených kol.
3. Výpočet ohybových napětí zubů kol.
4. Výpočet nástrojů na ozubení pro obrábění kol s přídatkem pod ševing.

5. Výpočet seřazení obráběcího stroje.
6. Výpočet hrubovacího pracovního cyklu.
7. Výpočet ševingovacích nástrojů na ozubení.
8. Analýza záběru novým a přebroušeným nástrojem.
9. Výpočet nástrojů pro srážení třísek se zubů kol.
10. Analýza křivek opsaných vrcholy sdružených kol a výpočet přechodových křivek vytvořených při hrubování.
11. Výpočet drah vrcholů zubů nového i přestřeleného nástroje.
12. Optimalizace výpočtů s cílem obdržení optimálního tvaru přechodu u paty zubu.
13. Výpočet ceny operace výroby ozubení.

Obdobný program výpočtu nástrojů pro výrobu ozubených kol byl zpracován rovněž na Čvut Praha doc. Švecem /85/. Zahrnoval prakticky předchozích sedm bodů. Po pevnostním a geometrickém výpočtu byly provedeny ekonomické propočty, řezné podmínky, normy času, náklady na obrábění pro obrábění ozubení obrázcími hřebenovými noži Maag, kruhovými obrázcími noži a odvalovacími frézami. Pak byla provedena optimalizace výrobního způsobu v závislosti na minimálních výrobních nákladech. Pro vybraný optimální nástroj byly provedeny jeho geometrické výpočty a pak výpočty výměnných kol - tedy částečně výpočty seřazení strojů. Výpočet pokračoval návrhem dokončovacího nástroje (ševingovacího kola), dále obdobně norem času, výměnných kol a nákladů na ševingování. V závěru byly vypočítávány celkové náklady na výrobu ozubení. Na tento program navazoval program kreslení nástrojů; odladěno bylo kreslení odvalovací frézy na kreslicím zařízení.

Metodicky se jevil tento program velmi dobrý, avšak byl sestaven na základě "klasické" teorie, která je méně přesná a dovoluje řešit nástroje pouze jednotlivě. Optimalizace mezi technologiemi výroby ozubení není vhodná, protože první dvě jsou málo produktivní a hodí se jen pro zvláštní případy obrábění ozubení, kde naopak nejde použít odvalovacích fréz.

Cílem této práce je komplexnější pohled na navrhování odvalovacích fréz s uvažováním vlivu podmínek obrábění součástí včetně návrhu výroby frézy a návrhu optimálních řezných podmínek, při kterých by byla ekonomicky využita. Konstrukci např. ovlivňuje i velikost záběrového pole, velikost odebírané třísky

a další vlivy. Dokud se tyto vlivy nebudou při konstrukci fréz brát v úvahu, frézy nebudou hospodárně využívány. Optimální řezné podmínky jsou závislé i na ceně nástroje. Cenu je nutné předkalkulovat předem, je tedy nutné ji vypočítat. To je možné jenom při navrhování technologického postupu výroby frézy pomocí počítače.

Podrobněji je možno cíl práce specifikovat následovně. Pro splnění vytčených úkolů je nutné vypracovat obecnou teorii navrhování, podle které by bylo možné navrhnout výchozí povrch pro součást libovolného profilu. Dosavadní způsoby výpočtů se liší pro evolventní profily (ozubení) a neevolventní profily. Přitom pro evolventní ozubení je podrobně vypracována teorie /72/, /52/ a velická pozornost je věnována i otázkám přesnosti, kdežto pro neevolventní profily se frézy navrhuji převážně podle náhradních křivek /13/, /89/.

Dalším úkolem je provést přeměnu výchozího povrchu v řezný nástroj a tím získat ostří. Ostří nástroje vznikne jako průsečnice čela a obálky. To představuje řešení rovnic vyšších řádů, které lze s úspěchem řešit pouze pomocí číslicového počítače. Po získání ostří je nutné z výrobních důvodů u fréz provést náhradu vypočítaného profilu.

Konstrukční část a část pojednávající o geometrii břitu je společná pro evolventní i neevolventní profily. Zde je nutno tedy sjednotit ještě některé odlišnosti, aby těleso frézy mohlo být rovněž navrženo pomocí počítače. Při určování řezných úhlů nástroje vycházet z pracovní (technologické) geometrie, tj. s přihlédnutím na řezné podmínky zejména v některých extrémních případech.

Po navržení frézy je nutné stanovit technologický postup ekonomické výroby. Při jeho sestavování je nutné využít zkušeností předních výrobců těchto fréz (obdobně je možné postupovat i u jiných nástrojů) a sestavit předpis, který by bylo možno použít i u menších výrobců. To opět umožňuje číslicový počítač, který je "schopen" kromě výrobního postupu stanovit parametry výroby, přiřadit stroje, nástroje, vypočítat technologické časy a provést poměrně přesnou předkalkulaci ceny nástroje. Tato hodnota může být použita jako pomůcka při plánování výroby.

Po navržení nástroje a jeho vyrobení je vhodné tento vybavit doprovodnými údaji - za jakých podmínek má pracovat příp.

pro jaké podmínky je určen. Je tedy potřeba zjistit záběrové poměry, tj. rozměry záběrového pole, nastavení frézy vzhledem k frézované součásti, stanovit optimální řezné podmínky, optimální trvanlivost, příp. optimální krokování odvalemí frézy, provést rozbor odebírané třísky, tj. její tloušťku a délku. Tyto údaje mohou zpětně ovlivnit vlastní konstrukci frézy.

Ke splnění a plnému a úspěšnému zavedení těchto cílů do praxe je nutné mít k dispozici potřebné technické prostředky, které mohou přispět k zvýšení produktivity práce v technické přípravě výroby, úspoře pracovních sil v této oblasti, ke kvalitativně vyššímu stupni řízení výroby, k lepšímu využití nástrojů a strojů a tedy i k nižším nákladům na výrobu.

1. STANOVENÍ VÝCHOZÍHO POVRCHU ODVALOVACÍCH FRÉZ

Požadovaný tvar i velikost určité plochy součásti je při obrábění závislý na tvaru a rozměrech profilující části ostří nástroje a na relativním pohybu nástroje vůči obráběné součásti. Profilující části ostří nástroje musí ležet na povrchu, jež se při obrábění stýká s danou plochou součásti. Takovému povrchu se říká výchozí povrch řezného nástroje /62/, /67/. Prvním krokem při návrhu libovolného řezného nástroje je stanovení výchozího povrchu nástroje jako povrchu sdruženého s povrchem součásti. Sdružené povrchy jsou v podstatě vzájemně se obalující plochy, vznikající při relativním pohybu nástroje a součásti při obrábění. Zákonitosti vytváření obalových ploch, kterých se bude využívat při navrhování odvalovacích fréz jsou uvedeny v této kapitole.

1.1 Teorie výchozího povrchu

1.1.1 Obecná teorie obalových ploch

Pro stanovení výchozího povrchu odvalovacích fréz bude důsledně použito teorie obalových ploch i s nutnými předpoklady /6/, /12/, /44/. Nebude zde v plném znění prováděna, bude pouze uvedena přímá aplikace na plochy řezných nástrojů. Rovněž aplikace tenzorů otočení bude provedena bez bližšího vysvětlení, protože již byla uvedena v publikacích autora /46/, /48/ i dalších /47/.

Mějme danou plochu součásti (dále jen S) a plochu nástroje (dále N). Za určitých předpokladů /6/ platí, že S a N jsou regulární plochy.

Nechť plocha součásti (nástroje) má rovnici

$$X = X(u, v, t) \quad (1.1)$$

a pro každé t má spojitě parciální derivace podle tohoto parametru až do druhého řádu. Potom množinu všech ploch určených rovnicí (1.1) nazýváme jednoparametrickou soustavou ploch.

Předpokládejme, že dvě soumезné plochy S a N z jednoparametrické soustavy se protínají v nějaké průsečnici.

Libovolný bod na této průsečnici nechť má souřadnice (u, v, t) na ploše součásti S a nechť je současně bodem plochy nástroje N . Potom tento bod má vzhledem k ploše nástroje N souřadnice $(u+du, v+dv, t+dt)$, kde N je plocha určená rovnicí

$$X = X(u, v, t+dt) \quad (1.2)$$

Podmínka, aby bod ležel současně v soumезných plochách součásti S a nástroje N

$$X(u, v, t) = X(u+du, v+dv, t+dt) \quad (1.3)$$

Nebo též z Taylorova rozvoje vyplývá, když se zanedbají vyšší mocniny

$$X_u du + X_v dv + X_t dt = 0 \quad (1.4)$$

kde

$$X_u = \frac{\partial X}{\partial u} ; \quad X_v = \frac{\partial X}{\partial v} ; \quad X_t = \frac{\partial X}{\partial t} \quad (1.5)$$

Odtud vyplývá, že tři vektory X_u , X_v , X_t jsou komplanární a proto smíšený součin (determinant tří vektorů) bude roven nule.

$$X_u \cdot (X_v \times X_t) = \det |X_u \ X_v \ X_t| = 0 \quad (1.6)$$

(X_u , X_v tvoří tečnou rovinu ve které leží vektor rychlosti X_t).

Je-li (u, v, t) řešením rovnice (1.6) lze z této rovnice vyjádřit jednu ze tří proměnných

$$t = t(u, v) \quad (1.7)$$

Dosažením rovnice (1.7) do rovnice (1.1) dostaneme rovnici nástroje N ze známé plochy součásti S nebo i naopak.

Rovnice obalové plochy

$$X = X(u, v, t(u, v)) \quad (1.8)$$

K této rovnici lze dospět i jiným postupem [12/.

Charakteristika

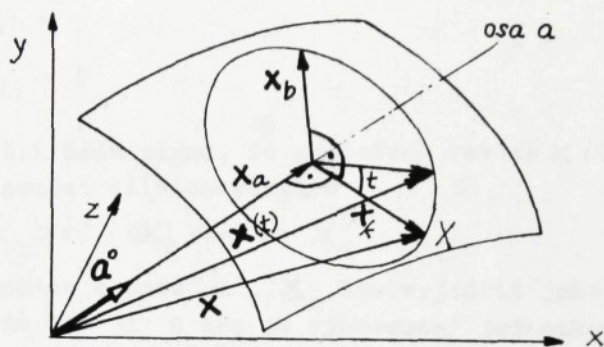
Pro $t = t_0 = \text{konstanta}$ lze napsat

$$q(u, v) = 0 \Rightarrow u = u(v, t_0) \quad (1.9), (1.10)$$

$$\mathbf{X} = \mathbf{X}(u(v, t_0), v, t_0) \quad (1.11)$$

1.1.2 Tenzor otočení

Budiž dána plocha součástí nebo nástroje S (obr. 1.1) na níž je libovolný bod X . Radiusvektor $\mathbf{X}$ tohoto bodu nechť se otáčí v souřadnicové soustavě xyz kolem osy a .



✓ Obr. 1.1

Úhel pootočení vektoru v rovině kolmé na osu otáčení nechť je t . Jednotkový vektor ve směru osy otáčení nechť je $\mathbf{a}^0$. Pootočený vektor $\mathbf{X}$ označíme $\mathbf{X}(t)$. Vektor $\mathbf{X}$ lze rozložit do dvou směrů. Do osy a - vektor $\mathbf{X}_a$ a do směru kelmého na osu a - vektor $\mathbf{X}_k$. Dále předpokládejme, že vektor $\mathbf{X}_b$ leží v rovině rotace koncevého bodu radiusvektoru $\mathbf{X}$ a je současně kelmý na vektor $\mathbf{X}_k$. Pak lze napsat

$$\mathbf{X} = \mathbf{X}_a + \mathbf{X}_k \quad (1.12)$$

$$\mathbf{x}_b = \mathbf{a}^0 \times \mathbf{X} = \mathbf{a}^0 \times \mathbf{X}_k \quad (1.13)$$

$$\mathbf{X} = \mathbf{X}(x_1, x_2, x_3)$$

$$\mathbf{a}^0 = \mathbf{a}^0(a_1, a_2, a_3)$$

$$\mathbf{x}_b = \mathbf{a}^0 \times \mathbf{X} = \begin{vmatrix} \mathbf{i} & \mathbf{j} & \mathbf{k} \\ a_1 & a_2 & a_3 \\ x_1 & x_2 & x_3 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0 & -a_3 & a_2 \\ a_3 & 0 & -a_1 \\ -a_2 & a_1 & 0 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{vmatrix} \quad (1.14)$$

$$x_b = R(a^0) \cdot x \quad (1.15)$$

$$R(a^0) = \begin{vmatrix} 0 & -a_3 & a_2 \\ a_3 & 0 & -a_1 \\ -a_2 & a_1 & 0 \end{vmatrix} \quad (1.16)$$

$R(a^0)$ je antisymetrický tenzor splňující tyto podmínky

$$1) \quad a_{ij} = -a_{ji}$$

$$2) \quad a_{ii} = 0$$

Z obr. 1.1 dále plyne, že pootočený vektor $X(t)$ lze zapsat jako součet dílčích vektorů

$$X(t) = X_k \cos t + X_b \sin t + X_a \quad (1.17)$$

Rovnoběžný vektor s osou a , X_a lze vyjádřit jako průmět vektoru X do osy a a ten je vynásobený jednotkovým vektorem a^0

$$X_a = a^0 \otimes a^0 \cdot X \quad (1.18)$$

kde $a^0 \otimes a^0$ je diadický součin vektoru a^0 (platí $a^0 \otimes a^0 = a^0 \otimes a^{0*}$, kde a^{0*} je transponovaný tenzor sleupcový).

$$X_k = X - X_a = X - a^0 \otimes a^0 \cdot X = (E - a^0 \otimes a^0) \cdot X \quad (1.19)$$

kde E je jednotkový tenzor (tenzor identity)

$$E_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{je-li } i = j \\ 0, & \text{je-li } i \neq j \end{cases}$$

Rozepsaný vztah (1.18) má tvar

$$X_a = \begin{vmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{vmatrix} =$$

$$= \begin{vmatrix} a_1 a_1 & a_1 a_2 & a_1 a_3 \\ a_2 a_1 & a_2 a_2 & a_2 a_3 \\ a_3 a_1 & a_3 a_2 & a_3 a_3 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{vmatrix} \quad (1.20)$$

Dosažením (1.19)(1.15) (1.18) do (1.17) dostaneme

$$\mathbf{x}(t) = [(\mathbf{E} - \mathbf{a}^0 \otimes \mathbf{a}^0) \cos t + \mathbf{R}(\mathbf{a}^0) \sin t + \mathbf{a}^0 \otimes \mathbf{a}^0] \mathbf{x} = \mathbf{A}_a^t \mathbf{x} \quad (1.21)$$

$$\mathbf{x}(t) = \mathbf{A}_a^t \cdot \mathbf{x} \quad (1.22)$$

$\mathbf{A}_a^t$ je tenzor otočení, tímto se vektor $\mathbf{x}$ otočí o konstantní úhel t aniž se změní velikost vektoru. Celá soustava se otáčí ale nedeformuje.

Vlastnosti tenzoru otočení

$$\mathbf{A}_a^t = (\mathbf{E} - \mathbf{a}^0 \otimes \mathbf{a}^0) \cos t + \mathbf{R}(\mathbf{a}^0) \sin t + \mathbf{a}^0 \otimes \mathbf{a}^0 \quad (1.23)$$

První derivace (1.23) podle t

$$\left. \frac{d\mathbf{A}_a^t}{dt} \right|_{t=0} = \mathbf{R}(\mathbf{a}^0) \quad (1.24)$$

$$\frac{d\mathbf{A}_a^t}{dt} = \mathbf{R}(\mathbf{a}^0) \cdot \mathbf{A}_a^t \quad (1.25)$$

Derivace potočeného vektoru (1.22)

$$\frac{d}{dt} (\mathbf{A}_a^t \cdot \mathbf{x}) = \mathbf{R}(\mathbf{a}^0) \mathbf{A}_a^t \mathbf{x} = \mathbf{R}(\mathbf{a}^0) \mathbf{x}(t) = \mathbf{a}^0 \times \mathbf{x}(t) \quad (1.26)$$

Řešení této rovnice je obdobné jako v jednorozměrném případě

$$\mathbf{x}(t) = e^{\mathbf{R}(\mathbf{a}^0)t} \mathbf{x} \quad (1.27)$$

Srovnáním (1.22) a (1.27) plyne

$$\mathbf{A}_a^t = e^{\mathbf{R}(\mathbf{a}^0)t}, \text{ kde obecně} \quad (1.28)$$

$$e^B = \mathbf{E} + \frac{B}{1!} + \frac{B^2}{2!} + \dots$$

Odtud také

$$\frac{d}{dt} (e^{\mathbf{R}(\mathbf{a}^0)t}) = \mathbf{R}(\mathbf{a}^0) \cdot e^{\mathbf{R}(\mathbf{a}^0)t} = \mathbf{R}(\mathbf{a}^0) \cdot \mathbf{A}_a^t$$

Zřejmě platí, že tenzory reciproké a transponované jsou si rovný

$$(A_a^t)^{-1} = (A_a^t)^* \quad (1.29)$$

a pro otáčení kolem téže osy lze psát

$$A_a^c A_a^{pt} = A_a^{c+pt} \quad (1.30)$$

pak derivace (1.30)

$$\frac{d}{dt} (A_a^{c+pt}) = p R(a^o) A_a^{c+pt} \quad (1.31)$$

Z obr. 1.1 rovněž plyne

$$|A_a^t x| = |A_a^t x(t)| = |x| - |x(t)| \quad (1.32)$$

Zkrácené uvedení teorie tenzoru otočení umožní řešení úloh vyšetřování výchozího povrchu odvalovacích fréz.

1.1.3 Zavedení tenzoru otočení pro obalové plochy vzniklé při rotačních pohybech kolem dvou mimoběžných os

~~Podmínka valení~~ Převodový poměr

$$p = \frac{\omega_n}{\omega_s} \quad (1.33)$$

Z obr. 1.2 vyplývá

$$r = m - q \quad (1.34)$$

Trajektorie bodu M při rotaci kolem osy σ_n

$$b. B_n = A_n^{pt} \cdot r = A_n^{pt} (m - q) \quad (1.35)$$

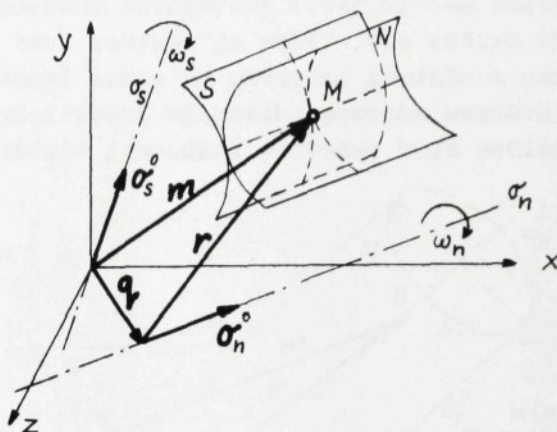
Trajektorie bodu M při rotaci kolem osy σ_s

$$b. B_s = A_s^t (q + A_n^{pt} (m - q)) \quad (1.36)$$

Derivace součinu tenzorů otočení

$$\frac{d}{dt} (A_s^t A_n^{pt}) = (A_s^t)' A_n^{pt} + A_s^t (A_n^{pt})'$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} (A_s^t A_n^{pt}) &= R(\sigma_s^o) A_s^t \cdot A_n^{pt} + p A_s^t R(\sigma_n^o) A_n^{pt} = \\ &= [R(\sigma_s^o) + p R(A_s^t \sigma_n^o)] A_s^t A_n^{pt} \end{aligned} \quad (1.37)$$



Obr. 1.2

1.1.4 Formulace úlohy pro odvalovací frézování

Proces frézování odvalovacími frézami lze studovat jako vzájemně závislý pohyb dvou členů, které se po sobě odvalují (viz obr. 1.3). Přitom oba členy (v našem případě válce) se otáčejí kolem svých os σ_s a σ_n , jež jsou mimoběžné.

Zvolme vektor m jako polohový vektor bodu M , ležícího na ose válce součásti, vzhledem k pevně zvolenému bodu O na ose válce nástroje.

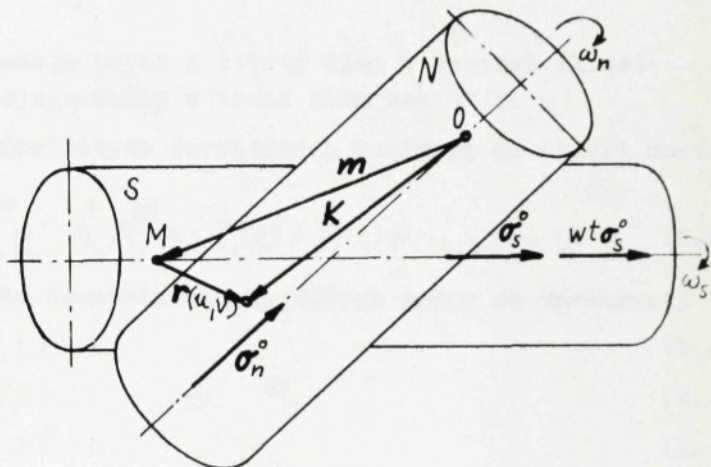
Zastavme pohyb nástroje a nechme pohybovat součást vzhledem k nehybnému nástroji s tím, že součást přejímá všechny pohyby dosud vykonávané nástrojem. Označme plochu povrchu součásti symbolem K . Nyní napišme vztah, který bude vyjadřovat celou soustavu těchto povrchů při vykonávání příslušných pohybů vzhledem k bodu O .

$$K = A_n^t (m + A_s^{pt} r(u, v) + w t \sigma_s^o) \quad (1.38)$$

Pevrək səuǵástı pro nulovou hodnotu parametrů t a w je možné popsat ve tvaru

$$k = m + r(u, v) \quad (1.39)$$

Člen $w t \sigma_s^0$, který se vyskytuje ve vztahu (1.38) a uplatňuje se při modelování výchozího povrchu odvalovací frézy, dourčuje ve skutečnosti celé schéma obrábění a zaručuje vytvoření celého povrchu součásti, nikoliv jeho profilu. Při vyšetřování výchozího povrchu odvalovací frézy bychom tento člen mohli zařadit k tzv. pohybu "po sobě". Dle autora tohoto pojednání /63/, nepůsobí tento na utváření profilu a není tedy nutno jej pro vyšetřování výchozího povrchu uvažovat. V této teorii a s ním z důvodů zobecnění problému bude počítáno.



Obr. 1.3 ✓

Upravená rovnice (1.38) má tvar

$$K = A_n^t m + A_n^t A_s^{pt} r(u, v) + A_n^t w t \sigma_s^o \quad (1.40)$$

Aby byla splněna podmínka valení povrchu součástí po nástroji musí platit vztah (1.6), čili

$$\det |K_u, K_v, K_t| = 0 \quad (1.41)$$

Parciální derivace

$$K_u = \frac{\partial K}{\partial u} ; \quad K_v = \frac{\partial K}{\partial v} ; \quad K_t = \frac{\partial K}{\partial t}$$

Z rovnice (1.40) pak

$$K_u = A_n^t A_s^{pt} \frac{\partial r(u, v)}{\partial u} = A_n^t A_s^{pt} r_u \quad (1.42)$$

$$K_v = A_n^t A_s^{pt} \frac{\partial r(u, v)}{\partial v} = A_n^t A_s^{pt} r_v \quad (1.43)$$

$$K_t = R(\sigma_n^o) A_n^t m + R(\sigma_n^o) A_n^t A_s^{pt} r(u, v) + \\ + A_n^t R(\sigma_s^o) p A_s^{pt} r(u, v) + (R(\sigma_n^o) t + E) A_n^t w \sigma_s^o \quad (1.44)$$

$$K_t = T_1(t) + T_2(t) r(u, v) \quad (1.45)$$

$T_1(t)$ představuje první a čtvrtý člen v rovnici (1.44)

$T_2(t)$ představuje druhý a třetí člen bez $r(u, v)$

Dosažením jednotlivých parciálních derivací do (1.41) dostaneme

$$\det [A_n^t A_s^{pt} r_u, A_n^t A_s^{pt} r_v, T_1(t) + T_2(t) r(u, v)] = 0 \quad (1.46)$$

Řešením tohoto determinantu vyjádříme jednu ze závislostí

$$u = u(v, t) \quad (1.47)$$

$$v = v(u, t) \quad (1.48)$$

$$t = t(u, v) \quad (1.49)$$

Jestliže dosadíme závislost (1.47) do rovnice (1.38) pak rovnice obálky bude mít vyjádření

$$K = A_n^t (m + A_s^{pt} r(u(v, t), v) + w t \sigma_s^o) \quad (1.50)$$

1.1.4.1 Charakteristika

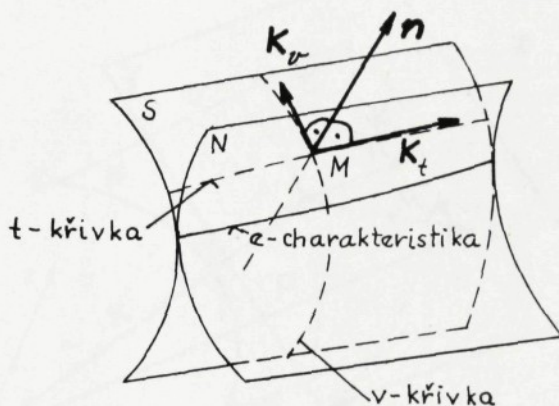
Charakteristikou nazýváme čáru styku vzájemně se po sobě valících obalových ploch součástí a nástroje /63/. Ze vztahu pro stanovení výchozího povrchu odvalovací frézy (1.50) je zřejmé, že K je funkcí parametrů v a t . Jestliže se zvolí jeden z nich konstantní, druhý zůstane proměnný, získá se tím charakteristika (parametrická křivka). Při konstantním v

dostaneme parametrickou t -křivku, při konstantním t parametrickou v -křivku (viz obr. 1.4).

Tečné vektory k parametrickým křivkám dostaneme jako parciální derivace rovnice obalové plochy podle příslušných parametrů

$$K_v = \frac{\partial K}{\partial v} = A_n^t A_s^{pt} \frac{\partial r(u(v,t), v)}{\partial v} \quad (1.51)$$

$$K_t = \frac{\partial K}{\partial t} = \frac{\partial A_n^t}{\partial t} m + \frac{\partial A_n^t}{\partial t} A_s^{pt} r(u(v,t), v) + \frac{\partial}{\partial t} (A_n^t w t \sigma_s^o) + \\ + A_n^t \frac{\partial A_s^{pt}}{\partial t} r(u(v,t), v) + A_n^t A_s^{pt} \frac{\partial r(u(v,t), v)}{\partial t} \quad (1.52)$$



Obr. 1.4

1.1.4.2 Normála k obalové ploše

Jestliže jsme si vyjádřili tečné vektory k parametrické v -křivce a t -křivce, pak vektorový součin těchto vektorů vyjadřuje vektor normály

$$n = \frac{\partial K}{\partial v} \times \frac{\partial K}{\partial t} \quad (1.53)$$

Dosažením vztahů (1.51) a (1.52) do (1.53) získáme rovnici normály k obalové ploše ve tvaru

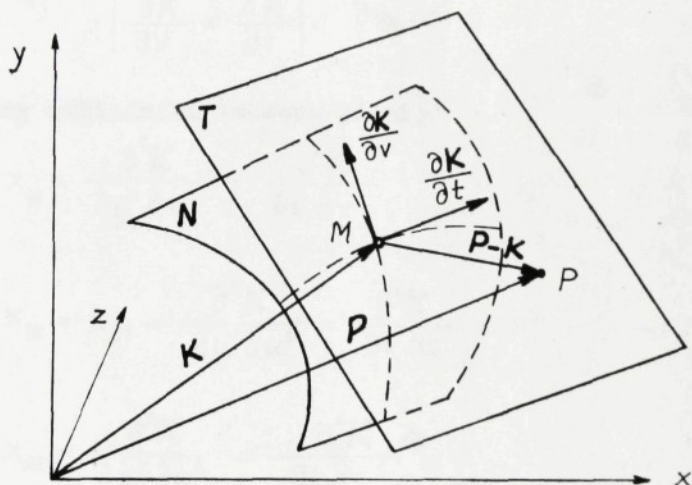
$$n = \begin{vmatrix} i & j & k \\ \frac{\partial K^x}{\partial v} & \frac{\partial K^y}{\partial v} & \frac{\partial K^z}{\partial v} \\ \frac{\partial K^x}{\partial t} & \frac{\partial K^y}{\partial t} & \frac{\partial K^z}{\partial t} \end{vmatrix} \quad (1.54)$$

1.1.4.3 Tečná rovina obalové plochy

Předpokládejme, že je dán regulární bod M plochy N (obr. 1.5). V takovém bodě existuje jediná tečná rovina. Jestliže si v této rovině zvolíme bod P s radiusvektorem P vzhledem k počátku, pak můžeme rovnici roviny napsat ve tvaru /27/.

$$(P-K) \cdot \left(\frac{\partial K}{\partial v} \times \frac{\partial K}{\partial t} \right) = 0 \quad (1.55)$$

Vektor $(P-K)$ musí být komplanární s tečnými vektory K_v a K_t .



Obr. 1.5

1.1.4.4 Křivost křivky na povrchu nástroje

Při vyjádření křivosti vyjdeme z předpokladů uvedených v /6/. Buď $X = X(u^1, u^2)$ vektorová rovnice regulární plochy N . V bodě $X(u^1, u^2)$ si určíme jednotkový vektor normály n^0 a dva tečné vektory X_1 a X_2 .

$$n_i^0 = \frac{\partial n^0}{\partial u^i} \quad (1.56)$$

$$X_{ij} = \frac{\partial^2 X}{\partial u^i \partial u^j} = \frac{\partial X_i}{\partial u^j} \quad (1.57)$$

pak druhý základní tenzor plochy (tenzor v kovariantních souřadnicích)

$$h_{ij} = -h_i^0 x_j = h^0 x_{ij} \quad (1.58)$$

Pro plochu popsanou rovnicí (1.50) je $u^1 = v$, $u^2 = t$

$$x_{ij} = \frac{\partial^2 K}{\partial u^i \partial u^j} = \frac{\partial^2}{\partial u^i \partial u^j} \left[A_n^t (m + A_s^{pt} r(u(v, t), v) + wt \sigma_s^0) \right] \quad (1.59)$$

$$h_{ij} = \frac{\frac{\partial K}{\partial v} \times \frac{\partial K}{\partial t}}{\left| \frac{\partial K}{\partial v} \times \frac{\partial K}{\partial t} \right|} \cdot \frac{\partial^2 K}{\partial v \partial t} \quad (1.60)$$

Složky základního tenzoru plochy

$$x_{11} = \frac{\partial^2 K}{\partial u^1 \partial u^1} = \frac{\partial^2 K}{\partial v \partial v} \quad (1.61)$$

$$x_{12} = x_{21} = \frac{\partial^2 K}{\partial u^1 \partial u^2} = \frac{\partial^2 K}{\partial v \partial t} \quad (1.62)$$

$$x_{22} = \frac{\partial^2 K}{\partial u^2 \partial u^2} = \frac{\partial^2 K}{\partial t \partial t} \quad (1.63)$$

Proložme v libovolném bodě $X(u^1, u^2)$ plochy N křivku k , která bude mít rovnici

$$u^i = u^i(t) \quad (1.64)$$

Označme du^i diferenciál funkce $u^i(t)$

$$du^i = u^i dt \quad (1.65)$$

pak při určitém postupu /6/ lze odvodit vztah

$$\varphi_1 \equiv g_{ij} du^i du^j \quad (1.66)$$

což představuje tzv. první základní formu plochy.

Tenzor

$$g_{ij} = x_i \cdot x_j \quad (1.67)$$

Podle /6/, /27/ lze normální křivost křivky k vyjádřit vztahem

$$\bar{\kappa} = \frac{h_{ij} du^i du^j}{g_{ij} du^i du^j} = \frac{\varphi_2}{\varphi_1} \quad (1.68)$$

Hodnota φ_2 nazýváme druhou základní formou plochy.

1.2 Výchozí povrch a tvar ostří obráběcích fréz pro danou rovinou plochu součásti

Na základě teorie uvedené v předchozích kapitolách bude zde provedena aplikace na několika typech povrchů. Podle /62/, /63/ plocha součásti nabývá v zásadě tří tvarů. Buď je to plocha válcová, rotační nebo šroubová. Pro tyto plochy součásti by se měl vyšetřovat výchozí povrch nástroje. Protože tyto mohou zaujímat vzhledem k osám rotace různé polohy, a povrch součásti je obvykle složen z více tvarů, vzniká veliké množství konfigurací, jejich řešení není možné v této práci postihnout. Zaměříme se pouze na ty nejpoužívanější.

1.2.1 Stanovení výchozího povrchu

Rovinná plocha jako zvláštní případ válcové je jednou z ploch vyskytujících se u součástí vyráběných odvalovacími frézami. Provedeme aplikaci vyšetřování výchozího povrchu nástroje pro obrábění této plochy.

Budiž plocha součásti S (obr. 1.6) určena parametry u, v .

Bod M na ploše S je popsán dvěma hodnotami u, v vzhledem k nějakému pevně zvolenému bodu Q na ose součásti.

Vyjádření plochy

$$r(u, v) = \rho + uq + v\sigma_s^o \quad (1.69)$$

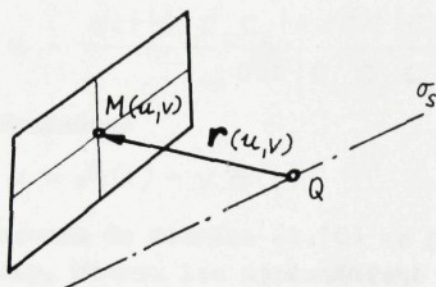
dosadíme do rovnice (1.38)

$$K = A_n^t \left(m + A_s^{pt} (\rho + uq + v\sigma_s^o) + w.t\sigma_s^o \right) \quad (1.70)$$

Rovnice (1.70) vyjadřuje plochu povrchu součásti při libovolném jejím potočení kolem os σ_n , σ_s a posunutí kolem osy σ_s . Obálku parametrické soustavy ploch (1.70) představuje teoreticky výchozí povrch odvalovací frézy. Budeme vycházet z podmínky odvalení (1.6). Vyjádříme jednotlivé partiální derivace výrazu (1.70) podle proměnných u , v , t .

$$K_u = A_n^t A_s^{pt} q = c_1 \quad (1.71)$$

$$K_v = A_n^t A_s^{pt} \sigma_s^o = A_n^t \sigma_s^o = c_2 \quad (1.72)$$



Obr. 1.6

Přepíšeme rovnici (1.70)

$$K = A_n^t m + A_n^t A_s^{pt} (\rho + uq + v\sigma_s^o) + A_n^t w \cdot t \sigma_s^o$$

pak derivace podle t

$$K_t = R(\sigma_n^o) A_n^t m + R(\sigma_n^o) + p R(A_n^t \sigma_s^o) A_n^t A_s^{pt} (\rho + uq + v\sigma_s^o) + (R(\sigma_n^o)t + E) A_n^t w \sigma_s^o \quad (1.73)$$

Substitute

$$\begin{aligned} a &= A_n^t A_s^{pt} \\ b &= R(\sigma_n^o) + p R(A_n^t \sigma_s^o) \\ c_3 &= R(\sigma_n^o) A_n^t m + (R(\sigma_n^o)t + E) A_n^t w \sigma_s^o + b a \rho \end{aligned} \quad (1.74)$$

$$c_4 = a \cdot q \quad (1.75)$$

$$c_5 = a \cdot \sigma_s \quad (1.76)$$

$$K_t = c_3 + u c_4 + v c_5 \quad (1.77)$$

dosadíme do rovnice (1.6)

$$\det |c_1; c_2; c_3 + u c_4 + v c_5| = 0$$

po rozepsání (smíšený součin)

$$\det |c_1, c_2, c_3| + u \det |c_1, c_2, c_4| + v \det |c_1, c_2, c_5| = 0 \quad (1.78)$$

Pak závislost parametru u na v

$$u = \frac{\det |c_1, c_2, c_3| + v \det |c_1, c_2, c_5|}{\det |c_1, c_2, c_4|} \quad (1.79)$$

zjednodušeně

$$u = A(t) + v B(t) \quad (1.80)$$

dosazením do rovnice (1.70) za parametr u , obdržíme rovnici obálky, kterou lze zjednodušeně napsat

$$OB - KA(t) + v KB(t) \quad (1.81)$$

nebo změnou vyjádření závislosti parametru v na u z rovnice (1.48)

$$OB = U(t) + u V(t) \quad (1.82)$$

Pro pevně zvolené t dostáváme přímku, jejíž je charakteristikou hledané obalové plochy (která je nutně plochou rozvinutelnou).

1.2.2 Vyjádření tvaru ostří odvalovací frézy

Průřeznice čela a výchozího povrchu řezného nástroje tvoří profil ostří odvalovací frézy. Ten je závislý na tom, jaká plocha byla zvolena pro čelo nástroje, tj. jaký tvar má drážka. U odvalovacích fréz se mohou vyskytovat drážky přímé nebo šroubovitě. U přímých drážek je čelo břitu rovinnou plochou

zaujímající různou polohu vzhledem k ose frézy, a to podle velikosti úhlu čela. U drážek šroubovitých je čelo plochou šroubovou. Rovinné čelo se zpravidla vyskytuje u skládaných fréz, šroubovitě u fréz celistvých.

Řez obálky obecnou plochou

Parametrické vyjádření plochy

$$Y = Y(s, z) \quad (1.83)$$

Hledáme-li průsečík obálky (1.82) s plochou (1.83), pak platí

$$U(t) + u V(t) = Y(s, z) \quad (1.84)$$

1.2.2.1 Řez obálky rovinnou plochou

$$Y = Q + P_s + R_z \quad (1.85)$$

$$U(t) + u V(t) = Q + P_s + R \cdot z \quad (1.86)$$

Dostáváme soustavu tří lineárních rovnic pro tři neznámé u , s , z .

$$P_s + R_z - u V(t) = U(t) - Q \quad (1.87)$$

Označme maticí

$$M = \begin{bmatrix} P & R & -V(t) \end{bmatrix} \quad (1.88)$$

po úpravě

$$\begin{bmatrix} s \\ z \\ u \end{bmatrix} = M^{-1}(U(t) - Q) \quad (1.89)$$

kde s , z , u jsou hledané parametry. Dosazením do rovnice obálky (1.82) nebo (1.85) získáme průsečík roviny s t -charakteristikou obálky.

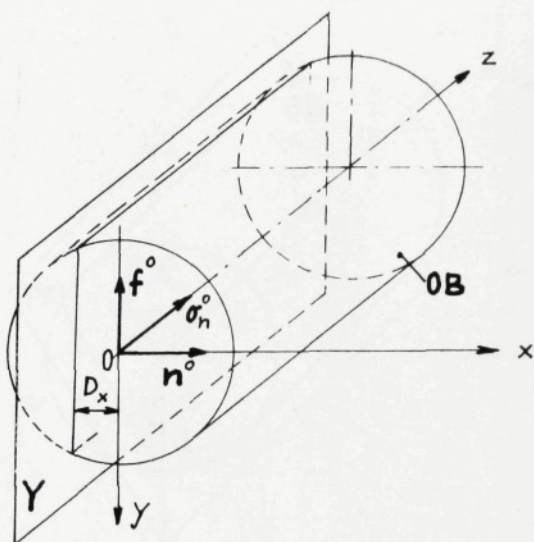
Vektorové vyjádření roviny řezu v normálovém tvaru

Je-li rovina (obr. 1.7) daná rovnicí

$$Y \cdot n^o = D_x \quad (1.90)$$

vektor normály

$$n^o = \sigma_n^o \times f^o \quad (1.91)$$



Obr. 1.7

Hledáme-li průsečík s t -charakteristikou obálky, pak dosadíme do vztahu (1.90) a (1.82)

$$Y = OB$$

$$(U(t) + u V(t)) \cdot n^o = D_x$$

Odkud

$$U(t)n^o + u V(t)n^o = D_x$$

$$u = \frac{D_x - U(t) \cdot n^o}{V(t)n^o} \quad (1.92)$$

Dosažením do rovnice obálky (1.82) získáme hledaný průsečík s t -charakteristikou.

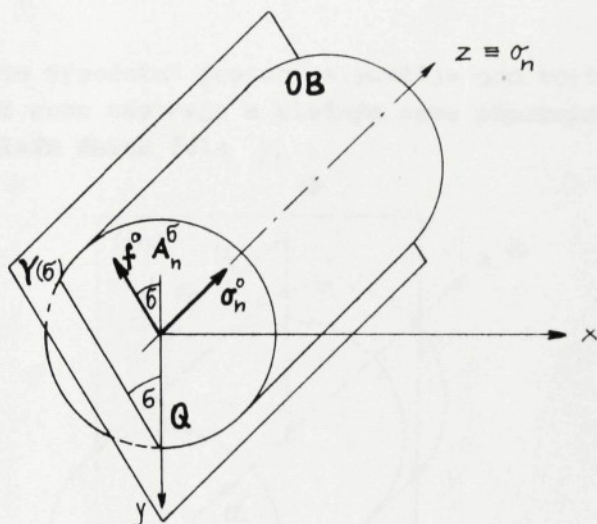
Řez obálky rovinou rovnoběžnou s osou σ_n a jdoucí mimo počátek bodem Q (obráz. 1.8).

Vyjdeme z obecné rovnice roviny (1.85)

$$Y(\sigma) = Q + s \sigma_n^o + z A_n^{\bar{\sigma}} f^o \quad (1.93)$$

Po úpravě

$$s \sigma_n^o + z A_n^{\bar{\sigma}} f^o - u V(t) = U(t) - Q \quad (1.94)$$



Obr. 1.8

Matic

$$M = \begin{vmatrix} \sigma_n^o & A_n^{\bar{\sigma}} f^o & -V(t) \end{vmatrix} \quad (1.95)$$

$$\begin{vmatrix} s \\ z \\ u \end{vmatrix} = M^{-1} (U(t) - Q) \quad (1.96)$$

Pokud bude rovina řezu a tedy i bod Q v jiné pootočené poloze o úhel ϑ , rovnici (1.93) násobíme tenzorem otočení A_u^{ϑ} . Rovnice se pak změní

$$Y(\vartheta) = A_n^{\vartheta} (Q + s \sigma_n^o + z A_n^{\bar{\sigma}} f^o) \quad (1.93.1)$$

Po úpravě

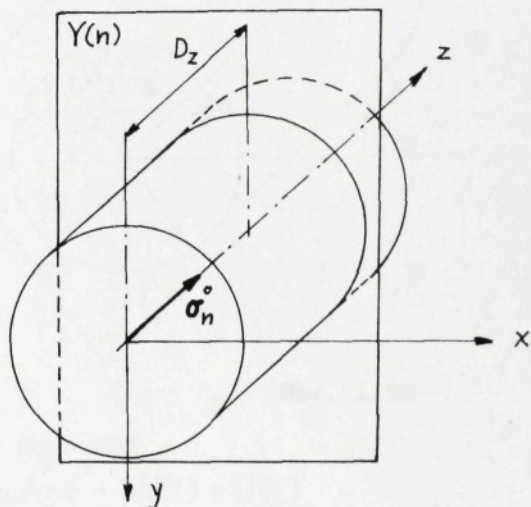
$$Y(\vartheta) = A_n^{\vartheta} Q + s A_n^{\vartheta} \sigma_n^o + z A_n^{\vartheta} A_n^{\bar{\sigma}} f^o$$

$$U(t) + u V(t) = A_n^{\vartheta} Q + s A_n^{\vartheta} \sigma_n^{\circ} + z A_n^{\vartheta} A_n^{\beta} f^{\circ} \quad (1.94.1)$$

$$M = \|\sigma_n^{\circ}, A_n^{\vartheta+\beta} f^{\circ}, -V(t)\| \quad (1.95.1)$$

$$\begin{vmatrix} s \\ z \\ v \end{vmatrix} = M^{-1} (U(t) - A_n^{\vartheta} Q) \quad (1.96.1)$$

Tento výpočetní postup se použije pro rovinné čelo procházející osou nástroje s kladným nebo záporným nástrojovým ortogonálním úhlem čela γ_0 .



Obr. 1.9

Řez obálky rovinou kolmou k ose nástroje (obr. 1.9)

$$Y(n) \sigma_n^{\circ} = D_z \quad (1.97)$$

průsečnice obálky s rovinou

$$(U(t) + u V(t)) \sigma_n^{\circ} = D_z$$

$$U(t) \sigma_n^{\circ} + u V(t) \sigma_n^{\circ} = D_z$$

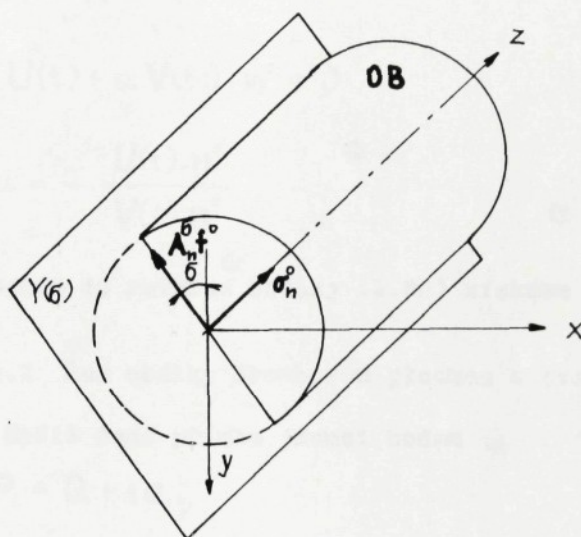
$$u = \frac{D_z - U(t) \sigma_n^{\circ}}{V(t) \sigma_n^{\circ}} \quad (1.98)$$

Dosažením do rovnice obálky získáme průsečnici s normálovou rovinou.

Řez obálky rovinou jdoucí osou nástroje (obr. 1.10)

$$Y(\delta) = P_s + R_z \quad (1.99)$$

$$Y(\delta) = s \sigma_n^o + z A_n^{\delta} f^o \quad (1.100)$$



Obr. 1.10

Po úpravě a dosazení

$$s \sigma_n^o + z A_n^{\delta} f^o - u V(t) = U(t) \quad (1.101)$$

maticky koeficientů

$$M = \left\| \sigma_n^o, A_n^{\delta} f^o - V(t) \right\| \quad (1.102)$$

Řešení tří lineárních rovnic

$$\begin{pmatrix} s \\ z \\ u \end{pmatrix} = M^{-1} U(t) \quad (1.103)$$

Dosažením do rovnice obálky nebo roviny získáme průsečnici roviny s obálkou.

Jiná varianta pomocí vektoru normály roviny

$$\mathbf{n}^o = \boldsymbol{\sigma}_n^o \times \mathbf{f}^o \quad (1.104)$$

v obecné poloze

$$\mathbf{A}_n^{\bar{\sigma}} (\boldsymbol{\sigma}_n^o \times \mathbf{f}^o) = \boldsymbol{\sigma}_n^o \times \mathbf{A}_n^{\bar{\sigma}} \mathbf{f}^o = \mathbf{n}^o \quad (1.105)$$

rovnice roviny

$$\mathbf{Y}(\bar{\sigma}) \cdot \mathbf{n}^o = 0 \quad (1.106)$$

$$(\mathbf{U}(t) + u \mathbf{V}(t)) \cdot \mathbf{n}^o = 0 \quad (1.107)$$

$$u = - \frac{\mathbf{U}(t) \cdot \mathbf{n}^o}{\mathbf{V}(t) \cdot \mathbf{n}^o} \quad (1.108)$$

Dosazením do rovnice obálky (1.82) získáme průsečnici.

1.2.2.2 Řez obálky šroubovou plochou s tvořící přímkou

Budiž daná přímka jdoucí bodem $\mathbf{Q}$

$$\mathbf{P} = \mathbf{Q} + s \mathbf{a}_p \quad (1.109)$$

Směrnici přímky lze vyjádřit $\mathbf{a}_p = \mathbf{A}_n^z \mathbf{Q}$.

Šroubová plocha vznikne pohybem tvořící přímky, jejím posuvem a rotací kolem osy $\boldsymbol{\sigma}_n$ ve vzdálenosti Q od počátku.

$$\mathbf{SP} = \mathbf{A}_n^z \mathbf{P} + C z \boldsymbol{\sigma}_n^o = \mathbf{A}_n^z (\mathbf{Q} + s \mathbf{a}_p) + C z \boldsymbol{\sigma}_n^o \quad (1.110)$$

$$C = \frac{h}{2\pi} \quad (1.111)$$

Plocha v obecné poloze bude mít tvar (při otáčení kolem osy $\boldsymbol{\sigma}_n$ o úhel ϑ)

$$\mathbf{SP} = \mathbf{A}_n^{\vartheta} \mathbf{A}_n^z (\mathbf{Q} + s \mathbf{a}_p) + C z \boldsymbol{\sigma}_n^o = \mathbf{A}_n^{\vartheta+z} (\mathbf{Q} + s \mathbf{a}_p) + C z \boldsymbol{\sigma}_n^o \quad (1.112)$$

Průsečnice obálky se šroubovou plochou

$$\mathbf{U}(t) + u \mathbf{V}(t) = \mathbf{SP} \quad (1.113)$$

$$U(t) + uV(t) = A_n^{\vartheta+z} (Q + s a_p) + C z \sigma_n^o \quad (1.113a)$$

Dostaneme rovnici o třech neznámých u , s , z .

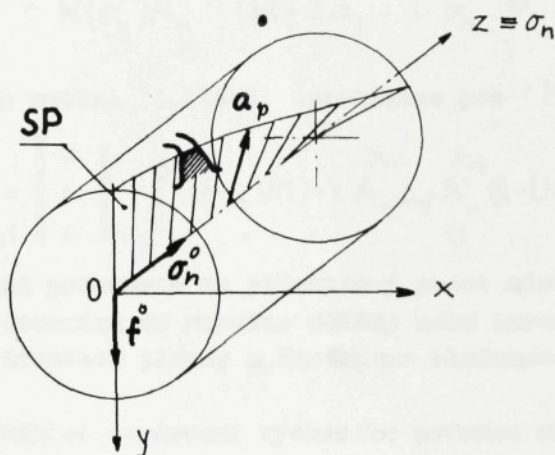
Rovnici lze řešit Newtonovou metodou /55/.

Aproximace pro $k+1$ krok

$$x_{k+1} = x_k - \tilde{f}^{-1}(x_k) f(x_k) \quad (1.114)$$

V našem případě je $f(x_k)$ vektorová funkce vektorového argumentu

$$f(x_k) = \begin{Bmatrix} f_1(x_1, x_2, x_3) \\ f_2(x_1, x_2, x_3) \\ f_3(x_1, x_2, x_3) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} f_1(u, s, z) \\ f_2(u, s, z) \\ f_3(u, s, z) \end{Bmatrix} \quad (1.115)$$



Obr. 1.11

její derivaci

$$f_{ij} = \frac{\partial f_i}{\partial x_j}$$

vznikne matice

$$\tilde{f} = \begin{Bmatrix} f_{11} & f_{12} & f_{13} \\ f_{21} & f_{22} & f_{23} \\ f_{31} & f_{32} & f_{33} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} f_{1u} & f_{1s} & f_{1z} \\ f_{2u} & f_{2s} & f_{2z} \\ f_{3u} & f_{3s} & f_{3z} \end{Bmatrix} \quad (1.116)$$

$$\tilde{f} = \left\| \frac{\partial f}{\partial u}, \frac{\partial f}{\partial s}, \frac{\partial f}{\partial z} \right\| \quad (1.117)$$

Pro řešení je důležitý odhad prvního kroku, aby funkce konvergovala. Položme rovnici (1.113a) rovnou nule a provedme její parciální derivace podle u , s , z .

$$\frac{\partial f}{\partial u} = -V(t) \quad (1.118)$$

Rovnici (1.118) lze řešit numericky, kde můžeme použít přibližného vztahu

$$\frac{\partial f}{\partial u} \approx \frac{f(u + \Delta u) - f(u)}{\Delta u} \quad (1.118a)$$

$$\frac{\partial f}{\partial s} = A_n^{\partial_{t+z}} a_p \quad (1.119)$$

$$\frac{\partial f}{\partial z} = R(\sigma_n^o) A_n^{\partial_{t+z}} (Q + s a_p) + C \sigma_n^o \quad (1.120)$$

sestavíme matici (1.116a); aproximace pro $(k+1)$ krok

$$\begin{pmatrix} u \\ s \\ z \end{pmatrix}_{k+1} = \begin{pmatrix} u \\ s \\ z \end{pmatrix}_k - \tilde{f}^{-1} \begin{pmatrix} -u V(t) + s A_n^{\partial_{t+z}} a_p + A_n^{\partial_{t+z}} Q - U(t) + C z \sigma_n^o \end{pmatrix} \quad (1.121)$$

Aproximaci provedeme na požadovaný počet míst. Výsledný parametr u dosadíme do rovnice obálky nebo parametry s , z do rovnice šroubové plochy a dostaneme hledanou průsečnici.

1.2.3 Příklad stanovení výchozího povrchu odvalovací frézy pro frézování součásti tvaru n -hranu

Stanovíme sadávací parametry součásti, tj. rovnici povrchu, intervaly parametrů u , v ; t , tenzory otočení a dosadíme do odvozených vztahů pro stanovení výchozího povrchu. Dále zvolíme poloměr valčícího válce (kružnice). Pro tento případ je vhodné volit střední poloměr r_{VS} , jak je uvedeno v kap. 1.3.3.

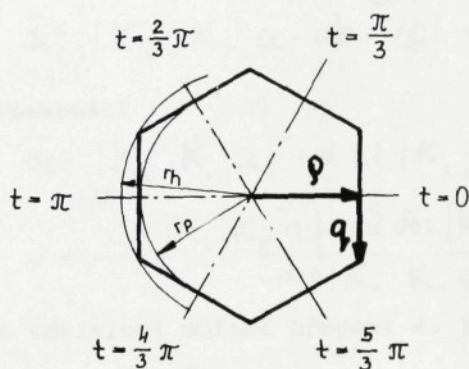
Aplikace parametrického vyjádření ploch na šestihranu (obr. 1.12)

$$\begin{aligned} - \text{plocha } t = 0 & : \varphi + u q + v \sigma_s^o \\ - \text{plocha } t = \frac{\pi}{3} & : A_s^{\frac{\pi}{3}} (\varphi + u q + v \sigma_s^o) \end{aligned}$$

- plocha $t = \frac{2}{3}\pi$: $A_s^{\frac{2}{3}\pi}(\rho + uq + v\sigma_s^o)$
- plocha $t = \pi$: $A_s^{\pi}(\rho + uq + v\sigma_s^o)$
- plocha $t = \frac{4}{3}\pi$: $A_s^{\frac{4}{3}\pi}(\rho + uq + v\sigma_s^o)$
- plocha $t = \frac{5}{3}\pi$: $A_s^{\frac{5}{3}\pi}(\rho + uq + v\sigma_s^o)$

Parametr t pro n -hran

$$t = \frac{2\pi}{i_s} \cdot i_p, \quad \text{kde } i_p = 0, 1, 2, \dots, i_s - 1 \quad (1.122)$$



Podmínky:

$$-1 \leq u \leq 1$$

$$0 \leq v \leq 1$$

$$|\rho| = \rho$$

Obr. 1.12

V dalším bude vynechán z rovnice (1.70) člen vyjadřující posuvný pohyb ve směru osy σ_s , protože na tvar obálky nemá vliv /63/. Rovnice pak bude mít tvar

$$K(u, v, t) = A_n^t m + A_n^t A_s^{pt}(\rho + uq + v\sigma_s^o) \quad (1.123)$$

$$K_u = A_n^t A_s^{pt} q \quad (1.124)$$

$$K_v = A_n^t \sigma_s^o \quad (1.125)$$

$$K_t = R(\sigma_n^o) A_n^t m + (R(\sigma_n^o) + p R(A_n^t \sigma_s^o)) A_n^t A_s^{pt}(\rho + uq + v\sigma_s^o) \quad (1.126)$$

Zavedením substituce a dosazením do rovnice (1.126) dostaneme rovnici (1.131)

$$c(t) = R(\sigma_s^o) + p R(A_n^t \sigma_s^o) \quad (1.127)$$

$$a = R(\sigma_s^o) A_n^t m + c(t) A_n^t A_s^{pt} p \quad (1.128)$$

$$b = c(t) A_n^t A_s^{pt} q \quad (1.129)$$

$$c = c(t) A_n^t \sigma_s^o \quad (1.130)$$

$$K_t = a + u b + v c \quad (1.131)$$

Podmínka valení (1.6) po dosažení (1.131)

$$\det |K_u, K_v, a + u b + v c| = 0 \quad (1.132)$$

po rozepsání

$$\det |K_u, K_v, a| + u \det |K_u, K_v, b| + v \det |K_u, K_v, c| = 0$$

pak

$$v = \frac{\det |K_u, K_v, a| + u \det |K_u, K_v, b|}{\det |K_u, K_v, c|} \quad (1.133)$$

Tuto závislost můžeme přepsat do tvaru

$$v = \alpha(t) + \beta(t) u \quad (1.134)$$

Dosažením rovnice (1.134) do (1.123) dostaneme rovnici obálky

$$OB = A_n^t m + A_n^t A_s^{pt} (p + \alpha(t) \sigma_s^o + u (q + \beta(t) \sigma_s^o)) \quad (1.135)$$

nebo

$$OB = A_n^t m + A_n^t A_s^{pt} (p + \alpha(t) \sigma_s^o) + u A_n^t A_s^{pt} (q + \beta(t) \sigma_s^o) \quad (1.136)$$

nebo zjednodušeně

$$OB = U(t) + u V(t) \quad (1.137)$$

$$U(t) = A_n^t m + A_n^t A_s^{pt} (p + \alpha(t) \sigma_s^o) \quad (1.138)$$

$$V(t) = A_n^t A_s^{pt} (q + \beta(t) \sigma_s^o) \quad (1.139)$$

Tím je určen výchozí povrch, který je obálkou daného povrchu součástí. Profil zubů odvalovací frézy stanovíme tak,

že provedeme řez obálky plochou čela. Pro přímou drážku zubů s úhlem čela γ_0 použijeme vztahů (1.93.1) a (1.96.1). Provedeme pouze záměnu γ_0 za σ . Úhel ϑ vyjadřuje polohu břitu zubu na obvodu obálky a nepřímo počet břitů. Najdeme průsečnici obálky s rovinou čela a to zpětným dosazením u do vztahu (1.137). Pro sklon drážek zubů ve šroubovici použijeme vztahu (1.121).

Průsečnice obálky s rovinou

$$U(t) + uV(t) = A_n^{\vartheta} Q + s A_n^{\vartheta} \sigma_n^0 + z A_n^{\vartheta} A_n^{\gamma_0} f^0 \quad (1.140)$$

$$M = \left\| \sigma_n^0, A_n^{\vartheta+\gamma_0}, -V(t) \right\| \quad (1.141)$$

$$\left\| \begin{matrix} s \\ z \\ v \end{matrix} \right\| = M^{-1} | U(t) - A_n^{\vartheta} Q | \quad (1.142)$$

1.3 Výchozí povrch a tvar ostří pro zakřivenou válcovou plochu

Válcová plocha součásti se u součástí vyráběných odvalovacím způsobem vyskytuje buď jako plocha funkční, např. u řetězových kola obloukového ozubení, nebo jako přechodová plocha, např. u drážkových, rohatkových profilů nebo profilů drážek nástrojů.

1.3.1 Stanovení výchozího povrchu

Aplikace bude provedena na válcové ploše s určitým daným poloměrem křivosti. Budiž dána soustava válcových ploch navínutých na válcové ploše (obr. 1.13).

Bod B na ploše součásti popíšeme pomocí parametrů (u, v) vzhledem k pevně zvolenému bodu M na ose součásti (obr. 1.14)

$$r_1(u, v) = -m^0 \rho_c + A_s^u \rho_k m^0 + v \sigma_s^0 \quad (1.143)$$

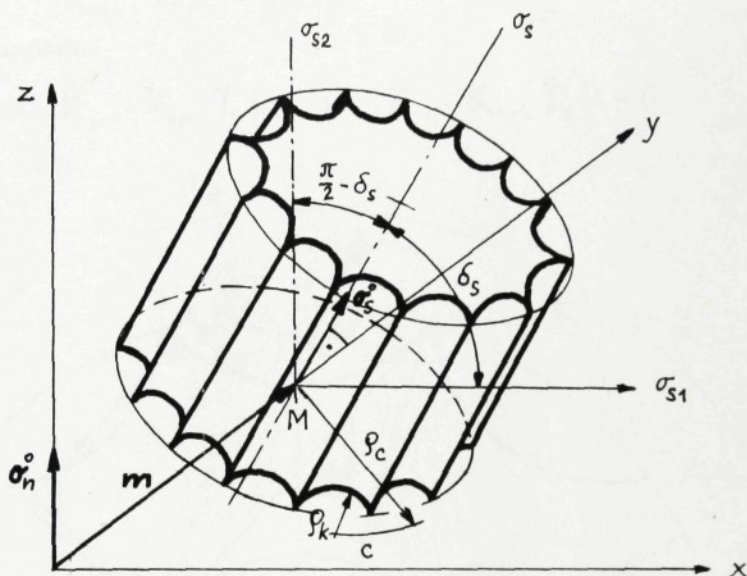
Parametry

$$u \in \langle -\gamma, \gamma \rangle$$

$$v \in \langle 0, l \rangle$$

Dosažení do rovnice (1.38) při zanedbání složky pohybu "po sobě"

$$K_1 = A_n^t (m + A_s^{pt} r_1(u, v)) \quad (1.144)$$



Obr. 1.13

Po dosažení (1.143)

$$K_1 = A_n^t m + A_n^t A_s^{pt} (-\rho_c m^o + A_s^u \rho_k m^o + v \sigma_s^o) \quad (1.145)$$

Parciální derivace podle parametrů u, v, t

$$K_{1u} = A_n^t R(\sigma_s^o) A_s^{pt+u} \rho_k m^o \quad (1.146)$$

$$K_{1v} = A_n^t A_s^{pt} \sigma_s^o \quad (1.147)$$

$$K_{1t} = R(\sigma_n^o) A_n^t m + [R(\sigma_n^o) + p R(A_n^t \sigma_s^o)] A_n^t A_s^{pt} (-\rho_c m^o + A_s^u \rho_k m^o + v \sigma_s^o) \quad (1.148)$$

Substituce

$$T_1 = [R(\sigma_n^o) + p R(A_n^t \sigma_s^o)] A_n^t A_s^{pt} \sigma_s^o \quad (1.149)$$

$$T_2 = R(\sigma_n^o) A_n^t m + [R(\sigma_n^o) + p R(A_n^t \sigma_s^o)] A_n^t A_s^{pt} (A_s^u \rho_k m^o - \rho_c m^o) \quad (1.150)$$

Pak $K_{1t} = v T_1 + T_2$

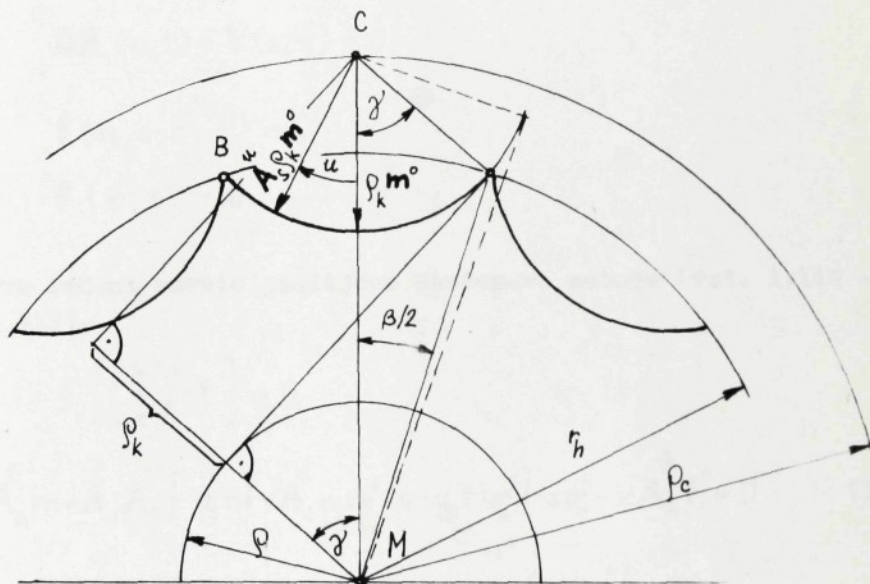
$$K_{1+} = v T_1 + T_2$$

Dosaďte do rovnice (1.6)

$$\det |K_{1\alpha}, K_{1\beta}, \sqrt{T_1 + T_2}| = 0 \quad (1.152)$$

po rozepsání

$$\text{vdet} |K_{1u}, K_{1v}, T_1| + \text{det} |K_{1u}, K_{1v}, T_2| = 0 \quad (1.152.1)$$



Obr. 1.14

Závislost parametru v na u, t

$$v = - \frac{\det |K_{1u}, K_{1v}, T_2|}{\det |K_{1u}, K_{1v}, T_1|} = - \frac{\det 1}{\det 2} \quad (1.153)$$

Obálka

$$0B_1 = A_n^t \left[m + A_s^{pt} (A_s^u \varrho_k m^o - \varrho_c m^o) - \frac{\det 1}{\det 2} \sigma_s^o \right] \quad (1.154)$$

1.3.2 Vyjádření tvaru ostří odvalovací frény

1.3.2.1 Řez obálky rovinnou plochou

a) Čelo procházející osou nástroje

Použijeme rovnice roviny procházející osou v obecné poloze (pro $\gamma_0 = 0$) (1.100) a rovnice obálky (1.154), jinak postupujeme stejně, tj. vyjádříme si matici (1.102) a hledáme řešení (1.103)

$$OB_1(u, t) = Y(s, z)$$

$$OB_1(u, t) - Y(s, z) = 0$$

$$f(u, s, z, t) = 0$$

$$f(r, t) = 0$$

Pro řešení rovnic použijeme Newtonovu metodu (vzt. 1.114 - 1.117).

$$f \left[\begin{pmatrix} u \\ s \\ z \end{pmatrix}_i, t \right] = 0$$

$$A_n^t m + A_n^t A_s^{pt} [-\rho_c m^o + A_s^u \rho_k m^o - v(u, t) \sigma_s^o] - s \sigma_n^o - z A_n^{\vartheta} f^o = 0 \quad (1.155)$$

$$\frac{\partial f}{\partial u} = A_n^t A_s^{pt} (R(\sigma_s^o) A_s^u \rho_k m^o - \frac{\partial v(u, t)}{\partial u} \cdot \sigma_s^o) \quad (1.156)$$

$$\frac{\partial f}{\partial s} = -\sigma_n^o \quad (1.157)$$

$$\frac{\partial f}{\partial z} = -A_n^{\vartheta} \cdot f^o \quad (1.158)$$

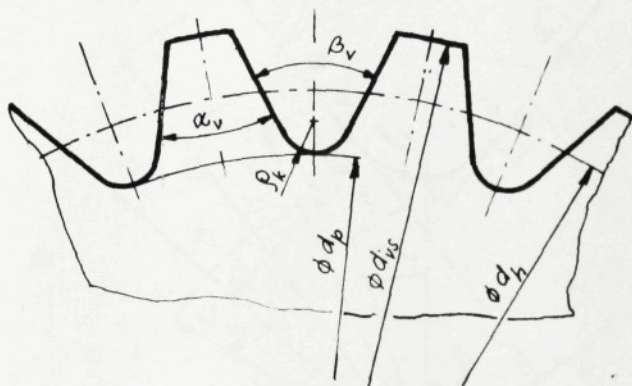
další postup je stejný jako v kap. 1.2.

b) Čelo procházející mimo osu nástroje ($\gamma_0 > 0$, nebo $\gamma_0 < 0$).
Pro tento případ použijeme při vyšetřování profilu ostří postup podle vztahů (1.93.1) - (1.196.1), tj. budeme řešit rovnici roviny procházející mimo osu nástroje pod úhlem čela

ortogonální s rovnící obálky (1.154). Další postup bude stejný jako v případě a).

1.3.2.2 Řez obálky šroubovou plochou s tvořící přímkou

Pro šroubovou plochu použijeme vztahů (1.110, 1.112). Průsečnici obálky OB , (1.154) se šroubovou plochou (1.112) vyjádříme podle vztahu (1.113) a (1.114). Dostaneme rovnici o třech neznámých parametrech u , s , z . Rovnici řešíme opět Newtonovou metodou dle postupu z kap. 1.2.2.2. Tím získáme hledanou průsečnici, tj. profil ostří.



Obr. 1.15

1.3.3 Příklad stanovení výchozího povrchu pro frézování drážkového profilu

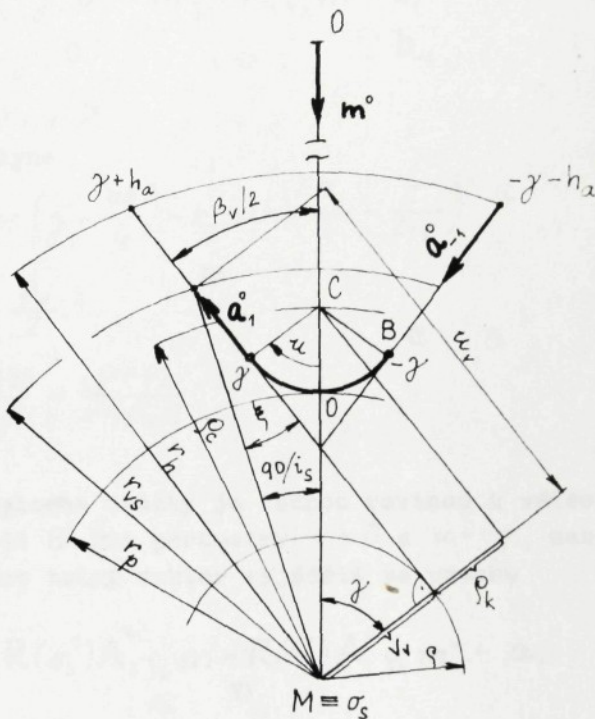
Pro řešení výchozího povrchu odvalovací frézy pro válcový povrch součásti zvolíme profil tzv. jemného drážkování dle ČSN 01 4943, kde se tato plocha vyskytuje (obr. 1.15).

Povrch drážky se skládá ze dvou rovinných ploch, které plynule (tečně) navazují na válcovou plochu dna drážky. Vyjádření povrchu součásti provedeme z obr. 1.16 a vyjdeme ze zadáných parametrů v obr. 1.15.

Obdobně jako v příkladě v kap. 1.2.3 je také nutné stanovení dalšího zadávacího parametru, tj. poloměru valící kružnice r_v . Toto vyplývá z podmínek vyrobitelnosti součástí odvalovacími způsoby /67/, /34/, /39/. Podle /13/ je

doporučována volba poloměru r_v buď mezi patním r_p a středním poloměrem r_{vs} , kde $r_{vs} = (r_p + r_h)/2$, nebo na středním poloměru.

Lačňev /39/ však tvrdí, že poloměr r_L je závislý i na



Obr. 1.16

úhlu profilu drážky β_v a doporučuje volbu r_v provést v rozmezí r_{vmax} a r_{vmin} , tj. největšího a nejmenšího poloměru, který se získá ze vztahu

$$r_v = \sqrt{u_v + (g_v + v_v \pm \sqrt{g_v(g_v - v_v)})^2} \quad (1.159)$$

kde

$$u_v = r_i \cos \xi$$

$$V_V = r_i \sin \xi$$

$$g_v = g_k$$

Vztah je obecně platný a podle něj lze stanovit racionální parametry poloměru valíčího válce.

Rovnice povrchu součásti

Válcovou plochu vyjádříme ze vztahu (1.143). Jednotlivé větve oblouku pak budou

$$\begin{aligned} MB = \mathbf{r}_1(-\gamma, 0) &= \mathbf{m}^0_{\rho_c} + \mathbf{A}_s^{-\gamma} \rho_k \mathbf{m}^0 = \mathbf{b}_1 \\ \mathbf{r}_1(\gamma, 0) &= \mathbf{b}_{-1} \end{aligned} \quad (1.160)$$

$$u \in \langle -\gamma, \gamma \rangle$$

Z obr. 1.16 plyne

$$\rho = r_{vs} \cos\left(\gamma + \frac{q_0}{i_s}\right) = r_{vs} \sin\left(\frac{\beta_v}{2} + \frac{\pi}{2i_s}\right)$$

$$\gamma = 90 - \frac{\beta_v}{2}$$

$$\rho_c = \frac{\rho + \rho_k}{\cos \gamma} = \frac{\rho + \rho_k}{\sin \beta_v / 2}$$

Rovinná plocha drážky je tečnou rovinou k válcovému povrchu. V bodě B pro parametry $v=0$ a $u=-\gamma$, nebo $u=\gamma$ je možno tečný vektor vyjádřit ze vztahu

$$\left. \frac{\partial \mathbf{r}_1}{\partial u} \right|_{u=-\gamma, v=0} = \mathbf{R}(\sigma_s^0) \mathbf{A}_s^u \rho_k \mathbf{m}^0 = \mathbf{R}(\sigma_s^0) \mathbf{A}_s^{-\gamma} \rho_k \mathbf{m}^0 = \mathbf{a}_1 \quad (1.161)$$

$$\mathbf{a}_1^0 = \frac{\mathbf{a}_1}{|\mathbf{a}_1|} = \mathbf{R}(\sigma_s^0) \mathbf{A}_s^{-\gamma} \mathbf{m}^0 \quad (1.162)$$

$$\mathbf{a}_{-1} = \mathbf{R}(\sigma_s^0) \mathbf{A}_s^{\gamma} \rho_k \mathbf{m}^0 \quad (1.163)$$

$$\mathbf{a}_{-1}^0 = \mathbf{R}(\sigma_s^0) \mathbf{A}_s^{\gamma} \mathbf{m}^0 \quad (1.164)$$

Rovina (boční plocha zubu)

$$\mathbf{r}_2(u, v) = \mathbf{b}_1 + u \mathbf{a}_1^0 + v \sigma_s^0 \quad (1.165)$$

$$\mathbf{r}_{-2}(u, v) = \mathbf{b}_{-1} + u \mathbf{a}_{-1}^0 + v \sigma_s^0 \quad (1.166)$$

$$u \in \langle \gamma; \gamma + h_a \rangle, \quad \langle -\gamma, -\gamma - h_a \rangle$$

Povrch válcové části vyjádříme dle vztahu (1.145), obálku dle vztahů (1.154) a ostří dle vztahů z kap. 1.3.2. Bod na rovinných plochách vyjádříme dle vztahu (1.38) při zanedbání pohybu "po sobě".

$$K_2 = A_n^t (m + A_s^{pt} r_2(u, v)) \quad (1.167)$$

Po dosazení

$$K_2 = A_n^t m + A_n^t A_s^{pt} (b_1 + u a_1^o + v \sigma_s^o) \quad (1.168)$$

$$K_{-2} = A_n^t m + A_n^t A_s^{pt} (b_{-1} + u a_{-1}^o + v \sigma_s^o) \quad (1.169)$$

Parciální derivace

$$K_{2u} = A_n^t A_s^{pt} a_1^o \quad (1.170)$$

$$K_{2v} = A_n^t \sigma_s^o \quad (1.171)$$

$$K_{2t} = R(\sigma_s^o) A_n^t m + [R(\sigma_n^o) + p R(A_n^t \sigma_s^o)] A_n^t A_s^{pt} (b_1 + u a_1^o + v \sigma_s^o) \quad (1.172)$$

Substituce

$$T_1 = [R(\sigma_n^o) + p R(A_n^t \sigma_s^o)] A_n^t \sigma_s^o \quad (1.173)$$

$$T_2 = R(\sigma_n^o) A_n^t m + [R(\sigma_n^o) + p R(A_n^t \sigma_s^o)] A_n^t A_s^{pt} b_1 \quad (1.174)$$

$$T_3 = R(\sigma_n^o) + p R(A_n^t \sigma_s^o) A_n^t A_s^{pt} a_1^o \quad (1.175)$$

Pak

$$K_{2t} = v T_1 + T_2 + u T_3 \quad (1.176)$$

$$\det |K_{2u}, K_{2v}, K_{2t}| = 0 \quad (1.177)$$

$$\det |K_{2u}, K_{2v}, v T_1 + T_2 + u T_3| = 0$$

$$v \det |K_{2u}, K_{2v}, T_1| + \det |K_{2u}, K_{2v}, T_2| + u \det |K_{2u}, K_{2v}, T_3| = 0$$

$$v = \frac{\det |K_{2u}, K_{2v}, T_2| + u \det |K_{2u}, K_{2v}, T_3|}{\det |K_{2u}, K_{2v}, T_1|} =$$

$$= \frac{\det 3 + u \det 4}{\det 5} \quad (1.178)$$

Rovnice obálky rovinných ploch

$$OB_2 = A_n^t (m + A_s^{pt} (b_1 + u a_1^o - \frac{\det 3 + u \det 4}{\det 5} \sigma_s^o)) = OB_2(u, t) \quad (1.179)$$

$$OB_{-2} = A_n^t (m + A_s^{pt} (b_{-1} + u a_{-1}^o - (\frac{\det 3 + u \det 4}{\det 5})_2 \sigma_s^o)) \quad (1.180)$$

Ostří pro rovinné čelo:

Řez obálkami OB_1 , jako i OB_2 , OB_{-2} provedeme stejným postupem jak již bylo uvedeno v kap. 1.2.2 nebo 1.3.2.

Upravená rovnice obálky

$$OB_2 = u U(t) + V(t) \quad (1.181)$$

Pak ostří frézy představuje řešení rovnic

$$OB_2(u, t) = Y(s, z) \quad (1.182)$$

$$s \sigma_n^o + z A_n^{\vec{v}} f^o = u U(t) + V(t)$$

$$s \sigma_n^o + z A_n^{\vec{v}} f^o - u U(t) = V(t)$$

$$M = | \sigma_n^o, A_n^{\vec{v}} f^o, -U(t) | \quad (1.183)$$

$$\begin{pmatrix} s \\ z \\ u \end{pmatrix} = M^{-1} V(t) \quad (1.184)$$

Dosadíme do rovnice obálky nebo rovnice roviny a obdržíme ostří odvalovací frézy. Pro obálku OB_{-2} postupujeme obdobně.

Ostří pro šroubové čelo

Řez obálkami OB_1 , jako i OB_2 , OB_{-2} provedeme obdobně jako ty předchozí řezy.

$$OB_2(u, t) = SP(s, z) \quad (1.185)$$

$$OB_2(u, t) - SP(s, z) = 0$$

Rovnice řešíme Newtonovou metodou až ke $(k+1)$ aproximaci. Dosazením s , z do rovnice šroubové plochy dostaneme ostří frézy na šroubové ploše čela.

1.4 Východí povrch a tvar ostří pro evolventní plochu

Evolventní plocha je nejčastěji se vyskytující plochou u součástí vyráběných odvalovacími frézami. Je to buď u evolventního ozubení s přímými zuby nebo se šroubovými zuby. Evolventní plocha se zuby přímými bude zde rozvedena.

1.4.1 Východí povrch odvalovacích fréz

Ozubené kolo s přímými zuby a evolventním profilem boku zubu vezmeme za plochu součástí a pro ni vyšetříme obálku. Vyjdeme z obr. 1.17 a obr. 1.18. Nebudeme zatím uvažovat zaoblenou patu zubu.

Z obr. 1.18 si nejdříve vyjádříme rovnici evolventy nebo radiusvektoru bodu na evolventě

$$r(u, v) = A_s^u r_o^o y^o + A_s^{u - \frac{\pi}{2}} r_o^o u y^o + v \sigma_s^o \quad (1.186)$$

$$r(u, v) = r_o A_s^u (E + u A_s^{-\frac{\pi}{2}}) y^o + v \sigma_s^o \quad (1.187)$$

Dosazením do (1.38) a při zanedbání složky $w t \sigma_s^o$ vektor libovolného bodu plochy

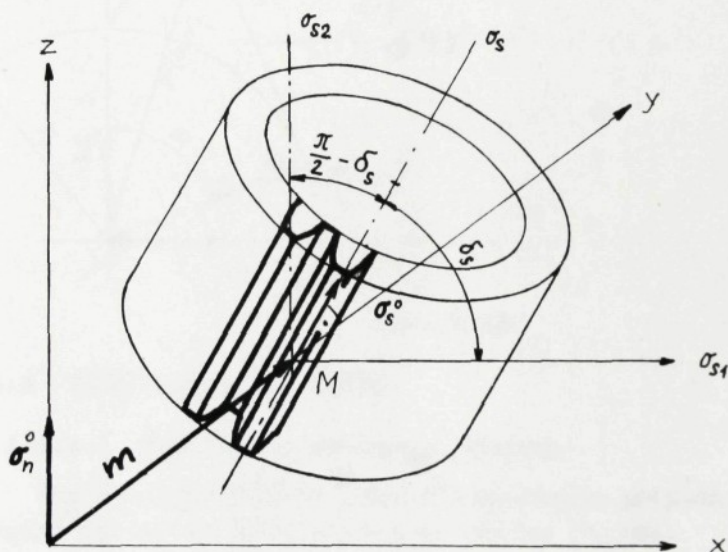
$$K = A_n^t (m + A_s^{pt} (r_o A_s^u (E + u A_s^{-\frac{\pi}{2}}) y^o + v \sigma_s^o)) \quad (1.188)$$

Parciální derivace

$$K_u = A_n^t A_s^{pt} (r_0 R(\sigma_s^0) A_s^u (E + u A_s^{-\frac{\pi}{2}}) y^0 + r_0 A_s^u A_s^{-\frac{\pi}{2}} y^0) \quad (1.189)$$

$$K_v = A_n^t A_s^{pt} \sigma_s^0 \quad (1.190)$$

$$K_t = R(\sigma_s^0) A_n^t m + R(\sigma_s^0) A_n^t A_s^{pt} [r_0 A_s^u (E + u A_s^{-\frac{\pi}{2}}) y^0 + v \sigma_s^0] + A_n^t R(\sigma_s^0) p A_s^{pt} [r_0 A_s^u (E + u A_s^{-\frac{\pi}{2}}) y^0 + v \sigma_s^0] \quad (1.191)$$



Obr. 1.17

Substitute

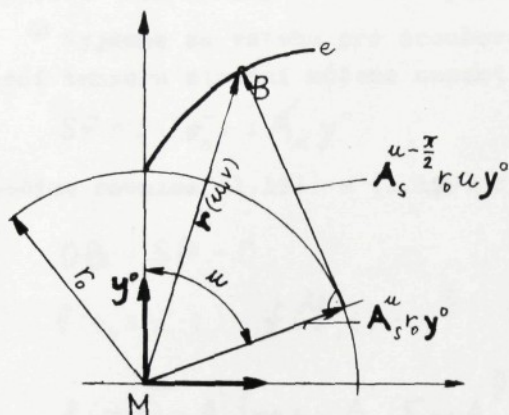
$$K_t = v T_1 + T_2 \quad (1.192)$$

$$\det |K_u, K_v, v T_1 + T_2| = v \det |K_u, K_v, T_1| + \det |K_u, K_v, T_2| = 0$$

$$v = - \frac{\det |K_u, K_v, T_2|}{\det |K_u, K_v, T_1|} = - \frac{\det 1}{\det 2} \quad (1.193)$$

Rovnice obálky

$$OB = A_n^t \left[m + r_0 A_s^u (E + u A_s^{-\frac{\pi}{2}}) y^o - \frac{\det 1}{\det 2} \sigma_s^o \right] \quad (1.194)$$



Obr. 1.18

1.4.2 Vyjádření tvaru ostří

1.4.2.1 Řes obálky rovinnou plochou

Postupujeme obdobně jako v předchozím případě. Použijeme rovnici roviny (1.100) a rovnici obálky (1.194)

$$OB(u, t) - Y(s, z) = 0$$

$$f(u, s, z, t) = f(r, t) = 0$$

Pro řešení rovnic použijeme Newtonovu iterační metodu obdobně jako v předchozích případech (vzt. 1.114-1.117)

$$f(r, t) = A_n^t \left[m + r_0 A_s^u (E + u A_s^{-\frac{\pi}{2}}) y^o - \frac{\det 1}{\det 2} \sigma_s^o \right] - s A_n^t - z \sigma_n^o = 0 \quad (1.195)$$

$$\frac{\partial f}{\partial u} = \frac{f(u + \Delta u) - f(u)}{\Delta u} \quad \text{numericky dle zvolené hodnoty} \quad (1.196)$$

$$\frac{\partial f}{\partial s} = -\bar{A}_n^s y^o \quad (1.197)$$

$$\frac{\partial f}{\partial z} = -\sigma_n^o \quad (1.198)$$

Další postup je obdobný jako v kap. 1.2.

1.4.2.2 Řez obálky šroubovou plochou

Vyjdeme ze vztahu pro šroubovou plochu (1.110) nebo pomocí tenzoru otočení můžeme napsat

$$SP = z C \sigma_n^o + s \bar{A}_n^z y^o \quad (1.199)$$

Řešíme rovnice (1.194) a (1.199), čímž získáme ostří nástroje.

$$OB - SP = 0$$

$$f(u, s, z, t) = f(r, t) = 0$$

$$f(r, t) = \bar{A}_n^t \left[m + r_0 \bar{A}_s^u (E + u \bar{A}_s^{-\frac{\pi}{2}}) y^o - \frac{det 1}{det 2} \sigma_s^o \right] - \\ - z C \sigma_n^o - s \bar{A}_n^z y^o \quad (1.200)$$

Řešíme opět Newtonovou iterační metodou

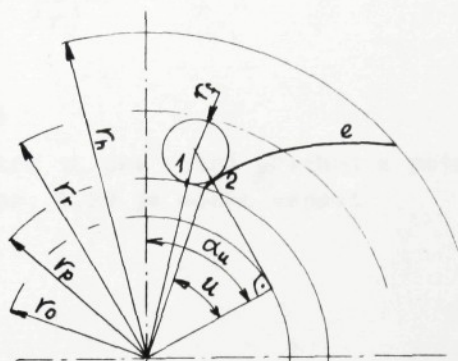
$$\frac{\partial f}{\partial u} = \frac{f(u + \Delta u) - f(u)}{\Delta u} \quad (1.201)$$

$$\frac{\partial f}{\partial s} = -\bar{A}_n^z y^o \quad (1.202)$$

$$\frac{\partial f}{\partial z} = -C \sigma_n^o \quad (1.203)$$

1.4.3 Příklad stanovení výchozího povrchu

Příklad bude uveden na profilu evolventního zubu se zaobleným přechodem do paty zubu o daném poloměru zaoblení. Přechodová kružnice se dotýká patní kružnice v bodě 1 a evolventy v bodě 2. Vyhledejme nejprve bod dotyku kružnice zaoblení paty s evolventou.



Obr. 1.19

Vyjďeme z rovnice evolventy vyjádřeně pomocí funkce komplexní proměnné. Z obr. 1.19 plyne

$$r(u, v) = r_0 e^{iu} + (-i) r_0 u e^{iu}$$

Po úpravě

$$r(u, v) = r_0 e^{iu} (1 - iu) \quad (1.204)$$

Normála

$$n = -ie^{iu} \quad (1.205)$$

Bod dotyku 2 získáme z podmínky, že kružnice se při dotyku s evolventou bude dotýkat patní kružnice, pak bude platit

$$[r_0 e^{iu} (1 - iu) - r_f i e^{iu}]^2 = (r_p + r_f)^2 \quad (1.206)$$

(Obecně platí $|z|^2 = z \cdot z^*$, kde $z = a + bi$; $z^* = a - bi$).

Pak můžeme vztah (1.206) přepsat

$$[r_0 e^{iu} (1 - iu) - r_f i e^{iu}] [r_0 e^{-iu} (1 + iu) + r_f i e^{-iu}] = (r_p + r_f)^2$$

po úpravě

$$r_0^2 u^2 + 2r_0 r_f u + r_0^2 - 2r_p r_f - r_p^2 = 0 \quad (1.207)$$

Diskriminant

$$D = 4r_0^2 (r_f^2 - r_0^2 + 2r_p r_f + r_p^2) \quad (1.208)$$

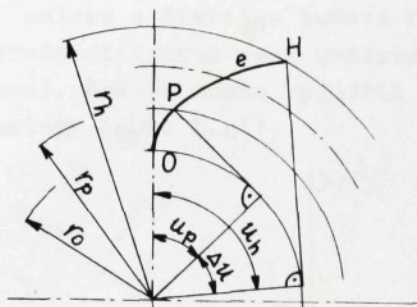
Řešení rovnice (1.207)

$$u_{1,2} = -\frac{r_f}{r_0} \pm \frac{\sqrt{D1}}{2r_0^2} \quad (1.209)$$

Položme

$$u_1 = \alpha$$

Omezení parametru u pro ostrý přechod z patní kružnice na evolventu. Z obr. 1.20 je možno napsat



Obr. 1.20

$$(e(u))_P^2 = r_p^2 \quad (1.210)$$

$$(e(u))_H^2 = r_h^2 \quad (1.211)$$

$$(e(u))_0^2 = r_0^2 (1 + u^2) \quad (1.212)$$

Parametr u pro patní kružnici kola

$$r_0^2 (1 + u^2) = r_p^2$$

$$(u_{1,2})_p = \pm \frac{\sqrt{r_p^2 - r_0^2}}{r_0} \quad (1.213)$$

Parametr u pro hlavovou kružnici kola

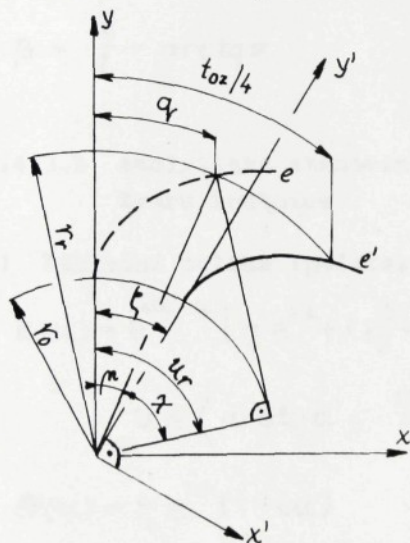
$$(u_{1,2})_h = \pm \frac{\sqrt{r_h^2 - r_0^2}}{r_0} \quad (1.214)$$

Rozdíl $\Delta u = u_h - u_p$

$$\Delta u = \frac{1}{r_0} \left(\sqrt{r_h^2 - r_0^2} - \sqrt{r_p^2 - r_0^2} \right) \quad (1.215)$$

Poznámka: Bod P může být pro zaoblenou patu nahrazen bodem dotyku 2 evolventy s kružnicí (obr. 1.19).

Jestliže je uvažováno, že osa y souřadnicové soustavy je totožná s osou zubové mezery, pak je evolventa pootočená vůči základní poloze o čtvrtinu zubové rozteče kola, měřeno na roztečné kružnici (pokud není uvažována žádná korekce ani modifikace zubu). Pak je možno vyjádřit úhel pootočení souřadnicové soustavy (obr. 1.21)

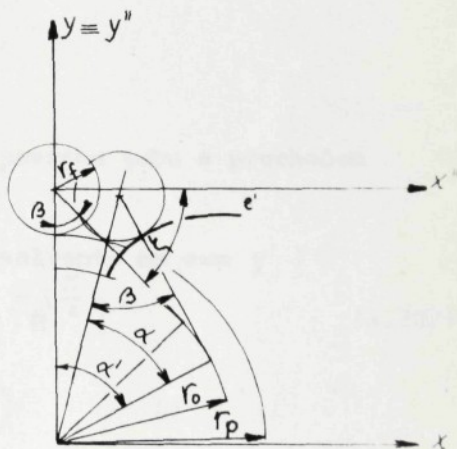


Obr. 1.21

$$u_{r1,2} = \pm \frac{\sqrt{r_r^2 - r_0^2}}{r_0} \quad (1.216)$$

$$\operatorname{tg} \chi = \frac{r_0 u_r}{r_0} = u_r \quad (1.217)$$

$$\mu = u_r - \operatorname{arctg} u_r = \operatorname{inv} \chi \quad (1.218)$$



Obr. 1.22

$$q = r_r \operatorname{inv} \chi$$

Úhel pootočení soustavy

$$\zeta = \frac{t_{0z} \cdot \operatorname{inv} \chi}{4 r_r \operatorname{inv} \chi} = \frac{\pi}{2 z_k} \quad (1.219)$$

Přechodovou kruhovou část vyjádříme z obr. 1.22.

V soustavě $x''y''$ je možno napsat

$$\widehat{12} = r_f e^{i\zeta}; \quad \text{kde} \quad \zeta \in \left\langle -\frac{\pi}{2}; \beta - \frac{\pi}{2} \right\rangle \quad (1.220)$$

V soustavě xy

$$\widehat{12} = r_f e^{i\zeta} + (r_p + r_f) e^{i\frac{\pi}{2}} \quad (1.221)$$

$$\zeta = u; \quad \operatorname{tg} \alpha = \frac{r_p \alpha' + r_f}{r_p}$$

$$\beta = \frac{\pi}{2} - \operatorname{arctg} \alpha$$

1.4.3.1 Analytické stanovení povrchu zubu s přechodem tvaru kružnice

a) Základní poloha (počátek evolventy na ose y)

$$k(u) = e^{i\alpha' - \alpha} [r_f e^{iu} + (r_p + r_f) e^{i\frac{\pi}{2}}] \quad (1.222)$$

$$u \in \left\langle \operatorname{arctg} \alpha'; \frac{\pi}{2} \right\rangle$$

$$e(u) = r_0 e^{iu} (1 - iu) \quad (1.223)$$

$$u \in \langle \alpha, u_2 \rangle$$

b) Pootočená poloha o $t/4$ od osy y

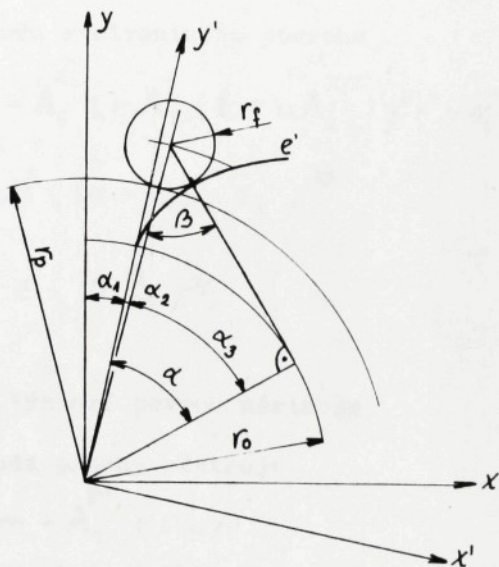
$$k(u) = e^{i(\alpha' - \operatorname{arctg} \alpha' + \frac{t}{4r_r})} [r_f e^{iu} (r_p + r_f) e^{i\frac{\pi}{2}}] \quad (1.224)$$

$$u \in \left\langle -\operatorname{arctg} \alpha'; -\frac{\pi}{2} \right\rangle$$

$$e(u) = r_0 e^{i\left(\frac{t}{4r_r} + u_r\right)} (1 - iu) \quad (1.225)$$

$$u \in \langle \alpha, u_2 \rangle$$

Vztahy (1.222 - 1.225) převedeme do tenzorového tvaru. Z obr. 1.23 stanovíme nejdříve potřebné úhly:



Obr. 1.23

$$\alpha_1 = \frac{t}{4r_r} \quad (1.226)$$

$$\alpha_2 = \alpha - \alpha_3 \quad (1.227)$$

$$\alpha_3 = \arctg \frac{r_0 \alpha + r_f}{r_0} \quad (1.228)$$

$$\alpha = -\frac{r_f}{r_0} \pm \frac{\sqrt{D1}}{2r_0^2} = u_1 \quad (1.229)$$

$$\beta = \frac{\pi}{2} - \alpha_3 \quad (1.230)$$

$$u_{h2} = \frac{\sqrt{r_h^2 - r_0^2}}{r_0} \quad (1.231)$$

Pak vektor bodu přechodového povrchu

$$\mathbf{r}(u, v)_k = \mathbf{A}_s^{(\alpha_1 + \alpha_2)} \left[(r_f \mathbf{A}_s^u + r_p + r_f) \mathbf{y}^0 + v \sigma_s^0 \right] \quad (1.232)$$

$$u \in \left\langle -\left(\frac{\pi}{2} - \beta + \alpha_1 + \alpha_2\right); \left(-\frac{\pi}{2} + \alpha_1 + \alpha_2\right) \right\rangle$$

$$v \in \langle 0, b \rangle$$

Vektor bodu evolventního povrchu

$$\mathbf{r}(u, v)_e = \mathbf{A}_s^{\alpha_1} \left[r_0 \mathbf{A}_s^u (E + u \mathbf{A}_s^{\pi/2}) \mathbf{y}^0 + v \sigma_s^0 \right] \quad (1.233)$$

$$u \in \langle (\alpha + \alpha_1); \alpha_i \rangle$$

$$v \in \langle 0, b \rangle$$

1.4.3.2 Výchozí povrch nástroje

Vektor bodu plochy nástroje

$$\mathbf{K} = \mathbf{A}_n^t (\mathbf{m} + \mathbf{A}_s^{\text{pt}} \mathbf{r}(u, v))$$

Bod pro přechodový oblouk

$$\mathbf{K}_1 = \mathbf{A}_n^t \left[\mathbf{m} + \mathbf{A}_s^{\frac{t + z_k(\alpha_1 + \alpha_2)}{z_k}} (r_f \mathbf{A}_s^u + r_p + r_f) \mathbf{y}^0 + v_1 \sigma_s^0 \right] \quad (1.234)$$

Bod pro evolventní část

$$\mathbf{K}_2 = \mathbf{A}_n^t \left[\mathbf{m} + \mathbf{A}_s^{\frac{t + z_k \cdot \alpha}{z_k}} (r_0 \mathbf{A}_s^u (E + u \mathbf{A}_s^{\pi/2}) \mathbf{y}^0 + v_2 \sigma_s^0) \right] \quad (1.235)$$

Parciální derivace

$$\mathbf{K}_{1u} = \mathbf{R}(\sigma_s^0) \mathbf{A}_n^t \mathbf{A}_s^{\frac{t + z_k(\alpha_1 + \alpha_2) + z_k \cdot u}{z_k}} r_f \mathbf{y}^0 \quad (1.236)$$

$$\mathbf{K}_{2u} = r_0 \cdot u \mathbf{A}_s^u \mathbf{y}^0 \quad (1.237)$$

$$\mathbf{K}_{1v} = \mathbf{K}_{2v} = \mathbf{A}_n^t \mathbf{A}_s^{\frac{t}{z_k}} \sigma_s^0 \quad (1.238)$$

$$K_{1t} = R(\sigma_n^o) A_n^t m + R(\sigma_n^o) A_n^t A_s^{\frac{t+z_k(\alpha_1+\alpha_2)}{z_k}} [(r_f^u A_s^u + r_p + r_f) y^o + \\ + v_1 \sigma_s^o] + R(\sigma_s^o) A_n^t \frac{1}{z_k} A_s^{\frac{t+z_k(\alpha_1+\alpha_2)}{z_k}} [(r_f^u A_s^u - r_p + r_f) y^o + v \sigma_s^o] \quad (1.239)$$

$$K_{2t} = R(\sigma_n^o) A_n^t m + R(\sigma_n^o) A_n^t A_s^{\frac{t+z_k \alpha}{z_k}} [r_0^u A_s^u (E + u A_s^{\pi/2}) y^o + v \sigma_s^o] + \\ + R(\sigma_s^o) A_n^t \frac{1}{z_k} A_s^{\frac{t+z_k \alpha}{z_k}} [r_0^u A_s^u (E + u A_s^{\pi/2}) y^o + v_2 \sigma_s^o] \quad (1.240)$$

Po provedení substitucí

$$K_{1u} = c_1^k; \quad K_{1v} = c_2^k; \quad K_{1t} = v T_1^k + T_2^k$$

$$K_{2u} = c_1^e; \quad K_{2v} = c_2^e; \quad K_{2t} = v T_1^e + T_2^e$$

Chceme-li vyjádřit $v = f(u, t)$ pak

$$v_1 = - \frac{\det(c_1^k, c_2^k, T_2^k)}{\det(c_1^k, c_2^k, T_1^k)} = - \frac{1 \det 1}{1 \det 2} \quad (1.241)$$

$$v_2 = - \frac{\det(c_1^e, c_2^e, T_2^e)}{\det(c_1^e, c_2^e, T_1^e)} = - \frac{2 \det 1}{2 \det 2} \quad (1.242)$$

Rovnice obálek

$$KOB = A_n^t \left\{ m + A_s^{\frac{t+z_k(\alpha_1+\alpha_2)}{z_k}} [(r_f^u (A_s^u + 1) y^o + r_p y^o - \frac{1 \det 1}{1 \det 2} \sigma_s^o)] \right\} \quad (1.243)$$

$$EOB = A_n^t \left\{ m + A_s^{\frac{t+z_k \alpha}{z_k}} [r_0^u A_s^u (E + u A_s^{\pi/2}) y^o - \frac{2 \det 1}{2 \det 2} \sigma_s^o] \right\} \quad (1.244)$$

Řez obálky rovinnou a šroubovou plochou

Postupujeme obdobně jako v předchozích řešených případech, tj. vycházíme z rovnice obálek (1.243) a (1.244) a rovnice osové roviny (1.100) a pro případ šroubové plochy čela z rovnice (1.110) nebo (1.112).

Řešení spočívá v tom, že pro postupně volené t hledáme průsečíky plochy čela s t -křivkami obálky. Výslednou rovnici průsečnice získáme dosazením parametrů ploch do rovnice těchto ploch nebo do rovnice obálky (což je složitější).

2. PŘEMĚNA VÝCHOZÍHO POVRCHU ODVALOVACÍ FRÉZY V ŘEZNÝ NÁSTROJ A JEHO KONSTRUKČNÍ PARAMETRY

Přeměnu výchozího povrchu odvalovací frézy uskutečníme tak, že tento povrch opatříme břity a udělíme mu řezné vlastnosti. V praxi se to provede tak, že výchozí povrch odvalovací frézy, zjednodušeně řečeno, profrézujeme drážkami pro odvod třísek a tím současně vytvoříme čelo nástroje. Hřbetní plochy vytvoříme tak, že ostří udělíme pohyb po nějaké křivce (Archimédova, logaritmická spirála, kružnice, přímka či obecná křivka). Dále vytvoříme na nástroji upínací, kontrolní, ustavovací či jiné plochy.

2.1 Vytvoření čela zubů odvalovací frézy

Jak již bylo uvedeno v předchozí kapitole může být čelo odvalovací frézy povrchem rovinným a šroubovým. Rovinná plocha může zaujmout několik poloh. Pro úhel čela nulový prochází osou nástroje, pro kladný a záporný úhel čela prochází mimo osu. Obdobně to může být provedeno u odvalovacích fréz se šroubovým povrchem čela. Šroubovice drážky je kolmá na šroubovici zubů frézy. Technologicky je nejjednodušší vyřezat čelo ve tvaru rovinné plochy. Pro případ čela rovnoběžného s osou frézy je úhel na jednom bočním břitu kladný, na druhém záporný, proto lze rovinné čelo volit pouze pro malé úhly steepání šroubovice.

Matematické vyjádření povrchu čela bylo provedeno v předchozí kapitole současně se stanovením ostří jednotlivých druhů profilů odvalovacích fréz dle základních vztahů (1.100) a (1.110) nebo (1.199).

2.2 Vytvoření hřbetních ploch zubů odvalovací frézy

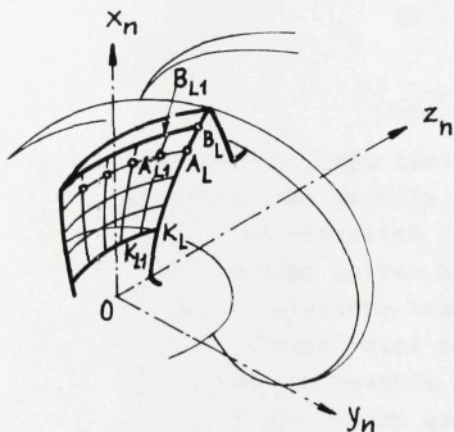
Obecně vytvoříme hřbetní plochy nástroje tak, že jeho ostří udělíme určitý pohyb /62/. Ostří přitom opíše v prostoru povrch hřbetu jehož tvar musí vyhovovat následujícím požadavkům /39/:

- a) ve všech bodech ostří musí být vytvořeny pro práci nutné úhly hřbetu
- b) všechna ostří frézy musí ležet na výchozím povrchu, nebo též na povrchu základního šneku

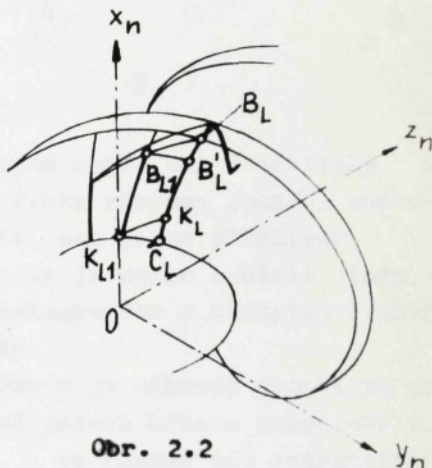
c) musí být splněny technologické požadavky.

K navrhování tvaru hřbetu odvalovací frézy se přistupuje podle toho, jestli existuje možnost nastavení polohy ostří po přecestření zubů nebo ne. Pro první možnost musí být povrch zubů takový, aby po přecestření zůstal tvar drážky zubu beze změny. Pro splnění tohoto požadavku stačí, aby povrch hřbetu byl tvořen povrchem dovolujícím pohyb po sobě. Ve většině případů však konstrukce frézy nedovoluje regulaci polohy zubů a proto po každém přecestření se vnější a tím i valivý válec zmenšuje.

Změna poloměru valivého válce frézy je závislá na tom, jaké podtáčecí křivky jsou zvoleny. Zmenšení radiusu valivého

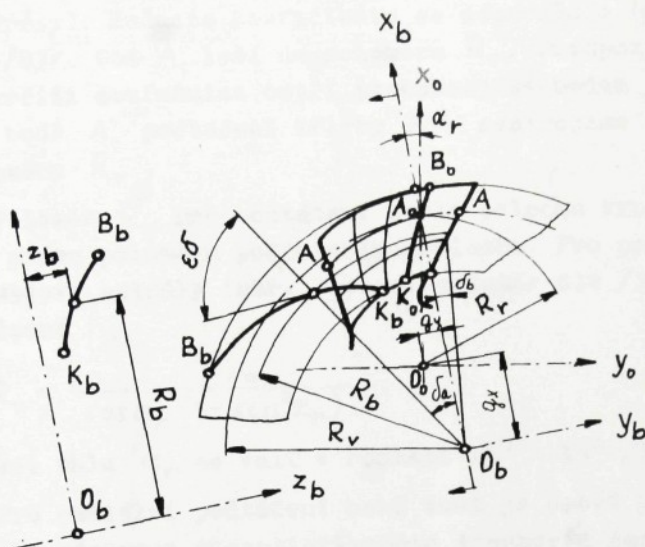


Obr. 2.1



Obr. 2.2

válce frézy způsobuje, že se po přecestření mění tvar základního šneku a pro šrebovitě čele i tvar čelní plochy. V důsledku toho pro získání daného tvaru ozubené součásti by mělo mít každé ostří jako průsečnice čela a hřbetu po každém přecestření různý tvar (obr. 2.1). Jestliže se stejné body těchto ostří spojí čarami, pak hřbetní povrch frézy je určen sítí souřadnicových čar, které sestávají z ostří a čar spojujících stejné body ostří (jejich tvar je různý). Tento povrch lze vyrobit podtáčecím nástrojem, který by měl s ním bodový styk. Toho lze dosáhnout jen tak, že nástroj při výrobě bude konat pohyby vy počítané v závislosti na tvaru jeho souřadnicových čar. Tento požadavek prakticky lze splnit pouze speciálním zařízením. Na obvyklých podtáčecích strojích tyto pohyby nelze uskutečnit, protože supert podtáčecího stroje ovládá pouze jediná vačka.

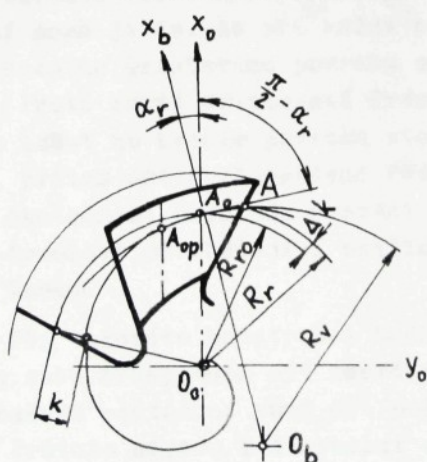


Obr. 2.3

Získat takový povrch jiným nástrojem nelze ani teoreticky (s výjimkou přímkového profilu). Proto všechny způsoby zhotovení hřbetů zubů odvalovacích fréz jsou jenom přibližné.

Teoreticky přesný povrch hřbetu je možno zaměnit jiným, který je schůdný z hlediska technologického a odchylka tvaru se od přesného odlišuje velmi málo.

Takovým možným nahrazením hřbetu je náhrada šroubovým povrchem. Na teoreticky přesný boční povrch hřbetu zubu (obráz. 2.3)



Obr. 2.4

se nanese síť souřadnic drážek frézy a čar spojujících stejné body drážek. Jedna z těchto čar je podtáčecí křivka. Na podtáčecí křivce zvolíme bod A_o , ve kterém se bude dotýkat šroubový povrch povrchu teoretického hřbetu. Poloha bodu A_o na podtáčecí křivce se obvykle volí tak, aby tento bod ležel přibližně ve středu mezi bodem A (odpovídá poloze povrchu

čela nové frézy) a bodem A_{op} (odpovídá povrchu čela opotřebované frézy). Hodnota koeficientu se doporučuje $(0,1 - 0,25) \cdot k / 72 /, / 83 /$. Bod A_o leží na poloměru R_{ro} . Předpokládáme, že jsme určili souřadnice ostří procházející bodem A_o (kap.1). Pak v bodě A_o podtáčecí křivky AA sestrojíme kružnici o poloměru R_v .

Poloměr R_v pro podtáčení podle oblouku kružnice je roven přímo poloměru podtáčecího oblouku. Pro podtáčení podle Archimedovy spirály (obr. 2.4) se poloměr dle /39/ určí následovně :

$$R_v = \frac{R_{ro}}{\cos \alpha_r (1 + \sin^2 \alpha_r)} \quad (2.1)$$

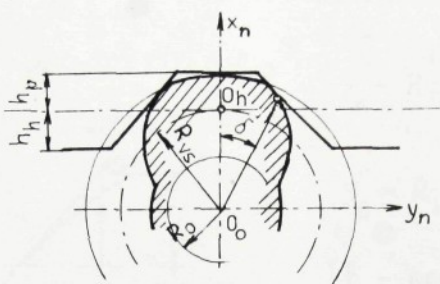
Velikost úhlu α_r se volí v rozmezí $10^\circ - 15^\circ / 72 /$.

Pro radiální podtáčení boků zubů je osové posunutí podtáčecího nástroje charakterizováno šroubovým parametrem C výchozího šneku.

2.2.1 Zvláštnosti tvaru hřbetu odvalovacích fréz pro evolventní ozubená kola

Základní šnek evolventní odvalovací frézy pro evolventní ozubená kola je evolventní šroubové ozubené kolo s počtem zubů rovným počtu chodů šneku /39/. Jeho profil v čelní rovině je evolventa (obr. 2.5). Charakteristické pro tento tzv. evolventní šnek je to, že při změně poloměru valícího válce záběr jeho bočního šroubového povrchu se s přímkovým hřebenem nemění. Proto ostří odvalovací frézy pro novou i přeostřenou frézu budou ležet na bočním povrchu stejného evolventního šneku (obr. 2.2), přitom ostří přeostřené frézy bude částí ostří nové frézy. Tato skutečnost dovoluje provést boční hřbetní povrch jako povrch šroubový, procházející ostřím $B_L C_L$ s osou v ose základního šneku.

Při takovéto konstrukci bočních povrchů, podtáčení bočních stran zubů frézy musí být osové a podtáčení hlav radiální. Při osovém podtáčení musí mít podtáčecí nástroj křivkový profil. Protože nejsou k dispozici stroje na osové podtáčení, provádí se pouze radiální podtáčení. Teoreticky přesný povrch



Obr. 2.5

boku zubu se nahrazuje zpravidla Archimedovým šroubovým povrchem /39/, /83/, /68/, který dovoluje radiální podtáčení odvalovacích fréz. Avšak při použití takových metod vznikají chyby při výrobě Archimedových šroubových povrchů a jsou ohraňovány možnosti racionálního výběru geometrických parametrů odvalovacích fréz (úhlů čela a stoupání šroubovice šneku). Z tohoto důvodu podal Lašněv /39/ novou metodu profilování odvalovacích fréz.

2.2.1.1 Nahrazení teoreticky přesného povrchu boku zubu Archimedovou šroubovou plochou

Náhrada se provádí tak, že v osovém řezu vypočtený tvar evolventního šneku nahradíme přímkovým profilem šneku Archimédova (obr. 2.6). Úhel profilu šneku $\alpha_{CA} = \alpha_C$

$$\operatorname{tg} \alpha_C = \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\cos \beta_{zn}} \quad (2.2)$$

Z obr. 2.6 plyne, že na hlavách a patách vzniknou tlustší zuby. Úchyly je možno zanedbat pouze u fréz s úhlem stoupání $\beta_{zn} \leq 3^\circ - 4^\circ$. Úchyly je možno snížit úhlovou korekcí podle obr. 2.7. Přímkové ostří se vede koncovými body A, B aktivního profilu. Vznikne nový úhel profilu $\alpha'_{CA/83/}$

$$\operatorname{tg} \alpha'_{CA} = \frac{i_n m (\operatorname{inv} \alpha_A - \operatorname{inv} \alpha_B)}{2 \cos \beta_{zn} (m + H_{pm} + 0,5 k)} \quad (2.3)$$

Úhly záběru v bodech A, B - α_A , α_B lze vyjádřit ze vztahů

$$\cos \alpha_A = \frac{R_o}{y_A}; \quad \cos \alpha_B = \frac{R_o}{y_B}; \quad (2.4)$$

souřadnice bodu A , B

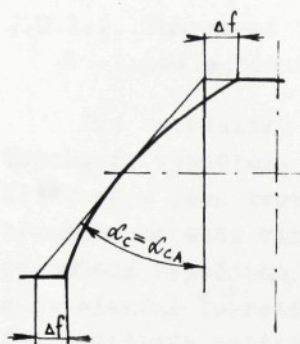
$$y_A = R_r + \frac{f \cdot m}{\cos \omega_k} \quad (2.5)$$

$$y_B = R_r - \frac{H_{pm} + 0,5k}{\cos \omega_k}$$

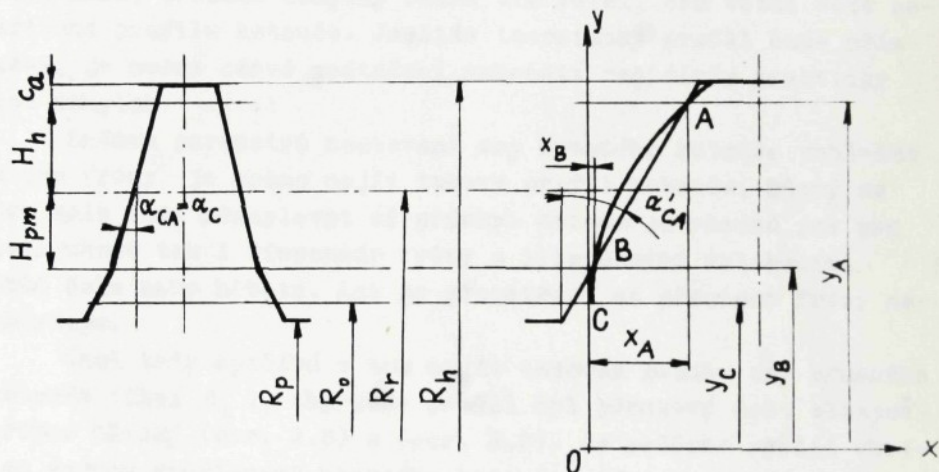
f - součinitel hlavy zubu ozubeného kola

R_o - poloměr zákl. kružnice frézy

H_{pm} - výška k počátku modifikace



Obr. 2.6



Obr. 2.7

$$H_{pm} = 0,55 m \quad (2.6)$$

Poloměr základní kružnice

$$R_o = R_r \cos \alpha_c \quad (2.7)$$

Úhly profilu v osovém řezu budou nabývat odlišných hodnot jak pro levý tak pro pravý bok zubu (při pohledu proti zubu)

$$\cotg \alpha_{np} = \cotg \alpha_{CA} \mp \frac{k \cdot z_f}{H_d} \quad (2.8)$$

$$\cotg \alpha_{nl} = \cotg \alpha_{CA} \pm \frac{k \cdot z_f}{H_d} \quad (2.9)$$

Horní znaménko platí pro pravochodé a dolní pro levochodé frézy.

2.2.1.2 Nahrazení teoreticky přesného povrchu boku zubu podle Lašněva /39/

Pro teoretický přesný povrch boku zubu, jako pro povrch šroubový, vypočteme profil brusného kotouče. Tento profil bude křivkový a jeho tvar bude závislý na parametrech ustavení osy brusného kotouče vzhledem k broušenému povrchu. Při osovém podtáčení vypočítaný křivkový profil brusného kotouče umožňuje získání teoretického tvaru bočního povrchu bez úchylek. Při radiálním podtáčení brusný kotouč nevyrobí požadovaný tvar boku zubu, přičemž úchyly budou tím větší, čím větší bude zakřivení profilu kotouče. Jestliže teoretický profil bude přímkový, je možno osové podtáčení nahradit radiálním prakticky bez úchylek.

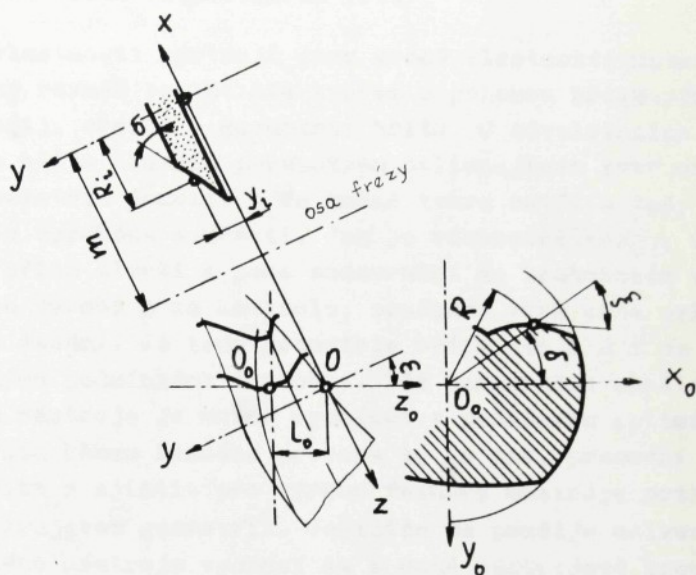
Změnou parametrů nastavení osy brusného kotouče vzhledem k ose frézy, je možno najít takový profil kotouče, který se jen málo bude odchylvat od přímky. Metoda je vhodná jak pro jednochodé tak i vícechodé frézy s libovolnými velikostmi úhlů čela nebo hřbetu. Ani po přestřžení se přesnost frézy nezhoršuje.

Úkolem tedy spočívá v tom najít takovou polohu osy brusného kotouče (úhel ε_k), aby jeho profil byl přímkový nebo alespoň přímce blízký (obr. 2.8) a (obr. 2.9). Je potřeba zvolit vhodnou osovou vzdálenost brusného kotouče a frézy a vzdálenost křížení jejich os (l_0) k pevně zvolenému bodu (počátku) na ose frézy. Pak je potřeba nalézt takový úhel ε_k , kde odchylky profilů řezů šroubovým povrchem boků zubů se pohybovaly v požadovaných mezích

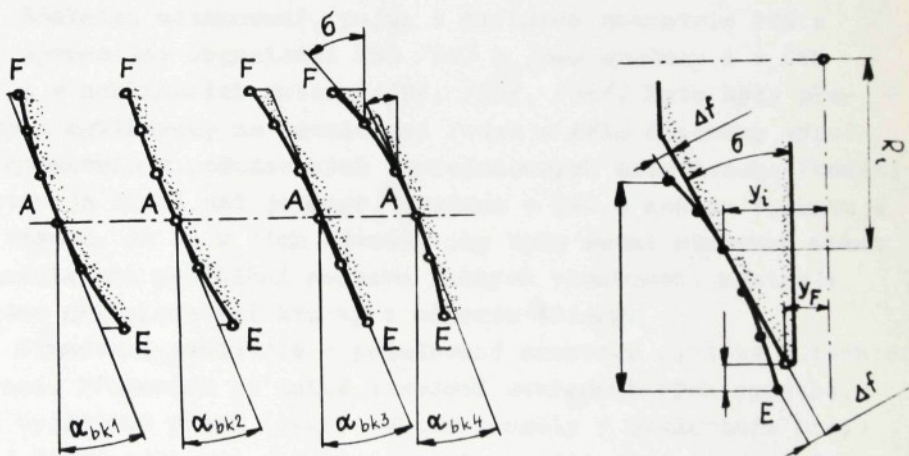
$$|\Delta f| \leq \Delta f_{\text{zad}} \quad (2.10)$$

Chyba nahrazení se může snížit také tak, že profil frézy budeme brousit po částech. Nejdříve patu a pak hlavu zubu. Vhodné je to zejména u odvalovacích fréz pro velké moduly, vícechodé frézy a frézy s kladným nebo záporným úhlem čela.

Úlohu je možno pro její pracnost řešit pouze pomocí číselnicového počítače.



Obr. 2.8



Obr. 2.9

2.3 Geometrie břitu odvalovacích fréz

Řezné vlastnosti nástrojů jsou kromě vlastnosti materiálu nástroje dány rovněž optimálním tvarem a polohou břitu při úběru třísky, tj. obecně - geometrií břitu. U odvalovacích fréz je geometrie břitu hlavním parametrem ovlivňujícím tvar ostří. Při změně geometrie dochází i ke změně tvaru ostří a tedy i změně tvaru vyráběné součásti. Jak je všeobecně známo, údaje o geometrii břitu slouží k jeho znázornění na technickém výkrese, k jeho výrobě a ke kontrole, současně však může ovlivnit i proces řezání. Je tedy geometrie břitu závislá i na technologických podmínkách obrábění. Při konstrukci speciálního řezného nástroje je možné vycházet z požadavku optimální geometrie břitu během řezného procesu tj. s tzv. pracovní geometrie břitu a zjistit pro výrobu řezného nástroje potřebnou tzv. nástrojovou geometrii. Jestliže se použije univerzálního řezného nástroje vychází se z dané nástrojové geometrie břitu a provádí se pouze kontrola geometrie pracovní.

Základní ustanovení, pojmy a definice geometrie břitu byly zpracovány organizací ISO /94/ a jsou uvedeny i v ČSN /95/ i v publikacích autora /29/, /35/, /36/. Tyto byly převzaty a aplikovány na odvalovací frézu a dále doplněny výpočtem geometrie v požadovaných souřadnicových soustavách. Použití soustav je širší, než je např. uvedeno v ISO a než se vyskytuje při výrobě. Je to z těch důvodů, aby bylo možné sledovat změnu geometrie při provádění rozboru řezných vlastností nástroje zejména při sledování tvorby a odchedu třísky.

Stanovení geometrie v požadované soustavě sestává z těchto operací. Především je nutné zavedení souřadnicových soustav, dále vyjádření ploch (stačí vektor normály v uvažovaném bodě) řezné části nástroje pomocí vektorů, vyjádření transformačních vztahů pro převedení vektoru normály z dané do požadované soustavy a nakonec vyjádření požadovaných řezných úhlů.

Plochy řezné části nástroje. Geometrii řezné části nástroje můžeme stanovit buď v nástrojové soustavě $(x_f y_f z_f)$ nebo v nástrojové normální soustavě $(x_n y_n z_n)$, v nástrojové ortogonální soustavě $(x_o y_o z_o)$ - obr. 2.10, dále v pracovní

soustavě $(x_{fe} \ y_{fe} \ z_{fe})$, v pracovní ortogonální $(x_{oe} \ y_{oe} \ z_{oe})$ v pracovní normální $(x_{ne} \ y_{ne} \ z_{ne})$ - obr. 2.11. Jako pomocná soustava slouží soustava strojová $(x_m \ y_m \ z_m)$. Souřadnicové soustavy jsou pravouhlé. Vztah mezi nástrojovými soustavami a soustavou strojovou určuje nastavení nástroje na stroji a vzájemná poloha pracovních soustav a strojové soustavy je určena pohybem nástroje vzhledem k obráběné součásti.

Čelo i hřbet odvalovacích fréz může být plochou libovolného tvaru. Těmto plochám lze určit vektory normál. Normála představuje vektorový součin dvou libovolných vektorů ležících v tečné rovině k rovině čela nebo hřbetu. Geometrie řezné části se stanoví tak, že se určí úhly mezi normálou a jejími složkami v požadované souřadnicové soustavě.

Budiž dán povrch čela nebo hřbetu rovnicí

$$r = r(u, v) \quad (2.11)$$

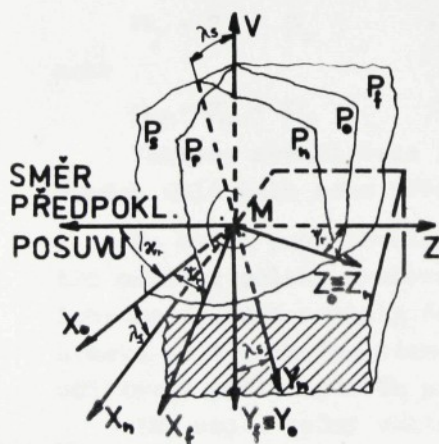
pak vektory ^{ležící v} tečných rovin ^{ah} budou

$$r_u = i x_u + j y_u + k z_u \quad (2.12)$$

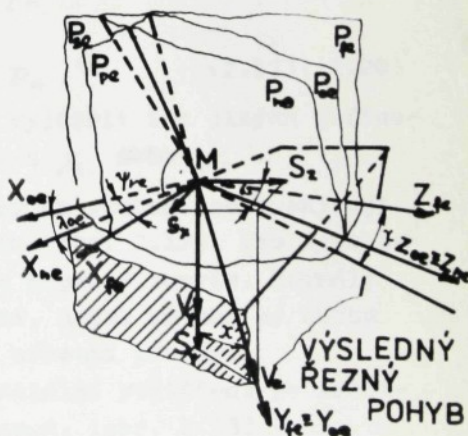
$$r_v = i x_v + j y_v + k z_v$$

normála k povrchu

$$n = r_u \times r_v \quad (2.13)$$



Obr. 2.10



Obr. 2.11

Volba vektorů se provede tak, že za první vektor se zvolí vektor tečný k ostří, za druhý pak vektor tečný k nějaké křivce povrchu. Např. u šroubových ploch ke šroubovici. Pro případ rovinného čela nebo hřbetu je vyjádření tečných vektorů jednoduché, protože tečná rovina je totožná s rovinou čela nebo hřbetu. V tomto případě se postupuje podobně.

Vektory je výhodné vyjádřit pomocí směrových kosínů úhlů $\cos \alpha_i = n_i / |\eta|$. Jestliže vektor $\eta (n_1, n_2, n_3)$ je libovolný vektor, pak směrové kosíny jsou přímo rovny souřadnicím n_i .

Vektor ostří v ortogonální soustavě

$$\sigma_o = \sigma_o (\cos \lambda_s, \sin \lambda_s, 0) \quad (2.14.1)$$

Vektor ostří v nástrojové soustavě

$$\sigma_n = \sigma_n (\cos \lambda_s, \sin \kappa_r, \sin \lambda_s, -\cos \lambda_s \cos \kappa_r) \quad (2.14.2)$$

Vektor průsečnice roviny čela A_γ a nástrojové roviny ortogonální P_o v ortogonální soustavě

$$p_o = p_o (0, \sin \gamma_o, \cos \gamma_o) \quad (2.15)$$

Vektor průsečnice roviny čela A_γ a normální roviny P_n v ortogonální soustavě.

$$p_n = p_n (-\sin \gamma_n \sin \lambda_s, \sin \kappa_r \cos \lambda_s, \cos \gamma_n) \quad (2.16)$$

Obdobně se postupuje při vyjádření dalších vektorů průsečnic.

Potom vektory normál rovin čela

$$n_\gamma = \sigma_o \times p_o; \quad n_\gamma = \sigma_o \times p_n \quad (2.17), (2.18)$$

nebo

$$n_\gamma = \sigma_n \times p_o; \quad n_\gamma = \sigma_n \times p_n \quad (2.19), (2.20)$$

Vektory normál čela je možno vyjádřit i z jiných definovaných úhlů čela nebo hřbetu např. z χ_z nebo χ_p .

Na ostří zubu odvalovací frézy na ozubení se vyskytují tři odlišné polohy uvažovaného bodu (obr. 2.12). Pro tyto polohy se vyjádří normály čela podle popsané teorie. Normály hřbetu se v principu stanoví stejně, avšak vztahy se budou odlišovat podle způsobu podtáčení hřbetní plochy.

Tak např. tečný vektor pro radiální podtáčení po Archimédově nebo logaritmické spirále apod. (obr. 2.13)

$$q = q (\tan \alpha_r, 1, -\tan \beta_{hn}) \quad (2.21)$$

kde úhel α_r se vypočte ze vztahu /83/

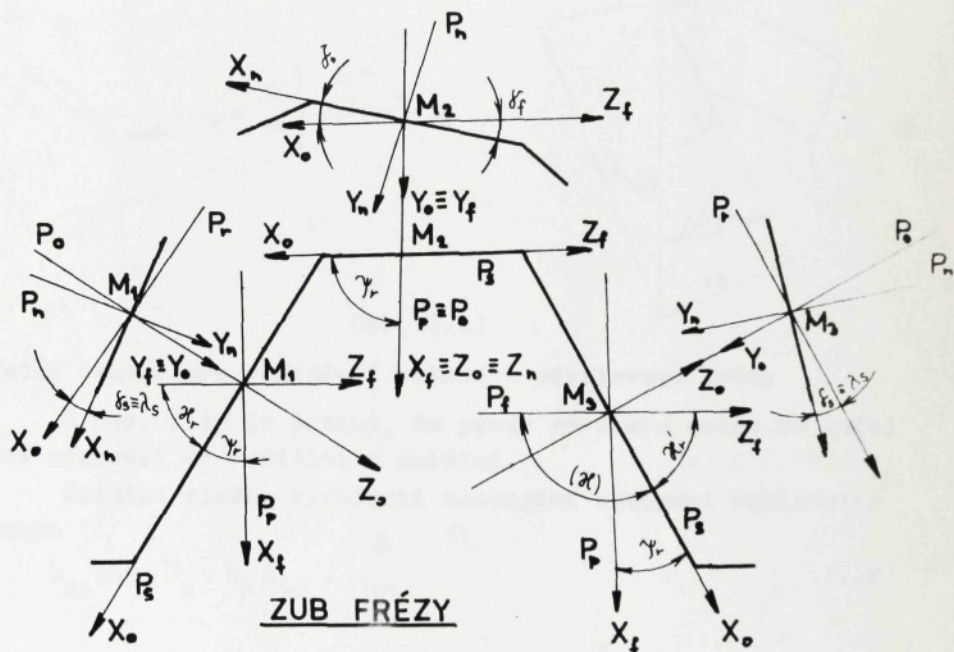
$$\operatorname{tg} \alpha_r = \frac{k \cdot z_f}{\pi D_h} \quad (2.22)$$

Tečný vektor pro kružnici u sledovaných odvalovacích fréz

$$\mathbf{q} = q (\operatorname{tg} \alpha_r, 1, -\operatorname{tg} \beta_{hn}) \quad (2.23)$$

kde úhel α_r (obr. 2.13) se vypočte ze vztahu

$$\sin(\alpha_r + \gamma_r) = \frac{2H_f}{D_h} \quad (2.24)$$



Obr. 2.12

Tečný vektor pro axiální podtáčení

Při axiálním podtáčení se úhel stoupání šroubovice buď zmenšuje nebo zvětšuje podle toho, o který bok zubu jde. Úhel se vyjádří z obr. 2.14. Ze známého úhlu stoupání na roztečné kružnici základního šneku se vyjádří úhel stoupání na vrcholové nebo jiné kružnici

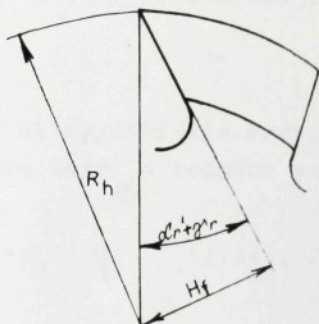
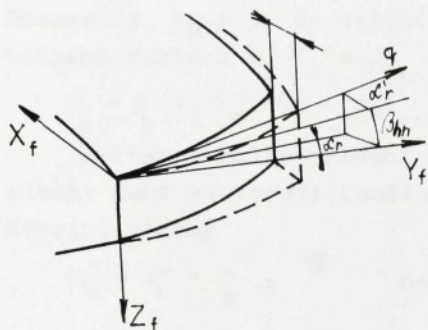
$$\operatorname{tg} \beta_{hn} = \frac{D_r}{D_h} \operatorname{tg} \beta_{zn} \quad (2.25)$$

$$\operatorname{tg} \beta'_{hn} = \operatorname{tg} \beta_{hn} \mp \frac{k_a}{H_{zn}} \operatorname{tg} \beta_{hn} \quad (2.26)$$

Znaménko — platí pro zmenšený úhel stoupání a + pro zvětšený úhel.

Tečný vektor k této ploše pak bude

$$\mathbf{q} = q (0, \cos \beta'_{hn}, -\sin \beta'_{hn}) \quad (2.27)$$



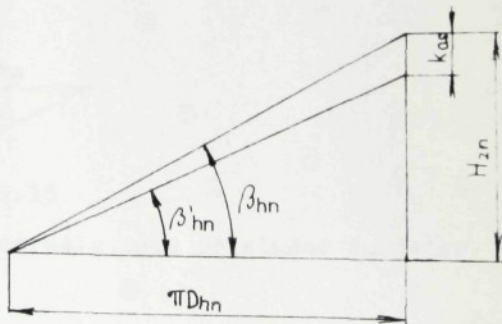
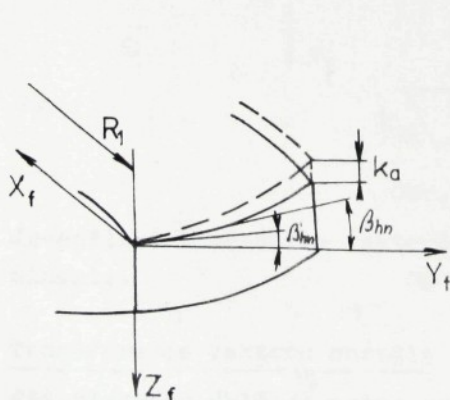
Obr. 2.13

Tečný vektor pro podtáčení kuželové odvalovací frézy

Z obr. 2.15 je patrné, že posuv ve směru kolmo na kužel lze rozložit na radiální a axiální.

Axiální složka rychlosti sledující stoupání základního šneku

$$k_{as} = -\pi D_h \cdot \operatorname{tg} \beta_{hn} + H_{zn} \quad (2.28)$$



Obr. 2.14

Přídavný posuv kolmo na kužel

$$k_{kk} = \pi D_h \cdot \operatorname{tg} \beta_{hn} \cdot \sin \omega_k \quad (2.29)$$

Výsledný posuv

$$k_v = k_{kk} + k_{as} \quad (2.30)$$

pak

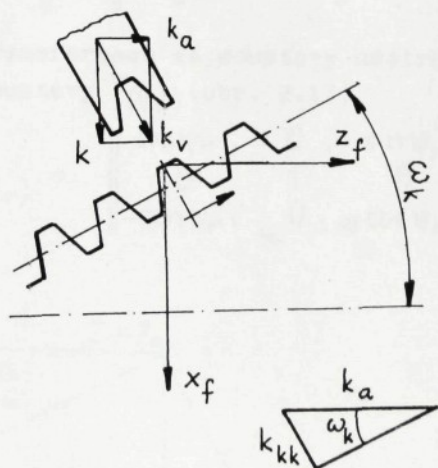
$$k_a = k_v \cdot \sin \omega_k \quad ; \quad k = k_v \cdot \cos \omega_k \quad (2.31), (2.32)$$

Dosažením k_a a k do vztahů (2.26) a (2.22) se získají složky tečného vektoru $\operatorname{tg} \alpha_r$ a β'_{hn} .

$$\mathbf{q} = q (\operatorname{tg} \alpha_r, 1, -\operatorname{tg} \beta'_{hn}). \quad (2.33)$$

Vektor normály hřbetní plochy se vyjádří dle druhu použité plochy jako vektorový součin vektoru ostří a tečného vektoru hřbetní plochy

$$\mathbf{n}_\alpha = \boldsymbol{\sigma}_\sigma \times \mathbf{q}, \quad \text{nebo} \quad \mathbf{n}_\alpha = \boldsymbol{\sigma}_n \times \mathbf{q} \quad (2.34), (2.35)$$



Obr. 2.15

Jednotlivé souřadnice vektoru normály jsou příslušné subdeterminanty.

Transformace vektoru normály

Při přepočtu úhlů je možno provést tyto transformace:

- a) přímou - přechod některé nástrojové soustavy do požadované pracovní. V tomto případě se zjišťují

pracovní úhly z dané geometrie a nastavení nástroje.

- b) inverzní - přechod z některé pracovní soustavy do požadované nástrojové. V tomto případě se z daných pracovních úhlů zjišťuje potřebná geometrie a nastavení nástroje.

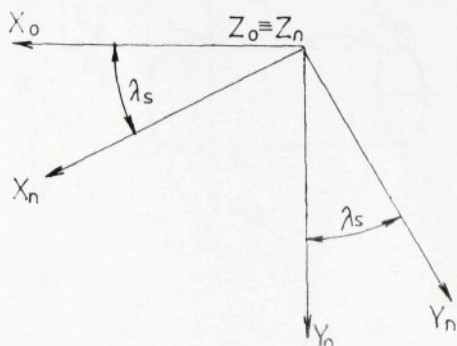
Ad a) Při této transformaci se vychází z nástrojové normálové soustavy a postupně se provedou transformace do nástrojové ortogonální $T_{(\lambda_s)}$, nástrojové $T_{(\psi_r)}$, pracovní $T_{(-\tau)}, T_{(-\chi)}$, pracovní ortogonální $T_{(\psi_{ra})}$ a pracovní normálové $T_{(-\lambda_{se})}$. Transformace provedeme pomocí matic (2.36) až (2.39) a (2.46) a (2.47).

Transformace ze soustavy nástrojové normálové do nástrojové ortogonální soustavy $T_{(\lambda_s)}$ (obr. 2.16)

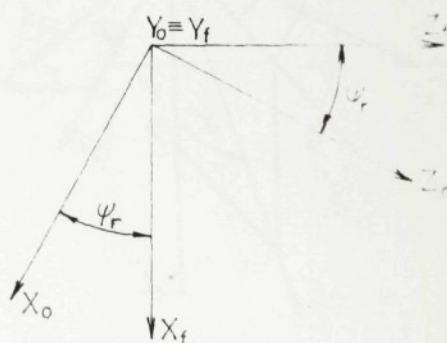
$$T_{(\lambda_s)} = \begin{pmatrix} \cos \lambda_s & -\sin \lambda_s & 0 \\ \sin \lambda_s & \cos \lambda_s & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2.36)$$

Transformace ze soustavy nástrojové ortogonální do nástrojové soustavy $T_{(\psi_r)}$ (obr. 2.17)

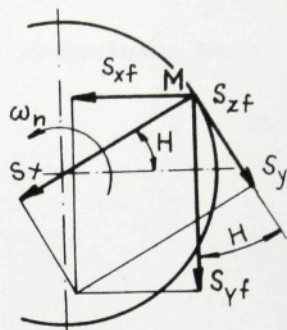
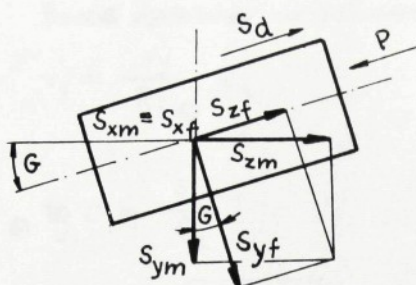
$$T_{(\psi_r)} = \begin{pmatrix} \cos \psi_r & 0 & \sin \psi_r \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \psi_r & 0 & \cos \psi_r \end{pmatrix} \quad (2.37)$$



Obr. 2.16



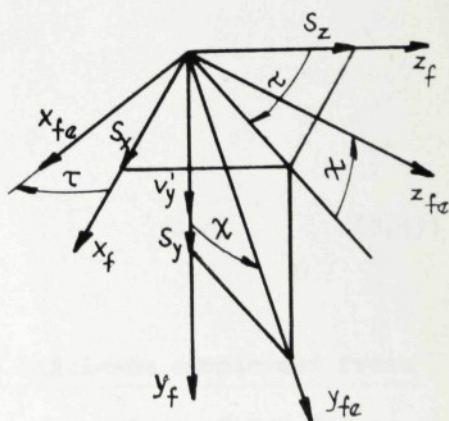
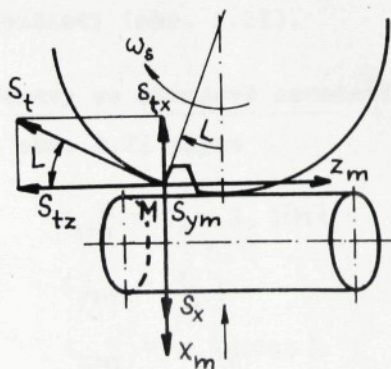
Obr. 2.17



Transformace ze soustavy nástrojové do soustavy pracovní
- obr. 2.18.

$$T_{(\tau)} = \begin{vmatrix} \cos \tau & 0 & \sin \tau \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \tau & 0 & \cos \tau \end{vmatrix} \quad (2.38)$$

$$T(x) = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos x & -\sin x \\ 0 & \sin x & \cos x \end{vmatrix} \quad (2.39)$$



Výpočet úhlů τ a χ ze známých posuvů

Řezná rychlost na poloměru R_i libovolného bodu

$$v'_y = \frac{v_y}{R_{fr}} \cdot R_i \quad (2.40)$$

$$\operatorname{tg} \tau = \frac{s_x}{s_z} \quad (2.41)$$

$$\operatorname{tg} \chi = \frac{\sqrt{s_x^2 + s_z^2}}{v'_y + s_y} \quad (2.42)$$

Pro $s_z < 0$ je polarita úhlu χ záporná.

Složky posuvu s_x , s_y , s_z jsou závislé na směru posuvu odvalovací frézy vůči obrobku a je nutné je transformovat ze soustavy strojové do nástrojové. U odvalovacího frézování se mohou vyskytovat tyto posuvy obr. 2.19; 2.20; 2.21 radiální (s_x), axiální (s_y), tečný (s_t), diagonální (s_d). Poloha nástrojové soustavy (x_f , y_f , z_f) vůči strojové souřadnicové soustavě (x_m , y_m , z_m) je dána úhly nastavení G , H , L . Úhel G určuje vyklonění osy frézy (obr. 2.19), úhel H polohu bodu na obvodu frézy (obr. 2.20), úhel L polohu bodu M na obvodu součásti (obr. 2.21).

Posuvy ve strojové soustavě

z obr. 2.21 plyne :

$$\begin{aligned} s_{xm} &= s_x - s_t \sin L \\ s_{ym} &= s_y \\ s_{zm} &= -s_t \cos L \end{aligned} \quad (2.43)$$

Posuvy ve strojové soustavě pro kuželovou odvalovací frézu

Vzhledem k tomu, že úhel L se uvažuje od kolmice na kuželovou plochu bude rozklad tečného posuvu

$$s_{xm} = s_x - s_t \sin(L - \omega_k)$$

(2.43a)

$$s_{ym} = s_y$$

$$s_{zm} = -s_t \cos(L - \omega_k)$$

Z obr. 2.19 plyne

$$s_{xt} = s_{xm}$$

$$s_{yt} = s_{ym} \cos G + s_{zm} \sin G$$

(2.44)

$$s_{zt} = -s_{ym} \sin G + s_{zm} \cos G$$

Posuvy v nástrojové soustavě (obr. 2.20)

$$s_x = s_{xf} \cos H + s_{yf} \sin H$$

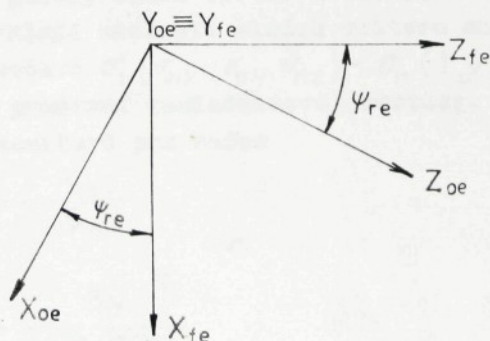
$$s_y = s_{xf} \sin H + s_{yf} \cos H$$

(2.45)

$$s_z = s_{zf} + s_d$$

Dosažením za s_x , s_y a s_z do vztahů (2.41) a (2.42) můžeme vypočítat úhly τ , χ a pak transformační matice (2.38), (2.39).

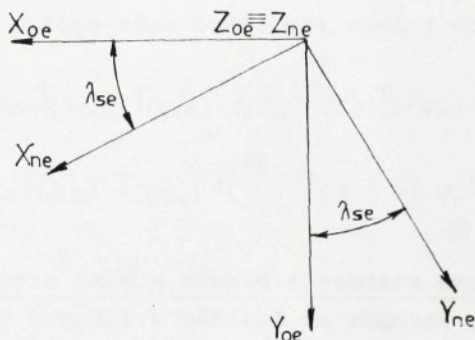
Transformace ze soustavy pracovní do pracovní ortogonální $T(-\psi_{re})$ - obr. 2.22



Obr. 2.22

$$T_{(\psi_{re})} = \begin{vmatrix} \cos \psi_{re} & 0 & \sin \psi_{re} \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \psi_{re} & 0 & \cos \psi_{re} \end{vmatrix} \quad (2.46)$$

Transformace ze soustavy pracovní ortogonální do soustavy pracovní normálové $T_{(-\lambda_{se})}$ - obr. 2.23



Obr. 2.23

$$T_{(\lambda_{se})} = \begin{vmatrix} \cos \lambda_{se} & -\sin \lambda_{se} & 0 \\ \sin \lambda_{se} & \cos \lambda_{se} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \quad (2.47)$$

Dopočet úhlů polohy ostří (2.48) a (2.49) v transformacích se provede na základě znalostí složek vektoru ostří. V nástrojové normálové soustavě $\sigma_n(\sigma_{nx}, \sigma_{ny}, \sigma_{nz}) = \sigma_n(1, 0, 0)$. Tento transformujeme do pracovní souřadnicové soustavy.

Úhly v této soustavě pak budou

$$\operatorname{tg} \psi_{re} = -\frac{\sigma_{nz}}{\sigma_{nx}} \quad (2.48)$$

$$\operatorname{tg} \lambda_{se} = \frac{\sigma_{ny}}{\sqrt{\sigma_{nx}^2 + \sigma_{nz}^2}} \quad (2.49)$$

Celková transformace vektoru normály čela (hřbetu) ze soustavy nástrojové normálové do pracovní normálové

$$n_{je} = n_j \cdot T(\lambda_s) \cdot T(\psi_r) \cdot T(-\tau) \cdot T(-\chi) \cdot T(-\psi_{re}) \cdot T(-\lambda_{se}) \quad (2.50)$$

$$n_{\alpha e} = n_{\alpha} \cdot T(\lambda_s) \cdot T(\psi_r) \cdot T(-\tau) \cdot T(-\chi) \cdot T(-\psi_{re}) \cdot T(-\lambda_{se}) \quad (2.51)$$

Ad b) Při zpětném způsobu transformace se postupuje stejně, transformační matice však budou mít opačné znaménko

$$n_j = n_{je} \cdot T(\lambda_{se}) \cdot T(\psi_{re}) \cdot T(\chi) \cdot T(\tau) \cdot T(-\psi_r) \cdot T(-\lambda_s) \quad (2.50.1)$$

$$n_{\alpha} = n_{\alpha e} \cdot T(\lambda_{se}) \cdot T(\psi_{re}) \cdot T(\chi) \cdot T(\tau) \cdot T(-\psi_r) \cdot T(-\lambda_s) \quad (2.51.1)$$

Určení úhlu rovin čela a hřbetu z vektoru normály. Jestliže je znám vektor normály v některé ze soustav např. pro čelo $n_j (n_{xc}, n_{yc}, n_{zc})$, provede se výpočet úhlu spádu roviny ve směrech souřadných os.

Pro čelo platí

$$\operatorname{tg} \gamma_x = -\frac{n_{xc}}{n_{yc}} ; \quad \operatorname{tg} \gamma_z = -\frac{n_{zc}}{n_{yc}} ; \quad (2.52)$$

Pro hřbet platí

$$\operatorname{tg} \alpha_x = -\frac{n_{yh}}{n_{xh}} ; \quad \operatorname{tg} \alpha_z = -\frac{n_{yh}}{n_{zh}} . \quad (2.53)$$

K výpočtu úhlů čela, nebo hřbetu v požadované soustavě použijeme transformovaného vektoru normály do této soustavy.

2.4 Hlavní konstrukční rozměry tělesa frézy

Mezi hlavní konstrukční rozměry odvalovacích fréz počítáme vnější průměr frézy, průměr upínacího otvoru a počet hřebců (drážek). Pokud to poměry dovolují je výhodné volit tyto parametry co největší.

2.4.1 Válcová odvalovací fréza (obr. 2.24)

1. Průměr frézy

Průměr frézy je výhodné volit co největší protože to vede k zvýšení přesnosti ozubení, trvanlivosti břitu. Větší průměr frézy dovoluje zvětšení upínacího otvoru a tedy i upínacího trnu, čím se zvýší tuhost upnutí a sníží chvění. Zvětšením průměru je možné zvýšit počet zubových hřebenů, klesá tím posuv na zub a zvyšuje se trvanlivost břitu.

Tyto výhody je potřeba srovnat s určitými zápory, jako je zvýšení ceny, zvýšení spotřeby kvalitní rychlořezné oceli (pokud se nepoužijí skládané frézy), zhoršení podmínek tepelného zpracování. Velkých průměrů tedy používáme v zásadě pro přesné a dokončovací a hlavně skládané odvalovací frézy.

Průměr vypočteme ze vztahu

$$D_h = D_p + 2(h_n + k + r_{fd}) \quad (2.54)$$

Průměr paty podélných drážek D_p volíme v závislosti na obráběcím stroji a průměru upínacího trnu.

$$D_p = (1,4 \text{ až } 2,0) D_n \quad (2.55)$$

Poloměr zaoblení paty podélných hřebenů zubů se volí v rozmezí

$$r_{fd} = (1,5 \text{ až } 3,5) \text{ mm} \quad (2.56)$$

nebo ze vztahu

$$r_{fd} = \frac{\pi(D_h - 2h_n)}{10z_f} \quad (2.57)$$

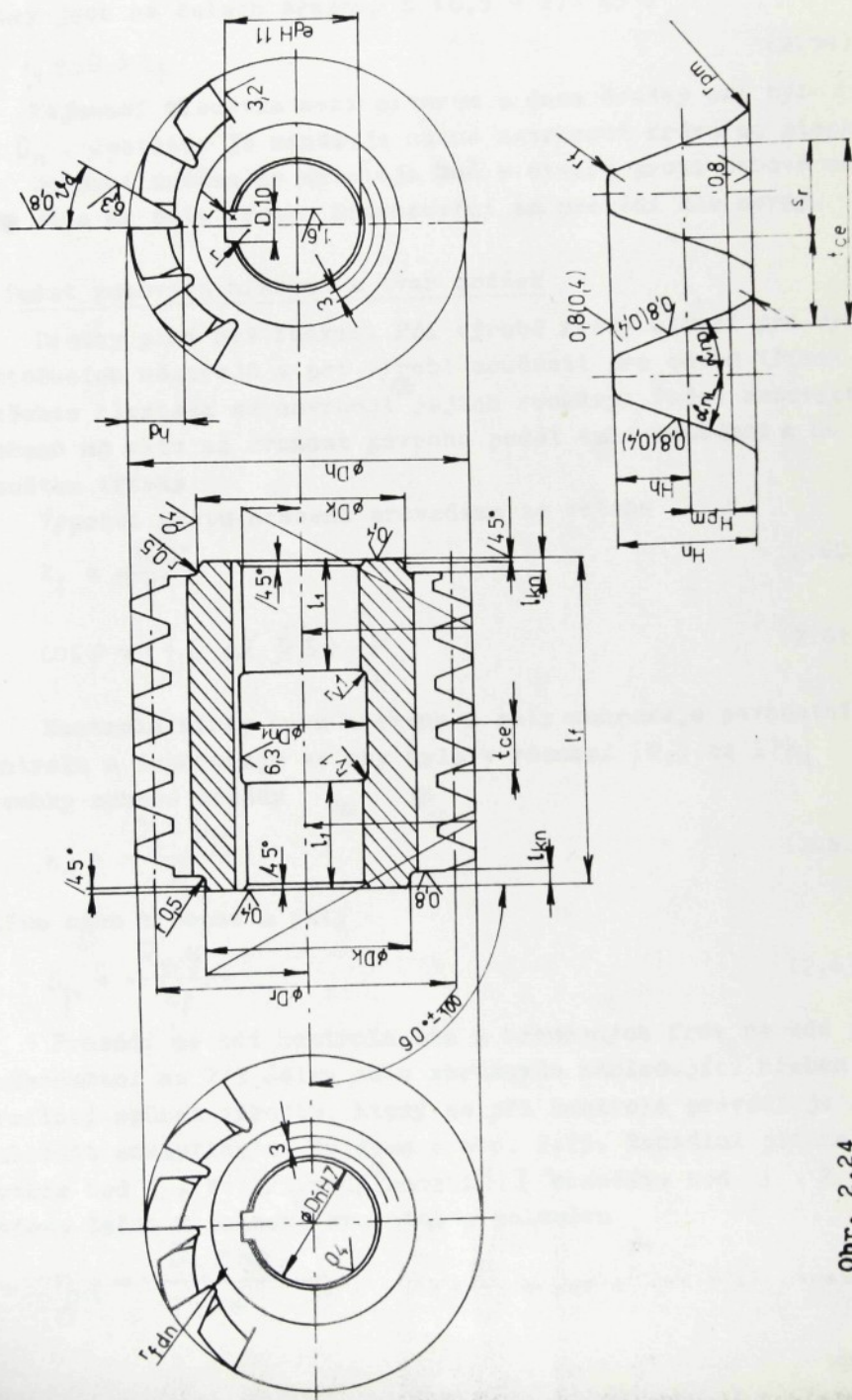
Zdvih vačky k vypočteme ze vztahu (2.22) dle zvoleného úhlu α_r a zaokrouhlíme na hodnotu zdvihu vačky ze sady vaček dodávaných ke stroji (hodnoty uvádí příloha 2).

2. Průměr upínacího otvoru

Otvor slouží k upnutí frézy na trnu. Orientační hodnota pro dimenzování je

$$D_n = (0,20 \text{ až } 0,45) D_h \quad (2.58)$$

Jinak jsou otvory normalizované v řaděs to 16, 22, 27, 32, 40, 50 mm. Pro lepší slícování s trnem se dosedací plocha



Обр. 2.24

otvoru přerušuje vybráním v délce jedné třetiny celkové délky frézy o 1 až 2 mm s poloměrem zaoblení 0,5 až 1,5 mm. Otvory jsou na čelech sraženy o $(0,5 - 2) \times 45^\circ$.

$$l_1 = 0,3 l_f \quad (2.59)$$

Nejmenší tloušťka mezi otvorem a dnem drážky smí být 0,3 D_h . Jestliže je menší, je nutné navrhnout frézu se stopkou.

Unášecí drážka se umísťuje buď v otvoru proti zubové mezeře nebo na čele frézy. Dimenzování se provádí dle normy.

3. Počet zubových hřebenů a tvar drážek

Drážky plní dvě funkce. Při výrobě frézy slouží pro výběh podtáčecích nástrojů a při výrobě součástí pro odvod třísek. Z těchto hledisek se navrhuje jejich rozměry. Počet zubových hřebenů má vliv na drsnost povrchu podél zubu součásti a na tloušťku třísky.

Výpočet počtu hřebenů provedeme ze vztahu

$$z_f = \frac{360^\circ}{\varphi} \quad (2.60)$$

$$\cos \varphi = (1,0 \text{ až } 4,5) \frac{D_p}{D_h} \quad (2.61)$$

Kontrola šířky zubu hřebene u paty nahrazuje pevnostní kontrolu a doporučuje se, aby byla v rozmezí $(0,5 \text{ až } 1) h_d$ hloubky zubové drážky

$$h_d = \frac{D_h - D_p}{2} \quad (2.62)$$

Šířka zubu hřebene u paty

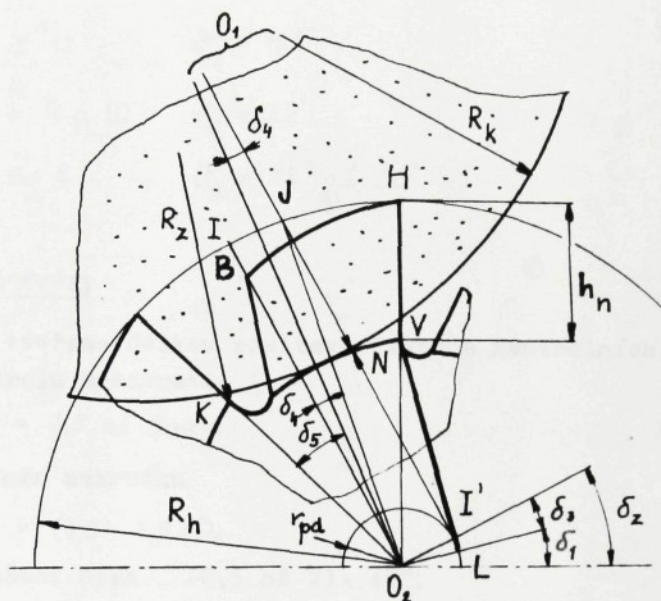
$$s_p = \frac{R_p \varphi}{z_f} \quad (2.63)$$

Provádí se též kontrola, zda u broušených fréz nebude při podbroušení na 2/3 délky zubu zbrusován následující hřeben. Grafický způsob výpočtu, který se při kontrole provádí je nutné nahradit analytickým. Vyjdeme z obr. 2.25. Radiální přímka vytkne bod I. Ve 2/3 vzdálenosti HI označíme bod J. Z něho vedeme tečnu k pomocné kružnici o poloměru

$$r_{pd} = \frac{D_h \sin \alpha_r}{2} \quad (2.64)$$

Na této tečně leží střed bruseného kotouče o průměru D_k .
 Prochází-li tato kružnice nad bodem K, je podmínka splněna.
 Průměr bruseného kotouče nesmí být menší než 40 mm. Podmínku
 lze vyjádřit vztahem

$$R_z \geq R_k \quad (2.65)$$



Obr. 2.25

$$R_z = \sqrt{(\overline{O_2V})^2 + (\overline{O_2O_1})^2 - 2 \cdot \overline{O_2V} \cdot \overline{O_2O_1} \cos \delta_5} \quad (2.66)$$

$$\overline{O_2O_1} = \sqrt{r_{pd}^2 + (\overline{I'O_1})^2}$$

$$\delta_5 = \frac{1}{4} \cdot \frac{2\pi}{z_f} + \delta_4 \quad ; \quad \delta_4 = \arctg \frac{r_{pd}}{\overline{I'O_1}}$$

$$\overline{I'O_1} = R_k + \overline{NI'} \quad ; \quad \overline{IN} = \overline{VL} - \overline{IL}$$

$$\overline{VL} = \sqrt{(\overline{O_2V})^2 - r_{pd}^2} \quad ; \quad \overline{IL} = r_{pd} \cdot \delta_3$$

$$\delta_3 = \delta_2 - \delta_1 \quad ; \quad \delta_2 = \frac{3}{4} \cdot \frac{2\pi}{z_f}$$

$$\delta_1 = \arcsin \frac{r_{pd}}{O_2V} \quad ; \quad \overline{O_2V} = \frac{D_h}{2} - h_n$$

Úhel rozevření drážky ϑ_d je závislý na přesnosti vyráběné frézy. Pro broušené nástroje a počet hřebců

$$\begin{aligned} z_f \geq 12 & \quad \vartheta_d = 18^\circ \\ z_f = 9 \text{ a } 10 & \quad \vartheta_d = 22^\circ \\ z_f \leq 8 & \quad \vartheta_d = 25^\circ \text{ až } 30^\circ \end{aligned} \quad (2.67)$$

4. Délka frézy

Je tvořena délkou závitové části a kontrolních nákrůžků pro kontrolu házivosti.

$$l_{kn} = 2,5 \text{ až } 5 \text{ mm} \quad (2.68)$$

Průměr nákrůžku

$$D_{k1} = (1,5 - 1,7) D_0 \quad (2.69)$$

Sražení hran $(0,5 \text{ až } 2) \times 45^\circ$.

Délka závitů by měla odpovídat délce celkového pracovního rozsahu frézy l_c (viz kap. 3.1.3 vzt. 3.71). Je nutné však přidat několik závitů pro možnost krokování. Pak celková délka frézy

$$l_f = l_{zn} + 2l_{kn} \quad (2.70)$$

kde

$$l_{zn} = (4 \text{ až } 5) \pi \cdot m + (10 \text{ až } 15) \text{ mm} \quad (2.71)$$

Doporučována je délka dvojnásobná délce závitů /52/. Prodlouženou frézou je možno dosáhnout trojnásobného výkonu obrábění při nepatrně zvýšených nákladech. Dosáhne se toho krokování.

Pro příliš velké průměry kol vychází i délka pracovního rozsahu veliká a fréza by byla příliš dlouhá. Pak je možno

frézu skrátkit a přílišné zatížení na první zuby rozdělit. To se provádí pomocí náběhového kužele. Stejný případ nastane i při kolech se šikmými zuby o velikém sklonu $\beta_z \geq 20^\circ$. Pak se doporučuje zhotovit kužel o úhlu $\omega_k = 18^\circ - 30^\circ$ na délce l_k /72/, /83/

$$l_k = (4 \text{ až } 5) m_n \quad (2.72)$$

Velikost kužele pro jednotlivé případy je možné upravit dle získaných hodnot průřezů třísek (z kap. 3.1.4.1).

5. Rostečný průměr frézy

Je základním výpočtním průměrem frézy a k němu se vztahují další parametry jako jsou úhly stoupání závitů i drážek. K němu je vztahován základní vypočtený profil apod.

$$D_r = D_h - 2 H_h - 2 \frac{k}{4} \quad (2.73)$$

H_h - výška hlavy zubu frézy

Se změnou rostečné kružnice se mění i úhel stoupání šroubovice β_{zn} .

$$\sin \beta'_{zn} = \frac{m}{D'_r} \quad (2.74)$$

Rostečný průměr nové frézy

$$D'_r = D_h - 2 H_h \quad (2.75)$$

6. Úhel stoupání šroubovice zubů a sklonu drážek na rostečném válci

Normální rosteč

$$t_n = \pi \cdot m \quad (2.76)$$

Osová rosteč

$$t_{ce} = \frac{t_n}{\cos \beta_{dn}} \quad (2.77)$$

Osová rosteč před kalením u fréz z rychlořezné oceli

$$t_{cn} = 0,9993 t_{ce} \quad (2.78)$$

Úhel stoupání šroubovice na rostečném válci

$$\sin \beta_{zn} = \frac{i_n \cdot m}{D_r} = \frac{i_n t_n}{\pi D_r} \quad (2.79)$$

Lze snadno odvodit

$$\operatorname{tg} \beta_{dn} = \frac{\pi D_r}{H_d} \quad (2.80)$$

Pak

$$\beta_{zn} = \beta_{dn} \quad (2.81)$$

2.4.2 Kuželová odvalovací fréza (obr. 2.26)

Vztahy pro stanovení rozměrů kuželové odvalovací frézy jsou obdobné, některé totožné se vztahy pro frézu válcovou.

1. Průměr frézy

$$D_h = D_p + \frac{2(h_n + k + r_{fd})}{\cos \omega_k} \quad (2.82)$$

D_p - vypočteme ze vztahu (2.55), r_{fd} ze vztahu (2.56) nebo (2.57), h_n závisí na použitém profilu frézy.

Malý průměr kužele frézy

$$D_{h1} = D_h - l_{zn} \sin \omega_k \quad (2.83)$$

Velký průměr frézy

$$D_{h2} = D_h + l_{zn} \sin \omega_k \quad (2.84)$$

2. Délka frézy

$$l_f = l_{zn} \cos \omega_k + 2 l_{kn} \quad (2.85)$$

l_{kn} vypočteme ze vztahu (2.68), l_{zn} ze vztahu (2.71).

Průměry nákrůků

$$D_{k1} = (1,5 \text{ až } 1,8) D_n \quad (2.86)$$

$$D_{k2} = D_{k1} + 2 l_{zn} \sin \omega_k \quad (2.87)$$

3. Průměr upínacího otvoru se stanoví dle údajů z kap. 2.4.1

b. 2.

4. Počet zubových hřebenů

Určí se na základě vztahů z kap. 2.4.1 a kontroly na nejmenším průměru frézy.

5. Roztečný průměr frézy

Střední roztečný průměr frézy stanovíme ze vztahu

$$D_r = D'_{rk} - 2 \frac{k}{4} \quad (2.88)$$

$$D'_{rk} = D_h - 2 \frac{H_h}{\cos \omega_k} \quad (2.89)$$

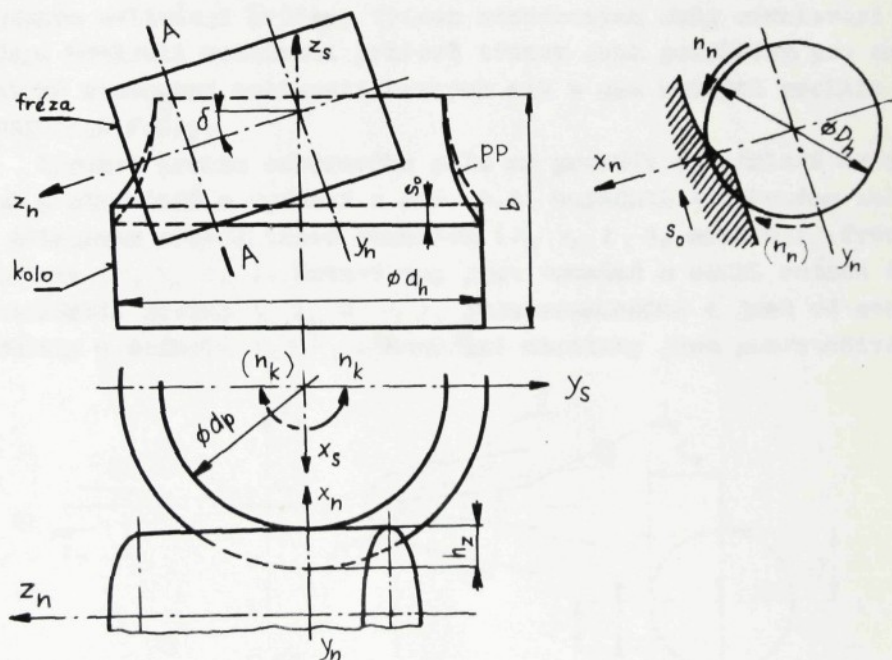
6. Ostatní parametry jsou voleny obdobně. Čelo hřebenů je přímé rovnoběžné s osou nástroje. Úhel stoupání se se zvětšujícím průměrem zmenšuje.

3. TECHNOLOGICKÉ PARAMETRY ODVALOVACÍHO FRÉZOVÁNÍ

3.1. Záběrové poměry při frézování osazení odvalovacím způsobem

3.1.1 Záběrové pole odvalovací frézy

Při frézování osazených součástí odvalovacím způsobem dochází k vzájemnému pronikání dvou těles a obrábění probíhá v určité oblasti, které se říká záběrové pole odvalovací frézy. Záběrové pole je prostorová křivá plocha ohraničená pronikem válcové nebo kuželové plochy frézy (určené hlavními břitzy frézy) a válcovou plochou opsanou obrobku nebo osazení (určenou průměrem hlavové kružnice), přičemž válcová plocha obrobku na tzv. odchoďné straně, kde obrobek vychází ze záběru, je zmenšena na poloměru o hloubku frézované zubové mezery. Jde tedy o plochu ohraničenou pronikem buď tří válcových ploch nebo plochy kuželové a dvou válcových, jejich osy jsou totožné. Plocha frézy



Obr. 3.1

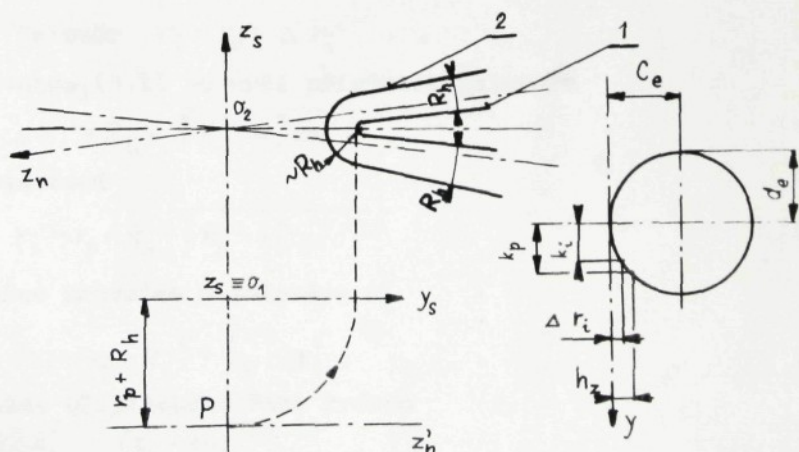
s mimoběžnou osou k ose obrobku je tečná k válcové ploše na odchoďné straně /31/.

Záběrové pole ohraničují tři křivky. Spodní je pronikem dvou válců, nebo kužele a válce s osami mimoběžnými.

Druhé dvě křivky vzniknou dotykem povrchu válce nebo kužele s tvarovou rotační plochou na otáčejícím se válci o poloměru R_h přesazenou na vřezávací straně o velikost posuvu na otáčku kola oproti straně odchoďné. Velikost a tvar záběrového pole závisí na způsobu frézování (sousedné, nesousedné), hloubce frézování, posuvu frézy, úhlu nastavení frézy, průměru obráběného kola, směru otáčení obrobku, směru stoupání šroubovice kola i frézy, zda fréza má náběhový kužel, či nikoliv.

Určení velikostí záběrového pole je základem pro stanovení délky a pracovního rozsahu odvalovací frézy. S nimi dále souvisí délka optimálního krokování odvalovací frézy. Záběrové pole dále slouží k nastavení frézy před obráběním, tj. slouží k stanovení tzv. náběhů a přeběhů, které ovlivňují frézovanou délku a tedy i strojní čas. Záběrové pole v závislosti na modulu, počtu zubů a posuvu ovlivňují průřezy třísek odebíraných zuby odvalovací frézy. Znalosti velikostí průřezů třísek jsou podkladem pro analytické stanovení velikostí řezných sil i pro korekci profilu odvalovací frézy.

Výpočet hranic záběrového pole se provádí na základě určitých předpokladů a vychází z obr. 3.1. Součástí (osazenému kolu) je přizpůsobená souřadnicová soustava (x_s, y_s, z_s), nástroji (fréze) soustava (x_n, y_n, z_n). Zetavé osy jsou totožné s osami rotace frézy a součástí. Roviny y_n, z_n a y_s, z_s jsou rovnoběžné a jsou od sebe vzdáleny o hodnotu $r_p + R_h$. Souřadné soustavy jsou pravotočivé.



1 - rotační hyperboloid, 2 - ekvidistanční plocha

Obr. 3.2

Přechodový povrch PP přerušovaný jednotlivými zuby je povrch šroubový, avšak vzhledem k malému stoupání šroubovice (malému posuvu na otáčku kola) je možno tuto plochu zjednodušit dle obr. 3.2. Tato plocha je ekvidistantní plochou hyperboloidu, který vznikne rotací frézy kolem osy obrobku ve vzdálenosti $r_p + R_h$. Vzdálenost ekvidistanty je rovna právě poloměru válcového povrchu frézy. U hrdla hyperboloidu se ekvidistanta přibližuje kružnici. Vzhledem k malému natočení osy frézy jako aproximaci přechodového povrchu je kruhový oblouk a v meridiánu (v rovině $y_s z_s$) eliptický oblouk s hlavní poloosou $d_e = R_h \cdot (\cos \delta)^{-1}$ a vedlejší poloosou $c_e = R_h$.

Velikost přechodového povrchu se vypočte z rovnice elipsy

$$\frac{(x - R_h)^2}{c_e^2} + \frac{y^2}{d_e^2} = 1 \quad (3.1)$$

délka přechodu

$$k_p = y = \frac{\sqrt{2R_h \cdot h_z - h_z^2}}{\cos \delta} \quad (3.2)$$

Pro výpočet velikosti záběrového pole, obdobně jako pro stanovení hodnot nastavení kap. 3.1.2, je použito metody řezů. V řezech rovinami kolými na osu kola se určí souřadnice bodů proníku. Řezy na obrobku budou při zjednodušení kružnice o poloměru r_i . Řezy na válci frézy elipsy pro kuželovou frézu proměnné velikosti.

3.1.1.1 Horní hranice záběrového pole (hranice O-P)

$$\text{Poloměr } r_i = r_p + \Delta r_i \quad (3.3)$$

z rovnice (3.1) se určí přírůstek poloměru

$$\Delta r_i = R_h - \sqrt{R_h^2 - k_i^2 \cos^2 \delta}$$

po dosazení

$$r_i = r_p + R_h - \sqrt{R_h^2 - k_i^2 \cos^2 \delta} \quad (3.4)$$

Rovnice kružnice o poloměru r_i

$$(x_i - r_p - R_h)^2 + z_i^2 = r_i^2 \quad (3.5)$$

Rovnice eliptického řezu frézou

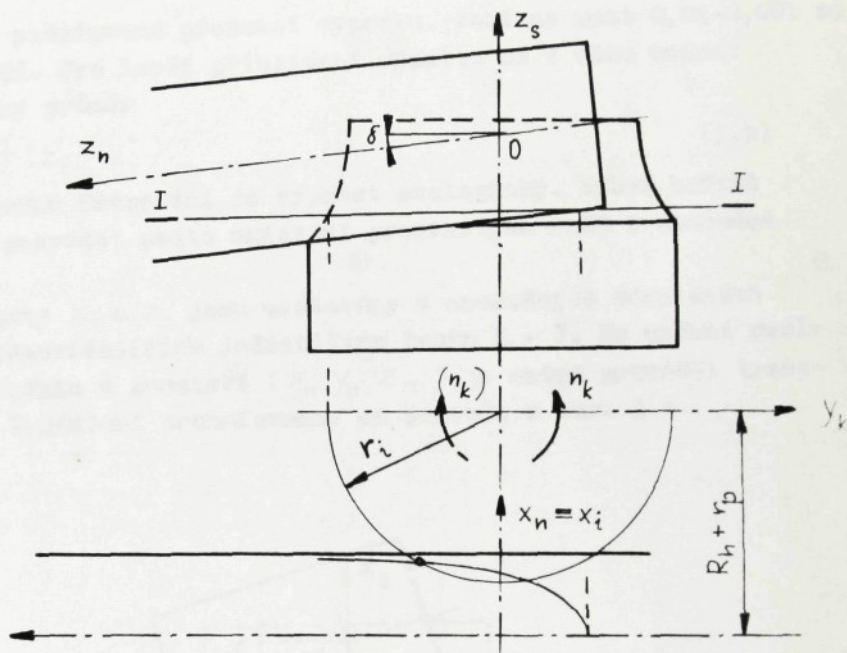
$$\frac{x_i^2}{a_e^2} + \frac{(z_i - p_i)^2}{b_e^2} = 1 \quad (3.6)$$

$$\text{kde } p_i = \left(k_i - \frac{s_0 \cdot i}{j} \right) \cotg \delta$$

$$a_e = R_h \quad ; \quad b_e = \frac{R_h}{\cos \delta}$$

dosazením a po úpravě

$$x_i^2 + (z_i - p_i) \sin \delta = R_h^2 \quad (3.7)$$



Obr. 3.3

Řešením dvou kvadratických rovnic (3.5) a (3.7) dostaneme rovnici 4. stupně, která je řešitelná jenom numericky. Pro řešení je použita aproximační Newtonova metoda tečen [2]. Rovnice upravíme tak, aby neznámou bylo z a proměnnou x , za kterou se postupně dosazují přibližné hodnoty.

$$z_{i12} = \pm \sqrt{r_i^2 - (x_i - r_p - R_h)^2} \quad (3.5a)$$

$$z_{i12} = p_i \pm \frac{\sqrt{R_h^2 - x_i^2}}{\sin \delta} \quad (3.7a)$$

Pro neousledné frézování dojde k proniku v kladné části osy z (obr. 3.3) a kořen z_{i1} z rovnice (3.5a) označme z_{i1}' . Protože k proniku dochází ve vzdálenosti menší než p_i z rovnice (3.7a), bereme kořen z_{i2} a označme ho z_{i2}'' . Do rovnic (3.5a)

a (3.7a) se postupně dosazují hodnoty x_i . Za první aproximaci x_0 se volí R_h . Po vyčíslení hodnot z_i' a z_i'' se provádí jejich srovnání.

Musí platit

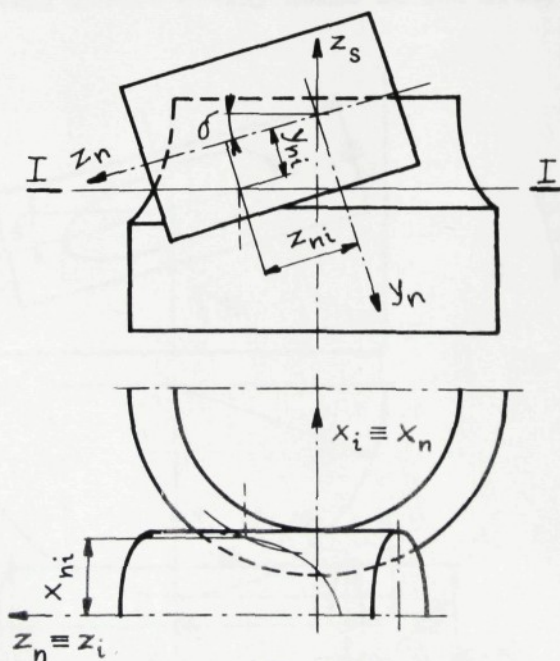
$$|z_i' - z_i''| \leq \varepsilon \quad (3.8)$$

kde ε je požadovaná přesnost výpočtu. Volí se mezi 0,01–0,001 mm, ale i větší. Pro lepší přiblížení vypočte se z obou hodnot aritmetický průměr

$$z_i = \frac{1}{2}(z_i' + z_i'') \quad (3.9)$$

Pro sousledné frézování je výpočet analogický. Výběr kořenů je nutno provádět podle umístění pronikových bodů v souřadné soustavě.

Hodnoty x_i a z_i jsou uvažovány v souřadných soustavách (x, z) odpovídajících jednotlivým řezům I – I. Po určení reálných souřadnic v soustavě (x_n, y_n, z_n) je nutné provádět transformace. Vyjádření transformace se provede z obr. 3.4.



Obr. 3.4

$$x_{hi} = x_i$$

$$y_{hi} = \sqrt{(R_h^2 - x_i^2)} \quad (3.10)$$

$$z_{hi} = \frac{z_i + y_{hi} \sin \delta}{\cos \delta}$$

3.1.1.2

Spodní hranice záběrového pole (0-S)

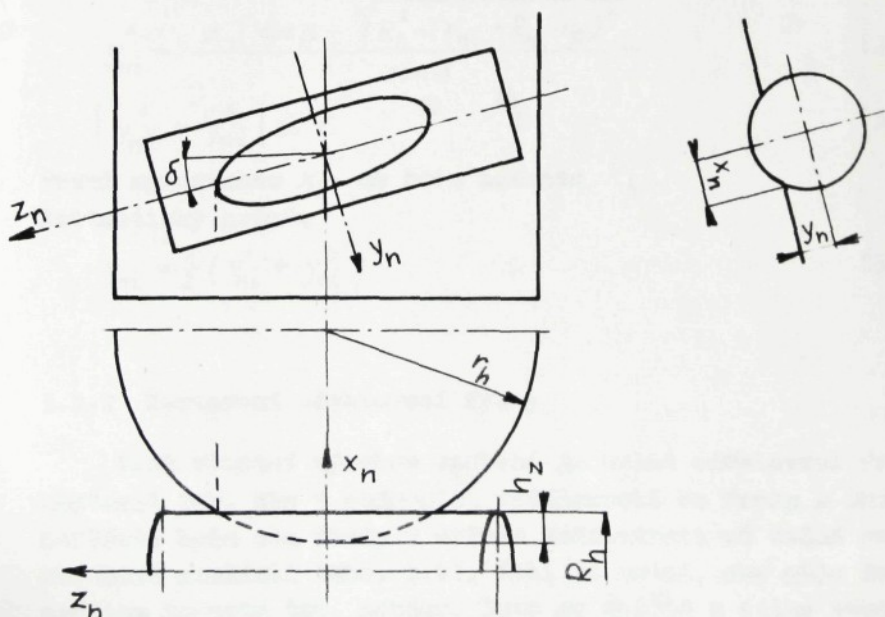
Výpočet bodů hranice se provádí stejným způsobem jako předchozí hranice. Přechodový povrch je posunut v záporném směru osy z_s o velikost posuvu s_0 . Řezy obrobkem a frézou jsou opět kružnice a elipsy, jiná je pouze vzdálenost středu elipsy od počátku soustavy

$$p_i = k_i \cotg \delta \quad (3.11)$$

3.1.1.3

Hranice záběrového pole v oblasti plného válce (P-S)

Oblast P-S je částí proniku dvou válcových ploch a vychází z výsledků výpočtu hranic 0-P, 0-S (obr. 3.5). V oblasti P-S se volí řezové roviny kolmé na osu frézy z_n , tj. řežou



Obr. 3.5

frézu v kružnicích

$$x_{ni}^2 + y_{ni}^2 = R_h^2 \quad (3.12)$$

Roviny řezu jsou určeny rovnicí $z_{ni} = \text{konst}$, kde z_{ni} se volí v rozsahu souřadnic bodu S a P , tj. z_{ns} a z_{np} .

Řezy obrobkem jsou elipsy

$$\frac{(x_{ni} - R_h - r_p)^2}{a_e^2} + \frac{(y_{ni} - z_{ni} \cotg \delta)^2}{b_e^2} = 1 \quad (3.13)$$

kde hlavní polose $b_e = R_h / \sin \delta$ a vedlejší $a_e = R_h$.

Po úpravě

$$(x_{ni} - R_h - r_p)^2 + (y_{ni} \sin \delta - z_{ni} \cos \delta)^2 = R_h^2 \quad (3.14)$$

Body proniku dostaneme řešením rovnic (3.13) a (3.14) aproximační metodou, přitom neznámou bude y a proměnnou x . Po řešení obdobně jako při určování horní hranice $O-P$ obdržíme výsledné vztahy pro určení souřadnic bodů hranice $P-S$.

Tyto souřadnice již není třeba transformovat, protože se pracovalo v soustavě $(x_n y_n z_n)$.

Pak

$$y_{ni}' = \sqrt{(R_h^2 - x_{ni}^2)} \quad (3.15)$$

$$y_{ni}'' = \frac{z_{ni} \cos \beta - \sqrt{R_h^2 - (x_{ni} - R_h - r_p)^2}}{\sin \delta} \quad (3.16)$$

$$|y_{ni}' - y_{ni}''| \leq \varepsilon \quad (3.17)$$

První aproximace x_{ni} se bere hodnota R_h .

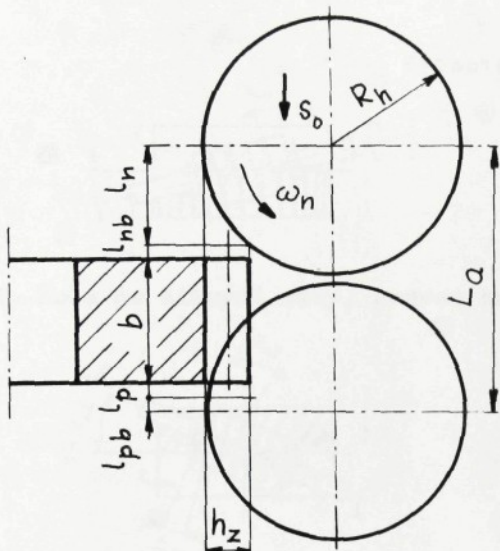
Aritmetický průměr

$$y_{ni} = \frac{1}{2} (y_{ni}' + y_{ni}'') \quad (3.18)$$

3.1.2 Nastavení odvalovací frézy

Před vlastní výrobou ozubení je nutné odvalovací frézu nastavit tak, aby v nejkratší vzdálenosti od frézy a obráběné součásti byla osa frézy v určité vzdálenosti od čelní roviny obráběné součásti (obr. 3.6), čili je nutné, aby měla fréza určitou hodnotu tzv. náběhu. Tato se skládá z délky náběhu

frézy l_n a z bezpečné vzdálenosti při náběhu frézy l_{nb} . Obdobně pro úplné vyrobení zubů je nutné počítat s tzv. přeběhem, který se skládá z délky přeběhu frézy l_p a bezpečné



Obr. 3.6

vzdálenosti při přeběhu frézy l_{pb}

Pak minimální délka frézování

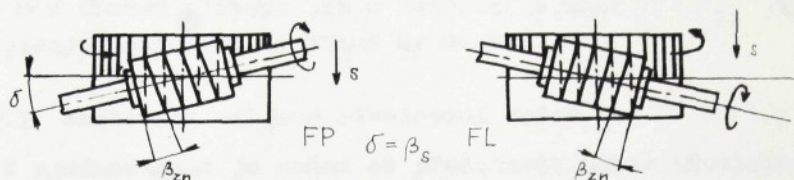
$$L_a = l_{nb} + l_n + b + l_p + l_{pb} \quad (3.19)$$

Tato délka je rozhodující i pro výpočet strojněho času t_s . Jednotlivé délky se buď volí (délka l_{nb} , l_{pb}) nebo jsou dány b nebo se vypočítají l_n a l_p . Délky l_n a l_p jsou vlastně závislé na záběrovém poli odvalovací frény a tedy na činitelích ovlivňujících záběrové pole. Pro natočení frény vůči ose osazeného kola existuje celkem dvanáct variant (viz obr. 3.7), které lze shrnout do tří případů.

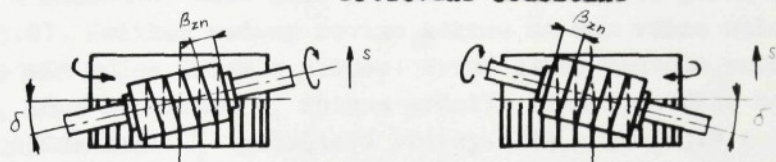
První případ je frézování čelařích osubenech kol s přírmy
zuby, když frézu nastavíme o úhel δ rovný úhlu stoupání šrou-
bovice β_{zn} tak, aby tečna ke šroubovici frézy byla totožná se
směrem zubové mezery.

Drugi případ - frása se nastává o úhel $\delta = \beta_{zs} + \beta_{zn}$
 při stejnéh směleš sklonu sub osuběho kola a odvalovací

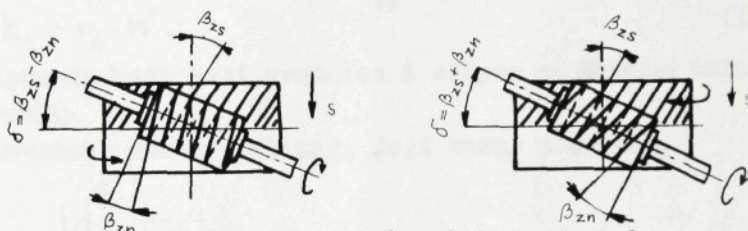
1. Kolo s příčnými zuby - frézování nesousledné
fréza pravá **fréza levá**



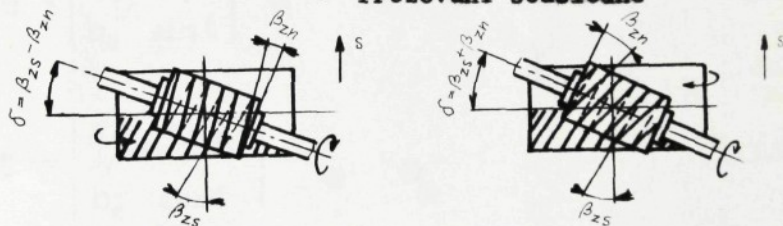
- frézování sousledné



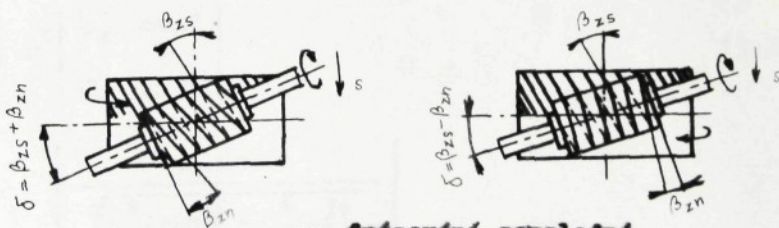
2. Kolo se šikmými zuby, pravou šroubovicí - fr. nesousledné



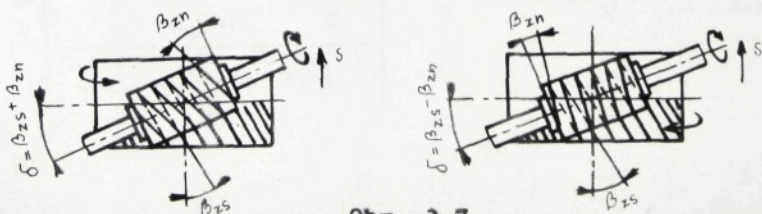
- frézování sousledné



3. Kolo se šikmými zuby, levou šroubovicí - fr. nesousledné



- frézování sousledné



Obr. 3.7

frézy a v třetím případě jde o natáčení o úhel $\delta = \beta_{zs} - \beta_{zn}$ při opačných smyslech stoupání šroubovic.

3.1.2.1 Nastavení válcové odvalovací frézy

V zjednodušení je možno si představit záběr odvalovací frézy a ozubeného kola jako průnik dvou válcových ploch dle obr. 3.8). Jelikož vedeme rovinu kolmou na osu válce kola, protne nám válec frézu v elipse. První záběr nastane právě tehdy, když se elipsa e_1 dotkne průmětu kružnice válce kola v nejnižším bodě T_2 průmětové křivky. Pak z obr. 3.8 a 3.9 plyne

$$l_n = S_c \cdot \operatorname{tg} \delta \quad (3.20)$$

$$k_k = r_h \cdot n^\circ \quad (3.21)$$

V dotykovém bodě mají kružnice i elipsa společnou tečnu i normálu.

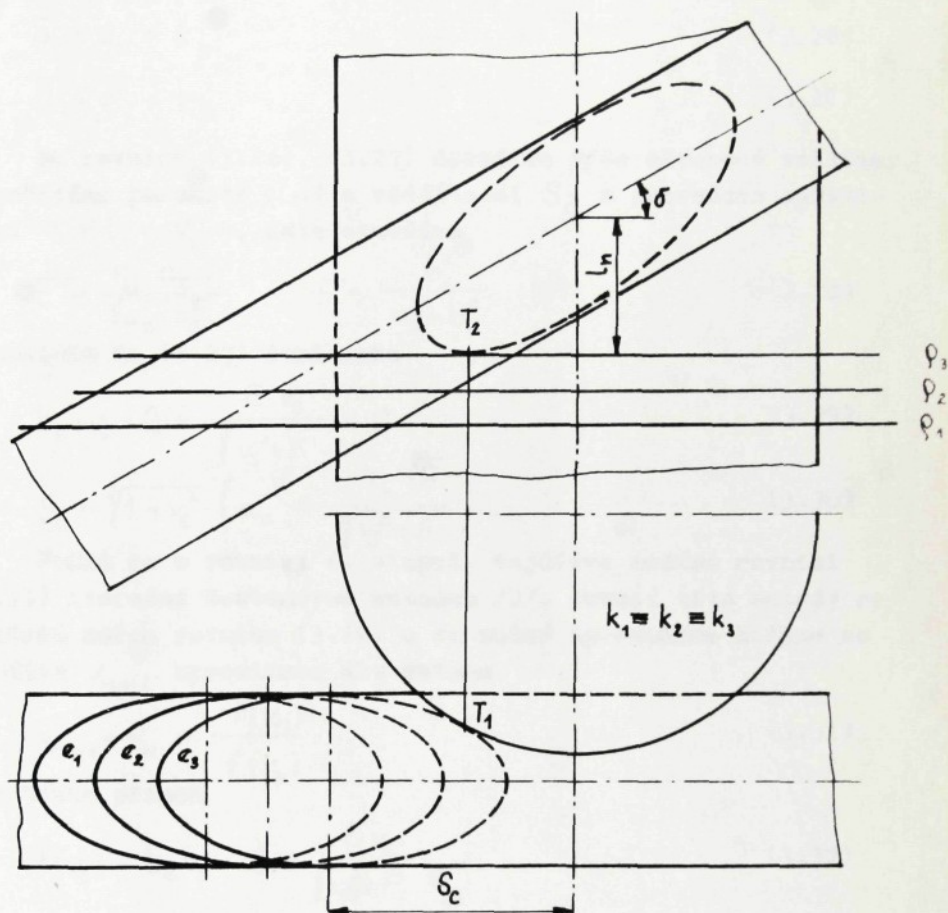
Parametrické rovnice elipsy, její tečny a normály

$$e = \begin{vmatrix} a_e \cos t \\ b_e \sin t \end{vmatrix} \quad (3.22)$$

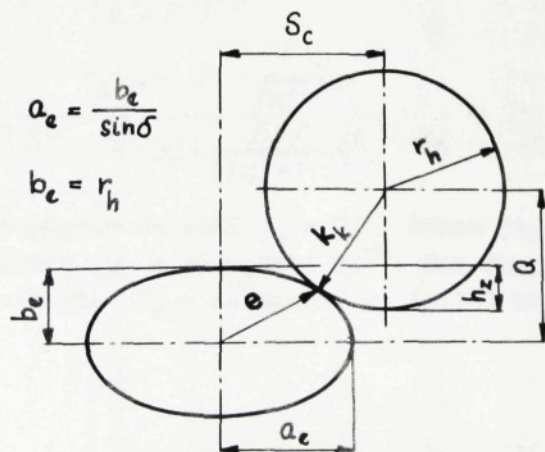
$$t = \begin{vmatrix} -a_e \sin t \\ b_e \cos t \end{vmatrix} \quad (3.23)$$

$$n = \begin{vmatrix} b_e \cos t \\ a_e \sin t \end{vmatrix} \quad (3.24)$$

$$n^\circ = \begin{vmatrix} \frac{b_e \cos t}{\sqrt{a_e^2 \sin^2 t + b_e^2 \cos^2 t}} \\ a_e \sin t \\ \frac{a_e \sin t}{\sqrt{a_e^2 \sin^2 t + b_e^2 \cos^2 t}} \end{vmatrix} \quad (3.25)$$



Obr. 3.8



Obr. 3.9

pak

$$S_c = e_x + k_x \quad (3.26)$$

$$Q = e_y + k_y \quad (3.27)$$

Do rovnice (3.26), (3.27) dosadíme výše odvozené veličiny, vypočítáme parametr $\sin t$ a vzdálenost S_c a provedeme substituci $\sin t = v_s$, dále označíme

$$E = \frac{r_h \cdot a_e}{\sqrt{a_e^2 + b_e^2}} \quad F = \frac{b_e^2}{a_e^2 + b_e^2} \quad (3.28)$$

dosazením do (3.27) dostaneme

$$b_e \cdot v_s - Q + \frac{E \cdot v_s}{\sqrt{v_s^2 + F}} = 0 \quad (3.29)$$

$$S_c = \sqrt{1 - v_s^2} \left(a_e + \frac{r_h \sqrt{F}}{\sqrt{v_s^2 + F}} \right) \quad (3.30)$$

Jedná se o rovnice 4. stupně. Nejdříve řešíme rovnici (3.29) iterační Newtonovou metodou [2]. Pomocí této metody se vyhledá kořen rovnice (3.29) a ze známé aproximace kořene se spočítá v_{n+1} aproximace dle vztahu

$$v_{n+1} = v_n - \frac{f(v_n)}{f'(v_n)} \quad (3.31)$$

Pro tento případ

$$f(v_s) = b_e v_s - Q + \frac{E v_s}{\sqrt{v_s^2 + F}} \quad (3.32)$$

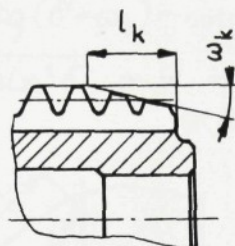
$$f'(v_s) = b_e + \frac{EF}{(\sqrt{v_s^2 + F})^3} \quad (3.33)$$

$$v_{n+1} = v_n - \frac{b_e v_n - Q + \frac{E v_n}{\sqrt{v_n^2 + F}}}{b_e + \frac{E \cdot F}{(\sqrt{v_n^2 + F})^3}} \quad (3.34)$$

Počáteční aproximace se volí $v_0 = 0,5$. Během čtyř až šesti kroků dostaneme hodnotu v_s s přesností 10^{-6} . Pak dosadíme do vztahu (3.30) a vypočítáme S_c a dosazením do (3.20) hledanou hodnotu L_n .

3.1.2.2 Nastavení kuželové odvalovací frézy, nebo frézy s tzv. náběhovým kuželem

Postup uvedený v této kapitole se volí v těchto případech:



Obr. 3.10

- při frézování kuželovou odvalovací frézou s úhlem kužele $10-15^\circ$ (viz kap. 2) /9/, /10/. Dále pro upravené frézy pro frézování ozubených kol se zuby ve šroubovici s velikým sklonem ($\beta_{zs} > 20^\circ$), kdy pro odlehčení prvních zubů frézy, které odobírají veliké průřezy třísek, se fréza skloní do kužele o úhlu ω_k (obvykle bývá $\omega_k = 15^\circ$ na délce $l_k = (4-5)m_n$ - viz obr. 3.10) /83/.
- obdobně při frézování kol o velkých průměrech, kdy by neúněrně atoupla délka frézy, jejíž výroba by byla obtížná, je nutné provést úpravu s náběhovým kuželem o délce dvou restací s úhlem kužele $\omega_k = 9-15^\circ$ /72/.

Určení náběhu fréz kuželových nebo s kuželem se provede podobným způsobem jako pro frézy válcové, jenom se bude uvažovat s průnikem kužele s válce (viz obr. 3.11). Vedou-li se kuželem řady rovinami $\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n$ rovnoběžnými s čelem obrobku, průnikové elipsy $e^1, e^2, \dots, e^n$ budou měnit svoji velikost. Pro řazení dotyku elipsy s kružnicí se musí stanovit parametry elipsy v závislosti na vzdálenosti vrcholu kužele od čela obráběného kola.

Z obr. 3.12 plyne :

$$O = w \cotg(\delta + \omega_k) \quad (3.35)$$

$$P = w \cotg(\delta - \omega_k) \quad (3.36)$$

$$G = 0,5 \cdot (O + P) = w \cdot \mu \quad (3.37)$$

$$\mu = 0,5 [\cotg(\delta + \omega_k) + \cotg(\delta - \omega_k)] \quad (3.38)$$

$$u = w \cdot \varphi \quad (3.44)$$

$$\varphi = \operatorname{tg} \omega_k (1/\sin \delta + v \cos \delta) \quad (3.45)$$

$$\eta = \sqrt{\varphi^2 - v^2 \sin^2 \delta} \quad (3.46)$$

$$L_v - G - S_c = 0 \quad (3.47)$$

Dosazení (3.37) do (3.47)

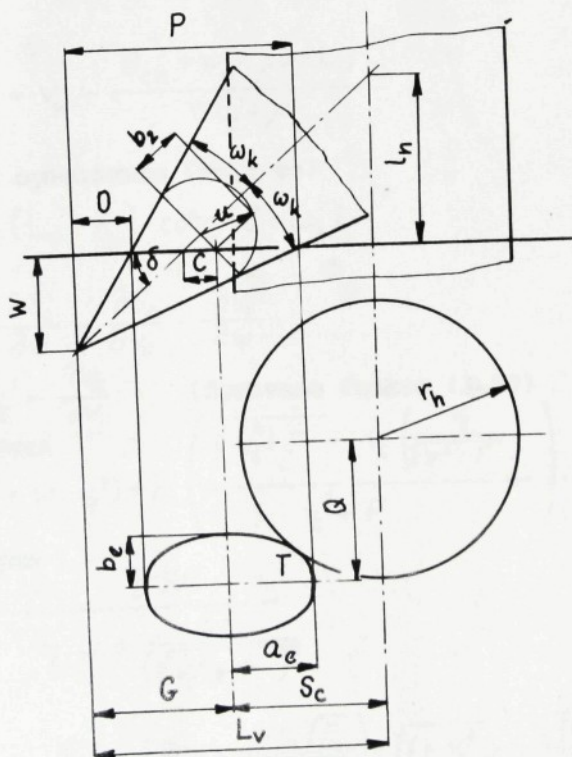
$$S_c + \mu \cdot w - L_v = 0 \quad (3.48)$$

Dosazení (3.41) a (3.43) do (3.28)

$$E = \frac{\eta_h \cdot x}{\sqrt{x^2 - \eta^2}}, \quad F = \frac{\eta}{x^2 - \eta^2} \quad (3.49)$$

Dosazení (3.41) a (3.49) do (3.29)

$$v \cdot w \cdot \eta - Q + \frac{E \cdot v_s}{\sqrt{v_s^2 + F}} = 0 \quad (3.50)$$



Obr. 3.12

Dosažením (3.41) a (3.49) do (3.30)

$$S_c = \sqrt{1 - v_s^2} \left(w \cdot x + \frac{r_h \sqrt{F}}{\sqrt{v_s^2 + F}} \right) \quad (3.51)$$

Náběh frézy

$$L_h = (S_c + C) \cdot \operatorname{tg} \sigma \quad (3.52)$$

dosažením (3.39)

$$L_h = (S_c + w \cdot v) \cdot \operatorname{tg} \sigma \quad (3.53)$$

Je nutné spočítat vzdálenost středů kružnice a elipsy, které se dotýkají v bodě T a vzdálenost vrcholu kužele od čela obrobku. Hodnota S_c je závislá na v_s a w .

Pro řešení rovnic použijeme Newtonovu metodu [2/].

Pak

$$f(w) = S_c + \mu \cdot w - L_v \quad (3.54)$$

derivative

$$f'(w) = S'_c + \mu = 0 \quad (3.55)$$

$$w_{h+1} = v_h - \frac{S_{cn} + w_n \cdot \mu - L_v}{S'_c + \mu} \quad (3.56)$$

Počáteční aproximace (volí se)

$$w_0 = (L_v - r_h) \cdot \cotg(\sigma - \omega_k) \quad (3.57)$$

derivative

$$S'_c = \frac{\partial S_c}{\partial w} = \frac{\partial S_c}{\partial v_s} \cdot \frac{\partial v_s}{\partial w} \quad (3.58)$$

kde : $v'_s = \frac{\partial v_s}{\partial w}$ (derivative funkce (3.50))

po provedení

$$\eta(v_s + w \cdot v'_s) + E \left(\frac{\sqrt{v_s^2 + F} - v_s \left(\frac{v_s}{\sqrt{v_s^2 + F}} \right)}{v_s^2 + F} \right) \cdot v'_s = 0 \quad (3.59)$$

odtud plyne

$$v'_s = \frac{\eta \cdot v_s}{\eta \cdot w + \frac{EF}{(\sqrt{v_s^2 + F})^3}} \quad (3.60)$$

$$\frac{\partial S_c}{\partial v_s} = - \frac{v_s}{\sqrt{1 - v_s^2}} \left(w x + \frac{r_h \sqrt{F}}{\sqrt{v_s^2 + F}} \right) + \sqrt{1 - v_s^2} \cdot \frac{r_h \sqrt{F}}{(\sqrt{v_s^2 + F})^3} v_s \quad (3.61)$$

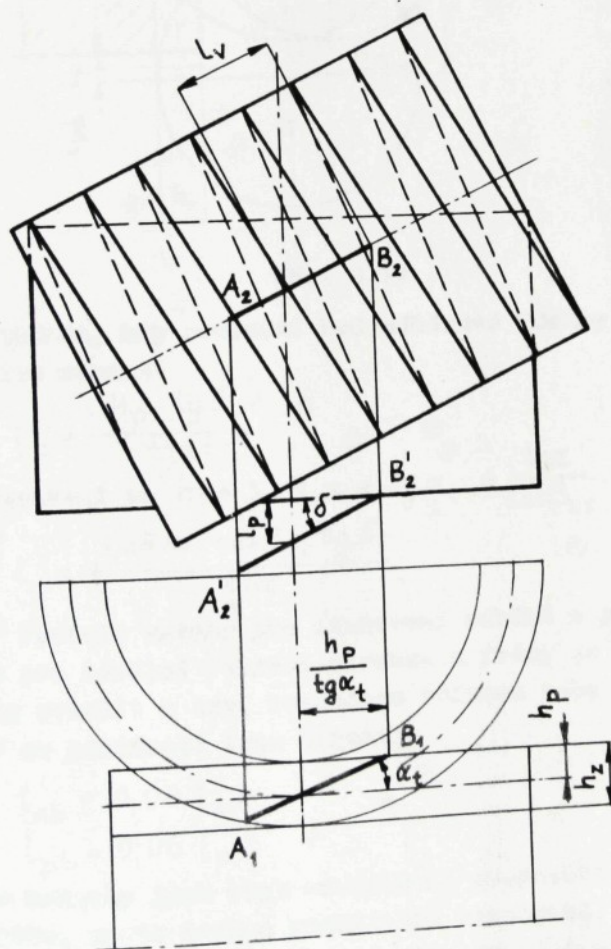
Dosažením vztahů (3.60) a (3.61) do (3.58) dostaneme konečný vztah pro derivaci S'_c . Je-li s dostatečnou přesností vypočteny hodnoty v_s a w a tedy i S_c dosadí se do (3.53) a vypočte hodnota náběhu.

Pro výpočet hodnoty náběhu je nezbytné spočítat hodnotu L_v , která určuje vzdálenost vrcholu kužele od středu stroje.

$$L_v = \left(\frac{d_h}{2 \operatorname{tg} \omega_k} + l_z - l_k \right) \cos \delta \quad (3.62)$$

Pro případ kuželových fréz je nutné znát ustavení frézy, tj. hodnotu l_z (viz obr. 3.11), pak

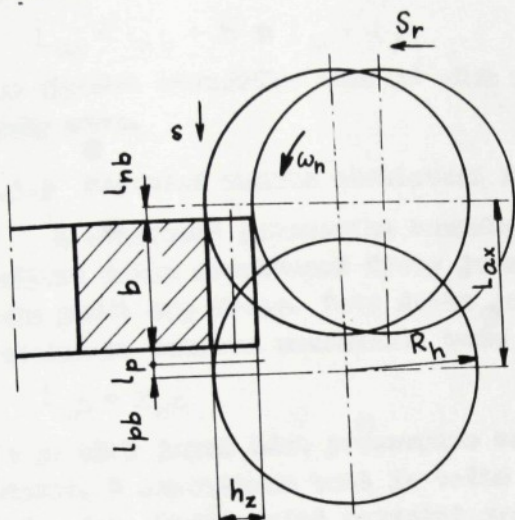
$$L_v = \left(\frac{d_{h \min}}{2 \operatorname{tg} \omega_k} + l_z \right) \cos \delta \quad (3.63)$$



Obr. 3.13

3.1.2.3 Stanovení přeběhů odvalovacích fréz při frézování čelních ozubených kol

Při výpočtu se vychází ze záběru hřebene základního profilu s ozubeným kolem (viz obr. 3.13 půdorys). K záběru dochází na záběrové úsečce AB. Hodnota přeběhu se počítá



Obr. 3.14

v okamžiku, kdy poslední bod záběrové úsečky je ještě v záběru. Pak lze napsat

$$l_p = \frac{h_p \cdot \operatorname{tg} \delta}{\operatorname{tg} \alpha_t} \quad (3.64)$$

Po dosazení za $h_p = 1,25 \text{ m}$ a $\operatorname{tg} \alpha_t = \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\cos \beta_{zs}}$

bude

$$l_p = \frac{1,25 \text{ m} \cdot \cos \beta_{zs} \operatorname{tg} \delta}{\operatorname{tg} \alpha} \quad (3.65)$$

Protože vztahy pro stanovení náběhů a přeběhů jsou uvažovány pro ideální rozměry obrobku a frézy je nutné vypočtené délky svěřit o tzv. bezpečnou hodnotu nebo toleranci. V praxi /1a/ se používají tyto hodnoty

$$l_{nb} = 0,08 l_n \quad (3.66)$$

$$l_{pb} = 0,06 l_p \quad (3.67)$$

Tyto hodnoty jsou však závislé na přesnosti výroby v tom kterém podniku, proto nejsou použitelné všeobecně.

V praxi existují i jiné způsoby pracovních cyklů než jak bylo naznačeno na obr. 3.6, např. cyklus s kombinací radiálního

a axiálního posuvu (obr. 3.14), kdy osa frézy se nastaví na úroveň vrchního (nebo spodního) čela ozubeného kola a nejdříve se frézuje radiálně, pak axiálně. V tomto případě je výpočet naběhu i přeběhu totožný a počítají se dle vztahu (3.53). Pak celková délka frézování ve směru osy kola

$$L_{ax} = l_{nb} + b + l_p + l_{pb} \quad (3.68)$$

Pro výpočet strojního času je však nutné uvažovat i hodnotu výšky zubu.

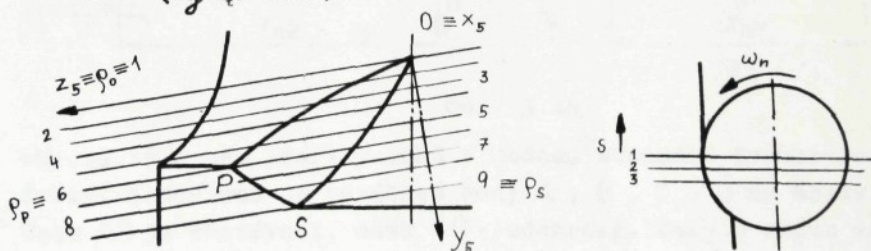
3.1.3 Pracovní rozsah odvalovací frézy

K stanovení pracovního rozsahu odvalovací frézy a určení celkové délky odvalovací frézy je nutné znát délku záběrového pole podél osy frézy. Tato délka je pro frézování nesezvalené totožná se setovou souřadnicí bodu P

$$l_{zP} = z_{nP} \quad (3.69)$$

Je to však jenom část pracovního rozsahu a to na vstředvací straně. V centrálním bodě je velká část zubové masery již odfrézována. Zbývá ještě vytvořit profil odchoďné strany zubové masery, tj. odebrat materiál zubové masery odpovídající záběru po druhé části desčky (obr. 3.13). Tato část lze vyjádřit vztahem

$$l_v = \frac{h_p}{(\operatorname{tg} \alpha_t + \cos \sigma)} \quad (3.70)$$



Obr. 3.15

celkový pracovní rozsah odvalovací frézy pak bude

$$l_c = l_{zP} + l_v \quad (3.71)$$

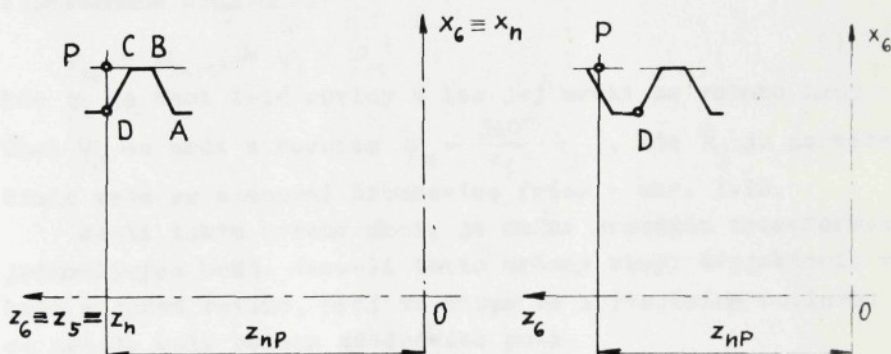
3.1.4 Analytické určení rozměrů třísek při odvalovací frézování

Vzhledem k tomu, že zde bude počtena pouze metodika výpočtu, aplikace bude provedena na lichoběžníkovém profilu zubu nástroje

tj. na odvalovací fríze na evolventní ozubení. Při výpočtu průřezu třísek u jednotlivých zubů vycházíme z kinematických vztahů mezi součásti a nástrojem. Metodiku výpočtu rozměrů třísky popsal Sulzer /75/, úplné řešení však nebylo k dispozici a tak bylo doplněno autorem i podle dalších pramenů /51/, /77/.

Výpočet průřezů třísek je založen na modelování frézování jedné zubové mezery odvalovacím způsobem. Frézování dalších mezer je analogické. Tvar i velikost třísky jsou dány profilem nástroje, tvarem a rozměry záběrového pole. Výpočet je zaměřen především na nescusledné frézování.

Vydeme z obr. 3.15 a vzdálenost mezi body 0-S rozdělíme přiměřeným počtem řezových rovin $\varphi_0, \varphi_1, \dots, \varphi_p, \dots, \varphi_s$. Roviny jsou vedeny rovnoběžně s osou frézy a rovina φ_0 prochází bodem 0. Výpočet se dále provádí u toho profilu zubu, který je nejbližší bodu P a leží celý v záběrovém poli -



Obr. 3.16

obr. 3.16 a pro profily zubů v jednom stoupání šroubovice frézy. Každý zub je rozdělen body A, B, C, D na úseky. Úsek AB je vřezávací, úsek CD - odchodný. Boky a hlavu zubu rozdělíme na další dostatečně malé úseky (asi po 0,1 - 1 mm, nebo i jinak).

Pak sledujeme trajektorie jednotlivých takto zvolených bodů. Pro výpočet je potřeba znát stopy těchto trajektorií v jednotlivých řezových rovinách viz obr. 3.15 a 3.17.

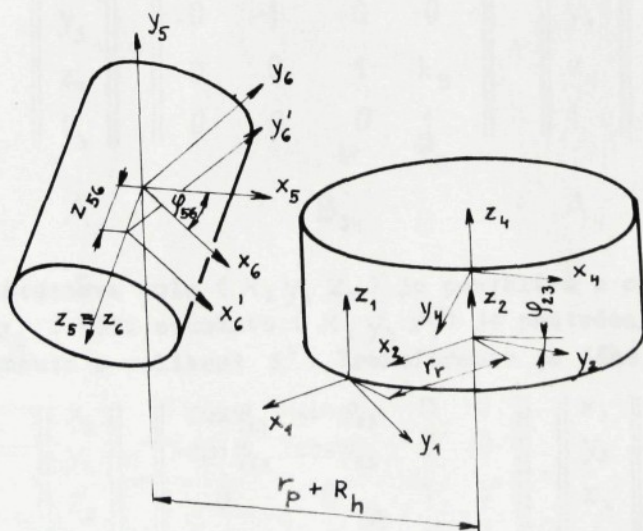
Určíme vstupní bod M^I a výstupní bod M^II . Potom stačí libovolný bod $M(x_6^i, y_6^i, z_6^i)$ transformovat do několika řezových rovin ležících mezi body M^I a M^II (na obr. 3.17 jsou to roviny 6, 7, 8).

přičadme zubové mezeře na kole soustavu (x_1, y_1, z_1) a soustavy (x_2, y_2, z_2) , (x_5, y_5, z_5) nechť jsou soustavy pomocné, fréze přiřadíme soustavu (x_6, y_6, z_6) viz obr. 3.19, pak je možné vyjádřit transformační matice z jedné soustavy do druhé.

Souřadnicová soustava (x_6, y_6, z_6) je v prostoru pohyblivá a současně pevně spojená s frézou. V ní je zadán profil zubu frézy. Soustava (x_5, y_5, z_5) je v prostoru nehybná a charakterizuje polohu bodů ostří frézy. Transformace ze soustavy "6" do "5" spočívá v pootočení o úhel φ_{56} a posuv $s' = \varphi_{56} \cdot R_h \cdot \tan \delta$. Popisána je transformační maticí B_{56} .

$$\begin{pmatrix} x_5 \\ y_5 \\ z_5 \\ t_5 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \varphi_{56} & -\sin \varphi_{56} & 0 & 0 \\ \sin \varphi_{56} & \cos \varphi_{56} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & s' \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_6 \\ y_6 \\ z_6 \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$A_5 = B_{56} \cdot A_6 \quad (3.75)$$



Obr. 3.19

V prostoru nehybná souřadnicová soustava $(x_4 y_4 z_4)$ je vzhledem k soustavě $(x_5 y_5 z_5)$ posunuta o osovou vzdálenost $R_h + r_p$ ve směru osy x_5 a pootočena o úhel $(90^\circ + \delta)$. Transformaci vyjadřuje matice B_{45}

$$\begin{pmatrix} x_4 \\ y_4 \\ z_4 \\ t_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & -(R_h + r_p) \\ 0 & -\sin\delta & \cos\delta & 0 \\ 0 & -\cos\delta & -\sin\delta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_5 \\ y_5 \\ z_5 \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$A_4 = B_{45} \cdot A_5 \quad (3.74)$$

Pomečná soustava kola $(x_3 y_3 z_3)$ je vzhledem k soustavě $(x_4 y_4 z_4)$ posunuta o velikost k_B v záporném směru osy z_4 a pootočena o 180° kolem osy z_4 . Vzdálenost k_B udává polohu počátku souřadné soustavy frézy vůči počátku souřadné soustavy kola podél jeho osy. Je závislá na daném okamžiku frézování, tzn. že závisí na šířce kola B a počtu otočení, které obrobek učinil do daného okamžiku. Transformace je popsána maticí B_{34}

$$\begin{pmatrix} x_3 \\ y_3 \\ z_3 \\ t_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & k_B \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_4 \\ y_4 \\ z_4 \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$A_3 = B_{34} \cdot A_4 \quad (3.75)$$

Soustava kola $(x_2 y_2 z_2)$ je pohyblivá a otáčí se kolem osy z_2 . Vůči soustavě $(x_3 y_3 z_3)$ je pootočena o úhel φ_{23} a posunuta o velikost s'' . Transformace je dána maticí B_{23}

$$\begin{pmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \\ t_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\varphi_{23} & \sin\varphi_{23} & 0 & 0 \\ -\sin\varphi_{23} & \cos\varphi_{23} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & s'' \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_3 \\ y_3 \\ z_3 \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$A_2 = B_{23} \cdot A_3 \quad (3.76)$$

Úhel pootočení obrobku φ_{23} je závislý na úhlu natočení frézy - pohyby frézy a obrobku jsou ve stroji vzájemně spřaženy a platí pro ně převodový poměr

$$n_k / n_n = i_n / z_k$$

Vzhledem k tomu, že otáčky jsou přímo úměrné úhlové rychlosti je i úhel φ přímo úměrný úhlové rychlosti ω , lze tedy psát

$$\frac{i_n}{z_k} = \frac{\varphi_k}{\varphi_n} = \frac{\varphi_{23}}{\varphi_{56}} \quad (3.77)$$

z čehož plyne závislost úhlu natočení obráběného kola φ_{23} na úhlu natočení frézy φ_{56}

$$\varphi_{23} = \varphi_{56} \frac{i_n}{z_k} \quad (3.78)$$

Velikost posunutí s'' je závislá na posuvu na otáčku kola s_0 .

$$s'' = \frac{\varphi_{23}}{360^\circ} \cdot s_0 = \frac{i_n \cdot \varphi_{56}}{360^\circ \cdot z_k} \cdot s_0 \quad (3.79)$$

Pohyblivá souřadnicová soustava zubu kola (x_1, y_1, z_1) je vzhledem k soustavě (x_2, y_2, z_2) posunuta o velikost poloměru roztečné kružnice r_r v kladném směru osy x_2 . Transformace soustav je popsána maticí B_{12} .

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \\ t_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & -R_r \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$A_1 = B_{12} \cdot A_2 \quad (3.80)$$

Celkovou transformací ze soustavy "6" do "1" dostaneme násobením matic typu B_{ij} . Vzhledem k tomu, že se jedná o prostorové transformace, mají matice B_{ij} čtyři sloupcové vektory. První tři vyjadřují pootočení, čtvrtý posunutí. Pro dodržení pravidla o počtu řádků a sloupců násobených matic je čtvrtý řádek dopsán řádkovým vektorem $(0, 0, 0, 1)$. Tím se hodnota matic nezměnila a předpoklad pro násobení matic je dodržen.

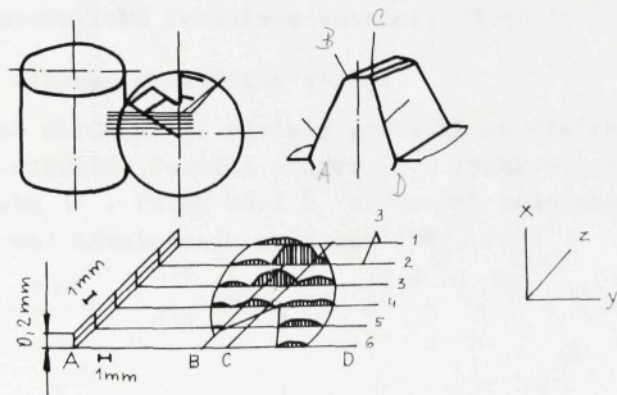
Celková transformace

$$A_1 = B_{12} \cdot B_{23} \cdot B_{34} \cdot B_{45} \cdot B_{56} \cdot A_6 \quad (3.81)$$

3.1.4.2 Grafické vyhodnocování rozměrů třísek

V uvedeném výpočtu rozměrů třísek se určovaly stopy trajektorií všech bodů v jednotlivých rovinách. To však nedává představu o rozměrech třísky. Ty získáme tak, že rozdíl trajektorií dvou po sobě jdoucích zubů vyhodnotíme. Tím získáme průřez třísky pro jeden zub odvalovací frézy.

Pro ucelenou představu o vzniku a rozměrech třísky je vhodné grafické znázornění. Do soustavy souřadnic (xyz) vynášíme odpovídající hodnoty, tj. na osu z polohu jednotlivých řezů a tedy i délky třísky, na osu y polohu zubu a tedy i šířky třísky; na osu x tloušťky třísky viz obr. 3.20. Pro každý záběr zubu lze zakreslit samostatný graf. Sebor grafů pro jednu zubovou mezeru poskytuje ucelený obraz o úběru třísky



Obr. 3.20

jednotlivými břity. Z toho lze usuzovat jednak na namáhání /75/, ale také lze úspěšně ovlivňovat profil zubu frézy a odstraňovat nepříznivé podmínky řezání v zubové mezeře např. rozdělením třísek na dvě části.

3.2 Optimální řezné podmínky

Řezný proces a jeho zákonitosti je možné vyjádřit matematickým modelem, tj. soustavou matematických rovnic a nerovností, které vytváří omezující podmínky tohoto procesu. Při určování možných omezení lze zařadit pouze ta, která jsou pro daný typ obrábění nezbytná. Naopak nedostatečná matematická formulace vede k zúžení oblasti přípustných řešení i k neřešitelnosti úlohy. Soutava omezujících podmínek bude zahrnovat vztahy mezi jednotlivými činiteli řezného procesu.

Jsou to zejména omezení daná :

- obráběcím strojem (výkonem, rozsahem otáček a posuvů)
- řezným nástrojem (jeho geometrií a materiálem)
- obráběnou součástí (druhem obráběného materiálu)
- požadavky kladenými na výsledek obráběcího procesu (rozměrová a tvarová přesnost, kvalita obrobené plochy, minimální náklady na výrobu, maximální produktivita apod.).

3.2.1 Matematická formulace omezení, které je

a) dané výkonem obráběcího stroje

Výkon obrábění je závislý převážně na složce řezné síly ve směru hlavního řezného pohybu F_v a rychlosti hlavního řezného pohybu v . Vztah mezi F_v a řeznými podmínkami pro frézování ozubení odvalovacím způsobem /52/, /55/

$$F_v = \frac{15 m_n^{1,4} \cdot s^{0,35} \cdot t_u e^{0,12} \cdot c_g \cdot e^{0,65 \cdot x_f \cdot z_k^{-0,35}}}{v^{0,28}} \cdot 9,81 \cdot c_w \quad (3.82)$$

$$F_v \leq \frac{P_s \cdot \eta}{60 v_{op}} \quad ; \quad (3.83)$$

kde

$$v_{op} = \frac{\pi \cdot D_{fr} \cdot n_{op}}{1000} \quad (3.84)$$

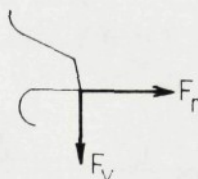
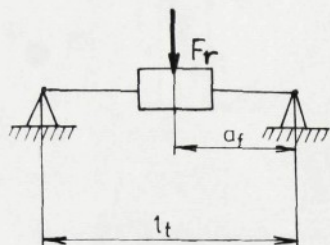
Porovnáním pravých stran rovnic (3.82) a (3.83) dostaneme omezující podmínku z hlediska výkonu obráběcího stroje :

$$s_{op}^{0,35} \cdot n_{op}^{0,72} \leq b_1 \quad (3.85)$$

kde

$$b_1 = 25,85 \frac{P_s \cdot \eta}{D_{fr}^{0,72} \cdot m_n^{1,4} \cdot t_u^{0,012} \cdot c_g^{0,012} \cdot e^{0,65} \cdot x_f \cdot z_k^{-0,35} \cdot c_w} \quad (3.86)$$

$$t_u = \frac{\text{hloubka úběru}}{m_n} \cdot 10 \quad (10 \%)$$



Obr. 3.21

- b) dané tuhostí vřetene a přesností tloušťky zubu na roztečné kružnici

Upnutí odvalovací frézy na vřetenu si lze představit jako nosník o dvou podporách zatěžený osamělou silou (obr. 3.21). Z rozkladu sil na břitu zubu odvalovací frézy plyne, že průhyb vřetene způsobuje převážně radiální složka řezné síly F_r (obr. 3.21)

$$y_{F_r} = \frac{F_r \cdot a_f^2 (l_t - a_f)^2}{3 \cdot E \cdot I l_t} \quad (3.87)$$

Hodnota průhybu nesmí překročit toleranci tloušťky zubu. Protože se jedná o malé průhyby můžeme při výpočtu vycházet z obr. 3.22, ve kterém je evolventa nahrazena přímkou.

Radiální složka řezné síly

$$F_r = k_F \cdot F_v = 0,5 F_v \quad (3.88)$$

$$k_F = 0,5$$

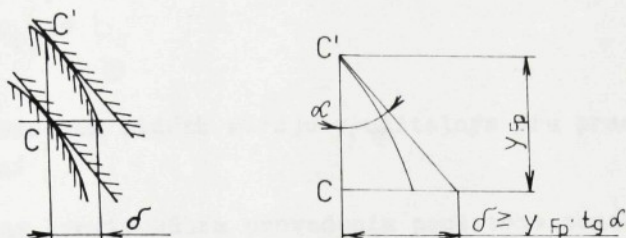
Moment setrvačnosti pro kruhový průřez

$$I = \frac{\pi d^4}{64} \quad (3.89)$$

Po dosazení a úpravě dostaneme omezující podmínku charakterizující pevnost a konstrukční uložení vřetene ve vztahu k rozměrové

přesnosti
 $s_{op}^{0,35} \cdot n_{op}^{-0,28} \leq b_2$

(3.90)



Obr. 3.22

$$b_2 = 83,7 \frac{l_t \sigma_s \cdot d^4 \cdot D_{fr}}{tg \alpha \cdot a_F^2 (l_t - a_F)^2 \cdot m_n^{1,4} \cdot t_u e^{0,012} \cdot c_g \cdot e^{0,65 \cdot x_f \cdot z_k^{-0,35}} \cdot c_w} \quad (3.91)$$

c) dané hospodárnou řeznou rychlostí

Pro odvalovací frézování platí vztah /18/

$$T = \frac{c_T}{v_m m_n r s_v^y} \quad (3.92)$$

Za řeznou rychlost V můžeme dosadit v_{op} ze vztahu (3.84).

Použitím Taylorova vztahu obdržíme funkční závislost mezi řeznou rychlostí a trvanlivostí nástroje

$$v_{op} = \frac{c_v}{T_{op}^{1/m}} \quad (3.93)$$

Sleučením rovnic (3.84) a (3.93) dostaneme omezení dané řeznou rychlostí

$$n_{op} = b_3 \frac{1}{T_{op}^{1/m}} \quad (3.94)$$

$$b_3 = 318,3 \cdot \frac{c_v}{D_{fr}} \quad (3.95)$$

d) dané rozsahem posuvů obráběcího stroje

$$s_{op} \geq s_{minf} = b_4 \quad (3.96)$$

Posuv není omezen horní hranicí, protože zde není uvažována drsnost povrchu.

- e) dané maximální přípustnou drsností povrchu
boků zubů obrobku

Omezení hodnoty posuvu z tohoto hlediska je možné provést dle vztahu

$$s_{op} \leq s_{Ra} = b_5 \quad (3.97)$$

- f) dané rozsahem otáček stroje využitelným pro proces
obrábění

Je dáno konstrukčním provedením použitého obráběcího stroje a vyjadřuje spolu s výkonem a rozsahem posuvů provozní podmínky obráběcího stroje

$$n_{op} \geq n_{minf} = b_6 \quad (3.98)$$

$$n_{op} \leq n_{maxf} = b_7 \quad (3.99)$$

- g) dané velikostí obráběné součásti

Z hlediska přesnosti výrobku (ozubeného kola) není možné provádět výměnu nástroje na rozpracované operaci součástí, případně sadě součástí. Optimální trvanlivost by tedy měla být násobkem strojního času, který pro odvalemáčí frézování má tvar

$$t_s = \frac{z_k \cdot L_a}{i_n \cdot n \cdot s} \quad (3.100)$$

Stanovení délky L_a lze provést dle vztahu (3.19) nebo (3.68) pak

$$T_{op} = k_t \cdot t_s \quad (3.101)$$

kde $k_t = (1, 2, \dots, n)$ celé číslo.

Vytvoření této závislosti je vhodné i z hlediska plynulosti vlastní výroby ozubených kol, což je dáno požadavkem určitého počtu výměn nástroje během pracovní směny. Přichází do úvahy hlavně u strojů v obráběcí lince.

Pak závislost trvanlivosti na strojním čase

$$T_{op} \geq t_s \frac{z_k \cdot L_a}{i_n \cdot n \cdot s} \quad (3.102)$$

Upravením dostaneme omezení dané velikosti obrobku

$$n_{op} \cdot s_{op} \geq b_8 \cdot T_{op}^{-1} \quad (3.103)$$

kde

$$b_8 = \frac{z_k \cdot L_a}{i_n} \quad (3.104)$$

Předchozí požadavek může vyvolat potřebu volby trvanlivosti blízké se trvanlivosti optimální, pak vztah (3.103) dostane následující podobu

$$n_{op} \cdot s_{op} \geq b_8 \cdot T_v^{-1} = b_q \quad (3.105)$$

Volbou trvanlivosti je však nutné při řešení přejít od lineárního parametrického programování k lineárnímu, kde není možné zkoumat vliv změny trvanlivosti jakožto činitele zahrnutého do formulace úkolu pro dosažení optimálního řešení.

3.2.2 Kriterium optimálnosti

Pro stanovení nejvýhodnější varianty řezných podmínek je možné použít tato kritéria: minimální náklady, maximální produktivita, maximální zisk. Vzhledem k tomu, že je snaha, aby výrobní náklady byly co nejmenší bude nejvýhodnější použít kritérium optimálnosti z hlediska minimálních nákladů.

Vlastní náklady na jednici výroby lze vyjádřit vztahem

$$N_{cj} = t_s \frac{M_s}{60} \left(1 + \frac{R_s}{100}\right) + t_{pz} \frac{t_s \cdot M_s}{T \cdot 60} \left(1 + \frac{R_s}{100}\right) + t_0 \frac{t_s}{T} \frac{M_0}{60} \left(1 + \frac{R_0}{100}\right) + \frac{t_s}{T} \cdot \frac{N_n}{(n_0 + 1)} \quad (3.106)$$

Pro cenu nástroje N_n platí vztah (4.7).

Po dosazení vztahu (3.100) a po úpravě dostaneme tzv. kritériální nebo účelovou funkci

$$N_{cj} = \frac{K_1}{n \cdot s} + \frac{K_2}{n \cdot s \cdot T} \quad (3.107)$$

Optimální řezné podmínky jsou tedy závislé na řezné rychlosti, posuvu a trvanlivosti mezi nimiž existuje určitá vzájemná vazba.

4. TVORBA TECHNOLOGICKÉHO POSTUPU VÝROBY ODVALOVACÍCH FRÉZ POMOCÍ POČÍTAČE

4.1 Současný stav navrhování technologických postupů speciálních řezných nástrojů

Sestavování technologických postupů se vyvíjelo na základě praktických zkušeností a pravidla byla formulována pouze jako všeobecné předpisy platné pro hrubě vyčleněné typy výrob - kusevou, sériovou, hromadnou apod. Pro racionálnější práci technologů byly později vytvořeny tzv. typové a skupinové výrobní postupy /50/, /74/. Tyto metody jsou však pro dnešní stav obrábění již zastaralé. Proto byly v poslední době zavedeny metody využívající pro tyto účely číslicových počítačů /20/, /41/, /88/.

Technologický postup obsahuje tyto kroky:

- 1) Seznámení s dílenským výkresem a technickými podmínkami výroby.
- 2) Volba ustavovacích a upínacích základů při obrábění.
- 3) Sestavení postupu výroby na postupovém technologickém listě.
- 4) Stanovení mezioperačních rozměrů a tolerancí, volba druhu a rozměru polotovaru.
- 5) Sestavení postupových listů pro jednotlivé operace.
- 6) Volba stroje, nástrojů, přípravků a měřidel.
- 7) Technické normování.

Technolog při sestavování postupu výroby musí více či méně podrobně rozpracovat uvedené body, závisí to na druhu výroby. V praxi to znamená, že postup pro řezný nástroj obsahuje popis úkonů operace, druh stroje, celkový normovaný čas a mzdu na operaci. Důkladný technologický postup by trval velmi dlouho, což by se promítlo i do ceny nástroje.

Pro většinu druhů speciálních řezných nástrojů je možné stanovit typový postup, který z hlediska posloupnosti prací bude pro tyto nástroje stejný. Obsahuje tyto práce: - příprava polotovaru, vytvoření hrubého tvaru nástroje, vytvoření zubových drážek, tepelné zpracování, broušení příslušných ploch nástroje, ostření břitů, označení typu nástroje. Odlišnosti při výrobě jednotlivých druhů nástrojů vznikají jen ze způsobu jakým se uvedené práce vykonávají, na jakém stroji a jakým nástrojem. Dokladem, že je tomu tak, je i technologický

postup výroby monolitní odvalovací frézy, který se skládá z těchto operací /65/:

- 1) Řezání poletovaru.
- 2) Kování, žíhání, mečení.
- 3) Hrubovací soustružnické operace (vrtání upínacích otvorů, soustružení čel, vytvoření odlehčení v upínacím otvoru).
- 4) Protahování upínacího otvoru frézy s přídatkem na broušení.
- 5) Dokončovací soustružnické operace (soustružení vnějšího průměru nahotovo, soustružení nákrůžků, srážení hran).
- 6) Protahování drážky pro unášecí péro.
- 7) Frézování profilu fréz nahrubo.
- 8) Frézování drážek pro odvod třísek.
- 9) Podtáčení profilu.
- 10) Odstranění neúplných zubů.
- 11) Tepelné zpracování, pískování.
- 12) Broušení upínacího otvoru načisto.
- 13) Henování upínacího otvoru.
- 14) Broušení čel načisto.
- 15) Broušení nákrůžků a zubových drážek (čel břitů).
- 16) Broušení profilů zubů.
- 17) Povrchové úpravy.
- 18) Kontrola a značení.

Specifickými operacemi při výrobě odvalovacích fréz jsou operace jako frézování profilu frézy, drážek pro odvod třísky, podtáčení (podsoustružení, podbroušení) a ostření fréz. Většinu těchto operací je možno provádět najednou nasazením více poletovarů na jeden trn. V sledu operací tedy nejsou zahrnuty požadavky přesnosti (třídy AA, A, B, C), které tento sled ovlivňují a to zejména při výrobě otvorů. Obdobně i ostatní operace mají své zvláštnosti. Splnění náročných požadavků, které jsou kladeny při výrobě odvalovacích fréz, vyžadují dlouholeté zkušenosti. Zde nestačí jenom praxe, ale musí být zvládnuta i teoretická část.

4.2 Využití číslicových počítačů při návrhu technologického postupu výroby odvalovacích fréz

Samočinné počítače umožňují řešit sestavení technologických postupů libovolně podrobných jak pro kusovou tak i malosériovou výrobu. Sem patří i výroba speciálních řezných nástrojů, tedy i odvalovacích fréz. Počítač se zadáním výkresových hodnot polotevaru a součástí určí jednotlivé záběry, řezné podmínky, obráběné průměry a délky a posloupnost jednotlivých pohybů nástroje. Tyto se spolu s údaji o použitých nástrojích převedou do číselného kódu a vyděrují do pásy.

V této práci je použito systému navrhování, který vychází z technologických postupů výroby několika, dle autora, perspektivních druhů odvalovacích fréz. Jde o frézy monolitní a skládané. Pokud se týče skládaných fréz je do tzv. souhrnného technologického postupu zahrnuto pouze těleso a te z důvodů konstrukční odlišnosti vložených upínacích elementů. Souhrnný technologický postup se získá porovnáním jednotlivých technologických postupů odvalovacích fréz. Tento souhrnný nebo komplexní postup obsahuje veškeré operace a úkony, které jsou potřebné k výrobě kterékoliv ze zpracovávaných odvalovacích fréz.

4.3 Výběr odvalovacích fréz pro komplexní technologický postup výroby

4.3.1 Monolitní odvalovací frézy

Monolitní nebo celistvé odvalovací frézy patří v současné době u nás k nejpoužívanějším typům nástrojů k výrobě ozubení evolventních i neevolventních profilů pro svoji ekonomičnost i dostatečnou produktivitu. Výkonnější celistvé frézy jsou frézy vícechodné, které zvyšují produktivitu 1,5 - 2,5 násobně. Protože se technologické postupy výroby pro různé velikosti modulů od sebe liší, byly rozděleny do tří skupin. Frézy s moduly do 2, od 2 do 8 a nad 8 mm.

4.3.2 Skládané odvalovací frézy

Snaha po šetření kvalitní avšak drahé rychlořezné oceli a po zvyšování produktivity při výrobě ozubení vedla k novým konstrukcím, kde z vysokovýkonného řezného materiálu (rychlořezná ocel, slinutý karbid a jiné) jsou pouze břity fréz. Těleso frézy je z levnější konstrukční oceli. Břity fréz jsou vloženy do tělesa frézy a zpravidla mechanicky uchyceny.

Konstrukce skládaných odvalovacích fréz mají své zvláštnosti. Břity jsou uspořádány ve tvaru hřebců nebo destiček, které je možno pro broušení i ostření vyjímat. Mají po obvodu více hřebců než celistvé (v důsledku toho, že není nutný výběh pro podtáčení). Hřbety nejsou vytvořeny pošbrušváním, ale obvykle broušením na bruskách pro válcové broušení. Zubové drážky mohou být přímé a profilem v osové rovině.

Z množství existujících konstrukcí bylo pro komplexní postup výroby vybráno několik s určitými odlišnými charakteristickými znaky. Vybrány jsou odvalovací frézy ZTS Dubnica nad Váhom, Saazor, Samputensili, Klingelberg a VNII (SSSR).

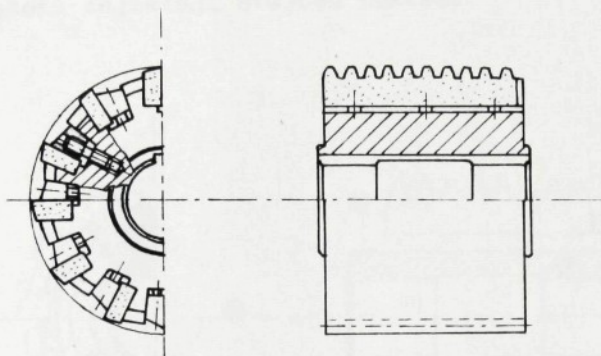
Konstrukce ZTS Dubnica nad Váhom

Fréza sestává z tělesa z konstrukční oceli 15240.6, v kterém jsou profrézovány drážky pro břitové hřebce ze slinutého karbidu, nebo vysokovýkonné rychlořezné oceli, a pro upínací klíny utahovány třemi diferenciálními šrouby. Profil hřebců je před vložením do tělesa předhrubován elektrochemicky a po montáži do tělesa je hřbet podtečen klasickým způsobem. Konstrukce je patrna z obr. 4.1. Zatím je fréza vyzkoušena pouze pro malé moduly v rozsahu 1 až 3 mm.

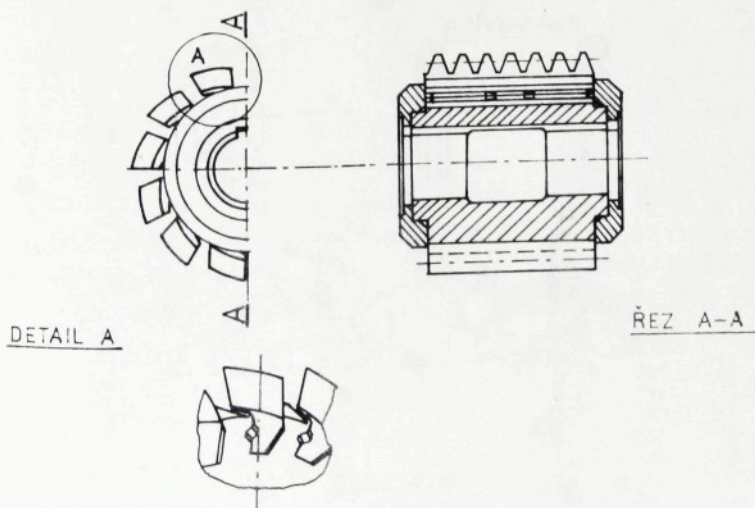
Konstrukce Saazor

Břitové hřebce jsou v tuhém tělese frézy upevněny podélnými kolíky čtvercového průřezu, které lisují na dvou plochách, takže upínací síla přitlačuje hřebce k dosedacím plochám (obr. 4.2). V axiálním směru jsou hřebce drženy přírubami, které se nasazují lisováním a za tepla. Zuby hře-

bená se vyrábí v speciálním přípravku, který je opatřen drážkami, zrcadlově otočenými vzhledem k drážkám v tělese frázy, takžeuby hřebení vytváří šroubovou plochu, kterou lze snadno brousit. Rozsah vyráběných modulů je od 0,5 do 10 mm.



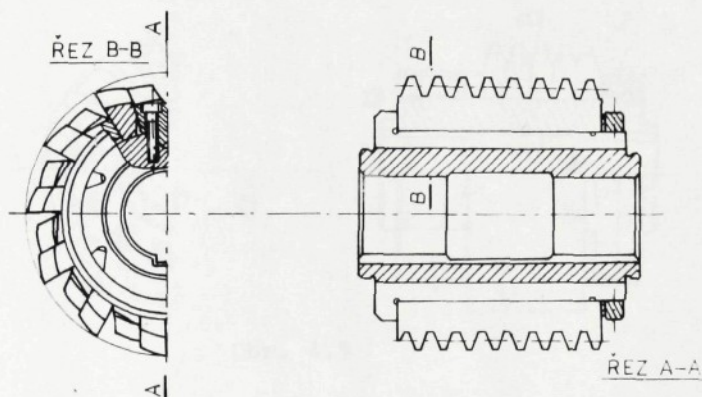
Obr. 4.1



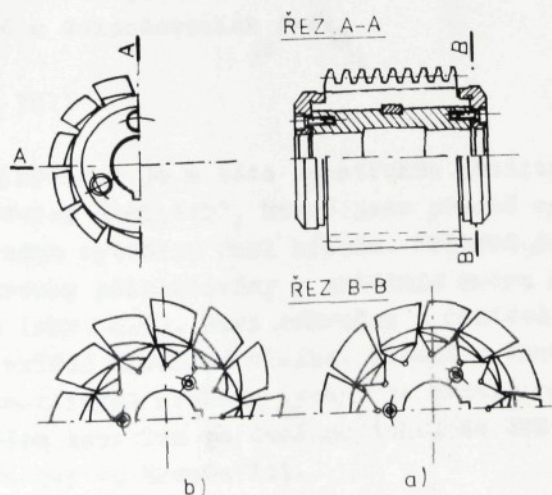
Obr. 4.2

Konstrukce Klingelberg

Za účelem snadné vyměnitelnosti břitových hřebenů se u této konstrukce nepoužívají k jejich uchycení příruby, ale lišty. Jedna lišta je vždycky opěrná a je uložena v drážce tělesa; druhá je upínací a působí jako klín. Břitové hřebeny jsou nejdříve axiálně upevněny mezi nákrůžkem a maticí (obr. 4.3). Opěrné lišty při výměně břitových hřebenů zůstávají pevné, protože zajišťují stejnou rozteč.



Obr. 4.3



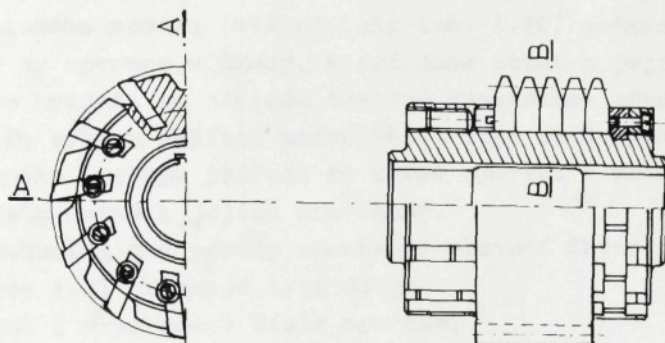
Obr. 4.4

Konstrukce Samputensili

Od konstrukce Saazor se odlišuje uložením hřebenů, jinak mají desti podobné prvky. Břitové hřebeny jsou uloženy v nesymetrických prizmatických drážkách a upevněny přírubami, které jsou k tělesu pevně přišroubovány. V axiálním směru jsou jištěny kruhovými péry. Hřebeny je možno přímo brousit v těle-

ŘEZ B-B

ŘEZ A-A



Obr. 4.5

se frézy natočením o 180° (obr. 4.4). Tyto frézy se vyrábí v rozsahu modulů 0,5 až 10 mm. Počet hřebenů je 12 u hrubevacích a 16 u dokončovacích fréz.

Konstrukce VNII

Místo hřebenů je u této konstrukce použito jednotlivých nožů (břitových destiček), které jsou přesně vybroušeny a je na nich předem vytvořen úhel hřbetu. Břitové destičky jsou v tělese šrouby přitlačovány v axiálním směru na pevný nákrůžek vpravo (obr. 4.5). Mezi nákrůžek a břitové destičky se ze strany vkládá broušená vložka. Tloušťka vložek je proměnná a mezi jednotlivými hřebeny (zuby) je rozdíl rozteče připadající na jeden zub. Tím se dosáhne toho, že břitové destičky jsou uspořádány ve šroubovici.

4.4 Komplexní technologický postup výroby odvalovacích fréz

Na základě podrobného rozboru typových výrobních postupů monolitních fréz a základního tělesa skládaných fréz byl sestaven souhrnný technologický postup. Za základ bylo použito postupu výroby monolitní odvalovací frézy na eventuelní osazení obořového podniku Škoda Plzeň. Komplexní postup je zpracován formou tabulky (viz příloha P), která kromě názvu operací a úkonů obsahuje i jejich číslování a další potřebné údaje.

Pe zadání konkrétní odvalovací frézy vybere počítač pomocí matematického modelu (viz přílohy tab. 4.20^B podmínky výběru operací ty operace a úkony, které jsou nutné k její výrobě. Výběr se provádí na základě zvolené konstrukce odvalovací frézy. Po výběru počítač pomocí algoritmů uvedených v tabulce komplexního postupu přiřadí ke každé operaci a úkonu konkrétní hodnoty nutné k jejich provedení.

Technologický postup výroby odvalovací frézy uvedený v příloze 4.21 obsahuje tyto údaje:

V sloupci 1 - pořadové číslo operace,

2 - pořadové číslo úkonu v rámci operace,

3 - název operace,

4 - průměr obrobku /mm/,

5 - délka úseku /mm/,

6 - stroj,

7 - nástroj,

8 - měřidlo,

9 - přípravek,

10 - přídavek na obrábění,

11 - posuv /mm/zub , mm/ot/,

12 - hloubka řezu /mm/,

13 - řezná rychlost /m/s , m/min/ ,

14 - otáčky obrobku /l/min/ ,

15 - otáčky nástroje /l/min/ ,

16 - počet úběrů ,

17 - čas hlavní /min/ ,

18 - čas vedlejší /min/ ,

19 - čas obsluhy a oddechu /min/ ,

20 - čas přípravy a zakončení /min/ ,

21 - čas celkový /min/ ,

- 22 - třída dle TKK ,
- 23 - sazba dle TKK /Kčs/ ,
- 24 - cena úkonu /Kčs/ .

4.4.1 Výpočet rozměrů polotovaru

Řezná část (břity) odvalovacích fréz se vyrábí nejčastěji z rychlořezných ocelí (viz tab. 4.1). Tyto se dodávají ve tvaru válcovaných kruhových tyčí od průměrů 5 mm do 60 mm a jako kované od 60 mm směrem nahoru. Průměry jsou odstupňovány po 1 mm. Pro monolitní frézy se volí jako polotovar ocel kruhového průřezu.

Průměr polotovaru monolitní frézy

$$D_{om} = 1,05 D_h + 1 \quad (4.1)$$

Délka polotovaru

$$l_{om} = l_f + 4 \quad (4.2)$$

Hmotnost válce polotovaru monolitní frézy

$$G_{om} = 7,85 \frac{\pi}{4} \cdot D_{om}^2 \quad (4.3)$$

Cena materiálu polotovaru

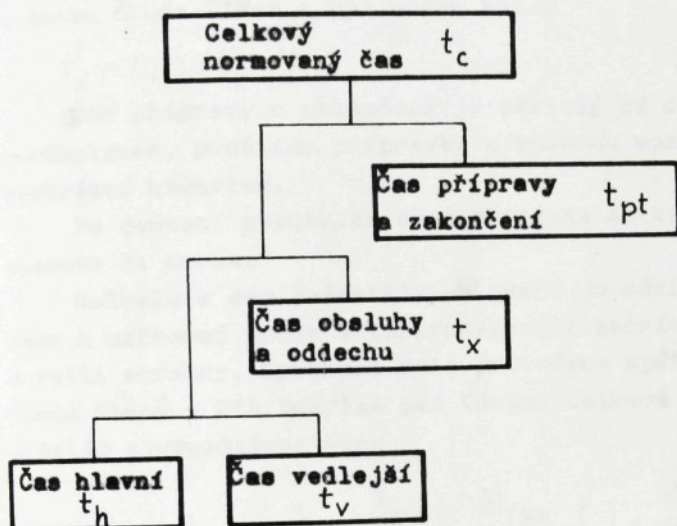
$$N_G = G_{om} \cdot N_{G1} \quad (4.4)$$

4.4.2 Volba řezných podmínek pro výrobu odvalovacích fréz

Komplexní technologický postup obsahuje více způsobů třískového obrábění, a proto je potřeba volit pro ně řezné podmínky. Základem pro stanovení řezných podmínek byly normativy pro soustružení, frézování, vrtání a broušení, používané v ober. podniku Škoda Plzeň. Při volbě se vycházelo z obrábělnosti materiálů uvedených v tab. 4.1 - viz Přílohy.

Řezné podmínky pro jednotlivé způsoby obrábění byly nahrazeny jako konstantní hodnoty do paměti počítače dle tabulek 4.2 až 4.19.

4.4.3 Normy času, kalkulace cen jednotlivých operací, celková cena odvalovací frézy



Obr. 4.6

Na základě technicky zdůvodněných norem času je možno správně stanovit plné využití výrobních možností výrobního zařízení, potřebný počet pracovníků pro vykonání určitého objemu prací apod. Z toho plyne i nutnost poznat normy spotřeby pracovního času při určování výrobních postupů. Normy času jsou tedy výchozími údaji při technické-ekonomických výpočtech, o které se opírá plánování a činnost podniku.

Technická norma času určuje nevyhnutný, ne úplně postačující čas na vykonání určité práce za normálních, dobře organizovaných podmínek výroby /87/. Pro účelné zpracování komplexního technologického postupu, se uvažují časy uvedené v grafickém členění na obr. 4.6. Toto schéma představuje upravený graf a dělí se na čtyři části:

Čas hlavní je pro každý způsob obráběcí operace vypočítáván dle vztahu, který je uveden v tabulce 4.21 viz Přílohy.

Čas vedlejší je zpracován formou vzorce a je uveden rovněž v příloze. Vztahy jsou zpracovány v závislosti na hmotnosti,

průměru nebo délky polotovaru a byly získány z grafů. Pro vrtání, vyhrubování a vystružování jsou uvedeny hodnoty přímo v tabulkách řezných podmínek příslušných operací.

Čas obsluhy a oddechu je vyjádřen procentuálně z času operačního, který sestává z času hlavního a vedlejšího. Stanovení času obsluhy a oddechu bylo provedeno dle zkušeností obor. podniku Škoda Plzeň a byl určen vztah

$$t_x = 0,12 (t_h + t_v) \quad (4.5)$$

Čas přípravy a zakončení je závislý na druhu stroje, jeho parametrech, použitém přípravku a způsobu upnutí. Je udáván konkrétní hodnotou.

Pe sečtení uvedených časů obdržíme celkový čas trvání operace či úkonu.

Kalkulace cen jednotlivých úkonů je závislá na celkovém času a zařazení práce v tarifně-kvalifikačním katalogu (TKK) a režii obrobny. Zařazení bylo provedeno opět dle poznatků Škoda Plzeň a ZTS Dubnica nad Váhom. Celková cena úkonu po určitém zjednodušení bude

$$N_u = \left(t_h + t_v + t_x + \frac{t_{pz}}{p_k} \right) \cdot \frac{M_{TKK}}{60} \left(1 + \frac{R_{ob}}{100} \right) + \\ + t_o \cdot \frac{t_h}{T} \frac{M_o}{60} \left(1 + \frac{R_o}{100} \right) + \frac{N_{ho}}{n_o + 1} \cdot \frac{t_h}{T} \quad (4.6)$$

Celková cena nástroje

$$N_n = \sum N_u + N_G \quad (4.7)$$

Vztah pro určení předkalkulačních (přibližných) nákladů výroby odvalovací frézy lze získat Lagrangeovým interpolováním cen nástrojů ($\sum N_u$) v závislosti na modulu, které byly vypočítány podle programu na číslicovém počítači a sestaveny do grafu

$$\sum N_u = 0,6891 m_n^3 - 13,4085 m_n^2 + 114,5694 m_n - 90,052 \quad (4.8)$$

4.5 Formulace matematického modelu výskytu operací při výrobě odvalovacích fréz

V předchozí kapitole byl vypracován souhrnný technologický postup výroby komplexní odvalovací frézy. Nyní je potřebné stanovení způsobu výběru operací a úkonů pro uvažovanou odvalovací frézu. Řešení způsobu výběru bylo provedeno analytickou metodou pomocí matematického modelování. Pod pojmem matematicko-logický model bude dále uvažována taková komplexní informační sestava, v které jsou v uspořádané formě zabudované všechny známé nebo účelně zvolené dílčí informace o soustavě, model které je sestavován /88/.

V kap. 4.3 bylo popsáno šest typů odvalovacích fréz. Výrobní postupy byly podrobeny rozboru jak z konstrukčního tak i z technologického hlediska. Z toho vyplývají jednotlivé zvláštnosti resp. odlišnosti technologie. Na základě uvedeného rozboru byl sestaven matematicko-logický model, který umožňuje jednoznačně určit potřebné operace a úkony dle zadaných vstupních údajů. Model je uveden v tabulce 4.20 v přílohách. Je zpracován formou plošného matematického pole, v kterém každý bod je definován souřadnicemi i, j .

V svislém směru nabývá souřadnice i hodnoty od 1 do 72. Každé souřadnici i je přiřazena přesně podle očíslování operací a úkonů komplexního technologického postupu jedna operace nebo úkon se všemi údaji, které k ní náleží. Ve vodorovném směru je každé souřadnici j přiřazen jeden z vybraných typů odvalovacích fréz.

Výskyt jednotlivých operací a úkonů je v modelu zaznamenán pomocí logických konstant 0, 1 (false, true), kde 0 značí, že operace se u daného typu frézy nevyskytuje tj. je nepotřebná a 1 naopak se u daného typu odvalovací frézy vyskytuje tj. musí se uskutečnit. Na základě zvoleného typu odvalovací frézy počítač vybere sloupec odpovídající vstupním údajům. Pak vykoná konjunkt logických konstant ve vodorovném směru v každém řádku. Jestliže při působení ve vodorovném směru narazí počítač na nulu, to znamená, že operace či úkon jsou za daných podmínek nepotřebné a počítač je vyloučí. Po sečtení si pamatuje pouze ty operace a úkony, v kterých se vyskytly konstanty jedna. Po tomto výběru operací a úkonů,

kteřé jsou nutné k výrobě daného typu frézy, počítač na základě souhlasného očíslování modelu a komplexního postupu výroby přiřadí vybraným operacím a úkonům příslušné řádky komplexního technologického postupu.

O tom, jak jsou jednotlivé hodnoty přiřazovány, určuje program pro číslicový počítač. Program byl odladěn pro monolitní frézy. Pro technologický postup výroby odvalovacích fréz byl rovněž odladěn program pro jeho vytištění. Tiskárna po ukončení výpočtů vytiskne technologický postup ve formě tabulky, který sestává z vybraných operací a úkonů (tab. 4.22 - přílohy). Tabulka obsahuje všechny údaje uvedené v komplexním technologickém postupu, kromě názvu operace či úkonu a potřebného zařízení, které počítač nezpracovává a odečítají se z tabulky. Je to z důvodů umístění na listu široké tiskárny. Technologický postup, který obdržíme z počítače je možno pro potřeby výroby přepsat do předtištěného formuláře.

Práce předkládá:

1. Obecnou teorii navrhování výchozího povrchu odvalovacích fréz.

Teorie vychází z kinematiky záběru odvalovací frézy a obráběné součásti. Pro řešení je použito tenzorového počtu a matic, jež umožňují jednodušší vyjádření daných vazeb součástí a nástroje. Při řešení obálek se vychází z poznatků diferenciální geometrie. Použití těchto disciplin umožňuje zpřesnění výpočtu a v některých případech upuštění od přibližných metod profilování ostří odvalovacích fréz.

Na základě obecné teorie byly odvozeny vztahy pro několik nejvíce se vyskytujících ploch součástí vhodných pro odvalovací frézování. Je to zejména evolventní plocha používaná u čelních osubených kol, dále rovinná plocha, která se vyskytuje ponejvíce u n-hranů a drážkových profilů a válcová plocha, která je součástí ploch drážkových hřídelů a řetězových kol. Příklady jsou zaměřeny na určení vektorů bodů součástí, a při respektování podmínky valení na stanovení vektorů bodů výchozího povrchu nástroje jako obálky povrchu součástí. V práci nejsou uvedeny aplikace na šroubovou plochu součástí i když te obecná teorie umožňuje.

2. Teorii přeměny výchozího povrchu nástroje v přesný nástroj.

Je uvedena teorie výpočtu ostří pro vyskytující se variace ploch čela. Čelo je uvažováno jako rovinné nebo šroubové. Při použití této teorie je možno stanovit profil pro odvalovací frézy s kladným, záporným i nulovým úhlem čela. Tato fáze řešení představuje nalezení bodů průsečnice obálky s rovinnou nebo šroubovou plochou. To lze řešit Newtonovou iterační metodou, která byla pro uvedené příklady použita.

3. Nahrazení teoretického profilu

Získaný profil ostří je možné využít pro přesné nebo přibližné stanovení povrchů zubů odvalovacích fréz. V práci je využíván pro stanovení geometrických rozměrů zubů frézy způsob přibližný, obvykle v praxi používaný. Přesný způsob nahrazení popsany původně Lašševem /39/ je pouze naznačen a je poukázáno

na možnost jeho výhodného použití právě pro předchozí přesnou metodu stanovení výchozího povrchu nástroje.

4. Teorii výpočtu geometrie břitu odvalovacích fréz.

Při výpočtu geometrie, tj. nástrojových řezných úhlů je možno vycházet z požadavku optimální geometrie břitu během řezného procesu a zjišťovat pro výrobu řezného nástroje potřebnou nástrojovou geometrii. Je uvedena tzv. přímá a inverzní transformace řezných úhlů. Přímou lze provádět přepočty ze soustav nástrojových do pracovních a inverzní, opačné přepočty. Princip transformace spočívá ve stanovení vektoru normály čela, nebo hřbetu nástroje a jeho transformaci pomocí transformačních matic do požadované soustavy. Normála se určuje jako vektorový součin dvou tečných vektorů plochy čela nebo hřbetu.

5. Výpočetní vztahy pro určení geometrických parametrů tělesa válcové a kuželové odvalovací frézy.

Dosavadní vztahy pro výpočet tělesa jsou modifikovány a rozšířeny o nové poznatky v oblasti konstrukce odvalovacích fréz. Kuželové odvalovací frézy se u nás zatím nepoužívají. Zavedení těchto fréz do praxe by dle sovětských zkušeností mohlo přinést zvýšení výkonu obrábění odvalovacími frézami o 30 - 40 %.

6. Vztahy pro výpočet parametrů nastavení.

Pro navrženou odvalovací frézu a vyráběnou součást jsou dále odvozeny vztahy pro výpočet hodnot ustavení na obráběcím stroji, tj. hodnot náběhů a přeběhů pro dané parametry součásti a odvalovací frézy.

7. Odvození vztahů pro výpočet záběrového pole frézy.

Podle rozměrů záběrového pole je navrhována pracovní délka odvalovací frézy, nebo pokud by vycházela příliš veliká je doporučována úprava frézy (náběhový kužel) pro stejnoměrnější rozdělení průřezů odebíraných třísek. Záběrové pole slouží rovněž jako omezující faktor při určování průřezů třísek.

8. Odvození vztahů pro stanovení průřezů třísek na základě znalostí trajektorií jednotlivých bodů zubů odvalovací frézy.

Z rozdílů drah po sobě jdoucích zubů je možné určit tloušťku třísky v počítaném místě. Metoda umožňuje kontrolu záběrových poměrů pro každý případ frézování součástí. Na základě rozboru záběrových poměrů je možné provádět korekci profilu tak, aby záběr jednotlivých zubů odvalovací frézy byl plynulý a nedocházelo k nadměrnému opotřebení nejvíce namáhaných zubů. Z průřezů třísek a znalosti specifických řezných odporů je možné stanovení řezné síly.

9. Sestavení vztahů pro výpočet optimálních řezných podmínek z hlediska minimálních nákladů na výrobu.

Při řešení se vycházelo z omezujících podmínek obrábění a metodami lineárního programování se prováděla optimalizace. Z těchto údajů je možné vycházet při výpočtech nákladů na tuto operaci obrábění. Je možné je použít při plánování výroby a výpočtech výrobních kapacit.

10. V závěru technologický postup výroby odvalovací frézy.

Postup je zpracován formou souhrnného postupu pro více typů odvalovacích fréz. Sestavení postupu pro zvolený typ frézy se provádí pomocí samočinného počítače výběrem úkonů a operací z matematicko-logického modelu.

Na základě uvedených teoretických podkladů byly sestaveny algoritmy výpočtů. Většina výpočtů byla naprogramována a odladěna na číslicovém počítači MINSK 22 na Katedře technické kybernetiky VŠST v Liberci. Vzhledem k velikému rozsahu výsledků, byly vybrány pouze ukázky výpočtů parametrů odvalovacích fréz, parametrů výroby, optimálních řezných podmínek a technologického postupu výroby odvalovací frézy. Tyto výpočty jsou uvedeny ve výsledkové části práce jako přílohy.

Vzhledem k tomu, že v práci nebyly zatím postihnuty všechny možnosti v oblasti konstrukce odvalovacích fréz, doporučoval bych do budoucna aplikovat uvedenou teorii na další i modifikované profily včetně šroubových povrchů součástí. Pro vypracované podprogramy sestavit řídicí program pro počítač s větší pamětí.

Vytvořit programy pro grafické výstupy získaných výsledků. Zejména se jedná o nakreslení výrobního výkresu odvalovací frézy, nakreslení profilů frézy ve zvětšeném měřítku, o nakreslení grafů záběrového pole, grafů rozměrů třísek pro jednotlivé body ostří zubu frézy. K tomu je nutné kreslicí zařízení.

Pro potřeby uživatelů z praxe bude nutné části výpočtů přispůsobit jejich požadavkům, případně je podrobněji rozvést a konkretizovat pro určitý rozsah rozměrových parametrů odvalovacích fréz. Bude vhodné využít programu pro výpočet průřezů třísek k analytickému stanovení působících řezných sil na jednotlivé břity a uvažovat o pevnostním výpočtu odvalovací frézy.

Je mou milou povinností, závěrem poděkovat mému školi-
teli a vedoucímu Katedry obrábění a ekonomiky zdejší školy
prof. Ing. Jaroslavu Draskému CSc, za poskytnutí cenných rad
v průběhu celé aspirantury a při vypracování této práce.

Dále bych chtěl poděkovat akademiku USSR P.R. Rodinovi
a doc. ing. O.N. Čkalové CSc z katedry výroby řezných nástrojů
Kyjevského polytechnického institutu za odbornou i teoretickou
průpravu v oblasti navrhování řezných nástrojů, rovněž tak
Ing. Vladimíru Kracíkovi CSc z katedry technické kybernetiky
zdejší školy za teoretickou průpravu a konzultace v oblasti
matematických disciplín.

Za ochotnou pomoc při sestavování a odlehčování jednotli-
vých programů patří dík Ing. Janu Tišerovi z katedry technické
kybernetiky VŠST, ~~soudr.~~ Daně Dejčové a Marii Gelkové za napsání
čistopisu podstatné části práce jakož i Zdeně Helígarové
a ostatním, kteří se podíleli na úpravě a redakci zprávy.

LITERATURA

- /1/ ARMAREGO, E.J.A.-BROWN, R.H.: The machining of metals. Prentice-Hall, Inc. 1969 (ruský překlad).
- /2/ BARTSCH, J.: Matematické vzorce II. Praha, SNTL 1961.
- /3/ BOLEK a kol.: Části strojů II. Praha, NČSAV 1963.
- /4/ BUCKINGHAM, E.: Analytical Mechanics of Gears. Cambridge-Massachusetts 1949.
- /5/ BUDA, J.-BÉKÉS, J.: Teoretické základy obrábění kovov. Bratislava, SVTL 1967.
- /6/ BUDINSKÝ, B.-KEPR, B.: Základy diferenciální geometrie s technickými aplikacemi. Praha, SNTL 1970.
- /7/ CORMAC, P.: A treatise on screws and wormgear their mills and hobs. London, 1936. *1. snímekový převod*
- /8/ CVIS, J.V.: Profilování obkato instrumenta. Moskva, Mašgiz 1961.
- /9/ ČKALOVA, O.N.: Koničeskije červjačnyje frezy dlja obrabotki cilindričeskich zubčatych koles./Kand.dis./Kijev, 1970.
- /10/ ČKALOVA, O.N.: Příspěvek k teorii stanovení profilu odvalovacích fréz pro čelní ozubená kola. Strojírenství, sv.21, 1971, č. 9.
- /11/ DICHTJAR, F.S.: Profilování metalorežuščevo instrumenta. Moskva, Izd. Mašinostrojenije 1965.
- /12/ FINIKOV, S.P.: Differencialnaja geometrija. Moskva, Izd. MGU 1961.
- /13/ FRAJFELD, I.A.: Instrumenty rabotajuščije metodom obkatki. Moskva-Leningrad, Mašgiz 1948.
- /14/ GARAJ, J.: Základy vektorového počtu. Bratislava, SVTL 1957.
- /15/ GRANOVSKIJ, G.J.: Kinematika rezanija. Moskva, Mašgiz 1948.
- /16/ GRUBIN, A.N. a kol.: Nástroje na ozubení I., II. díl. Praha, Průmyslové vydavatelství 1952.
- /17/ HLA VATÝ, V.: Diferenciální geometrie křivek a ploch a tenzorový počet. Praha 1937.
- /18/ HNÍDEK, V.: Řezné podmínky při odvalovacím frézování Čelákovice, TOS 1970.
- /19/ HOSTINSKÝ, B.: Diferenciální geometrie křivek a ploch. Praha 1950.
- /20/ HRON, J.-KOŠEK, J.: Sestavování technologických postupů samostatným počítačem. Strojírenská výroba, sv.19, 1971, č. 7-8, str. 508-514.

- /21/ JANEČEK, J. - MODRLÁK, O.: Simplexová modifikovaná metoda. Liberec, AS - VŠST 1972.
- /22/ JOPPA, K.: Bedeutung der Dreiflakenspäne auf das Verschleissverhalten beim Wälzfräsen. Ind.-Anz. 100, 1978, N° 5, 24-25.
- /23/ KIRSANOV, G. N.: Issledovanije konstruktivno-kinematičeskych parametrov červjačnych frez./Kand.dis./Moskva, Stankin 1967.
- /24/ KLEPAL, V. a kol.: Výroba ozubených kol. Praha, SNTL 1959.
- /25/ KOLČIN, N. J.: Analitičeskij rasčet ploskich i prostranstvennych zaceplenij. Moskva, Mašgiz 1949.
- /26/ KORDA, B. a kol.: Matematické metody v ekonomii. Praha, SNTL 1967.
- /27/ KORN, G. - KORN, T.: Mathematical Handbook. New York, Mc Graw Hill Book Company 1968 (ruský překlad).
- /28/ KUNSTETTER, S.: Narzedzia skrawajace do metali, konstrukcja. 3.vyd., Warszawa, WNT 1973.
- /29/ KUTÍK, B. - KVAPIL, R.: Nové pohledy na geometrii řezných nástrojů. Českoslov. standardizace 2, 1977, č. 7 - Příloha.
- /30/ KŮNZI, H. P. - TZSCHACH, H. G. - ZEHNDER, C. A.: Numerical Methods of Mathematical Optimization. University of Maryland 1968.
- /31/ KVAPIL, R. - PATRÁK, J.: Optimální krokování odvalovací frézy na ozubení. Sborník VŠST, Liberec 1970, str. 171-180.
- /32/ KVAPIL, R.: Příspěvek sovětské vědy pro navrhování řezných nástrojů z hlediska současných požadavků. Sborník semináře. Praha-Nižbor 1974.
- /33/ KVAPIL, R. a kol.: Matematický model obrábění. - Řezné nástroje. (Výzk. zpráva), Liberec, VŠST 1974.
- /34/ KVAPIL, R.: Principy navrhování profilů odvalovacích nástrojů na ozubení./Kand.minimum/, Liberec, VŠST 1975, 68 s.
- /35/ KVAPIL, R.: Základní přepočty mezi nástrojovými a pracovními úhly. Sb.konference. Bratislava, SVŠT 1976.
- /36/ KVAPIL, R.: Geometria rezného klina rezných nástrojov a jej vzťah k reznému procesu. Náradie sv.4, 1977, č.4. s.27-33.
- /37/ KVAPIL, R.: Geometrie břitu odvalovacích fréz ve vztahu k procesu obrábění. Strojírenství sv.28, 1978, č.7, s.408-411.
- /38/ KVAPIL, R.: Konstrukce skládané odvalovací frézy s břitzy ze slinutých karbidů. Výzk. zpráva. Liberec, VŠST 1978, 60 s.

- /39/ LAŠNĚV, S.J.: Formoobrazovanie zubčatých detalej reječnymi i červjačnymi instrumentami. Moskva, Mašinostroj. 1971.
- /40/ LIPTÁK, O.-VALČUHA, Š.: Navrhovanie a konštrukcia rezných nástrojov. Bratislava, SVŠT 1971.
- /41/ LIPTÁK, O.-VALČUHA, Š.: Možnosti a spôsob použitia samočinných počítačov pri konštrukcii rezných nástrojov. Strojírenská výroba 19, 1971, č. 12, s. 848-852.
- /42/ LITVIN, F.L.: Teória zubčatých zacepleníj. Vyp. 1, Moskva, Mašgiz 1960.
- /43/ LITVIN, F.L.: Teória zubčatých zacepleníj. Vyp. 2, Moskva, Izd. Nauka 1968.
- /44/ LJUKŠIN, V.S.: Teória vintových pověrchnostěj v projektirovaniji režuščich instrumentov. Moskva, Mašinostroj. 1968.
- /45/ LONG, B.T.-KVAPIL, R.: Studium profilu součástí a nástroje při jejich vzájemném pohybu s aplikací na výrobu prostorového ozubení. Náradie sv.3, 1976, č.4, s. 7-10, 14.
- /46/ LONG, B.T.-KVAPIL, R.: Obecná teorie vytvoření povrchu součástí obráběním s aplikací na kuželová kola. Strojírnoství, sv.27, 1977, č. 9, s. 524-528.
- /47/ LONG, B.T.: Obecná teorie vytváření povrchových ploch součástí obráběním s aplikací na prostorové ozubení pomocí samoč.počítače. /Kand.disertace/, Liberec, VŠST 1977.
- /48/ LONG, B.T.-KVAPIL, R.: Vzájemný vztah povrchu řezného nástroje a součásti s aplikací na ozubená kola. Strojírenská výroba 25, 1977, č. 5, s. 357-359, 367.
- /49/ MÁDL, J.: Optimalizace řezných podmínek. /Výzk.zpráva/, Praha, FS ČVUT 1975.
- /50/ MITROFANOV, S.P.: Vedecké základy skupinovej technologie. Bratislava, SVTL/SNTL 1960.
- /51/ MITROVIČ, R.: Sile rezanja pri odvalnom glodanju analogna istraživanja i računska odredjivanja. Obrada metala i tribologija, N° 3, Kragujevac 1974.
- /52/ MENTE, H.P.: Die Entwicklung des Wälzfräsens in den letzten fünf Jahren. 3.Zahnradkonferenz. Budapest 1974.
- /53/ MRKVICA, M.: Užití kinematických zákonů při podbroušení a tvorbě ostří zubů odvalovací frézy. Strojírenská výroba 25, 1977, č. 4.
- /54/ NIKOLAJEV, A.F.: Kinematičeskije osnovy teoriji prostranstvennych zacepleníj. /Doktor.dis./ Moskva, Mosstankin 1953.

- /55/ OLEHLA, M. - TIŠER, J.: Základy numerických metod a programování. /Skripta/, Liberec, VŠST 1977.
- /56/ PACHOVÁ, Z. - FREY, T.: Vektorová a tenzorová analýza, Praha, SNTL 1964.
- /57/ PETRUCHIN, S.S.: Osnovy projektirovanija režuščej časti metalorežuščich instrumentov, kinematičeskaja teorija. Moskva, Mašgiz 1960.
- /58/ PFAUTER, H.: Pfauter Wälzfräsen. Teil 1. Berlin, Heidelberg, New York, Springer-Verlag 1976.
- /59/ PŘIKRYL, Z. - MUSÍLKOVÁ, R.: Teorie obrábění. Praha, SNTL/ALFA 1971.
- /60/ RALSTON, A.: Základy numerické matematiky. Praha, Academia 1971.
- /61/ RAMOND, P.: Research into the best strength - silence - cost in designing gears and generating tools. Trans. ASME B 96, 1974, No 1, 21-24.
- /62/ RODIN, P.R.: Osnovy teoriji projektirovanija režuščich instrumentov. Moskva, Mašgiz 1960.
- /63/ RODIN, P.R.: Voprosy teoriji režuščich instrumentov. /Doktor.dis./. Odessa 1961.
- /64/ RODIN, P.R.: Projektirovanije i proizvodstvo režuščego instrumenta. Moskva, Mašgiz 1962.
- /65/ RODIN, P.R.: Projektirovanije i proizvodstvo režuščego instrumenta. Kijev, Technika 1968.
- /66/ RODIN, P.R.: Režuščij instrument. Rasčotno-grafičeskije i laboratornyje raboty. Kijev, Technika 1966.
- /67/ Rodin, P.R.: Osnovy formoobrazovanija poverchnostej rezanijem. Kijev, Višča škola 1977.
- /68/ ROMANOV, V.F.: Rasčoty zuboreznych instrumentov. Moskva, Mašinostrojenije 1969.
- /69/ SACHAROV, G.N.: Projektirovanije kruglych obkatočnych rezcov. /Sb. "Novoje v konstruirovaniji metalorežuščich instrumentov"/. Moskva, Mašgiz 1958.
- /70/ SEMENČENKO, D.I.: Novoje k voprosam teoriji profilirovanija i izmerenija čerpyačnych fres. Moskva, ENINS 1958.
- /71/ SEMENČENKO, I.I.: Režuščij instrument. Tom III, Moskva-Sverdlovsk, Mašgiz 1944.
- /72/ SEMENČENKO, I.I. - MATJUŠIN, V.M. - SACHAROV, G.N.: Projektirovanije metalorežuščich instrumentov. Moskva, Mašgiz 1962.
- /73/ SIDORENKO, A.K.: Progressivnoje zubofrezetrovanije. Moskva, Mašgiz 1951.
- /74/ STUNA, M.: Technologické postupy. Liberec VŠST 1970/skripta/.

- /75/ SULZER, G.: Bestimmung der Spannungsquerschnitte beim Wälzfräsen. Ind.-Anz. 96, 1974, No 12.
- /76/ SCHMIDT, E.: Příručka řezných nástrojů. Praha, SNTL 1974.
- /77/ SCHMIDTHAMMER, A.: Die Verschleisserscheinungen am Wälzfräser und ihre Ursachen. Vorträge der 3.Zahnradkonferenz, Budapest 1974.
- /78/ ŠALAMOUN, Č.-SUCHÝ, M.: Převody./Skripta/ Praha ČVUT 1971.
- /79/ ŠALAMOUN, Č.-SUCHÝ, M.: Patní přechod čelního evolventního ozubení./Sb.II.celest.konference o ozubení/.Příbram 1973.
- /80/ ŠEVJL, M.: Teorie a výpočty ozubených kol. 1.díl, Praha SNTL 1957.
- /81/ ŠEVELEVA, G.T.: Algoritm číselného račeta obrabatyvajemoj poverchnosti. Stanki i instrument 1969, No 8.
- /82/ ŠIŠKOV, V.A.: Obrazovaniye poverchnostej rezanijem po metodu obratki. Moskva, Mašgiz 1951.
- /83/ ŠVEC, S.: Konstrukce nástrojů pro výrobu čelních ozubených kol. Praha, SNTL 1956.
- /84/ ŠVEC, S.: Řezné nástroje. /Skripta/ Praha, ČVUT 1970.
- /85/ ŠVEC, S.: Komplexní výpočet konstrukce ozubení, řezných nástrojů a jejich výroby pomocí samočinného počítače. Výzk. zpráva 88, Praha, ČVUT 1972.
- /86/ TUMAŠENKO, N.N.: Sovremennyye napravleniya v konstrukcii červjačnyh frez./Výsk. zpráva KPI/ Kijev 1972.
- /87/ VALČUHA, Š.: Automatizácia konštrukcie a prípravy výroby pretahovacích a pretlačovacích nástrojov./Kand. dis./ Bratislava, SVŠT 1972.
- /88/ VALČUHA, Š.: Automatizácia navrhovania technologického postupu výroby pretahovacích a pretlačacích nástrojov. /Sb. konference/. Bratislava, SVŠT 1973.
- /89/ VALČUHA, Š.: Výpočet a konštrukcia odvalovacích fréz na neevolventné profily. Výsk.zpráva.Bratislava,SVŠT 1974.
- /90/ VELIKANOV, K.M.-NOVOŽILOV, V.I.: Ekonomičnyje režimy rezanija metallov. Leningrad, Izd.Mašinostrojenije 1972.
- /91/ WILDHABER, E.: Osnovy zacepleniya koničeskikh i gipoidnich peredač. Moskva, Mašgiz 1948 /ruský překlad/.
- /92/ ZELENKA, A.: Aplikace vybraných matematických metod ve strojírenské technologii. Praha, PS-ČVUT 1970.
- /93/ Doporučení ISO R841. Názvy os a pohybů pro číslíkové řízené stroje. 1968.

/94/ **Doporučení ISO/DIS 3002. Geometry of the Active Part of Cutting Tools. 1973.**

/95/ **ČSN 22 00 11. Řezné nástroje. Geometrie řezných částí nástrojů. Připravovaná čs. norma.**

Anotace	1
Přehled označení a symbolů	2
ÚVOD	13
1. STANOVENÍ VÝCHOZÍHO POVRCHU ODVALOVACÍCH FRÉZ	19
1.1 Teorie výchozího povrchu	19
1.1.1 Obecná teorie obalových ploch	19
1.1.2 Tenzor otočení	21
1.1.3 Zavedení tenzoru otočení pro obalové plochy vzniklé při rotačních pohybech kolem dvou mimoběžných os	24
1.1.4 Formulace úlohy pro odvalovací frézování	25
1.1.4.1 Charakteristika	27
1.1.4.2 Normála k obalové ploše	28
1.1.4.3 Tečná rovina obalové plochy	29
1.1.4.4 Křivost křivky na povrchu nástroje	29
1.2 Výchozí povrch a tvar ostří odvalovacích fréz pro danou rovinnou plochu součásti	31
1.2.1 Stanovení výchozího povrchu	31
1.2.2 Vyjádření tvaru ostří odvalovací frézy	33
1.2.2.1 Řez obálky rovinnou plochou	34
1.2.2.2 Řez obálky šroubovou plochou s tvořící přímkou	39
1.2.3 Příklad stanovení výchozího povrchu pro frézování součásti tvaru n-hranu	41
1.3 Výchozí povrch a tvar ostří pro zakřivenou válcovou plochu	44
1.3.1 Stanovení výchozího povrchu	44
1.3.2 Vyjádření tvaru ostří odvalovací frézy	47
1.3.2.1 Řez obálky rovinnou plochou	47
1.3.2.2 Řez obálky šroubovou plochou s tvořící přímkou	48
1.3.3 Příklad stanovení výchozího povrchu pro frézování drážkového profilu	48
1.4 Výchozí povrch a tvar ostří pro evolventní plochu	53
1.4.1 Stanovení výchozího povrchu	53
1.4.2 Vyjádření tvaru ostří	55
1.4.2.1 Řez obálky rovinnou plochou	55
1.4.2.2 Řez obálky šroubovou plochou s tvořící přímkou	56

1.4.3	Příklad stanovení výchozího povrchu	56
1.4.3.1	Analytické stanovení povrchu zubu s přechodem tvaru kružnice	60
1.4.3.2	Výchozí povrch nástroje	62
2.	PŘEMĚNA VÝCHOZÍHO POVRCHU ODVALOVACÍ FRÉZY V ŘEZNÝ NÁSTROJ A JEHO KONSTRUKČNÍ PARAMETRY	65
2.1	Vytvoření čela zubu odvalovací frézy	65
2.2	Vytvoření hřbetních ploch zubů odvalovací frézy	65
2.2.1	Zvláštnosti tvaru hřbetu evolventních fréz pro evolventní ozubená kola	68
2.2.1.1	Nahrazení teoreticky přesného povrchu boku zubu Archimedovou šroubovou plochou	69
2.2.1.2	Nahrazení teoreticky přesného povrchu boku zubu podle Lašnéva	71
2.3	Geometrie břitu odvalovacích fréz	73
2.4	Hlavní konstrukční rozměry tělesa frézy	84
2.4.1	Válcová odvalovací fréza	85
2.4.2	Kuželová odvalovací fréza	91
3.	TECHNOLOGICKÉ PARAMETRY ODVALOVACÍHO FRÉZOVÁNÍ	94
3.1	Záběrové poměry při frézování ozubení odvalovacím způsobem	94
3.1.1	Záběrové pole odvalovací frézy	94
3.1.1.1	Horní hranice záběrového pole	96
3.1.1.2	Spodní hranice záběrového pole	99
3.1.1.3	Hranice záběrového pole v oblasti plného válce	99
3.1.2	Nastavení odvalovací frézy	100
3.1.2.1	Nastavení válcové odvalovací frézy	103
3.1.2.2	Nastavení kuželové odvalovací frézy, nebo frézy s tzv. náběhovým kuželem	106
3.1.2.3	Stanovení přeběhů odvalovacích fréz při frézování čelních ozubených kol	111
3.1.3	Pracovní rozsah odvalovací frézy	112
3.1.4	Analytické určení rozměrů třísek při odvalovacím frézování	112
3.1.4.1	Grafické vyhodnocování rozměrů třísek	118

3.2 Optimální řezné podmínky	119
3.2.1 Matematická formulace omezení	119
3.2.2 Kriterium optimálnosti	123
4. TVORBA TECHNOLOGICKÉHO POSTUPU VÝROBY ODVALOVACÍCH FRÉZ POMOCÍ POČÍTAČE	124
4.1 Současný stav navrhování technologických postupů speciálních řezných nástrojů	124
4.2 Využití číslicových počítačů při návrhu technologického postupu výroby odvalovacích fréz	126
4.3 Výběr odvalovacích fréz pro komplexní technologický postup výroby	126
4.3.1 Monolitní odvalovací frézy	126
4.3.2 Skládané odvalovací frézy	127
4.4 Komplexní technologický postup výroby odvalovacích fréz	131
4.4.1 Výpočet rozměrů polotovaru	132
4.4.2 Volba řezných podmínek pro výrobu odvalovacích fréz	132
4.4.3 Normy času a kalkulace cen jednotlivých operací, celková cena odvalovací frézy	133
4.5 Formulace matematického modelu výskytu operací při výrobě odvalovacích fréz	135
ZÁVĚR	137
Literatura	141
Obsah	147

Vysoká škola strojní a textilní v Liberci
nostelka Řádu práce
Katedra obrábění a ekonomiky

Ing. Robert K V A P I L

KONSTRUKČNÍ A TECHNOLOGICKÉ PARAMETRY ODVALOVACÍCH
FRÉZ

Výsledková část
kandidátské dizertace

Únor 1979

Seznam tabulek

	str.
1. Vypočtené parametry ostří odvalovací frézy pro frézování šestihranu; tab.1.1 - 1.4	1
2. Konstrukční parametry válcové odvalovací frézy, tab. 2.1	5
3. Konstrukční parametry kuželové odvalovací frézy, tab. 2.2	8
4. Tabulka konstant, tab..2.3.-2.5.	10
5. Výpočet geometrie břítu odvalovacích fréz, tab. 2.6 - 2.9	11
6. Diagramy záběrových polí	16
7. Vypočtené hodnoty náběhů a přeběhů tab. 3.5; 3.6	20
8. Optimální řezné podmínky, tab.3.7 - 3.9	22
9. Vypočtené souřadnice záběrového pole, tab. 3.10	25
10. Souřadnice trajektorií bodů ostří odvalovací frézy pro výpočet průřezu třísky (obrobitelnosti, řezných podmínek, hlavních a vedlejších časů); tab. 3.11	26
11. Tabulky pomocných hodnot pro stanovení technologického postupu; tab. 4.1 - 4.19	29
12. Matematický model výběru operací tab. 4.20	42
13. Technologický postup výroby monolitní frézy sestavený počítačem; tab. 4.21	45
14. Souhrnný technologický postup tab. 4.22	47

1. Příklad výpočtu výchozího povrchu a ostří odvalovací frézy pro frézování šestihranu
pro čelo rovnoběžné s osou nástroje

Tab. 1.1 Vstupní a výstupní údaje výpočtu

a) Pořadí dat vstupujících do počítače přes snímač	
Označení dané veličiny v programu	Daná veličina
S2 /m m/	Poloměr vepsané kružnice N-hranu
BET /°/	Úhel sklonu nástroje
T /m m/	Nejkratší vzdálenost os nástroje součásti
VER /m m/	Poloměr navržené frézy
PH	Počet hran N-hranu
D /m m/	Vzdálenost roviny kolmé na O_n od počátku
JGAMAP /°/	Počáteční úhel
KGAMAP /°/	Krok úhlu
EGAMAP /°/	Konečný úhel
ETAK /°/	Krok úhlu (dán počtem zubů)
FRFI /°/	Konečný úhel
b) Data zadávaná přes dálkopis	
JFI /°/	Počáteční úhel
KFI /°/	Krok otáčení nástroje
c) Pořadí dat vystupujících z počítače	
ETA	pootočení roviny řezu o úhel φ
GAMA	Úhel čela γ
FI	Parametr pootočení
OB	Souřadnice obálky s řezem rovnoběžným s osou O_n
OBP	Souřadnice obálky s řezem kolmým na O_n
POLO	Ostří vyjádřené řezem o poloměru r a posutém podél osy O_n o vzdálenost z

Tab. 1.2 Výtah z výsledků výpočtu východního povrchu pro šestihran. Čelo rovinné.

Tab. 1.2 Výtah z výsledků výpočtu výchozího povrchu pro sestavu 10, ETA 36, Dané hodnoty: T = 100, VER = 50, PH = 6, D = 0, S2 = 50; BET = 5; 0, JGAMAP = -10, KGAMA = 10, EGAMA = 10, ETA 36, FRFI = 360.									
FI	OB			OBP			POLO		
	x	y	z	x	y	z	r	z	
36,0	-29,35	40,38	-1,98	-29,02	40,37	0,00	49,93	-1,98	
36,8	-29,14	39,94	2,57	-29,57	39,95	0,00	49,44	-2,57	
37,6	-28,92	39,48	7,11	-30,12	39,53	0,00	98,94	7,11	
38,4	-28,69	39,02	11,61	-30,66	39,09	0,00	48,43	11,61	
39,2	-28,46	38,54	16,08	-31,20	38,65	0,00	47,91	10,08	
40,0	-28,22	38,06	20,52	-31,73	38,19	0,00	47,38	20,52	
40,4	-28,10	37,81	22,73	-31,99	37,96	0,00	47,11	22,73	

2. Příklad výpočtu výchozího povrchu a ostří odvalovací frézy pro frézování šestihranu
pro čelo ve tvaru šroubové plochy

Tab. 1.3 Vstupní a výstupní údaje výpočtu

a) Pořadí dat vstupujících do počítače přes snímač	
Označení dané veličiny v programu	Daná veličina
S2 /m m/	Poloměr vepsané kružnice
BET /°/	Úhel sklonu nástroje
T / m m/	Nejkratší vzdálenost os
VER /m m/	Poloměr navržené frézy
PH	Počet hran N-hranu
D /m m/	Vzdálenost roviny kolmé na osu nástroje
JGAMAP /°/	Počáteční úhel GAMA
KGAMA /°/	Krok úhlu GAMA
EGAMA /°/	Konečný úhel GAMA
ETAK /°/	Krok úhlu ETA
TT	Parametr přímky
SC /m m/	Stoupání šroubovice
b) Data zadávaná přes dálnopis	
KFI /°/	Krok úhlu FI
JFI /°/	Počáteční úhel FI
MK1 (1)	Počáteční odhad parametrů
MK1 (2)	pro aproximaci Newtonovou
MK1 (3)	metodou
c) Pořadí dat vystupujících z počítače	
ETA	Pootočení roviny řezu o úhel α_n
GAMA	Úhel čela γ_0
FI	Parametr pootočení
OBS	Souřadnice průsečíků šroubové plochy a obálky z rovnice obálky
SRP	Souřadnice průsečíků šroubové plochy a obálky z rovnice šroubové plochy
OB	Souřadnice roviny rovnoběžné s osou o_n

Tab. 1.4 Výtah z výsledků výpočtu východního povrchu pro šestihran - čelo šroubové

Dané hodnoty: $T = 100$, $VER = 50$, $PH = 6$, $D = 0$, $S2 = 50$, $BET = 5$, $JGAMAP = 0$, $KGAMA = 10$, $EGAMA = 10$, $ETAK = 36$, $TT = 0$, $SC = 2000$									
OBS			SRPL			OB			
PI	x	y	z	x	y	z	x	y	z
35,60	-29,09	40,59	-2,06	-29,00	40,59	-2,06	-29,50	40,60	-4,40
36,40	-29,24	40,16	0,32	-29,24	40,16	0,32	-29,18	40,16	0,70
37,20	-29,39	39,73	2,73	-29,39	39,73	2,73	-28,85	39,71	5,90
38,00	-29,52	39,28	5,15	-29,52	39,28	5,15	-28,51	39,24	11,08
38,80	-29,64	38,82	7,58	-29,64	38,82	7,58	-28,16	38,77	16,25
39,60	-29,75	38,36	10,02	-29,75	38,36	10,02	-27,81	38,28	21,39

Tab. 2.1 Vypočtené hodnoty konstrukčních parametrů válcové odvalovací frézy

Označení	Vypočtené hodnoty	Název parametru
l_f	75,1207	Délka nástroje
D_n	32,0000	Průměr upínacího otvoru
Z_f	9,0000	Počet hřebenů
α_d	22° 00' 00"	Úhel rozevření drážky
H_n	5,0000	Výška hlavy nástroje
H_p	4,8000	Výška paty nástroje
H_n	9,8000	Výška zubu nástroje
t_n	12,5664	Rozteč v normální rovině frézy
s_r	6,2832	Tloušťka zubu na roztečné přímce
r_f	1,0000	Poloměr zaoblení na hlavě a patě zubu
D_d	48,0000	Průměr paty podélných drážek
α_{rh}	11° 08' 31"	Úhel hřbetu na hlavě zubu
k	5,5000	Zdvih vačky
r_{pd}	7,7297	Poloměr pomocné kružnice
H_{pm}	2,2000	Výška paty zubu nástroje k poč. modifikace
O_2V	30,2000	Vzdálenost při kontrole
δ_1	14° 39' 53"	velikost úhlu delta při kontrole
δ_2	30° 00' 00"	Velikost úhlu delta 2 při kontrole
δ_3	15° 20' 07"	Velikost úhlu delta 3 při kontrole
$I'L$	2,0688	Vzdálenost při kontrole
VL	29,1940	Vzdálenost při kontrole
$I'N$	27,1252	Vzdálenost při kontrole
$I'O_1$	47,1252	Vzdálenost při kontrole
δ_4	9° 09' 54"	Vzdálenost úhlu delta 4
δ_5	10° 18' 54"	Velikost úhlu delta 5
O_2O_1	47,7549	Vzdálenost při kontrole
R_{zn}	5,4230	Poloměr základního válce evolventního šneku
y_A	39,0000	Souřadnice bodu A hlavy zubu profilu hřebene

pokračování tab. 2.1

Ozna- čení	Vypočtené hodnoty	Název parametru
y_B	30,0500	Souřadnice bodu B paty zubu hřebene
α_A	82° 00' 25"	Úhel záběru v bodu A
α_B	79° 36' 11"	Úhel záběru v bodu B
α_{CA}	58° 01' 00"	Úhel profilu Archimedova šneku
α_C	80° 43' 08"	Úhel profilu evolventního šneku
l_z	68,5467	Délka závitové části nástroje
l_{kn}	3,2860	Délka nákrůžku
l_t	150,2414	Délka upínacího trnu mezi opěrymi ložisky
D_{kn}	51,2000	Průměr nákrůžku nástroje
S_u	0,8000	Rozměr sražení hran
k_l	9,9000	Zdvih vačky podsoustružení základního hřbetu
R_p	30,2000	Poloměr patní kružnice nástroje
D_{hl}	84,4000	Hlavový průměr nástroje pro podsoustružení
D_r	70,0000	Roztečný průměr nové odvalovací frézy
t_{cl}	12,5887	Osová rozteč na roztečné přímce
S_{rc}	6,2943	Osová tloušťka zubu hřebene na roztečné přímce
t_{cn}	12,5798	Osová rozteč frézy před kalením
l_z	75,1207	Délka frézy
S_{r1}	5,9832	Tloušťka zubu na roztečné rovině
F_z	90,3401	Složka řezného odporu
H_{hl}	5,2000	Výška hlavy zubu hřebene pro profil 1
S_{r2}	5,4832	Tloušťka zubu na roztečné rovině frézy pro profil 3
F_y	36,1360	Složka řezného odporu
T_u	36136,0256	Tuhost upnutí
H_{h2}	5,4000	Výška hlavy zubu hřebene pro profil

pokračování tab. 2.1

Označení	Vypočtené hodnoty	Název parametru
H_{kl}	9,6000	Kontrola nejslabšího místa tělesa
H_{dn}	16,0000	Hloubka zubové drážky
r_{fd}	1,6755	Poloměr zaoblení paty zubu podélných drážek
D_{nl}	33,0000	Průměr odlehčení otvoru
L_{nl}	22,5362	Délka odlehčení otvoru
D_r	67,2500	Roztečný průměr frézy
β_z	$30^\circ 24' 36''$	Úhel stoupání šroubovice
H_d	3545,7235	Stoupání šroubovice drážky
β_d	$30^\circ 24' 36''$	Úhel stoupání šroubovice sklonu drážek
t_{ce}	12,5887	Osová rozteč
R_k	21,6916	Kontrolní průměr bodu K
α_{nb}	$100^\circ 59' 59''$	Normální úhel hřbetu na boku zubu
H_t	12,5887	Stoupání šroubovice zubu hřebenu
α_{pp}	$200^\circ 07' 37''$	Profilový úhel pravochoď
α_{Lp}	$190^\circ 56' 21''$	Profilový úhel pravochoď
α_{PL}	$190^\circ 56' 21''$	Profilový úhel levochoď
α_{LL}	$200^\circ 07' 37''$	Profilový úhel levochoď
RL	1,0000	Poloměr zubu výchozího profilu

Tab. 2.2 Vypočtené hodnoty konstrukčních parametrů kuželové odvalovací frézy

Označení	Vypočtené hodnoty	Název parametru
m	6,0	modul
ω_k	15°	úhel kužele frézy
D_{hn}	180,0	vnější průměr frézy
z_f	8,0	počet hřebenů
α_d	25°	úhel drážky
l_z	109,247	délka ozubeného hřebene
l_f	115,525	délka nástroje
k	13,0	zdvih vačky
α_{rh}	10°25'15"	úhel hřbetu na hlavě zubu
hh	7,500	výška hlavy zubu frézy
hp	6,979	výška paty zubu frézy
h_z	14,479	výška zubu frézy
Dd	121,99	průměr paty podélných drážek
H_{dn}	29,005	hloubka zubové drážky
v_{fdn}	1,524	poloměr zaoblení paty zubu drážky
t	18,849	normální rozteč
s_p	9,424	tloušťka zubu na roztečné přímce
r_f	1,5	poloměr zaoblení na patě i hlavě profilu zubu
Dh_1	151,724	vnější průměr frézy - malý
Dh_2	208,275	vnější průměr frézy - velký
Ddn_1	93,715	malý průměr podélných drážek
D	60,000	průměr upínacího otvoru
Dk_1	84,000	průměr malého nákrůžku
Dk_2	140,550	průměr velkého nákrůžku
D	157,741	roztečný průměr frézy
β_{zn}	2°10'48"	úhel stoupání šroubovice zubů frézy
t_c	18,863	osová rozteč
r_{pd}	16,279	poloměr pomocné kružnice
α_{re}	10°25'42"	pracovní úhel hřbetu
α_c	20° 0'48"	úhel profilu evolventního šneku
α_{bn}	3°36'6"	normálový úhel hřbetu na boku zubu
H_z	18,86	stoupání zubu
α_{ca}	20°32'11"	úhel profilu Archimedova šneku

Označení	Vypočtené hodnoty	Název parametru
α_{PP}	20°35'34"	úhel profilu pravé strany, pravochoďový šnek
α_{PL}	20°28'48"	úhel profilu pravé strany, levochoďový šnek
α_{LP}	20°28'48"	úhel profilu levé strany, pravochoďový šnek
α_{LL}	20°35'34"	úhel profilu levé strany, levochoďový šnek

Tab. 2.3 Tabulka kódu obráběného materiálu ozubeného kola

Materiál ozubeného kola		M
Uhlíková ocel σ_{pt} do 800 MPa		M1
Uhlíková ocel σ_{pt} nad 800 MPa		M2
Ocele chromové		M3
Litina do HB = 1700 MPa		M4
Litina HB = 2120-2230 MPa		M5

Tab. 2.4 Tabulka hodnoty konstant pro stanovení řezné síly

M	Cz	Xz	Yz
M1	30,0	1,02	0,75
M2	31,0	0,9	0,76
M3	24,4	1,03	0,75
M4	11,7	1,13	0,8
M5	10,9	1,37	0,8

Tab. 2.5 Sada váček dle hodnoty k pro podtáčení

0,50	3,50	7,50
0,75	4,00	11,00
1,00	4,50	12,00
1,25	5,00	13,00
1,75	5,50	14,00
2,00	6,00	15,00
2,25	6,50	16,00
2,50	7,00	17,00
2,75	8,00	18,00
3,00	9,00	19,00
1,50	10,0	20,00

Tab. 2.6 Geometrie odvalovacího fréz

a) Vstupní data pro přímou transformaci

Označení v programu	Význam veličiny
Čelo	Druh zadání plochy čela (1,2,3,4)
Hřbet	Druh zadání plochy hřbetu (1,2,3)
I	Počet přeastření
GAMAX	Úhel γ ve směru osy x pro zadání: $\gamma_s = 0$ pro (x_n, y_n, z_n) soustavu $\gamma_s = \lambda_s$ pro (x_o, y_o, z_o) soustavu γ_p pro (x_f, y_f, z_f) soustavu
GAMAZ	Úhel γ ve směru osy z pro zadání γ_n pro (x_n, y_n, z_n) soustavu γ_o pro (x_o, y_o, z_o) soustavu γ_f pro (x_f, y_f, z_f) soustavu
LAMBDA	Nástrojový úhel sklonu ostří λ_s
KAPA	Nástrojový úhel nastavení κ_r
THETA	Úhel pro který je zadána hodnota K_a, K, K_{kk}
OMEGA	Úhel stoupání šroubovice zákl.šneku β_z na poloměru R
A	Úhel nastavení frézy
B,C	Úhly polohy bodu M
VY	Řezná rychlost na poloměru R
SX	Posuv ve směru osy x
SY	posuv ve směru osy y
ST	rychlost otáčení obrobku v bodě M
SD	Diagonální posuv
OSTR	Délka oblouku odbroušení na poloměru R
RO	Poloměr broušení podle kružnice
H	Hodnota vyhloubení při broušení dle kružnice
R	Základní poloměr frézy
RI	Výpočtový poloměr - poloha bodu M
SA	Hodnota axiálního podtáčení
SR	Hodnota radiálního podtáčení
FI	Poloviční úhel kužele kuželové frézy

Pokračování tabulky 2.6

b) Výstupní data přímé transformace

Geometrie ostří odvalovací frézy - název

Čelo 2 LAMDA dané hodnoty

Počet I = 3

tabulka

Souřadná soustava	GAMAX	GAMAZ	ALFAX	ALFAZ
Nástrojová normální		γ_n		α_n
Nástrojová ortogonální	λ_s	γ_o		α_o
Nástrojová	γ_p	γ_f	α_p	α_f
Pracovní	γ_{pe}	γ_{fe}	α_{pe}	α_{fe}
Pracovní ortogonální	λ_{se}	γ_{oe}		α_{oe}
Pracovní normální		γ_{ne}		α_{ne}

Tab. 2.7 Výsledky výpočtu řezných úhlů - transformace přímá

Dáno: Čelo = 4 (γ_f, γ_p); Hřbet = 2 (radiální podtáčení) GAMAX = 6,0, GAMAZ = 3,0; LAMDA = 0,00, KAPA = 70, THETA = 36; OMEGA = 3 A = 0,0; B = 0,0; C = 0,0 VY = 1,0; SX = 0,00; SY = 0,001 ST = 0,0524 SD = 0,00 R = 45,0 R1 = 45,0 SA = 0,00 SR = 10,0 FI = 0,00					
Soustava	GAMAX	GAMAZ	ALFAX	ALFAZ	
Nástrojová normální		4°51'		4°14'	
Nástrojová ortogonální	4°37'	4°52'		4°13'	
Nástrojová	6°0'	3°0'	11°59'	4°30'	
Pracovní	6°0'	0°0'	19°27'	7°30'	
Pracovní ortogonální	5°38'	2°2'		7°2'	
Pracovní normální		2°1'		7°4'	

Tab. 2.8 Geometrie odvalovacích fréz

a) Vstupní data pro inverzní transformaci

Pro vstupní data platí stejné zásady a označení jako byly uvedeny v tab. 2.6

Označení v programu	Význam veličiny
TYP	Druh zadání
GAMAX	Úhel γ ve směru osy x pro jednotlivá zadání $\gamma_{se} = 0$ pro soustavu (x_{ne}, y_{ne}, z_{ne}) $\gamma_{se} = \lambda_{se}$ pro soustavu (x_{oe}, y_{oe}, z_{oe}) γ_{pe} pro x_{fe}, y_{fe}, z_{fe}
GAMAZ	Úhel γ ve směru osy z pro jednotlivá zadání: γ_{ne} pro (x_{ne}, y_{ne}, z_{ne}) γ_{oe} pro (x_{oe}, y_{oe}, z_{oe}) γ_{fe} pro (x_{fe}, y_{fe}, z_{fe})
ALFAX	úhel α ve směru osy x pro jednotlivá zadání: $\alpha_e = 90^\circ$ pro (x_{ne}, y_{ne}, z_{ne}) $\alpha_e = 90^\circ - \lambda_{se}$ pro (x_{oe}, y_{oe}, z_{oe}) α_{pe} pro (x_{fe}, y_{fe}, z_{fe})
ALFAZ	Úhel α ve směru osy z pro jednotlivá zadání: α_{ne} pro (x_{ne}, y_{ne}, z_{ne}) α_{oe} pro (x_{oe}, y_{oe}, z_{oe}) α_{fe} pro (x_{fe}, y_{fe}, z_{fe})
KAPAE	Pracovní úhel nastavení K_{re}

Dále jako pro přímou transformaci viz tab. 2.6

b) Výstupní data inverzní transformace

Pořadí dat

Geometrie ostří odvalovací frézy

Zadáno: inverzní transformace

Typ: = GAMAX =

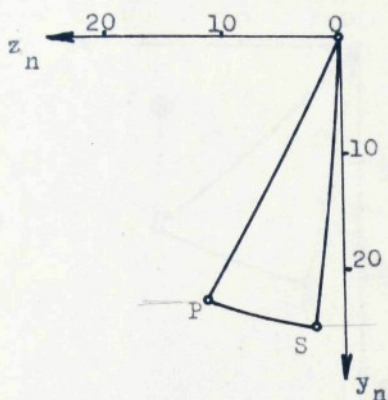
Tabulka úhlů v jednotlivých soustavách v opačném pořadí než v tab. 2.6

Tab. 2.9 Výsledky výpočtu řezných úhlů - inverzní transformace

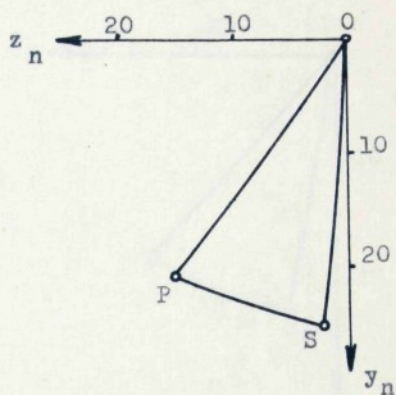
Zadáno: Inverzní transformace Typ 1 GAMAX = 0,0 GAMAZ = 2,024; ALFAX 90,0 ALFAZ 7,064 LAMDAE = 5,641, KAPAE = 70,253; THETA = 36,0; OMEGA = 3,0 A = 0,0 B = 0,0 C = 0,0 VY = 1,0; SX = 0,0; SY = 0,001; ST = 0,0524; SD = 0,0 R = 45,0 RI = 45; FI = 0,0				
Soustava	GAMAX	GAMAZ	ALFAX	ALFAZ
Pracovní normální		2°1'		7°4'
Pracovní ortogonální	5°30'	2°2'		7°2'
Pracovní	6°0'	0°0'	19°27'	7°30'
Nástrojová	6°0'	3°0'	11°59'	4°30'
Nástrojová ortogonální	4°37'	4°52'		4°13'
Nástrojová normální		4°51'		4°14'
SA = 3,707			SR = 10,0	

Tab. 3. 1 Záběrové pole frézy

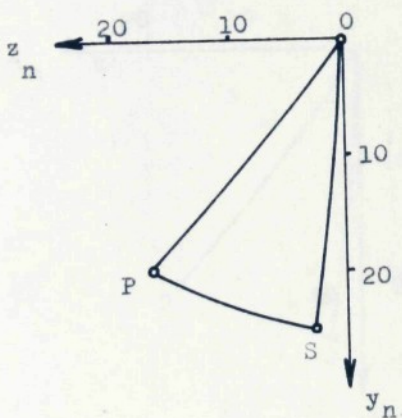
a/ Vliv posuvu s_o na velikost a tvar záběrového pole



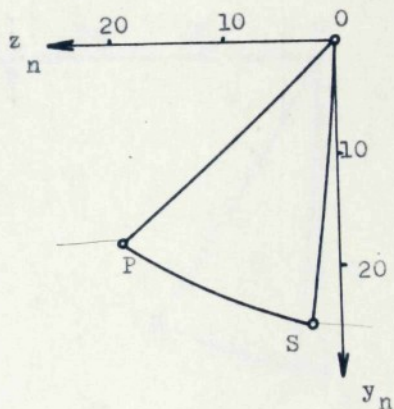
Graf 1 - $m = 3$, $z_k = 30$
 $R_h = 50$, $s_o = 2$



Graf 2 - $m = 3$, $z_k = 30$
 $R_h = 50$, $s_o = 4$



Graf 3 - $m = 3$, $z_k = 30$
 $R_h = 50$, $s_o = 5$

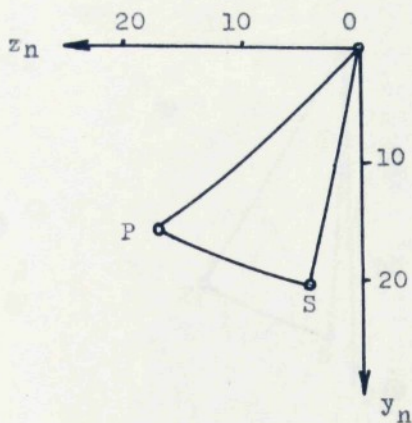


Graf 4 - $m = 3$, $z_k = 30$
 $R_h = 50$, $s_o = 7$

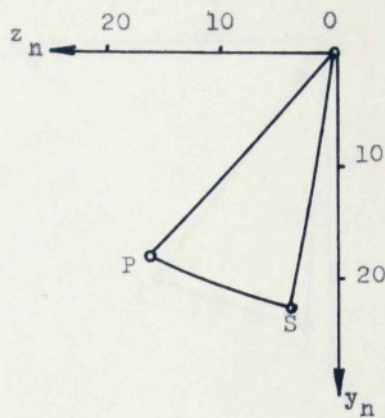
Z grafů 1, 2, 3 a 4 je vidět, že vlivem rostoucího posuvu se zvětšuje šířka záběrového pole, zatímco jeho délka zůstává nezměněna.

Tab. 3. 2 Záběrové pole frézy

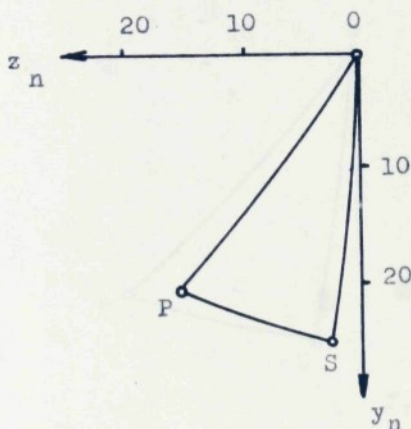
b/ Vliv poloměru R_h na velikost a tvar záběrového pole



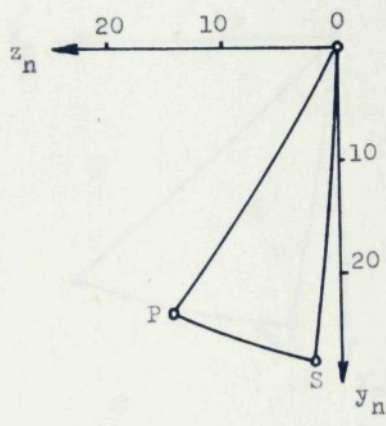
Graf 5 - $m = 3$, $z_k = 30$
 $R_h = 35$, $s_o = 4$



Graf 6 - $m = 3$, $z_k = 30$
 $R_h = 40$, $s_o = 4$



Graf 7 - $m = 3$, $z_k = 30$
 $R_h = 50$, $s_o = 4$

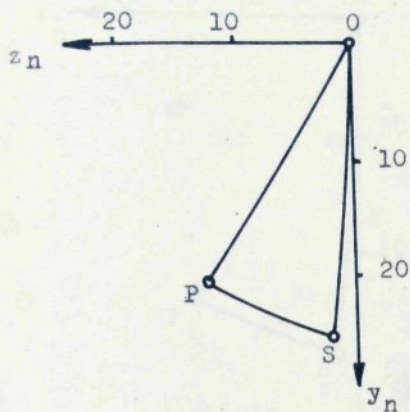


Graf 8 - $m = 3$, $z_k = 30$
 $R_h = 60$, $s_o = 4$

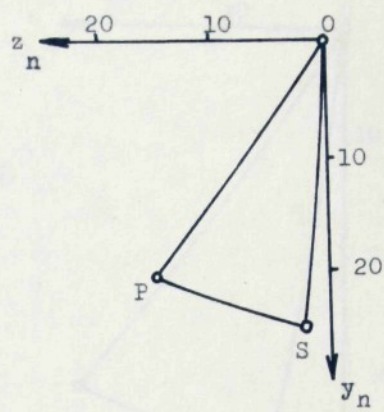
S rostoucím poloměrem nástroje R_h roste délka záběrového pole, jeho šířka zůstává v podstatě konstantní a záběrové pole se přiklání blíž k ose y_n - jak je vidět z grafů 5, 6, 7 a 8.

Tab. 3. 3 Záběrové pole frézy

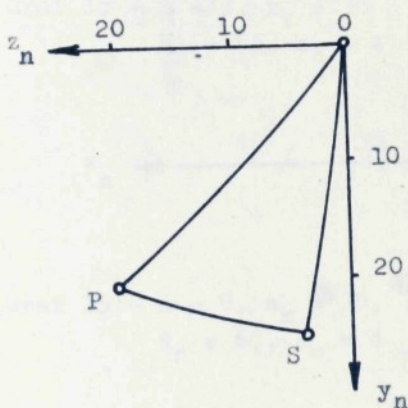
c/ Vliv počtu zubů z_k na velikost a tvar záběrového pole



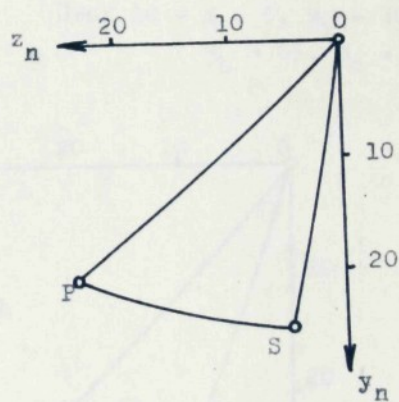
Graf 9 - $m = 3$, $z_k = 20$
 $R_h = 50$, $s_o = 4$



Graf 10 - $m = 3$, $z_k = 30$
 $R_h = 50$, $s_o = 4$



Graf 11 - $m = 3$, $z_k = 50$
 $R_h = 50$, $s_o = 4$

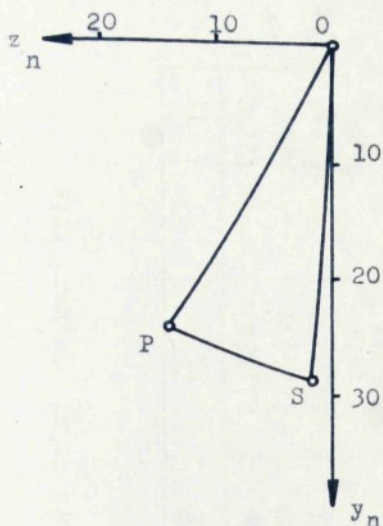


Graf 12 - $m = 3$, $z_k = 70$
 $R_h = 50$, $s_o = 4$

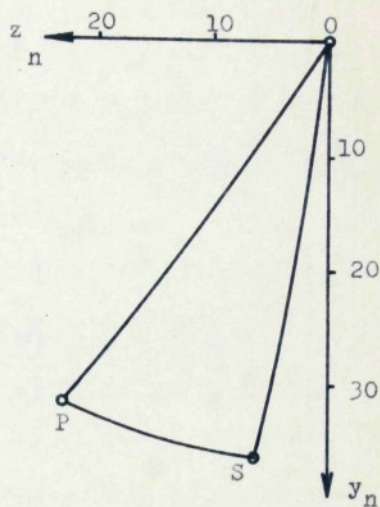
Grafy 9, 10, 11 a 12 naznačují, že při zvětšujícím se počtu zubů roste šířka záběrového pole, délka záběrového pole zůstává přibližně stejná a záběrové pole se odklání od osy y_n .

Tab. 3. 4 Záběrové pole frézy

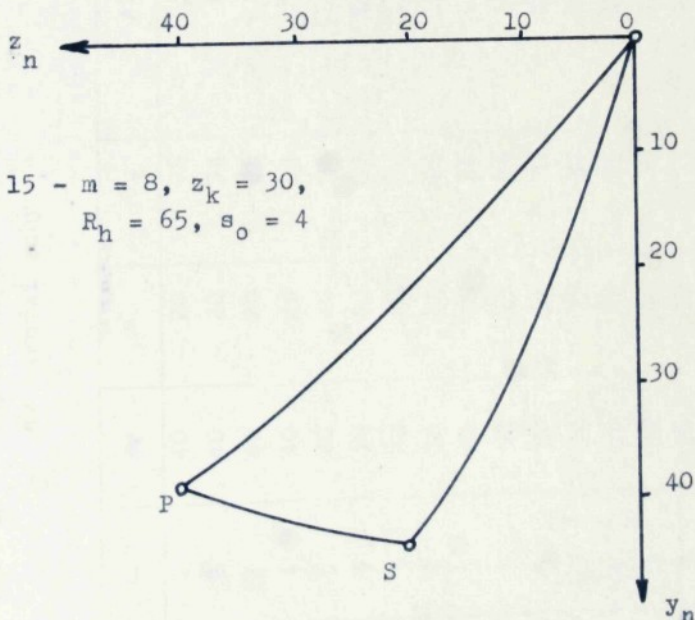
d/ Vliv modulu na tvar a velikost záběrového pole



Graf 13 - $m = 3$, $z_k = 30$
 $R_h = 65$, $s_o = 4$



Graf 14 - $m = 5$, $z_k = 30$
 $R_h = 65$, $s_o = 4$



Graf 15 - $m = 8$, $z_k = 30$,
 $R_h = 65$, $s_o = 4$

Z grafů 13, 14 a 15 je vidět, že s rostoucím modulem se zvětšuje šířka i délka záběrového pole, přičemž délka roste rychleji. Kromě toho se pole odklání prudce od osy y_n .

Tab. 3. 5 Tabulka vypočtených náběhů a přeběhů pro čelní ozubená kola se šikmými zuby

m	zk	α°	β_z°	ϕD_h	δ°	l_n	lp
1	40	20	26	50	30	13,254	1,782
2	40	20	34	63	30	21,963	3,288
3	40	20	26	80	30	30,927	5,346
4	40	20	34	90	30	38,776	6,575
5	40	20	25	100	30	46,535	8,911
5	10	20	26	100	30	39,687	8,911
5	20	20	34	100	30	42,119	8,219
5	30	15	25	100	30	44,392	12,104
5	40	15	34	100	30	46,535	11,165
5	50	15	25	100	30	4 8,572	12,104
5	50	20	26	100	30	48,572	8,911
5	50	15	30	100	35	54,615	14,144
5	50	15	35	100	40	61,874	16,033
5	50	15	50	100	45	70,675	14,993
5	50	15	55	100	50	81,537	15,944

Tab. 3. 6 Tabulka náběhů a přeběhů odvalovacích fréz s náběhovým kuželem

m	z_k	α°	β_{zs}°	ϕ_{Dh}	δ°	ω_k°	l_z	l_{sn}	l_n	l_p
2	60	20	35	63	33	18	30	10	50	3,7
5	40	20	30	100	27,6	18	52	25	65,1	7,8
10	30	15	40	150	35,3	18	105	50	123,5	25,3

Zadáání vstupních a tisk výstupních hodnot

při výpočtu optimálnícñ řezných podmínek

Nutným předpokladem pro správné zadání vstupních dat je shromáždění potřebných informací o podmínkách, za kterých se uskutečňuje daný proces obrábění.

Tyto vstupní údaje zapisujeme do formuláře vstupních dat, který se skládá ze tří částí:

1. část - podává informace o typu obráběcího stroje, nástroje s označením materiálu obrobku, čísla dílenského výkresu a čísla pracoviště.
2. část - vytvořená konstantními daty, která nám charakterizují na vstupu do samočinného počítače obrobek, způsob obrábění (hrubování nebo dokončovací), provozní podmínky stroje, konstanty obrobiteľnosti a řezivosti, krokování frézy a nákladové položky.
3. část - zde se vypisují vypočtené hodnoty, které se vytiskly na široké tiskárně; tyto hodnoty zpravidla budeme muset upravit tak, aby vyhovovaly hodnotám nastavitelným na obráběcím stroji.

Vstupní data děrujeme na pásku tak, že čtení probíhá po řádku a udává tak pořadí přečtených údajů.

Vlastní vypracování formuláře vstupních dat je provedeno v tab. 3.7

Tab. 3.9 Výsledky výpočtu optimalizovaných veličin

Příklad 1: NO = 1033 SO = 1,78 TCYKL = 2,93 NCJ = 4,98	Příklad 2: NO = 477 SO = 5,11 TCYKL = 1,00 NCJ = 10,69
Příklad 3: NO = 1033 SO = 1,78 TCYKL = 2,93 NCJ = 4,978	Příklad 4: NO = 1600 SO = 12,0 TCYKL = 12,3 NCJ = 0,133

Tab. 3.7 Formulář vstupních a výstupních údajů

Typ obráběcího stroje				Číslo dílenského výkresu:		
Nástroj				Číslo pracoviště:		
Materiál obrobku						
DF.	HL.	BT.	CP.	TOLER.	AL	
HR.	TV.	TW.	PRES.			
HZ.	DK.	SRA.	STNMIN.	STNMAX		
WSUZ.	ETA.	ATR.	LTR.	DV.		
CG.	CW.	CV.	RM.			
KROK.	KOR.	KY.	LUZ.	LA.	LB.	LF.
MN.	CN.	KZ.	KF.	ZO.	MS.	MOS.
RD.	RS.	TOS.	T102.	LK.		
IT						
Optimalizované veličiny				Vypočtené hodnoty		
NO /l/s/ (l/min.)						
SO /mm/ot./						
TCYKL /s/ (min)						
NCJ /Kčs/J/						

Tab. 3.8 Vstupní data kontrolních příkladů

Příklad č.1: 200. 3. 0. 0. 0.05 0.615

0.0 0.0 0. 2 0.001

3.38 47. 5.2 25. 2500.

3.500. 0.75 75. 170. 30.

1.2 1.3 650. 0.35

1. 1. 0.4 75. 0. 0. 0.

1.5 1260. 45. 1. 20. 7.3 8.5

254. 150. 40. 10. 8.2

Příklad č.2: 200. 3. 0. 0. 0.05 0.615

0.0 0.0 0.0 2 0.001

3.38 47. 5.2 25. 2500.

3.500 0.75 75. 170. 30.

1.2 1.3 300. 0.35

1. 1. 0.4 75. 0. 0. 0.

1.5 1260. 45. 1. 20. 7.3 8.5

254. 150. 40. 10. 8.2

Příklad č.3: 200. 3. 0. 0. 0.05 0.615

1. 0.0 0.0 2 0.001

3.38 47. 5.2 25. 2500.

3.500. 0.75 75. 170. 30.

1.2 1.3 650. 0.35

1. 1. 0.4 75. 0. 0. 0.

1.5 1260. 45. 1. 20. 7.3 8.5

254. 150. 40. 10. 8.2

Příklad č.4: 150. 5. 0. 0. 0.01 0.716

0.0 0.0 0.0 2 0.001

3.38 47. 150. 45. 5600.

8500. 0.75 75. 170. 30.

1. 1. 798. 0.425

1. 1. 0.4 80. 0. 0. 0.

1.5 1260. 45. 1. 10. 8.5 9.6

254. 30. 40. 10. 6.

Tab. 3.10 Výpočet hranic záběrového pole

Výpočet hranice 0 - P

$m = 3$, $z_1 = 30$, $i_n = 1$; $j = 10$, $\epsilon = 0,001$,

$s_0 = 2,0 \text{ mm/ot}$; $x = 50$, $R_n = 50$, $r_r = 45$,

$\beta = 0,03242$, $r_p = 41,25$; $r_h = 48,00$

ID	XN	YN	ZN
1	50,00	0,00	0,00
2	49,94	2,27	1,030
3	49,76	4,55	2,06
4	49,53	6,83	3,12
5	49,16	9,10	4,20
6	48,68	11,38	5,31
7	48,09	13,65	6,46
8	47,39	15,65	7,67
9	46,56	18,20	8,95
10	45,61	20,46	10,31
11	44,53	22,73	11,76

Výpočet hranice 0 - S

ID	XN	YN	ZN
1	50,	0,00	0,00
2	49,93	2,50	0,21
3	49,74	5,00	1,43
4	49,43	7,51	0,65
5	48,98	10,01	0,88
6	48,40	12,52	1,12
7	47,68	15,02	1,37
8	46,82	17,52	1,64
9	45,81	20,02	1,94
10	44,63	22,53	2,25
11	43,28	25,03	2,61

Výpočet hranice P - S

$z_{nP} = 11,76978$ $z_{nS} = 2,61308$			
	XN	YN	ZN
1	43,28	25,03	2,61
2	43,32	24,95	3,52
3	43,38	24,84	4,44
4	43,46	24,71	5,36
5	43,56	24,54	6,27
6	43,67	24,33	7,19
7	43,81	24,09	8,10
8	43,96	23,81	9,02
9	44,13	23,49	9,93
10	44,32	23,13	10,85
11	44,53	22,73	11,76

Tab. 3.11

Souřadnice trajektorií bodů ostří odvalovací frézy

Souřadnice základních bodů A,B,C,D ve výchozí poloze
(počátku souřadné soustavy x_n, y_n, z_n)

ZA = 1,012; ZB = 3,721; ZC = 5,704; ZD = 8,413; K = 0,943

Číslo zubu	Číslo bodu zubu	Číslo roviny	Souřad- nice ře- zových rovin	Souřadnice trajektorií bodů			
			y_5	x	y	z	
1	2	3	4	5	6	7	
1	16	6	22,732	-1,979	-8,973	-12,712	
		7	23,498	-1,955	-8,976	-12,802	
	15	5	18,186	-3,095	-8,349	- 7,357	
		6	22,732	-2,223	-8,474	-11,799	
		7	23,498	-2,201	-8,477	-11,890	
		8	24,264	-2,180	-8,479	-11,976	
		9	25,030	-2,160	-8,482	-12,058	
	14	5	dtto	-3,240	-7,851	- 6,407	
		6		-2,453	-7,976	-10,866	
		7		-2,433	-7,978	-10,957	
		8		-2,413	-7,981	-11,044	
		9		-2,395	-7,983	-11,125	
	13	5	dtto	-3,367	-7,353	- 5,434	
		6		-2,669	-7,478	- 9,908	
		7		-2,650	-7,480	-10,000	
		8		-2,632	-7,483	-10,087	
		9		-2,615	-7,485	-10,169	
	12	5	dtto	-3,476	-6,856	- 4,440	
		6		-2,868	-6,980	- 8,928	
		7		-2,851	-6,983	- 9,021	
		8		-2,836	-6,986	- 9,108	
		9		-2,819	-6,988	- 9,190	

pokračování tab. 3.11

1	2	3	4	5	6	7
	11	5	dtto	-3,566	-6,360	-3,428
		6		-3,049	-6,484	-7,928
		7		-3,034	-6,486	-8,020
		8		-3,020	-6,489	-8,108
		9		-3,006	-6,491	-8,191
	16	5	dtto	10,126	-9,131	-34,367
		6		13,392	-9,398	-37,480
		7		13,462	-9,404	-37,541
		8		13,529	-9,409	-37,599
		9		13,592	-9,414	-37,653
	15	5	dtto	9,451	-8,615	-33,659
		6		12,655	-8,877	-76,840
		7		12,724	-8,882	-36,902
		8		12,790	-8,888	-36,962
		9		12,852	-8,893	-37,017
	14	5	dtto	8,777	-8,100	-32,926
		6		11,918	-8,356	-36,172
		7		11,986	-8,362	-36,236
		8		12,050	-8,367	-36,296
		9		12,111	-8,372	-26,354
	13	5	dtto	8,107	-7,586	-32,167
		6		11,182	-7,837	-35,477
		7		11,249	-7,842	-35,542
		8		11,312	-7,848	-35,604
		9		11,372	-7,853	-35,662
	12	4	dtto	4,696	-6,852	-27,657
		5		7,444	-7,073	-31,381
		6		10,450	-7,318	-34,755
		7		10,516	-7,324	-34,822
		8		10,577	-7,329	-34,885
		9		10,636	-7,334	-34,945

pokračování tab. 3.11

	2	3	4	5	6	7
	11	4	dtto	4,118	-6,345	-26,787
		5		6,787	-6,560	-30,570
		6		9,722	-6,801	-34,507
		7		9,787	-6,806	-34,076
		8		9,847	-6,811	-34,140
		9		9,905	-6,816	-34,201
	10	4	dtto	3,413	-5,714	-25,669
		5		5,982	-5,924	-29,523
		6		8,826	-6,158	-33,038
		7		8,888	-6,163	-33,108
		8		8,947	-6,168	-33,174
		9		9,003	-6,172	-33,237

Tab. 4.1 - MATERIÁL. Třídy obrobitelnosti ocelí používaných na odvalovací frézy

Materiál	Soustružení	Frézování	Vrtání	Broušení
19802.3	10b	10b	10b	III.
19810.3	9b	9b	9b	III.
19824.3	10b	10b	10b	III.
19826.3	10b	10b	10b	III.
19854.3	9b	8b	8b	III.
19855.3	8b	7b	7b	III.
19856.3	8b	7b	7b	III.
19857.3	8b	7b	7b	III.
15230.3	12b	12b	12b	IV.
15240.3	13b	13b	13b	IV.
14260.3	10b	10b	10b	IV.
12031.3	14b	14b	14b	IV.

Tab. 4.2 - Tabulka řezných podmínek pro broušení čel na brusce BK 5/1500.

	$L_s = /d_{hn}-d_k//2; 0,3 d_n$							
	6,3	10	16	20	25	40	63	80
	S_p							
20	1,8	1,6	1,4	-	-	-	-	-
32	1,6	1,3	0,9	0,7	-	-	-	-
50	1,3	0,9	0,7	0,6	0,4	0,3	-	-
80	0,9	0,7	0,6	0,4	0,2	0,14	-	-
125	0,7	0,6	0,4	0,2	0,14	0,1	0,07	-
200	0,6	0,4	0,2	0,14	0,1	0,07	0,05	0,04
300	0,4	0,2	0,14	0,1	0,07	0,05	0,04	0,03

S_p - přísuv /mm/min/

Tab. 4.3 - T_abulka řezných podmínek a vedlejšího času pro vrtání upínacího otvoru.

d	8b	9b	10b	12b	13b	14b	8b	9b	10b	12b	13b	14b	60	80	100	200	300	400
20	145	174	208	291	349	415	0,17	0,18	0,20	0,22	0,23	0,25	1,7	1,8	2,0	4,4	8,5	9,2
25	105	126	150	210	252	300	0,19	0,20	0,21	0,24	0,25	0,27	1,6	1,7	1,9	3,6	7,2	8,1
30	88	105	125	175	210	250	0,19	0,20	0,22	0,25	0,26	0,28	1,6	1,7	1,8	3,4	7,0	7,6
35	68	82	98	137	164	195	0,21	0,22	0,23	0,27	0,28	0,30	1,6	1,6	1,7	3,3	6,9	7,0
45	58	69	83	116	139	165	0,23	0,24	0,26	0,29	0,31	0,33	1,5	1,6	1,7	3,3	6,5	6,8
55	46	55	65	91	109	130	0,24	0,26	0,27	0,31	0,33	0,35	-	1,5	1,6	3,9	5,9	6,2
60	37	44	53	74	88	105	0,25	0,27	0,28	0,32	0,34	0,36	--	1,7	1,6	4,1	4,9	5,4
70	30	36	43	60	71	85	0,26	0,27	0,29	0,33	0,35	0,37	-	-	-	-	-	-

d - průměr vrtáku

n - otáčky nástroje /1/min/

t_v - vedlejší čas /min/

l - délka vrtaného úseku

Tab. 4.4 - Tabulka řezných podmínek a vedlejšího času pro vyhrubování upínacího otvoru

d	8b	9b	10b	12b	13b	14b	8b	9b	10b	12b	13b	14b	30	60	90	140	200	250	330
20	156	182	208	234	247	260	0,18	0,19	0,21	0,26	0,29	0,32							
25	120	140	160	180	190	200	0,20	0,22	0,24	0,30	0,33	0,37	1,3	1,6	1,8	2,1	2,5	2,9	3,6
30	93	109	124	140	147	155	0,23	0,25	0,27	0,34	0,38	0,42							
40	60	70	80	90	95	100	0,28	0,30	0,33	0,4	0,45	0,50							
50	45	53	60	68	71	75	0,31	0,34	0,37	0,46	0,51	0,57	1,4	1,7	1,9	2,2	2,6	3,0	3,7
60	33	30	44	50	52	55	0,36	0,39	0,42	0,52	0,59	0,65							
70	27	32	36	41	43	45	0,41	0,44	0,48	0,59	0,67	0,74	1,5	1,8	2,0	2,3	2,7	3,1	3,8

d - průměr výhrubníku

Tab. 4.5 - Tabulka řezných podmínek a vedlejšího času pro vystružování upínacího otvoru

a ₃	d	8b	9b	10b	12b	13b	14b	8b	9b	10b	12b	13b	14b	30	60	90	140	200	250	330
0,25	20	54	63	72	81	86	90	0,26	0,29	0,31	0,38	0,43	0,48							
0,25	25	44	51	58	66	69	73	0,32	0,35	0,38	0,46	0,52	0,58	1,3	1,5	1,7	2,0	2,3	2,8	3,4
0,30	30	36	42	48	54	57	60	0,37	0,40	0,44	0,54	0,60	0,67							
0,35	40	25	29	34	38	40	42	0,44	0,48	0,52	0,64	0,72	0,80							
0,40	50	19	22	26	29	30	32	0,52	0,57	0,62	0,76	0,86	0,95	1,5	1,7	1,9	2,2	2,6	3,2	3,8
0,40	60	15	18	20	23	24	25	0,59	0,64	0,70	0,86	0,96	1,07							
0,50	70	12	14	16	18	19	20	0,66	0,72	0,78	0,96	1,08	1,2	1,8	2,0	2,2	2,5	3,0	3,5	4,2

d - průměr výstředníku /mm/

a₃ - přídavek na vystruhování /mm/

Tab. 4.6 - Tabulka hlavního času pro soustružení zápichů

t_h	P r ů m ě r o b r o b k u											
	do 60			do 100			do 150			do 200		
b/h	14b	13b 12b	11b 10b	14b	13b 12b	11b 10b	14b	13b 12b	11b 10b	14b	13b 12b	11b 10b
2,5/ 1,2	0,25	0,3	0,4	0,3	0,4	0,5	0,4	0,5	0,7	0,5	0,7	0,9
4,5/ 2,4	0,35	0,5	0,6	0,4	0,5	0,7	0,6	0,8	1,0	0,7	0,9	1,2

b - šířka zápichu /mm/

h - hloubka zápichu /mm/

Tab. 4.7 - Tabulka řezných podmínek pro soustružení

	vnější						vnitřní					
	8b	9b	10b	12b	13b	14b	8b	9b	10b	12b	13b	14b
v	29	35	44	72	88	110	8,5	10,3	13,0	21	26	32
s	0,3						0,4					

Tab. 4.8 - Tabulka vedlejšího času pro soustružení čela

Lisovat na trn	$t_{v1} = 0,05/d_n - 2a_3/-0,5$					
Upnout mezi hroty	G obrobku /kg/					
	5	10	15	20	30	100
	1,2	1,2	1,7	2,5	4,0	5,0
Zarovnat čela	$t_{v3} = 0,63 + 0,003/D - d/$					

$$t_v = \sum_{i=1}^n t_i$$

D - max. průměr /mm

d - min. průměr /mm

d_n - průměr upínacího otvoru

a_3 - přídavek na vystru-
žování /mm/

Tab. 4.9 - Tabulka řezných podmínek pro frézování řezných drážek

$\alpha_f=30^\circ$	D_f	h	s						v							
			7b	8b	9b	10b	12b	13b	14b	7b	8b	9b	10b	12b	13b	14b
do m5	63	0,5	66	82	99	118	170	204	257	12	13	15	18	26	31	39
		5	54	66	80	96	138	165	208	9	11	14	16	23	28	35
		10	18	22	27	32	46	55	69	5	8	12	15	21	25	31
do m10	90	10	19	23	28	34	39	45	56	7	9	11	13	17	21	28
		15	13	16	19	22	29	38	49	7	8	9	11	18	20	27
		20	12	13	14	16	19	27	38	6	7	9	10	11	15	20
do m14	120	20	13	14	16	20	28	36	41	5	7	8	10	12	14	19
		25	12	13	15	18	21	28	37	4	5	7	8	9	11	15
		28	12	12	14	16	19	25	30	4	5	6	7	8	10	13
do m20	160	30	14	16	18	20	24	30	33	4	5	6	7	8	9	12
		35	12	14	16	18	20	24	29	3	4	5	6	6	7	10
		40	10	12	14	16	19	23	28	2	3	4	5	6	7	9

D_f - průměr frézy /mm/

s - posuv /mm/min/

h - hloubka frézování /mm/

v - řezná rychlost /m/min/

Tab. 4.10 - Tabulka řezných podmínek pro frézování drážek řezných hřebenů

$\beta = 90^\circ$	D_f	z	h	b	s						v					
					8b	9b	10b	12b	13b	14b	8b	9b	10b	12b	13b	14b
	56	16	4	12,5	58	70	84	120	144	181	10	12	14	20	24	30
			8	13,5	32	39	46	67	80	101	8	10	12	18	21	26
	70	18	5	15,7	52	62	74	107	128	161	8	10	12	18	21	26
			10	19,5	27	33	39	57	68	86	7	9	10	15	18	23
	90	20	8	25,0	38	46	54	78	94	118	7	8	10	14	17	21
			15	29,5	16	19	23	33	40	50	6	8	9	13	16	20

D_f - průměr frézy /mm/
 z - počet zubů frézy
 h - hloubka frézování /mm/
 b - šířka frézování /mm/
 s - posuv /mm/min/
 v - řezná rychlost /m/min/

Tab. 4.11 - Tabulka řezných podmínek pro frézování kotoučovou frézou

	D_f	$h = m$	s							v						
			7b	8b	9b	10b	12b	13b	14b	7b	8b	9b	10b	12b	13b	14b
do m6	80	3	91	104	125	149	215	257	324	9	11	13	16	23	27	34
		5	64	79	95	114	164	196	247	8	10	12	15	21	25	32
		10	51	57	68	82	118	141	178	7	9	11	13	19	23	29
do m10	100	5	48	62	74	89	128	153	193	8	9	11	13	19	23	29
		10	31	42	50	60	86	103	130	7	8	10	12	18	21	26
do m14	125	10	32	40	48	57	83	99	125	8	9	11	13	18	22	28
		20	17	20	24	28	41	49	62	7	8	10	12	17	20	25
do m20	160	10	29	35	42	52	73	87	110	7	9	11	13	18	22	28
		20	18	21	25	30	43	52	66	6	8	9	10	15	18	23
		40	8	10	12	15	21	25	32	6	7	8	10	14	17	21

D_f - průměr frézy /mm/

h - hloubka frézování /mm/

Tab.4.12 - Tabulka řezných podmínek pro broušení upínacího otvoru

Délka "Ln" /mm/	Průměr otvoru obrobku											
	10		25		40		65		100			
	i	s	i	s	i	s	i	s	i	s	i	s
25	47	1,2	42	5,2	38	7,8	47	8,4	52	9,6		
40	45	2,0	43	6,0	43	10,0	48	10,2	52	11,1		
65	-	-	45	6,8	45	11,5	50	12,0	54	12,9		
100	-	-	47	7,4	47	13,4	55	13,8	57	14,3		
160	-	-	-	-	49	14,8	59	15,8	63	16,5		
220	-	-	-	-	51	16,3	61	16,7	68	17,9		
280	-	-	-	-	-	-	66	17,6	73	19,1		
320	-	-	-	-	-	-	69	19,2	78	213		

i - počet záběrů

s - podélný posuv /mm/ot/

Tab. 4.13 - Tabulka řezných podmínek pro tvarové frézování

D_f	b	h	10b	12b	13b	14b	10b	12b	13b	14b
45	3, 2-4	0,2 1,6	93 122	119 138	131 149	150 171	16 16	22 20	28 26	34 30
63	8 - 10	0,4 4,0	64 87	79 112	95 130	122 148	16 15	20 19	29 26	38 33
80	16	0,5 4,0 8,0	44 98 58	58 110 69	71 128 83	92 145 106	15 14 13	20 19 16	29 25 23	38 36 31
100	28	0,5 7,0 14,0	29 64 29	39 79 38	50 94 49	72 115 67	15 12 10	19 18 14	28 26 20	41 38 31

h - hloubka řezu /mm/
s - posuv /mm/min/

D_f - průměr frézy /mm/
z - počet zubů frézy
b - šířka frézované drážky /mm/

Tab. 4.14 - Tabulka řezných podmínek pro broušení
vnějšího průměru

Délka úseku "l"/mm/	Průměr obrobku											
	10		25		40		65		100		160	
	i	s	i	s	i	s	i	s	i	s	i	s
65	38	4	20	8	17	10	18	12	19	15	-	-
100	38	4	27	10	25	15	23	16	25	19	37	20
160	-	-	31	14	26	16	27	18	30	21	41	22
250	-	-	34	15	28	17	30	19	33	23	43	24
320	-	-	37	16	31	20	34	22	36	27	46	26

i - počet záběrů

s - podélný posuv /mm/ot/ obrobku

Tab.4.15 - Tabulka řezných podmínek pro broušení obvodem

šířka plochy	a	n_z	i
20 mm	0,25	18	3
50 mm	0,30	18	3

a - přídavek na broušení /mm/

n_z - počet zdvihů stolu /l/min/

i - počet záběrů

Tab.4.16- Tabulka řezných podmínek pro vrtání a
upínání otvorů

D	s		n			
	14b	13b, 12b, 10b	14b	13b	12b	10b
4	0,06	0,08	1540	1280	1060	740
6	0,09	0,09	1030	855	710	500
8	0,11	0,11	780	640	540	370
10	0,13	0,13	610	500	420	290
12	0,14	0,14	500	415	350	240
15	0,17	0,17	380	315	260	182
20	0,20	0,20	260	216	180	125

D - průměr vrtáku /mm/

s - posuv /mm/ot/

n - otáčky nástroje /ot/min/

Tab.4.17- Tabulka řezných podmínek pro řezání vnitřních
závitů

D	s	n			
	14b, 13b, 12b 10b	14b	13b	12b	10b
M 6	0,75	245	195	155	98
M 8	0,75	210	170	135	84
M 10	0,75	180	145	110	72
M 12	1,30	155	125	100	62
M 16	1,00	135	110	85	54
M 20	1,00	120	95	75	48

D - průměr závitníku /mm/

s - posuv /mm/

n - otáčky nástroje /l/min/

Tab. 4.18 - Tabulka hlavního času pro řezání vnitřních závitů

Hloubka	M 5	M 6	M 8	M 10	M 12	M 16	M 20
10	2,2	2,1	2,0	2,0	1,9	2,0	1,9
20	3,5	3,3	3,1	3,2	3,0	3,1	3,0
30	-	-	4,3	4,4	4,1	4,2	4,1
40	-	-	5,4	5,4	5,1	5,4	5,1

Tab. 4.19

m	D _n	L _n	D _n	l _k	z _f	G
1	50	32	22	3	14	0,5
1,25	50	40	22		14	0,6
1,5	63	45	27		12	0,8
1,75	63	50	27		12	0,9
2	63	50	27		12	1,0
2,25	71	56	27		12	1,2
2,5	71	63	27		12	1,3
2,75	71	63	27		12	1,4
3	80	71	32		12	1,6
3,25	80	71	32		12	1,8
3,5	80	71	32		12	2,0
3,75	90	80	32		12	2,6
4	90	80	32		12	2,8
4,5	90	90	32		10	3,5
5	100	100	32	4	10	4,4
5,5	112	112	40		10	4,4
6	112	112	40		10	6,5
6,5	112	118	40		10	7,0
7	118	125	40		10	7,9
8	125	140	40		10	8,6
9	140	150	40		10	11,3
10	150	170	40		10	13,0
11	160	180	50	5	9	14,5
12	170	200	50		9	16,5
14	190	224	50		9	27,0
16	212	250	60	6	9	38,5
18	236	280	60		9	48,0
20	250	300	60		9	55,0

m - modul

D_n - vnější průměr /mm/

L_n - celková délka /mm/

D_n - průměr upínacího otvoru

l_k - délka nákrůžku /mm/

z_f - počet zubových drážek

G - hmotnost 1 ks v kg

Tab. 4.20 - Matematický model výběru operací

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Pořadové číslo	Číslo operace	monolitné				skladané				
		Číslo úkonu	$m \leq 2$	$m \leq 8$	$m > 8$	Saazor	Samputensili	Klingelnsberg	VN II	SMZ
1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0
2		2	0	0	0	1	1	1	1	1
3	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1
4	3	1	0	0	0	1	1	1	1	1
5	4	1	0	0	0	1	1	1	1	1
6	5	1	1	1	1	1	1	1	1	1
7		2	1	1	1	1	1	1	1	1
8		3	1	1	1	1	1	1	1	1
9		4	1	1	1	0	0	0	0	0
10		5	0	0	0	1	1	1	1	1
11		6	0	0	0	0	0	1	1	0
12		7	0	0	0	0	1	0	1	0
13		8	0	0	0	0	0	0	1	0
14		9	1	1	1	1	1	1	1	1
15		10	0	0	0	0	0	1	0	0
16		11	0	0	0	0	0	0	1	0
17		12	1	1	1	0	0	1	1	1
18		13	1	1	1	1	1	1	1	1
19		14	1	1	1	0	0	1	1	1
20		15	0	0	0	0	0	1	0	0
21		16	0	0	0	0	0	1	0	0
22	6	1	1	1	1	1	1	1	1	1
23	7	1	1	1	1	1	1	1	1	1
24		2	1	1	1	1	1	1	1	1
25	8	1	0	0	0	0	0	1	0	0
26		2	0	0	0	0	1	0	0	0
27		3	0	0	0	1	0	0	1	1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
28	9	1	0	1	1	0	0	0	1	0
29	10	1	0	1	0	0	0	0	0	0
30		2	1	0	1	0	0	0	0	0
31	11	1	1	1	1	1	1	1	1	1
32	12	1	1	1	1	1	1	1	1	1
33		2	1	1	1	1	1	1	1	1
34	13	1	1	0	0	0	0	0	0	1
35		2	0	1	1	0	0	0	0	0
36	14	1	0	0	0	0	0	1	0	0
37		2	0	0	0	0	1	0	0	0
38		3	0	0	0	1	0	0	1	1
39	15	1	1	1	1	0	0	0	0	0
40	16	1	1	1	1	0	0	0	1	1
41	17	1	1	1	1	0	0	0	1	1
42	18	1	0	0	0	0	1	0	0	0
43		2	0	0	0	1	0	0	0	0
44	19	1	1	1	1	0	0	0	0	0
45	20	1	1	1	1	0	0	0	0	0
46	21	1	1	1	1	0	0	0	0	0
47	22	1	1	1	1	1	1	1	1	1
48	23	1	1	1	1	1	1	1	1	1
49		2	1	1	1	1	1	1	1	1
50		3	0	0	0	1	1	1	1	0
51		4	0	0	0	0	1	1	1	0
52	24	1	0	0	0	0	0	1	0	0
53		2	0	0	0	0	1	0	0	0
54		3	0	0	0	1	0	0	1	1
55	25	1	0	0	0	1	0	0	0	0
56	26	1	1	0	0	0	0	0	0	0
57	27	1	1	1	1	0	0	0	1	0
58	28	1	1	1	1	0	0	0	0	0
59	29	1	1	1	1	0	0	0	0	0
60	30	1	0	0	0	0	0	1	0	0
61		2	0	0	0	0	0	1	0	1
62		3	0	0	0	0	1	0	0	0
63		4	0	0	0	0	0	0	1	0

pokračování tab. 4.20

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
64		5	0	0	0	0	0	0	1	0
65	31	1	0	0	0	0	0	1	0	0
66	32	1	0	0	0	0	0	1	0	0
67		2	0	0	0	0	0	1	0	1
68		3	0	0	0	0	1	0	0	0
69		4	0	0	0	0	0	0	1	0
70	33	1	1	1	1	1	1	1	1	1
71	34	1	1	1	1	0	0	0	0	0
72	35	1	0	0	0	1	1	1	1	1

Tab. 4.21 Technologický postup výroby monolitní frýzy

modul m = 12
materiál ČSN 19854.3

Polotovar: průměr = 179,5
déka = 204,0
hmotnost = 40,5

Číslo operace dle tab. 4.22	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Průměr obrobku																		
Délka těsku																		
Přídavek																		
Posuv																		
Hloubka řezu																		
Hezná rychlost																		
Otáčky obrobku																		
Otáčky nástroje																		
Počet záběrů																		
Čas hlavní																		
Čas vedlejší																		
Čas obsluhy																		
Čas přípravy a zakončení /min/																		
Čas celkový /min/																		
Třída																		
Sazba /Kčs/hod./																		
Cena /Kčs/																		

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
39	0.0	190.30	0.20	12.00	0.02	35.	0.	1967.	10.	10.3	5.1	1.8	30.	47.2	6	10.6	8.30
40	0.0	0.00	0.00	ručné	0.00	81.	0.	150.	1.	15.3	2.0	2.1	20.	39.3	5	9.4	6.20
41	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.	0.	0.	0.	7.3	1.2	0.8	8.	17.3	5	9.4	2.70
44	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.	0.	0.	0.	0.0	0.0	0.0	0.	170.3	6	10.6	30.10
45	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.	0.	0.	0.	0.0	0.0	0.0	0.	9.8	5	9.4	1.50
46	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.	0.	0.	0.	0.0	0.0	0.0	0.	11.5	5	9.4	1.80
47	50.0	200.30	0.13	16.70	0.002	35.	782.	26752.	61.	1.0	6.4	0.9	20.	28.3	6	10.6	5.00
48	0.0	190.00	0.15	0.05	0.15	35.	782.	1967.	1.	6.0	1.9	1.0	15.	23.9	5	9.4	3.70
49	0.0	200.00	0.15	0.60	0.15	35.	782.	1967.	1.	0.5	1.7	0.3	0.	2.5	5	9.4	0.40
57	0.0	2691.67	0.10	0.12	0.00	891.	6.	16000.	85.	23.6	24.0	5.7	50.	103.3	8	13.6	23.40
58	0.0	190.00	0.10	12.00	0.02	35.	0.	2623.	5.	3.8	5.1	1.1	30.	40.0	5	9.4	6.30
59	170.0	190.00	0.10	ručné	0.03	35.	0.	2623.	3.	40.2	5.7	5.5	35.	86.4	7	12.0	17.30
70	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.	0.	0.	0.	0.0	0.0	0.0	0.	5.0	5	9.4	0.80
71	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.	0.	0.	0.	63.3	46.6	0.0	30.	139.9	10	12.0	29.00

Číslo úkolu	Název operace (úkolu)	Průměr obvodu D / mm	Délka vlny λ / mm	Pomocné zařízení			Přídavek p / mm	Pocuv a mm/s	Hl. Res. frekvencí t / mm min	Měrný obměr	Měrný čas / min	Hlavní měřící přístroj	Přístroj na měření teploty	Číslo díla							
				stroj	nástroj	šifra									zif. přístroj						
2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
1	1	D_{om}	D_{om}	Ketouč. pila H 350	Ketouč. ČSN 27210	ČSN 251125	Prisma	D_{om}	0,1	-	25	-	$\frac{1000}{4}$	1	L_{an}	$0,35 + 0,502 D_{om}$	$0,12(t+t_v)$	20	Z_{t_1}	5	9,40
2	2	D_{es}	D_{es}	"	"	"	"	D_{es}	0,1	-	25	-	"	1	"	"	"	17	Z_{t_1}	5	9,40
3	3	d_{n-3}	d_{om}	Soustřed. SU 50	Vrták ČSN 221140	Peavka ČSN 251230	-	d_{n-3}	tab. 4.3	-	$\frac{D_{n-3}}{1000}$	tab. 4.3	-	1	L_{an}	tab. 4.3	-	35	Z_{t_1}	6	10,60
4	4	-	-	Elektr. pec	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	15	5	9,40
5	5	$d_{n-3} + 2a_3$	d_{n-3}	Soustřed. SU 50	Výhrubník ČSN 221411	Peavka ČSN 251230	-	$\frac{3+2a_3}{2}$	tab. 4.4	-	$\frac{D_{n-3}}{1000}$	tab. 4.4	-	1	L_{an}	tab. 4.4	$0,12(t+t_v)$	-	Z_{t_1}	5	10,60
6	6	$d_{n-0,5}$	$d_{n-0,5}$	"	Vystřed. ČSN 221312	Kalibr ČSN 251284	-	tab. 3	tab. 4.5	-	-	tab. 4.5	-	1	L_{an}	tab. 4.5	-	-	Z_{t_1}	6	10,60
7	7	-	D_{om}	"	Nůž ČSN 223712	Peavka ČSN 251230	trn	$\frac{D_{om}-1}{2}$	0,3	1,5	tab. 4.7	1000	-	1	L_{2en}	tab. 4.8	-	-	Z_{t_1}	6	10,60
8	8	d_{n-1}	L_{n-1}	"	"	"	"	$\frac{D_{n-1}-s}{2}$	"	2	"	"	-	p/2	L_{1an}	$0,33 + 0,0012 L$	-	-	Z_{t_1}	5	10,60
9	9	d_{n-1}	L_{n-1}	"	"	"	"	$\frac{D_{n-1}-s}{2}$	"	"	"	"	-	"	"	"	-	-	Z_{t_1}	5	10,60
10	10	d_{n-1}	L_{n-1}	"	"	"	"	$\frac{d_{n-1}-d_{n-2}}{2}$	"	"	"	"	-	"	"	"	-	-	Z_{t_1}	6	10,60
11	11	d_{n-1}	L_{n-1}	"	"	"	"	$\frac{d_{n-1}-d_{n-2}}{2}$	"	"	"	"	-	"	"	"	-	-	Z_{t_1}	6	10,60
12	12	d_{n-1}	L_{n-1}	"	"	"	"	$\frac{d_{n-1}-d_{n-2}}{2}$	"	"	"	"	-	"	"	"	-	-	Z_{t_1}	6	10,60
13	13	d_{n-1}	L_{n-1}	"	"	"	"	$\frac{d_{n-1}-d_{n-2}}{2}$	"	"	"	"	-	"	"	"	-	-	Z_{t_1}	6	10,60
14	14	d_{n-1}	L_{n-1}	"	"	"	"	$\frac{d_{n-1}-d_{n-2}}{2}$	"	"	"	"	-	"	"	"	-	-	Z_{t_1}	6	10,60
15	15	d_{n-1}	L_{n-1}	"	"	"	"	$\frac{d_{n-1}-d_{n-2}}{2}$	"	"	"	"	-	"	"	"	-	-	Z_{t_1}	6	10,60
16	16	d_{n-1}	L_{n-1}	"	"	"	"	$\frac{d_{n-1}-d_{n-2}}{2}$	"	"	"	"	-	"	"	"	-	-	Z_{t_1}	6	10,60
17	17	d_{n-1}	L_{n-1}	"	"	"	"	$\frac{d_{n-1}-d_{n-2}}{2}$	"	"	"	"	-	"	"	"	-	-	Z_{t_1}	6	10,60
18	18	d_{n-1}	L_{n-1}	"	"	"	"	$\frac{d_{n-1}-d_{n-2}}{2}$	"	"	"	"	-	"	"	"	-	-	Z_{t_1}	6	10,60
19	19	d_{n-1}	L_{n-1}	"	"	"	"	$\frac{d_{n-1}-d_{n-2}}{2}$	"	"	"	"	-	"	"	"	-	-	Z_{t_1}	6	10,60
20	20	d_{n-1}	L_{n-1}	"	"	"	"	$\frac{d_{n-1}-d_{n-2}}{2}$	"	"	"	"	-	"	"	"	-	-	Z_{t_1}	6	10,60
21	21	d_{n-1}	L_{n-1}	"	"	"	"	$\frac{d_{n-1}-d_{n-2}}{2}$	"	"	"	"	-	"	"	"	-	-	Z_{t_1}	6	10,60
22	22	d_{n-1}	L_{n-1}	"	"	"	"	$\frac{d_{n-1}-d_{n-2}}{2}$	"	"	"	"	-	"	"	"	-	-	Z_{t_1}	6	10,60
23	23	d_{n-1}	L_{n-1}	"	"	"	"	$\frac{d_{n-1}-d_{n-2}}{2}$	"	"	"	"	-	"	"	"	-	-	Z_{t_1}	6	10,60
24	24	d_{n-1}	L_{n-1}	"	"	"	"	$\frac{d_{n-1}-d_{n-2}}{2}$	"	"	"	"	-	"	"	"	-	-	Z_{t_1}	6	10,60
25	25	d_{n-1}	L_{n-1}	"	"	"	"	$\frac{d_{n-1}-d_{n-2}}{2}$	"	"	"	"	-	"	"	"	-	-	Z_{t_1}	6	10,60
26	26	d_{n-1}	L_{n-1}	"	"	"	"	$\frac{d_{n-1}-d_{n-2}}{2}$	"	"	"	"	-	"	"	"	-	-	Z_{t_1}	6	10,60
27	27	d_{n-1}	L_{n-1}	"	"	"	"	$\frac{d_{n-1}-d_{n-2}}{2}$	"	"	"	"	-	"	"	"	-	-	Z_{t_1}	6	10,60
28	28	d_{n-1}	L_{n-1}	"	"	"	"	$\frac{d_{n-1}-d_{n-2}}{2}$	"	"	"	"	-	"	"	"	-	-	Z_{t_1}	6	10,60
29	29	d_{n-1}	L_{n-1}	"	"	"	"	$\frac{d_{n-1}-d_{n-2}}{2}$	"	"	"	"	-	"	"	"	-	-	Z_{t_1}	6	10,60
30	30	d_{n-1}	L_{n-1}	"	"	"	"	$\frac{d_{n-1}-d_{n-2}}{2}$	"	"	"	"	-	"	"	"	-	-	Z_{t_1}	6	10,60
31	31	d_{n-1}	L_{n-1}	"	"	"	"	$\frac{d_{n-1}-d_{n-2}}{2}$	"	"	"	"	-	"	"	"	-	-	Z_{t_1}	6	10,60
32	32	d_{n-1}	L_{n-1}	"	"	"	"	$\frac{d_{n-1}-d_{n-2}}{2}$	"	"	"	"	-	"	"	"	-	-	Z_{t_1}	6	10,60
33	33	d_{n-1}	L_{n-1}	"	"	"	"	$\frac{d_{n-1}-d_{n-2}}{2}$	"	"	"	"	-	"	"	"	-	-	Z_{t_1}	6	10,60
34	34	d_{n-1}	L_{n-1}	"	"	"	"	$\frac{d_{n-1}-d_{n-2}}{2}$	"	"	"	"	-	"	"	"	-	-	Z_{t_1}	6	10,60
35	35	d_{n-1}	L_{n-1}	"	"	"	"	$\frac{d_{n-1}-d_{n-2}}{2}$	"	"	"	"	-	"	"	"	-	-	Z_{t_1}	6	10,60
36	36	d_{n-1}	L_{n-1}	"	"	"	"	$\frac{d_{n-1}-d_{n-2}}{2}$	"	"	"	"	-	"	"	"	-	-	Z_{t_1}	6	10,60
37	37	d_{n-1}	L_{n-1}	"	"	"	"	$\frac{d_{n-1}-d_{n-2}}{2}$	"	"	"	"	-	"	"	"	-	-	Z_{t_1}	6	10,60
38	38	d_{n-1}	L_{n-1}	"	"	"	"	$\frac{d_{n-1}-d_{n-2}}{2}$	"	"	"	"	-	"	"	"	-	-	Z_{t_1}	6	10,60
39	39	d_{n-1}	L_{n-1}	"	"	"	"	$\frac{d_{n-1}-d_{n-2}}{2}$	"	"	"	"	-	"	"	"	-	-	Z_{t_1}	6	10,60
40	40	d_{n-1}	L_{n-1}	"	"	"	"	$\frac{d_{n-1}-d_{n-2}}{2}$	"	"	"	"	-	"	"	"	-	-	Z_{t_1}	6	10,60

2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
11	Sražit brany na a_{dt}	d_{dt}	-	Soustruh SU 50	Nůž ČSN 223716	Posávka ČSN 251260	trn	-	ručně	-	tab. 4.7	$\frac{1000x}{D}$	-	-	0,6	0,4	$0,12(\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2})$	-	Σt_1	6	10,60
12	Sražit brany na nákručích	$d_k + 0,3$	-	"	"	"	"	-	-	-	-	"	-	-	"	"	"	-	Σt_1	6	10,60
13	Soustružit vylébní v upínací otvoru	d_{dn}	L_{dn}	"	Nůž ČSN 223724	Dutinař	-	$\frac{d_{dn} + 0,5}{2}$	0,4	1,5	tab. 4.7	"	-	$\frac{2}{t_1}$	Li/mm	0,8 + +0,0012 L	"	-	Σt_1	6	10,60
14	Sražit brany v upínacím otvoru	$d_n - 0,5$	-	"	"	Posávka ČSN 251230	-	-	ručně	-	-	"	-	-	1,6	0,4	"	-	Σt_1	6	10,60
15	Soustružit záspích typu 0	$d_k + a$	-	"	Nůž ČSN 223730	"	-	-	0,2	1	"	"	-	-	tab. 4.6	1,5	"	-	Σt_1	6	10,60
16	Soustružit záspích typu B	$d_k + a$	-	"	"	"	-	-	-	-	-	"	-	-	-	-	"	-	Σt_1	6	10,60
17	1. Protahovat klínovou dráhu	-	L_{k1}	Protahovač vaňový 221612	"	"	světlík	-	-	5	-	-	-	4	$\frac{4L}{1000v}$	16,5 + +0,2 G _{em}	"	20	Σt_1	5	9,40
18	1. Brousit čela zubů hřebene náhrubo	-	L_{z1}	Bruskař 5/1500	224510	"	trn	0,15	tab. 4.2	0,15	35	$\frac{6000x}{D}$	$\frac{1200x}{D}$	1	2pi/s _p	0,6 + +0,08 G	"	15	Σt_1	5	9,40
19	2. Brousit čela nákručí náhrubo	-	L_{n1}	"	"	"	"	-	-	-	-	"	-	-	-	1,7	"	-	Σt_1	5	9,40
20	1. Frézovat pilovité drážky náhrubo	-	L_{p1}	Frézka FA-4U	222240	"	dél.přístroj	$\frac{d_{dt} - d_{dt}}{2}$	tab. 4.9	P	tab. 4.9	"	$\frac{1000x}{D}$	1	6L/mm	2,5+0,07G + +0,01 Ds	"	40	Σt_1	6	10,60
21	2. Frézovat úhlové drážky pro řez. hřebeny náhrubo	-	"	"	Frézka 222244	"	"	$\frac{d_{dt} - d_{dt}}{2}$	tab. 4.10	"	tab. 4.10	-	"	"	12L/mm	2,5+0,07G + +0,12G	"	40	Σt_1	6	10,60
22	3. Frézovat drážky pro řezné hřebeny náhrubo	-	L_{p1}	Frézka 222161	Frézka 222250	"	"	$\frac{d_{dt} - d_{dt}}{2}$	tab. 4.11	"	tab. 4.11	-	-	"	14L/mm	2,5+0,07G + +0,01 Ds	"	40	Σt_1	6	10,60
23	1. Frézovat profil náhrubo	-	L_{p1}	Leos- brander	Frézka 222250	Frézka 222240	trn	"	"	"	"	$\frac{e}{d_{dt}}$	"	"	14L/mm	0,65+0,1G + +0,0004 L	"	30	Σt_1	6	10,60
24	1. Frézovat řezné drážky a přeruš. podfrézovat	-	L_{p1}	Frézka PA-3U	Spec. úhl.	"	dél.přístroj	$\frac{d_{dt} - d_{dt}}{2}$	tab. 4.9	"	tab. 4.9	-	"	"	112L/mm	2,5+0,07G + +0,01 Ds	"	40	Σt_1	6	10,60
25	2. Frézovat řezné drážky	-	"	"	Frézka 222240	"	"	$\frac{d_{dt} - d_{dt}}{2}$	tab. 4.9	"	tab. 4.9	-	-	"	"	"	"	40	Σt_1	6	10,60
26	1. Brousit upínací otvor náhrubo	$d_n - 0,5$	L_{n1}	Bruska 72 A	Kružná 223254	Kalibr ČSN	-	0,12	tab. 4.11	9/1	35	$\frac{1200x}{D}$	"	"	tab. 4.12	5,6+0,05G	"	20	Σt_1	6	10,60
27	1. Brousit čela náhrubo	-	L_{n1}	Bruska BK5/1500Z4510	Kružná 251230	Posávka ČSN	trn	0,2	tab. 4.2	0,2	35	$\frac{1200x}{D}$	1	2pi/s _p	0,6+0,08G	"	"	15	Σt_1	5	9,40
28	2. Brousit čela nákručí náhrubo	-	L_{n1}	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	1,7	"	-	Σt_1	5	9,40
29	1. Podřezat profil k broušení	-	-	Soustruh DH 3	Podřezá- cí nůž	Sablona úhelník	"	$\frac{d_{dt} - 2h + 0,2}{2}$	0,44	0,5	$\frac{1000x}{D}$	8	-	$\frac{9}{t_1}$	180 + +150	5,8	"	30	Σt_1	7	12,00

2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
2	Přetáčet profil k broušení	-	-	Soustruh IH 3	Počítací nář.	Šablona, Whitemer	trn	$b-a=0,1$	0,44	0,5	$\frac{1000}{\pi D}$	8	-	-	195+ +4,26	4,6 + +0,030	0,12 (t_2+t_1)	30	Σt_1	7	12,00
1	Přísavit pilo- vité drátky	-	L_2	Frézka FA-4U	Fréza ČSN 222240	Posuvka ČSN 251230	del. při střež	$d_f-d_a=0,02$ 2	tab. 4,9	F	tab. 4,9	-	1000V πD_f	1	61,5/ π	2,5+0,07 9+0,06 D	"	45	Σt_1	6	10,60
2	Převést uhlavé drátky pro řez. hřeb. k broušení	-	-	"	Fréza ČSN 222244	"	"	$d_f-d_a=0,2$ 2	tab. 4,10	"	tab. 4,10	"	"	"	121,5/ π	2,5+0,070+ +0,12 D	"	45	Σt_1	6	10,60
3	Převést drátky pro řez. hřeb. k broušení	-	-	"	Tvarový fréza	"	"	$d_f-d_a=0,2$ 2	tab. 4,13	"	tab. 4,13	-	"	"	121,5/ π	2,5+0,070+ +0,01 D _z	"	45	Σt_1	6	10,60
5	Brousit porušené že- lo prof. po podtač.	-	$L_2+0,3$	Bruška BH 102	Kotouč ČSN 224580	Šablona	"	0,2	12	0,02	35	-	6000V πD	1	7 + 0,50	0,8+0,070	"	30	Σt_1	6	10,60
6	Neuplné konce subú odfrézovat	-	-	Frézka FA-4V	Fréza ČSN 222130	"	opěrka	-	ručné	-	$\frac{1000}{\pi D}$	-	150	1	7 + 0,50	0,8+0,070	"	20	Σt_1	5	9,40
7	Neuplné konce subú sacovat	-	-	"	Pilník	"	svěrák	-	-	-	-	-	-	-	6+0,080	0,75+ +0,0250	0,10 (t_2+t_1)	8	Σt_1	5	9,40
8	Přetahovat drátky v dráčk. typ E	-	L_2	Gučálek HO 63	Tvarový nář.	Posuvka ČSN 251230	del. při- střež	b	ručné	p/1	5	-	-	2	$\frac{2L}{1000}$	4,5+0,070+ +0,01 D _z	0,12 (t_2+t_1)	30	Σt_1	5	9,40
2	Přetahovat drátky pro kalby k broušení	-	L_2	"	"	"	"	c-0,1	-	2	-	-	-	-	$\frac{L_2}{1000}$	5,0+0,070+ 0,01 D _z	"	30	Σt_1	5	9,40
19	1 Topené spracovat na 62-64 HRC	-	-	elektr. pec	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	30+	6	10,60
20	1 Přísavit	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	65+0,255	5	9,40
21	1 Oxidačosořetovat	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	65+0,255	5	9,40
22	1 Brousit upínací ot- vor na čisto	-	$L_2+0,3$	Bruška 72 A	Kotouč ČSN 224550	Šablona	-	0,13	tab. 4,12	p/1	35	12000V πD	tab 4,12	5,6 + +0,050	1,7	0,12 (t_2+t_1)	20	Σt_1	6	10,60	
23	1 Brousit žela sube- váhe hřebena náčisto	-	L_2	Bruška BK 5/1500	Kotouč ČSN 224510	Posuvka ČSN 251230	trn	0,15	tab. 4,2	0,15	"	"	"	1	$\frac{2L}{\pi}$	0,6 + +0,050	"	15	Σt_1	5	9,40
2	Brousit žela nákrúž- ká náčisto	-	L_2	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	1,7	"	-	Σt_1	5	9,40
3	Brousit vnější průměr zákl. tělesa náčisto	-	L_2	"	"	"	"	"	tab. 4,14	0,5/1	"	"	"	tab 4,14	0,6 + +0,050	"	"	20	Σt_1	5	9,40
4	Brousit průměr pro up- ínací a strany náč.	-	L_2	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	20	Σt_1	5	9,40
24	1 Brousit pilovité drátky náčisto	-	L_2	Bruška BPH 300/1000	Tvarový žetmě	Mikrom. ČSN 251420	del. při- střež	tab. 12	tab. 4,15	tab. 4,15	"	"	"	tab 4,15	2,5+0,070+ +0,050	"	"	50	Σt_1	7	12,00
2	Brousit úhlavé dráží. pre řez. hřeb. náčisto	-	L_2	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	121,5/ π	2,5+0,070+ +0,12 D	"	50	Σt_1	7	12,00
3	Brousit drátky pre řez. hřeb. náčisto	-	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	121,5/ π	2,5+0,070+ +0,01 D _z	"	50	Σt_1	7	12,00
1	Brousit drátky pro ke- líky náčisto	-	"	Bruška BPH 300/1000	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	121,5/ π	2,5+0,070+ +0,12 D	"	70	Σt_1	6	10,60
26	1 Zhotovit rolnu pro radiuay profilu	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	120	6	13,60

2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
1	Pedrousit boky a radušny profilu náčisto	-	L ₂	Bruska GVV 30	Tvarový kotouč	Šablona	tm	0,1	0,12	0,002	1000	6	16000	85	531 mm	22,5+0,090	0,12(t _n +t _v)	50	Z _{t1}	8	13,6
3	Opřít čele profilu náčisto	-	"	Bruska BN102	Kotouč 224500	-	del.přístroj	"	12	0,02	35	-	60000 %D	5	512/2 mm	3,6+0,090	"	30	Z _{t1}	5	9,4
9	Pedbrousit břbet předfilu náčisto	d _{nn}	L ₂	Bruska necker	Realizovaný kotouč	Šablona	tm	"	ručné	0,03	"	-	"	"	13 + 41,650	4,2+0,090	"	35	Z _{t1}	7	12,00
0	Vrtat otvory na vnějším prům. zákl. tělesa	d _{dt}	L _u	Vrtáčka MKV 63	Vrták 221127	Počet 251230	del.přístroj	-	tab. 4.16	-	1000	-	tab. 4.16	1	121/2 mm	2,7+0,030	"	15	Z _{t1}	6	10,60
2	Vrtat otvory v drážkách zákl. tělesa	d _a	-	"	"	Ø"	"	-	"	-	"	-	"	"	12/2 mm	0,064+0,030 +0,12 z	"	15	Z _{t1}	6	10,60
3	Vrtat otvory pro upnutí příruby	d _g	-	"	"	"	skřídlo	-	"	-	"	-	"	"	61/2 mm	1,13+0,030	"	13	Z _{t1}	6	10,60
4	Vrtat otvory pro upnutí elementu	d _u	-	"	"	"	"	-	"	-	"	-	"	"	12/2 mm	1,28+0,060 +0,2 z	"	16	Z _{t1}	6	10,60
5	Zalebit otvory pro upínací šroub	"	-	"	Základník 221386	"	"	-	"	-	"	-	"	"	12/2 mm	1,54+0,060	"	-	Z _{t1}	6	10,60
31	Řezat závit pro upínací matici	d _{dt}	L _m	Seznam SU 50	Mříž 223770	"	"	-	0,15	-	60	1000 %D	-	-	12,3	1,8+0,010	"	-	Z _{t1}	6	10,60
32	Řezat závit v otvorrech základního tělesa	"	-	Vrtáčka MKV 63	Závitník 223010	"	del.přístroj	-	tab. 4.17	-	1000	-	tab. 4.17	"	tab. 4.18	1,57+0,030	"	-	Z _{t1}	6	10,60
2	Řezat závit v drážkách zákl. tělesa	d _n	-	"	"	"	"	-	"	-	"	-	"	"	"	0,34+0,030 +0,12 z	"	-	Z _{t1}	5	10,60
3	Řezat závit v otvorrech pro upnutí příruby	d _g	-	"	"	"	SKřídlo	-	"	-	"	-	"	"	"	0,71+0,030	"	-	Z _{t1}	6	10,60
4	Řezat závit v otvorrech pro upnutí elementu	d _u	-	"	Závitník 223062	"	"	-	"	-	"	-	"	"	"	0,44+0,060 +0,2 z	"	-	Z _{t1}	5	10,60
33	Označení druhu odvalovací frézy	-	-	-	Elektr. jebla	"	"	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Z _{t1}	5	9,40
34	Kontrola odvalovací frézy dle ČSN 222501	-	-	Pete	-	"	-	-	-	-	-	-	-	-	55+0,50	40+0,40	-	30	Z _{t1}	10	12,00
35	Vstupní kontrola zákl. tělesa	-	-	-	-	"	-	-	-	-	-	-	-	-	48+0,50	32+0,30	-	30	Z _{t1}	10	12,00