

SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE
Materiálovotechnologická fakulta

Prof. Ing. Ján Békés, DrSc. – Prof. Ing. Ján Hrubec, CSc.
Doc. Ing. Juraj Kicko, CSc. – Doc. Ing. Zdenko Lipa, CSc.

TEÓRIA OBRÁBANIA

PREDHOVOR

Predkladané skriptá sú určené poslucháčom 4. ročníka študijného odboru Technológie strojárskych výrob. Užitočné môžu byť i študentom Materiálového inžinierstva. Dôvodom na vydanie týchto skript je fakt, že učebnice a skriptá vhodné pre predmet Teória a metodika obrábania sú už dlhšie rozobrané a skromná zásoba starších titulov v požičovniach skript nestačí ani zďaleka pokryť záujem poslucháčov o tieto texty.

Použitá symbolika i terminológia sa opierajú o normatívy ISO i keď na niektorých miestach pre jednoduchšie indexy sa rezná rýchlosť označuje miesto v_c . Keďže symboly sú priamo v texte vysvetlené nemalo by dôjsť k nesprávnemu pochopeniu takéhoto textu. Uvedená symbolika, terminológia i zaužívané vzťahy v niektorej zahraničnej literatúre sa taktiež brali na zreteľ v predložených textoch skript, aby pri štúdiu zahraničnej literatúry mal čitateľ uľahčenú úlohu.

Autori sa na predloženom texte podieľali takto:

Prof. Ing. Ján Békés, DrSc. – vedúci autorského kolektívu – pripravil celkovú koncepciu skript, zostavil výber látky a sám napísal state: 1, 2, 5, 6, 10, 13, 14, 15.

Prof. Ing. Ján Hrubec, DrSc. – svojimi skúsenosťami a radami prispel k skvalitneniu celého textu skript a okrem toho sám napísal celú stať 11.

Doc. Ing. Juraj Kicko. – napísal texty o simulácii, a to: 3.3.2.1, 4.2, 8.7, 9.2, 12.6, 13.6.

Doc. Ing. Zdenko Lipa, CSc. – urobil záverečnú redakciu textu a prispel napísaním predhovoru, úvodu a statí 3, 4, 7, 8, 9, 12 okrem statí o simulácii.

Aby skriptá dostali konečnú podobu bolo treba úsilie viacerých pracovníkov, nielen autorov textu. Za spracovanie textu na počítači autori ďakujú Ing. Petrovi Púčikovi, Ing. Ladislavovi Dobrovodskému, Ľuboslavovi Mozovi jr. a p. Alžbete Skýpalovej, ktorí venovali tejto práci náležitú pozornosť.

Je známe, že málokedy sa podarí napísať text či už knihy alebo skript, ktorý by bol úplne bez chyby. Že v týchto skriptách nebude chýb veľa za to autori vďačia aj starostlivej recenzii, ktorú vykonali známi odborníci z teórie obrábania, a to prof. Ing. Imrich Kažimír, CSc. zo Sjf TU Košice a doc. Ing. Dušan Štekláč, CSc. zo Sjf ŽU Žilina. Recenzentom na tomto mieste autori vyslovujú svoje poďakovanie.

Napokon sa nám prichodí poďakovať pracovníkom Vydavateľstva STU, ktorí sa veľmi starali aby skriptá vyšli čo najskôr a aby mali aj náležitú úpravu a vzhľad. Za vkusnú sadzbu ďakujú autori pracovníkom tlačiarne Vydavateľstva STU.

A napokon želanie pre tých, ktorým sú skriptá určené. Autori želajú čitateľom skript veľa úspechov pri ich štúdiu, veľa radostí z objavovania nepoznaného a veľa trpezlivosti pri čítaní náročnejších partií. Autori dúfajú, že predložené skriptá budú užitočné všetkým, ktorí do nich nahliadnu, ale najmä budú ich potrebovať pri štúdiu a veria, že budú mať u čitateľov úspech.

ÚVOD

Norma STN 22 00 10 stanovuje pre obrábanie takúto definíciu: Obrábanie je časť výrobného procesu, ktorý je založený na využití energie dodanej obrábaciemu stroju, ktorého činnosťou (za spolupôsobenia strojného vybavenia a nástroja) vzniká obrobok žiadaného tvaru, rozmerov a akosti povrchu odobratím určitého (prebytočného) množstva materiálu rezným nástrojom. Pod pojem obrábanie nezahŕňame len opis alebo návod ako zhotoviť súčiastku odobratím prebytočného materiálu ale aj objasňovanie a vysvetľovanie javov a faktov (objasnenie podstaty) existujúcich v procese obrábania. Obrábanie má preto aj svoju vedeckú, nielen praktickú, zložku. Prírodné i technické vedy majú svoju časť teoretickú i experimentálnu. Preto môžeme hovoriť o teórii obrábania i o experimentálnych metódach obrábania. Teória postaví hypotézy, ktoré sa experimentálne overujú a po overení sa hypotéza stáva platnou teóriou. A naopak, experimenty poskytujú skutočnosti, aby ich teória vysvetlila a objasnila. Pravda, to sa nezaobíde bez určitého zjednodušenia, pretože proces obrábania je veľmi zložitý. Avšak teoreticky zistené údaje za určitých zjednodušujúcich predpokladov sa nemajú podstatne líšiť od údajov zistených experimentálne. Teória obrábania i experimenty v obrábaní sa spravidla v učebných plánoch našej fakulty vykladajú spolu ako predmet Teória a metodika obrábania. Navrhovanie a vyhodnocovanie experimentu býva zaradované ako nepovinný predmet Experimentálne metódy obrábania v 5. ročníku. Teória a metodika obrábania sa niekedy zvykne uvádzať ako Inžinierska technológia obrábania na rozdiel od Dielenskej (praktickej) technológie obrábania. Technológiu obrábania možno deliť i podľa iných kritérií, a to napr. na konvenčnú a nekonvenčnú (z hľadiska metód), klasickú a modernú (z hľadiska riadenia), hrubovacíu a dokončovaciú atď.

Predkladané skriptá majú názov Teória obrábania, ku ktorému pripojíme zopár poznámok z histórie. Za zakladateľa teórie obrábania sa pokladá Francúz H. Tresca, ktorý už v roku 1873 uverejnil svoje výskumy o vzniku triesky. K nemu sa pridali I. A. Time (1877) v Rusku (pojem strižnej roviny a stlačenia triesky) a A. Haussner (1892) v Rakúsku (výskum nárasťku). K nim možno počítať i Zvorkina (1893) a Brixu (1896) v Rusku (rezné sily, merný rezný odpor). Ďalší rozvoj teórie obrábania nastal, keď skupina amerických bádateľov okolo F. W. Taylora vyvinula rýchloreznú oceľ (1900). Sám F. W. Taylor v roku 1906 zverejnil vzťah trvanlivosti rezného nástroja a reznej rýchlosti nazývaný po ňom Taylorov vzorec (rovnica). Výskum rezania vo V. Británii v tom čase vykonával J. Nicolson (1908 – kolísanie reznej sily). Ďalším medzníkom bolo vyvinutie nových rezných materiálov, a to spekaných karbidov v Nemecku (1920) skupinou bádateľov združených okolo H. Schroetera. M. Kronenberg (1927) v Nemecku uvažuje o pojme obrobiteľnosť. Krátko na to merajú rezné sily i krútiace momenty a porovnávajú získané hodnoty O. W. Boston a C. E. Kraus v USA (1936). Výsledkom je ich rovnica pre rezné sily so zovšeobecnenými exponentami (tzv. mocninný tvar). K podobnému výsledku dospeli i A. I. Čelustkin v Rusku. V tom istom roku V. Piispanen vo Fínsku uvažuje o uhlovom pretvorení pri rezaní a C. Solomon v Nemecku uvažuje o vysokorýchlostnom obrábaní. A napokon N. A. Safonov v Rusku uvažuje nie o mocninnom, ale o exponenciálnom vzťahu medzi trvanlivosťou a reznou rýchlosťou.

Reznú keramiku vyvinula skupina bádateľov v Nemecku združená okolo W. Osenberga (1936). Medzný uhol deformácie na základe rôznych predpokladov teoreticky vypočítavajú

J. Krystoff v Nemecku (1939), H. Ernst a M. E. Merchant v USA (1941), znovu M. E. Merchant (1945), H. H. Lee a B. V. Schafer v USA (1951), H. Hucks v Nemecku (1952), M. C. Shaw, N. H. Cook a I. Finnie v USA (1957), N. N. Zorev v Rusku (1957) a iní. V tom istom období (1939-57) uhol textúry za rôznych predpokladov teoreticky vypočítavajú S. F. Glebov, A. M. Rosenberg, G. H. Townend a N. N. Zorev. Medzitým v USA vyvinuli syntetické diamanty (1953) a kubický nitrid bóru (1957) bádatelia sústredení okolo R. Wentdorfa. M. Kronenberg (1954) a I. O. Kinzle a H. Victor (1956) v Nemecku stanovili iné vzorce pre špecifický rezný odpor a z toho plynúcu reznú silu. G. Boothroyd (V. Británia) a iní stanovili tzv. pasívne sily pri rezaní. Gruzinec T. N. Loladze (1952) stanovil model tvorenia triesky a reznú silu ako funkciu stlačenia triesky.

Zavádzaním kybernetických metód do riadenia procesu obrábania sa zaoberali V. J. Solomencev, H. Opitz, W. König a iní. K automatizovanej tvorbe i navrhovaniu technologických postupov pomocou výpočtovej techniky smerovali práce A. P. Sokolovského, M. Mitrofanova, H. Opitza a iných.

Aj mnohí ďalší bádatelia významne prispeli k rozvoju teórie obrábania, avšak vymedzený priestor nám nedovoľuje zmieniť sa o všetkých. Z okolitých štátov ešte do teórie obrábania prispeli H. Merzejewski z Poľska aplikáciou teórie plasticity na proces rezania, L. Bálint z Maďarska a Z. Přikryl z Česka prácami o rezných silách.

Na Slovensku sa počiatky teórie obrábania viažu s menom E. Hirschfelda (monografia Tvrdé kovy, učebnica Teória rezania kovov), J. Hausera (vedúci autor učebnice Obrábanie kovov) a J. Ondru, všetko profesorov českého pôvodu pôsobiacich v danej dobe na Strojníckej fakulte SVŠT Bratislava. Zo slovenských vedcov zaoberajúcich sa teóriou obrábania možno spomenúť J. Békésu (optimalizácia procesu rezania, optimalizácia technologických postupov, uplatňovanie matematických postupov v obrábaní), J. Hrubcu (teória obrobitel'nosti, obrobitel'nosť ťažkoobrobitel'ných materiálov, uplatňovanie fyzikálnochemických postupov v obrábaní), J. Budu (robotizácia v obrábaní), K. Vasilku (deformačné polia a i.), I. Kažimíra (skúmanie podstaty javov v obrábaní), A. Janáča (chvenie pri obrábaní, CIM), B. Bátoru (rezné prostredie a i.), V. Pálku (teória ostrenia, obrábanie povlakov) a iní.

PREHLAD SYMBOLOV A ZNAČIEK

- a - odpis ceny nástroja [Sk]
- A - amplitúda [mm]
- a_p - hĺbka rezu [mm]
- b - šírka odrezávanej vrstvy [mm], náklady na nástroje [Sk]
- B - náklady na jedno nasadenie nástroja [Sk], šírka [mm]
- c - náklady na jednu výmenu nástroja [Sk]
- C - cena nástroja [Sk], konštanta
- d - priemer [mm]
- D - diamant
- E - modul pružnosti [MPa], náklady na minútu práce strojného zariadenia [Sk min⁻¹]
- f - posuv [mm], frekvencia [Hz]
- f_{ot} - posuv na otáčku [mm]
- f_t - prípustný (technologicky dovolený) posuv [mm]
- f_p - posuvy pre plné využitie výkonu na vretene (posuvy pre konštantný výkon) [mm]
- f_T - posuvy pre plné využitie trvanlivosti reznej hrany (posuvy pre konštantnú trvanlivosť) [mm]
- f_Z - posuv na zub [mm]
- F - sila [N]
- F_c - hlavná zložka reznej sily [N]
- F_p - spätná zložka reznej sily [N]
- F_f - posuvová zložka reznej sily [N]
- h - hrúbka odrezávanej vrstvy [mm], hĺbka pod povrchom [mm], výška [mm]
- H - výška [mm], tvrdosť [HB], [HRC]
- I - moment zotrvačnosti prierezu [mm⁴]
- k - tuhosť [N/mm]
- KT - hĺbka žliabku opotrebovania na čele [mm]
- KV_S - rozmerové opotrebovanie [mm]
- k_c - špecifický rezný odpor [MPa]
- K - opravný súčiniteľ v empirických rovniciach, označenie typu spekaného karbidu podľa ISO
- KNB- kubický nitrid bóru
- L - vzdialenosť [mm], dĺžka [mm]
- m - exponent reznej rýchlosti v T-v závislosti
- M - hmotnosť [kg], označenie typu spekaného karbidu podľa ISO
- n - otáčky za čas (minútu [min⁻¹] alebo sekundu [s⁻¹])
- N - počet otáčok
- P - výkon [W], označenie typu spekaného karbidu podľa ISO
- PKD- polykrystalický diamant
- Q_A - plošný výkon rezania [mm² · s⁻¹]

- Q_v - objemový výkon rezania [$\text{mm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]
 q - počet zrn v jednotkovom objeme
 r - rozstup zubov [mm]
 r_n - polomer zaoblenia reznej hrany [μm]
 r_e - polomer hrotu nástroja [mm]
 R - polomer [mm], vzdialenosť [mm], náhodné číslo z intervalu $\langle 0,1 \rangle$
 R_a - stredná aritmetická odchýlka nerovnosti povrchu [μm]
 S - prierez odrezávanej vrstvy [mm^2]
SD - syntetický diamant
SK - označenie spekaného karbidu
SNOP sústava obrábania (stroj, nástroj, obrobok, prípravok)
 t - čas [s], [min]
 T - trvanlivosť reznej hrany [min]
 T_h - hospodárna trvanlivosť reznej hrany [min]
 T_p - trvanlivosť reznej hrany pre maximálnu produktivitu stroja [min]
 v_c - rezná rýchlosť [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$], [$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$]
 v_f - rýchlosť posuvu [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$], [$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$]
 v_h - hospodárna rezná rýchlosť [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$], [$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$]
 v_p - rezná rýchlosť z hľadiska najväčšej produktivity stroja [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$], [$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$]
 v_P - rezná rýchlosť pre daný výkon [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$], [$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$]
 v_T - rezná rýchlosť pre danú trvanlivosť [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$], [$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$]
 V - objem [cm^3]
VB - šírka plošky opotrebovania na chrbte [mm]
VTM - veľmi tvrdé materiály
 W - moment odporu prierezu [mm^3]
 y - odtlačenie [mm], označenie cieľovej funkcie
 Y - náklady [Sk], cieľová funkcia
 z - počet nasadení nástroja, počet zubov, prídavok [mm]
 \dot{Z} - životnosť nástroja [min], [h]
 α - koeficient lineárnej teplotnej rozťažnosti [K^{-1}], [$^{\circ}\text{C}^{-1}$]
 α_o - nástrojový ortogonálny uhol chrbta [$^{\circ}$]
 β_o - nástrojový ortogonálny uhol rezného klina [$^{\circ}$]
 γ_o - nástrojový ortogonálny uhol čela [$^{\circ}$]
 δ - uhol rozostupu [$^{\circ}$]
 δ_o - uhol rezu [$^{\circ}$]
 Δ - znak diferencie
 ε_r - nástrojový uhol hrotu rezného klina [$^{\circ}$]
 η - účinnosť
 θ - teplota [K], [$^{\circ}\text{C}$]
 κ_r - nástrojový uhol nastavenia hlavnej reznej hrany [$^{\circ}$]
 κ'_r - nástrojový uhol nastavenia vedľajšej reznej hrany [$^{\circ}$]
 λ - súčiniteľ času rezania
 λ_s - nástrojový uhol sklonu hlavnej reznej hrany [$^{\circ}$]
 μ - súčiniteľ trenia
 ξ - stlačenie triesky
 φ - uhol záberu [$^{\circ}$]

- Φ_1 - uhol medznej roviny deformácie [°]
- Φ_2 - uhol textúry [°]
- ψ - záberový súčiniteľ
- π - Ludolfovo číslo
- Π - znak súčinu
- ρ - hustota (špecifická hmotnosť) [gcm^{-3}]
- σ - normálové napätie [MPa], smerodajná odchýlka
- Σ - znak súčtu
- τ - tangenciálne napätie [MPa], čas [s], [min]
- ω - objemový súčiniteľ triesky, uhlová rýchlosť [s^{-1}], [min^{-1}]

ANALÝZA PROCESU REZANIA

1. MODELÝ PROCESU REZANIA

Proces rezania je charakterizovaný týmito veličinami:

1. rezné sily,
2. chvenie,
3. trvanlivosť reznej hrany,
4. drsnosť povrchu,
5. tvarovanie triesky.

Hodnoty týchto veličín sú ovplyvnené vlastnosťami obrábaného a rezného materiálu, prostredím, v ktorom prebieha proces rezania a vybranými parametrami SNOP, najmä použitými posuvmi, otáčkami, geometriou rezného nástroja a vzájomnou polohou obrobku a nástroja. Malým zmenám posuvu, chemického zloženia obrábaného materiálu a pod. zodpovedajú malé zmeny drsnosti, rezných síl atď. Preto proces rezania je spojitým procesom a na jeho modelovanie môžeme využiť metódy modelovania spojitých procesov.

Proces rezania je z hľadiska modelovania zložitým dynamickým systémom, v ktorom súčasne prebieha množstvo stochastických (náhodných) javov, ktoré sa vzájomne ovplyvňujú a nie sú vo fáze. Takéto systémy môžeme modelovať štatistickými alebo simulačnými metódami.

1.1. ŠTATISTICKÉ MODELÝ

Štatistické modely skúmanej náhodnej veličiny y (napr. tvrdosti obrobku, trvanlivosti reznej hrany v daných podmienkach atď.) pozostávajú:

1. zo strednej hodnoty \bar{y} náhodnej veličiny y ,
2. zo smerodajnej (strednej kvadratickej) odchýlky σ alebo disperzie $D = \sigma^2$ náhodnej veličiny y ,
3. z typu zákona rozloženia náhodnej veličiny y .

Zvyčajne pri skúmaní procesu rezania nás zaujíma závislosť niektorej náhodnej veličiny od vybraných parametrov (napr. reznej sily od posuvu, hĺbky rezu a ďalších faktorov). Štatistický model takýchto závislostí je daný opäť troma charakteristikami:

1. regresnou funkciou, ktorá vyjadruje závislosť strednej hodnoty \bar{y} náhodnej veličiny y od parametrov procesu:

$$\bar{y} = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

2. závislosťou smerodajnej odchýlky σ od parametrov procesu:

$$\sigma = g(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

3. typom zákona rozloženia náhodnej veličiny, t. j. hustotou pravdepodobnosti (zákonom rozloženia pravdepodobnosti) $\varphi(y)$ spojitej náhodnej veličiny y alebo distribučnou funkciou $F(y)$ náhodnej veličiny pri pevných hodnotách parametrov x_1, x_2, \dots, x_n .

Pri štatistických modeloch je dôležité uviesť aj definičný obor funkcie \bar{y} . Definičný obor zahŕňa intervaly parametrov x_i a ostatné podmienky, ktoré boli pri experimentálnom skúmaní procesu rezania považované za konštantné. Pretože štatistické modely získame na základe experimentov, často označujeme základnú rovnicu pre \bar{y} ako štatistickú alebo empirickú rovnicu vybranej charakteristiky procesu rezania (reznej sily, drsnosti atď.). Štatistickú rovnicu často označujeme ako štatistický model, hoci tieto pojmy nie sú totožné.

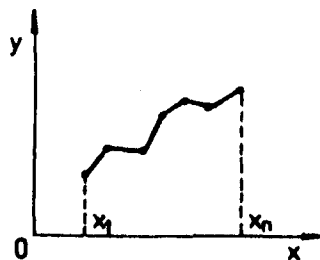
1.1.1. Experimentálne riešenie úlohy

Ak reálny systém je natoľko zložitý, že ho nevieme riešiť analytickými, numerickými alebo simulačnými metódami, riešime ho experimentálne. Experimenty robíme na skutočnom alebo na modelovom systéme. Modelový systém je idealizovaná čiastočná realizácia skutočného systému, v ktorom nepodstatné faktory zanedbáme. Môže byť vytvorený v rôznom meradle, treba však rešpektovať zákonitosti teórie podobnosti.

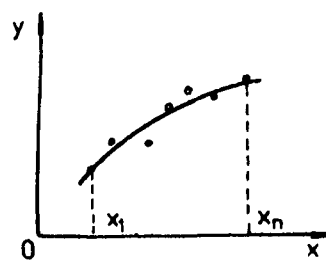
Štatistické modely charakteristík procesu rezania získame spracovaním experimentálnych výsledkov. Výhoda štatistických modelov je tá, že pomocou nich môžeme vyjadriť aj pomerne zložité väzby medzi prvkami reálneho systému rovnicami, ktoré majú jednoduchý tvar a žiadanú presnosť. Ich nedostatkom je, že platia len pre experimentálne preskúmanú oblasť a podmienky experimentu.

1.1.2. Voľba tvaru funkčnej závislosti

Predpokladajme, že experimentálne stanovená závislosť dvoch spojených premenných x, y je zadaná tabuľkovou formou. Dvojice (x_i, y_i) parametrov môžeme znázorniť v súradnicovom systéme ako body (obr. 1.1.). Pri lineárnej interpolácii susedné body spojíme úsečkami. Získaná závislosť nebude hladká a jej analytické vyjadrenie vyžaduje $n - 1$ rovníc (n je počet bodov v grafe). Podstatne výhodnejšie je preložiť cez všetky experimentálne body priamku alebo hladkú krivku (obr. 1.2.), ktorá s dostatočnou presnosťou vyjadruje závislosť premenných x, y v intervale x_1 až x_n .



Obr. 1.1. Graf experimentálnych bodov a ich lineárna interpolácia



Obr. 1.2. Aproximácia experimentálnych bodov hladkou krivkou

Postupujeme zvyčajne tak, že experimentálnu závislosť linearizujeme transformáciou, t. j. graf vynesieme v súradnicovom systéme $X = g(x)$, $Y = h(y)$. Transformačné rovnice $g(x)$, $h(y)$ stanovíme skusmo tak, aby experimentálne body ležali na priamke alebo v jej tesnej blízkosti.

Experimentálne body prakticky nikdy nebudú ležať presne na priamke. Preto, ak počet experimentálnych bodov je väčší ako počet hľadaných koeficientov, možno cez experimentálne body preložiť viac priamok. Optimálnu priamku zvyčajne určíme metódou najmenších štvorcov. Výhodiskom sú tzv. plánované experimenty. Experimentálne techniky sú predmetom disciplíny Teória experimentu.

1.2. SIMULAČNÉ MODELY

Pri simulačnej technike skutočný (reálny) systém (skutočnosť) nahradíme jeho matematickou podobou. Následnosťou aritmetických a logických operácií opíšeme tie vzťahy v sústave, ktoré sú zhodujúce z hľadiska jej skúmania, t. j. vedú k hľadaným hodnotám drsnosti povrchu, rezných síl, trvanlivosti reznej hrany, chvenia alebo tvarovania triesky. Tak môžeme výpočtom, teda bez experimentov na reálnej sústave, zistiť jej vybrané vlastnosti, alebo nájsť jej optimálne parametre.

Podľa charakteru simulovanej sústavy simulačné modely môžu byť: statické alebo dynamické, deterministické alebo stochastické.

Kombinácia uvedených vlastností modelu (statický – dynamický, deterministický – stochastický) dáva štyri rôzne typy modelov. Najjednoduchší z nich je statický deterministický model. Takéto modely používame pri bežných numerických riešeniach technicko-inžinierskych úloh. Sú to v podstate výpočty. Použitie počítača umožňuje rýchlo získať výsledky pre rôzne vstupné údaje.

Simulačné modely sú vytvárané tak, aby mali vlastnosti napodobenej reality. Správajú sa ako skutočné objekty a pomáhajú vysvetliť reálne javy spojené so skutočnými objektmi.

Komponenty simulačného modelu sú analytické alebo štatistické rovnice (zákonitosti). Analytické rovnice alebo ich sústava môže opísať len taký systém, v ktorom sa v danom čase vyskytuje len jeden dej s deterministickým charakterom. Ak v sústave vzájomne spolupôsobia mnohé javy, ktoré sa menia s časom, nie sú vo fáze a ich pôsobisko v priestore sa mení, máme do činenia s komplexnou dynamickou sústavou, ktorú nemôžeme vyjadriť analytickým modelom.

Metódy experimentu a simulácie súvisia. Simulácia na počítači (numerické, počítačové simulácie) je experiment na počítači.

1.2.1. Všeobecné zásady zostrojenia simulačného modelu

Model skúmaného javu pri číslicovej simulácii je zostavený vo forme programu pre číslicový počítač. Simulácia prebieha ako postupnosť algebrických a logických operácií s číselnými údajmi, ktoré definujú model.

Pri zostrojení modelu treba dbať, aby model vystihol podstatu ako skutočne vzniká modelovaný jav alebo predmet, alebo ako pracuje sústava. Transformácia vstupných údajov až k žiadaným výstupom má prebiehať v súlade so skutočným priebehom procesu. Model nemusí byť vernou kópiou skutočnosti, môže byť bez kvalitatívne aj kvantitatívne nepodstatných

detailov, avšak z hľadiska cieľov simulácie. Pri návrhu simulačného modelu treba definovať cieľ simulácie a kritériá, ktorými budeme merať výsledky vyšetrovania, alebo veličiny, ktoré majú byť výsledkom simulácie.

Pri stanovení cieľov simulácie treba požadované výsledky matematicky formulovať tak, aby sa dali číselne vyjadriť. Ak napr. simulujeme drsnosť povrchu, musíme nájsť zodpovedajúci číselný model drsnosti povrchu. Môže to byť napr. dvojrozmerné pole (matica), ktorá obsahuje súradnice x a y jednotlivých dostatočne blízkych bodov profilu.

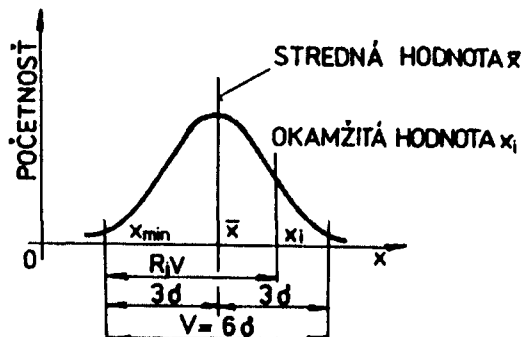
Simulačné modely umožňujú opísať skúmanú sústavu do najmenších podrobností (pokiaľ ich poznáme), vrátane pôsobenia náhodných faktorov. Aby model nebol veľmi zložitý, treba vedieť diferencovať dôležité a menej dôležité faktory. Z toho vyplýva, ako treba chápať vernosť napodobenia skutočnosti simulačným modelom. Simulačný model (ak je správne postavený) bude odrážať vždy tie stránky a spôsob prejavu skutočnosti, ktoré boli do neho zabudované.

1.2.2. Metóda náhodných čísiel (metóda Monte Carlo)

Metódu náhodných čísiel používame na stanovenie okamžitej (v danom výpočtovom cykle uvažovanej) hodnoty parametra, ktorú považujeme za náhodnú veličinu.

Konkrétnu hodnotu x_i náhodnej veličiny x určíme na základe jej strednej hodnoty \bar{x} , smerodajnej odchýlky σ a typu zákona rozloženia náhodnej veličiny (obr. 1.3.). Tieto štatistické charakteristiky stanovíme spracovaním experimentálnych výsledkov.

Predpokladajme, že máme k dispozícii tabuľku náhodných čísiel alebo generátor pseudo-náhodných čísiel z intervalu $\langle 0, 1 \rangle$. Typ zákona rozloženia náhodných čísiel nech je rovnaký, aký je charakter rozloženia náhodnej veličiny v simulačnom modeli.



Obr. 1.3. Schéma na stanovenie okamžitej hodnoty náhodnej veličiny ($k = 3$)

Najprv stanovíme variačné rozpätie (interval zmeny hodnoty náhodnej veličiny)

$$V = 2k \cdot \sigma$$

a najmenšiu hodnotu náhodnej veličiny x z variačného rozpätia

$$x_{\min} = \bar{x} - k \cdot \sigma$$

kde \bar{x} je stredná hodnota náhodnej veličiny x ,

k - konštanta, závislá od volenej šírky variačného rozpätia,

σ - smerodajná odchýlka.

Okamžitú hodnotu x_i náhodnej veličiny x vypočítame pomocou náhodného čísla R_j z rovnice

$$x_i = x_{\min} + R_j V$$

V ďalšom výpočtovom cykle si zoberieme nasledujúce náhodné číslo R_{j+1} a analogickým postupom získame okamžitú hodnotu náhodnej veličiny x_{i+1} pre $i+1$ výpočtový cyklus.

Je zrejmé, že súbor (x_1, x_2, \dots, x_n) okamžitých hodnôt náhodnej veličiny vo všetkých výpočtových cykloch bude mať pri dostatočne veľkom n také isté štatistické charakteristiky, aké sme získali spracovaním experimentálnych výsledkov. Simulácia teda odráža urobené experimenty, ale súčasne umožňuje spojiť aj čiastkové výsledky do komplexného celku a skúmať ich interakciu. To je vklad číslicovej simulácie do poznania prírody a rozvoja vedy. Simulácia je nástroj poznania.

1.2.3. Model procesu rezania

Z hľadiska požadovaných cieľov, volenej úrovne podrobnosti a rozsahu poznania ten istý faktor môže byť vstupným údajom, alebo výsledkom výpočtu niektorého subsystemu modelu.

Konečným cieľom simulácie procesu rezania je plné nahradenie technologických experimentov výpočtom. Žiada sa zostrojiť také modely, v ktorých ako vstupné údaje sa vyskytujú fyzikálne a mechanické vlastnosti obrábaného a rezného materiálu, vybrané vlastnosti stroja, prípravku, nástroja a obrobku a parametre procesu rezania (posuv, hĺbka rezu, rezná rýchlosť a vlastnosti prostredia). Výstupom z tohto modelu by mali byť vybrané charakteristiky procesu rezania, ako drsnosť povrchu, rezná sila, trvanlivosť reznej hrany, chvenie a tvarovanie triesky.

Taký model bude pozostávať z mnohých vzájomne spojených subsystemov zodpovedajúcich čiastkovým modelom kinematických, dynamických, teplotných, deformačných, abrazívnych a iných javov v procese rezania. Napriek zložitosti procesu rezania možno nájsť najjednoduchšie určujúce skutočnosti systému SNOP, ktoré podstatnou mierou vplyvajú na jeho charakteristiky.

Z kategórie hmoty sú to:

- rezný klin, obrábaný materiál a prostredie;

z kategórie pohybu:

- vzájomný pohyb čiastočiek obrábaného materiálu a rezného klinu, vrátane chvenia;

z kategórie priestoru:

- vzájomné priestorové usporiadanie prvkov z kategórie hmoty a pohybu a ich vnútorné usporiadanie;

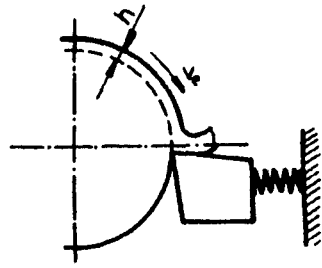
z kategórie času:

- zmena vlastností prvkov predchádzajúcich kategórií v čase.

V závislosti od cieľov skúmania sa budú meniť určujúce vlastnosti vymenovaných prvkov. Vo všeobecnosti možno rozlíšiť vlastnosti, ako sú tvar, materiálové charakteristiky a teplota.

Schematicky (pre prípad voľného rezania) základný model procesu rezania je na obr. 1.4.

Rezný klin odrezáva z obrábaného materiálu vrstvu s danou hrúbkou a šírkou. Pohybuje sa vzhľadom na obrábaný materiál rýchlosťou rezného pohybu. Vzájomná poloha rezného klinu a obrábaného materiálu je daná podmienkou rovnováhy síl vyvolaných procesom rezania a pružným odtlačením členov sústavy SNOP.



Obr. 1.4. Predstava modelu SNOP pre analýzu procesu rezania

2. GEOMETRICKÁ A KINEMATICKÁ ANALÝZA

Geometrická a kinematická analýza procesu rezania vychádza z geometrických modelov rezného klina, z modelu pohybov obrábacieho stroja a z modelu vzájomnej polohy obrobku a nástroja. Pretože tieto modely opisujú len geometrické a kinematické vlastnosti prvkov systému SNOP, výsledkom analýzy sú tiež geometrické a kinematické veličiny. Ide o tieto zoskupenia:

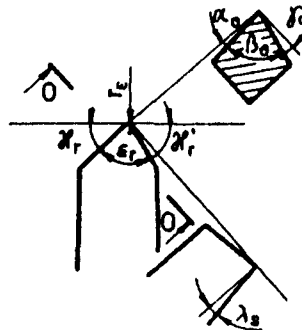
1. parametre odrezávanej vrstvy,
2. parametre vzájomného pohybu obrobku a nástroja,
3. parametre rezného klina v procese rezania,
4. parametre nových plôch, vznikajúcich v procese rezania.

Na výpočet parametrov použijeme analytické rovnice alebo numerické postupy (simuláciu).

2.1. ZÁKLADNÉ MODELY

2.1.1. Model rezného klina

Rezný klin sústružníckeho noža (priameho uberáka) je na obr. 2.1. Tento obraz môžeme považovať za geometrický model rezného klina. Uvedený model, pravda, vystihuje iba niektoré vlastnosti rezného klina, ktoré z hľadiska našej analýzy považujeme za podstatné. Neberie napr. zreteľ na to, že rezná hrana je vytvorená prienikom dvoch reálnych drsných plôch s určitým prechodom, teda že rezná hrana je trojrozmerný priestorový útvar, ale predpokladá, že rezná hrana je hladká čiara.



Obr. 2.1. Grafický model rezného klina

Rezný klin z hľadiska jeho výroby je definovaný uhlami chrbta, čela, nastavenia, sklonu reznej hrany a prechodom hlavnej a vedľajšej reznej hrany. Tieto údaje v dohodnutom poradí predstavujú číslcový model rezného klina:

$$RK = (\gamma_o, \lambda_s, \kappa_r, r_\epsilon, \kappa'_r, \alpha_o)$$

Po formálnej stránke tento model je vektor (alebo n-tica). Z technologického modelu rezného klina transformáciou môžeme získať aj ďalšie modely rezného klina alebo jeho prvkov. Môžeme použiť analytické alebo množinové opisy.

2.1.2. Model obrobku

Obrobok z hľadiska geometricko-kinematickej analýzy procesu rezania stačí opísať iba v časti, v ktorej sa práve nachádza rezný klin. Znamená to, že stačí poznať vzájomnú polohu obrábaného povrchu a rezného klina.

Model povrchu je aproximovaný útvar. Opíšeme ho ako ideálny tvar (útvár) s odchýlkami (toleranciami) v súradnicovom systéme SNOP.

2.1.3. Model pohybov a vzájomnej polohy

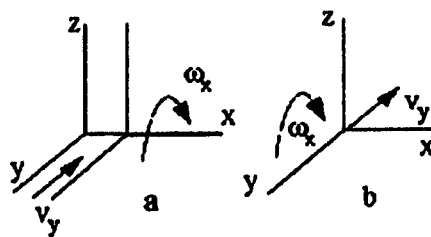
Z hľadiska analýzy procesu rezania rozoznávame pri rezaní:

1. hlavný pohyb,
2. posuv.

Tieto pohyby sa realizujú v súradnicovom systéme stroja. Ak sa obmedzíme na rotačné a priamočiare pohyby vzhľadom na x, y, z osi súradnicového systému, model pohybov, ktoré sa uskutočňujú v jednom súradnicovom systéme, je vektor (šesticca).

$$(v_x, v_y, v_z, \omega_x, \omega_y, \omega_z)$$

Ak súradnicový systém pohybov koná ďalší pohyb v nadväznom súradnicovom systéme, ako napr. pri čelnom sústružení (obr. 2.2.), potom pohyby prvého súradnicového systému v nadväznom súradnicovom systéme zadáme ďalším vektorom a modelom vzájomnej polohy. Použijeme všeobecný model vzájomnej polohy



Obr. 2.2. Pohyby a ich súradnicové systémy pri obrábaní
a – čelné sústruženie, b – frézovanie

$$(x, y, z, k_x, k_y, k_z)$$

kde x, y, z sú súradnice začiatku nadväzného súradnicového systému v základnom súradnicovom systéme,

k_x, k_y, k_z – smerové kosínusy vybranej osi nadväzného systému.

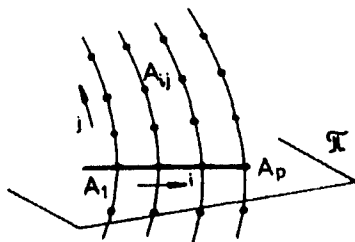
Modelom vzájomnej polohy opíšeme aj vzájomné priestorové usporiadanie rezného klina a obrobku v súradnicovom systéme pohybov, ktorý zvyčajne považujeme za základný.

2.2. MODELÝ REZNEJ PLOCHY

2.2.1. Základný model reznej hrany

Rezná plocha sa vytvára v procese rezania bezprostredne za reznou hranou. Vzniká ako stopa reznej hrany v obrábanom materiáli pri vzájomnom pohybe obrobku a nástroja.

Základný model reznej plochy si môžeme predstaviť ako súbor bodov ležiacich na povrchu reznej plochy. Ak body zadáme svojimi x , y , z -ovými súradnicami dostaneme maticu typu $m \times 3$, kde m je počet zadovaných bodov.



Obr. 2.3. Grafická predstava základného modelu reznej plochy

Ak použijeme súradnicový model reznej hrany, javí sa výhodným vytvoriť model reznej plochy ako súradnice bodov reznej hrany vo vybraných časových intervaloch. Po matematickej stránke takému modelu zodpovedá trojrozmerná matica typu $3 \times p \times s$ (p je počet bodov na reznej hrane, s je počet volených časových okamihov – obr. 2.3.). Takýto model môže byť rozmerný, a preto sa javí účelným voliť p aj s také, aby to práve stačilo na riešenie konkrétnej úlohy.

2.2.2. Dráha rezného pohybu

Dráha rezného pohybu je vždy viazaná na niektorý bod reznej hrany. Dráha je preto opísaná maticou $3 \times 1 \times s$, kde s je ľubovoľný. Vývojový diagram na vytvorenie modelu dráhy bodu A_{ij} je na obr. 2.4.

Analyticky ľahko vyjadríme dráhu rezného pohybu parametrickými rovnicami. Pre pozdĺžne sústruženie napr. rovnicami (predpokladáme valcový súradnicový systém s osou x)

$$x = x_0 + v_f \cdot \tau$$

$$\varphi = \varphi_0 + \omega \cdot \tau$$

$$r = R$$

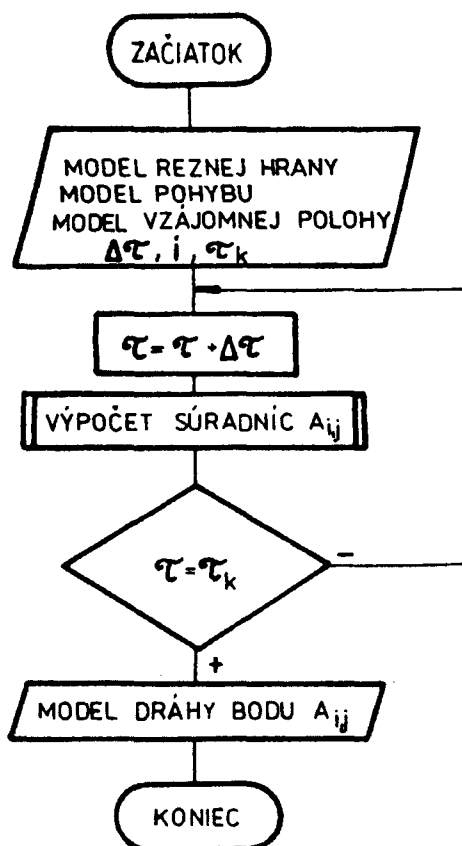
resp. pre karteziánsky súradnicový systém

$$x = x_0 + v_f \cdot \tau$$

$$y = R \cdot \cos\varphi$$

$$z = R \cdot \sin\varphi$$

kde R je vzdialenosť daného bodu od osi otáčania, v_f – rýchlosť posuvu, τ - čas, ω - uhlová rýchlosť.



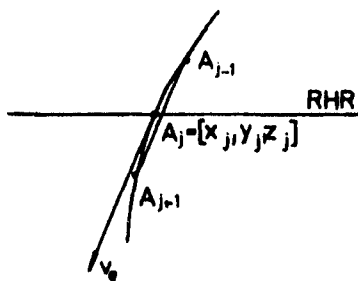
Obr. 2.4. Vývojový diagram na výpočet číslcového modelu dráhy bodu A_{ij}

2.2.3. Vektor rezného pohybu

Vektor rezného pohybu pôsobí v smere tangenty k reznej ploche. Zostrojenie vektora rezného pohybu vyžaduje poznať súradnice daného bodu a dvoch dostatočne blízkych bodov na dráhe rezného pohybu (alebo na reznej ploche – obr. 2.5.). Model reznej plochy pre tento prípad je matica typu $3 \times 1 \times 3$. Vektor rezného pohybu je rovnobežný so spojnicou bodov,

$$A_{j+1}, A_{j-1}$$

a má pôsobisko v bode A_j .



Obr. 2.5. Určenie vektora rezného pohybu v bode A_j

Absolútna hodnota vektora rezného pohybu je rýchlosť rezného pohybu

$$v_e = \left| \frac{A_{j+1}, A_{j-1}}{t_{j+1} - t_{j-1}} \right|$$

pre pozdĺžne sústruženie

$$v_e = \sqrt{v_c^2 + v_f^2}$$

kde v_c je rýchlosť hlavného pohybu.

Smerové kosínusy vektora dostaneme bezprostredne zo súradníc bodov A_{j+1}, A_{j-1} .

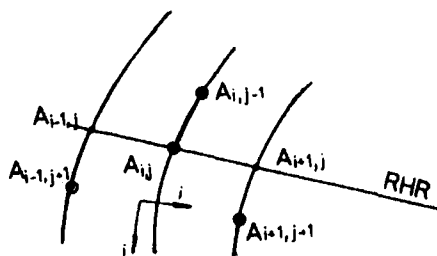
2.2.4. Normála k reznej ploche

Na zostrojenie normály v danom bode treba poznať súradnice daného bodu a troch ďalších dostatočne blízkych bodov (obr. 2.6.). Na reznej hrane treba poznať súradnice troch bodov

$$A_{i-1,j} \quad A_{i,j} \quad A_{i+1,j}$$

a na reznej ploche súradnice bodov

$$A_{i-1,j+1} \quad A_{i,j-1} \quad A_{i+1,j+1}$$



Obr. 2.6. Model reznej plochy na určenie normály v bode $A_{i,j}$

Model reznej plochy pre tento prípad je daný súradnicami bodov

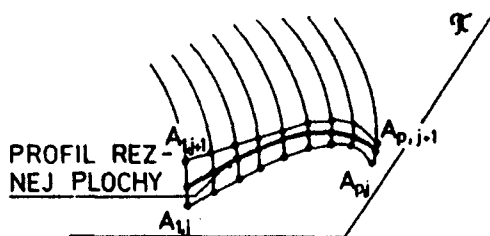
$$A_{i,j}, A_{i-1,j+1} \quad A_{i,j-1} \quad A_{i+1,j+1}$$

teda ako dvojrozmerná matica. Hľadaná normála je kolmica na rovinu definovanú bodmi v okolí bodu $A_{i,j}$. Smerové kosínusy vektora rovnobežného s normálou a orientovaného do voľného priestoru získame testovaním.

2.2.5. Profil reznej plochy

Profil reznej plochy je jej stopa v základnej rovine $z = 0$ (obr. 2.7.). Ak sa rozhodneme určiť body ležiace na stope interpoláciou, potrebujeme poznať súradnice bodov na reznej ploche zodpovedajúcich bodom reznej hrany $A_1 \dots A_p$ tesne nad a pod rovinou $z = 0$. Model rez-

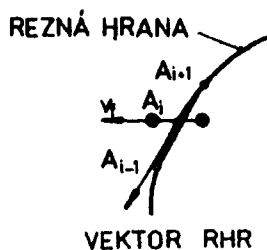
nej plochy pre túto úlohu je matica typu $3 \times p \times 2$. Profil reznej plochy analytickou rovnicou vo všeobecnosti nevieme vyjadriť. Možno zostrojiť iba analytické funkcie, ktoré ho aproximujú v jednotlivých jeho častiach.



Obr. 2.7. Model reznej plochy na určenie profilu reznej hrany

2.2.6. Vektor posuvu a reznej hrany

Okrem modelov reznej plochy pre niektoré úlohy treba poznať vektor posuvu a reznej hrany v danom bode (obr. 2.8.). Vektor posuvu v danom bode reznej hrany určíme analogicky ako vektor rezného pohybu. Vychádzame však nie z dráhy rezného pohybu, ale z dráhy posuvu.



Obr. 2.8. Určenie vektora posuvu a reznej hrany v bode A_i

Vektor reznej hrany v danom bode A_i je rovnobežný so spojnicou susedných bodov A_{i-1} , A_{i+1} a má pôsobisko v bode A_i .

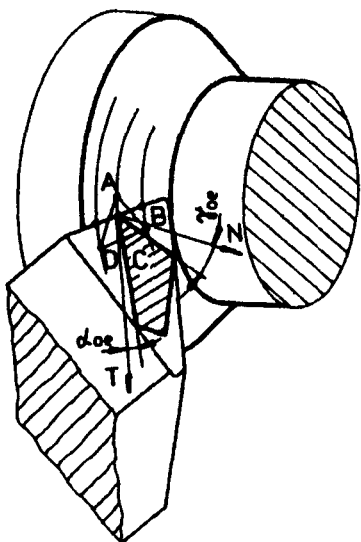
2.3. PRACOVNÉ (TECHNOLOGICKÉ) ÚLOHY

Ukážeme analytické a numerické riešenie vybraných úloh z oblasti geometricko-kinematickej analýzy procesu rezania.

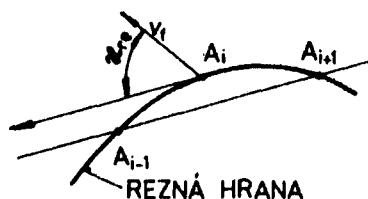
Analytické riešenia sa vzťahujú vždy na určitý konkrétny príklad. Numerické riešenia sú všeobecne použiteľné pre ľubovoľný spôsob obrábania. Pracovné uhly rezného klina sú uhly, ktoré zvierajú prvky rezného klina s tzv. pracovným súradnicovým systémom. Osi pracovného súradnicového systému sú dané smermi rezného pohybu, posuvu a prísuvu.

2.3.1. Pracovné (technologické) uhly

Pracovné (technologické) uhly rezného klina určíme vzhľadom na reznú plochu. Pracovný uhol chrbta je uhol medzi vektorom rezného pohybu a chrbtovou plochou nástroja v danom bode (obr. 2.9.).



Obr. 2.9. Pracovný uhol chrbta a čela



Obr. 2.10. Pracovný uhol nastavenia reznej hrany

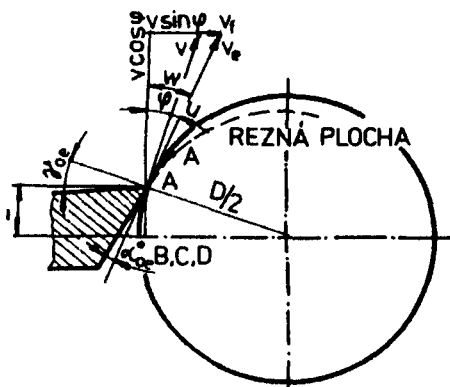
Pracovný uhol čela je uhol medzi normálou k reznej ploche a čelnou plochou nástroja v danom bode (obr. 2.9.).

Pracovný uhol nastavenia je uhol medzi vektorom reznej hrany a vektorom posuvu (obr. 2.10).

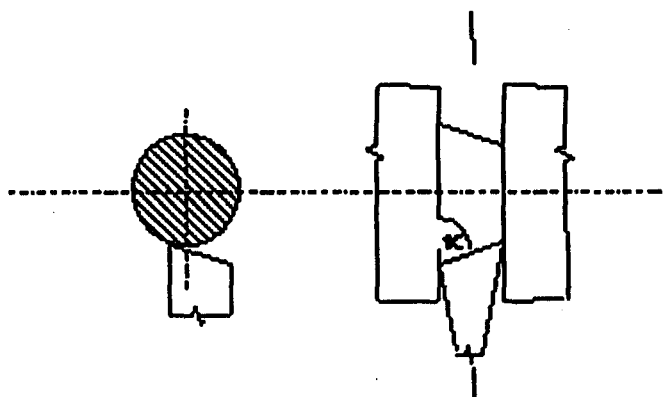
Pracovný uhol chrbta a čela vypočítame ako uhol medzi priamkou a rovinou, pracovný uhol nastavenia ako uhol medzi vektormi. Analytické riešenie pracovných uhlov si ukážeme na príklade.

Príklad:

Zapichovanie, nôž je nastavený nad osou otáčania. Treba vypočítať pracovný ortogonálny uhol chrbta a čela.



Obr. 2.11. Pracovný uhol čela a chrbta pri zapichovaní



Obr. 2.12. Schéma pre výpočet uhlov k obr. 2.11. ak $\kappa_r \neq 90^\circ$

Priemet reznej plochy je (obr. 2.11.) špirála. Tangenta, resp. normála k tejto špirále v bode reznej hrany určujú pracovné uhly.

Pretože nôž je nad osou otáčania, vektor hlavného pohybu zvierá so zvislým smerom uhol φ

$$\varphi = \arcsin(2z/D)$$

kde z je nastavenie noža nad alebo pod stred (rovinu osi otáčania obrobku),

D - obrábaný priemer.

Vektor rezného pohybu v_e zvierá s vektorom hlavného pohybu v_c uhol u , so zvislým smerom uhol w . Uhol w vypočítame z rovnice

$$w = \arctg(v_f + v_c \cdot \sin \varphi) / (v_c \cdot \cos \varphi)$$

Ak uhol nastavenia reznej hrany κ_r je iný ako 90° , takto vypočítaný uhol treba ešte prepočítať (obr. 2.12.).

$$\text{tg } w_s = \text{tg } w \cdot \sin \kappa_r$$

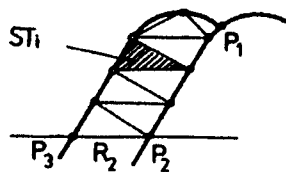
Pracovné uhly sú $\alpha_{oe} = \alpha_o - w_s$, resp. $\gamma_{oe} = \gamma_o + w_s$

2.3.2. Prierez odrezávanej vrstvy

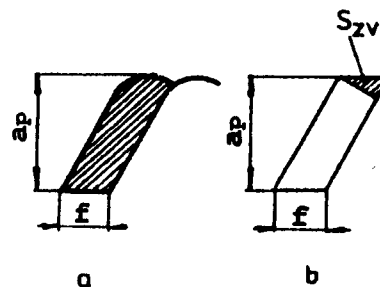
Prierez odrezávanej vrstvy (dielensky „prierez triesky“) je určený v profilovej rovine. Je to obrazec ohraničený dvoma susednými stopami reznej plochy a stopou obrábanej plochy (obr. 2.13). Numerické riešenie vyžaduje stanoviť súradnice priesečníkov P_1 , P_2 a P_3 , rozdeliť prierez na elementárne časti, napr. trojuholníky a počítať ich plošný obsah. Prierez (plošný obsah) odrezávanej vrstvy dostaneme potom ako súčet plošného obsahu elementárnych trojuholníkov

$$S = \sum_{i=1}^k ST_i$$

kde k je počet elementárnych trojuholníkov.



Obr. 2.13. Numerický výpočet prierezu odoberanej vrstvy



Obr. 2.14. Schéma k výpočtu odoberanej vrstvy

Analytické riešenie ukážeme pre prípad pozdĺžneho sústruženia. Približný výpočet podľa obr. 2.14a dáva výsledok

$$S = f \cdot a_p$$

kde S je plošný obsah prierezu,

f - posuv,

a_p - hĺbka rezu.

Tento výsledok platí, ak vedľajší uhol nastavenia $\kappa_r = 0$. Ak predpokladáme, že $\kappa_r \neq 0$ a zároveň $r_\epsilon = 0$ (r_ϵ je polomer hrotu), potom (obr. 2.14b)

$$S = f \cdot a_p - S_{zv}$$

kde S_{zv} je zvyškový prierez,

$$S_{zv} = \frac{\text{tg} \kappa_r \cdot \text{tg} \kappa_r}{2 (\text{tg} \kappa_r + \text{tg} \kappa_r)} f^2$$

2.3.3. Výpočet hrúbky a šírky odrezávanej vrstvy

Hrúbka odrezávanej vrstvy je jej rozmer kolmý na stopu hlavnej reznej hrany. Pri sústružení v priamkovitej časti stopy (obr. 2.15a)

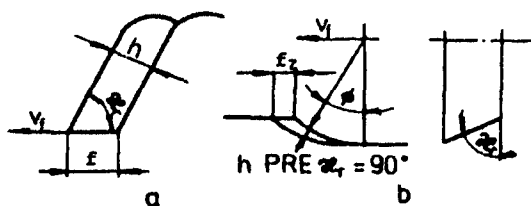
$$h = f \cdot \sin \kappa_r$$

kde κ_r je uhol medzi stopou reznej hrany a smerom posuvu.

Pri frézovaní (obr. 2.15b) je hrúbka v smere rezného pohybu menlivá. Závisí od uhla pootočenia frézy Φ

$$h = f_z \cdot \sin \kappa_r \cdot \sin \Phi$$

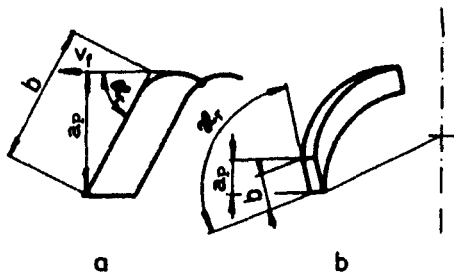
kde f_z je posuv na zub.



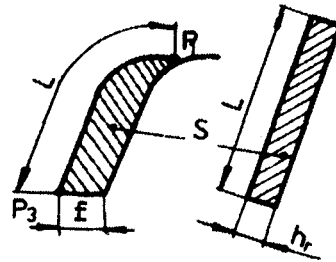
Obr. 2.15. Hrúbka odrezávanej vrstvy h pri
a – sústružení, b – valcovom frézovaní

Šírka odrezávanej vrstvy je jej rozmer v smere stopy hlavnej reznej hrany. Pri sústružení a čelnom frézovaní (obr. 2.16.).

$$b = a_p / \sin \kappa_r$$



Obr. 2.16. Šírka odrezávanej vrstvy b pri
a – sústružení, b – čelnom frézovaní



Obr. 2.17. Redukovaná hrúbka h_r
odrezávanej vrstvy

Šírka odrezávanej vrstvy je jej rozmer v smere stopy hlavnej reznej hrany. Pri sústružení a čelnom frézovaní (obr. 2.16.)

$$b = a_p / \sin \kappa_r$$

Tu sa zmienime aj o tzv. redukovanej hrúbke odrezávanej vrstvy. Redukovaná hrúbka odrezávanej vrstvy je definovaná pomocou dĺžky stopy reznej hrany v zábere, t. j. dĺžkou čiary P1 – P3 (obr. 2.17.).

Redukovaná hrúbka je

$$h_r = S / L$$

kde L je dĺžka stopy reznej hrany v zábere.

3. REZANIE AKO FYZIKÁLNY PROCES

3.1. VZNIK TRIESKY

Trieska je definovaná ako z obrobku odrezaná časť materiálu. Obrábaný materiál pri vnikaní rezného klina sa pružne a plasticky deformuje, kladie odpor proti vnikaniu rezného klina. Pružne sa deformujú aj prvky sústavy SNOP mení sa pôvodná poloha obrobku a rezného klina a môže vznikáť aj chvenie.

Deformačná práca pri rezaní sa mení na teplo, ktoré ohrieva obrábaný materiál a rezný klin. Zvýšenie teploty pôsobí na fyzikálne a mechanické vlastnosti materiálov a ovplyvňuje vzájomné spolupôsobenie obrábaného materiálu, rezného materiálu a prostredia, v ktorom proces rezania prebieha. Výsledkom spolupôsobenia je nárastok a opotrebenie rezného klina. Proces tvorby nárastku a opotrebenia menia tvar rezného klina, čo spätne pôsobí na deformačnú prácu.

Pochopenie podstaty procesu rezania vyžaduje skúmať javy, ktoré prebiehajú pri vzniku triesky. Prvotný význam z týchto javov majú plastické deformácie.

3.1.1. Model SNOP pre proces rezania

V procese rezania sa vlastnosti prvkov systému SNOP menia.

Rezný klin. Tvar rezného klina a vlastnosti jeho povrchovej vrstvy vznikom nárastku, opotrebením, teplotou rezania a pôsobením prostredia sa menia. V procese rezania treba uvažovať nie pôvodné vlastnosti rezného klina, ale jeho skutočné vlastnosti. Stručne hovoríme o skutočnom reznom kline.

Obrábaný materiál. Deformáciou, teplotou rezania a spolupôsobením skutočného rezného klina sa menia vlastnosti obrábaného materiálu. Na dotykové povrchy rezného klina nepôsobí materiál s pôvodnými, ale pozmenenými vlastnosťami.

Pohyby pri rezaní. Pohyby nezodpovedajú vždy pôvodným pohybom systému SNOP. V procese rezania vznikajú vlastné, vynútené alebo samobudené kmity, alebo také kmity môžu pôsobiť na sústavu SNOP zvonka. Preto pri analýze procesu rezania treba uvažovať so skutočnými pohybmi systému.

Vzájomná poloha rezného klina a obrobku sa tiež mení. Nejde len o zmeny vyvolané kmitaním prvkov sústavy, ale aj o zmeny vyvolané pružnými a teplotnými deformáciami a opotrebovaním rezného klina.

Proces, ktorý prebieha v určitom systéme, modelujeme tak, že opíšeme vybrané vlastnosti jeho prvkov vo volených časových intervaloch. Preto proces rezania môžeme opísať ako postupnú zmenu vlastností jeho prvkov.

Pochopenie javov, ktoré prebiehajú v procese rezania, vyžaduje brať do úvahy skutočný rezný klin, skutočné vlastnosti obrábaného materiálu, skutočné pohyby pri rezaní a skutočnú vzájomnú polohu nástroja a obrobku.

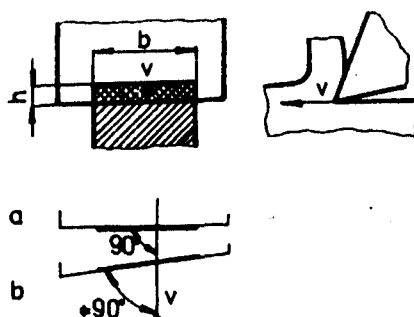
Ide o mimoriadne zložitý komplexný systém, v ktorom zmeny prebiehajú s rôznou rýchlosťou alebo frekvenciou. Rýchle zmeny (zmeny s veľkou frekvenciou) z hľadiska pomalých zmien možno považovať za stále a brať do úvahy ich priemernú hodnotu. Jednotlivé zmeny nie sú však izolované, ale sa vzájomne ovplyvňujú. Preto pri analýze ľubovoľného čiastkového javu v procese rezania je nesprávne vychádzať z pôvodných vlastností prvkov SNOP. Na

týchto vlastnostiach sa musí odzrkadliť vplyv analyzovaného javu. Znamená to, že pri modelovaní procesu rezania matematickými metódami (simuláciou) musíme s plynutím času meniť vlastnosti (modely) prvkov SNOP podľa skutočnosti.

Všetky charakteristiky procesu rezania sú výstupmi zo systému so spätnou väzbou, okrem drsnosti povrchu. Práca deformácie napr. závisí od teploty materiálu. Pôvodná teplota materiálu sa však následkom deformačnej práce zvyšuje, čo pochopiteľne spätne vplyva na deformačnú prácu. Trenie medzi trieskou a čelnou plochou je funkciou teploty a prostredia. Trením však vzniká teplo, ktoré ohrieva dotýkajúce sa vrstvy, čo pôsobí na charakter dotyku a prístup prostredia, teda aj na prácu trenia.

3.1.2. Fyzikálne modely rezania

Tak ako v každom vednom odbore, aj v teórii rezania je prirodzená snaha skúmať procesy rezania v zjednodušených podmienkach, v ktorých parametre pôsobiace na proces rezania majú konštantnú hodnotu. Zjednodušený fyzikálny model procesu rezania predstavuje tzv. voľné rezanie (obr. 3.1a). Priamkovitou reznou hranou, kolmou na hlavný pohyb, odrezávame vrstvu s konštantnou hrúbkou z výstupku materiálu. Reže teda len jedna rezná hrana, hrúbka odrezávanej vrstvy je konštantná, rýchlosť rezania je všade rovnaká a ak $b \gg h$, deformácia materiálu je prakticky rovinná. Ak je rezná hrana kolmá na smer rezania, hovoríme o ortogonálnom (kolmom) voľnom rezaní.



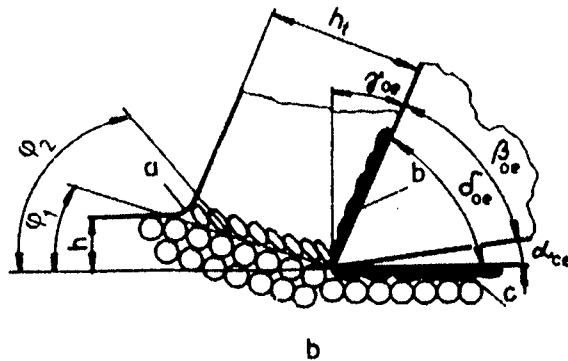
Obr. 3.1. Schéma voľného rezania

Ak rezná hrana so smerom rezania zvierá iný uhol (obr. 3.1b), hovoríme o šikmom voľnom rezaní. Pri voľnom rezaní skúmame proces rezania nie na skutočnom, ale na modelovom systéme.

3.1.3. Koreň triesky a jej charakteristiky

Koreň triesky tu vidíme na metalografickom výbruse časti rezaného materiálu aj so stopou rezného klina a odchádzajúcu triesku (obr. 3.2.). Koreň triesky získame rýchlym prerušením rezania a následným metalografickým spracovaním získanej vzorky koreňa triesky.

Koreň triesky je oblasť rezania, kde rezný klin (nástroj) deformuje a oddeľuje obrábaný materiál od obrobku vo forme triesky. Na metalografickom výbruse koreňa triesky (obr. 3.2.) rozoznávame tri oblasti deformácie:



Obr. 3.2. Koreň triesky a jeho charakteristika

1. primárna oblasť deformácie (a),
2. sekundárna oblasť deformácie povrchovej vrstvy triesky pri čele noža (b),
3. sekundárna oblasť deformácie povrchovej vrstvy obrobenej plochy (c).

Plastické deformácie materiálu v koreni triesky sú spojené so zvyšovaním tvrdosti a so vznikom zvyškových napätí. Oblasť deformácie môžeme preto skúmať nielen vizuálne podľa hranice zŕn, ale aj meraním a porovnávaním tvrdosti.

V koreni triesky môžeme rozoznať tieto geometrické charakteristiky (obr. 3.2.):

1. medzný uhol deformácie Φ_1 . Je to uhol medzi smerom rezného pohybu a medznou rovinou deformácie deformácie. Oddeľuje deformované a nedeformované zrná,
2. uhol textúry Φ_2 – je to uhol medzi smerom rezného pohybu a smerom deformovaných zŕn v trieske,
3. hrúbku odrezávanej vrstvy h – je to vzdialenosť obrábanej a obrobenej plochy,
4. hrúbku (deformovanej) triesky h_t – je to vzdialenosť okrajov horného a spodného povrchu triesky.

Na reznom klíne vidíme uhly chrbta, klinu, čela a rezu.

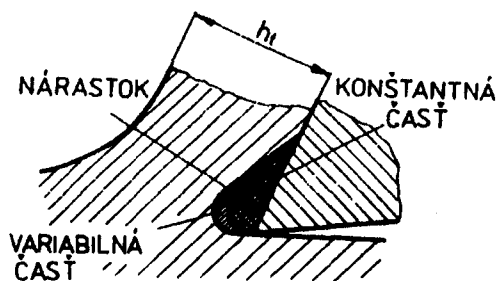
Pozorovanie výbrusov koreňov triesky, ale aj bezprostredné merania vedú k poznatku, že hrúbka (deformovanej) triesky h_t je vždy väčšia ako hrúbka odrezávanej vrstvy h . V procese rezania kovov nastáva stlačenie odrezávanej vrstvy. Tento jav voláme stlačením triesky.

3.1.4. Nárastok

Porovnanie metalografických výbrusov koreňov triesky získaných pri rôznych rezných rýchlostiach vykazujú zreteľné rozdiely v textúre spodnej vrstvy triesky pri reznej hrane. Pri obrábaní niektorých materiálov (ocelí, zliatin hliníka) na koreňoch triesky získaných pri rezných rýchlostiach 20 až 50 m . min⁻¹ vidíme časť materiálu odolnú leptaniu s tvarom palca (obr. 3.3.).

Odolnosť proti leptaniu poukazuje na to, že ide o veľmi silne deformovanú časť obrábaného materiálu. Niekedy po prerušení rezania (napr. rýchlym vytiahnutím noža zo záberu) nájdeme aj na čelnej ploche noža pozdĺž reznej hrany útvar s podobným profilom. Označuje-

me ho názvom nárastok a hovoríme o vzniku nárastku. Ak skúmame spodnú plochu triesky, nájdeme na nej priľnuté, akoby prilepené časti ináč zafarbené a čiastočne ohraničené.



Obr. 3.3. Schéme nárastku

Nárastok je silne deformovaná časť obrábaného materiálu prilipnutá k čelnej ploche nástroja pozdĺž reznej hrany, ktorá je taká tvrdá, že je schopná rezať. Stopy nárastku nájdeme na reznej ploche, na obrobenej ploche, na noži a na trieske.

3.2. FYZIKÁLNE JAVY PRI VZNIKU TRIESKY

Pri vzniku triesky možno rozlíšiť niekoľko ohraničených mechanizmov vzájomného pôsobenia prvkov obrábaného materiálu, rezného klina a prostredia. Sú to:

1. mechanizmus spolupôsobenia elementov kovového materiálu pri pôsobení vonkajšej sily,
2. mechanizmus spolupôsobenia prostredia a povrchu kovového materiálu,
3. mechanizmus statického spolupôsobenia dvoch kovových povrchov,
4. mechanizmus spolupôsobenia dvoch povrchov pri pohybe.

Pochopenie fyzikálnej podstaty rezania a vytvárania jej zodpovedajúcich modelov vyžaduje poznať tieto javy.

Povrch kovového materiálu je v bežných podmienkach obklopený plynným alebo tekutým prostredím. Na povrchu kovových materiálov vzniká absorpčný film. Pevnosť spoja absorpčného filmu je taká veľká, že film prakticky nemožno odstrániť bez poškodenia povrchu.

Absorpčný film mení vlastnosti povrchu materiálu. Ak je neporušený, potom súčiniteľ trenia je určený nie vlastnosťami dotýkajúcich sa materiálov, ale vlastnosťami absorpčného filmu.

Reálne povrchy nikdy nie sú ideálne hladké. Následkom toho dva povrchy sa začínajú dotýkať iba v niekoľkých málo diskretných bodoch. Vzhľadom na nepatrné rozmery týchto bodov budú tlaky aj pri malých silách veľké, dotýkajúce sa výstupky sú deformované, povrchový film, ktorý pokrýva povrchy, popraská a do styku prichádzajú bezprostredne častice vlastného materiálu vzoriek.

Ak sú vzorky kovové, vznikajú v miestach skutočného dotyku bez povrchových filmov veľmi pevné kovové väzby. Medzi dotýkajúcimi sa povrchmi vzniká adhézia (súchyt).

Ak tvrdosť a tvar dotýkajúcich sa častí jednej a druhej vzorky sú rovnaké, aj ich deformácie sú rovnaké (súmerné). Ak tvar alebo tvrdosť je rôzna, potom nastáva vnikanie čiastočiek jedného materiálu do druhého.

Tu treba mať na mysli, že všetky reálne materiály v mikroobjemoch sú anizotropné. Je zrejmé, že pri vzájomnom dotyku tvrdšie mikroobjemy vnikajú do mäkkších, avšak rozhoduje

aj tvar výstupkov. Hroty (ihlanové výstupky) aj z geometrického hľadiska vnikajú do plošných (rovinných) tvarov.

Okrem adhézných a geometrických javov pri dotyku dvoch povrchov môžu prebiehať aj difúzne javy. Podmienky ich vzniku sú:

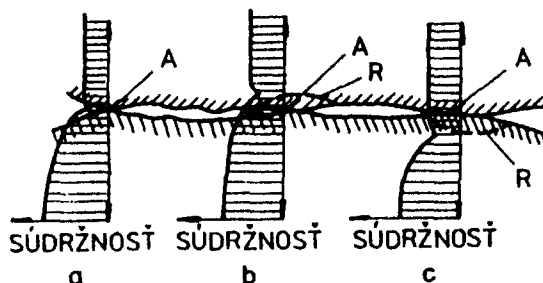
1. chemická príbuznosť prvkov oboch vzoriek (telies),
2. dostatočne vysoká teplota,
3. rozdielna koncentrácia prvkov v dotýkajúcich sa telesách.

Predpokladajme, že dva kovové povrchy sú k sebe pritlačené a potom vzájomne posúvané. Vzájomný posuv telies spôsobí, že adhézne a mechanické väzby, ktoré boli predtým vytvorené, sú porušené a vytvárajú sa nové. Proces vzniku a porušenia adhézných a mechanických väzieb spojený s difúznymi a chemickými javmi charakterizuje spolupôsobenie dvoch povrchov pri pohybe.

Tvar dotýkajúcich sa povrchov nebráni pohybu. Potom môžeme rozlíšiť dve vonkajšie stránky tohto procesu:

1. dynamickú. Znamená to, že na udržanie vzájomného pohybu treba pôsobiť na telesá silou. Hovoríme, že treba prekonať silu trenia;
2. geometrickú, ktorá sa prejaví zmenou tvaru pohybujúcich sa povrchov. Hovoríme, že povrchy sa opotrebojú.

Medzi plasticky deformovanými výstupkami dotýkajúcich sa telies pôsobia adhézne sily. Ich väzba sa pri vzájomnom pohybe poruší. Pre porušenie väzby platí zákon najmenšieho odporu, to znamená, že väzba sa poruší po ploche, po ktorej odpor proti porušeniu väzby je minimálny. Umiestnenie tejto plochy závisí od konkrétnych vlastností materiálu oboch výstupkov a od pevnosti vzájomnej väzby. Možno rozlíšiť tieto prípady v závislosti od gradientu mechanických vlastností výstupkov. Na obr. 3.4. zobrazujeme rez dotykovej oblasti (plochy), preto hovoríme o čiarach porušenia. Možnosti sú tieto:



Obr. 3.4. Gradient mechanických vlastností a porušenia povrchovej vrstvy

1. väzba sa poruší v miestach styku,
2. väzba sa poruší po čiare, ktorá obklopuje výstupok vo vrchnom telese,
3. väzba sa poruší po čiare, ktorá obklopuje výstupok v spodnom telese.

Ak si spodné teleso predstavíme ako rezný klin, vrchné ako triesku, druhý prípad predstavuje vznik elementárneho nárazku, tretí opotrebenie elementárneho objemu rezného klina.

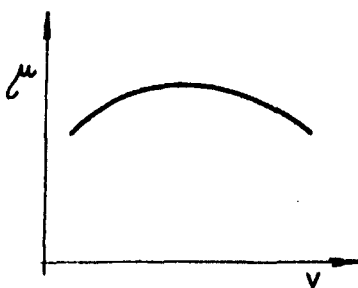
3.2.1. Spolupôsobenie povrchov pri rezaní

Rýchlosť vzájomného pohybu obrobku a nástroja ovplyvňuje teplotu dotýkajúcich sa povrchov, určuje charakter dotyku oboch telies a vnikanie prostredia medzi trecie plochy.

Vnikanie prostredia medzi dotýkajúce sa povrchy v procese rezania je umožnené kapilárnymi účinkami, zavlečením prostredia pohybom a nasávacím účinkom vákua, vznikajúceho v miestach rozrušenia adhézných spojov.

Pri malých rýchlostiach sú teploty nízke a málo vplývajú na vlastnosti obrábaného a rezného materiálu. Obe telesá (trieska a nôž) sa dotýkajú v diskretných bodoch. Hovoríme o bodovom dotyku. Prostredie má dobrý prístup k trecím plochám. Na týchto vznikajú absorpčné filmy z molekúl prostredia a chemických zlúčenín, ktoré prostredie vytvára s kovom. Povrchové filmy, aj keď boli rozrušené, sa rýchlo obnovia. Súčiniteľ trenia je preto malý. Väzby medzi rezným klinom a materiálom triesky sú ohraničené časovo aj priestorovo, nárastok nevzniká.

Pri vyšších (stredných) rýchlostiach sú teploty vyššie, trieska je plastickejšia, preto skutočná dotyková plocha rastie. Prístup prostredia je sťažený, adhézne sily sú značné. Navonok sa to prejaví zvýšením súčiniteľa trenia (obr. 3.5.). Gradient mechanických vlastností povrchovej vrstvy triesky je záporný (smerom do hĺbky klesá). Preto nastáva hĺbkové rozrušenie materiálu triesky. Na noži vzniká nárastok.



Obr. 3.5. Závislosť súčiniteľa trenia od reznej rýchlosti

Pri vysokých rýchlostiach je teplota taká veľká, že spôsobuje značný pokles mechanických vlastností povrchovej vrstvy triesky. Materiál triesky je zatlačený aj do najjemnejších priehlbín rezného materiálu. Skutočná dotyková plocha má maximálnu hodnotu, zodpovedajúcu skutočnému povrchu. Hovoríme o plošnom dotyku.

Prostredie nemá prístup k trecím plochám, dotýkajú sa čisté kovové povrchy. Gradient mechanických vlastností povrchovej vrstvy triesky je kladný, preto nastáva povrchové rozrušenie, nárastok nevzniká. Pre vysoké teploty je odpor materiálu triesky proti porušeniu väzby malý. Prejaví sa to poklesom súčiniteľa trenia.

Pri stredných a vysokých rýchlostiach sú teploty dostatočne vysoké pre vznik chemických a difúzných procesov. Prvky materiálu rezného klina a triesky vzájomne difundujú. Tento proces mení pôvodné vlastnosti materiálu rezného klina.

Pri úbytku materiálu rezného klina, t. j. pri jeho opotrebovaní spolupôsobia tri mechanizmy:

1. mechanicko-brúsny,
2. adhéžno-molekulárny,
3. chemicko-difúzny.

Podstatou mechanicko-brúsneho opotrebovania je to, že tvrdšie čiastočky jedného materiálu vyryjú ryhu do mäkšieho materiálu, resp. výstupky sa odlamujú. Predpokladom toho je anizotropia materiálu v mikroobjektoch. V mikroobjektoch pri teplotách rezania tvrdosť rezného materiálu môže byť menšia ako tvrdosť obrábaného materiálu. Spolupôsobí aj tvar výstupkov. Ihlan vždy vnika do roviny.

Podstatou adhézne-molekulárneho opotrebovania je vznik molekulárnej väzby medzi obrábaným a rezným materiálom. Predpokladom vzniku kovovej väzby sú:

- kovovo čisté povrchy,
- podobná kryštálová mriežka,
- deformácia povrchov, t. j. existencia prítlačnej sily,
- dostatočne vysoké teploty.

Rezný materiál sa opotrebuje, ak pevnosť spoja obrábaného materiálu s rezným materiálom je väčšia ako vzájomná pevnosť spojov elementov rezného materiálu. Väzba v týchto podmienkach sa poruší vytrhnutím čiastočky rezného materiálu. Vytrhnutá čiastočka môže pôsobiť na ostatné časti rezného klina mechanicko-brúsnym účinkom.

Podstatou chemicko-difúzneho opotrebovania je vzájomný prenos materiálu medzi rezným klinom a trieskou difúznymi procesmi. Prebiehajú pri dostatočne vysokých teplotách. Spolu pôsobia aj chemické procesy, a to nielen medzi rezným a obrábaným materiálom, ale aj medzi nimi a prostredím. (To je štvrtý mechanizmus, tzv. chemické opotrebenie). Vznikajú oxidy alebo iné povrchové povlaky, ktoré môžu mať veľkú alebo malú priľnavosť, môžu byť mäkké alebo tvrdé a pod. Tvrdé a pevne prilipnuté povlaky na reznom klíne znižujú jeho opotrebenie, mäkké a ľahko odstrániteľné povlaky intenzitu opotrebovania zvyšujú.

Chemické procesy prebiehajú za predpokladu chemickej príbuznosti prvkov obrábaného a rezného materiálu alebo prostredia. Chemické spolupôsobenie povrchu a prostredia nadobúda mimoriadny význam pri použití rezných kvapalín.

3.3. VÝSKUM KOREŇA TRIESKY

Zaoberá sa tromi javmi spojenými so vznikom triesky. Sú to: stlačené triesky, vznik nárstku a stvrdnutie povrchu. Postupne uvedieme výsledky analytickej, simulačnej a experimentálnej metódy výskumu.

3.3.1. Stlačenie triesky

3.3.1.1. Geometrická analýza

Skúmanie metalografického výbrusu koreňa triesky (obr. 3.2.) ukazuje, že hrúbka triesky h_t je väčšia ako hrúbka odrezávanej vrstvy. Hovoríme o stlačení triesky. Stlačenie triesky je mierou deformácie materiálu pri rezaní. Preto na základe hodnoty stlačenia triesky možno posudzovať hodnoty deformačnej práce, rezných síl, teploty a pod.

Stlačenie triesky definujeme pomerom

$$\xi = L / L_t$$

kde L je dĺžka dráhy rezania,

L_t - dĺžka odrezanej triesky.

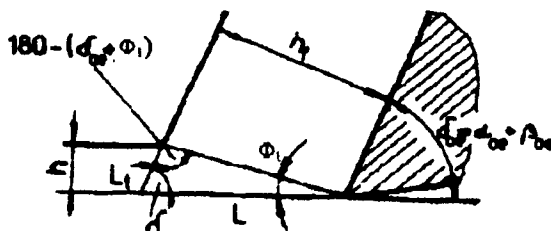
Z geometrických súvislostí medzi parametrami koreňa triesky a rezného klína možno vypočítať stlačenie triesky. Za predpokladu nestlačiteľnosti materiálu, konštantných vlastností materiálu bez fázových premen a deformácie iba v rovine rezu x, y pre pomer L / L_t (obr. 3.6.) na základe sínusovej vety dostaneme

$$\xi = L / L_t = \sin (180 - (\delta_{oe} + \Phi_1)) / \sin \Phi_1$$

ktorý môžeme upraviť na

$$\xi = \frac{\sin (\delta_{oe} + \Phi_1)}{\sin \Phi_1}$$

kde Φ_1 je medzný uhol deformácie (obr. 3.6.).



Obr. 3.6. Schéma k výpočtu stlačenia triesky

Stlačenie triesky umožní vypočítať rýchlosť odchodu triesky (rýchlosť triesky na čele noža). Ak v rovnici pre stlačenie

$$\xi = L / L_t$$

uvažujeme dráhy za jednotku času, t. j. rýchlostí, úpravou dostaneme rovnicu pre výpočet rýchlosti odchodu triesky

$$v_t = v_c / \xi$$

Stlačenie triesky umožní vypočítať aj medzný uhol deformácie pomocou vzťahu ľahko odvoditeľného z obr. 3.6.:

$$\operatorname{tg} \Phi_1 = \frac{\sin \delta_{oe}}{\xi - \cos \delta_{oe}}$$

Existuje aj viacero spôsobov teoretického určenia medzného uhlu deformácie, napr. podľa Ernsta a Merchanta

$$\Phi_1 = 45^\circ - \frac{\eta}{2} + \frac{\gamma_{oe}}{2}$$

Podľa Stablera

$$\Phi_1 = 45^\circ - \eta + \frac{\gamma_{oe}}{2}$$

Podľa Lee-Schafera

$$\Phi_1 = 45^\circ - \eta + \gamma_{oe}$$

kde η je trecí uhol, $\eta = \text{arctg } \mu$, pričom μ je koeficient trenia (medzi trieskou a čelom nástroja). Ďalej ešte $\gamma_{oe} = 90^\circ - \delta_{oe}$.

Teoreticko-experimentálny je spôsob určenia medzného uhla deformácie podľa Merchanta, kde platí

$$\Phi_1 = \frac{C - \eta + \gamma_{oe}}{2}$$

pričom ešte C je tzv. Merchantova konštanta, je to uhol charakterizujúci obrábaný materiál. Dôvodom zavedenia tejto Merchantovej konštanty bolo, že predchádzajúce teoretické vzorce nedávali vždy zhodné výsledky s experimentami (napr. porovnaním vzorca podľa Merchanta a vzorca podľa Ernsta a Merchanta pre vzorec Ernstov a Merchantov vychádza Merchantova konštanta $C = 90^\circ$ pre všetky obrábané materiály). Merchant experimentálne určil hodnoty konštant C pre rôzne obrábané materiály. Stredná hodnota C pre ocele je $C = 75^\circ$. Konštanta C býva tabelovaná.

Medzný uhol deformácie umožňuje určiť aj uhlové pretvorenie γ (deformáciu od šmykového napätia) podľa tzv. Piispanenovho vzorca

$$\gamma = \cotg \Phi_1 + \text{tg} (\Phi_1 - \gamma_{oe})$$

a napokon možno určiť aj vyššie spomínaný uhol textúry Φ_2 vzťahom podľa Rosenberga

$$\cotg (\Phi_2 - \Phi_1) = \gamma + 1$$

alebo podľa Kronenberga a Glebova

$$\cotg (\Phi_2 - \Phi_1) = \gamma$$

alebo podľa Brixa a Zvorykina

$$\cotg (\Phi_2 - \Phi_1) = \gamma + \text{tg} (\Phi_1 - \gamma_{oe})$$

alebo podľa vzťahu, ktorý odvodil Lipa

$$\cotg (\Phi_2 - \Phi_1) = \gamma + \text{tg} \Phi_1$$

pričom vo všetkých vzťahoch je γ uhlové pretvorenie.

Najmä pre viazané rezanie uvedené vzťahy celkom nevystihujú experimentálne získané hodnoty Φ_2 .

Preto sa musí aproximovať

$$\cotg (\Phi_2 - \Phi_1) = c_1 \gamma + c_2$$

alebo

$$\cotg (\Phi_2 - \Phi_1) = c_3 \gamma^c$$

kde konštanty c , c_1 , c_2 , c_3 je nevyhnutné určiť experimentálne.

3.3.1.2. Fyzikálna podstata stlačenia triesky

Medzný uhol deformácie Φ_1 sa vytvára v súlade so zákonmi plastickej deformácie kovov. Najdôležitejšie z nich sú tieto:

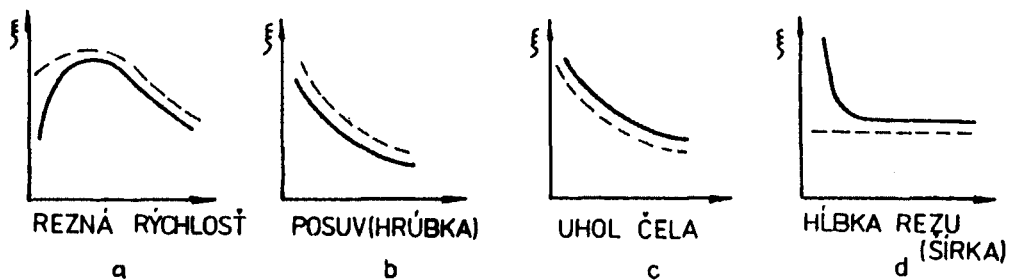
1. zákon najmenšieho odporu,
2. zákon maximálneho šmykového napätia.

Medzný uhol deformácie je vždy menší ako 45° . Jeho hodnota závisí od súčiniteľa trenia triesky o čelo noža. So zvyšovaním súčiniteľa trenia medzný uhol deformácie sa znižuje. Pretože medzný uhol deformácie je menší ako 45° , hrúbka triesky je vždy väčšia ako hrúbka odrezávanej vrstvy.

Zdanlivé anomálie sú publikované v spojitosti s obrábaním titanu.

3.3.1.3. Výsledky experimentálneho výskumu

Typické závislosti stlačenia triesky od reznej rýchlosti, posuvu, hĺbky rezu a uhla čela sú na obr. 3.7. vyznačené plnou čiarou. Prerušovanou čiarou sú označené výsledky teoretickej analýzy.



Obr. 3.7. Experimentálna (plná čiara) a teoretická (prerušovaná čiara) závislosť stlačenia triesky od a – reznej rýchlosti, b – posuvu (hrúbky odrezávanej vrstvy), c – uhla čela, d – hĺbky rezu (šírky odrezávanej vrstvy)

3.3.2. Nárastok

Nárastok (obr. 3.3.) je silne deformovaná vrstva obrábaného materiálu, ktorá je pevne prilipnutá k čelnej ploche pozdĺž reznej hrany. Skladá sa z konštantnej a variabilnej časti. Konštantná časť sa odtrháva od čela len výnimočne. Variabilná časť je odnášaná trieskou alebo reznou plochou, vzápätí je však nahradzovaná novou.

Dôležitou vlastnosťou nárastku je menlivosť jeho rozmerov v čase a priestore (pozdĺž reznej hrany). Druhá jeho dôležitá vlastnosť je vysoká tvrdosť, ktorá umožní prevziať funkciu reznej hrany.

Vznik nárastku je podmienený adhéziou medzi obrábaným a rezným materiálom. Táto závisí najmä od chemického zloženia a štruktúry obrábaného a rezného materiálu, od deformácie, teploty a prítomnosti povrchových filmov. Rozhodujúci vplyv má záporný gradient mechanických vlastností adhézných väzieb smerom do hĺbky triesky.

3.3.2.1. Simulačný model vývoja nárastku

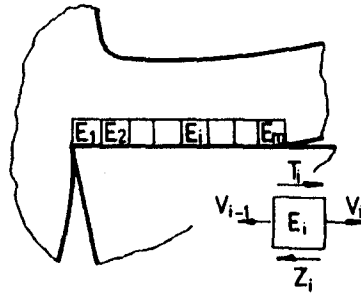
Podstata vzniku nárastku a opotrebovania je odtrhnutie časti materiálu. Pri nárastku sa odtrhuje časť triesky a prilepuje sa na nástroj. Pri opotrebovaní sa odtrhuje časť nástroja (rezného klina) a odchádza s trieskou do prostredia.

Simulačný model nárastku zostrojíme na základe týchto predstáv, ktoré úzko súvisia. Časová frekvencia zmeny nárastku je podstatne väčšia ako zmena tvaru rezného klina opotrebo-

vaním. Táto skutočnosť umožní vytvoriť podsystem nárastku, vymedzený časovým intervalom, v ktorom opotrebovanie rezného klina zanedbáme. V podsystemoch nárastku aj opotrebovanie rezného klina zanedbáme. Táto čiara definuje skutočný tvar rezného klina v danom časovom okamihu.

Ďalšie východiskové podmienky nech sú dané skutočnými vlastnosťami a stavom materiálu (skutočného) rezného klina a obrábaného materiálu, t. j. ich chemickým zložením, štruktúrou, mechanickými vlastnosťami a teplotou.

Tretiu skupinu východiskových podmienok nech tvoria podmienky vzájomného spolupôsobenia elementov obrábaného materiálu, rezného klina a prostredia, t. j. prítomnosť povrchových filmov, vzájomná rýchlosť pohybu, prítláčny tlak, dĺžka dotyku triesky s rezným klinom a pod.



Obr. 3.8. Sily pôsobiace na element triesky E_i

Vyznačme v dĺžke dotyku triesky s rezným klinom na spodnej ploche triesky m elementov E_1, \dots, E_m (obr. 3.8.). Na základe východiskových podmienok vypočítame sily väzby medzi týmito elementmi. Sú to tieto sily:

1. sily vnútorného trenia T_i medzi elementmi E_i a elementom triesky, ktorý je nad ním,
2. sily súdržnosti V_i medzi elementmi E_i a E_{i+1} , resp. E_{i-1} ,
3. adhézne sily Z_i medzi elementom E_i a elementom rezného klina, ktorý je pod ním.

Potom pre elementy $i = 1 \dots m$ môžeme určiť výslednicovú silu, ktorou je skupina k elementov unášaná trieskou, resp. zadržovaná trieskou, resp. zadržovaná silami adhézie:

$$F_u = \sum_{i=1}^k T_i + V_k, \quad F_a = \sum_{i=1}^k Z_i \quad \text{pre } k = 1 \dots m$$

Ak unášajúca sila F_u bude menšia ako adhézne sily F_a

$$F_u < F_a$$

potom skupina k elementov sa zachytí na čele rezného klina, t. j. nárastok rastie.

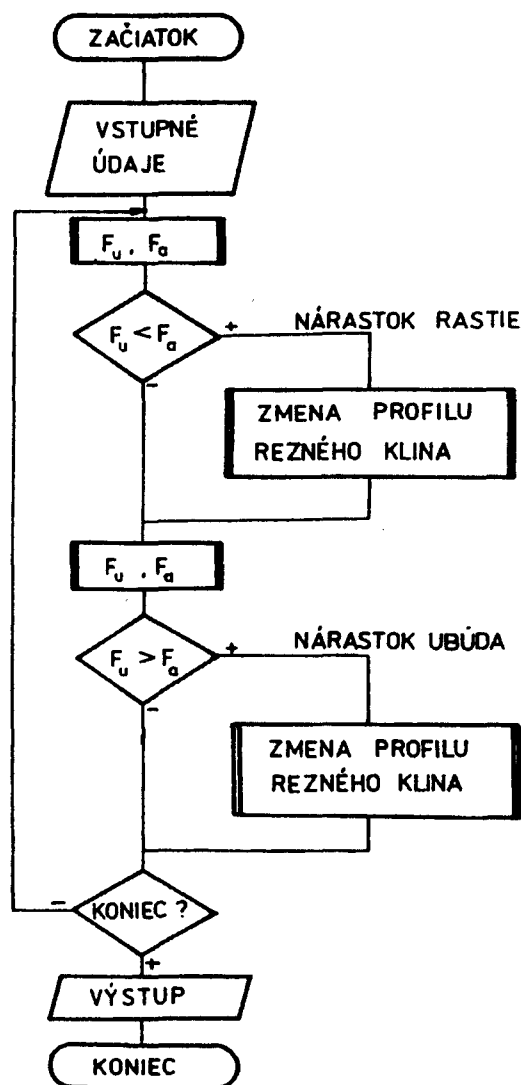
V ďalšom kroku simulujeme ubúdanie nárastku. Postupne analogicky ako pri raste. Na povrchu skutočného čela vyznačíme v dĺžke dotyku triesky elementy $ES_1 \dots ES_n$ a vypočítame sily väzby TS_i , VS_i a Z_i .

Potom opäť porovnáme unášajúce sily a sily adhézie pre skupinu k elementov. Skupiny však vytvárame od posledného elementu n :

$$F_u = \sum_{i=k}^n TS_i + VS_k > F_a = \sum_{i=k}^n Z_i \quad \text{pre } k = m \dots 1$$

Pri splnení tejto podmienky skupina $m - i$ elementov sa zadržiava na trieske, t. j. je unášaná triedkou. To znamená, že nárastok ubúda. Opäť treba korigovať východiskové podmienky.

Korekciou východiskových podmienok po ubúdaní nárastku sme ukončili jeden cyklus simulácie tvorenia nárastku. Ak časový interval simulácie nárastku nebol vyčerpaný, vrátime sa a počítame ďalší cyklus. Vývojový diagram (simulačný model) je na obr. 3.9.

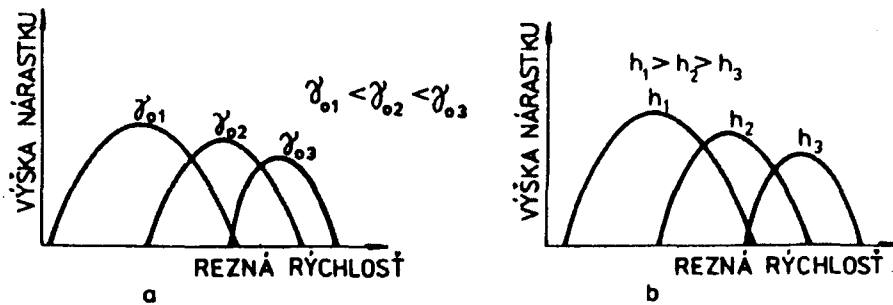


Obr. 3.9. Ideový simulačný model vývoja nárastku

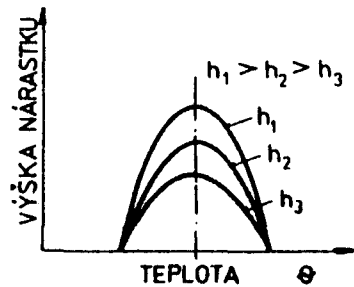
3.3.2.2. Výsledky experimentálneho výskumu

Typické závislosti výšky nárastku od reznej rýchlosti pre rôzne uhly čela a hrúbky odrezávanej vrstvy sú na obr. 3.10. Priebehy plne zodpovedajú teoretickým poznatkom o mechanizme spolupôsobenia dvoch povrchov pri pohybe. Ak základné podmienky vzniku nárastku sú splnené, potom existuje určitá oblasť rezných rýchlostí, v ktorej nárastok vzniká. Mimo tejto oblasti rezných rýchlostí nemožno pozorovať vznik nárastku.

Rozhodujúci vplyv teploty rezania na oblasť tvorenia nárastku ukazuje diagram obr. 3.11. Pre rôzne hrúbky odrezávanej vrstvy nárastok vzniká v určitom intervale teploty rezania.



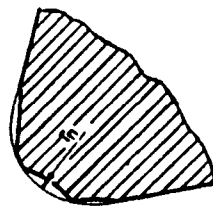
Obr. 3.10. Vplyv reznej rýchlosti na výšku nárazku pre rôzne uhly čela (a) a hrúbky odrezávanej vrstvy (b)



Obr. 3.11. Vplyv teploty rezania na výšku nárazku pre rôzne hrúbky odrezávanej vrstvy

3.3.3. Spevnenie povrchu a zvyškové napätia

Skutočná rezná hrana (obr. 3.12.) je vytvorená medzi čelnou a chrbtovou plochou nepravidelnými plôškami, ktoré vznikajú následkom drsnosti čelnej a chrbtovej plochy a dynamického pôsobenia zrn brúsneho kotúča pri ostrení. Polomer kruhového oblúka, ktorý preložíme cez profil reznej hrany, voláme polomer reznej hrany. Polomer reznej hrany závisí od štruktúry a zrnitosti materiálu rezného klina a od podmienok ostrenia a práce nástroja. Zvyčajne je v medziach 5 až 20 μm .



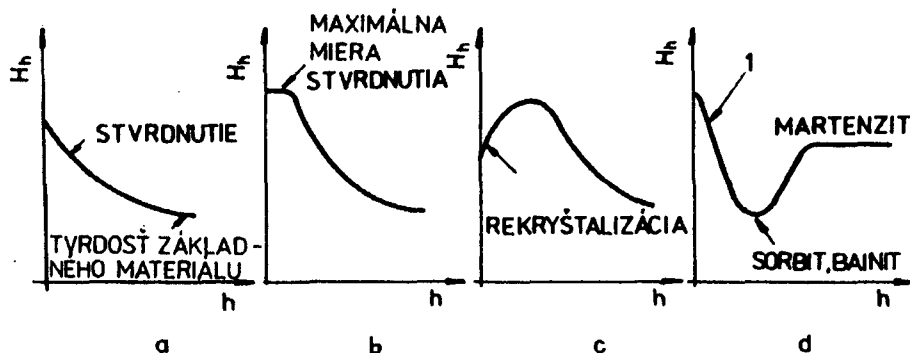
Obr. 3.12. Skutočný profil reznej hrany

Pretože rezná hrana je zaoblená, rezný klin neodreže celú vrstvu materiálu. Neodrezaná vrstva pri polomere reznej hrany je pružne a plasticky deformovaná. Preto tvrdosť nového povrchu, ktorý vzniká v procese rezania, je väčšia ako tvrdosť základného materiálu. Tento jav voláme stvrdnutím povrchu. Literatúra označuje tento jav aj spevnením.

Typické zmeny tvrdosti materiálu pod novým povrchom sú na obr. 3.13. Priebeh na obr. 3.13a zodpovedá opísanému mechanizmu. Väčším plastickým deformáciám v blízkosti povrchu zodpovedajú väčšie tvrdosti. Ak plastické deformácie prekročia určitú hraničnú hod-

notu, tvrdosť materiálu sa už nezvyšuje. Preto tvrdosť pri povrchu je konštantná. Taký priebeh je na obr. 3.13b.

Spevnenie povrchovej vrstvy môže byť ovplyvnené rekryštalizáciou (obr. 3.13c) alebo fázovými premenami (obr. 3.13d) vyvolanými vysokými okamžitými teplotami v procese rezania. Spevnenie na povrchu alebo tesne pod povrchom je menšie ako v hlbších vrstvách.



Obr. 3.13. Typické priebehy mikrotvrdości obrábaného materiálu v závislosti od hĺbky h pod povrchom: 1 – dodatočne zakalená, tzv. biela vrstva

Plastické deformácie, fázové premeny a vysoké okamžité teploty pôsobiace lokálne v diskretných bodoch dotyku (tzv. lokálny ohrev) vyvolávajú zvyškové napätia v povrchovej vrstve. Ak sú zvyškové napätia ťahové a prekročia medzu pevnosti materiálu v ťahu, vznikajú trhliny.

Spevnenie a zvyškové napätia podstatnou mierou ovplyvňujú prevádzkové vlastnosti súčiastok: pevnosť pri dynamickom namáhaní, odolnosť proti opotrebovaniu a korózii.

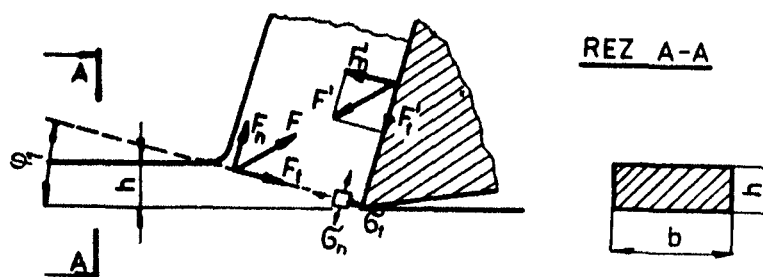
4. REZNÉ SILY

Silu, ktorou vtlačame nástroj do materiálu pri rezaní, voláme reznou silou. Odpor, ktorý kladie materiál proti porušeniu rezaním, je rezný odpor. Rezná sila a rezný odpor majú rovnakú veľkosť a smer, ale opačný zmysel.

4.1. ROVNOVÁHA SÍL V KORENI TRIESKY

4.1.1. Sily na čele

Element materiálu v medznej rovine deformácie (obr. 4.1.) je namáhaný tangenciálnym a normálovým napätím. Pre model koreňa triesky sily v medznej rovine deformácie sú:



Obr. 4.1. Rovnováha síl na čele noža

$$F_n = \frac{h \cdot b}{\sin \Phi_1} \sigma_n$$

$$F_t = \frac{h \cdot b}{\sin \Phi_1} \sigma_t$$

kde $h \cdot b / \sin \Phi_1$ je plošný obsah medznej roviny deformácie. Výslednica týchto síl je

$$F = \frac{h \cdot b}{\sin \Phi_1} \sqrt{\sigma_n^2 + \sigma_t^2}$$

Pre sily na čele môžeme napísať tieto vzťahy:

$$F' = F$$

$$F'_t = \mu \cdot F'_n$$

$$F' = \sqrt{F_n'^2 + F_t'^2}$$

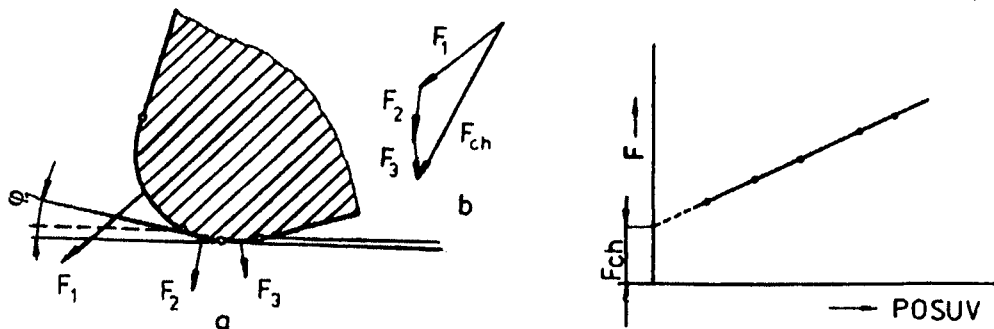
kde μ je súčiniteľ trenia.

Ak označíme $\eta = \arctg \mu$ a uvažíme, že uhol medzi F a F_t je $(\Phi_1 + \eta - \gamma_{oe})$, potom môžeme napísať tzv. vzorec Gadolinov

$$F = \frac{F_t}{\sin \Phi_1 \cos (\Phi_1 + \eta - \gamma_{oe})} = \frac{\sigma_t \cdot h \cdot b}{\sin \Phi_1 \cos (\Phi_1 + \eta - \gamma_{oe})}$$

4.1.2. Sily na chrabte

Sily na chrabte sú vyvolané pružnými a plastickými deformáciami vrstvy materiálu, ktorá polomerom reznej hrany nebola odrezaná. Táto vrstva sa stláča, prechádza pod reznou hranou, odpruží a dotýka sa časti chrabtovej plochy. Na zaoblení rezného klina vznikajú preto sily (obr. 4.2a):



Obr. 4.2. Rovnováha síl na chrabte noža (a) a výslednicová sila na chrabát (b)

F_1 – sila, ktorá stláča obrábaný materiál,

F_2 – sila, ktorá deformuje obrobený materiál,

F_3 – sila, pružných deformácií a trenia.

Výslednicu síl na chrabte dostaneme vektorovým sčítaním (obr. 4.2b)

$$F_{ch} = \bar{F}_1 + \bar{F}_2 + \bar{F}_3$$

4.1.3. Výslednicová rezná sila a jej zložky pre voľné a viazané rezanie

Sily na čele F a na chrabte F_{ch} pôsobia pri voľnom rezaní v rovine yz . Ich výslednica je sila F_v (obr. 4.3a)

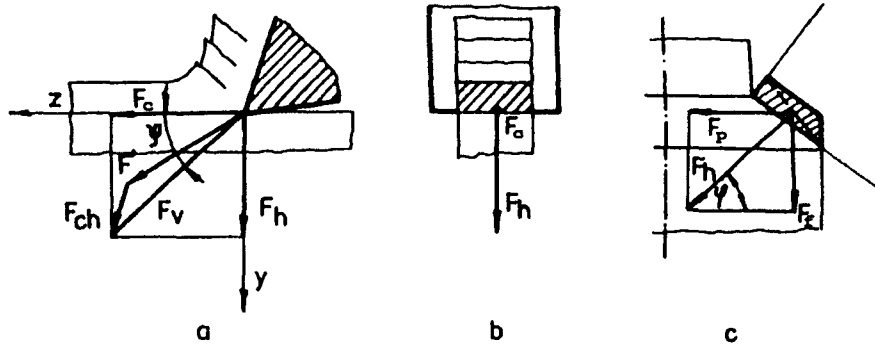
$$\bar{F}_v = \bar{F} + \bar{F}_{ch}$$

ktorú môžeme rozkladať do smerov z a y . Dostaneme silu hlavnú (tangenciálnu)

$$F_c = F_v \cdot \cos \psi$$

a normálovú

$$F_h = F_v \cdot \sin \psi$$



Obr. 4.3. Výslednicová rezná sila a jej zložky
a, b – pri voľnom rezaní, c – pri viazanom rezaní

Viazané rezanie si môžeme predstaviť ako zoskupenie elementárnych voľných rezaní (obr. 4.4.), kde elementárne normálové sily $F_{h,e}$ pôsobia kolmo na reznú hranu.

Pri viazanom rezaní (obr. 4.3c) sila F_h nepôsobí kolmo na priemet reznej hrany, prakticky je kolmá na uhlopriečku prierezu rezu.

Pri viazanom rezaní zložkou F_h môžeme rozkladať na zložky F_f a F_p . Zložka F_f pôsobí v smere posuvu, preto ju nazývame posuvovou zložkou reznej sily alebo jednoducho silou posuvu

$$F_f = F_h \cdot \sin \varphi$$

Zložka F_p pôsobí v smere prísuvu. Tento smer obvykle je kolmý na smer posuvu, preto túto zložku voláme normálovou zložkou reznej sily alebo niekedy aj jednoducho silou prísuvu

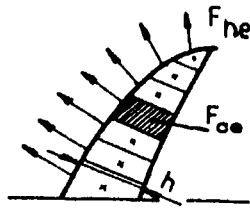
$$F_p = F_h \cdot \cos \varphi$$

Rozmery b , h prierezu odrezávanej vrstvy pri voľnom rezaní zodpovedajú hrúbke a šírke odrezávanej vrstvy pri viazanom rezaní, preto zo sily F_h možno vypočítať zložky F_f a F_p .

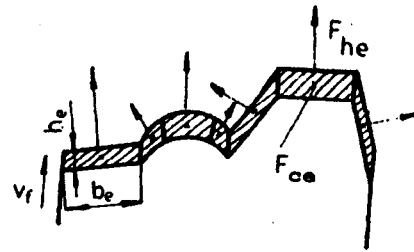
4.2. SIMULAČNÉ MODELY REZNÝCH SÍL

Modely reznej hrany, pohybov pri rezaní, obrobnku a vzájomnej polohy umožnia stanoviť pre ľubovoľný spôsob obrábania a časový okamih, prierez odrezávanej vrstvy, rýchlosť rezného pohybu, pracovné uhly rezného klina atď.

Ak prierez odrezávanej vrstvy rozdelíme na elementárne prierezy (obr. 4.4., 4.5.) na základe štatistických rovníc rezných síl získaných pri voľnom rezaní, môžeme stanoviť elementárne zložky reznej sily F_{ce} a F_{he} a ich výslednicu F .



Obr. 4.4. Elementárne prierezy a zložky rezných síl



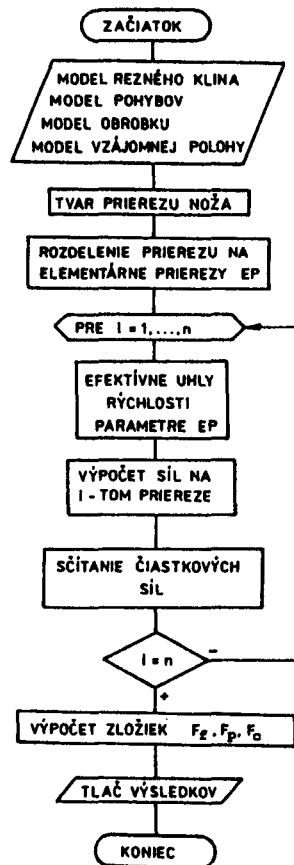
Obr. 4.5. Elementárne prierezy a zložky rezných síl pre tvarový nástroj

Opakujúc tento výpočet pre časové okamihy, ktoré za sebou nasledujú, možno stanoviť časový priebeh rezných síl v nestacionárnej etape práce nástroja alebo rezného klina. Výsledkom je časový priebeh rezných síl.

V oboch prípadoch hovoríme o simulácii reznej sily. Použitý výpočtový postup je simulačným modelom reznej sily. Simulovať môžeme okamžité hodnoty reznej sily a časový priebeh reznej sily.

4.2.1. Okamžitá hodnota reznej sily

Postupujeme tak, že prierez odrezávanej vrstvy rozdelíme na elementárne prierezy, stanovíme pracovné uhly, rýchlosti rezného pohybu a geometrické parametre elementárnych prierezov. Potom na základe závislosti zložiek síl od týchto parametrov pre voľné rezanie vypočítame elementárne sily a tieto vektorovo sčítame. Potom výslednicovú silu F rozkladáme do zložiek F_f , F_p , F_c . Vývojový diagram tohto postupu je na obr. 4.6.



Obr. 4.6. Vývojový diagram pre výpočet okamžitej hodnoty reznej sily

4.2.2. Časový priebeh reznej sily

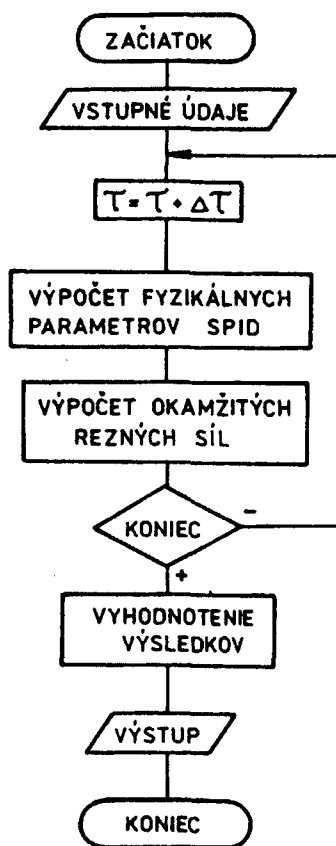
Matematický opis situácie zahŕňa v sebe ako nezávislý parameter aj čas alebo jemu zodpovedajúci parameter, napr. uhol pootočenia frézy, vzdialenosť rezného klina od vybraného bodu atď. Priebeh rezných síl opíšeme rovnicami (funkciami), ktoré sú iba po častiach spojité a hladké. Kým je rezný klin mimo obrábaného materiálu, hodnota rezných síl je nulová

$$F = f(t) = 0$$

Ak je rezný klin v obrábanom materiály a reže, potom rezné sily sú závislé od okamžitého prierezu odrezávanej vrstvy, od pracovných uhlov nástroja a od okamžitých vlastností obrábaného materiálu v mieste rezania

$$F = g(h, b, \gamma_{oc}, \sigma, t, \dots) \neq 0$$

Ak je súčasne niekoľko rezných klinov v zábere (ako napr. pri frézovaní), výslednicovú reznú silu, resp. jej zložky dostaneme vektorovým súčtom čiastkových síl, pôsobiacich na jednotlivé rezné klíny vo zvolených časových okamihoch.



Obr. 4.7. Vývojový diagram pre výpočet časového priebehu reznej sily

Výpočtový postup je simulačným modelom časového priebehu rezných síl. Hrubý vývojový diagram je na obr. 4.7. Vstupnými údajmi sú informácie o geometrických a materiálových vlastnostiach prvkov SNOP. Vo výpočtovom cykle postupne zvyšujeme čas. Namiesto súradníc času použijeme súradnice zmeny polohy rezného klina, napr. uhla pootočenia frézy.

Pre vybrané časové okamihy (polohy nástroja) počítame skutočné parametre vplývajúce na hodnotu reznej sily a počítame reznú silu v čase t . Po uplynutí simulovaného času vyhodnotíme získaný rad dvojíc (F, t) a výpočet ukončíme. Vyhodnotenie môže zahrnúť stanovenie minimálnych a maximálnych zložiek síl, ich kolísanie alebo nakreslenie grafu závislosti síl od času.

4.3. ŠPECIFICKÝ REZNÝ ODPOR A PRÁCA REZANIA

Špecifický rezný odpor je podiel hlavnej zložky reznej sily F_c a prierezu odrezávanej vrstvy S :

$$k_c = F_c / S \quad [\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}] \qquad 1 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2} = 1 \text{ MPa}$$

Vynásobením pravej strany rýchlosťou v_c ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) dostaneme

$$F_c \cdot v_c / S \cdot v_c = P / O_s \qquad [\text{W} \cdot \text{s} \cdot \text{cm}^{-3}]$$

kde P je výkon rezania,

O_s sekundové množstvo odrezávaného materiálu, t. j. výkon na jednotku odrezávaného objemu. To je fyzikálny význam špecifického rezného odporu.

Práca rezania má tieto zložky:

1. práca plastickej deformácie A_d ,
2. práca trenia na čele A_ζ ,
3. práca trenia na chrbte A_{ch} ,
4. práca na vytváranie nových povrchov A_p .

Rozhodujúci význam má práca plastickej deformácie. Prácu na vytváranie nových povrchov prakticky môžeme zanedbať. Práca trenia na čele a na chrbte závisí najmä od rýchlosti vzájomného pohybu.

Špecifický rezný odpor umožní univerzálny výpočet výkonu alebo práce rezania. Pretože výkon rezania je

$$P = F_c \cdot v_c \qquad \text{úpravou} \qquad P = k_c \cdot S \cdot v_c$$

Dostaneme

$$P = k_c \cdot O_s$$

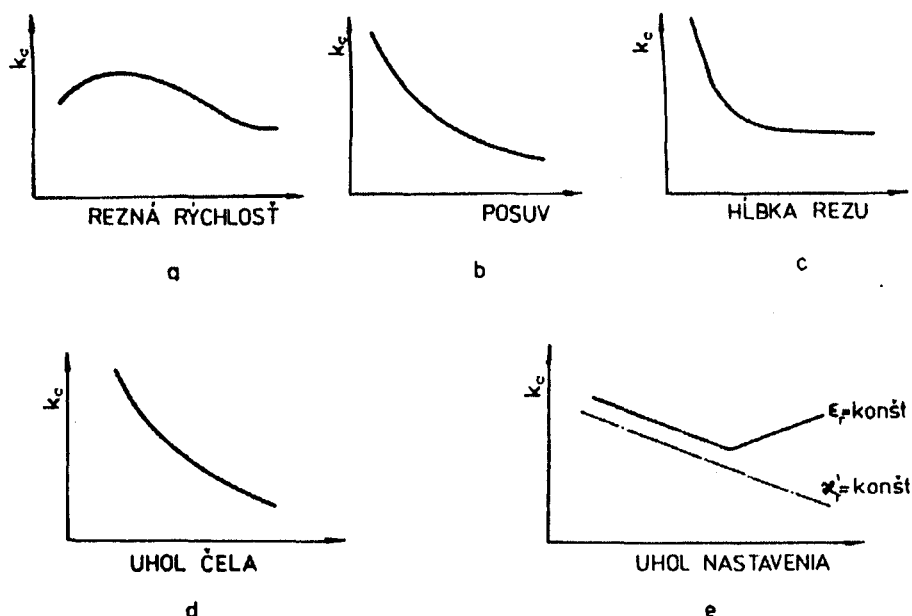
V tejto rovnici sekundové množstvo odrezávaného materiálu O_s počítame z geometrických a kinematických pomerov. Špecifický odpor k_c v tejto rovnici nie je konštanta, ale závisí od parametrov rezania, najmä od pevnosti obrábaného materiálu a od hrúbky odrezávania vrstvy.

4.4. VÝSLEDKY EXPERIMENTÁLNEHO VÝSKUMU

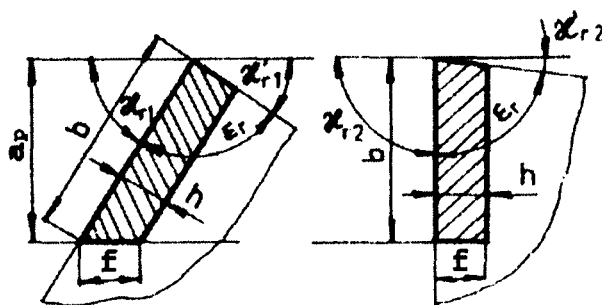
4.4.1. Vplyv vybraných parametrov na špecifický rezný odpor

Uvádzame typické závislosti reznej rýchlosti, posuvu, hĺbky rezu, uhla čela a nastavenia hlavnej reznej hrany na špecifický rezný odpor. Platia pre obrábanie kovových materiálov.

Diagramy (obr. 4.8.) vykazujú podobný charakter ako príslušné diagramy vplyvu parametrov na stlačenie triesky. Ukazuje to na to, že stlačenie triesky aj špecifický rezný odpor sú podstatnou mierou ovplyvnené tými istými faktormi. Je to deformácia materiálu pri rezaní.



Obr. 4.8. Závislosť špecifického rezného odporu k_c od a- reznej rýchlosti, b- posuvu, c- hĺbky rezu, d- uhla čela, e- nastavenia hlavnej reznej hrany



Obr. 4.9. Prierez odrezávanej vrstvy pri konštantnom uhle hrotu r_e

4.4.2. Vplyv vybraných parametrov na rezné sily

Uvádzame typické závislosti reznej rýchlosti, posuvu, hĺbky rezu, uhla nastavenia a polomeru hrotu na rezné sily pre sústruženie a hobl'ovanie. Platia pre pomer šírky a hrúbky odrezávanej vrstvy $b/h = 4$ a pre uhol nastavenia 60° až 70° pre obrábanie kovových materiálov.

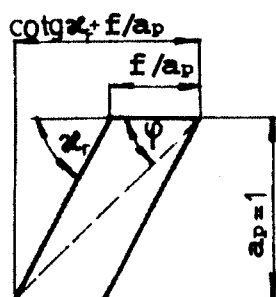
V týchto podmienkach približne platí tento pomer zložiek rezných síl:

$$F_c : F_p : F_f = 1 : 0,4 : 0,25$$

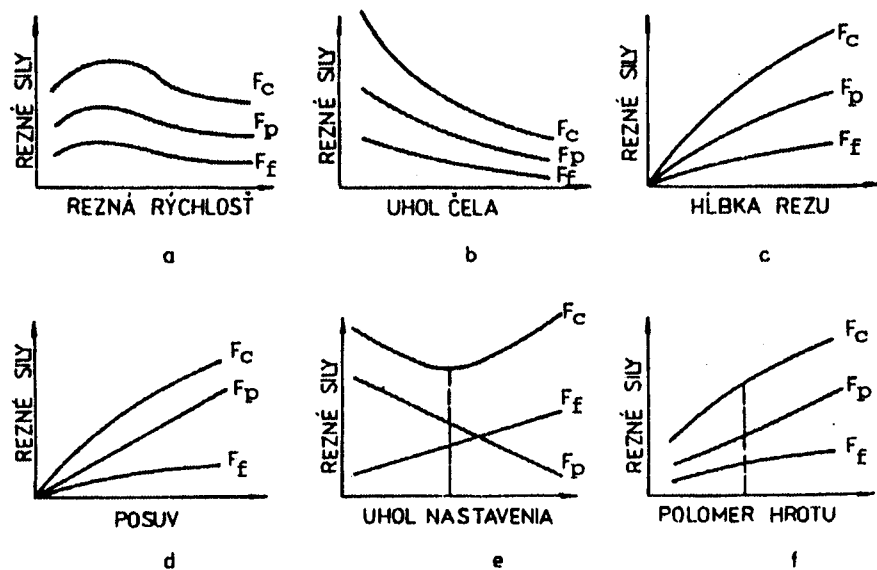
Pomer zložiek rezných síl výrazne závisí od uhla nastavenia hlavnej reznej hrany a od pomeru hĺbky rezu k posuvu (alebo šírky a hrúbky odrezávanej vrstvy). Vyplýva to z toho, že uhol φ , pomocou ktorého prepočítame F_h na F_f a F_p , bezprostredne závisí od posuvu, hĺbky rezu a uhla nastavenia (obr. 4.10.).

Experimentálne výsledky potvrdzujú, že priebeh zložky F_c plne zodpovedá priebehu špecifického rezného odporu (porovnaj obr. 4.8. a 4.11.). Vyplýva to z rovnice

$$F_c = k_c \cdot f \cdot a_p$$



Obr. 4.10. Schéma pre výpočet uhla φ



Obr. 4.11. Závislosť zložiek rezných síl od
 a – reznej rýchlosti, b – uhla čela, c – hĺbky rezu, d – posuvu, e – nastavenia hlavnej reznej hrany, f – polomeru hrotu

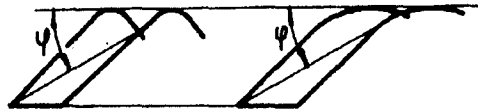
Pri zmene reznej rýchlosti a uhla rezu alebo čela (obr. 4.11a, b) pomer f/a_p a uhol nastavenia κ_r sa nemenia, preto zložky F_f a F_p sú pomernou časťou zložky F_c v celom rozsahu zmeny týchto parametrov.

Zmena hĺbky rezu pri $f/a_p \geq 4$ pomerne málo vplyva na hodnotu uhla φ . Preto pomer zložiek F_f a F_p pre rôzne hĺbky rezu zostáva prakticky konštantný (obr. 4.11c).

S rastom posuvu (obr. 4.11d) zložka F_p sa mení rýchlejšie a zložka F_f pomalšie, ako by to zodpovedalo prijatému pomeru zložiek síl $F_c : F_p : F_f$. Prejavuje sa tu práve vplyv posuvu na uhol φ .

Výrazný vplyv má na priebeh zložiek F_f a F_p uhol nastavenia κ_r skoro úmerne rastie aj uhol φ . Preto zložka F_p s rastom uhla nastavenia klesá a F_f stúpa.

S rastom polomeru hrotu sa znižuje stredná hrúbka rezu. Preto zložka F_c rastie (obr. 4.11f). S rastom polomeru hrotu zložka F_p rastie rýchlejšie, zložka F_f pomalšie, ako by to zodpovedalo priemernému pomeru zložiek síl. Vyplýva z toho, že so zväčšením polomeru hrotu uhol φ sa znižuje (obr. 4.12.).



Obr. 4.12. Vplyv polomeru hrotu na polohu uhlopriečky prierezu

4.5. ŠTATISTICKÉ MODELY REZNÝCH SÍL

Strednú hodnotu reznej sily v závislosti od parametrov prierezu odrezávanej vrstvy vyjadrujeme pri rezaní kovov s všeobecnými mocninnými rovnicami. Pre voľné rezanie (s parametrami prierezu odrezávanej vrstvy b , h) dostaneme:

$$F_h = C_{F_h} \cdot b^{x_{F_h}} \cdot h^{y_{F_h}} \quad [\text{N}]$$

$$F_c = C_{F_c} \cdot b^{x_{F_c}} \cdot h^{y_{F_c}} \quad [\text{N}]$$

kde C_{F_h}, C_{F_c} sú konštanty, ktoré vyjadrujú vplyv obrábaného materiálu, geometrie nástroja a ostatných konštantných podmienok rezania okrem šírky b a hrúbky h odrezávanej vrstvy,

$x_{F_h}, y_{F_h}, x_{F_c}, y_{F_c}$ sú konštanty, ktoré vyjadrujú mieru vplyvu šírky, resp. hrúbky odrezávanej vrstvy na zložky rezného odporu.

Pre viazané rezanie (s parametrami prierezu a_p , f) dostaneme:

$$F_c = C_{F_c} \cdot a_p^{x_{F_c}} \cdot f^{y_{F_c}} \quad [\text{N}]$$

$$F_p = C_{F_p} \cdot a_p^{x_{F_p}} \cdot f^{y_{F_p}} \quad [\text{N}]$$

$$F_f = C_{F_f} \cdot a_p^{x_{F_f}} \cdot f^{y_{F_f}}$$

Význam konštant je tu podobný ako v rovniciach pre voľné rezanie.

Konštanty C vyjadrujú vplyv všetkých parametrov, ktoré nie sú explicitne v rovnici uvedené.

Na rezné sily okrem parametrov prierezu odrezávanej vrstvy vplýva aj celý rad ďalších činiteľov. Vplyv týchto vyjadrujeme obvykle vo forme opravných súčiniteľov K , ktoré inde-

xujeme symbolom závislej premennej a symbolom tohto parametra, ktorého vplyv opravný súčiniteľ vyjadruje. Napr. opravný súčiniteľ $K_{F_p, r}$ je opravným súčiniteľom konštanty C_{F_p} vzhľadom na polomer hrotu r_e .

Všeobecný tvar empirickej rovnice zapíšeme ako súčin základnej rovnice a opravných súčiniteľov. Napr. pre zložku F_c všeobecný tvar je

$$F_c = C_{F_c} \cdot a_p^{x_{F_c}} \cdot f^{y_{F_c}} \cdot \prod K_{F_c, i}$$

kde $i \in (\gamma_0, \kappa_r, r_e, v_e \dots)$

Štatistické modely reznej sily vyžadujú pochopiteľne uviesť obor platnosti rovnice, t. j. všetky podmienky experimentov.

Vyššie uvedené vzorce sa zvyknú nazývať aj vzorce Bostonove-Krausove. Známe sú aj vzorce, ktoré uviedli Kienzle a Victor, ktorí pre špecifický rezný odpor k_c stanovili

$$k_c = \frac{k_{c1}}{h^2}$$

kde k_{c1} je špecifický rezný odpor pre jednotkovú hrúbku odoberanej vrstvy a z je konštanta. Potom

$$F_c = k_c \cdot b \cdot h = k_{c1} \cdot b \cdot h^{1-z}$$

Aj Kronenberg vypracoval vzťahy pre výpočet hlavnej zložky reznej sily F_c . Ak označíme $b/h = G$ (štíhlosť odoberanej vrstvy) a tiež $b \cdot h = S$ (prierez odoberanej vrstvy), potom Kronenbergov vzorec pre špecifický rezný odpor znie

$$k_c = C_{k_c} \frac{\left(\frac{G}{5}\right)^g}{S^s}$$

a Kronenbergov vzorec pre zložku F_c bude

$$F_c = k_c \cdot S = C_{k_c} \cdot \left(\frac{G}{5}\right)^g \cdot S^{1-s}$$

kde C_{k_c} , g , s sú konštanty, ktoré treba určiť experimentálne a 5 je etalónová (základná) hodnota štíhlosti odoberanej vrstvy.

Ešte možno uviesť Loladzeho vzorec pre výpočet hlavnej zložky reznej sily F_c :

$$F_c = C_{F_c} \cdot h \cdot b \cdot \sigma_p \cdot \xi$$

Kde C_{F_c} je konštanta, σ_p je medza pevnosti v ťahu a ξ je stlačenie triesky.

Známe sú tiež polynomické (a iné) vzorce reznej sily, z nich najjednoduchší je vzorec Brixov:

$$F_c = K_1 \cdot h \cdot b + K_2 \cdot b$$

kde K_1, K_2 sú konštanty.

4.5.1. Banka (základňa) technologických údajov

Výpočet podľa štatistických rovníc vyžaduje poznať konkrétny typ empirickej rovnice a hodnoty jej konštánt pre dané podmienky obrábania. Tieto údaje nájdeme v odbornej literatúre alebo v tabuľkách rezných podmienok.

Pri automatizácii technologických výpočtov na počítačoch môžeme postupovať tak, že konštanty použitých empirických rovníc zadáme ako vstupné údaje. Taká organizácia práce však nebude zvlášť efektívna. Konštanty pre konkrétne podmienky obrábania treba vyhľadať v literatúre a vložiť ich pred výpočtom do pamäte počítača.

Podstatne efektívnejší je taký spôsob, že do pamäte počítača uložíme konštanty empirických rovníc a podmienky ich platnosti vopred. Potom stačí zadať podmienky obrábania (napríklad spôsob obrábania, identifikačné číslo nástroja alebo jeho geometriu atď.) a počítač na základe zadaných podmienok obrábania vyhľadá v svojej pamäti konštanty potrebné pre výpočet. Odpadá vyhľadávanie údajov v literatúre a ich vloženie do pamäte počítača, túto prácu raz a navždy sme už vykonali vopred. Hovoríme, že technologické konštanty sme uložili do základne (banky) údajov. Takto môžeme postupovať so všetkými častejšie používanými údajmi, ktoré sa týkajú nielen technologických vlastností obrábaného materiálu z hľadiska rezných síl, ale aj trvanlivosti reznej hrany, drsnosti povrchu atď., alebo sa týkajú údajov o strojoch, nástrojoch a pod.

Základňa (banka) technologických údajov zahŕňa všetky údaje o strojoch, nástrojoch a obrábaných materiáloch, ktoré z hľadiska rôznych technologických výpočtov možno považovať za stále, nemenné.

Výpočty rezných síl (ale aj ďalších charakteristík procesu rezania) podľa empirických rovníc sú viazané na prijatý typ empirickej rovnice. V základni údajov možno ukladať konštanty iba pre vybrané, vopred určené typy empirických rovníc.

4.6. REZNÉ SILY PRE RÔZNE SPÔSOBY OBRÁBANIA

Pri analýze rezných síl v predchádzajúcich statiach sme mali na mysli sústruženie a hobl'ovanie. Táto analýza v podstate platí aj pre iné spôsoby obrábania. Treba si však uvedomiť tvar prierezu odrezávanej vrstvy a jeho označovanie, ktoré je pre vŕtanie, vyhrubovanie, vystruženie, frézovanie, preťahovanie, rezanie závitov a pod. čiastočne odlišné ako pre sústruženie alebo hobl'ovanie.

Východiskom pre stanovenie prierezu odrezávanej vrstvy je vždy

- tvar reznej hrany,
- vzájomný pohyb obrobku a nástroja,
- vzájomná poloha obrobku a nástroja v procese rezania.

Tvar reznej hrany určíme podľa druhu nástroja. Základné typy nástrojov s vyznačeným profilom reznej hrany uvádzame v ďalšom.

Vzájomný pohyb obrobku a nástroja (rezný pohyb) je vektorový súčet hlavného pohybu a posuvu.

Vzájomnú polohu obrobku a nástroja zvyčajne predpokladáme tak, ako to zodpovedá podmienkam plného záberu nástroja.

Prierez odrezávanej vrstvy nájdeme v profilovej rovine kolmej na hlavný pohyb ako obrazec medzi dvoma susednými stopami reznej plochy ohraničené z ostatných strán stopou povrchu obrábaného materiálu.

Ak uhol sklonu reznej hrany λ_S a čela γ_0 sú málo odlišné od nuly, stopu reznej hrany môžeme nahradiť priemetom reznej hrany do základnej roviny. Potom pri spôsoboch obrábania, pri ktorých používame jednoklinové nástroje (napr. sústruženie, hobľovanie, obrážanie), stopy reznej plochy vznikajú posunutím priemetu reznej hrany o otáčku alebo zdvih v smere posuvu. Pri spôsoboch obrábania, pri ktorých používame viacklinové nástroje (vrtanie, vyhrubovanie, vystruženie, preťahovanie, rezanie závitov závitníkmi, očkami alebo čeľuťami a pod.) stopy reznej plochy vznikajú posunutím reznej hrany o posuv na zub.

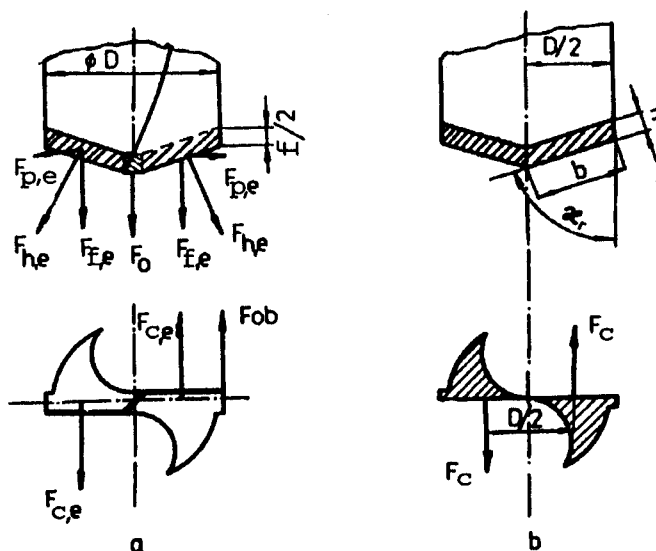
Pri frézovaní a brúsení odrezávaná vrstva má v smere rezného pohybu tvar fúza, ohraničeného dvoma susednými reznými plochami. Hrúbka odrezávanej vrstvy sa rovná posuvu iba vtedy, ak rezná hrana je kolmá na smer posuvu a tento prechádza cez os otáčania. Pre iné vzájomné polohy reznej hrany a osi otáčania je vždy menšia. Závisí od uhla pootočenia rezného klina φ .

Ak uhol sklonu reznej hrany je veľmi odlišný od nuly (napr. pri frézach, uhol sklonu reznej hrany je až 45°), nemožno zanedbať rozdiel medzi šírkou prierezu odrezávanej vrstvy a dĺžkou reznej hrany v zábere. Pretože uhol pootočenia jednotlivých bodov reznej hrany frézy je rôzny, hrúbka odrezávanej vrstvy sa mení aj pozdĺž reznej hrany v zábere. V takýchto podmienkach vo výpočtoch treba uvažovať namiesto šírky prierezu odrezávanej vrstvy dĺžku reznej hrany v zábere a strednú hrúbku odrezávanej vrstvy.

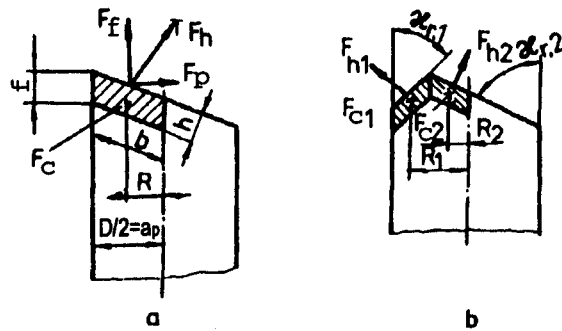
Je dôležité vo výpočtoch správne určiť zmysel (orientáciu) zložiek rezných síl. Z dvoch súradnicových systémov (obrobku alebo nástroja) treba si jeden zvoliť a v tomto jednotne stanoviť zmysel všetkých zložiek reznej sily, napr. podľa dohovoru, že rezný klin tlačí na obrábaný materiál. Potom pri pozdĺžnom sústružení hlavná zložka reznej sily pôsobí proti smeru otáčania obrobku, posuvová zložka v smere posuvu a spätná zložka smerom do obrobku v smere priečného posuvu.

4.6.1. Vrtanie

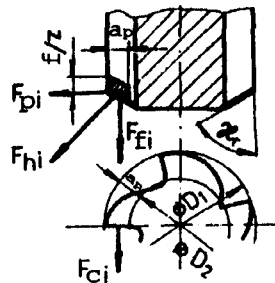
Schéma na výpočet rezných síl a krútiacich momentov pre skrutkový vrták je na obr. 4.13, pre delový vrták s priamočiarou reznou hranou na obr. 4.14a, s lomenou reznou hranou na obr. 4.14b, pre výhrubník a výstružník na obr. 4.15.



Obr. 4.13. Zložky reznej sily pôsobiace na reznú hranu skrutkového vrtáka
a – vrták s priečnou reznou hranou, b – idealizovaný vrták bez priečnej reznej hrany



Obr. 4.14. Zložky reznej sily pôsobiace na rezný klin delového vrtáka
 a – vrták s priamou reznou hranou, b – vrták s lomenou reznou hranou



Obr. 4.15. Zložky reznej sily pôsobiace na zub výhrubníka alebo výstružníka

4.6.2. Frézovanie

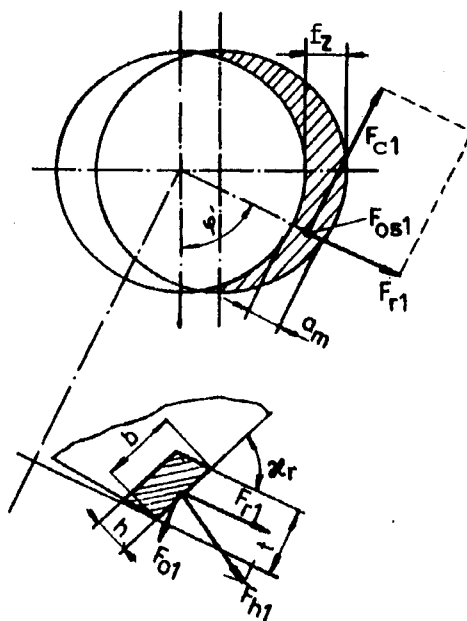
Pri frézovaní možno rozoznať sily pôsobiace na zub a sily pôsobiace na nástroj (na všetky zuby frézy v zábere). Pretože sa mení aj šírka odrezávanej vrstvy, možno hovoriť o okamžitej hodnote rezných síl, o časovom priebehu rezných síl a o strednej hodnote rezných síl.

Pre valcové, čelné a kužeľové frézy s priamymi zubmi prierez odrezávanej vrstvy a sily na zub počítame podľa obr. 4.16., sily pôsobiace na nástroj podľa obr. 4.17. V závislosti od vzájomnej polohy obrábaného materiálu a frézy rozoznávame uhol vstupu, uhol záberu a uhol výstupu frézy (obr. 4.18.).

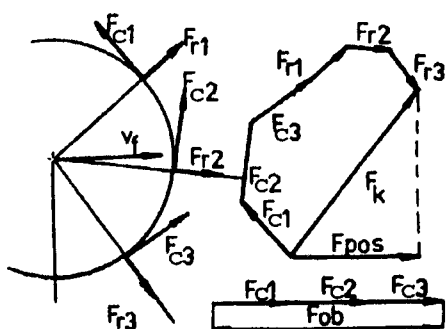
Frézy so šikmými a strmými zubmi je nielen obchodný názov (uhol sklonu pre šikmé zuby $0 < \lambda_s < 30^\circ$, pre strmé zuby $\lambda_s > 30^\circ$), ale aj technologický pojem. Podľa spôsobu úberu frézy rozoznávame frézy podľa pomeru dĺžky záberového oblúka i , šírky frézovania B (obr. 4.19.). Ak na rozvinutom obraze reznej plochy sklonu zuba je menší ako uhol uhlopriečky, hovoríme o šikmých, ináč o strmých zuboch.

Prierez odrezávanej vrstvy vyšetrujeme na rozvinutej ploche (obr. 4.19., 4.20). Sily na zub F_{c1} a F_{h1} pôsobia v ťažisku odrezávanej vrstvy (obr. 4.21.).

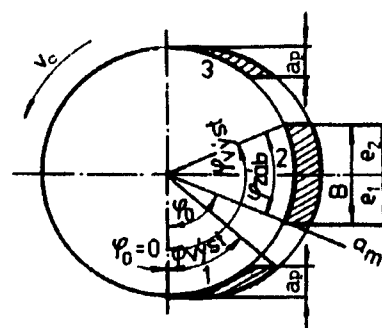
Rezné sily vznikajú iba v tých vzájomných polohách zuba a obrábaného materiálu, v ktorých zub je v zábere. Ak zuby sú priame, pre záberový uhol 180° priebeh síl na zub zodpovedá grafu 4.22. (porovnaj tento obr. s obr. 4.16.). Pri šikmých alebo strmých zuboch zub zarezáva do obrábaného materiálu postupne a tiež postupne vychádza zo záberu. Postupné vchádzanie zuba šikmej frézy pri protibežnom frézovaní je znázornený na rozvinutej reznej ploche na obr. 4.23., zuba strmej frézy na obr. 4.24. Typické priebehy reznej sily na jeden zub sú na obr. 4.25.



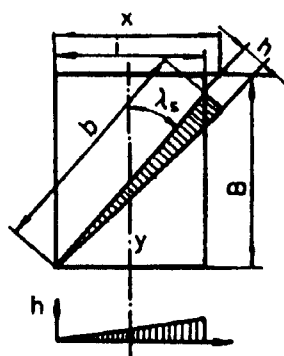
Obr. 4.16. Schéma na stanovenie prierezu odrezávanej vrstvy a zložiek síl na zub frézy



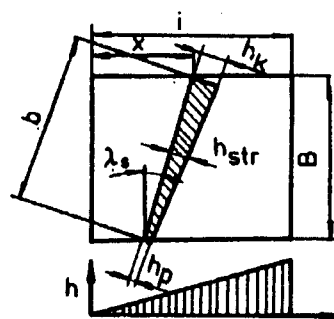
Obr. 4.17. Sily pôsobiace na frézu a ich výslednica



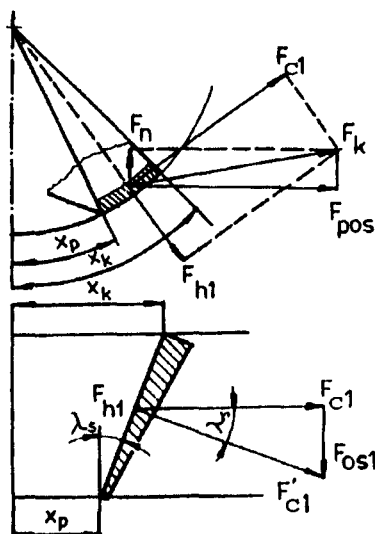
Obr. 4.18. Uhly vstupu, záberu a výstupu zuba frézy: 1 – protibežné frézovanie, 2 – čelné frézovanie, 3 – súbežné frézovanie



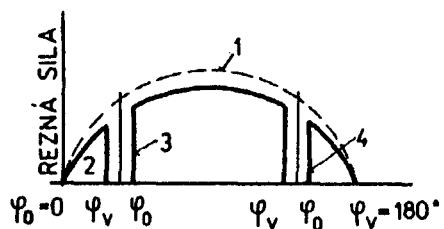
Obr. 4.19. Rozvinutá rezná plocha a prierez odrezávanej vrstvy pre frézu so strmými zubmi



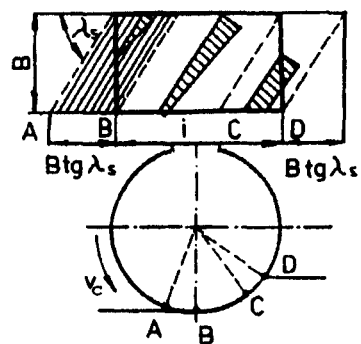
Obr. 4.20. Rozvinutá rezná plocha a prierez odrezávanej vrstvy pre frézu so šikmými zubmi



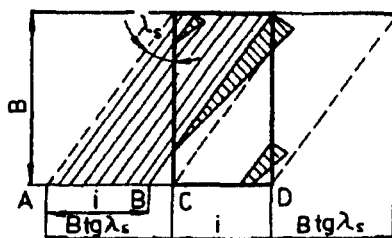
Obr. 4.21. Sily pôsobiace na zub frézy so šikmými zubmi



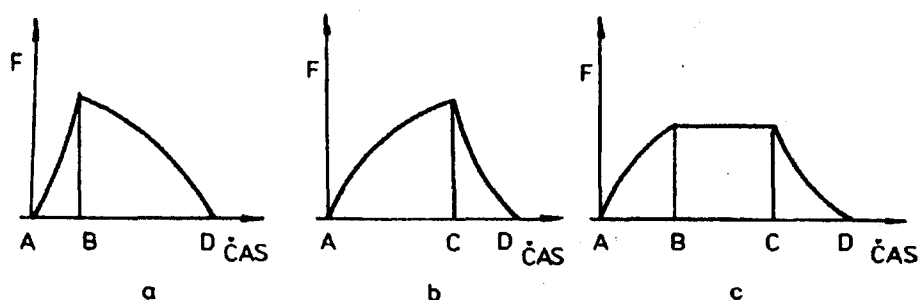
Obr. 4.22. Časový priebeh reznej sily na zub 1 – uhol záberu 180° , 2 – protibežné frézovanie, 3 – čelné frézovanie, 4 – súbežné frézovanie



Obr. 4.23. Zmena prierezu odrezávanej vrstvy pri protibežnom frézovaní frézou so šikmými zubmi

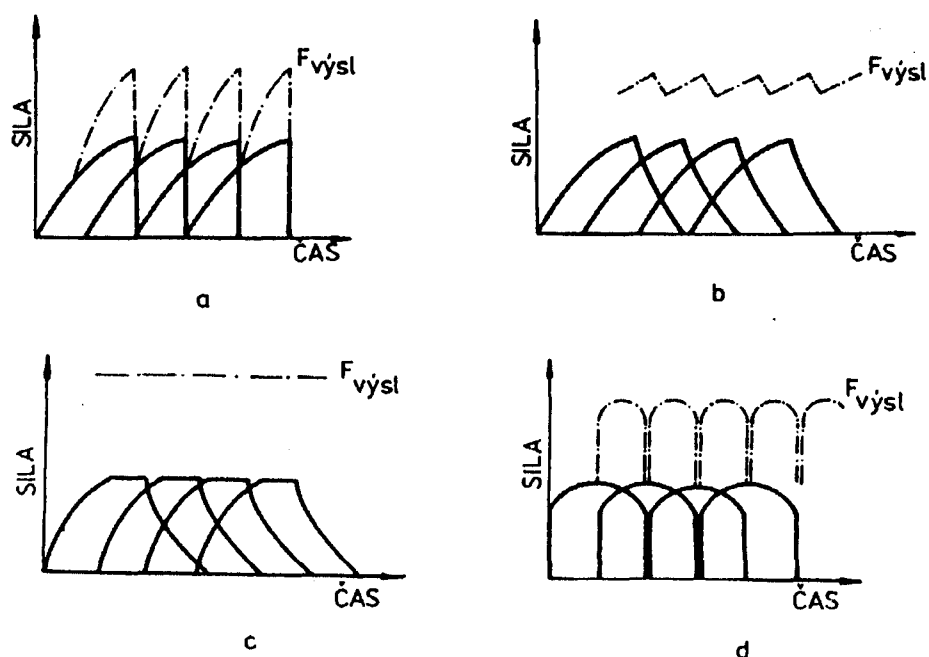


Obr. 4.24. Zmena prierezu odrezávanej vrstvy pri protibežnom frézovaní frézou so strmými zubmi



Obr. 4.25. Časový priebeh sily pôsobiacej na zub frézy
 a – súbežné, b – protibežné frézovanie frézou so šikmými zubmi, c – protibežné frézovanie frézou so strmými zubmi

Časový priebeh reznej sily pre frézu závisí od počtu zubov v zábere. Výslednú reznú silu dostaneme sčítaním síl pôsobiacich na zuby v zábere. Charakteristické priebehy výslednej reznej sily pre frézy s priamymi, šikmými a strmými zubmi a pre čelné frézy sú na obr. 4.26. Rezná sila kolíše. Kolísanie reznej sily je *mierou rovnomernosti chodu frézy*. Minimálne kolísanie dostaneme vtedy, ak niektorý zub vchádza do záberu práve vtedy, ak iný práve začína – vychádzať zo záberu. V takom prípade záberový súčiniteľ (priemerný počet zubov v zábere) je práve celé číslo.

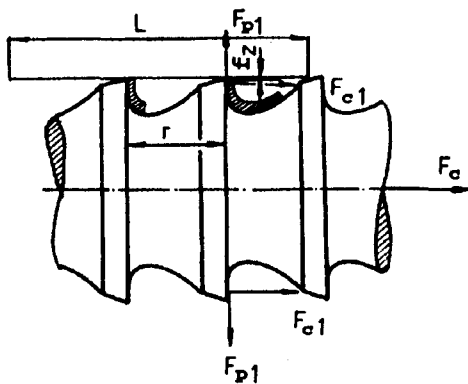


Obr. 4.26. Časový priebeh výslednej reznej sily pri protibežnom frézovaní valcovou frézou so zubmi a – priamymi, b – šikmými, c – strmými, d – pri súmernom frézovaní čelnou frézou

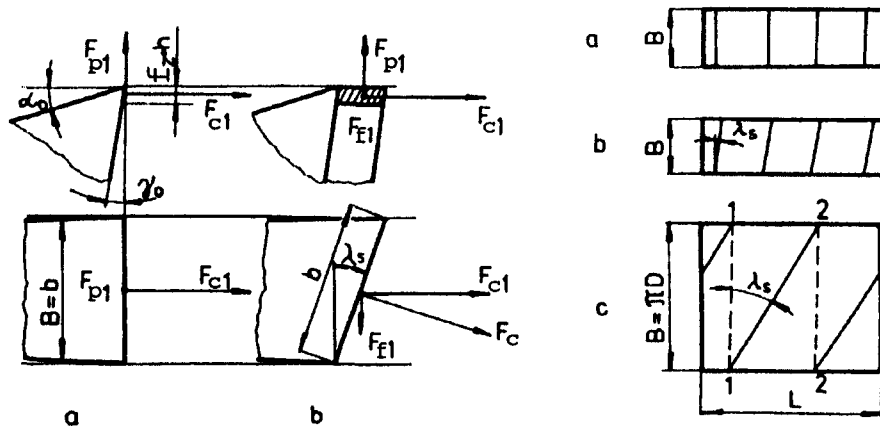
4.6.3. Preťahovanie

Pri preťahovaní (obr. 4.27.) opäť rozoznávame sily na zub a sily pôsobiace na nástroj. Sily na zub počítame na základe hrúbky a šírky odrezávanej vrstvy (obr. 4.28.). Zuby môžu byť priame, šikmé alebo v skrutkovicí (obr. 4.29.). Pri šikmých alebo skrutkových zuboch môže-

me rozoznať (obr. 4.3.) úsek vchádzania zuba do záberu, úsek konštantného prierezu a úsek vychádzania zuba zo záberu. Výslednicovú reznú silu získame sčítaním čiastkových síl pôsobiacich na zuby v zábere. Typické priebehy sú na obr. 4.31.

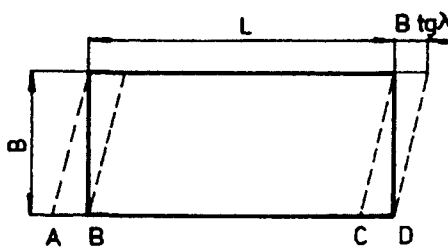


Obr. 4.27.

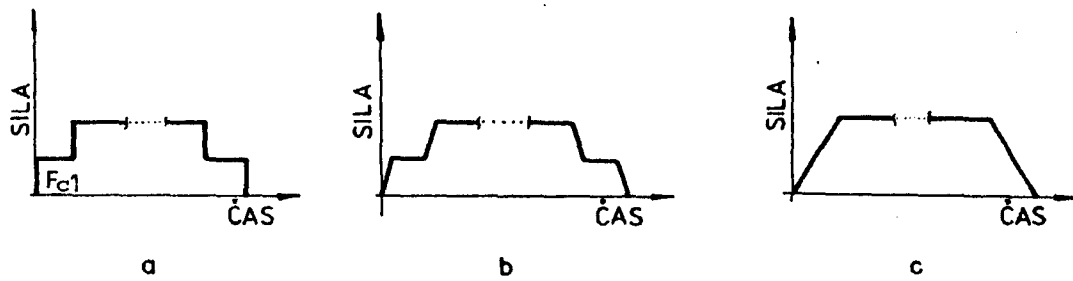


Obr. 4.28.

Obr. 4.29.



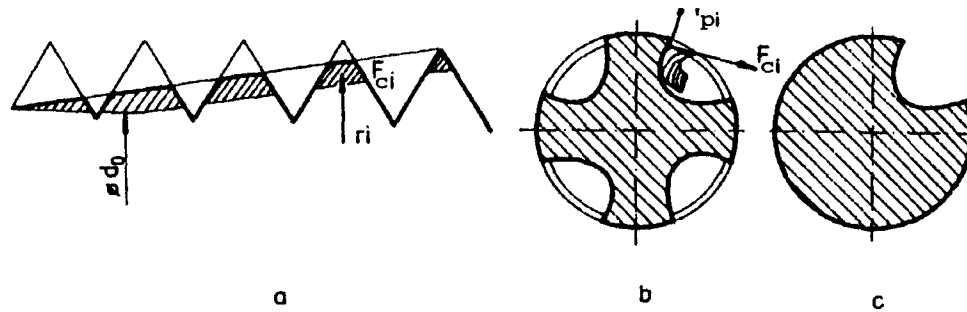
Obr. 4.30.



Obr. 4.31.

4.6.4. Rezanie závitov

Závitníky, závitnice a závitové čeľuste sú v podstate preťahovacie nástroje, ktoré konajú rezný pohyb po skrutkovnici. Prierez odrezávanej vrstvy počítame podľa obr. 4.32. Zuby postupne vchádzajú do záberu, preto aj rezné sily sa menia plynule.



Obr. 4.32.

5. CHVENIE PRI OBRÁBANÍ

5.1. ZÁKLADNÉ POJMY

Pri kmitaní rozoznávame tieto parametre

1. amplitúda,
2. kmit,
3. perióda,
4. frekvencia.

Podľa charakteru pôsobenia sily na pružný systém rozoznávame kmity: *vlastné*, ak na pružnú sústavu pôsobí jednorazová vonkajšia sila, *vynútené*, ak na pružnú sústavu pôsobí periodická vonkajšia sila, *samobudené*, ak periodicky sa meniaci sila vzniká vo vlastnom systéme.

Kmity rozdeľujeme podľa časovej stálosti amplitúdy na netlmené a tlmené.

Ďalšie základné pojmy sú:

tuhosť, je podiel sily pôsobiacej na pružnú sústavu a vyvolanej odchýlky:

$$k = F / y$$

poddajnosť, je podiel vyvolanej odchýlky k pôsobiacej sile, čo je prevrátená hodnota tuhosti:

$$c = y / F = 1 / k$$

útlm, je schopnosť pružnej sústavy pohlcovať energiu kmitavého pohybu,

rezonancia, je jav vznikajúci pri vynútenom kmitaní, ak frekvencia budiacej sily sa blíži k frekvencii vlastných kmitov.

5.2. SAMOBUDENÉ KMITY, ICH DRUHY A VZNIK

Samobudené kmity rozoznávame (obr. 5.1.):

-*parametrické*, ak kmity vznikajú následkom toho, že niektorý parameter pružnej sústavy sa periodicky mení,

-*skoroharmonické*, ak časový priebeh pohybu približne zodpovedá harmonickému (sínusovému) priebehu,

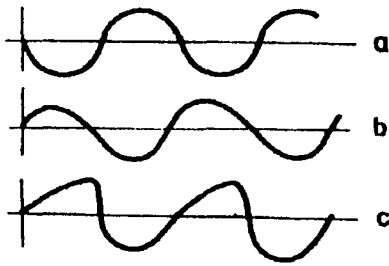
-*relaxačné kmitanie*, ak časový priebeh pohybu má pílovitý charakter.

Vznik samobudiacich síl si vysvetlíme na Wan der Pollovom modele (obr. 5.2.). Ak nie je pás v pohybe, medzi pásom a telesom pôsobí sila trenia

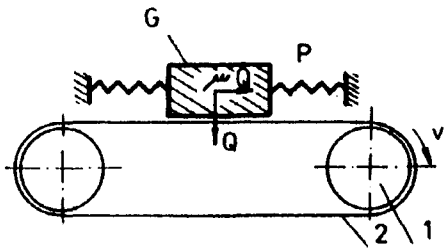
$$T = \mu \cdot Q$$

kde μ je súčiniteľ trenia v pokoji,

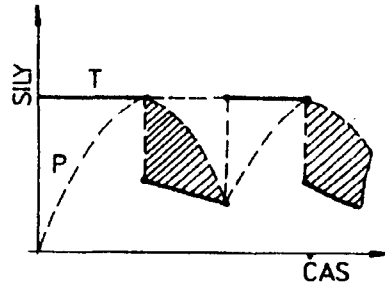
Q tiaž telesa G .



Obr. 5.1. Typické priebehy amplitúdy samobudených kmitov
a – parametrické (harmonické), b – skoroharmonické, c – relaxačné kmity



Obr. 5.2. Wan der Pollov model
1 – kladka, 2 – pás



Obr. 5.3. Časový priebeh síl pružnosti P a trenia T vo Wan der Pollovom modele

Pri pustení pásu teleso G je unášané silou trenia. V okamihu rovnováhy síl trenia T a pružnosti P vzniká vzájomný pohyb medzi telesom a pásom, následkom čoho sily trenia okamžite poklesnú, systém sa dostane do nerovnovážnej polohy (obr. 5.3.).

Vnútnou silou, ktorá vyvolala kmitavý pohyb analyzovaného systému, je rozdiel sily trenia v pohybe a v pokoji. Túto vnútornú silu voláme budiacou silou.

V procese rezania rozoznávame primárne a sekundárne budiace sily. Ako primárne označujeme tie, ktoré dávajú podnet k vzniku kmitania, ako sekundárne tie, ktoré vznikajú už v dôsledku pôsobenia primárnych budiacich síl.

5.2.1. Fyzikálne príčiny vzniku primárnych budiacich síl pri rezaní

Analýza procesu rezania vedie k trom budiacim silám.

1. Relatívna rýchlosť medzi trieskou a čelom nástroja v danej polohe noža závisí od smeru kmitavého pohybu (obr. 5.4.). Ak súčiniteľ trenia s narastajúcou rýchlosťou klesá, sily trenia a tým aj rezné sily pri pohybe noža do obrábaného materiálu budú menšie ako pri pohybe noža von z obrábaného materiálu. Pre danú polohu noža v závislosti od smeru kmitavého pohybu sú rezné sily rôzne.

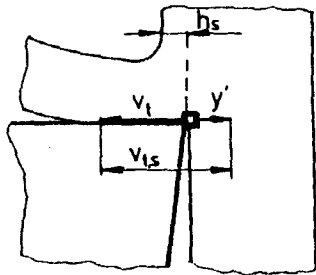
Priebeh reznej sily za jednu periódu v závislosti od polohy noža je na diagrame (obr. 5.5.).

2. Kmitavý pohyb ovplyvňuje skutočné uhly rezného klina pri rezaní (obr. 5.6.), a tým aj reznú silu. Skutočný uhol čela pri pohybe noža do obrábaného materiálu bude väčší ako pri pohybe noža von z obrábaného materiálu. Preto v danej polohe noža vznikajú dve rôzne hodnoty reznej sily v závislosti od smeru pohybu: menšia sila, ak sa nôž pohybuje do obrábaného materiálu, a väčšia sila, ak sa nôž pohybuje von z obrábaného materiálu.

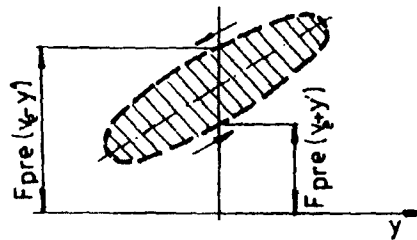
3. Plastické deformácie, a tým aj okamžitá hodnota reznej sily zaostávajú za skutočnou polohou noža (obr. 5.7.). Pri pohybe noža smerom do obrábaného materiálu medzná rovina

deformácie sa vytvára v nedeformovanom materiáli, pri pohybe von v deformovanom materiáli. Deformovaný materiál je spevnený, má zvýšenú medzu klzu. Tomu zodpovedá potom aj menšia, resp. väčšia hodnota reznej sily v závislosti od smeru kmitavého pohybu.

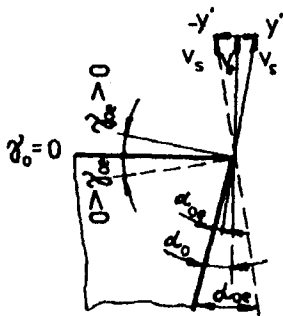
Sú aj ďalšie hypotézy, ktoré vysvetľujú vznik primárnych budiacich síl pri rezaní. Známym je princíp polohovej väzby, predložený Tlustým.



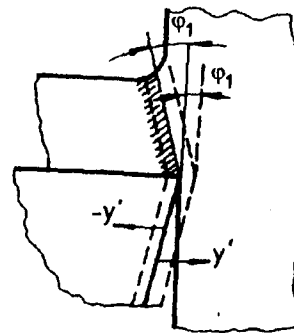
Obr. 5.4. Vplyv kmitavého pohybu noža smerom do obrábaného materiálu na skutočnú rýchlosť triesky na čele noža



Obr. 5.5. Priebeh primárnych budiacich síl za peródu



Obr. 5.6. Skutočné uhly čela a chrbta pri kmitavom pohybe noža

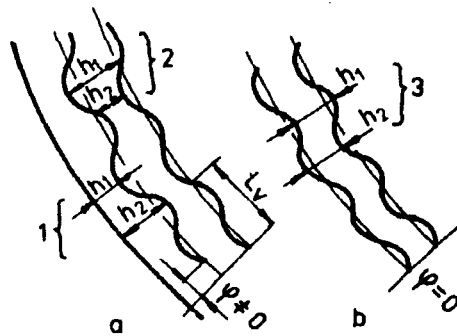


Obr. 5.7. Vytváranie roviny medznej deformácie

5.2.2. Sekundárne budiace sily

Hrúbka odrezávanej vrstvy pri druhej a ďalšej otáčke (alebo zdvihu) obrobku závisí nielen od kmitavého pohybu noža, ale aj od toho akú dráhu opísala rezná hrana pri predchádzajúcej otáčke. Ak medzi kmitavým pohybom noža v predchádzajúcej a danej otáčke je fázový posuv (obr. 5.8a), mení sa hrúbka odrezávanej vrstvy a vzniká periodická sila aj bez ohľadu na primárne budiace sily. Túto silu voláme sekundárnou budiacou silou. Fyzikálnou podstatou sekundárnej budiacej sily je fázový posuv medzi za sebou nasledujúcimi dráhami kmitavého pohybu.

Sekundárne budiace sily zosilňujú účinok primárnych budiacich síl. Pochopiteľne, ak dráhy kmitavého pohybu sú vo fáze (obr. 5.8b), sekundárne budiace sily nevznikajú.

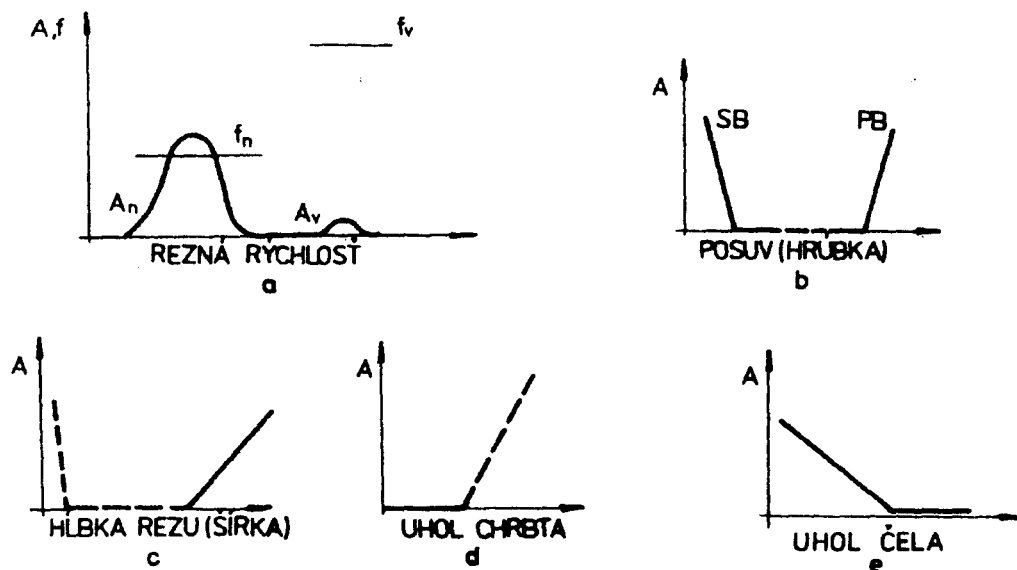


Obr. 5.8. Hrúbka odrezávanej vrstvy pri kmitaní noža
a – s fázovým posuvom, b – bez fázového posuvu

5.3. VÝSLEDKY EXPERIMENTÁLNEHO VÝSKUMU

Vplyv parametrov sústavy SNOP a podmienok rezania na samobudené kmitanie pri rezaní môžeme vysvetliť na základe primárnej a sekundárnej budiacej sily. Ak budiace sily dodávajú pri náhodnom rozkmitaní sústavy väčšiu energiu ako môže sústava pohltiť, vznikajú samobudené kmity. Prejavujú sa zvyčajne v oblastiach vlastných kmitov niektorého člena sústavy SNOP.

Vplyv reznej rýchlosti na amplitúdu a frekvenciu samobudeného kmitania je na obr. 5.9. Pri nižších rýchlostiach zvyčajne kmitá člen sústavy s veľkou hmotnosťou (obrobok, vyvrtávací tyč), frekvencia je pomerne nízka. Hovoríme o tzv. nízkofrekvenčnom chvení. Pri vyšších rýchlostiach frekvencia je vysoká (tzv. vysokofrekvenčné chvenia), kmitá člen sústavy s malou hmotnosťou (zvyčajne nôž).



Obr. 5.9.

a – Vplyv reznej rýchlosti na amplitúdu A a frekvenciu f skoroharmonického samobudeného kmitania, b – vplyv posuvu (hrúbky odrezávanej vrstvy) na amplitúdu, c – vplyv hĺbky rezu (šírky odrezávanej vrstvy) na amplitúdu, d – vplyv uhla chrbita na amplitúdu, e – vplyv uhla čela na amplitúdu

Vplyv posuvu (hrúbky odrezávanej vrstvy) je na obr. 5.9. Pri malých posuvoch (hrúbkach odrezávanej vrstvy) kmitanie vzniká najmä vplyvom sekundárnych budiacich síl, pri veľkých posuvoch (hrúbkach odrezávanej vrstvy) vplyvom primárnych budiacich síl.

Vplyv hĺbky rezania (šírky odrezávanej vrstvy) je na obr. 5.9. Pri zväčšení hĺbky rezania rastú budiace sily a pri prekročení určitej hĺbky rezania zákonite sa prejaví samobudené kmitanie.

Kmitanie môže vznikáť aj v oblasti malých hĺbok rezu, ak vplyvom zaoblenia polomeru hrotu hrúbka rezu odrezávanej vrstvy je taká, že vyvolá vznik samobudených kmitov.

Uhly chrbta bežne používané na nožoch, vrtákoch, frézovacích hlavách a pod., málo vplyvajú na rezné sily.

Nulový uhol chrbta (alebo väčšie opotrebenie nástroja) zvyšuje sily trenia a v týchto podmienkach môže vznikáť chvenie. Pretože uhol chrbta obmedzuje maximálnu rýchlosť kmitavého pohybu, malé uhly chrbta tlmia chvenie (obr. 5.9.).

Uhol čela výrazne vplyva na rezné sily. Pri väčších silách väčšie sú aj primárne budiace sily. Preto pri záporných uhloch čela amplitúda samobudeného chvenia rastie (obr. 5.9.).

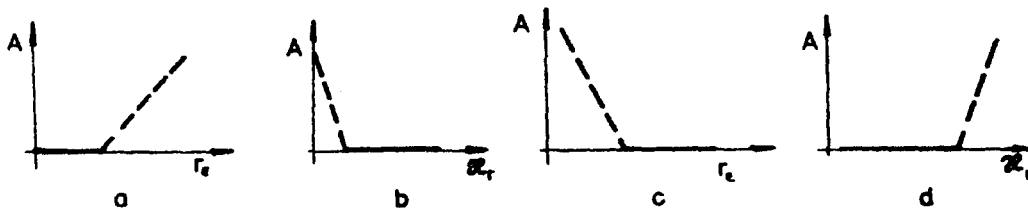
Uhol sklonu reznej hrany vplyva na rezné sily podobne ako uhol čela.

Uhol nastavenia hlavnej reznej hrany κ_r a polomer hrotu r_e vplyva na hrúbku a šírku odrezávanej vrstvy. Pri malých uhloch nastavenia a veľkých polomeroch hrotu odrezávaná vrstva má veľkú šírku a malú hrúbku. Preto v týchto oblastiach zvyčajne vzniká chvenie. Výrazne sa tu prejavuje aj vplyv ďalšieho faktora: smeru pôsobenia reznej sily.

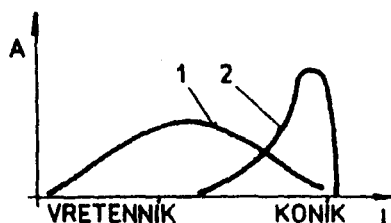
Ak tuhosť sústavy SNOP v smere pôsobenia reznej sily je veľká, potom primárne budiace sily sú malé a chvenie nevzniká. Pretože so zmenou uhla nastavenia a polomeru hrotu sa mení aj smer pôsobenia reznej sily, pri analýze ich vplyvu na chvenie treba brať do úvahy aj tuhosť stroja v rôznych smeroch.

Na obr. 5.10. uvedené závislosti platia pre pozdĺžne sústruženie.

Pri čelnom frézovaní zmenšenie uhla nastavenia a zväčšenie polomeru hrotu naopak náchylnosť k chveniu zväčšujú (obr. 5.10.).



Obr. 5.10. Vplyv polomeru hrotu (a) a uhla nastavenia hlavnej reznej hrany (b) na amplitúdu samobudeného kmitania pri pozdĺžnom sústružení. Vplyv polomeru hrotu (c) a uhla nastavenia hlavnej reznej hrany (d) na amplitúdu samobudeného kmitania pri čelnom frézovaní



Obr. 5.11. Závislosť amplitúdy samobudeného kmitania od polohy noža pri sústružení
1 – málo tuhé obrobky, 2 – tuhé obrobky

Tuhosť systému vždy vplýva na vznik chvenia. V praxi často pozorujeme, že pri sústružení tenkých hriadeľov chvenie vzniká v prostriedku hriadeľa, kým pri sústružení hriadeľov s veľkým priemerom – pri koníku (obr. 5.11.).

5.3.1. Štatistické modely oblasti vzniku samobudeného chvenia

Pri kmitaní obrobku alebo nástroja sa zhoršuje drsnosť obrobeného povrchu. Stroj a nástroj sú dynamicky namáhané, môžu sa porušiť časti stroja alebo prípravku. Zhoršujú sa pracovné podmienky, vzniká nadmerný a neprijemný hluk. Preto také parametre rezania, pri ktorých vzniká chvenie, nie sú použiteľné v praxi.

Voľba parametrov rezania preto vyžaduje určiť oblasť parametrov rezania bez vzniku samobudených kmitov. Preveríme, či v prípustných kombináciách v_c , a_p , f vzniká chvenie. Výsledok vynesieme do diagramu (obr. 5.12.). Kombináciu parametrov, pri ktorých vzniká chvenie, označíme krížikmi, pri ktorých nevzniká chvenie krúžkami.

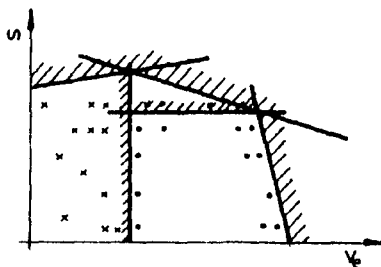
Oblasť obrábanie bez vzniku samobudeného kmitania je bodová množina, ktorú analyticky vyjadríme reláciou medzi vybraným parametrom rezania (zvyčajne hĺbkou rezu a_p) a ostatnými analyzovanými parametrami. Postupujeme tak, že štatistickými rovnicami vyjadríme hranicu oblasti bez samobudeného chvenia a zvolíme si vhodnú reláciu. Ak hranica je spojitá hladká čiara, potom stačí použiť jedinou reláciu, napr.

$$a_p \leq C \cdot L^x \cdot d^y \cdot n^z \cdot f^w \dots$$

kde C , L , d sú parametre obrobku,

n - otáčky vretena,

f - posuv.



Obr. 5.12. Vymedzenie oblasti kombinácií posuvu a reznej rýchlosti bez vzniku samobudeného chvenia

Ak je hranicou lomená čiara, oblasť bez samobudeného chvenia vymedzíme sústavou nerovnic a podmienkami ich platnosti.

6. TEPLOTA REZANIA

6.1. VZNIK A ODVOD TEPLA

Deformačná práca a práca trenia v procese rezania sa mení na teplo. Trom oblastiam deformácie v koreni triesky zodpovedajú tri pramene vzniku tepla. Teplo z týchto miest prúdi do chladnejších miest. Je odvádzané trieskou, rezným klinom, obrábaným materiálom a okolím (chladiacim médiom).

Na začiatku práce rezania obrábaný materiál aj rezný klin majú teplotu okolia. Tejto teplote zodpovedajú ich mechanické a fyzikálne vlastnosti.

Teplo z prvotnej oblasti deformácie je odvádzané vedením a sálaním, ale najmä materiálovým tokom (trieskou). V tejto oblasti teplo pôsobí vždy na nové „studené“ objemy materiálu. Preto teploty v tejto oblasti sú pomerne nízke, okolo 300 °C.

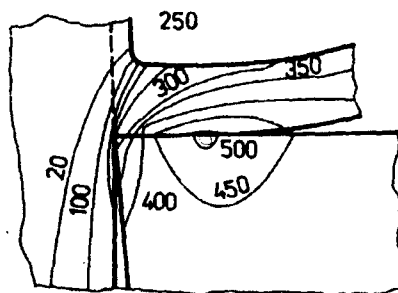
Po krátkom časovom úseku rezania s rezným klinom prichádzajú do styku už zohriate elementy materiálu. Zo začiatku sú ochladzované ešte pomerne studeným rezným klinom, ktorý stačí odvádzat' teplo.

Povrchová teplota rezného klina v miestach dotyku sa rýchlo zvyšuje, kým nenastáva rovnováha medzi zdrojmi a odvodom tepla. Vzniká stacionárne teplotné pole s maximálnymi teplotami do 1000 °C, ba i viac.

6.2. TEPLTNÉ POLE REZNÉHO KLINA

Teplotné pole rezného klina vieme veľmi presne modelovať. Prvé metódy boli analógia polí a analógia sietí, dnes používame metódu konečných prvkov (číslícovú simuláciu). Experimentálne a vypočítané hodnoty ukazujú dobrú zhodu.

Teplotné pole rezného klina je na obr. 6.1. Miesto maximálnych teplôt závisí od charakteru triesky. Pri obrábaní húževnatých materiálov je trieska spojitá. Teplotné pole je výrazne ovplyvnené aj teplom z trenia. Maximálne teploty sú na čelnej ploche v určitej vzdialenosti od reznej hrany.



Obr. 6.1. Teplotné pole rezného klina pri obrábaní húževnatých materiálov

Pri obrábaní krehkých materiálov je trieska drobivá, odskakuje od čela. Trenie triesky o čelo je malé a rezné prostredie má dobrý prístup. Preto maximálne teploty sú na reznej hrane alebo na chrbte v bezprostrednej blízkosti reznej hrany.

Teplota myslených bodov rezného klina aj obrábaného materiálu v koreni triesky je rôzna. Od tejto skutočnej hodnoty teploty treba rozlíšiť tzv. teplotu rezania. Je to stredná teplota dotykových miest obrábaného a rezného materiálu.

6.3. TEPELNÁ BILANCIA

Tepelná bilancia vychádza zo zákona zachovania energie. Mechanická energia potrebná na rezanie sa mení prevažne na teplo.

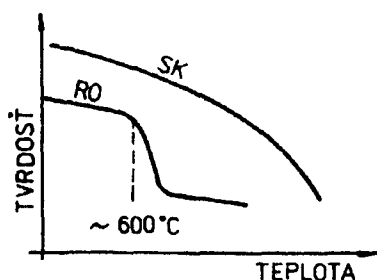
Deformačná práca v koreni triesky, práca trenia na čele a na chrbte sa mení na teplo a je odvedené trieskou, rezným klinom (nástrojom), obrábaným materiálom a okolím. Sú názory, že nepatrná časť energie rezania sa spotrebuje aj na vytváranie nových povrchov.

Tepelná bilancia porovnáva privádzanú energiu (100 %) a odvádzanú energiu. Je to pomerne množstvo tepla odvedené obrobkom, nástrojom, trieskou a okolím (a prípadne energia vytvárania nových povrchov). Vyjadrenie množstva privádzanej energie a kanálov jej spotreby (odvádzania) voláme tepelná bilancia.

Pomer množstva tepla odvádzaného trieskou, nástrojom, obrobkom a okolím závisí najmä od reznej rýchlosti. So zvyšovaním reznej rýchlosti klesá množstvo tepla odvádzané obrobkom (pri vysokých rezných rýchlostiach obrobok je studený), zvyšuje sa množstvo tepla odvádzané trieskou a nástrojom (hrot nástroja a trieska sú dokonca žeravé). Pri týchto úvahách treba mať na mysli, že so zvyšovaním reznej rýchlosti sa zväčšuje privádzané množstvo energie. Preto zmenšenie podielu môže znamenať v absolútnych jednotkách viac. Rozhodujúcim faktorom je teplota rezania.

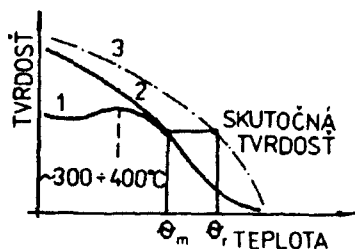
6.4. VPLYV TEPLoty NA VLASTNOSTI OBRÁBANÉHO A REZNÉHO MATERIÁLU

Elementy rezného klina v procese rezania sú vystavené pomerne dlhodobému účinku teploty. Ich vlastnosti v procese rezania sú preto podstatne iné ako pri izbovej teplote (obr. 6.2.).



Obr. 6.2. Vplyv teploty rezania na tvrdosť rýchloreznej ocele (RO) a spekaného karbidu (SK)

Elementy obrábaného materiálu sú v procese rezania vystavené krátkodobému účinku teploty. Teplota preto málo ovplyvňuje ich vlastnosti (obr. 6.3.). Spolupôsobí tu aj deformácia a deformačná rýchlosť, ktoré zvyšujú mechanické vlastnosti obrábaného materiálu.



Obr. 6.3. Vplyv teploty rezania na mechanické vlastnosti obrábaného materiálu
 1 – dlhodobé pôsobenie teploty na nedeformovaný obrábaný materiál, 2 – dlhodobé pôsobenie teploty na deformovaný obrábaný materiál, 3 – skutočná tvrdosť triesky v procese rezania, vypočítaná pomocou modifikovanej teploty

Výnimky vznikajú pri vŕtaní, frézovaní, brúsení a pod. Rezné klíny pôsobia na tie isté miesta reznej plochy vo veľmi krátkych časových intervaloch. Preto elementy tu uložené majú už pred odrezávaním podstatne vyššiu teplotu ako izbovú. HRUBEC využil tento efekt na produktívne vŕtanie ťažkoobrobiteľných materiálov.

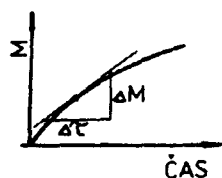
7. OPOTREBOVANIE

Opotrebovanie je strata pôvodného geometrického tvaru rezného klina. Môže byť spojené aj so zmenou mechanických vlastností.

7.1. INTENZITA OPOTREBOVANIA

Intenzita opotrebovania je rýchlosť úbytku materiálu rezného klina (obr. 7.1.):

$$i = \frac{dM}{d\tau} \approx \frac{\Delta M}{\Delta \tau}$$



Obr.7.1. Závislosť úbytku materiálu (opotrebovania) od času

Intenzita opotrebovania závisí od konkrétnych vlastností obrábaného a rezného materiálu v miestach vzájomného dotyku. Ovpływujú ich teplota a rezné prostredie, ktoré vytvára povrchové filmy. Konkrétne vlastnosti povrchových vrstiev určujú aj mechanizmus opotrebovania. Jednotlivým mechanizmom opotrebovania (mechanicko-brúsne, molekulárno-adhézne, chemicko-difúzne) zodpovedajú čiastkové intenzity opotrebovania i_1 , i_2 , i_3 . Výsledná intenzita opotrebovania je daná ich súčtom

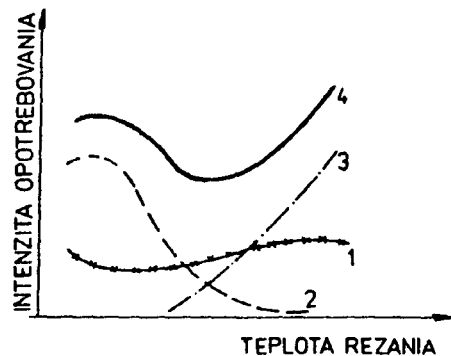
$$i = i_1 + i_2 + i_3$$

Čiastkové intenzity opotrebovania môžeme odhadnúť výpočtami. Hypotetický priebeh výslednej intenzity opotrebovania a jej zložiek je na obr. 7.2.

V konkrétnych podmienkach rezania nepôsobia vždy všetky mechanizmy opotrebovania rovnakou mierou. Mechanizmy opotrebovania v rôznych bodoch dotyku rezného klina a materiálu môže byť rôzne. To, že ktorý mechanizmus akou mierou sa prejaví v danom bode, závisí okrem konkrétnych vlastností obrábaného a rezného materiálu, od prítomnosti rezného prostredia, od teploty povrchu rezného klina a od vzájomnej rýchlosti pohybu.

Niekedy môže byť užitočné uvažovať s prevrátenou hodnotou intenzity opotrebovania, ktorá sa v zahraničnej literatúre označuje ako inverzná intenzita opotrebovania, a táto je:

$$i^{-1} = \frac{d\tau}{dM}$$

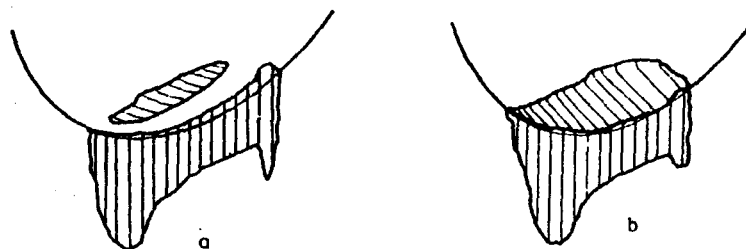


Obr. 7.2. Vplyv teploty rezania na intenzitu opotrebovania a jej zložky: intenzita mechanicko-brúsneho (1), molekulárno-adhézneho (2), chemicko-difúzneho (3) a výsledného (4) opotrebovania

7.2. TYPICKÉ PREJAVY OPOTREBOVANIA

Na dotkových plochách obrábaného a rezného materiálu vždy prebieha vzájomný prenos materiálu. Obrábaný materiál odnáša časti rezného materiálu. Viditeľné opotrebovanie vzniká v miestach s väčšou intenzitou opotrebovania, teda tam, kde teploty alebo vzájomná rýchlosť pohybu je vysoká.

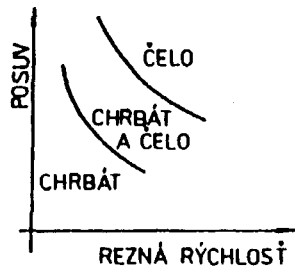
Typické opotrebovanie rezného klina pri obrábaní ocelí je na obr. 7.3a. Na čele sa vymieľa žliabok. Na chrbte vzniká plôška. Najväčšiu šírku má zvyčajne pod hrotom alebo v miestach dotyku obrábaného povrchu s rezným klinom. Niekedy pozorujeme zvýšené opotrebovanie pri výbehu vedľajšej reznej hrany z obrábaného materiálu.



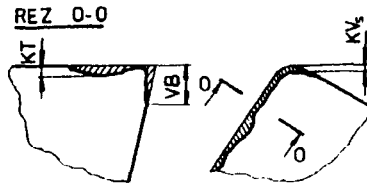
Obr. 7.3. Typické opotrebovanie rezného klina pri obrábaní
a – ocelí, b – liatin

Pri obrábaní liatiny sa opotrebovanie koncentruje na chrbtovú plochu (obr. 7.3b) a časť čela v bezprostrednej blízkosti reznej hrany.

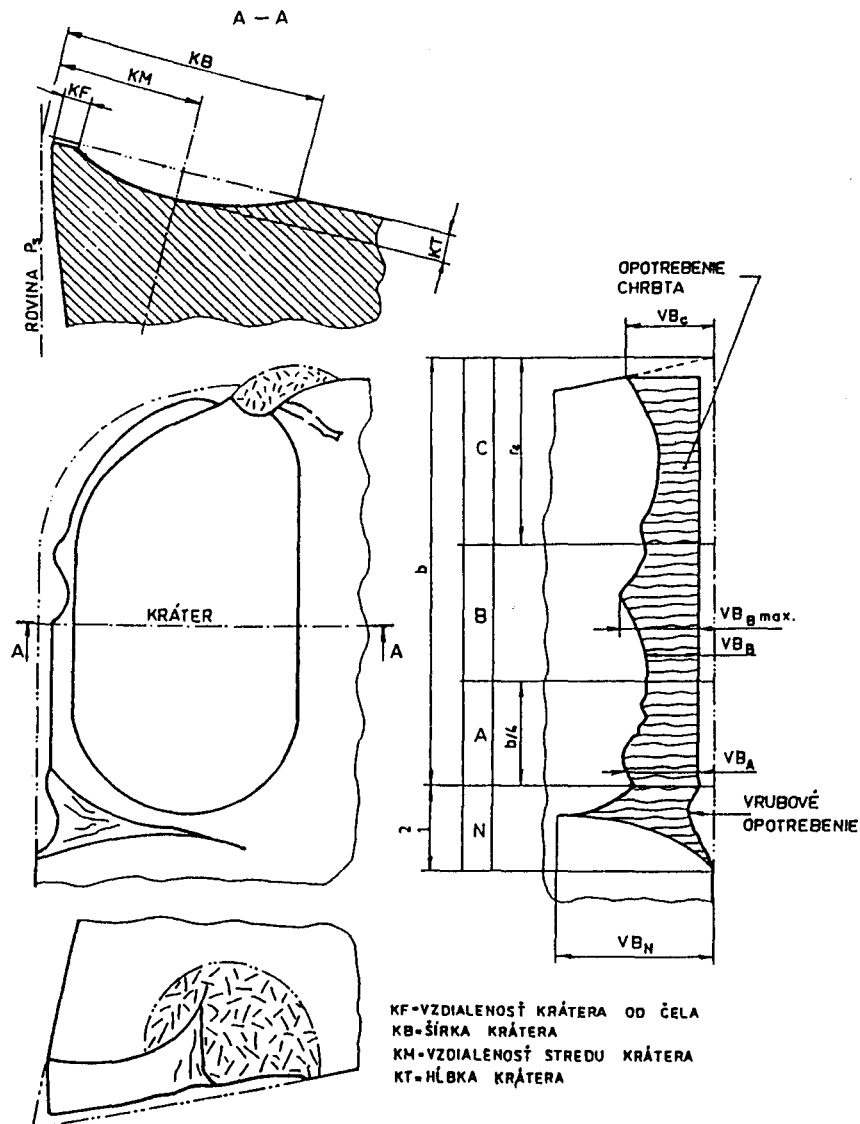
To či v konkrétnych podmienkach prevláda opotrebovanie čela alebo chrbta, závisí okrem druhu obrábaného materiálu aj od posuvu a reznej rýchlosti (obr. 7.4.).



Obr. 7.4. Vplyv posuvu a reznej rýchlosti na opotrebovanie rezného klína



Obr. 7.5.



Obr. 7.5.a Charakteristické miery lineárneho opotrebovania rezného klína: VB – šírka opotrebovania na chrbte, KT – hĺbka žliabku (krátera) na čele, KV_c – rozmerové opotrebovanie

7.3. VÝSLEDKY EXPERIMENTÁLNEHO VÝSKUMU

7.3.1. Miery opotrebovania

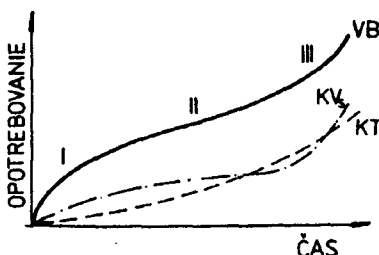
Zvyčajne stanovíme tieto rozmery opotrebovaných častí (obr. 7.5.):

1. šírka plôšky opotrebovania na chrbte (VB),
2. hĺbka žliabku opotrebovania na čele (KT),
3. posunutie hrotu nástroja opotrebovaním. Posunutím hrotu nástroja vplyvom opotrebovania sa menia rozmery obrobeného povrchu, preto túto mieru opotrebovania označujeme ako rozmerové opotrebovanie (KV_s).

Symboly sú z nemčiny: VB – Verschleissmarkenbreite, KT – Kolktiefe, KV_s – Kantenversetzung an der Spanfläche.

7.3.2. Časový priebeh opotrebovania

Opotrebovanie je proces prebiehajúci v čase. Hodnotenie procesu opotrebovania rezného klina vyžaduje merať opotrebovanie a čas práce nástroja. Hovoríme o časovom priebehu opotrebovania.

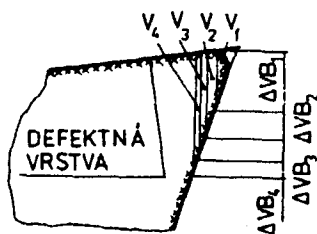


Obr. 7.6. Časový priebeh šírky plôšky opotrebovania na chrbte (VB), hĺbky žliabku na čele (KT) a rozmerového opotrebovania (KV_s)

Typický priebeh opotrebovania vybraných charakteristík je na obr. 7.6. Na časovom priebehu šírky plôšky opotrebovania chrbta rozoznávame tri pásma:

- zábehové pásmo,
- pásmo normálneho opotrebovania,
- pásmo zrýchleného opotrebovania.

V týchto pásmach sa intenzita opotrebovania mení. Príčiny sú tieto:



Obr. 7.7. Schematické znázornenie príčin intenzity opotrebovania v zábehovom smere (v₁ = v₂ = v₃ = v₄)

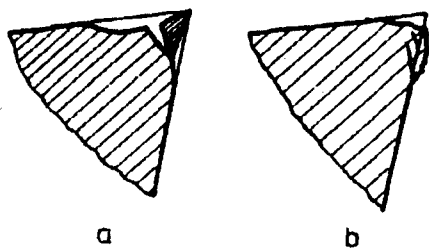
1. V zábehovom pásme (obr. 7.7.) sa prejavíajú vlastnosti povrchovej vrstvy rezného klina po ostrení (zvyškové napätia, zmeny štruktúry, zmeny chemického zloženia atď.). Dotyková plocha medzi rezným klinom a obrábaným materiálom je malá, vznikajú veľké tlaky. Značný vplyv má aj klinový tvar, pre opotrebovanie rovnakého objemu hodnota ΔV_{bi} zo začiatku je väčšia ako neskôr. Preto intenzita opotrebovania postupne klesá (inverzná intenzita opotrebovania rastie). Táto jednoduchá geometrická analýza dáva parabolický priebeh (s osou x) opotrebovania.

2. V normálnom pásme opotrebovania sa podmienky ustália, opotrebuje sa pôvodný, ostrením neporušený materiál rezného klina. Pre opotrebovanie rovnakého objemu za čas hodnota ΔV_{bi} klesá málo, rastie však dotyková plocha, a tým aj teplota. Tieto protichodné javy sú však v rovnováhe. Preto intenzita opotrebovania sa ustáli a je menšia ako v zábehovom pásme (inverzná intenzita opotrebovania sa taktiež ustáli a je väčšia ako v zábehovom pásme).

3. V pásme zrýchleného opotrebovania na vlastnostiach povrchovej vrstvy rezného klina sa prejavujú zmeny spôsobené procesom rezania: zmeny štruktúry, tvrdosti a chemického zloženia. Opotrebovaním čela sa rezná hrana oslabuje a vyštrbuje, polomer klina rastie. Teplota ďalej rastie. Následkom týchto zmien objemový úbytok materiálu opotrebovaním rastie stále rýchlejšie. Pokles hodnoty ΔV_{bi} pre opotrebovanie rovnakého objemu za čas už nemôže vyrovnať rast objemovej intenzity opotrebovania, preto intenzita lineárneho opotrebovania rastie (inverzná intenzita opotrebovania klesá).

Ak opotrebovanie nástroja je veľmi veľké, nástroj sa poškodí krehkým alebo plastickým porušením rezného klina (obr. 7.8.). Hovoríme o katastrofálnom opotrebovaní rezného klina alebo jednoducho o jeho poškodení. Prácu nástroja treba vždy prerušiť pri menšom opotrebovaní, aké zodpovedá začiatku katastrofálneho opotrebovania. Toto opotrebovanie je maximálne opotrebovanie, dovolené z hľadiska nástroja. Limitné opotrebovanie nástroja z hľadiska poškodenia označujeme symbolom V_{Bk} .

Tri pásma opotrebovania môžeme rozlíšiť aj na časovom priebehu rozmerového opotrebovania (obr. 7.6.). Časový priebeh hĺbky žliabku na čele má parabolický priebeh. Ukončený je v okamihu krehkého alebo plastického rozrušenia rezného klina.



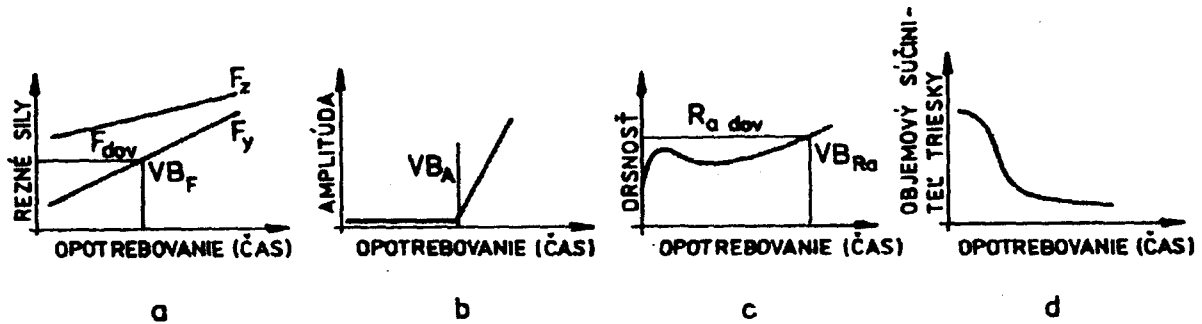
Obr. 7.8. Poškodenie nástroja
a – krehké, b – plastické porušenie reznej hrany

7.3.3. Vplyv opotrebovania na proces rezania, limitné opotrebovanie

Opotrebovaním sa mení pôvodný tvar rezného klina. Tieto geometrické zmeny vplyvajú na rezné sily, chvenie, drsnosť povrchu a tvarovanie triesky.

Typické závislosti týchto charakteristík procesu rezania od šírky plôšky opotrebovania na chrúbte sú na obr. 7.9. Zo štúdia týchto obrázkov vyplýva, že ak rezné sily alebo drsnosť povrchu sú obmedzené vopred stanovenou hodnotou, nie je možné dovoliť ľubovoľné opotrebovanie rezného klina. Existuje určité limitné opotrebovanie ΔV_{BF} z hľadiska prípustnej reznej

sily F_{dov} a VB_{Ra} z hľadiska prípustnej drsnosti povrchu $R_{a,dov}$. Analogicky môžeme stanoviť limitné opotrebovanie aj z hľadiska chvenia VB_A .



Obr. 7.9.

a – Limitné opotrebovanie z hľadiska zložky reznej sily, b – limitné opotrebovanie z hľadiska vzniku chvenia, c – limitné opotrebovanie z hľadiska drsnosti povrchu, d – závislosť objemového súčiniteľa triesok od opotrebovania (času)

Limitné opotrebovanie potrebujeme poznať na stanovenie optimálneho opotrebovania rezného klina. Zaoberáme sa ním v časti o optimalizácii rezných podmienok.

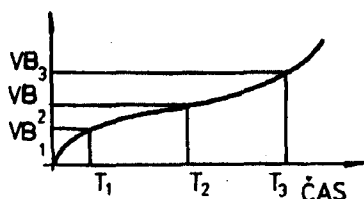
8. TRVANLIVOSŤ A ŽIVOTNOSŤ

8.1. TRVANLIVOSŤ REZNÉHO KLINA

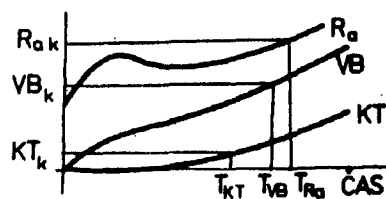
Trvanlivosť rezného klina definujeme ako čas opotrebovania rezného klina na vopred zvolenú hodnotu opotrebovania. Čas opotrebovania obvykle udávame v minútach. V prevádzkových podmienkach často používame ako mieru trvanlivosti aj počet kusov obrobených nástrojom do jeho otupenia. Túto trvanlivosť označujeme ako trvanlivosť v kusoch T_k . Medzi trvanlivosťou v minútach a trvanlivosťou v kusoch T_k je jednoduchý vzťah:

$$T = T_k \cdot t_c$$

kde t_c je čas rezania na jednom obrobku.



Obr. 8.1. Vzťah volenej hodnoty opotrebovania a trvanlivosti rezného klina



Obr. 8.2. Stanovenie trvanlivosti pre rôzne miery opotrebovania

Vzťah volenej hodnoty opotrebovania a trvanlivosti je na obr. 8.1.

Trvanlivosť nástroja môže byť limitovaná rôznymi mierami opotrebovania (obr. 8.2.). Pre rôzne miery opotrebovania dostaneme rôzne trvanlivosti. Môžeme hovoriť o trvanlivosti z hľadiska opotrebovania chrčta, čela, z hľadiska dovolenej drsnosti a pod. Platná je vždy pochopiteľne, menšia hodnota trvanlivosti:

$$T = \min (T_{VB}, T_{KT}, T_{Ra}, \dots),$$

kde indexami sme označili hľadiská stanovenia trvanlivosti.

Ak uvážime intenzitu opotrebovania na chrčte rezného klina ako:

$$I = dVB / d\tau \quad \text{čiže} \quad dVB = i \cdot d\tau$$

Potom pomocou intenzity opotrebovania môžeme určiť kritérium opotrebovania na chrčte rezného klina integráciou predchádzajúcej rovnice, a teda:

$$VB_k = \int_0^{\tau} i \cdot d\tau$$

a napokon pomocou inverznej intenzity opotrebovania na chrčte rezného klina dostaneme

$$i^{-1} = d\tau / dVB \quad \text{čiže} \quad d\tau = i^{-1} \cdot dVB$$

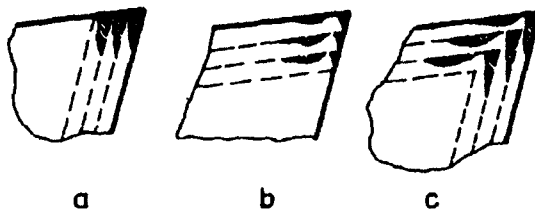
potom integráciou predchádzajúceho vzťahu môžeme vyjadriť trvanlivosť

$$T_{VB} = \int_0^{VB_k} i \cdot dVB$$

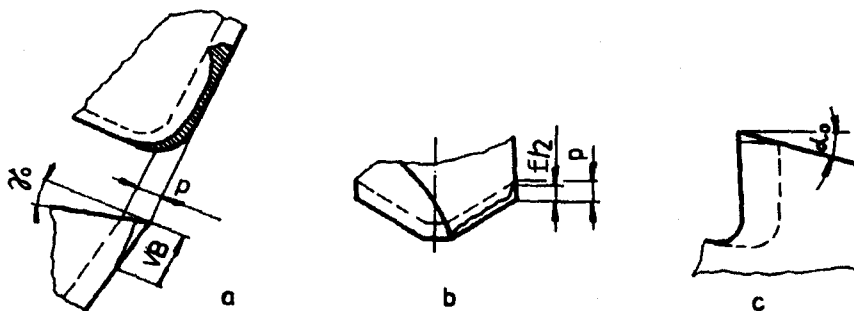
Rozmerové opotrebovanie nástroja zvyčajne nelimituje trvanlivosť. Ak rozmerové opotrebenie noža dosahuje dovolenú hodnotu, nástroj prestavíme, t. j. posunieme ho tak, aby opotrebovaná rezná hrana zaujala polohu, akú mala ostrá rezná hrana na začiatku práce.

8.2. SCHÉMY OSTRENIA, POČET NASADENÍ NÁSTROJA

Nástroje (rezné platničky) ostríme z chrbta, z čela alebo oboch strán (obr. 8.3.). Závisí to od konštrukcie nástroja a od rozmerov opotrebovaných plôch. Schému ostrenia si zvolíme tak, aby pre obnovenie rezných vlastností nástroja bolo potrebné odbrúsiť čo najmenší objem materiálu z rezného klina.



Obr. 8.3. Schémy ostrenia rezného klina
a – z chrbta, b – z čela, c – z chrbta a čela



Obr. 8.4. Hrúbka odbrúsenej vrstvy p pri ostrení
a – noža chrbta, b – skrutkového vrtáka z chrbta, c – tvarového nástroja z čela

Pri každom ostrení odbrúsime z rezného klina vrstvu s hrúbkou p. Táto hrúbka zahŕňa prídavok na obnovenie geometrického tvaru a na odstránenie porušenej povrchovej vrstvy (praskliny, popúšťanie). Hrúbku odbrúsenej vrstvy p pre rôzne typy nástrojov a schém ostrenia sme označili na obr. 8.4.

Ostrením sa znižujú rozmery rezného klina. Konštrukciou nástroja sú dané najmenšie možné rozmery preostreného nástroja. Najväčšiu vzdialenosť reznej hrany preostreného nástroja a nového nástroja voláme využitelným rozmerom nástroja VR.

Na základe využitelného rozmeru nástroja a prídavku na ostrenie vypočítame počet nasadení nástroja

$$z = VR / p + 1$$

kde jeden na pravej strane označuje prvé nasadenie nástroja.

8.3. ŽIVOTNOSŤ NÁSTROJA

Súčet trvanlivosti rezného klina nástroja od prvého nasadenia až po jeho vyradenie voláme životnosťou.

$$\check{Z} = \Sigma T$$

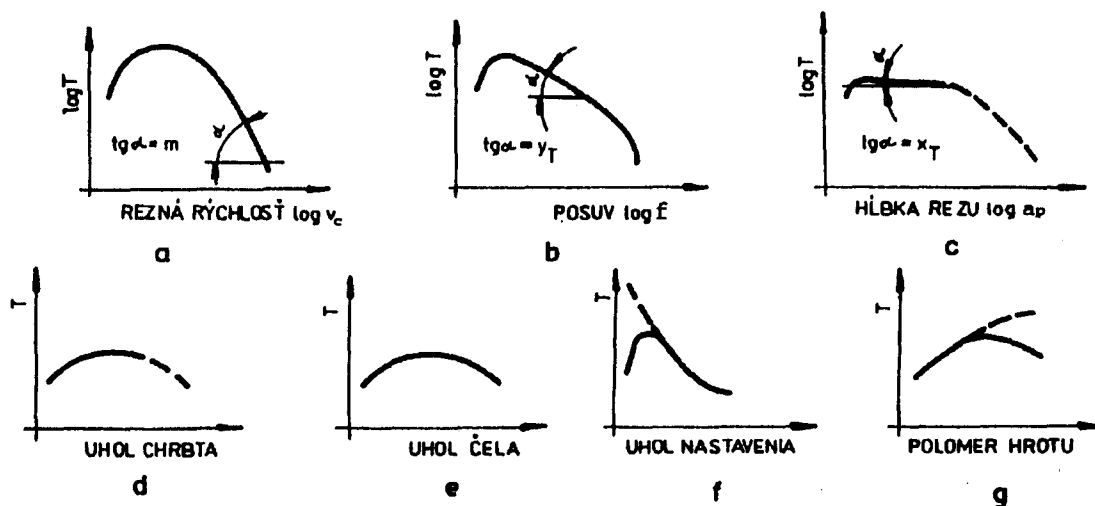
Ak je trvanlivosť rezného klina nástroja pri jednotlivých nasadeniach rovnaká, potom životnosť nástroja dostaneme ako súčin počtu nasadení z a trvanlivosti T :

$$\check{Z} = z \cdot T$$

Životnosť určujeme v minútach alebo (napr. pri pretáňovaní) aj počtom kusov. Podľa volenej miery životnosti volíme v rovnici pre jej výpočet mieru trvanlivosti podľa reznej hrany.

8.4. VÝSLEDKY EXPERIMENTÁLNEHO VÝSKUMU

Pri experimentálnom stanovení trvanlivosti rezného klina rozoznávame tzv. dlhodobé a krátkodobé metódy. Pri dlhodobých metódach bezprostredne stanovíme trvanlivosť na základe časového priebehu opotrebovania, z nej výpočtom získame trvanlivosť.



Obr. 8.5. Typické závislosti trvanlivosti od: a – reznej rýchlosti, b – posuvu, c – hĺbky rezu, d – uhla chrbta, e – uhla čela, f – uhla nastavenia hlavnej reznej hrany, g – polomeru hrotu

Typické priebehy trvanlivosti rezného klina a vybraných parametrov rezania sú na obr. 8.5. Vykazujú maximum pri určitej hodnote parametra. Vznik takéhoto priebehu okrem zmeny teploty vyvoláva aj chvenie.

8.5. ŠTATISTICKÉ MODELY TRVANLIVOSTI REZNÉHO KLINA

Výsledky experimentálneho výskumu vedú k poznatku, že závislosti trvanlivosti od parametrov rezania nemajú monotónne stúpajúci alebo klesajúci charakter, ale vykazujú extrém. So zmenou parametrov sa mení teplota rezania a intenzita opotrebovania. Táto skutočnosť neumožní jednou empirickou rovnicou exponenciálneho tvaru vyjadriť vplyv trvanlivosti v celom rozsahu zmeny voleného parametra. Zvyčajne postupujeme tak, že analyticky vyjadříme len časť závislosti, ktorá zodpovedá v praxi použitej tzv. pracovnej oblasti parametrov a uvedieme rozsah platností (interval zmeny parametrov).

Trvanlivosť zvyčajne vyjadříme ako funkciu reznej rýchlosti v_c , posuvu f a hĺbky rezu a_p . Najčastejšie používaný tvar empirickej rovnice je

$$T = \frac{C_T}{v_c^m a_p^{x_T} f^{y_T}}$$

kde C_T , m , x_T , y_T sú konštanty.

Tento tvar tiež býva nazývaný ako rozšírená Taylorova rovnica.

Vplyv ostatných parametrov je zahrnutý do konštanty C_T . Preto pre použiteľnosť empirickej (štatistickej) rovnice trvanlivosti treba poznať nielen intervaly zmeny parametrov v_c , a_p , f , pre ktoré boli konštanty stanovené, ale aj ostatné podmienky práce (druh obrábaného a rezného materiálu, geometriu nástroja, použité pracovné prostredie) a najmä volenú mieru opotrebovania, pre ktorú bola trvanlivosť stanovená.

Na vyjadrenie vplyvu ostatných parametrov používame opravné súčinitele. Označujeme ich obdobne ako opravné súčinitele rezných síl.

Trvanlivosť často vyjadrujeme ako funkciu jediného parametra – reznej rýchlosti. Potom rovnica trvanlivosti má tvar

$$T \cdot v_c^m = C_T$$

kde m zohľadňuje vplyv komplexných podmienok rezania (obrábania), ako: rezného materiálu, obrobiteľnosti materiálu, geometrie rezných častí nástroja, stav povrchu (liata kôra a pod.), tuhosť sústavy SNOP ...

Táto závislosť sa stručne označuje ako $T - v$ závislosti alebo ako Taylorova rovnica trvanlivosti.

Nedostatkom logaritmickej linearizácie trvanlivostných závislostí (exponenciálneho tvaru empirickej rovnice) je pomerne úzka oblasť dostatočne presných aproximácií experimentálnych hodnôt. Preto sa používajú aj rovnice iného tvaru. Kvôli jednoduchosti miesto v_c píšeme v nich symbol v .

Z literatúry sú napr. známe tvary $T - v$ závislosti, navrhnuté dvojicou autorov Konig-Depiereux:

$$T (v + v_0)^z = K$$

alebo

$$T \exp (a \cdot v^b) = D$$

kde v_0, z, K, a, b, D sú pre dané podmienky rezania konštantami. Tieto závislosti však nie sú linearizovateľné.

Linearizovateľné závislosti navrhol Rus Safonov a Poliak Florek:

$$T \exp (a \cdot v) = E_0$$

$$T (v + v_0)^2 = H_0$$

v ktorých a, E_0, v_0 a H_0 sú pre dané podmienky rezania konštanty.

Mocninové závislosti pre vyjadrenie vplyvu reznej rýchlosti a posuvu na trvanlivosť vrtákov pri vrtaní ťažkoobrobiteľných materiálov a výstružníkov na vystruženie ocelí navrhol a uplatnil Békés:

$$T^{1/p} = c_0 + c_1 \cdot v^{1/q} + c_2^{1/r}$$

kde p, q, r sú celé čísla,

c_0, c_1, c_2 – experimentálne určené konštanty.

Rovnice nového typu aproximujú experimentálny priebeh trvanlivosti presnejšie a v širšej oblasti ako klasický Taylorov exponenciálny tvar. Používame ich vtedy, ak logaritmická linearizácia vedie k neprípustne veľkým chybám. Pri voľbe typu empirickej rovnice treba mať na mysli okrem jej presnosti aj prácnosť matematického spracovania experimentálnych údajov a technologických výpočtov, ktoré nadväzujú na volený typ rovnice.

8.6. ZÁKON HOSPODÁRNEHO OBRÁBANIA

Exponenty m, x_T, y_T empirickej závislosti trvanlivosti majú menlivé hodnoty. Možno ich považovať za konštanty iba v úzkej oblasti zmeny parametrov. Hodnoty exponentov závisia aj od druhu obrábaného a rezného materiálu a od rezného prostredia. Vo všeobecnosti platí, že čím je vplyv parametra alebo pracovných podmienok na intenzitu opotrebovania väčší, tým väčšia je aj hodnota exponentov.

Priemerné hodnoty exponentov pre podmienky používané v praxi pri obrábaní ocelí sú v tab. 8.1.

Ak poznáme trvanlivosť a podmienky práce, ľahko vypočítame trvanlivosť pre iné podmienky. Napr. pre známu trvanlivosť T_1 a reznú rýchlosť v_1 platí:

$$T_1 \cdot v_1^m = T_2 \cdot v_2^m$$

z čoho

$$T_1 / T_2 = (v_2 / v_1)^m$$

Z tejto úmery vyplýva, že pri práci so spekanými karbidmi pri zvýšení reznej rýchlosti na dvojnásobok trvanlivosť klesá 8 až 32-krát (2^3 až 2^5 -krát). Pri dvojnásobnom posuve trvanlivosť je polovičná, pri dvojnásobnej hĺbke rezu asi len o 20 % menšia.

Tabuľka 8.1

Exponent	Rezný materiál	
	rýchlorezná oceľ	spekaný karbid
m	8 až 10	3 až 5
xT	0,4	0,3
yT	2	0,9 až 1

Z týchto výsledkov vyplýva zákon hospodárneho obrábania. Z hľadiska minimálnych nákladov na nástroje (maximálnej trvanlivosti) treba pracovať s maximálnou hĺbkou rezu, s čo najväčším posuvom a im zodpovedajúcou (pomerne nízkou) reznou rýchlosťou.

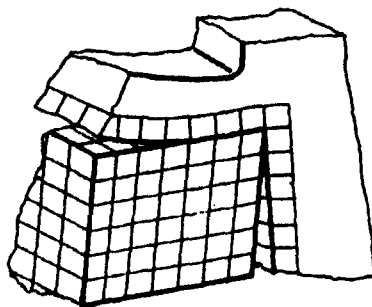
Inými slovami: pre zvýšenie produktivity rezania (množstva minútového objemu odrezávaného materiálu) pri konštantnej trvanlivosti nástroja najvýhodnejšie je zväčšiť hĺbku rezu, potom posuv a nakoniec reznú rýchlosť.

Hospodárna trvanlivosť (15.422) klesaním exponentu m klesá, ba nadobúda zápornú hodnotu. Znamená to, že rezná rýchlosť je limitovaná technickými podmienkami. Pre voľbu rezného materiálu rozhodujúca je trvanlivosť a produktivita pri limitných podmienkach.

8.7. SIMULAČNÝ MODEL OPOTREBOVANIA A TRVANLIVOSTI

Stanovenie trvanlivosti vyžaduje určiť čas, za ktorý sa nástroj opotrebuje na zvolenú mieru. Preto simulácia trvanlivosti bezprostredne nadväzuje na simuláciu opotrebovania.

Simulácia opotrebovania vyžaduje poznať (teda aj číslícovými modelmi vyjadriť) podstatné faktory, ktoré na jeho priebeh vplývajú. Ide tu najmä o materiálové vlastnosti obrábaného a rezného materiálu, o teplotné pole a okamžitý tvar rezného klina.



Obr. 8.6. Elementárne objemy rezného klina a obrábaného materiálu

Rozdeľme obrábaný materiál a rezný klin v koreni triesky na elementárne objemy (obr. 8.6.). Predstavme si, že všetky mysliteľné vlastnosti obrábaného a rezného materiálu v objeme

týchto elementov sú konštantné a menia sa od elementu k elementu nespojite, diskkrétne. Potom materiálový model rezného klina a obrábaného materiálu si môžeme predstaviť vo forme trojrozmerných matíc, kde každému elementu so súradnicami x, y, z priradíme určitú diskrétnu hodnotu niektorej vlastnosti.

Pri rovinnom modelovaní opotrebovanie rezného klina môžeme sledovať v hlavnej sečnej rovine rezného klina a predstaviť si všetky tieto modely vo forme obdĺžnikovej matice.

V literatúre sú prezentované návrhy matematických modelov opotrebovania rezných nástrojov, zahŕňajúce vplyvy nehomogenity rezného materiálu na výslednú intenzitu opotrebovania. Modely sú vytvorené na základe výsledkov uskutočnenej geometrickej a fyzikálnej analýzy opotrebovania a analýzy štruktúry rezného materiálu.

Na základe vykonaných analýz sú navrhnuté algoritmy generovania štruktúry rezných materiálov, ktoré sú následne implementované do simulačných modelov opotrebovania. Vlastná simulácia je vykonávaná v krokoch, v ktorých je vypočítavané chemické zloženie aktívnej vrstvy rezného klina, t. j. tej, ktorá je práve v kontakte s obrobkom. Intenzita opotrebovania závisí predovšetkým od meniacej sa štruktúry rezného materiálu v jednotlivých vrstvách a od teploty v oblasti rezania, ktorú výrazne podmieňuje rezná rýchlosť.

Rezný klin je umiestňovaný do vopred vytvorenej pravidelnej štvorcovej mriežky (obr. 8.6.) (napr. veľkosti $10 \mu\text{m}$).

Zvislé čiary mriežky a profil rezného klina vymedzujú vrstvy, ktoré sa opotrebovávajú v jednotlivých časových intervaloch. Strata rezného materiálu na chrbte nástroja býva uvažovaná ako časová postupnosť odbúravania stĺpcov použitej mriežky. Čas opotrebovania vrstvy je úmerný intenzite opotrebovania a opotrebovanému objemu materiálu. Proces plynulého opotrebovania býva nahradený simulačným procesom vo vyššie uvedených jednotlivých krokoch.

9. DRSNOSŤ REZNÉHO A OBROBENÉHO POVRCHU

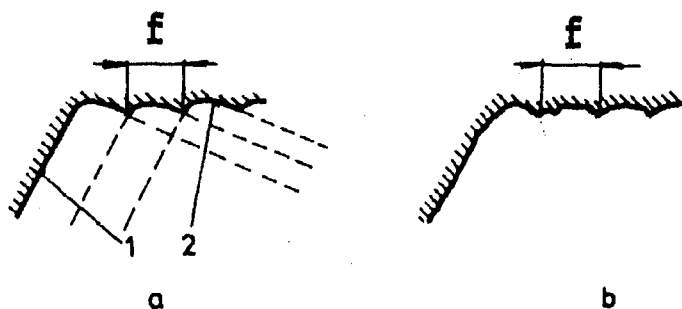
9.1. FYZIKÁLNE PRÍČINY VZNIKU DRSNOSTI

Povrchy, ktoré vznikajú pri obrábaní, sú tieto:

1. rezná plocha, vzniká bezprostredne za reznou hranou nástroja,
2. obrobenej plochy, vzniká za hrotom nástroja v smere posuvu.

Tieto povrchy vykazujú stopy po nástroji, sú drsné. Opíšeme príčiny vzniku drsností reznej a obrobenej plochy. Rozoznávame štyri skupiny príčin.

1. Zobrazením tvaru reznej hrany do obrábaného materiálu (obr. 9.1a). Drsnosť ideálneho profilu obrobenej plochy voláme teoretickou alebo kinematickou drsnosťou. Rezná hrana nie je však ideálne hladká, preto ani profily reznej hrany alebo obrobenej plochy nebudú hladké, ale budú od ideálneho tvaru vykazovať niektoré odchýlky (obr. 9.1b).



Obr. 9.1. Zobrazenie tvaru

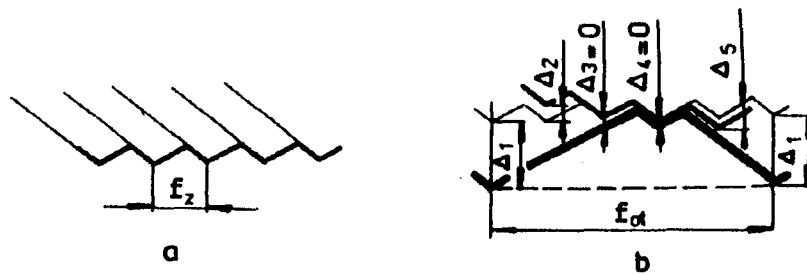
a – ideálnej, b – skutočnej reznej hrany do obrábaného materiálu

2. Plastickými deformáciami spojenými so vznikom triesky. Pri rezaní je obrábaný materiál v blízkosti reznej hrany plasticky a pružne deformovaný: Časti obrábaného materiálu adhéznymi silami prilipnú na reznú hranu a menia jej pôvodný tvar. Môže vznikáť aj nárastok. Ak vzniká nárastok, jeho časti odchádzajú aj reznou plochou. Práve vytváraná rezná plocha aj s prípadnými časťami nárastku je reznou hranou nástroja deformovaná.

3. Chvením. Proces rezania je vždy spojený s kmitaním. Kmitanie reznej hrany ovplyvňuje skutočný vzájomný pohyb obrobku a nástroja, a tým aj tvar reznej plochy a drsnosť obrobenej plochy.

4. Poškodením povrchu náhodnými javmi, napr. odchádzajúcou trieskou, rýchlom posuvom noža po obrobenej ploche a pod.

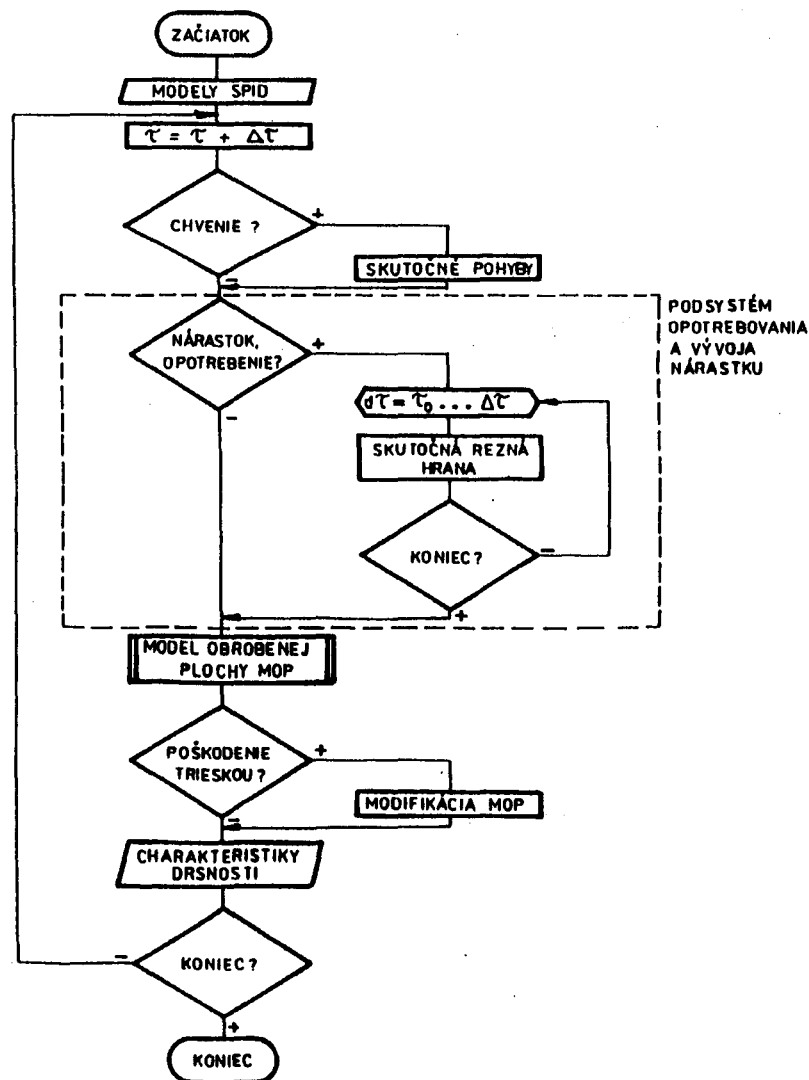
Takto vzniká drsnosť obrobenej plochy pri jednoklinových nástrojoch. Pri viac a mnohoklinových nástrojoch (skrutkových vrtákoch, frézach, brúsiacich nástrojoch), má svoje zvláštnosti. Rezné hrany nie sú umiestnené pravidelne. Za sebou nasledujúce rezné hrany viacklinových nástrojov kvôli nepresnosti ostrenia a hádzania vretena obrábacieho stroja sa zobrazujú v obrábanom materiáli obr. 9.2. Profil vytvorený hrotom nástroja sa cyklicky opakuje nie po posuve na zub, ale po posuve na otáčku. Umiestnenie zrn (ich hrotov a rezných hrán) v brúsiacom nástroji je náhodné (pozri kap. 12.4 a ďalšie).



Obr. 9.2. Vplyv hádzania zubov frézy na drsnosť povrchu
 a – ideálny profil bez vplyvu hádzania, b – skutočný profil (silná čiara)

9.2. SIMULAČNÝ MODEL PROFILU A DRSNOSTI OBROBENÉHO POVRCHU

Profil a drsnosť obrobeného povrchu sú v podobnom vzťahu ako opotrebovanie a trvanlivosť. Drsnosť je jedna z charakteristík profilu povrchu. Jej simulácia vyžaduje vytvoriť najprv model profilu a tento vyhodnotiť.



Obr. 9.3. Hypotetický simulačný model vzniku obrobenej plochy a drsnosti povrchu

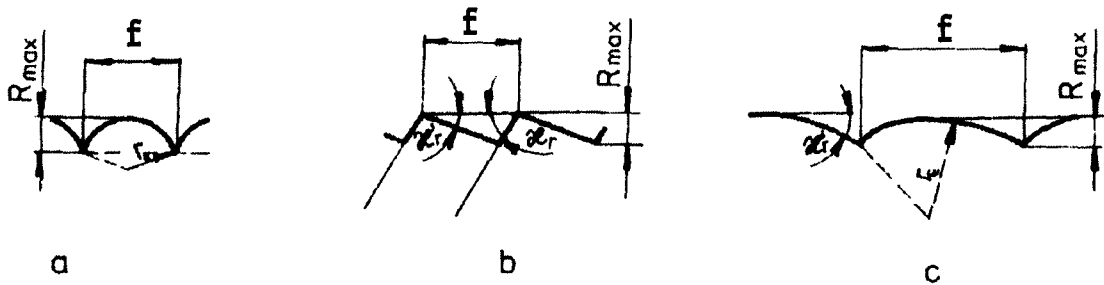
Vychádzame geometricko-kinematického modelu SNOP (konkrétne z tvaru reznej hrany nástroja, pohybov pri rezaní a zo vzájomnej polohy nástroja a pohybov), zo štatistických modelov nárastku, chvenia a náhodného poškodenia obrobeného povrchu trieskou. Charakteristiky týchto modelov sa zadávajú ako vstupné údaje (obr. 9.3.).

Pohyby pri rezaní doplníme charakteristikami chvenia a určíme skutočný relatívny pohyb nástroja vzhľadom na obrobok.

9.3. ANALYTICKÝ VÝPOČET DRSNOSTI OBROBENÉHO POVRCHU

Ak si zvolíme dostatočne jednoduchý teoretický model vzniku profilu obrobeného povrchu, môžeme vyjadriť charakteristiky drsnosti priamo rovnicami.

Všeobecne známe sú rovnice na výpočet maximálnej drsnosti R_{max} . Podľa DIN sa R_{max} označuje ako R_t podľa návrhu ISO sa R_{max} bude označovať R_y . Ak profil obrobeného povrchu je vytvorený iba kruhovými oblúkmi (t. j. hlavná a vedľajšia rezná hrana sa nezúčastňuje na vytváraní profilu) môžeme odvodiť rovnicu (obr. 9.4a).



Obr. 9.4. Vytváranie profilu obrobenej plochy: a – polomerom hrotu, b – hlavnou a vedľajšou reznou hranou, c – polomerom s vedľajšou reznou hranou

Pretože platí pre výšku nerovností R_Z :

$$R_Z \cong R_{max}$$

môžeme pre R_Z písať:

$$R_Z = \frac{f^2}{8r_e} \quad [\text{mm}] \quad \text{resp.} \quad R_Z = 125 \frac{f^2}{r_e} \quad [\mu\text{m}]$$

kde f je posuv,

r_e - polomer kruhového oblúka.

Ak profil obrobeného povrchu je vytvorený len hlavnou a vedľajšou reznou hranou (t. j. polomer hrotu je nulový – obr. 9.4b), potom

$$R_Z = f \frac{\text{tg } \kappa_r \cdot \text{tg } \kappa_r}{\text{tg } \kappa_r + \text{tg } \kappa_r} \quad [\text{mm}] \quad R_Z = (3,9 \div 5) R_a^{0,97}$$

kde κ_r - je uhol nastavenia hlavnej reznej hrany

κ'_r - je uhol nastavenia vedľajšej reznej hrany.

Tieto rovnice vyjadrujú vplyv geometrie nástroja a posuvu v profilovej rovine. Používame ich na odhad drsnosti.

V literatúre nájdeme rovnice pre výpočet R_z aj pre prípady, ak profil obrobeného povrchu je vytvorený úsečkou a kruhovým oblúkom (obr. 9.4c). Za predpokladu, že prechod medzi hlavnou a vedľajšou reznou hranou je parabolický oblúk, boli odvodené rovnice aj pre výpočet aritmetickej drsnosti povrchu R_a .

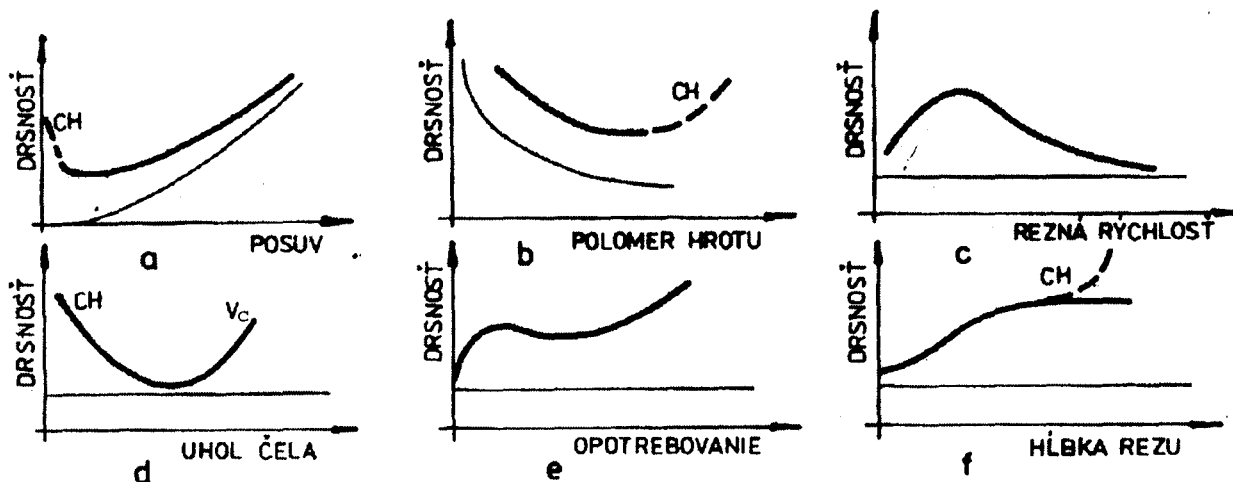
9.4. VÝSLEDKY EXPERIMENTÁLNEHO VÝSKUMU

Uvedieme rozdiely medzi skutočným a teoretickým priebehom drsnosti a ich príčiny.

Vplyv posuvu. Skutočná drsnosť je v oblasti malých posuvov podstatne väčšia ako teoretická a na rozdiel od nej (obr. 9.5a) pri zväčšovaní posuvu do určitej hodnoty sa nemení. Príčiny sú v drsnosti skutočnej reznej hrany, plastických deformáciách reznej plochy a v chvení. V oblasti celkom malých posuvov, ak vzniká chvenie, drsnosť môže byť väčšia ako pri posuvoch väčších.

Vplyv polomeru hrotu (obr. 9.5b). So zväčšovaním polomeru hrotu v súlade s teoretickou drsnosťou klesá aj skutočná drsnosť, avšak len do určitej limitnej hodnoty polomeru, kým nevzniká chvenie. Pri väčších polomeroch vzniká chvenie a skutočná drsnosť sa zväčšuje.

Vplyv reznej rýchlosti (obr. 9.5c). Rezná rýchlosť neovplyvňuje teoretickú drsnosť. Skutočná drsnosť vykazuje extrém v oblasti vzniku nárazku. Chvenie môže vyvolať ďalšie extrémny.



Obr. 9.5. Závislosť drsnosti povrchu od a – posuvu, b – polomeru hrotu, c – reznej rýchlosti, d – uhla čela, e – opotrebovania, f – hĺbky rezu. Teoretická drsnosť je nakreslená tenkou čiarou. CH – chvenie, V – vyštrbenie reznej hrany

Vplyv uhlu čela. Závislosť drsnosti povrchu a uhla čela (obr. 9.5d) vykazuje minimum. Pri malých uhloch čela drsnosť povrchu sa zhoršuje následkom väčších deformácií obrábaného povrchu a vzniku samobudeného kmitania. Pri veľkých uhloch čela pevnosť rezného klina je

malá, rezný klin sa ľahko vyštrbuje. Režeme teda reznou hranou, ktorá je podstatne drsnejšia ako rezná hrana s optimálnym uhlom čela.

Vplyv opotrebovania (obr. 9.5e). Opotrebovaním rezného klina sa mení drsnosť reznej hrany, polomer hrotu a šírka plôšky opotrebovania na chrbte nástroja. Závislosť drsnosti povrchu od opotrebovania odráža všetky tieto vplyvy. Zo začiatku sa drsnosť povrchu rýchlo zhoršuje.

Vplyv hĺbky rezu (obr. 9.5f). Pri malých hĺbkach rezu sa obrobený povrch vytvára v povrchovej vrstve, ktorá bola predchádzajúcim obrábaním spevnená. Prejavuje sa to menšou drsnosťou povrchu ako pri väčších hĺbkach rezu, keď sa obrobený povrch vytvára v nespevnenom materiáli. V tejto oblasti zmena hĺbky rezu, ak nevyvoláva chvenie, nevlýva na drsnosť povrchu. Väčšia hĺbka rezania podporuje vznik chvenia (obr. 9.5f).

9.5. ŠTATISTICKÉ MODELY DRSNOSTI POVRCHU

Vyjadriť vplyv reznej rýchlosti, posuvu, polomeru hrotu atď. na drsnosť povrchu exponenciálnou rovnicou vyžaduje zaviesť intervaly, v ktorých drsnosť monotónne stúpa alebo klesá.

Potom pre tieto intervaly zmeny parametrov môžeme vyjadriť ich vplyv na drsnosť povrchu rovnicou typu

$$Ra = C_{Ra} \cdot f^{y_{Ra}} \cdot v_c^{z_{Ra}} \cdot r_e^{q_{Ra}}$$

kde C_{Ra} , y_{Ra} , z_{Ra} , q_{Ra} sú empiricky stanovené konštanty.

Vplyv ostatných parametrov rezania, ako napr. opotrebovanie uhla čela a pod., zvyčajne vyjadríme pomocou opravných súčiniteľov. Opravnými súčiniteľmi vyjadríme aj vplyv zmeny vlastností obrábaného a rezného materiálu, pochopiteľne iba v určitom intervale týchto zmien. Pri väčších zmenách vlastností dostatočná presnosť vypočítaných výsledkov vyžaduje uvažovať nielen so zmenou konštanty C_{Ra} , ale aj so zmenou exponentov.

10. TVAROVANIE TRIESKY

Tvar triesky má značný význam z hľadiska obsluhy stroja a trieskového hospodárstva. Stuhová plynulá trieska sa namotá na obrobok, na časti nástroja alebo stroja a treba ju odstrániť ručne. Vznikajú prestoje, rastie nebezpečenstvo úrazu, poškodenia obrobeného povrchu a reznej hrany nástroja. Dlhé triesky nie sú vhodné pre trieskové hospodárstvo, sťažujú alebo znemožňujú automatickú dopravu triesok a vyžadujú veľké priestory na skladovanie. Efektívna práca vyžaduje zabezpečiť vhodný tvar triesok. Triesky sú odpad, treba ich odstrániť z pracovného priestoru. Upínacie plochy pre výmenu obrobkov alebo nástrojov musia byť čisté, bez zvyškov triesok.

10.1. OBJEMOVÝ SÚČINITEĽ A TVARY TRIESOK

Tvary triesok z hľadiska ich vzhľadu môžeme zhodnotiť súborom parametrov ako sú napr. polomer zakrivenia triesky, dĺžka triesky, rozstup závitov triesky atď. Jednoduchý a ľahko merateľný ukazovateľ tvaru triesok je tzv. objemový súčiniteľ triesok. Objemový súčiniteľ triesok je pomer objemu zabratého trieskami k objemu kovu.

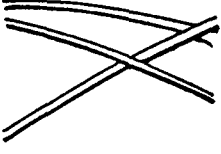
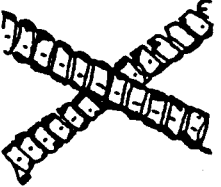

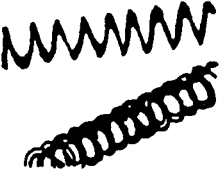
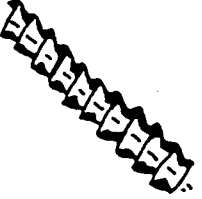



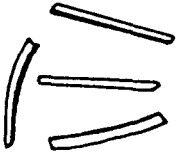
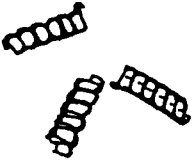

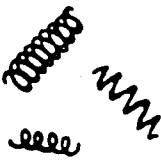

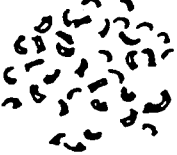
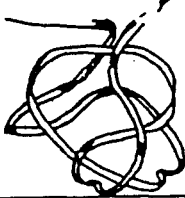

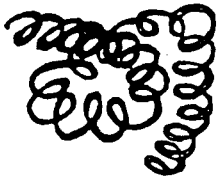
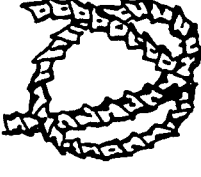
Typické tvary triesok a im zodpovedajúce intervaly objemového súčiniteľa sú v tab. 10.1.; obr. 10.1. Z hodnôt objemového súčiniteľa vyplýva, že triesky zaberajú až niekoľko stokrát väčší objem ako bol objem kovu, z ktorého vznikli.

Objemový súčiniteľ triesok

Tabuľka 10.1

Tvar triesok	Objemový súčiniteľ
Delené	3 až 5
Lámané	6 až 9
Špirálové	10 až 15
Krátke lámané	16 až 20
Krátke skrutkové	40 až 50
Dlhé skrutkové	80 až 100
Motané	200 až 300
Stuhové rovné	300 až 400

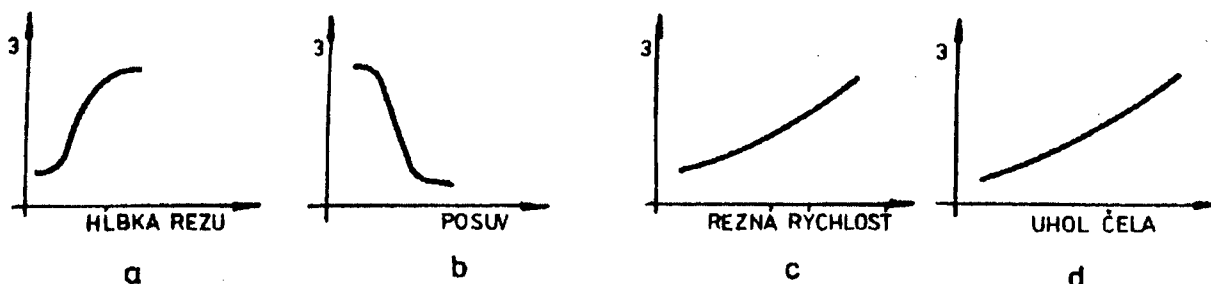
Najväčší vplyv na tvar triesok má obrábaný materiál. Húževnaté materiály dávajú súvislé triesky, krehké - drobné. Ďalším faktorom je tvar čela. Rovinné (ploché) čelo nekladie prekážky a netvaruje (neláme) triesku.

Tvary triesok							
1 Pásová trieska	2 Rámkové trieska	3 Špirálová trieska	4 Skrutkovicová trieska	5 Kuželovo skrutkovicová trieska	6 Oblíkové trieska	7 Článkovaná trieska	8 Ihllová trieska
1.1 Dlhé	2.1 Dlhé	3.1 Plochá	4.1 Dlhé	5.1 Dlhé	6.1 Spojené		
							
1.2 Krátke	2.2 Krátke	3.2 Kubeňové	4.2 Krátke	5.2 Krátke	6.2 Drobné		
							
1.3 Stočené	2.3 Stočené		4.3 Stočené	5.3 Stočené			
							

Obr. 10.1. Tvary triesok

10.2. VÝSLEDKY EXPERIMENTÁLNEHO VÝSKUMU

Vplyv vybraných parametrov rezania na objemový súčiniteľ triesok pri obrábaní húževnatých materiálov (oceli) pre ploché čelo je na obr. 10.2. Pri obrábaní krehkých materiálov (liatiny) vznikajú zvyčajne drobné triesky.

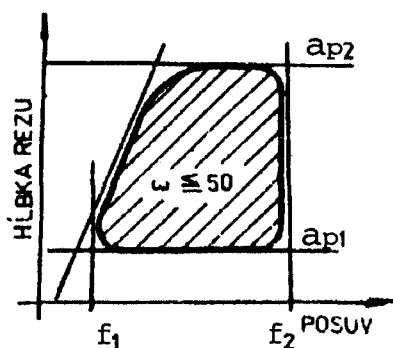


Obr. 10.2. Závislosť objemového súčiniteľa triesok ω od a – hĺbky rezu, b – posuvu, c – reznej rýchlosti, d – uhla čela

Vplyv posuvu reznej rýchlosti a uhla čela na objemový súčiniteľ čiastočne môžeme vysvetliť deformáciou materiálu pri rezaní. Čím väčšia je deformácia (t. j. väčšie je stlačenie triesky), tým krehkejší je materiál triesky a objemový súčiniteľ je menší. Avšak spolupôsobí aj smer odchodu triesok, teplotné pole triesky a opotrebovania čela. Ak opotrebovaním vzniká na čele žliabok, objemový súčiniteľ sa zmenší. Žliabok opotrebovania pôsobí ako tvarovač.

10.3. ŠTATISTICKÝ MODEL OBLASTI VHODNE TVAROVANEJ TRIESKY

Za vhodné tvarovanie môžeme považovať triesky s objemovým súčiniteľom do 40 až 50. Na základe experimentálnych výsledkov môžeme v n-rozmernom priestore rezných podmienok stanoviť hranice tejto oblasti a nerovnicami zapísať kombinácie parametrov rezania, pri ktorých tvarovanie triesky ešte považujeme za vyhovujúce.



Obr. 10.3. Vymedzenie oblasti vhodne tvarovanej triesky

Oblasť vhodného tvarovania na obr. 10.3. môžeme napr. definovať nerovnicami

$$a_p \leq a_{p2}$$

$$a_p \leq k \cdot f + b$$

$$f \geq f_1$$

$$a_p \geq a_{p1}$$

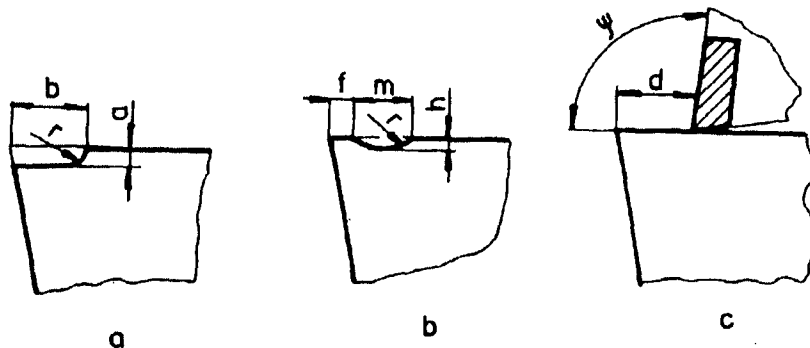
$$f \leq f_2$$

kde k , b , a_{p1} , a_{p2} , f_1 , f_2 sú experimentálne získané konštanty.

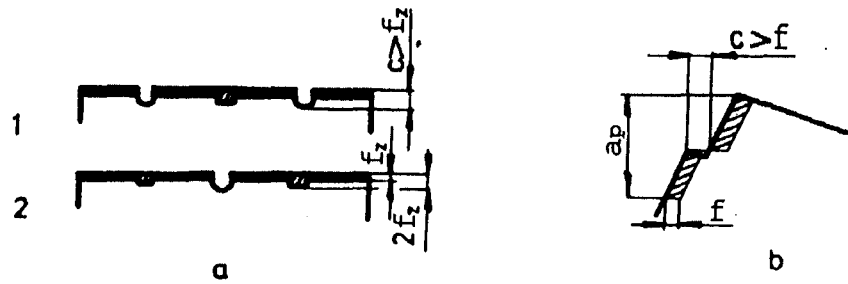
10.4. TVAROVAČE A DELIČE TRIESOK

Vhodný tvar (objemový súčiniteľ) triesok môžeme zabezpečiť niekoľkými spôsobmi Sú to tieto:

1. Voľba geometrie nástroja a rezných podmienok tak, aby objemový súčiniteľ mal prijateľné hodnoty.
2. Voliť takú kinematiku rezania, ktorá dáva krátke triesky (napr. frézovanie) alebo v krátkych časových intervaloch prerušiť posuv. Do tejto skupiny patrí aj rozkmitanie nástroja (sústružníckeho noža) so zvláštnym zariadením. Kmitaním noža sa periodicky mení hrúbka odrezávanej vrstvy a v okamihoch, keď hrúbka je extrémna, trieska sa láme.
3. Zvláštnou úpravou čela rezného klina. Hovoríme o tvarovačoch a deličoch triesky. Tvarovače (stupienkové alebo žliabkové – obr. 10.4a, b) vybrúsime do čelnej plochy rezného klina alebo ich vylisujeme už pri výrobe reznej platničky. Kombinované tvarovače sú tvary získané pri lisovaní platničky. Majú tvary, ktoré zabezpečia tvarovanie v širokom pásme posuvu, hĺbky rezu a reznej rýchlosti. Tvarovače typu obr. 10.4b vlisované do platničiek upravujú uhol čela. Príložné tvarovače (obr. 10.4c) pripevňujeme k nožu. Aby tvarovač spoľahlivo pracoval, treba jeho geometrické parametre voliť vzhľadom na hrúbku odrezávanej vrstvy.



Obr. 10.4. Tvarovače triesky
a – stupienkový, b – žliabkový, c – príložný



Obr. 10.5. Deliče triesok

a – žliabok na 1 – nepárnom, 2 – párnom zube, b – odstupňovaná rezná hrana

Deliče triesok (obr. 10.5.) využívajú experimentálnu skutočnosť, že pri malých hĺbkach rezu vzniká vhodne tvarovaná trieska. Dĺžku reznej hrany v zábere rozdelíme žliabkom (obr. 10.5a) alebo stupňom (obr. 10.5b). Rozmer c má byť väčší ako posuv.

11. OBROBITEĽNOSŤ KOVOVÝCH MATERIÁLOV A REZNOSŤ NÁSTROJOVÝCH REZNÝCH MATERIÁLOV

Efektívnosť operácií obrábania významným podielom závisí od obrobitel'nosti konštrukčných materiálov a reznosti nástrojových materiálov, t. j. od intenzity spolupôsobenia tejto dvojice faktorov v procese rezania. Tento je charakterizovaný spolupôsobením chemických, fyzikálnych, mechanických a technologických vlastností obrábaného materiálu, vzťahujúcich sa k pojmu „obrobitel'nosť materiálu“ a tých istých vlastností, avšak rozdielnej kvality nástrojového materiálu, vzťahujúcich sa k pojmu „reznosť nástrojového materiálu“.

11.1. VYMEDZENIE POJMU „OBROBITEĽNOSŤ“

So zreteľom na značný rozsah hodnotenej problematiky jej výklad obmedzíme na hlavnú skupinu konštrukčných materiálov: ocelí a zliatin, poznatky však možno v značnej miere zovšeobecniť aj na široký sortiment iných kovových materiálov.

Termínom „obrobitel'nosť“ označujeme vlastnosti okamžitého termodynamického stavu plasticky deformovaného materiálu v oblasti koreňa triesky, obr. 11.1. (detail A), v okamihu transformácie odrezávanej vrstvy materiálu na triesku a vznikajúcich nových povrchov – reznej a obrobenej plochy, v jej prípade tiež vytvárajúca sa integrita povrchu (komplexná akosť povrchu a povrchovej vrstvy).

Uvažovaný termodynamický stav plasticky deformovaného materiálu sa vytvára v dôsledku spolupôsobenia takých chemických, fyzikálnych, mechanických a technologických vlastností, ktoré spolupôsobia s rovnakými vlastnosťami nástroja v procese rezania. Intenzitu tohto spolupôsobenia a tým aj kvalitu uvažovaného stavu, určujú rezné podmienky, z nich najmä rezná rýchlosť ako aj rezné prostredie, pôsobiace ako termodynamické faktory.

Prejavom kvality termodynamického stavu materiálu vo vzťahu ku komplexnej obrobitel'nosti ocelí a zliatin (obr. 11.1.) sú najmä:

a) zmeny špecifického rezného odporu, charakterizované narastaním či poklesom deformačného spevňovania materiálu v procese rezania. Tento jav je závislý najmä od úrovne plasticity a žiarupevnosti obrábaného materiálu;

b) tvorenie a tvarovanie triesky;

c) drsnosť povrchu;

d) trvanlivostné závislosti, vzťahnuté na zvolené kritérium opotrebenia (VB, KT);

e) výkony rezania (obrábania): Q_v [$\text{mm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$], Q_A [$\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$], Q_P [$\text{mm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{W}^{-1}$],

f) zvyškové napätia v dynamicky namáhaných súčiastkach v ich najexponovanejšom mieste – obrobenej ploche (napr. po brúsení zakalených oceľových súčiastkach).

Existencia termodynamického stavu plasticky deformovaného materiálu v uvažovanej oblasti úzko súvisí a pôsobí vo vzájomnej podmienenosti s pracovnými vlastnosťami nástroja. Tieto sú významne závislé od reznosti jeho nástrojového materiálu.

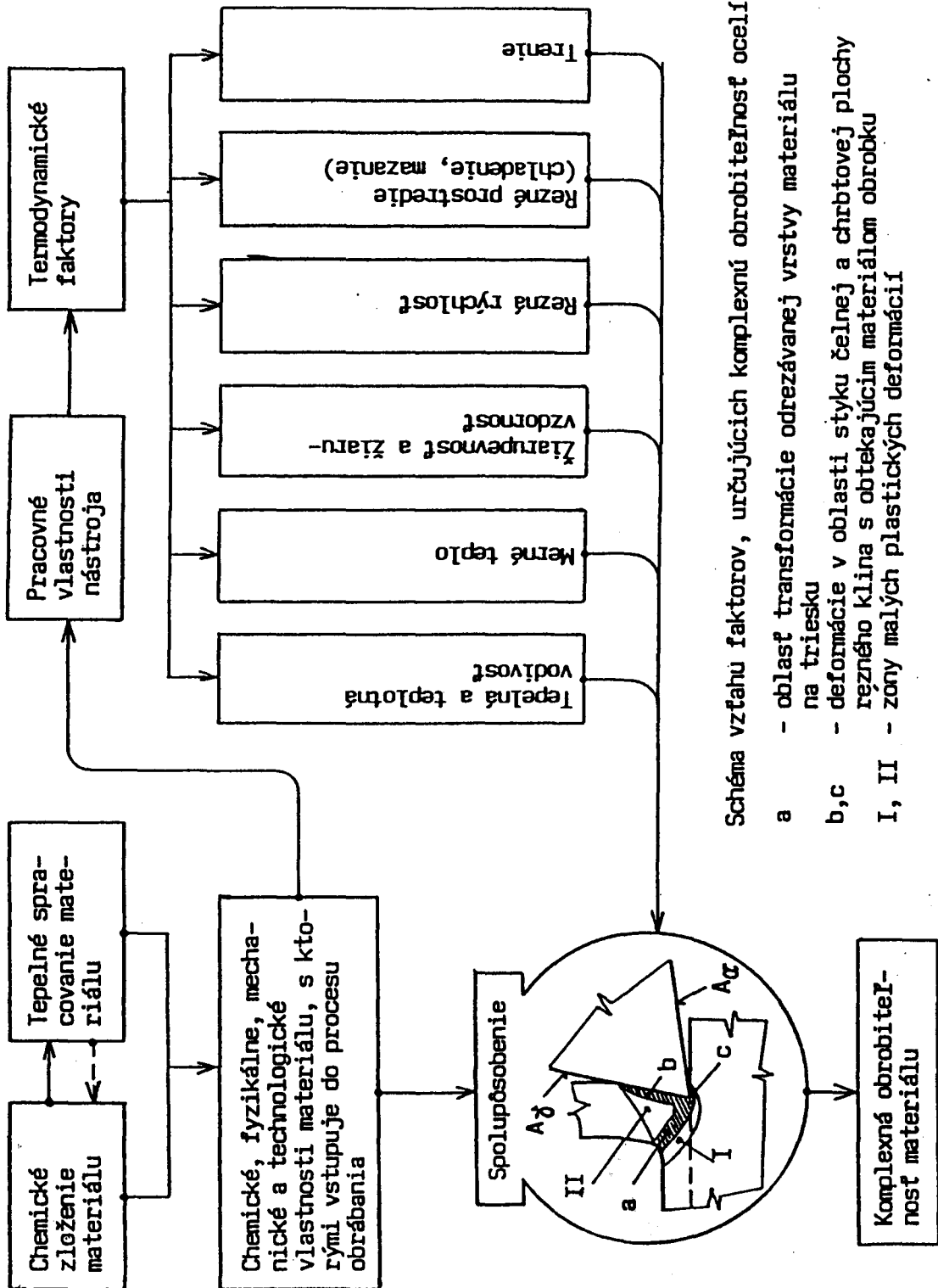


Schéma vzťahu faktorov, určujúcich komplexnú obrábateľnosť ocelí

- a - oblasť transformácie odrezávanej vrstvy materiálu na triesku
- b,c - deformácie v oblasti styku čelnej a chrbtovej plochy rezného klína s obtekajúcim materiálom obrabku
- I, II - zóny malých plastických deformácií

Obr. 11.1. Faktory ovplyvňujúce obrábateľnosť

Obrobiteľnosť ako sme ju charakterizovali, je tzv. komplexná obrobiteľnosť – súhrn vlastností, ktoré nemožno vyjadriť jedným technickým parametrom či kritériom, ale viacerými dohodnutými kritériami. Každé z týchto kritérií vymedzuje pojem obrobiteľnosti na celkom určité špecifické vlastnosti obrábaného materiálu, akými sa prejavuje v procese rezania vzhľadom na technologické a ekonomické požiadavky výroby. Sú to účelovo – vzťahné kritériá a obrobiteľnosť ako technologická vlastnosť materiálu, na ktorú sa niektoré z nich vzťahuje, je účelovovzťahná obrobiteľnosť.

11.1.1. Účelovovzťahné kritériá obrobiteľnosti

Pre potreby praxe i výskumu najvýznamnejšie kritériá obrobiteľnosti sú:

1. Rezná rýchlosť (v_c [$m \cdot min^{-1}$]) pri dohodnutej trvanlivosti (T [min]) a zvolenom kritériu opotrebovania VB_B [mm], resp. KT [mm].

Obrobiteľnosť podľa reznej rýchlosti (kinetická obrobiteľnosť) je účelovovzťahnou obrobiteľnosťou. Je tým lepšia, čím vyššia je rezná rýchlosť pri ináč rovnakých podmienkach obrábania.

2. Špecifický odpor (k_c [MPa]). Pri obrábaní materiálov rôznych fyzikálno-mechanických vlastností sa mení rezný tlak na nástroj a výkon potrebný na rezanie. Z týchto dôvodov možno použiť špecifické rezné odpory ako účelovovzťahné kritérium obrobiteľnosti materiálov. V tomto prípade hovoríme o obrobiteľnosti podľa merných rezných odporov (dynamická obrobiteľnosť). Toto kritérium obrobiteľnosti neplatí všeobecne. Platí len pre chemicky príbuzné materiály s rovnakým tepelným spracovaním.

3. Drsnosť obrobeného povrchu (mikrotopografia). Obrobiteľnosť podľa tohto kritéria hodnotí materiál z hľadiska schopnosti vytvárať obrábaním akostné povrchy v širokom rozsahu rezných rýchlostí.

4. Tvorenie a tvarovanie triesky. Toto kritérium obrobiteľnosti materiálu ho hodnotí podľa jeho schopnosti vytvárať pri danom spôsobe a štandardných podmienkach obrábania vyžadovaný tvar triesky. Obrobiteľnosť tvorenia a tvarovania triesky je účelovovzťahná obrobiteľnosť. Má veľký význam z hľadiska potrieb automatizácie operácií obrábania.

11.1.2. Vplyv chemického zloženia materiálu na jeho obrobiteľnosť

Na obrobiteľnosť ocelí a zliatin má rozhodujúci vplyv chemické zloženie. Určuje ich chemické a fyzikálne vlastnosti a je rozhodujúcim faktorom pri procesoch tepelného spracovania k dosiahnutiu vyžadovaných mechanických a technologických vlastností. Vplyv chemického zloženia a ďalších faktorov od neho závislých je na obr. 11.1.

1. Vplyv jednotlivých prvkov na obrobiteľnosť ocelí pri ich obvyklom obsahu:

Vplyv jednotlivých prvkov na obrobiteľnosť ocelí sa prejavuje najmä v tom, ako pôsobia na ich tepelné spracovanie a zodpovedajúcu mikroštruktúru. Možno ich zaradiť do skupín:

a) prvky tvoriace tuhý roztok s feritom (Cr, Ni). Zvyšujú pevnosť ocelí bez zníženia ich ťažnosti, čo má za následok zhoršenie ich obrobiteľnosti. Úroveň zhoršenia závisí od ich obsahu, môže byť mierny až výrazný;

b) prvky tvoriace tuhý roztok s feritom, zvyšujúce pevnosť ocelí pri súčasnom znížení ich ťažnosti. Ich vplyv na obrobiteľnosť býva spravidla zanedbateľný až mierne zhoršujúci;

c) karbidotvorné prvky (W, Mo, V, Cr). Zvyšujú pevnosť a tvrdosť ocelí s dôsledkom zhoršenia ich obrobiteľnosti. Úroveň zhoršenia závisí od ich obsahu, môže byť stredný až výrazný;

d) prvky tvoriace nekovové tvrdé nerozpustné zlúčeniny s vysokou abrazívnou schopnosťou (oxid kremičitý SiO_2 , oxid hlinitý Al_2O_3), významne zhoršujú obrábiteľnosť;

e) prvky(S, P) tvoriace nekovové krehké mäkké nerozpustné zlúčeniny (sírnik mangánu MnS , fosfid). Zlepšujú obrábiteľnosť;

f) prvky podporujúce vznik alebo tvoriace austenitickú štruktúru ocelí (Mn, Ni, Cr-Ni, Cr-Mn). Výrazne zhoršujú ich obrábiteľnosť.

2. Vplyv mikroštruktúry ocelí na ich obrábiteľnosť.

Chemické zloženie ocelí a ich tepelné spracovanie, ovplyvnené najmä obsahom uhlíka, určujú mikroštruktúru a pomer štruktúrnych zložiek, teda aj fyzikálno – mechanické i technologické vlastnosti. Vplyv mikroštruktúry, resp. jej štruktúrálnej zložiek, možno charakterizovať takto:

Ferit – je mäkký, tvárny a húževnatý. Jeho brúsne účinky sú nepatrné (tvrdosť asi 80 HB). Nástroj opotrebuje molekulárno-adhézny spôsobom (eróziou). Jeho vysoký podiel v štruktúre materiálu je príčinou, že pri malých rezných rýchlostiach je obrobeneý povrch drsný – potrhávaný. Príčina je v tom, že sa nalepuje na čelo nástroja, zvyšuje koeficient trenia a teplotu rezania.

Perlit – eutektoidná zmes feritu a cementitu. Z hľadiska obrábiteľnosti je dôležité, v akej forme sa cementit vyskytuje. Globulárny cementit získaný žíhaním lamelárneho perlitu (žíhanie na mätko), má malý brúsny účinok. Cementit v tvare lamiel (v lamelárnom perlite) má značný abrazívny účinok (tvrdosť cementitu dosahuje až 1000 HV).

Sorbit – je to mikroštruktúra tvoriaca základ zošľachtených ocelí. Vzniká popúšťaním martenzitu. Je to zmes feritu a cementitu v jemnej zrnitej forme. Čím je sorbit jemnejší, tým má oceľ vyššiu pevnosť a tvrdosť a schopnosť vytvárať hladšie povrchy.

Martenzit – tvorí základnú štruktúru zakalených ocelí. Má vysokú tvrdosť a pôsobí abrazívne na nástroj. Obrábiteľnosť materiálu s touto štruktúrou, ak ju hodnotíme z hľadiska reznej rýchlosti alebo špecifických rezných odporov, je ťažká.

Bainit – je to štruktúra bainiticky kalených ocelí. Týmto kalením sa transformuje austenit na bainit. Je to heterogénna zmes feritu a cementitu ihlicovitého tvaru. Čím je jemnejšia, tým je tvrdšia a pevnejšia. V porovnaní s martenzitom má nižšiu pevnosť a tvrdosť, je však výrazne húževnatejšia. Vysoká tvrdosť, pevnosť a húževnatosť a abrazívny účinok robí túto štruktúru ťažkoobrábiteľnú, efektívne len spekanými karbidmi, reznou keramikou či kubickým nitridom bóru.

Austenit – je mäkký (asi 150 HB), plastický a húževnatý. Materiály s austenitickou štruktúrou majú malú tepelnú vodivosť, sklon k výraznému deformačnému spevneniu (až 100 %) a značné adhézne schopnosti. Tieto faktory sú príčinou ich ťažkej obrábiteľnosti.

Pri oceliach podeutektoidných (s obsahom uhlíka nižšie 0,8 %) je mikroštruktúra tvorená feritom a perlitom. Ferit je síce mäkký, ale sa „navára“ na rezný klin nástroja. Je to nepriaznivý jav, lebo pri periodickom strhávaní tohto nárastku z nástroja odnáša so sebou i mikroskopické častice reznej hrany a spôsobuje tak rýchlejšie opotrebovanie nástroja, najmä ak rezný materiál je krehký.

Pri nadeutektoidných oceliach prevláda v štruktúre perlit a obrábiteľnosť potom závisí od tvaru cementitu. Globulárny perlit s rovnomerne rozloženými zrnami cementitu je lepšie obrábiteľný než perlit lamelárny s cementitom v tvare lamiel. Zvyšujúci sa obsah cementitu nadeutektoidných ocelí zväčšuje ich mechanickobrúsny účinok na aktívne plochy rezného klina nástroja, urýchľuje proces jeho opotrebovania a znižuje trvanlivosť.

11.2. VYMEDZENIE POJMU „REZNOSŤ“ NÁSTROJOVÝCH MATERIÁLOV

Súhrn vlastností nástrojových rezných materiálov, vplývajúcich na fyzikálne a technologické charakteristiky procesov obrábania (rezania) a ich ekonomickú efektívnosť, označujeme termínom „reznosť“. Je to pojem relatívny, keďže jej úroveň nevieme vyjadriť priamo, ani vyhodnotiť v technických jednotkách, ale len prostredníctvom obrobiteľnosti porovnávacích (etalónových) materiálov. Vo vzťahu k obrobiteľnosti materiálov je pojem reznosť zašifrovaný v pojme „pracovné vlastnosti nástroja“ (obr. 11.1.). To ju dovoľuje charakterizovať ako súhrn chemických, fyzikálnych, mechanických a technologických vlastností, ktorými sa nástroj prejavuje v procese rezania proti rôznym mechanizmom opotrebovania jeho reznej časti v priebehu jeho spolupôsobenia s materiálom obrobku. Intenzitu tohto spolupôsobenia určuje úroveň rezných podmienok a kvalita rezného prostredia.

Uvedenú charakteristiku reznosti nástrojových materiálov a faktorov, ktoré ju určujú, resp. od ktorých je závislá, znázorňuje schéma na obr. 11.2.

Vychádzajúc z analýzy faktorov a ich vzťahu k reznosti nástrojových materiálov, uvedeníh v predmetnej schéme, treba konštatovať:

1. Reznosť nástrojových materiálov je jedným z najvýznamnejších faktorov, určujúcich a hodnotiacich pracovné vlastnosti nástrojov. Jej dôsledné využitie v systéme „nástroj“ predpokladá najmä:

- a) správnu voľbu rezných materiálov pre uvažované operácie obrábania a ich špecifické zvláštnosti,
- b) zohľadniť charakter operácií a podmienky ich realizácie (hrubovacie či dokončovacie obrábanie, prerušovaný rez, tvrdá kôra odliatkov, pripečený piesok na povrchu odliatkov ...),
- c) zabezpečiť technickú úroveň obnovy rezných vlastností nástrojov ich ostrením,
- d) uplatňovať konštrukčno-technologické charakteristiky obrábacích strojov, resp. automatizovaných obrábacích sústav.

Uvedeným bodom a) až d) treba podriadiť voľbu rezných podmienok a rezného prostredia (obrábanie za „sucha“ či s využitím rezných kvapalín).

2. Prostredníctvom reznosti ako špecifickej vlastnosti jednotlivých druhov nástrojových materiálov a presne definovaných podmienok hodnotiacich skúšok a ich vyhodnotení určuje sa najmä:

- a) relatívna obrobiteľnosť kovových materiálov;
- b) triedia sa rezné materiály podľa vhodnosti použitia pre rôzny charakter operácií obrábania, ako napr.: triedenie spekaných karbidov (SK) podľa odporúčania ISO, hodnotenie rýchlo-rezných ocelí (RO), reznej keramiky (RK) na báze oxidu hliníka a silíciumnitridu ako aj supertvrdých materiálov (diamant a polykryštalický kubický nitrid bóru);
- c) voľba geometrických parametrov reznej časti nástrojov a ich konštrukcia ako celku, zohľadňujúc pritom druh operácie obrábania, obrobiteľnosť materiálu polovýrobku, jeho tvar, rozmery, stav povrchu (napr. kôra, pripečený piesok a pod.) ako aj kvalita rezného prostredia;
- d) optimalizácia rezných podmienok a voľba rezného prostredia so zreteľom na využitie výkonu moderných obrábacích sústav.

Efektívne využívanie rezných materiálov vyžaduje skúmať a poznávať ich aktívne a pasívne technologické vlastnosti.

Reznosť nástrojových materiálov vyjadrujeme koeficientom reznosti

$$k = \frac{v_{e15}}{v_{ce15}}$$

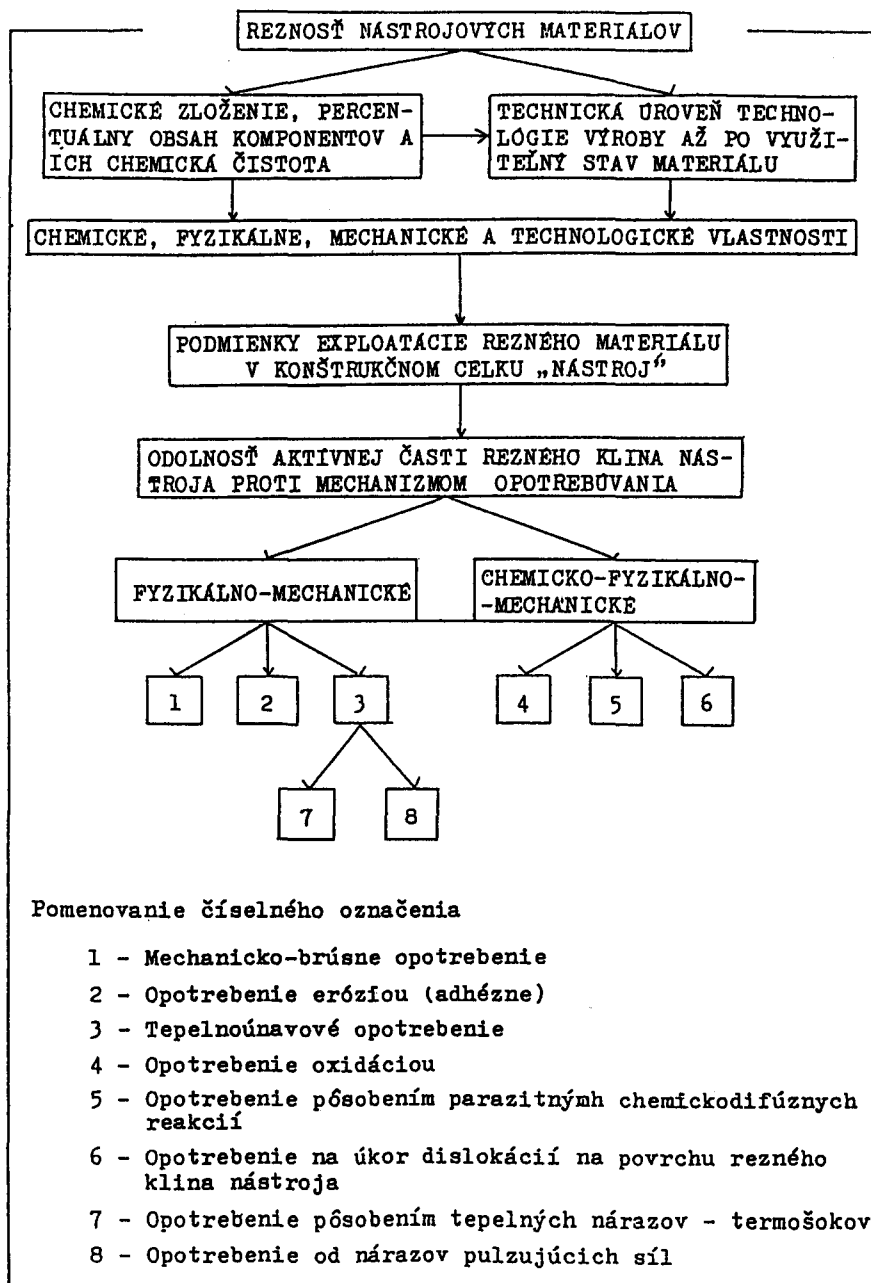
kde v_{c15} je rezná rýchlosť dosiahnutá skúšaným (hodnoteným) rezným materiálom, pri trvanlivosti rezného klina $T = 15$ min a $VB = 0,3$ mm,

v_{ce15} – rezná rýchlosť dosiahnutá etalónovým rezným materiálom, pri trvanlivosti rezného klina $T = 15$ min a $VB = 0,3$ mm, dosiahnutá pri rovnakých podmienkach skúšok reznosti.

Hodnoty v_{c15} a v_{ce15} určíme z diagramov $T - v_c$ závislosti pre príslušné rezné materiály.

Takto určená reznosť nástrojových materiálov je označovaná ako reznosť relatívna.

Triedenie rezných materiálov podľa hodnoty koeficientov ich reznosti sa dosiaľ neuskutočnilo, aj keď napr. triedenie spekaných karbidov podľa odporúčaní ISO k tomu významne prispieva.



Obr. 11.2. Faktory ovplyvňujúce reznosť nástrojových materiálov

11.3. NÁSTROJOVÉ REZNÉ MATERIÁLY

Rozdielne podmienky realizácie procesov obrábania vyvolávajú potrebu širokého sortimentu rezných materiálov rôznych chemicko-fyzikálnych, mechanických a technologických vlastností. Túto potrebu v súčasnosti pokrývajú rezné materiály rôznych druhov spekaných karbidov, rýchlorezných ocelí, keramických rezných materiálov, stelitov a supertvrdých rezných materiálov.

Prednostné použitie určitého rezného materiálu z vymenovaných skupín je vždy závislé od charakteru operácie obrábania, podmienok jej realizácie a technologicko-ekonomickej účinnosti.

1. Spekané karbidy (SK)

Sú to prirodzene tvrdé rezné materiály, vyrobené spekaním karbidov ťažkotaviteľných kovov: volfrámkarbidov (WC), titánkarbidov (TiC), tantalkarbidov (TaC), nióbkarbidov (NbC), molybdénkarbidov (MoC), a kobaltu (Co) ako spojovacej fázy.

Stručné charakteristiky predmetných komponentov SK podľa (obr. 11.2. a obr. 11.3.) uvádzame:

WC – zabezpečuje odolnosť proti mechanicko-brúsnemu opotrebovaniu (odieraniu) a pevnosť rezného klina,

TiC – zvyšuje odolnosť proti vymieľaniu čela, znižuje však odolnosť proti odieraniu ako aj húževnatosť, pevnosť v ohybe a tomu zodpovedajúcu mechanickú pevnosť rezného klina nástroja,

Ta (Nb) C – v spojení s WC zvyšuje odolnosť proti opotrebovaniu pri vysokých teplotách, avšak menej ako TiC. Zvyšuje húževnatosť, mechanickú pevnosť rezného klina a odolnosť proti tepelným nárazom (termošokom),

Co – nie je karbidotvorný, plní funkciu spojovacej fázy. So vzrastom jeho percentuálneho obsahu zvyšuje sa húževnatosť a pevnosť v ohybe, klesá však tvrdosť. Pri nadmerne veľkom obsahu a veľkých rezných tlakoch a teplotách hrozí nebezpečie porušenia geometrického tvaru rezného klina nástroja jeho plastickou deformáciou.

Vysokú tvrdosť a pevnosť za tepla zabezpečuje skelet z WC + TiC + Ta (Nb) C. Je závislá od percentuálneho obsahu uvedených komponentov a obsahu kobaltu (Co).

Odolnosť proti mechanicko-brúsnemu opotrebovaniu na chrbte rezného klina zabezpečuje najmä WC. Je tým väčšia, čím vyšší je obsah WC a menší TiC + Ta (Nb) C a Co.

Odolnosť proti opotrebovaniu vytváraním vrubových rýh oxidáciou na hlavnej i vedľajšej chrbtovej ploche je tým väčšia, čím väčší je obsah TiC a Ta (Nb) C.

Sklon k adhézii sa znižuje s obsahom TiC.

Pri vysokom tepelnom namáhaní a rezných tlakoch pôsobiacich na rezný klin dochádza k vymieľaniu na čele v dôsledku pôsobenia parazitných difúzných reakcií a degradácie materiálu kontaktnej vrstvičky čelnej plochy (A_γ). Odolnosť proti tomuto prejavu opotrebovania je tým väčšia, čím je vyšší obsah TiC a Ta (Nb) C a menší obsah Co.

Húževnatosť SK je dôležitá z hľadiska odolnosti proti mechanickému poškodzovaniu rezného klina únavovými javmi:

a) únavovému opotrebovaniu, pri ktorom sa na reznom klíne tvorí sieť trhlin v dôsledku pôsobenia pulzujúcich síl. Sprievodným zjavom tvorenia mikrotrhlin je vyštiepovanie častíc SK z rezného klina – rezná hrana je pilovitá, rýchlo sa opotrebová;

b) únavové tepelné opotrebovanie, charakterizované vznikom mikrotrhlin, kolmých na reznú hranu. Toto opotrebovanie je vyvolané cyklickými tepelnými nárazmi (šokmi).

Odolnosť proti týmto únavovým javom, vedúcim k zvýšenej intenzite opotrebovania rezného klina nástroja je tým väčšia, čím väčší je obsah Co a nižší obsah TiC a Ta (Nb) C, t. j. čím väčšia je pevnosť SK v ohybe.

Súčasný druh SK sú podľa odporúčania ISO rozdelené podľa vhodnosti použitia do troch základných skupín:

1. Skupina: P (P01 až P50)

Sú to SK určené na obrábanie materiálov tvoriacich pri obrábaní dlhú triesku, opotrebovávajúce nástroj zväčša chemicko-fyzikálnym spôsobom. Ich predstaviteľom sú ocele. Chemické zloženie tejto skupiny SK je: WC + TiC + Ta (Nb) C + Co. Obsah TiC a Ta (Nb) C sa zväčšuje smerom od P50 k P01, obsah Co tým istým smerom klesá. Za týchto podmienok sa menia chemicko-fyzikálne vlastnosti uvažovaných materiálov: stúpa tvrdosť a odolnosť proti tepelnému namáhaniu, klesá húževnatosť a odolnosť proti tepelným nárazom.

2. Skupina: K (K01 až K30)

Je to skupina SK určená na obrábanie materiálov tvoriacich pri obrábaní krátku triesku, pôsobiaca na nástroj zväčša brúsnym účinkom. Jej predstaviteľom sú liatiny. Chemické zloženie tejto skupiny SK je: WC + Ta (Nb) C + Co. Obsah Co sa zvyšuje smerom od K01 po K30 na úkor obsahu WC. Tým istým smerom sa zväčšuje pevnosť v ohybe, húževnatosť a odolnosť proti tepelným nárazom, klesá tvrdosť, odolnosť proti oteru a tepelnému namáhaniu.

3. Skupina: M (M10 až M30)

Je to tzv. univerzálna skupina SK, vhodná na obrábanie materiálov tvoriacich pri obrábaní dlhú i krátku triesku, opotrebovávajúce nástroj za pôsobenia adhézných síl eróznym spôsobom, sú však dostatočne odolné proti abrazívnemu i chemicko-fyzikálnemu spôsobu opotrebovania, teda pre ocele, oceľoliatiny a liatiny, ako aj väčšinu ťažkoobrobiteľných materiálov. Ich chemické zloženie: je ako v skupine SK P, avšak v rozdielnom percentuálnom obsahu (hm. %) ich komponentov, t. j. WC + Ta (Nb) C + Co. Obsah TiC + Ta (Nb) C sa zväčšuje smerom od druhu M30 k M10, obsah Co tým istým smerom klesá. V dôsledku toho stúpa tvrdosť a odolnosť proti tepelnému namáhaniu, klesá húževnatosť a odolnosť proti tepelným nárazom.

Porovnanie SK z hľadiska ich základných vlastností podľa (obr. 11.2.) je na obr. 11.3.

2. Rýchlorezné ocele (RO)

Sú to vysokolegované ocele. Hlavné prísadové prvky volfrám (W), molybdén (Mo), vanád (V) a chróm (Cr) sú karbidotvorné, kobalt (Co) zvyšuje stálosť proti popusteniu a tvrdosť za tepla. K zvyšovaniu odolnosti proti popusteniu prispievajú taktiež prvky karbidotvorné, postupne v poradí Cr – Mo – W – V.

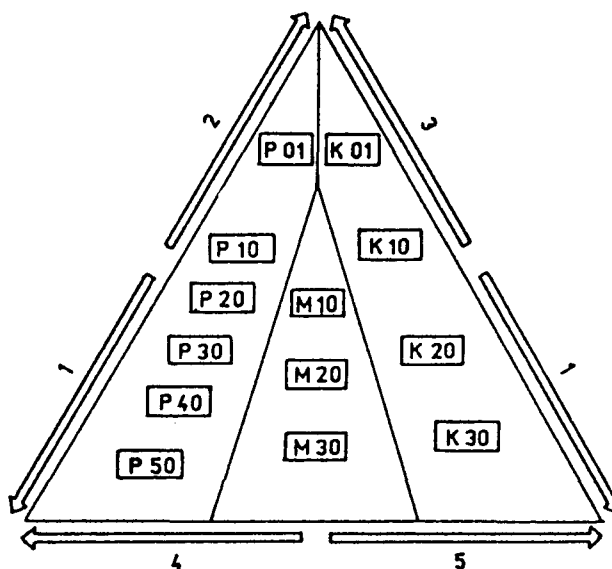
Vhodnou kombináciou uvedených prvkov a ich percentuálnym obsahom, ako aj príslušným tepelným spracovaním – kalením (kaliace teploty moderných druhov RO sú 1190-1270 °C) a viacnásobným popúšťaním (teploty popúšťania: 525-625 °C) získavajú RO vyžadovanú štruktúrnú stabilitu, chemické, fyzikálne, mechanické a technologické vlastnosti, označované termínom „reznosť“.

Rezné teploty RO musia byť pod teplotami popúšťania.

Triedenie súčasného sortimentu RO je v tab. 11.1.

Operatívny prehľad o typoch RO dáva medzinárodne zavedený mnemotechnický systém ich označovania. Je založený na číselnom údaji percentuálneho obsahu legujúcich prvkov v poradí: W – Mo – V – Co, pričom sa predpokladá optimálny obsah chrómu (Cr) 4 hm.%. Tak napr. „univerzálnu“ RO 19830 zaraďuje do triedy typu W – Mo – V – 6 – 5 – 2 (jej skutočné zloženie je: 6,25 % W, 5 % Mo, 1,85 % V pri 4,2 % Cr a 0,85 % C).

SK	TVRDOSŤ HV 30	PEVNOSŤ $\sigma_{0.2}$ MPa
P 01 až P 40	↑ 1700 až 1350	↓ 800 až 1900
M 10 až M 40	↑ 1700 až 1350	↓ 1350 až 2100
K 01 až 40	↑ 1800 až 1300	↓ 1200 až 2200



Obr. 11.3. Porovnanie SK z hľadiska ich základných vlastností
 1 – odolnosť proti mechanickému porušeniu rezného klina, 2 – odolnosť proti fyzikálno-chemickému opotrebeniu rezného klina, 3 – odolnosť proti adhéznemu a abrazívnemu opotrebeniu rezného klina, 4 – odolnosť proti vymieľaniu čela rezného klina, 5 – odolnosť proti opotrebeniu chrbta rezného klina

Šúčasný sortiment rýchlorezných ocelí

Tabuľka 11.1.

Skupina RO podľa výkonnosti	Základný sortiment RO	
	Označenie	Typ
Pre bežné výkony	19 820	W – Mo
	19 824	W
Výkonné	19 830	W – Mo
	19 802	W – V
	19 829	W – Mo
	19 810	W – V
Vysokovýkonne	19 852	W – Mo – Co
	19 856	W – Co
	+ 19 851	W – Mo – Co
	19 857	W – Co
	+ 19 850	W – Mo – Co
	19 861	W – Mo – Co

Druhy RO 19 850 a 19 851 (v tab. 11.1. označené symbolom +) sú tzv. Super Hard RO (SH RO). V súčasnosti predstavujú pravdepodobne kulminačný bod kvality RO. Ich zloženie zodpovedá stupňu legovania 6 – 5 – 2 – 10.

Na reznosť RO významne vplyva ich tepelné spracovanie. Nevhodné podmienky jeho realizácie sú príčinou, že sa nedosahuje jej možný optimálny stav. Tak napr.

- vyššie kaliace teploty alebo veľmi dlhá doba austenitizácie je príčinou nadmerného narastania zŕn s následkom nižšej húževnatosti a možností vyštiepovania reznej hrany rezného klina a tým aj skrátenia jeho trvanlivosti,
- pri nízkych kaliacich teplotách sa zasa nedosiahne dostatočné rozpustenie karbidov v základnej hmote, čo znižuje odolnosť proti popusteniu a tvrdosť za tepla, tým aj reznosť RO.

Podobne zníženú reznosť RO aj nevhodne zvolené popúšťacie teploty a počet cyklov popúšťania.

3. Keramické rezné materiály (rezná keramika – RK)

Túto skupinu nástrojových materiálov v súčasnosti predstavujú:

- a) keramické rezné materiály na báze oxidu hliníka – Al_2O_3 ;
- b) silíciumnitridová keramika – Si_3N_4 .

Sú to prirodzene tvrdé rezné materiály. Ich zavádzanie do výroby si vynútili požiadavky a okolnosti:

a) znížiť spotrebu spekaných karbidov pre obmedzené zdroje deficitných prvkov na ich výrobu, najmä volfrámu, tantalu a kobaltu;

b) prudký vývoj chemicko-fyzikálnych, mechanických a technologických vlastností, určujúcich ich reznosť, dovoľuje značnou mierou nahradiť spekané karbidy, ba aj získať prioritu v značne širokej oblasti procesov obrábania ťažkoobrobiteľných vysokopevných a žiarupevných ocelí a zliatin.

4. Chemické zloženie reznej keramiky a jej základné vlastnosti

Súčasná rezná keramika pozostáva z oxidu hlinitého ako základu a zložiek: oxidu zirkoničitého (ZrO_2) alebo karbidu titánu (TiC). Podľa zložiek a ich percentuálneho obsahu, s ktorými sa základ kombinuje, získava rezná keramika (RK) charakteristické exploatačné vlastnosti. Zirkón v podobe ZrO_2 zvyšuje medzu pevnosti, karbid titánu (TiC) zväčšuje tvrdosť a pevnosť rezného klina, znižuje však chemickú stálosť RK. Niektoré druhy RK obsahujú karbid volfrámu (WC), nitrid titánu (TiN), novšie aj silíciumnitrid a ďalšie zložky, rôznou mierou a spôsobom ovplyvňujúce vlastnosti a podmienky jej využitia.

Posledné vývojové druhy RK vynikajú homogénnou jemnozrnnou štruktúrou a optimálnou hustotou. Tieto vlastnosti spolu s vysokou tvrdosťou a pevnosťou v tlaku za tepla zvyšujú ich odolnosť proti oteru. Vhodné kombinácie uvedených vlastností využívajú výrobcovia RK na výrobu jej špeciálnych druhov, vhodných pre určité oblasti a podmienky použitia, vynikajúcich odolnosťou proti oxidácii a difúznym javom. To im dovoľuje hospodárne pracovať vysokými reznými rýchlosťami, značne prevyšujúcich hodnoty obvyklé pri spekaných karbidoch. Tak napr. pri sústružení sivej liatiny sú to rýchlosti $1000 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ i vyššie, avšak aj pri ďalších ich hodnotách v oblasti $100, 300, 500 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ práca s nimi je vysokohospodárna, umožňujúca plne využiť výkon obrábacieho stroja.

V období posledných rokov bol vyvinutý nový druh reznej keramiky – Si_3N_4 . Základným materiálom pre jej výrobu je kremíkový prášok (Si). Z neho nitridačným procesom vzniká tvrdý silíciumnitrid Si_3N_4 . Rezné platničky sa vyrábajú z jemnozrnného silíciumnitridu lisovaním za tepla alebo spekaním. Konečný presný tvar získavajú brúsením.

Platničky z tohto materiálu sa vyrábajú v tvaroch a rozmeroch podľa platných ISO-noriem. Tento druh reznej keramiky sa vyznačuje troma základnými vlastnosťami, dôležitými pre operácie obrábania:

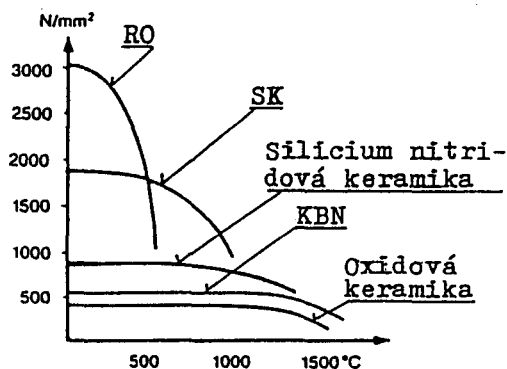
- v porovnaní s oxidovou keramikou má podstatne väčšiu lomovú húževnatosť;
- vyniká vysokou odolnosťou proti cyklickým tepelným nárazom (termošokom), čo dovoľuje použiť pri obrábaní s prerušovaným rezom (napr. pri čelnom frézovaní frézovacími hlavami) rezné kvapaliny s chladiacim účinkom;
- vysokou odolnosťou proti oteru.

Rezná keramika Si_3N_4 je vhodná pre operácie obrábania liatinových (ale aj iných) polotovarov s tvrdou kôrou, resp. tvrdými vtrúseninami v materiále.

Platničky Si_3N_4 s povlakom Al_2O_3 hrúbky 1 μm podstatne zvyšujú odolnosť proti difúznemu opotrebovaniu.

Súhrn uvedených vlastností dovoľuje obrábať liatinové odliatky reznými rýchlosťami nad 1000 $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ a posuvmi až 0,6 mm.

Medza pevnosti v ohybe v závislosti od teploty v porovnaní s inými reznými materiálmi je na obr. 11.4.



Obr. 11.4. Vplyv teploty na medzu pevnosti v ohybe pre jednotlivé materiály

Ďalší vývoj RK je zameraný na zdokonaľovanie chemicko-fyzikálnych, mechanických a technologických vlastností, najmä na báze dostupných materiálov a zdokonaľovania výrobných technológií (čistota surovín, zrnitosť, podmienky syntézy ...) s cieľom dať im univerzálnejší charakter použitia a tak rozšíriť oblasť ich použitia.

5. Cermety

Táto skupina rezných materiálov bola pôvodne označovaná ako „bezvofrámové“ spekané karbidy. Pozostávajú:

- z tvrdej nekovovej (keramickej) fázy, ktorú tvorí titánkarbonitrid TiCN , prípadne aj doplnujúce zložky: karbidy WC , TaC a nitridy TaN . Tieto zložky cermetov sú nositeľmi oteruvzdornosti;

- zo spojovacej fázy, ktorou býva nikel (Ni), molybdén (Mo) alebo kobalt (Co).

Cermety vynikajú vysokou chemickou stálosťou – odolnosťou proti oxidácii a parazitným difúznym reakciám, ktorých prejavom sú oxidačné ryhy a vymieľanie čela. Pevné povrchové oxidické vrstvičky obmedzujú adhéziu, čo vedie k zníženiu tvorby nárastku. Sú vhodné na obrábanie nízkouhlíkových a tiež nehrdzavejúcich ocelí.

Ďalšími významnými charakteristikami cermetov sú najmä:

- vysoká pevnosť rezného klina,
- vysoký odpor proti abrazívnemu oteru,

- sú doplnkom povlakovaných platničiek spekaného karbidu pre dokončovacie operácie obrábania,

- vytvárajú ostrú reznú hranu (priemik plôch $A_\gamma - A_\alpha, A_\gamma - A_\alpha'$).

Oblasť odporúčaného použitia cermentov zodpovedá skupinám SK ISO P01 – P20, resp. K01 – K10 a M10, pre posuvy $f < 0,35$ mm. Nie sú vhodné na obrábanie zošľachtených ocelí a väčšiny neželezných kovov, keďže v dôsledku chemickej afinity spôsobujú tvorbu nárastku. Taktiež nie sú vhodné pre ťažké hrubovacie operácie a abrazívne povrchy polovýrobov.

Platničky cermentov sa dodávajú s predlisovanými tvarovačmi triesok, vhodnými aj pre veľmi malé posuvy.

Efektívne využitie cermentov vyžaduje vysokú tuhosť pracovnej sústavy a bezvibračný režim rezania.

Cenný informatívny údaj o fyzikálno-mechanických vlastnostiach cermentov poskytuje ich porovnanie so skupinou spekaných karbidov ISO P10 a P25, tab. 11.2.

Porovnanie cermentov so skupinou SK ISO P

Tabuľka 11.2.

Rezný materiál	Štandardné SK ISO P		Cermenty	
	P10	P25	P01-P10	P10-P25
Hustota $g \cdot cm^{-3}$	10,6	12,5	6,1	7,1
Tvrdosť HV 30	1550	1450	1700	1600
Pevnosť v ohybe [MPa]	1700	2200	2000	2300
Pevnosť v tlaku [MPa]	4500	4600	5000	4600
Modul pružnosti $kN \cdot mm^{-2}$	520	550	465	445

11.4. POVLAKOVANÉ REZNÉ MATERIÁLY

Povlakovanie vybraných druhov SK a RO oteruvzdornými povlakmi s vysokou odolnosťou proti pôsobeniu mechanizmov opotrebovania významne zvyšuje ich rezné vlastnosti – reznosť.

11.4.1. Účel a metódy povlakovania

K zvyšovaniu reznosti platničiek SK a nástrojov z RO sa na ne nanášajú oteruvzdorné povlaky. Používajú sa dve základné metódy povlakovania:

a) CVD (Chemical Vapor Deposition), pri ktorej sa povlak nanáša chemicky v plynnom prostredí z plynnej fázy pri teplote asi 1000 °C. Je vhodná len pre povlakovanie platničiek SK. Povlak sa skladá z viacerých tenkých vrstvičiek rôznych zlúčenín prvkov: Ti, V, Hf, Ta Zr a Al s prvkami B, N, C a O, tab. 11.3. Hrúbka povlaku býva 5 až 10 μm .

b) PVD (Physical Vapor Deposition). Metóda sa používa na povlakovanie nástrojov z RO i SK. Komponenty povlaku (TiN) sa počas reakcie, ktorá nemá prekročiť 550 °C, nachádzajú v tuhom stave.

Zloženie povlakov	Tvrdosť HV, MPa . 10 ⁻³		Koeficient tepelnej rozťažnosti .10 ⁻⁶ [MPa]
	0 °C	800 °C	
Al ₂ O ₃	21	9	8,4
HfC	29	10	6,7
HfN	26	-	6,9
HfB ₂	24	4,5	5,3
TaC	21,5	5,8	6,3
TaB ₂	20	-	5,1
TiC	32	5	7,7
TiN	21	-	6,9
TiB ₂	33	7,5	6,4
VC	26	8,5	6,6
VB ₂	28	-	5,3
ZrC	30	3,2	6,7
ZrN	20	-	7,2
ZrB ₂	22	7,5	7,8
WC-6 % C	17	7,5	5,6

Povlakovaním sa v oboch prípadoch dosiahne:

1. vysoká odolnosť proti opotrebovaniu pri nízkych i vysokých teplotách rezania v dôsledku vysokej tvrdosti povlakov,
2. vysoká chemická stálosť, zabráňujúca oxidácii a chemicko-difúznym reakciám pri práci s SK nástrojmi,
3. ochrana základného rezného materiálu proti tepelnému zaťaženiu povlakom s malou tepelnou vodivosťou,
4. povlak znižuje hodnotu súčiniteľa trenia,
5. zachováva sa rozmerová presnosť nástroja,
6. potlačuje sa tvorba nárastku,
7. povlak zvýšením trvanlivosti nástroja zvyšuje technologicko-ekonomický efekt obrábania znižovaním časových strát na jeho výmenu a z časov prevoja stroja.

Zvyšovanie pracovných vlastností nástrojov povlakovaním je významným prínosom k zefektívňovaniu procesov obrábania.

11.4.2. Povlakovanie nástrojov z rýchlireznych ocelí

Po náležitej úprave možno povlakovať nástroje zo všetkých druhov RO. Najväčší efekt prináša povlakovanie zložitých nástrojov, pri ktorých limitujúcim faktorom využitia je opotrebenie so stratou presnosti rozmeru (preťahovacie trne, nástroje na ozubenie, výstružníky, závitníky a pod.).

11.4.3. Povlakovanie platničiek spekaných karbidov

Povlakovanie platničiek SK je významne závislé od dokonalosti spoja povlak – základný materiál. Požiadavky na karbidové platničky sa tak rozdelili na dve skupiny:

- a) požiadavky na základný materiál SK,
- b) požiadavky na vlastnosti povlaku.

Základný materiál musí mať: vysokú pevnosť v ohybe, dostatočnú tvrdosť, chemické zloženie vhodné na vytvorenie dokonalého spoja s povlakom, odolnosť proti tepelnému namáhaniu pri procese povlakovania, odolnosť proti tepelným nárazom, dobrú tepelnú vodivosť, dostatočnú odolnosť proti opotrebovaniu, súčiniteľ tepelnej rozťažnosti má byť blízky s touto veličinou povlaku.

Od povlaku sa vyžaduje: vysoká tvrdosť a žiarupevnosť, vysoká chemická stabilita, malý súčiniteľ trenia, dobrá väzba so základným materiálom a bezpórovitosť.

Titánkarbidové povlaky (TiC) majú dobrú príľnavosť k základnému materiálu, čo je potrebné pri práci s nárazmi a vysokými teplotami.

Titánnitridové povlaky (TiN) majú oproti TiC povlakom menšiu tvrdosť, sú však odolnejšie proti oxidácii a difúzii, a teda aj proti vymieľaniu čela. V dôsledku odolnosti proti difúzii sa obťažnejšie spájajú so základom, čo sa môže prejavovať pri silových nárazoch ich odlupovaním.

Povlaky obmedzujú tvorenie nárastku. Najvýraznejší vplyv na tento jav má povlak oxidu hlinitého (Al_2O_3), menší titánkarbidový, najmenší titánnitridový.

Zo súhrnu používaných povlakov neukázal sa ani jeden univerzálnym. Pretože svojimi vlastnosťami sa môžu navzájom účelne dopĺňať, používajú sa v kombinácii viacerých vrstiev.

11.5. VEĽMI TVRDÉ REZNÉ MATERIÁLY – VTM

Veľmi tvrdé rezné materiály (VTM) zhodnotíme z dvoch hľadísk ich využívania:

1. VTM používané ako brusivo (prírodný i syntetický diamant a kubický nitrid bóru).
2. VTM používané ako rezný materiál pre nástroje s definovanou geometriou rezného klinu, t. j. pre obrábanie sústružením, frézovaním a pod. (prírodný diamant, polykryštalický diamant, polykryštalický nitrid bóru).

1. Prírodné diamanty – D

Technický diamant pozostáva z uhlíka s nepatrným množstvom prímiesí. Na rozdiel od rôznych foriem uhlíka (napr. grafit zrnitý, vločkový, lupienkový s analogickou štruktúrou) má kryštalickú stavbu. Z hľadiska tvaru má sklon na pravidelnosť a hladkosť povrchu. Tá je príčinou, že jeho spojenie so živcovým spojivom nespĺňa požiadavky ideálnej väzby. Jeho fyzikálno-mechanické vlastnosti:

- hustota: $3,48-3,56 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,
- mikrotvrdosť: 100 600 MPa (v rôznych rovinách sa mení),
- modul pružnosti: $7,09 \text{ až } 9,11 \cdot 10^5 \text{ MPa}$,
- pevnosť v ohybe: 294 MPa,
- súčiniteľ tepelnej vodivosti: $2000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$,
- súčiniteľ tepelnej rozťažnosti: $0,9 \cdot 10^{-6} \cdot \text{K}^{-1}$.

Technické diamanty sa používajú na výrobu rôznych druhov diamantových brúsnych kotúčov, rezných teliesok pre jemné sústruženie a vyvrtávanie farebných kovov, honovacích nástrojov a pod.

2. Syntetické diamanty (monokryštály) – SD

Syntetické diamanty sa vyrábajú kryštalizáciou uhlíka pri vysokých teplotách a tlakoch. Z hľadiska chemického zloženia, stavby, tepelnej stability, tepelnej vodivosti a hustoty sa nelíšia od prírodných. Vysoká tvrdosť a vyhovujúca pevnosť (sú programovateľné parametrami syntézy) im zabezpečuje vysokú reznosť, ktorá preyšuje aj reznosť prírodných diamantov. So zreteľom na nízke teploty oxidácie: 700 až 800 °C, nie sú vhodné na obrábanie materiálov, pri ktorých sú vystavené vysokému tepelnému namáhaniu. Triedia sa podľa použitia na:

- a) syntetické diamanty pre brúsne kotúče
 - so živicovým spojivom (s vyššou tvrdosťou a nižšou pevnosťou),
 - s kovovým spojivom (s vyššou pevnosťou a húževnatosťou a nižšou tvrdosťou),
- b) syntetické diamanty so zvýšenou pevnosťou pre rezné telieska pre nástroje s definovanou geometriou ich reznej časti (pre výrobu polykryštalických diamantov).

3. Kubický nitrid bóru – KNB (CBN)

Je to syntetický, veľmi tvrdý materiál (chemický vzorec N_2B_3), vyrobený v podstate rovnakou technológiou ako syntetické diamanty, kryštalizáciou hexagonálneho nitridu bóru pri vysokých tlakoch a teplotách. Jeho chemické zloženie: 56,4 % N, 43,6 % B. Je to materiál s riaditeľnými fyzikálnymi vlastnosťami podľa východiskových zložiek a parametrov syntézy. Fyzikálne vlastnosti:

- hustota: 3,4-3,5 g . cm⁻³,
- mikrotvrdosť: 91 000 MPa,
- tepelná stálosť: 1500 až 1600 °C.

Veľká tvrdosť, dobrá tepelná vodivosť, vysoká odolnosť proti tepelnému namáhaniu a chemická inertnosť k železu a jeho zliatinám sú príčinou, že KNB má výrazne nižšie adhézne a difúzne opotrebenie v porovnaní s diamantom. To ho predurčuje na brúsenie uvedených materiálov.

Brúsne zrná KNB sú monokryštály, majú v porovnaní s diamantom hladšie plochy a ostré priamočiare hrany. Pri brúsení treba používať rezné kvapaliny, nie však na báze vody, pretože v tomto prípade pri teplotách okolo 800 °C sa KNB začína rozkladať na kyselinu bórovú a čpavok.

4. Polykryštalické veľmi tvrdé materiály – PKVTM

Sú to materiály vyrábané pri rôznych termodynamických podmienkach, charakterizovaných vysokými tlakmi a teplotami (7 GPa a 2000 °C) vo vysokotlakových zariadeniach. Obsahujú viac ako 95 % veľmi tvrdých materiálov, t. j. diamantov či kubického nitridu bóru, zvyšok je spojivo (kovové – TiC, novšie tiež keramické).

Uvedené materiály, t. j. polykryštalický diamant (PKD) či polykryštalický kubický nitrid bóru (PKNB) prichádzajú na trh pod rôznymi názvami. Dodávajú sa ako platničky kruhového alebo štvorcového či trojuholníkového tvaru s priemerom vpísanej kružnice 12,7 alebo 9,52 mm, hrúbky 3,18 mm.

Použitie veľmi tvrdých rezných materiálov typu PKD či PKNB umožňuje:

- zvýšiť produktivitu práce,
- zvýšiť úroveň využitia moderných vysokovýkonných obrábacích strojov,

- zabezpečiť reprodukovateľnosť operácií obrábania podľa konvenčných kritérií na technologicke-ekonomickú efektívnosť výrobných procesov.

11.6. OBLASTI POUŽITIA SUPERTVRDÝCH REZNÝCH MATERIÁLOV

Diamanty ako rezné materiály (D, SD, PKD) sa odporúčajú používať na operácie obrábania tých materiálov, pre ktoré je určená skupina spekaných karbidov ISO K vtedy, keď už použitie týchto materiálov sa stáva neefektívne. Sú to najmä: keramika, sklo, porcelán, horniny, betón, umelé látky a tvrdé, krehké, krátku triesku tvoriace materiály.

Podobne je tomu pri náhrade spekaných karbidov skupiny ISO P kubickým nitridom bóru (KNB, PKNB) pri obrábaní ťažkoobrobiteľných materiálov, ako sú: rýchlorezné ocele, nástrojové zošľachtené vysokopevné ocele, kalené ocele od 60 HRC... .

11.7. REZNÉ PROSTREDIA (REZNÉ KVAPALINY)

Efektívne využitie nástrojov, obrábacích strojov ako aj kvalita operácií obrábania, sú významne závislé od použitého rezného prostredia, zodpovedajúceho predmetným operáciám.

11.7.1. Účel použitia rezných kvapalín

Vhodné použitie rezných kvapalín umožňuje:

- zvýšiť úroveň ekonomického využitia nástrojov a strojov a v tej súvislosti zvýšiť výkon obrábania (Q_v , Q_A),
- pri zachovaní rezných podmienok zvýšiť trvanlivosť nástroja,
- obmedziť tvorenie nárastku,
- kladne pôsobiť na integritu povrchu,
- chladiť nástroj a obrobok,
- odvod triesok z pracovného priestoru (pri vŕtaní hlbokých dier),
- pri brúsení zabrániť zanášaniam brúsneho kotúča, podobne aj pri honovaní a superfinišovaní.

Aby rezná kvapalina spĺňala uvedené funkcie, musí mať vhodné chemické zloženie, ktoré jej zabezpečí základné exploatačné vlastnosti, t. j.:

- chladiaci účinok (rýchly odvod tepla z oblasti jeho vzniku a tým znížiť tepelné zaťaženie nástroja),
- mazací účinok, t. j. schopnosť znížiť súčiniteľ trenia,
- čistiaci účinok,
- vyplachovací účinok.

11.7.2. Vyžadované vlastnosti rezných kvapalín

Chladiace a mazacie účinky rezných kvapalín sú podmienené ich chemickými a fyzikálnymi vlastnosťami:

1. vysokým špecifickým teplom,
2. vysokým výparným teplom,
3. vysokou zmáčavosťou, priľnavosťou a penetračnou schopnosťou (schopnosť prenikať),
4. schopnosťou dostatočne rýchlo vytvárať vhodné chemické zlúčeniny s kovmi obrodku a nástroja,
5. malou penivosťou.

Okrem uvedených vlastností, ktoré možno označiť ako pracovné, vyžaduje sa od nich aby boli:

- chemicky stále a schopné regenerácie,
- schopné aspoň krátkodobo konzervovať súčiastky proti korózii,
- zdravotne neškodné,
- nepoškodzovali náter stroja,
- lacné.

Univerzálna rezná kvapalina nejestvuje, preto sa používa viac druhov, ktoré sa volia podľa druhu operácie obrábania a pracovných podmienok. Ich účinok je značne ovplyvňovaný privedeným množstvom, tlakom a spôsobom prívodu.

11.7.3. Chemicko-fyzikálna podstata účinku rezných kvapalín

Účinok chladiaco-mazacej kvapaliny na zníženie koeficientu trenia medzi nástrojom a materiálom obrodku nemožno odvodzovať pri stredných a vyšších rezných rýchlostiach len od uplatnenia normálneho hydrodynamického účinku kvapaliny. Teplota a najmä tlaky sú v reznej oblasti veľmi vysoké, takže kvapalina nie je schopná zabrániť hydrodynamickým účinkom priamemu kontaktu obrábaného kovu a nástroja. Tomuto nepriaznivému stavu možno účinne zabrániť prítomnosťou chemických aktívnych komponentov v reznej kvapaline – emulzii či reznom oleji, tzv. EP (Extrême Pressure) prísad.

Pri teplotách a tlakoch, ktoré sú v reznej oblasti, kovy reagujú s predmetnými látkami neobyčajne rýchlo. Aktívne látky sú viazané valenčnými silami kovu na povrchu a prenikajú i do povrchovej vrstvy difúziou, pričom sa udáva, že difúzny koeficient tohto pochodu je proti normálnym podmienkam kontaktu zväčšený až miliónkrát, takže difúzna rýchlosť v týchto povrchových vrstvách dosahuje rádovo rýchlosť obrábania. Na povrchu obrábaného kovu i nástroja sa vytvára film zlúčenín, ktoré majú podstatne menšiu pevnosť v šmyku než kov obrodku, preto pôsobí priaznivo na zníženie koeficientu trenia.

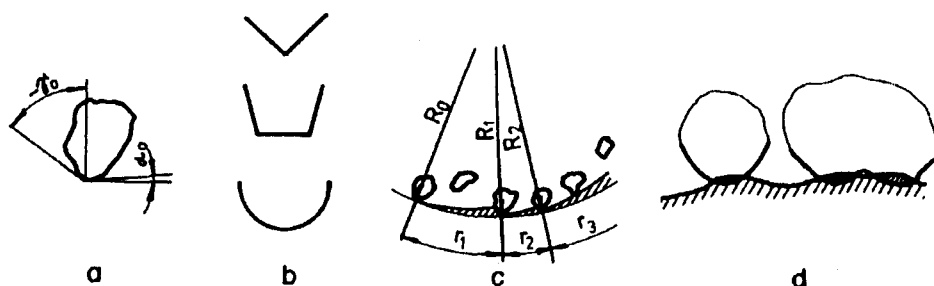
12. ZVLÁŠTNOSTI PROCESU REZANIA PRI BRÚSENÍ

Fyzikálna podstata procesu rezania pri brúsení je rovnaká, ako pri spôsoboch obrábania, ktoré sme charakterizovali doteraz (sústruženie, frézovanie, hobľovania atď.). Odlišnosti uvádzame v ďalšom.

12.1. BRÚSNY NÁSTROJ A PARAMETRE REZANIA PRI BRÚSENÍ

Rezné hrany brúsneho nástroja sú vytvárané hranami brúsnych zrn, ktoré sú umiestnené náhodne a majú nepravidelný tvar. Z týchto skutočností vyplývajú zvláštnosti brúsneho nástroja. Sú to tieto:

1. Rezné hrany sú nepravidelné. Uhol čela a chrbta sa mení v širokom intervale (obr. 12.1.).



Obr. 12.1. Zvláštnosti brúsneho nástroja

a) geometria zrn, b) idealizované tvary rezných hrán, c) umiestnenia zrn v povrchovej vrstve, d) prierez odrezávaný zrnom a vytváranie reznej, resp. obrobenej plochy

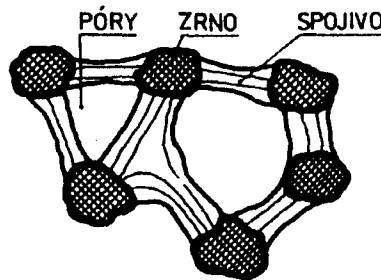
2. Rezné hrany pracujú na rôznom polomere R_i a majú nerovnomerný rozstup r_i . Preto počet zrn (rezných hrán) v zábere závisí od posuvu. Zrná, ktoré sú hlbšie (sú v „tieni“ predchádzajúcich zrn), nerežú. Režú iba zrná v aktívnej povrchovej vrstve.
3. Jednotlivé zrná pracujú s rôznou hrúbkou a šírkou odrezávanej vrstvy. Preto sú rôzne aj rezné sily, pôsobiace na jednotlivé zrná.
4. Zrná v procese brúsenia sa štiepia alebo vydrobujú. Vznikajú tým neustále nové rezné hrany.
5. Obrobený povrch sa vytvára ako zvyšok rezných plôch nepravidelných rezných hrán jednotlivých nepravidelne umiestnených zrn.
6. Rezné rýchlosti sú o jeden rád vyššie ako pri iných spôsoboch obrábania, posuvy závisia od rozmerov použitého brúsneho nástroja, hĺbky rezu sú zvyčajne nanajvyš niekoľko stotín až tisícín milimetra.

Z hľadiska úrovne použitých rezných rýchlostí, posuvov a hĺbok rezu rozoznávame:

- a) bežné brúsene,
- b) hĺbkové brúsenie,
- c) rýchlostné brúsenie,
- d) dokončovacie spôsoby, ako lapovanie, honovanie, superfinišovanie.

12.1.1. Vlastnosti brúsnych kotúčov a ich označovanie

V štruktúre brúsneho nástroja rozoznávame zrná, spojivo a póry (obr. 12.2.).



Obr. 12.2. Štruktúra brúsneho nástroja

Najdôležitejšie vlastnosti brúsneho kotúča sú: druh brúsiva, veľkosť zrn, tvrdosť brúsneho nástroja, objem pórov a druh spojiva. Tieto vlastnosti zapíšeme v schéme podľa obr. 12.3. Významové poradie a použité kódy podľa STN sú na schéme (obr. 12.3.). Úplné označenie vyžaduje ešte uviesť rozmery brúsneho nástroja (napr. pri brúsnych kotúčoch vonkajší priemer D , šírku s , priemer upínacej diery d). Podotýkame, že treba rozlišovať medzi tvrdosťou brúsnych zrn a tvrdosťou brúsneho nástroja (ktorá je uvádzaná v označovaní), čo je vlastne tvrdosť spojiva.

Zrnitosť brúsiva sa udáva podľa STN 22 40 15 veľkosťou brúsnych zrn, podľa normy FEPA (rozšírená verzia ISO) v počtoch ôk triediacich sít a pod.

12.1.2. Kotúče z veľmi tvrdých materiálov (VTM)

Mimoriadny význam majú brúsne kotúče s brúsnou vrstvou na telese kotúča (obr. 12.1c), obsahujúcou diamantové alebo KNB brúsivo. Hodnoty hrúbky X a šírky W vrstvy sú rôzne, menia sa v závislosti od tvaru a priemeru kotúča (D): X v rozsahu 1 až 6 mm, $W = 2$ až 15 mm. Majú prioritné uplatnenie pri brúsení vysokopevných a tvrdých materiálov (SK, RK, RO ...), tvarových a veľkorozmerových plôch s nárokom na vysokú presnosť rozmeru, geometrického tvaru a integrity povrchu (surface integrity).

Ich pracovné vlastnosti sú závislé najmä od: druhu brúsiva, jeho zrnitosti, koncentrácie a spojiva, v spolupôsobení s chladiacomazacou emulziou aj s EP (Extrem Pressure) prísadami. Význam uvedených charakteristík kotúčov:

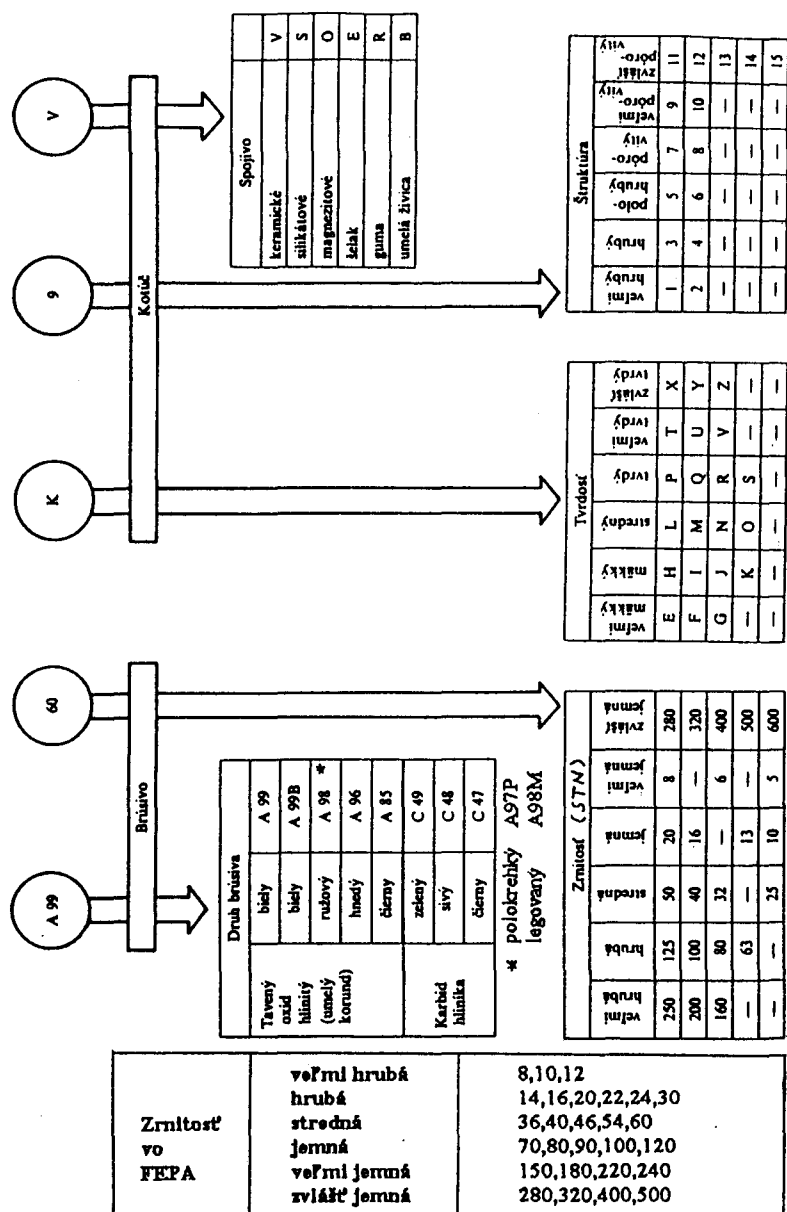
1. Zrnitosť: Udáva sa podľa normy FEPA (rozšírená verzia ISO), STN alebo ASTN (US Standard). S rastom veľkosti zrn diamantu i KNB narastá drsnosť obrobených plôch a výkon brúsenia (objemový i plošný). Preto pri voľbe zrnitosti treba posúdiť či pre určitú fázu výroby je dôležitejší výkon brúsenia alebo požadovaná drsnosť povrchu.

2. Koncentrácia: Je mierou pre podiel hmotnosti zrn diamantu alebo KNB v objeme brúsnej vrstvy kotúčov. Voľba koncentrácie diamantu a KNB má značný vplyv na efektívnosť

brúsenia. Vyššia koncentrácia zvyšuje náklady na nástroj, zvyšuje životnosť nástroja a jeho tvarovú stálosť. Prekročenie optimálnej koncentrácie má za následok zvýšenie rezných odporov a zníženie výkonu brúsenia.

Pre koncentráciu zložky VTM v hmote brúsnej vrstvy je určená ako východisková porovnávací hodnota K100. Je určená obsahom 0,88 g, t. j. 4,4 karátu v 1 cm³ brúsnej vrstvy, čo zodpovedá 25 % jeho objemu pri hustote 3,52 g . cm⁻³.

Ostatné hodnoty koncentrácií, t. j. 25, 50, 75, 125 a 150 sú proporcionálne. Zrná predstavujú rezné klíny, póry majú funkciu zubových medzier, do nich sa ukladá vytvárajúca sa trieska, spojivo spája brúsne zrná do kompaktného nástroja.



Obr. 12.3. Označovanie brúsnych kotúčov

3. Spojivo: Môže byť živicové alebo kovové.

Živicové spojivo (najčastejšie formaldehydové) je určené na brúsne kotúče pre produktívne brúsenie SK a pre ostrenie SK nástrojov pri použití chladenia alebo i bez chladenia. Brúsne

kotúče so živicovým spojivom sa vyznačujú vynikajúcimi reznými vlastnosťami. Brúsne kotúče s kovovým spojivom sa vyznačujú vysokou tvarovou stálosťou a vysokou životnosťou. Nie sú vhodné pre produktívne brúsenie a vyžadujú použitie chladiacich kvapalín. Podľa typu kovového spojiva (rôzne druhy bronzov alebo galvanicky nanesených vrstiev Ni) sú vhodné na brúsenie SK, keramiky a pre otvorové brúsenie, kde nedostatočná rezná rýchlosť je eliminovaná vyššou tvrdosťou spojiva.

12.1.3. Voľba brúsnych kotúčov s diamantovým a KNB brúsnivom

Voľbu brúsnych kotúčov oboch druhov, obzvlášť ak ide o operácie brúsenia súčiastok vyrábaných veľkosériovo či hromadne, treba riadiť podľa konvenčných kritérií efektívnosti týchto výrob.

Základnými kritériami pre tieto prípady ich voľby sú:

a) kritérium Q_v ($\text{mm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$), t. j. množstvo odobraného materiálu obrobku za jednotku času, pri brúsení obvodom kotúča vyjadrené vzťahom:

$$Q = a_p \cdot f \cdot v_o$$

kde a_p je hĺbka rezu (mm),

f – posuv (mm), (býva funkciou šírky brúsneho kotúča),

v_o – obvodová rýchlosť obrobku ($\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$)

b) kritérium „G“ vyjadrené pomerom

$$G = \text{objem odobraného materiálu (mm}^3\text{)} / \text{objem úbytku kotúča (mm}^3\text{)}$$

Obe kritériá hodnotia pracovné vlastnosti brúsneho kotúča z hľadiska jeho špecifických vlastností, môžu byť teda kritériami pre jeho voľbu, spravidla však iba v spojitosti s ďalšími pomocnými kritériami: kritériom akosti operácie a kritériom hospodárnosti jej realizácie. To preto, že aj keď bude splnené kritérium objemového výkonu obrábania (Q_v) i akosti operácie, môže byť nepriaznivé kritérium G . Potom, pretože nástroj je drahý, ekonomické kritérium bude hovoriť v neprospech voľby nástroja podľa kritéria objemového výkonu Q_v .

Uvažujeme druhú alternatívu, t. j. voľbu nástroja podľa kritéria pomeru G . Predpokladajme, že tento pomer je mimoriadne priaznivý (je veľký) a že kritérium akosti operácie je splnené, ale dosiahnuteľný výkon obrábania (Q_v) je nedostatočný. V takom prípade nebude splnená požiadavka ekonomického kritéria – hospodárnosť výroby.

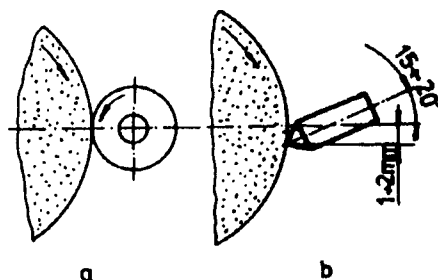
Ak uvážime možnosť pôsobenia aj ďalších faktorov na efektívnosť operácií brúsenia (napr. vplyv rezného prostredia a pod.) vidíme, že v takýchto prípadoch je voľba brúsneho kotúča optimalizačnou úlohou. V takýchto úlohách bude potrebné určovať aj náklady na brúsenie.

12.1.4. Tvarovanie brúsnych kotúčov

Tvarovanie (orovnávanie) je rovnocenná operácia ako ostrenie nástrojov. Spôsob a podmienky tvarovania ovplyvňujú počet zŕn v povrchovej (aktívnej) vrstve kotúča a tvar rezných hrán zŕn na povrchu. Preto tvarovanie má veľký vplyv na pracovné charakteristiky brúsneho nástroja, na rezné sily, drsnosť povrchu a trvanlivosť. Štruktúra aktívnej vrstvy kotúča je dotváraná tvarovaním.

Rozoznávame tieto metódy tvarovania:

1. odvaľovaním (obr. 12.4a),
2. diamantom (obťahovaním) (obr. 12.4b),
3. kameňom.



Obr. 12.4. Tvarovanie brúsneho kotúča
a – odvaľovaním, b – diamantom

12.2. REZNÉ SILY A VÝKON PRI BRÚSENÍ

Rezné sily pri brúsení vypočítame:

1. Na základe štatistických rovníc. Napr. v literatúre nájdeme pre výpočet reznej sily F_c rovnicu

$$F_c = 250 \frac{v_s}{v_{ck}} a_p^{0,53} f^{0,53}$$

kde v_s – je obvodová rýchlosť obrobku [$m \cdot min^{-1}$],

v_{ck} – obvodová rýchlosť kotúča [$m \cdot s^{-1}$].

Analogické rovnice nájdeme pre pasívnu (bočnú) silu F_p a posuvovú silu F_f .

2. Z výkonu rezania. Výkon rezania je:

$$P = F_c \cdot v_{ck} \text{ [W]}$$

z čoho

$$F_c = \frac{P}{v_{ck}}$$

Ostatné zložky vypočítame podľa pomeru $F_c : F_p : F_f$. Pri brúsení býva

$$F_p = (2 \text{ až } 3) F_c \text{ [N]}$$

3. Na základe špecifického rezného odporu (k_c [MPa]). Pre brúsenie obvodom kotúča platí:

$$P = f a_p k_c v_s = F_c \cdot v_{ck} \text{ [W]}$$

z čoho

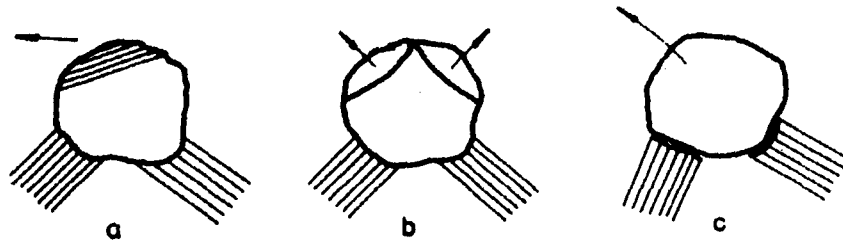
$$F_c = f a_p \frac{v_s}{v_{ck}} k_c \quad [\text{N}]$$

Špecifický rezný odpor (k_c) závisí od strednej hrúbky odrezávanej vrstvy. Mení sa od 20 do 200 kN . mm⁻² (Gpa) pri hrubovaní až pri jemnom brúsení.

12.3. OPOTREBOVANIE A TRVANLIVOSŤ BRÚSNEHO NÁSTROJA

Pri brúsení rozoznávame opotrebovanie brúsnych zŕn a opotrebovanie kotúča (brúsneho nástroja). Mechanizmus opotrebovania brúsnych zŕn (obr. 12.5.) zahŕňa:

- a) abrazívne, adhézne a difúzne opotrebovanie zrna,
- b) rozštiepenie (krehké rozrušenie) zrna,
- c) vypadnutie (vydrobenie) zrna.



Obr. 12.5. Mechanizmy opotrebovania brúsneho nástroja

a – abrazívne, adhézne a difúzne opotrebovanie zrna, b – štiepenie zrna, c – vypadnutie zrna

Opotrebovanie brúsneho kotúča prebieha takto: rozštiepením zŕn sa znižujú póry na povrchu, plastická trieska ich zaplňa. Hovoríme, že kotúč sa zanáša. Rozštiepením alebo vypadnutím zŕn sa objavujú nové rezné hrany; tento jav sa označuje samoostrením. Zanášanie a samoostrenie závisia od pomeru tvrdosti kotúča, pevnosti hrany zrna a rezných síl.

Ak sú póry zanášané odrezávanými trieskami, zrná nemôžu vniknúť do materiálu. Trenie medzi nástrojom a obrobkom sa zvyšuje. Na obrobenom povrchu vznikajú vrstvy oxidov. Hovoríme, že kotúč „páli“.

Časový priebeh opotrebovania má známy typický priebeh, avšak bez tretieho pásma. Trvanlivosť brúsneho kotúča môže byť obmedzená:

1. stratou tvaru a rozmerov profilu nástroja,
2. stratou kruhovitosti kotúča,
3. stratou ostroty kotúča, t. j. otupením zŕn alebo zanesením.

Závislosť trvanlivosti od parametrov rezania vyjadrujeme štatistickými modelmi (empirickými rovnicami).

12.4. DRSNOSŤ POVRCHU PRI BRÚSENÍ

Rezná plocha po brúsnom zrne má tvar jednej alebo niekoľkých rýh s nepravidelným profilom. Obrobený povrch sa vytvára ako obalová plocha týchto rýh, vznikajúcich po všetkých zrnách v aktívnej vrstve kotúča. Preto drsnosť povrchu závisí od počtu dotykov zrn na plošnú jednotku povrchu a od tvaru rezných hrán.

Počet dotykov zrn je funkciou počtu zrn v jednotkovom objeme aktívnej vrstvy brúsneho nástroja, pomeru posuvnej a reznej rýchlosti, kinematiky vzájomného pohybu a počtu prechodov brúsneho nástroja po obrobenom povrchu bez prísuvu.

Zrnitosť kotúča, podmienky jeho orovnávanía a zmena profilu kotúča opotrebovaním podstatnou mierou ovplyvňuje počet dotykov za jednotku času a tým aj čas, za ktorý získame žiadanú drsnosť.

Drsnosť povrchu je ovplyvnená aj tzv. vyiskrením. Vyiskrenie je prechod brúsneho kotúča po obrobenom povrchu bez prísuvu. Kotúč pritom odrezáva výstupky nerovnosti, a preto sa drsnosť znižuje. Pri vyiskrení sa uvoľnia aj pružné napätia systému SNOP a deformácie obrobku vyvolané teplom rezania. Získame tým aj lepší geometrický tvar, no súčasne sa preruší aj dotyk brúsneho nástroja a obrobku.

12.5. VPLYV VLASTNOSTÍ BRÚSNEHO KOTÚČA NA PROCES BRÚSENIA

Druh brúsiva ovplyvňuje najmä trvanlivosť brúsneho kotúča.

Oxid hlinitý (Al_2O_3) je bežne používané brúsivo na ocele. Je pomerne húževnatý a neštíepi sa. Má dostatočnú trvanlivosť, pretože nepodlieha difúznemu opotrebovaniu.

Karbid kremíka (SiC – siliciumpkarbid). Pri brúsení ocelí podlieha difúznemu opotrebovaniu. Je krehkejší ako oxid hlinitý. V procese brúsenia sa štíepi a vytvára nové rezné hrany. Preto je vhodný na brúsenie liatin a farebných kovov, ale aj tvrdých materiálov (spekaných karbidov a keramických materiálov), ktoré žiadajú ostré zrná.

Kubický nitrid bóru (N_2B_3 – CBN resp. KNB) pri brúsení ocelí nepodlieha difúznemu opotrebovaniu. Je tvrdší ako oxid hlinitý. Používa sa na výkonné brúsenie ocelí.

Diamant (D) je mimoriadne tvrdý, avšak pri vysokých teplotách nestabilný. Preto ho používame na liatiny, farebné kovy a tvrdé materiály, ktoré môžeme produktívnejšie brúsiť diamantom ako karbidom kremíka.

So zväčšovaním čísla zrnitosti (teda so zmenšením rozmerov zrn) rezné sily rastú, drsnosť sa znižuje.

Tvrdosť nástroja vplyva najmä na trvanlivosť. Mäkké kotúče sa rýchlo opotrebojú vypadávaním zrn, tvrdé sa zanášajú. Maximálnu trvanlivosť dostaneme pri určitej tvrdosti kotúča, ktorá závisí od mechanického namáhania brúsnych zrn.

Pórovitosť ovplyvňuje najmä rezné sily. Pri pórovitých kotúčoch prvé zrno za pórom reže s veľkou hrúbkou, preto rezné sily sú menšie. Pri väčšej pórovitosti znižuje sa aj náchylnosť k zanášaniam kotúča. Pórovité kotúče sú vhodné na brúsenie s veľkými hĺbkami a posuvmi.

12.6. SIMULÁCIA PROCESU BRÚSENIA

Simulácia procesu brúsenia vyžaduje vytvoriť model brúsneho kotúča, upraviť jeho povrchovú vrstvu v závislosti od podmienok tvarovania, stanoviť prierez odrezávanej vrstvy pre jednotlivé zrná a nájsť výpočtový postup pre určenie profilu obrobeného povrchu, rezných síl, trvanlivosti, atď.

12.6.1. Model brúsneho nástroja

V teoretických úvahách nepravidelný tvar brúsneho zrna zvyčajne nahradíme guľou alebo kockou. Skutočný tvar profilu reznej hrany zrna nahradíme trojuholníkom, lichobežníkom alebo kruhovým oblúkom. Model brúsneho nástroja vytvoríme na základe štatistických charakteristík tvaru a veľkosti zrn a ich počtu v jednotkovom objeme brúsneho nástroja. Používame metódu náhodných čísiel. Predpokladáme, že zrná sú v brúsnom nástroji rovnomerne rozložené.

Model brúsneho nástroja je daný súradnicami hrotov rezných hrán jednotlivých brúsnych zrn, prípadne ďalšími vlastnosťami, ako napr. rozmermi a pod. Po formálnej stránke je to matica s počtom riadkov rovnajúcich sa počtu brúsnych zrn. Postup vytvárania modelu brúsneho nástroja si ukážeme na príklade brúsneho kotúča:

Nech je daný polomer R , hrúbka h a šírka B simulovanej povrchovej vrstvy brúsneho kotúča a počet zrn v jednotkovom objeme q . Počet zrn Q , ktorý treba umiestniť nájdeme ako súčin simulovaného objemu nástroja a počtu zrn v jednotkovom objeme q :

$$Q = V \cdot q$$

Ak použijeme cylindrický súradnicový systém, hľadané súradnice sú φ , r , z . Ich variačné rozpätie je:

$$0^\circ \leq \varphi \leq 360^\circ$$

$$R - h \leq r \leq R$$

$$0 \leq z \leq B$$

kde R je polomer kotúča,

h – hrúbka simulovanej vrstvy,

B – šírka simulovanej vrstvy.

Súradnice jednotlivých brúsnych zrn nájdeme takto:

Zoberieme trojicu náhodných čísiel R_1, R_2, R_3 s rovnomerným rozložením z intervalu $(0,1)$. Hľadané súradnice hrotu zrna sú:

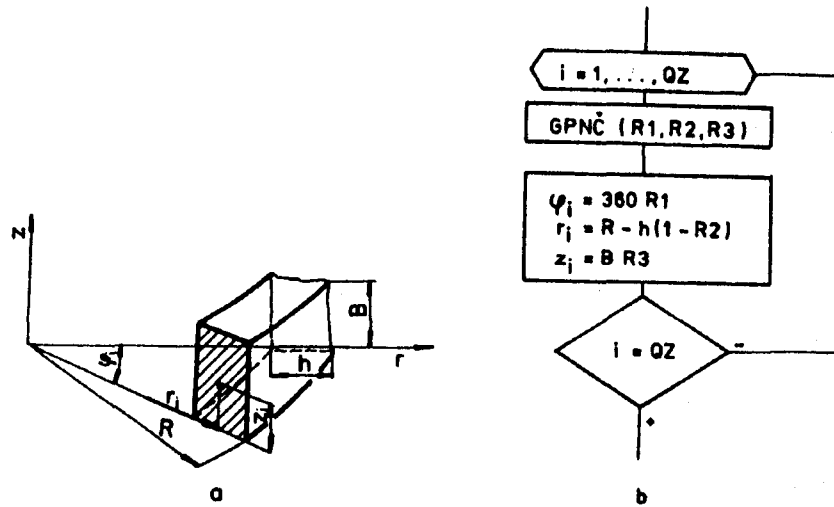
$$\varphi = R_1 \cdot 360,$$

$$r = R - h + R_2 \cdot h = R - h(1 - R_2)$$

$$z = R_3 \cdot B.$$

Výpočet ukončíme, ak počet umiestnených zrn sa rovná Q . Vývojový diagram výpočtového postupu je na obr. 12.6.

Metódou náhodných čísiel môžeme simulovať nielen polohu jednotlivých brúsnych zrn, ale aj veľkosť alebo iné tvarové alebo materiálové charakteristiky.



Obr. 12.6. Simulácia brúsneho kotúča

a – súradnica i -teho zrna, b – vývojový diagram na určenie súradníc Q zrn, GPNC – generátor pseudonáhodných čísiel

12.6.2. Simulácia charakteristík procesu brúsenia

Matematický model brúsneho nástroja je východiskom pre simuláciu procesu brúsenia. Rezné sily a drsnosť povrchu simulujeme na základe vzájomného pohybu zrn a obrábaného materiálu. Pri simulácii drsnosti povrchu pri brúsení stanovíme profil obrobenej plochy v profilovej rovine. Profil obrobenej plochy vzniká postupne ako obalová plocha profilu rezných hrán jednotlivých zrn pri prechode nástroja profilovou rovinou.

Pri výpočte rezných síl vypočítame prierez odrezávaný daným zrnom. Hodnotu reznej sily pôsobiacej na zrno určíme zo štatistických rovníc reznej sily pre daný brúsny kotúč a obrábaný materiál. Výslednicovú reznú silu získame ako vektorový súčet síl pôsobiacich na zrná v zábere.

Pri simulácii procesu brúsenia treba aj simulovať samoostrenie, zanášanie ako aj účinok tvarovania. Zanášanie a samoostrenie simulujeme na základe pomeru reznej sily na zrno, pevnosti väzby. Účinok tvarovania simulujeme tak, že pre jednotlivé zrná na povrchu postupne stanovíme pevnosť väzby zrna, pevnosť zrna a rozmery zrna. Na základe týchto vlastností, druhu a podmienok tvarovania, ako aj polohy zrna vzhľadom na orovnávač rozhodujeme o tom či bude zrno vydrobené, prerezané alebo vyštiepené.

Opotrebovanie brúsneho zrna simulujeme podľa vzťahov, ktoré modelujú mechanizmy opotrebovania zrna. Opotrebovanie brúsneho kotúča dostaneme sčítaním vplyvu opotrebovania zrna, jeho vyštiepenia a vydrobenia.

12.7. SIMULAČNÉ MODELY NEPRESNOSTI OBRÁBANIA

V predchádzajúcich statiach sme naznačili informatívny postup pri stanovení vplyvu rôznych faktorov na nepresnosti obrábania. Vplyv niektorých faktorov sme vyjadrili fyzikálnymi rovnicami, iných štatistickými (empirickými) rovnicami. Na základe postupov uvedených v predchádzajúcej časti môžeme vypočítať výslednú nepresnosť obrábania pre zvolené priemerné hodnoty vstupných veličín.

Vlastnosti obrobku (napr. pevnosť materiálu, prídavky na obrábanie a pod.) nie sú však konštantné a nemožno považovať za konštantné ani všetky parametre obrábania ako sú napr. upínacie sily, okamžitá poloha vretena, hrotu nástroja vzhľadom na obrobok atď. Všetky tieto parametre sú z hľadiska konkrétnej realizácie technologickej operácie v danom časovom intervale náhodné veličiny, ktoré majú svoju strednú hodnotu, smerodajnú odchýlku a zákonitosť rozloženia náhodnej veličiny. Je zrejmé, že máme do činenia s komplexným dynamickým systémom, ktorý môžeme modelovať simuláciou. Teda môžeme vytvoriť simulačné modely nepresnosti úseku operácie, alebo celého technologického procesu obrábania na rôznej úrovni hĺbky analýzy. Vytvoriť statické, deterministické, stochastické a dynamické simulačné modely nepresnosti obrábania. Môžeme zostaviť statický model nepresnosti obrábania, napr., ktorý zohľadňuje deformáciu sústavy obrábania, teplotnú deformáciu nástroja, opotrebovanie nástroja. Výsledkom simulácie môžu byť hodnoty maximálnej, minimálnej nepresnosti, tvar obrobku, optimalizácia parametrov obrábania, a to posuvu a hĺbky rezu aby sa dosiahla požadovaná tolerancia a pod. Základnými komponentami takéhoto simulačného modelu sú fyzikálne a štatistické rovnice, ktoré opisujú príčiny vzniku nepresnosti pri realizácii danej operácie alebo úseku operácie.

Simulácia nepresnosti, resp. simulácia hranatosti obrobku pri bezhrotovom brúsení bola úspešne použitá pri voľbe rezných podmienok bezhrotového brúsenia. Simuláciou bolo umožnené experimentálne nastavenie rezných podmienok nahradiť výpočtom – numerickým experimentom.

Keď sledujeme cieľ simulovať celý proces obrábania z hľadiska nepresnosti musíme vychádzať zo štatistických modelov prvkov sústavy obrábania SNOP a procesov, ktoré vyvolávajú vznik nepresností. Pre každý výpočtový cyklus metódou náhodného výberu určíme konkrétne hodnoty parametrov. Niektoré z nich môžu byť aj funkciou času. Z použitých fyzikálnych rovníc alebo štatistických rovníc vypočítame výsledné nepresnosti súčiastky v danom výpočtovom cykle. Po dostatočnom počte opakovaní výpočtových cyklov môžeme vyhodnotiť štatistické charakteristiky výsledných nepresností a vplyv vstupných údajov na ich hodnoty.

Simulačné modely nepresností môžeme využiť aj na optimalizáciu technologického postupu z hľadiska nepresnosti obrábania. Pri takomto postupe meníme vlastnosti prvkov systému (strojov, prípravkov, nástrojov, polovýrobov) a použité pracovné podmienky (posuv, reznú rýchlosť, hĺbku rezu, pracovné prostredia). Výpočtom získame obraz o vplyve jednotlivých faktorov na volené ukazovatele procesu, napr. na výslednú nepresnosť, produktivitu práce, náklady na obrábanie a pod.

13. NEPRESNOSTI TVARU A ROZMERU PLOCHY

Predchádzajúcimi kapitolami sme ukončili analýzu procesu rezania. Teraz budeme skúmať vplyv fenoménov rezania na nepresnosti tvaru a rozmeru plochy.

13.1. MODEL SNOP Z HĽADISKA NEPRESNOSTI OBRÁBANIA

Nepresnosti obrábania vznikajú zmenou vzájomnej polohy obrobku a hrotu nástroja vplyvom poddajnosti, teplotných deformácií, opotrebovania atď.

Sústava SNOP predstavuje z hľadiska výskumu nepresnosti obrábania systém, v ktorom hmota je sústredená v niekoľkých prvkoch, ktoré sú spojené a menia svoju tuhosť. Na prvky pôsobia vonkajšie a vnútorné sily, následkom čoho sa mení ich vzájomná poloha, tvar a presnosť vyrábaných plôch.

Takýto systém je definovaný maticami prvkov, ich stavu (teploty, vnútorné napätia) a tuhosti a maticou vnútorných a vonkajších síl. Úlohou je stanoviť odchýlky vzájomnej polohy vybraných prvkov: hrotu noža a základne obrobku. Odchýlky spôsobia nepresnosti tvaru a rozmerov plôch súčiastky.

13.2. ZÁKLADNÉ POJMY

Rozoznávame nepresnosti rozmerov, tvarov a vzájomnej polohy. Tieto nepresnosti definujeme ako odchýlky od ideálnych rozmerov, tvarov a vzájomnej polohy plôch súčiastky.

Pri analýze príčin nepresnosti sa stretávame s týmito pojmami:
Tuhosť je definovaná ako pomer sily a odtlačenia (priehybu):

$$k = F / y$$

kde F je sila v smere y ,
 y – odtlačenie.

Poddajnosť je prevrátená hodnota tuhosti

$$c = 1 / k = y / F$$

z týchto rovníc odtlačenie y pre známu silu F , tuhosť k alebo poddajnosť c je

$$y = F / k = F \cdot c$$

Rozoznávame tuhosť (poddajnosť) prvku a sústavy. Prvky SNOP sú napr. suport, vretenník, koník, stojan, stôl atď., sústava je tvorená z niekoľkých prvkov, napr. (vretenník – obrobok – koník) – (lôžko – suport – nôž).

13.3. FYZIKÁLNE PRÍČINY VZNIKU NEPRESNOSTI

Fyzikálne príčiny odchýlok od žiadaných rozmerov, tvarov a polohy plôch súčiastok pri obrábaní sú tieto:

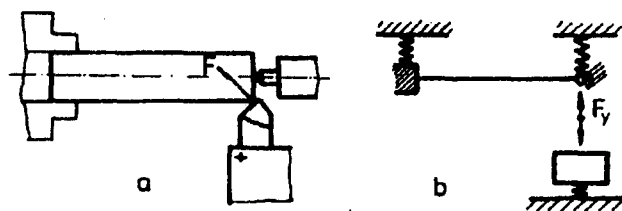
1. nepresnosti vzájomného nastavenia nástroj – obrobok,
2. poddajnosť sústavy SNOP,
3. teplotné deformácie sústavy SNOP,
4. rozmerové opotrebovanie nástroja,
5. vnútorné napätie obrobku,
6. deformácie spôsobené upínacími silami.

13.4. ANALITICKÝ VÝPOČET NEPRESNOSTI PRI OBRÁBANÍ

13.4.1. Nepresnosti tvaru vyvolané reznými silami a poddajnosťou

Na sústavu SNOP v procese rezania pôsobia všetky zložky reznej sily. Pri približných výpočtoch uvažujeme len odtlačenia v smere y , ktoré bezprostredne vplyvajú na zmenu obrábaného rozmeru. Pri informatívnych výpočtoch uvažujeme zložku F_p . Postup výpočtu ukážeme na príklade.

Treba stanoviť tvarové nepresnosti hriadeľa upnutého do skľučovadla a hrotu. Predpokladáme, že na sústavu pôsobí iba zložka F_p . Upnutie obrobku a nástroja nahradíme pružným uložením. Získame takto z obrazu skutočnosti teoretický model (obr. 13.1.).



Obr. 13.1. Obrobok upnutý do skľučovadla a hrotu

a – skutočná situácia, b – schéma teoretického modelu pre výpočet pružných deformácií

Postup stanovenia tvarových nepresností sa zakladá na tom, že pre rôzne vzájomné polohy nástroja a obrobku (pri hrote, pri vretenníku a napr. v prostriedku obrobku) vypočítame odtlačenie nástroja a osi obrobku. Namiesto nastaveného rozmeru R vyrábame plochu s rozmerom R_s (obr. 13.2.). Rozmery R_s v rôznych miestach obrobku, vznikajú pôsobením zložky F_p na poddajnú sústavu SNOP.

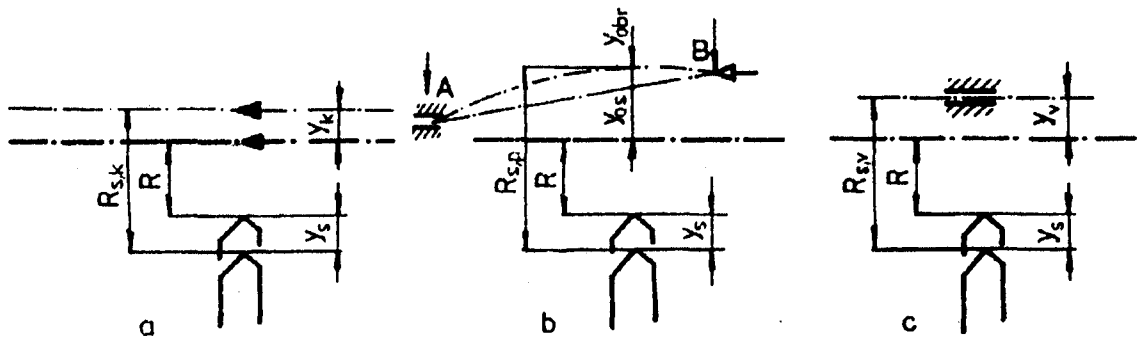
Označme poddajnosti koníka, suportu, vretenníka a obrobku symbolmi c_k, c_s, c_v, c_{obr} .

Rozmer pri koníku (obr. 13.2a). Sila F_p pôsobí naproti podpere. Pre dostatočne poddajný obrobok odtláčenie podpery (hrotu) platí

$$y_k = F_p \cdot c_k$$

a pre odtláčenie suportu

$$y_s = F_p \cdot c_s$$



Obr. 13.2. Schéma pre výpočet skutočných rozmerov hriadeľa podľa obr. 13.1b:
a – pri koníku, b – v prostriedku, c – pri vretenníku

Rozmer v prostriedku obrobku (obr. 13.2b). Reakcie sú $A = B = F_p / 2$. To znamená, že os stroja sa posunie o hodnotu

$$y_{os} = F_p \frac{c_k + c_v}{4}$$

Prehnutie obrobku vypočítame zo známej rovnice

$$y_{obr} = \frac{F_p L^3}{CEI}$$

kde L je vzdialenosť podpier,

C – konštanta; pre upnutie v sklúčovadle $C = 3$, pre upnutie medzi hroty $C = 48$, pre upnutie do sklúčovadla a do hrotu $C = 100$,

E – modul pružnosti obrábaného materiálu,

I – moment zotrvačnosti prierezu hriadeľa.

Ak je sila F_p konštantná, odtláčenie suportu sa nemení. Rozmer R_s v prostriedku obrobku je

$$R_{s,o} = R + y_{os} + y_{obr} + y_s$$

Rozmer pri vretenníku (obr. 13.2c) vypočítame podobne ako pri koníku y_k . Dostaneme

$$y_v = F_p \cdot c_v$$

$$R_{s,v} = R + y_v + y_s$$

Pre tvarovú nepresnosť rozhoduje najväčší a najmenší rozmer R_s .

$$R_{s,max} = \max (R_{s,k}, R_{s,o}, R_{s,v})$$

$$R_{s,min} = \min (R_{s,k}, R_{s,o}, R_{s,v})$$

Tvarová nepresnosť je

$$u_{F_p} = R_{s,max} - R_{s,min}$$

Zvyčajne $c_k > c_y$, preto aj $y_k > y_v$ a tvarová nepresnosť je daná rozdielom $R_s - R_{s,k}$. Ak $F_p = \text{konšt.}$, t.j. prídavok na obrábanie a tvrdosť obrábaného materiálu sú rovnaké pri koniku aj v prostriedku obrobku, potom odtlačenie suportu vyvoláva len rozmerové nepresnosti. Pre tieto podmienky tvarové nepresnosti sú dané rovnicou

$$u_{F_p} = F_p \left(\frac{c_k + c_v}{4} + \frac{L^3}{CEI} - c_k \right) = F_p \cdot U$$

Ak je táto odchýlka kladná, vyrábaný tvar je vypuklý súdok, ak záporná, súdok je vdutý.

Z obdržaného výsledku vyplýva dôležitý poznatok, že tvarovú nepresnosť môžeme vyjadriť ako násobok sily F_p

$$u_{F_p} = F_p \cdot U$$

kde U je súčiniteľ, závislý od tuhosti prvkov sústavy, obrobku a spôsobu jeho upnutia.

13.4.2. Nepresnosti vyvolané teplotnými deformáciami

Tepelnou dilatáciou, úmerne koeficientu teplotnej rozťažnosti, rozmeru a rozdielu teplôt, sa menia rozmery prvkov v systéme SNOP. Odchýlka od pôvodného rozmeru, vyvolaná teplotnou rozťažnosťou je

$$u_t = \alpha \cdot L \cdot (\theta_2 - \theta_1)$$

kde θ_1 je pôvodná teplota,

θ_2 - teplota, pri ktorej stanovíme odchýlku,

α - koeficient teplotnej rozťažnosti,

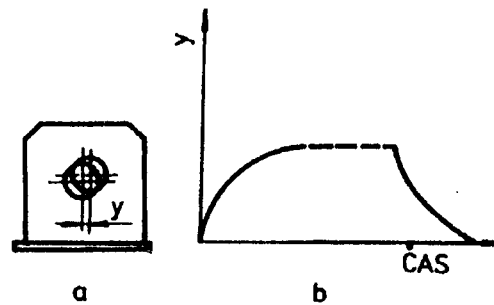
L - uvažovaný rozmer.

Pri jednoduchých (približných) výpočtoch skutočné rozdelenie teplôt nahradíme strednými teplotami. Pri presných výpočtoch uvažujeme skutočné teplotné pole. Zvyčajne používame metódu konečných prvkov.

Uvedieme niekoľko príkladov:

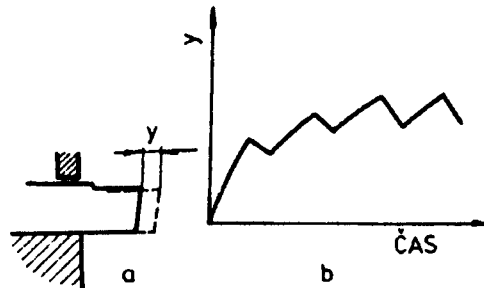
Poloha vretena na obrábacom stroji závisí od teplotného poľa vretenníka. Ohrievaním vretenníka teplom z mechanických strát v prevodoch a ložiskách premiestňuje sa os vretena vzhľadom na lôžko alebo stojan stroja (obr. 13.3a). Po spustení stroja odchýlka skutočnej

a pôvodnej polohy vretena postupne narastá, potom sa ustáľuje (obr. 13.3b). Dosiagnuť stacionárny stav vyžaduje rádovo hodinovú prevádzku.



Obr. 13.3. Teplotná deformácia vretena sústruhu (a) a jej zmena v závislosti od času (b)

Nástroj je zvyčajne zohrievaný bezprostredne teplom, privádzaným z procesu rezania. Teplota telesa nástroja v procese rezania sa postupne zvyšuje, v prestávkach, keď nástroj nereže, sa znižuje (obr. 13.4.). Rovnovážny stav sa dosiahne zvyčajne za niekoľko minút.



Obr. 13.4. Teplotná deformácia noža (a) a jej zmena v závislosti od času pri cyklickom rezaní (b)

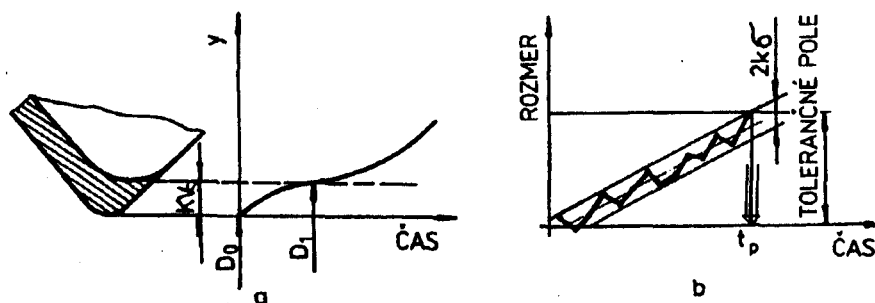
Obrobok sa zohrieva zvyčajne teplom z procesu rezania. Rozmery, ktoré sú presné na zohriatom kuse, pri ochladiení obrobku sa postupne zmenšujú.

Teplotné deformácie stroja, obrobku a nástroja znížime chladením. Konštantná teplota oleja v prevodoch stroja alebo účinné chladenie obrobku a nástroja prakticky plne odstráni teplotné deformácie.

13.4.3. Nepresnosti vyvolané rozmerovým opotrebovaním

Rozmerovým opotrebovaním nástroja (obr. 13.5.) sa znižuje hĺbka odrezávanej vrstvy a postupne sa menia rozmery vyrábanej plochy.

Rozmerové opotrebovanie nástroja vyjadríme štatistickými rovnicami. Z nich vypočítame odchýlky vyrábaného rozmeru od ideálneho.



Obr. 13.5. Rozmerové opotrebovania noža a zmena obrábaného rozmeru D_0 v závislosti od času

13.4.4. Nepresnosti vyvolané vnútornými napätiami

Povrchová vrstva odliatkov a výkovkov vykazuje následkom nerovnomerného chladnutia a deformácií zvyškové napätia. Tieto sú v polovýrobku v rovnováhe. Keď však obrábaním odrežeme povrchovú vrstvu, porušíme túto rovnováhu a súčiastka sa deformuje.

Pre odstránenie odchýlok od ideálneho tvaru, vznikajúceho následkom uvoľnenia vnútorných napätí, odliatky a výkovky podrobíme umelému alebo prirodzenému starnutiu. Túto operáciu zvyčajne zaradíme pred ich obrábaním načisto.

13.4.5. Nepresnosti vyvolané upínacími silami

Upínacie sily pružne deformujú obrobok. Ak je tuhosť obrobku v smere pôsobenia upínacej sily malá, vznikajú veľké deformácie. Plochy, ktoré sme v danom upnutí obrobili, majú žiadaný tvar a vzájomnú polohu k iným plochám iba na upnutom obrobku. Po uvoľnení obrobku z upnutia pružné deformácie zanikajú, materiál sa vráti do pôvodnej polohy. Obrábaním získaný geometrický tvar, ktorý bol na upnutom obrobku správny, sa deformuje.

13.5. ŠTATISTICKÉ MODEL Y NEPRESNOSTI OBRÁBANIA

V technologickom procese malé zmeny prídavku na obrábanie, tvrdosti obrobku, tuhosti stroja, posuvu a pod., vyvolávajú malé zmeny odchýlok od žiadaného tvaru. Preto technologický proces z hľadiska vzniku nepresnosti je spojeným procesom.

Zdroje nepresnosti môžeme rozdeliť na dve skupiny. Jedna skupina zdrojov je viazaná s odchýlkami vlastností polovýrobku x_i , druhá skupina z_i technologickým operátorom, t. j. použitým strojom, nástrojom a prípravkom a podmienkami práce, ako posuv, rezná rýchlosť, hĺbka rezu a pod.

Zdroje nepresnosti x_i a z_i môžeme považovať za vstupy, ktoré sa v konkrétnych podmienkach práce transformujú na výsledné nepresnosti y :

$$y = f_1(x_i) + f_2(z_i)$$

Ak uvažujeme iba jednu vlastnosť obrobku a jeden parameter obrábania, najjednoduchší tvar funkcií $f(x_1)$ a $f(z_1)$ je

$$f_1(x) = a + kx$$

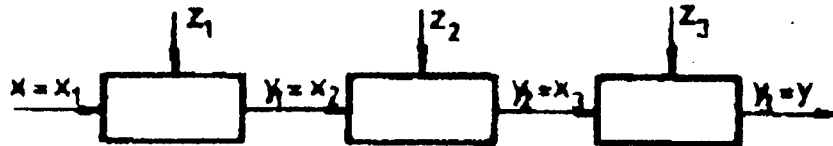
$$f_2(z) = b + qz$$

Výsledná nepresnosť je

$$y = a + b + kx + qz = c + kx + qz$$

Koeficienty c , k , q môžeme stanoviť na základe experimentu. Získame takto štatistickú rovnicu pre výpočet výslednej nepresnosti (napr. ovality, odchýlok od žiadaného rozmeru a pod.) v závislosti od vybranej vlastnosti polovýrobku x a podmienok obrábania z .

Okrem strednej hodnoty nepresnosti možno stanoviť aj smerodajnú odchýlku σ a typ zákona rozloženia náhodnej veličiny. Rovnica strednej hodnoty nepresnosti $y = f(x, z)$, smerodajnej odchýlky $\sigma = g(x, z)$ a typ zákona rozloženia náhodnej veličiny sú štatistickým modelom technologickej operácie z hľadiska nepresnosti obrábania.



Obr. 13.6. Vznik výslednej nepresnosti pri troch operáciách

Ak na seba nadväzuje niekoľko krokov technologickeho postupu, výstup z prvého kroku (operácie) je vstupom do ďalšieho a môžeme vytvoriť reťaz zobrazujúcu vznik výsledných nepresností. Grafické znázornenie väzby parametrov x , y , z pre tri operácie je na obr. 13.6.

Počet analyzovaných vstupov x a z a výstupov y môže byť pochopiteľne ľubovoľný. Metódami matematickej štatistiky, aké sú faktorová analýza, korelačný počet, regresná analýza a pod. môžeme stanoviť rozhodujúce faktory, ktoré vplyvajú na nepresnosti obrábania, a korigovať technologickeý proces alebo navrhnuť jeho úpravy.

13.6. SIMULAČNÉ MODELY NEPRESNOSTI OBRÁBANIA

V predchádzajúcich statiach sme naznačili informatívny postup pri stanovení vplyvu rôznych faktorov na nepresnosti obrábania. Vplyv niektorých faktorov sme vyjadrili fyzikálnymi rovnicami, iných štatistickými (empirickými) rovnicami.

Na základe týchto postupov môžeme vypočítať výslednú nepresnosť obrábania pre zvolené priemerné hodnoty vstupných veličín.

Vlastnosti obrobku (pevnosť materiálu, prídavky na obrábanie) nie sú však konštantné a nemôžeme považovať za konštantné ani všetky parametre obrábania, ako sú napr. upínacie sily, okamžitá poloha vretena a hrotu nástroja vzhľadom na obrobok atď. Všetky tieto parametre sú z hľadiska konkrétnej realizácie technologickej operácie v danom časovom intervale

náhodné veličiny, ktoré majú svoju strednú hodnotu, smerodajnú odchýlku a zákonitosť rozloženia náhodnej veličiny.

Je zrejmé, že máme do činenia s komplexným dynamickým systémom, ktorým môžeme modelovať situáciu. Vychádzame zo štatistických modelov prvkov SNOF a procesov, ktoré vyvolávajú vznik nepresností. Pre každý výpočtový cyklus metódou náhodného výberu určíme konkrétne hodnoty parametrov. Niektoré z nich môžu byť aj funkciou času. Potom z fyzikálnych alebo štatistických rovníc vypočítame výsledné nepresnosti súčastky v danom výpočtovom cykle.

Pri dostatočnom počte opakovaní výpočtových cyklov môžeme vyhodnotiť štatistické charakteristiky výsledných nepresností a vplyv vstupných údajov (x_i , z_i) na ich hodnoty.

Simulačný model môžeme využiť aj na optimalizáciu technologického postupu z hľadiska nepresnosti obrábania. Meníme vlastnosti prvkov systému (strojov, prípravkov, nástrojov, polovýrobných) a použité pracovné podmienky (posuv, reznú rýchlosť, hĺbku rezu, pracovné prostredie). Výpočtom získame obraz o vplyve jednotlivých faktorov na volené ukazovatele procesu, napr. na výslednú nepresnosť, produktivitu práce, náklady na obrábanie a pod.

SYNTÉZA

14. ZÁKLADY OPTIMALIZÁCIE PARAMETROV OBRÁBANIA

14.1. PARAMETRE OBRÁBANIA A ICH VLASTNOSTI

Pojmom parametre obrábania rozumieme:

1. prvky systému obrábania SNOP (stroje, prípravky, nástroje, polovýrobky),
2. parametre týchto prvkov (výkon, rozmery, stupeň mechanizácie a automatizácie, geometriu a rozmery nástrojov, druh rezného materiálu, druh pracovného prostredia),
3. parametre vlastného procesu rezania (rezná rýchlosť, posuv, hĺbka rezu).

Parametre obrábania rozdeľujeme na spojité a nespojité.

Význam rozdelenia parametrov obrábania na spojité a nespojité je v tom, že spojité parametre, ktoré sú k dispozícii vyjadrujeme pomocou relácií (teda nekonečnými množinami). Nespojité (diskrétno) parametre sú prvkami konečných množín, definujeme ich vymenovaním (zoznamom).

14.2. DOSTUPNÉ, VYHOVUJÚCE A PRÍPUSTNÉ RIEŠENIA ÚLOHY

Riešenie každej technologickej (ale aj inej) úlohy si môžeme predstaviť ako kombináciu hľadaných parametrov:

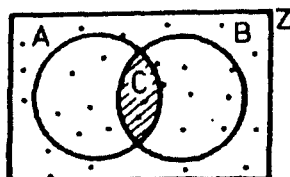
$$K_i = (x_{1,i}, x_{2,i}, \dots, x_{n,i})$$

kde K_i je i -tá kombinácia parametrov obrábania,

$x_{j,i}$ – parametre obrábania,

n – počet hľadaných parametrov.

Pochopiteľne nie všetky kombinácie musia mať zmysel. Kombinácie (sústruh, strojový zverák, honovacia hlava) alebo vrtáčka s kuželom vretena M2, vrták s kuželom M4, zrejme nebudú mať zmysel.



Obr. 14.1. Vzájomný vzťah základnej množiny Z, množiny dostupných A, vyhovujúcich B a prípustných riešení C úlohy

Nech všetky zmysluplné kombinácie hľadaných parametrov sú prvkami základnej množiny Z (obr. 14.1.). Kombinácie, ktoré sú k dispozícii alebo sú dostupné, nech sú prvkami množiny A .

Kombinácie hľadaných parametrov obrábania, ktoré zabezpečia žiadané vlastnosti výrobku (napr. tvar, rozmery, tolerancia, drsnosť povrchu atď.), nech sú prvkami množiny vyhovujúcich kombinácií B .

V konkrétnych podmienkach môžeme použiť vo výrobe len tie kombinácie parametrov, ktoré sú prvkami prieniku množín A, B .

$$A \cap B = C$$

Tieto kombinácie predstavujú prípustné riešenie danej technicko-inžinierskej úlohy.

Množiny A, B môžu mať $2^3 = 8$ vzájomných vzťahov. Z hľadiska praxe majú význam len tie, pri ktorých $C \neq \emptyset$, t. j. úloha má aspoň jedno prípustné riešenie. Ak počet prvkov množiny C

$$m(C) = 0,$$

potom úloha nemá prípustné riešenie. V tomto prípade z hľadiska praxe treba rozšíriť základné množiny o zmysluplné kombinácie ich parametrov, aby úloha mala aspoň jedno prípustné riešenie. Ak

$$m(C) = 1,$$

potom má úloha práve jedno prípustné riešenie, ak

$$m(C) > 1,$$

nastane situácia, ktorú voláme rozhodovaním. Treba rozhodnúť o tom, ktoré z prípustných riešení použijeme.

14.3. OPTIMÁLNE RIEŠENIE, CIELOVÉ FUNKCIE

V rozhodovacej situácii existuje možnosť výberu aspoň z dvoch prípustných riešení. Je prirodzenou snahou si vybrať lepšie riešenie. Vyžaduje to posúdiť (ohodnotiť) kvalitu prípustných riešení.

Prípustné riešenia sú reprezentované kombináciami hľadaných parametrov.

$$K_i = (x_{1,i}, x_{2,i}, \dots, x_{n,i})$$

Kvalitu prípustných riešení môžeme ohodnotiť z rôznych hľadísk. Tieto zvyčajne vyjadrujú určité globálne ciele výroby, ako napríklad

- minimálne náklady na nástroje,
- minimálne náklady na výrobu (obrábanie),
- maximálny zisk (rýchlosť obrátových prostriedkov),
- maximálna produktivita a pod.

Postupujeme tak, že zvolený cieľ vyjadríme ako funkciu hľadaných parametrov úlohy

$$y = (x_1, x_2, \dots, x_n)$$

Preto funkciu y voláme cieľovou funkciou. Prípustné riešenie, pri ktorom volená cieľová funkcia dosahuje žiadaný extrém (minimum alebo maximum), je optimálne riešenie.

Výpočet globálnych cieľov výroby, ako sú náklady, zisk, produktivita, je často zdĺhavý a nie je z hľadiska optimalizácie ani potrebný. Ide nám nie o hodnotu extrému cieľovej funkcie, ale o optimálnu kombináciu hľadaných parametrov úlohy. Preto globálne cieľové funkcie nahradíme jednoduchšími. Získame ich matematickou alebo logickou analýzou vplyvu hľadaných parametrov na volenú cieľovú funkciu. Napr. pri optimalizácii posuvu (či už z hľadiska nákladov na obrábanie alebo produktivity) analýza vedie k cieľovej funkcii $y = f(\max!)$.

14.3.1. Dôležitosť a priorita cieľových funkcií

Ak parametre sú nespojité, často používame aj niekoľko cieľových funkcií (napr. počet druhov strojov, počet druhov nástrojov atď.). V takomto prípade treba rozhodnúť o dôležitosti alebo o prioritě (hierarchii) cieľových funkcií.

Majme k čiastkových cieľových funkcií y_1, y_2, \dots, y_k . Výslednú cieľovú funkciu si môžeme predstaviť v tvare polynómu

$$y = f(y_1, y_2, \dots, y_k)$$

Ak si zvolíme polynóm prvého stupňa, výsledná cieľová funkcia má tvar

$$y = a_1 \cdot y_1 + a_2 \cdot y_2 + \dots + a_k \cdot y_k$$

kde a_1, a_2, \dots, a_k sú koeficienty, voláme ich aj dôležitosťou.

Zvyčajne volíme $a_i = 1$

Inak postupujeme ak cieľovým funkciám prisudzujeme určitú prioritu (hierarchiu). V tomto prípade pomocou prvej cieľovej funkcie určíme množinu C_1 , ako časť množiny C :

$$C_1 \subset C$$

Prvkami množiny C_1 budú všetky prípustné riešenia, ktoré majú niektorú vlastnosť, napr. že produktivita obrábania dosahuje určitú minimálnu hodnotu, alebo, že počet použitých strojov je minimálny. Ak počet prvkov množiny C_1 je väčší ako jeden, pomocou ďalšej cieľovej funkcie (ktorá je v poradí druhá) stanovíme množinu C_2 , ktorá je časťou množiny C_1 . Takto postupujeme, kým nevyčerpáme všetky cieľové funkcie, alebo kým sa počet prvkov množiny C_i nebude rovnať jednej.

Treba ešte poukázať na to, že voľba cieľovej funkcie, priority alebo dôležitosti má subjektívny charakter. Od riešiteľa úlohy závisí, aké ciele voleným riešením dosiahnuť. Pochopiteľne tieto ciele môžu byť direktívne predpísané plánom alebo výsledkom vyšších rozhodovacích procesov.

14.4. VŠEOBECNÝ POSTUP OPTIMALIZÁCIE

Všeobecný postup optimalizácie technologických parametrov pozostáva z týchto krokov:

1. Definícia základnej množiny Z optimalizovaných parametrov.
2. Definícia množiny dostupných kombinácií hľadaných parametrov A .
3. Definícia vyhovujúcich kombinácií hľadaných parametrov B .
4. Nájdenie prípustných riešení úlohy ako prienik množín A, B .
5. Určenie počtu prvkov množiny prípustných riešení C .
6. Rozhodnutie o ďalšom postupe riešenia. Ak počet prvkov množiny C je $m(C) \leq 1$, úloha nemá riešenie, alebo má práve jedno riešenie. Výpočet ukončíme. Ak počet prvkov množiny C je $m(C) > 1$, potom máme aspoň dve prípustné riešenia a pokračujeme v riešení.
7. Voľba cieľovej funkcie a stanovenie jej žiadaného extrému. Ak máme viac cieľových funkcií, treba stanoviť ich dôležitosť (hierarchiu).
8. Určenie optimálneho riešenia, t. j. takej kombinácie prípustných parametrov, ktorá zabezpečí žiadaný extrém cieľovej funkcie.

15. OPTIMALIZÁCIA PARAMETROV OBRÁBANIA

Pri optimalizácii parametrov obrábania využívame poznatky, ktoré sme získali pri analýze procesu rezania. Východiskom k optimalizácii sú štatistické modely (empirické rovnice).

Výkonové obmedzenia zatiaľ nemôžeme uplatniť, pretože nepoznáme otáčky za minútu, teda ani rezné rýchlosti.

Graf práce nástrojov môžeme zobrazit' aj číslcovým modelom. Číslcový model práce nástrojov je matica, v ktorej význam riadkov je poradové číslo nástroja a význam stĺpcov je čas alebo počet otáčok zodpovedajúci začiatku a ukončeniu práce (pozri obr. 15.3c).

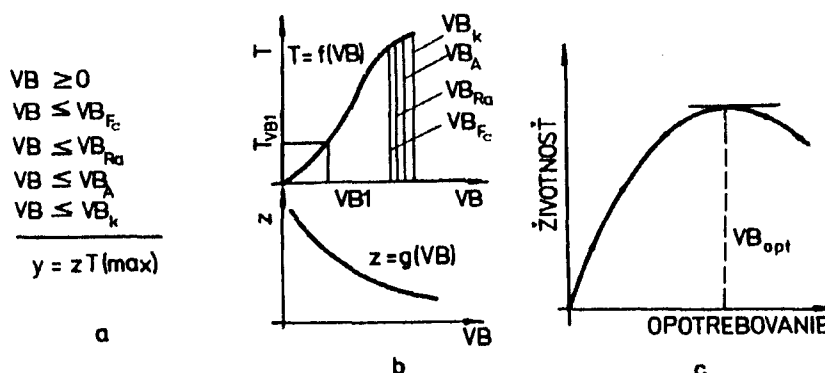
15.1. OPTIMALIZÁCIA KRITÉRIA OTUPENIA NÁSTROJA

Voľba kritéria otupenia má prioritný význam z hľadiska stanovenia trvanlivosti reznej hrany. V podstate ide o optimalizáciu jedinej spojitej veličiny: šírky plošky opotrebovania na chrbte VB alebo hĺbky žliabku KT opotrebovania na čele.

Opotrebovanie na chrbte (pod hrotom) je dobre viditeľné a merateľné. Ak šírka plošky opotrebovania dosahuje zvolenú hodnotu, nástroj považujeme za otupený. Pretože optimalizovaná veličina je spojitá, množina prípustných opotrebovaní je vymedzená intervalmi. Dolná hranica intervalu je 0, horná hranica prípustných hodnôt závisí od limitných opotrebovaní VB_{Fc} , VB_{Ra} , VB_A a VB_k . Interval prípustných opotrebovaní je daný riešením sústavy nerovnic (obr. 15.1.):

$$VB_{p,\min} = 0$$

$$VB_{p,\max} = \min(VB_{Fc}, VB_{Ra}, VB_A, VB_k)$$



Obr. 15.1. Optimalizácia opotrebovania nástroja
a – matematický model, b – diagramy ku graficko analytickej optimalizácii, c – závislosť životnosti a opotrebovania

Ak sústavu nerovnic doplníme cieľovou funkciou a vyznačíme jej žiadaný extrém, dostaneme model pre optimalizáciu opotrebovania nástroja. Pri optimalizácii opotrebovania zvyčajne si zvolíme cieľovú funkciu životnosť nástroja. Žiadaný extrém cieľovej funkcie je maximum. To sme naznačili na obr. 15.1a pod sústavou nerovnic.

Z definície trvanlivosti vyplýva, že trvanlivosť je funkciou opotrebovania, t. j. $T = f(VB)$. Podobne je to aj s počtom nasadení nástroja: $z = g(VB)$. Pretože sme tieto funkcie analyticky nevyjadrili, optimum (VB, pri ktorej životnosť je maximálna) stanovíme graficky analytickou metódou.

Na základe časového priebehu opotrebovania postupne stanovíme pre jednotlivé opotrebovania z intervalu trvanlivosť reznej hrany, počet nasadení a životnosť nástroja. Nakreslíme graf $Z = f_0(VB)$ (obr. 15.1b) a z neho odčítame optimálne opotrebovanie, t. j. opotrebovanie VB_{opt} , pri ktorom je životnosť maximálna.

15.2. ŠTRUKTÚRA OPERÁCIÍ Z HĽADISKA PRÁCE NÁSTROJOV

Optimálna hodnota posuvu a reznej rýchlosti závisí od toho, aká je štruktúra operácie z hľadiska práce nástroja. Ideálne by bolo, keby pri zmene podmienok (priemeru, hĺbky rezu, posuvu) bola použitá vhodná rezná rýchlosť. Zmena otáčok je však viazaná stratovými časmi.

Zavedieme pojem úseku ako časti technologického postupu, v ktorej medzi parametrami rezania je určitá väzba, napr. konštantné otáčky, konštantná rýchlosť posuvu alebo výrobný takt. Časť úseku s konštantnými parametrami nazveme ako záber.

Optimalizáciu rezných podmienok pri obrábaní súčiastok môžeme potom rozčleniť na čiastkové úlohy optimalizácie rezných podmienok pre jednotlivé takto definované úseky, resp. zábery.

Z hľadiska práce nástroja môžeme rozlíšiť tieto štruktúry operácií:

- jednonástrojové obrábanie:

1. konštantné podmienky práce,
2. menlivé podmienky práce,

- viacnástrojové obrábanie:

1. jednovretenové obrábanie,
2. viacvretenové obrábanie
 - a) s viazaným prevodom vretien,
 - b) so spoločným posuvom,
 - c) s rovnakou dĺžkou taktu.

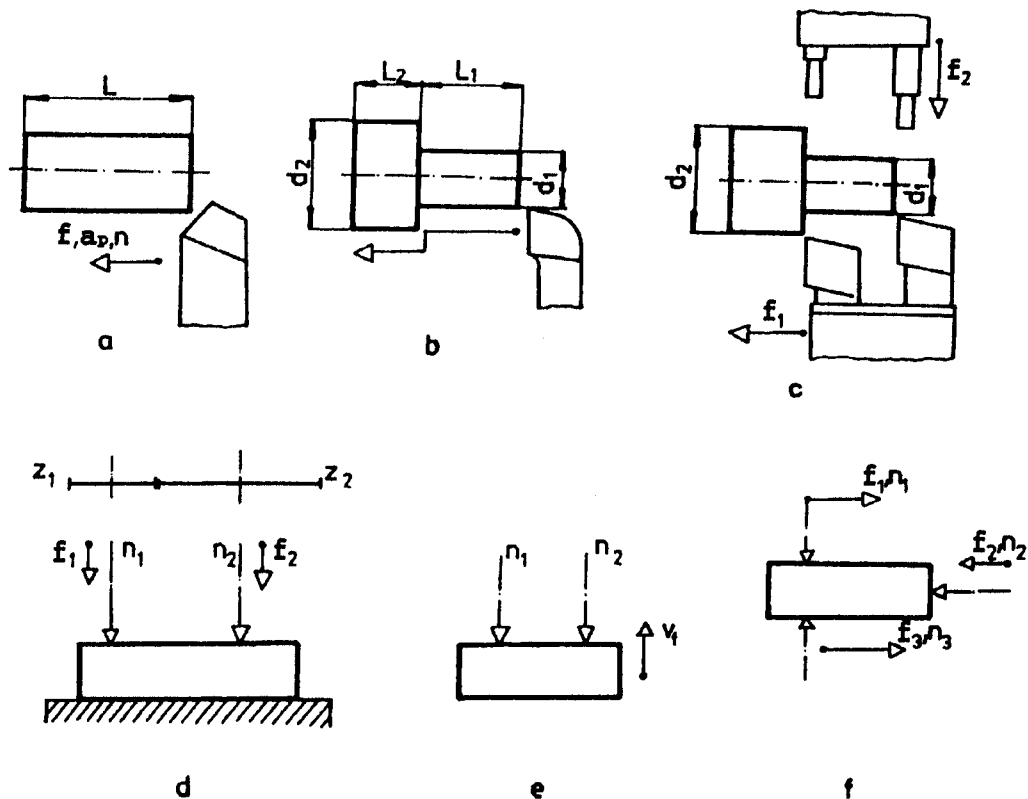
Pri jednonástrojovom obrábaní s konštantnými podmienkami práce (obr. 15.2a) v dĺžke strojového posuvu L sú konštantné rezná rýchlosť, hĺbka rezu a posuv.

Ak sa podmienky práce menia (obr. 15.2b), v jednotlivých záberoch pracujeme s rôznou reznou rýchlosťou, hĺbkou rezu a posuvom. Ak otáčky vretena sú rovnaké, rýchlosti sú viazané podmienkou $v_1 / v_2 = d_1 / d_2$.

Pri jednovretenovom obrábaní viacerými nástrojmi (obr. 15.2c) jednotlivé nástroje pracujú rôznymi reznými rýchlosťami a hĺbkami rezu. Posuv nástrojov na otáčku je pre všetky nástroje v jednom superte rovnaký. Rezné rýchlosti majú pomer $v_1 / v_2 = d_1 / d_2$. Pri viacvretenovom obrábaní s viazaným prevodom vretien (obr. 15.2d) sú rezná rýchlosť, hĺbka rezu a posuv pre jednotlivé vretená rôzne. Otáčky vretena sú viazané podmienkou

$$n_1 \cdot z_1 = n_2 \cdot z_2$$

kde z_1, z_2 je počet zubov prevodových ozubených kolies.



Obr. 15.2. Štruktúry operácií: 1. jednonástrojové a jednovretenové: a – s konštantnými podmienkami, b – s menlivými podmienkami, 2. viacnástrojové: c – jednovretenové, d – až f – viacvretenové: d – s mechanicky viazaným prevodom, e – so spoločným posuvom, f – s rovnakým výrobným taktom

Pri viacvretenovom obrábaní so spoločným posuvom (obr. 15.2e) otáčky a posuvy vretien sú viazané reláciou

$$n_1 \cdot f_1 = n_2 \cdot f_2$$

Ak ide o viacnástrojové obrábanie s rovnakou dĺžkou taktu (obr. 15.2f), pre všetky vretená platí:

$$\frac{L_1}{n_1 f_1} = \frac{L_2}{n_2 f_2} = \frac{L_3}{n_3 f_3}$$

kde L_1, L_2, L_3 sú dráhy strojového posuvu vretien.

Táto podmienka vyjadruje rovnosť času strojových posuvov jednotlivých vretien. Vretená nemusia byť umiestnené na jednom stroji, môže to byť aj niekoľko strojov, ktoré sú však viazané pevným taktom. Tento prípad zodpovedá výrobnej linke s viazaným taktom.

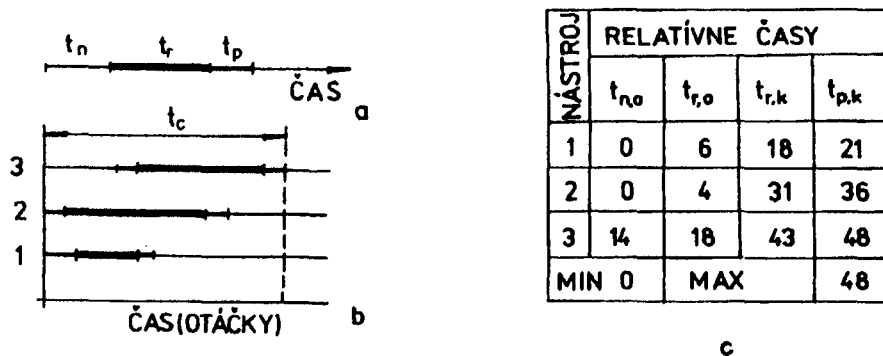
15.2.1. Graf práce nástrojov

Vyjadruje spoločnú prácu viacerých nástrojov alebo postupnú prácu jedného nástroja v rôznych podmienkach. Časovú nadväznosť a vzťahy zahrnieme v grafe práce nástrojov.

V grafe práce nástrojov vynesieme na vodorovnú os čas. Čas nábehu, čas rezania a čas prebehu nástroja zobrazujeme vodorovnými úsečkami.

Pre jednonástrojové obrábanie s konštantnými podmienkami (obr. 15.3a) vynesieme všetky tieto hodnoty na polpriamku.

Pri viacnástrojovom obrábaní použijeme v grafe nástrojov toľko polpriamok, koľko je počet nástrojov. Čas, ktorý uplynie od nábehu prvého nástroja k ukončeniu výbehu posledného nástroja, je tzv. čas cyklu t_c (obr. 15.3b).



Obr. 15.3. Graf práce nástrojov: a – jednonástrojové obrábanie s konštantnými podmienkami, b – viacnástrojové obrábanie, c – číslcový model grafu (obr. 15.3b), $t_{n,o}$ – čas nábehu, $t_{r,o}$ – čas začiatku rezania, $t_{r,k}$ – čas ukončenia rezania, $t_{p,k}$ – čas ukončenia prebehu nástroja

Graf nástroja ľahko zostrojíme, ak poznáme časy nábehu, časy rezania a časy prebehu. Tieto hodnoty však vieme určiť až po stanovení otáčok a posuvov jednotlivých nástrojov. Preto postupujeme tak, že najprv stanovíme dovolené posuvy (postup uvedieme neskôr) a namiesto času vynášame úmernú veličinu, napr. počet otáčok vretena:

$$N = L / f$$

kde L je dĺžka posuvu nástroja,
 f – posuv.

Podčiarkneme, že ide o počet otáčok vretena (čo je ekvivalent dráhy), nie o otáčky vretena za minútu (čo vyjadruje rýchlosť).

Ak ide o viacvretenové obrábanie, treba počet otáčok vretien prepočítať. Jedno z vretien si zvolíme za základné a počet otáčok ostatných vretien vyjadríme počtom otáčok základného vretena. Použijeme na to už stanovené relácie medzi otáčkami vretena za minútu.

Dostaneme
 pre viazaný prevod

$$N_z = N_i \frac{z_i}{z_z}$$

pre rovnaký minútový posuv

$$N_z = N_i \frac{f_i}{f_z}$$

pre rovnaký takt

$$N_z = N_i \frac{L_z \cdot f_i}{L_i \cdot f_z}$$

kde sme veličiny pre základné vreteno označili indexom z, pre i-té vreteno indexom i.

Graf práce nástrojov nemôžeme ľubovoľne voliť. Musíme rešpektovať poradie elementárnych operácií v technologickom postupe, a obmedzenia, ktoré vyplývajú zo súčasnej práce nástrojov a prípustných maximálnych síl, točivých momentov a výkonov rezania.

Výkonové obmedzenie zatiaľ nemôžeme uplatniť, pretože nepoznáme otáčky za minútu, teda ani rezné rýchlosti.

Graf práce nástrojov môžeme zobrazit' aj číslícovým modelom. Číslícový model práce nástrojov je matica (obr. 15.3c) v ktorej význam riadkov je poradie nástroja a význam stĺpcov je čas alebo počet otáčok zodpovedajúci začiatku a ukončeniu práce nástroja.

15.2.2. Súčiniteľ času rezania

Súčiniteľ času rezania vyjadruje podiel času práce nástroja z celkového času jeho nasadenia. Pre jednonástrojové obrábanie s konštantnými podmienkami je daný pomerom

$$\lambda = L_r / L = N_r / N$$

kde N_r , N je počet otáčok vretena

Pre ostatné štruktúry obrábania určíme súčiniteľ času rezania pre i-tý nástroj ako podiel času rezania i-tého nástroja k času cyklu:

$$\lambda_i = \frac{t_{r,i}}{t_c} = \frac{N_{r,i}}{N_c}$$

15.3. MODEL Y PRE OPTIMALIZÁCIU PARAMETROV REZANIA

Modely pre optimalizáciu parametrov rezania pozostávajú z oblasti prípustných riešení, cieľovej funkcie a označenia jej žiadaného extrému. Je to súbor rovníc a nerovnic, ktoré určujú optimálne parametre rezania.

15.3.1. Vymedzenie oblasti prípustných riešení

Ukážeme, ako vymedzíme oblasť použiteľných (prípustných) posuvov a rezných rýchlostí. Podmienky niekedy limitujú len posuv alebo reznú rýchlosť, niekedy oboje. V grafe (pozri obr. 15.5.) sa to prejaví čiarami rovnobežnými alebo šikmými k osiam.

15.3.1.1. Prípustné posuvy

Optimalizovaný parameter nech je posuv. Ostatné parametre sú konštantné. Základná množina optimalizovaného parametra je daná posuvmi väčšími ako nula:

$$Z = \{f \in E_1, f > 0\}$$

Stanovíme posuvy, ktoré sú k dispozícii. Sú vymedzené týmito reláciami:

1. Posuvy nastaviteľné na danom stroji sú dané reláciami:

$$f \geq f_{\min}$$

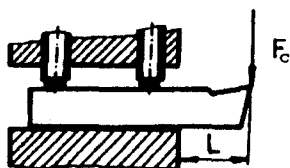
$$f \leq f_{\max}$$

kde f_{\min} , f_{\max} sú minimálne a maximálne posuvy stroja. Avšak prípustné posuvy sú zhora obmedzené aj ďalšími hľadiskami. Sú to tieto:

2. Maximálna zložka reznej sily F_c , F_p , F_f z hľadiska konštrukcie stroja. Pretože obrábacie stroje sú konštruované pre zvyčajný pomer týchto zložiek 1:0,4:0,2, stačí obmedziť posuv z hľadiska hlavnej zložky reznej sily. Pre konkrétne podmienky, t. j. hodnotu $F_{c,dov}$, hĺbku rezu a_p a konštanty empirickej rovnice reznej sily C_{F_c} , x_{F_c} a y_{F_c} dostaneme

$$f \leq \left(\frac{F_{c,dov}}{C_{F_c} \cdot a_p^{x_{F_c}}} \right)^{\frac{1}{y_{F_c}}}$$

kde pravá strana pre konkrétne podmienky je konštanta (číselná hodnota).



Obr. 15.4. Ohybové namáhanie noža zložkou F_c

3. Maximálna zložka reznej sily z hľadiska nástroja a jeho časti. Ak uvažujeme iba zložku F_c a sústružnícky nôž ako votknutý nosník s vyložením L (obr. 15.4.), sila F_c vyvolá ohybový moment $M = F_c \cdot L$. Napätie v telese nástroja s momentom odporu prierezu W

$$\sigma = M / W$$

nemá prekročiť dovolenú hodnotu σ_{dov} , t. j. $\sigma \leq \sigma_{dov}$

Z tejto podmienky dostaneme

$$\sigma_{dov} \geq C_{Fc} a_p^{x_{Fc}} f^{y_{Fc}} L / W$$

z čoho hlavná zložka reznej sily dovolená z hľadiska nástroja je

$$F_{c_{dov}} \geq \sigma_{dov} W / L$$

Analogickým postupom ako v bode 2 dostaneme pre konkrétne podmienky pre posuv

$$f \leq \left(\frac{F_{c_{dov,n}}}{C_{Fc} a_p^{x_{Fc}}} \right)^{\frac{1}{y_c}}$$

4. Výkon elektromotora stroja pri ostatných konštantných podmienkach, vrátane reznej rýchlosti, tiež obmedzuje zložku reznej sily F_c . Pretože $P = F_c \cdot v$, dovolená zložka hlavnej reznej sily z hľadiska výkonu elektromotora je

$$F_{c_{dov,p}} = \frac{P\eta}{v}$$

kde η je účinnosť prevodových mechanizmov stroja. Horná hranica posuvu je pre konkrétne podmienky vymedzená podobne ako v bode 2 alebo 3.

5. Trvanlivosť reznej hrany tiež obmedzuje použiteľnú hodnotu posuvov. Pretože

$$T = \frac{C_T}{v^m a_p^{x_T} f^{y_T}}$$

pre konkrétne podmienky a trvanlivosť T dostaneme závislosť $f = f(v_c)$ v tvare

$$f \leq \left(\frac{C_T}{v^m a_p^{x_T} T} \right)^{\frac{1}{y_T}}$$

Podmienkami 1 až 5 sme definovali množinu posuvov, ktoré sú použiteľné, teda množinu A. Mohli by sme nájsť aj ďalšie obmedzujúce podmienky, napr. z hľadiska tvarovania triesky, vzniku chvenia atď. Počet obmedzujúcich podmienok nie je však účelné veľmi rozširovať, pretože tým rastie zložitosť matematického modelu a čas potrebný na jeho riešenie.

Množina vyhovujúcich posuvov B je vymedzená posuvmi, pri ktorých dosahujeme žiadajú akosť vyrábanej plochy súčiastky.

6. Posuv z hľadiska drsnosti povrchu. Ak štatistický model drsnosti má napr. tvar

$$Ra = C_{Ra} f^{y_{Ra}}$$

a dovolená (výkresom predpísaná) drsnosť je Ra_{dov} , potom prípustný posuv z hľadiska drsnosti je

$$f \leq \left(\frac{Ra_{dov}}{C_{Ra}} \right)^{\frac{1}{y_{Ra}}}$$

7. V kapitole o nepresnostiach obrábania sme ukázali, že tvarové odchýlky možno vyjadriť rovnicou

$$u_{F_p} = F_p \cdot U$$

kde U je konštanta závislá od upnutia a tuhosti obrobku. Ak je hodnota tvarovej nepresnosti limitovaná, t. j. je známa jej maximálna prípustná hodnota $u_{F_p, dov}$, musí platiť

$$u_{F_p, dov} \geq F_p \cdot U \quad \text{t. j.} \quad F_p \geq \frac{u_{F_p, dov}}{U}$$

Pretože $F_p \geq C_{F_p} a_p^{x_{F_p}} f^{y_{F_p}}$, prípustný posuv z hľadiska nepresnosti obrábania je

$$f \leq \left(\frac{u_{F_p, dov}}{U C_{F_p} a_p^{x_{F_p}}} \right)^{\frac{1}{y_{F_p}}}$$

Podmienkami 6 až 7 sme vymedzili množinu vyhovujúcich posuvov B . Všetky podmienky 1 až 7 vymedzujú množinu prípustných posuvov C_f .

Niektoré z posuvov obmedzili oblasť prípustných riešení C_f zhora, iné zdola. Hornú hranicu dostaneme riešením rovnice

$$F_{hm} = \min (f_i) \text{ pre } i = 1 \dots r, f \leq a_i$$

dolná hranica je

$$f_{dm} = \max (f_j) \text{ pre } i = 1 \dots q, f \geq b_j$$

kde a_i, b_j sú pravé strany nerovnic.

Množina prípustných posuvov C_f je definovaná takto:

$$C_f = \{f \in E_1 : f \leq f_{hm} \wedge f \geq f_{dm}\}$$

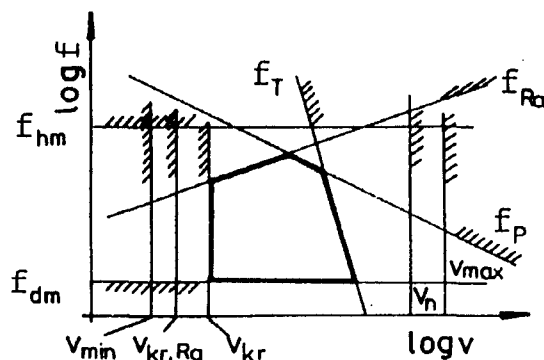
Táto množina môže byť prázdna, jednoprvková, konečná alebo nekonečná. Ak množina C_f nie je prázdna, najväčší posuv voláme technologicky dovoleným najväčším (alebo jednoducho optimálnym) posuvom.

15.3.1.2. Prípustné rezné rýchlosti

Oblasť prípustných rezných rýchlostí vymedzíme analogicky ako oblasť prípustných posuvov.

V ďalšom predpokladáme, že optimalizujeme nielen reznú rýchlosť, ale aj posuv.

Množina prípustných kombinácií (v_c , f) bude časťou karteziánskeho súčinu základnej množiny posuvov a rezných rýchlostí, môžeme ju znázorniť v grafe $f - v$ (obr. 15.5.). Prípustné posuvy sú označené čiarami f_{dm} a f_{hm} .



Obr. 15.5. Oblasť prípustných kombinácií (f , v_c)

1. Minimálna a maximálna realizovateľná rezná rýchlosť z hľadiska stroja a priemeru obrábanej plochy alebo nástroja d sú dané reláciami

$$v \geq v_{\min} = \frac{\pi d n_{\min}}{1000}$$

$$v \leq v_{\max} = \frac{\pi d n_{\max}}{1000}$$

2. Z hľadiska prípustnej veľkosti odstredivých síl účinkujúcich na prípravok, obrobok, únosnosti podpier (lunety) obrobku, môžeme vypočítať maximálne dovolené otáčky n_u . Konkrétne otáčky môžu byť $n \leq n_u$ a rezná rýchlosť pre daný priemer d musí vyhovovať podmienke

$$v \leq v_u = \frac{\pi d n_u}{1000}$$

3. Výkon elektromotora závisí od posuvu a reznej rýchlosti. Použiteľné sú tie kombinácie (f , v) pre ktoré platí:

$$v \cdot f^{y_{Fc}} \leq \frac{P \cdot \eta}{C_{Fc} \cdot a_p^{x_{Fc}}}$$

Pravá strana relácie je konštanta. Ak konštantu označíme symbolom C_1 potom pre použiteľné posuvy platí rovnica

$$f_p \leq \left(\frac{C_1}{v} \right)^{\frac{1}{y_{Fc}}}$$

Na obr. 15.5. je to oblasť pod čiarou f_p .

4. Z hľadiska trvanlivosti reznej hrany použitého nástroja dostaneme podobnú reláciu

$$v^m f^{y_r} \leq \frac{C_T}{a_p^{y_r} T} = C_2$$

a pre posuvy použiteľné z hľadiska trvanlivosti T platí:

$$f_T \leq \left(\frac{C_2}{v^m} \right)^{\frac{1}{y_r}}$$

Na obr. 15.5. je to oblasť od čiary f_T naľavo.

5. Pretože závislosť $T - v$ je definovaná analytickou rovnicou len pre určitý interval rezných rýchlostí $v_1 \leq v \leq v_2$, aj túto podmienku treba zahrnúť do vzťahov, ktoré vymedzujú oblasť prípustných rezných rýchlostí. Dolnú hranicu intervalu platnosti $T - v$ závislosti niekedy (nie celkom presne) označíme aj ako kritickú (minimálnu) reznú rýchlosť. Potom relácia

$$v_{kr} \leq v$$

obmedzuje oblasť použiteľných rezných rýchlostí zdola.

Podmienkami 1 až 5 sme definovali množinu rezných rýchlostí, ktoré sú k dispozícii.

6. Drsnosť závisí od posuvu a reznej rýchlosti, preto posuvy dovolené z hľadiska drsnosti povrchu budú (pre volenú reznú rýchlosť) pod čiarou f_{Ra} (obr. 15.5.).

Všetky uvedené podmienky vymedzujú množinu prípustných kombinácií (f, v) . Na obr. 15.5. je to päťuholník so silne vyznačenými hranami.

15.3.2. Cieľové funkcie

Z prípustných kombinácií (f, v_c) optimálne riešenie si vyberieme pomocou cieľových funkcií. Jednotlivé kombinácie ohodnotíme hodnotou cieľovej funkcie a za optimálne považujeme kombinácie s extrémom volenej cieľovej funkcie. Pri optimalizácii rezných podmienok najčastejšie používame cieľové funkcie ako sú náklady na nástroje, náklady na obrábanie a produktivita obrábania. Získané extrémny sú minimom alebo maximom.

Zložkami týchto cieľových funkcií sú strojový čas, čas rezania, náklady na minútu práce nástroja, čas výmeny nástrojov a vedľajšie časy. Ukážeme ich výpočet.

Strojový čas vypočítame ako podiel dráhy a rýchlosti posuvu:

$$t_{str} = L / v_f$$

kde L je dráha strojového posuvu [mm],

v_f – rýchlosť posuvu; $v_f = f \cdot n$, kde

f – posuv na otáčku [mm],

n – otáčky vretena za minútu.

Čas rezania nástroja vypočítame analogicky, namiesto dráhy strojového posuvu však uvažujeme iba jej časť, dráhu strojového posuvu pri rezaní

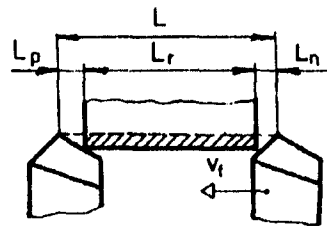
$$t_r = L_r / v_f$$

Úlohou je stanoviť hodnoty parametrov obrábania na danom výrobnom zariadení tak, aby vyrábané plochy mali predpísanú akosť a súčasne aby boli globálne ciele výroby maximálnou mierou splnené.

Úvodom do optimalizácie podmienok obrábania ukážeme postup pri optimalizácii kritéria otupenia nástroja.

Medzi dráhou strojového posuvu, dráhou rezania, nábehom L_n a prebehom L_p nástroja je vzťah (obr. 15.6.).

$$L = L_n + L_r + L_p$$



Obr. 15.6. Dĺžka dráhy strojového posuvu L , nábehu L_n , rezania L_r a prebehu L_p nástroja

Náklady na jedno nasadenie nástroja (pre jednu trvanlivosť reznej hrany) B sú súčtom troch zložiek:

$$B = a + b + c$$

kde a je podiel ceny nástroja C a počtu nasadení z : $a = C / z$,

b – náklady na jedno ostrenie alebo obnovu nástroja pri ostrení (pri vymeniteľných platničkách sú to zodpovedajúce náklady na nasadenie ďalšej reznej hrany platničky), je to súčin času ostrenia a mzdy brusiča s réziou, $b = t_{\text{ostr}} (\text{mzda} + \text{réžia})$,

c – náklady na jednu výmenu nástroja.

Náklady na jednu výmenu nástroja sú:

$$c = t_{\text{vým}} \cdot E$$

kde $t_{\text{vým}}$ je čas výmeny nástroja, vrátane jeho nastavenia, prípadne aj prestavenia v min,

E – náklady na minútu práce stroja. Má tieto zložky: odpis stroja, podiel nákladov na priestor, údržbu, prevádzku stroja a mzda pracovníka.

Náklady na minútu práce nástroja vypočítame ako podiel nákladov na jedno nasadenie nástroja a trvanlivosti reznej hrany:

$$A = B / T$$

Vedľajšie časy zahŕňajú čas výmeny obrobku, časy na nastavenie nástroja na žiadaný rozmer, podiel času prípravy a ukončenia práce. Vedľajšie časy dostaneme, ak z kusového času t_k odpočítame strojový čas a podiel času výmeny nástroja:

$$t_{\text{ved}} = t_k - t_{\text{str}} - t_{\text{v,n}}$$

Podiel času na výmenu nástroja $t_{v,n}$ dostaneme, ak čas rezania t_r vynásobíme podielom času výmeny nástroja na jednu minútu jeho práce:

$$t_{v,n} = t_r \frac{t_{vým}}{T}$$

kde T je trvanlivosť reznej hrany.

Pomocou odvodených vzťahov ľahko zostrojíme globálne cieľové funkcie.

Náklady na nástroje pri obrábaní jedného obrobku sú

$$Y_n = t_r \frac{B}{T}$$

náklady na strojový čas

$$Y_s = t_{str}E$$

náklady na vedľajšie časy

$$Y_v = t_{ved}E$$

Náklady na obrábanie jedného kusa sú dané súčtom nákladov na strojový čas, nákladov na nástroje a nákladov na vedľajšie časy:

$$Y = Y_s + Y_n + Y_v$$

Po dosadení pre jednonástrojové obrábanie dostaneme:

$$Y = t_{str}E + t_r \frac{B}{T} + t_{ved}E$$

Analogicky vypočítame aj kusový čas

$$t_k = t_{str} + t_r \frac{t_{vým}}{T} + t_{ved}$$

Prevrátená hodnota kusového času $1/t_k$ je ukazovateľ produktivity stroja. Pre maximálnu produktivitu kusový čas má byť minimálny.

Pre viacnástrojové obrábanie do týchto rovníc dosadíme namiesto t_{str} čas cyklu t_c a súčet nákladov na nástroje

$$\sum_{i=1}^r \left(t_{r,i} \frac{B_i}{T_i} \right), \quad \text{resp. súčet časov na výmenu nástroja} \quad \sum_{i=1}^r \left(t_{r,i} \frac{t_{vým}}{T_i} \right)$$

15.3.2.1. Zjednodušenie cieľových funkcií

Pri optimalizácii rezných podmienok prijatú cieľovú funkciu vyjadríme pomocou optimalizovaných parametrov, napr. pomocou posuvu f a reznej rýchlosti v_c . Pretože medzi otáčkami vretena n , priemerom obrábania D a reznou rýchlosťou platí vzťah

$$n = \frac{1000 v_c}{\pi D}$$

strojový čas je

$$t_{str} = \frac{L}{f \cdot 1000 v_c} \pi D$$

Ak zavedieme časový súčiniteľ rezania

$$\lambda \frac{L_r}{L}$$

potom čas rezania je

$$t_r = t_{str} \lambda$$

Trvanlivosť T je tiež funkciou posuvu a reznej rýchlosti. Platí:

$$T = \frac{C_T}{v_c^m f^{y_T}}$$

Dosadením týchto rovníc do nákladovej funkcie Y dostaneme

$$Y = \frac{L \pi D}{1000 v_c f} \left(E + \frac{B \cdot v_c^m f^{y_T}}{C_T} \right) + t_{ved} E$$

Pretože hľadáme hodnoty parametrov, pri ktorých táto funkcia má extrém (minimum), môžeme zanedbať náklady na vedľajšie časy a považovať výraz $L \pi D / 1000$ za konštantu, napr. rovnú jednej.

Potom cieľová funkcia nadobúda tvar

$$Y = \frac{1}{v_c f} \left(E + \lambda \frac{B v_c^m f^{y_T}}{C_T} \right)$$

Túto cieľovú funkciu môžeme ďalej zjednodušiť, ak predpokladáme, že budeme pracovať s konštantnou trvanlivosťou reznej hrany. Potom aj výraz v zátvorke bude konštantou a extrém dosiahneme vtedy, ak súčin $v_c f$ dosiahne maximum $y = v_c \cdot f$ (max!), pri $T = \text{konšt.}$

Je to najjednoduchší tvar cieľovej funkcie z hľadiska nákladov na obrábanie. Dostali sme ho pre konštantnú trvanlivosť, preto sme túto podmienku uviedli aj v zápise.

Ak by sme zjednodušili rovnicu pre kusový čas, dostali by sme ten istý výsledok. Pochopiteľne náklady na obrábanie aj produktivita závisia od volenej hodnoty trvanlivosti. Minimum nákladov dostaneme, ak sa trvanlivosť rovná hospodárnej trvanlivosti T_h . Pre maximum produktivity stroja je trvanlivosť T_p z hľadiska produktivity.

15.3.3. Modely rezania pre optimalizáciu posuvu a reznej rýchlosti

Modely rezania pre optimalizáciu posuvu a reznej rýchlosti obsahujú nerovnice na vymedzenie prípustných kombinácií posuvu a reznej rýchlosti, cieľovú funkciu a označenie žiadaného extrému.

Vymedzenie množiny prípustných riešení závisí od konkrétnych podmienok, od štruktúry operácie z hľadiska práce nástrojov, a od úvah riešiteľa, že ktoré obmedzenia uvažuje.

15.3.3.1. Jednonástrojové obrábanie s konštantnými parametrami

Najjednoduchší je model rezania pre jednonástrojové obrábanie s konštantnými parametrami. Hľadáme optimálnu hodnotu posuvu f_1 a reznej rýchlosti $v_{c,1}$ (indexy označujú čísla úseku). Na ľavých stranách relácií, ktoré vymedzujú oblasť prípustných kombinácií ($f_1, v_{c,1}$), sa vyskytujú aritmetické výrazy vytvorené z týchto parametrov, na pravých stranách sú konštanty. K reláciám pripojíme aj intervaly platnosti použitých empirických rovníc charakteristík procesu rezania, ako aj podmienky, za ktorých sme zjednodušili prijatú globálnu cieľovú funkciu. V príklade táto podmienka je

$$T \geq T_h \vee T_p$$

t. j. trvanlivosť má byť väčšia, ako je jej hodnota z hľadiska minimálnych nákladov na obrábanie T_h alebo maximálnej produktivity stroja T_p . Trvanlivosť na ľavej strane vyjadríme ako funkciu posuvu a reznej rýchlosti.

15.3.3.2. Iné štruktúry operácií

Pri jednonástrojovom obrábaní s menlivými parametrami dostaneme pre každý záber s konštantnými parametrami sústavu relácií pre dvojice (f_i, v_{ci}) kde i je číslo záberu s konštantnými parametrami. Pritom, pretože pracujeme so spoločnými otáčkami, rezná rýchlosť v_{c1} a v_{ci} sú viazané podmienkou $v_1/v_i = d_1/d_i$. Táto podmienka preto tiež patrí k reláciám, ktoré vymedzujú oblasť prípustných riešení.

15.3.3.3. Viacnástrojové obrábanie

Pri viacnástrojovom obrábaní medzi posuvmi nástrojov, umiestnených na tom istom nosiči (suporte, vretene) a medzi otáčkami jednotlivých vretien existujú v závislosti od štruktúry operácie ďalšie väzby. Tieto práce nástrojov treba zahrnúť do modelu rezania pre optimalizáciu posuvu a reznej rýchlosti.

Budú to podmienky, ktoré vyjadrujú:

- a) väzbu medzi posuvmi a reznými rýchlosťami jednotlivých nástrojov,
- b) súčtové účinky, a to:
 - rezných síl nástrojov, upnutých na jednom nosiči na časti systému SNOP,
 - výkonu rezania pre nástroje so spoločným príivodom energie pre hlavný pohyb.

Model optimalizácie rezných podmienok zahŕňa vo všeobecnosti:

1. relácie na vymedzenie posuvov a rezných rýchlostí (otáčok) individuálnych nástrojov,
2. relácie väzby medzi parametrami rezania v závislosti od štruktúry operácie,

3. relácie väzby medzi parametrami rezania v závislosti od usporiadania nástrojov na nosičoch (suportoch alebo vretenách) a konštrukčného usporiadania pohonu vretien.

Súčtové účinky rezných síl a výkonu treba brať do úvahy pri zostrojení grafu práce nástrojov.

15.4. RIEŠENIE MODELOV

Je dôležité si uvedomiť to, že matematické riešenie dáva optimum pre situáciu, ktorú vyjadruje model, t. j. pre prijatý tvar a hranice empirických rovníc, pre prijaté vymedzenia oblasti prípustných riešení a pre zvolenú cieľovú funkciu.

Metóda riešenia závisí od formálnych vlastností modelu.

Metódy riešenia matematických modelov optimalizácie rezných podmienok rozdeľujeme takto:

1. Analytické metódy

1.1 extrém funkcie z intervalu $\langle a, b \rangle$

1.2 Lagrangeova metóda viazaných extrémov

2. Numerické metódy

2.1 výber zo všetkých variantov

2.2 výber z obmedzeného počtu variantov.

3. Kombinované metódy

V praxi pre určenie rezných podmienok používame počítačové programy. Často sú spojené s údajovými základňami, ktoré obsahujú konštanty empirických rovníc rezných síl, trvanlivosti, drsnosti povrchu atď., a charakteristiky strojov (výkon, účinnosť, rozsah posuvov, otáčok, dovolené zaťaženia a pod.).

15.4.1. Charakteristika a použiteľnosť metód

15.4.1.1. Analytické metódy

Absolútny extrém funkcie z intervalu a, b .

Nezávisle premenné cieľovej funkcie vyjadríme pomocou optimalizovaných parametrov a hľadáme extrém tejto funkcie v intervale a, b . Postup riešenie z matematiky je všeobecne známy. Najprv nájdeme lokálny extrém z intervalu a, b . Hodnotu cieľovej funkcie v lokálnom extréme porovnávame s jej hodnotami na hraniciach intervalu a, b , v bodoch nespojitosti a v bodoch nespojitosti derivácie.

Metódu obvykle používame, ak máme jeden optimalizovaný parameter, cieľová funkcia je derivovateľná a z limitujúcich podmienok vieme explicitne vyjadriť interval a, b .

Lagrangeová metóda viazaných extrémov.

Postup riešenia sa zakladá v rozšírení prijatej cieľovej funkcie Lagrangeovými koeficientmi a v riešení sústavy rovníc, ktoré získame parciálnymi deriváciami rozšírenej cieľovej funkcie.

Metódu používame, ak obmedzujúce podmienky z hľadiska rezných síl, výkonu rezania, drsnosti povrchu atď. sú dané nie reláciami, ale rovnicami, t. j. pri optimálnom riešení rezná sila, výkon rezania, drsnosť povrchu atď. sa práve rovnajú ich dovoleným hodnotám. Rozšírená cieľová funkcia má byť derivovateľná a sústava rovníc parciálnych derivácií riešiteľná.

15.4.1.2. Numerické metódy

Výber zo všetkých variantov daných karteziánskym súčinom $A \times B \times C \times \dots$ množín optimalizovaných parametrov.

Postup riešenia sa zakladá na vytvorení všetkých variantov (kombinácií) optimalizovaných parametrov. Ak tieto sú spojité, volíme určité diskrétné hodnoty z intervalu ich prípustnej zmeny.

Pre jednotlivé kombinácie parametrov, ktoré sú prvkami prípustnej množiny riešení, stanovíme hodnotu cieľovej funkcie. Za optimálnu považujeme kombináciu, pri ktorej cieľová funkcia dosahuje žiadaný extrém.

Metóda má všeobecné použitie, nekladie nijaké požiadavky na tvar obmedzujúcich podmienok a cieľovej funkcie. Počet variantov (kombinácií parametrov) však nemá byť príliš veľký.

Výber z obmedzeného počtu variantov.

Do tejto skupiny patrí väčšina metód matematického programovania, ako napr.:

- lineárne programovanie, cieľová funkcia aj obmedzujúce podmienky majú byť lineárne alebo linearizovateľné;
- nelineárne programovanie (konvexné a kvadratické programovanie). Cieľová funkcia a obmedzujúce podmienky nemusia byť lineárne, kladieme ale na ne určité špeciálne podmienky, napr. musia mať tvar kvadratickej rovnice, majú byť konvexné atď.;
- gradientné metódy patria k metódam nelineárneho programovania. Známe sú metódy relaxácie, gradienta, najväčšieho spádu a pod.

Ak model obsahuje aj obmedzenia, zvyčajne používame pokutové funkcie. Obmedzenia a cieľové funkcie majú byť derivovateľné. Ak je známy tvar hyperplochy cieľovej funkcie, obmedzení a relatívna poloha extrému, podmienka derivovateľnosti nie je nevyhnutná, pretože determinovaná dráha k extrému môže byť vopred známa;

- metódy náhodnej cesty k extrému sa nevyznačujú touto determinovanosťou dráhy. Táto sa určuje iba na základe hodnoty cieľovej funkcie v danom a v novom bode. Preto táto metóda nekladie na tvar cieľovej funkcie nijaké požiadavky;

- celočíselné programovanie používame, ak aspoň jeden z optimalizovaných parametrov môže nadobudnúť len celočíselné hodnoty (napr. počet záberov pri delení prídavku). Optimum v takých podmienkach nemožno vždy získať len jednoduchým zaokrúhľovaním výsledkov neceločíselného programovania;

- dynamické programovanie sa vyznačuje etapovitosťou úlohy alebo postupu riešenia. Riešeny proces má byť markovský. Z oblasti optimalizácie rezných podmienok za taký proces možno považovať stanovenie medzioperačného prídavku;

- heuristické metódy sa zakladajú vo využívaní niektorého racionálneho princípu alebo vlastnosti modelu (tvaru hyperplochy cieľovej funkcie, polohy extrému a obmedzení) pri výbere variantov;

- metódy náhodného výberu porovnávajú hodnotu cieľovej funkcie pre rôzne, náhodne určené kombinácie optimalizovaných parametrov. Na tvar obmedzení a cieľovej funkcie nekladú nijaké obmedzenia;

- stochastické programovanie na rozdiel od všetkých predchádzajúcich metód berie do úvahy skutočnosť, že každá reálna úloha sa rieši v podmienkach neúplných informácií, t. j. že parametre cieľovej funkcie a ohraničení môžu byť náhodnými veličinami. Väčšina prác z tejto oblasti sa týka lineárneho programovania.

Základná úloha stochastického lineárneho programovania okrem lineárnosti ohraničení a cieľovej funkcie sa vyznačuje tým, že koeficienty obmedzujúcich podmienok alebo aj cieľovej funkcie sú náhodné veličiny. Charakteristiky rozdelenia náhodných veličín môžu byť známe (prípád risku) alebo neznáme (prípád neurčitosti).

Prípád risku je charakteristický pre proces voľby rezných podmienok. Rezné sily, drsnosť povrchu, opotrebovanie, trvanlivosť reznej hrany atď. považujeme za náhodné veličiny.

15.4.1.3. Kombinované metódy

Na riešenie zložitých modelov, aké sú napr. optimalizácia rezných podmienok pre viacnástrojové obrábanie alebo modelov, ktoré zahŕňajú okrem posuvu a reznej rýchlosti schému delenia prídavku, geometriu nástroja, výkon elektromotora stroja a pod., najčastejšie používame kombinované metódy. Niektoré časti modelu riešime analytickými, iné numerickými metódami. Z numerických metód uprednostňujeme tie, ktoré nekladú nijaké požiadavky na tvar cieľových funkcií a ohraničení. Ak prípustné hodnoty optimalizovaného parametra sú prvkami konečnej množiny a počet jej prvkov nie je príliš veľký, často používame metódu výberu zo všetkých variantov. Inak zvyčajne využívame heuristické metódy.

15.4.2. Analitické riešenie

Analytické riešenia tiež využívame na optimalizáciu reznej rýchlosti, trvanlivosti reznej hrany, resp. otáčok vretena. Všetky tieto parametre sú navzájom závislé. Vyjadrujú ich rovnice

$$v_c = \frac{\pi dn}{1000}$$

$$Tv_c^m = C_T$$

Najprv ukážeme analytický výpočet optimálnych otáčok vretena pre viacnástrojové obrábanie. Úpravou získaného výsledku pre jednonástrojové obrábanie dostaneme rovnice pre hospodárnu trvanlivosť a reznú rýchlosť.

15.4.2.1. Hospodárne otáčky vretena – všeobecný prípad

Hospodárne otáčky vretena sú tie, pri ktorých náklady na obrábanie pri konštantných hodnotách ostatných parametrov (posuv, hĺbka rezu atď.) sú minimálne.

Pri výpočte hospodárnych otáčok vychádzame z nákladovej funkcie pre viacnástrojové obrábanie:

$$Y = t_c E + \sum \left(t_{r,j} \frac{B_i}{T_i} \right) + t_v E$$

Pretože vedľajšie časy t_v nezávisia od optimalizovaného parametra (otáčky vretena) a ďalej

$$t_{r,i} = \lambda_i t_c$$

môžeme nákladovú funkciu nahradiť z hľadiska hľadania jej extrémou funkciou

$$y = t_c \left(E + \sum \lambda_i \frac{B_i}{T_i} \right)$$

Parametre tejto funkcie vyjadríme pomocou otáčok základného (prvého) vretena za minútu. Použijeme na to rovnice

$$T_c = N_c / n_1$$

$$T_i = \frac{C_i}{n_i^{m_i}} = \frac{C_i}{(k_i n_1)^{m_i}}$$

$$C_i = T_i n_i^{m_i} = \frac{C_{T,i}}{\left(\frac{\pi d_i}{1000} \right) t_i^{x_i} f_i^{y_i}}$$

Po dosadení do cieľovej funkcie a po úprave dostaneme

$$y = \frac{const}{n_1} \left(E + \sum \left[\lambda_i \frac{B_i}{C_i} (k_i n_1)^{m_i} \right] \right)$$

Položením parciálnej derivácie $\partial y / \partial n_1 = 0$ dostaneme podmienku pre výpočet hospodárnych otáčok prvého vretena n_h . Výsledok je po úprave

$$E = \sum \left[(m_i - 1) \lambda_i \frac{B_i}{C_i} k_i^{m_i} n_1^{m_i} \right]$$

Je to vlastne polynóm typu

$$a_0 + a_1 x^{m_1} + a_2 x^{m_2} + \dots + a_n x^{m_n} = 0$$

ktorý riešime numericky.

Výsledkom výpočtu sú hospodárne otáčky n_h prvého (základného) vretena. Z rovníc

$$n_{h,i} = k_i n_h$$

vypočítame hospodárne otáčky ostatných vretien.

Hospodárnym otáčkam zodpovedajúce rezné rýchlosti a trvanlivosti určíme bezprostredne z rovníc:

$$v_{h,i} = \frac{\pi d_i n_i}{1000}$$

$$T_{h,i} = \frac{C_i}{n_{h,i}^{m_i}}$$

15.4.2.2. Hospodárne otáčky, trvanlivosť a rezná rýchlosť – špeciálne prípady

Rovnicu pre výpočet hospodárnych otáčok pre špeciálne prípady získame úpravou základnej rovnice.

Pre viacnástrojové obrábanie na jednom vretenne $n_1 = n_2 = \dots n_i = n$. Preto dostaneme

$$E = \sum \left[(m_i - 1) \lambda_i \frac{B_i}{C_i} n^{m_i} \right]$$

Pre rovnaké rezné materiály $m_1 = m_2 = \dots m_i = m$. Dostaneme

$$E = (m - 1) n^m \sum \left(\lambda_i \frac{B_i}{C_i} \right)$$

z čoho hospodárne otáčky už môžeme explicitne vyjadriť:

$$n_h = \sqrt[m]{\frac{E}{(m - 1) \lambda_i \frac{B_i}{C_i}}}$$

Pre jeden nástroj dostaneme

$$n_h = \sqrt[m]{\frac{E}{(m - 1) \lambda \frac{B}{C}}}$$

Pretože

$$T = \frac{C}{n^m}$$

z rovnice pre n_h dostaneme hospodárnu trvanlivosť

$$T_h = (m - 1) \lambda \frac{B}{E}$$

Hospodárnu reznú rýchlosť získame dosadením T_h do rovnice $T \cdot v_c^m = C_T$.

$$v_h = \sqrt[m]{\frac{C_T}{T_h}}$$

Slovné definície sú tieto:

Hospodárna trvanlivosť reznej hrany je tá, pri ktorej náklady na obrábanie pri konštantných hodnotách ostatných parametrov sú minimálne.

Hospodárna rezná rýchlosť je tá, pri ktorej náklady na obrábanie pri konštantných hodnotách ostatných parametrov sú minimálne.

15.4.2.3. Otáčky, rezná rýchlosť a trvanlivosť z hľadiska produktivity stroja

Je dôležité si uvedomiť, že optimum určíme z hľadiska produktivity strojového zariadenia. Nevzťahujeme časy na výrobu a na údržbu (ostrenie) nástrojov. Produktivita stroja sa zvyšuje na úkor spotreby nástrojov.

Pre viacnástrojové obrábanie je to

$$Y = t_c + \sum \left(t_{r,i} \frac{t_{vým,i}}{T_i} \right) + t_v$$

Tým istým spôsobom ako sme odvodili hospodárne otáčky, hospodárnu reznú rýchlosť a hospodárnu trvanlivosť reznej hrany, z tejto základnej rovnice dostaneme optimálne hodnoty otáčok, reznej rýchlosti a trvanlivosti reznej hrany pre maximálnu produktivitu strojového zariadenia.

Uvedieme iba hodnotu trvanlivosti pre jednonástrojové obrábanie pre maximálnu produktivitu stroja.

$$T_p = (m - 1) \lambda t_{vým}$$

kde $t_{vým}$ je čas výmeny nástroja.

Pochopiteľne $T_p \neq T_h$ a ani rezné rýchlosti $v_p \neq v_h$. V praxi, ak je to možné trvanlivosti a rezné rýchlosti volíme z intervalu $T_h \geq T \geq T_p$, resp. $v_h \leq v \leq v_p$. Je to tzv. racionálna oblasť voľby trvanlivosti reznej hrany, resp. reznej rýchlosti.

15.4.2.4. Testovanie prípustnej reznej rýchlosti

Analytickým riešením stanovená hodnota optimálnej reznej rýchlosti v_h alebo v_p je v konkrétnych podmienkach použiteľná iba vtedy, ak je z intervalu prípustných rezných rýchlostí. Z podmienky

$$T \geq T_h \vee T_p$$

dostaneme pre reznú rýchlosť

$$v_c \leq v_h \vee v_p$$

alebo pre otáčky

$$n \leq n_h \vee n_p$$

Preto ak v_h alebo v_p sú vyššie ako horná medza intervalu prípustných rezných rýchlostí, optimálnou reznou rýchlosťou je najvyššia prípustná rezná rýchlosť. Ak vypočítané rezné rýchlosti v_h alebo v_p sú nižšie ako dolná medza intervalu prípustných medzných rýchlostí, úloha pre zvolené podmienky nemá riešenie, pretože trvanlivosť reznej hrany aj pri najnižšej použiteľnej rýchlosti je kratšia ako T_h alebo T_p . Zvyčajne navrhujeme iný rezný materiál, iný stroj a pod.

15.4.3. Kombinovaná metóda

Ako príklad kombinovanej metódy uvedieme postup optimalizácie posuvu a reznej rýchlosti pre viacnástrojové obrábanie. Úloha implicitne zahŕňa v sebe aj optimálny návrh grafu práce nástrojov.

Východiskovými údajmi sú technologické obmedzenia na súčasnosť, resp. následnosť práce nástrojov k jednotlivým záberom obrábania.

Postup riešenia je tento:

1. Stanovíme prípustné posuvy pre jednotlivé nástroje z hľadiska síl rezania, drsnosti povrchu a žiadanej presnosti obrábania. Vypočítame sily účinkujúce na jednotlivé nástroje.

2. Vytvárame varianty grafu práce nástrojov z hľadiska prípustnosti poradia a súčtových účinkov síl. Pre jednotlivé varianty stanovíme súčiniteľ času rezania.

3. Vypočítame hospodárne otáčky vretien a stanovíme hospodárne rezné rýchlosti.

4. Testujeme, či hospodárne rezné rýchlosti sú z oblasti prípustných riešení. Berieme do úvahy podmienky pre individuálne nástroje, ako aj pre ich zoskupenia podľa grafu práce nástrojov. Ak ani jeden variant grafu práce nástrojov nie je vyhovujúci, vytvárame nové varianty z hľadiska súčtových účinkov výkonov rezania individuálnych nástrojov.

5. Na základe hodnoty cieľovej funkcie vyberieme z vyhovujúcich variantov optimálny.

LITERATÚRA

1. Békés, J.: Inžinierska technológia obrábania kovov. ALFA, Bratislava 1981.
2. Békés, J.: Obrábanie. ES SVŠT, Bratislava 1983.
3. Békés, J. – Herbanský, L. – Janáč, A.: Teória obrábania. Návody na cvičenia. ES SVŠT, Bratislava 1981.
4. Buda, J. – Békés, J.: Teoretické základy obrábania kovov. II. vyd. ALFA, Bratislava 1977.
5. Buda, J. – Souček, J. – Vasilko, K.: Teória obrábania. II. vyd. ALFA, Bratislava 1988.
6. Gazda, J. a kol.: Teorie obrábění. ES VŠST, Liberec 1993.
7. Hrubec, J.: Technológia obrábania. ES SVŠT, Bratislava 1980.
8. Hrubec, J.: Špeciálna technológia II. ES SVŠT, Bratislava 1990.
9. Janáč, A. – Békés, J. - Kicko, J. – Pálka, V.: Teória obrábania. Návody na cvičenia. ES SVŠT, Bratislava 1988.
10. Liemert, G. – Drábek, F. – Ondra, J. – Vavřík, J.: Obrábění. SNTL, Praha 1974.
11. Příkryl, Z.- Musílková, R.: Teorie obrábění. SNTL, Praha 1971.
12. Vasilko, K. – Novák, S.: Teória obrábania. Návody na cvičenia. ALFA, Bratislava 1980.

OBSAH

PREDHOVOR	3
ÚVOD	5
PREHLAD SYMBOLOV A ZNAČIEK	7
ANALÝZA PROCESU REZANIA	10
1. MODEL Y PROCESU REZANIA.....	10
1.1. Štatistické modely.....	10
1.1.1. Experimentálne riešenie úlohy.....	11
1.1.2. Voľba tvaru funkčnej závislosti.....	11
1.2. Simulačné modely.....	12
1.2.1. Všeobecné zásady zostrojenia simulačného modelu.....	12
1.2.2. Metóda náhodných čísiel (metóda Monte Carlo).....	13
1.2.3. Model procesu rezania.....	14
2. GEOMETRICKÁ A KINEMATICKÁ ANALÝZA.....	16
2.1. Základné modely.....	16
2.1.1. Model rezného klina.....	16
2.1.2. Model obrobku.....	17
2.1.3. Model pohybov a vzájomnej polohy.....	17
2.2. Modely reznej plochy.....	18
2.2.1. Základný model reznej hrany.....	18
2.2.2. Dráha rezného pohybu.....	18
2.2.3. Vektor rezného pohybu.....	19
2.2.4. Normála k reznej ploche.....	20
2.2.5. Profil reznej plochy.....	20
2.2.6. Vektor posuvu a reznej hrany.....	21
2.3. Pracovné (technologické) úlohy.....	21
2.3.1. Pracovné (technologické) uhly.....	22
2.3.2. Prierez odrezávanej vrstvy.....	23
2.3.3. Výpočet hrúbky a šírky odrezávanej vrstvy.....	24
3. REZANIE AKO FYZIKÁLNY PROCES.....	26
3.1. Vznik triesky.....	26
3.1.1. Model SNOP pre proces rezania.....	26
3.1.2. Fyzikálne modely rezania.....	27
3.1.3. Koreň triesky a jeho charakteristiky.....	27
3.1.4. Nárastok.....	28
3.2. Fyzikálne javy pri vzniku triesky.....	29

3.2.1.	Spolupôsobenie povrchov pri rezaní.....	30
3.3.	Výskum koreňa triesky.....	32
3.3.1.	Stlačenie triesky.....	32
3.3.1.1.	Geometrická analýza.....	32
3.3.1.2.	Fyzikálna podstata stlačenia triesky.....	35
3.3.1.3.	Výsledky experimentálneho výskumu.....	35
3.3.2.	Nárastok.....	35
3.3.2.1.	Simulačný model vývoja nárastku.....	35
3.3.2.2.	Výsledky experimentálneho výskumu.....	37
3.3.3.	Stvrdnutie povrchu a zvyškové napätia.....	38
4.	REZNÉ SILY.....	40
4.1.	Rovnováha síl v koreni triesky.....	40
4.1.1.	Sily na čele.....	40
4.1.2.	Sily na chrbte.....	41
4.1.3.	Výslednicová rezná sila a jej zložky pre voľné a viazané rezanie.....	41
4.2.	Simulačné modely rezných síl.....	42
4.2.1.	Okamžitá hodnota reznej sily.....	43
4.2.2.	Časový priebeh reznej sily.....	44
4.3.	Špecifický rezný odpor a práca rezania.....	45
4.4.	Výsledky experimentálneho výskumu.....	46
4.4.1.	Vplyv vybraných parametrov na špecifický rezný odpor.....	46
4.4.2.	Vplyv vybraných parametrov na reznú silu.....	46
4.5.	Štatistické modely rezných síl.....	48
4.5.1.	Banka (základňa) technologických údajov.....	50
4.6.	Rezné sily pre rôzne spôsoby obrábania.....	50
4.6.1.	Vrtanie.....	51
4.6.2.	Frézovanie.....	52
4.6.3.	Preťahovanie.....	55
4.6.4.	Rezanie závitov.....	57
5.	CHVENIE PRI OBRÁBANÍ.....	58
5.1.	Základné pojmy.....	58
5.2.	Samobudené kmity, ich druhy a vznik.....	58
5.2.1.	Fyzikálne príčiny vzniku primárnych budiacich síl pri rezaní.....	59
5.2.2.	Sekundárne budiace sily.....	60
5.3.	Výsledky experimentálneho výskumu.....	61
5.3.1.	Štatistické modely oblasti vzniku samobudeného chvenia.....	63
6.	TEPLOTA REZANIA.....	64
6.1.	Vznik a odvod tepla.....	64
6.2.	Teplotné pole rezného klina.....	64
6.3.	Tepelná bilancia.....	65
6.4.	Vplyv teploty na vlastnosti obrábaného a rezného materiálu.....	65
7.	OPOTREBOVANIE.....	67
7.1.	Intenzita opotrebovania.....	67
7.2.	Typické prejavy opotrebovania.....	68
7.3.	Výsledky experimentálneho výskumu.....	70

7.3.1.	Miery opotrebovania.....	70
7.3.2.	Časový priebeh opotrebovania.....	70
7.3.3.	Vplyv opotrebovania na proces rezania, limitné opotrebovanie.....	71
8.	TRVANLIVOSŤ A ŽIVOTNOSŤ.....	73
8.1.	Trvanlivosť rezného klina.....	73
8.2.	Schémy ostrenia, počet nasadení nástroja.....	74
8.3.	Životnosť nástroja.....	75
8.4.	Výsledky experimentálneho výskumu.....	75
8.5.	Štatistické modely trvanlivosti rezného klina.....	76
8.6.	Zákon hospodárneho obrábania.....	77
8.7.	Simulačný model opotrebovania a trvanlivosti.....	78
9.	DRSNOSŤ REZNÉHO A OBROBENÉHO POVRCHU.....	80
9.1.	Fyzikálne príčiny vzniku drsnosti.....	80
9.2.	Simulačný model profilu a drsnosti obrobeného povrchu.....	81
9.3.	Analytický výpočet drsnosti obrobeného povrchu.....	82
9.4.	Výsledky experimentálneho výskumu.....	83
9.5.	Štatistické modely drsnosti povrchu.....	84
10.	TVAROVANIE TRIESKY.....	85
10.1.	Objemový súčiniteľ a tvary triesok.....	85
10.2.	Výsledky experimentálneho výskumu.....	87
10.3.	Štatistický model oblasti vhodne tvarovanej triesky.....	87
10.4.	Tvarovače a deliče triesok.....	88
11.	OBROBITEĽNOSŤ KOVOVÝCH MATERIÁLOV A REZNOSŤ NÁSTROJOVÝCH REZNÝCH MATERIÁLOV.....	90
11.1.	Vymedzenie pojmu „obrobiteľnosť“.....	90
11.1.1.	Účelovovzťahné kritéria obrobiteľnosti.....	92
11.1.2.	Vplyv chemického zloženia materiálu na jeho obrobiteľnosť.....	92
11.2.	Vymedzenie pojmu reznosť nástrojových materiálov.....	94
11.3.	Nástrojové rezné materiály.....	96
11.4.	Povlakované rezné materiály.....	101
11.4.1.	Účel a metódy povlakovania.....	101
11.4.2.	Povlakovanie nástrojov z rýchlorezných ocelí.....	102
11.4.3.	Povlakovanie platničiek spekaných karbidov.....	103
11.5.	Veľmi tvrdé rezné materiály – VTM.....	103
11.6.	Oblasti použitia supertvrdých rezných materiálov.....	105
11.7.	Rezné prostredia (rezné kvapaliny).....	105
11.7.1.	Účel použitia rezných kvapalín.....	105
11.7.2.	Vyžadované vlastnosti rezných kvapalín.....	105
11.7.3.	Chemicko-fyzikálna podstata účinku rezných kvapalín.....	106
12.	ZVLÁŠTNOSTI PROCESU REZANIA PRI BRÚSENÍ.....	107
12.1.	Brúsny nástroj a parametre rezania pri brúsení.....	107
12.1.1.	Vlastnosti brúsnych kotúčov a ich označovanie.....	108
12.1.2.	Kotúče z veľmi tvrdých materiálov (VTM).....	108
12.1.3.	Voľba brúsnych kotúčov s diamantovým a KNB brúsivom.....	110

12.1.4.	Tvarovanie brúsnych kotúčov.....	110
12.2.	Rezné sily a výkon pri brúsení.....	111
12.3.	Opotrebovanie a trvanlivosť brúsneho nástroja.....	112
12.4.	Drsnosť povrchu pri brúsení.....	113
12.5.	Vplyv vlastností brúsneho kotúča na proces brúsenia.....	113
12.6.	Simulácia procesu brúsenia.....	114
12.6.1.	Model brúsneho nástroja.....	114
12.6.2.	Simulácia charakteristík procesu brúsenia.....	115
12.7.	Simulačné modely nepresnosti obrábania.....	116
13.	NEPRESNOSTI TVARU A ROZMERU PLOCHY.....	117
13.1.	Model SNOP z hľadiska nepresnosti obrábania.....	117
13.2.	Základné pojmy.....	117
13.3.	Fyzikálne príčiny vzniku nepresnosti.....	118
13.4.	Analytický výpočet nepresnosti pri obrábaní.....	118
13.4.1.	Nepresnosti tvaru vyvolané reznými silami a poddajnosťou.....	118
13.4.2.	Nepresnosti vyvolané teplotnými deformáciami.....	120
13.4.3.	Nepresnosti vyvolané rozmerovým opotrebovaním.....	121
13.4.4.	Nepresnosti vyvolané vnútornými napätiami.....	122
13.4.5.	Nepresnosti vyvolané upínacími silami.....	122
13.5.	Štatistické modely nepresnosti obrábania.....	122
13.6.	Simulačné modely nepresnosti obrábania.....	123
SYNTÉZA.....		125
14.	ZÁKLADY OPTIMALIZÁCIE PARAMETROV OBRÁBANIA.....	125
14.1.	Parametre obrábania a ich vlastnosti.....	125
14.2.	Dostupné, vyhovujúce a prípustné riešenia úlohy.....	125
14.3.	Optimálne riešenie, cieľové funkcie.....	126
14.3.1.	Dôležitosť a priorita cieľových funkcií.....	127
14.4.	Všeobecný postup optimalizácie.....	128
15.	OPTIMALIZÁCIA PARAMETROV OBRÁBANIA.....	129
15.1.	Optimalizácia kritéria otupenia nástroja.....	129
15.2.	Štruktúra operácií z hľadiska práce nástrojov.....	130
15.2.1.	Graf práce nástrojov.....	132
15.2.2.	Súčiniteľ času rezania.....	133
15.3.	Modely pre optimalizáciu parametrov rezania.....	133
15.3.1.	Vymedzenie oblasti prípustných riešení.....	134
15.3.1.1.	Prípustné posuvy.....	134
15.3.1.2.	Prípustné rezné rýchlosti.....	136
15.3.2.	Cieľové funkcie.....	138
15.3.2.1.	Zjednodušenie cieľových funkcií.....	141
15.3.3.	Modely rezania pre optimalizáciu posuvu a reznej rýchlosti.....	142
15.3.3.1.	Jednonástrojové obrábanie s konštantnými parametrami.....	142
15.3.3.2.	Iné štruktúry operácií.....	142
15.3.3.3.	Viacnástrojové obrábanie.....	142

15.4.	Riešenie modelov.....	143
15.4.1.	Charakteristika a použiteľnosť metód.....	143
15.4.1.1.	Analytické metódy.....	143
15.4.1.2.	Numerické metódy.....	144
15.4.1.3.	Kombinované metódy.....	145
15.4.2.	Analytické riešenie.....	145
15.4.2.1.	Hospodárne otáčky vretena – všeobecný prípad.....	145
15.4.2.2.	Hospodárne otáčky, trvanlivosť a rezná rýchlosť – špeciálne prípady.....	147
15.4.2.3.	Otáčky, rezná rýchlosť a trvanlivosť z hľadiska produktivity stroja.....	148
15.4.2.4.	Testovanie prípustnej reznej rýchlosti.....	148
15.4.3.	Kombinovaná metóda.....	149
LITERATÚRA.....		151

Slovenská technická univerzita v Bratislave
 Ústredná knižnica - študijné a inf. stredisko
 pri Materiálovotechnologickej fakulte
 ul. J. Bottu 23, 917 24 Trnava

Autori Prof. Ing. Ján Békés, DrSc. – Prof. Ing. Ján Hrubec, CSc.
Doc. Ing. Juraj Kicko, CSc. – Doc. Ing. Zdenko Lipa, CSc.

Názov TEÓRIA OBRÁBANIA

Vydanie 1. vydanie
Náklad 150 výtlačkov
Rozsah 157 strán, 129 obrázkov, 5 tabuliek, 12,563 AH, 12,808 VH
Edičné číslo 4772
Tlač Vydavateľstvo STU v Bratislave
Vytlačené 1999