

VYSOKÁ ŠKOLA STROJNÍ A TEXTILNÍ LIBEREC

nositelka Řádu práce

Fakulta strojní

Katedra obrábění a montáže

obor 23 - 07 - 8 strojírenská technologie

zaměření o b r á b ě n í a m o n t á ž

DATABANKA ŘEZNÝCH PODMÍNEK PRO BROUŠENÍ

637

KOM - OM - [REDACTED]

Tomáš P l í h a l

Vedoucí práce: Ing. Jan Jersák, VŠST Liberec

Konzultanti: Ing. Aleš Průšek, VŠST Liberec

Ing. Jar. Janoušek, VŠST Liberec

Počet stran..... 95

Počet tabulek..... 5

Počet obrázků..... 22

Počet příloh..... 2

15. května 1989

Vysoká škola: strojní a textilní Fakulta: strojní
Katedra: obrábění a montáže Školní rok: 1988 - 89

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

pro Tomáše P l í h a l a
obor 23 - 07 - 8 strojírenská technologie

Vedoucí katedry Vám ve smyslu nařízení vlády ČSSR č. 90/1980 Sb., o státních závěrečných zkouškách a státních rigorozních zkouškách, určuje tuto diplomovou práci:

Název tématu: Databanka řezných podmínek pro broušení

Zásady pro vypracování:

1. Rozbor současného stavu
2. Metodika řešení databanky řezných podmínek pro broušení
3. Návrh vlastního řešení zadání
4. Zapojení do návrhu komplexní databanky
5. Návrh optimalizace řezných podmínek v rámci databanky broušení
6. Zhodnocení a závěr

V 276/89 S

VYSOKÁ ŠKOLA STROJNÍ A TEXTILNÍ
Ústřední knihovna
LIBEREC 1, STUDENTSKÁ 8
PSČ 461 17

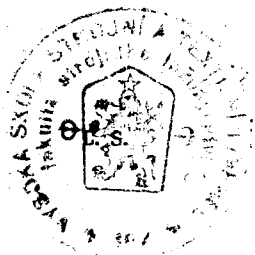
Bratři - šatník

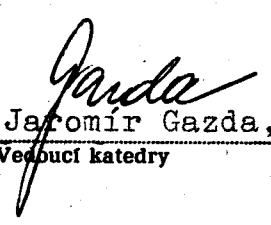
KOM/OM

Rozsah grafických prací: dle potřeby
Rozsah průvodní zprávy: 50 - 60 stran textu
Seznam odborné literatury:

- Mádl, J. : OPTimalizace řezných podmínek při obrábění, 1. vydání
ČVUT Praha 1988
- Maslov, J.N. : Teorie broušení kovů, 1.vydání, SNTL Praha 1979
- Lierath, F. : Komplexní matematický model externí optimalizace
broušení, Wissenschaftliche Zeitschrift der
Technischen Hochschule Otto von Guericke Magdeburg 20,
1976, sešit 5, s. 535 - 545
- Kalászi, I. : Ausdehnung der Schneidfähigkeitsparametr nach Lure
auf die Planung der Schleiftechnologie In: Periodica
Vedoucí diplomové práce: Polytechnika, 27, Budapest 1983, s.23
- Vedoucí diplomové práce: Ing. Jan Jersák - VŠST Liberec
- Konzultant : Ing. Aleš Průšek - VŠST Liberec
Ing. Jaroslav Janoušek - VŠST Liberec

Datum zadání diplomové práce: 12. 9. 1988
Termín odevzdání diplomové práce: 2. 6. 1989




Doc. Ing. Jaromír Gazda, CSc.
Vedoucí katedry


Prof. Ing. Vladimír Prášil, DrSc.
Děkan

v Liberci dne 12. 9. 1988

Místopřísežné prohlášení

Místopřísežně prohlašuji, že jsem diplomovou práci
vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury.

V Liberci 15. května 1989

Tomáš Páhal

	Seznam použitých zkratk a symbolů	5
1.	Úvod.....	9
2.	Současný stav v oblasti databank řezných pod- mínek v zahraničí.....	11
2.1.	Informační střediska pro obrábění v zahraničí..	11
3.	Princip a charakteristika broušení.....	17
3.1.	Zvláštnosti broušení.....	18
4.	Pojem obrobiteľnost.....	19
4.1.	Obrobiteľnost při broušení.....	20
4.2.	Kritéria používaná při hodnocení obrobiteľ- nosti.....	23
5.	Vliv opotřebení a trvanlivosti broušícího ko- touce.....	24
6.	Vazby technologie broušení.....	25
6.1.	Veličiny ovlivňující proces broušení.....	27
7.	Metodika řešení databanky ŘP pro broušení.....	28
7.1.	Činitelé ovlivňující volbu broušícího kotouce..	28
7.2.	Zásady pro volbu broušícího kotouce.....	30
7.3.	Hlavní znaky určující jakost broušícího ko- touce.....	30
7.3.1.	Volba broušícího kotouce podle jakosti.....	32
7.4.	Označení etiket na broušících kotoučích.....	34
7.5.	Pevnost broušících nástrojů.....	35
7.6.	Výkonnost broušících nástrojů.....	35
7.7.	Vady při broušení a jejich příčiny.....	36
7.8.	Vyvažování broušících kotoučů.....	37
7.9.	Orovnání broušících kotoučů.....	37
7.10.	Vliv ŘP při broušení na trvanlivost broušícího kotouce.....	37
7.11.	Tuhost technologické soustavy a stabilita řezného procesu.....	38
7.12.	Chlazení při broušení.....	38
7.13.	Drsnost povrchu a kvalita povrchové vrstvy broušených dílů.....	40
8.	Návrh vlastního řešení zadání.....	41
8.1.	Blokové schema databanky.....	42
8.2.	Podrobné schema databanky.....	43

8.2.1.	Podrobné schema databanky pro broušení vnějších válnových ploch.....	43
8.2.2.	Podrobné schema databanky pro broušení rovinných ploch obvodem kotouče.....	55
8.3.	Databanka - program.....	64
9.	Zapojení do návrhu komplexní databanky.....	65
10.	Návrh optimalizace řezných podmínek.....	65
10.1.	Charakteristika optimalizace.....	74
10.2.	Model externí optimalizace řezných podmínek při broušení.....	80
10.3.	Model opotřebení.....	81
10.4.	Analytické vyjádření trvanlivostní funkce při broušení.....	84
11.	Vlastní model externí optimalizace.....	84
11.1.	Kriteria optimalizace a cílové funkce.....	88
11.2.	Systém technických a kvalitativních omezení.....	90
11.3.	Model optimalizace broušení - strategie.....	92
12.	Zhodnocení a závěr.....	94
	Literatura.....	

Seznam příloh

Příloha č. 1: Tabulka č. 1
Výběr kritérií používaných při hodnocení
obrobitelností a řezivosti

Příloha č. 2: Program
Programový výpis databanky řezných
podmínek pro broušení vnějších rotačních
ploch

Seznam použitých zkratek a symbolů

A	N.s	Kriterium počátečního impulsu
a	mm	Šířka řezu
A _e	mm ²	Kontaktní plocha břitu
A ₁₁		Konstanta
A _{1...n}		Koeficienty a konstanty trvanlivostních funkcí
a _d	mm	Hloubka orovnění brousicího nástroje
B _v , B _T , B _{1...14}		Koeficient trvanlivostní funkce
B _k	mm	Šířka kotouče
c _{WZ}		Nástrojová konstanta
c	Nmm ⁻¹	Tuhost systému
c _s	Nmm ⁻¹	Tuhost řezu
C		Konstanta vyjiskřovací křivky
C _o		Konstanta závisující na podmínkách broušení
d _o	mm	Průměr obrobku
D	mm	Ekvivalentní průměr brousicího kotouče
Δd _{WZnutz}	mm	Užitečný rozdíl průměru brousicího kotouče
e	mm	Hloubka záběru
e _{ZUL}	mm	Teoretická přípustná hloubka záběru
e _{ef}	mm	Efektivní hloubka záběru
e _{z,h}	mm	Svislý přísuv /hloubka třísky/
e _r	mm	Radiální přísuv při broušení šroubových válců
e		Základ přirozených logaritmů
F _z	N	Tangenciální složka řezné síly
F _y	N	Radiální složka řezné síly
h _{ef}	μm	Ekvivalentní tloušťka odebírané vrstvy
h _m	mm s ⁻¹	Intenzita úběru
h _z	mm min ⁻¹	Minutový přísuv z průměru
h _p	mm φ ⁻¹	Přísuv na zdvih stolu při broušení s podélným posuvem

i_{dU}		Počet možných výměn orovnávacího zařízení
i_{dT}		Počet orovnění vztažený na jeden orovnávací nástroj
IT		Stupeň přesnosti
k	Nmm^{-2}	Hlavní hodnota normálové síly
K_K		Faktor chlazení
K_W		Faktor tvaru obrobku
K_{WST}		Faktor materiálu obrobku
K_p		Faktor vlivu pojiva kotouče
$K_V, K_T, K_{BM}, K_{GEOM}, K_K, K_{SK}, K_{SM}, K_{WST}$		Konstanty trvanlivostní funkce
K_q		Koeficient zrnitosti
K_{VAR}	$Kčs\ ks^{-1}$	Variabilní výrobní náklady
K_L	$Kčs\ min^{-1}$	Faktor mezd
K_A	$Kčs\ orovnění^{-1}$	Poměrné náklady na brousící kotouč
K_{ABR}	$Kčs\ orovnění^{-1}$	Náklady na orovnění brousícího kotouče
K_{WE}	$Kčs\ orovnění^{-1}$	Náklady na výměnu brousícího kotouče
K_1	$Kčs\ min^{-1}$	Faktor strojních a mzdových nákladů
K_2	$Kčs\ orovnění^{-1}$	Poměrné náklady na brousící kotouč
K		Korekční faktor trvanlivosti
K_{dA}	Kčs	Náklady na pořízení orovnávacího zařízení
K_{dWE}	Kčs	Náklady na výměnu orovnávacího zařízení
K_{dU}	Kčs	Náklady na jednu výměnu orovnávacího zařízení
$k_{puž.}$		Koeficient pro jiné šířky kotouče než 10 mm
k_q	$mm^3 s^{-1} N^{-1}$	Řezná schopnost koeficientu řezivosti
k_{y,k_z}	$\mu m\ s^{-1} N^{-1}$	Řezivost
K_{ob}		Koeficient brusitelnosti
K_{obA}		Index absolutní obrobiteľnosti
K_{obR}		Index relativní obrobiteľnosti

m	mm	Modul
m		Poměrný objemový obrus
$\overline{m}$		Měrná výrobnost kotouče
m_A		Exponent poměrné trvanlivosti
m_N	mm^2	Kvadratický poměrný obrus
M		Tvarový součinitel
n_k	min^{-1}	Otáčky brousicího kotouče
n_Q	min^{-1}	Otáčky obrobku
ORP		Optimální řezné podmínky
P_s	kW	Skutečný příkon broušení
P	kW	Příkon vřetene brusky
$P_{už.}$	kW	Užitečný příkon na vřetení brusky
$P_{SK_{10}}$	kW	Skutečný příkon broušení pro šířku 10 mm
Q_W	J	Množství dodaného tepla
Q_Z	$\text{mm}^3 \text{mm}^{-1}$	Objem odbroušeného materiálu obrobku na 1 mm šířky kotouče = vztažný objem obrábění
Q_{ZT}	$\text{mm}^3 \text{mm}^{-1}$	Vztažný objem materiálu obroběného za dobu trvanlivosti kotouče
Q_{ZT}	$\text{mm}^3 \text{s}^{-1}$	Objem odebraný za jednotku času = výkon broušení
Q_1	$\text{mm}^3 \text{s}^{-1} \text{mm}^{-1}$	Výkon broušení na jednotku šířky brousicího kotouče
Q_1	W mm^{-1}	Odebraný materiál na 1 mm šířky záběru
Q_M	$\text{mm}^3 \text{min}^{-1} \text{mm}^{-2}$	Měrný úběr na jednotku řezné plochy kotouče
q	$\text{mm}^3 \text{s}^{-1} \text{W}^{-1}$	Měrný výkon broušení
q	W^{-1}	Charakteristika broušitelnosti
q		Rychlostní poměr
r		Faktor tvaru břitu
R_a	μm	Střední aritmetická drsnost
s_a	mm ot^{-1}	Osový posuv na otáčku dílce
$s_{př}$	mm zdvih^{-1}	Příčný posuv u rovinného broušení
s_{po}/s_L	m.min^{-1}	Podélný posuv
S	mm^2	Plocha pod křivkou
t_B	mm	Hloubka důlku při zkoušce tvrdosti
t	min	Čas broušení

t_{GM}	min	Základní strojní čas
$t_{GM\triangledown}$	min	Základní strojní čas pro hrubování
$t_{GM\triangledown\triangledown}$	min	Základní strojní čas pro hlazení
t_{GMO}	min	Základní strojní čas vyjiskřování vztažený na odpružení stroje
T	min	Trvanlivost
t_{HABR}	min	Pomocný čas pro orovnění
t_{Hd}	s	pomocný čas na jedno orovnění
T_1		Koeficient časového úseku
u_q	mm min ⁻¹	Rychlost posuvu podélných saní
U	mm ⁻²	Kriterium strmosti práce
v_f	m min ⁻¹	Rychlost posuvu obrobku
v_{ob}	ms ⁻¹	Obvodová rychlost obrobku
v_k	ms ⁻¹	Řezná rychlost kotouče
VKG		Opotřebení
VKG _{ZUL}		Přípustné opotřebení
V'_W		Obroušený objem obráběcího nástroje vztažený na 1 mm šířky kotouče
V'_{WT}		Objem obráběcího nástroje vztažený na 1 mm řezné šířky
v_{so}	m min ⁻¹	Kruhová rychlost stolu
V_K	mm ³	Úbytek brusného kotouče
V_o	mm ³	Objem odbroušeného materiálu
v_y	mm min ⁻¹	Rychlost přísuvu
y	mm	Odtlačení SPID
μ		Součinitel tření
μ	mW ⁻¹ um ⁻¹	Poměrný koeficient brousitelnosti
γ		Účinnost
θ	°C	Teplota
σ_k	N mm ⁻²	Mez kluzu
ε	mm	Napružení systému
$\triangledown$		Hrubování
$\triangledown\triangledown$		Hlazení
$\alpha, \beta, \mu, \delta$		Koeficienty trvanlivostní funkce
α		Úhel strmosti vyjiskřovací křivky
λ_d		Řezivost po orovnění

1. Úvod

V hlavních směrech hospodářského a sociálního rozvoje ČSSR na léta 1986 - 1990 a výhledu na období do roku 2000, schválených na XVII. sjezdu KSČ, se kromě jiného říká: "Rozvoj strojírenské výroby jako nositele vědeckotechnického rozvoje ve všech odvětvích národního hospodářství a hlavního exportního odvětví je nutno zaměřit na vytvoření nezbytných podmínek pro podstatné zvýšení technické úrovně výroby na základě realizace nejnovějších výsledků VTR, urychlené zavádění nových výrobních technologií a na snížení nákladů výroby. Dále zvýšit produktivitu práce v průmyslu o 14 - 17% a jejím růstem krýt 92 - 95 % přírůstku výroby. Dosáhnout toho dokonalejším řízením výroby, rychlejším zaváděním výsledků vědy a výzkumu do praxe, lepším využíváním výrobních kapacit, modernizací, automatizací, elektronizací výrobních provozů a technologií, prohlubování mezinárodní spolupráce.

Rozhodující úlohu v urychlení VTR musí plnit strojírenství, které na základě prohlubování spolupráce především se socialistickými státy musí zabezpečit potřebné stroje a zařízení vysoké technické úrovně pro modernizaci výrobně technické základny čs. ekonomiky a přechod k zásadně novým technologickým postupům a k technice nových generací. Je třeba urychlit inovační procesy a dosáhnout podstatného růstu kvality výrobků a jejich úrovně a spolehlivosti. Rozvoj surovinově, energeticky a materiálově náročných odvětví je nutno podřídit hlediskům ekonomické efektivity. Je třeba zajistit pokles materiálové náročnosti výroby a výrazně zvýšit hodnocení materiálových zdrojů v celém národním hospodářství.

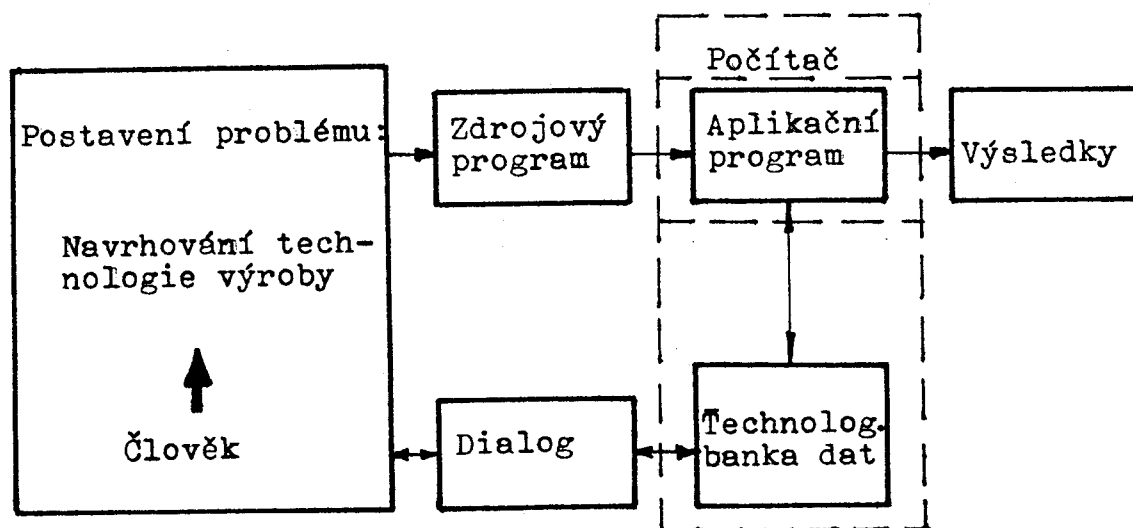
Ke splnění těchto úkolů je třeba těsné spolupráce mezi výrobou a výzkumem, neboť je nutné vkládat do výroby stále větší podíl tvořivého myšlení a kvalifikované práce.

S vývojem nových strojírenských materiálů a technologií vzrůstají i nároky na broušení. Zejména u nových ušlechtilých a tepelně zpracovaných ocelí vyvstává při jejich užití v hromadné výrobě požadavek na minimální přídatky na obrábění, optimální řezné a ekonomické podmínky /doba obrábění, rezivost, trvanlivost, řezná rychlost atd./

Výzkum v oblasti broušení se převážně zabýval zdokonalováním brusných nástrojů a brusného stroje. V současné době jsou brusky již na takové úrovni, že jejich konstrukce nemůže podstatně ovlivnit výkon a jakost broušení. Možnosti zkvalitňování obrábění jsou ještě ve zlepšení kvality brusných kotoučů, využití optimálních řezných podmínek a ve zdokonalování technologie, při zkoumání všech vlivů, které během broušení působí. Významnou součástí technické přípravy výroby je tedy určování o optimálních ŘP, optimální trvanlivosti nástroje, eventuálně optimálních hodnot dalších pracovních podmínek. Technickým systémem, který umožňuje shromažďovat velká množství systematicky uspořádaných informací, je technologická banka dat. Postavení technologické banky dat ve vztahu k problematice technické přípravy výroby je na obr. 1.

Výsledkem této práce je databanka řezných podmínek pro broušení, resp. návrh struktury databanky pro broušení. Databanka umožní podle určitých kritérií vybrat optimální řezné podmínky a optimální řezné nástroje pro konkrétní operaci broušení s potřebnými údaji. Tímto postupem se urychlí vlastní příprava výroby a vyloučí se subjektivní vliv technologa při určování použití řezného nástroje a stanovení ŘP při jeho využívání.

Obr. 1: Postavení banky dat k postavení technické přípravy výroby



2. Současný stav v oblasti databank řezných podmínek v zahraničí /6/

Informační střediska pro obrábění mají obvykle celostátní působnost a úzce spolupracují s velkými výrobními podniky, vysokými školami a výzkumnými ústavy, od nichž též získávají část informací.

Mezi činnosti, vykonávané nebo řešené informačními středisky, patří:

- 1/ Zjišťování charakteristických vlastností /z hlediska obrábění/ u hospodářsky důležitých kombinací obráběných a nástrojových materiálů.
- 2/ Zjišťování úrovně ŘP užívaných ve výrobě.
- 3/ Vypracování metodiky zkoušek obrobitelnosti, řezivosti a poskytování podkladů pro vytváření těchto zkoušek.
- 4/ Vypracování normativů ŘP.
- 5/ Sdělování doporučených ŘP, případně technologických postupů.
- 6/ Stanovení OŘP pro konkrétní případy.
- 7/ Poskytování výpočetních programů pro optimalizaci ŘP.

2.1. Informační střediska pro obrábění v zahraničí

1/ Japonsko

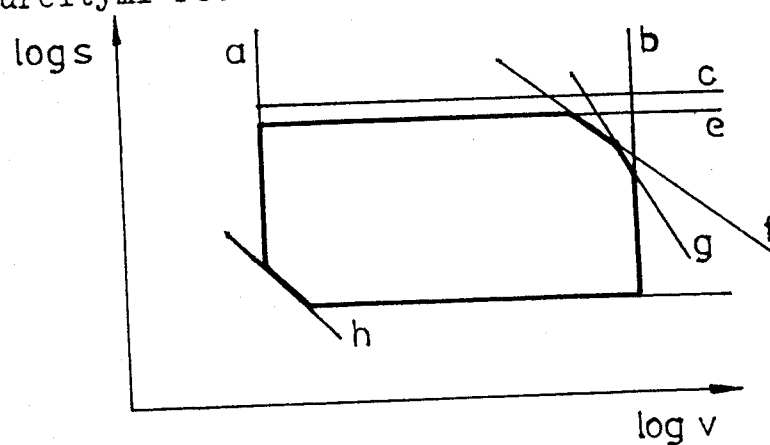
Středisko údajů pro obrábění /Machining Data Center/ provádí následující činnosti:

- sběr a poskytování informací o skutečných ŘP
- doporučené OŘP pro výrobu a poskytování dalších údajů pro obrábění
- vypracování programů pro výpočet ŘP
- standartizace zkušebních metod pro posouzení obráběných materiálů, nástrojů a obráběcích strojů
- konzultace průmyslu v otázkách týkajících se obrábění.

Získané informace se dělí do tří skupin:

- na průmyslové
- na laboratorní
- na literární.

Obr. 2. Oblast možných řezných podmínek ohraničená určitými restrikcemi



- a - minimální otáčky vřetene
- b - maximální otáčky vřetene
- c - maximální posuv
- d - minimální posuv
- e - maximální řezná síla
- f - stabilita vůči chvění
- g - maximální výkon
- h - hledisko nárůstu

Jednotlivým informacím se přiřazuje kvalifikační kód, pod kterým se uloží. Průmyslové a literární informace se dále nezpracovávají. Výsledky laboratorních zkoušek se zpracovávají matematickými metodami, vyjádří se ve tvaru empirických vztahů, jejichž parametry se ukládají do paměti. Údaje o trvanlivosti při určitých podmínkách obrábění se popisují Taylorovou rovnicí. Optimální ŘP jsou takové, které zaručují minimální náklady nebo dobu obrábění za předpokladu určitých omezení, jakým je např. řezná síla, výkon, velikost posuvu a počet otáček vřetene daného obráběcího stroje. Všechna omezení jsou vyjádřena lineární závislostí v logaritmických souřadnicích obr. 2. Všechny možné ŘP se nacházejí uvnitř obrazce. /6/

2/ USA

V USA pracuje středisko údajů o obrobiteľnosti /Machicability Data Center/, který zaměřuje svoji činnost především na shromažďování údajů o obrábění, vydávání příruček ŘP a na zodpovídání dotazů. Zdrojem informací jsou speciální experimenty, pozorování na závodech, technická literatura, inženýrské expertní odhady.

Jednotlivé dokumenty jsou uloženy v paměti počítače, odkud se vyhledávají podle druhu obrábění a obráběného materiálu popř. podle geometrie nástroje, řezných sil, nákladů a produktivity. /6/

3/ Velká Británie

Technologický institut /PERA/ vytvořil databanku ŘP, která se stala základem činnosti služby v oblasti sběru dat, ukládání a poskytování informací o ŘP /Machining Data Club/. Hlavními zdroji informací byly výzkumné práce, zkušební výroby, doporučení výrobců řezných nástrojů, podnikové normy a technická literatura.

Počítače se využívají jako banka dat, zajišťující rychlé vyhledání informace, neprovádí se již další operace, např. určování minimálních nákladů nebo maximálních produktivit. ŘP jsou zaznamenány na magnetické pásky. Na jednu pásku může být zapsáno až 50 tisíc údajů, které obsahují:

- druh operace
- údaje o obrobku /materiál, tvar atd./
- údaje o nástroji /typ, materiál, geometrie řezné části, rozměry atd./
- údaje o zařízení /typ, výkon atd./
- údaje o ŘP /řezná rychlost, posuv, atd./
- údaje o používaných řezných kapalinách
- kritéria efektivnosti obrábění /náklady na nástroj, přesnost, drsnost povrchu atd./

Služby, které poskytuje informační středisko jsou dvojího druhu:

1. Zasílá podnikům univerzální příručky ŘP, které jsou neustále doplňovány a obnovovány.

2. Odpovídá na dotazy z podniků, které se týkají konkrétních podmínek. /6/

4/ NSR

V NSR bylo vybudováno Informační středisko pro obrábění /INFOS/ s úkolem:

- získávat a shromažďovat informace
- zpracovávat je a archivovat
- předávat informace.

V souladu s tím je INFOS organizačně rozdělen na část pro vnitřní a pro vnější zpracování informací. Vnitřní úkoly zahrnují všechny úkoly, které se provádějí na počítači. Sem patří:

- srovnání dat s již uloženými
- ukládání do paměti
- zpětné získávání a vyhodnocování dat.

Vnější zpracování informací představuje shromažďování, ověřování, úpravu informací o obrábění, analýzu zpětných hlášení od uživatelů. Informační služba střediska INFOS má charakter:

- a/ aktivní údaje ve formě tabulek směrných hodnot a údajů z kartotéky materiálů, programy pro výpočet ŘP
- b/ pasivní údaje o obrábění pro určitý stroj ve formě normativů, diagramu řezných hodnot, rovnic trvanlivosti atd.

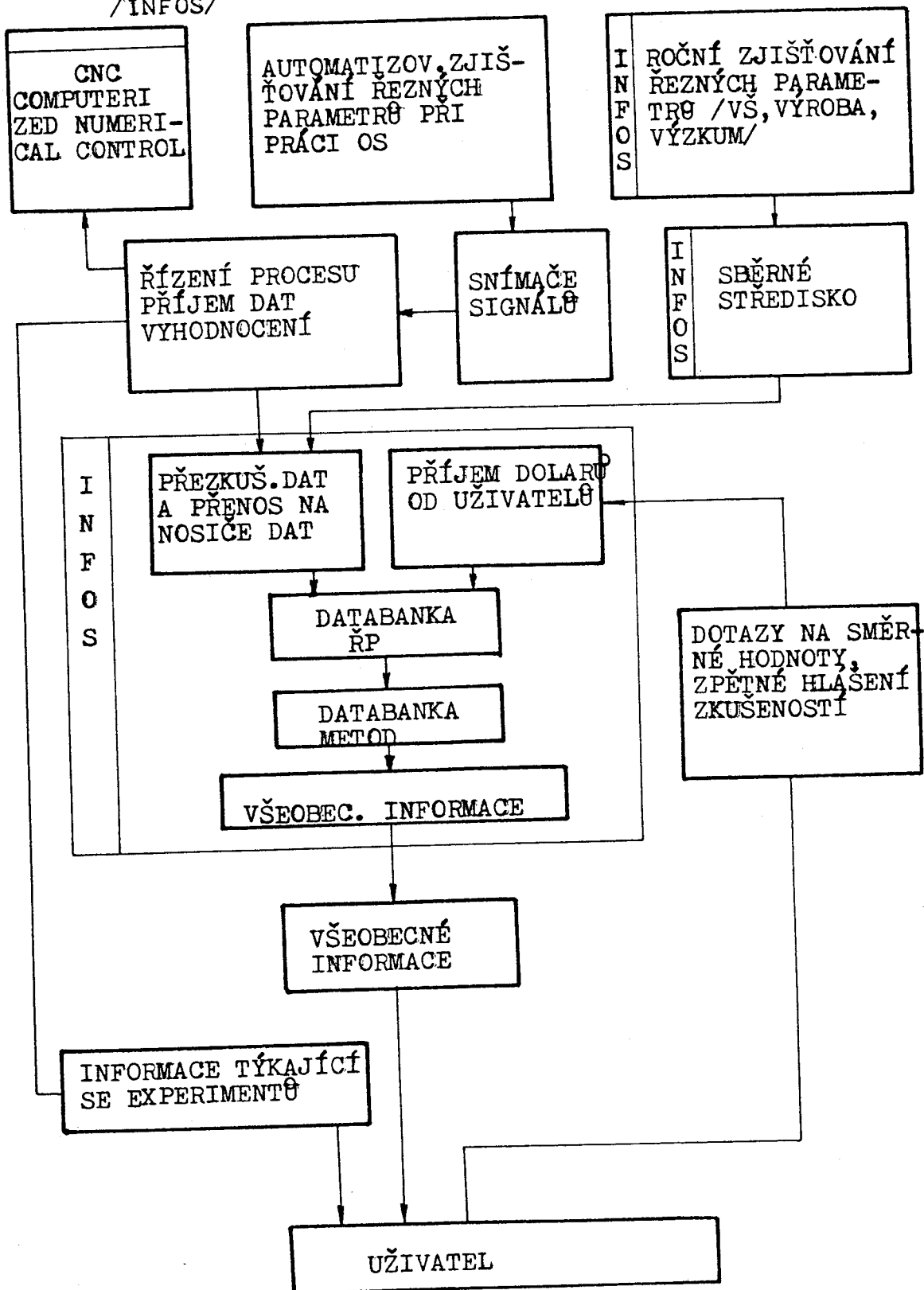
Sekund. znázornění na obr. 3. /6/

5/ NDR

Hlavním úkolem informačního střediska pro obrábění /SWS/ je poskytovat:

- 1/ Směrné hodnoty ŘP pro jednotlivé druhy obrábění ve formě katalogů
- 2/ Údaje o obrábění, přihlížející k opotřebení a výkonu ve formě tabulek

Obr. 3: Organizace informačního střediska pro obrábění
/INFOS/



3/ Optimalizované ŘP představující informace nejvyšší úrovně, zjišťování optimalizovaných řezných parametrů probíhá ve dvou formách /podle volby zákazníka/:

- s přihlédnutím k obrobku /na základě údajů, které sdělí zákazník na speciální formuláře/
- bez ohledu na obrobek, ve formě tabulek sestavených pro konkrétní materiál obrobku, nástroje a OS, a pro několik volitelných veličin /hloubka řezu, posuv atd./

Základem SWS je počítačový systém složený:

- a/ ze systému komunikačních programů
- b/ ze systému zpracovatelských programů a kartoték /programy pro výpočet ŘP, OŘP, kartotéky obráběcích a nástrojových materiálů, strojů, přípravků, nástrojů atd./.

Středisko SWS se buduje postupně ve třech etapách:

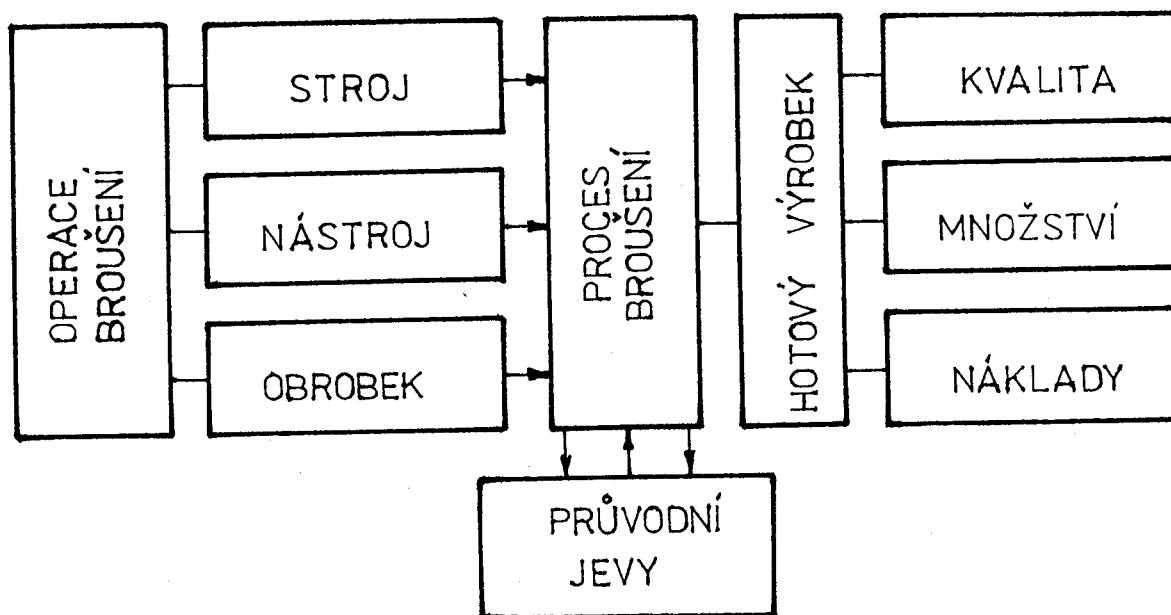
1. etapa - analýza současného stavu: zpracování údajů pro důležité nástrojové a obráběné materiály: tvorba kartotéky pro OS, nástroje, přípravky, materiály, výstavba databankového systému pro zpracování a ukládání údajů, výstavba komunikačního systému mezi střediskem a uživateli
2. etapa - vypracování tabulek směrných hodnot ŘP
3. etapa - výpočet optimalizovaných ŘP /6/

3. Princip a charakteristika broušení

Broušení je charakterizováno jako metoda třískového obrábění, při kterém jsou z obráběného materiálu odebrány velmi jemné třísky působením brousicího kotouče. Brousicí kotouč lze charakterizovat jako mnohabřitý nástroj, jehož řezné hrany jsou rozloženy nepravidelně a nemají definovanou geometrii. Operace broušení je umožněna pohybem nástroje a pohybem obrobku. Jednotlivé způsoby broušení se liší kinematickými poměry a podmínkami záběru mezi brousicím nástrojem a obrobkem. Operace broušením je uskutečňována technologickou soustavou stroj - nástroj - obrobek. Členy této soustavy je nutno považovat za vstupní podmínky procesu. V průběhu procesu broušení vznikají a působí průvodní jevy. Výsledek procesu je dán množstvím a kvalitou obrobku a ekonomickými ukazateli. Blokové schema procesu broušení je na obr. 4.

Broušení je složitý řezný proces, který se od jiných metod obrábění liší svými specifickými zvláštnostmi, především časovou změnou brousicího kotouče, který má souvislý břit a jehož funkční plocha se skládá z velkého množství nepravidelně rozložených brousicích zrn.

Obr. 4: Blokové schema procesu broušení



Brousicí zrna mají tvar nepravidelného mnohostěnu a zcela nahodilou orientací krystalografických os vzhledem k pracovní ploše kotouče. Břítý zrn jsou převážně zaobleny, řezné úhly závisí na uložení zrna v kotouči a z hlediska obrábění jsou nevhodné, neboť úhel čela je záporný.

Přisouváním brousicího kotouče do řezu nastávají na stykové ploše kotouče a obrobku tři rozdílné fáze:

- tření - brousicí zrna se v důsledku zaoblených břitů a velmi malého počátečního záběru tře po povrchu obrobku bez úběru materiálu a dochází k elastické nebo plastické deformaci. V místě styku vzniká teplo.
- vyrývání - brousicí zrna způsobuje plastickou deformaci materiálu obrobku, ve směru pohybu vznikají rýhy, materiál obrobku je při malé rychlosti vytrháván.
- řezání - před řeznou hranou zrna, za působení plastické deformace a teploty dochází k posunutí částic materiálu a vytváří se tříška, při velké rychlosti úběru materiálu. /8/

3.1. Zvláštnosti broušení

Porovnáním broušení a ostatních způsobů třískového obrábění lze zjistit řadu rozdílů a zvláštností: /8/

- nástroj /brousicí kotouč/ podléhá v průběhu procesu broušení neustálým změnám
- brousicí zrna mají nepravidelný tvar, jejichž řezné hrany mají negativní úhel čela
- brousicí zrna mají vysokou tvrdost a odolnost proti otěru i za vysokých teplot, což umožňuje provádět úběr materiálu při vysokých řezných rychlostech
- prostorové rozložení brousících zrn v tělese nástroje je nepravidelné a způsobuje i nepravidelné odebírání třísek jednotlivými zrny
- brousicí zrna jsou upevněna v tělese nástroje poměrně málo, což omezuje velikost dovolené řezné síly a umožňuje samoostření brousicího kotouče, tedy vytváření nových řezných hran

- tříska je odebírána nikoliv souvislým břitem, ale velkým množstvím řezných hran - brousicích zrn
- tloušťka třísky se pohybuje řádově v rozměru $0,0001 \div 0,01 \text{ mm}$
- utváření třísek probíhá ve velmi krátkých časových intervalech, řádově $10^{-7} \div 10^{-6}$ sekundy
- vznikající řezné síly dosahují relativně malých hodnot, řádově 100 N.

4. Pojem obrobitelnost

Obrobitelnost je souhrn vlastností obáběného materiálu určujících jeho vhodnost k produktivnímu obrábění [18], jiná definice říká, že pojem obrobitelnosti materiálu obsahuje souhrn fyzikálních i chemických vlastností obráběného materiálu, který má vliv na vlastní proces obrábění.

Určování obrobitelnosti je možno provádět podle různých kritérií, neboť obrobitelnost není dosud zcela jednoznačně definována.

- Technologické kritérium: objem materiálu odebraného za časovou jednotku.
- Kvalitativní kritérium: schopnost materiálu dosáhnout při dané operaci drsnost povrchu, strukturu a napjatost povrchové vrstvy.

Souhrn technologických vlastností, které určují obrobitelnost materiálu lze vyjádřit ve vztahu k těmto parametrům:

- řezná síla, kroutící moment nebo výkon, potřebný na oddělení materiálu
- řezná rychlost při požadované trvanlivosti řezné hrany
- tvar odcházející třísky.

Shrneme-li tyto parametry, pak za lépe obrobitelný materiál považujeme:

- menší zatížení nástroje a stroje řeznými silami
- vyšší řezná rychlost při dané trvanlivosti řezné hrany
- menší drsnost a větší přesnost obrobené plochy
- více drobná tříska.

Všechny popsané parametry závisejí na geometrii nástroje, jeho opotřebení a na řezných podmínkách./3/

4.1. Obrobitelnost při broušení

Například profesor Křístek definuje obrobitelnost takto: "Obrobitelností materiálu rozumíme jeho vlastnost podrobit se procesu obrábění, tj. odstranění přebytečného materiálu ve tvaru třísek." /3/

Podobně definoval obrobitelnost broušení Maslov /12/ jako: "Souhrn technologických vlastností materiálu, charakterizujících jeho způsobilost k obrábění brousicím nástrojem."

Uvedené definice, jakož i souhrn dosavadních poznatků o procesu broušení ukazují, že v důsledku vzájemné interakce dvojice brusný kotouč - obrobek nutně existuje určitá souvislost mezi řezivostí brousicích kotoučů a obrobitelností broušením.

Obrobitelnost zahrnuje řadu ukazatelů:/10/

- produktivitu obrábění /úběr/
- měrnou spotřebu brousicího nástroje a jeho trvanlivost
- velikost řezných sil a teplot broušení
- drsnost obrobeného povrchu a kvalitu povrchové vrstvy
- rozměrovou přesnost apod.

Např. při obrábění ocelí elektrokorundovým kotoučem s keramickým pojivem je menší opotřebení než při obrábění kotouči s brusivem z karbidu křemíku při stejném pojivu. Je to způsobeno chemicky aktivní povrchovou vazbou mezi zrna elektrokorundu s keramickým pojivem.

U těžko obrobitelných ocelí je vhodné použití monokorundového brusiva, jehož zrno má o 18 až 20 % vyšší řezivost oproti korundu a je dosaženo vyšší produktivity broušení.

Obrobitelnost ocelí s vysokým obsahem manganu se zlepšuje použitím kotouče z bílého elektrokorundu a monokorundu pro jejich vyšší trvanlivost oproti kotoučům z karbidu křemíku.

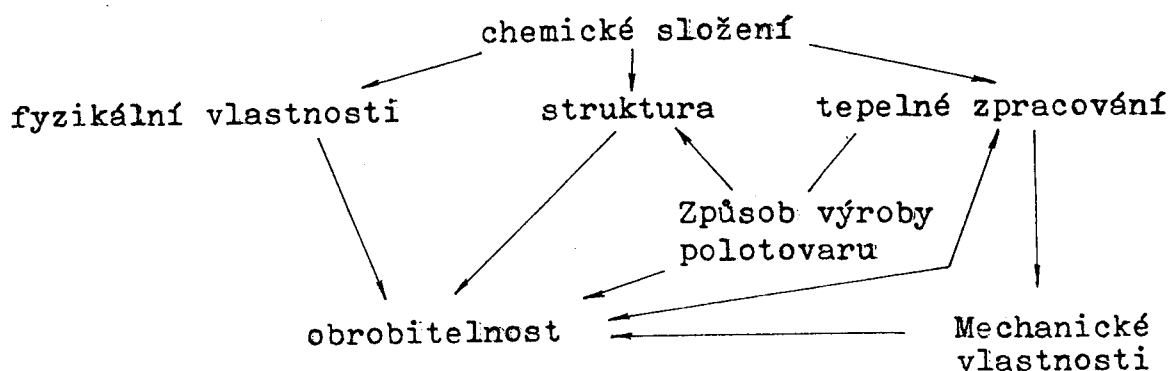
Obrobitelnost litiny při broušení určuje především její chemické složení a struktura.

Šedou litinu s uhlíkem ve formě grafitu lze úspěšně brousit nástroji s brusivem z karbidu křemíku nebo kubického nitridu bóru /elboru/. Bílou a tvrzenou litinu s uhlíkem ve tvaru volného karbidu s vysokou tvrdostí nelze brousit kotouči z karbidu křemíku. V tomto případě je vhodné použít diamantové kotouče s kovovými pojívy, které jsou 10 ÷ 20 x trvanlivější než kotouče z karbidu křemíku.

Obrobitelnost v procesu obrábění jako charakteristiku obráběného materiálu tedy ovlivňuje řada činitelů. K nejdůležitějším patří:

- fyzikální vlastnosti
- chemické složení
- způsob výroby
- mikrostruktura.

Tyto činitele mohou být vzájemně vázány jak názorně ukazuje obr. 5.

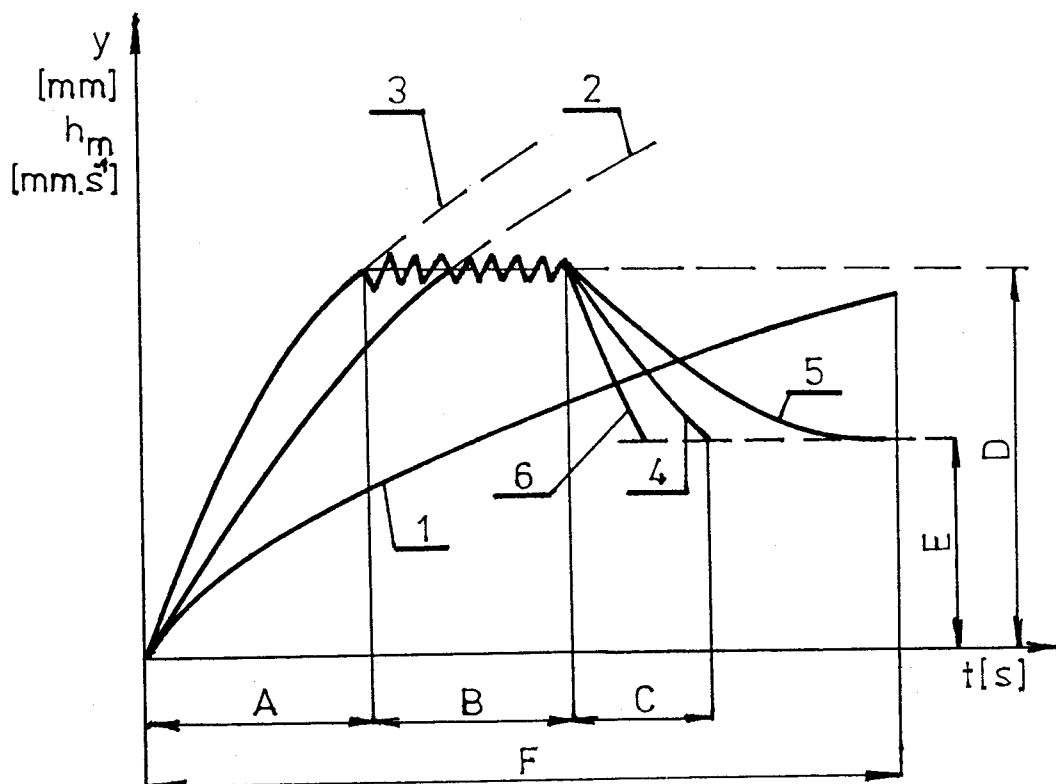


Obr. 5: Vliv vlastností obráběného materiálu na obrobitelnost broušením

Mezi fyzikální vlastnosti patří zejména tvrdost, pevnost, houževnatost, tepelná vodivost a adhezní schopnost. Tvrdost zvětšuje abrazivní opotřebení a pevnost zvyšuje řeznou sílu. Zvýšení teploty a řezné síly u těžkoobrobitelných materiálů mají za následek velké zpevnění v oblasti tvoření třísek. Tento negativní jev lze odstranit nebo alespoň snížit zvýšením posuvu a snížením řezné síly.

Z chemického složení vyplývají všechny vlastnosti obráběného materiálu. K prvkům, které výrazně snižují obrobitelnost patří uhlík /u ocelí legovaných karbidotvornými prvky/,

křemík, chrom /snižuje obrobiteľnosť úmerně s obsahem uhlíku/, větší obsah niklu, hliníku, wolframu a další. Naopak zlepšení obrobiteľnosti materiálu lze dosáhnout přidáním síry.



Obr. 6: Optimální cyklus broušení

Zkoumání obrobiteľnosti daných materiálů broušením směřuje především k určení jejich výkonného obrábění. A výkonnost broušení je úzce spojena s problematikou optimálního cyklu broušení, který má tři fáze:

1. rozřezávání - vzrůstá přísuv, intenzita úběru, dochází k napružení soustavy SPID
2. ustálený režim - přísuv je konstantní, úběr velký, systém zůstává napružen
3. vyjiskřování - broušení bez přísuvu, pokles úběru materiálu, uvolnění napjatosti systému.

Grafické znázornění optimálního cyklu broušení /12/ je na obr. 6:

kde: y - odtlačení SPID

h_m - intenzita úběru

A - doba vřezávání se zvýšeným přísuvem

B - doba ustáleného procesu broušení

C - doba závěrečného broušení bez přísuvu /vyjiskřování/

D - odtlačení technologické soustavy při konstantním přísuvu

E - odtlačení technologické soustavy na konci vyjiskřování

F - doba zapichování konstantním přísuvem

Křivka 1 - vřezávání s ustáleným nízkým přísuvem

Křivka 2 - 3 - zapichování se zrychleným přísuvem

Křivka 4 - dokončování broušení bez přísuvu /vyjiskřování/

Křivka 5 - zpomalení vyjiskřování

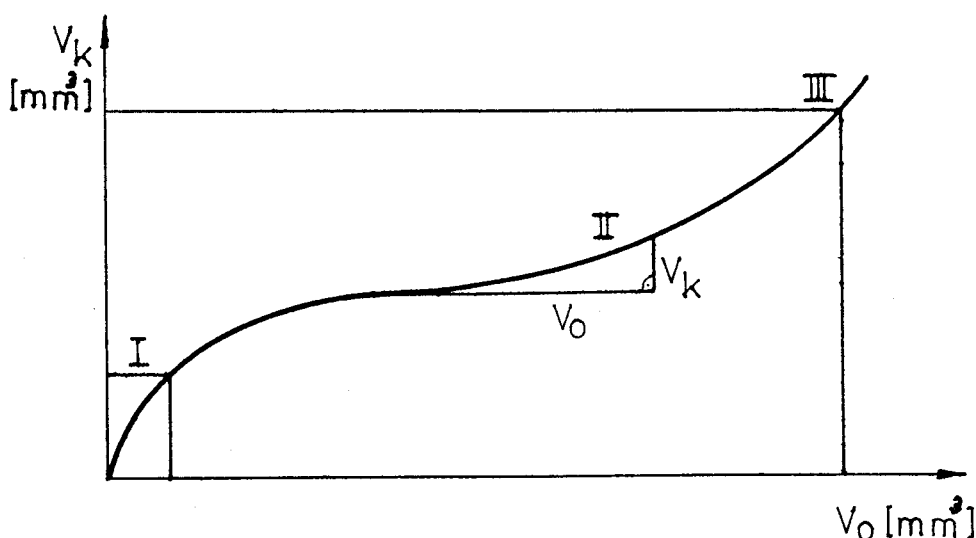
Křivka 6 - urychlení vyjiskřování

4.2. Kritéria používaná při hodnocení obrobiteľnosti /3/

V praxi je obrobiteľnosť úzce spojená s pojmem řezivost, což je vlastně souhrn vlastností nástroje, které vyjadřují jeho řezné schopnosti. V tabulce č. 1 je výběr několika kritérií, která v souvislosti s těmito dvěma jevy byly zavedeny. /viz příloha/

5. Vliv opotřebení a trvanlivosti brousicího kotouče

Opotřebení brousicího kotouče patří mezi hlavní parametry, které působí na kvalitu brousicího procesu. Průběh opotřebení brousicího kotouče závisí na všech podmínkách broušení - charakteristice kotouče, vlastnostech obráběného materiálu, řezných podmínkách apod. Na obr. 7 je křivka opotřebení brousicího kotouče.



Obr. 7: Opotřebení brousicího kotouče

Křivka je tvořena třemi oblastmi:

v oblasti I - nastává rychle opotřebení ostrých zrn, dochází k odlamování vrcholů

v oblasti II - otěr zrn, vznikají opotřebením plošky, dochází k částečnému vylamování zrn

v oblasti III - při zvýšení řezné rychlosti se zvyšuje intenzita porušování zrn

Z tohoto diagramu můžeme vypočítat strmost křivky a hodnotit řezivost nebo obrobitelnost materiálu. Podle toho, jaké vlastnosti má brusný nástroj a jaké řezné podmínky jsou užity, mohou na brousicím kotouči probíhat dva stavy. Jednak otupení kotouče kdy jsou brusná zrna postupně štěpena a ztrácí řezivost a potom také samoostření brousicího kotouče, kdy v důsledku otupení brusných zrn se zvýší brusný odpor a zrna již

nejdou schopna odebírat třísku a vydrolují se z pojiva.

Maslov /12/ uvádí, že opotřebení brousicího kotouče závisí především na jeho trvanlivosti.

$$VKG = \frac{C_o}{T_m}, \quad (1)$$

kde: C_o - konstanta, závisí na podmínkách broušení
 T_m - trvanlivost

Trvanlivost brousicího kotouče lze vyjádřit pomocí minutového úběru materiálu, připadající na jednotku řezné plochy kotouče. Potom platí vztah

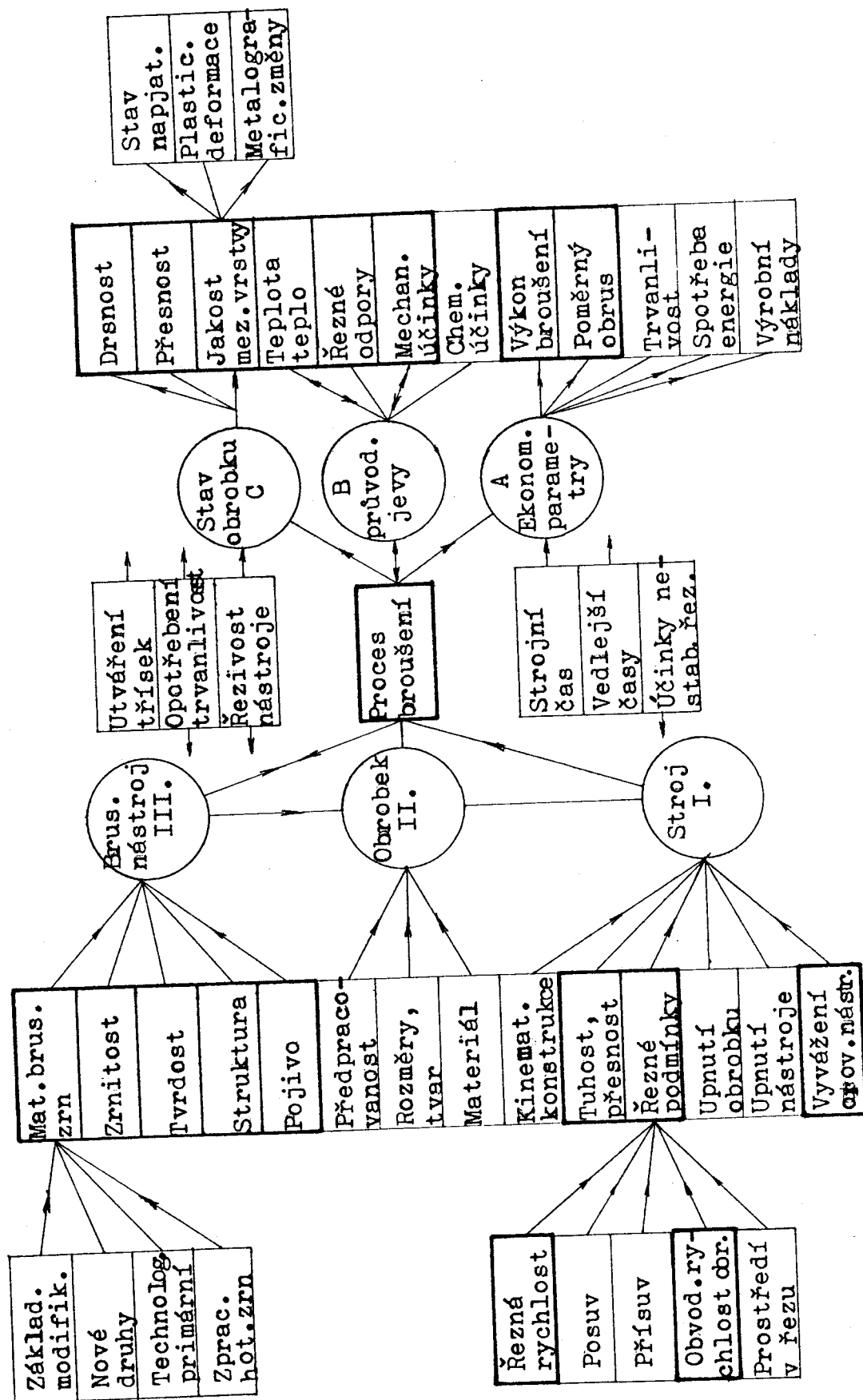
$$T^m_A = \frac{C_o}{Q_M}, \quad (2)$$

kde: m_A - exponent poměrné trvanlivosti
 Q_M - měrný úběr na jednotku řezné plochy kotouče
/mm³.min⁻¹.mm⁻²/

6. Vazby technologie broušení

Postihnout techniku broušení a její vývoj v celé šíři je obtížný a náročný úkol. Náhorný příklad o rozsahu techniky broušení podává blokové schéma na obr. 8. Proces broušení je zde představen jako produkt působení velkého počtu převážně nezávisle proměnných veličin od výchozích materiálových a tvarových údajů o obrobku přes charakteristiky a veličiny definující brusný nástroj, primární a sekundární řezné podmínky, až ke stavu a působení brusky. Na proces broušení se pak váží průvodní jevy procesu, důsledky jejich působení na stav obrobku a nástroje a technicko-ekonomické ukazatele broušení. Ve schématu mohou být vyznačeny vzájemné vazby mezi jednotlivými veličinami, které současně představují rozličné cesty řešení a studia. Jejich počet a tím také počet pohledů na detaily techniky broušení je prakticky neomezený. Je třeba ještě zdůraznit, že schéma představuje jen některé nejobecnější souvislosti z techniky broušení a v žádném případě nevystihuje desítky konkrétních aplikací pro jednoznačně specifikované operace broušení. /9/

Obr. 8: Rozsah techniky broušení /9/



6.1. Veličiny ovlivňující proces broušení

Proces broušení je uskutečňován soustavou stroj-nástroj-obrobek a každý člen této soustavy výsledky procesu ovlivňuje. Dosažení žádoucích výsledků je proto závislé na vytvoření optimálních podmínek mezi členy soustavy.

Z hlediska parametrů stroje proces broušení ovlivňují:

- řezné podmínky - řezná kapalina - způsob chlazení, tlak, množství, druh
 - obvodová rychlost obrobku
 - obvodová rychlost kotouče
 - velikost úběru materiálu
 - rychlost zápichu
- upnutí obrobku - způsob upnutí
 - velikost broušené plochy
 - radiální házení
 - tuhost upnutí obrobku
- tuhost - koníku
 - pracovního vřeteníku
 - brousicího vřetena
- přesnost chodu - pracovního vřetena
 - brousicího vřetena
 - upnutí obrobku
- příkon pohonu - přísuvných mechanismů
 - pracovního vřetene
 - brousicího vřetene

Z hlediska parametrů obrobku proces broušení ovlivňují:

- materiál obrobku - druh materiálu
 - pevnost
 - tvrdost
 - houževnatost
 - předchozí opracování
 - tepelné zpracování
 - hutní zpracování
- rozměr obrobku - přídavek na broušení
 - průměr, šířka, délka
 - tloušťka stěny

- požadovaná a výchozí drsnost povrchu
- požadovaná geometrická přesnost obrobku

Z hlediska broušicího kotouče je proces broušení ovlivněn:

- vlastnostmi broušicího kotouče
 - druhem základního materiálu
 - zrnitostí
 - tvrdostí
 - strukturou
 - druhem pojiva
 - speciální úpravou /impregnací/
- geometrickou přesností broušicího kotouče
 - statickou a dynamickou vyvážeností
 - radiálním házením
 - axiálním házením
 - přesností rozměru
- orovnááním broušicího kotouče - podmínkami
 - obvodová rychlost kotouče
 - hloubkou záběru
 - intenzivním chlazením
 - druhem orovnávače
 - upnutím orovnávače /8/

7. Metodika řešení databanky řezných podmínek pro broušení

7.1. Činitelé ovlivňující volbu broušicího kotouče

Při volbě jakosti broušicího kotouče /2/ se vychází od těchto činitelů:

A. Vlastnosti broušeného materiálu

1/ pevnost v tahu

2/ tvrdost

3/ tažnost za studena /křehkost - houževnatost/

B. Druh broušicí operace /poloha broušicího kotouče k broušenému předmětu/

- 1/ broušení válcových ploch vnějších
- 2/ broušení válcových ploch vnitřních
- 3/ broušení rovinné
- 4/ broušení ruční

C. Podmínky, při nichž se brousí

- 1/ stroj
 - a/ druh a typ stroje
 - b/ obvodová rychlost broušicího kotouče
 - c/ obvodová rychlost broušeného předmětu
 - d/ rychlost posuvu
 - e/ stykový oblouk broušicího kotouče
 - oblouk dotyku
 - šířka dotyku
 - rozsah dotyku
 - dotyk kontinuální či přerušovaný
 - f/ způsob podávání
 - ruční
 - poloautomatické
 - automatické /hydraulické, mechanické/
- 2/ brusič, jeho zkušenost a odbornost
- 3/ technický stav broušicího stroje
- 4/ velikost a hmotnost broušicího stroje v poměru k broušicí části
- 5/ broušený předmět
 - a/ velikost
 - b/ tvar /hrana, plocha, přerušení/
 - c/ stav /tvrzený, legovaný, kalený aj./
 - d/ množství obroušeného materiálu
 - e/ stupeň opracování
 - f/ požadovaná jakost výbrusu /drsnot povrchu/
- 6/ orovnění kotouče
- 7/ chlazení

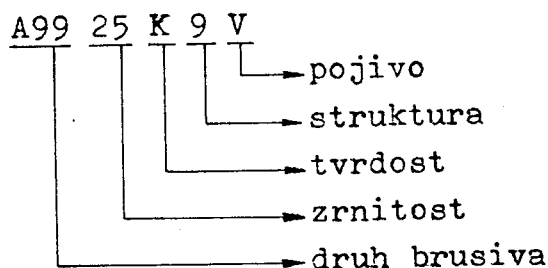
7.2. Zásady pro volbu brousicího kotouče:

- pro větší úběr materiálu se volí hrubší zrnitost
- pro tvrdší obrušovaný materiál se volí měkký kotouč
- pro broušení materiálu se sklonem k mazlavosti /měď, mosaz, hliník aj./ se volí brousicí kotouč měkký s hrubou zrnitostí
- čím větší je styčná plocha /stykový oblouk násobený šířkou kotouče/ mezi brousícím kotoučem a obrobkem, tím hrubší se volí zrnitost a nižší tvrdost brousicího kotouče
- pro materiál citlivý na teplotní změny se volí měkký brousicí kotouč
- pro broušení přerušovaných ploch se volí kotouč tvrdší
- pro broušení otvorů se volí kotouč měkký než pro broušení vnějších válcových ploch.
- při broušení obrobku čelem kotouče se obvykle volí kotouč měkký než pro broušení obvodem kotouče. /2/

7.3. Hlavní znaky určující jakost brousicího nástroje /10/ tab. č. 2

1. Druh brousicího materiálu
2. Zrnitost brousicího materiálu
3. Tvrdost kotouče
4. Struktura kotouče
5. Pojivo

Označení brousicího kotouče dle ČSN:



Druh brusiva	A99B	umělý korund	bílý s barvou A99 bílý A99B růžový A98 manganový A98M hnědý A96 mikrokryсталický A97M polokřehký A97P zirkonový A97E tecepol TC leštící čern F slinutý korund K
		karbid křemíku	zelený C49 černý C 48
Zrnitost	25	velmi hrubá hrubá střední jemná velmi jemná zvlášť jemná	315,250,200,160 125,100,80,63 50,40,32,25 20,16,12,10 8,6,5 4,3,M32,M22,M15
Tvrdost	K	velmi měkká měkká střední tvrdá velmi tvrdá zvlášť tvrdá	G,H I,J,K L,M,N,O P,Q,R,S T,U, V,W,Z
Struktura	9	velmi hutný hutný polohutný pórovitý velmi pórovitý zvlášť pórovitý	1,2 3,4 5,6 7,8 9,10 11,12,13
Pojivo	V	keramické silikátové magnezitové šelakové pryžové umělá pryskyřice polyuretanové	V S Mg E R B U

Tab. č. 2

7.3.1. Volba brousicího kotouče podle jakosti /1/,/2/,/8/,/10/

1. Druh brousicího kotouče

Druh brousicího materiálu se volí podle druhu a vlastností broušeného materiálu viz tab. č. 3

Brousicí materiál	Broušený materiál
Tavený oxid hlinitý Al_2O_3 - umělý korund	ocel ocel na odlitky temperovaná litina tvrdé bronzy
Karbid křemíku SiC	šedá litina mosaz měkké kovy měď lehké kovy a jejich slitiny slinuté karbidy
Kubický nitrid bóru B_4C	kalené oceli vysoké tvrdosti rychlořezné oceli žárupevné oceli koroziivzdorné oceli vysoce legované oceli šedá litina s uhlíkem ve formě grafitu
Diamant	slinuté karbidy bílá temperovaná litina rychlořezné oceli tvrdé nekovové materiály /sklo, polovodiče, keramika/ ferit

Tab. č. 3: Druh brousicího materiálu

2. Zrnitost brousicího kotouče

Volí se podle požadované jakosti broušeného povrchu obrobku, průměru brousicího kotouče a průměru obrobku. Pro hrubování zrnitost větší, pro broušení na čisto menší. Pro těžko obrobitelné materiály volíme zrnitost menší a měkčí kotouč. Pro tvarové broušení zrnitost menší. Pro roztíratelné materiály a materiály s dlouhou třískou volíme velkou zrnitost, aby nedocházelo k zanášení kotouče. Rozměry zrnitosti jsou dány v mikrometrech, měrný rozměr je vždy šířka opsaného rovnoběžnostěnu zrna. Frakce od 200 do 16 μm určuje brusné zrno, 12 až 3 μm brusné prášky, M40 až M3 mikroprášky.

3. Tvrdost brousicího kotouče

Tvrdost kotouče je odpor, který klade pojivo proti vy-lomení nebo uvolnění jednotlivých zrn z nástroje vlivem vnějších sil. Tvrdost se volí podle druhu broušeného materiálu a způsobu broušení /podle polohy brousicího kotouče k broušenému předmětu a tvaru broušené plochy/. Kotouč volíme tím měkčí, čím tvrdší je broušený předmět a čím větší je styčná plocha brousicího kotouče s broušeným předmětem.

Tvrdost nemá tak velký vliv na proces broušení, ale na tepelné chování. S rostoucí tvrdostí roste teplota. Pro tvarové a profilové broušení volíme kotouč tvrdší, aby nedocházelo ke změně tvaru kotouče. Pro vysoké tlaky /hrubování, ruční broušení/ volíme kotouč tvrdší, aby se zabránilo úbytku zrn. Pro nízké tlaky se volí kotouče s nízkým stupněm tvrdosti a využívá se procesu samoostření k zabránění vzniku vysokých teplot.

4. Struktura brousicího kotouče

Strukturou brousicích nástrojů se rozumí poměr objemu pórů k celkovému objemu brousicího tělesa. Struktura je v přímé souvislosti s tvrdostí kotouče a tedy tvrdost kotouče závisí na struktuře. Struktura - označení 1 až 10 vyplývá z dané technologie. Struktura - označení 11 až 13 se docílí uměle, přísadou pórotvorných komponentů. Na broušení hladkých předmětů z tvrdého a křehkého materiálu při malé

styčné ploše broušení se doporučuje sloh hutný, zatímco na broušení materiálu houževnatého při velké styčné ploše jsou vhodné kotouče pórovité. Na opracování předmětů, které se nesmí broušením ohřívat, je třeba volit kotouče zvlášť pórovité. U hrubovacích kotoučů je tvrdost dosažena malou pórovitostí.

5. Druh pojiva

Nejběžněji používaným pojivem je pojivo keramické /V/. Pro výrobu nástrojů, u nichž se vyžaduje dobré držení profilu je v poslední době využíváno speciální keramické pojivo /27/ - kotouče sklářské, závitové apod. Pojivo umělá pryskyřice B se pro svou vysokou mechanickou pevnost používá pro výrobu kotoučů rychloběžných, řezacích a drážkovacích. Pojiva pryžového R se využívá vzhledem k jeho vysoké pevnosti a pružnosti pro výrobu velmi slabých rozřezávacích a drážkovacích kotoučů, kotoučů pro broušení pilek apod. Jeho elasticity se využívá při výrobě kotoučů leštících. S pryžovým pojivem se vyrábějí i kotouče podávací pro bezhroté brusky. Magnezitové pojivo Mg se vyznačuje studeným výbrusem. Proto se ho používá pro výrobu kotoučů na broušení nožířského zboží a pilníkářských kotoučů velkých průměrů. Mimo to se používá pro výrobu různých druhů tvarových segmentů určených pro broušení nekovových materiálů.

7.4. Označení etiket na brousicích kotoučích

Pro bezpečnost práce a správné použití brousicích kotoučů jsou na kotouči nebo na papírových štítcích vyznačeny tyto údaje: /10/

1. původ a ochranná známka
2. jmenovité rozměry
3. číslo příslušné rozměrové normy
4. druh brusiva
5. číslo zrnitosti
6. stupeň tvrdosti
7. číslo struktury
8. druh pojiva
9. záznam o zkoušce pevnosti
10. mezní obvodová rychlost při broušení
11. hodnota statického vyvážení

7.5. Pevnost brousicích nástrojů

Keramické hmoty mají z používaných pojiv nejnižší pevnost v tahu, proto je nutné s těmito nástroji pracovat s nižšími obvodovými rychlostmi. Vyšších obvodových rychlostí lze použít u nástrojů s organickými pojivy, nejvyšších u kotoučů obsahujících kromě zrna a pojiva i výztuž. /10/

7.6.. Výkonnost brousicích nástrojů

Výkonnost brousicích nástrojů je vlastnost, která má vliv zejména na ekonomii broušení. Je závislá na:

- trvanlivosti brousicího kotouče
- řezivosti brousicího kotouče, řezivost vzrůstá s řeznou rychlostí při současném poklesu řezného odporu
- životností brousicího kotouče.

U měkkého kotouče /s měkkým pojivem/ bude řezná síla s otupováním brusných zrn vzrůstat stejně jako u kotouče s vhodnou tvrdostí, brusná zrna se však začnou vyламovat z pojiva při menší síle, tj. za kratší dobu. Uvolňují se po obvodu kotouče nerovnoměrně, kotouč ztratí kruhový tvar, což má za následek nárazy na povrch obráběného dílce během jedné otáčky. Projeví se to střídavým klesáním a stoupáním řezné síly, vlnitostí broušeného povrchu a rychlým opotřebením brousicího kotouče.

U tvrdého kotouče bude řezná síla s postupujícím otupováním zrna rovněž stoupat. Protože je ale zrno uchyceno pevněji než u samoostřicího kotouče, bude otupování zrn dále pokračovat a řezná síla ještě poněkud stoupne, než se brusné zrno vyломí z pojiva. Může se stát, že se třísky zamáčknu do pórů kotouče, znesnadní tím další řezání a radiální složka řezné síly prudce stoupne. Zvýší se tření kotouče po broušeném povrchu a broušený povrch se zahřívá.

Mají-li brousicí kotouče stejnou tvrdost, ale různou zrnitost, pak kotouč s jemnějším zrnem bude mít větší řezný odpor než kotouč hrubozrný, protože za stejných podmínek bude mít v záběru větší počet zrn.

Trvanlivost hrubozrných kotoučů je delší, protože při stejné síle je velké zrno uloženo v pojivu kotouče pevněji. Trvanlivost jemného kotouče se zmenšuje ještě tím, že se snáze zanáší třískami materiálu. /10/

7.7. Vady při broušení a jejich příčiny - tabulka č. 4

Chyba	Příčina
Brousicí kotouč se zamazává a pálí	Brousicí kotouč je příliš tvrdý Zrnitost kotouče je příliš jemná Obvod. rychlost je příliš velká Brousicí kotouč je špatně orovná
Brousicí kotouč se příliš rychle opotřebovává	Brousicí kotouč je příliš měkký
Brousicí kotouč málo ubírá	Brousicí kotouč je příliš tvrdý Zrnitost je příliš jemná
Brousicí kotouč neudrží profil	Brousicí kotouč je příliš měkký Zrnitost je příliš hrubá Počet otáček kotouče je příliš malý
Stopy po chvění na obroušené ploše	Bruska nepracuje klidně Nevyváženost u velkých kusů Ložisko vřetena brusky není v pořádku Brousicí kotouč není správně vyvážen Brousicí kotouč je příliš tvrdý
Rysky na obroušené ploše	Nečistota v chladicí kapalině
Skvrny na ploše	Brousicí kotouč je příliš tvrdý nebo příliš jemný Posuv je příliš velký Rychlost obráb. kusu je příliš malá Chladicí tekutina není vhodná
Brousicí kotouč tluče	Nesprávné uložení brusky Brousicí kotouč je špatně orovná

Tabulka č. 4. /2/

7.8. Vyvažování brousicích kotoučů

Vyvažování brousicího kotouče spočívá v uspořádání hmoty kotouče tak, aby se jeho těžiště shodovalo s jeho geometrickým středem. Nevýváženost negativně ovlivňuje brousicí vřeteno a jeho ložiska.

Při malé šířce kotouče, kdy jsou rotující hmoty téměř v jedné rovině, stačí jeho statické vyvážení.

Je-li šířka kotouče $B_k > 0,1 D_k$ je statické vyvážení nedostupné, neboť nevyvážené hmoty jsou obvykle rozloženy v různých rovinách. Pak je nutné brousicí kotouč dynamicky vyvážit na vyvažovacím zařízení./10/

7.9. Orovnávání brousicích kotoučů

Mezi hlavní způsoby se řadí orovnávání diamantovými orovnávači, diamantovými zrny upevněnými na speciálních držácích, diamantovými jednokamennými nástroji, nástroji vyrobenými z diamantového prášku, orovnávacími kolečky, brousky, elektrojiskrovým způsobem pro kotouče s kovovými pojivy, orovnání bez použití diamantu apod.

Při orovnání je třeba odebírat co nejmenší celkovou vrstvu brusiva a pohybuje se v rozsahu $0,05 \div 0,25$ mm na 1 orovnání.

Styčná plocha mezi diamantem a brousicím kotoučem je malá, proto vznikají při orovnání malé síly, což spolu s vysokou odolností diamantu proti opotřebení dává předpoklad k získání přesného geometrického tvaru brousicího kotouče a tím i kvality broušeného dílce. /10/

7.10. Vliv řezných podmínek při broušení na trvanlivost brousicího kotouče

Zvětší-li se rychlost dílce při broušení kalené oceli, objem materiálu odebíraného za dobu trvanlivosti kotouče se zpravidla zmenšuje. Při broušení nekalené oceli se objem odebíraného materiálu za dobu trvanlivosti kotouče prakticky nemění při všech rychlostech dílce. Proto je broušení dílců z nekalené oceli produktivnější.

Se zvětšením přísluvu při broušení kalené oceli trvanlivost brousícího kotouče z počátku roste, ale po krátké době rychle klesá, kdežto u dílců z nekalené oceli je tento pokles pomalejší, neboť vyšším zatížením zrn kotouče se úběr materiálu zvětšuje /zrna méně klouzají/.

Při broušení načisto se nedoporučuje pracovat s velmi malým přísluvem $/h < 0,005 \text{ mm}/$, při kterém je zatížení zrn brusiva velmi pomalé, vzniká jejich prokluz a brousící kotouč se značně opotřebovává. /10/

7.11. Tuhost technologické soustavy a stabilita řezného procesu

Proces řezání ovlivňuje tuhost technologické soustavy, která podmiňuje stabilitu řezného procesu a jakost obrobekových ploch. Tuhost technologické soustavy vyjadřuje její odolnost proti pružným deformacím členů soustavy a soustavy jako celku. Nízká tuhost technologické soustavy způsobuje vznik kmitů, které se negativně projevují ve snížení přesnosti geometrického tvaru, zhoršení drsnosti povrchu dílce, rychlejším otupením nástroje, zvýšeným opotřebením stroje s případnou destrukcí jeho částí. /10/

7.12. Chlazení při broušení

Řezné a chladicí kapaliny

Řezné a chladicí kapaliny jsou prostředky, které se používají při obrábění kovů. Vytvářejí prostředí, ve kterém probíhá řezný proces, na nějž působí svým chladícím řezným /mazacím/ a čistícím účinkem. Řezné a chladicí kapaliny jsou vedle konstrukce a materiálu nástroje jedním z faktorů, které významně ovlivňují produktivitu a ekonomii obrábění. Řezná a chladicí kapalina odvádí teplo z řezné oblasti, snižuje třecí odpory mezi nástrojem a dílcem, uvolňuje a odvádí třísky s nečistotami.

Hlavním účelem použití řezných a chladicích kapalin je:

- a/ zvýšení trvanlivosti nástroje
- b/ zlepšení jakosti obráběného povrchu
- c/ snížení spotřeby energie

Druh broušeného materiálu		Chladicí kapalina	Obsah ve vodě %	Přísada
Ocel	Legovaná/mimo austenitické/	Emulze H	2 - 3	
	Nelegovaná nekalená	Akvol	2 - 3	
	legovaná/mimo austenitické/ kalená	Emulsin H Robol Diol	2 - 3 5 4	
	austenitická nástrojová a rychlořezná	ROBOL řezný olej P2DS řez.ol.P2DS Robol	5 10	S+Se S+Se
Litina		Diol Emulsin H	3 2 - 3	

Tabulka č. 5: Doporučené řezné a chladicí kapaliny pro broušení

Rozdělení řezných a chladicích kapalin:

- 1/ Vodné roztoky
- 2/ Ropné výrobky používané pro řezné kapaliny
 - a/ vodní emulze emulgačních olejů a maziv
 - b/ minerální oleje
 - c/ řezné oleje maštěné
 - d/ řezné oleje s chemickými přísadami
- 3/ koncentráty účinných vysokotlakých přísad
- 4/ mastné látky živočišného a rostlinného původu
- 5/ syntetické kapaliny

Doporučené řezné a chladicí kapaliny jsou v tab. č. 5 /10 /

7.13. Drsnost povrchu a kvalita povrchové vrstvy broušených dílců

Na drsnosti povrchu dílce závisí hlavně počáteční opotřebení součásti a kvalita povrchové vrstvy má zase vliv na opotřebení během provozu.

Drsnost broušeného povrchu je ovlivňována všemi podmínkami broušení:

- druhem a charakteristikou brousicího kotouče, řeznými podmínkami, orovnáním kotouče atd. Drsnost povrchu příznivě ovlivňuje vysoká obvodová rychlost brousicího kotouče vzhledem k tomu, že se zmenšuje tloušťka třísky odebraná jedním zrnem kotouče.
- zvýšením podélného a příčného posuvu se drsnost broušeného povrchu zvětšuje, protože se zvětšuje tloušťka třísky odebraná jedním zrnem brusiva a zrna pronikají hlouběji do povrchové vrstvy dílce.

Drsnost povrchu je značně ovlivněna druhem brousicího kotouče /při ostatních stejných podmínkách se u kotouče s jemnější zrnitostí dosáhne nižší drsnosti/ a počtem zdvihů při broušení. Nerovnosti, které na povrchu dílce zbývají proto, že mezi zrny brusiva jsou mezery, se odstraňují při dalších kontaktech kotouče s každým broušeným úsekem. Drsnost povrchu se též snižuje při vyjiskřování.

Při broušení vzniká velké množství tepla a zároveň i velké tlaky, které vytvářejí na povrchu dílce tenkou vrstvu plasticky deformovaného kovu. Stav této vrstvy závisí na řezných podmínkách a mechanických vlastnostech obráběného materiálu. /10/

8. Návrh vlastního řešení zadání - databanky

Databanka řezných podmínek, kterou jsem v této práci zpracoval, se týká dvou nejpoužívanějších způsobů broušení:

- 1/ broušení vnějších válcových ploch
 - a/ s podélným posuvem s chlazením
 - b/ zapichovací s chlazením
- 2/ broušení rovinných ploch obvodem kotouče
 - a/ s příčným posuvem a se svislým přísuvem kotouče s chlazením
 - b/ zapichovací s chlazením

Rozdělení materiálu, výběr chladicí kapaliny a výběr brousicího kotouče jsem sestavil s pomocí konfrontace uvedených literatur /1/, /2/, /8/, /10/, /11/.

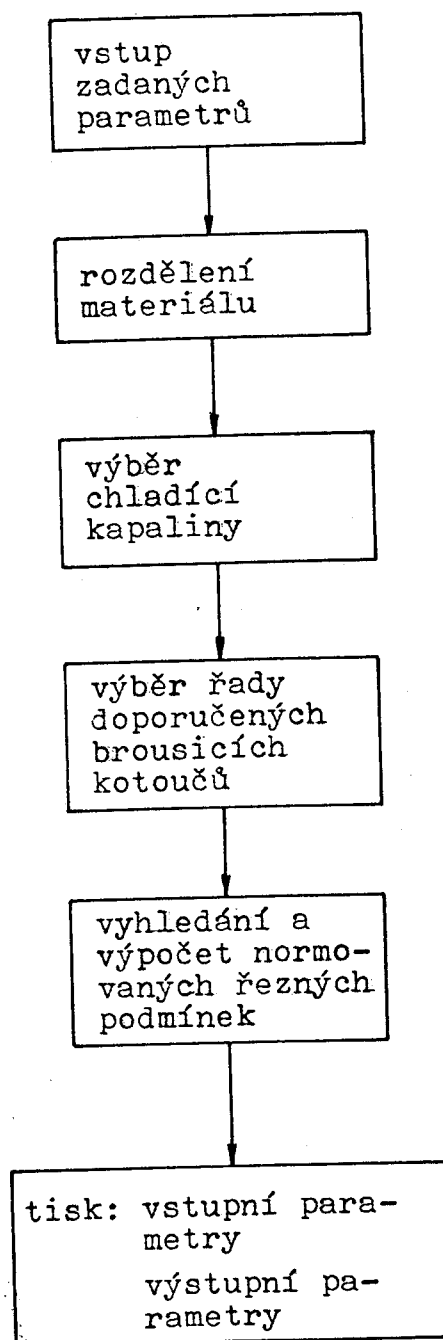
Řezné podmínky jsem stanovil z dostupných jednotných normativů pro broušení a to jen pro ty materiály, pro které jsou řezné podmínky v normativech uvedeny. Pro ostatní jsou v databance zaneseny hodnoty řezných podmínek doporučené, a nebo nejsou uvedeny, protože je předpokládá, že tyto materiály se nebrousí, a nebo jen velmi málo.

Pro broušení vnějších válcových ploch jsou normovány řezné podmínky pro všechny oceli skupiny obrobitelnosti 1b - 10b, pro stupeň přesnosti IT5 - IT9 a střední aritmetickou drsnost od 0,4 μm . Řezné podmínky jsou určeny jen pro vybrané druhy brousicích kotoučů dle ČSN používané na hrotových bruskách, od šířky brousicího kotouče 32 mm do 100 mm a průměru od 250 mm do 900 mm.

Pro broušení rovinných ploch obvodem kotouče jsou normovány řezné podmínky pro oceli skupiny obrobitelnosti 9b, 5b, litinu skupiny obrobitelnosti 8a, pro stupeň přesnosti IT 5 až IT 11 a střední aritmetickou drsnost 0,4 μm pro chlazení a 0,8 - 1,6 μm pro hrubování. Řezné podmínky jsou určeny jen pro vybrané druhy brousicích kotoučů dle ČSN používané na rovinných bruskách, do šířky brousicího kotouče 32 mm a průměru 250 mm.

8.1. Blokové schema databanky řezných podmínek

Blokové schema databanky viz obr. 9., se skládá ze 6 částí, které jsou v další části práce podrobně zpracovány.



Obr. 9. Blokové schema databanky

8.2. Podrobné schema databanky

8.2.1. Podrobné schema databanky pro broušení vnějších válcových ploch

Databanka řezných podmínek je zpracovaná pro oceli skupiny obrobitelnosti lb - lOb. Pro ně jsou řezné podmínky zpracovány z jednotných normativů pro broušení. Pro litinu, bronz, měď, mosaz, hliník a slinuté karbidy jsou řezné podmínky pouze doporučené a nebo nejsou uvedeny. Brousicí kotouče jsou rozděleny podle jakosti pro broušení:

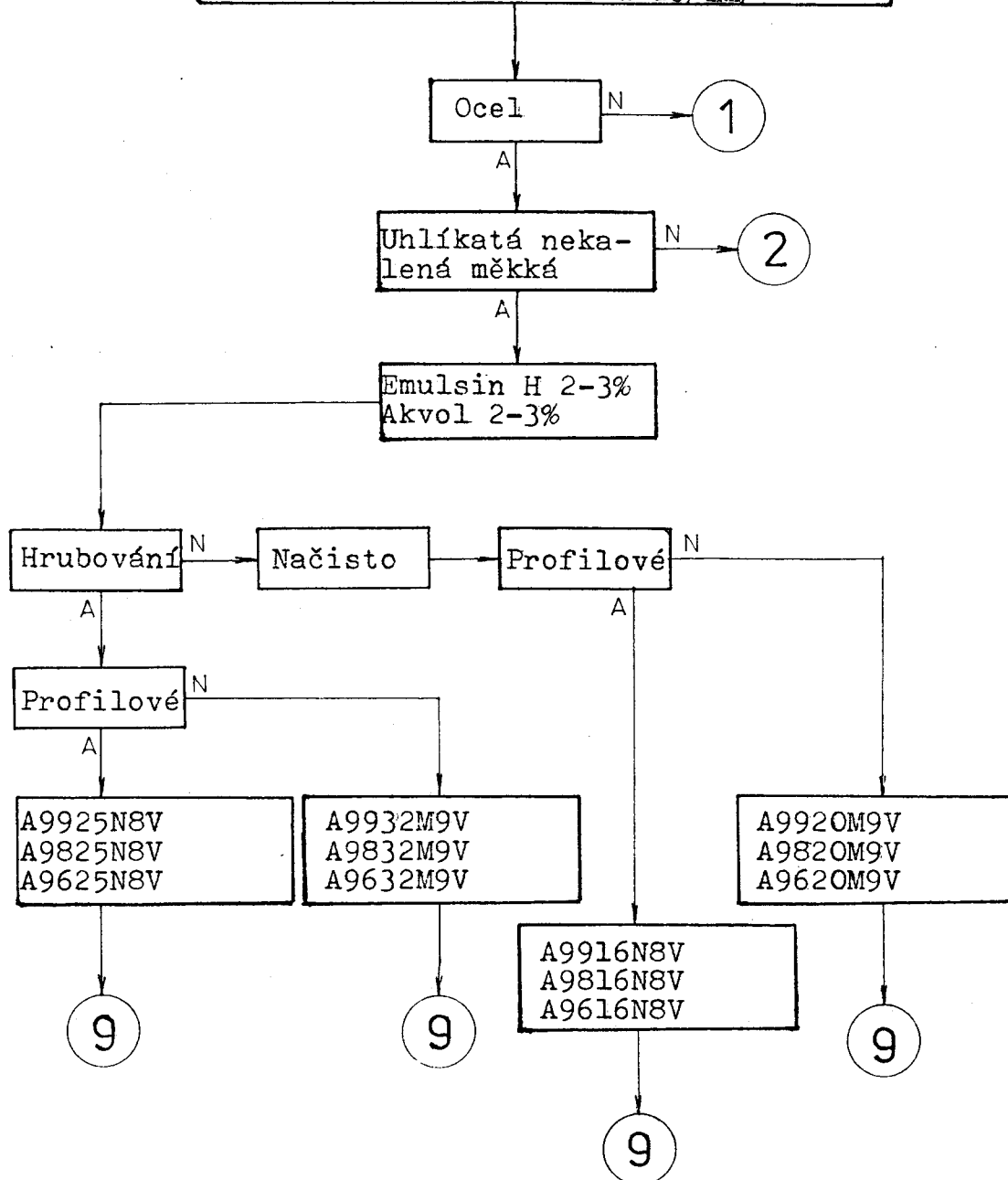
- hrubovací
- načisto
- profilové .

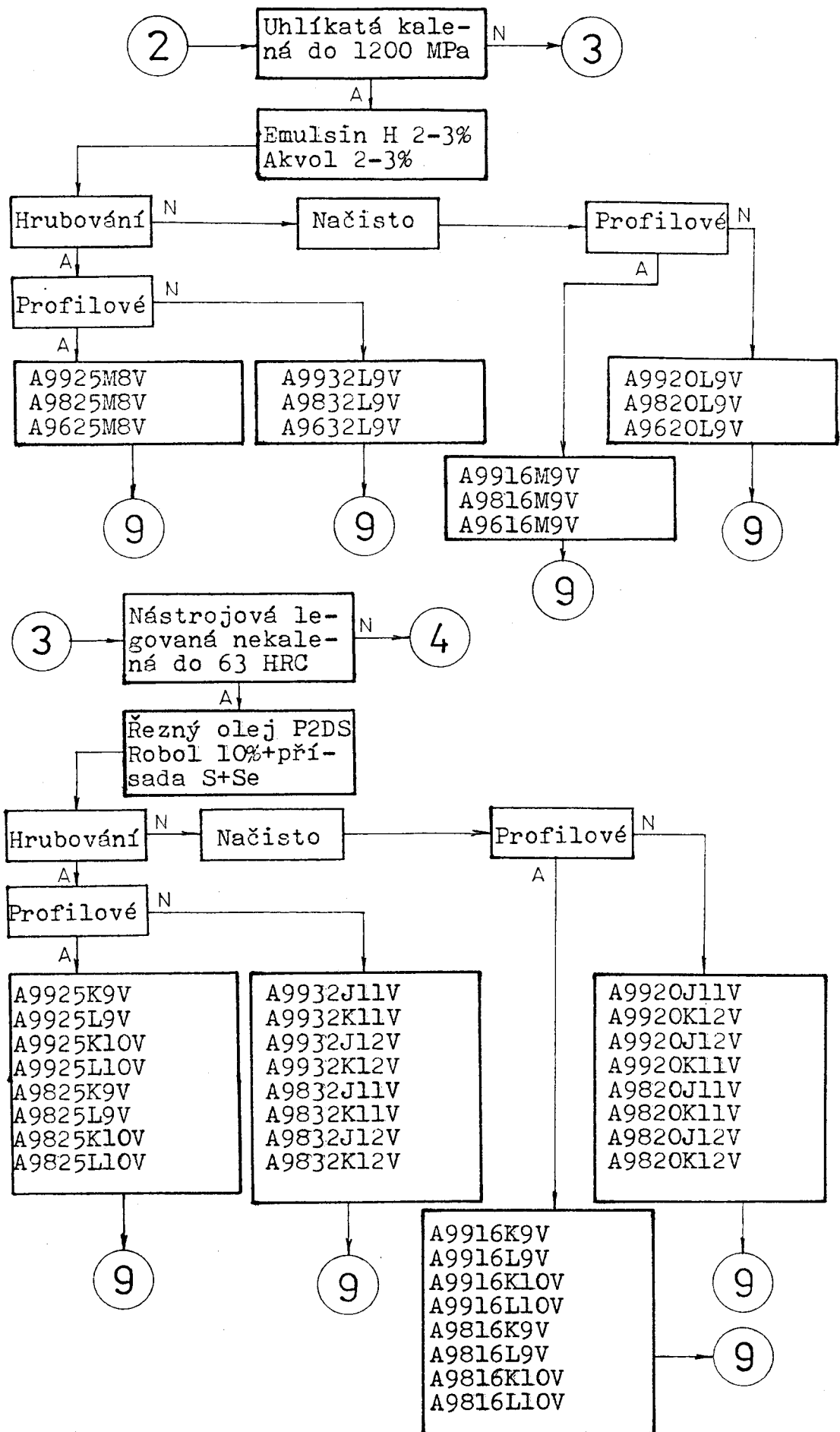
Rozdělení ocelí:

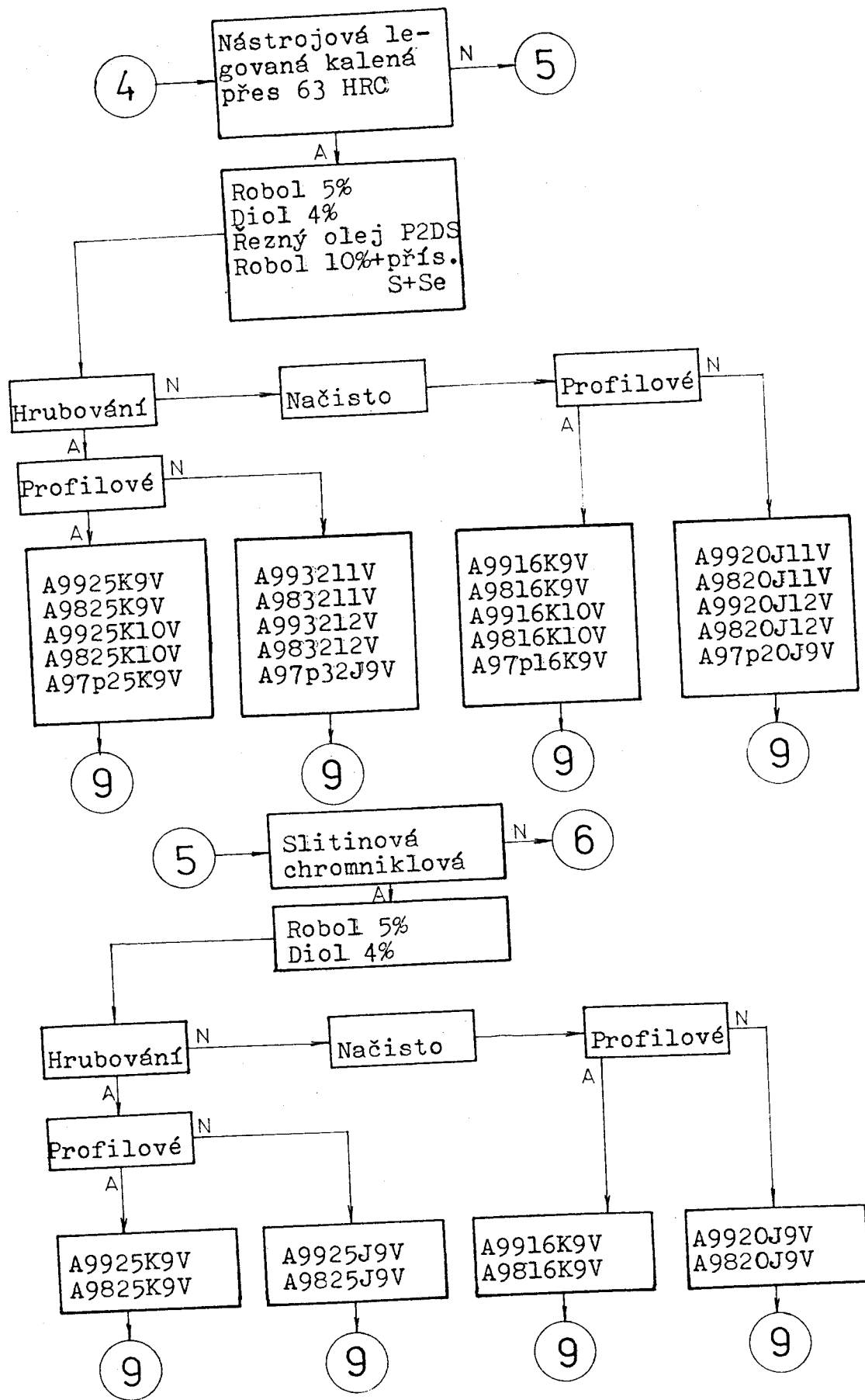
Název	Označení dle ČSN
Uhlíkatá nekalená měkká	10XXX.Y, 11XXX.Y, 12XXX.Y, Y=1,2,3,5,6,7,8,9
Uhlíkatá kalená do 1200 MPa	11XXX.4, 12XXX.4
Nástrojová legovaná nekalená do 63 HRC	13XXX.Y, 14XXX.Y 15XXX.Y, 16XXX.Y Y = 1,2,3,5,6,7,8,9
Nástrojová legovaná kalená přes 63 HRC	16XXX.4, 19XXX, 11700.4 a více 12042.4 a více 13XXX.4, 14XXX.4 15XXX.4
Slitinová chromniklová	17XXX
Slitinová chrommolybdenová	17116, 17341, 17102 17134, 17483
Nerez měkká austenitická nemagnetická	17331, 17341, 17482 17483, 17021
Nerez martenzitická magnetická	17023.4, 17024.4, 17027.4, 17028.4, 17029.4, 17030.4, 17031.4, 17042.4, 17115.4, 17618.4

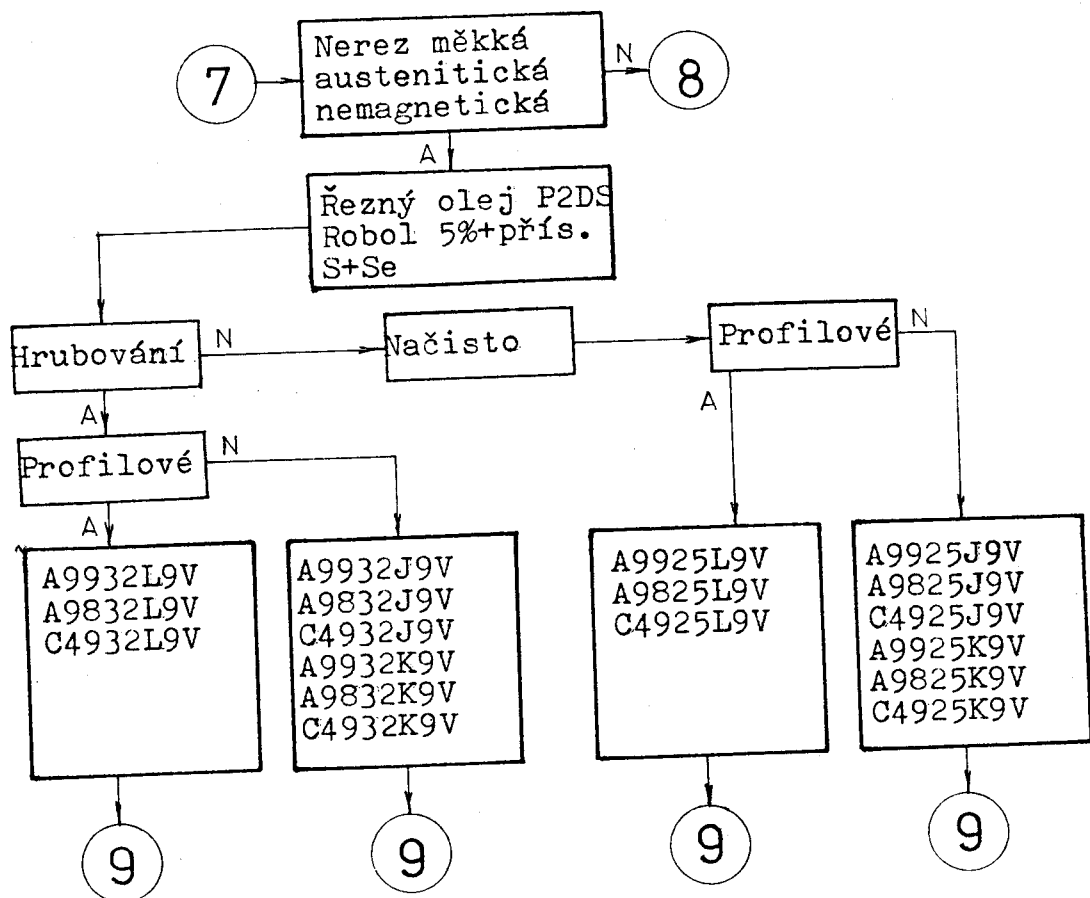
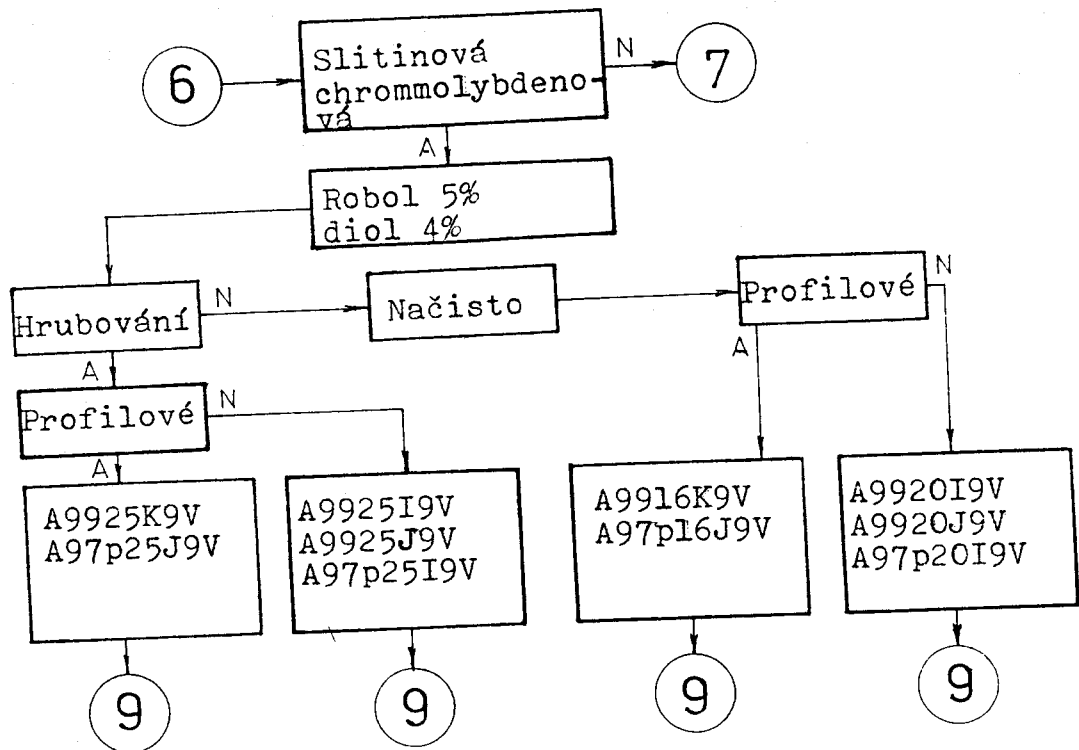
Broušení vnějších rotačních ploch

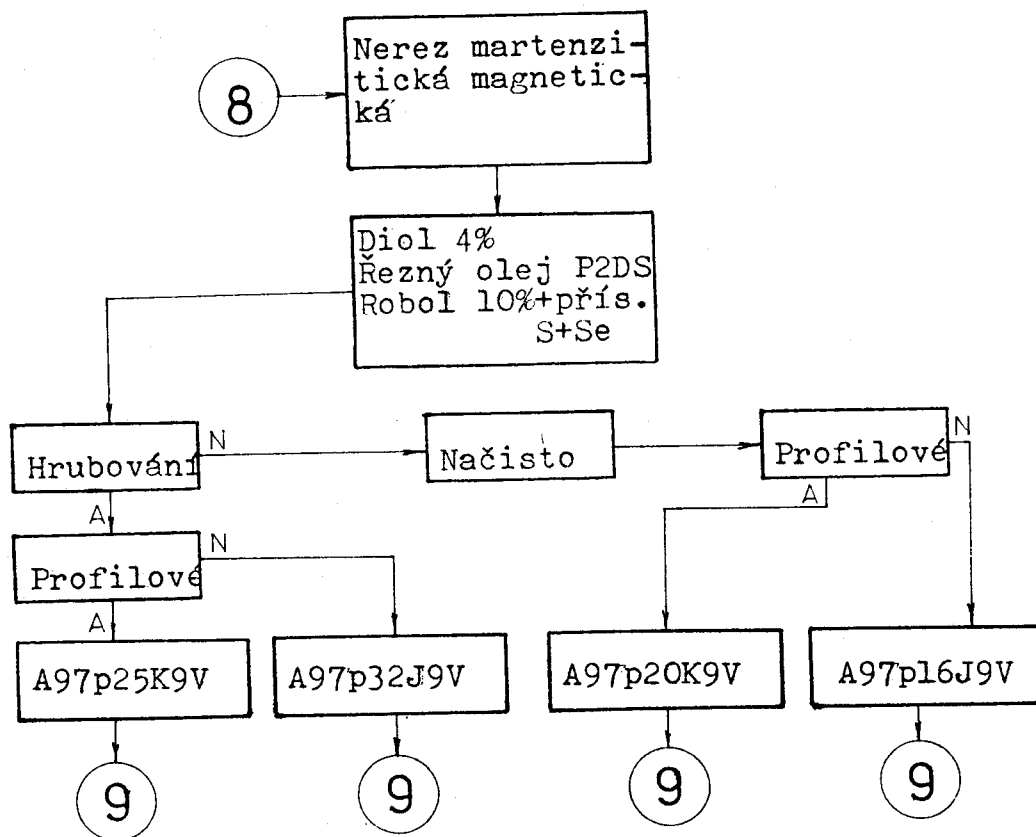
Zadávané -Otáčky brusného vřetena n_k
 parametry: /min⁻¹/
 -Materiál-ČSN, skup.obrobit.
 -Způsob.broušení-zapichovací
 -s podélným posuvem
 -Druh broušení-hrubovací R_a
 0,8; načisto R_a 0,4; profilové
 -Průměr obrobku do/mm/











9

Zadej velikost kotouče
 $D_k = /250, 350-400, 500-600, 750-900/ [mm]$
 $B_k = /20, 32, 40, 50, 63, 80, 100/ [mm]$

$$v_k = \frac{D_k n_k \pi}{60000} / m.s^{-1} /$$

15

Broušení zapichovací

Ukaž řadu $\emptyset d_{ox}$

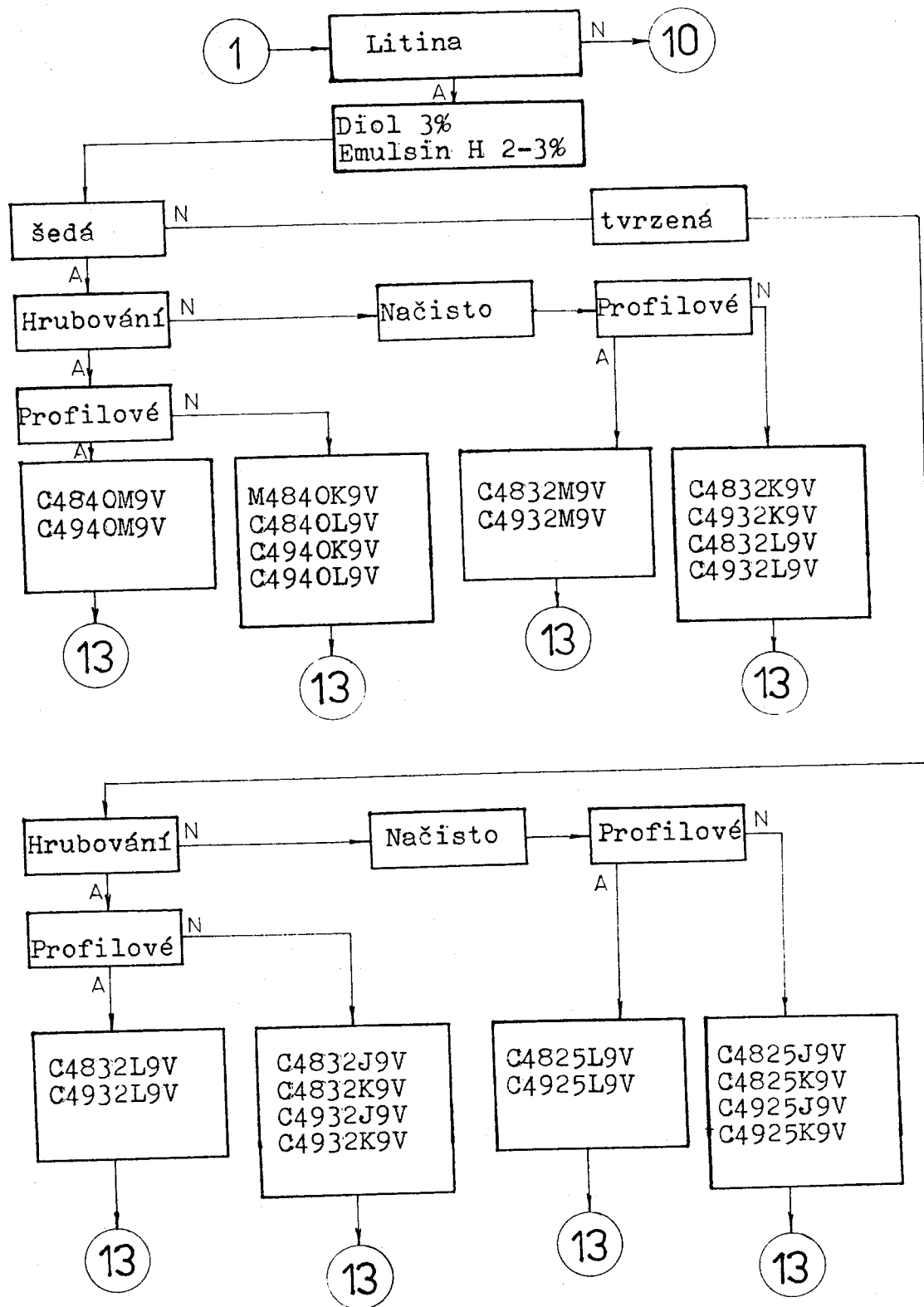
Výběr nejbližšího vyššího nebo rovného z řady zadanému d_o

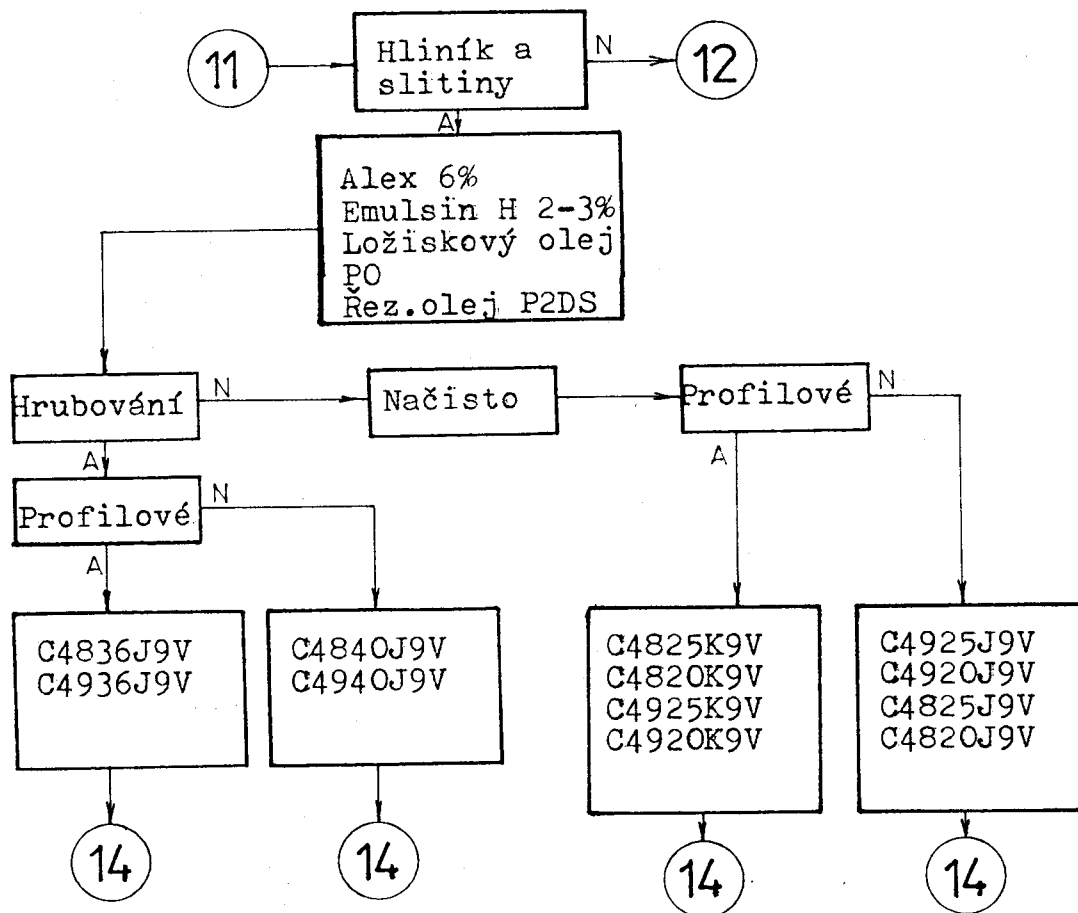
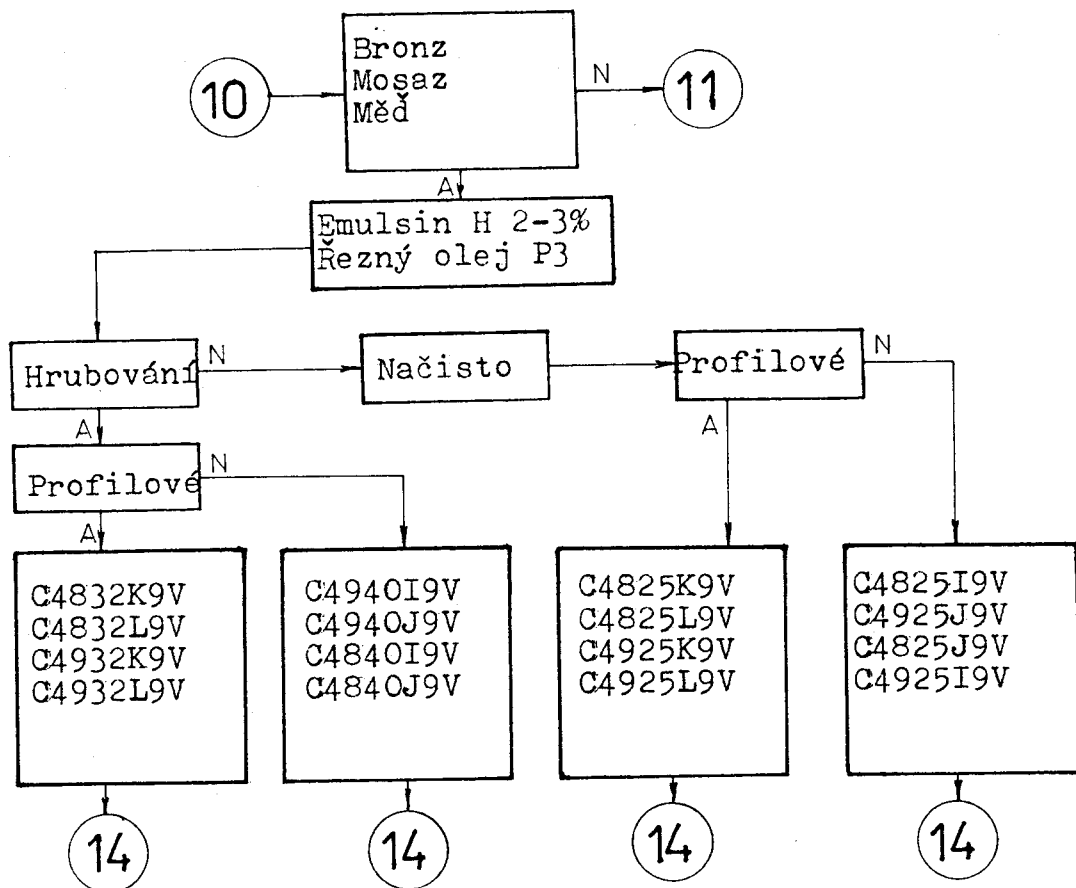
Pro d_{ox} urči n_o

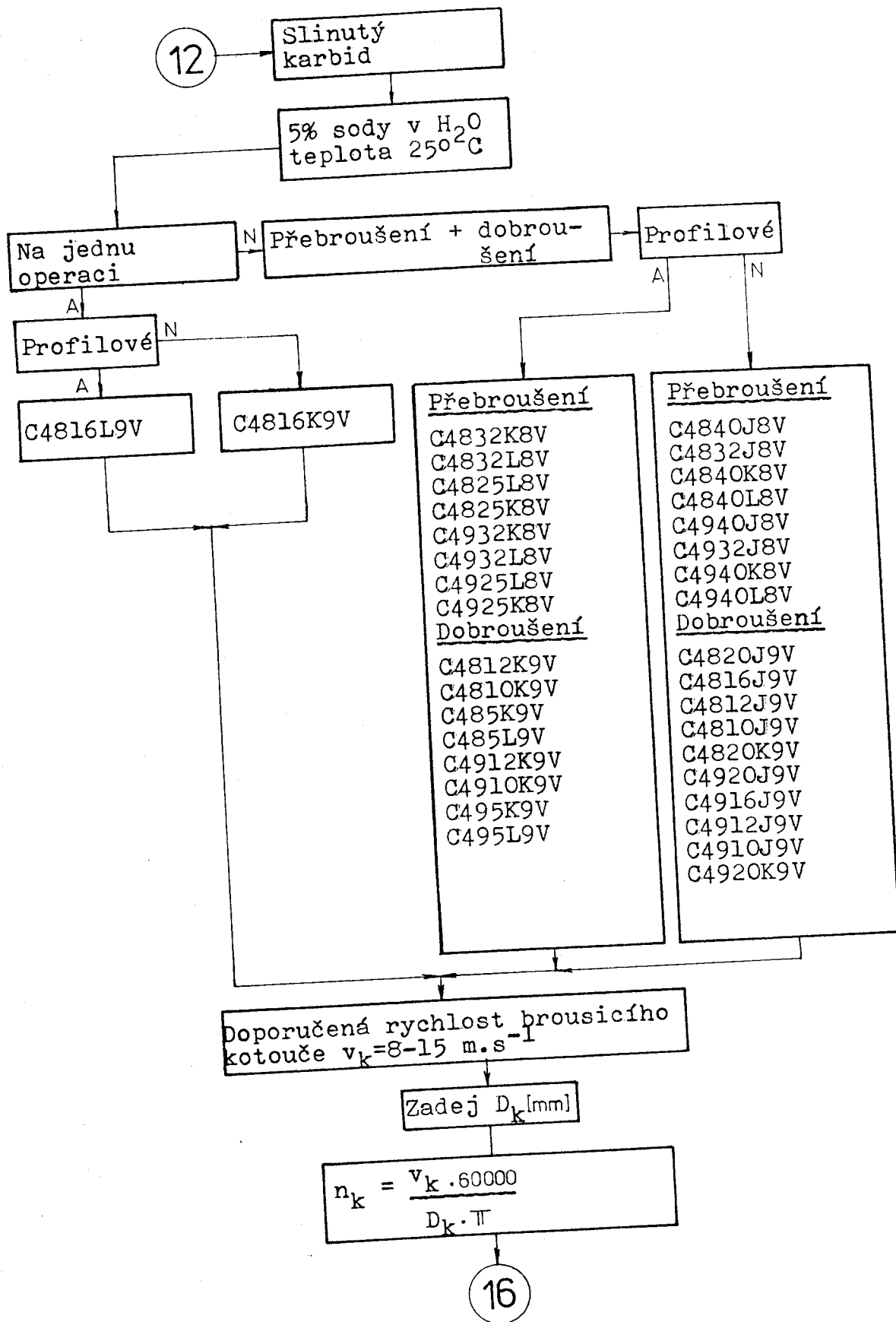
$$v_o = \frac{\pi \cdot d_{ox} \cdot n_o}{60000} [m.s^{-1}]$$

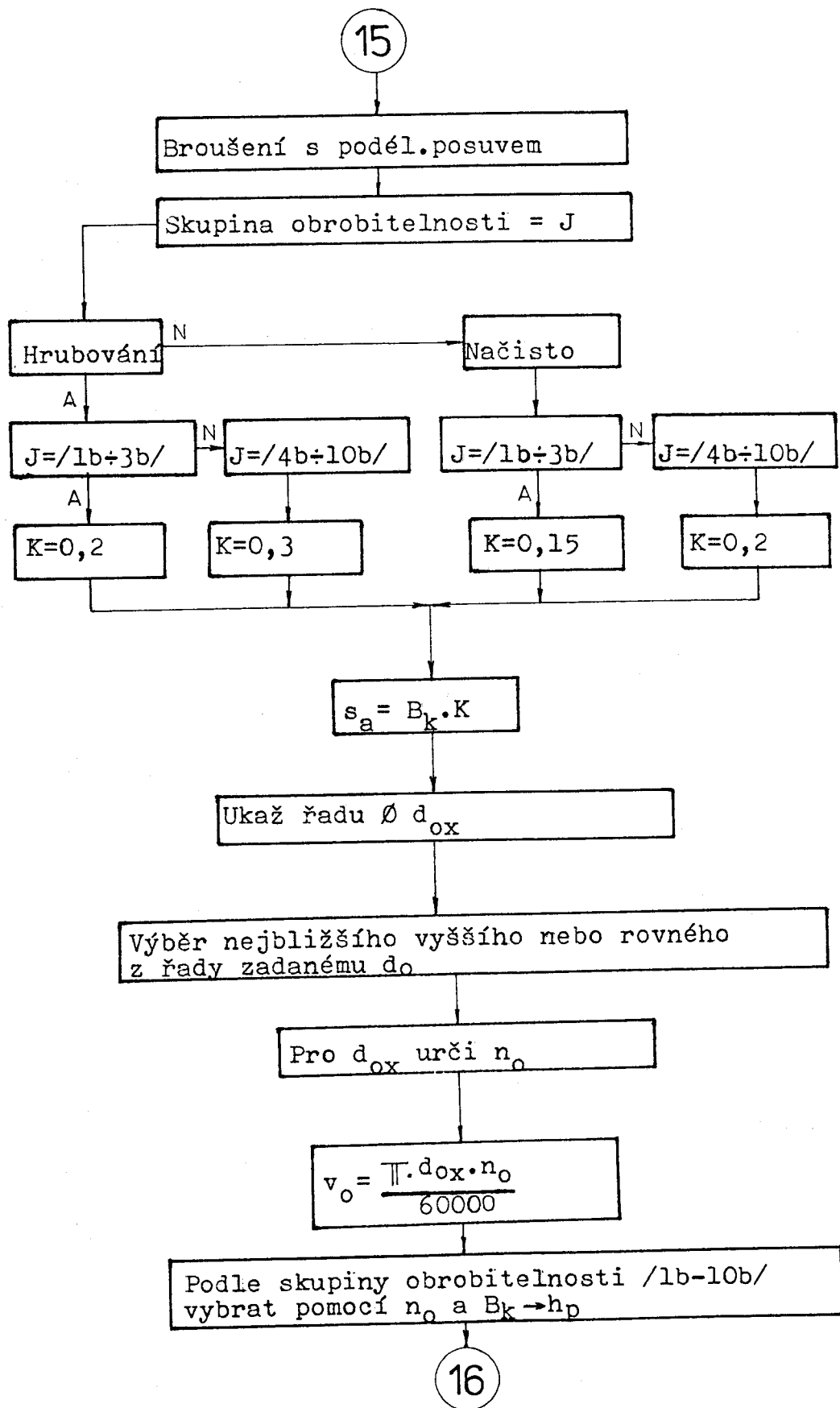
Podle skupiny obrobitelnosti /1b-10b/ vybrat pomocí n_o a $B_k \rightarrow h_z$

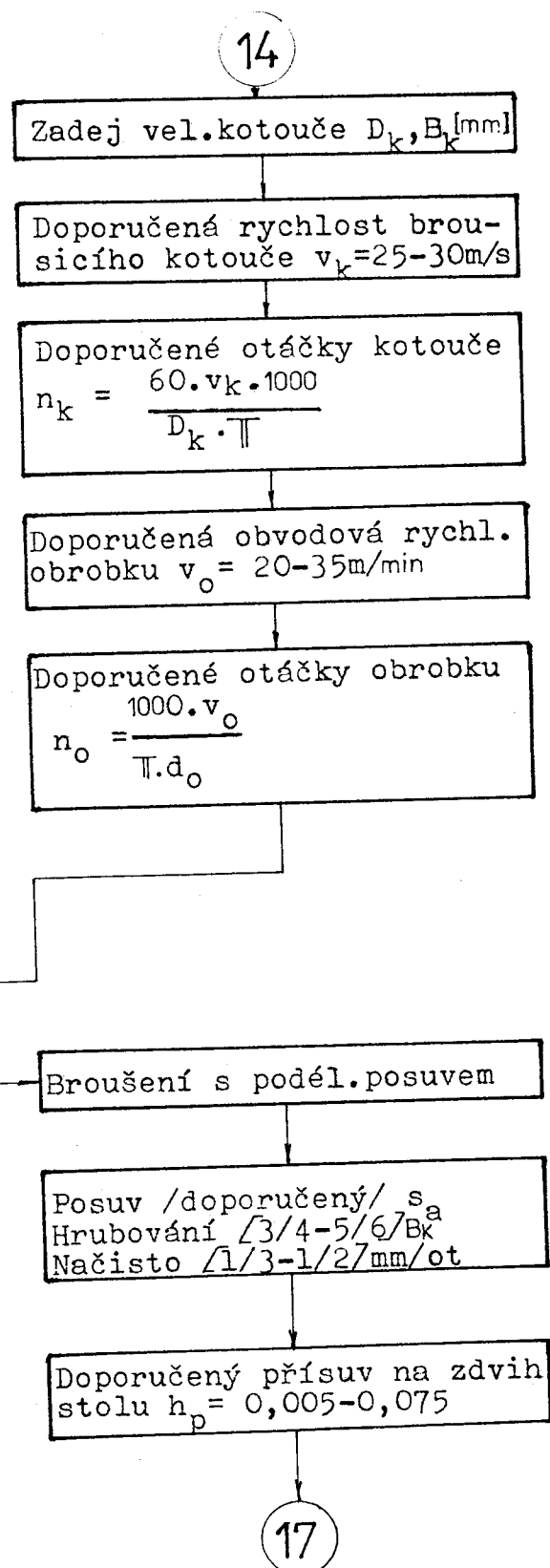
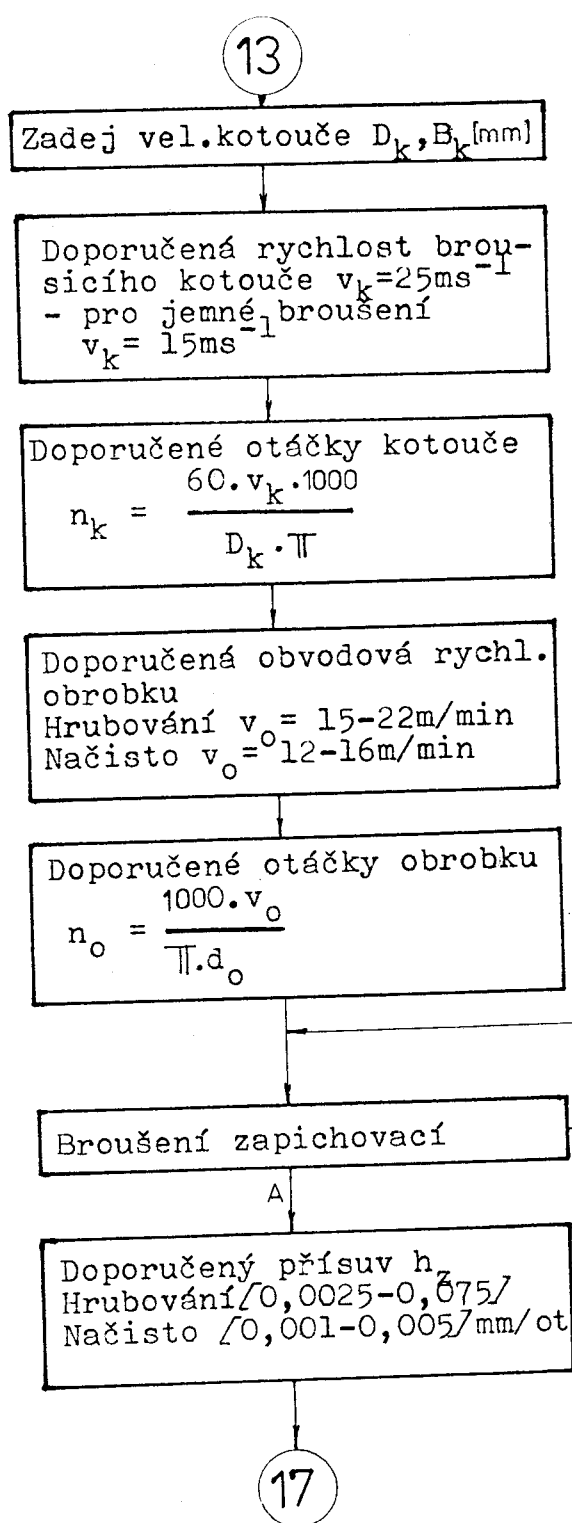
16











Tisk: broušení vnějších rotačních ploch
Zadávané parametry:

- stroj
- materiál /ČSN, skupina obrobitelnosti/
- způsob broušení-s podél.posuvem
 - zapichovací
- druh broušení-hrubovací
 - načisto
 - profilové
- průměr obrobku d_o [mm]

Výstupní parametry:

- doporučená řezná kapalina
- doporučená řada kotoučů
- průměr kotouče D_k [mm]
- šířka kotouče B_k [mm]
- řezná rychlost v_k [m/s]
- otáčky kotouče n_k [ot/min]
- rychlost obrobku v_o [m/s]
- otáčky obrobku n_o [ot/min]
- přísuv h_z [mm/min]
- přísuv na zdvih stolu h_p [mm/Ø]
- posuv s_a [mm/ot]

Tisk: broušení vnějších rotačních ploch
Zadávané parametry:

- stroj
- materiál /druh, ČSN/
- způsob broušení-s podél.posuvem
 - zapichovací
- druh broušení-hrubovací
 - načisto
 - profilové
- průměr obrobku d_o [mm]

Výstupní parametry:

- doporučená řezná kapalina
- doporučená řada kotoučů
- průměr kotouče D_k [mm]
- šířka kotouče B_k [mm]
- Doporučené hodnoty/nějsou v normativech/
 - řezná rychlost kotouče v_k [m/s]
 - otáčky kotouče n_k [ot/min]
 - rychlost obrobku v_o [m/s]
 - otáčky obrobku n_o [ot/min]
 - přísuv h_z [mm/ot]
 - přísuv na zdvih stolu h_p [mm/Ø]
 - posuv s_a [mm/ot]

8.2.2. Podrobné schema databanky pro broušení rovinných ploch obvodem kotouče

Databanka řezných podmínek je zpracována pro oceli skupiny obrobitelnosti 9b, 5b a litinu skupiny obrobitelnosti 8a. Pro tyto oceli a litinu jsou řezné podmínky zpracovány z jednotných normativů pro broušení. Pro hliník, bronz, mosaz a měď jsou uvedeny řezné podmínky doporučené.

Brousicí kotouče jsou rozděleny dle jakostí pro broušení:

- hrubovací
- načisto
- profilové

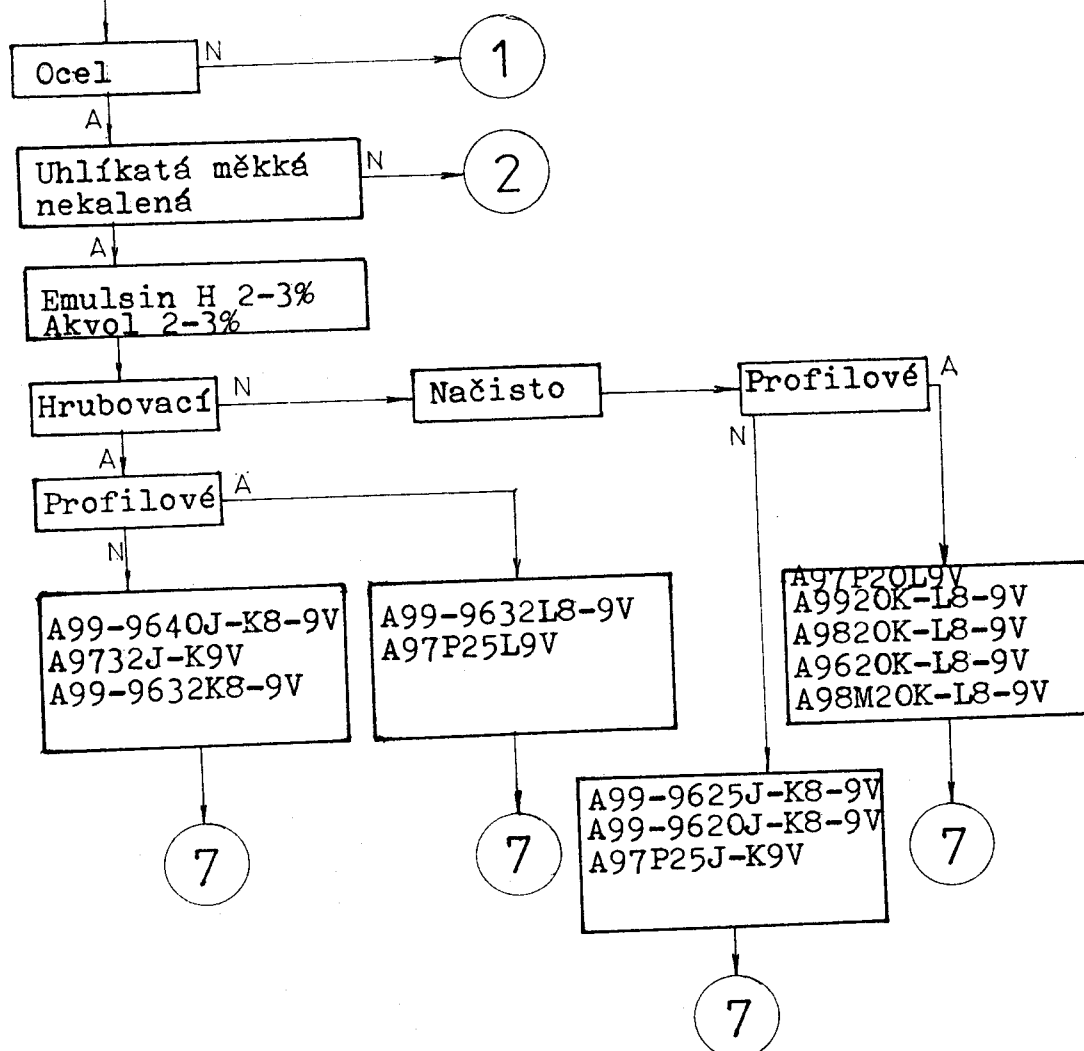
Rozdělení ocelí:

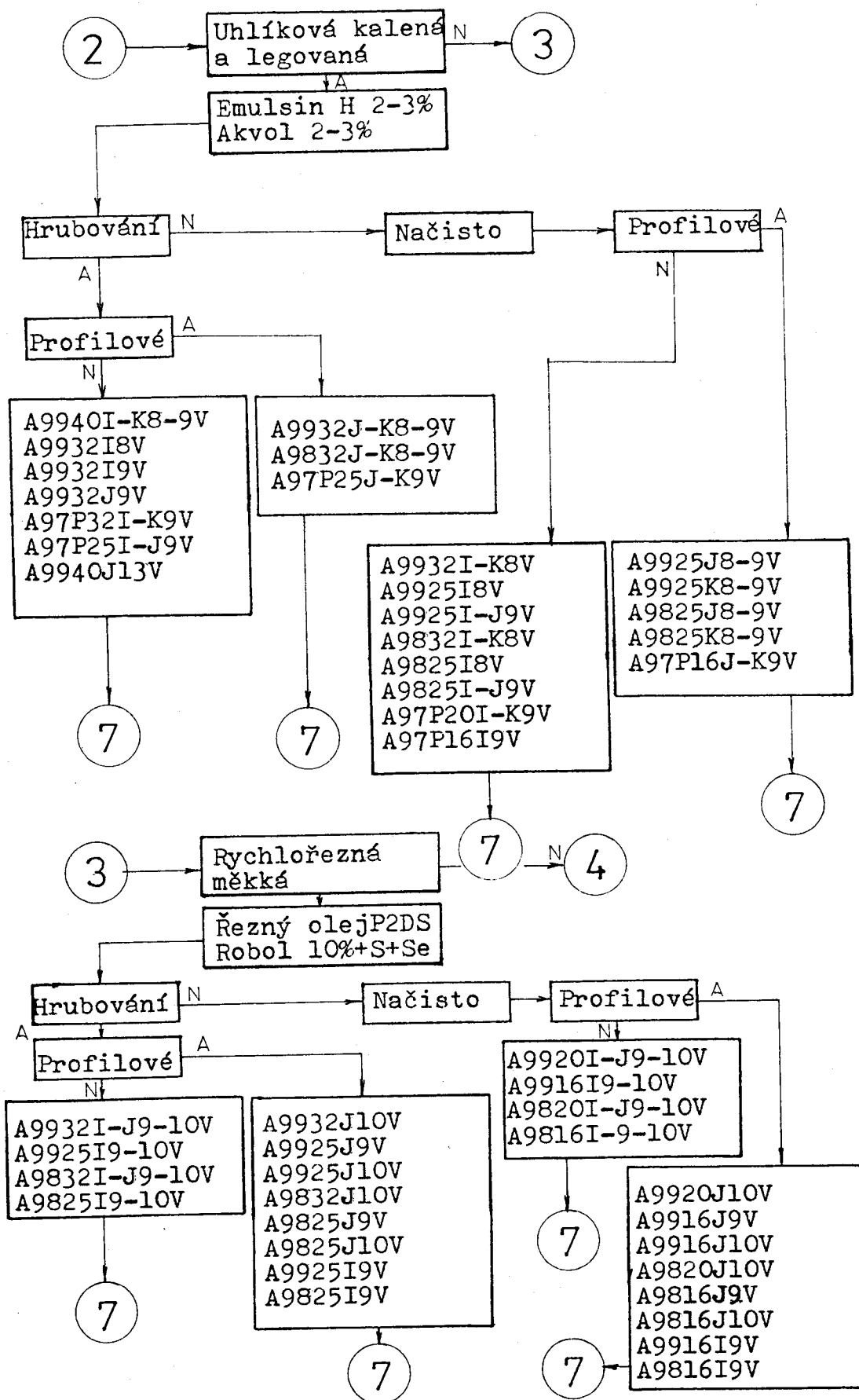
Název	Označení dle ČSN
Uhlíkatá nekalená měkká	10XXX.Y, 11XXX.Y, 12XXX.Y, Y = 1,2,3,5,6,7,8,9
Uhlíkatá kalená a legovaná	12XXX.4, 13XXX, 14XXX,15XXX,16XXX, 17XXX,19ZXX Z = 1 - 7
Rychlořezná měkká	198XX.Y Y = 1,2,3,5,6,7,8,9
Rychlořezná kalená	198XX.4
Nerez	17331,17341,17482, 17483,17021,17023, 17024,17027,17028, 17029,17030,17031, 17042,17115,17618

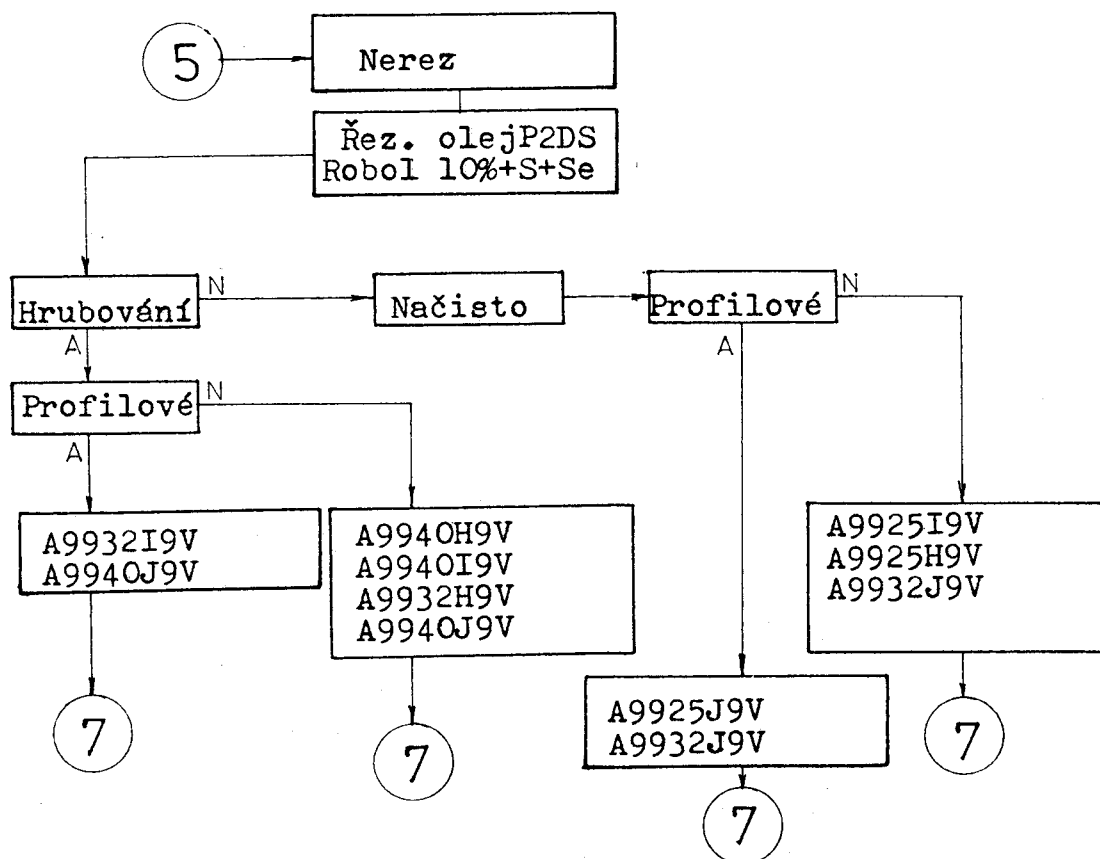
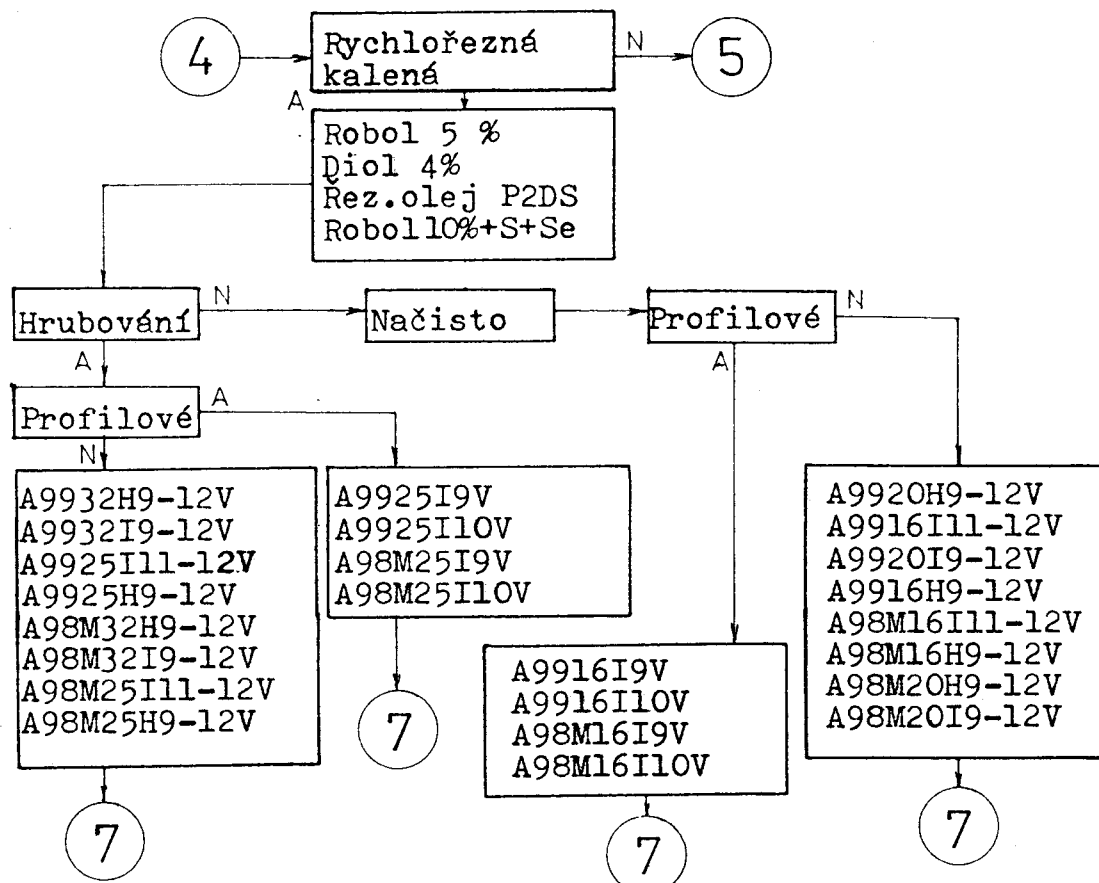
Broušení rovinných ploch obvodem kotouče

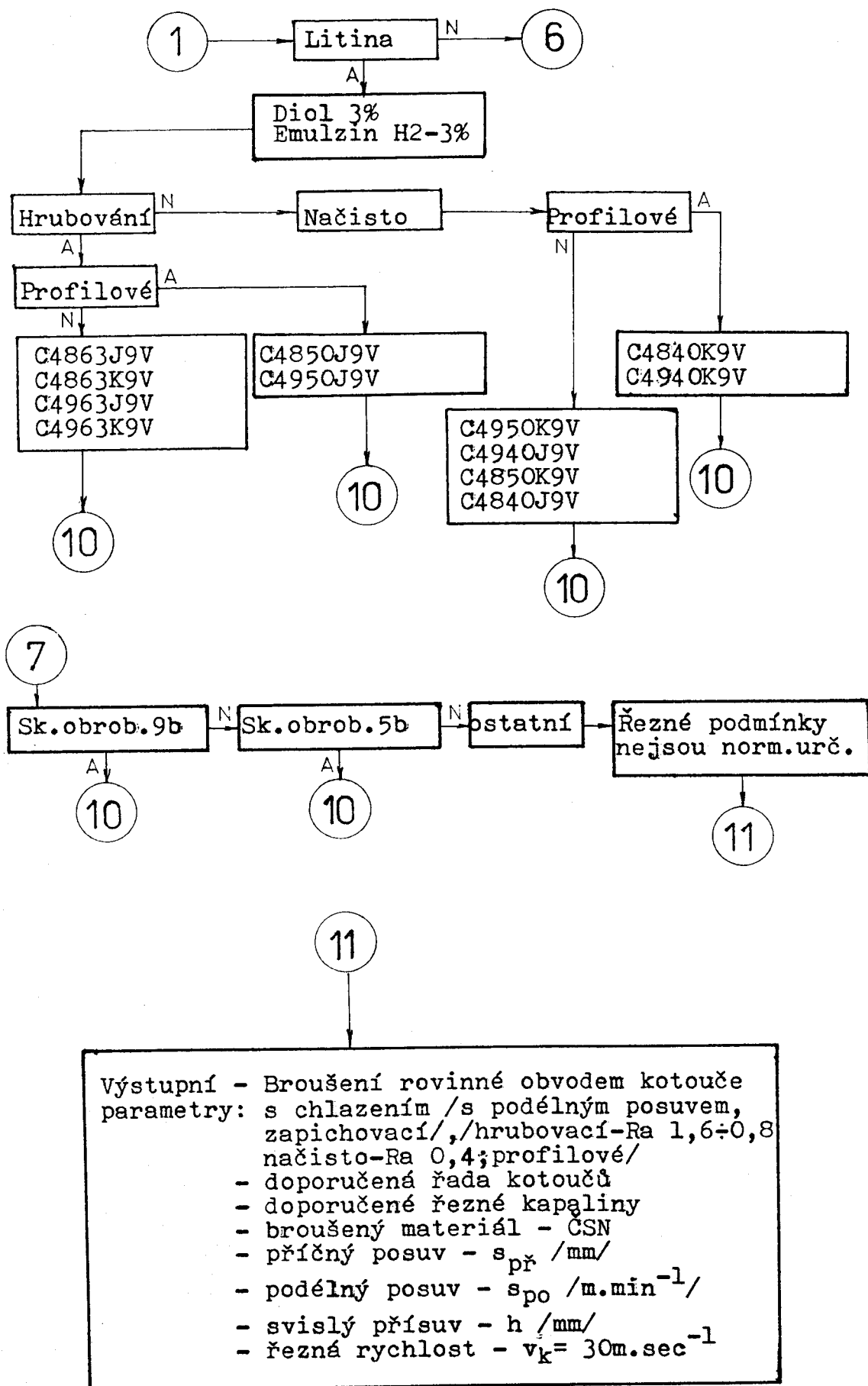
Zadávané parametry:

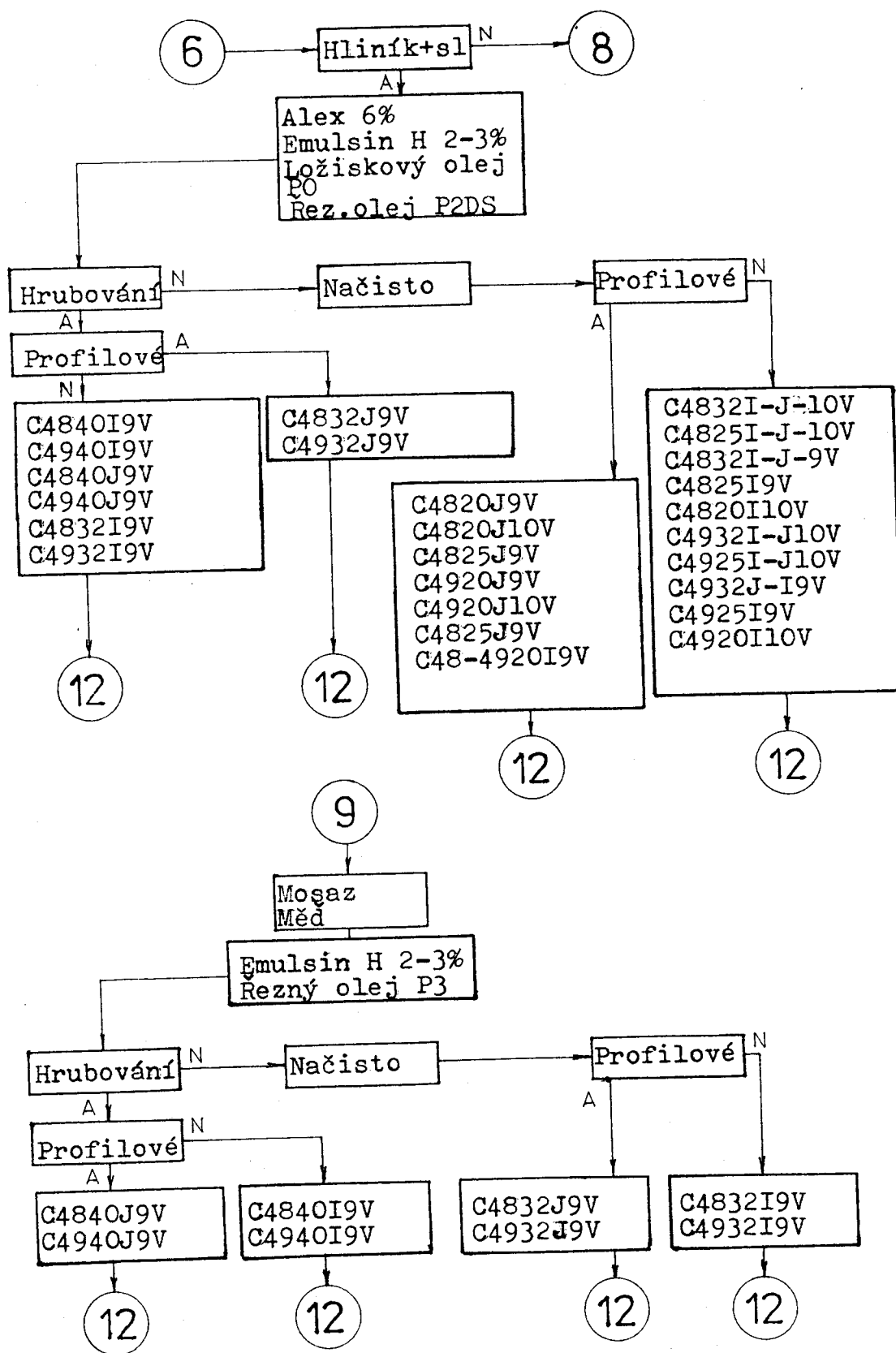
- způsob broušení - s příč. posuvem
- zapichovací
- druh broušení - hrubovací $Ra=1,6$ až $0,8$, načisto $Ra=0,4$
- profilové
- stroj - příkon na vřetení P /kW/
- příčný posuv $s_{přMax.nast.}$ /mm.zdvih-1/
- šířka brusného kotouče Bk /mm/
- Broušený materiál - ČSN
- skupina obrob-
itelnosti

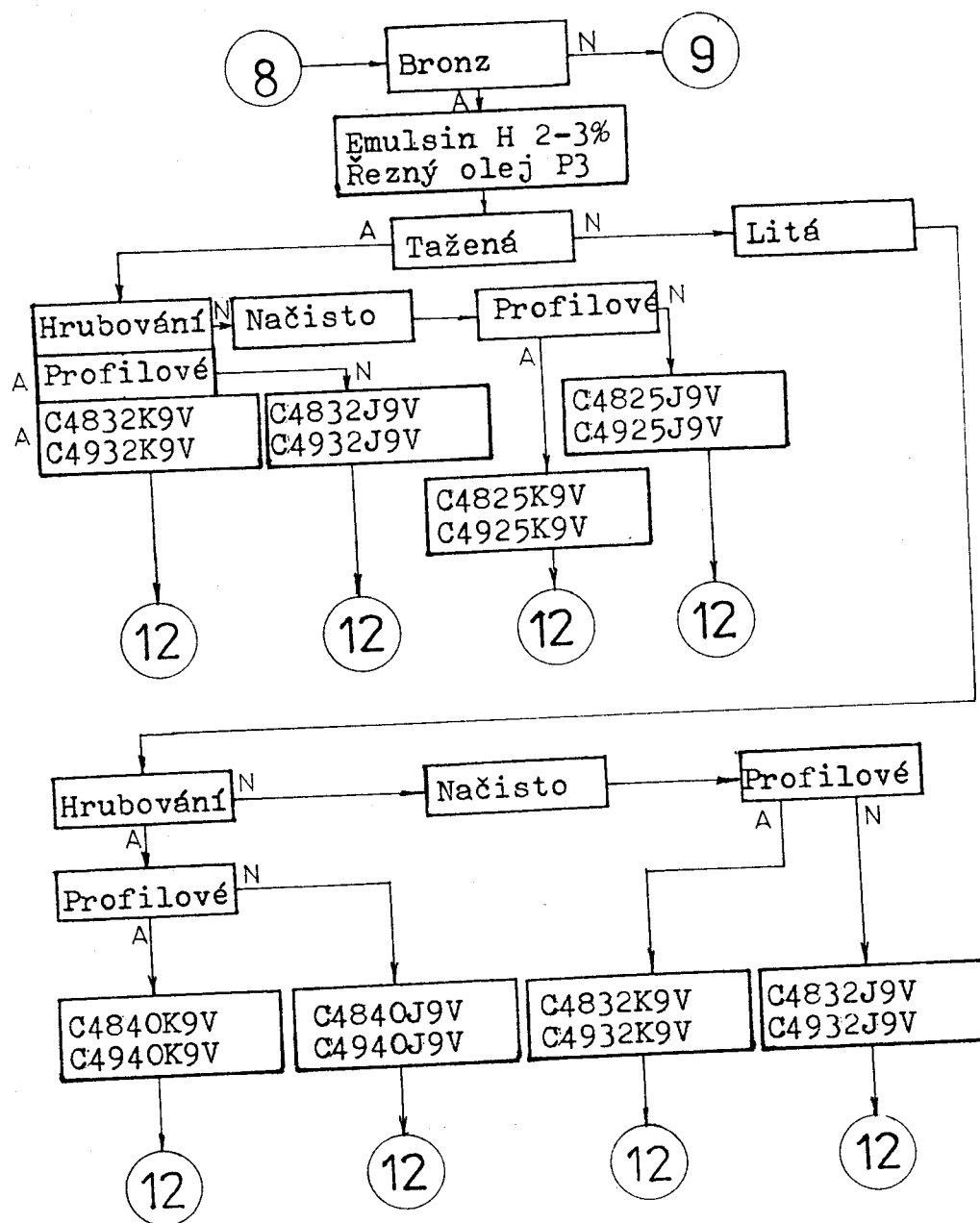


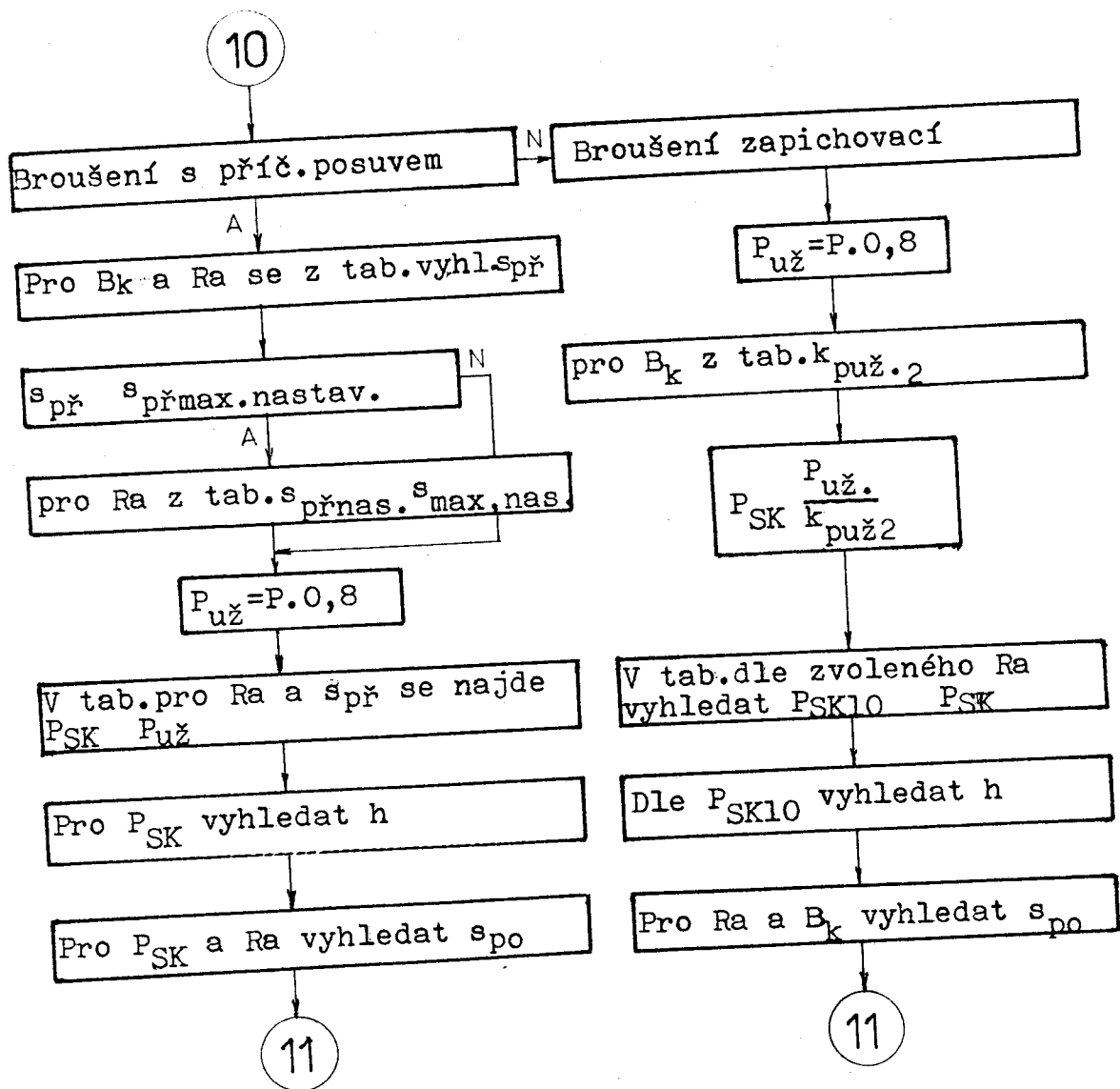




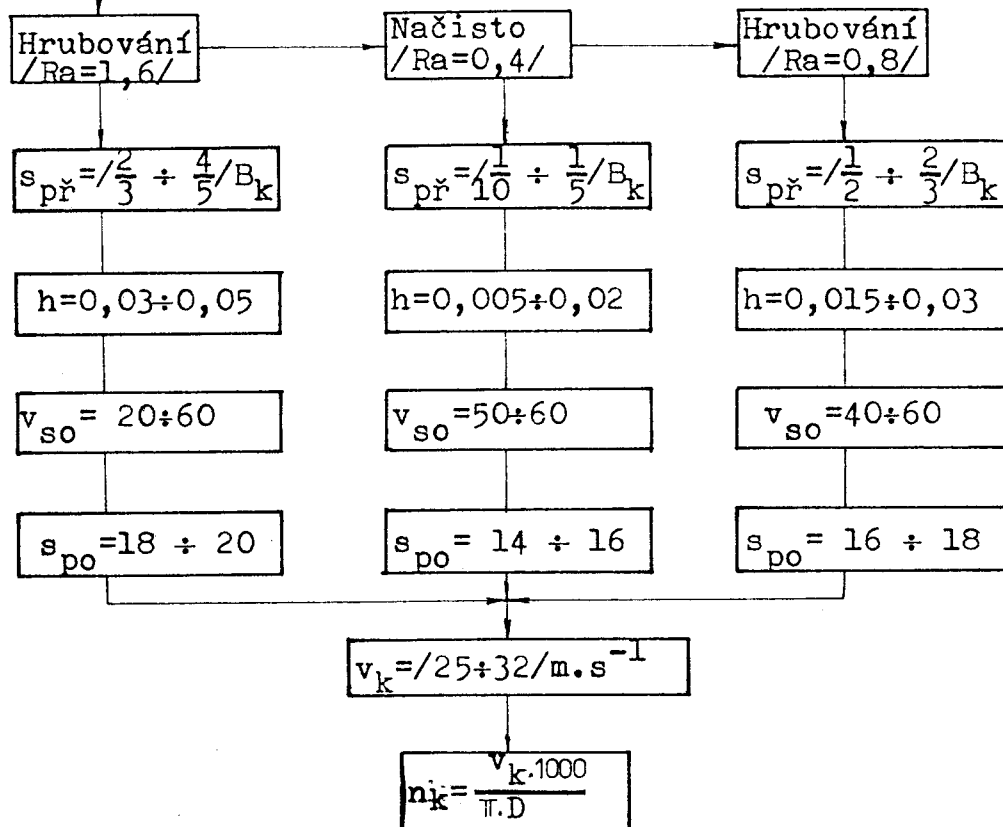








12



Výstupní parametry:

- broušení rovinné obvodem kotouče s chlazením /hrubovací Ra 1,6 Ra 0,8, načisto Ra 0,4, profilové/
- doporučená řada kotoučů
- doporučené řezné kapaliny
- broušený materiál - ČSN
- doporučený příčný posuv s_{pr} /mm/
- doporučený kruh. pohyb stolu v_{so} /m.min⁻¹/
- doporučený podélný vratný pohyb stolu s_{po} /m.min⁻¹/
- doporučená rychlost kotouče v_k /m.s⁻¹/
- doporučené otáčky kotouče n_k /ots⁻¹/
- doporučený svis. přísuv h /mm.zdv⁻¹/

8.3. Databanka -- program

V této práci jsem programově zpracoval databanku řezných podmínek pro broušení vnějších rotačních ploch. Programový výpis je v příloze práce.

9. Zapojení do návrhu komplexní databanky

Databanka řezných podmínek pro broušení vnějších rotačních ploch je zpracovaná v programovacím jazyce FEL Pascal SMEP na 16 bitovém počítači SM 72 09. Je nahrána na floppy disk 8". Používání databanky je umožněno tím, že ji z floppy disku vyvoláme pod názvem "Program P". Strukturálně je databanka vytvořena v dialogovém režimu.

Databanka pro broušení je vytvořena jako diplomová práce a spolu s ostatními vytvořenými databankami /frézování, soustružení, vrtání/, vytváří základ komplexní databanky, která umožňuje vybrat řezné podmínky a řezné nástroje pro konkrétní operaci. Tímto postupem se urychlí vlastní příprava výroby a vyloučí se subjektivní vliv technologa při určování použití řezného nástroje a stanovení řezných podmínek při jeho využívání.

10. Návrh optimalizace řezných podmínek

10.1. Charakteristika optimalizace řezných podmínek

Významnou součástí technické přípravy výroby je určování optimálních řezných podmínek /OŘP/, optimální trvanlivosti nástroje /OTN/, eventuálně optimálních hodnot dalších pracovních podmínek. Lze konstatovat, že v našich závodech v řadě případů při obrábění nedosahují ŘP, TN respektive i další pracovní podmínky ani zdaleka optimálních hodnot. Význam určování optimálních pracovních podmínek /OPP/ v poslední době velmi významně vzrostl a to zejména v důsledku relativně rychlého rozvoje výrobní techniky, především v důsledku:

- nasazení NC strojů do výroby
- nasazení NC strojů do výrobních systémů
- použití moderních ŘN
- nasazení manipulátorů a robotů ve výrobě
- možnosti využití počítačů pro řízení práce jednotlivých strojů i výrobních systémů
- energetické náročnosti moderních obráběcích strojů i dalších výrobních zařízení
- nutnost zajistit spolehlivost obrábění z hlediska obrobitelnosti obráběného materiálu a řezivosti ŘN
- nutnosti zajistit spolehlivost obrábění z hlediska vhodného utváření třísky

Význam optimalizace ŘP a TN roste zároveň s rostoucími požadavky na komplexní optimalizaci PP, zejména s vazbou na optimalizaci tvaru a materiálu nástrojů, výměnu nástrojů při nasazení více nástrojů při práci současně, takt u linek, hospodaření s nářadím, lhůtové plánování atd. Tyto optimalizační vazby jsou velmi složité a lze je uspokojivě řešit pouze na počítači při použití vhodných optimalizačních algoritmů. Při optimalizaci více PP však v současnosti jde převážně o optimalizaci dílčího zaměření bez vazby na další faktory ovlivňující komplexně optimalizaci technologie jako celku, respektive jde o optimalizaci značně zjednodušenou. Uvážíme-li pouze OŘP a TN, nelze v současné době ani v této úzké oblasti pokládat způsob optimalizace těchto parametrů za zcela uspokojivý. Často se setkáváme se skutečností, že

při nasazení NC strojů do výroby se použijí stejné ŘP jako při obrábění na univerzálních strojích. Výrobní náklady při této změně výroby, ve srovnání s výrobou na univerzálních strojích, mnohonásobně vzrostou. Velmi často se při změně výrobního zařízení spoléhá na snížení nákladů na výrobu součástí v důsledku snížení vedlejších časů resp. časů na výměnu strojů. Tato skutečnost v některých případech zmírňuje někdy i eliminuje výšku uvedené negativní skutečnosti. Převážná většina případů nasazení NC strojů do výroby je však dnes spojena s nárůstem výrobních nákladů. I když ceny NC obráběcích strojů v celosvětovém měřítku mají v současnosti tendenci se snižovat, nelze přikládat zatím této tendenci větší význam a je nutné uvažovat optimalizaci PP jako optimalizaci na nákladném výrobním zařízení. A právě cena stroje je jedním ze závažných faktorů, ovlivňujících optimalizaci PP.

Další ze závažných skutečností ovlivňujících OPP je hospodaření s nářadím. Současný způsob hospodaření s nářadím je ve většině podniků nevyhovujícím. Týká se to zejména evidence nářadí, možnosti nekvalifikovaného zásahu obsluhy do volby nástroje, do ŘP, nedbalosti při manipulaci a skladování nářadí atd. Také oblast hospodaření s nářadím lze začlenit do komplexní optimalizace PP a významně tak přispět ke zlepšení situace v této oblasti.

Oblast určování optimálního opotřebení nástroje je značně podceněna, přestože má významný dopad na ekonomickou stránku procesu obrábění, na produktivitu obrábění, resp. na OPP. Optimální velikost opotřebení bezprostředně ovlivňuje trvanlivost nástroje, spotřebu nástrojů, výměnu nástrojů. Význam optimální velikosti opotřebení je zejména v tom, že je výchozím podkladem pro určování základních empirických podkladů pro optimalizaci. Dnes jsou určovány OŘP převážně pomocí normativů, tedy postupným způsobem. Přitom se má vycházet z optimální hodnoty trvanlivosti řezného nástroje. Optimální trvanlivost je závislá na ekonomických, časových a empirických údajích a je nezávislá na ŘP /tato skutečnost umožňuje určovat optimální trvanlivost před optimalizací ŘP/. Postupný způsob určování OŘP platí pouze tehdy, pokud se při optimalizaci neuplatní určité

omezující podmínky. Především jde o omezení z hlediska maximálního přípustného výkonu obráběcího stroje, maximálních otáček a minutových posuvů /pokud má stroj posuvy v mm/min./ dosažitelných na stroji. Kromě toho při postupném způsobu určování OŘP se vychází ze zásady obrábět pokud možno maximální hloubku řezu, tedy obrábět na 1 třísku. Tato zásada není též obecně správná. Někdy je výhodné rozdělit celý přídavek na obrábění na více třísek. Tato skutečnost je dána tím, že závislost měrného řezného odporu na tloušťce třísky, resp. na posuvu má klesající tendenci. Pokud se při optimalizaci uplatní některá z omezujících podmínek silového charakteru, je obvykle výhodné, jak z hlediska minimálních výrobních nákladů, tak i z hlediska maximální produktivity rozdělit přídavek na opracování na 2 a více třísek.

Do komplexního optimalizačního výpočtu lze zahrnout technologické zkušenosti, které nelze postupným způsobem určování OŘP podchytit. K nim patří např. omezené množství určitého druhu nástrojů na výrobu určitého množství výrobků, technologické vazby ve výrobních systémech apod.

Komplexní OŘP lze tedy chápat jako postup pro určení OŘP, TN a současně i dalších PP, vše se zřetelem na technicko-organizační omezení a optimalizační požadavky.

Lze konstatovat, že komplexní optimalizační výpočet v oblasti pracovních podmínek se dnes používá zcela výjimečně. Jedním z důvodů pro to je neznalost možností, které skýtá komplexní optimalizace a také obavy z komplikací s vlastním zavedením tohoto postupu do technické přípravy výroby.

Charakterizujme ve stručnosti současný stav komplexní optimalizace pracovních parametrů z hlediska:

- možností vlastních výpočetních metod a množství optimalizovaných parametrů
- podkladů pro optimalizaci
- nároků na zavedení systému komplexní optimalizace
- nároků na kvalifikaci pracovníků při zavádění a vlastním využití komplexní optimalizace
- návaznosti na banku dat pro optimalizaci

- návaznosti na optimální volbu nástrojů
- poruch výrobního zařízení
- dalších aspektů

Z hlediska vlastních výpočetních metod jsme omezeni matematickým tvarem omezujících podmínek a kritérií optimálnosti. Z hlediska matematického jde vždy o nalezení totálního vázaného extrému účelové funkce. Jako kritérium optimálnosti přichází v úvahu především kritérium minimálních výrobních nákladů za určitých okolností též kritérium maximální produktivity, ale i jiná kritéria.

K omezujícím podmínkám patří zejména omezení z hlediska výkonu, maximálního přípustného krouťícího momentu /daného např. upínacím prostředkem stroje/, maximální přípustné řezné síly, resp. jejich složek, vhodného utváření třísky, chvění, požadované drsnosti obrobené plochy, požadované přesnosti obrobené plochy, maximálních a minimálních otáček dosažitelných na stroji, maximálních a minimálních posuvů dosažitelných na stroji, obrobitelnosti obráběného materiálu, řezného prostředí, omezeného množství nástrojů na určitý objem výroby, termínu zhotovení určitého množství výrobku, skupinové výměny nástrojů apod.

Nejčastěji se pro komplexní optimalizaci používá lineární parametrické programování. Tento matematický aparát vychází z lineárního kritéria optimálnosti a lineárních omezujících podmínek a je schopen tedy řešit takové úkoly, u kterých lze omezující podmínky a účelovou funkci převést na lineární tvar /linearizovat kritéria optimálnosti při jednonástrojovém obrábění z hlediska minimálních výrobních nákladů, maximální produktivity, resp. maximálního zisku je umožněna tím, že trvanlivost nástroje uvažujeme jako parametr./

Požadavek lineárního tvaru kritéria optimálnosti a omezujících podmínek značně omezuje použití lineárního parametrického programování. Některé z omezujících podmínek, které pro současnou optimalizaci přicházejí v úvahu jsou nelineárního tvaru. Stejně tak i při složitějších typech optimalizace má účelová funkce tvar, který nelze linearizovat parametrizací.

Další možnosti pro komplexní optimalizaci jsou analytické způsoby optimalizace, při kterých hledáme vázaný totální extrém účelové funkce v oblasti přípustných řešení. Tyto metody lze použít též pro nelineární tvary účelových funkcí a omezujících podmínek, ale doporučují se pro jednodušší případy optimalizací s menším počtem optimalizovaných parametrů.

V současnosti je za vhodné považovat především heuristické metody. Tyto postupy jsou relativně jednoduché, nejsou vázány na lineární tvary účelových funkcí a omezujících podmínek. Lze je použít i pro složité optimalizační úlohy, s vyšším počtem optimalizovaných parametrů.

Kromě toho může být uživateli dána možnost volby mezi dvěma kritérii optimálnosti, mezi hrubováním a obráběním načisto apod.

Takový algoritmus, který obsáhne širokou oblast použití, však bude vyžadovat značný počet vstupních dat. Tím je jeho praktická použitelnost poněkud stížena. Proto se doporučuje zejména při zavádění systému komplexní optimalizace, jednoúčelové algoritmy platící např. pro určité kritérium optimálnosti, určitý stroj, určitý nástroj, určitý obráběný materiál, určité řezné prostředí apod. Počet vstupů se pak redukuje na několik, např. pro hrubování na průměr obrobku, délku obrábění a velikost přídkvu na obrábění. Systém těchto jednoúčelových programů může být uložen v paměti počítače, ze kterého si je technolog může vyvolat.

Častým argumentem proti využití komplexního výpočtu je nedostatek empirických konstant, především konstant komplexního Taylorova vztahu. Skutečně bez znalosti tohoto vztahu nelze optimalizaci realizovat a tento vztah se zjišťuje doposud klasickým graficko-početním způsobem, který vychází minimálně z 15 experimentálně určených závislostí velikosti opotřebení břitu $\dot{R}_N$ na čase. Pro složitější tvary komplexního Taylorova vztahu se tento postup nehodí se zřetelem na to, že počet experimentálně určovaných závislostí velikosti opotřebení břitu na čase dále roste. Pro zjednodušení tohoto způsobu je snaha redukovat počet nezbytných experimentů. Např. byl navržen a ověřen zkrácený postup, vycházejí-

cí přibližně z polovičního počtu experimentálně určených zákonitostí velikosti opotřebení na čase. I když redukce experimentů je značná, pracnost při této metodě je stále velká.

Kromě zmíněného klasického graficko-početního způsobu lze při velkém počtu proměnných komplexního Taylorova vztahu určit párové závislosti $T = f_1/v$, $T = f_2/s$, $T = f_3/h$, ... a sice vždy pro střední hodnoty ostatních proměnných. Dalším matematickým zpracováním získáme komplexní Taylorův vztah. Tento postup však nemusí zaručit zjištění skutečné vazby mezi jednotlivými proměnnými.

Je možné konstatovat, že celostátně používané normativy ŘP jsou solidním podkladem, ze kterého můžeme vycházet při stanovení empirických konstant komplexního Taylorova vztahu. Tyto výchozí vztahy je možno dále upřesňovat v průběhu výroby. Pokud při výrobě bude dosaženo jiných skutečností, než které vyplynou z použitého komplexního Taylorova vztahu /např. bude dosaženo jiné trvanlivosti nástroje, než která odpovídá použitému vztahu/, je možné provést korekci původního Taylorova vztahu pouze na základě zjištěné skutečné trvanlivosti nebo skutečné velikosti opotřebení, které odpovídá předpokládané trvanlivosti.

Pro určení zcela nového komplexního Taylorova vztahu, když skutečně nemáme možnost získat alespoň přibližné hodnoty příslušného vztahu, lze použít způsob, který je efektivní, avšak stále nedoceněný. Jde o způsob statistický, bez nároků na laboratorní zkoušky. Při tomto způsobu zpracováváme údaje získané přímo z výroby.

Naznačené postupy určování konstant komplexních Taylorových vztahů nemusí ve všech případech obrábění zaručit získání základních podkladů pro optimalizaci. Umožňují však zajistit většinu výroby daného závodu prakticky okamžitě.

Druhým nejdůležitějším podkladem empirického charakteru pro optimalizaci pracovních podmínek je závislost tangenciální složky řezné síly na řezných podmínkách. Také tento vztah lze pro konkrétní pracovní podmínky určit z normativů řezných podmínek. Lze též provádět jeho upřesňování ve výrobě zjištěním skutečného příkonu na obrábění.

Řadu dalších empirických podkladů pro komplexní optimalizaci lze získávat též ze stávajících podkladů /např. oblasti vhodného utváření třísek z kategorie ŘN/. Kromě empirických podkladů jsou pro optimalizaci pracovních podmínek nezbytné i technicko-ekonomické údaje o výrobních procesech, výrobních zařízeních, nástrojích, mzdové tarify dělníků, časové údaje, údaje organizačního, resp. lhůtového charakteru apod. Získávání těchto podkladů však většinou nečiní větší obtíže.

Celkově lze optimalizaci řezných, eventuelně i dalších pracovních podmínek chápat jako stanovení optimálních hodnot určování podmínek podle uvažovaného optimalizačního kritéria v rámci omezujících podmínek. Při sestavování matematického modelu pro určování OPP, resp. logicky optimalizace, vycházíme tedy ze dvou výchozích údajů:

- matematicky formulovaného kritéria optimálnosti
- matematicky, event. tabelárně formulovaných omezujících podmínek.

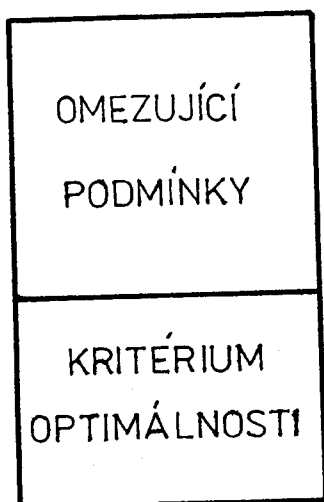
Schematicky je toto znázorněno na obr. 10.

Při formulaci kritérií optimálnosti a omezujících podmínek je nutné vycházet z daných výchozích podmínek, které určují danou technologii. U univerzálních NC i dalších strojů, u kterých určujeme OŘP před obráběním, jsme schopni optimalizovat řezný proces na základě parametrů, které musíme znát před vlastním obráběním /obrobitelnost materiálu, řezivost nástroje, velikost přídávku na obrábění, průměr, na který obrábíme apod./. Je zřejmé, že řadu z těchto parametrů jsme schopni pouze předpokládat, resp. vycházet z nejméně příznivého případu, který se může při obrábění vyskytovat /např. maximálně možný přírůstek na obrábění, nejhorší možná obrobitelnost, maximální průměr, na kterém obrábíme apod./. Všechny tyto předpoklady vnášejí do optimalizace řezných podmínek nepřesnosti a způsobují odklon od skutečně optimálního stavu. Tato skutečnost ve svém důsledku znamená snížení produktivity, zvýšení nákladů na obrábění apod. a představuje vlastně určitou rezervu pro optimalizaci.

Výše uvedené nedostatky odstraňuje obrábění na strojích AC /s adaptivním řízením/ a to buď úplně, nebo jen částečně v závislosti na typu AC systému obráběcího stroje. Stroje s adaptivním řízením jsou schopny určovat OŘP v průběhu obrábění v závislosti na okamžitém stavu řezného procesu, nebo alespoň zjistit překročení určitého mezního stavu a stroj zastavit.

Se zřetelem na výše uvedené skutečnosti je zřejmé, že optimalizace ŘP se děje na základě parametrů, které:

- jsou dány přesně
- jsou dány odhadem, resp. předpokladem.



Obr. 10.

Optimalizaci ŘP můžeme tedy rozdělit na:

- 1/ optimalizaci konvenční / u strojů bez AC/
- 2/ optimalizaci adaptivní / u AC strojů/.

Konvenční optimalizací rozumíme optimalizaci ŘP před vlastním obráběním.

Adaptivní optimalizací rozumíme optimalizaci ŘP během obrábění. Optimalizaci provádí adaptivní řídicí systém na základě informací o právě se vyskytujícímu stavu řezného procesu /výjimečně na základě informací o výsledku určité části řezného procesu/. Takto stanovené optimální hodnoty se u adaptivní optimalizace okamžitě realizují.

Oba tyto typy optimalizací jsou v principu stejné. Vycházejí z omezujících podmínek a z kritéria optimálnosti.

Také jejich matematická formulace je v principu stejná. U adaptivní optimalizace na rozdíl od konvenční jsou však některé údaje dodávány v průběhu obrábění snímači, které zjišťují stav řezného procesu /např. hloubku řezu, teplotu řezání, chvění, příkon na obrábění apod./. Z hlediska technologické složitosti lze rozdělit optimalizaci řezných podmínek na optimalizaci:

- 1/ při práci s jedním nástrojem
- 2/ při práci na jednom stroji s více nástroji současně
- 3/ při práci více strojů, které jsou vázány taktem výroby
- 4/ při práci více strojů, které jsou vázány organizačně.

Vybudování systému komplexní optimalizace by měl provádět zkušený technolog - inženýr, eventuálně menší skupina pracovníků, kteří mají znalosti též z algoritmizace optimalizačních úloh, o vlastních matematických metodách a znalosti z programování. Období tvorby základů systému komplexní optimalizace v závislosti na počtu zainteresovaných pracovníků může být několik týdnů až měsíců. Dále je však možné pouze upřesňovat resp. doplňovat tento základní systém jedním kvalifikovaným pracovníkem.

V souvislosti s komplexní optimalizací pracovních podmínek je vhodné zdůraznit výhody banky dat pro komplexní optimalizaci. Banka dat může být z počátku vybavena jen nejn nutnějšími údaji. Tyto údaje je možné dále upřesňovat a doplňovat, a tak vytvořit postupně základnu pro komplexní optimalizaci pracovních podmínek.

Při aplikaci systému komplexní optimalizace dojde nejen ke snížení nákladů a času na technickou přípravu výroby, ale zejména ke snížení nákladů na výrobu. /5/,/7/

10.2. Model externí optimalizace řezných podmínek při broušení /13/, /14/, /15/

Popis fyzikálních vlastností procesu broušení je založen na geometricky-kinematickém popisu záběru břitů. Přitom se vychází:

- z konfigurace jednotlivých břitů
- z prostorového uspořádání jednotlivých břitů u brousicích těles
- z parametrů obrábění vztažených na jeden břit
- z pohybů vztažených na brousicí těleso

Při matematickém modelování konfigurace a prostorového uspořádání se vychází z prací Kassena a Wernera /Kassen, G.: Beschreibung der elementaren Kinematik des Schleifvorganges. /Disertační práce/ TH Aachen 1969: Werner, G.: Kinematik und Mechanik des Schleifprocesses /Disertační práce/ TH Aachen 1972/.

I když byla vytvořena již řada modelů, popisujících silové poměry při broušení, z nichž některé se vyznačují vysokou přesností aproximace, neuvažuje se při vytváření těchto závislostí silný vliv teploty na proces vytváření třísky. Na základě třecích poměrů, které jsou v oblasti elastického přetváření dle Wernera, v této oblasti určujícími pro utváření procesů, byl vytvořen model silového působení, který bere do úvahy vliv opotřebení jednotlivých zrn brusiva a tloušťky třísky. Vztahy pro výpočet normálové složky F_y a tangenciální složky F_z řezné síly:

$$F_y = k \cdot (\kappa^2)^{\frac{4}{6}} \cdot (c_{wz})^{\frac{2}{6}} \cdot \left(\frac{v_t}{v_k}\right)^{\frac{4}{6}} \cdot (e)^{\frac{5}{6}} \cdot (D^{\frac{1}{6}}) \cdot a \quad (3)$$

$$F_z = \mu \cdot F_y \quad (4)$$

$\mu = f \angle v_k$, kombinace materiálu nástroje, obrobku/

Jestliže vezmeme do úvahy souvislosti mezi velikostí řezné síly a výkonu brousicího stroje, lze vyjádřit první z omezujících podmínek platných při optimalizaci procesu broušení. Vycházíme z podmínky:

$$P_s \leq P \cdot \gamma \quad (5)$$

pak lze stanovit výkonově podmíněnou maximální hloubku záběru e_p :

$$e_p = \left[\frac{1020 \cdot P \cdot \gamma}{\mu \cdot k \cdot a} \right]^{1,2} \cdot \left[\frac{1}{\kappa^{1,6} \cdot C_{WZ}^{0,4} \cdot N_f^{0,8} \cdot N_k^{0,4} \cdot D^{0,2}} \right] \quad (6)$$

Pozn. hodnoty μ , k a hodnoty exponentů jsou závislé na kombinaci materiálu nástroje a obrobku.

Při matematickém popisování teplotního pole se dospívá k tomu, že prozatím nebyla vytvořena žádná mezinárodně platná metoda k popisu těchto polí, i když jsou známy jednotliví činitelé, principiálně odpovídají všechny modely následující závislosti:

$$\theta = f/Q_w, \frac{1}{A_e}, \text{ vlastnosti materiálu, souřadnice zkoumaného bodu} \quad (7)$$

Jako omezující podmínka se při broušení projevuje teplotou podmíněné napětí případně ovlivnění struktury u povrchových vrstev obrobku a mechanické napětí projevující se na břitech zrn brousicího nástroje při jejich záběru. Rozhodující je zde působení na povrchovou vrstvu obrobku, které je způsobeno především:

$$\text{- mechanickým namáháním povrchu} \quad (\sigma_{MECH} = -A_M \cdot F_H) \quad (8)$$

$$\text{- tepelným namáháním povrchu} \quad (\sigma_{TEP} = A_{12} \cdot F_k \cdot N_k \cdot \sigma_k) \quad (9)$$

- strukturními změnami při tepelném působení.

Důsledkem tepelného namáhání povrchu obrobku při broušení, které je závislé na technologických podmínkách, na charakteristice brousícího nástroje, na podmínkách chlazení a na vlastnostech obráběného materiálu i na vnitřním napětí způsobeném pnutími při předchozím zpracování obrobku, je, že může dojít při broušení k porušení povrchových vrstev. Protože doposud nejsou dostatečné znalosti o vlivu zbytkových pnutí v povrchových vrstvách obrobku na jeho pevnost, spolehlivost a životnost, zaměřujeme se při obrábění především na to, aby nedocházelo ke vzniku povrchových trhlin, případně aby nedocházelo ke vzniku popálenin na obrobku.

Obr.11. Teoreticky přípustné hloubky záběru a jejich kvalitativní závislosti /17/

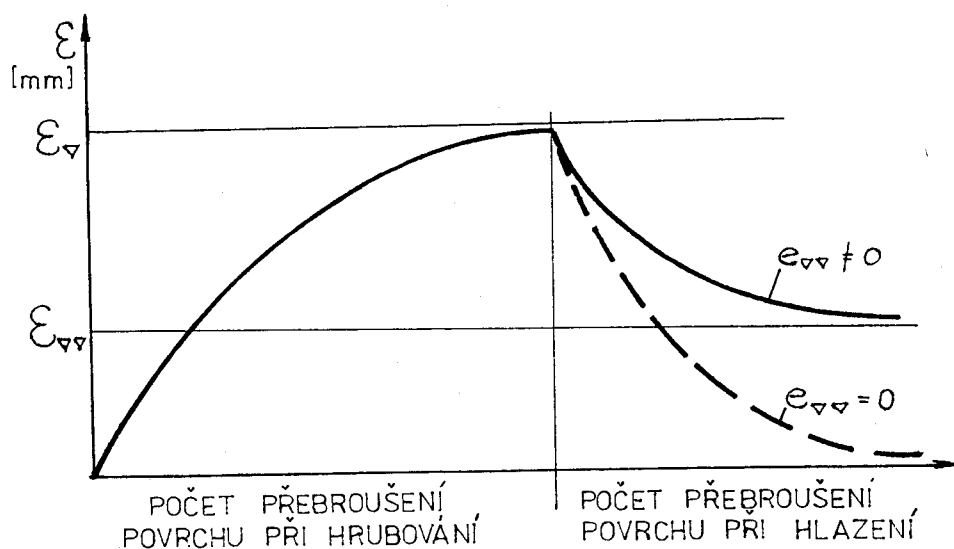
METODA	ROVNICE TRVANLIVOSTI	KVALITATIVNÍ ZÁVISLOSTI
BROUŠENÍ NAKULATO - S PODĚL. PŘÍSUVEM - ZAPICHOVACÍ	$e_{2zul} = C_1 \cdot \frac{1}{s_a^{C_2} \cdot v_f^{C_3} \cdot v_k^{C_4}}$ $e_{2zul} = C_1 \cdot \frac{1}{a^{C_2} \cdot v_f^{C_3} \cdot v_k^{C_4}}$ $C_1 > 0$ $C_2 > C_3 > C_4$	
BROUŠENÍ JEDNOHO BOKU VÁLCŮ	$e_{2zul} = C_1 \cdot \frac{1}{u_q^{C_2}}$ $C_1 > 0 \quad C_2 < 1$	
NÍLESOVO ČÁSTÍ DO PLNA	NEDOSÁHLO SE HRANICE TRHLINY	
BROUŠENÍ ŠROUBOVÝCH VÁLCŮ	$s_{Lzul} = C_1 \cdot \frac{1}{e_r^{C_2}}$ $C_1 > 0$ $C_2 < 1$	

Thyssenovi se podařilo na základě experimentálních výzkumů teoreticky vyjádřit hodnotu přípustné hloubky záběru e_{ZUL} tak, že pro každou menší hodnotu hloubky záběru $[e < e_{ZUL}]$ nedochází ke vzniku tepelných poškození povrchu obrobku.

$$e_{ZUL} = K_k \cdot K_w \cdot K_{wst} \cdot K_p \left\{ \frac{(ZRNITOST)^{\frac{2}{3}} \cdot (t_B)^{\frac{3}{4}}}{\mu \cdot k} \right\} \cdot a^{-\frac{5}{6}} \cdot n_f^{-\frac{1}{2}} \cdot n_k^0 \quad (10)$$

Pro některé konkrétní případy broušení jsou vyjádřeny mezní hloubky záběru na obr. 11. /17/

Další omezení procesu broušení vyplývá z omezení tuhosti soustavy stroj - nástroj - obrobek. Síly při broušení, v návaznosti na tuhost soustavy a proces opotřebení brusiva, ve svém konečném účinku způsobují odchyl-



Obr. 12. Závislost napružení systému na počtu přebroušení povrchu.

ky rozměrů a tvarů, čímž rozhodující měrou ovlivňují produktivitu procesu broušení. Mimo to vzniká příčná nerovnost povrch, což je důsledkem toho, že zrna brusiva netvoří souvislý břit a podélnou nerovnost povrchu, což je způsobeno kinematickými poměry při broušení.

Odchyšky rozměrů a tvarů jsou způsobeny normální složkou řezné síly, která zejména při hrubování vyvolává stav napružení systému ξ . /viz obr. 12/
 Napružení při jednom přebroušení při hrubování $\xi_{\nabla 1}$:

$$\xi_{\nabla 1} = \frac{F_M}{c} = e_{ef} \cdot \frac{c_{s\nabla}}{c} \quad (11)$$

$$e_{ef} = e - \xi_{\nabla 1} \quad (12)$$

$$\xi_{\nabla 1} = \frac{e \cdot c_{s\nabla} - \xi_{\nabla 1} c_{s\nabla}}{c} \rightarrow \xi_{\nabla 1} = e \left(\frac{1}{1 + \frac{c}{c_{s\nabla}}} \right) \quad (13)$$

Při každém následném přebroušení se přičte napružení předcházejícího přebroušení k nové hloubce záběru, takže napružení systému se stále zvětšuje [viz obr. 12]

$$\xi_{\nabla 2} = (e + \xi_{\nabla 1}) \cdot \left(\frac{1}{1 + \frac{c}{c_{s\nabla}}} \right) = e \left(\frac{1}{1 + \frac{c}{c_{s\nabla}}} \right)^1 + e \left(\frac{1}{1 + \frac{c}{c_{s\nabla}}} \right)^2 \quad (14)$$

$$\xi_{\nabla i} = e \left(\frac{1}{1 + \frac{c}{c_{s\nabla}}} \right)^1 + e \left(\frac{1}{1 + \frac{c}{c_{s\nabla}}} \right)^2 + \dots + e \left(\frac{1}{1 + \frac{c}{c_{s\nabla}}} \right)^i \quad (15)$$

Hraniční hodnota řady je napružení systému

$$\xi_{\nabla} = e \cdot \frac{c_{s\nabla}}{c} \quad (16)$$

Požadovanou výslednou přesnost musíme dosáhnout odstraněním vlivu napružení při hladícím broušení, kdy:

- jsou sníženy hodnoty hloubky záběru /přísuvu/
- brousíme bez přísuvu /hloubka záběru je dána pouze napružením systému/
- kombinujeme oba uvedené způsoby

Snížení stavu napružení systému jako funkce počtu hladících cyklů přebroušení povrchu lze matematicky vyjádřit. Napružení systému po prvním hladícím přebroušení $\varepsilon_{\nabla\nabla 1}$:

$$\varepsilon_{\nabla\nabla 1} = (e_{\nabla\nabla} + e_{\nabla}) \cdot \left(\frac{1}{1 + \frac{c}{c_{s\nabla\nabla}}} \right) \quad (17)$$

aby bylo dosaženo snížení stavu napružení, musí být hodnota hloubky záběru při hlazení velmi malá. Po druhém hladícím přebroušení bude napružení:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{\nabla\nabla 2} &= (e_{\nabla\nabla} + \varepsilon_{\nabla\nabla 1}) \cdot \left(\frac{1}{1 + \frac{c}{c_{s\nabla\nabla}}} \right) = \\ &= e_{\nabla\nabla} \left(\frac{1}{1 + \frac{c}{c_{s\nabla\nabla}}} \right)^1 + e_{\nabla\nabla} \left(\frac{1}{1 + \frac{c}{c_{s\nabla\nabla}}} \right)^2 + \varepsilon_{\nabla} \left(\frac{1}{1 + \frac{c}{c_{s\nabla\nabla}}} \right)^2 \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} \varepsilon_{\nabla\nabla i} &= e_{\nabla\nabla} \left(\frac{1}{1 + \frac{c}{c_{s\nabla\nabla}}} \right)^1 + e_{\nabla\nabla} \left(\frac{1}{1 + \frac{c}{c_{s\nabla\nabla}}} \right)^2 + \dots + \\ &+ e_{\nabla\nabla} \left(\frac{1}{1 + \frac{c}{c_{s\nabla\nabla}}} \right)^i + \varepsilon_{\nabla} \left(\frac{1}{1 + \frac{c}{c_{s\nabla\nabla}}} \right)^i \end{aligned} \quad (19)$$

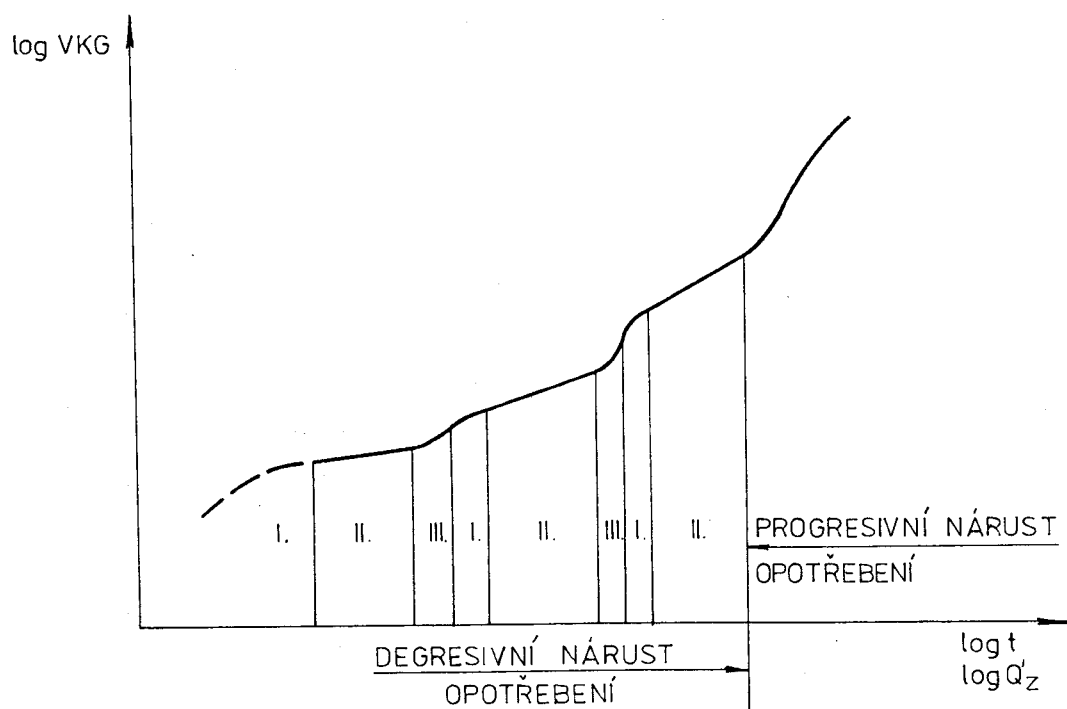
Při dostatečně velikém počtu přebroušení "i" bude mít zbytkové napružení hodnotu

$$\varepsilon_{\nabla\nabla} = e_{\nabla\nabla} \cdot \frac{c_{s\nabla\nabla}}{c} \quad (20)$$

Pomocí metody, kdy experimentálně určíme poměr tuhosti $\frac{c}{c_s}$ pro hrubování i pro hlazení a při stanovení přípustné hodnoty napružení ε_{zul} , lze dobře vyhovět požadavkům na přesnost rozměrů a tvarů.

10. 3. Model opotřebení

Model opotřebení zaujímá v systému matematického modelování procesu broušení dominantní postavení, protože opotřebení je příčinou kvalitativních změn všech veličin během periody trvanlivosti broušícího tělesa. Po jaké době broušení dosáhne broušící kotouč kritériálního opotřebení je dáno časovým průběhem nárůstu opotřebení broušícího nástroje. Při sledování velikosti opotřebení v diagramu čas - opotřebení však lze objevit zřetelné analogie vzhledem k závislostem, které vykazují nástroje s definovanou geometrií břitu. Charakter trvanlivostní funkce je zřejmý z obr. 13.



Obr.13: Průběh trvanlivostní funkce při broušení

- I ... oblast opotřebování otupováním
- II ... oblast opotřebování otupováním
- III ... oblast opotřebování vylamováním

Funkce má stupňovitý charakter, způsobený střídáním obou základních druhů opotřebení. Oblast progresivního nárůstu

opotřebení je charakterizována zvýšeným vylamováním zrn, což vyžaduje orovnění broušícího kotouče.

Trvanlivostní funkce při broušení je ovlivňována řadou faktorů:

- technologickými pracovními podmínkami
- vlastnostmi a tvarem broušícího tělesa
- podmínkami chlazení
- materiálem obrobku a jeho tvarem

Pro optimalizaci procesu broušení je matematické vyjádření trvanlivostní funkce objektivně nutné.

10.4. Analytické vyjádření trvanlivostní funkce při broušení

Výpočet trvanlivostních funkcí při libovolné kombinaci rezných podmínek.

Závislost opotřebení VKG na vztažném objemu obrábění Q_z' :

$$VKG = \alpha_v \cdot Q_z'^{\beta_v} \quad (21)$$

$$\text{kde: } \alpha_v = \mu_{vk}(e, v_f, a)^{\alpha_{vk}} \quad (22)$$

$$\beta_v = \mu_{ve}(e, v_f, a)^{\beta_{ve}} \quad (23)$$

Závislost opotřebení VKG na čase broušení t :

$$VKG = \alpha_t \cdot t^{\beta_t} \quad (24)$$

$$\text{kde: } \alpha_t = \mu_{tk}(e, v_f, a)^{\alpha_{tk}} \quad (25)$$

$$\beta_t = \mu_{te}(e, v_f, a)^{\beta_{te}} \quad (26)$$

Linearizace trvanlivostních funkcí lze provést pomocí dvou regresních kroků:

I. krok: logaritmické linearizování trvanlivostní funkce
/viz obr. 14/

$$\log VKG = \log \alpha_v + \beta_v \cdot \log Q_z' \quad (27)$$

$$\log VKG = \log \alpha_t + \beta_t \cdot \log t \quad (28)$$

II. krok: logaritmická linearizace závislosti koeficientů na řezných podmínkách /viz obr.15/

$$\log \alpha_v = \log \mu_{VK} + \delta_{VK} \cdot \log (e, v_f, a) \quad (29)$$

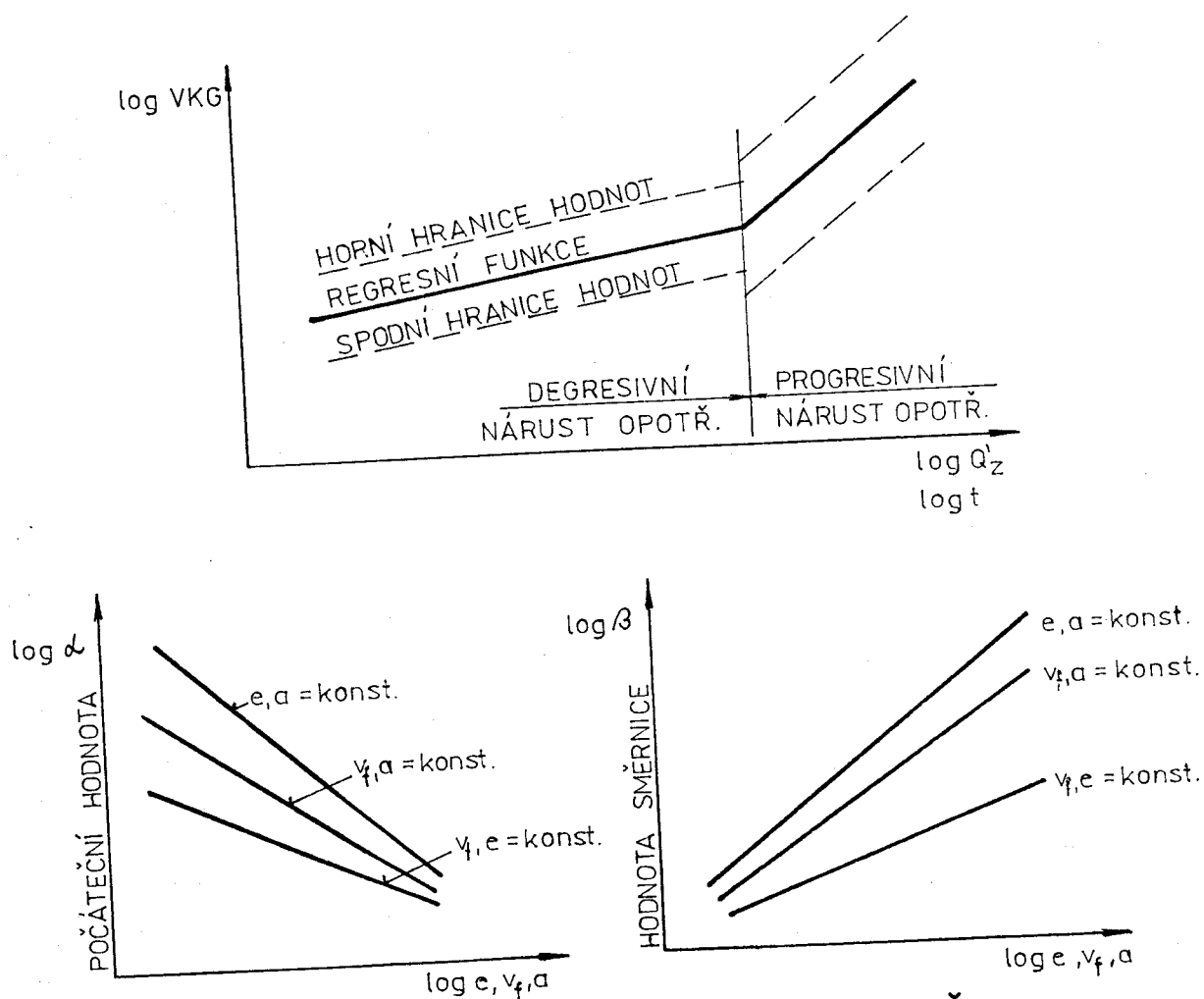
$$\log \beta_v = \log \mu_{VE} + \delta_{VE} \cdot \log (e, v_f, a) \quad (30)$$

$$\log \alpha_t = \log \mu_{LK} + \delta_{LK} \cdot \log (e, v_f, a) \quad (31)$$

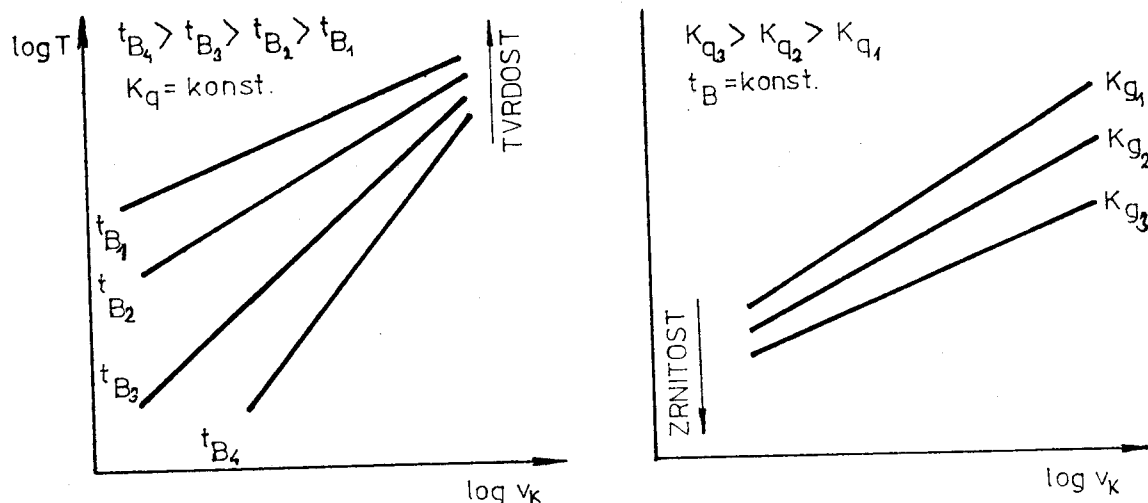
$$\log \beta_t = \log \mu_{LE} + \delta_{LE} \cdot \log (e, v_f, a) \quad (32)$$

Pomocí těchto rovnic lze, pokud stanovíme velikost přípustného opotřebení VKG_{ZUL} , vypočítat trvanlivost, resp. hodnotu vztažného objemu materiálu obrobeného za dobu trvanlivosti kotouče Q'_{ZT} .

Obr. 14: Logaritmicky linearizované trvanlivostní funkce



Obr.15: Kvalitativní závislost koeficientů na ŘP



Obr. 16: Závislost trvanlivosti brousicího kotouče na jeho jakosti.

$$Q'_{ZT} = \left[\frac{VKG_{ZUL}}{\alpha_v} \right]^{\frac{1}{\beta_v}} \quad (33)$$

$$T = \left[\frac{VKG_{ZUL}}{\alpha_t} \right]^{\frac{1}{\beta_t}} \quad (34)$$

Z toho vyplývají závislosti:

$$Q'_{ZT} = (K_v \cdot B_{v1} \cdot VKG_{ZUL}^{B_{v2}} \cdot n_f^{B_{v6}} \cdot e^{B_{v8}}) \exp. \frac{B_{v5}}{n_f^{B_{v10}} \cdot e^{B_{v12}} \cdot a^{B_{v14}}} \quad (35)$$

$$T = (K_T \cdot B_{T1} \cdot VKG_{ZUL}^{B_{T2}} \cdot n_f^{B_{T6}} \cdot e^{B_{T8}}) \exp. \frac{B_{T5}}{n_f^{B_{T10}} \cdot e^{B_{T12}} \cdot a^{B_{T14}}} \quad (36)$$

kde $B_8 > B_6$, $B_{10} = B_{12} > B_{14}$ a $B = f / VKG_{ZUL}$

Pro rozšíření funkce a její platnosti zavádíme konstanty K_V , K_T , které zohledňují:

- vliv brousicího kotouče, pojiva, tvrdosti, zrnitosti, struktury a řezné rychlosti. Závislost trvanlivosti na jakosti brousicího kotouče je na obr. 16.

- vliv chladících a mazacích kapalin, jejich množství a způsob přivedení
- vliv tvaru obrobku
- vliv druhu materiálu obrobku

$$K_V(T) = K_{SK} \cdot K_K \cdot K_{GEOM.} \cdot K_{WST} \quad (37)$$

$$K_{SK} = A_1 \cdot K_{SM} \cdot K_{BM} \cdot [t_B]^{-A_2} \cdot [v_k]^{A_3} \cdot t_B^{A_4} \cdot K_q^{-A_6} \quad (38)$$

Jednotlivé konstanty na základě stanovených funkčních závislostí jsou uvedeny v literatuře /13/.

Příklady Taylorových trvanlivostních funkcí pro některé druhy broušení jsou na obr. 17.

S použitím uvedeného modelu opotřebení při využití trvanlivostních funkcí a zvolené velikosti přípustného opotřebení je možno pro každý objem obrobeného materiálu v oblasti uvnitř pole restrikcí vypočítat kvalitativní hodnoty obrobku.

11. Vlastní model externí optimalizace

11.1. Kritéria optimalizace a cílové funkce

Požadavek obrábět v požadované kvalitě a s minimálními náklady nebo v co nejkratším čase je také při broušení uznávaným cílem optimalizace. S použitím matematických výrazů pro výpočet základního strojního času a pro výpočet trvanlivosti broušícího kotouče lze v závislosti na optimalizované řezné případně strojní hodnotě vyjádřit cílové funkce pro variabilní výrobní náklady a variabilní výrobní čas.

- variabilní výrobní náklady /15/

$$K_{VAR} = (K_M + K_L) \cdot t_{GM} + (K_A + K_{ABR} + K_{we}) \cdot \frac{t_{GM}}{T} \quad (39)$$

METODA	ROVNICE TRVANLIVOSTI	KVALITATIVNÍ ZÁVISLOSTI
BROUŠENÍ NAKULATO - S PODÉLNÝM - PŘÍŠEVEM - ZAPICHOVACÍ	$T = A_5 \cdot v_f^{A_2} \cdot e_z^{A_4} \cdot s_a^{A_6}$ $T = A_5 \cdot v_f^{A_2} \cdot e_z^{A_4} \cdot a^{A_6}$ $A_5 > 0$ $ A_2 > A_4 > A_6 $	
BROUŠENÍ ČÁSTÍ JEDNOHO BOKU	$T = A_3 \cdot u_g^{A_2} \cdot e_z^{A_4} \cdot K$ $A_3 > 0$ $ A_2 > A_4 $	
NÍLESOVO BROUŠENÍ VÁLČŮ DO PLNA	$T = A_3 \cdot u_g^{A_2} \cdot m^{A_4}$ $A_3 > 0$ $ A_2 > A_4 $	
BROUŠENÍ SROUBOVÝCH VÁLČŮ	$T = A_3 \cdot s_L^{A_2} \cdot e_r^{A_4}$ $A_3 > 0$ $ A_2 > A_4 $	

Obr.17.: Rovnice trvanlivosti a kvalitativní závislosti při broušení /17/

$$K_M + K_L = K_1 \quad (40)$$

$$K_A + K_{BR} + K_{we} = K_2 \quad (41)$$

$$t_{GM} = t_{GM\triangledown} + t_{GM\triangledown\triangledown} + t_{GM0} \quad (42)$$

$$K_{VAR} = K_1(t_{GM\triangledown} + t_{GM\triangledown\triangledown} + t_{GM0}) + K_2 \frac{t_{GM\triangledown}}{T} = f(v_f, e, a) \rightarrow MIN. \quad (43)$$

- variabilní výrobní čas

$$t_{VAR} = t_{GM} + t_{HABR} \cdot \frac{t_{GMV}}{T} \quad (44)$$

$$t_{VAR} = t_{GMV} + t_{GMVV} + t_{GMO} + t_{HABR} \cdot \frac{t_{GMV}}{T} = f(n_f, e, a) \rightarrow \text{MIN.} \quad (45)$$

Optimalizovanými veličinami jsou při broušení:

- posuvová rychlost obrobku v_f
- hloubka záběru e
- šířka záběru a /případně axiální posuv s_a /

Provádět optimalizaci broušení změnami řezné rychlosti v_s není vhodné, protože v současné době vyžaduje změna této rychlosti ve velkém rozsahu provést změny v konstrukčním uspořádání stroje, což lze velice těžko technicky realizovat.

Funkční závislost obou cílových funkcí rozhodujícím způsobem ovlivňuje:

- charakter použité trvanlivostní funkce
- vícenásobná závislost cílových funkcí na optimalizovaných veličinách
- vzájemné ovlivňování hrubovacích, hladících a vyjiskřovacích fází,

takže určení extrémů pomocí diferenciálního počtu nevede k triviálnímu, prakticky použitelnému řešení.

Cílová funkce "variabilní výrobní náklady":

$$K_{VAR} = K_1 \left\{ \frac{c_1}{e \cdot v_f} + \frac{\log \left(\frac{C_{ZVL}}{e} \cdot \frac{c}{k [\chi^2]^{1/6} [C_{WZ}]^{2/6} [\frac{1}{v_k}]^{1/6} [D]^{1/6} [v_f]^{1/6} [a]} \right)}{\log \left(1 + \frac{1}{\frac{c}{k [\chi^2]^{1/6} [C_{WZ}]^{2/6} [\frac{1}{v_k}]^{1/6} [D]^{1/6} [v_f]^{1/6} [a]}} \right)} \right\} +$$

$$+ K_2 \left\{ \frac{c_2}{(K \cdot B_1 \cdot V K G_{ZVL}^{B_2} \cdot n_f^{B_6} \cdot e^{B_8}) \exp \frac{B_5}{n_f^{B_{10}} \cdot e^{B_{12}} \cdot a^{B_{14}}}} \right\} \quad (46)$$

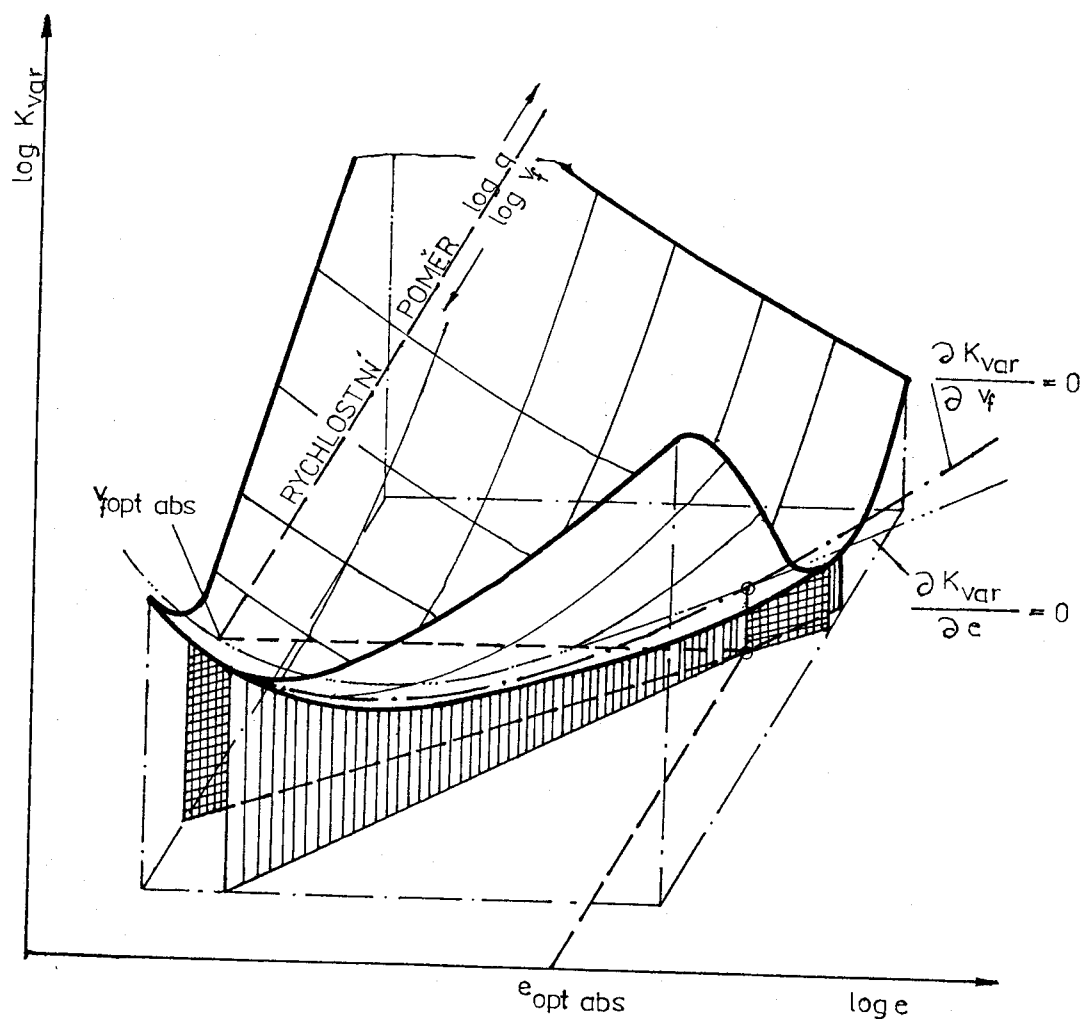
Průběh cílové nákladové funkce pro vnější broušení rotačních ploch zapichovacím způsobem je na obr. 18.

Pokud nahradíme v základním vzorci variabilních výrobních nákladů životnost T objemem /16/ a náklady na nářadí rozepíšeme do tří částí:

- náklady na pořízení brousicích nástrojů a výměnu
- náklady na pořízení orovnávacích nástrojů, výměnu a orovnění, pak rovnice má tvar:

$$K_{VAR} = K_1 \cdot t_{GM} + K_2 \cdot \frac{t_{GM}}{T} \quad (47)$$

Obr. 18. Průběh cílové nákladové funkce pro vnější broušení rotačních ploch zapichovacím způsobem



$$K_{VAR} = \frac{K_1}{Q_{zt}} + K_2 \frac{V'_w}{V'_{WT}} \quad (48)$$

$$K_2 = (K_A + K_{WE}) \cdot \frac{2a_d}{\Delta d_{WZnu+2z}} + (K_{dA} + K_{dWE} + i_{du} \cdot K_{du}) \cdot \frac{1}{i_{dT}} + K_1 \cdot t_{Hd} \quad (49)$$

Závislost funkce nákladů na odebraném objemu nám umožní graficky zjistit nákladové minimum obr. 19.

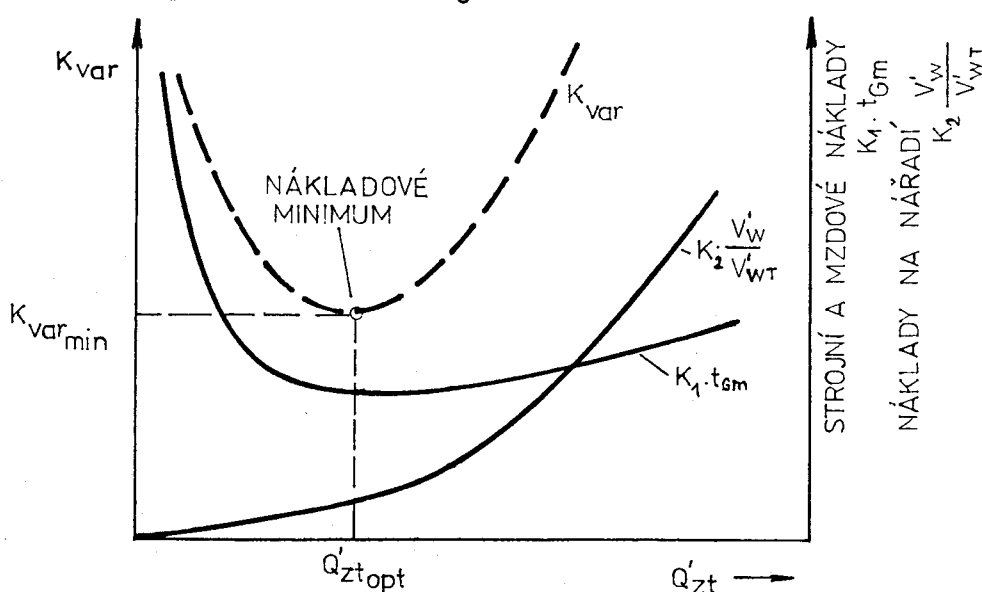
11.2. Systém technických a kvalitativních omezení

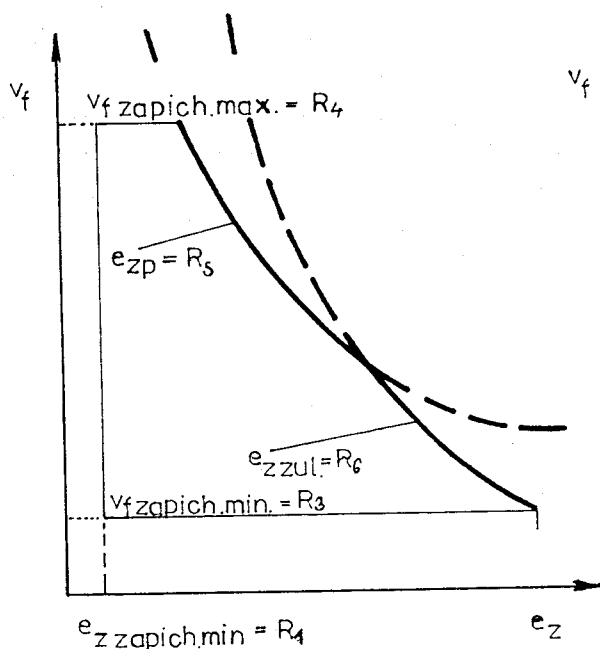
Při vytváření systému omezení je třeba přihlédnout především k tomu, o jaký druh broušení se jedná.

Pole řešení pro hrubovací broušení je ohraničeno omezeními obr. 20.:

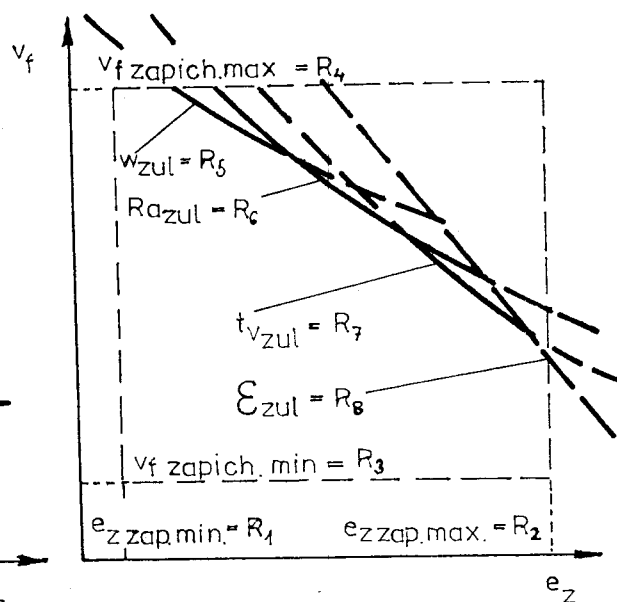
- omezení R_1 - minimální nastavitelná hloubka záběru $e_{Zzapich.MIN.}$
- omezení R_2 - maximální nastavitelná hloubka záběru $e_{Zzapich.MAX.}$

Obr. 19. Závislost variabilních broušicích nákladů na odebraném objemu /16/





Obr. 20. Restrikcemi omezené pole řešení při hrubovacím broušení



Obr. 21. Restrikcemi omezené pole řešení při broušení načisto

- omezení R_3 - minimální nastavitelná hodnota posuvové rychlosti $v_{fzapich.MIN.}$ nebo minimální hodnota otáček obrobku $n_{ozapich.MIN.}$ nebo minimální hodnota počtu dvojzdvihů $n_{DMzapich.MIN.}$
- omezení R_4 - maximální nastavitelná hodnota posuvové rychlosti $v_{fzapich.MAX.}$ nebo maximální hodnota otáček obrobku $n_{ozapich.MAX.}$ nebo maximální hodnota počtu dvojzdvihů $n_{DMzapich.MAX.}$
- omezení R_5 - výkonově podmíněná maximální hloubka záběru e_p
- omezení R_6 - přípustná hloubka záběru, při které nedochází ke vzniku tepelných poškození povrchu obrobku e_{ZUL} .

Pole řešení pro broušení načisto je kromě omezení daných konstrukcí stroje omezeno zejména požadavky povrchové kvality obrobku. Tuto situaci znázorňuje obr. 21.:

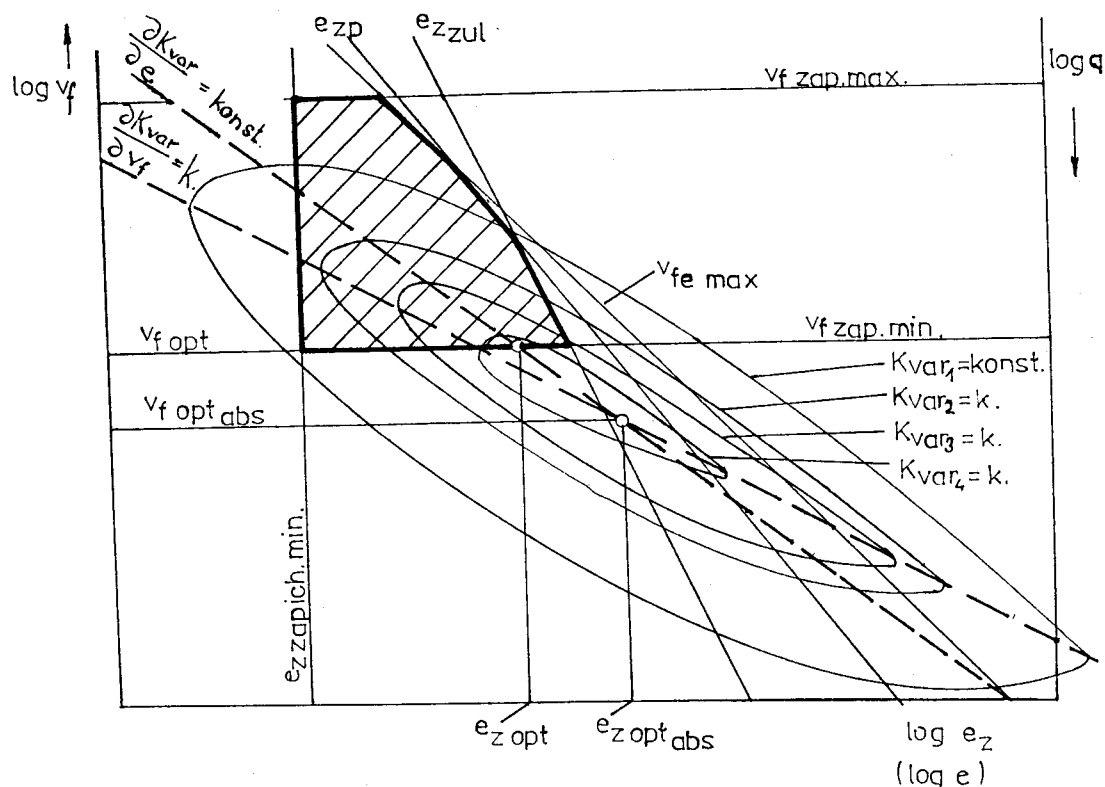
- omezení R_1 - minimální nastavitelná hloubka záběru $e_{Zzapich.MIN.}$

- omezení R_2 - maximální nastavitelná hloubka záběru $e_{Zzapich.MAX.}$.
- omezení R_3 - minimální nastavitelná hodnota posuvové rychlosti $v_{fzapich.MIN.}$ nebo minimální hodnota otáček obrobku $n_{ozapich.MIN.}$ nebo minimální hodnota počtu dvojzdvíhů $n_{DMzapich.MIN.}$.
- omezení R_4 - maximální nastavitelná hodnota posuvové rychlosti $v_{fzapich.MAX.}$ nebo maximální hodnota otáček obrobku $n_{ozapich.MAX.}$ nebo maximální hodnota počtu dvojzdvíhů $n_{DMzapich.MAX.}$.
- omezení R_5 - přípustná vlnitost povrchu obrobku $W_{ZUL.}$.
- omezení R_6 - přípustná hodnota povrchu $R_{aZUL.}$.
- omezení R_7 - přípustná hodnota hloubky opotřebení brousicího kotouče $t_{vZUL.}$ nebo přípustná odchylka tvaru obrobku způsobená opotřebením brousicího kotouče
- omezení R_8 - přípustná odchylka rozměru obrobku v důsledku napružení systému nástroj - obrobek - přípravek /odpadá, je-li napružení redukováno vyjiskřováním na přípustnou hodnotu/.

11.3. Model optimalizace broušení - strategie

Pokud jsme vyjádřili pole řešení technických a kvalitativních omezení spolu s ekonomickou cílovou funkcí, dostáváme se k problému nelineární optimalizace procesu. Vlastní model je na obr. 22.

K řešení tohoto problému lze nejlépe použít, vycházíme-li ze zkušeností získaných při optimalizaci rezných podmínek u nástrojů s definovanou geometrií břitu, metodu postupného zjišťování funkčních hodnot, kombinovanou se zpracováním získaných údajů pomocí výpočetní techniky. Určení nákladového případně časového optima lze nejlépe na základě určení křivek parciálních derivací:



Obr. 22. Vlastní model optimalizace broušení

$$\frac{\partial K_{VAR}}{\partial e} = 0 \quad ; \quad \frac{\partial t_{VAR}}{\partial e} = 0 \quad (50)$$

Průsečík křivek se zjištěnými omezeními nám určuje relativní, technicky realizovatelné optimum řezných podmínek, hloubka záběru - posuvová rychlost. Šířka řezu není v rámci tohoto programu hodnotou pro optimalizaci, její velikost lze předem pevně určit.

Pomocí uvedené optimalizační metody nenajdeme absolutní minimum stanovené u cílové funkce. Řešení většinou leží v oblasti velice malých posuvových rychlostí, které leží mimo oblast technicky možných řešení, a proto by stejně mělo jen teoretický význam.

12. Zhodnocení a závěr

V první části této práce jsem shrnul a postihnul techniku broušení a její vývoj. Proces broušení je závislý na působení velkého počtu většinou nezávisle proměnných veličin. Jedná se zejména o materiálové a tvarové údaje o obrobku, charakteristiky a veličiny definující brusný nástroj, primární a sekundární řezné podmínky a další jevy, ukazatele a vazby. Vzniká tak mnoho řešení a možností přístupu k problematice technologie broušení podle toho, kterým parametrům z tak velkého rozsahu techniky broušení dáváme větší váhu.

Hlavním cílem této práce bylo vytvoření databanky řezných podmínek pro broušení. Toto téma ještě u nás nebylo zpracováno, a tak toto řešení dává ucelený pohled na jednu z možností přístupu k tomuto problému. Databanka je celkově zpracovaná z jednotných normativů pro broušení. Uživatel zadává způsob broušení /s podélným posuvem, zapisovací/, požadovanou jakost broušeného povrchu obrobku /hrubování, broušení načisto/, požadavek tvarového broušení, velikost broušicího kotouče a obráběný materiál /ČSN, skupinu obrobitelnosti/. Databanka údaje zpracuje a na výstupu se uživateli objeví řada doporučených broušicích kotoučů, řezná a chladicí kapalina a řezné podmínky, pokud jsou pro příslušnou skupinu obrobitelnosti broušeného materiálu uvedeny v normativech. Jestliže v normativech uvedeny nejsou, poskytuje databanka řezné podmínky doporučené. Broušicí kotouče jsem zvolil a rozčlenil podle druhu broušeného materiálu, způsobů broušení, jakosti broušeného povrchu obrobku a požadavku tvarového broušení. Řeznou kapalinu dle broušeného materiálu. Řezné podmínky jsou vybírány podle požadované jakosti povrchu obrobku, velikosti broušicího kotouče, skupiny obrobitelnosti a průměru broušeného obrobku.

Toto řešení banky dat je však omezeno množstvím experimentálně zjišťovaných hodnot řezných podmínek pro jednotlivé druhy materiálů, které mají různou skupinu obrobitelnosti.

Databanka je zpracována na 16bitovém osobním počítači SM 7209 a její použití má za cíl urychlit určení pracovních podmínek v procesu broušení. Zpracování a uchování těchto informací pro používání na samočinných počítačích by mělo pomáhat zkracovat dobu přípravy výroby a určovat neoptimálnější řezné podmínky a řezné nástroje pro operaci. To se projeví ve snížení výrobních nákladů a ve zvýšení produktivity práce.

V další části diplomové práce jsem zpracoval matematický model externího vyšetřování optimálních pracovních a technologických podmínek z požadavku minimalizace výrobních nákladů při zachování požadované kvality povrchu obrobku.

V tomto modelu se pomocí logické vazby matematicky spojují účelové funkce s omezeními, aby se dosáhlo ekonomicko-optimálního řešení pro danou pracovní úlohu. Pro každou metodu broušení je nutné vytvořit zvláštní program, protože experimentálně zjištěné hodnoty funkčních závislostí a výrobně-technické a geometrické zákonitosti jednotlivých způsobů broušení jsou rozdílné. Abychom mohli prakticky používat těchto modelů pro všechny druhy broušení, musíme znát tyto výrobně-technické a geometrické zákonitosti a funkční charakteristiky účelových funkcí, které jsou dány charakterem funkce trvanlivosti břitu.

Rád bych poděkoval Ing. J. Jersákovi a Ing. A. Průškovi za pomoc při řešení zadaného úkolu, za cenné rady, materiály a metodické vedení při vypracování diplomové práce.

Literatura

- /1/ Tyrolit, Schwarz: Schleifen mit Tyrolit. (B.r.).
- /2/ Továrny strojírenské techniky k.p., Benátky nad Jizerou: Katalog brousicích nástrojů, 1982, (B.r.).
- /3/ Frumar, J.: Výzkum řezivosti brousicích kotoučů pro broušení materiálů se stíženou obrobitelností.
Diplomová práce, Liberec, 1986, VŠST - fakulta strojní
- /4/ Gazda, J.: Řezivost brousicích kotoučů.
/Habilitační práce/ Liberec 1979, VŠST-fakulta strojní
- /5/ Mádl, J.: Strojírenská výroba, 1, 1985, s.14
- /6/ Kvapil, R., Menšík, J.: Informační střediska pro obrábění
/Výzkumná zpráva/.Liberec,
VŠST - fakulta strojní 1980.
- /7/ Mádl, J.: Optimalizace řezných podmínek v teorii obrábění.
I. vydání. ČVUT Praha 1988
- /8/ Kořínek, J.: Brousicí nástroje a jejich používání.
1.vyd.Bratislava, Dom techniky ČSTVS 1984
- /9/ Kubišta, P.: Hodnocení vlivu vlastností kotoučů a vlivu pracovních podmínek na výkon broušení.
In: Nové směry broušení a nové brusné materiály, Praha 1977, s. 1.
- /10/ Jednotné normativy - Broušení na plocho BPH, BRH
VUSTE Praha 1985
- /11/ Jednotné normativy - Broušení vnější na hrotových bruskách, VUSTE Praha 1978
- /12/ Maslov, J.N.: Teorie broušení kovů
1. vydání, Praha, SNTL, 1979

- /13/ Thyssen, W.: Komplexe mathematische Modellierung des Schleifprozesses - Schaffung von Grundlagen für die externe Schnittwertoptimierung /Doktorská práce/. Magdeburg 1982.- TH Magdeburg
- /14/ Lierath, F.: Komplexer Informationsgehalt und effektive Nutzungsformen der externen Schnittwertoptimierung. /Doktorská práce/. Magdeburg 1980.- TH Magdeburg
- /15/ Lierath, F.; Thyssen, W.: Wissenschaftliche Zeitschrift der Technischen Hochschule Otto von Guericke. Magdeburg 26, 1982, Heft 5, s. 49
- /16/ Lierath, F.; Thyssen, W.: Spanende formung - 8 lehrbrief, Schleifen, Schleifverfahren und - werkzeuge, -, Herausgegeben von der Zentralstelle für das Hochschulfernstudium des Ministeriums für Hoch - und Fachschulwesen
- /17/ Lierath, F.: Wissenschaftliche Zeitschrift der Technischen Hochschule Otto von Guericke. Magdeburg 20, 1976, Heft 5, s. 535
- /18/ Buda, J.; Bakeš: Teoretické základy obrábání kovů Bratislava, ALFA, 1977

Rok	Autor	Vzorec	Rozměr	Pojmenování
		$Q_{ZT} = V_o/t$	$mm^3.s^{-1}$	Výkon broušení
		$q = Q/P$	$mm^3.s^{-1}.W^{-1}$	Měrný výkon broušení
	Schleisiger	$m = V_o/V_k$ $m = V_k/V_o$		Poměr. objem.obrus Měrná výrob.kotouče
	Norton	$m_N = C_N.V_o^2/V_k$	mm^2	Kvadratický poměrný obrus
1953	Majkus	$k_y = v_y/F_y$	$\mu m.s^{-1}.N^{-1}$	Řezivost
1957	Koellner	$k_y = v_y/F_y$ $k_z = v_z/F_y$	$\mu m.s^{-1}.N^{-1}$ $\mu m.s^{-1}.N^{-1}$	Řezivost
1962	Kramer Engelland	N	s^{-1}	Emise elektronů
1969	Lurje	$k_q = Q/F_y$ $k_T = K_o.Y^{-1}$ $R = k_T/\lambda.\theta$	$mm^3.s^{-1}.N^{-1}$	Řezná schopnost Vliv trvanlivosti Komplexní řezivost
1974	Maslov	$k_Q = Q/F_y$ $k_s = Q_k/F_y$ $\mu = F_z/F_y$	$mm^3.s^{-1}.N^{-1}$ $mm^3.s^{-1}.N^{-1}$	Koeficient řezivosti Koeficient samoostř. Koeficient broušení
1974	Cirp Snoeys Peters Decnent	$h_{eq} = h.v_o/v_k$ R_a, m, Q_1, F_y, F_z, e	μm	Ekvivalentní tloušťka odebírané vrstvy Diagram broušení
1975	Říčka	$K_{obA} = m/m_E$ $K_{obA} = Q/Q_E$ $K_{obR} = m/m_E$ $K_{obR} = Q/Q_E$	Index absol.obrob.z poměr.obrusu Index absol.obrob.z výkonu brouš. Index rel.obrob.z poměr.obrusu Index rel.obrob.z výkonu broušení	
	Mc Kee Moore Beston	$\mu = m/P_{11}.R_a$	$m.W^{-1}.\mu m^{-1}$	Poměrný koeficient brousitelnosti
1977	Armavego Brown	$m = V_o/V_k$ $q = m/P$ $\mu = m/P_{11}.R_a$	W^{-1} $m.W^{-1}.\mu m^{-1}$	Měrná výrobnost Char.brousitelnosti Poměrný koef. brousitelnosti
1977	Kubišta	$K_{ob} = m/e_{0,1}.M_e$		Koeficient obrobi- telnosti
1979	Gazda	$tg\alpha = C/T$ $A = C.T$ $U = 10^5.tg\alpha/S$ $R = 10^6/S.T_1$	mm^{-2}	Kriterium strmosti Kriterium počátečního impulzu Krit.strmosti práce Krit.časového objemu práce

Tab. č. 1