

Ministerstvo školství ČSR

VYSOKÁ ŠKOLA STROJNÍ A TEXTILNÍ
nositelka Řádu práce
Liberec

Fakulta strojní
katedra obrábění a ekonomiky

Ing. Jaromír G a z d a , CSc

Ř e z i v o s t b r u s n ý c h k o t o u č ů

Habilitační práce

Liberec, duben 1979

A N O T A C E

Autor: Ing. Jaromír Gazda, CSc

Druh zprávy: Habilitační práce

Ř E Z I V O S T B R U S N Ý C H K O T O U Č Ů

Cílem práce je vytvořit vhodné kritérium řezivosti brusných kotoučů z taveného kysličníku hlinitého a karbidu křemíku, pojených keramickým pojivem, pro případ rovinného broušení obvodem kotouče. Vychází se z rozboru stavby brusného kotouče, dosavadních způsobů hodnocení jejich kvality a pracovní schopnosti, definuje se pojem řezivosti obecně pro řezné nástroje a pro brusné kotouče zvláště.

Pro vlastní návrh kritéria řezivosti se používá rozbor cyklu broušení, zvláště jeho závěrečné fáze, charakterizované vyjiskřovací křivkou, popsanou rovnicí

$$y = C e^{-\frac{x}{T}}$$

Kritérium řezivosti U bylo vytvořeno jako podíl strmosti vyjiskřovací křivky a plochy pod touto křivkou násobené vyrovnávací konstantou

$$U = 10^5 \frac{\operatorname{tg} \alpha}{S}$$

a bylo nazváno kritériem strmosti práce.

V práci je ověřena jeho platnost a schopnost rozlišit řezivost brusných kotoučů různé tvrdosti za různých řezných podmínek.

Zpracováno na: VŠST-FS-KOE, Liberec

TU Dresden, FW / AT

Dokončeno: duben 1979

Počet stran: 131

Počet příloh: - -

Počet tabulek: 10

Počet obrázků: 57

Počet diagramů: 12

O b s a h

Anotace	2
Obsah	3
Seznam použitých symbolů	4
I. Úvod	
1. Motivace	9
2. Zaměření práce	10
II. Zvláštnosti procesu broušení	
1. Soustava S-N-O-P	12
2. Stavba brusného kotouče	13
3. Dosavadní způsoby hodnocení brusných kotoučů..	16
4. Některé novější metody hodnocení brusných nástrojů	23
III. Řezivost při broušení	
1. Filozofie pojmu řezivost	39
2. Pojem řezivost v obrábění	40
3. Řezivost brusných kotoučů	41
4. Metody a kriteria řezivosti brusných kotoučů..	42
IV. Experimentální výzkum řezivosti brusných kotoučů	
1. Volba kriteria řezivosti	70
2. Metodika měření	80
3. Zpracování naměřených údajů	91
4. Zhodnocení výsledků měření	101
V. Závěr	
Literatura	129

Seznam použitých symbolů

- a_1 ... vzdálenost od tyčového měřítka
 a_2 ... výchylka odraženého paprsku
 a ... exponent
 A ... kritérium rezivosti - počátečního impulsu
 a_j ... koeficienty regresní funkce

 B ... šířka kotouče
 B ... kritérium rezivosti - převrácená hodnota počátečního impulsu
 B_o ... okamžitá šířka brusného kotouče
 b ... exponent

 C_T ... konstanta Taylorova vztahu
 c ... tuhost funkčních částí brusky
 c_k ... konstanta (Říčka)
 c_o ... tuhost vřeteníku obrobku
 c_k ... tuhost vřeteníku brusného kotouče
 c_s ... styková tuhost obrobku a kotouče
 C_T ... konstanta tlumiče příčného suportu
 C_N ... konstanta (Norton)
 C_l ... konstanta odpovídající $F_y = 1$ (Lur' je)
 C_{F_z} ... citlivost dynamometru ve směru F_z
 C_{F_z} ... citlivost dynamometru ve směru F_y
 C_{F_z}, C_{F_y} ... tuhost dynamometru v příslušném směru
 C_y, C'_y ... konstanta vyjiskřovací křivky (Hahn)
 C ... konstanta vyjiskřovací křivky

 d_k ... hloubka rytí (Peklenik)
 D ... průměr brusného kotouče
 d ... průměr obrobku
 D_E ... ekvivalentní průměr

 E ... modul pružnosti v tahu
 E_o ... modul pružnosti ocelového etalonu
 e ... měrná energie
 e_{MS} ... měrná energie broušení

- F_1 ... síla prvního drcení
 F_2 ... síla druhého drcení
 F_y ... radiální složka řezné síly
 F_z ... tangenciální složka řezné síly
 F_s ... průhybová síla
 F_{y1} ... podíl radiální složky řezné síly připadající na jednotku šířky brusného kotouče
 F_{y1T} ... dtto pro konečnou hranici oblasti tření
 F_{y1R} ... dtto pro konečnou hranici oblasti rytí
 F_{y1L} ... dtto pro sílu způsobující vylamování zrn
 F_{yT} ... celková radiální složka řezné síly pro konečnou hranici oblasti tření
 F_a ... vyvolaná přibližovací síla (počáteční)
 F_l ... maximální síla na 1 brusné zrno
 F_{11} ... konstanta síly pro $h_{eq} = 0,01 \mu m$
 f ... exponent silové rovnice
 $f_j(x)$... libovolná funkce

 G ... hmotnost nasáklého vzorku
 G_o ... hmotnost suchého vzorku
 g_m ... charakteristika brusitelnosti

 H_D ... dynamická tvrdost (Collwel)
 h ... tloušťka odebírané vrstvy, přísuv
 h_A ... přírůstek, ubíraný při vřezávání
 h_1 ... maximální tloušťka třísky na 1 brusné zrno
 h_1, h_2, h_3, h_4 ... tloušťka odebírané vrstvy, odpovídající 0,01; 0,02; 0,03; 0,04 mm
 h_{eq} ... ekvivalentní tloušťka odebírané vrstvy

 I_{UM} ... intenzita úběru materiálu
 I_o ... intenzita úběru při ustáleném procesu
 i_A ... poměr konečného průhybu a odtlačení při ustáleném úběru

 k ... konstanta útlumu
 K ... řezivost brusného kotouče
 k ... exponent polytropy (Říčka)
 k_p ... koeficient řezivosti (Maslov)
 k_s ... koeficient samoostření (Maslov)
 k_u ... koeficient úběru materiálu (Maslov)
 K_o ... řezivost brusného kotouče po orovnaní

- k_1 ... konstanta
 k_2 ... konstanta
 K ... koeficient úměrnosti
 k_w ... ukazatel poměru síly a obrusu (Wolfram)
 k ... počet regresních funkcí
- l ... délka brusného zrna
 l_b ... vzdálenost břitů
 L ... délka broušeného čepu
 L ... celková dráha zdvihu
 L_1 ... délka jednoho zdvihu
- m_o ... poměrný obrus
 m ... celková hmotnost
 m ... exponent Taylorova vztahu
 m ... střední kvadratická odchylka
 M ... tvarový součinitel
 m_N ... kvadratický poměrný obrus
 m_1 ... konstanta poměrného obrusu pro $h_{eq} = 0,01 \mu m$
 m_{aj} ... střední odchylka koeficientů
 m_{jk} ... matice koeficientů
- n ... objemová nasáklivost
 n ... počet hodnot získaných při experimentu
 n_o ... počet orovnáání
 N ... útlum emise exoelektronů
 n_k ... otáčky brusného kotouče
 n_i ... počet zdvihů
- P ... výkon
 P ... síla průhybová
 P_b ... střední hodnota síly rytí (Peklenik)
 p ... měrný řezný odpor
 P_{11} ... měrný výkon na jednotku času a jednotku šířky
- Q ... výkon broušení
 Q ... chybový součet čtverců
 q ... měrný výkon broušení
 Q_k ... objemový úbytek brusného kotouče za jednotku času

- Q_{vyp} ... vypočtený objemový úbytek obrobku za časovou jednotku
 Q_i ... obecný úbytek brusného kotouče
 Q_{kl} ... jednotkový objem úbytku brusného nástroje
 q_v ... rychlostní poměr
 Q_{11} ... konstanta objemu odebraného materiálu pro $h_{eq} = 0,01 \mu m$

 R ... frekvence chvění brusného kotouče
 R_a ... střední aritmetická účhylnost povrchu
 R_z ... střední výška nerovnosti povrchu
 r ... poloměr obrobku
 r ... exponent rovnice drsnosti
 R ... poloměr brusného kotouče
 R ... kritérium řezivosti - časového objemu práce
 R_L ... komplexní řezivost podle Lur'je
 R_{al} ... konstanta drsnosti pro $h_{eq} = 0,01 \mu m$

 $S-N-O-P$... soustava stroj - nástroj - obrobek - přípravek
 s ... šířka brusného zrna
 s ... dráha odpovídající úběru
 S ... ostrost (Hahn)
 S_1 ... průřez třísky připadající na 1 brusné zrno

 t ... čas
 T ... trvanlivost
 T ... časová konstanta
 T_s ... doba mezi záznamy vzorku
 T_{so} ... doba mezi záznamy etalonu
 T_{opt} ... optimální trvanlivost
 t_A ... čas vřezávání

 u ... dráha odpovídající opotřebení brusného kotouče
 u ... exponent rovnice odebraného objemu materiálu
 U ... kritérium řezivosti brusných kotoučů - strážnosti práce

v	...	výška brusného zrna
v	...	rychlost, řezná rychlost
V	...	objem vzorku brusného nástroje
V_o	...	objem odbroušeného materiálu obrobku
V_k	...	objem úbytku brusného kotouče
v_T	...	řezná rychlost při konstantní trvanlivosti
v_{15}	..	řezná rychlost při trvanlivosti 15 minut
v_{15E}	.	řezná rychlost při trvanlivosti 15 minut pro etalonový nástroj
v_p	...	rychlost přísuvu
v_o	...	rychlost pohybu obrobku
v_m	...	rychlost podélného posuvu obrobku
w	...	exponent rovnice poměrového obrusu
x	...	změna rozměru obrobku za čas
y	...	průhyb napružení, odtlačení S-N-O-P
y_k	...	konečný průhyb, velikost odtlačení po ukončení cyklu broušení
y_o	...	odtlačení při ustáleném úběru
$y(x)$	..	regresivní funkce
y_i	...	vyhodnocované veličiny jednotlivých experimentů
Z	...	životnost
μ	...	koeficient broušení
λ	...	koeficient trvanlivosti brusného kotouče
Δ_{or}	...	sklon přímky Q_1 v oblasti rytí
Δ_o	...	sklon přímky Q_1 v oblasti řezání
Δ_k	...	sklon přímky úbytku brusného kotouče Q_{1k}
γ	...	poměrný koeficient brusitelnosti
α	...	úhel strmosti vyjiskřování křivky
α	...	konstanta (Šal'nov)

I. Úvod

1. Motivace

Ve zprávě o hlavních směrech hospodářského a sociálního rozvoje ČSSR v letech 1976 - 1980, přednesené na XV. sjezdu KSČ soudruhem Lubomírem Štrougálem, se uvádí: "Vyšší stupeň uspokojování potřeb společnosti i obyvatelstva a další rozkvět naší země závisí v rozhodující míře na růstu průmyslové výroby."

"Dosažení tohoto záměru předpokládá zvýšit strojírenskou výrobu až o 48 - 51%."

"Při minimálních přírůstcích pracovních sil je nutno urychlovat technickou rekonstrukci a modernizaci strojírenské výrobní základny"

"Věda a technický rozvoj se mají stát hlavním činitelem při rozvíjení moderní a efektivní výroby"

Při plnění těchto úkolů nelze použít cestu extenzivního rozvoje, protože zdroje pracovních sil jsou silně omezeny. Možná a prakticky realizovatelná je jen cesta intenzifikace výroby, která však nesmí být uskutečňována vynakládáním větší námahy dělníka, stále se zvětšující frekvencí a úsilím při pracovních pohybech.

Intenzifikovat výrobní proces lze proto jen aplikací vědeckých poznatků do všech jeho oblastí, počínaje konstruováním výrobku, přes přípravu polotovarů, výrobu součástí, jejich montáž, technickou kontrolu, dopravu uvnitř závodu a konče organizací práce.

V uvedeném, možná i neúplném přehledu, lze za zvlášť významnou oblast považovat výrobu součástí. To vyžaduje, s ohledem na dosažení vyšší produktivity práce, použití té nejpokrokovější technologie obrábění. Stupeň její automatizace je závislý na počtu výrobků produkovaných za rok. Čím je jejich počet vyšší, tím vyšší musí být též úroveň automatizace. Výrobní specializace, která umožňuje soustřeďovat výrobu velkého množství součástí jednoho typu, dovoluje nasazení vyšší automatizace a tím dosažení výroby většího počtu obrobků, tedy vyšší produktivity práce. Proto je tak značný význam RVHP a její snahy a její snahy, zaměřené na splnění tohoto záměru, což za 30 let její existence už přineslo mnohé pozitivní výsledky pro naše národní hospodářství.

Lze-li za jednu z možností zvyšování produktivity práce považovat automatizaci, pak této je dosaženo nejen za použití odpoví-

dajících strojů a jejich řídicích členů, ale také aplikací technologie obrábění na nejvyšší úrovni.

Mezi všemi, v současnosti používanými způsoby obrábění, má své pevné místo také broušení, a lze vyslovit předpoklad, že jeho postavení a význam dále poroste. Broušení plní tři základní úlohy: je především procesem dokončovacím, jež probíhá při malé tloušťce odebírané vrstvy, ale při velké přesnosti a jakosti obrobku. Dále je to schopnost broušení obrábět prakticky všechny druhy materiálů, jejichž tvrdost je menší, než tvrdost zrn brusného kotouče. Třetí úlohu-hrubovací, kdy broušení probíhá za velké tloušťky odebírané vrstvy, získalo broušení teprve nedávno. Všechny tyto úlohy nacházejí ve strojírenské praxi plného uplatnění, i když stupeň využití v jednotlivých oblastech není vždy na nejlepší úrovni a jistým způsobem odpovídá úrovni výzkumu. Systematický rozvoj studia problémů broušení je předmětem nejvyššího zájmu z hlediska technických a ekonomických potřeb současné výroby.

2. Zaměření práce

Technologická soustava, tvořená strojem-nástrojem-obrobkem-přípravkem, umožňuje ve vzájemné součinnosti realizovat proces obrábění. Ve sledovaném případě rovinného broušení obvodem kotouče je strojem bruska, nástrojem plochý brusný kotouč, obrobkem vzorek, podrobený působení nástroje a přípravkem dynamometr, v němž je vzorek upnut.

Je zřejmé, že brusný kotouč je tou nejdůležitější částí technologické soustavy, která rozhoduje o úspěšnosti rezného procesu. Pracovní výkonnost brusného nástroje má významnou roli v praktických úkolech broušení, kde silně ovlivňuje jak technickou, tak i ekonomickou stránku výroby.

Předložená práce si z mnoha problémů, spojených s hodnocením brusných nástrojů, vybírá úkol stanovit pracovní schopnost - řezivost brusných kotoučů. Posoudit určitým způsobem kvalitu těchto nástrojů stává se pro současný průmysl nezbytnou záležitostí. Kvantifikovat řezivost nástroje s velmi složitou stavbou by přineslo možnost účelněji automatizovat pracovní cyklus broušení. Kromě toho by se tím dala technikovi možnost spolehlivě předem vybrat brusný nástroj pro provedení určité operace broušení na daném brousícím stroji.

Autor na základě rozboru pracovního cyklu a jeho kritického posouzení navrhuje kritérium řezivosti pro případ rovinného broušení obvodem kotouče. Metoda stanovení řezivosti může být aplikována na ostatní způsoby broušení. V závěru práce je učiněn rozbor naměřených výsledků a naznačena jejich praktická aplikace.

II. Zvláštnosti procesu broušení

Broušení lze považovat za proces hromadného rychlostního mikrořezání či rytí povrchové vrstvy obrobku značným počtem nevelkých brusných zrn, zpravidla vázaných pojivem do podoby brusného nástroje, jemuž jsou vhodným strojem umožněny potřebné hlavní a vedlejší řezné pohyby a kde v nutném upínacím zařízení je přidržován obráběný předmět [1]. Mohou probíhat pouze v ucelené technologické soustavě stroj (S) - nástroj (N) - obrobek (O) - přípravek (P), která zajistí všechny výše uvedené požadavky.

1. Soustava S - N - O - P

Stroj v tom nejobecnějším vyjádření je dynamická soustava, která zprostředkovává přenos energie a informace mezi vstupem a výstupem stroje tak, aby výstupy realizovaly zadané parametry operací technologického procesu na daném objektu [2]. Operace jsou v zásadě dvou typů:

- 1) pomocné - realizuje se příprava objektu k uskutečnění žádaného přetvoření
- 2) hlavní - realizuje se přetvoření objektu technologického procesu.

Pokud se hlavní operací dosáhne poměrně trvalého přetvoření objektu, pak stroj, jímž se uskutečnilo, lze nazvat výrobním strojem. Přetvoření je zde nutno chápat v jeho nejobecnějším významu, tedy jako libovolnou změnu fyzikálních či chemických vlastností. Z tohoto pohledu je přetvoření realizovatelné:

- a) při konstantní hmotnosti objektu
- b) při změně hmotnosti objektu
- c) zaplňováním objemů objektu
- d) spojováním objektů.

Obrábění, jež se děje oddělováním třísky lze zařadit pod bod b). Ke změně hmotnosti dochází při takových operacích, které vyvolávají větvení proudu objektu (obrobek - tříska); z toho je pouze jedna část (obrobek) dále využitelná.

Aplikace těchto obecných poznatků na brousící stroj vede k tomu, že elektrická energie vstupující do stroje je jím přeměňovaná na energii mechanickou. Ta se v místě pracovního styku brusného kotouče s obrobkem změnila v jinou formu energie, z největší části pak v energii tepelnou, která se zmaří. Výsledkem je oddělení vrstvy materiálu a vznik požadovaného tvaru a rozměru součástí.

Obráběcí stroj, v našem případě bruska, je důležitou součástí technologické soustavy a svými vlastnostmi v nejširším slova smyslu může ovlivňovat proces broušení. Svými parametry působí proto jako omezující faktor při volbě rezných podmínek.

Nástroj - je vykonavatelem hlavní operace, tj. realizuje přetvoření objektu. V jeho pracovním styku dochází k setkání proudu energie a proudu informací. Má proto při obrábění nezastupitelnou úlohu.

V procesu broušení, vzhledem k jeho zvláštní stavbě, která se u jiných druhů nástrojů nevyskytuje, má mimořádný význam pro jeho bezkonfliktní a produktivní provedení. Proto je mu věnována i tato práce.

Obrobek - je vlastním objektem přetvoření, jehož průběh může ovlivňovat především svými fyzikálněmechanickými, tepelnotechnickými a chemickými vlastnostmi. Dále pak se musí vzít v úvahu i velikost a tuhost obrobku. Rovněž stav materiálu obrobku po tepelném zpracování, zejména pak jeho struktura může výrazně působit na proces broušení.

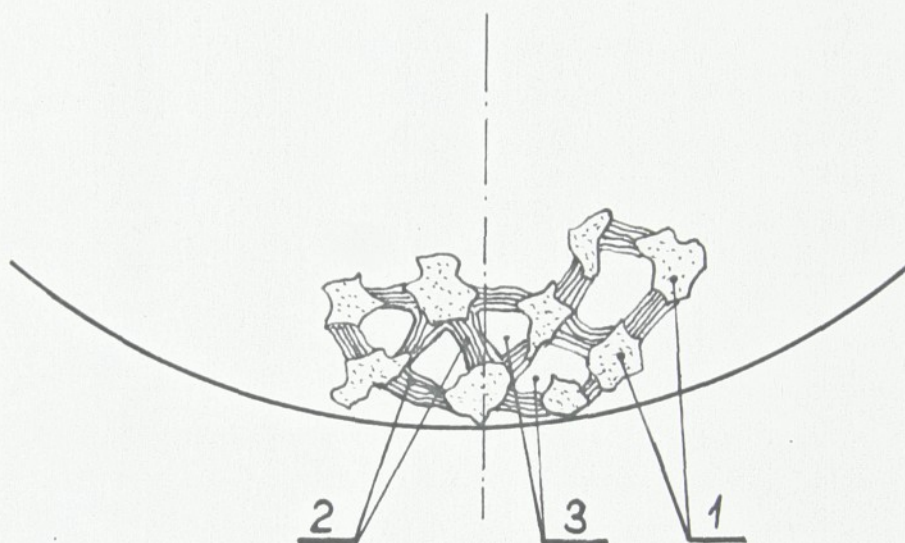
Přípravek - je realizátorem úseku pomocných operací a to té části, která zajišťuje správnou polohu objektu a jeho upevnění v této poloze. V některých úvahách se považuje za součást stroje, jindy jako samostatný člen technologické soustavy. V každém případě je však neodmyslitelnou náležitostí, bez které by nemohl rezný proces probíhat,

2. Stavba brusného kotouče

Brusný nástroj plní úlohu rezného nástroje. Je vytvořen ze zrn brusiva, navzájem v jeden celek spojených pojivem, vhodným pro určitý druh brusných zrn.

Předmětem studia v této práci jsou brusné kotouče, vyrobené z taveného kysličníku hlinitého pojené keramickým pojivem. Proto nebude pojednáváno o kotoučích diamantových nebo z kubického nitridu bóru, které jsou zpravidla pojené jinými pojivy.

Podle výše uvedené definice a také z mnoha publikací, výsledků výzkumů, ale i z praxe vyplývá, že stavba brusného kotouče je poměrně jednoduchá. Často se také znázorňuje prostým modelem, jak jej představuje obr. 1, kde brusná zrna /1/ jsou spojená



Prostý model stavby
brusného kotouče obr. 1

pojivými můstky /2/. Mezi nimi vzniknou volná, prázdná místa - póry /3/.

Někteří autoři, zvláště Peklenik [3], když popisují stavbu brusného kotouče, rozlišují tzv. makrogeometrii a mikrogeometrii. Pod makrogeometrii se zařazuje rozložení zrn na pracovním povrchu, pod mikrogeometrii pak vlastní brusná zrna, jejich druh, tvar, rozměry a geometrie. Toto rozdělení má sice své opodstatnění, avšak nevystihuje úplně a správně veličiny stavu brusného kotouče. Výstižnější by bylo hovořit o:

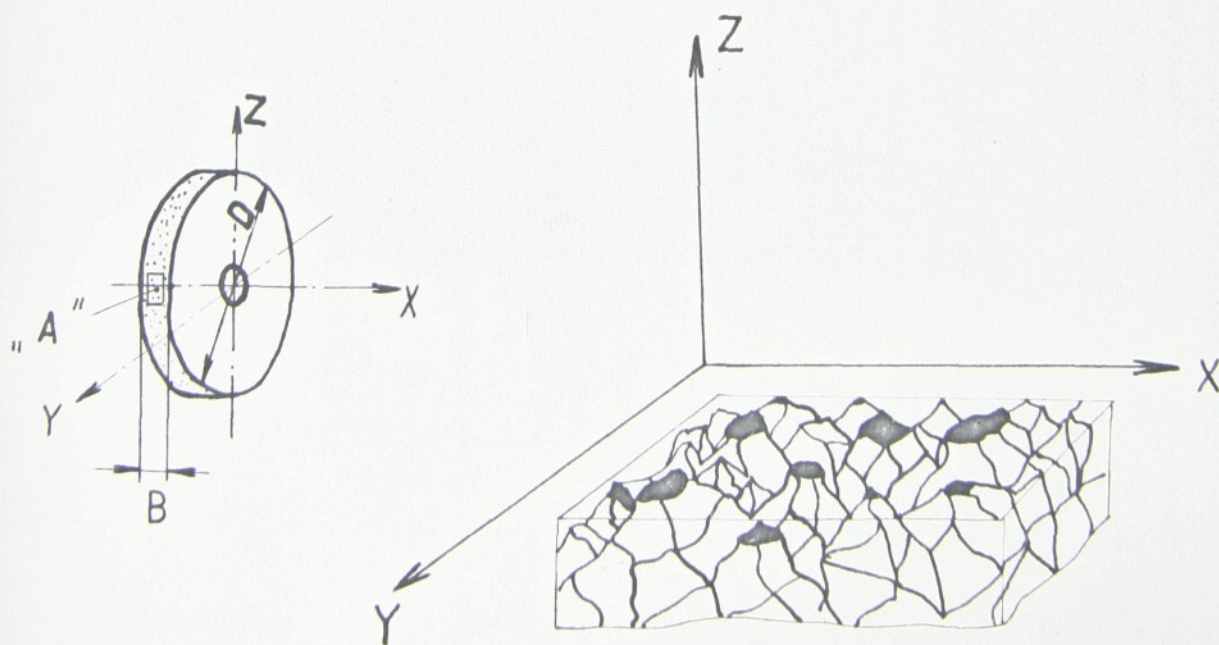
makrostruktuře - zahrnuje celkovou stavbu brusného nástroje, popsaného technickou charakteristikou, ale také stav pracovního povrchu, vyjádřený jeho pracovní nebo-li řeznou schopností,

mikrostruktura - obsahuje poznatky o tvaru a geometrii brusných zrn, jejich štěpných rovinách, ostrosti hran, opotřebení, fyzikálních a chemických vlivech působících na proces řezání reznými hranami jednotlivého zrna.

Další pojednání bude zaměřeno na oblast makrostruktury neboť některým problémům mikrostruktury věnoval autor jinou svou práci [4].

2.1 Makrostruktura brusného kotouče

Brusné kotouče uskutečňují brusný proces buď svou čelní plochou, zpravidla rovinnou, nebo svým obvodem, tedy plochou válcovou. Ve zvláštních případech může jít i o plochy jiných tvarů, např. kuželovou, kulovou či jejich kombinací. Každá tato plocha jako součást tělesa brusného kotouče je tvořena brusnými zrny, pojivem a póry, takže nejde o ideální hladkou plochu. Tu představuje obálka vrcholů vyčnívajících brusných zrn, která jsou nepravidelně a nahodile rozmístěna v brusném kotouči ve všech třech osách na sebe kolmých. Na obr. 2 je uvedena představa pracovního povrchu brusného kotouče podle Peklenika [3].



DETAIL „A“

Představa pracovního povrchu brusného kotouče obr. 2

Tuto představu dnes podporují stereoskopické snímky, z nichž je tento pohled na stavbu brusného kotouče zřejmý. Taková strukturální stavba brusného kotouče vznikne ze spojení zrn brusiva s pojivem, založeném na vypalovacím procesu v průběhu výroby. Vzniklé brusné těleso je pro použití v technické praxi popsána tzv. technickou charakteristikou. Ta se soustřeďuje na následující základní proměnné veličiny:

geometrický tvar a rozměry

brusivo

zrnitost

tvrdost

strukturu

pojivo

3. Dosavadní způsoby hodnocení brusných kotoučů

Československou státní normou byly přijaty některé metody zkoušení jakosti brusných nástrojů za základ pro kontrolu hotových výrobků. Vezmeme za základ dalšího výkladu příklad označení brusného kotouče podle ČSN 224010 a normy přidružené.

A 99	80	K	6	V
MATERIÁL BRUSNÝCH ZRN	ZRNITOST	TVRDOST	STRUKTURA	POJIVO

Tab. I.

Materiál brusných zrn - brusivo. Brusivo je krystalická látka nebo hmota zrnitého, někdy mikrokrytalického slohu, jejíž zrna jsou tak tvrdá, houževnatá a ostrohranná, že jimi lze obrousovat jiné hmoty.

Každé brusné zrno v kotouči můžeme považovat za samostatný řezný nástroj, který musí splňovat celou řadu často protichůdných požadavků. Patří k nim jednak tvrdost zrna,

vytvoření optimálních řezných úhlů, dostatečná dynamická pevnost, odolnost proti opotřebení, tepelná vodivost a vysoký bod tání.

Uvedené požadavky splňují nejlépe z přírodních brusiv diamant (D), korund a smírek a z umělých korund (Al_2O_3), karbid křemíku (SiC), karbid boru (BC), kubický nitrid boru (CNB) a umělý diamant (SD).

Pro ilustraci a porovnání fyzikálněmechanických hodnot uvádíme stručnou tabulku nejčastěji používaných druhů brusiv.

Druh brusiva	Hustota [m^{-3}kg]	Bod tání [$^{\circ}\text{C}$]	Tvrдость Knoop [MPa]	Mikrotvrдость [MPa]
D	3 500	3 700	70 000	98 000
CBN	3 480	-	47 000	91 000
BC	2 500	2 450	27 500	39 000
SiC	3 200	2 200	24 800	29 000
Al_2O_3	3 900	2 050	21 000	19 800

Tab. II

Fyzikálněmechanické hodnoty brusných materiálů

Pro kontrolu brusných materiálů se postupuje podle ČSN 224010 (korund bílý) nebo ČSN 224044 (korund hnědý), kde je přesně popsán způsob odběru vzorků, jejich příprava (drcení, prosévání, čištění) a podrobný postup chemického rozboru včetně potřebného laboratorního vyšetřování.

Kontrola zrnitosti

Zrno drceného brusiva je krystal nebo částice brusné hmoty, jejíž šířka nepřevyšuje 5 mm a poměr největšího rozměru k nejmenšímu nepřesahuje u 90% zrn 5 : 1.

Rozměry zrna jsou určeny délkovými mírami (délka l , šířka s , výška v) rovnoběžnostěnu, opsaného zrna. Vztah mezi rozměry zrna je

$$l \geq s \geq v.$$

Zrnitost drčeného brusiva je předepsaný vzájemný váhový poměr pěti (šesti) podílů zrn roztríděných podle normy ČSN 224012.

Velikost brusných zrn se kontroluje vždy po provedeném roztrídění, tj. před vlastní výrobou brusného nástroje, jak to předpisuje ČSN 224014 a přidružené normy ČSN 224012 - 13. Používají se zde metody prosévání pro zrnitosti 250 až 5, mikroskopické pro zrnitost M 32 až M 5 a kombinované pro zrnitost 4 a 3.

Avšak pro kontrolu velikosti zrn v hotovém brusném kotouči není v ČSSR normou předepsána žádná zkouška, ačkoli právě zde by byla tato kontrola velmi důležitá s ohledem na dodržování požadované jakosti povrchu obrobků. Někteří autoři [5] doporučují způsoby mikroskopické, založené na tom, že se měří velikost zrn pod měřícím mikroskopem buď na neupraveném vzorku nebo na jeho metalografickém výbrusu. Jiný možný postup se nabízí v chemickém odleptání pojiva a takto získaná brusná zrna pak kontrolovat proséváním nebo mikroskopicky. Další možný postup pro kontrolu zrnitosti se nabízí ve zhotovování otisků zrn na bílý papír pomocí karbonového kopírovacího listu. Poměrně dobře propracovanou metodu otiskovou publikoval Nakayama [6]. Její popis bude uveden na jiném místě.

Kontrola tvrdosti brusného nástroje

Tvrdost - soudržnost - brousícího nástroje je odpor, který klade pojivo proti vylomení nebo uvolnění jednotlivých zrn z nástroje, pod vlivem vnějších sil. Je závislá na druhu a množství pojiva a způsobu výroby.

Nejvíce různých metod a zařízení je známo pro kontrolu tvrdosti brusného nástroje. Z důvodů rozdílnosti teoretické definice a praktické možnosti určování tvrdosti se pro stanovení tvrdosti používají vesměs metody nepřímé.

Příkladem tohoto přístupu je i návrh československé státní normy pro zkoušení tvrdosti brusných nástrojů číslo ČSN 224020. Tato norma má platit pro zkoušení brusných nástrojů z umělých korundů a karbidů křemíku pojených keramickým pojivem a umělou pryskyřicí o zrnitosti 63 a jemnější. Vychází z doporučení komise pro normalizaci při RVHP.

Uvádí dva metodické postupy podle toho, jaké má brusný nástroj rozměry a jakou zrnitost:

- 1) Metodu pískovací (známou též jako metodu Zeiss-Mackenzen) pro kotouče Al_2O_3 a SiC o minimální šířce 8 mm a s nejmenším průměrem rovinné plochy 35 mm. Zrnitost smí být 63 a jemnější a pojivo keramické nebo umělá přyskyřice.
- 2) Metodu vtlačované kuličky (někdy označovanou jako metoda Briro) pro nástroje ze stejných brusiv jako výše, které však z rozměrových důvodů nelze touto metodou zkoušet. Jejich tloušťka je větší než 6 mm. Je vhodná pro kotouče o zrnitosti 12 a jemnější.

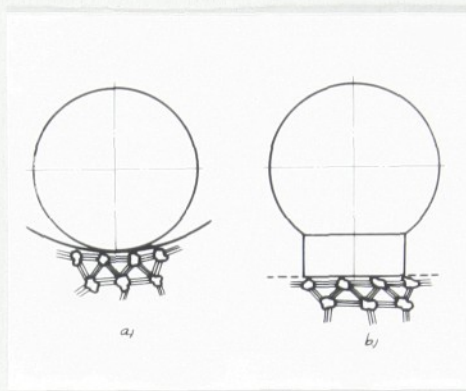
Pískovací metoda je založena na narušování povrchu brusných nástrojů proudem tryskajícího křemičitého písku z trysky o průměru 6 mm ze vzdálenosti 9 mm. Objem pracovní dávky je 28 cm^3 suchého písku o předepsané zrnitosti a je vyfoukáván tlakem 0,05 MPa pro měkčí a 0,15 MPa pro tvrdší nástroje. Měření se považuje za ukončené po úplném výstupu dávky písku z komory. Rozhodující pro stanovení tvrdosti je hloubka vzniklého důlku, která se měří s přesností $\pm 0,05 \text{ mm}$. Této hodnotě odpovídá daný stupeň tvrdosti podle Nortonovy stupnice označený písmeny velké abecedy, jež se vyhledá v tabulce, patřící k danému přístroji.

Pro provádění těchto měření jsou dostupné dva přístroje a to sovětské výroby, který nese označení TF 21 a je považován za základní (etalonový). Druhý je přístroj československý, výrobek n.p. Považské strojárny v Považské Bystrici s typovým označením TP 2.

Metoda zkoušení tvrdosti vtlačováním kuličky se realizuje pomocí přístroje typu ROCKWELL při předběžném zatížení 98,1 N a celkovém zatížení 588,4 N. Kulička má průměr 5 mm a její zatížení trvá 4 až 7 sekund. Kulička se po styku s měřeným povrchem zatlačuje plynule, bez rázů, předběžným zatížením. Po jeho dosažení se nastaví na ukazateli nulová poloha a zatížení se rovnoměrně zvyšuje tak, aby za výše uvedený čas dosáhlo celkové hodnoty. Potom se odlehčí na míru předběžného zatížení a provede se odečtení hloubky trvalého vtisku s přesností $\pm 0,01 \text{ mm}$.

Za hodnotu tvrdosti se považuje výsledek jednotlivého měření, vyjádřeného v jednotkách stupnice Rockwella, na které se převede hloubka vtisku. Stupeň tvrdosti podle Nortona se stanoví pomocí převodní tabulky.

Ve výzkumném ústavu valivých ložisek Brno [7] byla navržena úprava této metody tak, že místo kuličky se používá plošky. Z obr. 3 je zřejmé, že ploškou je při po-

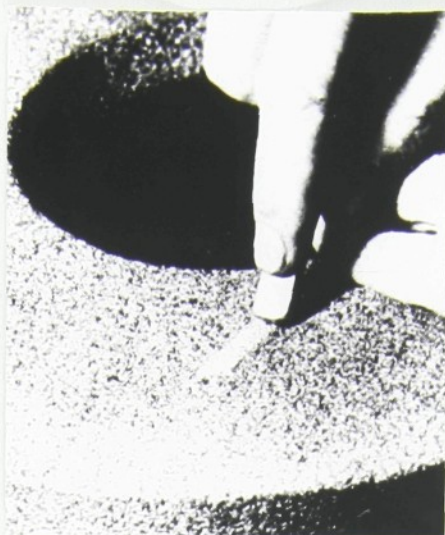


Obr. 3. Znázornění vtisku kuličky (a) a plošky (b)
čátečním styku zasažen buď větší počet zrn - měření je objektivnější, nebo lze tuto metodu použít pro hrubozrnější kotouč či otevřenější strukturu - rozšíření použitelnosti přístroje.

Obě metody, navržené jako norma i uvedená doplňková metoda VÚVL, mají jeden značný nedostatek a to je jejich lokálnost. I když se tomu čelí provedením nejméně tří měření na každém čele kotouče, přesto se tvrdost celého kotouče posuzuje podle tvrdosti pouze velmi malého procenta jeho povrchu.

Pro úplnost budou ve stručném přehledu uvedeny některé další známé metody.

Nejprve způsob nejjednodušší, který se provádí speciální ruční škrabkou, jak to názorně ukazuje obr. 4. Je to způsob zvláště subjektivní, závislý značně na praktických zkušenostech. U výrobců je však velmi rozšířený, protože rychlostí provedení předčí všechny ostatní metody. Je však rovněž lokální.



Obr. 4. Ruční zkoušení tvrdosti brusného kotouče

Pro brusné kotouče s gumovým pojivem zrnitosti 24 - 100 se používá metoda, jejíž princip je založen na vyvrtávání důlku speciálním plochým dvoubřitým vrtákem při stálém osovém zatížení 250 N pro měkčí a 350 N pro tvrdší kotouče. Směrodatným údajem je počet otočení vrtáku pro vyvrtání jamky o hloubce 2,5 mm.

Pro tytéž kotouče byla v SSSR zavedena jiná metoda, která spočívá v tom, že se do kotouče vtiskuje elektricky ohříváný kuželový hrot. O tvrdosti brusného kotouče rozhoduje hloubka vtisku. Touto metodou má být nahrazen výše uvedený způsob.

Další metoda používá vnikání dlátka o rozměrech 0,8 x 2 mm do povrchu brusného kotouče postupnými rázy. Na tomto principu byl zkonstruován přístroj ve VÚVL Brno [7] pro všechny kotouče s keramickou vazbou.

Výrobce brusek na závity, firma Lindner, zkonstruovala přístroj, jímž kontroluje všechny kotouče před použitím na jejich strojích. Díky tomu dosahuje tak vynikající přesnosti opracování i jakosti povrchu. Princip spočívá v drcení kotouče kladičkou a měří se hloubka vydrcezení a potřebná přitlačná síla. Z těchto údajů se usuzuje na tvrdost brusného kotouče,

Jiná známá firma na výrobu brusných nástrojů a brusek, fa Norton, zase používá akustické zkoušky.

Podle výšky tónu, který vydává rozechvěný kotouč, se stanovuje jeho tvrdost.

Kontrola slohu

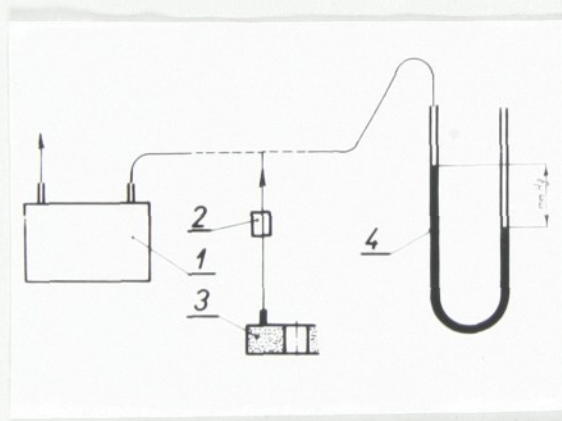
Podle definice přijaté ČSN 224024 je struktura brusných nástrojů určena poměrem objemu póru k celkovému objemu brusného tělesa. Proto byla pro zkoušení přijata normou tzv. zkouška objemové nasáklivosti, která přesně odpovídá definici. Struktura se stanoví ze vzorce

$$n = \frac{G - G_0}{V} \cdot 100 \quad / \% / \quad (1)$$

kde značí n objemovou nasáklivost v %
 G hmotnost nasáklého vzorku v kg
 G_0 hmotnost suchého vzorku v kg
 V objem vzorku v m³

Pro provedení této zkoušky je přesně předepsána procedura, která je značně zdlouhavá.

Z toho důvodu byla ve VÚVL Brno [7] vypracována metoda měření struktury na základě propustnosti vzduchu.



Obr. 5

Princip měření struktury stanovuje struktura kotouče. Metoda neklade nároky na čas, vlastní měření trvá jen několik vteřin a hlavně je nedestruktivní.

Ve VÚVL Brno ve spolupráci s VUT Brno bylo ve vývoji této metody pokračováno a byl zkontruován přístroj, který nese označení Strukturometr S4. Pracuje se systémem tří sond o průměru $\varnothing 4$, jimiž lze objektivně stanovit škálu struktury od zrnitosti 25 výše. Pro každou zrnitost je však třeba brusné kotouče hodnotit podle samostatné škály struktury. Důležitým zjištěním také je, že výsledky měření nejsou ovlivněny tloušťkou brusného nástroje,

Schema zařízení, jak je ukazuje obr. 5, sestává z olejové vývěvy /1/ pomocí níž je nasáván vzduch přes brusný kotouč /3/ a keramický filtr /2/ a z tlakoměrné trubice /4/ pro měření vzniklého podtlaku v mm rtuťového sloupce. Z hodnoty podtlaku se stanovuje struktura kotouče.

pokud je větší než 3 mm. Vzhledem k dobrým a s dosud normovaným způsobem - objemovou nasáklivostí - nesrovnatelným výsledkům se navrhuje tato metoda k přijetí za normu pro kontrolu slohu brusných nástrojů.

Pojivo

Jak již bylo poukázáno dříve, podílí se pojivo významnou měrou na vlastnostech brusného kotouče, zejména na jeho tvrdosti. Přesto však se pojivu, zejména jeho stavu v brusném kotouči, nevěnuje zvláštní pozornost. Ani normy dosud nestanovují způsob kontroly jakosti pojiva. Důvodem může být to, že jakost pojiva se zrcadlí ve tvrdosti brusného kotouče, jak vyplývá z její definice.

Přehled několika výše uvedených metod kontroly jednotlivých určujících veličin brusného kotouče svědčí o tom, že jsou vesměs statického charakteru a neurčují dostatečně, jak se brusný nástroj jako celek bude chovat při vlastním broušení. Proto se stále více autorů snaží vypracovat způsob, jímž by mohly být stanoveny funkční vlastnosti brusného kotouče.

4. Některé novější metody hodnocení brusných nástrojů

Práce výzkumného a vývojového charakteru v oblasti hodnocení brusných nástrojů rozděluje Říčka [8] do tří základních skupin:

- a/ Vývoj metod zjišťování funkčních nebo výsledných řezných vlastností brusných nástrojů v průběhu broušení
- b/ Výzkum a zdokonalení metod kontroly dílčích fyzikálně mechanických vlastností brusných nástrojů
- c/ výzkum vzájemné vazby mezi dílčími fyzikálně mechanickými a funkčními vlastnostmi brusných nástrojů.

Pokusíme se nyní blíže osvětlit některé novější práce, které byly v jednotlivých skupinách zpracovány.

Do skupiny metod, zjišťujících funkční vlastnosti brusného nástroje (ad a/), můžeme zařadit všechny práce, které se zabývají řeznými silami, výkonem broušení, řezivostí, poměrným obrusem, jakostí povrchu, tvrdostí ap.

Pro celkové posouzení brusného kotouče se stanovují tyto údaje:

$$\text{výkon broušení } Q = \frac{V_o}{t} \text{ /m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \text{ - množství} \quad (2)$$

odbroušeného materiálu za časovou jednotku

$$\text{měrný výkon broušení } q = \frac{Q}{P} \text{ /m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{W}^{-1} \quad (3)$$

- je dán poměrem výkonu broušení a příkonu elektromotoru pro pohon brusného vřetene

$$\text{poměrný obrus } m_o = \frac{V_o}{V_k} \quad (4)$$

vyjadřuje poměr objemu odbroušeného materiálu k objemu úbytku brusného nástroje a to jak opotřebením tak i následujícím orovnáváním.

trvanlivost $T \dots \dots \dots / \text{s} /$

je stanovena dobou, po níž nástroj pracuje mezi dvěma po sobě jdoucími orovnáními. Potřeba orovnat nástroj se stanoví podle podstatného zhoršení přesnosti a jakosti obrobku.

$$\text{životnost } Z = n_o \cdot T \dots \dots \dots / \text{s} / \quad (5)$$

je dána součinem počtu orovnání a trvanlivosti. Počet orovnání n_o udává celkovou sumu možných přeostržení do úplného využití brusného kotouče. K těmto provozním kritériím můžeme ještě přiřadit některé další, jako jsou např. jakost povrchu, přesnost rozměrů, teplota povrchové vrstvy. Tato vlastně charakterizují výsledek působení brusného nástroje na obrobek.

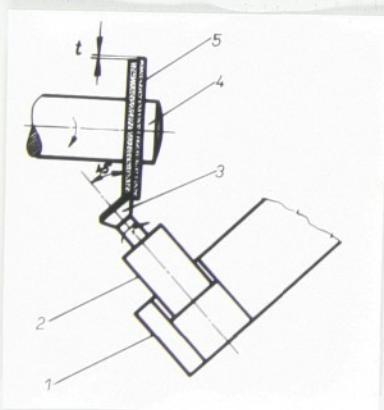
Významná metoda, která byla vyvinuta v úzké spolupráci mezi Production Engineering Laboratory při univerzitě v Michiganu a Macklin Company of Jackson, Michigan, je autory Colwellem, Lanem a Soderlundem [11] označována jako dynamická zkouška tvrdosti brusných kotoučů. Vycházejí z poznatku, že při přemístění brusného kotouče ze stroje na stroj se jeví tento kotouč jako tvrdší nebo měkčí v závislosti na tuhosti systému stroj - nástroj - obrobek.

S postupujícím opotřebením brusných kotoučů vznikají vyšší síly a větší třecí teplo. Tyto síly působí na brusné zrno a snaží se je vylomit z vazby, případně

rozdrtit, pokračuje-li jeho otupování a tím i narůstání řezné síly. Jsou-li ostatní podmínky shodné pak tedy za tvrdší prohlašujeme ten kotouč, který si otupené zrno déle podrží. Tuto okolnost je možno dále rozebírat, ale pro naše úvahy je toto konstatování postačující.

Tato funkční, či také efektivní tvrdost, která by zahrnovala výše uvedené faktory, by byla velmi dobrým ukazatelem pro praktické použití brusného nástroje. Z těchto teoretických základů, zde pouze stručně naznačených, byla odvozena praktická metoda, kterou je možno uvítat, neboť přináší velmi dobrou možnost charakterizovat, či ohodnotit brusný kotouč při jeho praktickém použití za skutečných podmínek práce na daném stroji. Všechny vlastnosti, včetně funkční tvrdosti, jsou zde charakterizovány jediným údajem, tak zvanou dynamickou tvrdostí.

Metoda spočívá v drcení povrchu brusného kotouče /5/ drtícím kuželem /1/ z manganové oceli. Kužel je o-



Obr. 6

Schema zařízení pro měření dynamické tvrdosti

točně uložen ve vřeteníku /2/ a spolu s ním v dynamometru /3/ tak, že osa kužele svírá s osou vřetena brusného kotouče /4/ úhel 45°. Celkové uspořádání ukazuje obr.6. Dynamometrem ve spojení s přímo píšícím oscillografem je změřena síla drcení při prvním přejetí F_1 a rovněž při přejetí zpět bez změny hloubky nastavení F_2 . Tímto druhým přejetím se vlastně postihuje tuhost systému stroj - nástroj. Výsledné dynamické tvr-

dostní číslo (bezrozměrné) je určeno poměrem průměrné síly při druhé fázi násobením 1000 pro odstranění desetinných čísel.

$$H_D = \frac{F_2}{F_1} \cdot 10^3 \quad (6)$$

Nejvyšší teoreticky dosažitelná tvrdost $H_D = 1000$ je možná pouze v případě, kdy $F_2 = F_1$. Tento případ by

mohl nastat pouze při kotouči tak tvrdém, že by vůbec nedošlo ke zmenšení průměru brusného kotouče odrcením při prvním přejetí a druhé by se dělo za stejné hloubky a tím také stejné drtící síly.

Největší předností, kterou tato zkouška má, je to, že ji lze provádět na každé brusce před pracovní operací. Např. při výměně spotřebovaného brusného kotouče si brusič může ověřit, má-li nový kotouč stejnou dynamickou tvrdost, tj. bude-li operace probíhat za stejných podmínek. Důležitou okolností je i to, že vlastní měření trvá pouhých 45 vteřin a dává okamžitě číselné výsledky. To má velký význam pro zavedení této metody do průmyslové praxe, zvláště pro značnou rozlišovací schopnost.

Velmi zajímavou a po všech stránkách novou metodou použitým principem je výzkum brusiva pomocí exoelektronů [12]. Emise exoelektronů, která je protikladem luminiscence na určitých pevných tělesech, může být vyvolána pomocí mechanického opracování těchto těles nebo jejich ozářením, či tepelnou aktivací apod. Kramer a Engelland provedli pokusy, které ukazují, že jde o metodu velmi citlivou^a při porovnání křivek pro různé druhy brusných materiálů se zjistilo, že obraz emise je podobný pro všechny brusné prostředky na bázi Al_2O_3 . Metoda byla aplikována na tři základní oblasti:

sledování procesu drcení a mletí brusiva
působení tvrdosti obráběného materiálu na vznik nových povrchů brusných zrn
rozlišování zrnitosti brusného kotouče.

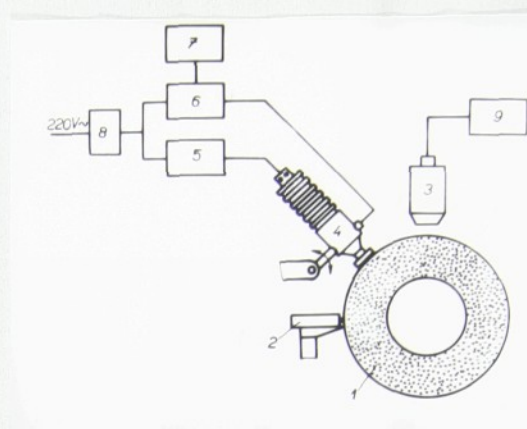
První z těchto oblastí má význam pro výrobce brusiva, který může pomocí této metody stanovovat velikost zrn v průběhu drtícího procesu. Blíže nebudeme tento postup rozvádět.

Rozlišování zrnitosti a vliv tvrdosti broušeného materiálu je prováděno na shodném zařízení, které znázorňuje obr. 7. Počítač impulsů /4/ je upevněn na brusném vřeteníku otočně tak, aby mohl být v době, kdy

brusný kotouč /1/ pracuje, od něj vzdálen. Je spojen kabelem se zesilovačem /6/ a elektrickým čítačem /7/, jímž jsou impulsy registrovány. Přístroje jsou napájeny proudem ze sítě vedeným přes stabilizátor napětí /8/.

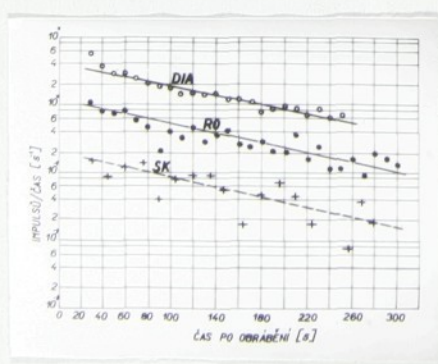
Zkouška vlivu tvrdosti obráběného materiálu byla provedena za sucha broušením nástrojové oceli rychlořezné, destičky ze slinutého karbidu a o-

rovnáním kotouče diamantem /2/. Po každé z těchto operací následuje měření počtu impulsů a jejich útlum s časem po obrábění. Emise exoelektronů je sledována na stojícím brusném kotouči po sklopení počítače impulsů. Největší počet impulsů za vteřinu vykazuje brusný kotouč po orovnání diamantem, nejméně po broušení rychlořezné oceli a střední hodnoty po broušení slinutého karbidu. Kramer tuto okolnost blíže



Obr. 7

Schema zařízení pro měření emise exoelektronů z povrchu brusného kotouče



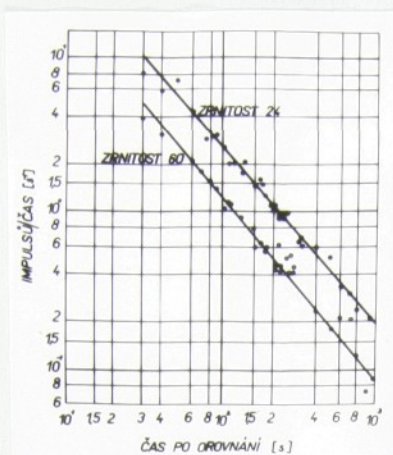
Obr. 8

Závislost počtu impulsů za vteřinu na době po obrábění

různé zrnitosti a stejné tvrdosti. Kotouče byly orovnané diamantem a pak následovalo měření emise. Bylo

nerozpracovává, ale zdá se být zřejmé, že emise je větší tehdy, vytvoří-li se použitou operací větší množství nových ploch na povrchu brusného kotouče schopných emise exoelektronů. Průběh útlumů emise ukazuje diagram na obr. 8.

K podobnému závěru vedou i výsledky dalšího měření, provedeného na kotoučích o



Obr.9
Závislost počtu impulsů
na době po orovnání
pro různé zrnitosti

zjištěno, že kotouče různé zrnitosti dávají dvě různé křivky útlumu emise se stejnými exponenty, jak patrně z obr. 9. Útlum probíhá podle vztahu

$$N = k \cdot t^{-1,13} \dots / s^{-1} / \quad (7)$$

k - konstanta útlumu

t - čas /s/

$k = 474 \dots$ pro zrnitost 24

$k = 215 \dots$ pro zrnitost 60

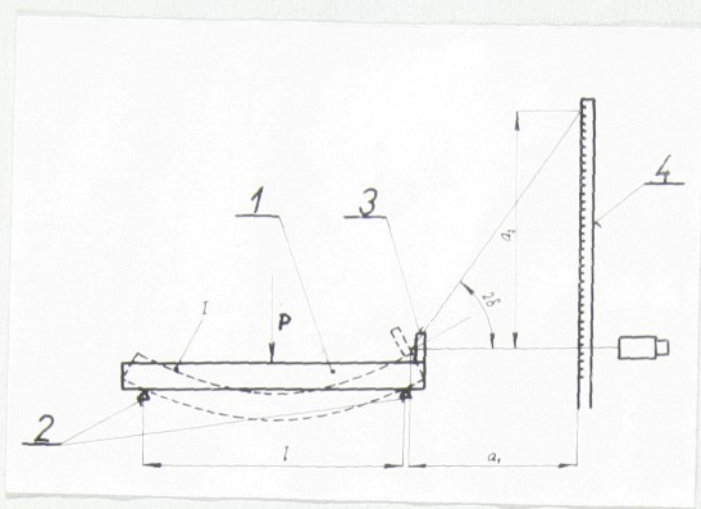
Bližší úvahy o těchto výsledcích Kramer neprovedl, protože přesahují rámec uvedené práce. Je však z uvedených poznámek zřejmé, že se tím dostává do praxe nová metoda, která by mohla v průzkumu vlastností brusných nástrojů a také v oblasti výzkumu opotřebení těchto nástrojů přinést nové poznatky.

To bylo několik vybraných metod, které lze použít pro stanovení funkčních či výsledných řezných schopností. Metody, které se bezprostředně zabývají řezivostí brusných kotoučů, budou uvedeny v kapitole věnované této problematice.

Pro zdokonalení metod kontroly dílčích fyzikálně-mechanických vlastností brusných nástrojů snaží se někteří autoři použít metod známých pro stanovení těchto vlastností u konstrukčních materiálů. Jednou z těchto metod je stanovení modulu pružnosti brusného nástroje, z něhož lze stanovit tvrdost brusného nástroje. Některé práce na tomto poli byly vypracovány pro lapovací kameny, kde je celá záležitost poměrně dobře matematicky zvládnutelná.

Pursche [13] uvádí celkem tři metody pro stanovení modulu pružnosti pro lapovací kameny. První z nich můžeme označit jako zkoušku průhybovou, jejíž

uspořádání je patrné z obr. 10. Zkoušený lapovací



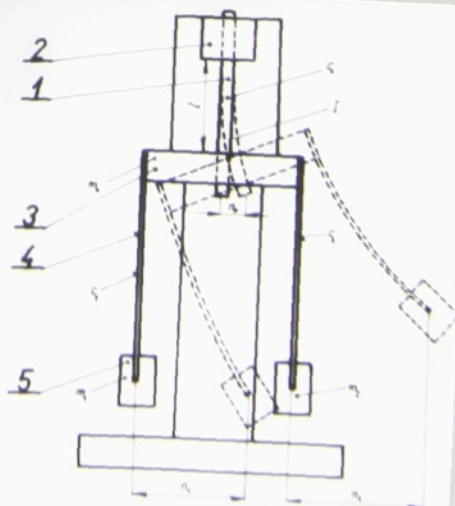
obr. 10
Schema průhybové metody

kámen /1/ je uložen na dvou kalených břitech /2/ (vzdálenost o $l_0 = 55,32 \text{ mm}$). Uprostřed se zatíží přes další břit silou $P = 100 \text{ (N)}$. Průhyb je měřen zrcadlovým systémem. Zrcadlo /3/ se přilepí na kámen a umístí do vzdálenosti a_1 od tyčového měřítka /4/. Na měřítku odečteme výchylku paprsku a_2 z počáteční polohy. Ze vztahu pro velikost průhybu a průhybového úhlu 2 lze vypočítat modul pružnosti.

Cejchování přístroje se provádí pomocí ocelové tyče o známém modulu pružnosti.

Další způsob vyvinutý původně pro stanovení modulu pružnosti kovových materiálů používá dvojitého kyvadla. Autory této metody jsou Le Rolland a Sorin [14]. Zkoušený lapovací kámen /1/ se upne do držáku /2/ za jeden konec a na druhou stranu se upevní příčník /3/, opatřený dvěma kyvadly. Tato kyvadla sestávají z listových pružin /4/ a nasazenými závažími /5/. Uspořádání je zřejmé z obr. 11.

obr. 11
Schema dvojkyvadlové metody



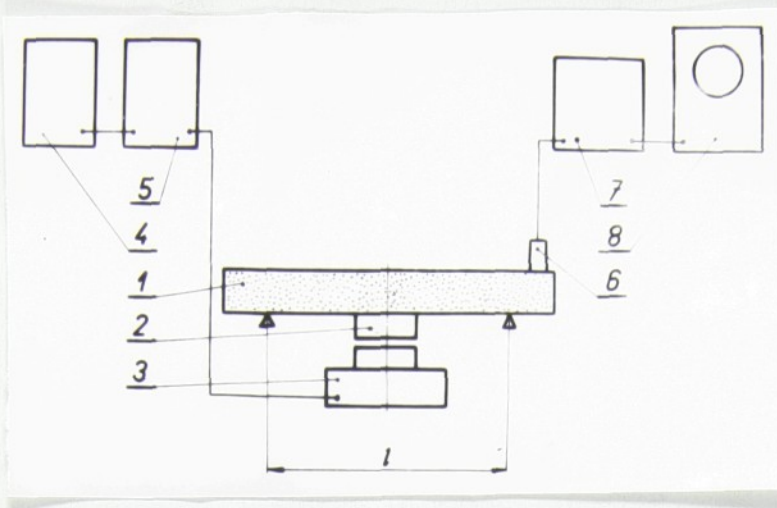
Vychýlíme-li jedno kyvadlo z rovnovážné polohy, uveďte se samočinně do pohybu i kyvadlo druhé, jeho amplituda vzrůstá, zatím co se amplituda prvního kyvadla zmenšuje, až se konečně zastaví. V témže okamžiku dosáhne amplituda druhého kyvadla maximální hodnoty. Děj se opakuje cyklicky, avšak se ztrátami energie, vyvolanými jednak odporem vzduchu a vnitřním třením v materiálu tyče a závěsu kyvadla, jednak absorpcí energie ve zkoušeném elementu střídavými pružnými deformacemi, takže se cykly po určité době stávají neznatelnými. Obě kyvadla působí střídavě na zkoušený element stejnými silami. Vznikající deformace jsou velmi malé a odpovídají Hookeovu zákonu.

Časový interval mezi dvěma následujícími klidovými stavy téhož kyvadla je podle Rollandových měření v přibližně lineárním vztahu k modulu pružnosti. Modul pružnosti lze touto metodou zjistit s vyšší přesností než zrcátkovými průtahoměry.

Přenos energie z jednoho kyvadla na druhé je podmíněn pružnými deformacemi zkoušeného elementu, na jehož tuhosti závisí velikost periody cyklu. Základní výhoda této metody je v tom, že není třeba měřit napětí ani deformace, ale pouze čas. Naproti tomu však, protože jde o nepřímé měření, závisí jeho přesnost na zprostředkujících podmínkách, jejichž hodnota může být funkcí mnoha činitelů.

Třetí metoda využívá pro stanovení modulu pružnosti ohybového chvění, které se uměle vyvolá v měřeném objektu. Blokové schéma uspořádání ukazuje obr. 12. Lapovaný kámen /1/ je uložen na dvou podpěrách, mezi nimiž je na něj nalepena ocelová destička /2/. Proti této destičce je postavena rozkmitávací elektromagnetická souprava /3,4,5/, která kámen rozkmitá. Kmity jsou měřeny krystalovým tónovým snímačem /6,7/ a pomocí osciloskopu /8/ se stanovuje rezonanční frekvence. Ta je základem pro stanovení modulu pružnosti.

Cejchování se provádí opět pomocí ocelové tyče.

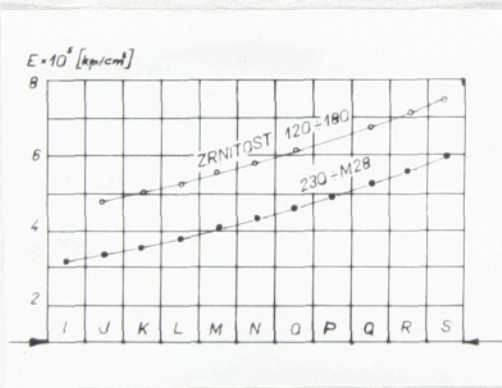


Obr.12

Schema metody ohybového chvění

Jak ukazují srovnávací měření, které Pursche provedl, poskytují tyto metody podstatně větší rozlišení, než metody vtiskováním kuličky.

Podobná měření provedli Raport a Čofnus [18], kteří použili pro stanovení modulu pružnosti měření frekvence příčných vlastních kmitů a na velkém množství lapovacích kamenů provádějí srovnávací měření s Rockwellovou metodou.



obr.13

Závislost tvrdosti a modulu pružnosti lapovacích kamenů

Závislost frekvence, tvrdosti lapovacích kamenů není jednoznačná, ale závislá na jejich měrné hmotě, délce a šířce. Ze srovnávacích měření však plyne jednoznačně i lineární závislost mezi frekvencí a tím modulem pružnosti a tvrdosti podle Rockwella, jak to ukazuje obr. 13. Tato linearita umožňuje provádět kontrolu lapovacích kamenů pružnost-

ními charakteristikami, které dávají podstatně větší rozlišovací schopnost, než dřívější metody, zejména Rockwellova a Mackenzenova.

Uvedené metody jsou schopné rozlišit kameny od různých výrobců přesto, že jsou stejného označení, stejné tvrdosti podle Rockwella. Ukazuje se, že určování tvrdosti brusných nástrojů pomocí pružnostních charak-

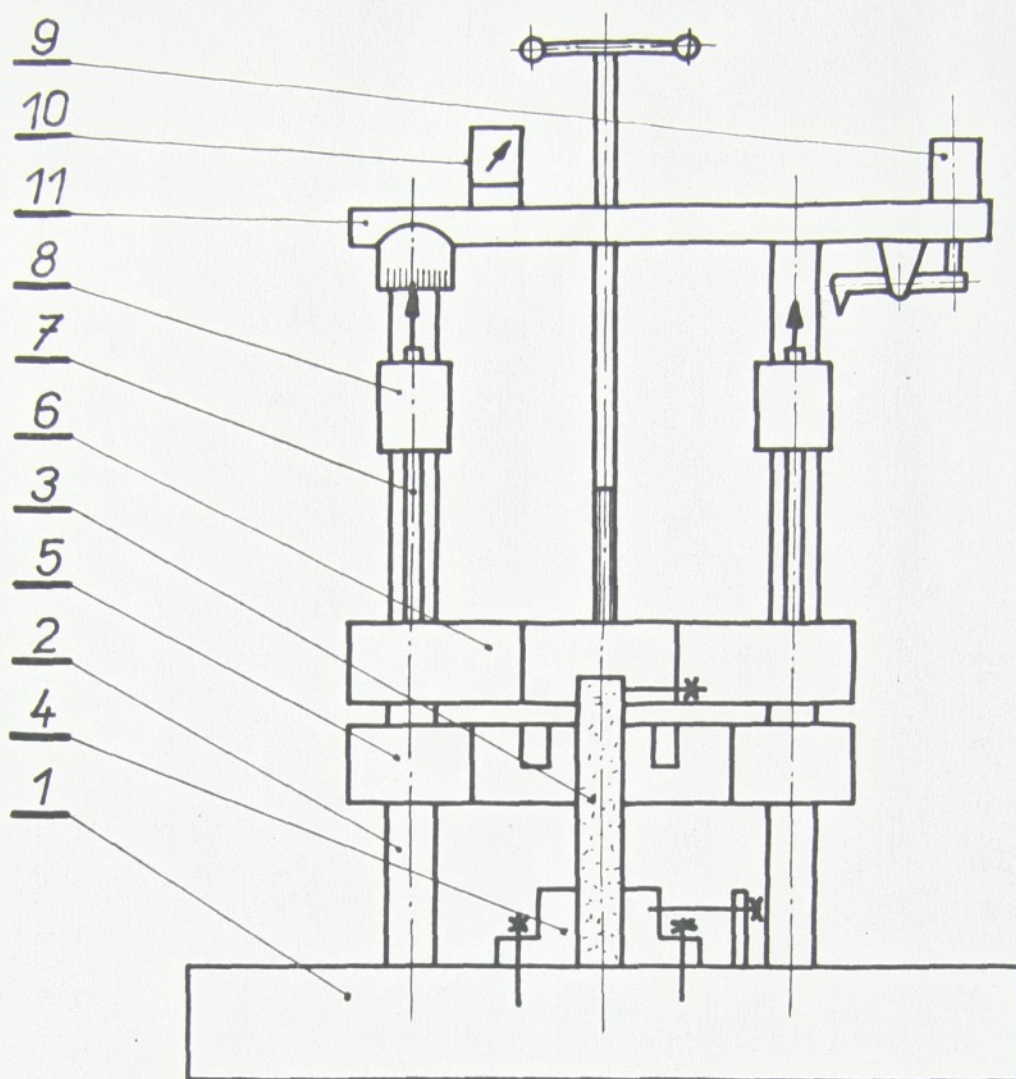
teristik je mnohem přesnější než podle tvrdosti, kterou stanovíme Rockwellovou metodou. Podstatou těchto rozdílných výsledků je to, že Rockwellovou i Mackenzellovou metodou zjistíme tvrdost pouze v měřeném místě (lokální tvrdost) a z ní usuzujeme, že takový je celý nástroj. Z funkčního hlediska je tato metoda nedostatečná. Nová metoda posuzuje nástroj jako celek a poskytuje lepší roztrídění podle tvrdosti. Donedávna byla omezena pouze na lapovací kameny, neboť zvládnutí tohoto úkolu pro brusné kotouče je velmi náročné jak po stránce matematické, tak i experimentální. Přesto se autor se spolupracovníky pokusil tuto úlohu řešit. K řešení byla použita metoda, jež umožňuje stanovit modul pružnosti porovnávacím způsobem tak, že se použije etalonu o stejném tvaru a rozměrech a známém modulu pružnosti. Měřením času mezi dvěma maximálními výchylkami jednoho kyvadla pro etalon a vzorek dostaneme hodnoty, které dosadíme do vztahu:

$$E = \frac{T_s}{T_{so}} \cdot E_o \quad (8)$$

Zde značí: E modul pružnosti vzorku /Pa/
 E_o modul pružnosti ocelového etalonu /Pa/
 T_s doba mezi zázněji vzorku /s/
 T_{so} doba mezi zázněji etalonu /s/

Po provedení zkoušek na provizorním zařízení [16] byl zkonstruován a zhotoven přístroj [17] v provedení použitelném pro kotouče ploché ČSN 224510 o rozměrech 250 x 20 x 76 mm. Po určitých úpravách lze měřit i kotouče jiných rozměrů. Pro kotouče jiných tvarů je nutné vyrobit etalon příslušného tvaru.

Na obr. 14 je znázorněno schema přístroje. Se- stává ze základové desky 1 a dvou sloupků 2 spojených v hořejší části nosníkem 11. Pro zjednodušení a urychlení nasazení příčnicku 6 s pruty 7 a závažím 8 je zde uloženo zdvihací zařízení 5 s pohybovým šroubem. Brus- ný kotouč 3 je upevněn do svěráku 4 a na něj se upevní



Obr. 14

Přístroj pro měření modulu pružnosti

příčnick 6. Pravé kyvadlo se vychýlí z neutrální polohy a zachytí západkou spouštěcího elektromagnetického zařízení 9. Čas mezi dvěma zázněji se měří stopkami 10.

Na uvedeném zařízení byly provedeny zkoušky kotoučů výrobcem shodně označených a zkontrolovaných metodou Zeiss-Mackensen. Z výsledků měření se ukázalo, že rozptyl měření metodou Zeiss-Mackensen je asi $\pm 10\%$, kdežto u uvedeného způsobu pouze $\pm 2\%$. Výhoda dále spočívá v jednoduchém zařízení, snadném cejchování a měření. To sestává pouze ze stanovení doby záznějů pomocí stopek. Nevýhodou je značná závislost na rozměrech, hmotnosti a tvaru měřeného tělesa.

V tomto oboru byly v nedávné době vyvinuty dva přístroje, které měření modulu pružnosti značně urychlují. Oba využívají pro měření rozechvění kotouče, vznikající po úderu na kotouč ve vhodném místě.

Belgická firma J.W.Lemmens-Elektronika uvádí na trh přístroj GRINDO-SONIC MK 3, který vyvolané chvění snímá dotykovým piezoelektrickým snímačem. Frekvence kmitů se číselně zobrazí na digitronových ukazatelích přístroje. Z tohoto údaje, z hmotnosti a rozměrů brusného kotouče se podle vztahu (9) vypočítá modul pružnosti:

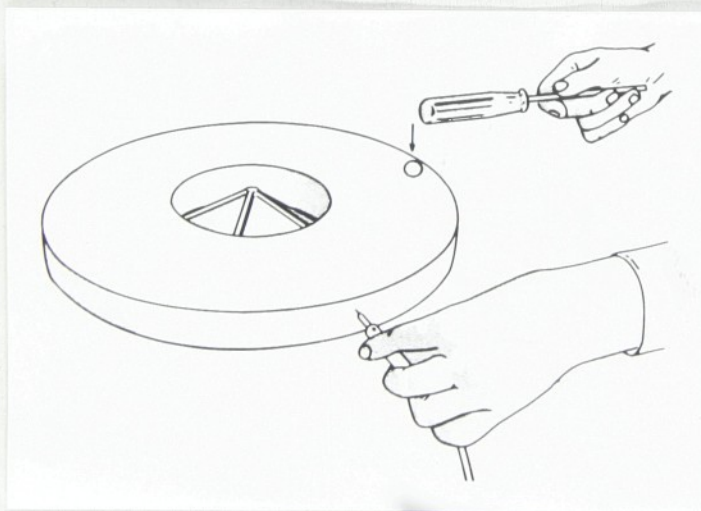
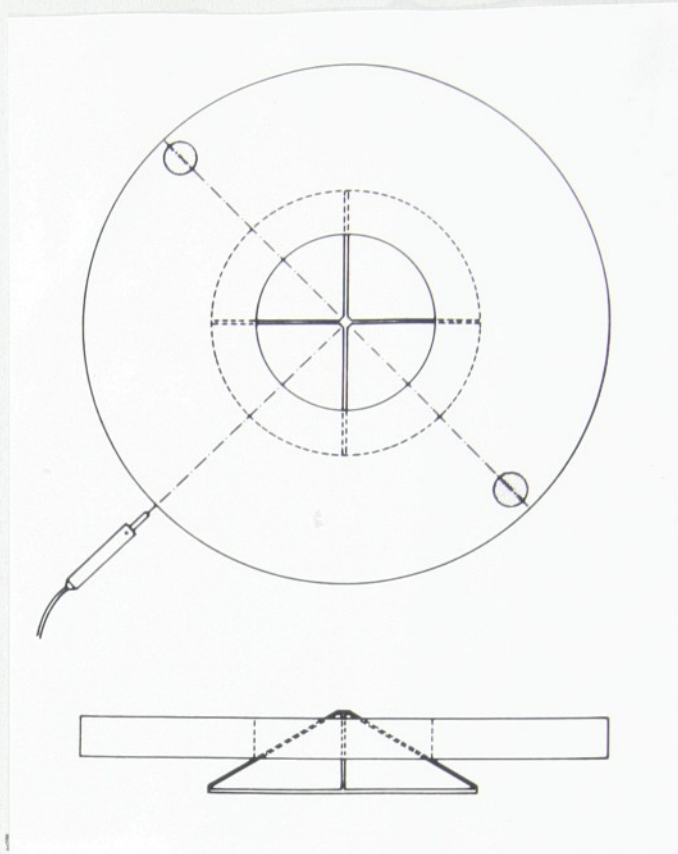
$$E = \frac{m \cdot M}{B \cdot R^2} \quad /Pa/ \quad (9)$$

kde: m celková hmotnost /kg/
 M tvarový součinitel daný poměry D/B , d/D
 B šířka kotouče /m/
 R frekvence chvění brusného kotouče
 změřená přístrojem GRINDO-SONIC /s⁻¹/

Výpočet se provádí na programovatelné kapesní počítači Hewlet-Packard HP 65, kterou firma J.W.Lemmens-Elektronika dodává se svým přístrojem a s pěti magnetickými pásky s programem pro výpočet modulu pružnosti jak pro brusné kotouče, tak i pro lapovací kameny. Pro brusné kotouče ploché jsou vstupními údaji: průměr brusného kotouče, šířka kotouče, průměr otvoru, váha brusného kotouče a hodnota frekvence odečtená na přístroji GRINDO-SONIC MK 3.

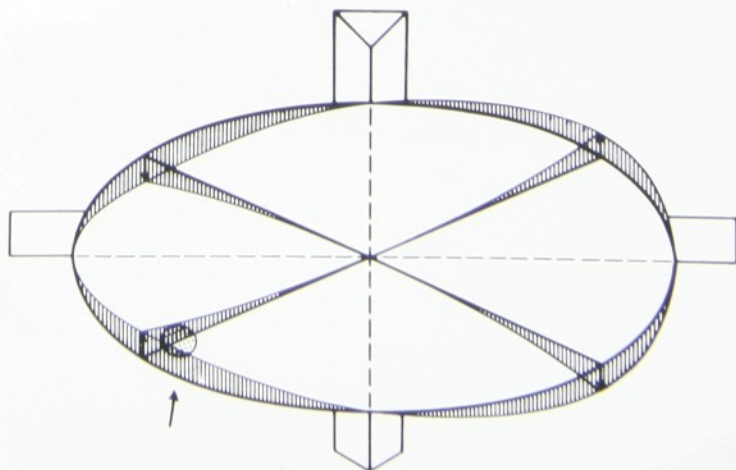
Naměření této hodnoty se realizuje způsobem znázorněným na obr.15. Brusný kotouč se svým otvorem uloží na zvláštní kužel z umělé hmoty, jehož plášť je rozdělen čtyřmi žebry na stejné segmenty. V ose jednoho ze segmentů se realizuje úder, jímž se těleso rozkmitá a v ose sousedního segmentu se přiloží snímač, připojený k přístroji. Praktické provedení je zřejmé z obr.16. Důležité je při měření držet snímač tak, aby vyznačený symbol (červenou tečkou) směřoval vzhůru. Pak má snímač maximální citlivost.

obr. 15
Měření přístrojem GRINDO-
-SONIC MK 3



obr. 16
Měření dotykovým snímačem

obr. 17
Model kmitání
brusného kotouče



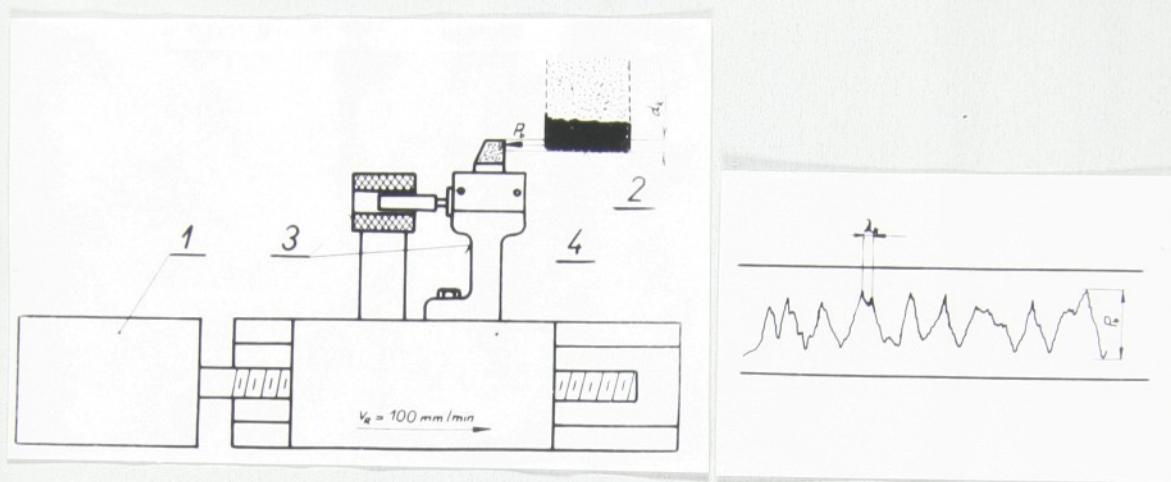
Model kmitání znázorňuje následující obr. 17, kde silnou šipkou je vyznačeno místo úderu, malými šipkami smysl a velikost kmitání v jednotlivých segmentech.

Firma dodává ke zjištěným hodnotám E-modulu ještě tabulky, podle nichž se převádí tento údaj na tzv. Nortonovu tvrdost, označenou písmeny velké abecedy. Zdůvodnění bylo uvedeno dříve.

Na podobném principu je založen i maďarský přístroj PERIO-TIMER vyvinutý a vyráběný Výzkumným ústavem technologie strojírenské výroby v Budapešti. Na rozdíl od předchozího přístroje se zde nepracuje s dotykovým snímačem. Vznikající kmitání tělesa se projevuje zvukově a je snímáno speciálním mikrofonom. Zpracování naměřených hodnot vlastních frekvencí se dá provádět stejným způsobem jako v předchozím případě, nebo je možné použít k přístroji dodávané nomogramy a tabulky.

Mnozí autoři navrhnou přístroje, které mají co nejlépe realizovat ustanovení, resp. definici tvrdosti, tj. měřit síly, jež jsou nutné pro překonání upevnění zrn v kotouči. Jednou z prvních prací v tomto oboru uveřejnil Peklenik [18]. Metoda, jak ji schematicky znázorňuje obr. 18, spočívá ve změření sil při příčném rytí do povrchu brusného kotouče /2/ v hloubce, která je závislá na středním průměru brusných zrn. Například pro kotouče zrnitosti 60 je hloubka vrypu $d_k = 275$ μ m. Dynamometr vybavený induktivním snímačem /3/ je uložen ve zvláštní posuvové jednotce /4/ poháněné stálou rychlostí elektromotorem /1/. Tvrdost se vyjadřuje střední hodnotou síly P_b . Křivka, zapsaná snímačem, dovoluje stanovit také vzdálenost mezi jednotlivými zrny. Považuje se za ni rozteč dvou nejbližších vrcholů výkmitu síly, které vznikají při přejíždění přes zrno. Je možno tedy usuzovat i na strukturu brusného kotouče.

Na tomto principu byl v MLR ve Výzkumném ústavu technologie strojírenské výroby v Budapešti vyvinut přístroj, který sestává ze tří částí: vlastní rycí jednotky s induktivním snímačem, zesilovací a měřicí jednotky



Obr. 18. Schema měření tvrdosti podle Peklenika

a registrační jednotky. Je vhodný pro brusné kotouče průměru 100 až 600 mm z Al_2O_3 nebo SiC , tvrdosti H - P, vázané keramickým pojivem. Jeho použití může být přínosem pro hodnocení tvrdosti, protože poměrně přesně realizuje její definici.

Jiným příkladem přístroje, jež realizuje tuto myšlenku, je kyvadlové zařízení autorů Micheletti a Russo [19] pro určení tzv. rázové (dynamické) tvrdosti. Tato se stanovuje z velikosti síly, která vzniká v okamžiku pronikání diamantového hrotu povrchem brusného nástroje. Diamantový hrot je upevněn do kyvadla, jehož rameno je opatřeno tensometrickými snímači, jimiž je tato síla měřena. Hloubka vrypu se pohybuje v rozmezí od 0,1 - 0,9 mm podle zrnitosti, šířka hrotu 1,5 mm a vyvolaná síla dosahuje hodnot 50 až 700 N. Rychlost kladiva v okamžiku úderu do kotouče je $0,6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Z výsledku měření, které provedli na řadě kotoučů vyplývá, že rozptyl měření se pohybuje od 2 do 4 %. Uvedený způsob má

své přednosti v tom, že zkoušením není brusný nástroj poškozen, měření je velmi rychlé, s vysokou přesností a dává výsledky, které je opravňují k použití při rozlišování brusných kotoučů. Má však jednu značnou nevýhodu a to je její lokálnost.

V tomto přehledu se autor pokusil soustředit některé poznatky o způsobech hodnocení brusných nástrojů a připojit k nim něco hodnotících poznámek. Záměrně se vyhýbal uvádění metod, které posuzují pracovní či funkční schopnosti brusného nástroje, kterým bude věnována pozornost v další části práce.

III. Řezivost při broušení

Z rozdělení oblastí výzkumu metod hodnocení brusných nástrojů vyplývá, že mezi způsoby, posuzující jeho funkční vlastnosti, patří mimo jiné také **řezivost**. S ohledem na zaměření této práce zůstane tato problematika její základní částí. Nebudou proto uvedeny některé další metody, hodnotící funkční vlastnosti.

Nyní bude poukázáno na vývoj pojmu řezivost obecně a pro brusné kotouče zvláště, na některé výsledky prací jiných autorů a na návrh vlastní metody hodnocení.

1. Filozofie pojmu řezivost

Řezivost, aniž zatím bude definována, vyvolává okamžitě v mysli člověka představu jistého ostří, které má schopnost řezat, oddělovat, obrábět a těmito pochody vytvářet nový tvar. Současně však nastupuje další představa, že uvedené ostří si musí tuto schopnost zachovat po určitou, zpravidla delší dobu. Dále pak bude uživatele zajímat, jakou energii musí vynaložit při použití uvedeného nástroje pro realizaci procesu řezání. Podle úrovně procesu mohou přistupovat ještě další hlediska, jako jsou např. přesnost, drsnost povrchu, vzniklé teploty, charakter a tvar odděleného materiálu (třísky). Takový komplexní pohled umožňuje pak posoudit ekonomickou stránku nástroje a jeho použití.

Shrnutím výše uvedených představ se vytvoří nový pojem obecného charakteru - **ř e z i v o s t**. Ten se nemusí týkat jen problémů obrábění, ale může být aplikován i do oblasti denního života.

Je zřejmé, že jde o pojem hodně starý, ale většinou nikdy exaktně formulovaný, patřící do kategorie dalších podobných technologických pojmů, jako jsou např. obrobitelnost, slévatelnost, kalitelnost, svařitelnost apod. Teprve moderní doba se snaží tento pojem dotvořit, formálně zafixovat, tj. definovat a potom také vhodně využít.

Zpravidla jsou však tyto pojmy definovány velmi obecnými definicemi, které vymezují jen základní charakter a postavení pojmu. To má nesporně výhodu v tom, že s každým novým objevem, novou precizací, není nutno definici měnit. Jen je zkoumáno,

zda nová metoda definici vyhovuje. Nevýhoda pak je to, že každá přílišná obecnost je vždy na úkor exaktnosti. Dává to pak možnost vzniknout různým výkladům a metodám často velmi odlišné úrovně. To však jen do doby, než se určitá metoda stane mezinárodně uznávanou a tedy normovanou.

2. Pojem řezivost v obrábění

V procesu obrábění je řezný nástroj nadán schopností oddělovat z obrobku určitou vrstvu materiálu v podobě třísky a dát takto vzniklé součásti novou kvalitu. Tento úběr probíhá zpravidla za ustálených podmínek a při splnění kvalitativních, kvantitativních, energetických a ekonomických parametrů. Požadované parametry lze dosáhnout pouze tehdy, když nástroj, kterým se proces realizuje, má patřičné vlastnosti, např. tvrdost, pevnost, vhodný tvar apod. Proces oddělování třísky je nutně spojen se vznikem průvodních jevů, jejichž účinkům nástroj podléhá. To se navenek projeví změnou jeho tvaru, změnou původních vlastností aj., tedy opotřebením.

Na základě těchto skutečností lze potom definovat řezivost jako schopnost nástroje obrábět materiál při dodržení kvalitativních, kvantitativních, energetických a ekonomických parametrů.

Pro nástroje s definovaným břitem, zejména pro jednobřité nástroje, lze uvést tuto definici [20] :

Řezivost nástrojového materiálu je schopnost udržet za podmínek obráběcího pochodu původní tvar v určitých mezích po delší či kratší dobu.

Zde se řezivost posuzuje podle doby, po níž nástroj uspokojivě pracuje. Touto dobou je trvanlivost, která se tak stává mírou řezivosti.

Poněkud obecnější definice byla formulována takto [21] :

Souhrn vlastností materiálu, které vyjadřují jeho řezné schopnosti, nazýváme také řezivostí.

Pro uvedený typ nástrojů byly již vytvořeny mezinárodní i národní normy pro určování jejich řezivosti. Příkladem je návrh československé normy řezivosti pro soustružnické nože

vypracovaný VŠST v Liberci [22]. Zde se např. uvádí tato definice:

Řezivostí rozumíme zpravidla souhrn vlastností řezného materiálu, které ovlivňují velikost hospodárného úběru.

Dále se zde uvádějí doplňující poznatky, že zpravidla nelze pro daný nástrojový materiál stanovit absolutní hodnotu řezivosti, protože nástroje různého provedení z téhož nástrojového materiálu, pracující za různých řezných podmínkách mají rozdílnou řezivost. Základní vlastnosti materiálu určující jeho řezivost jsou tvrdost, houževnatost a jejich závislost na teplotě, a dále tepelná vodivost a chemická aktivita vůči materiálu obrobku. Jednotné a obecné platné kritérium pro určení řezivosti dosud neexistuje. Smluvně je stupeň řezivosti charakterizován konstantami C_T a exponentem m z Taylorova vztahu a řeznou rychlostí v_T , která odpovídá smluvní trvanlivosti T . Protože se v současné době ve strojírenské praxi pohybuje optimální trvanlivost T_{opt} u slinutých karbidů v rozmezí 5 až 20 min, navrhuje se volit smluvní trvanlivost $T = 15$ min, t.j. v_{15} . Relativní řezivost je pak určena koeficientem řezivosti:

$$k = \frac{v_{15}}{v_{15E}} \quad (10)$$

kde v_{15} řezná rychlost dosažená zkoušeným nástrojem

v_{15E} ... řezná rychlost dosažená etalonovým nástrojem

Stanovit tento koeficient řezivosti co nejpřesněji vyžaduje provedení dlouhodobých zkoušek trvanlivosti při dodržení stejných podmínek obrábění pro zkoušený i etalonový materiál. Mají-li být srovnatelné výsledky, jež byly provedeny v různých laboratořích, musí být realizovány na stejném zařízení a etalonový nástrojový materiál musí být dodán bankou těchto materiálů, vytvořenou nejlépe u jejich výrobce.

3. Řezivost brusných kotoučů

Výše uvedené definice a názory na řezivost u nástrojů s definovaným břitem ukazují, že tato problematika má je-

ště i v této oblasti mnohá úskalí a všechny otázky s ní spojené nelze považovat ani v případě vytvoření normy za zcela vyřešené.

Z tohoto pohledu je mnohem složitější vytvořit definici, či lépe najít metodu, odpovídající obecné představě rezivosti a současně obsahující všechny zvláštnosti procesu broušení, procesu, který se realizuje velkým množstvím v podstatě nedefinovaných břitů. Jde tedy o proces nahodilý, podléhající zákonům velkých čísel. [23].

Protože v zásadě zůstává broušení procesem spojeným s odbíráním třísky, je možné vztáhnout vhodným způsobem na hodnocení rezivosti brusných kotoučů vše, co bylo řečeno či použito pro ostatní nástroje. Vyjdeme-li z definice rezivosti, pak se naskytá možnost použití ukazatelů:

Kvalitativních - R_a , R_z , přesnost rozměrů, stav povrchové vrstvy, zbytková povrchová napětí,

kvantitativních - Q , q , V_k , V_o , m

energetických - F_z , F_y , P , e , p ,

ekonomických - T , Z , počet kusů za časovou jednotku, počet kusů na jedno orovnění, náklady na časovou jednotku broušení.

Většina z uvedených ukazatelů může být zařazena mezi provozní kontrolní metody, jež mají určit stupeň závislosti brusných kotoučů na ustanovených ukazatelích kvality jejich výroby.

Laboratorní výzkum řezných vlastností brusných kotoučů, který je zaměřen na nejefektivnější použití těchto nástrojů a na optimalizaci řezných podmínek broušení, vyúsťuje zpravidla v uměle vytvořená kritéria rezivosti, vede ke vzniku tzv. smluvních jednotek.

V oboru technických věd je tento postup častý a lze říci, že obvykle významně poslouží k praktickému hodnocení sledovaného jevu. Nejvýstižnějším příkladem jsou metody měření tvrdosti podle Brinella a Rockwella. Jde o technické metody, které s ohledem na poznatky fyziky kovů, mají jen určitý vztažený význam. Avšak v provozní praxi i při experimentálních výzkumech se široce a úspěšně používají.

4. Metody a kritéria rezivosti brusných kotoučů

V odborné literatuře o broušení je problematika rezivo-

sti brusných nástrojů zastoupena jen velmi omezeně a často je zahrnuta mezi další údaje a veličiny. Autor proto vybral jen některé, dle jeho názoru nejzávažnější práce a uvádí z nich podstatné informace, úzce zaměřené k řezivosti.

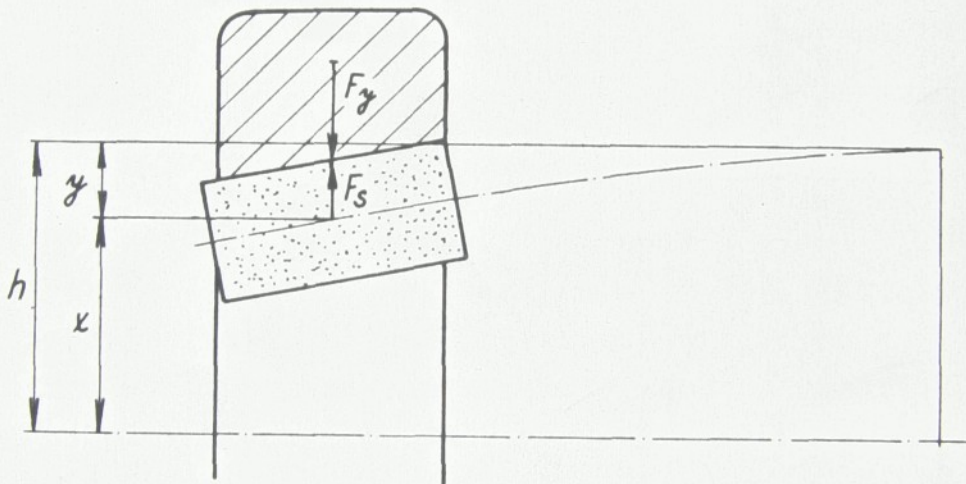
K zajímavému kritériu řezivosti brusných kotoučů dospěl Majkus [24] pro případ vnitřního válcového broušení. Vyšel z představy, že relativní dráha brusného kotouče vzhledem k obrobku je vždy menší než nastavená tloušťka odebírané vrstvy. Rozdíl se rovná průhybu brusného věřetena (obr. 19).

$$x = h - y \quad (11)$$

kde x změna rozměru obrobku za čas t

h tloušťka odebírané vrstvy - přísu

y průhyb



Obr. 19 Průhyb brusného věřetena

Vztah mezi rozměrem obrobku a základními reznými podmínkami je možno popsat diferenciální rovnicí

$$\frac{dx}{dt} + cK (x - v_p \cdot t) = 0 \quad (12)$$

Její řešení při použití okrajové podmínky pro určení integrační konstanty, tj. když $t = 0$, potom $x = 0$, má tvar

$$x = v_p \cdot t - \frac{v_p}{cK} \left(1 - \frac{1}{e^{cKt}} \right) \quad (13)$$

kde v_p rychlost přísu

t čas průběhu broušení

c tuhost funkčních částí brusky

K veličina, charakterizující řezivost brusného kotouče.

Platí dále

$$h = v_p \cdot t \quad (14)$$

$$y = \frac{v_p}{cK} \left(1 - \frac{1}{e^{cKt}} \right) \quad (15)$$

Limitujeme-li výraz (15) pro nekonečně dlouhou dobu broušení, pak bude

$$\lim_{t \rightarrow \infty} y = \lim \frac{v_p}{cK} \left(1 - \frac{1}{e^{cKt}} \right) = \frac{v_p}{cK} = y_k \quad (16)$$

a tedy

$$K = \frac{v_p}{c \cdot y_k} \quad (17)$$

Protože součin tuhosti c a konečného průhybu y_k se rovná radiální složce řezné síly, tj.

$$F_y = c \cdot y_k \quad (18)$$

vychází po dosazení pro řezivost brusného nástroje vztah

$$K = \frac{v_p}{F_y} \quad (19)$$

Ze vztahu (19) vyplývá, že čím vyšší lze použít rychlost pří-suvu pro daný brusný nástroj při konstantní radiální síle, tím vyšší bude jeho řezivost. Naopak, při konstantní rychlosti pří-suvu bude o řezivosti brusného nástroje rozhodovat velikost vznikající radiální složky řezné síly: čím tato síla bude menší, tím větší bude řezivost.

Tyto závěry dobře odpovídají brusičské praxi i výsledkům teoretického výzkumu v této oblasti. Z provedených experimentů vyplývá, že řezivost musí být funkcí stavu nástroje a podmínek broušení.

Podrobný metodický rozbor kritéria řezivosti (19) a jeho experimentální ověření provedl Köllner [9]. K ověření byla použita další osvědčená kritéria jako je poměrný obrus a zejména trvanlivostní ukazatelé.

Na základě provedených měření, kdy za řezivější byl považován ze dvou kotoučů ten, jehož pří-suvová rychlost byla větší při stejné radiální síle F_y , tj. kotouč, který má větší K , dochází Köllner k závěru, že toto kritérium je nevhodné. Je to-

mu především proto, že rozlišovací schopnost daného kritéria je velmi malá, což pravděpodobně plyne z použitého experimentálního a měřicího zařízení. Přiklání se proto k názoru, aby se kritériem stala trvanlivost brusného kotouče, kterou je možné určit přesněji. Dále doporučuje, aby nová kritéria byla volena v oblasti pro praxi důležitých hledisech a to produktivity broušení a jakosti povrchu.

Ve své knize [25] věnované problematice broušení kovů, shrnul Lurje poznatky, získané na základě vlastních výzkumů a z prací mnoha dalších výzkumníků. Zabýval se také problémem hodnocení pracovní schopnosti brusných nástrojů. V úvodu k této otázce uvedl definici pracovní schopnosti: Pod pojmem pracovní schopnost brusného kotouče se rozumí kvantitativní ohodnocení (podle jednoho nebo více ukazatelů) stupně splnění úlohy, k níž byl brusný kotouč předurčen, tj. že uskutečnil tu neb onu operaci.

Kvantitativní hodnocení může být realizováno buď přímým měřením nebo porovnáváním s parametry přijatými za jednotku. Ze známých pokusů stanovit takovou jednotku, takový ukazatel, jsou uvedeny:

$$\text{G. Schlesinger} \quad m = \frac{V_o}{V_k} \quad (4)$$

nebo

$$\bar{m} = \frac{V_k}{V_o} \quad (20)$$

$$\text{firma NORTON} \quad m_N = C_N \frac{V_o^2}{V_k} \quad (21)$$

$$\text{Mc Kee, Moore, Boston} \quad \gamma = \frac{m}{P_{11}} \cdot Ra \quad (22)$$

Wolfram, Takadzawa, Yokoama

$$k_w = \frac{F_z l}{\bar{m}} \quad (23)$$

Avšak všechna uvedená kritéria nedávají ty nejsprávnější výsledky, zejména proto, že postrádají údaj, zachycující změnu pracovní schopnosti brusného kotouče v průběhu jeho trvanlivosti.

Protože brusný proces je v podstatě založen na nanášení velkého množství obloukovitých drážek na povrch obráběného

kovu, je potom intenzita jeho úběru závislá především na radiální síle F_y , vtlačující brusná zrna do povrchu obráběného materiálu. Existuje proto závislost mezi F_y a Q ve tvaru

$$Q = C_1 \cdot F_y^a \quad (24)$$

kde C_1 konstanta pro $F_y = 1$
 a exponent ($a = 1,1$ až $1,5$).

Kvantitativní charakteristiku řezné schopnosti brusného kotouče, tedy jeho řezivost, lze pak vyjádřit vztahem

$$k_p = \frac{Q}{F_y} \quad (25)$$

Fyzikálně vyjadřuje k_p měrný objem kovu odebíraný za jednotku času na jeden newton síly, přitlačující brusný kotouč k povrchu obráběného materiálu. Takto stanovená řezivost závisí na řezných podmínkách, tvrdosti brusného kotouče, zrnitosti, materiálu obrobku, materiálu brusných zrn, podmínkách orovňávání a na trvanlivosti.

Trvanlivost se projevuje jako změna tvaru a stavu brusných zrn, což způsobuje pokles jejich schopností vnikat do materiálu a tím i snížení účinnosti brusného procesu. Tuto změnu lze zapsat exponenciální rovnicí

$$k_p = k_0 \cdot e^{-\lambda t} \quad (26)$$

kde k_0 řezivost po orovnění
 λ konstanta ($\lambda = 0,03$ až $0,15$)

Tyto úvahy se staly pro Lur' jeho východiskem pro komplexní hodnocení řezivosti brusného kotouče, když navíc do úvahy vzal ještě teplotu broušení. Obecná metodika komplexního hodnocení řezivosti obsahuje tyto operace:

- a) měření F_y v závislosti na technických požadavcích a podmínkách broušení
- b) stanovení úběru kovu za časovou jednotku Q a výpočet k_p podle vztahu (25)
- c) stanovení k_p v závislosti ^{na} čase podle vztahu (26). Kvantitativním ukazatelem je λ pro něj platí: čím menší je λ , tím pomalejší je změna řezivosti v čase,
- d) měření teploty broušení na konci pokusu.

Potom bude kvantitativním vyjádřením pro řezivost brusného kotouče při provádění určité operace vztah

$$R_L = \frac{k_p}{\lambda \cdot \theta} \quad (27)$$

kde R_L komplexní řezivost podle Lurje

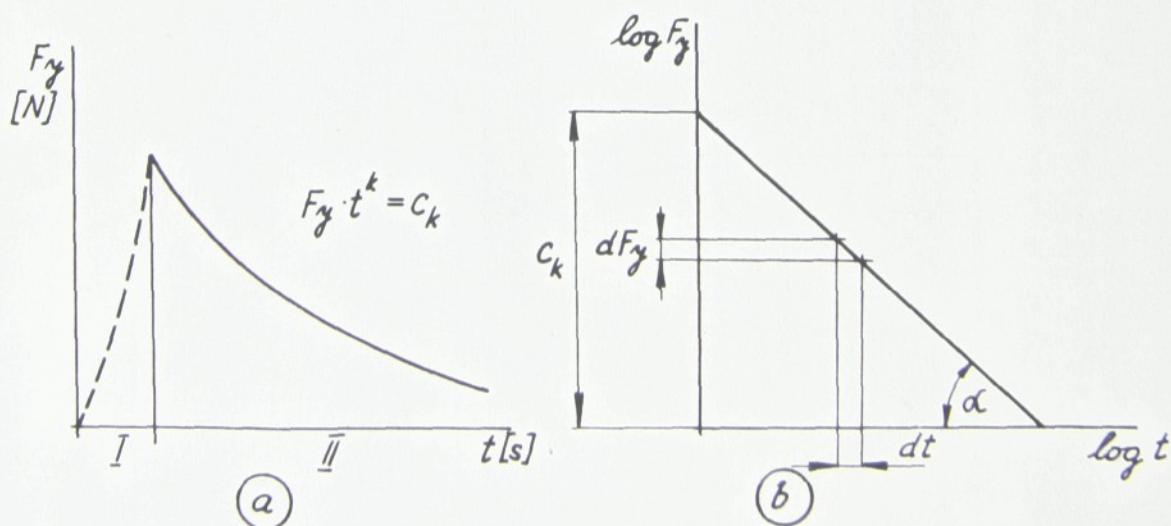
k_p řezivost dle vztahu (25)

λ konstanta vlivu trvanlivosti

θ teplota broušení

Z obecné platnosti závěrů uvedených v [9, 24] vyšel Říčka [10] k návrhu vlastního kritéria řezivosti brusných nástrojů. Předpokládá, že velikost řezné síly je funkcí řezivosti K a doby broušení t a aplikuje tento závěr na cyklus broušení. V jeho první části dochází k narůstání řezné síly a tím také k napružení soustavy S-N-O-P. Jeho druhá část začíná v okamžiku, kdy je ukončen přísuv brusného nástroje a dochází k poklesu řezné síly a proto i k odpružení soustavy. A v této druhé fázi se projeví výrazné rozdíly mezi jednotlivými brusnými kotouči. Průběh závislosti ve zjednodušeném tvaru ukazuje obr. 20a. Říčka si všímá zejména druhé fáze - vyjiskřování a popisuje tuto polytropickou funkcí rovnicí

$$F_y \cdot t^k = c_k \quad (28)$$



Obr. 20 Závislost řezné síly na čase pro zjednodušený cyklus broušení

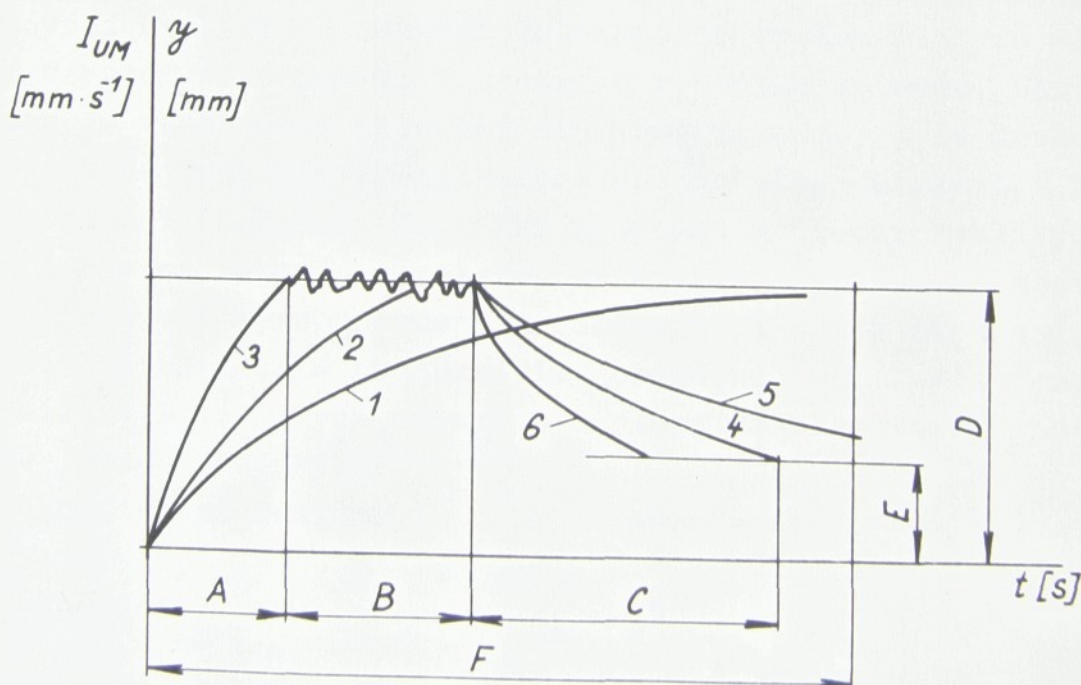
Exponent k a konstantu c_k považuje za koeficienty provozní řezivosti brusného nástroje.

Pro ověření platnosti svých závěrů provedl Říčka řadu zkoušek s různými druhy brusných nástrojů a z nich uzavírá: čím vyšší jsou hodnoty koeficientů řezivosti k a c_k , tím horší je řezivost.

Současně stanovil na základě svých měření, že řezivost je závislá na stavu vlastního brusného nástroje a na řezných podmínkách.

Tento přístup k problematice řezivosti brusných nástrojů je racionální a zasluhuje pozornost. Jistou nevýhodou je vyjádření dvěma údaji, u nichž není uvedeno, který z nich má větší váhu. Dále lze dodat, že řezivost bude závislá také na brousícím stroji, zvláště na jeho tuhosti, resp. na tuhosti jeho vřeteníku.

Cyklus broušení rozebírá také Maslov [1] v kapitole věnované obrobitelnosti materiálů broušením. Mimo definice obrobitelnosti poukazuje na řadu ukazatelů, které tato vlastnost zahrnuje.



Obr. 21 Intezita úběru materiálu a napružení S-N-O-P

Efektivnost obrábění celistvými brusnými nástroji je úzce spojena s realizací optimálního cyklu broušení, který probíhá ve třech cyklech: A - vřezávání, B - ustálený proces, C - vyjiskřování. V části A prudce vzrůstá intenzita úběru materiálu a dochází k napružení soustavy S-N-O-P. Následuje ustálený proces, kde probíhá rovnoměrný úběr materiálu, jehož množství je určeno počátečním "rozevřením" S-N-O-P. Při vyjiskřování (fáze C), které probíhá s nulovou přísuvovou rychlostí, vyvolá pokles intenzity úběru materiálu. Grafické znázornění těchto cyklů je uvedeno na obr. 21, kde křivka 1 charakterizuje vřezávání s ustáleným nízkým přísuvem, křivka 2,3 se zvýšeným přísuvem. Křivka 4 reprezentuje vyjiskřování bez přísuvu, 5 zpomalené a 6 zrychlené vyjiskřování. Časový úsek P odpovídá údajům pro křivku 1 a úsek D charakterizuje odpovídající napružení. Úsek E je pak "rozevřením" S-N-O-P na konci vyjiskřování, zejména bez přísuvu.

Poukazuje tu na skutečnost, že realizace broušení podle jednotlivých typů křivek je závislá na úrovni automatizace pracovního cyklu brousícího stroje.

V kapitole, věnované racionalizaci využití brusných kotoučů a brusek^{se} mimo jiné zabývá kontrolou kvality brusných nástrojů. Uvádí, že je nutné mít k dispozici dvě různé metodiky pro posuzování kvality, Především laboratorní výzkum řezných vlastností a potom také provozní kontrolu brusných kotoučů. Úkolem výzkumu je všestranně posoudit řezivost tak, aby bylo dosaženo jejich nejefektivnější exploatace při dodržení ukazatelů kvality broušení součástí. Metodika provozní kontroly kvality se soustřeďuje na takové ukazatele, ze kterých vyplývá možnost stále zlepšovat výrobu brusných nástrojů. K těmto ukazatelům se počítají ukazatele produktivity broušení, velikosti řezných sil, energetických nároků a doplňující ukazatele. K posledně jmenovaným patří:

$$\text{koeficient řezivosti} \quad k_p = \frac{Q}{F_y} \quad (25)$$

$$\text{koeficient samoostředění} \quad k_s = \frac{Q_k}{F_y} \quad (29)$$

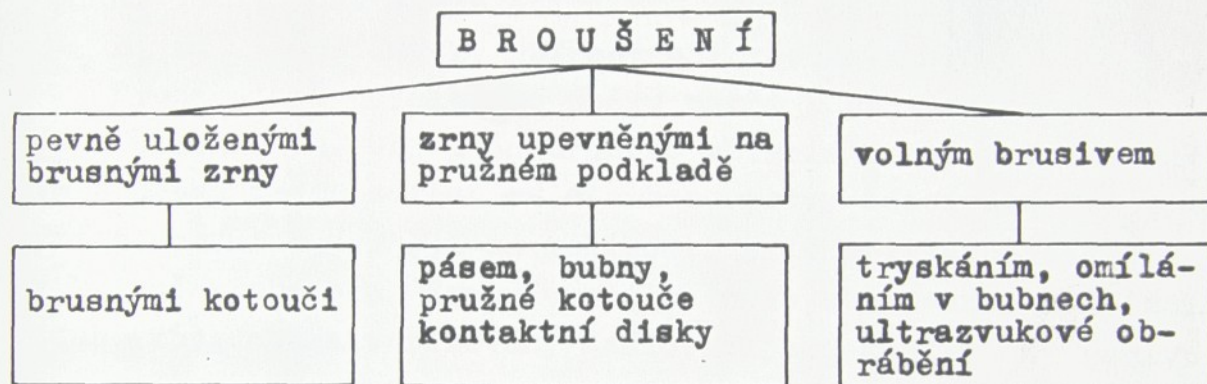
$$\text{koeficient broušení} \quad \mu = \frac{F_z}{F_y} \quad (30)$$

$$\text{koeficient úběru materiálu} \quad k_u = \frac{Q}{Q_{\text{vyp}}} \quad (31)$$

Ze sestavení doplňujících ukazatelů je zřejmý jejich značný význam pro analýzu procesu broušení. Např. koeficient řezivosti k_p udává, jaké množství materiálu obrobku je odebráno vynaloženou radiální řeznou silou. Podobně koeficient broušení μ charakterizuje efektivnost práce brusného kotouče. Se vzrůstem μ ve srovnání s koeficientem tření efektivnost řezání kotoučem roste.

Uvedením těchto ukazatelů a rozbořem cyklu broušení dostává se možnost nově posoudit problematiku řezivosti brusných kotoučů.

Šalňov ve své práci o broušení a leštění materiálů s vysokou pevností [25] se především zabýval principiálními schémata broušení. V zásadě rozlišuje tři základní principy a jejich realizaci, jak to znázorňuje obr. 22.



Obr. 22 Principiální schémata broušení

Tato nejobecnější představa dovoluje upřesnit názor na proces broušení, tj, umožňuje to studovat všechny otázky "brusného obrábění", zejména proto, že uvedená schémata mají řadu společných rysů. Je pak možné uznat za metodicky správné porovnávání výsledku výzkumem nebo praktické zkušenosti při přechodu od jednoho principiálního schématu ke druhému. Naopak to specifické pro každý princip mu musí zůstat zachováno.

Dále Šalňov podrobněji než Maslov rozebírá cyklus broušení. Používá stejného grafu pro jeho vysvětlení (obr. 21). Pro vřezávání s přísuvem, jež odpovídá konstantnímu úběru platí

$$y = y_0 \left(1 - e^{-\frac{I_0}{y_0} \cdot t} \right) \quad (32)$$

$$I_{UM} = I_0 \left(1 - e^{-\frac{I_0}{y_0} \cdot t} \right) \quad (33)$$

$$t_A = \frac{y_0}{I_0} \ln \frac{1}{1-i_A} \quad (34)$$

$$i_A = \frac{y_k}{y_0} \quad (35)$$

$$h_A = y_0 \left(\ln \frac{1}{1-i_A} - 1 \right) \quad (36)$$

kde y průběžná hodnota napružení, odtlačení S-N-O-P
 y_0 odtlačení při ustáleném úběru
 y_k velikost odtlačení po ukončení cyklu broušení
 I_0 intezita úběru při ustáleném procesu
 t_A čas vřezávání
 h_A přídavek, ubíraný při vřezávání

Druhá etapa ustáleného úběru patří k nejvíce propracovaným, prozkoumaným. Objem odebraného materiálu uskutečněný každým brusným zrnem závisí na hloubce vrstvy odebírané jednotlivými brusnými zrny, tj. na velikosti síly přitlačující brusný kotouč k obrobku. Experimentálně bylo stanoveno, že platí vztah (25), charakterizovaný Maslovem jako koeficient rezivosti. Změnu rezivosti v závislosti na trvanlivosti lze zapsat výrazem (26).

Etapa vyjiskřování může být popsána rovnicemi

$$y = y_0 \cdot e^{-\frac{I_0}{y_0} \cdot t} \quad (37)$$

$$I_{UM} = I_0 \cdot e^{-\frac{I_0}{y_0} \cdot t} \quad (38)$$

Uvedené vztahy (32, 33) byly získány řešením rovnice

$$\frac{dy}{dt} = i \cdot I_0 - I_0 \left(\frac{y}{y_0} \right)^m \quad (39)$$

Avšak tato rovnice nedovoluje postihnout inertní přemístění brusného kotouče při přechodových procesech. Přesnějšího vyjádření se dosáhne určením změny napružení, odtlačení soustavy S-N-O-P v závislosti na čase, zahrnující jak konstantní tak i proměnný přísuv. Z obr. 23 vyplývá:

$$x = y + s + u \quad (40) \quad 52$$

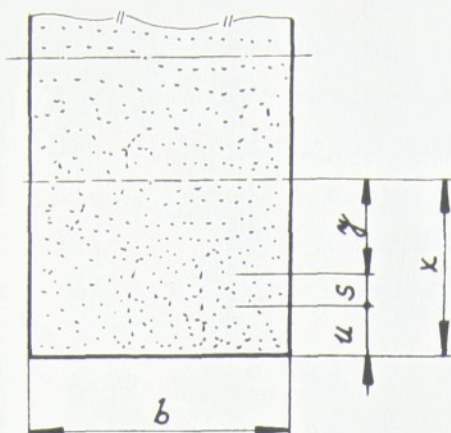
kde

x ... celková změna polohy
brusného kotouče

y ... odtlačení, napružení S-N-O-P

s ... dráha odpovídající
úběru

u ... dráha odpovídající opo-
třevení brusného kotouče



Obr. 23 Určení polohy brus-
ného kotouče po na-
pružení S-N-O-P

Provedením parciální derivace
rovnice (40) podle času bude

$$\frac{dx}{dt} = \frac{dy}{dt} + \frac{ds}{dt} + \frac{du}{dt} \quad (41)$$

Z rozboru jednotlivých členů této rovnice lze stanovit

$$\frac{dx}{dt} = v(t) \quad (42)$$

Jde vlastně o změnu polohy za jednotku času jako výsledek pří-
suvu, tj. rychlost

$$\frac{ds}{dt} = Q = C_1 \cdot F_y^a \quad (43)$$

Poměr vyjadřuje množství odebraného materiálu za čas a
podle některých výzkumníků může být popsáno exponenciální
funkcí. Vztáhneme-li úběr na veličinu průhybu či napružení
systému potom platí

$$\frac{ds}{dt} = k_1 y^a \quad (44)$$

když

$$k_1 = \frac{I_0}{y_0} = \frac{h}{y} \quad (45)$$

Poslední část parciální derivace představuje opotřevení
brusného kotouče za jednotku času, neboli intenzitu opotře-
bení.

$$\frac{du}{dt} = Q_k = C_2 \cdot Q_1^b \quad (46)$$

Potom podobně jako v rovnici (44) při přijatých označeních
bude

$$\frac{du}{dt} = k_2 \cdot y^b \quad (47)$$

když

$$k_2 = m \cdot \frac{d}{D} \cdot \frac{L}{B} \quad (48)$$

kde m poměrný obrus
 d průměr obrobku
 D průměr brusného kotouče
 L délka broušeného čepu
 B šířka brusného kotouče

Pro vnější válcové broušení zápichem bývá

$$m = \frac{1}{25} + \frac{1}{40} = 0,065$$

$$b = 0,6 \text{ až } 0,8$$

Potom dostane základní parciální diferenciální rovnice tvar

$$\frac{dy}{dt} + k_1 y^a + k_2 y^b = v(t) \quad (49)$$

V případě, že je známo opotřebení brusného kotouče za periodu trvanlivosti, tj. jeho úbytek, pak lze rovnici (49) zjednodušit

$$\frac{dy}{dt} + k_1 y^a = v(t) \quad (50)$$

Zanedbáním vzniklých chyb při použití exponentu v jeho nejnižší hodnotě $a = 1$ se dosáhne dalšího zjednodušení a rovnice nabude lineární tvar:

$$\frac{dy}{dt} + k_1 y = v(t) \quad (51)$$

Řešením této rovnice lze získat rovnici na průhyb či napružení ve tvaru

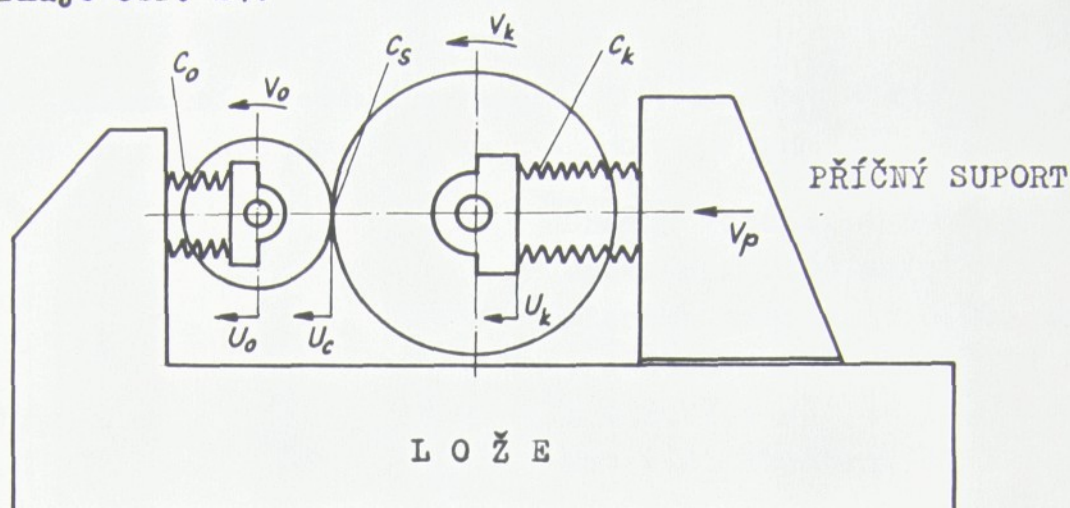
$$y = 1 y_0 \alpha \left(\frac{e^{-k_1 t}}{k_1 T + 1 - k_1 T} - e^{-\frac{t}{T}} \right) \quad (52)$$

Je zřejmé, tvrdí Šalňov, že zjednodušením, které bylo v průběhu řešení provedeno, se výsledky vypočtené podle rovnice (52) rozcházejí s výpočty, provedenými podle obecné pohybové diferenciální rovnice.

Práce Šalňova přináší do studia problematiky procesu broušení, zvláště pak cyklu broušení, nové poznatky. Ty mohou být využity zejména pro automatické řízení pracovního cyklu. Otázkami rezivosti brusných kotoučů se však zabývá jen okrajově.

V článku [27] rozebírá Hahn podmínky pro provedení velmi přesného broušení. Věnuje pozornost především základním parametrům broušení a dále pak rozboru cyklu broušení.

Základní parametry jsou nutné pro určení kvantitativních poměrů broušení. Brusný proces může být reprezentován prostřednictvím dvou otáčejících se válců, jež se vzájemně dotýkají, jak to znázorňuje obr. 24.



Obr. 24 Základní schéma vnějšího válcového broušení zápichem

Brusný kotouč a obrobek se opracovávají vzájemně, dostanou-li se do takového styku, že v kontaktní zóně vznikne řezná síla. Z každého tělesa ubude určité množství materiálu, které vztaženo na jednotku času a šířky styku je popsáno

Q_1 ... jednotkový odbroušený objem materiálu obrobku

Q_{k1} ... jednotkový objem úbytku brusného kotouče

Zpravidla bývá

$$Q_1 > Q_{k1} \quad (53)$$

Při broušení jsou vyvolány řezné síly a z nich důležitá místo zaujímá normálová složka F_y a její podíl na jednotku šířky brusného kotouče F_{y1} . Vyneseme-li Q_1 resp. Q_{k1} v závislosti na F_{y1} do grafu, pak odtud vyplynou zajímavé souvislosti. Především průběh Q_1 má 3 oblasti: oblast tření - $\langle 0; F_{y1T} \rangle$

oblast rytí - $\langle F_{y1T}; F_{y1R} \rangle$

oblast řezání - $\langle F_{y1R}; F_{y1} \rangle$

Sklon přímky Q_1 je dán v oblasti rytí poměrem

$$\Delta_{OR} = \frac{Q_1}{F_{y1R}} \quad (54)$$

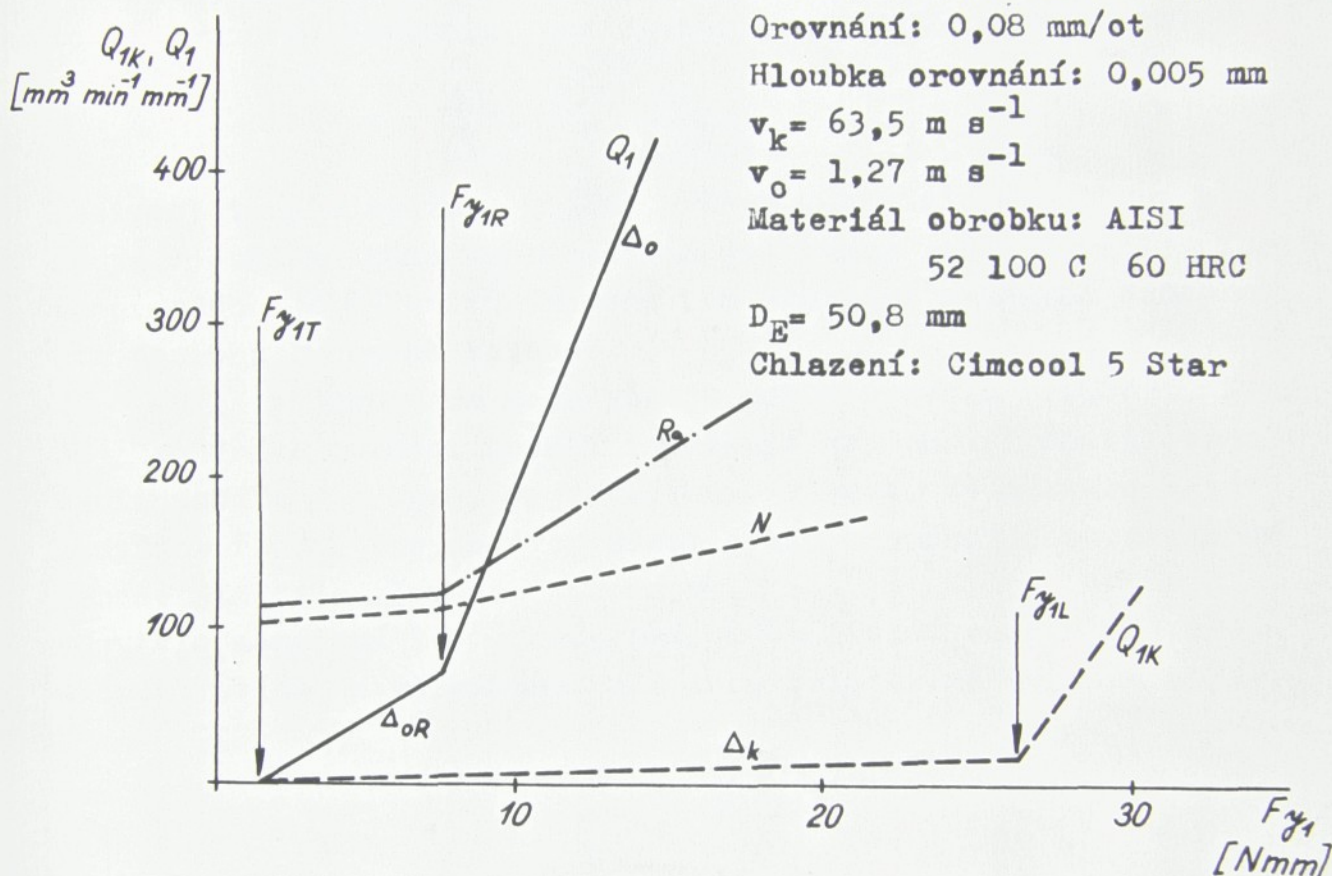
a v oblasti řezání

$$\Delta_0 = \frac{Q_1}{F_{y1}} \quad (55)$$

Podobně pro úbytek brusného kotouče lze napsat

$$\Delta_k = \frac{Q_{1k}}{F_{y1L}} \quad (56)$$

Grafické znázornění uvedených vztahů, tj. $Q_1, Q_{1k} = f(F_{y1})$ a dále výkonu P a drsnosti R_a na F_{y1} ukazuje obr. 25.



Obr. 25 Charakterizace dvojice brusný kotouč-obrodek
 Na přímce úbytku brusného kotouče možno při síle $F_{y1L} = 26,25 \text{ N.mm}^{-1}$ pozorovat ostrý zlom, tj. prudký vzrůst jeho úbytku. Sílu, při níž dochází k této změně, můžeme označit jako sílu lámání, či drcení brusných zrn v kotouči.

Další parametr, který ovlivňuje výkon broušení, je tzv. konformita, či sblížení, sdružení brusného kotouče a obrobku. Je to vlastně stupeň přizpůsobení, přiblížení, přidružení těchto těles navzájem. Může být vyjádřen tzv. ekvivalentním průměrem. Je to takový průměr brusného kotouče, který na rovině ploše má stejnou délku stykového oblouku jako při vnitřním nebo vnějším válcovém broušení. Lze jej vypočítat ze vztahu

$$D_E = \frac{D}{1 - \frac{D}{d}} \quad (57)$$

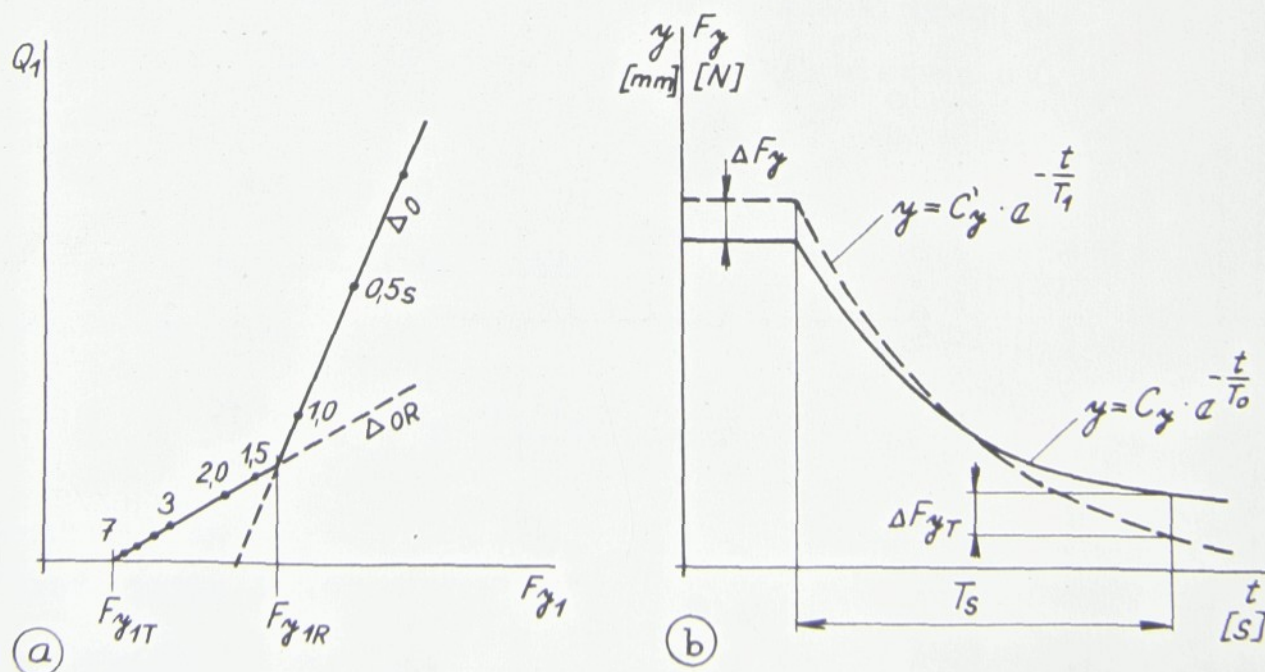
Při broušení se za zvlášť významné považuje tepelné ovlivnění povrchové vrstvy, kterou lze nejlépe sledovat pomocí její teploty. Na výši této teploty má vliv obvodová rychlost obrobku, brusného kotouče, velikost řezné síly, ekvivalentní průměr, chladicí prostředky a také ostrost brusného kotouče, tj. řezivost. Ze všech uvedených veličin je právě řezivost tou nejobtížněji dosažitelnou. Může být definována prostřednictvím parametru obrusu Δ_o . Podělíme-li tento parametr obvodovou rychlostí brusného nástroje, pak dostaneme ostrost - řezivost.

$$S = \frac{\Delta_o}{v_k} = \frac{Q_1}{v_k \cdot F_{y1}} \quad (58)$$

Řezivost tu představuje příčný průřez materiálu obrobku, který je v každém okamžiku oddělován jednotkou radiální síly. Tato proměnná je důležitá zejména pro zkoušení pracovní schopnosti povrchu brusného kotouče.

Velmi podrobně se Hahn věnuje rozboru cyklu broušení. Stejně jako dříve uvedení autoři rozděluje jej na tři části: vřezávání, ustálený proces, vyjiskřování. Přesto, že některé závěry a způsob řešení prvních dvou částí cyklu broušení jsou zajímavé, nebude jím dále věnována pozornost.

Pro zaměření této práce bude důležitější věnovat se problému třetímu, závěrečnému, ale také kritickému úseku - vyjisk-



Obr. 26 Charakteristiky vyjiskřování

křování. Po procesech, zajišťujících úběr a tvarování obrobku, je nutný takový pochod, který zajistí požadované tolerance, drsnost, integritu a kvalitu povrchové vrstvy a to vnejkratším čase. Takovým dějem je vyjiskřování, které nastává bezprostředně po dokončení ustáleného procesu tím, že se v daném okamžiku sníží rychlost přísuvového suportu na nulu, tj. $v_p = 0$. Tím počne klesat radiální síla F_y a zmenšuje se napružení, vychýlení soustavy S-N-O-P. Síla klesá až na hodnotu F_{y1R} , kdy řezání přechází v rytí a pokles se stává pomalejším. To odpovídá parametru Δ_{oR} . Hodnota síly se dále snižuje až k bodu F_{y1T} . V tomto okamžiku je úběr materiálu dokončen a brusný kotouč se o obrobek jen tře. Tím je proces vyjiskřování dokončen. Tento průběh lze graficky znázornit způsobem uvedeným na obr.26 a,b.

Pro časovou konstantu T_o stanovil Hahn tento vztah:

$$T_o = \frac{B_o}{c \left(\frac{\Delta_o}{\pi d} + \frac{\Delta_k}{\pi D} \right)} \quad (59)$$

kde c tuhost systému

B_o okamžitá šířka brusného kotouče

Na obr. 26b je plnou čarou znázorněn průběh vyjiskřování křivky realizované čerstvě ořvnaným brusným kotoučem. Čárkovaná čára představuje situaci, při níž se změnila:

1. předpokládaná úroveň sil z F_y na $F_y + \Delta F_y$
2. časová konstanta z T_o na T_1 na základě změny Δ_o
3. mezní síla a jí odpovídající průhyb vřetena o ΔF_{yT} .

Potom platí

$$F_y = F_a - C_T \cdot v_p \quad (60)$$

$$v_p = \frac{\Delta_o (F_{y1} - F_{y1R})}{\pi d} \quad (61)$$

Dosazením obdržíme

$$F_y = F_a - C_T \frac{\Delta_o (F_y - F_{yT})}{\pi d B_o} \quad (62)$$

Po úpravě potom

$$F_y = \frac{F_a + \frac{C_T \Delta_o}{\pi d B_o} F_{yT}}{\frac{C_T \Delta_o}{\pi d B_o}} \quad (63)$$

Vychýlení, odtlačení systému odpovídající této síle bude

$$y = \frac{F_y}{c} = \frac{\frac{F_a}{c} + \frac{C_T \Delta_o F_{yT}}{\pi d B_o c}}{1 - \frac{C_T \Delta_o}{\pi d B_o}} \quad (64)$$

Pro libovolný okamžik průběhu vyjiskřování bude vychýlení

$$y(t) = \left[\frac{\frac{F_a}{c} + \frac{C_T \Delta_o}{\pi d B_o} \cdot \frac{F_{yT}}{F_z} - \frac{F_{yT}}{c}}{1 + \frac{C_T \Delta_o}{\pi d B_o}} \right] \exp \left[\frac{-c \left(\frac{\Delta_o}{\pi d} - \frac{\Delta_{oR}}{\pi D} \right) t}{B_o} \right] + \frac{F_{yT}}{c} \quad (65)$$

kde F_a vyvolaná přibližovací síla (počáteční)
 C_T konstanta tlumiče příčného suportu
 F_{yT} celková síla, oddělující oblast tření od rytí
 d průměr obrobku
 D průměr brusného kotouče

První část výrazu vyjadřuje počáteční podmínky pro zahájení vyjiskřovací fáze a jeho druhá část mezní vychýlení vřetena po dlouhém čase vyjiskřování. Vztah (65) může být použit pro určení změny rozměru, dosažené po ukončování vyjiskřování, v čase T_s na základě změn Δ_o a F_{yT} .

Z uvedeného vyplývá, že pro určení průběhu broušení, resp. jeho řízení, jsou rozhodující tyto veličiny:

úběrový parametr broušení Δ_o
 úběrový parametr rytí Δ_{oR}
 radiální síla na jednotku šířky brusného kotouče oddělující oblast rytí a řezání F_{yLR}
 totéž pro oblast tření a rytí F_{yLT}
 parametr úbytku brusného kotouče Δ_k
 největší řezná síla v okamžiku, kdy dojde k poškození pracovní plochy brusného kotouče vylamováním zrn F_{yLL} .

Když dokážeme tyto veličiny změřit, pak mohou být správně zvoleny a ohodnoceny brusné nástroje, chladicí a mazací prostředky, řezné podmínky apod. Současně budou poskytnuty podklady pro realizaci automatického řízení cyklu broušení.

V knize australských autorů Armarega a Browna [28], věnované otázkám teorie obrábění, je ve statí zaměřené na oblast abrazivního obrábění proveden rozbor intezity úběru materiálu a také otázky brusitelnosti materiálu.

Uvádějí, že intenzitu úběru materiálu, označovanou také

jako výkon broušení, je možno stanovit obdobně jako pro obrábění jednobřítým nástrojem. Pro rovinné broušení platí:

$$Q = B_o \cdot h \cdot v_o \quad (66)$$

kde Q objem materiálu odbroušeného za jednotku času

B_o okamžitá šířka odebírané vrstvy

h tloušťka odebírané vrstvy

v_o rychlost pohybu obrobku

Podobně pro valové vnější broušení s podélným pohybem obrobku

$$Q = 2\pi \cdot r \cdot h \cdot v_m \quad (67)$$

kde r poloměr obrobku

v_m rychlost podélného posuvu

Rovnice platí za předpokladu, že úbytek brusného kotouče opotřebením je malý.

Pro stanovení měrné energie broušení používají vztahu, jež stanovili Marshall a Shaw:

$$e_{MS} = \frac{F_z \cdot v_k}{Q} = \frac{F_z \cdot v_k}{B_o \cdot h \cdot v_o} \quad (68)$$

kde F_z průměrná tangenciální síla při broušení.

Ukázalo se, že měrná energie, vypočtená podle vztahu (68), je až 10x větší než pro obrábění jednobřítým nástrojem. Vyplývá to ze skutečnosti, že se měrná energie zmenšuje při zvětšování rozměrů odebírané vrstvy. Tomuto jevu se někdy též říká "faktor měřítka" a je založen na teorii dislokací.

Pozornost je dále věnována problému obrobiteľnosti broušením. Termínem brusiteľnosť se označuje stupeň snadnosti provedení procesu broušení [28]. Brusiteľnosť je možno zkoumat analogicky jako obrobiteľnosť a bývá obvykle spojována se silami a výkonem při broušení, opotřebením brusného kotouče, intenzitou úběru kovu a kvalitou obrobeného povrchu. Materiál, který má mít dobrou brusiteľnosť vykazuje malé řezné síly, výkon a opotřebení brusného nástroje, ale intenzita úběru a kvalita obrobeného povrchu jsou vysoké. Ze zkušenosti i teorie vyplývá, že brusiteľnosť je závislá na všeobecných řezných podmínkách, zejména pak na tloušťce odřezávané vrstvy.

Síla, připadající na jedno brusné zrna je úměrná ploše úběru a za určitých podmínek kvadrátu tloušťky třísky:

$$F_1 \sim S_1 \sim h_1^2 \quad (69)$$

kde F_1 maximální síla na jedno brusné zrno

S_1 plocha úběru, průřez třísky připadající na 1 brusné zrno

h_1 maximální tloušťka třísky na 1 zrno.

Použitím vztahů, odvozených v publikaci [28], dostaneme konkrétní vztah

$$F_1 = K' \frac{v_o^2}{k^2 v_k^2} \left[\frac{2h(r+R)}{r \cdot R} \right] \quad (70)$$

kde K' koeficient úměrnosti

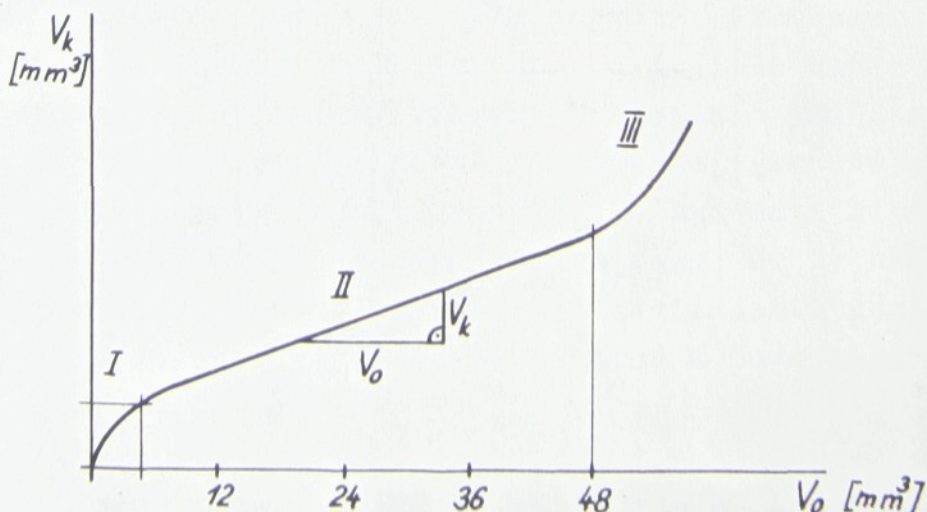
k počet zrn na jednotku délky obvodu brusného kotouče

R poloměr brusného kotouče

Praktický důsledek rovnice (70) je možno spatřovat v tom, že objeví-li se jev "zanášení" brusného kotouče, je nutno změnit její parametry tak, aby se síla F_1 zvětšila.

Dále z této rovnice docházejí autoři k závěru, že se zvyšováním rychlosti pohybu obrobku v_o se poměrný obrus zmenšuje, kvalita povrchové vrstvy se zhoršuje a potřebný výkon vzrůstá. Shodné výsledky dává také zvětšení tloušťky ubírané vrstvy a příčného posuvu v_p .

Pro konečné vyjádření charakteristických ukazatelů procesu broušení použili výsledků výzkumu provedených Krabacherem.



Obr. 27 Křivka opotřebení brusného kotouče (Krabacher)

Ten dokázal, že křivka opotřebení brusných kotoučů je svým tvarem shodná s křivkou opotřebení jednobřitých nástrojů. Popis jednotlivých fází je následující:

- I. fáze - po orovnaní při prvních záběrech dochází k rychlému opotřebení ostrých zrn jako důsledek odlamování a odírání jejich vrcholů
- II. fáze - postupné narůstání velikosti opotřebení, jehož příčinou je otěr zrn a vznik opotřebovaných plošek a částečného vylamování zrn
- III. fáze - intenzivní porušování zrn a jejich "vysypávání" ze současného vzrůstu síly broušení.

Ve fázi II. lze pak stanovit poměrný obrus jako podíl $V_o : V_k$ (viz (4)).

Na základě souhrnu výše uvedených poznatků a výsledku vlastních a dalších výzkumů pak za charakteristické ukazatele považují:

1. poměrný obrus (objemový koeficient, objemovou výkonnost)

$$m = \frac{V_o}{V_k} \quad (4)$$

2. charakteristiku brusitelnosti

$$g = \frac{m}{P} \quad (71)$$

3. poměrný koeficient brusitelnosti

$$\gamma = \frac{m}{P_{11} \cdot R_a} \quad (72)$$

Pro jejich použití platí: čím vyšší je hodnota těchto ukazatelů, tím lepší jsou podmínky broušení.

Brusitelnost, jak byla popsána Armaregem a Brownem, se svým vyjádřením, svou definicí a jejím obsahem dá velmi dobře srovnat s definicí řezivosti. Zásadní rozdíl spočívá v tom, že v případě brusitelnosti je všechno vztaženo směrem k obráběnému materiálu, kdežto v případě řezivosti k brusnému nástroji. Na tomto místě se naskytá myšlenka, že by ukazatelé brusitelnosti mohli snadno sehrát roli koeficientů řezivosti. Autor pro další úvahy převezme tento názor a bude jej dále používat.

Na tomto místě lze také připomenout základní schema (obr. 24) a potom fakt, lapidárně vyjádřený R.S. Hahnem, že brusný kotouč a obrobek se opracovávají navzájem. Odtud je už jen krůček k možnosti vzájemné záměny pojmů brusitelnost a řezivost.

Přesto, že práce, na kterou bude nyní upozorněno, se nezabývá bezprostředně problematikou řezivosti, se zařazuje do této oblasti proto, že je to jedna z mála (nebo snad jediná) prací, postihujících komplexně proces broušení. Jde o významnou kolektivní studii pod patronací skupiny G (Grinding - broušení) mezinárodního sdružení pro technologické výzkumy CIRP, realizovanou na různých výzkumných pracovištích, jejíž hlavní tvůrce představují R. Snoeys, J. Peters, A. Decneut. Podkladem pro popis bude článek v oficiálním časopise Annals of the CIRP [28] i když o této problematice bylo již mnohé publikováno [29, 30, 31].

V mnoha výzkumných pracech se objevovala snaha po charakterizování řezných podmínek při broušení pomocí tloušťky nedeformované třísky. Důvodem bylo, že na rozdíl od jiných způsobů obrábění je tato tloušťka u broušení souhrnnou funkcí kinematických podmínek a geometrie povrchu brusného nástroje. Tak vzniklo mnoho rovnic, sloužících k výpočtu těchto parametrů, s jejichž praktickou aplikací bylo mnoho těžkostí.

Přesto však zde byl nalezen základ pro definici parametru nazvaného ekvivalentní tloušťka broušení (odebírané vrstvy) h_{eq} . Bylo zjištěno, že tento parametr umožňuje vyjádřit v exponenciálním tvaru závislost na řezných silách, na drsnosti, na opotřebování brusného kotouče a objemu odbroušeného materiálu. Lze-li považovat proces odbrušování odebírané vrstvy h za plynulý, potom při zachování objemové stálosti je možné považovat poměr $h \cdot v_o / v_k$ za tloušťku vrstvy odebírané z obrobku při rychlosti v_k . Toto fyzikální vyjádření vyplývá z obr. 28a, a uvedený poměr dostal označení h_{eq} . Tedy platí

$$h \cdot B_o \cdot v_o = h_{eq} \cdot B_o \cdot v_k \quad (73)$$

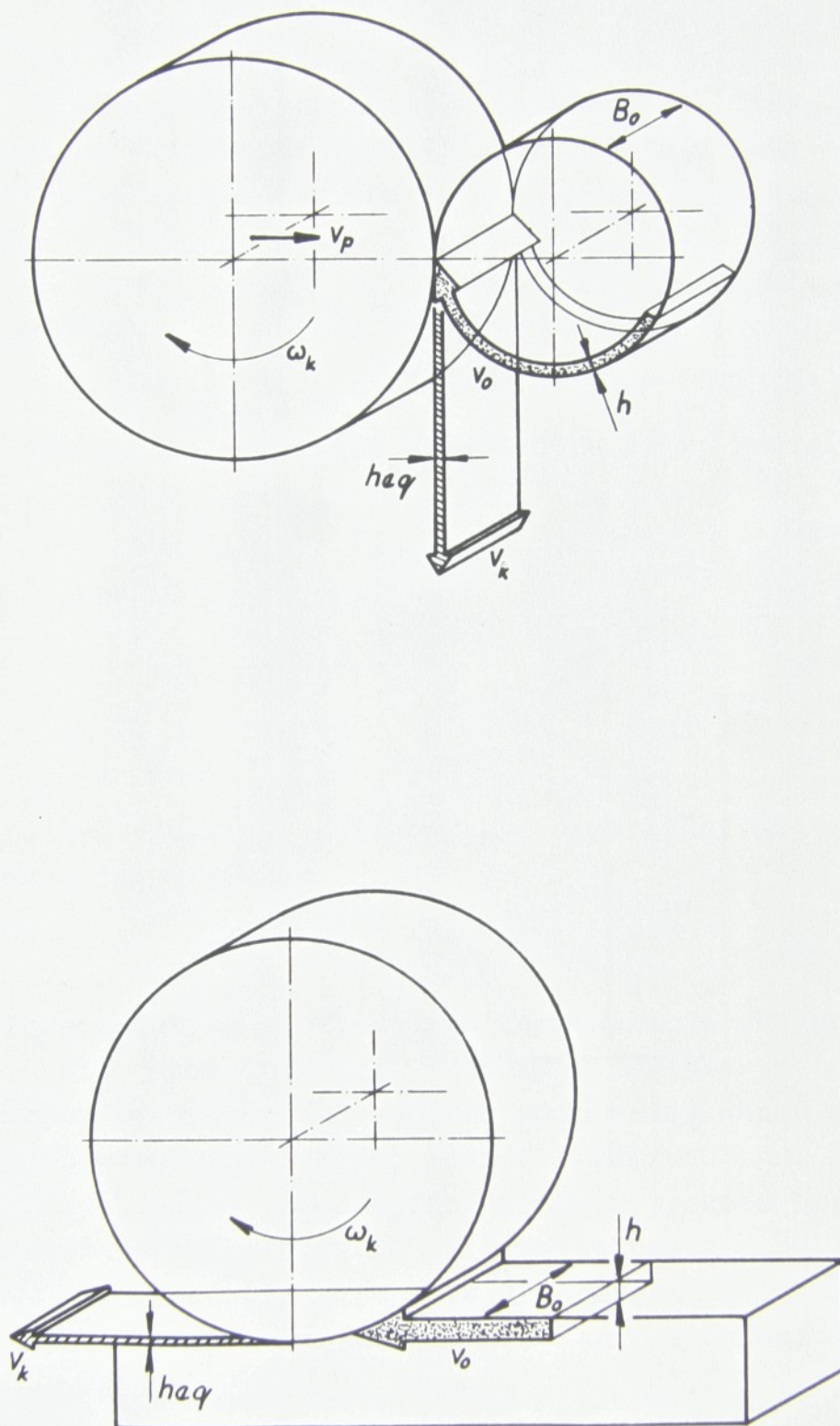
$$h_{eq} = h \frac{v_o}{v_k} \quad (74)$$

Potom platí-li

$$Q = B_o \cdot h \cdot v_o \quad (75)$$

$$\text{a také} \quad Q_1 = h \cdot v_o = h_{eq} \cdot v_k \quad (76)$$

$$\text{potom bude} \quad h_{eq} = \frac{Q_1}{v_k} \quad (77)$$



Obr. 28a
 Schema pro výpočet h_{eq}

$$q_v = \frac{v_k}{v_o} \quad (78)$$

takže také

$$h_{eq} = \frac{h}{q_v} \quad (79)$$

Brusným procesem vyvolané nebo dosažené veličiny lze v závislosti na ekvivalentní tloušťce vyjádřit vztahy: pro drsnost obroušeného povrchu:

$$R_a = R_{a1} \cdot h_{eq}^r \quad (80)$$

pro poměrný obrus

$$m = m_1 \cdot h_{eq}^w \quad (81)$$

pro objem odebraného materiálu na jednotku šířky brusného kotouče

$$Q_1 = Q_{11} \cdot h_{eq}^u \quad (82)$$

pro složky řezné síly

$$F_{y1} = \frac{F_{11}}{\mu} h_{eq}^f \quad (83)$$

$$F_{z1} = F_{11} \cdot h_{eq}^f \quad (84)$$

pro specifickou energii, potřebnou pro odstranění objemové jednotky materiálu obrobku

$$e = F_{11} \cdot h_{eq}^{f-1} \quad (85)$$

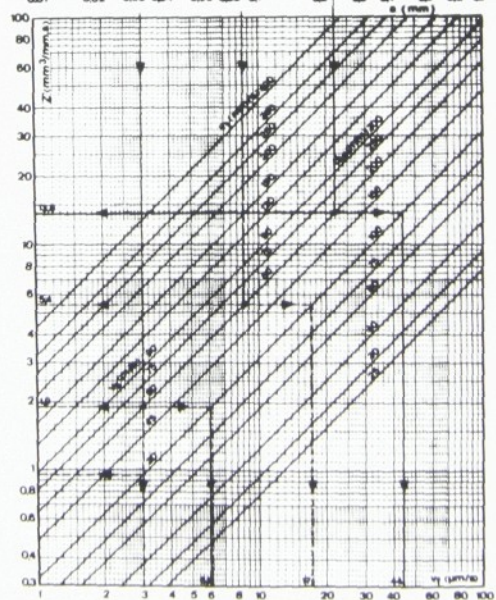
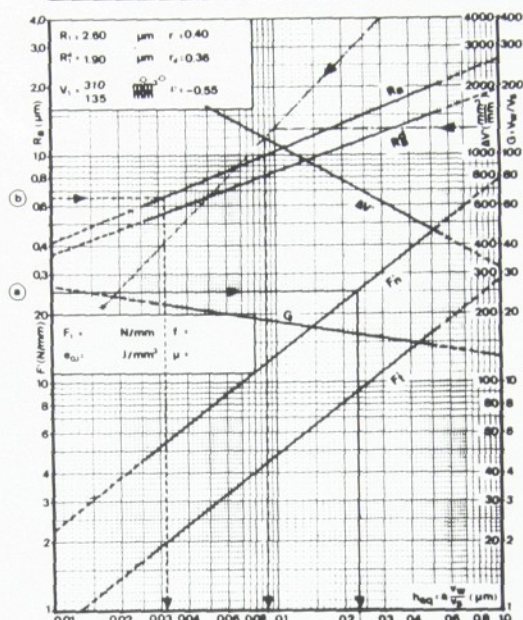
V bilogaritmických souřadnicích reprezentují uvedené vztahy přímky. Takto sestavený graf uvedených závislostí byl nazván diagramem broušení. Jeho úplnou podobu doplněnou o nomogram hlavních parametrů řezných podmínek ukazuje obr. 28b[29].

Za měřítko lepšího, snadnějšího průběhu procesu broušení, tedy řezivosti brusného kotouče či brusitelnosti daného materiálu se považuje hodnota exponentů a konstant ve výše uvedených vztazích a specifická energie broušení odpovídající

$h_{eq} = 0,1 \mu m$. Platí tyto závěry vyplývající z diagramu broušení:

1. Čím větší je absolutní hodnota exponentů, tím produktivněji probíhá proces broušení, tj. brusný kotouč je řezivější nebo materiál brusitelnější.
2. Čím menší jsou konstanty, tím lepšího výsledku se dosáhne.

100Cr6 (1C 143Cr)		HR _C 62-63	EK60L7VX	E 52.2 kN/mm ²	
d _s (mm) 665-720	v _s (m/s) 30-45-60	SB-C 3%			
d _w (mm) 83-100	q (v _s /r _w) 2080/120	Q ₁ (l/min·mm ²) 2			
d _e (mm) 80	V _w (mm ³ /mm) 500	p _f (atm) 2			
b (mm) 30	k _m (N/μm) 49	A (BF/s) 0.093	C (BF) 36.5		



Obr. 28b

Diagram broušení a nomogram řezných podmínek

3. Čím nižší je e_{OM} odpovídající $h_{eq} = 0,1 \mu m$, tím úspěšněji, s nižší energetickou náročností, probíhá proces broušení.

Diagram broušení umožňuje porovnávání výsledků zkoušek získaných při práci s různými kombinacemi brusný kotouč - obrobek. Tím jsou dány též předpoklady pro výměnu výsledků zkoušek prováděných různými laboratořemi a stává se tak základem pro vytváření banky dat. Zvlášť významná je jeho praktická aplikace, která plyne z doplnění o nomogram, z něhož lze provést přímý převod ekvivalentní tloušťky odebírané vrstvy na jednotkový objem odebraného kovu Q_1 , na příčný posuv v_p , či tloušťku odebírané vrstvy vyjádřit jako funkci rychlosti brusného kotouče v_k a průměru obrobku d nebo rychlosti stolu v_o . Je zřejmé, že uvedené parametry musí být pro zvolený stroj známy.

Informace získané z diagramu broušení mohou být také použity pro ekonomickou optimalizaci brusných operací.

Při pokusu o kritické posouzení diagramu broušení je nutno především ocenit jeho přednosti. K nim patří skutečnost, že jde o jednu z mála metod komplexně postihujících vzájemné působení dvojice brusný kotouč - obrobek. Tím se stává jak měřítkem řezivosti tak i brusitelnosti, jak to vyplývá z dodatkových údajů v záhlaví diagramu. Současně se diagramem dostáváme ke splnění jednoho z požadavků uvedených Říčkou [8] pro roztrídění výzkumných prací v oboru broušení, a to požadavku nejobtížnějšího: vyhledání vzájemné vazby mezi dílčími fyzikálními vlastnostmi a funkčními vlastnostmi brusného kotouče.

Jistým a to dosti závažným nedostatkem diagramu broušení je skutečnost, že může být sestaven na základě obsáhlého laboratorního měření, které je v provozních podmínkách jen obtížné, ne-li vůbec realizovatelné. Avšak i laboratorně stanovené diagramy broušení by měly pro praxi značný význam.

Další nedostatek lze spatřovat v tom, že v diagramu je jen velmi málo údajů o použitém stroji a to jen jeho tuhost. Je to údaj z hlediska procesu broušení nejdůležitější. O přesnosti a dalších údajích se předem předpokládá, že jsou v normě.

Nyní lze učinit pokus, shrnout poznatky získané z odborné literatury k danému problému, publikované zejména v ne-

dávné době. Shrnutím vznikla přehledná tabulka Tab. III. použitých vztahů, jejich pojmenování s uvedením autora, označením literárního pramene a čísla vztahu v textu. Autor se nevěnoval historickému zkoumání původu jednotlivých vzorců a uvádí je proto v tabulce tak, jak byly v citované literatuře uvedeny s tím, že použil jednotného způsobu označení pro snadné srovnávání.

Tabulka překvapivě ukazuje na značné množství kritérií pro hodnocení pracovních schopností brúsého nástroje, které jen v poslední době poskytla autorovi dostupná literatura. Ukazuje se také, že někteří autoři zdůrazňují použití již dříve sestaveného vztahu či kritéria a doplňují je o údaje další.

Z toho názorně vyplývá, že každý pokus, přidat nové kritérium musí být všestranně zváženo, aby přinesl možnost přesnějšího, snazšího, objektivnějšího, praktičtějšího, přístrojově nenáročného hodnocení řezivosti brúsého nástroje. Přesto, že existují tato přísná měřítka pokusí se autor o návrh vlastního kritéria.

Tab. III. Kriteria pracovní schopnosti brusných nástrojů

Rok	Autor	Vzorec	Pojmenování	Číslo
		$Q = \frac{V_o}{t}$	Výkon broušení	2
		$q = \frac{Q}{p}$	Měrný výkon broušení	3
	Schlesinger [25]	$m = \frac{V_o}{V_k}$	Poměrný objemový obrus	4
	"	$\bar{m} = \frac{V_k}{V_o}$	Měrná výrobnost ko- touče	20
	Norton [25]	$m_N = C_N \frac{V_o^2}{V_k}$	Kvadratický poměrný obrus	21
1953	Majkus [24]	$K = \frac{v_p}{F_y}$	Řezivost	19
1957	Kölner [9]	$K = \frac{v_p}{F_y}, K_z = \frac{v_p}{F_z}$	"	
1969	Lur'je [25]	$k_p = \frac{Q}{F_y}$	Řezná schopnost	25
	"	$k_p = k_o \cdot e^{-\lambda t}$	Vliv trvanlivosti	26
	"	$R = \frac{k}{\lambda \cdot \theta}$	Komplexní řezivost	27
1971	Říčka [10]	$F_y \cdot t^k = a_k$ k, c_k	Rovnice vyjiskřovací křivky Koeficienty řezivosti	28
1974	Maslov [1]	$k_p = \frac{Q}{F_y}$ $k_s = \frac{Q_k}{F_y}$ $\mu = \frac{F_z}{F_y}$ $k_u = \frac{Q}{Q_{vyp.}}$	Koeficient řezivosti Koeficient samoostření Koeficient broušení Koeficient úběru ma- teriálu	25 29 30 31

Rok	Autor	Vzorec	Pojmenování	Číslo
1974	CIRP [29] Snoeys Peters Decneut	$h_{eq} = h \frac{v_o}{v_k} = \frac{Q_1}{v_k} = \frac{h}{q_v}$	Ekvivalentní tloušťka odebírané vrstvy	74 77 79
		$R_a = R_{al} \cdot h_{eq}^r$		80
		$m = m_1 \cdot h_{eq}^w$		81
		$Q_1 = Q_{11} \cdot h_{eq}^u$	Diagram broušení - řezivost a brusitelnost dána konstantami (R_{al} , m_1 , Q_{11} , F_1) a exponenty (r , w , u , f)	82
		$F_{y1} = \frac{F_{11}}{\mu} \cdot h_{eq}^f$		83
		$F_{z1} = F_{11} \cdot h_{eq}^f$		84
		$e = F_{11} \cdot h_{eq}^{f-1}$		85
		$e_{0,1} = 10 \cdot F_{z1}$	Měrná energie broušení pro $h_{eq} = 0,1 \mu m$	
1975	Hahn [27]	$S = \frac{\Delta o}{v_k}$	Ostrost	58
	Marshall Shaw [28]	$e_{Ms} = \frac{F_z \cdot v_k}{Q}$	Měrná energie broušení	68
1977	Armarego Brown [28]	$m = \frac{v_o}{v_k}$	Měrná výrobnost	4
		$g = \frac{m}{P}$	Charakteristika brusitelnosti	71
		$\gamma = \frac{m}{P_{11} \cdot R_a}$	Poměrný koeficient brusitelnosti	72
	Mc Kee [25] Moore Boston	$\gamma = \frac{m}{P_{11} \cdot R_a}$	Poměrný koeficient brusitelnosti	22
	Wolfram [25] Takadzawa Yokojama	$k_w = \frac{F_{z1}}{\bar{m}}$	Ukazatel síly a měrné výrobnosti	23

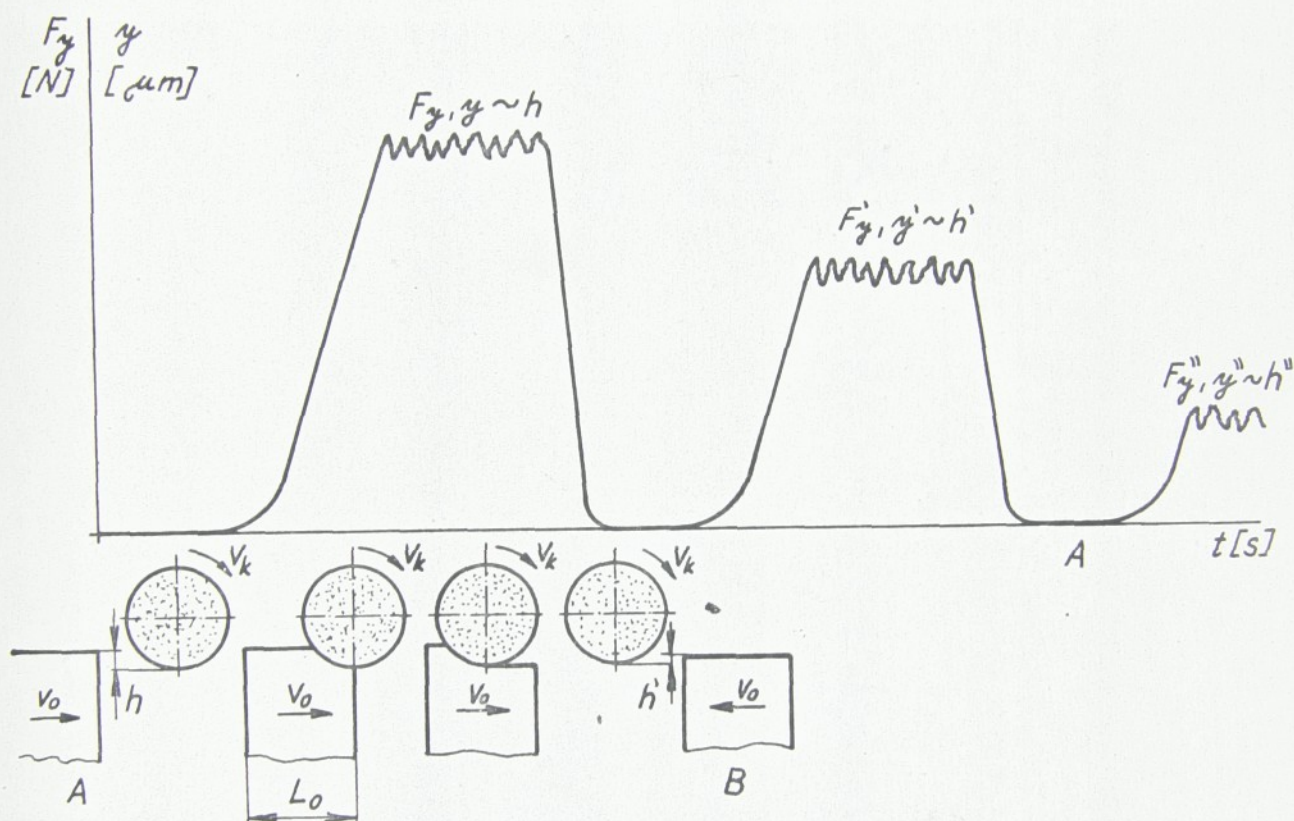
IV. Experimentální výzkum řezivosti brusných kotoučů

Po objasnění některých problémů, spojených se zvláštnostmi procesu broušení a stavby brusného nástroje, byla věnována pozornost kritériím a metodám dosud navrženým pro hodnocení řezivosti. Tento souhrn poznatků a jejich rozbor se stal základem pro vypracování vlastního návrhu kritéria a metodiky sloužící k ocenění pracovní schopnosti brusného nástroje, t.j. jeho řezivosti.

1. Volba kritéria řezivosti

Pro návrh kritéria řezivosti byl vzat za základ cyklus broušení, jež byl podrobně rozebrán v pracích Maslova [13], Říčky [10], Šalnova [26], Hahna [27] a to vždy pro proces válcového broušení zápichem, platný jak pro vnější, tak i vnitřní plochy. Protože autor zkoumá řezivost brusných kotoučů pro případ rovinného broušení obvodem brusného kotouče, budou nejdříve uvedeny odlišnosti tohoto způsobu od výše uvedených. Popis vychází z předpokladu, že se broušení realizuje zápichem, t.j. šířka brusného kotouče B je větší než šířka obrobku, jež odpovídá okamžité šířce broušení B_0 . Tento proces broušení se zpravidla realizuje jako přerušovaný /viz obr. 29/. To znamená, že obrobek z výchozí polohy /krajní úvratě stolu A / se přiblíží na dotyk k brusnému kotouči. V tomto časovém úseku se t.zv. „brousí vzduch“. Od okamžiku dotyku začíná fáze vřezávání. Řezná síla roste, dochází k oddálení, napružení systému S-N-O-P. Po ukončení vřezávání dochází k ustálenému ději, brusný kotouč odebírá určitou, více méně stálou vrstvu materiálu obrobku. Dosáhne-li brusný kotouč konce obrobku, nastává etapa jeho vycházení z obrobku, spojená s poklesem řezné síly a uvolněním napružení systému. Obrobek přejíždí určitou vzdálenost za brusný kotouč do druhé krajní úvratě B , odkud se vrací zpět ke kotouči. V této etapě se opět „brousí vzduch“ až do okamžiku dotyku obrobku a kotouče. Pokud se první část cyklu realizovala jako broušení protisměrné,

pak se druhá část uskuteční jako broušení sousměrné. Nedošlo-li v druhé krjní úvratí k přísuvu kotouče do řezu, proběhne druhá etapa za menších řezných sil a napružení soustavy. Když se přísuv neuskuteční v žádné z dalších úvratí, lze postupný pokles řezných sil, zejména její radiální složky F_y a procesy s tím spojené, považovat za vyjiskřování.

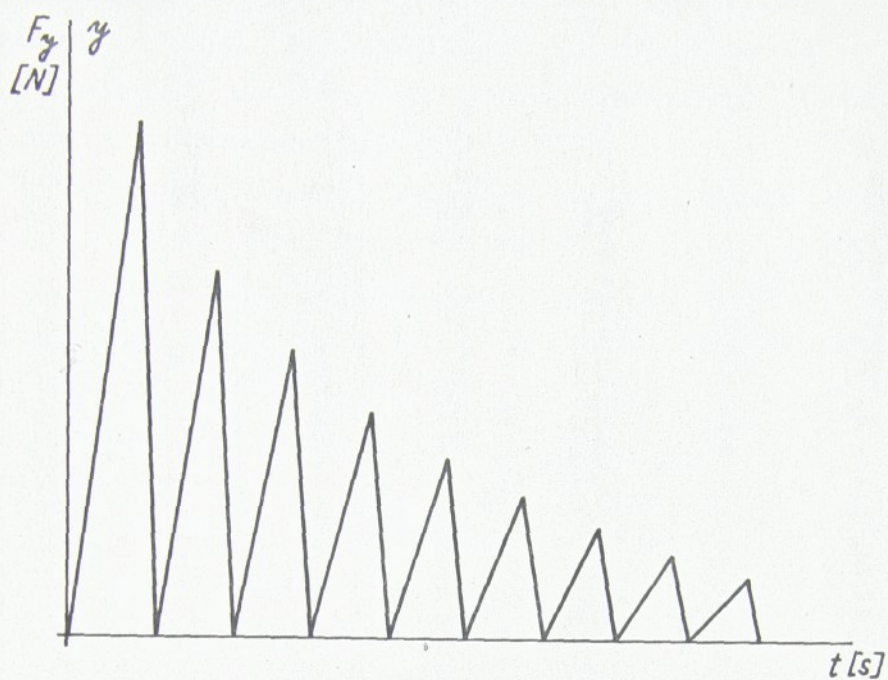


obr. 29

Cyklus rovinného broušení obvodem kotouče

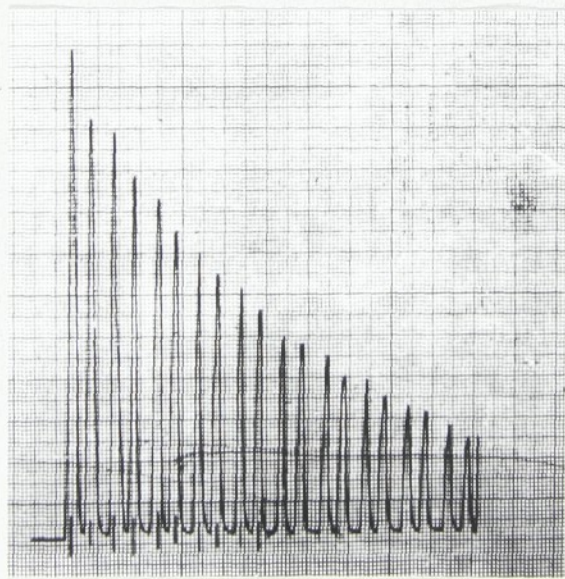
Znázorníme-li tento cyklus graficky, pak i když zůstanou zachovány zásady dříve uvedených cyklů, bude jeho průběh odlišný svými přerušeními. Na obr. 29 jsou k jednotlivým etapám připojeny schématické náčrty vzájemného postavení obrobku a brusného kotouče.

Takový záznam cyklu broušení lze získat použitím vhodného dynamometru zejména pro měření radiální řezné síly F_y a řezným podmínkám, zvláště rychlosti v_0 , odpovídající časové základně.



obr. 30

Znázornění průběhu vyjiskřování při rovinném broušení

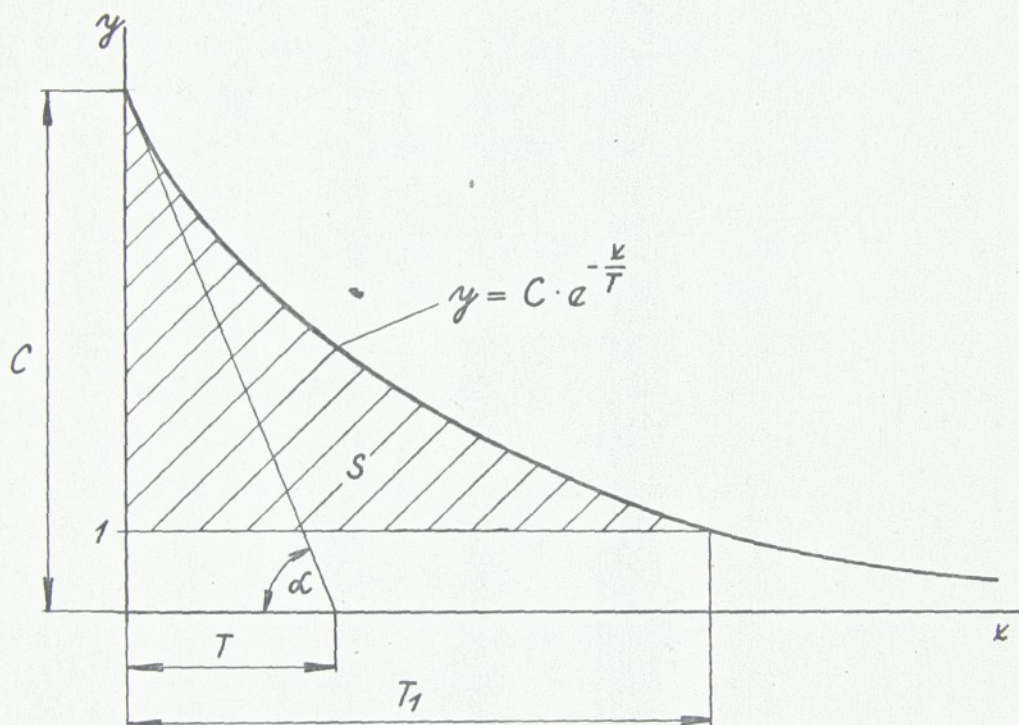


obr. 31

Skutečný průběh vyjiskřování při rovinném broušení

Změníme-li časovou základnu a upravíme vzdálenosti prázdného chodu, lze jednotlivé křivky změnit v pilový tvar a získat tak záznam, jehož znázornění ukazuje obr. 30. Skutečný záznam pak je na obr. 31.

Pro matematický rozbor je nutno jednotlivými vrcholy proložit křivku, kterou lze označit jako vyjiskřovací. Výhodné bude také posunout počátek souřadného systému, resp. svislou osu tak, aby probíhala vrcholem prvního záznamu. Tuto situaci znázorňuje obr. 32.



obr. 32

Zjednodušená vyjiskřovací křivka

Tím dostala vyjiskřovací fáze u rovinného broušení obvodem kotouče přibližně stejný charakter jako u zapichovacího vnitřního či vnějšího válcového broušení.

Podobně jako v pracech Šalnova [26] a Hahna [27] může být tvar vyjiskřovací křivky popsán exponenciální rovnicí

$$y = C \cdot e^{-\frac{x}{T}} \quad /86/$$

kde C ... konstanta, odpovídající úseku na ose y
 T ... časová konstanta, subtangenta úhlu α
 Lze-li pomocí vhodného měřicího zařízení stanovit průběh vyjiskřovací křivky např. jako $F_y = f/t$ potom dostane rovnice /86/ podobu

$$F_y = C e^{-\frac{t}{T}} \quad /87/$$

V obou případech jsou konstanty C, T údaji, které rozhodují o tvaru křivky a její poloze v souřadnicích x, y či t, F_y .

Po tomto popisu vyjiskřovací fáze cyklu broušení musí být nyní zodpovězena otázka, proč právě tato fáze je zajímavá a vhodná pro posouzení pracovních schopností brusného nástroje.

Odpověď je možné najít nejen v pracích zde citovaných [1, 10, 26, 27] a v mnoha dalších výzkumných zprávách, ale také v praktických zkušenostech brusičů. Pro zpřesnění této odpovědi můžeme použít obr. 21, kde Maslov pro vyjiskřovací fázi uvádí tři její možné průběhy:

- vyjiskřování bez přísuvu - křivka 4 /střední/
- vyjiskřování zpomalené - křivka 5 /horní/
- vyjiskřování zrychlené - křivka 6 /dolní/

Zde je různý průběh vyjiskřování dosažen změnou režimních podmínek pro týž brusný kotouč.

Lze snadno experimentálně dokázat, že různé brusné kotouče při broušení stále stejného materiálu na témž stroji mohou mít podle svých pracovních schopností, jimiž se při realizaci procesu broušení komplexně projevují, také různé průběhy vyjiskřovací fáze. Použijeme-li pro označení pracovních schopností pojmu řezivost, pak kotouč vyvíkající velkou řezivostí provede vyjiskřování zrychlené /viz křivka 6/ se střední řezivostí podle křivky střední /ozn. 4/ a s malou řezivostí se realizuje vyjiskřování zpomalené.

Na tomto základě je postavena myšlenka využít vyjiskřovací fázi a její vhodné vyhodnocení jako měřítko řezivosti brusných kotoučů. Neboť v této části cyklu brou-

šení, kdy proces oddělování třísky prochází všemi etapami od řezání k rytí, až ke tření vrcholů o povrch obráběného materiálu, se nejlépe zrcadlí schopnost brusného kotouče obrábět - brousit, tedy vykázat svou řezivost.

Pro vyhodnocení křivky vyjiskřování mohou být použity různé metody, kriteria či ukazatele. Jedna z možností je uvedena Říčkou [10] /viz kap. III. 4./, kdy řezivost kotoučů je dlišena pouze různou hodnotou konstanty c_k a exponentu k /viz/28/ /.

Tento způsob je správný, má jen nevýhodu v tom, že k ocenění řezivosti jsou nutné dva údaje, jež při zavedení do praxe by přinášely obtíže. Byly proto učiněny pokusy vyhledat takové ukazatele, byť uměle vytvořené, které by označovaly, oceňovaly řezivost jedinou hodnotou, jediným číslem.

Na základě rozboru vyjiskřovací křivky a jejího matematického popisu podal Matoušek [33] návrh na použití tří kriterií: strmosti, časové konstanty a počátečního impulsu.

Kriterium strmosti rozhoduje o tom, který z brusných kotoučů je řezivější podle toho, který z nich má strmější křivku. Její strmost může být vyjádřena velikostí úhlu /obr.32/. Potom lze říci: čím je brusný kotouč řezivější, tím má strmější křivku a také větší úhel α . Velikost úhlu α může být snadno vypočtena ze vztahu

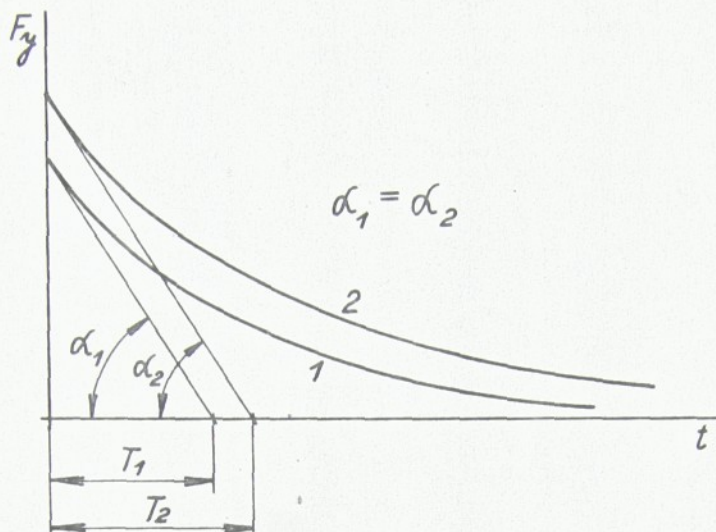
$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{C}{T} \quad /88/$$

a tento poměr označen za kriterium strmosti.

Toto kriterium však nepostihuje položení křivky vzhledem k souřadnému systému, lze jej použít jen v případech, kdy se počáteční síla F_y nebude u porovnávaných kotoučů příliš lišit. To lze předpokládat u kotoučů stejného druhu a tím je také předurčena použitelnost tohoto kriteria.

Kriterium časové konstanty rozlišuje řezivost podle velikosti subtangenty T . Čím je menší T , tím řezivější je brusný kotouč. Z toho je zřejmé, že kotouče, které vykazují

stejnou řezivost podle kriteria strmosti, t.j. mají stejný úhel α , se rozliší různou hodnotou T . Ta rozliší různou polohu vyjiskřovací křivky vůči svislé ose souřadného systému. Názorně to ukazuje obr. 33.



obr. 33

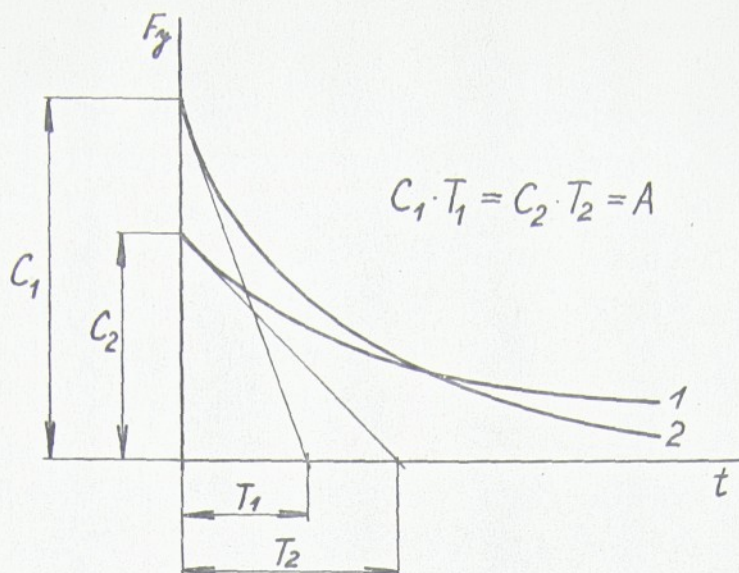
Použití kriteria časové konstanty

Z toho vyplývá podobná použitelnost jako pro kriterium strmosti - pro kotouče stejného typu.

Kriterium počátečního impulsu patří k nejobjektivnějším z dosud uvedených, neboť zahrnuje jak hodnotu počáteční síly, tak i časovou konstantu. Vznikne vlastně jejich součinem, takže platí

$$A = C \cdot T \quad /89/$$

Z této stavby kriteria vyplývá, že čím menší je hodnota A , tím větší je řezivost. Nedostatkem tohoto kriteria je to, že pro dvě různé křivky může být kriterium počátečního impulsu stejné. Takto by pak nebylo možné odlišit dva kotouče, vykazující různou řezivost, a tedy i různou vyjiskřovací křivku. Na obr. 34 je tento případ zakreslen. Kotouč 1 pracuje s větší počáteční silou F_y , tedy $C_1 > C_2$. Může být považován za méně řezivý, avšak daný úběr realizuje v kratším čase. Protože tato druhá podmínka odpovídá definici řezivosti více, lze kotouč 1 považovat za řezivější.



obr. 34

Použití kriteria počátečního impulsu

Úpravu kriteria počátečního impulsu navrhl Jirsa [34]. S ohledem na to, aby číselná velikost kriteria byla přímo úměrná rezivosti, doporučil používat jeho převrácenou hodnotu:

$$B = \frac{1}{A} = \frac{1}{C \cdot T} \quad /90/$$

Potom bude platit, že čím větší je B , tím je větší rezivost brusného kotouče. Toto změněné kriterium však neodstranilo nedostatky předešlého kriteria.

Všechna uvedená kriteria rozliší jednotlivé brusné kotouče stejného typu, avšak každé kriterium určí kotoučům různé pořadí. To znamená, že když kotouč podle kriteria strmosti obsadil 1. místo ze zkoušených kotoučů, pak podle kriteria časové konstanty byl třeba na 3. místě a podle kriteria počátečního impulsu až na místě posledním.

V důsledku těchto nedostatků, které vyplynuly z prací Matouška [33], Jirsy [34] a Středy [35], jejichž vedoucím konzultantem byl autor, se objevila nutnost navrhnout nové kriterium, které by lépe vyplňovalo požadavky na ně kladené.

Jak se ukázalo v předešlém rozboru, je rozhodující správně vyjádřit tvar vyjiskřovací křivky a její polohu v souřadnicích x, y , případně t, F_y . Navíc je nutno akceptovat požadavek učinit tak kvantitativně, t.j. jedním

číslem, jež by splňovalo přímou úměrnost: čím bude větší, tím bude řezivější takto označený brusný kotouč. Mimo to nesmí dojít ke stejnému ocenění dvou různých křivek.

Při konstrukci tohoto uměle vytvořeného kvantitativního kritéria vyšel autor z hlavní zásady, že řezivější je ten kotouč, jehož křivka je strmější a v daných souřadnicích níže položena. Z toho vyplývá, že plocha pod křivkou vyjiskřování je co nejmenší. Tuto plochu lze považovat za kvantitativní vyjádření práce vynaložené na proces vyjiskřování, proto i práce vyjiskřování je nejmenší. Samotná plocha pod křivkou nemůže stačit k rozlišení kotoučů, protože pod dvěma různými křivkami může být stejná plocha. Proto bylo navrženo spojit tuto plochu s charakteristikou křivky pod níž vznikla, t.j. s kriteriem strmosti. Tak vznikne kritérium strmosti práce.

$$U \approx 10^5 \frac{\operatorname{tg} \alpha}{S} \quad /91/$$

Platí-li vztah /88/ a dále, když

$$S = \int_0^{T_1} y \, dx \quad /92/$$

$$S = \int_0^{T_1} C \cdot e^{-\frac{x}{T}} \, dx \quad /93/$$

$$S = -C \cdot T \left(1 - e^{-\frac{T_1}{T}} \right) \quad /94/$$

$$T_1 = T \cdot \ln C \quad /95/$$

$$\ln C = \frac{T_1}{T} \quad /96/$$

$$S = -CT \left(1 - e^{-\ln C} \right) \quad /97/$$

Potom po dosazení do /91/ bude

$$U = \frac{10^5}{T^2 (1 - e^{-\ln C})} \quad /98/$$

Poslední výraz /98/ je určen pro zpracování nemnoha měření s použitím některého dokonalejšího typu kalkulačky. Pro zpracování na číslicovém počítači lze použít vztahu

$$U = \frac{10^5 \cdot C}{T \int_0^1 C \cdot e^{-\frac{x}{T}} dx} \quad /99/$$

Navržené kritérium splňuje výše uvedené podmínky. Konstanta 10^5 upravuje výsledek na hodnoty řádově 10^2 . Tedy jedním, dobře pamatovatelným číslem, je vyjádřena řezivost. Pro toto kvantitativní vyjádření dále platí, že čím větší je U , tím větší je řezivost brusného kotouče; splňuje se další požadavek - přímá úměrnost. Silně byla omezena možnost shodné řezivosti u kotoučů s různou vyjiskřovací křivkou, i když nebyla vyloučena.

Na základě podobných úvah je možné vytvořit další kritérium, které rovněž používá velikosti plochy pod křivkou. Jeho rovnice má tvar

$$R = \frac{10^6}{S \cdot T_1} \quad /100/$$

Dosazením z rovnice /94/ a /95/ bude

$$R = \frac{10^6}{-CT (1 - e^{-\ln C}) \cdot T \cdot \ln C} \quad /101/$$

a po úpravě

$$R = \frac{10^6}{-CT^2 (1 - e^{-\ln C}) \cdot \ln C} \quad /102/$$

Výraz vznikl jako převrácená hodnota součinu plochy pod křivkou a konstanty T_1 . Tato volba má opodstatnění v tom, že je zvýrazněn význam plochy pod křivkou, jako důležitého činitele rezivosti. Spojení s konstantou T_1 , která vyjadřuje časový úsek, v němž pokles radiální síly, resp. oddálení soustavy, v průběhu vyjiskřování dosáhl hodnoty $F_y = 1 = y$, se zdůrazňuje tvar vyjiskřovací křivky, zejména její konečné fáze.

Shrnutím kritérií vycházejících pouze z tvaru vyjiskřovací křivky lze si učinit představu o možnostech matematického i spekulativního hodnocení rezivosti z této křivky vyplývající. V další části práce budou rozboru podrobena tato kritéria uvedená rovnicí /86/ a obr.32:

$$y = C \cdot e^{\frac{-x}{T}} \quad /86/$$

C ... konstanta

T ... kritérium časové konstanty

$T_1 = T \cdot \ln C$ kritérium časového úseku

$\operatorname{tg} \alpha = \frac{C}{T}$ kritérium strmosti

$A = C \cdot T$ kritérium počátečního impulsu

$U = \frac{10^5 \cdot \operatorname{tg} \alpha}{S}$ kritérium strmosti práce

$R = \frac{10^6}{S \cdot T_1}$ kritérium časového objemu práce

2. Metodika měření

Pro splnění výše popsaného úkolu - stanovit výše uvedená kritéria pro soubor brusných kotoučů při rovinném broušení obvodem kotouče a ověřit tak jejich platnost a životaschopnost - bylo především třeba změřit vyjiskřovací křivku jako závislost radiální složky řezné síly v závislosti na čase. Druhou etapou pak je matematické zpracování naměřených údajů a třetí představuje jejich vyhodnocení.

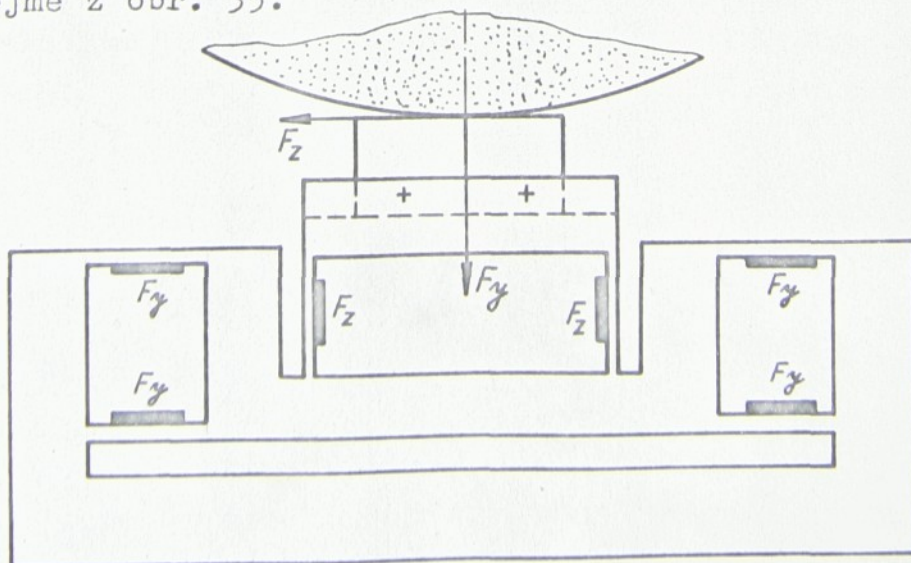
Všeobecně řezivost může být stanovována u výrobce brusných kotoučů na testovacím stroji a spotřebitelé by si její údaje modifikovali podle svého strojního vybavení, zejména podle tuhosti brousícího stroje, na němž by se broušení realizovalo. Dosavadní stav neumožňuje tento postup uskutečnit.

Druhou možností je zjišťovat řezivost u spotřebitele přímo na daných strojích. Je to postup obvyklejší zejména v těch případech, kdy jsou kladeny zvláštní nároky na přesnost a drsnost obrobku a potom u strojů vybavených automatickým pracovním cyklem. U posledně jmenovaných strojů lze požadavek stanovení řezivosti vidět jako nezbytnou nutnost.

Měření vyjiskřovací křivky jako závislosti $F_y = f t$ bylo provedeno v podmínkách, odpovídajících druhé možnosti, t.j. stanovení řezivosti u spotřebitele. Pro jeho realizaci je třeba kromě stroje a brusných kotoučů mít též vhodné měřicí a registrační zařízení pro měření řezné síly F_y , t.j. dynamometr.

Dynamometr

Pro tyto účely měření byl použit dvousložkový tenzometrický dynamometr, zkonstruovaný autorem [36] a vyrobený v dílenských laboratořích katedry obrábění a ekonomiky VŠST v Liberci. Základní konstrukční schéma dynamometru je zřejmé z obr. 35.



obr. 35

Dynamometr pro rovinné broušení

Dynamometr měří radiální a tengenciální složku řezné síly v těchto rozsazích:

$$F_z = 0,34 \text{ až } 350 \text{ N}$$

$$F_y = 1,33 \text{ až } 600 \text{ N}$$

Citlivost dynamometru byla zjišťována ve spojení s ostatní měřicí a registrační aparaturou, jak ji na blokovém schematu ukazuje obr. 36. Vyjádříme-li citlivost jako sílu, která při největším zesílení na aparatuře TDA 3 /bez zesilovačů/ způsobí výstupní signál 10 mV, který stačí u souřadnicového zapisovače ENDIM 2002/1 způsobit výchylku pisátka ve svislém směru 250 mm, pak bude:

$$C_{F_z} = 0,34 \text{ N/10 mm výchylky}$$

$$C_{F_y} = 1,33 \text{ N/10 mm výchylky}$$

Tuhost dynamometru byla ověřována cejchovacím siloměrným zařízením. Průhyb pružných elementů dynamometru byl měřen tisícínovým číselníkovým úchylkoměrem. Každé měření bylo třikrát opakováno vždy se shodným výsledkem. Pro složky F_z a F_y byly stanoveny tyto tuhosti

$$c_{F_z} = 6,47 \text{ N} \cdot \mu\text{m}^{-1}$$

$$c_{F_y} = 24,5 \text{ N} \cdot \mu\text{m}^{-1}$$

Vzájemné ovlivňování složek zjišťované při tomto měření nepřesáhlo v celém měřicím rozsahu 2%.

Dynamické údaje dynamometru vyjádřené vlastní frekvencí ve směru složky F_z a F_y byly ověřovány pomocí piezoelektrických snímačů. Jejich frekvence byla porovnávána s kontrolní frekvencí 1000 Hz a odtud výpočtem získána frekvence:

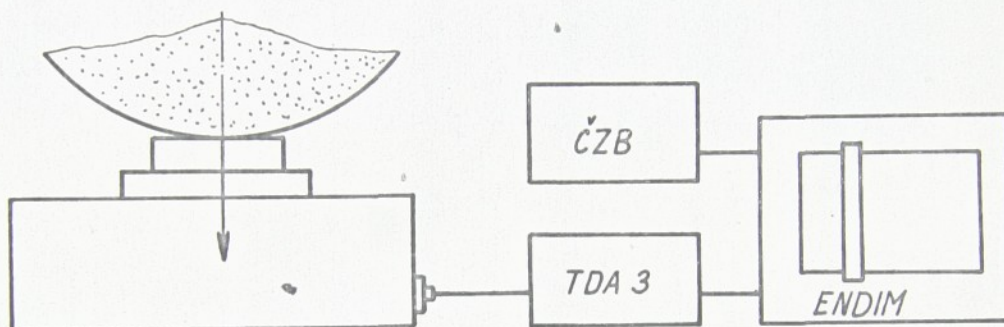
$$f_{F_z} = 483 \text{ Hz}$$

$$f_{F_y} = 502 \text{ Hz}$$

Registrační zařízení

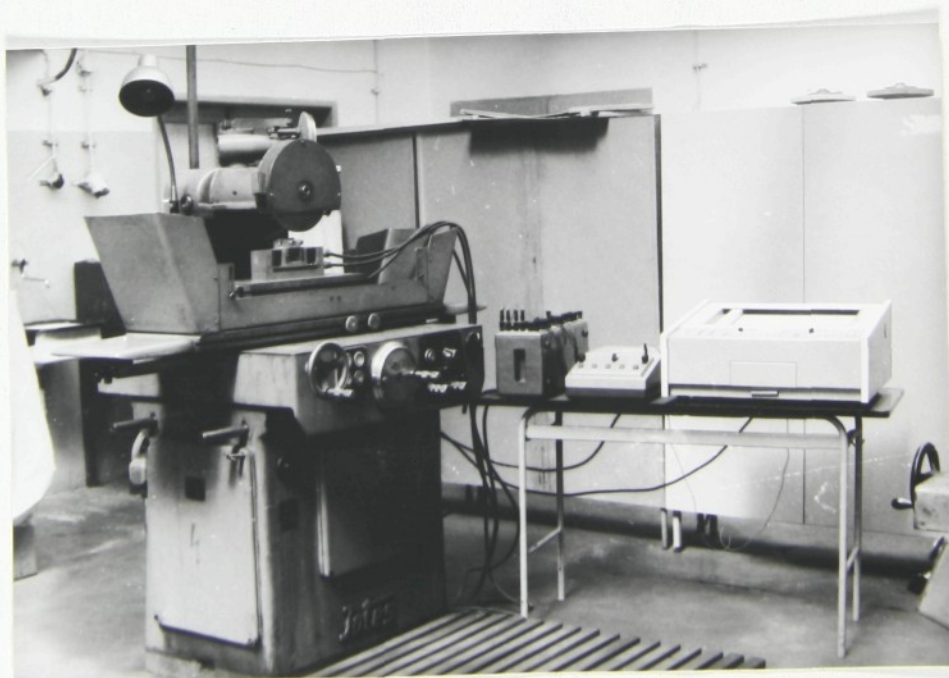
Pro potřebu stanovení vyjiskřovací křivky byla měřena jen radiální složka řezné síly F_y . Signál získaný z tanzometrů při zatížení dynamometru touto silou byl

zpracován v tenzometrické dynamické aparatuře typ TDA 3, výrobek n.p. Mikrotechna Praha, a předán k registraci na spojitý souřadnicový zapisovač ENDIM 2002/1, výrobek VEB Messapparatenwerk Schlotheim, NDR. Tento signál zajišťuje pohyb pisátka ve směru svislé osy $y / F_y /$. Jeho vodorovný pohyb je řízen časovou základnou přiváděnou z frekvenčního generátoru ČZB, výrobek ARITMA Praha. Blokové schéma aparatury představuje obr. 36, celkový pohled na měřicí pracoviště obr. 37 a detail instalovaného dynamometru obr. 38.



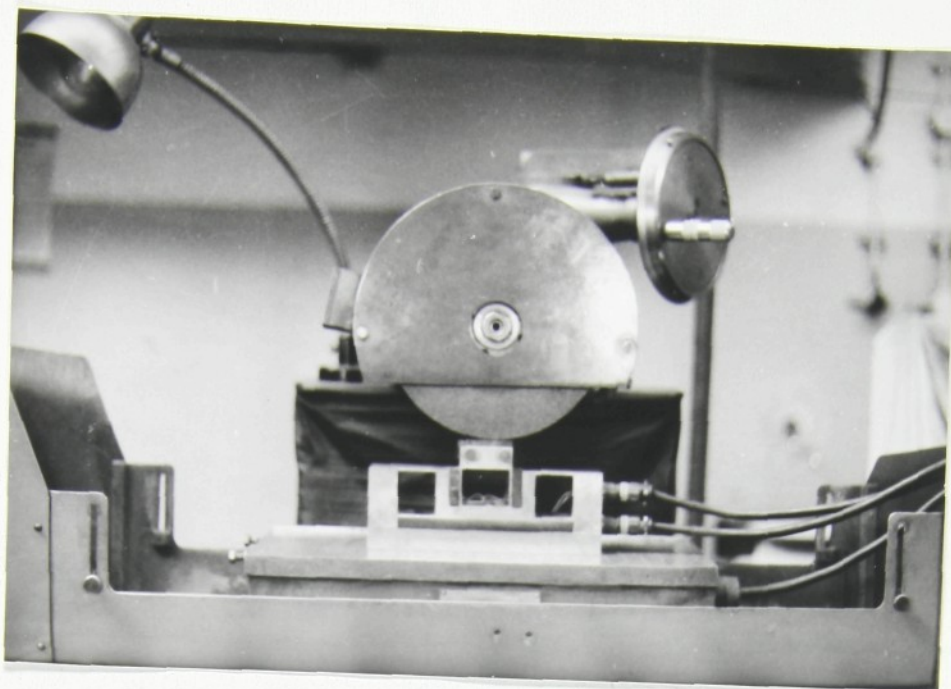
obr. 36

Blokové schéma měřicí aparatury



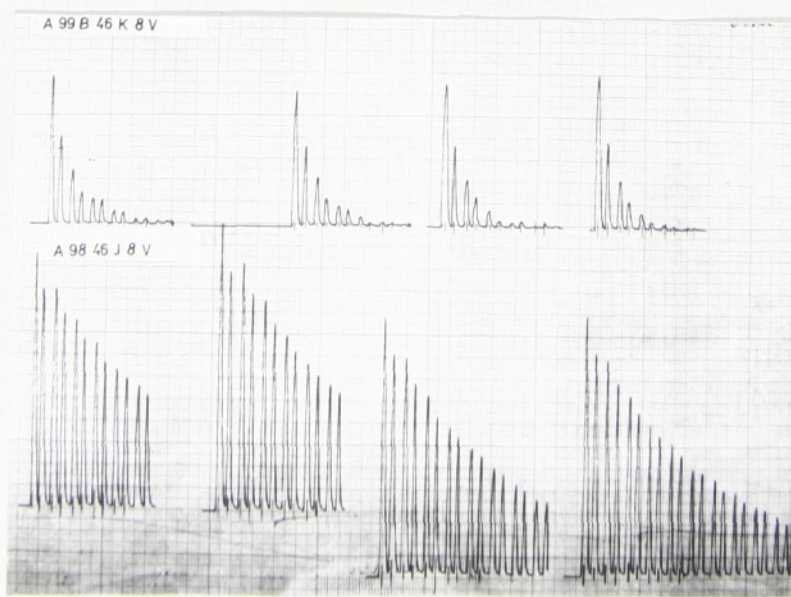
obr. 37

Měřicí pracoviště



obr. 38
Dynamometr

Vzájemnou kombinací pohybu písátka zapisovače ve svislém směru, řízeném signálem z dynamometru a ve vodorovném směru, řízeném časovou základnou, vznikne záznam, jehož příklad je uveden na obr. 39. Tento záznam byl opakován pro každý brusný kotouč a pro každou změnu řezných podmínek vždy pětkrát.



obr. 39
Záznam vyjiskřovací křivky ze zapisovače

Obrobek

S ohledem na to, aby po vřezání brusného kotouče do obrobku byla dána dostatečně dlouhá doba na ustálení brusného procesu a také vzhledem k upínacímu prostoru a vlastnostem dynamometru může být vzorek dlouhý 30 až 60 mm. Šířka vzorku se řídí podle šířky brusného kotouče. Pro zkoušky byly použity kotouče široké 20 mm. Protože se realizuje broušení zápichem, byla šířka vzorku 16 mm. Výška vzorku s ohledem na možné rozdíly v klopném momentu od síly F_y se doporučuje zvolit nejvýše 30 mm. Na základě těchto úvah byly vzorky vyrobeny z materiálu 12 050.0 o rozměrech 40 x 25 x 16 mm z jedné tyče materiálu pro zachování pokud možno stejných vlastností. Obrobek se upíná do drážky dynamometru dvěma upínacími šrouby.

Brusné kotouče

Hlavním cílem práce bylo ověřit použitelnost navrženého kritéria řezivosti. Současně se však naskytala možnost ověřit vliv některých fyzikálně - mechanických vlastností brusných kotoučů. Z nich byla za nejvýraznější a v praxi nejvíce používaný údaj technické charakteristiky těchto nástrojů vybrána tvrdost.

Všechny kotouče ČSN 22 45 10 o rozměrech 250x20x76 mm byly vyrobeny z taveného kysličníku hlinitého označené A 99, stejné zrnitosti 46 a pojené keramickým pojivem V. Malé rozdíly, vzniklé při výrobě, byly ve struktuře, která se lišila o 2 stupně, t.j. 7 až 9.

Laskavostí výrobce n.p. Závody na výrobu karborunda a elektritu v Benátkách nad Jizerou byly pro potřeby výzkumu vyrobeny kotouče tvrdosti J, K, L, N a to v každé skupině 10 kusů. Výrobce označil podle svých zvyklostí každý kotouč technickou charakteristikou a navíc provedl pečlivá měření tvrdosti metodou Zeiss-Mackensen na přístroji TF - 21. Měření bylo provedeno na každém kotouči 5 x a průměrné hodnoty hloubky důlku jsou uvedeny v tabulce /Tab. IV/. Podle této míry byly kotouče označeny číslem

Tab .IV

Přehled použitých brusných kotoučů

KOTOUČ	Ozn.	Hloubka důlku		Dynam.tvrđost		Modul pružnosti	
		h_M [mm]	Pořadí	HD	Pořadí	E [GPa]	Pořadí
A 99 46 J 9 V	J 2	2,73	4	262	1	38,89	3
	J 3	2,60	6	300	2		
	J 4	2,53	7	301	3	35,53	1
	J 5	2,13	8	329	4	38,34	2
A 99 46 K 9 V	K 2	1,63	10	387	8	45,86	9
	K 3	1,55	14	335	5	43,07	5
	K 4	1,50	15	403	10		
	K 5	1,50	16	434	12	44,07	6
A 99 46 L 8 V	L 2	2,88	1	433	11	51,19	11
	L 3	2,85	2	399	9	46,60	10
	L 4	2,82	3	385	6		
	L 5	2,72	5	387	7	44,85	7
A 99 46 N 7 V	N 2	1,65	9	579	13	62,40	13
	N 3	1,60	11	606	14	62,72	14
	N 4	1,58	12	608	15		
	N 5	1,55	13	621	16	63,15	16

1 - 10 a ve spojení s původním označením tvrdosti vzniklo doplňující označení, na př. J 2, K 5. Odtud potom vyplývá, že čím je číslo vyšší, tím je kotouč tvrdší.

Do tabulky byl dále zanesen údaj označený HD a definovaný jako dynamická tvrdost zjištěná metodou podle Collwela. Její popis je uveden v kapitole II.4. Autorem byl zkonstruován a v dílenských laboratořích katedry obrábění a ekonomiky VŠST v Liberci vyroben a vyzkoušen přístroj realizující definici dynamické tvrdosti. S přístrojem byla provedena rozsáhlá měření [37] pod autorovým vedením právě na kotoučích výše uvedených. Výsledky těchto měření jsou dalším porovnávacím kritériem, jímž lze hodnotit pracovní schopnosti brusného nástroje.

Pro měření rezivosti byly z každé skupiny vybrány čtyři kotouče se vzestupnou tvrdostí, jak to ukazuje tab.IV.

Tabulka byla dále doplněna údajem o modulu pružnosti E, jež je považován za nejpřesnější ukazatel tvrdosti brusných nástrojů. Pro naměření uvedených údajů bylo použito přístroje Perio-Timer, výrobek výzkumného ústavu GTI v Budapešti, MLR.

Odtud je zřejmé, že výrobcem vyznačená tvrdost neodpovídá tvrdosti, která byla změřena metodou Zeiss-Mackensen. Proto bylo do tabulky zařazeno ještě pořadí kotoučů podle hloubky důlku, podle dynamické tvrdosti HD a podle modulu pružnosti E.

Stroj

Měření se uskutečnilo na stroji označení JOTES SPC 20 polské výroby. Hlavní technická data stroje jsou:

největší délka broušení	:	500 mm
největší šířka broušení	:	200 mm
největší průměr brusného kotouče	:	$\varnothing$ 200 mm
rychlost podélného posuvu stolu v_o		$= 0,5 - 20 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$
rychlost příčného posuvu stolu v_p		$= 0,5 - 4 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$
přísuv kotouče		ručně
otáčky kotouče		$n_k = 48 \text{ s}^{-1}$

Dynamometr byl upnut na magnetickou upínací desku. Příčný i podélný posuv jsou ovládány hydraulicky, a proto je jejich rychlost plynule seřiditelná. Nastavení ovladače a celkové seřízení stroje se provádělo až po 20 minutách chodu na prázdno, kdy došlo k promazání a oteplení stroje.

Seřízení rychlosti pohybu stolu bylo vypočteno z délky zdvihu a doby trvání 10 zdvihů. Platí-li

$$L = n_i \cdot L_i \quad /103/$$

potom
$$v_o = \frac{L}{t} \quad /104/$$

kde L_i ... délka jednoho zdvihu
 n_i ... počet zdvihů
 L ... celková dráha zdvihů
 t ... čas

Protože stroj je vybaven pouze ručním nastavováním tloušťky odebírané vrstvy, může být tím vnesena individuální chyba do měření. Z toho důvodu se provádí měření opakovaně nejméně 5 krát.

Stroj byl v době prováděných měření v dobrém technickém stavu, nebyly zjištěny žádné mimořádné nedostatky.

Řezné podmínky

Měření se prováděla za těchto ustálených řezných podmínek:

obvodová rychlost brusného kotouče	$v_k = 38 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
rychlost podélného posuvu stolu	$v_o = 0,2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
rychlostní poměr	$q = 190$
příčný posuv stolu nebyl použit	

Proměnnou veličinou byla odebíraná vrstva:

h_1	$= 0,01 \text{ mm}$
h_2	$= 0,02 \text{ mm}$
h_3	$= 0,03 \text{ mm}$
h_4	$= 0,04 \text{ mm}$

Broušení probíhalo bez přívodu chladicí kapaliny.

Postup měření

Příprava brusného kotouče pro měření začíná zvukovou zkouškou, nasazením na příruby, statickým vyvážení a upevněním na vřeteno brusky. Pokračuje orovnááním pracovní plochy diamantovým jednozrnným orovnávačem. Pokud chod není klidný, provede se znovu vyvážení a po něm orovnáání.

Obrobek se vloží do dynamometru, upevní šrouby a spolu se přichytí magnetickým upínačem na stůl stroje. Vůči kotouči se nastaví tak, aby přesah kotouče byl na obou stranách stejný. Potom se vzorek přebrousí pro dosažení čisté obroušené plochy. Brusný kotouč se orovná.

Na stroji se nastaví zvolené řezné podmínky a uvede se do činnosti registrační aparatura. Kotoučem se zlehka najede na obrobek při zapnutém podélném posuvu a nechá se vyjiskřit a posuv se vypne. Pomocí ručního kola přísuvu se nastaví požadovaná tloušťka odebírané vrstvy v pravé krajní úvratí /viz obr. 29, postavení A/. Náhlým otevřením ventilu hydraulického posuvového ústrojí se uvede do pohybu stůl s dynamometrem. Začíná vlastní měření jedné vyjiskřovací křivky.

Bylo zjištěno, že mezi pěti i více za sebou následujícími měřeními není nutno brusný kotouč orovnávat. Proto po skončení celého cyklu vyjiskřování může být znovu při vypnutém posuvu nastavena hloubka h . Pořad se opakuje, v tomto případě, 5 krát.

Jako výsledek měření získáme záznamy, pořízené souřadnicovým zapisovačem ENDIM 2002/1, jejichž příklad je na obr. 39.

3. Zpracování naměřených údajů

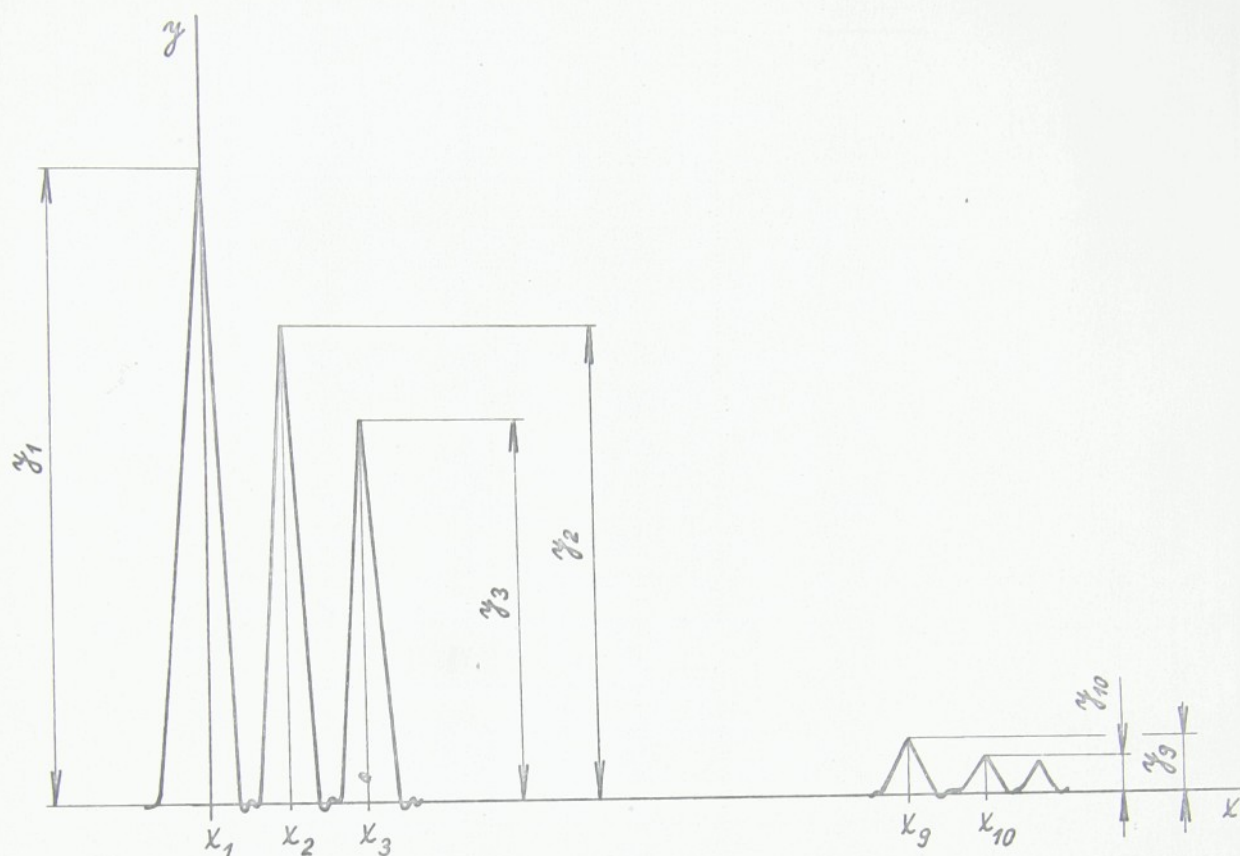
Ke způsobu získávání údajů je nutno učinit následující poznámku. Protože výsledky měření byly vyhodnocovány porovnáváním kritérií, které byly dosaženy při stálém nastavení měřicí a registrační aparatury a při stálých režných podmínkách, t.j. bylo použito relativní metody, odpadla nutnost cejchovat měřicí aparaturu. To by bylo nutné v případě určování absolutních hodnot. Proto také všechny číselné údaje, získané při měření sil jsou pouze délkové rozměry, odečtené v souřadnicích $x - y$ z milimetrového papíru, na který byl záznam přístrojem ENDIM 2002/1 pořízen. Z těchto důvodů také nejsou nikde uváděny rozměry sil.

Matematické zpracování průběhu vyjiskřovacích křivek získaných měření výše uvedeným měřicím systémem bylo prováděno na číslicovém počítači MINSK 22. Každé křivce byla přiřazena pravoúhlá soustava $x - y$ tak, aby osa y procházela vrcholem prvního záznamu a osa x , aby se ztožňovala s nulovými hodnotami síly F_y . Situaci dobře znázorňuje obr. 40. K výpočtu postačí odečíst souřadnice prvních deseti vrcholů vyjiskřovací křivky $/x_1, y_1 /$; $/x_2, y_2 /$; ; $/x_{10}, y_{10} /$, jak to ukazuje obr. 40.

Pro vyhodnocení vyjiskřovací křivky byl v jazyku FORTRAN vypracován program, který pro určení parametrů regresní křivky používá metody nejmenších čtverců. Ta zaručuje, že vypočtená křivka co nejtěsněji přiléhá k naměřenému průběhu, t.j. došlo k analytickému vyrovnání sledované závislosti. Regresní funkce, jak bylo uvedeno dříve /kap.IV .1./, byla exponenciála popsána rovnicí

$$y = C \cdot e^{\frac{-x}{T}} \quad /86/$$

Neznámými parametry jsou konstanty C a T .



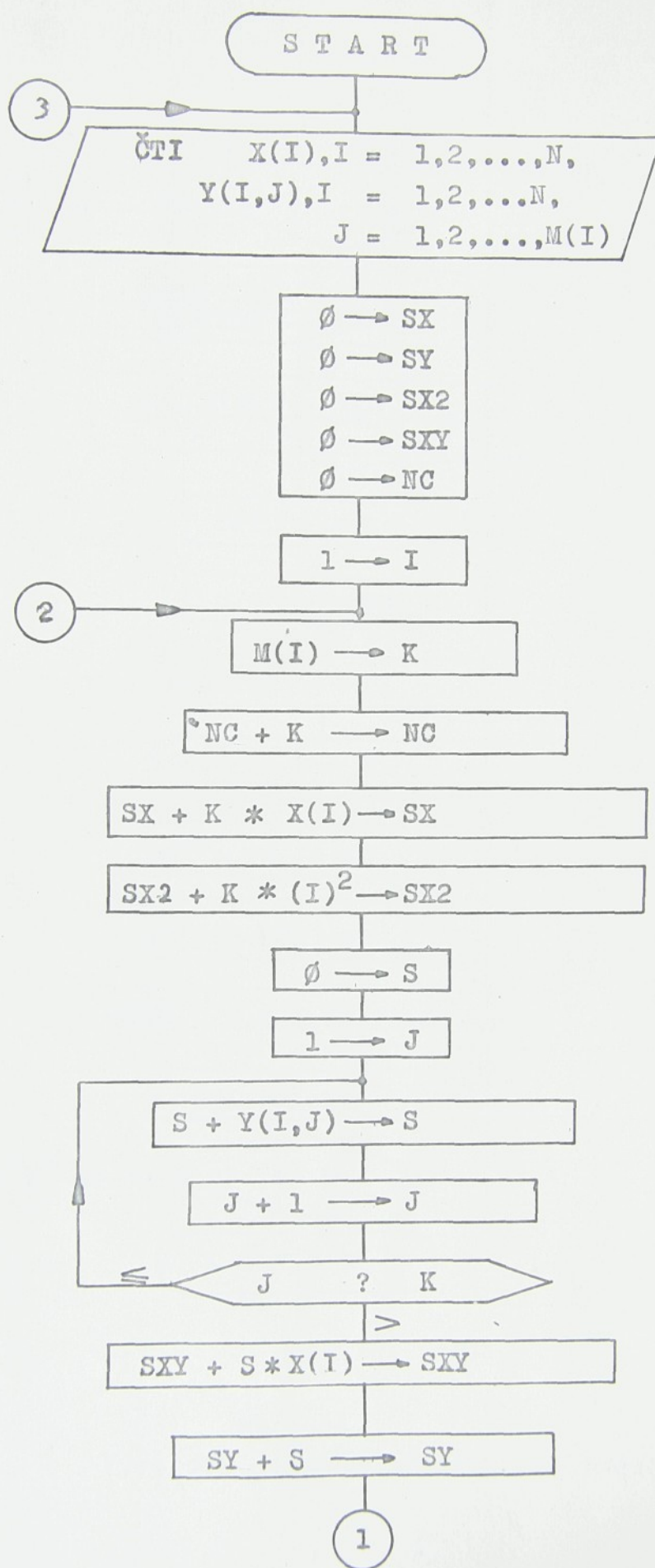
obr. 40

Přiřazení soustavy x-y naměřené křivce

Vývojový diagram výpočtu ukazuje obr. 41. Způsob zadávání vstupních dat je proveden tak, že ke každé souřadnici x_i jsou přiřazeny hodnoty všech naměřených y_{ij} , kdy $i = 1$ až 10 a $j = 1$ až 5, což odpovídá počtu realizovaných měření na jednom kotouči při konstantních podmínkách. Příklad zadání vstupních dat znázorňuje obr. 42.

Podle uvedeného programu je proveden výpočet a počítač vytiskne výsledky těchto hledaných kritérií v tomto pořadí: C, T, A, $\text{tg } \alpha$, T_1 , S, U, R. Způsob zápisu provedeného experimentu včetně vstupních dat a natištěných výsledků je uveden na obr. 43.

Výsledky takto vytištěné byly pro další použití, zejména pro zpracování různých grafických závislostí, přehledně zpracovány do tabulek označených Tab. V až VIII.



1
 rezivost brusnych kotoucu
 stroj: novinna bruska spc
 rezne podminky : $v=30\text{m/s}$, $h=0.05\text{mm}$
 cviceni: metodika obrateni 1977 ce a
 nastroj: a98 46 j p v

0.				
115.	128.5	115.5	116	
mon				
5.				
99.	107.	98.5	99.	
mon				
10.				
99.	111.	97.	96.5	
mon				
15.				
88.	97.	85.5	86.5	
mon				
20.				
85.	94.	80.	80.5	
mon				
25.				
76.	83.5	70.5	73.	
mon				
30.				
74.	78.	66.	67.	
mon				
35.				
65.5	71.5	61.5	62.5	
mon				
40.				
62.5	66.5	56.	59.	
mon				
45.				
58.5	60.	53.	54.	
mon				
mon				
1				

obr. 42

Příklad zadání vstupních dat

REZIVOST BRUSNYCH KOTOUČŮ

REZIVOST BRUSNYCH KOTOUČŮ
 TROJ:ROVINNA BRUSKA SPC
 EZNE PODMINKY .V=30M/S, H=0.05MM
 VICENI:METODIKA OBRABENI 1977 OE A
 ASTROJ: A98 46 J 8 V

VSTUPNI HODNOTY:

X(I):	Y(I,J):				
00000E 00	.11500E	03.12850E	03.11550E	03.11600E	03
50000E 01	.99000E	02.10700E	03.98500E	02.99000E	02
10000E 02	.99000E	02.11100E	03.97000E	02.96500E	02
15000E 02	.88000E	02.97000E	02.85500E	02.86500E	02
20000E 02	.85000E	02.94000E	02.80000E	02.80500E	02
25000E 02	.76000E	02.83500E	02.70500E	02.73000E	02
30000E 02	.74000E	02.78000E	02.65000E	02.67000E	02
35000E 02	.65500E	02.71500E	02.61500E	02.62500E	02
40000E 02	.62500E	02.66500E	02.56000E	02.59000E	02
45000E 02	.58500E	02.60000E	02.53000E	02.54000E	02

VYSLEDNE HODNOTY:

C :	.114876744E	03
T :	.024016835E	02
A :	.717425853E	04
TG :	.183945315E	01
T1 :	.296262130E	03
S :	.711180090E	04
U :	.258647790E	02
R :	.474617662E	00

12 050			SPC 20			A99 46 . 8 V		
$v_k = 38 \text{ m s}^{-1}$			$v_0 = 0,2 \text{ m s}^{-1}$			$h = 0,01 \text{ mm}$		
	C	T	A	TG	Tl	S	U	R
J 2	18,2	22,1	404,4	0,82	64,3	382,3	215,1	40,6
J 3	10,6	41,7	443,3	0,25	98,5	401,6	63,4	25,2
J 4	14,4	33,1	477,9	0,43	88,4	444,7	97,7	25,4
J 5	21,6	23,9	518,0	0,90	73,5	494,0	183,1	27,5
K 2	19,2	25,7	494,0	0,74	75,9	468,3	159,5	28,0
K 3	23,9	17,9	428,7	1,33	56,9	410,7	324,5	42,7
K 4	14,8	43,3	643,3	0,34	116,9	599,9	57,0	14,2
K 5	21,0	24,6	516,8	0,85	74,9	492,2	173,4	27,1
L 2	22,5	20,5	464,0	1,09	64,1	443,4	246,8	35,1
L 3	19,6	23,4	460,3	0,83	69,7	436,9	191,9	32,8
L 4	19,7	25,3	501,9	0,78	75,5	475,9	164,2	27,7
L 5	21,3	23,7	507,6	0,89	72,7	483,9	185,4	28,3
N 2	18,5	38,0	704,7	0,48	111,0	666,7	73,0	13,5
N 3	22,2	28,2	629,0	0,78	87,6	600,8	131,3	18,9
N 4	24,3	22,0	536,3	1,10	70,3	514,2	214,6	27,6
N 5	24,2	26,7	649,0	0,90	85,3	662,5	145,7	18,8

Tab.V

12 050 SPC 20 A99 46 . 8 V $v_k = 36 \text{ m s}^{-1}$ $v_o = 0,2 \text{ m s}^{-1}$ $h = 0,02 \text{ mm}$								
	C	T	A	TG	T1	S	U	R
J 2	39,6	16,9	671,7	2,33	62,3	654,8	357,0	24,4
J 3	22,7	29,1	662,2	0,77	91,0	633,0	112,9	17,3
J 4	32,7	23,3	764,0	1,40	81,4	740,7	189,2	16,5
J 5	41,0	19,6	805,8	2,08	72,9	786,1	265,5	17,4
K 2	40,7	23,9	975,3	1,70	88,6	951,4	179,3	11,8
K 3	44,6	17,8	798,7	2,49	67,9	780,8	319,6	18,8
K 4	30,0	29,2	880,5	1,02	99,6	851,2	120,5	11,7
K 5	45,7	17,2	789,2	2,65	65,9	771,9	343,2	19,6
L 2	46,0	18,2	842,5	2,52	70,0	824,2	306,0	17,3
L 3	42,7	19,8	846,5	2,15	74,3	826,7	260,8	16,2
L 4	43,9	22,3	982,7	1,96	84,4	960,3	204,6	12,3
L 5	45,7	21,4	982,6	2,13	82,0	960,1	221,8	12,6
N 2	40,1	25,8	1039,1	1,55	95,5	1013,2	153,0	10,3
N 3	42,1	23,0	972,5	1,82	86,3	949,6	192,3	12,2
N 4	44,3	20,7	921,5	2,13	78,7	900,7	237,4	14,0
N 5	45,0	20,8	937,0	2,16	79,2	916,2	236,3	13,7

Tab. VI

12 050 $v_k = 38 \text{ m s}^{-1}$			SPC 20 $v_0 = 0,2 \text{ m s}^{-1}$			A99 46 . 8 V $h = 0,03 \text{ mm}$		
	C	T	A	TG	T1	S	U	R
J 2	50,7	17,0	862,6	2,98	66,7	845,5	352,6	17,7
J 3	32,5	27,9	908,1	1,16	97,2	880,2	132,2	11,6
J 4	46,9	18,7	879,1	2,50	72,0	860,4	291,4	16,1
J 5	50,9	18,7	955,8	2,71	73,7	937,0	290,0	14,4
K 2	56,8	20,7	1177,4	2,74	83,7	1156,7	236,9	10,3
K 3	57,3	19,1	1096,8	3,00	77,4	1077,6	278,4	11,9
K 4	43,3	28,9	1254,6	1,49	109,0	1225,7	122,2	7,4
K 5	58,2	17,4	1018,2	3,32	71,0	1000,7	332,4	14,0
L 2	62,7	18,8	1185,9	3,32	78,2	1167,0	284,6	10,9
L 3	55,7	19,8	1104,8	2,80	79,7	1085,0	258,9	11,5
L 4	55,8	24,0	1342,5	2,32	96,6	1318,4	176,3	7,8
L 5	56,6	23,5	1335,3	2,40	95,1	1311,7	183,2	8,0
N 2	54,0	25,3	1369,3	2,12	101,1	1344,0	158,4	7,3
N 3	57,7	22,8	1320,9	2,52	92,8	1298,0	194,2	8,2
N 4	57,1	18,8	1078,0	3,02	76,3	1059,1	285,6	12,3
N 5	56,2	23,1	1305,8	2,42	93,5	1282,6	189,1	8,3

Tab .VII

12 050 SPC 20 A 99 46 . 8 V $v_k = 38 \text{ m s}^{-1}$ $v_o = 0,2 \text{ m s}^{-1}$ $h = 0,04 \text{ mm}$								
	C	T	A	TG	T 1	S	U	R
J 2	61,2	15,1	929,1	4,03	62,4	914,0	441,6	17,5
J 3	39,9	26,2	1051,3	1,52	96,9	1025,0	148,3	10,0
J 4	51,5	23,8	1230,8	2,15	94,1	1206,9	178,8	8,8
J 5	57,2	22,1	1265,0	2,58	86,4	1242,8	208,2	8,9
K 2	70,3	22,8	1609,4	3,07	97,3	1586,6	193,8	6,4
K 3	70,3	18,8	1325,9	3,73	80,1	1307,1	285,6	9,5
K 4	53,9	30,4	1642,1	1,76	121,4	1611,6	109,7	5,1
K 5	67,2	20,6	1390,5	3,24	87,0	1369,8	237,1	8,3
L 2	72,8	20,3	1486,5	3,57	87,4	1466,1	243,7	7,7
L 3	62,4	22,4	1401,3	2,78	92,7	1378,9	201,8	7,8
L 4	62,3	28,6	1788,2	2,17	118,4	1759,5	123,7	4,7
L 5	62,7	28,8	1808,1	2,17	119,2	1779,3	122,4	4,7
N 2	63,0	27,8	1756,3	2,26	115,4	1728,4	130,8	5,0
N 3	62,4	28,1	1760,6	2,21	116,5	1732,4	127,9	4,9
N 4	59,8	24,8	1486,2	2,41	101,6	1461,4	164,9	6,7
N 5	59,1	32,9	1950,1	1,79	134,4	1911,2	93,6	3,8

Tab. VIII

Ty se staly základem pro vyhodnocení měření a umožnily získat celou řadu kritérií vyplývajících z vyjiskřovacích křivek, potom mnohé charakteristiky pracovních schopností brusných kotoučů a v neposlední řadě též postihnout vliv řezných podmínek.

Rozhodnout, které vzájemné závislosti budou nejlépe charakterizovat všeobecné pracovní schopnosti brusných kotoučů, bylo velmi obtížné. Následující tabulkové a grafické zpracování výsledků bylo provedeno:

1. tabulkou pořadí kotoučů podle jednotlivých ukazatelů a kritérií
2. grafem souvislosti řezivosti U na tvrdosti, hodnocené třemi různými metodami a vynesené v závislosti na pořadí kotoučů od největší po nejmenší řezivost U
3. grafy závislosti řezivosti U na tvrdosti kotoučů, která byla vždy kvantifikována jednotlivými stupni tvrdosti $[U = f_1/h_M/, U = f_2/HD/, U = f_3/E/]$
4. grafem souvislosti řezivosti U s ostatními vybranými kritérii řezivosti $A, \operatorname{tg} \alpha, R$
5. grafy závislosti řezivosti U na ostatních kvantifikovaných kritériích řezivosti $[U = f_4/A/, U = \bar{f}_4/\operatorname{tg} \alpha/, U = f_5/R/]$
6. grafy závislosti kritérii řezivosti $U, A, \operatorname{tg} \alpha, R$ na změně tloušťky odebírané vrstvy pro jednotlivé brusné kotouče podle skupin tvrdosti $[U = f_6/h/, \operatorname{tg} \alpha = f_7/h/, A = f_8/h/, R = f_9/h/]$.

Výše uvedená tabulka a grafy nesou označení:

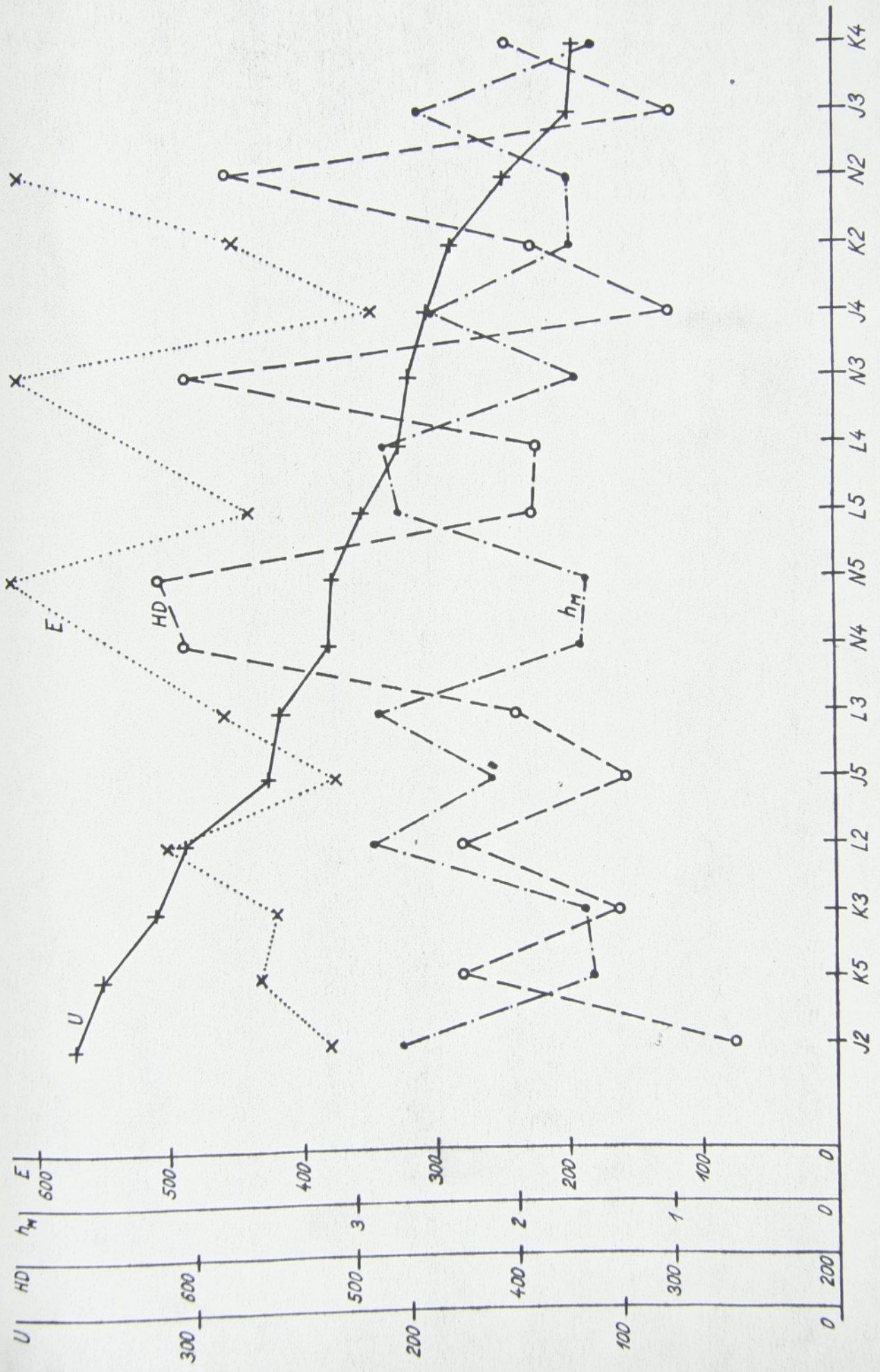
Tab. IX, obr. 44 až 55.

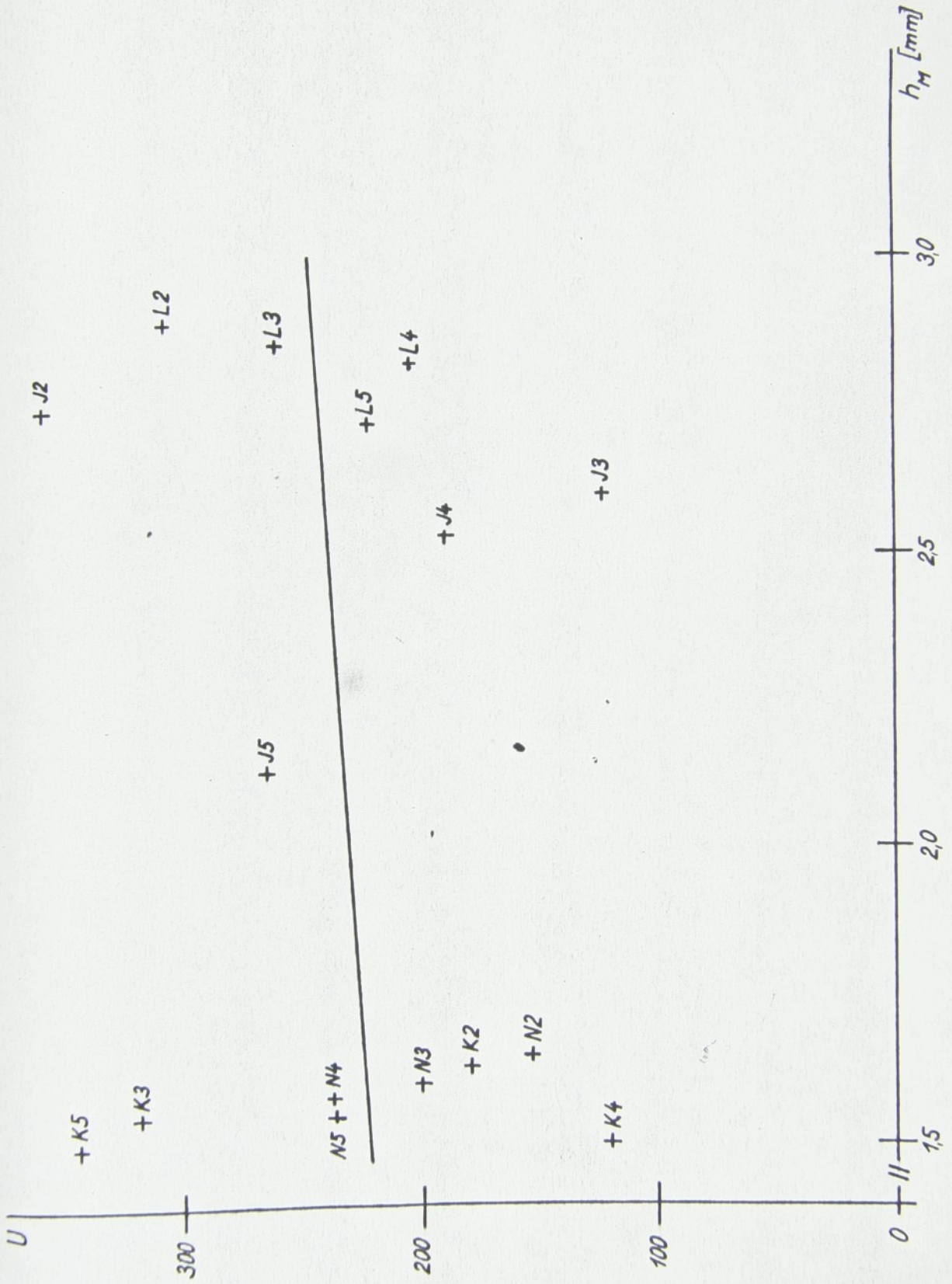
4. Zhodnocení výsledků měření

Než bude provedeno hodnocení výsledků měření, je třeba podotknout, že poněkud zúžený rozsah realizovaných pokusů neopravňuje k vyvozování všeobecně platných závěrů. Je nutno si uvědomit, že jde o měření orientační a jako takové má dát představu o správnosti použití navrženého kritéria pro hodnocení řezivosti brusných kotoučů a současně ho porovnat s kritérii dříve navrženými.

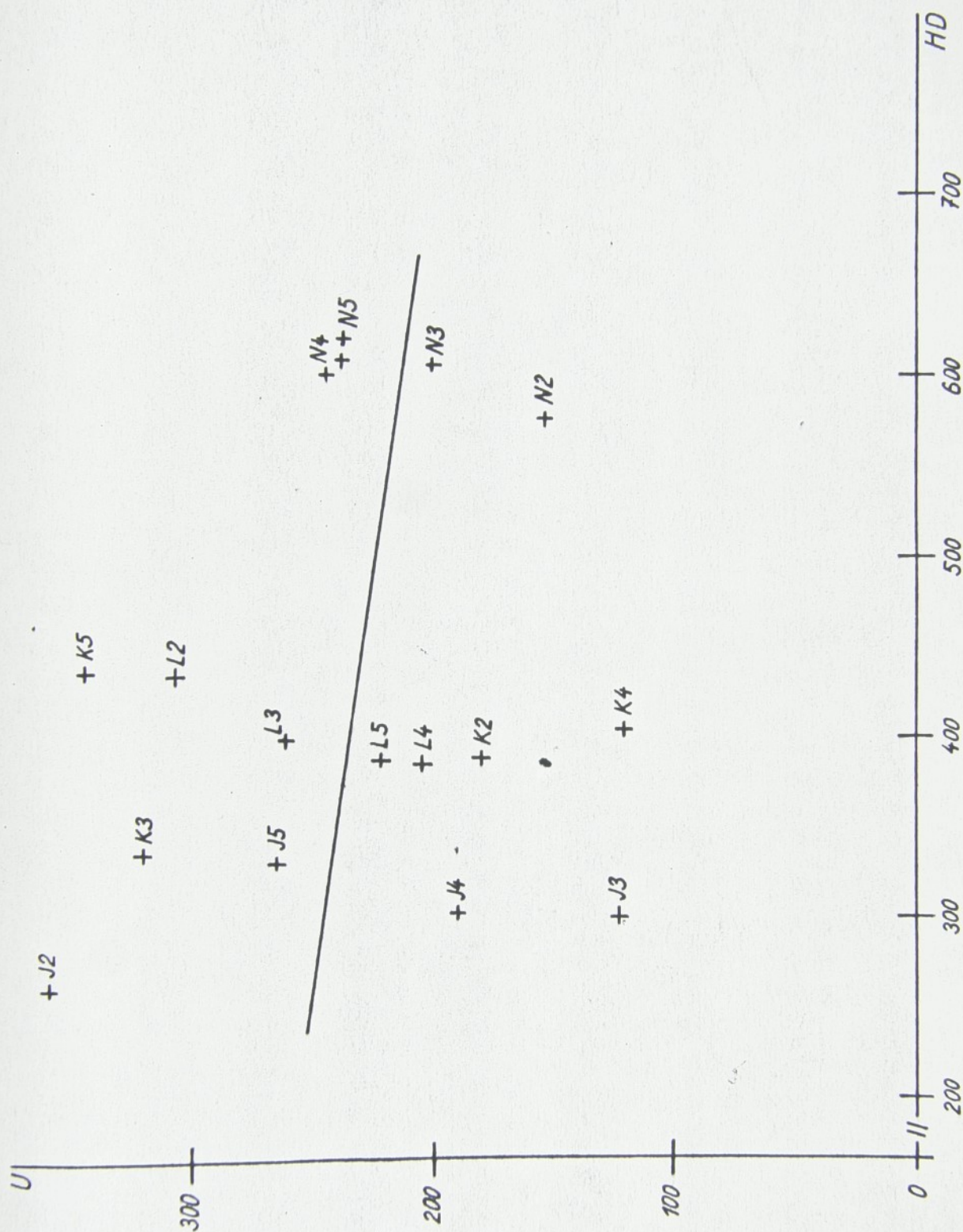
	E	h _M	HD	C				I				A				TG				TL				S				U				R				
				h ₁	h ₂	h ₃	h ₄	h ₁	h ₂	h ₃	h ₄	h ₁	h ₂	h ₃	h ₄	h ₁	h ₂	h ₃	h ₄	h ₁	h ₂	h ₃	h ₄	h ₁	h ₂	h ₃	h ₄	h ₁	h ₂	h ₃	h ₄					
		[GPa] _[mm]																																		
J2	3	4	1	4	4	4	7	4	1	1	1	1	2	1	1	9	4	5	1	3	1	1	1	1	1	1	3	1	1	1	2	1	1			
J3		6	2	1	1	1	1	15	15	15	10	3	1	3	2	16	16	16	16	14	14	8	2	1	3	2	15	15	15	10	12	5	7			
J4	1	7	3	2	3	3	2	13	12	3	8	6	3	2	3	14	14	10	13	13	9	3	7	6	3	2	13	12	3	8	11	7	2			
J5	2	8	4	11	7	5	4	7	5	4	5	11	6	4	4	4	9	8	7	7	5	4	3	11	6	4	4	7	5	4	5	9	4	3		
K2	9	10	8	6	6	11	14	10	13	9	7	7	13	9	10	12	12	7	5	10	13	9	9	7	13	9	10	10	13	9	7	6	14	10		
K3	5	14	5	14	12	13	15	1	3	7	2	2	5	7	5	1	3	4	2	1	3	6	2	3	5	7	5	1	3	7	2	1	3	6	3	
K4		15	10	2	2	2	3	16	16	16	15	14	9	11	11	15	15	15	15	16	16	16	15	13	9	11	11	16	16	16	15	15	15	11		
K5	6	16	12	9	15	15	13	8	2	2	4	10	4	5	6	7	1	1	4	8	2	2	4	10	4	5	6	8	2	2	4	10	2	4	6	
L2	11	1	11	13	16	16	16	2	4	5	3	5	7	10	9	3	2	2	3	2	4	7	5	5	7	10	9	2	4	6	3	3	6	9	8	
L3	10	2	9	7	9	7	9	5	6	8	6	4	8	8	7	8	6	6	6	4	6	8	6	4	8	8	7	5	6	8	6	4	8	8	7	
L4		3	6	8	10	8	8	9	10	13	13	8	15	15	14	10	10	13	11	9	11	13	13	8	15	15	14	9	10	13	13	7	12	14	14	
L5	7	5	7	10	14	10	11	6	9	12	14	9	14	14	15	6	7	12	12	6	10	12	14	9	14	14	15	6	9	12	14	5	11	13	15	
N2	13	9	13	5	5	6	12	14	14	14	11	16	16	16	12	13	13	14	9	15	15	11	16	16	16	16	12	14	14	14	11	16	16	16	12	
N3	14	11	14	12	8	14	10	12	11	10	12	13	12	13	13	11	11	9	10	12	12	10	12	14	12	13	13	12	11	10	12	13	13	13	12	13
N4		12	15	16	11	12	6	3	7	6	9	12	10	6	8	2	8	3	8	5	7	5	10	12	10	6	8	4	7	5	9	8	9	5	9	
N5	16	13	16	15	13	9	5	11	8	11	16	15	11	12	16	5	5	11	14	11	8	11	16	15	11	12	16	11	8	11	16	14	10	11	16	

Tab.IX

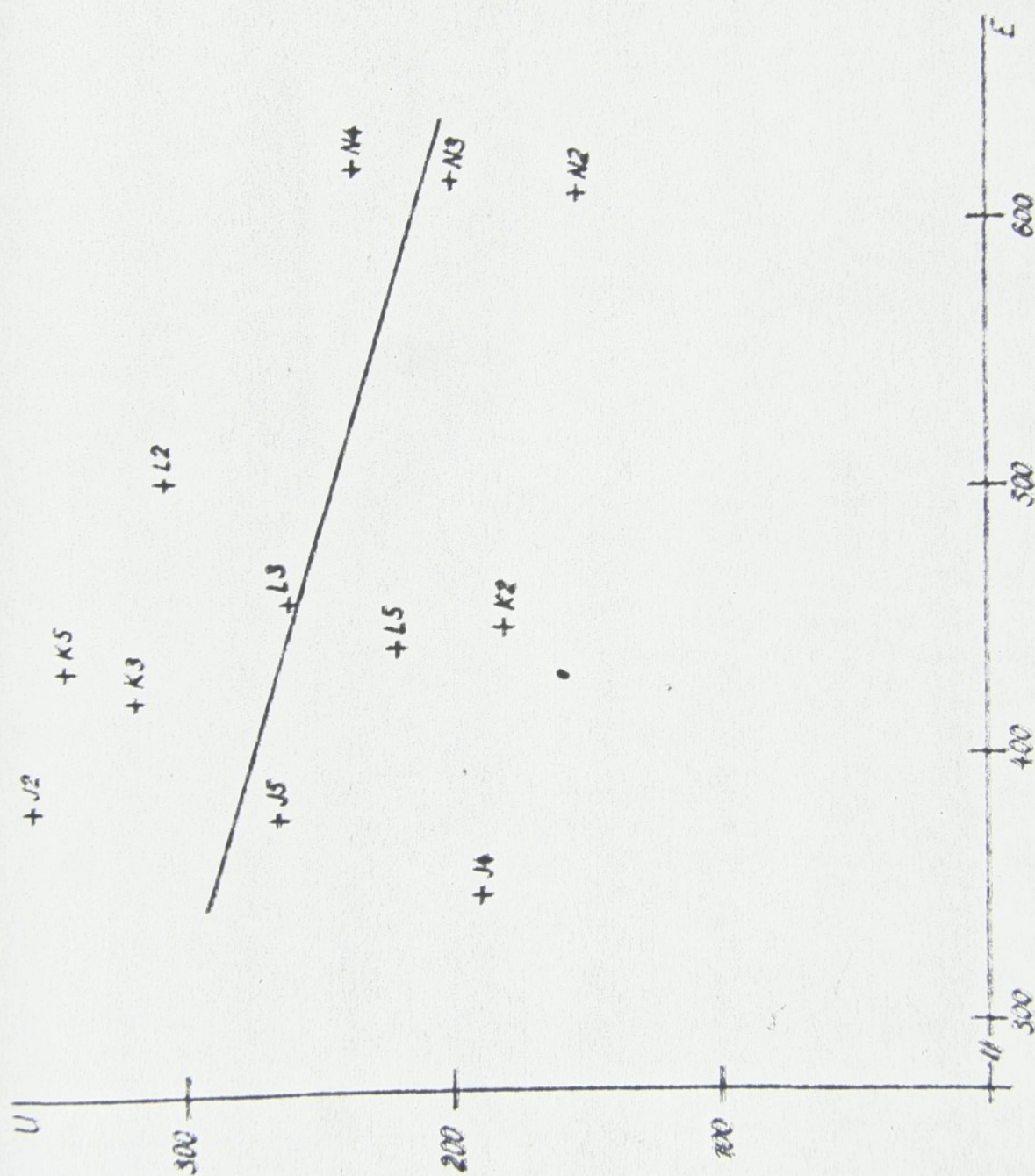


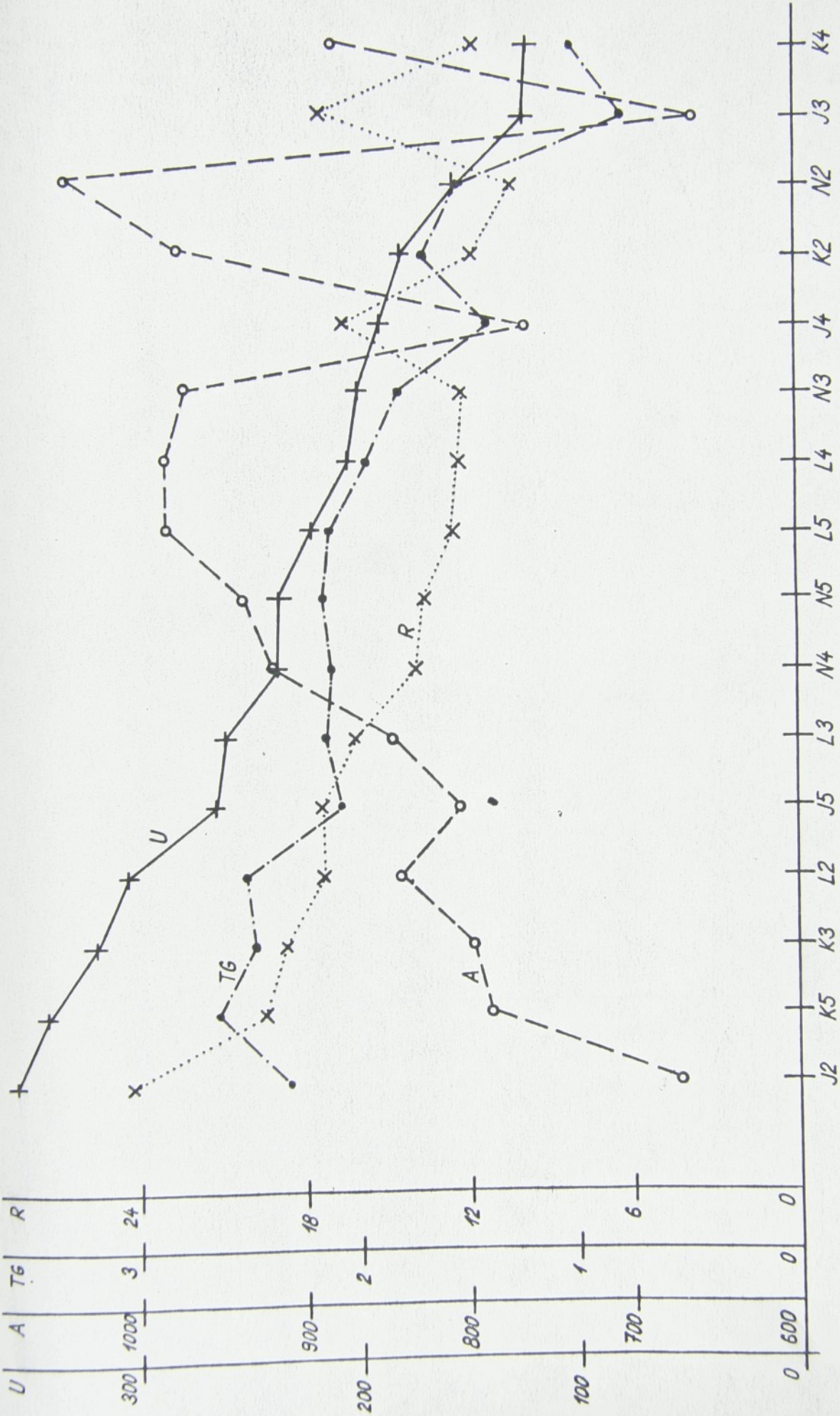


obr. 45

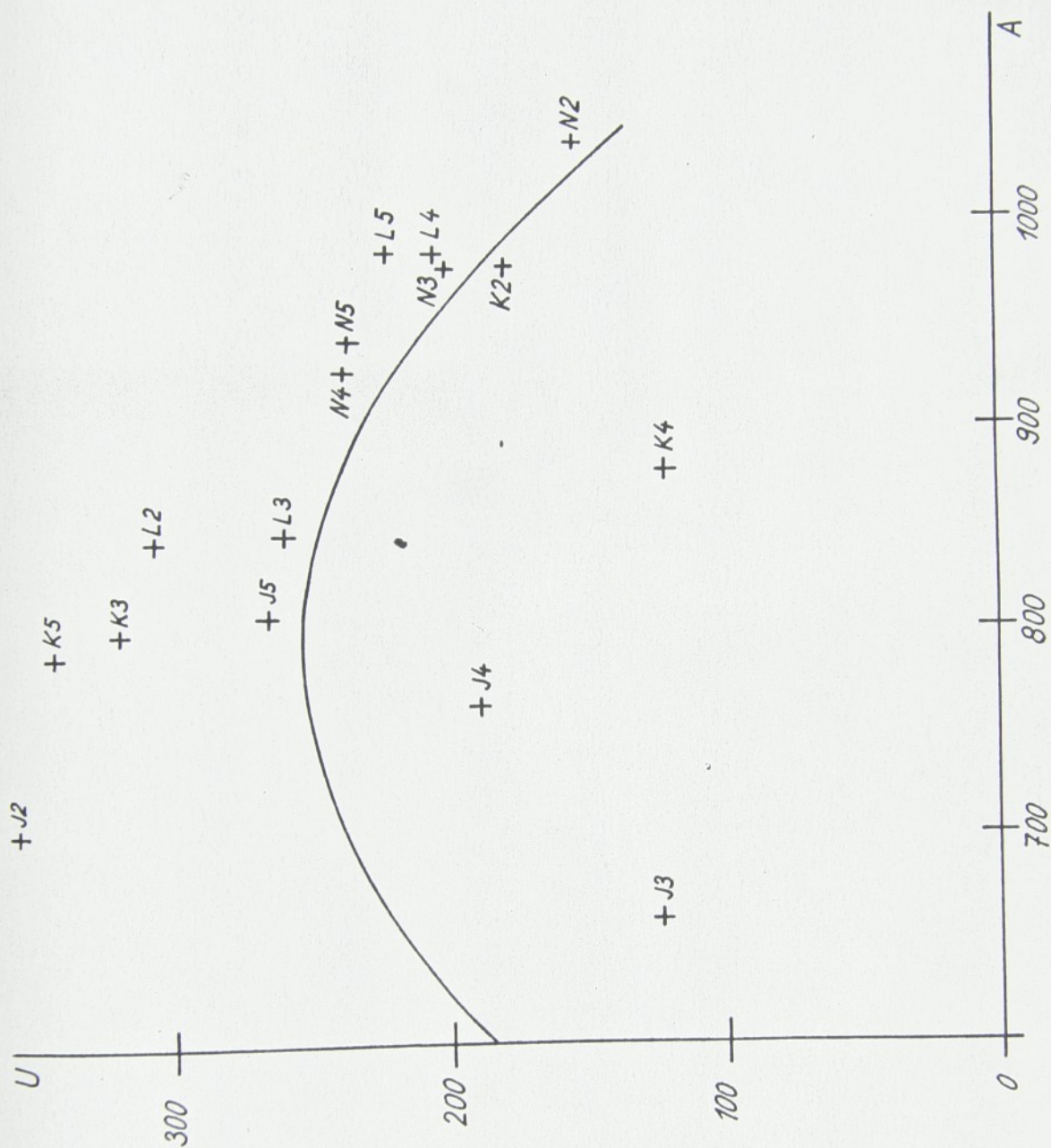


obr. 46

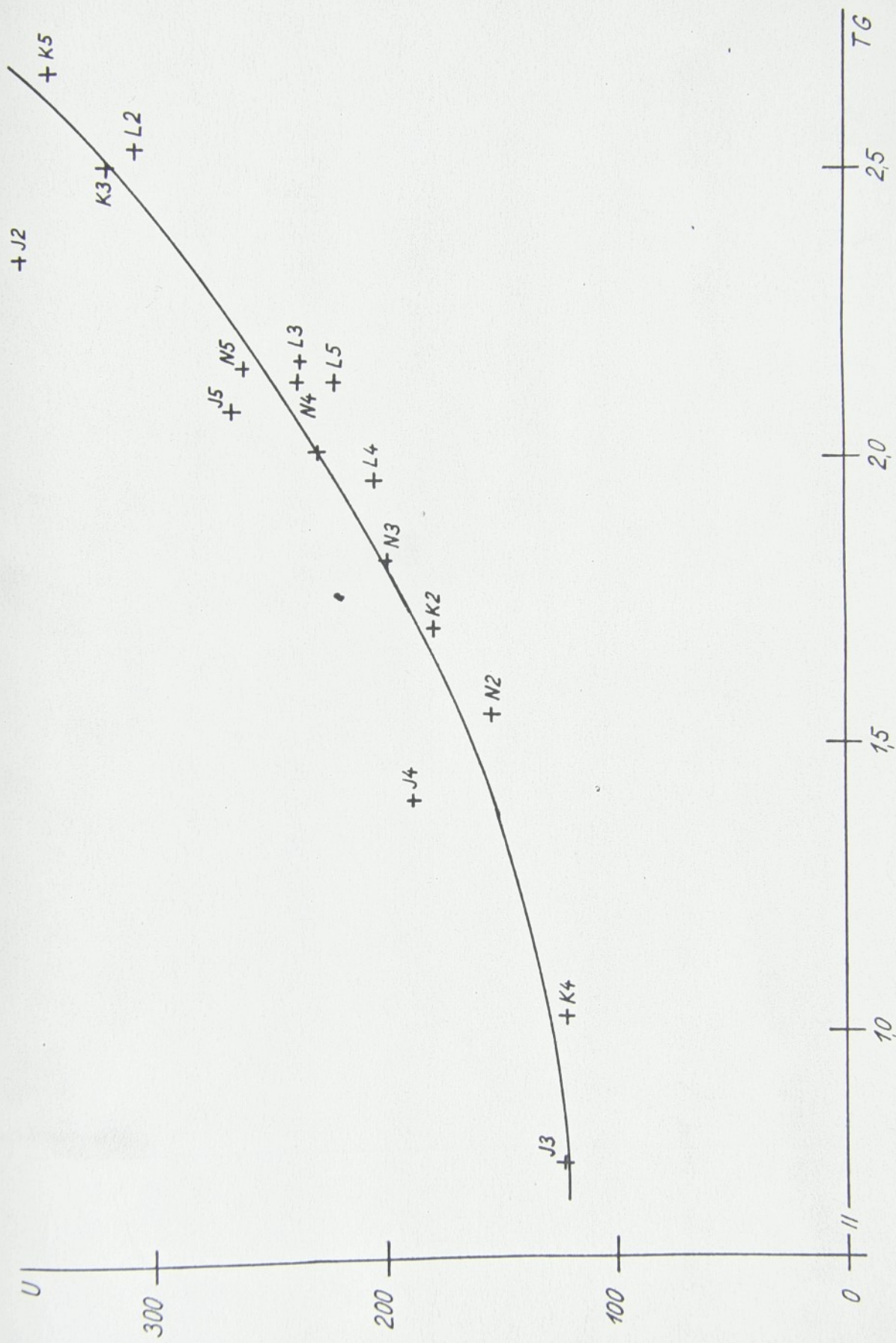




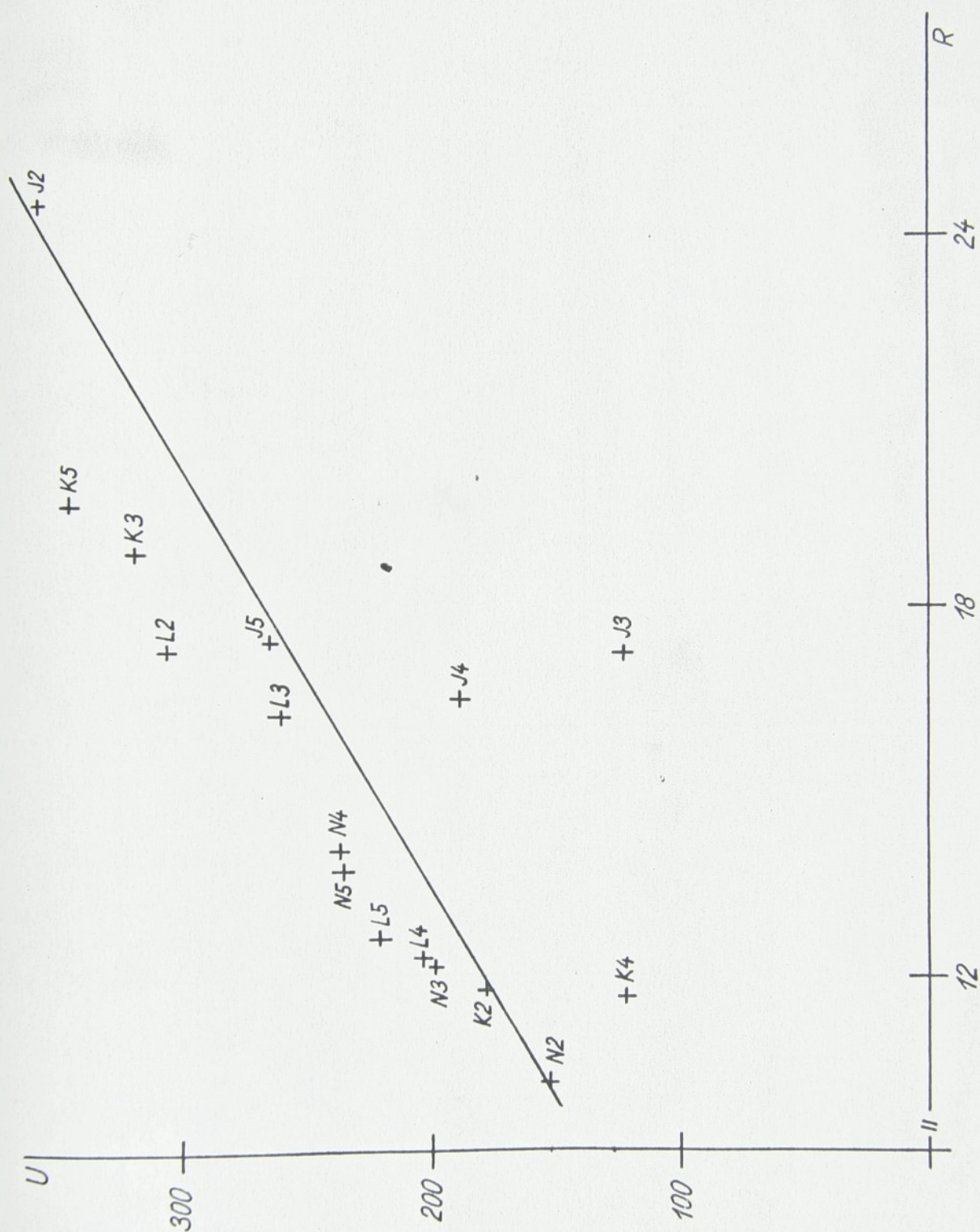
obr. 48

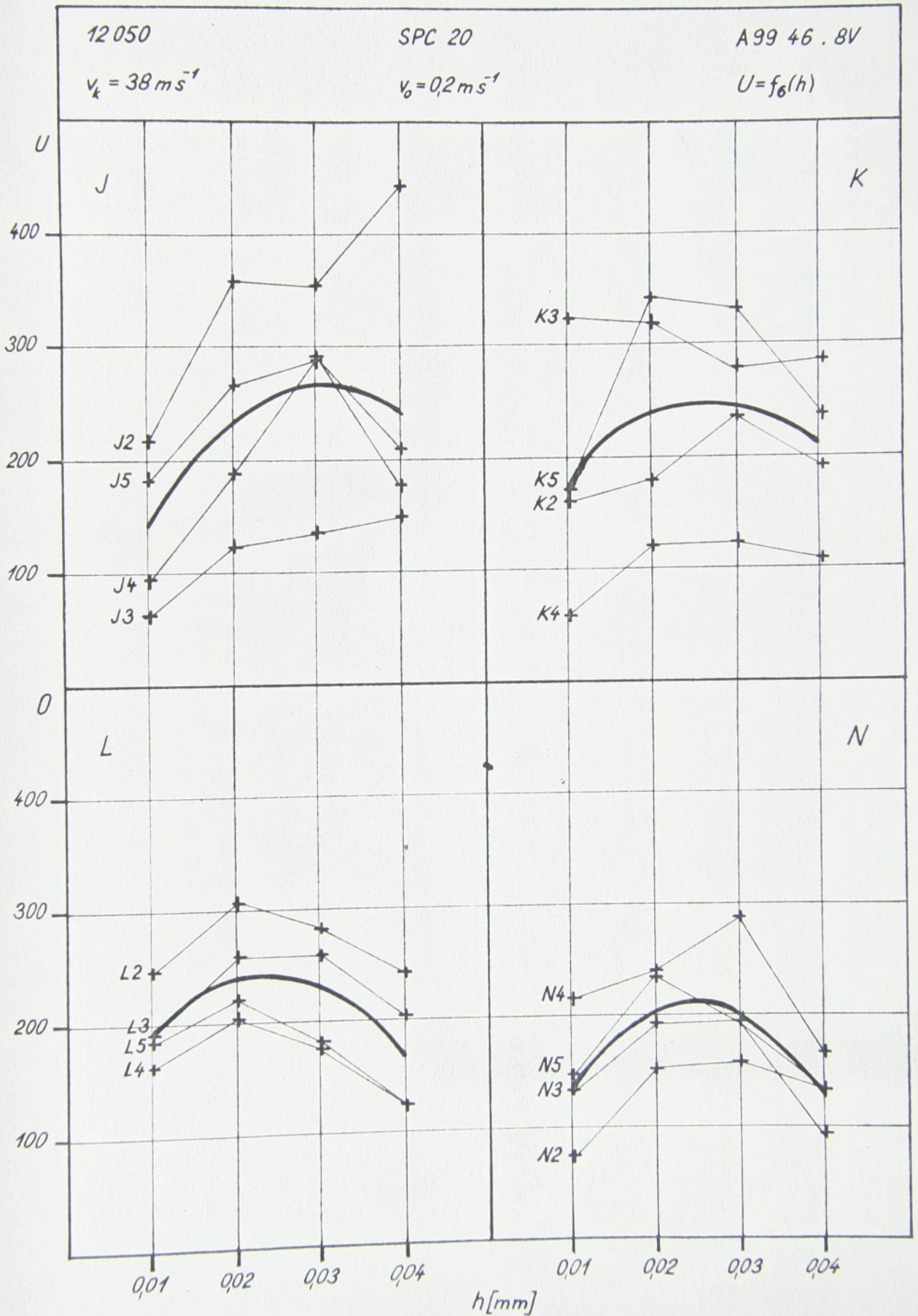


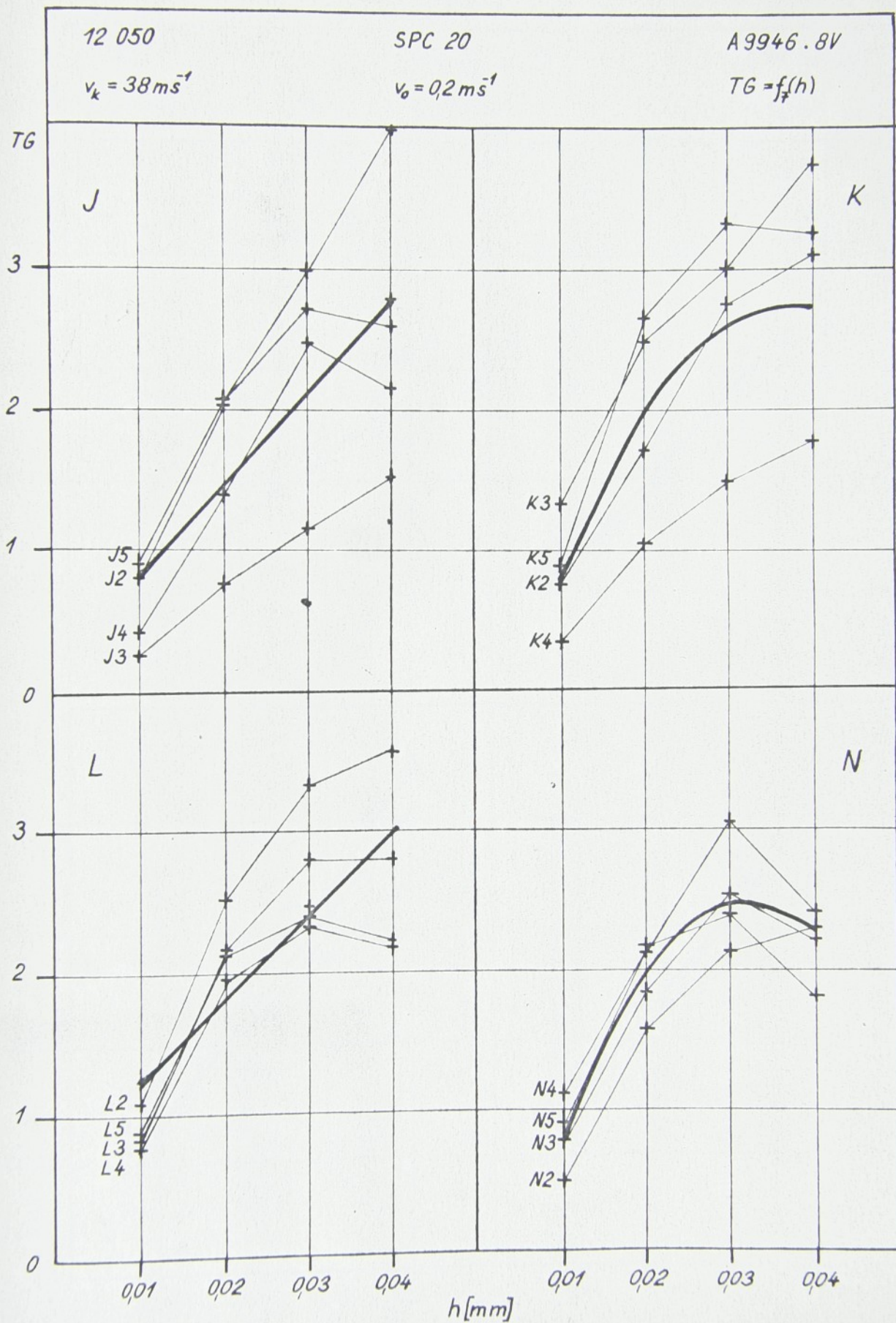
obr. 49

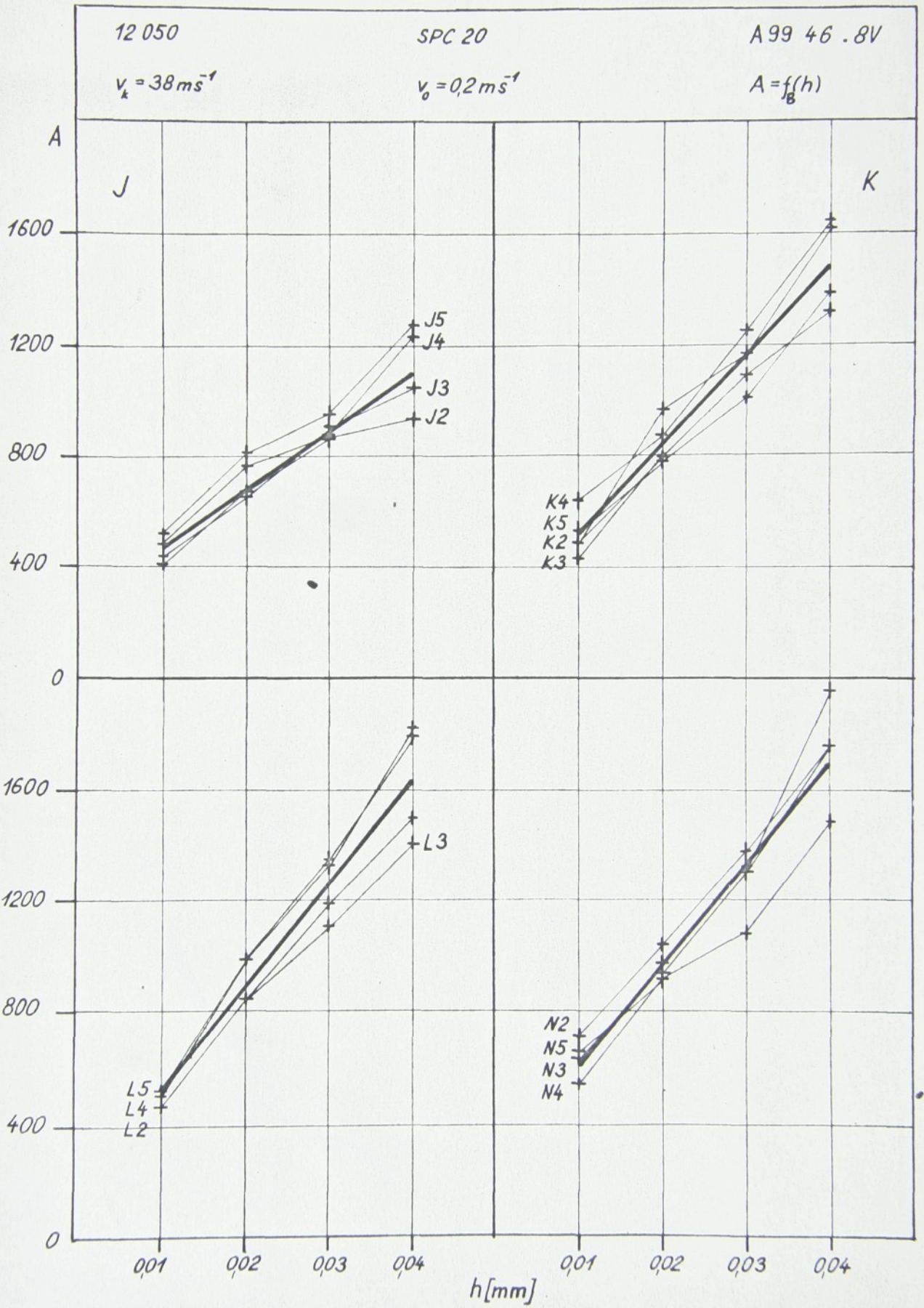


obr. 50

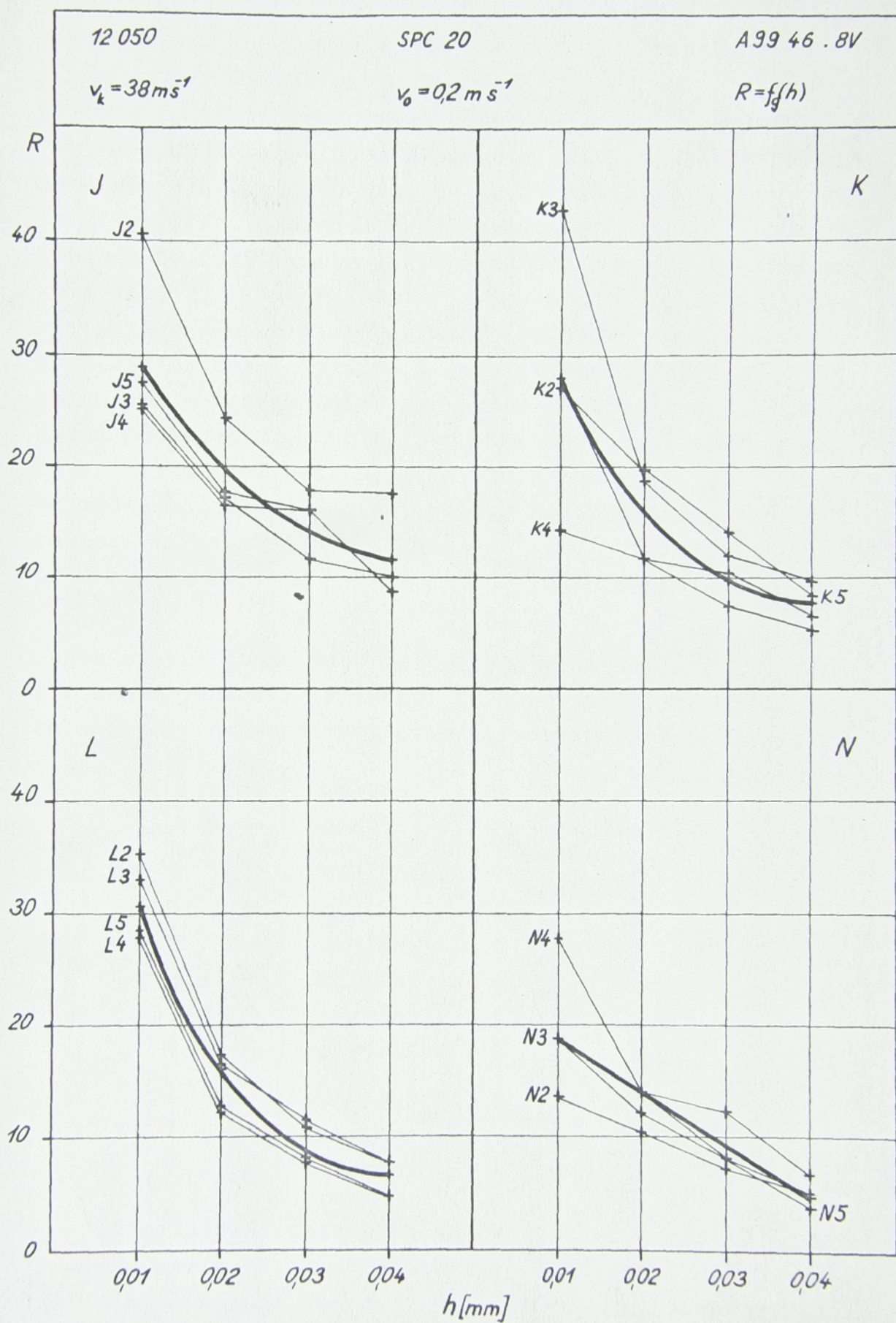








obr. 54



obr. 55

Z tohoto důvodu byly výsledky zpracovány do grafů, které umožňují provést vyhodnocení kvalitativně, porovnáním určitých naměřených hodnot a získat tak orientační posouzení úrovně pracovních schopností brusných kotoučů.

K tomu účelu slouží především tabulka celkového přehledu pořadí brusných kotoučů podle jednotlivých kritérií /viz Tab. IX/. Základem této tabulky je původní rozdělení kotoučů do čtyř skupin podle tvrdosti označené výrobcem /viz Tab. IV/. Každý kotouč je pak označen pořadím, které podle daného kritéria získal. Nejdříve jsou uvedena kritéria tvrdosti vyjádřená modulem pružnosti E , hloubkou důlku podle metody Zeiss-Mackensen a t.zv. dynamickou tvrdostí podle metody Collwelovy. Pak následují dříve popsaná kritéria řezivosti C , T , A , $TG = \operatorname{tg} \alpha$, T_1 , S , U , R a ta ještě rozdělena podle tloušťky odebírané vrstvy h takto:

$$\begin{array}{ll} h_1 = 0,01 \text{ mm} & h_3 = 0,03 \text{ mm} \\ h_2 = 0,02 \text{ mm} & h_4 = 0,04 \text{ mm} \end{array}$$

Legendou pro čtení Tab. IX je toto schema:

čím menší je modul pružnosti E , tím vyšší je pořadí v tabulce, t.j. nejmenšímu E bylo přisouzeno první místo.

↓ $E \Rightarrow$	↑ umístění ... $E_{\min}$	= 1
↑ $h_M \Rightarrow$	↑ umístění ... $h_{M_{\max}}$	= 1
↓ $HD \Rightarrow$	↑ umístění ... $HD_{\min}$	= 1
↓ $C \Rightarrow$	↑ umístění ... $C_{\min}$	= 1
↓ $T \Rightarrow$	↑ umístění ... $T_{\min}$	= 1
↓ $A \Rightarrow$	↑ umístění ... $A_{\min}$	= 1
↑ $TG \Rightarrow$	↑ umístění ... $TG_{\max}$	= 1
↓ $T_1 \Rightarrow$	↑ umístění ... $T_{1_{\min}}$	= 1
↓ $S \Rightarrow$	↑ umístění ... $S_{\min}$	= 1
↑ $U \Rightarrow$	↑ umístění ... $U_{\max}$	= 1
↑ $R \Rightarrow$	↑ umístění ... $R_{\max}$	= 1

Tato tabulka dává celkový přehled o jednotlivých kritériích, které je možno použít pro posouzení jejich kvalitativního projevu. Podrobíme-li rozboru nejdříve tři kritéria použitá pro hodnocení tvrdosti resp. modulu pružnosti

brusných kotoučů zjistíme, že mezi jednotlivými ukazateli není žádná souvislost, i když ji lze očekávat. Když určitý brusný kotouč bude měkký, pak se musí jako měkký projevit i podle zbývajících dvou kritérií. Není-li tomu tak, pak z toho vyplývá jen jeden závěr, že určitá metoda není objektivní.

Bude-li za základní, nejpřesnější a nejobektivnější metodu pro určování tvrdosti brusných kotoučů považována metoda určování modulu pružnosti E , pak podle ní se na 1. místo dostal kotouč označení J 4. Podle dynamické tvrdosti HD pak 1. místo získal kotouč J 2, ale podle hloubky důlku pak L 2, který podle E a HD získal 11. pořadí.

Podle kritérií řezivosti získal ve většině případů 1. místo kotouč J 2. Při podrobnějším studiu údajů u tabulky lze zjistit velmi dobrý souhlas v umístění kotoučů podle kritérií T , T_1 , U , R . Z toho je možné usuzovat, že existuje určitá vazba u těchto kritérií. U ostatních se tato tendence neprojevuje a vzhledem k tomu nelze potvrdit jakoukoliv vzájemnou souvislost.

Aby byly prokázány uvedené závěry, byly zhotoveny jejich grafy. Základem všech grafů je řezivost U , se kterou jsou ostatní kriteria porovnávána. Tím způsobem vznikl souhrnný graf na obr. 44. Brusné kotouče byly podle své řezivosti U seřazeny na vodorovnou osu a každému nejdříve přiřazena hodnota ukazatelů tvrdosti.

Tento graf jen potvrzuje hodnocení, uvedené v souvislosti s Tab. IX. Protože vodorovnou osu tvoří jen symboly označení brusných kotoučů, byl další rozbor prováděn na grafech $U = f_1/h_M$, $U = f_2/HD$, $U = f_3/E$ jejichž proměnné byly příslušně kvantifikovány /obr. 45, 46, 47/.

Podobný postup byl zvolen i pro posouzení jednotlivých kritérií řezivosti v závislosti na řezivosti U .

Protože experimentálně naměřené hodnoty, jak tomu obvykle v případech strojírenské technologie bývá, měly značný rozptyl a prakticky nebyly dosud formulovány.

Pro zpracování takových dat byla na Technické universitě v Drážďanech vypracována a ověřena metoda využívající výpočetní techniky pro vyhodnocování technologických

experimentů [39]. Při své stáži na této škole se autor s uvedeným postupem výpočtu seznámil a použil jej pro vyhodnocení svých experimentů.

Stanovení regresní funkce

Výsledky technologických experimentů se velmi často vyhodnocují metodami regresní analýzy. Vyrovnávání naměřených hodnot se provádí metodou nejmenších čtverců chyb, avšak její použití je dosud omezeno na jednoduché případy. Aplikací výpočetní techniky je nyní možné matematicky vyřešené problémy využít pro řešení technických úloh. Dosavadní programy jsou však nedostatečné pro vyhodnocení výsledků experimentů realizovaných technologickým výzkumem. Každá zkoumaná úloha zatím vycházela z nejrůznějších závislostí, které zvláště z hlediska jejich vyhodnocení bylo třeba provádět odděleně. Stálé zpracovávání nových programů pro každou zkoumanou úlohu je časově a finančně nepoužitelné.

Možnost najít úspěšnou cestu řešení nabízí lineární kombinace regresních funkcí

$$y /x/ = \sum_{j=1}^k a_j f_j /x/ \quad /105/$$

na základě použití metody nejmenších čtverců.

$$Q = \sum_{i=1}^n \left[J_i /x/ - J_i \right]^2 \rightarrow \min \quad /106/$$

$$\frac{\delta Q}{\delta a_j} = 0 \quad \text{pro } j = 1 \dots k \quad /107/$$

Tím dostáváme systém lineárních rovnic

$$m_{j1}a_1 + m_{j2}a_2 + \dots + m_{jk}a_k = m_{j0} \quad /108/$$

kde m ... střední kvadratická odchylka
 m_{aj} ... střední odchylka koeficientů a_j
 a_j ... koeficienty regresní funkce
 $f_j /x/$... libovolná funkce
 $y /x/$... regresní funkce

- y_i ... vyhodnocované veličiny jednotlivých experimentů
 k ... počet regresních funkcí
 n ... počet hodnot získaných při experimentu
 m_{jk} ... matice koeficientů
 Q ... chybový součet čtverců

Jeho řešení je možné pomocí výpočetního programu, což umožňuje určit hledané koeficienty a_j . Na hodnoceném problému jsou závislé jen funkce $f/x/$, které se použijí pro stanovení matice soustavy rovnic. Vhodnou stavbou programu lze vypočítat hodnoty funkcí použitím takové procedury, která je pro libovolný experiment vyměnitelná. Může však obsahovat všechny vztahy pro jedno vyhodnocení.

Obraz o tom, která z použitých funkcí nejlépe přiléhá naměřeným hodnotám, dává chybový součet čtverců odchylek /viz vztah /106/ / nebo střední kvadratická odchylka

$$m = \sqrt{\frac{Q}{n - k}} \quad /109/$$

protože pro obě veličiny je splněn požadavek minima. Struktura výpočtového programu umožňuje libovolný výběr kombinací výrazů pro řešení prostřednictvím rozděleného vyvolávání podprogramů a několikanásobně opakovaných výpočtů řídicích veličin, čímž je umožněn výběr nejvhodnějších výsledků.

Vliv jednotlivých členů vyrovnávací funkce je možné určit prostřednictvím střední kvadratické odchylky vypočtených koeficientů m_{aj} . Lze ukázat, že vyloučením členu, jehož relativní odchylka je největší, je dosaženo mnohem lepšího vyrovnání. Tento výsledek lze dále zjednodušit, což se příznivě projeví při hodnocení více proměnných. I tato rozhodnutí lze při použití výpočetní techniky programovat.

Metoda stanovení regresní funkce byla aplikována na všechny funkční závislosti, uvedené graficky na obr. 45 až 47 a 49 až 55. Na jejím základě byla vybrána pro první přiblížení polynomická funkce

$$y = a_1 + a_2x + a_3x^2 + a_4x^3 \quad /110/$$

pro nejmenší počet členů $r = 2$ a největší $s = 4$.

Vypočteny byly koeficienty a_1, a_2, a_3 , chybový součet čtverců odchylek Q a střeční kvadratická odchylka m .

Dále byly stanoveny střední kvadratické odchylky jednotlivých koeficientů m_{a1}, m_{a2}, m_{a3} . Výpočet se opět opakuje pro výraz /110/ se stejným nejmenším počtem členů $r = 2$, ale největší počet se snižuje o jeden t.j. na $s = 3$.

Bude tedy $y = \bar{a}_1 + \bar{a}_2 x + \bar{a}_3 x^2$ /111/

vypočteny: $\bar{a}_1, \bar{a}_2, \bar{a}_3; \bar{Q}; \bar{m}$ případně $\bar{m}_{aj}$.

Pro praktické rozhodnutí, který z obou případů dává křivku nejlépe přiléhající k naměřeným hodnotám, se použije střední kvadratické odchylky.

Když $m > \bar{m}$

bude tuto podmínku splňovat rovnice /111/ s menším počtem členů.

Bude-li $m = \bar{m}$

lze říci, že nebude velkých rozdílů při přiřazení obou rovnic. Za rozhodovací kritérium se použije střední kvadratická odchylka jednotlivých koeficientů m_{aj} .

Budou-li $m_{aj} > \bar{m}_{aj}$

potom přesněji popisuje naměřené hodnoty rovnice /111/.

Výsledky výpočtů

Výpočet podle uvedeného postupu byl realizován na počítači ROBOTRON na Technické univerzitě v Drážďanech pod vedením Dr.-Ing. Kurta Steudnera, který je jeho autorem. Příklad výstupu z počítače ukazuje obr. 56.

Výsledky byly zpracovány do tabulky Tab. X. Koeficienty umožňují sestavit výsledné rovnice /110/ a /111/. Ty funkce, které dávají dobrou shodu s naměřenými hodnotami, byly do grafů vkresleny silnou nepřerušovanou čarou.

Na tomto základě lze provést objektivnější posouzení získaných a graficky zpracovaných údajů.

	a_1	a_2	a_3	a	$\bar{a}_1$	$\bar{a}_2$	$\bar{a}$
$U = f_1(h_M)$	831	-614	146	75,1	196	17	75,1
$U = f_2(HD)$	333	-0,36	$0,28 \cdot 10^3$	75,5	279	-0,11	74,7
$U = f_3(E)$	-302	2,6	$-0,29 \cdot 10^2$	64,0	395	-0,3	64,5
$U = f_4(A)$	-931	3,0	$0,19 \cdot 10^4$	68,7	435	-0,24	70,7
$U = \bar{f}_4(TG)$	144	-73	57,5	26,8	-11,3	126	31,5
$U = f_5(R)$	2,0	15,0	$0,5 \cdot 10^2$	51,7	3,3	14,8	49,8
$U_J = f_6(h)$	-10,6	$1,8 \cdot 10^4$	$-2,9 \cdot 10^5$	98,4	135	3461	99,8
$U_K = f_6(h)$	73,2	$1,3 \cdot 10^4$	$-2,4 \cdot 10^5$	92,8	195	857	93,3
$U_L = f_6(h)$	105	$1,2 \cdot 10^4$	$-2,6 \cdot 10^5$	47,9	235	-951	53,9
$U_M = f_6(h)$	2,5	$1,7 \cdot 10^4$	$-3,5 \cdot 10^5$	45,3	179	-335	57,7
$TG_J = f_7(h)$	-0,88	168	-2031	0,74	0,14	66	0,75
$TG_K = f_7(h)$	-0,91	199	-2718	0,70	0,45	63	0,74
$TG_L = f_7(h)$	-1	225	-3325	0,53	0,66	58	0,53
$TG_M = f_7(h)$	-1,1	228	-3631	0,29	0,68	46	0,48
$A_J = f_8(h)$	205	27421	$-1,2 \cdot 10^5$	89,8	264	21500	87,4
$A_K = f_8(h)$	224	30021	$3,7 \cdot 10^4$	109,6	205	31896	105,7
$A_L = f_8(h)$	65,7	43816	$12,8 \cdot 10^4$	122,7	130	37413	119,0
$A_M = f_8(h)$	409,4	19763	$33 \cdot 10^4$	121,3	244	36266	122,0
$R_J = f_9(h)$	42,4	-1481	$-1,8 \cdot 10^4$	4,7	33,5	-591	4,9
$R_K = f_9(h)$	43,3	-1785	$2,2 \cdot 10^4$	6,2	32,0	-666	6,5
$R_L = f_9(h)$	51,5	-2424	$3,3 \cdot 10^4$	2,7	35,2	-793	4,4
$R_M = f_9(h)$	27,5	-876	$8,1 \cdot 10^3$	3,2	23,4	-473	3,2

Tab. X

DATUM: 05.04.79

 PROTOKOLL DER EINGELESENEN STEUERANWEISUNGEN

// JOB LA11 DR.STEUDNER 3-14-AT/TO
 // FOR LA11 MB=28
 // PAR OPS2 CPMB=CPRZ
 // ASR BEI RECHNUNG WAHLSCHALTER 3 EIN
 // EDJ LA11

BEARBEITER: DR.STEUDNER
 AUFTRAGSNR: 3-14-AT/TO
 OPERATOR: FRA

TITEL: LA11
 START: 21 UHR 41 MIN 31 SEC

$$U = f_1(h_M)$$

ANZ. DER MESSWERTE N= 16
 SUM Y .37084000# 04 SUM X .33820000# 02

AB FKT R= 2 BIS FKT S= 4

KOEFFIZIENTEN DER AUSGLEICHSFUNKTION

A 1 = .83151840# 03
 A 2 = -.61425794# 03
 A 3 = .14581822# 03

Q= .73410900# 05 M= .75146472# 02

1	A=	.83151840# 03	MA=	.64034919# 03
2	A=	-.61425794# 03	MA=	.63273683# 03
3	A=	.14581822# 03	MA=	.14596990# 03

AB FKT R= 2 BIS FKT S= 3

KOEFFIZIENTEN DER AUSGLEICHSFUNKTION

A 1 = .10592800# 03
 A 2 = .16950919# 02

Q= .79045890# 05 M= .75140768# 02

ENDE 01-RECHN.-LAUF: 21 UHR 42 MIN 57 SEC

obr. 56

Tisk výsledků na počítači ROBOTRON

Z obr. 45 je zřejmé, že mezi řezivostí U a tvrdostí brusných nástrojů podle Zeiss-Mackenzena nelze vysledovat prakticky žádnou souvislost. Přiřazená přímka vznikla z velmi rozptýlených hodnot a má jen nepatrně stoupající tendenci se vzrůstající hloubkou důlku.

Závislost $U = f_2 / HD /$ na obr. 46 má jen nepatrně výraznější klesající tendenci, která naznačuje, že se vzrůstající dynamickou tvrdostí klesá řezivost U .

Rozptyl naměřených údajů je opět značný a výše uvedené tvrzení je možné jen po matematickém zpracování.

Nejmenší rozptyl výsledků experimentů a nejvýraznější pokles řezivosti U s rostoucím modulem pružnosti brusných kotoučů poskytuje graf na obr. 47, znázorňující závislost $U = f_3/E$. Uvedený pokles byl zakreslen přímkou

$$U = 395 - 0,3 E \quad /112/$$

jak to vyplývá z Tab. X.

V souhrnu se ukazuje závažná skutečnost, že z použitých metod měření tvrdosti dává nejobektivnější výsledky metoda zjišťování modulu pružnosti. Jako nejméně vhodná se ukazuje metoda Zeiss-Mackenzen jednak pro značný rozptyl a dále proto, že se vzrůstající hloubkou důlku, t.j. s poklesem tvrdosti až o 5 stupňů podle Nortonovy stupnice se jen nepatrně změní řezivost.

Na obr. 48 byl vytvořen podobný souhrnný graf jako na obr. 44 i se stejnou vodorovnou osou, kvalitativně vyjadřující tvrdost kotoučů a na svislou osu byla vynesena kvantitativně jednotlivá nejzajímavější kritéria řezivosti. Protože z grafu vyplývá možnost jistých souvislostí mezi některými kritérii, byly zpracovány jednotlivé grafy závislosti řezivosti U na ostatních typech či kritériích: $U = f_4/A$, $U = \bar{f}_4/\operatorname{tg} \alpha$, $U = f_5/R$.

Předem lze říci, že každá z uvedených funkcí má zcela odlišný charakter. Nepochybně průběh $U = f_4/A$ znázorněný konvexní křivkou s výrazným maximem naznačuje, že mezi U a A není žádná vhodná závislost. Křivka není monotonní a rozptyl naměřených hodnot je značný.

Naopak lze z obr. 50 a 51 vidět velmi dobrou shodu mezi naměřenými údaji a přiřazenou křivkou, resp. přímkou jejichž rovnice jsou:

$$U = 144 - 73 \operatorname{tg} \alpha + 57,5 \operatorname{tg}^2 \alpha \quad /113/$$

$$U = 3,3 - 14,8 R \quad /114/$$

V obou případech se vzrůstajícím kritériem řezivosti $\operatorname{tg} \alpha$ a R roste řezivost U . Tato závislost vyplývá především ze stavby kritérií R a U a dosvědčuje to vhodnost volby kritéria U .

Třetí část hodnocení je věnována vlivu jedné z nejvýraznějších řezných podmínek pro broušení - tloušťce odebírané vrstvy h . Vznikly tak grafy závislosti jednotlivých kritérií řezivosti na této tloušťce, rozdělené ještě pro kotouče jednotlivých tvrdostí.

Obr. 52 poskytuje přehled o vlivu tloušťky odebírané vrstvy na řezivost U . U všech křivek, kreslených pro jednotlivé brusné kotouče, lze vysledovat tendenci ke konkávnímu průběhu křivky s lokálním maximem. Z toho lze soudit, že pro každý brusný kotouč je možno nalézt takovou odebíranou vrstvu, při níž bude řezivost U největší. Proložené silné křivky shrnují hodnoty všech čtyř zkoumaných kotoučů. Současně lze konstatovat, že jejich maxima jsou vyšší u kotoučů měkčích. V souhrnu jsou tyto závěry velmi důležité pro volbu optimálních řezných podmínek při broušení.

Podobné výsledky poskytuje i kritérium označené symbolicky TG odpovídající hodnotě $tg\alpha$ a popsané jako kritérium strmosti. Všechny grafy však již nemají tak jednoznačný průběh. Pro některé brusné kotouče, jako na př. J 2 a J 3 roste tedy $tg\alpha$ s rostoucím h od 0,01 až do 0,04. Dá se však vyslovit předpoklad, že při dalším růstu h dostoupí $tg\alpha$ svého maxima a pak nastane jeho pokles.

Vliv tloušťky odebírané vrstvy na kritérium počátečního impulsu je charakterizován jednoznačně stoupající přímkovou tendencí s rostoucím h . Průběh nenaznačuje, že by mělo dojít ke zlomu těchto přímek, charakterizovaných rovnicí, jejíž koeficienty vznikly jako průměr koeficientů skupin kotoučů:

$$A = 210 + 31770 h \quad /115/$$

Přesto, že naměřené údaje mají malý rozptyl a přímkový průběh závislosti, nejeví se kritérium A jako vhodné, protože neposkytuje informaci o největší možné řezivosti v daném rozsahu. Při jednoznačné snaze po maximální řezivosti by cesta vedla ke stálému zvyšování hloubky h , což by nutně vedlo k překročení možností stroje i nástroje.

Neočekávaný je výsledek zkoumání vlivu tloušťky odebírané vrstvy na řezivost podle kriteria $R = S^{-1} \cdot T_1^{-1}$. Pro toto kritérium obecně platí, že čím je R větší, tím větší je i řezivost brusného kotouče. Získané křivky začínají v nejvyšších hodnotách a klesají až k určitému minimu. Z tohoto průběhu lze odvodit, že vlastně největší řezivost by kotouče měly při nejmenším h . Je-li správně stanoveno tvrzení, že větší R představuje větší řezivost, pak už existuje jen jedna možnost: konstatovat, že kritérium R bylo nevhodně zvoleno.

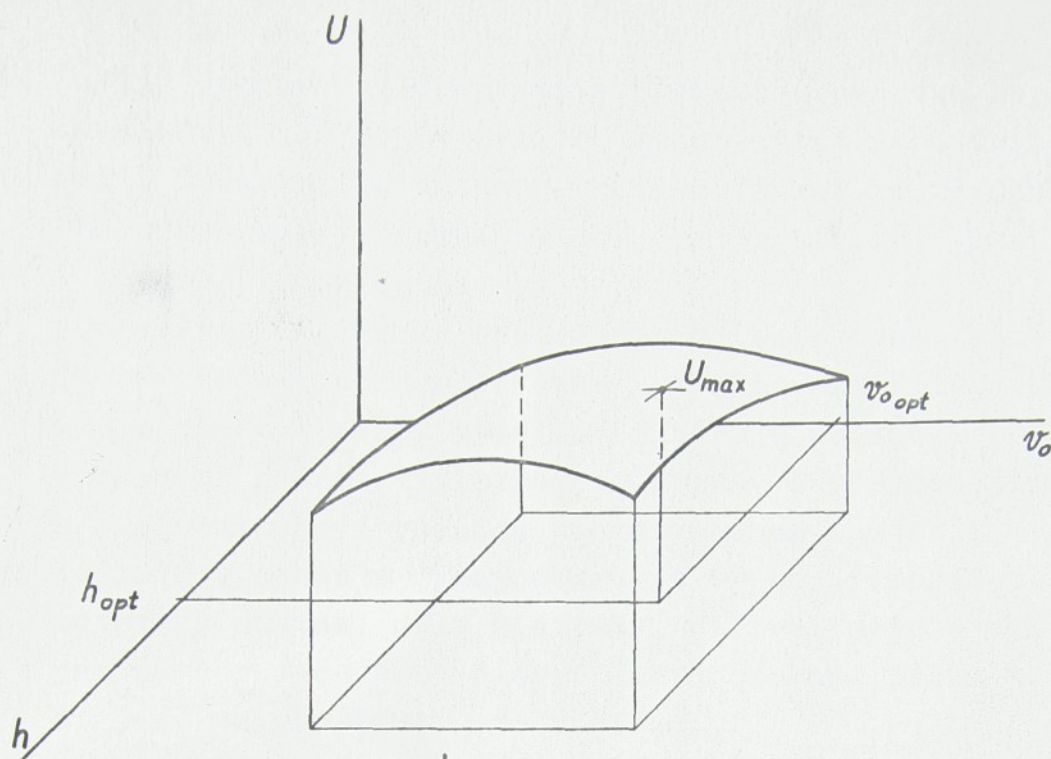
Z uvedeného rozboru vyplývá, že z hlediska vlivu tloušťky odebírané vrstvy lze za nejvhodnější kriteria řezivosti považovat U a jemu je nejblíže kritérium strmosti $\operatorname{tg} \alpha$.

Protože i s ohledem na ostatní výše uvedená hodnocení vychází kritérium U jako nejlepší, lze doporučit, aby se stalo uznávaným kritériem pro hodnocení brusných kotoučů z Al_2O_3 a SiC vyrobených na bázi keramické vazby pro všechny případy broušení. Kritérium současně splňuje další požadavky tím, že jedním číslem hodnotí řezivost, která je tím větší, čím je toto číslo větší.

IV. Z á v ě r

Na základě provedeného rozboru byly pro zhodnocení experimentálně získaných hodnot učiněny následující závěry:

1. Po provedení analýzy několika typů kritérií řezivosti bylo navrženo kritérium strmosti práce U splňující požadavky vytyčené v úvodu práce a v kapitole IV.1.
2. Na základě provedených experimentálních měření byla ověřena jeho platnost, objektivnost a tím i oprávněnost pro praktické použití.
3. Kritérium řezivosti U , jak ukazuje jeho závislost na tloušťce odřezávané vrstvy, může sloužit pro optimalizaci řezných podmínek při broušení.
4. Poskytuje-li toto kritérium možnost optimalizace řezných podmínek, pak odtud vyplývá i jeho použitelnost pro automatizaci pracovního cyklu brousicích strojů.
5. Vliv tloušťky odebírané vrstvy h na řezivost U lze charakterizovat konkávní funkcí s lokálním maximem. Protože posuvová rychlost v_o má na řezné síly podobný vliv jako tloušťka h , je možno předpokládat, že se projeví stejně její vliv na řezivost U . V ortogonálním trojrozměrném systému, kdy jednotlivé osy budou tvořit veličiny U , h , v_o , lze předpokládat vznik vypuklé plochy s lokálním maximem řezivosti U . Tomuto maximu budou odpovídat optimální hodnoty tloušťky odebírané vrstvy h_{opt} a optimální posuvové rychlosti $v_{o\ opt}$, za předpokladu konstantní obvodové rychlosti brusného kotouče v_k a za konstantních dalších podmínek. Tuto úvahu schematicky znázorňuje obr. 57.



obr. 57

Vliv řezných podmínek na řezivost U

6. Kriterium řezivosti U postihuje jen částečně ekonomické faktory, které jsou rozhodující pro hospodárnost broušení. Určité ekonomické výsledky dává jeho schopnost optimalizovat proces broušení. Nedává však informací o úbytku kotouče, o spotřebě elektrické energie a dalších, dříve uvedených hlediscích.

Pro získání uvedených údajů je nutno pokračovat ve výzkumu použitelnosti kritéria zejména ve směru stanovení řezivosti U v závislosti na měrném výkonu broušení a dále pak ve vyhledání vzájemné spojitosti mezi diagramem broušení a řezivosti.

7. Protože ukazatel řezivosti U je stanoven na základě jednorázového krátkodobého měření nezahrnuje rovněž vliv opotřebení brusného kotouče. Průzkumem tohoto vlivu vyžaduje provedení dalších časově náročných experimentálních měření.

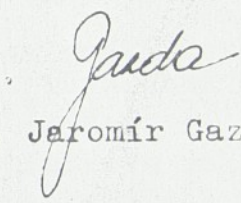
8. Také o dosahované drsnosti a přesnosti obrobku nepodává kritérium řezivosti U žádnou konkrétní informaci. Z faktu, že umožňuje optimalizovat řezné podmínky lze vyjít k předpokladu, že požadovaná drsnost i přesnost bude dosažena.
9. Pro ověření kritéria řezivosti U byla použita metoda, která vhodně znázorňuje tvar vyjiskřovací křivky přímým zápisem. Dnešní moderní přístroje umožňují proces získávání hodnot vyjiskřovací křivky a výpočet konstant a exponentů její rovnice získat mnohem snadněji a rychleji. K výstupu z dynamometru je třeba připojit tenzometrický můstek, dále digitální milivoltmetr s výstupem na děrovač děrné pásy. Takto získaná páska slouží jako ^{nositel} vstupní dat pro počítač.

Předložená práce vznikla na katedře obrábění a ekonomiky fakulty strojní Vysoké školy strojní a textilní v Liberci a byla dokončena v průběhu mé stáže na katedře obrábění Technické university v Drážďanech. Považuji za svou milou povinnost poděkovat vedoucím obou kateder Prof. Ing. Jaroslavu Draskému CSc a Prof. Dr.Sc.tech. Rolfu Reinholdovi za nevšední zájem o mou práci a všestrannou pomoc při její realizaci.

Současně vyjadřuji svůj dík za ochotu při realizaci rozsáhlých experimentů a jejich zpracování pracovním kolektivům obou kateder.

Mnohá měření byla realizována ve spolupráci s diplomanty katedry obrábění a ekonomiky, z nichž zvláště prospěšná byla spolupráce se s. Janem Klabanem. Jemu a všem ostatním upřímně děkuji.

V Liberci 30. dubna 1979


Ing. Jaromír Gazda, CSc

Literatura:

- [1] Maslov, E.N.: Teoria šlifovania materialov. Moskva, Mašinostrojenie 1974. 316s.
- [2] Prokeš, J.: Příspěvek ke klasifikaci výrobních strojů. In: II.konference o teorii strojů a mechanismů, díl B. Liberec, VSST 1976, s.143-150.
- [3] Peklenik, J.: Ermittlung von geometrischen und physikalischen Kenngrößen für die Grundlagenforschung des Schleifens. (Dr.-Ing.disertace) Aachen 1957. 116.s. Technische Hochschule.
- [4] Gazda, J.: Modelování brusného procesu (Kandidátská disertace) Liberec 1973. 141s. - Vysoká škola strojní a textilní. Fakulta strojní.
- [5] Černý, V., Pospíšil, L.: Brusivo a brusné nástroje Praha, SNTL 1967. 142s.
- [6] Nakayama, K.: Taper print Method for the Measurement of Grinding Wheel Surface. Bull. Japan Soc. of Prec.Engg., 1, 1973, č.2, s.59-60.
- [7] Říčka, J.: Vlastnosti brusného nástroje a jejich hodnocení. Strojírenství, 10, 1960, č.5, s. 357-364.
- [8] Říčka, J.: Hodnocení funkčních vlastností brusných nástrojů. Strojírenství, 15, 1965, č.7, s. 534-539.
- [9] Köllner, E.: Výzkum brusných vlastností kotoučů při broušení do kulata. (Výzkumná zpráva -V544). Praha, VÚOSO 1957. 108s.
- [10] Říčka, J.: Řezivost brusného nástroje jako funkce jeho stavu a podmínek broušení. Strojírenství, 21, 1971, č.9, s.540-545.
- [11] Collwel, L.V., Lane, R.O., Soderlund, K.N.: On Determining the Hardness of Grinding Wheels. Transactions of the ASME, ser. B, 84, 1962, č.1., s. 113-128.
- [12] Kramer, J., Engelland, W.: Untersuchungen an Schleifmitteln mit Exoelektronen. Werkstattstechnik, 52, 1962, č. 4, s. 173-177.
- [13] Pursche, G.: Kennzeichnung der Qualität von Ziehschleifsteinen mit Hilfe des E-Moduls. Fertigungstechnik und Betrieb, 15, 1965, č.4, s. 240-245.
- [14] Le Rolland, P., Sorin, P.: Etude d'une methode utilisant le couplage entre deux systemes oscilants pour la détermination de la resistance mécanique des constructions et mesure der modules d elasticité.Public.schént.et tech.du Minister de l air. 47, Paris 1934.

- [15] Rapoport, J.M.,
Cofnus, E.G.: O kontrole tvrdosti abrazivnych izdě-
lij po vprugim charakteristikam. Věst-
nik mašinostrojenja, 40, 1960, č. 7,
s. 57 - 61.
- [16] Gazda, J.,
Gabriel, Vl.: Modul pružnosti brusných kotoučů.
In: Sborník vědeckých prací Vysoké školy
strojní a textilní v Liberci. 7. Praha.
St.pedagog.nakl. 1968, s.87-98.
- [17] Novák, J.: Konstrukce přístroje pro měření modulu
pružnosti brusných kotoučů dvojkyvadlo-
vou metodou. (Diplomová práce). Liberec
1968. 64. s. - Vysoká škola strojní a
textilní. Fakulta strojní.
- [18] Peklenik, J.: Untersuchung der Härte von Schleifkör-
pern. Microtecnic, 1960, č.5, č. 6
- [19] Micheletti, G. F.,
Russo, G.: Prove su mole con il metodo del "mar-
tellopendolo": risultati sperimentali
e confronti con altri metodi. Atti e
rasegna tecnici, 19, 1965, č.1, s.1-13.
- [20] Dlouhý, M.,
Houdek, J.,
Koloc, J.: Slinuté karbidy pro obrábění.
Praha, SNTL 1964. 380 s.
- [21] Buda, J.,
Békés, J.: Teoretické základy obrábění kovov.
Bratislava, SVTL 1977. 693 s.
- [22] Gabriel Vl.,
Bukač, K.: Vypracování návrhu normy metodiky zkou-
šení řezivosti jednobřitých nástrojů ze
slinutého karbidu a metodiky zkoušení
obrobitelnosti kovových materiálů ná-
strojem ze slinutého karbidu. (Výzkum-
ná zpráva - 7/74-KOE-SU). Liberec VSST
1974. 47 s.
- [23] Yoshikawa, H.,
Peklenik, J.: Thre-dimensional simulation Techniques
of the Grinding Process. In:Advances in
Manufacturing systems. Oxford. Pergamon
Press1971, s. 89-102
- [24] Majkus, J.: Teoretický rozbor hospodárnosti a pro-
duktivity obrábění broušením. (Výzkum-
ná zpráva - V 203). Praha, VÚoso 1953.
- [25] Lur'je, G.B.: Šlifovanie metallov.
Moskva, Mašinostrojenje 1969, 175 s.
- [26] Šal'nov, V.A.: Šlifovanie i polirovanie vysokopročnych
materialov. Moskva, Mašinostrojenje 1972
243 s.
- [27] Hahn, R.S.: Neue Entwicklungen beim Genauschleifen.
Werstattstechnik, 65, 1975, č. 8,
s. 453-461

- [28] Armarego, E.J.A.,
Brown, R.H.: Obrabotka metallov rezaniem.
Moskva, Mašinostrojenie 1977. 323 s.
- [29] Snoeys, R.,
Peters, J.,
Decneut, A.: The Significance of Chip Thickness
in Grinding. Annals of the CIRP, 23,
1974, č. 2, s. 227 - 237.
- [30] Kubišta, P.: Charakteristické veličiny pro výpočet
řezných podmínek pro broušení vnějších
válcových ploch. Strojírebská výroba,
24, 1976, č. 2, s. 101-105.
- [31] Glaserová, M.: Návrh a ověření metody hodnocení funk-
čních vlastností brusných kotoučů.
(Diplomová práce) Liberec 1977. 55 s.-
Vysoká škola strojní a textilní. Fa-
kulta strojní.
- [32] Lemmens, J.W.: Elektronika, Heverle, Belgie: Přesná
kontrola tvrdosti brusných kotoučů.
(B.r.)
- [33] Matoušek, K.: Návrh určování řezivosti brusných ko-
toučů. (Diplomová práce). Liberec 1971.
61 s. - Vysoká škola strojní a textilní
Fakulta strojní.
- [34] Jirsa, M.: Řezivost brusných kotoučů při rovinném
broušení obvodem kotouče. (Diplomová
práce) Liberec 1973. 55 s. - Vysoká
škola strojní a textilní. Fakulta stroj-
ní.
- [35] Středa, M.: Hodnocení řezivosti brusných kotoučů
pro vnější válcové broušení. (Diplomo-
vá práce) Liberec 1972. 57 s. - Vyso-
ká škola strojní a textilní. Fakulta
strojní.
- [36] Gazda, J.: Měření řezných sil při rovinném brou-
šení obvodem kotouče. (Výzkumná zprá-
va) Liberec, VSST 1971. 33 s.
- [37] Rakušan, Z.: Měření dynamické tvrdosti brusných ko-
toučů. (Diplomová práce) Liberec 1975.
52 s. Vysoká škola strojní a textilní.
Fakulta strojní.
- [38] Klaban, J.: Řezivost brusných kotoučů při rovinném
broušení obvodem kotouče. (Diplomová
práce) Liberec 1975. Vysoká škola stroj-
ní a textilní. Fakulta strojní.
- [39] Steudner, K.: Nutzung der Rechentechnik zur Auswer-
tung technologischer Versuche. Ferti-
gungs-technik und Betrieb, 23, 1973,
č.11, s. 654-656.