

VYSOKÁ ŠKOLA STROJNÍ A TEXTILNÍ  
nositelka Řádu práce

FAKULTA STROJNÍ

KATEDRA OBRÁBĚNÍ A MONTÁŽE

Obor 23-07-8 strojírenská technologie  
Zaměření o b r á b ě n í a m o n t á ž

VÝZKUM ŘEZIVOSTI BROUSÍCÍCH KOTOUČŮ PRO BROUŠENÍ MATERIÁLŮ SE ZTÍŽENOU  
OBROBITELNOSTÍ

---

KOM - OM - 413

Josef F r u m a r

Vedoucí práce: Doc. Ing. Jaromír G a z d a, CSc.  
VŠST, Liberec

Konzultant: Ing. Ivo Š r á m e k  
SZVKE Benátky n. Jizerou  
Ing. Jiří B u r i a n  
VŠST, Liberec

Rozsah práce:

Počet stran : .....62  
Počet příloh a stran: .....33  
Počet obrázků:.....19  
Počet výkresů:..... 0  
Počet modelů nebo  
jiných příloh:..... 0

Datum: 23. května 1986

Vysoká škola: strojní a textilní Fakulta: strojní

Katedra: obrábění a montáže Školní rok: 1985-86

# ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

pro Josefa Frumera

obor 23 - 07 - 8 strojírenská technologie

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

Název tématu: Výzkum rezivosti brousících kotoučů pro broušení  
materiálu se ztíženou obrobiteľnosťí

## Zásady pro vypracování:

1. Význam poznání v oblasti výzkumu rezivosti brousících kotoučů pro výrobu leteckých motorů
2. Studium, souhrn a rozbor dosavadních poznatků z oboru broušení kovů, zaměřený k danému tématu DP
3. Návrh metodiky experimentů včetně výběru vhodných měřicích a registračních přístrojů
4. Provedení experimentů pro vybrané materiály a navržené brousící kotouče
5. Zpracování naměřených veličin, jejich rozbor a zhodnocení
6. Shrnutí poznatků, návrh dalšího pokračování výzkumu, závěry

VYSOKÁ ŠKOLA STROJNÍ A TEXTILNÍ  
Ústřední knihovna  
LIBEREC 1, STUDENTSKÁ 6  
420 01 17

Rozsah grafických prací: dle potřeby

Rozsah průvodní zprávy: 40 - 50 stran textu

Seznam odborné literatury:

Maslov, J. N.: Teorie broušení kovů. 1. vyd. Praha 1979

Tiep, N. V.: Obrobitelnost kovových materiálů broušením.  
/kandidátská disertační práce/ VŠST Liberec, 1984

Diplomová práce - Neřold, Glaserová, Kořínek, Voda

Vedoucí diplomové práce: Doc. Ing. J. Gazda, CSc.

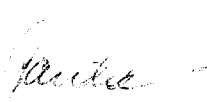
Konzultant: Ing. Ivo Šrámek - SZVKE Bemátky n/J

Ing. Burian - KOM


Datum zadání diplomové práce: 30. 9. 1985

Termín odevzdání diplomové práce: 23. 5. 1986

L. S.

  
Doc. Ing. Jaromír Gazda, CSc.

Vedoucí katedry

  
Doc. Ing. Ján Alaxín, CSc.

Děkan

v Liberci dne 20. 9. 1985

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

V Liberci, dne 23. května 1986

*F. J. J. J.*

Seznam použitých symbolů	3
1. Úvod	7
1.1. Zaměření práce	8
2. Broušení a jeho charakteristika v současné době	9
2.1. Podstata broušení	9
2.2. Princip úběru kovu	10
2.3. Zvláštnosti procesu broušení	12
3. Stavba brusného kotouče	14
3:1. Druh brusiva	14
3.2. Zrnitost brusiva	15
3.3. Tvrdost brusného kotouče	15
3.4. Struktura brusného kotouče	16
3.5. Druh pojiva	16
3.6. Označení brusného kotouče	17
4. Měření tvrdosti brousících kotoučů	17
4.1. Měření statické tvrdosti	17
4.2. Měření tvrdosti zvukovou metodou	17
4.3. Měření dynamické tvrdosti	19
5. Pojem obrobitelnosti	19
5.1. Obrobitelnost při broušení	22
5.2. Kritéria používaná při hodnocení obrobitelnosti	23
6. Řezivost brousících kotoučů (kritéria řezivosti)	32
6.1. Kritérium strmosti úběru	33
6.2. Kritérium obrobitelnosti broušením	33
6.3. Součinitel broušení	33
6.4. Ekvivalentní tloušťka odebírané vrstvy	35
6.5. Diagram broušení	36
6.6. Vliv opotřebení a trvanlivosti brusného kotouče	39
7. Těžkoobrobitelné materiály	39
7.1. Vysocepevnostní oceli	39
7.2. Korozivzdorné a žárovzdorné oceli	40
7.3. Žárupevné oceli	40
7.4. Slitiny s vysokým obsahem Cr, Ni	40
7.5. Vliv některých prvků na obrobitelnost	41

7.6. Broušení těžkoobrobitelných materiálů na bázi Ni, Cr a Ti	41
8. Chlazení těžkoobrobitelných materiálů	43
8.1. Popis některých řezných kapalin	43
9. Volba kritérií řezivosti	44
10. Metoda experimentálních měření	45
10.1. Zkušební stroj	45
10.2. Zkušební zařízení	45
10.3. Použité kotouče	48
10.4. Řezné podmínky	48
10.5. Měření užitečného výkonu	49
10.6. Měření drsnosti	49
10.7. Měření opotřebení kotouče	49
10.8. Měření otáček vřetena	50
11. Postup měření	51
12. Vyhodnocení měření	53
12.1. Výpočet kritérií	54
13. Zhodnocení dosažených výsledků	55
14. Diskuse výsledků a návrh dalšího výzkumu v této oblasti	57
15. Závěr	59
Seznam použité literatury	60
Seznam příloh	62

## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ

a	mm	Hloubka záběru
$a_t$	mm	Tloušťka třísky
A	N . s	Kritérium počátečního impulzu (relativní)
$A_5$	%	Tažnost
b	mm	Šířka kotouče
$\underline{b}$	mm	Šířka styku brusného kotouče s obrobkem
$c_K$	-	Rovnice vyjiskřovací křivky
C	-	Konstanta vyjiskřovací křivky
$C_K$	-	Konstanta provozní řeznosti
$C_o$	-	Konstanta závisící na podmínkách broušení
d	m	Vnitřní průměr kotouče
$d_s$	mm	Průměr brusného kotouče
$d_w$	mm	Průměr obrobku
D	m	Vnější průměr kotouče
e	-	Základ přirozených logaritmů
e	J . mm <sup>-3</sup>	Měrná energie broušení
$e_{0,1}$	J . mm <sup>-3</sup>	Specifická energie pro $h_{eq} = 1 \mu\text{m}$
E	Pa	Modul pružnosti
y	-	Exponent
z	-	Exponent
$F_1$	N . mm <sup>-1</sup>	Porovnávací síla pro $h_{eq} = 1 \mu\text{m}$
F	N	Radiální složka řezné síly
$F_p$	N . mm <sup>-1</sup>	Radiální složka řezné síly na 1 mm činné šířky
$F_e$	N	Tangenciální složka řezné síly
$F_e'$	N . mm <sup>-1</sup>	Tangenciální složka řezné síly na 1 mm činné šířky
h	mm	Přísuv
$h_{eq}$	$\mu\text{m}$	Ekvivalentní tloušťka odebírané vrstvy
$h_m$	mm . s <sup>-1</sup>	Intenzita úběru
$h_o$	$\mu\text{m}$	Nastavená tloušťka třísky
$h_{zb}$	$\mu\text{m}$	Neodebraná vrstva

HB	-	Tvrđost podle Brinella
HV	-	Tvrđost podle Vickerse
I N . s		Kritérium počátečního impulzu (absolutní)
k	-	Exponent
$k_p \mu\text{m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{N}^{-1}$		Řezivost
$k_q \text{mm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{N}^{-1}$		Řezná schopnost koeficientu řezivosti
$k_s \text{mm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{N}^{-1}$		Koeficient samoostření
$k_v \mu\text{m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{N}^{-1}$		Řezivost
$k_y \mu\text{m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{N}^{-1}$		Řezivost
$k_z \mu\text{m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{N}^{-1}$		Řezivost
K	-	Kritérium strmosti
KCU2 J	$\text{mm}^{-2}$	Vrubová houževnatost
$K_{ob}$	-	Koeficient broušitelnosti
$K_{obA}$	-	Index absolutní obrobitelnosti
$K_{obR}$	-	Index relativní obrobitelnosti
L	$\text{mm}^{-2}$	Kritérium strmosti úběru
m	-	Poměrný objemový obrus
$\frac{m}{m}$	-	Měrná výrobnost kotouče
$m_A$	-	Exponent poměrné trvanlivosti
$m_1$	-	Porovnávací poměrný obrus pro $h_{eq} = 1 \mu\text{m}$
$m_N$	$\text{mm}^2$	Kvadratický poměrný obrus
$m_g$	kg	Hmotnost kotouče
M	-	Tvarový součinitel
O	-	Opotřebení
$O_b$	$\text{mm}^{-4}$	Koeficient obrobitelnosti broušením
$q \text{mm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{W}^{-1}$		Měrný výkon broušení
$q$	$\text{W}^{-1}$	Charakteristika broušitelnosti
$q_v$	-	Rychlostní poměr
$Q$	$\text{mm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	Výkon broušení
$Q_1$	$\text{mm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{mm}^{-1}$	Výkon broušení na jednotku šířky brusného kotouče
$Q_1$	$\text{W} \cdot \text{mm}^{-1}$	Odebraný materiál na 1 mm šířky záběru



$Q_{11}$	-	Konstanta objemu odebraného materiálu pro $h_{eq} = 1 \mu\text{m}$
$Q_M$	$\text{mm}^3 \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{mm}^{-2}$	Měrný úběr na jednotku plochy kotouče
$r$	-	Exponent
$R$	$\text{s}^{-1}$	Frekvence chvění brusného kotouče
$R$	-	Kritérium časového objemu práce
$R$	-	Komplexní řezivost (Lurje)
$R_a$	$\mu\text{m}$	Drsnost povrchu
$R_{a1}$	-	Konstanta drsnosti povrchu pro $h_{eq} = \mu\text{m}$
$R_e$	MPa	Mez kluzu
$R_{e0,2}$	MPa	Smluvní mez kluzu
$R_m$	MPa	Mez pevnosti
$S$	$\text{mm}^2$	Plocha pod křivkou
$S_h$	$\text{mm}^2$	Plocha pod křivkou
$t$	s	čas
$T$	-	Časová konstanta
$T$	min	Trvanlivost
$T_1$	-	Koeficient časového úseku
$u$	-	Exponent
$U$	$\text{mm}^{-2}$	Kritérium strmosti práce
$v_K$	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	Obvodová rychlost kotouče
$v_o$	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	Obvodová rychlost obrobku
$v_s$	$\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$	Rychlost změny poloměru brusného kotouče
$v_y$	$\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$	Rychlost přísuvu
$V_k$	$\text{mm}^3$	Úbytek brusného kotouče
$V_o$	$\text{mm}^3$	Objem odbroušeného materiálu
$V_s$	$\text{mm}^3$	Objem opotřebení kotouče
$V_w$	$\text{mm}^3$	Objem odebraného materiálu obrobku
$w$	-	Exponent
$x$	mm	Změna rozměru obrobku za čas
$y$	mm	Odtlačení SPID (průhyb)

$y_k$	·mm	Konečný průhyb
$Z_w$	$\text{mm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	Rychlost úběru materiálu
$Z$	%	Kontrakce
$\alpha$	°	Úhel hřbetu brousícího zrna
$\beta$	°	Úhel čela brousícího zrna
$\alpha$	°	Úhel strmosti vyjiskřovací křivky
$\beta$	°	Úhel strmosti
$\mu$	$\text{m} \cdot \text{W}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$	Poměrný koeficient broušitelnosti
$\rho$	mm	Poloměr zaoblení zrna
$\omega$	-	Součinitel broušení
$\gamma$	-	Konstanta
$\lambda_d$	-	Řezivost po orovnění
$\lambda_w$	-	Komplexní řezivost podle Lurje
$\theta$	°C	Teplota broušení
$\delta$	°	Úhel řezu brousícího zrna
$\lambda_w$	$\text{mm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{N}^{-1}$	Parametr úběru kovu

## 1. ÚVOD

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

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

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

Potřeby našeho národního hospodářství, jako například výstavba energetických reaktorů, elektrárenských bloků, ale zejména výroba leteckých lopatkových motorů, vyžaduje užití materiálů se špičkovými užitnými vlastnostmi (vysoká pevnost), špičkovými fyzikálními, chemickými a jinými vlastnostmi. Jsou to například konstrukční oceli zušlechtěné na pevnost až 2500 MPa, vysokolegované chromové oceli, austenitické manganové oceli, manganniklové a manganchromové, austenitické oceli chromniklové, korozi-vzdorné, žárovevné, niklové slitiny a některé materiály vyráběné metodou

práškové metalurgie.

Užití takovýchto materiálů si vyžaduje podmínky, při kterých letecké lopatkové motory a energetické bloky pracují, ať už jde o vysoké teploty, velké odstředivé síly, tlakové namáhání či korozní prostředí.

V souvislosti se zkvalitňováním konstrukčních materiálů, což dovoluje za stejných podmínek nahradit původní materiál materiálem novým a tím zvýšit především bezpečnost výrobků, se objevuje řada obtíží při technologickém zpracování těchto materiálů, zejména pak při obrábění.

A právě výzkum řezivosti brousících kotoučů by mohl přispět k hlubšímu poznání procesu broušení těžkoobrobitelných materiálů a tím umožnit zvýšení produktivity práce při dodržení požadované jakosti a kvality obrobene plochy, rozměrové přesnosti eventuelně nahradit dovážené brousící kotouče kotouči tuzemské výroby.

Takovéto snížení výrobních nákladů, spojené s úsporou energie, surovin a materiálu by jistě vedlo ke zvýšení konkurenceschopnosti energetických celků i leteckých lopatkových motorů na zahraničních trzích.

### 1.1. Zaměření práce

Je nesporné, že brousící kotouč je jedním z nejdůležitějších členů technologické soustavy SPID, která rozhoduje o úspěšnosti odřezávání broušeného materiálu. Zásadním úkolem při broušení je tedy vybrat vhodný brousící kotouč tak, abychom jak po technické, tak i po ekonomické stránce odbrousili daný materiál. Jinými slovy řečeno, správně posoudit řezivost brousícího kotouče.

Cílem této diplomové práce je posoudit řezivost souboru brousících kotoučů při broušení těžkoobrobitelných materiálů používaných v leteckém průmyslu. K tomu je třeba kromě studia dosavadních teoretických poznatků o procesu broušení (řezivosti) také navrhnout metodiku experimentálních měření a zvolit vhodné měřicí a registrační přístroje.

Kromě toho je cílem této diplomové práce také pomoci při zavádění metodiky měření složek řezné síly pomocí dvousložkového tenzometrického dynamometru s grafickým záznamem na oscilografu v SZVKE v Benátkách nad Jizerou. Získané výsledky z měření umožňují posoudit, zda zvolená metodika měření a použité přístroje jsou vhodné či nikoliv.

## 2. BROUŠENÍ A JEHO CHARAKTERISTIKA V SOUČASNÉ DOBĚ

Broušení patří mezi nejstarší metody obrábění materiálů, které člověk znal a využíval již v předhistorických dobách. Prudký rozvoj technologie broušení, který nastal začátkem tohoto století, byl vyvolán stupňujícími se požadavky na vysokou přesnost součástí, dovolující jejich vzájemnou vyměnitelnost a byl umožněn objevem umělých brousících materiálů s rovnoměrnou a lepší kvalitou než měly běžné materiály přírodní.

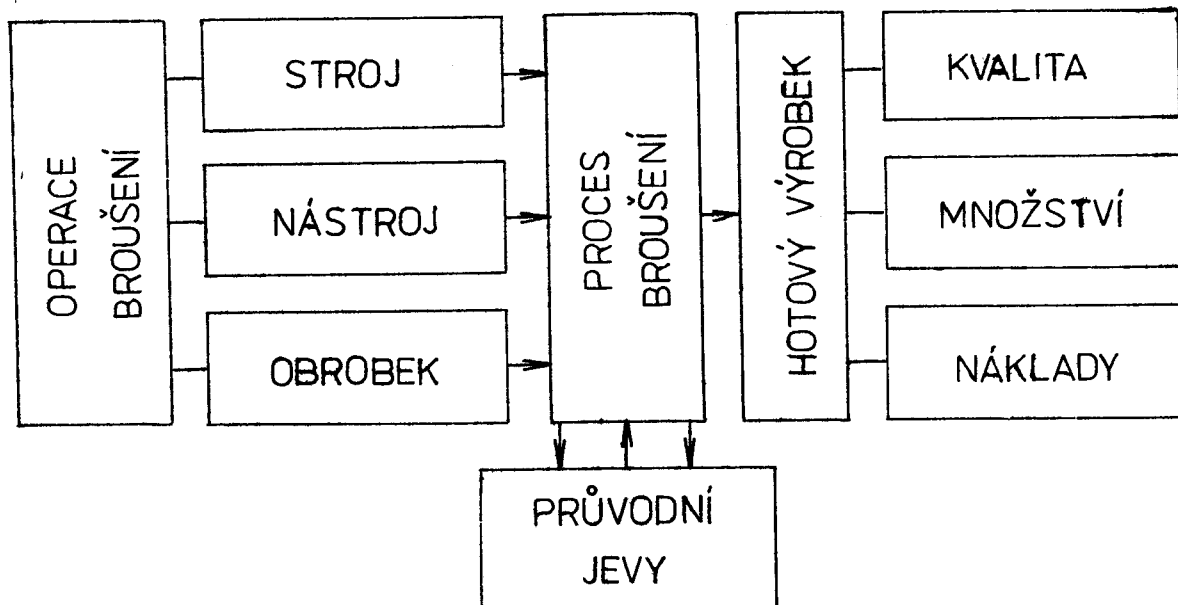
V současné době splňuje broušení ve strojírenské výrobě tyto hlavní funkce:

- opracování součástí na přesný geometrický tvar a rozměry s vysokou jakostí povrchové vrstvy
- opracování součástí a materiálů pro něž je jiný způsob obrábění obtížný nebo vůbec nemožný
- opracování součástí a materiálů, pro něž je broušení nejehospodárnější (hrubovací operace).

### 2.1. Podstata broušení

Broušení patří mezi třískové obrábění, při kterém jsou z broušeného materiálu odebírány velmi jemné třísky prostřednictvím mnohabřitého nástroje (brousícího kotouče) s nepravidelným rozmístěním břitů a nedefinovanou geometrií. Výsledný řezný pohyb je při broušení složen z pohybu nástroje a z pohybu obrobku. Jednotlivé metody broušení se navzájem liší pouze podmínkami záběru mezi brousícím nástrojem a obrobkem a kinematickými poměry.

Technologickou soustavou - stroj-nástroj-obrobek je uskutečňován proces broušení. Blokové schéma tohoto procesu je na obrázku 1. Za vstupní podmínky procesu broušení lze považovat všechny členy této soustavy s jejich dílčími parametry. Ty vytvářejí vzájemnou vazbu podmínky k uskutečnění procesu broušení a zároveň jej ovlivňují. V průběhu procesu broušení vznikají a působí průvodní jevy tohoto procesu. Výsledek celého procesu udává kvalita obrobku, množství obrobků a náklady, tedy ekonomické ukazatele.

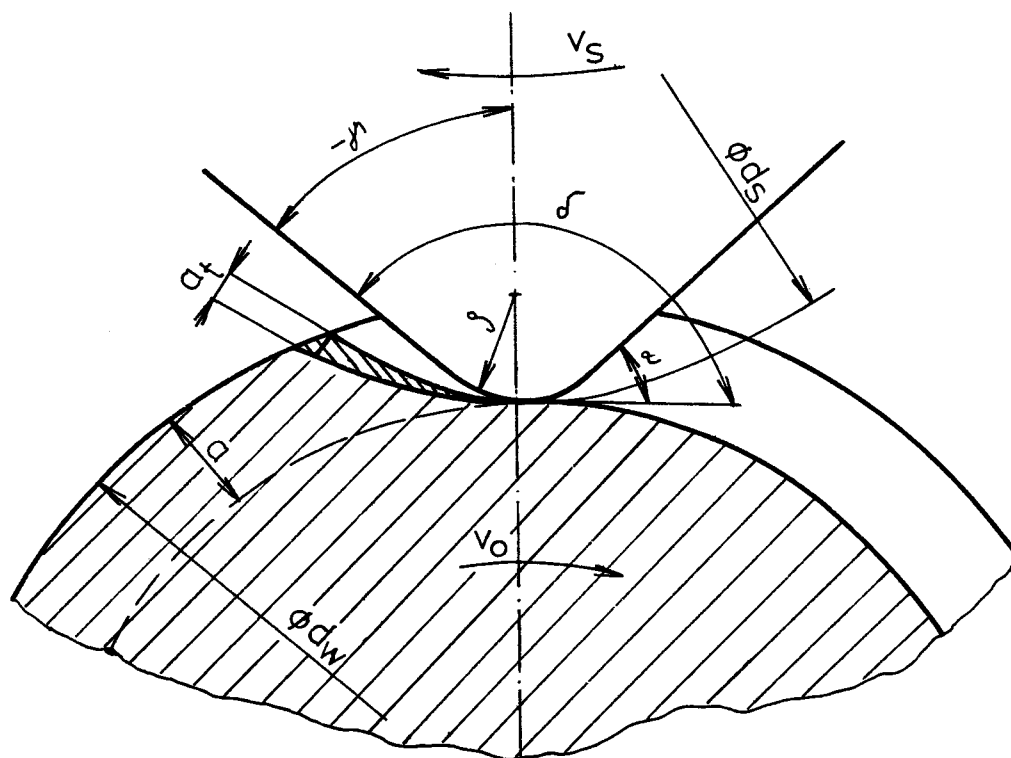


Obr. 1 Blokové schéma procesu broušení

## 2.2. Princip úběru kovu

I přestože broušení má velký význam v průmyslu, není proces broušení ještě zcela teoreticky objasněn a nejsou dosud známy všechny jeho vlivy a zákonitosti. Tato skutečnost vyplývá z toho, že broušení je značně složitý řezný proces, který se svými specifickými zvláštnostmi liší od běžných metod obrábění nástroji s pravidelnou geometrií.

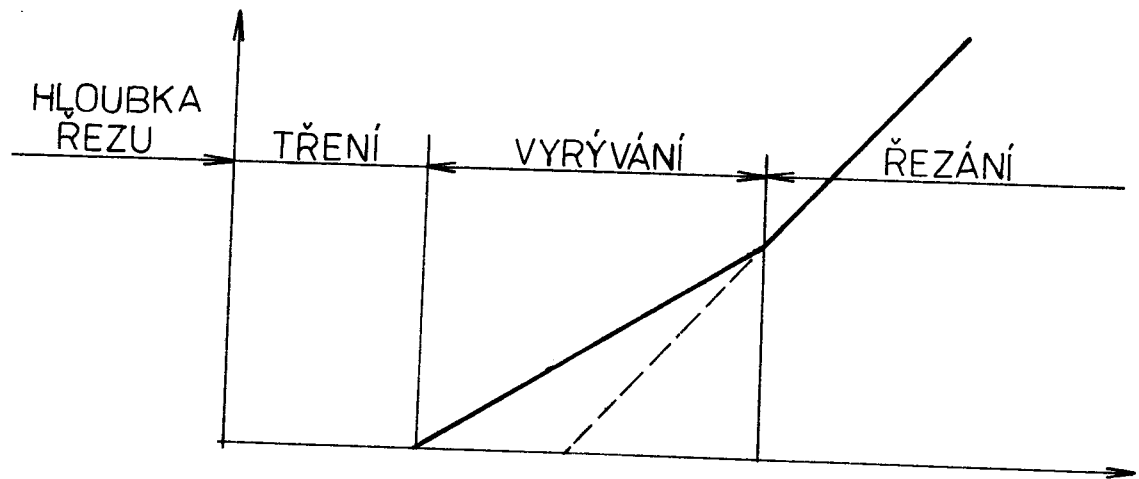
Složitost brusného procesu je dána především nestálostí řezného nástroje - brousícího kotouče. Funkční plocha kotouče se skládá z velkého množství v prostoru nepravidelně rozložených miniaturních řezných nástrojů, brousících zrn. Jednotlivá brusná zrna jsou tvaru nepravidelného mnohostěnu, mající zcela nahodilou orientaci krystalografických os vzhledem k pracovní ploše kotouče. Břity zrn jsou zaobleny rádiusem  $\rho$ , řezné úhly závisí na poloze zrna v kotouči a jsou znázorněny na obrázku č. 2. Z hlediska obrábění jsou řezné úhly zcela nevhodné. Úhel čela u brousících zrn je v rozsahu  $\alpha = -81^\circ$  až  $-89^\circ$ , úhel hřbetu  $\omega = 3^\circ$  až  $45^\circ$



Obr. č. 2 Řezné úhly na břitu brousícího zrna

Přisouváním brousícího kotouče do řezu při broušení nastávají na stykové ploše brousícího zrna a obrobku tři rozdílné fáze, uvedené na obrázku 3.

- 1) tření - brousící zrna (následkem zaoblení břitu a nepatrného počátečního záběru) klouže po povrchu obrobku a způsobuje elastickou, případně plastickou deformaci materiálu obrobku, v podstatě bez úběru materiálu. Vnější třením zrna po povrchu obrobku a zejména vnitřním třením materiálu vzniká v místě styku teplo.
- 2) vyrývání - brousící zrna způsobuje plastickou deformaci materiálu obrobku, ve směru kluzu vznikají rýhy, přičemž je materiál obrobku při malé rychlosti úběru vyvrácen na boky.
- 3) řezání - k řezání dochází před břitkem zrna, za současného působení plastické deformace a teploty a při dosažení určitého poměru mezi tloušťkou třísky a poloměrem zaoblení břitu, k posunutí částic materiálu a vytváří se tříska, při poměrně velké rychlosti úběru materiálu.



Obr. 3 Oblast tření, vyrývání a řezání při broušení

Hromadným odíráním vrstvy zrn kotouče a obrobku je vytvářen v místě řezu vysoký měrný řezný odpor, způsobený především nevhodnou geometrií brousících zrn a obrovským počtem ohnisek s vysokými teplotami, způsobený intenzivní plastickou deformací povrchové vrstvy obrobku - třením při procesu oddělování třísky.

### 2.3. Zvláštnosti procesu broušení

- Broušení v porovnání s ostatními způsoby třískového obrábění se vyznačuje řadou zvláštností a rozdílů. Mezi nejpodstatnější patří:
- Brusný kotouč jako nástroj podléhá v průběhu procesu broušení soustavným změnám.
  - Tříska není odebírána souvislým břitem, ale velkým množstvím elementárních břitů - brousících zrn.
  - Úhly čel zrn brusiva jsou nestejně, vesměs ale velké a záporné, což silně ovlivňuje charakter práce brousících zrn.
  - Třísky odděleného materiálu mají malé průřezy, řádově  $10^{-3} \text{ mm}^2$ .
  - Doba záběru zrna brusiva s obrobkem je krátká, řádově  $10^{-6}$  sekundy.
  - Materiály brousících zrn mají vysokou tvrdost a odolnost proti otěru i za vysokých teplot, což dovoluje provádět úběr materiálu velkými řeznými rychlostmi.
  - Různorodost geometrické formy zrn brusiva a neurčitost jejich vzájemné polohy mají za následek nepravidelný úběr třísky jednotlivými zrny brusiva.

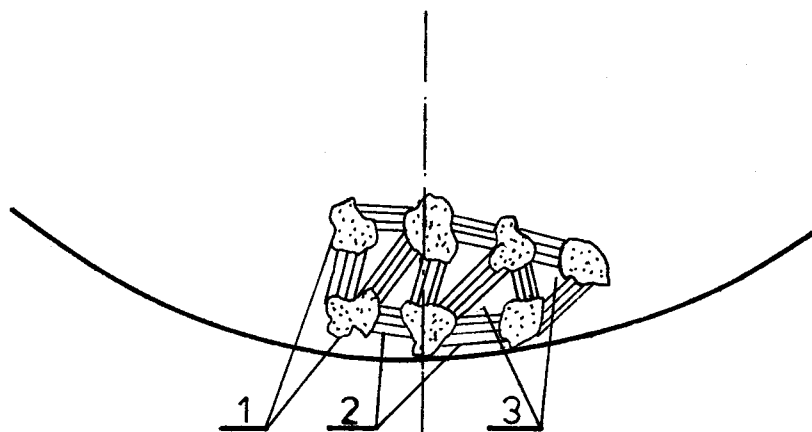


- Poměrně slabé upevnění zrna ve vazbě brousících kotoučů omezuje maximálně řeznou sílu, kterou je toto uložení zrna schopno přenést.
- Dochází k samovolnému uvolňování zrn brusiva při broušení, tzv. samoostření.
- Vznikají relativně malé řezné síly, maximálních hodnot  $10^2$  N.
- Poměr mezi tloušťkou třísky a poloměrem zaoblení břitu je nepříznivý a společně s extrémními hodnotami řezných úhlů brousících zrn zvyšují plastickou deformaci povrchové vrstvy obrobku.

### 3. STAVBA BRUSNÉHO KOTOUČE

Úlohu řezného nástroje při broušení plní brusný kotouč. Brusný kotouč má odlišnou stavbu oproti řeznému nástroji z kovu. Brusné kotouče jsou pórovitá tělesa vytvořená ze zrn brusiva, navzájem spojených pojivem v jeden celek.

Stavba brusného kotouče je poměrně jednoduchá. Nejčastěji bývá znázorněna prostým modelem, jak je vidět na obrázku 4.



Obr. 4 Model stavby brusného kotouče

kde: 1 - zrna brusiva

2 - pojivo ve tvaru spojovacích můstků

3 - póry

Brusné kotouče jsou charakterizovány těmito základními poměrnými veličinami: druh brusiva, zrnitost brusiva, tvrdost brusného kotouče, struktura brusného kotouče, druh pojiva.

#### 3.1. Druh brusiva

Materiál používaný k výrobě brusných nástrojů musí vyhovovat těmto požadavkům: - být dostatečně ostrý

- být velmi ostrý, ale houževnatý

- mít značnou tepelnou odolnost

Na výrobu brusných kotoučů se používají přírodní brusiva (diamant, křemen, smírek, přírodní korund a další) nebo umělá brusiva (umělý korund, karbid křemíku, karbid bóru, syntetický diamant, kubický nitrid bóru a další).

Nejčastěji užívanými brusivy v současné době ve strojírenství jsou převážně umělá brusiva vzhledem k jejich stejnorodosti a čistotě. Pro volbu kotouče platí, že čím větší je rozdíl v tvrdosti mezi brusivem a obráběným materiálem, tím větší je řezivost brusiva.

### 3.2. Zrnitost brusiva

Zrnitost určuje velikost brusných zrn a vyjadřuje se číslem, které je desetinou měrného rozměru hlavní frakce zrn, měřeného v mikrometrech. Norma ČSN 22 40 12 připouští, že každé číslo zrna může mimo základní velikost obsahovat i malé procento zrn hrubších a jemnějších.

### 3.3. Tvrdost brusného kotouče

Tato tvrdost nevyjadřuje skutečnou tvrdost brousícího materiálu, ale je mírou houževnatosti a pružnosti pojivových můstků mezi zrny, jakož i soudržnosti pojiva se zrny. Závisí tedy na vlastnostech pojiva, ale i na počtu a velikosti můstků, počtu a tvaru zrn. Je definována jako odpor proti vylomení nebo uvolnění jednotlivých brusných zrn z brousícího nástroje vlivem vnějších sil při broušení.

Ve správném kotouči zadržuje pojivo brusná zrna pouze do jejich otupení. Pak se mají vydrolit nebo odstranit orovnáváním. Při nesprávné volbě tvrdosti brusného kotouče se zrno vylamuje ještě neotupené a kotouč se rychle opotřebovává (málo tvrdý kotouč) nebo se velmi rychle zahřívá (příliš tvrdý kotouč).

### 3.4. Struktura brusného kotouče

Struktura je poměr objemu pórů k celkovému objemu brusného nástroje. Důležité je, aby tento poměr v celém tělese brusného kotouče byl stejný. Podle ČSN 22 40 24 je však struktura hodnocena podle tzv. zdánlivé pórovitosti, která se určuje metodou objemové nasákavosti. Tato metoda pracuje s určitou chybou, neboť zjišťuje pouze objem otevřených pórů. Kotouč ovšem obsahuje i určité množství uzavřených pórů, které se uplatňují během provozu kotouče při samoostření či orovnávaní.

### 3.5. Druh pojiva

Pojivo má za úkol stmelovat zrna brusiva tak, abychom získali nástroje žádaného tvaru, rozměru, tvrdosti a struktury. Vlastnosti brusného kotouče jsou závislé na druhu, složení a množství pojiva. Přehled používaných pojiv ukazuje tabulka č. 1.

### 3.6. Označení brusného kotouče

Označování brusných kotoučů podle normy ČSN 22 40 10 je uvedeno v tabulce č. 1.

#### 4. MĚŘENÍ TVRDOSTI BROUSÍCÍCH KOTOUČŮ

Měření tvrdosti brousících kotoučů je dosti důležité, neboť vyrobený kotouč nemusí mít vždy přesně hodnotu tvrdosti shodnou s hodnotou tvrdosti, kterou udává výrobce.

##### 4.1. Měření statické tvrdosti

Měření statické tvrdosti bylo prováděno metodou ZEISS-MACKENSEN na přístroji TF 21-1 v SZVKE v Benátkách nad Jizerou. Podmínky zkoušení udává norma PN 22 4020. Měřítkem tvrdosti je hloubka důlku vytvořeného v kotouči tryskáním 28 cm<sup>3</sup> křemičitého písku o zrnitosti 40 tryskou o průměru 5 mm při tlaku vzduchu 0,15 MPa.

Tato metoda je vhodná ke kontrole brusných nástrojů s pojivem keramickým nebo bakelitovým, zrnitosti 6 až 100.

##### 4.2. Měření tvrdosti zvukovou metodou

Rovněž měření tvrdosti zvukovou metodou bylo prováděno v SZVKE v Benátkách nad Jizerou.

Tvrdost brusného kotouče se určuje podle výšky tónu, který vydává rozechvěný brusný kotouč. Frekvence tónu se snímá pomocí dotykového snímače a zobrazuje na display. Přepočtem pomocí tabulek zjistíme tvrdost.

##### 4.3. Měření dynamické tvrdosti

Je to vlastně metoda zjišťování modulu pružnosti, který se vypočte z frekvence kmitání měřené přístrojem GRINDO-SONIC MK3. Přístroj snímá vyvolané chvění dotykovým piezoelektrickým snímačem. Frekvence kmitů se číselně zobrazí na display přístroje. Z takto získaného údaje, z hmotnosti a rozměrů brusného kotouče se vypočítá modul pružnosti E.

$$E = \frac{m_g \cdot M_2}{b^3 \cdot R^2} \quad /Pa/ \quad (1)$$

kde: E - modul pružnosti (Pa)

m<sub>g</sub> - celková hmotnost kotouče (kg)

M - tvarový součinitel daný poměrem  $\frac{D}{b}$  ;  $\frac{d}{D}$

b - šířka kotouče (m)

R - frekvence chvění brusného kotouče  
naměřená přístrojem GRINDO-SONIC ( $s^{-1}$ )

D - vnější průměr kotouče (m)

d - vnitřní průměr kotouče (m)

## 5. POJEM OBROBITELNOST

Obrobitelnost je souhrn vlastností obráběného materiálu určujících jeho vhodnost k produktivnímu obrábění (8), jiná definice říká, že pojem obrobitelnosti materiálu obsahuje souhrn fyzikálních i chemických vlastností obráběného materiálu, který má vliv na vlastní proces obrábění. Určování obrobitelnosti je možno provádět podle různých kritérií, neboť obrobitelnost není dosud zcela jednoznačně definována.

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

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

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

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

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

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

### 5.1. Obrobitelnost při broušení

Například profesor Křístek (9) definuje obrobitelnost takto:

"Obrobitelností materiálu rozumíme jeho vlastnost podrobit se procesu obrábění, tj. odstranění přebytečného materiálu ve tvaru třísek."

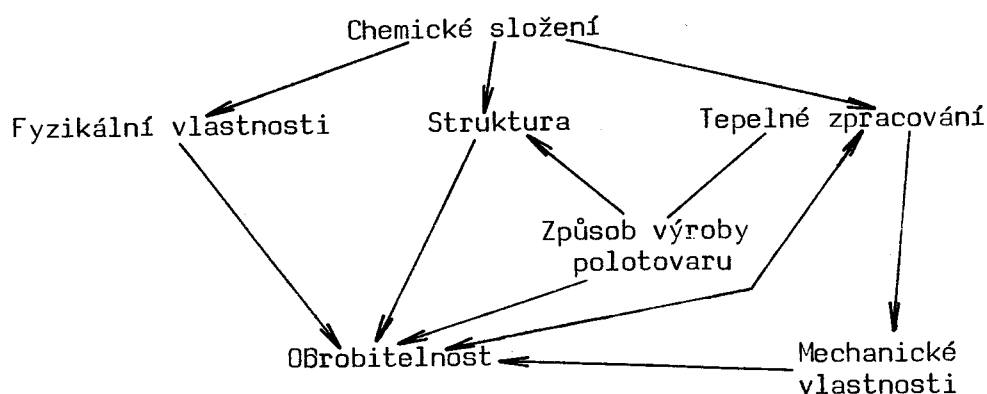
Podobně definoval obrobitelnost broušení Maslov (1) jako: "Souhrn technologických vlastností materiálu, charakterizujících jeho způsobilost k obrábění brousícím nástrojem."

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

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

- fyzikální vlastnosti
- chemické složení
- způsob výroby
- mikrostruktura

Tyto činitele mohou být vzájemně vázány, jak názorně ukazuje obrázek 5.



Obr. 5. Vliv vlastností obráběného materiálu na obrobitelnost broušením

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

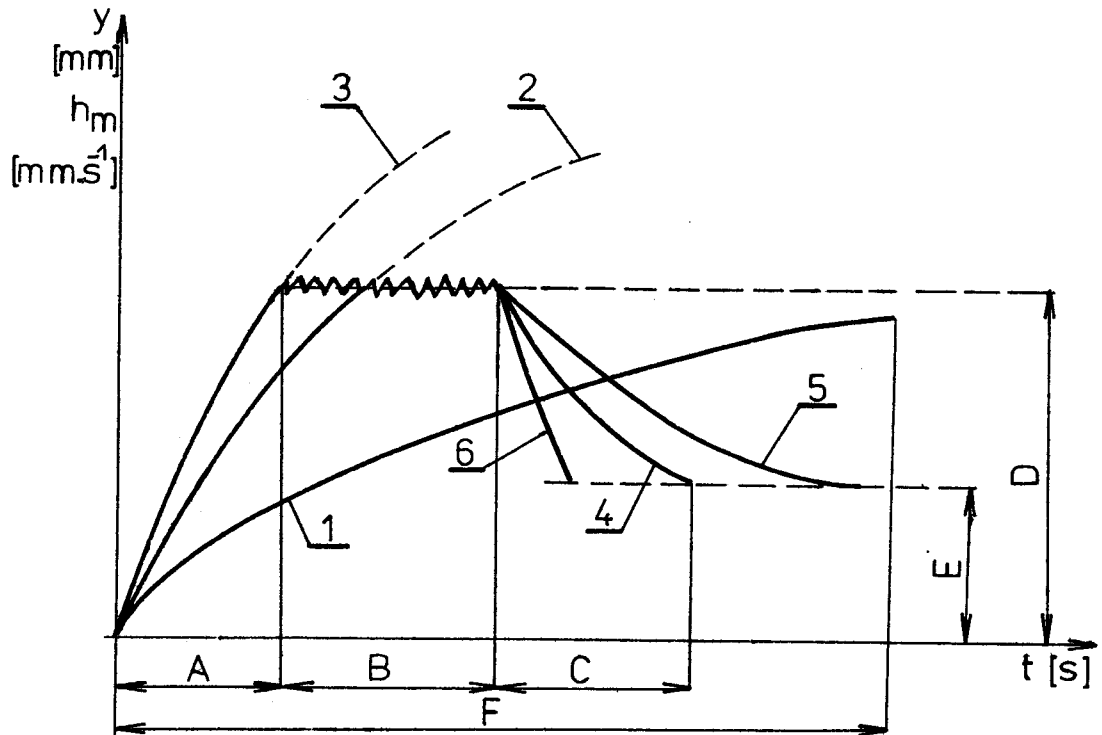
Z chemického složení vyplývají všechny vlastnosti obráběného materiálu. K prvkům, které výrazně snižují obrobitelnost, patří uhlík (u ocelí legovaných karbidotvornými prvky), křemík, chrom (snižuje obrobitelnost úměrně s obsahem uhlíku), větší obsah niklu, hliníku, wolframu a další. Naopak zlepšení obrobitelnosti materiálu lze dosáhnout přidáním síry.

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



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

Grafické znázornění optimálního cyklu broušení /1/ je na obrázku 6.



Obr. 6 Optimální cyklus broušení

kde:  $y$  - odtlačení SPID

$h_m$  - intenzita úběru

A - doba vřezávání se zvýšeným přísuvem

G - doba ustáleného procesu broušení

C - doba závěrečného broušení bez přísuvu (vyjiskřování)

D - odtlačení technologické soustavy při konstantním přísuvu

E - odtlačení technologické soustavy na konci vyjiskřování

F - doba zapichování konstantním přísuvem

Křivka 1 - vřezávání s ustáleným nízkým přísuvem

Křivka 2 - 3 - zapichování se zrychleným přísuvem

Křivka 4 - dokončování broušení bez přísuvu (vyjiskřování)

Křivka 5 - zpomalení vyjiskřování

Křivka 6 - urychlení vyjiskřování

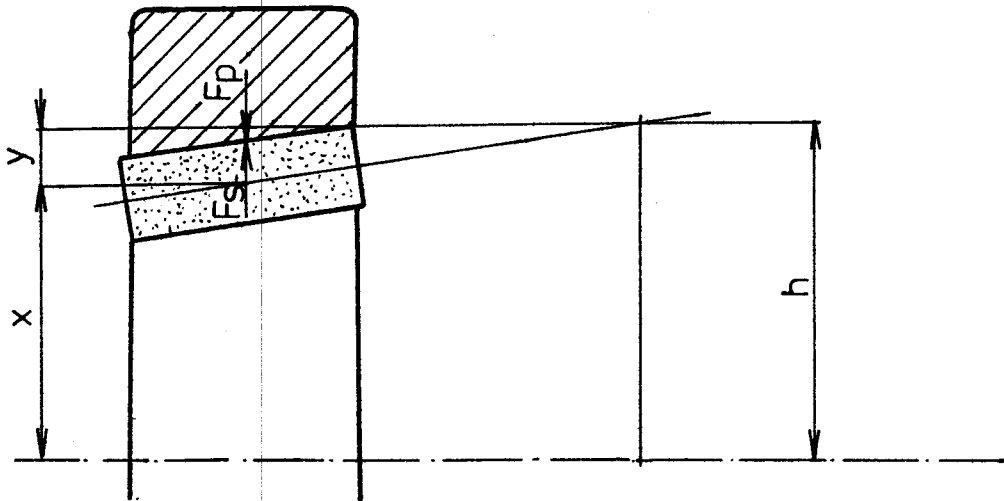
## 5.2. Kritéria používaná při hodnocení obrobiteľnosti

V praxi je obrobiteľnosť úzce spojená s pojmem řezivost, což je vlastně souhrn vlastností nástroje, které vyjadřují jeho řezné schopnosti. V následující tabulce číslo 2 je výběr několika kritérií, která v souvislosti s těmito dvěma jevy byly zavedeny.

## 6. ŘEZIVOST BROUSÍCÍCH KOTOUČŮ

Řezivost brousícího kotouče je jednou z nejdůležitějších vlastností, která rozhodujícím způsobem ovlivňuje výsledky procesu broušení. Řezivost brousícího kotouče charakterizuje, jakou rychlostí kotouč vniká do obrobku při konstantním řezném odporu. Řezivost vzrůstá s řeznou rychlostí při současném poklesu řezného odporu.

Stanovením kritérií řezivosti brousících kotoučů pro případ vnitřního válcového broušení se zabýval Majkus (12), který vyšel z představy, že relativní dráha brousícího kotouče vzhledem k obrobku je vždy menší než nastavená tloušťka odebírané vrstvy. Vzniklý rozdíl je roven průhybu brusného vřetena, jak ukazuje obrázek 7.



Obr. 7 Průhyb brusného vřetena

$$x = h - y \quad (2)$$

kde:  $x$  - změna rozměru obrobku za čas  $t$

$y$  - průhyb

$h$  - přírůstek (tloušťka odebírané vrstvy)

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

$$\frac{dx}{dt} + ck(x - v_y \cdot t) = 0 \quad (3)$$

Řešením této rovnice při použití okrajové podmínky

$t = 0; x = 0$  dostaneme

$$x = v_y \cdot t - \frac{v_y}{c \cdot k} \left( 1 - \frac{1}{e^{ckt}} \right) \quad (4)$$

kde:  $v_y$  - rychlost přísuvu

$t$  - čas průběhu broušení

$c$  - tuhost funkčních částí brusky

$k$  - veličina, charakterizující řezivost brousícího kotouče

Dále platí

$$h = \bar{v}_y \cdot t \quad (5)$$

$$y = \frac{v_y}{c \cdot k} \left( 1 - \frac{1}{e^{ckt}} \right) \quad (6)$$

Limitujeme-li výraz (6) pro nekonečně dlouhou dobu broušení, pak bude

$$\lim_{t \rightarrow \infty} y = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{v_y}{c \cdot k} \left( 1 - \frac{1}{e^{ckt}} \right) = \frac{v_y}{c \cdot k} = y_k \quad (7)$$

kde:  $y_k$  - konečný průhyb

Protože  $F_P = c \cdot y_k$  (8)

a jelikož lze řezivost brousícího kotouče vyjádřit

$$K_y = \frac{v_y}{F_P} \quad (\mu\text{m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{N}^{-1}) \quad (9)$$

Z uvedeného vyplývá, že čím vyšší je rychlost přísuvu pro daný brousící kotouč při  $F_P$  konstantní, tím větší je řezivost. Opačně ale také platí, že pro konstantní rychlost přísuvu rozhoduje o řezivosti radiální složka řezné síly  $F_P$ . Čím je tato síla menší, tím je větší řezivost.

Toto kritérium však není příliš vhodné, neboť při stejné  $F_P$  je za řezivější kotouč považován ten, který má větší přísuvovou rychlost.

Podle Lurje (15) je pracovní schopnost brousícího kotouče definována tak, že: "Pracovní schopnost brousícího kotouče se rozumí kvantitativní hodnocení (podle jednoho nebo více ukazatelů) stupně splnění úlohy k níž byl brousící kotouč předurčen." Kvalitativní hodnocení může být realizováno buď přímým měřením nebo porovnáním s parametry, přijatými za jednotku (2)

jako je např. poměrný obrus

$$G = \frac{W_v}{V_s} \quad (10)$$

kde:  $W_v$  - objem

$V_s$  - objem

Vzhledem k tomu, že proces broušení představuje v podstatě vytváření velkého množství obloukových drážek na povrchu obráběného obrobku, je intenzita úběru kovu závislá především na radiální složce řezné síly  $F_p$ , která vtlačuje zrno do povrchu obráběného materiálu. Na základě mnoha zkoušek byl prokázán lineární vztah mezi rychlostí úběru materiálu  $z_w$  a radiální složkou řezné síly  $F_p$

$$z_w = \lambda_w \cdot F_p \quad (11)$$

kde:  $\lambda_w$  - parametr úběru kovu

Fyzikálně parametr úběru kovu vyjadřuje měrný objem kovu, odebraný za jednotku času na jeden newton síly, přitlačující brousící kotouč k povrchu obráběného materiálu.

Takto stanovená řezivost závisí především na řezných podmínkách, ale i tvrdosti brousícího kotouče, zrnitosti, materiálu obrobku, materiálu brousících zrn, podmínkách orovnávaní a na tvrdosti břitu (2).

Trvanlivost se projevuje změnou tvaru a stavu brousících zrn. To způsobuje pokles jejich schopnosti vnikat do materiálu a tím i snížení účinnosti procesu broušení. Tuto změnu lze popsat exponenciální rovnicí (15)

$$\lambda_w = \lambda_d \cdot e^{-\psi t} \quad (12)$$

kde:  $\lambda_d$  - řezivost po orovnávaní  
 $\psi$  - konstanta

Spojením výše popsaných závislostí s teplotou v místě řezu dostaneme základ, z kterého bylo vycházeno při komplexním hodnocení řezivosti brousícího kotouče.

Obecná metodika komplexního hodnocení řezivosti obsahuje tyto operace (2):

- měření  $F_p$  v závislosti na technických požadavcích a podmínkách broušení
- stanovení  $z_w$  a výpočet  $\lambda_w$  podle vztahu 11
- stanovení  $\lambda_{v_i}$  v závislosti na čase podle vztahu 12
- měření teploty na konci pokusu

Kvantitativním ukazatelem je  $\psi$ , pro něž platí, že čím menší je  $\psi$ , tím pomalejší je změna řezivosti s časem.

Zahrneme-li však teplotu na konci pokusu, bude kvantitativním vyjádřením pro řezivost brousícího kotouče při provádění určité operace vztah

$$N = \frac{\lambda_w}{\psi \cdot \theta} \quad (13)$$

kde:  $N$  - komplexní řezivost podle Lurje (15)  
 $\theta$  - teplota broušení

Z prací Koellnera, Říčky vyplývá, že můžeme řezivost kotouče definovat jako podíl rychlosti vnikání nástroje do obrobku a řezné síly. Tedy

$$K_y = \frac{v_k}{F_p} \quad (\mu\text{m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{N}^{-1}) \quad (14)$$

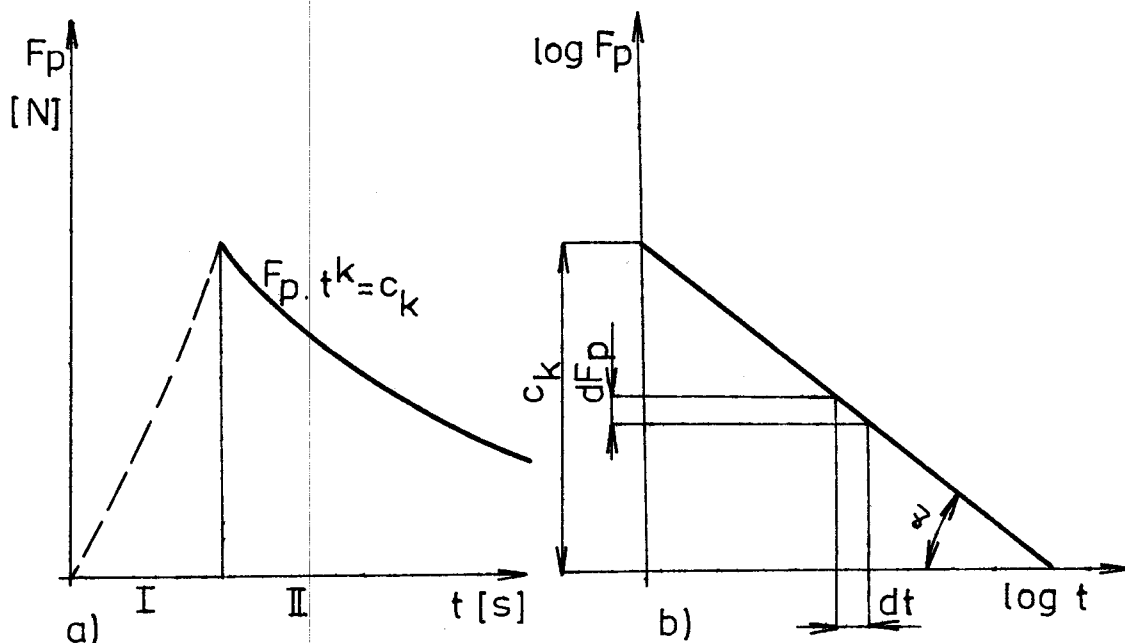
Při existenci známé závislosti mezi složkami řezné síly  $F_y$  a  $F_z$  lze řezivost stanovit jako

$$K_z = \frac{v_y}{F_c} \quad (\mu\text{m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{N}^{-1}) \quad (15)$$

Podle tohoto vztahu je usnadněno určení řezivosti v praxi, neboť složku  $F_c$  lze zjistit renáročným měřením.

Na základě provedených měření, kdy za řezivější byl považován ten ze dvou kotoučů, jehož přírůvková rychlost byla větší při stejné radiální síle  $F_p$ , tj. kotouč, který má větší  $K_y$ , dochází Koellner k závěru, že toto kritérium je nevhodné vzhledem k jeho velmi malé rozlišovací schopnosti.

Ze závěrů, které jsou uvedeny v pracích (12, 14) a mají obecnou platnost, navrhl Říčka vlastní kritérium řezivosti brusných nástrojů. Předpokládal, že velikost řezné síly je funkcí řezivosti  $K_y$  a doby broušení  $t$ . Tuto skutečnost aplikuje na cyklus broušení. Průběh závislosti řezné síly na čase ukazuje obrázek 8.



Obr. 8 Závislost řezné síly na čase pro zjednodušený cyklus broušení

Průběh je tvořen dvěma částmi. V první části dochází k nárůstu řezné síly a tím také k napružení soustavy SPID. Druhá část začíná v okamžiku ukončení přísuvu brousícího kotouče a dochází k poklesu řezné síly a tedy i k odpružení soustavy. Říčka se zajímá zejména o druhou fázi tzv. vyjiskřování a popisuje její rovnicí

$$F_p \cdot t^k = c_k \quad (16)$$

kde:  $c_k$  - koeficient provozní řezivosti brousícího kotouče.

Z obrázku 8b dostáváme pro rovnici vyjiskřovací křivky

$$k = \operatorname{tg} \omega \quad (17)$$

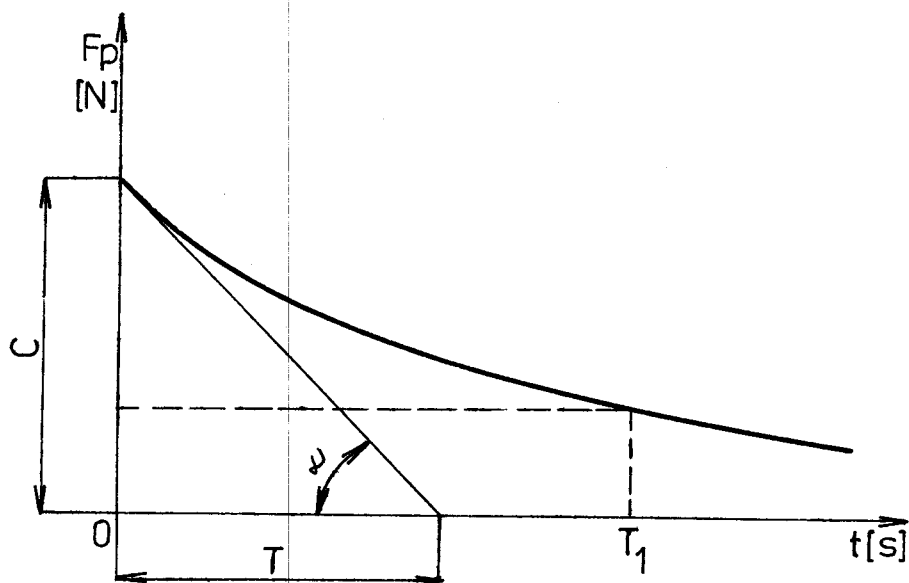
$$c_k = \log F_p \quad \text{pro } t = 1 \quad (18)$$

Aby mohl Říčka ověřit platnost svých závěrů, provedl řadu zkoušek s různými druhy brusných nástrojů. Z nich vyplynulo, že čím vyšší jsou hodnoty koeficientů řezivosti  $k$  a  $c_k$ , tím horší je řezivost. Na základě svých měření stanovil, že řezivost je závislá na stavu vlastního brusného nástroje a na řezných podmínkách.

Určitou nevýhodou tohoto přístupu je to, že se jedná o vyjádření dvěma údaji a není uvedeno, který z nich má větší váhu. Navíc řezivost bude také závislá na brousícím stroji - na tuhosti jeho vřeteníku.

Maslov (1) v kapitole obrobiteľnosť materiálů broušením rozebírá cyklus broušení. Grafické znázornění tohoto cyklu broušení je uvedeno v kapitole 5.2. na obrázku 6, kde křivky 4, 5, 6 představují vyjiskřování bez přísuvu. Maslov hodnotí řezivost brousících kotoučů na základě složek  $F_p$  a  $F_c$  a výkonu broušení.

J. Gazda stanovil nové kritérium řezivosti brousících kotoučů (2) na základě mnoha měření při rovinném broušení obvodem kotouče. Vychází z vyjiskřovací oblasti, kde byl zjištěn střední průběh radiální složky řezné síly v závislosti na čase, jak ukazuje obrázek 9.



Obr. 9 Zjednodušená vyjiskřovací křivka  
Vyjiskřovací křivku je možno popsat vztahem

$$F_p = c \cdot e^{-tx} \quad (19)$$

Po zavedení časové konstanty  $T$

$$F_p = c \cdot e^{-\frac{1}{T} t}$$

kde:  $c$  - konstanta vyjiskřovací křivky

$T$  - časová konstanta

$T_1$  - konstanta časového úseku



Průběh křivky udává schopnost brousícího kotouče odebrat materiál z obrobku. Při větší intenzitě úběru materiálu je vyjiskřovací křivka strmější a tedy úhel  $\omega$  větší.

Na základě rozboru vlastností křivky  $F_p = f(t)$  při vyjiskřování bylo stanoveno několik kritérií pro hodnocení rezivosti brousícího kotouče.

#### Kritérium strmosti

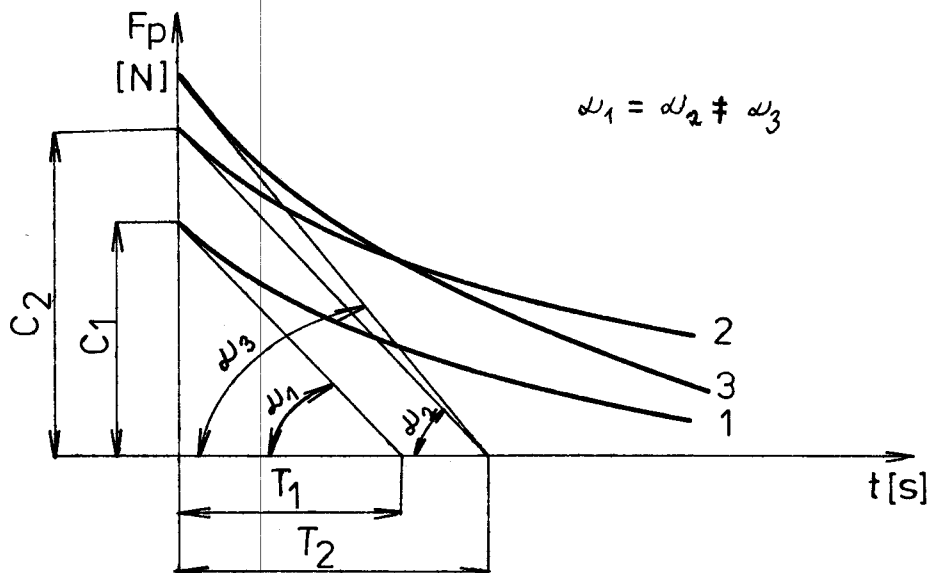
Kritérium vyjadřuje strmost vyjiskřovací křivky, tedy úhel  $\omega$ . Čím je úhel  $\omega$  větší, tím je křivka strmější a kotouč rezivější.

$$K = \operatorname{tg} \omega = \frac{C}{T} \quad (21)$$

Toto kritérium dává jednostranný pohled na hodnocení funkčních vlastností nástroje, neboť předpokládá užití stejné počáteční síly  $F_p$  testovaných brousících kotoučů a nepostihuje položení křivky v souřadnicích.

#### Kritérium časové konstanty

Kritérium vychází z předchozích úvah. Rozlišuje brousící kotouče podle velikosti časové konstanty  $T$ , tedy doby, za kterou by došlo k vyjiskřování, kdyby úběr materiálu probíhal stále stejnou počáteční rychlostí. Čím je časová konstanta  $T$  menší, tím je rezivost brousícího kotouče větší a naopak. Vykazují-li dva brusné kotouče stejnou strmost ( $\omega_1 = \omega_2$ ), je možno je rozlišovat časovou konstantou  $T$ , jak ukazuje obrázek 10.



Obr. 10. Použití kritéria časové konstanty

### Kritérium počátečního impulzu

Kritérium odstraňuje nedostatky předešlých dvou kritérií. Zahrnuje hodnotu počáteční síly a časové konstanty. Definujeme-li časový úsek síly za předpokladu, že síla je proměnná a vyjiskřování probíhá stále stejnou rychlostí, můžeme impulz této síly vyjádřit vztahem

$$I = \int_{t_0}^t F_p \cdot dt \quad (\text{N} \cdot \text{s}) \quad (22)$$

Při předpokladu vyjiskření podle přímky a obrázku 9 dostaneme

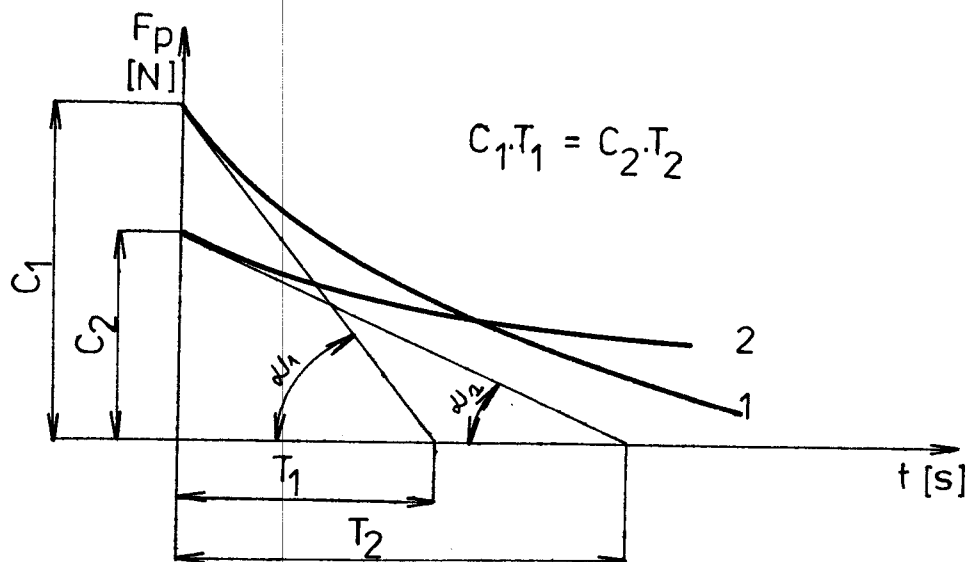
$$I = \frac{1}{2} C \cdot T \quad (23)$$

Je-li tedy hodnocení řezivosti provádí porovnávací metodou, není nutné znát absolutní velikost impulzu síly. Pak je tedy možno toto kritérium vyjádřit ve tvaru

$$A = C \cdot T \quad (24)$$

Z kritéria plyne závěr, že největší řezivost vykazuje brousící kotouč s minimální hodnotou A.

Z obrázku 11 je vidět, že dva kotouče mohou mít stejný počáteční impulz, ale různou řezivost. (Kotouč jedna je řezivější).



Obr. 11 Použití kritéria počátečního impulzu

### Kritérium časového objemu práce

Z podobných úvah je možné vytvořit kritérium, které používá velikost plochy  $S$  pod křivkou. Rovnice, vyjadřující tuto skutečnost má tvar

$$R = \frac{10^6}{S \cdot T_1} \quad (25)$$

kde:  $T_1 = T \cdot \ln C$  (26)

### Kritérium strmosti práce

Rozborem možností hodnocení jednotlivých parametrů křivky došel J. Gazda k návrhu kritéria strmosti práce pro hodnocení řezivosti brousících kotoučů, které má tvar

$$U = 10^5 \cdot \frac{\text{tg} \alpha}{S} \quad (\text{mm}^{-2}) \quad (27)$$

kde:  $S$  - plocha pod křivkou

Za řezivější je považován ten kotouč, který má větší hodnotu kritéria strmosti práce, tedy plochu pod křivkou co nejmenší a strmost křivky co největší.

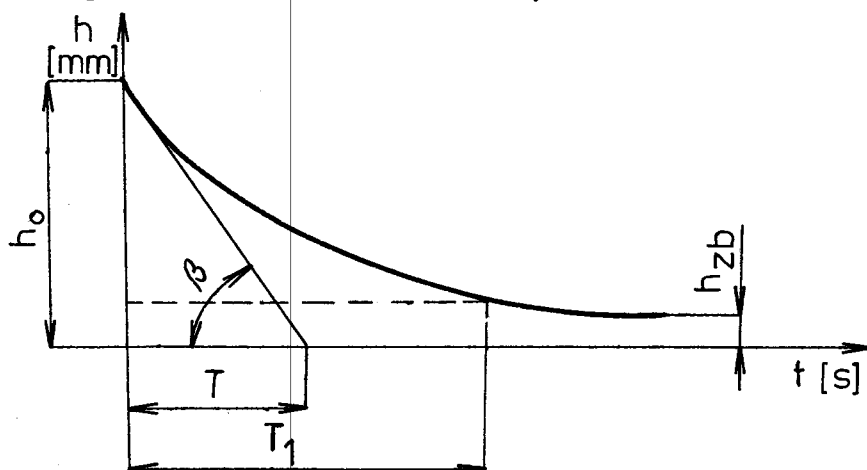
## 6.1. Kritéria strmosti úběru

Z praktických měření radiální a tangenciální složky řezné síly ( $F_p$ ,  $F_c$ ) při vyjiskřování je zřejmé, že se tyto složky řezné síly zmenšují. Řezná síla vzniká v důsledku existence přídatku na broušení. To ale zároveň znamená, že se úbytek materiálu během vyjiskřování postupně zmenšuje. Na základě toho byl vysloven předpoklad, že mezi velikostí úbytku broušeného materiálu, brousícího kotouče a řezné síly je určitá závislost. Vlivem odpružení systému SPID a opotřebení kotouče se úběr nastavení tloušťky třísky nedokončí úplně. Postupný úběr probíhá podle křivky podobné vyjiskřovací křivce. Rozdíl je pouze v tom, že i po mnoha zdvizích zůstává neodebraná určitá vrstva  $h_{zb}$ , což znázorňuje obr. 12

Křivka je popsána vztahem

$$h = h_0 \cdot e^{-\frac{1}{T} t} \quad (\text{mm}) \quad (28)$$

kde:  $h_0$  - nastavená tloušťka třísky



Obr. 12 Křivka postupného úběru

Vycházíme-li z grafického průběhu této závislosti, pak pro optimální kombinaci brousícího kotouče a obrobku musí být strmost křivky maximální ( $\beta$  co největší), plocha S pod křivkou minimální, časový úsek  $T_1$  co největší a  $h_{zb}$  minimální.

Na tomto základě bylo stanoveno v (3) kritérium strmosti úběru L

$$L = 10^3 \cdot \frac{\text{tg} \beta}{s_h} \quad (29)$$

Kde:  $\beta$  - úhel strmosti  
 $S_h$  - plocha pod křivkou ( $h = h_0 \cdot e^{-\frac{1}{T} t}$ )

### 6.2. Kritérium obrobitelnosti broušením

Na proces broušení má rozhodující vliv řezivost broušícího kotouče  $U$  a také broušený materiál, vyjádřený schopností podrobit se broušení  $L$ . V důsledku této skutečnosti bylo vytvořeno spojením obou kritérií nové kritérium, které vyjadřuje vzájemné působení broušícího kotouče a obrobku

$$O_B = U \cdot L = 10^5 \cdot \frac{\text{tg } \alpha}{S} \cdot 10^3 \cdot \frac{\text{tg } \beta}{S_h} \quad (30)$$

nebo jej lze po dosazení napsat ve tvaru

$$O_B = U \cdot L = \frac{10^5 \cdot C}{T^2 (C-1)} \cdot \frac{10^3 \cdot h_0}{T^2 (h_0-1)} \quad (31)$$

### 6.3. Součinitel broušení

Součinitel broušení udává poměr tangenciální a radiální složky řezné síly

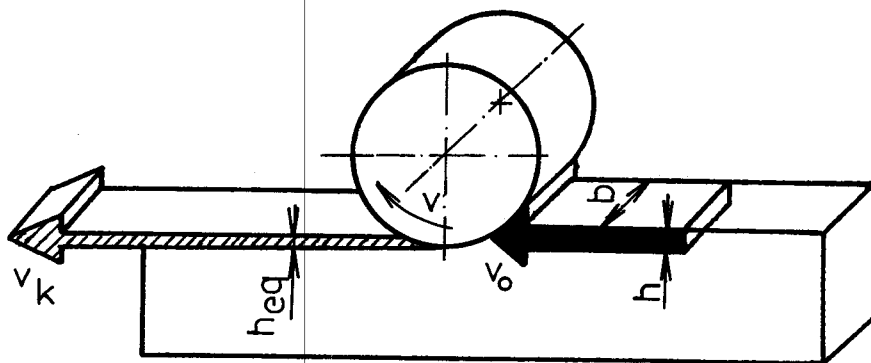
$$\mu = \frac{F_t}{F_p} \quad (32)$$

Někteří autoři, mezi nimi i Maslov, pozitivně hodnotí zavedení tohoto součinitele broušení, jakožto základního kritéria pro hodnocení procesu broušení. Charakterizuje totiž tento proces přesněji než ostatní ukazatelé, jako je např. úběr materiálu, příkon, brusný poměr a podobně.

### 6.4. Ekvivalentní tloušťka odebrané vrstvy

Považujeme-li proces obrušování odebírané vrstvy  $h$  za plynulý, potom při zachování objemové stálosti je možno považovat poměr  $h \cdot \frac{v_o}{v_k}$  za tloušťku odebírané vrstvy z obrobku při rychlosti  $v_k$ . Nazývá se ekvivalentní tloušťka třísky a značí

se  $h_{eq}$  jak je vidět z obrázku 13.



Obr. 13 Schema pro výpočet  $h_{eq}$

$h_{eq}$  je tloušťka pásu materiálu, který se odvine od obvodu kotouče a jehož objem je roven objemu vrstvy, která se odvine během stejného času od obrobku. Vrstva odebíraného materiálu o tloušťce  $h$  vstupuje do zóny řezu obvodovou rychlostí kotouče  $v_k$ .

Ze zákona stálosti objemu materiálu, který do řezné zóny vstupuje a z ní vystupuje, lze psát

$$h \cdot b \cdot v_o = h_{eq} \cdot b \cdot v_k \quad (33)$$

$$h_{eq} = h \cdot \frac{v_o}{v_k} \quad (\mu m) \quad (34)$$

kde:  $b$  - šířka styku brousícího kotouče s obrobkem

$v_o$  - obvodová rychlost obrobku

$v_k$  - obvodová rychlost kotouče

Jestliže platí

$$Q = b \cdot h \cdot v_o \quad (35)$$

a zároveň

$$Q_1 = h \cdot v_o = h_{eq} \cdot v_k \quad (36)$$

kde:  $Q$  - odebraný materiál

$Q_1$  - odebraný materiál na jednotku šířky brousícího kotouče,

Pak lze  $h_{eq}$  vyjádřit

$$h_{eq} = \frac{Q_1}{v_k} \quad (37)$$

nebo 
$$h_{eq} = \frac{h}{q_v} \quad (38)$$

kde:  $q_v$  - rychlostní poměr ( $q_v = \frac{v_k}{v_o}$ ) (39)

Platí tedy 
$$h_{eq} = h \cdot \frac{v_o}{v_k} = \frac{Q_1}{v_k} = \frac{h}{q_v} \quad (40)$$

### 6.5. Diagram broušení

Experimentálně bylo dokázáno, že většinu důležitých veličin vznikajících v procesu broušení lze vyjádřit v závislosti na ekvivalentní tloušťce odebrané vrstvy.

$$Ra, m, Q_1, F'_p, F'_z, e, e_{0,1} = f(h_{eq}) \quad (41)$$

#### Drsnost povrchu

$$Ra = Ra_1 \cdot h_{eq}^r \quad (\mu m) \quad (42)$$

kde:  $Ra_1$  - konstanta drsnosti pro  $h_{eq} = 1 \mu m$   
 $r$  - exponent

#### Poměrný obrus

$$m = m_1 \cdot h_{eq}^w \quad (43)$$

kde:  $m_1$  - porovnávací poměrný obrus pro  $h_{eq} = 1 \mu m$   
 $w$  - exponent

#### Odebraný materiál na jednotku šířky brousícího kotouče

$$Q_1 = Q_{11} \cdot h_{eq}^u \quad (mm^3 \cdot mm^{-1}) \quad (44)$$

kde:  $Q_{11}$  - konstanta objemu odebraného materiálu pro  $h_{eq} = 1 \mu m$   
 $u$  - exponent

#### Radiální složka řezné síly vztahovaná na 1 mm činné šířky kotouče

$$F'_p = \frac{F_1}{\mu} \cdot h_{eq}^{f_y} \quad (N \cdot mm^{-1}) \quad (45)$$

Tangenciální složka řezné síly vztažená na 1 mm činné šířky kotouče

$$F'_e = F_1 \cdot h_{eq}^{f_z} \quad (\text{N} \cdot \text{mm}^{-1}) \quad (46)$$

kde:  $F_1$  - porovnávací síla pro  $h_{eq} = 1 \mu\text{m}$   
 $\omega$  - součinitel broušení  
 $f_y$  - exponent  
 $f_z$  - exponent

Měrná energie broušení

$$e = F_1 \cdot h_{eq}^{f_z - 1} \quad (\text{J} \cdot \text{mm}^{-3}) \quad (47)$$

Specifická energie  $e_{0,1}$  odpovídající  $h_{eq} = 0,1 \mu\text{m}$

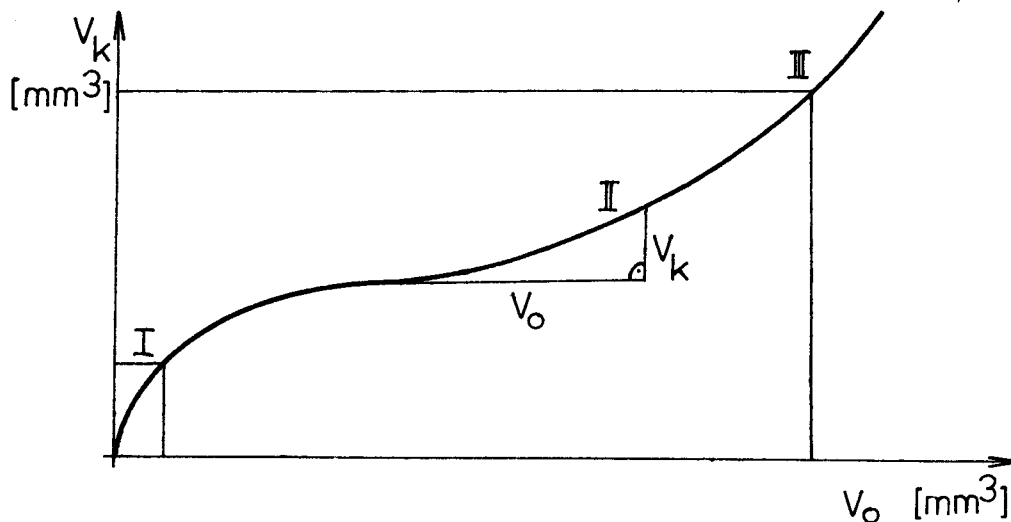
$$e_{0,1} = 10 \cdot F'_e \quad (\text{J} \cdot \text{mm}^{-3}) \quad (48)$$

Všechny funkční závislosti výše popsaných veličin na  $h_{eq}$  mají exponenciální charakter a převedením do logaritmické stupnice dostaneme přímkové závislosti. Tyto grafy se nazývají diagramy broušení. K velkým přednostem těchto diagramů bezpochyby patří komplexnost posouzení vzájemného působení brusný kotouč - obrobek (2). Informace získané z těchto diagramů broušení mohou být použity např. pro ekonomickou optimalizaci brousících operací.

#### 6.6. Vliv opotřebení a trvanlivosti brousícího kotouče

Opotřebení brousícího kotouče patří mezi hlavní parametry, které působí na kvalitu brousícího procesu. Průběh opotřebení brousícího kotouče závisí na všech podmínkách broušení - charakteristice kotouče, vlastnostech obráběného materiálu, řezných podmínkách apod. Na obrázku 14 je křivka opotřebení brousícího kotouče.





Obr. 14 Opotřebení brousícího kotouče

Křivka je tvořena třemi oblastmi:

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

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

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

Z tohoto diagramu můžeme vypočítat strmost křivky a hodnotit řezivost nebo obrobitelnost materiálů.

Podle toho, jaké vlastnosti má brusný nástroj a jaké řezné podmínky jsou užity, mohou na brousícím kotouči probíhat dva stavy. Jednak otupení kotouče, kdy jsou brusná zrna postupně štěpena a ztrácí řezivost a potom také samoostření brousícího kotouče, kdy v důsledku otupení brusných zrn se zvýší brusný odpor a zrna již nejsou schopna odebírat třísku a vydrolují se z pojiva.

Maslov (1) uvádí, že opotřebení brousícího kotouče závisí především na jeho trvanlivosti.

$$O = \frac{C_o}{T} \quad (49)$$

kde:  $C_o$  - konstanta, závisí na podmínkách broušení

$T$  - trvanlivost (min)

Trvanlivost brousícího kotouče lze vyjádřit pomocí minutového úběru materiálu, připadající na jednotku řezné plochy

kotouče.

Potom platí vztah

$$T^m_A = \frac{C_o}{Q_M} \quad (50)$$

kde:  $m_A$  - exponent poměrné trvanlivosti

$Q_M$  - měrný úběr na jednotku řezné plochy kotouče

## 7. TĚŽKO OBRITELNÉ MATERIÁLY

V posledních letech se vzhledem k vysokým požadavkům rozvoje našeho národního hospodářství začaly uplatňovat ve větší míře než dříve těžkoobrobitelné materiály. Jsou to materiály především s vysokými pevnostními parametry, s optimálními fyzikálními, chemickými a jinými vlastnostmi. Jejich použití si vyžadují požadavky na nová zařízení, která pracují za extrémních podmínek. Doposud běžně užívané materiály by za těchto podmínek (extrémních) byly prakticky nepoužitelné. Širší uplatnění těchto materiálů v celém národním hospodářství však přináší řadu problémů, z nichž za nejhlavnější je možno považovat jejich nesnadnou obrobitelnost. Charakteristickou vlastností těchto materiálů je zvýšená pevnost, což vede při obrábění k růstu řezných sil a současně dochází k vyššímu stupni pěchování. Velice významnou vlastností je také nízká tepelná vodivost (4). Mezi těžkoobrobitelné materiály řadíme vysokopevnostní oceli, korozivzdorné oceli, žáruvzdorné a žáropevné oceli a slitiny.

### 7.1. Vysocepevnostní oceli

Tyto oceli, jak již vyplývá ze samotného názvu, jsou charakteristické vysokou pevností. Za vysoce pevné se považují konstrukční materiály od pevnosti  $R_m \geq 1500$  MPa. Příčinou špatné obrobitelnosti těchto ocelí je velká stříhová pevnost, která způsobuje velké řezné síly na břit nástroje, vysoké teploty řezání a přítomnost tvrdých strukturních složek v oceli, které působí abrazivně na břit nástroje. Mezi tyto oceli patří například oceli typu TRIP nebo Maraging.

### 7.2. Korozivzdorné a žáruvzdorné oceli

Jsou to oceli austenitické, na bázi chromu a niklu s minimálním obsahem uhlíku. Oproti uhlíkovým ocelím mají vyšší pevnost a větší množství volných karbidů. To má za následek zhoršení obrobitelnosti. Nevýhodná je rovněž nízká tepelná vodivost těchto materiálů, kterou je však možno částečně kompenzovat kvalitním chlazením.

K tomu, aby ocel měla korozivzdorné vlastnosti, musí tuhý roztok obsahovat alespoň 12 % chromu. U žáruvzdorných ocelí je ke zvýšení odolnos-

ti proti opalu nutný obsah chromu kolem 20% .

### 7.3. Žárupevné oceli

Jsou to oceli vysokolegované austenitické s vyšším obsahem slitinových prvků. Obsah chromu nebývá vzhledem k nebezpečí výskytu fáze  $\delta$  větší než 16 %. Tyto oceli jsou charakterizovány vysokými hodnotami pevnosti při tečení za teplot 700 až 950 °C a zároveň nízkými hodnotami tažnosti ( $A_5$ ) při tečení.

Špatná obrobiteľnosť týchto ocelí je spôsobená veľkou ťižkovou pevnosťou, ktorá vyvoláva veľké rezné síly na břitú nástroje a zvýšená teplota rezní, neboť díky malé tepelné vodivosti týchto ocelí dochází ke koncentraci tepla v oblasti řezání. Obrobiteľnosť je dále zhoršovaná zpevňováním materiálu při řezání a adhezi měkkých a houževnatých částic obráběného materiálu.

### 7.4. Slitiny s vysokým obsahem Cr a Ni

Slitiny s převládajícím obsahem niklu a s přísadou chromu a dalších prvků jsou slitiny pro nároky, které už nelze splnit austenitickými ocelmi se zvýšenými obsahy niklu a chromu. Tyto slitiny obsahují jen několik procent železa. Patří mezi těžkoobrobitelné především pro typ jejich krystalické mřížky. Mřížka je krychlová, plošně středěná s velkou houževnatostí a špatnou tvárností. Obrobiteľnosť je zhoršovaná i těmi přísadami, které tvoří houževnaté a pevné tuhé roztoky. Přetavením ve vakuu se ještě více zlepšují vlastnosti těchto materiálů, ale zároveň se zhoršuje obrobiteľnosť. Příčinou špatné obrobiteľnosti je i velká ťižková pevnost a tvrdost po vytvrzení. Vytvrzení, jakožto způsob tepelného zpracování těchto slitin, spočívá v homogenizačním (rozpuštěním) žíhání při vysoké teplotě, čímž se všechny strukturní složky rozpustí v tuhém roztoku. Vlastní vytvrzení pak probíhá při teplotě nižší, při které je tuhý roztok vytvrzující fáze přesycen. Dochází tak k jeho vyloučení ve velmi rozptýlené formě. K vytvrzujícím prvkům patří především hliník, titan, dále pak zirkon, bór a některé další. Chemické složení těchto materiálů ukazuje tabulka č. 3. K důležitým vlastnostem z hlediska obrobiteľnosti patří i mechanické vlastnosti materiálu, což ukazuje tabulka č. 4.

## 7.5. Vliv některých prvků na obrobitelnost

- Uhlík - u vysocelegovaných ocelí se s rostoucím obsahem uhlíku klesá obrobitelnost. Se železem a některými dalšími prvky tvoří karbidy.
- Chrom - snižuje obrobitelnost úměrně s obsahem uhlíku (při nízkém obsahu uhlíku je vliv chromu malý a naopak). Při vysokém obsahu chromu vzniká tzv. intermetalická sloučenina FeCr, zhoršující obrobitelnost. Tvoří také karbidy s tvrdostí přes 1000 HV.
- Nikl - tvoří se železem tuhý roztok. U vytvrditelných ocelí spolu s chromem výrazně snižuje obrobitelnost.
- Molybden - s uhlíkem tvoří stálé karbidy a částečně snižuje obrobitelnost. U austenitických ocelí pomáhá utvářet třísku.
- Titan - má špatnou tepelnou vodivost, což způsobuje velké tepelné namáhání břitu nástroje. V kombinaci s ostatními přísadovými prvky obrobitelnost zhoršuje.
- Hliník - u žáruvzdorných a precipitačně vytvrditelných ocelí leguje ferit, čímž mírně zhoršuje obrobitelnost, ale pomáhá utvářet krátké třísky.
- Cobalt - jako přísada ovlivňuje obrobitelnost pouze nepatrně. S dalšími přísadami však tvoří karbidy, které zhoršují výrazně obrobitelnost.
- Wolfram - s uhlíkem tvoří stálé karbidy, obrobitelnost nepatrně zhoršuje.

## 7.6. Broušení těžkoobrobitelných materiálů na bázi Ni, Cr a Ti

Základním požadavkem při broušení těchto materiálů je, aby povrchová vrstva broušené plochy nebyla porušena mechanickými, fyzikálními ba ani chemickými účinky, které však provázejí proces broušení těžkoobrobitelných materiálů a vedou ke zvýšení vnitřního pnutí v obrobku, tedy vzniku trhlin. Malá tepelná vodivost těchto slitin způsobuje koncentraci tepla v oblasti broušení. Tím se zvětšuje namáhání brousícího nástroje a zhoršují podmínky broušení. V důsledku velké stíhové pevnosti těchto materiálů se zvětšuje i řezný odpor.

Vysoké teploty spolu s velkými řeznými odpory způsobují intenzivní otupování brousících kotoučů. Houževnatost těchto slitin navíc způsobuje zanášení brousícího kotouče a ztrátu řezných vlastností. Proto je nutné časté orovnávání brousícího kotouče. Velký význam pro snížení vlivu těchto negativních prvků má správné chlazení.

Broušením niklo-titanových slitin se zabýval Popov (21). Ze svých měření dochází k závěru, že nejvhodnější pro broušení těchto slitin je kotouč se zeleného karbidu křemíku nebo diamantu. Doporučuje užívat řeznou rychlost  $v = 30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , hloubku řezu  $h = 0,05 \text{ mm}$  a pro diamantový kotouč  $h = 0,1 \text{ mm}$ . Naměřené řezné síly nepřesahují 150 N, dosahovaná přesnost je v 7 třídě pro diamantový kotouč a v 9 třídě pro kotouč z karbidu křemíku.

V Sovětském svazu byly činěny pokusy brousit titanové slitiny nízkými řeznými rychlostmi. Kolektiv autorů (19) doporučuje jako nejvhodnější užít řeznou rychlost  $v_k = 1 - 3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . Bližším studiem broušení titanových slitin se ve své diplomové práci zabývá s. Veverková. Studium tvaru třísky v souvislosti s opotřebením kotoučů se zabývali Korž a Gelkov (20). Podle nich oddělující se tříška odchází po přední straně diamantového zrna, naráží na tmel, v důsledku čehož poslední částice strhávají okolní diamanty. Tím se vytváří drážka, která určuje rozvoj pracovního povrchu kotouče.

Z uvedeného vyplývá, že převážná většina autorů se zaměřuje při broušení těchto slitin na použití diamantových kotoučů. Vzhledem k tomu, že diamantové kotouče nejsou v praxi ještě příliš rozšířeny a že ani na katedře obrábění a montáže VŠST v Liberci není takovýto kotouč k dispozici, nemohl jsem ho ve své diplomové práci využít pro praktická měření.

## 8. CHLAZENÍ TĚŽKO OBRÁBĚLÝCH MATERIÁLŮ

Chlazení při broušení nabývá zvlášť velkého významu u těžkoobrobitelných materiálů, neboť tyto materiály jsou charakteristické kromě jiného malou tepelnou vodivostí. V důsledku nárůstu řezných sil při obrábění těžkoobrobitelných materiálů dochází k vysokým teplotám řezání. A právě malá tepelná vodivost způsobuje koncentraci tepla v oblasti řezání. Navíc je chladicí kapalina jedním z nejdůležitějších činitelů, který významně ovlivňuje produktivitu a tedy i celkovou ekonomiku procesu broušení.

Význam chlazení spočívá v: - chladícím účinku kapaliny  
- mazacím účinku kapaliny  
- čistícím účinku kapaliny a zároveň prostředku pro odstraňování třísek.

Možnost použití chladicí kapaliny pro různé druhy materiálů při jednotlivých způsobech broušení ukazuje tabulka č. 5.

### 8.1. Popis některých řezných kapalin

Chladicí kapaliny mají své důležité místo v procesu obrábění především proto, že chlazením obráběné plochy dochází nejen k odvodu tepla, ale snižuje se i řezný odpor, zlepšuje se jakost a přesnost obrobené plochy.

Při provádění praktických zkoušek v rámci mé diplomové práce bylo použito těchto kapalin: ROBOL (5 %)

ABRASOL B

EMULZIN H (4 %)

Robol - emulzační olej s vysokotlakými přísadami, pro výkonné a rychlostní broušení. Snižuje řezné síly oproti běžným řezným kapalinám až o 50 %. Má příznivé sekundární vlastnosti - nepodporuje korozi, hodnota pH, stabilita.

Abrasol B - řezný olej s obsahem vysokotlakových přísad na bázi chlóru a síry.

Emulzin H - emulzní minerální olej s anionaktivními a neionogenními emulgátory.

## 9. VOLBA KRITÉRIÍ ŘEZIVOSTI

Pro posouzení řezivosti jednotlivých brousících kotoučů při broušení zkoumaných materiálů byla použita tato kritéria:

- kritérium strmosti  $tg \omega$
- kritérium časové konstanty  $T$
- kritérium počátečního impulzu  $A$
- kritérium strmosti práce  $U_p, U_c$

Největší váha byla přisouzena kritériu strmosti  $U_p$ .



## 10. METODA EXPERIMENTÁLNÍCH MĚŘENÍ

Pro splnění zadaného úkolu - výzkumu řezivosti souboru brousících kotoučů při rovinném broušení obvodem kotouče na materiálech se ztíženou obrobiteľností - je třeba zaměřit vyjádřovací křivku (závislost radiální či tangenciální složky řezné síly na čase), drsnost povrchu, úbytek kotouče a některé další veličiny.

Pro záznam naměřených a později i vypočtených hodnot byla použita tabulka číslo 7.

### 10.1. Zkušební stroj

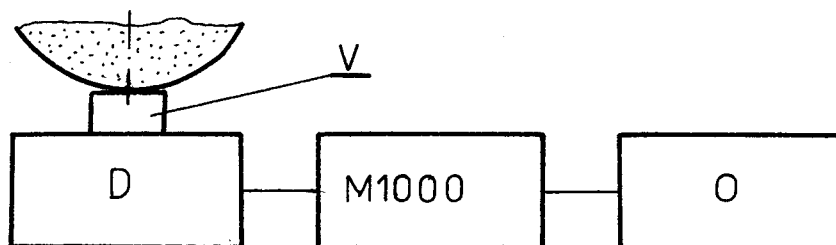
Měření bylo prováděno na vodorovné rovinné brusce BPH 300, určené pro broušení obvodem kotouče. Hlavní technická data jsou:

- výrobce TOS Hostivař
- rok výroby 1956
- generální oprava provedena v r. 1979 v TOS, Holice
- maximální průměr brusného kotouče  $D = 250$  mm
- rozměry kotouče  $250 \times 20 \times 76$  mm
- stroj je vybaven magnetickou upínací deskou
- příčný posuv stolu je samočinný i ruční
- pohon pracovního stolu je hydraulický
- podélná rychlost posuvu stolu  $v_o = 2$  až  $16$  m . min<sup>-1</sup>
- otáčky vřetena  $n = 2500/3800$  ot. min<sup>-1</sup>
- obvodová rychlost kotouče při  $D = 250$  mm je  $v_k = 30/50$  m . s<sup>-1</sup>
- přísuv kotouče je samočinný nebo ruční
- celkový příkon stroje 6 kW

Ovládání příčného i podélného posuvu stolu je hydraulické, plynule seřiditelné. Nastavení a celkové seřízení stroje bylo prováděno až po 30 minutách chodu na prázdko. Bylo to z důvodů dokonalého promazání a zahřátí stroje. V době provádění měření byl stroj v dobrém technickém stavu bez vážnějších nedostatků.

### 10.2. Zkušební zařízení

Pro měření potřebných veličin bylo použito zapojení měřicí aparatury tak, jak je ukazuje obrázek 15.



obr. 15: Schéma zapojení

kde: D - dynamometr

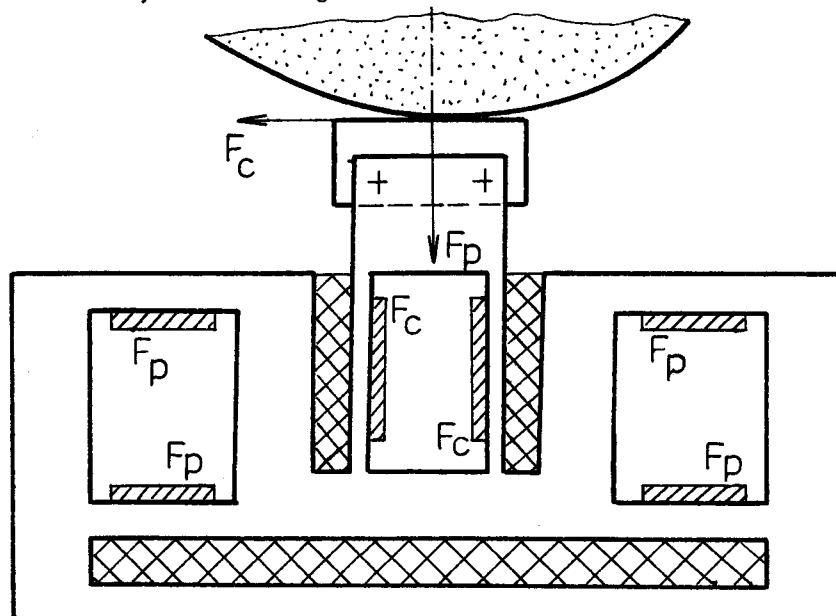
M1000 - vyvažovací zařízení

O - oscilograf N071.5

V - vzorek materiálu

### Dynamometr

Pro snímání radiální ( $F_p$ ) a tangenciální ( $F_c$ ) složky řezné síly byl použit dvousložkový tenzometrický dynamometr, zkonstruovaný a vyrobený v dílenských laboratořích katedry obrábění a montáže VŠST v Liberci. Schema tohoto dynamometru je na obrázku 16.



Obr. 16. Schema dvousložkového dynamometru.

Tuhost dynamometru byla kontrolována cejchovacím siloměrným zařízením. Průhyb pružných elementů dynamometru byl měřen tisícinovým číselníkovým úchylkoměrem. Měření bylo třikrát opakováno se stejnými výsledky, aniž by se projevila hystereze. Zjištěné tuhosti mají hodnotu:

$$C_{F_y} = 27,0875 \text{ N} \cdot \mu\text{m}^{-1}$$

$$C_{F_z} = 6,95 \text{ N} \cdot \mu\text{m}^{-1}$$

Dynamometr byl upnut na magnetickou upínací desku.

### Tenzometry

Jako snímače pro měření deformace dynamometru bylo použito 6 tenzometrů M-120. Umístění tenzometrů ukazuje obrázek 16.

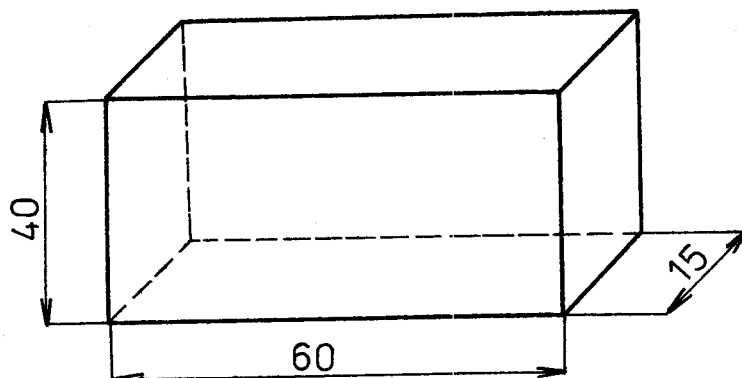
### Zkušební vzorky

Pro experimentální měření byly použity vzorky rozměrů 60 x 40 x 15 mm tak, jak je znázorněno na obrázku 17. Vzorky byly z materiálů:

14 109.4 (tvrdost 849 HV)

L-AK1TD.6

ŽS6K



Obr. 17. Zkušební vzorek

Celkový pohled na používanou měřicí aparaturu je na obrázku 18.



Obr. 18. Pohled na měřicí pracoviště

### 10.3. Použité kotouče

Výběr kotoučů byl proveden na základě:

- zkušeností z podobných měření prováděných na katedře obrábění a montáže VŠST Liberec
- doporučení v odborné literatuře
- doporučení výrobce k. p. Karborundum Benátky nad Jizerou

Pro experimentální měření byly ze souboru 7 brusných kotoučů užity tyto čtyři kotouče:

A 99B 25J9V

A 98 10J10V

A 98 25J10V

A98 25L9V

Rozměr použitých kotoučů byl 250 x 20 x 76 mm.

Celý souhrn brusných kotoučů byl podroben měření tvrdosti metodami popsány v kapitole 4.1. a 4.2. Zjištěné hodnoty jsou zaznamenány v tabulce č. 6.

### 10.4. Řezné podmínky

Měření bylo prováděno za následujících řezných podmínek:

- obvodová rychlost brusného kotouče v závislosti na průměru kotouče byla v rozmezí  $v_k = 32,66$  až  $30,3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
- rychlost podélného posuvu stolu  $v_o = 0,194 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
- rychlostní poměr  $q_v = 168,2$  až  $156,1$
- tloušťka odebírané vrstvy  $h_1 = 0,01 \text{ mm}$   
 $h_2 = 0,02 \text{ mm}$   
 $h_3 = 0,03 \text{ mm}$
- broušení probíhalo s přívodem chladicí kapaliny (viz kapitola 8.1.).
- měření probíhalo bez využití příčného posuvu stolu

Seřízení rychlosti pohybu stolu bylo určeno z délky zdvihu a doby trvání 10 zdvihů.

$$\begin{aligned} \text{Je-li} & \quad L = n_i \cdot L_i & (51) \\ \text{pak} & \quad v_o = \frac{L}{t} \end{aligned}$$

kde:  $L_i$  - délka jednoho zdvihu

$n_i$  - počet zdvihů

$L$  - celková dráha zdvihu

$t$  - čas

Po dosazení naměřených hodnot vyšlo

$$v_o = \frac{10 \cdot 0,4}{20,6} = 0,194 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

### 10.5. Měření užitečného výkonu

Měření užitečného výkonu bylo prováděno z důvodů kontroly či pro případné další využití. Měření bylo prováděno tak, že byl měřen příkon hlavního elektromotoru pro pohon včetně  $P_c$  a příkon při chodu na prázdko  $P_o$ . Z jejich rozdílu (viz rovnice 53), bylo možno stanovit hledaný užitečný výkon  $P_u$ .

$$P_u = P_c - P_o \quad (\text{W}) \quad (53)$$

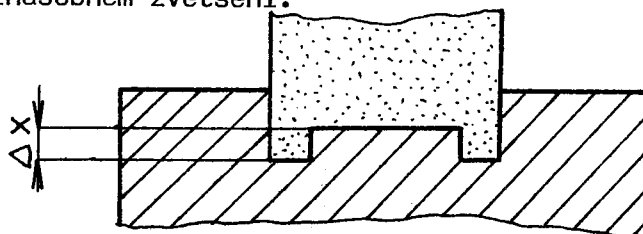
Měření bylo prováděno pomocí měřicího kufru QWII (výrobce Metra, Blansko) vždy pouze pro první zdvih tj. pro nastavenou hloubku  $h$ .

### 10.6. Měření drsnosti povrchu broušeného materiálu

Měření drsnosti povrchu broušeného materiálu bylo prováděno drsnoměrem Hommel-Tester T3 s diamantovým snímačem TFE 100/1290, délka dráhy 6,3 mm, Cut off 0,75 mm. Vzhledem k velkému počtu měření nebyl použit grafický záznam, ale pouze přímé odečítání. Měření bylo prováděno v příčném směru tak, že byl obrobek vyjmut z dynamometru a přenesen na měřicí pracoviště. Drsnost byla měřena před a po vyjiskření.

### 10.7. Měření opotřebení kotouče

Pro měření opotřebení brusného kotouče byla použita tzv. "obrysová metoda". Spočívá v tom, že se na kotouči, který byl předem orovnan, vybrousí během broušení profil, jak je možno vidět na obrázku 19. Takto opotřebovaným kotoučem se potom vybrousí do tenké ocelové planžety profil kotouče a změří se opotřebení  $\Delta x$ , jak to znázorňuje obrázek 19. Měření opotřebení  $\Delta x$  bylo prováděno na univerzálním mikroskopu (výroba CARL ZEISS JENA) při padesátinásobném zvětšení.



Obr. 19. Tvar žiletky a opotřebení kotouče.

#### 10.8. Měření otáček vřetena

Otáčky vřetena byly měřeny mechanickým otáčkoměrem HASLER (Švýcarsko), který měří v rozsahu 0 až 10000 ot. min<sup>-1</sup>. Měření bylo provedeno pětkrát.

$$n_1 = 2500 \text{ ot. min}^{-1}$$

$$n_2 = 2780 \text{ ot. min}^{-1}$$

$$n_3 = 2495 \text{ ot. min}^{-1}$$

$$n_4 = 2500 \text{ ot. min}^{-1}$$

$$n_5 = 2500 \text{ ot. min}^{-1}$$

$$\bar{n} = 2495 \text{ ot. min}^{-1}$$

## 11. POSTUP MĚŘENÍ

1. Volba brusného kotouče
2. Zvuková zkouška kotouče (poklep do volně zavěšeného kotouče - zvonivý zvuk).
3. Změření tvrdosti kotouče metodou Zeiss-Mackensen
4. Změření tvrdosti kotouče zvukovou metodou
5. Statické vyvážení brusného kotouče (vyvažovací stojánek vyrovnán libelou KINEX s výchylkou 0,18 mm na 1000 mm)
6. Upnutí brusného kotouče na vřeteno stroje
7. Drovnání brusného kotouče diamantem
8. Body 1 - 7 se opakují při výměně kotouče
9. Upnutí dynamometru na magnetický stůl
10. Upnutí cejchovací klece a cejchovacího tělíška
11. Zapojení měřicí aparatury
12. Dcejchování dynamometru
13. Upnutí vzorku do dynamometru
14. Nastavení zvolených řezných podmínek
15. Příprava chladící (řezné) kapaliny
16. Přebroušení vzorku (zarovnání plochy)
17. Drovnání kotouče
18. Provedení broušení bez vyjiskření
19. Změření drsnosti
20. Operace 18 provedena dvakrát
21. Otištění profilu kotouče do planžety (sloužilo k zjištění hodnot pro poměrný obrus)
22. Uvedení do chodu registračního zařízení
23. Vlastní měření - eliminace napružení soustavy SPID
  - $P_u$  určován jen pro první zdvih nastavené hloubky
  - pro stanovení vyjiskřovací křivky použito 10 zdvihů, tj. 10 průchodů vzorku pod brusným kotoučem
  - pro danou hloubku h provedena tři měření potom změřena drsnost
  - hloubky nastavovány  $h_1 = 0,01$  mm  
 $h_2 = 0,02$  mm  
 $h_3 = 0,03$  mm
24. Zaznamenání naměřených hodnot do tabulky č. 7.

Tento postup opakován pro každý brusný kotouč, broušený materiál a

řeznou kapalinu, dokud nevyčerpáme všechny možné kombinace. Na závěr provedeno opětovné cejchování dynamometru.

25. Vyhodnocení grafického záznamu pomocí cejchovací křivky
26. Výpočet kritérií řezivosti na minipočítači SAPJ-80 (JVS80-TESLA)
27. Sestavení diagramů
28. Výběr optimálních hodnot - řezná rychlost, brousící kotouč, řezná kapalina



## 12. VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ

Vyhodnocení měření spočívalo ve zpracování grafického záznamu získaného z registračního oscilografu N071.5 při měření tangenciální a radiální složky řezné síly  $F_c$  a  $F_p$ . Systém zápisu, jakož i průběh vyjiskřovací křivky jsou patrné z přílohy č. 4. Na vodorovnou osu byl nanášen čas, na svislou pak složky řezné síly. Rychlost posuvu záznamového papíru byla  $2 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ . Z grafického záznamu byla skutečná hodnota řezných sil získána tak, že pravitkem odměřená hodnota v milimetrech byla násobena cejchovním měřítkem příslušné síly.

Cejchování bylo provedeno pro celý soubor přístrojů tj. dynamometr, tenzometrickou aparaturu M 1000 a oscilograf N071.5. Zjištěné hodnoty posunutí záznamu, vyvolané známou silou, byly zaneseny do grafu. Užitím metody nejmenších čtverců pak byly stanoveny příslušné cejchovní křivky. Z nich zpočtené cejchovní měřítka sil mají hodnotu:

- pro radiální složku řezné síly  $F_p = 1,154221303 \text{ N}$

- pro tangenciální složku řezné síly  $F_c = 0,8075 \text{ N}$

Přepočtené hodnoty složek řezné síly byly zapsány do tabulky č. 7 (vzor zápisové tabulky uveden v příloze). Do této tabulky byly rovněž zaznamenávány ostatní naměřené hodnoty (např.  $R_a$  bez vyjiskření,  $R_a$  po vyjiskření, chladicí kapalina, příkon maximální a jiné.), jakož i hodnoty z nich vypočtené.

Obvodová rychlost brusného kotouče byla počítána podle vztahu

$$v_k = \frac{\pi \cdot D_k \cdot n}{1000} \cdot (\text{m} \cdot \text{s}^{-1}) \quad (54)$$

kde:  $D_k$  - průměr brusného kotouče (mm)

$n$  - otáčky brusného kotouče ( $\text{ot} \cdot \text{s}^{-1}$ )

Objem odbroušeného materiálu pak ze vztahu

$$V = a \cdot c \cdot h \quad (\text{mm}^3) \quad (55)$$

kde:  $a$  - délka vzorku (mm)

$c$  - šířka vzorku (mm)

$h$  - nastavený přídavek (mm)

$$\text{Měrný objem } V_v' = \frac{V}{b} \quad (\text{mm}^3 \cdot \text{mm}^{-1}) \quad (56)$$

Rychlostní poměr  $q_v$  byl počítán ze vztahu (39). Z rychlostního poměru a nastaveného přídávku byla podle vztahu (38) vypočtena ekvivalentní hloubka řezu pro případ, že bude odbroušen celý nastavený přídavek. Poslední hodnotou, která byla počítána do tabulky byl poměrný obrus. Byl spočten podle vztahu (10).

### 12.1. Výpočet kritérií

Pro posouzení řezivosti zkoumaných brousících kotoučů byla použita kritéria, zvolená v kapitole (9). Jejich výpočet byl proveden na minipočítači SAPI-80 (JVS 80 - Tesla). Pro výpočet byl použit program "Broušení", zpracovaný v diplomové práci s. M. Macouna. Tento program však musel být upraven, neboť jak vyplývá z přílohy č. 4, na časové ose jsou dva opakující se intervaly  $t_1$  a  $t_2$ . Úprava spočívala právě v načítání těchto časových intervalů.

Vstupními hodnotami pro výpočet byl:

- počet měření ( $N = 10$ )
- počet měření pro jeden bod ( $M = 3$ )
- časové intervaly ( $H_1 = 3,5$ ,  $H_2 = 5,5$ )
- hodnoty příslušné řezné složky síly

Z výstupu byly zaznamenány kritéria  $T$ ,  $\text{tg } \omega$ ,  $A$ ,  $U_p$ ,  $R$  popsána blíže v kapitole 6.

Přestože je za rozhodující a zároveň dostatečné považováno kritérium  $U_p$ , vypočtené ze síly  $F_p$ , bylo pro ověření správnosti a spolehlivosti a také pro zpřesnění provedeného výzkumu vypočteno kritérium  $U_c$  ze síly  $F_c$ .

### 13. ZHODNOCENÍ DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ

---

Vypočtené hodnoty jednotlivých kritérií pro kombinaci kapalina- materiál - brousící kotouč - hloubka řezu jsou uvedeny v příloze číslo 12 až 23 (tabulka 8 - 19).

Výsledky kritéria strmosti práce  $U_p$ ,  $U_c$  byly zpracovány do grafů (viz příloha č. 24 - 31), které umožňují provést kvalitativní vyhodnocení porovnání naměřených hodnot a získání orientačního přehledu o pracovní schopnosti jednotlivých kotoučů.

Aby bylo možno porovnat řezivost kotoučů, je třeba přiřadit  $h_{eq}$  jednu konkrétní hodnotu pro všechny kotouče a materiály. Z dostupné literatury vyplývá, že za dělicí hodnotu mezi hrubovacím a dokončovacím broušením je považována ekvivalentní hloubka řezu  $h_{eq} = 0,1 \mu\text{m}$ . Z těchto důvodů bylo vyhodnocení rozděleno do dvou částí - na řezivost při dokončovacím broušení (čemuž odpovídá hloubka řezu  $h_1 = 0,01 \text{ mm}$ ) a na řezivost při hrubovacím broušení (čemuž odpovídá  $h_3 = 0,03 \text{ mm}$ ).

Pro dokončovací broušení je výsledné pořadí jednotlivých kritérií řezivosti patrné z přílohy číslo 32 (tabulka 20). Z ní vyplývá, že kritéria  $U_p$ ,  $U_c$ ,  $T$  dávají shodné pořadí kotoučů, kdežto kritéria  $A$ ,  $\text{tg } \mu$ ,  $R$  vykazují pořadí odlišné. Z této tabulky je zároveň možné zjistit, který kotouč při kombinaci materiál - kapalina vykazuje největší řezivost. Porovnání emulzních kapalin Robol a Emulzin H je možné provést z několika hledisek:

- z hlediska dosahované drsnosti bez vyjiskření jsou při použití Emulzinu H dosahovány nižší hodnoty
- z hlediska energetické náročnosti je třeba při použití Robolu více energie než při použití Emulzinu H
- z hlediska poměrného obrusu je při použití Robolu dosahováno vyšších hodnot  $m$

Vzhledem k výše uvedeným faktům a s přihlédnutím k tomu, že i řezivost kotoučů při použití Emulzinu H byla vyšší, je možno doporučit pro dokončovací broušení emulzní kapalinu Emulzin H.

Pro hrubovací broušení je výsledné pořadí jednotlivých kritérií řezivosti patrné z přílohy číslo 33 (tabulka 21). Z tabulky je vidět, že pořadí kotoučů podle jednotlivých kritérií je podobné jako v případě dokončovacího broušení, u kritérií  $U_p$ ,  $U_c$ ,  $T$  shodné, kdežto u kritérií  $A$ ,  $\text{tg } \mu$ ,  $R$  v některých případech odlišné. Z tabulky rovněž vyplývá, který kotouč při kombinaci materiál - kapalina vykazuje největší řezivost. Srovnáním obou emulzních kapalin zjistíme, že:

- z hlediska dosahované drsnosti bez vyjiskření není možno jednoznačně říci, která z kapalin zajišťuje nižší hodnoty. To závisí na broušeném materiálu
- z hlediska dosahované drsnosti po vyjiskření jsou při použití Emulzinu H dosahovány nižší hodnoty
- z hlediska energetické náročnosti je třeba při použití Robolu více energie než při použití Emulzinu H
- z hlediska poměrného obrusu je při použití Robolu dosahováno vyšších hodnot

Z měření dále vyplynulo, že řezivost kotoučů při použití Robolu byla vyšší. V případě hrubovacího broušení není možno zcela jednoznačně říci, která z obou porovnávaných emulzních kapalin je vhodnější. To bude záležet na konkrétních podmínkách a požadavcích. (např. je-li rozhodující drsnost bez vyjiskření či energetická náročnost apod.).

#### 14. DISKUSE VÝSLEDKŮ A NÁVRH DALŠÍHO VÝZKUMU V TÉTO OBLASTI

Uvedené výsledky měření nedávají zcela přesný obraz o skutečných podmínkách a poměrech při broušení těžkoobrobitelných materiálů. Z měření, tak jak byla realizována, není možno sestavit například diagramy broušení, které umožňují provést komplexnější posouzení vzájemného působení dvojice obrobek - kotouč. Pro sestavení diagramů broušení je kromě veličin měřených v této diplomové práci třeba ještě měřit úbytek materiálu. Vzhledem k tomu, že vhodné měřicí zařízení nebylo na VŠST v Liberci ani v SZVKE v Benátkách nad Jizerou, kde byla měření realizována k dispozici (pneumatický snímač úbytku materiálu a kotouče se teprve vyrábí), nemohly být diagramy broušení sestaveny.

Dále je třeba vzít v úvahu, že kotouče, které byly pro měření použity, nebyly k tomuto účelu speciálně vyráběny. Jednalo se o kotouče z běžné výroby. To se plně odrazilo při vyvažování kotoučů, ale i při měření tvrdosti kotoučů (viz příloha číslo 10 - tabulka 6), kdy u některých případů byl rozdíl mezi tvrdostí udanou výrobcem a skutečně naměřenou až dva stupně. Navíc ani zrnitost udaná výrobcem nemusí odpovídat skutečnosti (Nedodržení technologické kázně při výrobě).

Z naměřených a vypočtených hodnot je možno vysledovat určitou závislost mezi velikostí radiální složky řezné síly  $F_p$  a řezivostí. Platí, že čím větší je radiální složka řezné síly, tím je řezivost horší. Ke zmenšení sil pomáhá mazací schopnost řezných kapalin. Je třeba mít na zřeteli, že při optimalizaci řezných podmínek chceme co nejmenší řezné síly a minimální úbytek kotouče. Tím dochází k minimálnímu narušení systému SPID, krátké době vyjiskření a z toho vyplývající velký úhel  $\mu$  vyjiskřovací křivky.

Zjištěné odlišnosti mezi výsledky jednotlivých kritérií, které jsou uvedeny v kapitole 12, vyplývají z jejich podstaty. Za dostatečně spolehlivé a tedy rozhodující bylo považováno kritérium strmosti práce  $U_p$  ( $U_c$ ).

Při porovnání materiálu 14109.4 s těžkoobrobitelnými je možno konstatovat, že sledované parametry (drsnost před i po vyjiskření, poměrný obrus, energetická náročnost) dosahují vyšších hodnot u těžkoobrobitelných materiálů. Rovněž hodnoty řezivosti jsou u nich ve většině případů horší než u etalového materiálu 14109.4.

Zpočtená kritéria řezivosti ani diagramy broušení, pokud by byly sestaveny, nedávají informace o zbytkových pnutích v povrchové vrstvě materiálu po procesu broušení. Přitom ale je nutno vidět, že změna vlastností povrchové vrst-

vy může do značné míry ovlivnit mechanické vlastnosti výrobku. A dvojnásob to platí u leteckých motorů, kde na lopatky turbin působí značně veliké síly a kde právě trhliny, způsobené velkým zbytkovým pnutím mohou zapříčinit poruchy. Tedy přeneseně značné ekonomické ztráty.

Přestože při měření bylo maximálně dbáno na přesnost všech prováděných úkonů, není možno zcela vyloučit zanesení osobní chyby. Je třeba si uvědomit, že lidské oko má určitou citlivost a rozlišovací schopnost, ale ani pravítko, používané na odečet sil z grafického záznamu není vyrobeno s absolutní přesností apod. Z těchto, ale i jiných důvodů (např. zrychlení a zpřesnění výpočtů) by bylo velice vhodné vytvořit takové pracoviště, kde by možnost zanesení chyby člověkem byla minimální. Tedy například záznam naměřených hodnot nahrávat na magnetickou pásku a tu vyhodnocovat přímo mikropočítačem, snímání drsnosti provádět zařízením Hommel-Tester T 1000 s přenosným snímačem drsnosti, event. zařízením Hommel Tester T20 a úbytek kotouče a neodebranou vrstvu materiálu snímat pneumatickým snímačem.

Pro další období navrhuji zaměřit se:

- na pokračování výzkumu těžkoobrobitelných materiálů při broušení rovinném i nakulato
- na zjišťování zbytkových pnutí na povrchu materiálu po broušení
- na zvýšení počtu měření v jednom bodě alespoň na 5
- na tuhost brusek v souvislosti s drsností a vlnitostí broušeného povrchu
- na vytvoření takového kritéria řezivosti, které by zahrnovalo více faktorů ovlivňujících řezivost
- na experimentální měření, aby bylo rozšířeno i na kotouče karborundové.

## 15. ZÁVĚR

Výsledky měření, uvedené v této diplomové práci umožňují, i když ne zcela komplexně, stanovit řezivost zkoumaných brousících kotoučů při broušení těžkoobrobitelných materiálů typu 80 % Fe, 10 % Cr (ŽS6K) a 67 % Ni, 9 % Cr, 5 % W, 5 % Al (L-AK1TD.6). Jedná se o typ materiálů, které dosud nebyly podrobeny důkladnému zkoumání z hlediska broušení. Ani v dostupné literatuře není mnoho informací o těchto materiálech. A pokud nějaké existují, pak se jedná o broušení s kotouči z kubického nitridu bóru či diamantu. Vzhledem k nedostupnosti těchto kotoučů byly pro účely této diplomové práce užity klasické kotouče elektrokorundové.

Za klad této diplomové práce je možno označit tu skutečnost, že pomohla při zavádění metodiky měření složek řezné síly pomocí dvousložkového tenzometrického dynamometru s grafickým záznamem na oscilografu N071.5, s jejich zavedením, vyzkoušením a aplikací při vlastním měření. Dosažené výsledky měření ukazují, že použitá metodika měření i měřicí a registrační přístroje byly voleny vhodně, s ohledem na současné možnosti.

Závěrem bych chtěl poděkovat vedoucímu diplomové práce s. Doc. Ing. Jaromíru Gazdovi, CSc. za cenné informace a poskytnutou literaturu, z níž jsem zejména v teoretické části čerpal, dále konzultantovi s. Ing. Jiřímu Burianovi za pomoc při vyhodnocování měření a s. Ing. Ivo Šrámkovi spolu s ostatními zaměstnanci Resortní zkušebny při SZVKE v Benátkách n. Jizerou za pomoc a vytvoření podmínek pro praktické měření.

## SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

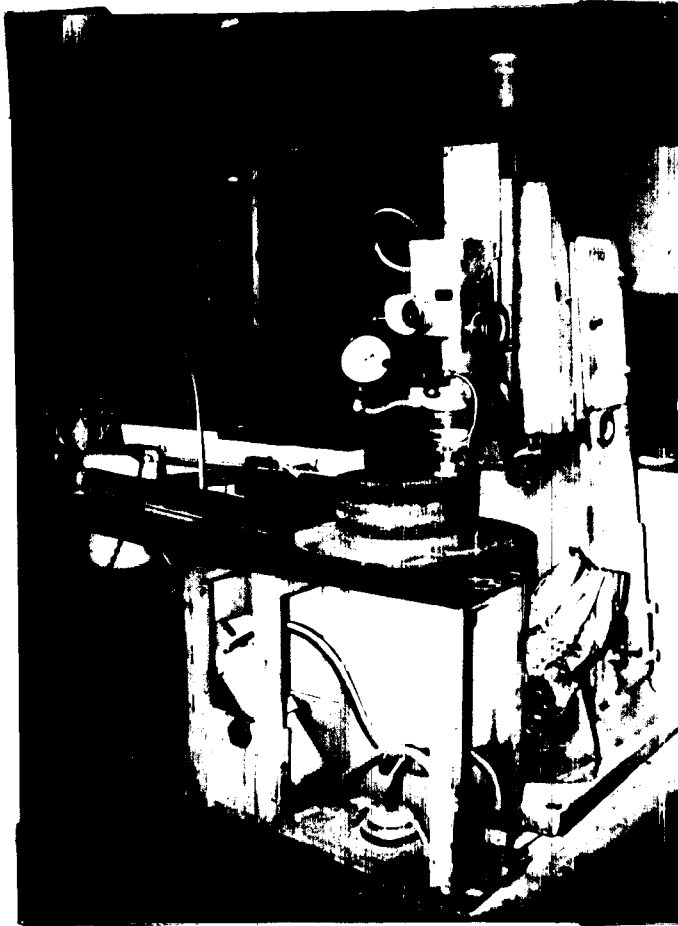
- 1) Maslov, J. N.: Teorie broušení kovů  
1. vydání, Praha, SNTL, 1979
- 2) Gazda, J.: Řezivost brusných kotoučů  
Habilitationní práce, Liberec, 1979, VŠST - fakulta strojní
- 3) Tíep, N.V.: Obrobitelnost kovových materiálů broušením  
Kandidátská disertační práce, Liberec, 1984, VŠST - fakulta strojní
- 4) Mikovec, M.: Obrábění těžkoobrobitelných materiálů  
Praha, SNTL, 1963
- 5) Mikovec, M.: Obrábění materiálů s velkou pevností a tvrdostí  
Praha, SNTL, 1982
- 6) Voda, L.: Broušení těžkoobrobitelných materiálů s vysokým obsahem niklu  
Diplomová práce, Liberec, 1985, VŠST - fakulta strojní
- 7) Kořínek J.: Hodnocení řezivosti brousících kotoučů při broušení valivých ložisek  
Diplomová práce, Liberec, 1981, VŠST - fakulta strojní
- 8) Buda, J., Bukeš, J.: Teoretické základy obrábění kovov  
Bratislava, ALFA, 1977
- 9) Křístek, F.: Obrobitelnost materiálů
- 10) Neřold, K.: Návrh kritéria pro hodnocení obrobitelnosti broušením u vybraných druhů ocelí  
Diplomová práce, Liberec, 1983, VŠST - fakulta strojní
- 11) Glaserová, M.: Návrh a ověření metody hodnocení funkčních vlastností brusných kotoučů



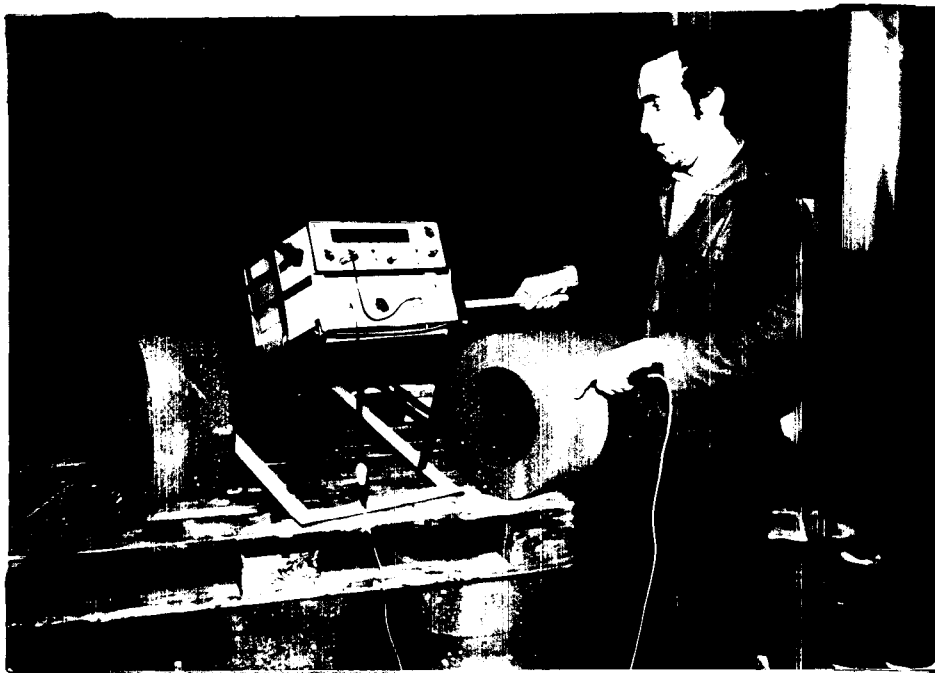
- 12) Majkus, J.: Teoretický rozbor hospodárnosti a produktivity obrábění broušením  
Výzkumná zpráva V203, VÚOS, Praha, 1953
- 13) Říčka, J.: Řezivost brusného nástroje jako funkce jeho stavu a podmínek broušení  
Strojírnoství, číslo 9, 1971, strana 21
- 14) Koellner, E.: Výzkum brusných vlastností kotoučů při broušení dokulata  
Výzkumná zpráva V544, VÚOS Praha, 1957
- 15) Lurje, G. B.: Šlifovanie metalov  
Mašinstrojenie, Moskva, 1969
- 16) Vigner, M., Přikryl, Z. a kolektiv: Obrábění  
Technický průvodce svazek 61, Praha, SNTL, 1984
- 17) Pluhař, J.; Koryta, J.: Strojírenské materiály  
Praha, SNTL/ALFA, 1982, třetí vydání
- 18) Vasilko, A.: Tvorenie triesky pri brúsení  
Strojírnoství, svazek 18, strana 279 - 282, SNTL, Praha 1968
- 19) Bolsakov, I. S. a kolektiv: Šlifovanie titanových splavov s nízkymi skorostjami rezania  
Abrazivy, číslo 11, strana 3, 4, Moskva, 1979
- 20) Korž, N.R., Galkov, A. V.: Vzájmnaja svjaz stružkoobrazovania i iznosa krugov pri šlifovanii Fe - ughlerodnych i titanových splavov  
Sverchtvjordye materialy, číslo 4, strana 48 - 53, Moskva 1981
- 21) Popov, M. A.: Šlifovanie niklo-titanových splavov  
Stanky i mašinstrojenie, číslo 3, str. 20, 21, Moskva 1981

## SEZNAM PŘÍLOH

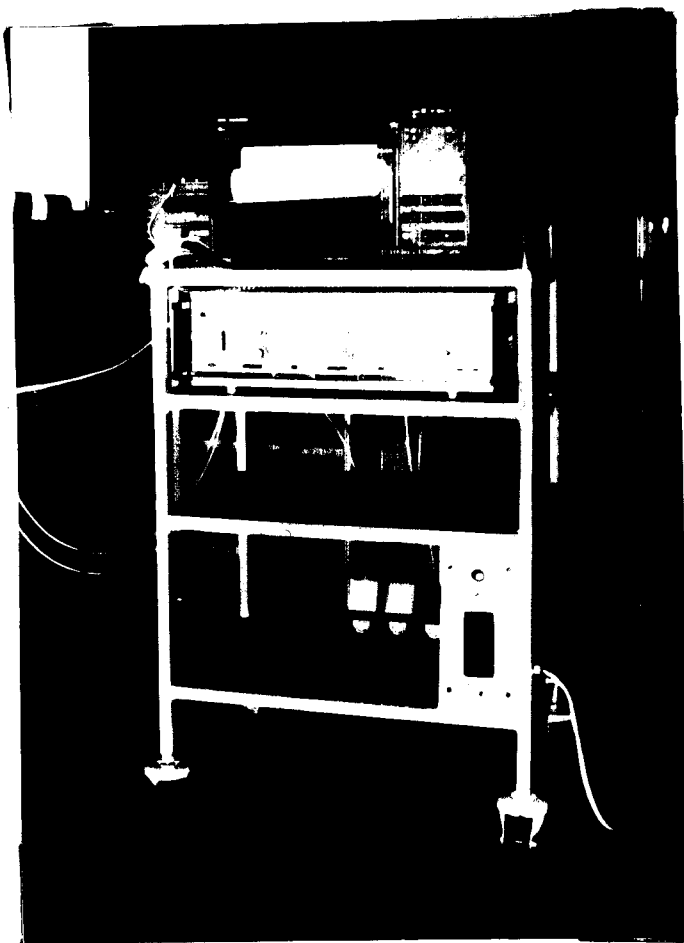
číslo přílohy	
1	Měření tvrdosti brousících kotoučů metodou Zeiss-Mackensen a zvukovou metodou
2	Pohled na registrační zařízení, stroj na zkoušení pevnosti brousících kotoučů za rotace
3	Zařízení na měření drsnosti HOMMEL-TESTER T3, cejchování dynamometru
4	Záznam vyjiskřovací křivky
5	Tabulka č. 1
6	Tabulka č. 2
7	Tabulka č. 3
8	Tabulka č. 4
9	Tabulka č. 5
10	Tabulka č. 6
11	Tabulka č. 7
12	Tabulka č. 8
13	Tabulka č. 9
14	Tabulka č. 10
15	Tabulka č. 11
16	Tabulka č. 12
17	Tabulka č. 13
18	Tabulka č. 14
19	Tabulka č. 15
20	Tabulka č. 16
21	Tabulka č. 17
22	Tabulka č. 18
23	Tabulka č. 19
24	Grafy skutečné závislosti kritéria $U_c$ na hloubce h
25	Grafy skutečné závislosti kritéria $U_c$ na hloubce h
26	Grafy skutečné závislosti kritéria $U_c$ na hloubce h
27	Grafy skutečné závislosti kritéria $U_c$ na hloubce h
28	Grafy skutečné závislosti kritéria $U_p$ na hloubce h
29	Grafy skutečné závislosti kritéria $U_p$ na hloubce h
30	Grafy skutečné závislosti kritéria $U_p$ na hloubce h
31	Grafy skutečné závislosti kritéria $U_p$ na hloubce h
32	Tabulka č. 20
33	Tabulka č. 21



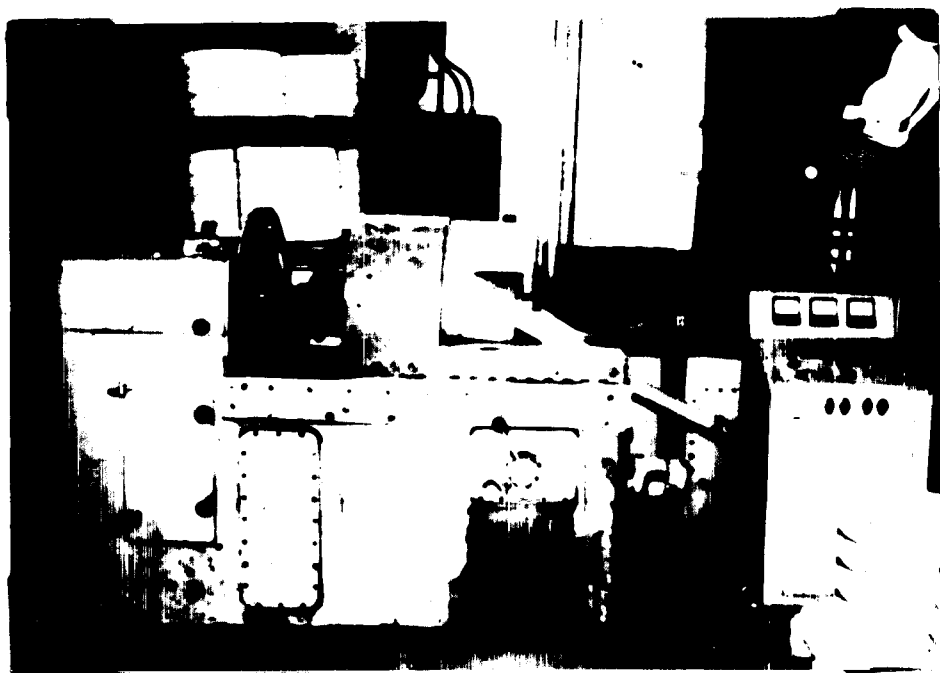
Měření tvrdosti brousících kotoučů metodou Zeiss-Mackensen



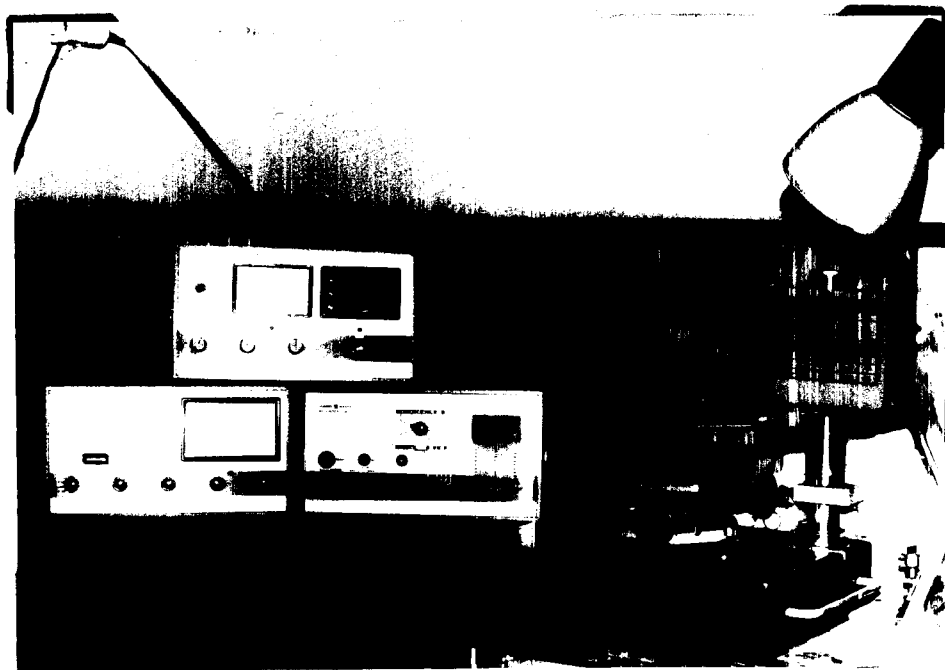
Měření tvrdosti brousících kotoučů zvukovou metodou



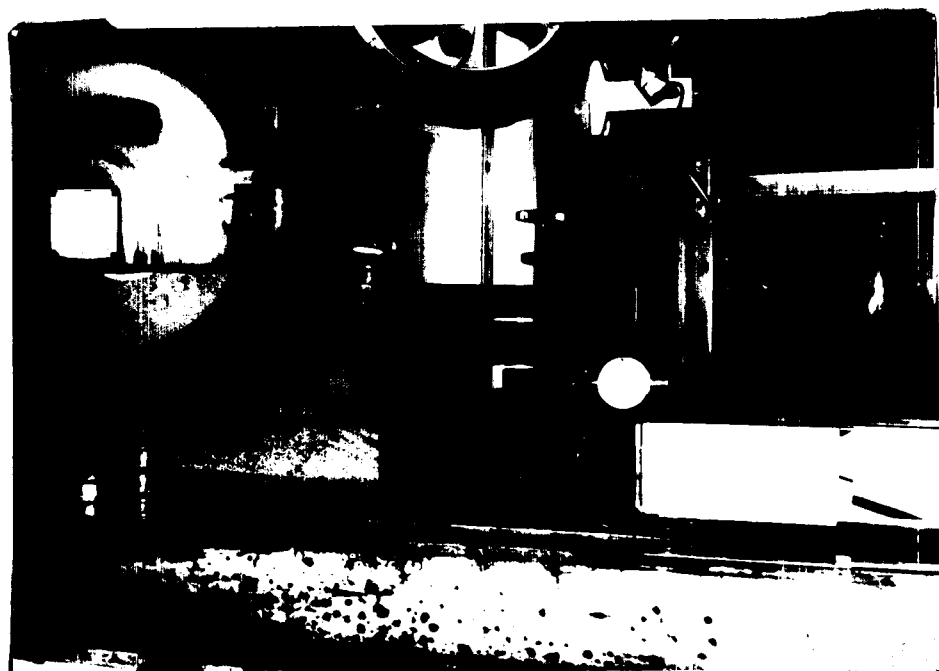
Pohled na registrační zařízení



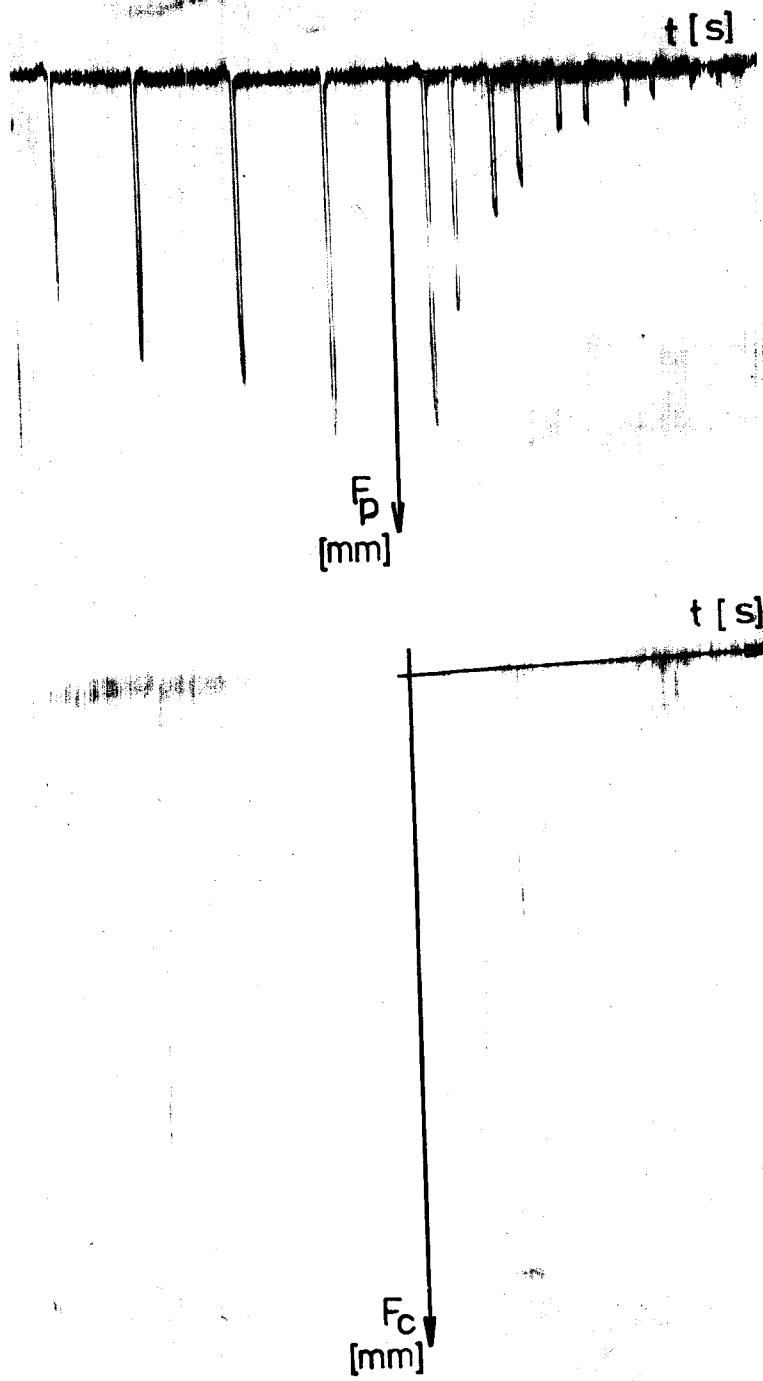
Stroj na zkoušení pevnosti brousících kotoučů za rotace



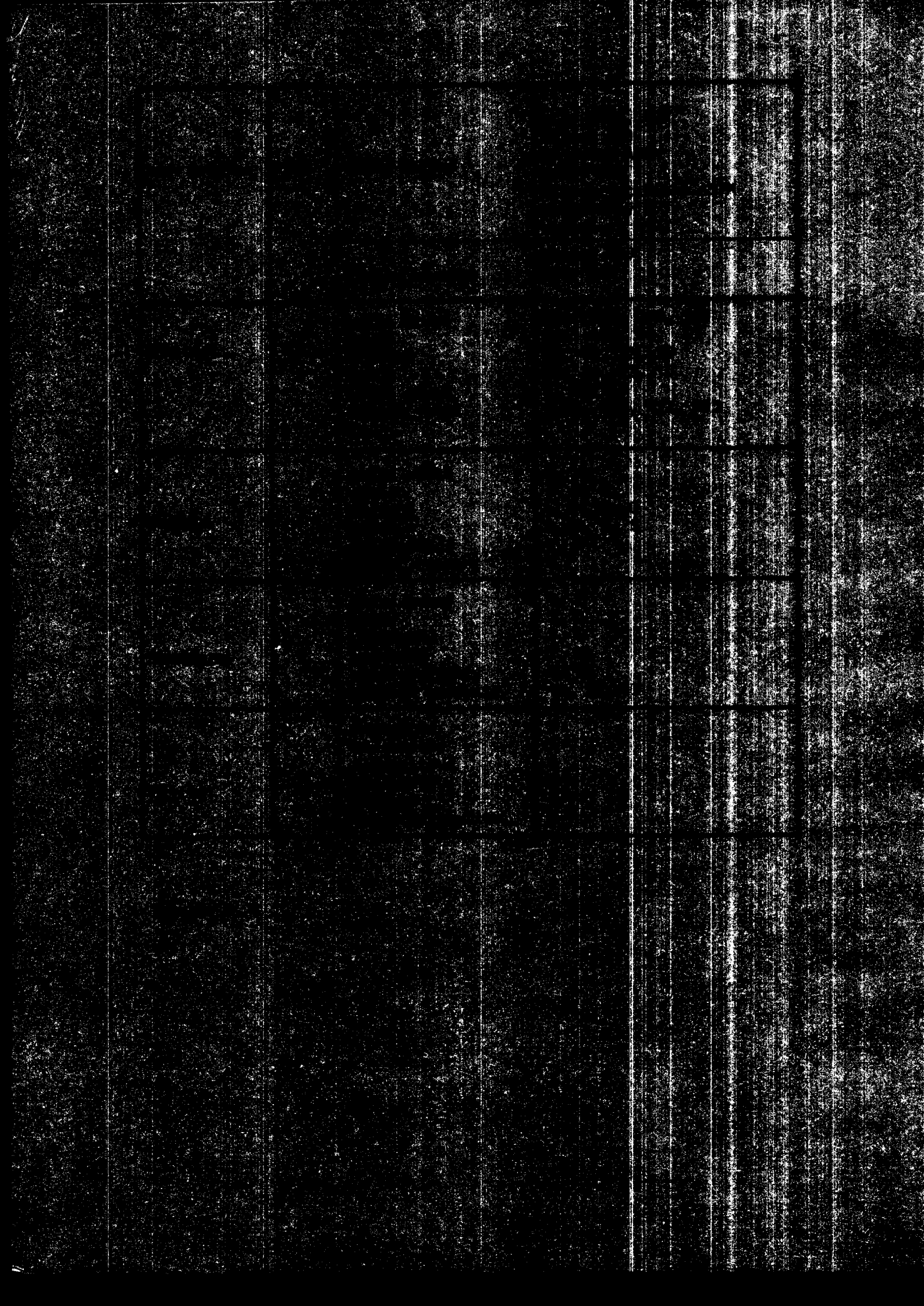
Zařízení na měření drsnosti HOMMEL TESTER T3

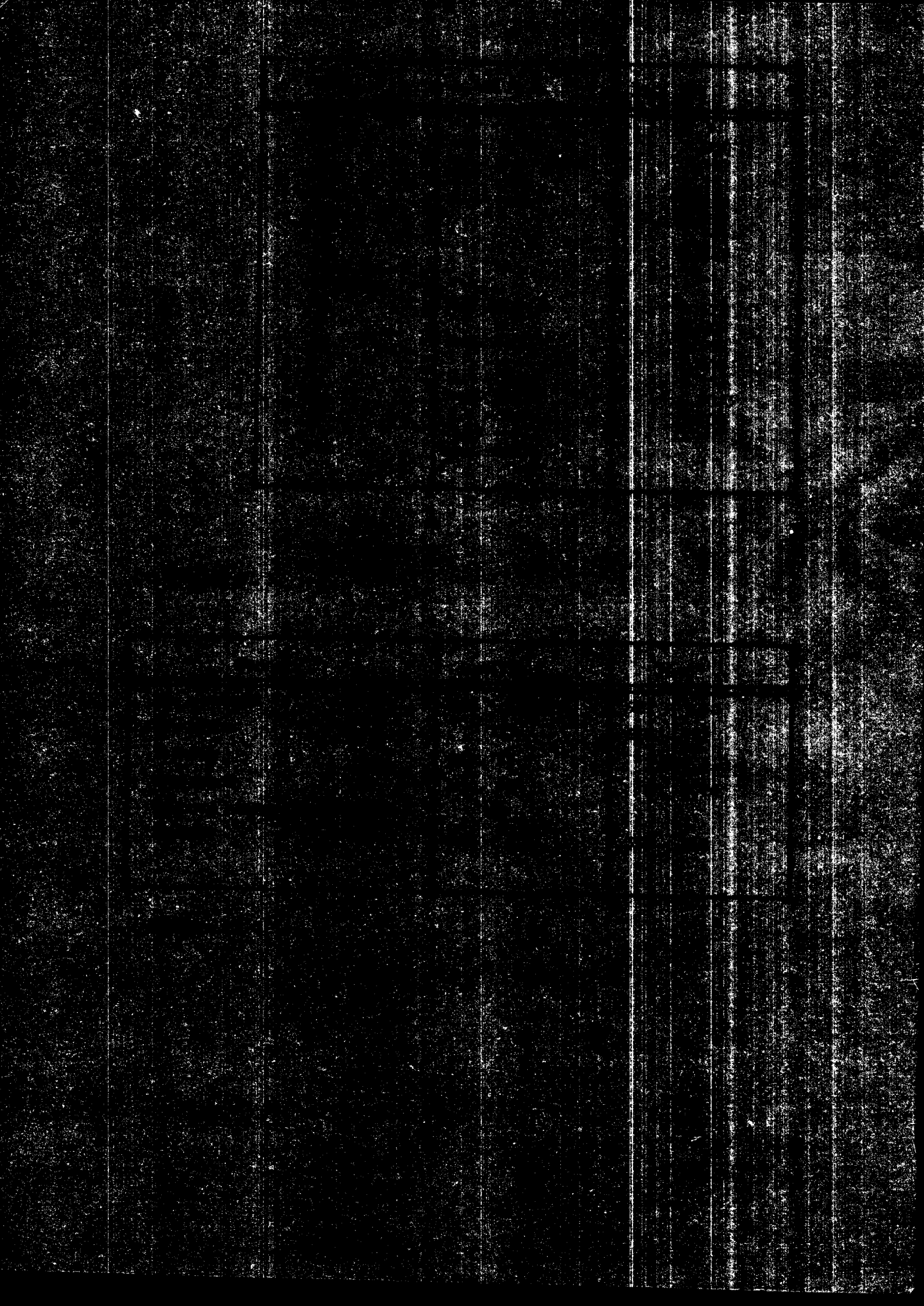


Cejchování dynamometru



Záznam vyjiskřovací křivky







Prvek	L-AK1 TD.6	ŽS6K (%)
Ni	1,5 - 1,8	67,3
Mn	max. 0,6	0,010
Si	max. 0,6	0,142
Cr	10,5 - 12	9,181
Mo	0,35 - 0,5	4,158
Ti	-	2,822
Al	-	5,292
Co	-	4,443
Nb	-	-
Nb + Ta	-	-
Fe	cca 80,0	0,625
Zr	-	0,005
Cu	max. 0,3	0,009
B	-	0,016
C	0,1 - 0,16	0,150
S	max. 0,025	0,0013
W	1,6 - 2,0	5,100
V	0,18 - 0,3	-
P	max. 0,030	-

Tabulka č. 3

Hodnoty	L-AK1TD.6	ŽS6K
Mez pevnosti R <sub>m</sub>	880 - 1030	981 - 1050
Mez kluzu R <sub>p0,2</sub>	735	863 - 922
Tažnost A <sub>5</sub>	min. 15	1,5 - 7,0
Kontrakce Z	min. 55	8 - 16
Vrbová houževnatost KCU2	90	-
Tvrdost HB	269 - 317	332 - 350

Tabulka č. 4

<p>πολιτο</p>	<p>Λ</p>	<p>πρωτη βιλεκλιτσε βιλεχουε ρεθικουε μωδουστρουε επιτικετουε κεθωιτκε</p>	<p>Β Β Ε Ο Σ Λ</p>
<p>επιδικουε</p>	<p>α</p>	<p>σατηρεε βοιφαιτλ αθιωτ βοιοατλ βοιοατλ βοιομικυλ μικυλ αθιωτ μικυλ</p>	<p>11' 15' 12 α' 10 1' 8 2' e 3' φ 1' 5</p>
<p>ταδουτ</p>	<p>Ι</p>	<p>σατηρεε ετιρε αθιωτ ετιρε ετιρε ετιρε μικικε αθιωτ μικικε</p>	<p>Λ' Σ 1' Π 6' 0' 6' 2 1' 0' 1' 0 1' 1' 1' 1 c' H</p>
<p>επιδικουε</p>	<p>ΣΣ</p>	<p>σατηρεε εθουε αθιωτ εθουε εθουε εθουε εθουε αθιωτ εθουε</p>	<p>α' 2' 125' 125' 112 8' e' 2 30' 1e' 15' 10 20' 40' 35' 52 122' 100' 80' e2 212' 220' 500' 1e0</p>
<p>οικουε βιουατ</p>	<p>ΑΒΒΒ</p>	<p>κετιρεε κικωικυ  μικικε κοικωικυ</p>	<p>εθουε cφ8 εθουε cφ8 ετικουε Αε15 βοιοκικικυ Αε16 μικικε Αε17 μικικε Αε8 εθουε Αε8 εθουε Αε8 εθουε Αε8</p>

Druh obrábění	Vysocелеgované oceli včetně austenitických	Austenitické slitiny a ostatní slitiny na bázi Ni, Ni-Cr, Co
Běžné broušení	Akvol (1,5-2 %) ostatní emulze (2 - 4 %)	Akvol (1,5-2 %) ostatní emulze (2 - 4 %)
Rychlostní broušení	ROBOL (5 %) Akvol (4 - 6 %) ostatní emulze (8 - 12 %) Abrazol B	ROBOL (5 %) Akvol (4 - 6 %) ostatní emulze (8 - 12 %) Abrazol B
Tvarové broušení	Abrasol B Ejektol Finol P 2 DS	Abrasol B Ejektol Finol P 2 DS

Tabulka č. 5

Kotouč	Číslo	Statická tvrdost		Zvuková metoda	
		Hloubka důlku(mm)	Tvrdost	Frekvence (kHz)	Tvrdost
A99B25I9V	1	5,3 5,3	G	4,30	H
A99B25J9V	2	5,0 5,3	G	4,32	H
A99B25L9V	3	3,2 3,0	L	5,81	L
A9925J12V	4	4,1 4,0	L	5,12	J
A9810J10V	5	3,1 3,2	L	5,70	L
A9825J10V	6	3,8 3,7	J	nelze změřit	---
A9825L9V	7	2,9 3,0	L	5,90	L

Tabulka č. 6.

				1		
S	F	1		2		
		1		2		
		1		2		

	c	Fp[N]		

Tabulka č. 7

## KRITÉRIUM: T

$\bar{v}_k = 32,3197 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

$v_0 = 0,194 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

KApalina: ROBOL

KOTOUČ	Materiál	Hĺoubka řezu (mm)		
		0,01	0,02	0,03
2	14 109.4 L - AK1TD.6 ŽS6K	11,8572 11,7276 11,2886	11,5883 12,6644 12,8371	10,9886 14,9156 18,5117
5	14 109.4 L-AK1TD.6 ŽS6K	10,5263 9,0482 9,6289	10,3784 11,1928 9,7283	18,2352 26,1701 38,4835
7	14 109.4 L-AK1TD:6 ŽS6K	9,4241 10,4582 10,2635	10,1905 9,8649 10,1184	16,6463 22,6981 40,1736
6	14 109.4 L-AK1TD.6 ŽS6K	9,0166 10,1381 9,9472	10,3301 9,0358 9,1202	14,6834 17,3930 23,0948

Tabulka č. 8

KRITÉRIUM: $U_p$				
$\bar{v}_k = 32,3197 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$		$v_o = 0,194 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$		Kapalina: ROBOL
Kotouč	Materiál	Hloubka řezu (mm)		
		0,01	0,02	0,03
2	14 109.4 L-AK1TD.6 ŽS6K	668,700 653,609 720,973	834,892 735,079 933,453	771,655 438,766 364,610
5	14 109.4 L-AK1TD.6 ŽS6K	764,306 929,738 939,057	721,464 647,480 1213,740	233,488 103,453 48,614
7	14 109.4 L-AK1TD.6 ŽS6K	942,346 707,054 737,141	721,472 803,279 948,642	357,488 162,514 40,183
6	14 109.4 L-AK1TD.6 ŽS6K	962,622 837,556 831,897	431,610 982,558 944,582	358,291 289,726 202,102

Tabulka č. 9

KRITÉRIUM: A				
$\bar{v}_k = 32,3197 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$		$v_0 = 0,194 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$		Kapalina: ROBOL
Kotouč	Materiál	Hĺoubka řezu (mm)		
		0,01	0,02	0,03
2	14 109.4 L-AK1TD.6 ŽS6K	333,113	218,001	271,088
		468,458	268,758	596,305
		659,325	327,695	1127,470
5	14 109.4 L-AK1TD.6 ŽS6K	429,981	596,898	1569,950
		580,951	845,852	2796,570
		713,243	958,524	5089,140
7	14 109.4 L-AK1TD.6 ŽS6K	481,418	493,596	933,281
		651,040	785,061	1903,200
		802,046	867,237	3527,030
6	14 109.4 L-AK1TD.6 ŽS6K	355,084	415,668	592,944
		429,453	378,600	1281,820
		626,907	626,323	1943,210

Tabulka č. 10



KRITÉRIUM : $U_c$				
$\bar{v}_k = 32,3197 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$		$v_0 = \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$		Kapalina: ROBOL
Kotouč	Materiál	Hĺoubka řezu (mm)		
		0,01	0,02	0,03
2	14 109.4 L-AK1TD.6 ŽS6K	737,520	786,473	863,155
		745,743	854,329	461,018
		798,394	631,574	296,688
5	14 109.4 L-AK1TD.6 ŽS6K	925,148	944,838	304,274
		1240,770	898,918	147,391
		1093,810	1076,460	68,037
7	14 109.4 L-AK1TD.6 ŽS6K	1148,450	983,262	367,437
		929,230	1040,650	196,441
		961,620	988,274	62,675
6	14 109.4 L-AK1TD.6 ŽS6K	1262,070	968,990	475,592
		996,473	1254,750	335,109
		1026,950	1220,000	189,742

Tabulka č. 11

KRITÉRIUM : $tg \omega$				
$\bar{v}_k = 32,3197 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ $v_o = 0,194 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ Kapalina: ROBOL				
Kotouč	Materiál	Hĺoubka řezu (mm)		
		0,01	0,02	0,03
2	14 109.4 L-AK1TD.6 ŽS6K	2,3693	1,6234	2,2451
		3,4060	1,6757	2,6803
		5,1739	1,9886	3,2901
5	14 109.4 L-AK1TD.6 ŽS6K	3,8806	5,5417	4,7693
		7,0960	6,7517	4,0833
		7,6927	10,1280	3,4663
6	14 109.4 L-AK1TD.6 ŽS6K	5,4206	4,7532	3,3681
		5,9525	8,0671	3,6941
		7,6139	8,4707	2,1854
7	14 109.4 L-AK1TD.6 ŽS6K	4,3676	3,8953	2,7502
		4,1784	4,6371	4,2372
		6,3359	7,5299	3,6433

Tabulka č. 12

KRITÉRIUM: R				
$\bar{v}_k = 32,3197 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$				
$v_0 = 0,194 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ Kapalina: ROBOL				
Kotouč	Materiál	Hloubka řezu (mm)		
		0,01	0,02	0,03
2	14 109.4 L-AK1TD.6 ŽS6K	78,704 50,629 33,607	142,466 100,926 76,367	109,147 31,265 11,854
5	14 109.4 L-AK1TD.6 ŽS6K	61,049 46,431 34,285	40,543 24,749 23,602	7,957 2,953 1,053
7	14 109.4 L-AK1TD.6 ŽS6K	57,155 36,132 28,233	52,316 29,877 25,906	16,276 5,289 1,595
6	14 109.4 L-AK1TD.6 ŽS6K	87,245 62,793 32,326	64,637 80,171 42,004	21,245 10,575 5,088

Tabulka č. 13

KRITÉRIUM: T				
$\bar{v}_k = 32,5326 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$		$v_o = 0,194 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$		Kapalina: EMULZIN H
Kotouč	Materiál	Hloubka řezu (mm)		
		0,01	0,02	0,03
2	14 109.4 L-AK1TD.6 ŽS6K	10,3079	15,6047	12,9781
		13,3511	11,8270	18,6316
		11,1791	12,0609	22,4653
5	14 109.4 L-AK1TD.6 ŽS6K	10,6903	13,9579	15,4709
		9,4566	12,1090	22,5889
		9,7157	13,2029	29,8746
7	14 109.4 L-AK1TD.6 ŽS6K	10,5235	11,3096	17,4057
		12,1767	11,4439	20,7492
		8,6017	9,8663	34,1000
6	14 109.4 L-AK1TD.6 ŽS6K	8,7092	9,5473	23,7377
		7,5027	9,5169	46,6235
		9,5992	9,2089	29,1621

Tabulka č. 14

KRITÉRIUM: $\operatorname{tg} \omega$				
$\bar{v}_k = 32,5326 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$				
$v_0 = 0,194 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$				
Kapalina: EMULZIN H				
Kotouč	Materiál	Hloubka řezu (mm)		
		0,01	0,02	0,03
2	14 109.4 L-AK1TD.6 ŽS6K	2,9067	1,0133	2,9788
		2,6994	1,7683	3,1957
		4,6655	2,2503	3,0687
5	14 109.4 L-AK1TD.6 ŽS6K	2,7052	3,7622	3,2468
		5,1833	5,4259	3,2717
		7,4329	6,0090	3,2774
7	14 109.4 L-AK1TD.6 ŽS6K	2,3434	2,0340	2,3996
		2,3462	2,9965	3,4248
		7,4474	8,0968	2,5286
6	14 109.4 L-AK1TD.6 ŽS6K	4,2218	5,3241	3,8511
		8,4958	8,6718	2,1772
		6,3457	11,3664	6,8792

Tabulka č. 15

KRITÉRIUM: A				
$\bar{v}_k = 32,5326 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ $v_0 = 0,194 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ Kapalina: EMULZIN H				
Kotouč	Materiál	Hĺoubka řezu (mm)		
		0,01	0,02	0,03
2	14 109.4 L-AK1TD.6 ŽS6K	308,848 481,162 583,064	246,731 247,347 327,342	501,719 1109,340 1548,730
5	14 109.4 L-AK1TD.6 ŽS6K	309,150 463,523 701,627	732,960 795,582 1047,630	777,130 1669,410 2925,020
7	14 109.4 L-AK1TD.6 ŽS6K	259,513 347,876 551,034	260,167 392,422 788,173	726,991 1474,470 2923,070
6	14 109.4 L-AK1TD.6 ŽS6K	320,225 478,232 584,721	485,297 785,429 963,923	2170,010 4732,700 5850,210

Tabulka č. 16

KRITÉRIUM: $U_C$				
$\bar{v}_k = 32,5326 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ $v_o = 0,194 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ Kapalina: EMULZIN H				
Kotouč	Materiál	Hloubka řezu (mm)		
		0,01	0,02	0,03
2	14 109.4 L-AK1TD.6 ŽS6K	973,642 577,018 815,819	438,394 750,805 713,742	609,481 292,992 201,058
5	14 109.4 L-AK1TD.6 ŽS6K	906,370 1141,530 1074,260	523,251 692,545 580,995	426,286 198,667 113,202
7	14 109.4 L-AK1TD.6 ŽS6K	941,155 698,896 1372,960	817,352 786,516 1040,310	338,174 235,589 87,523
6	14 109.4 L-AK1TD.6 ŽS6K	1355,250 1804,810 1103,360	1119,110 1117,620 1190,560	179,232 46,461 118,177

Tabulka č. 17

KRITÉRIUM : $U_D$				
$\bar{v}_k = 32,3197 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ $v_o = 0,194 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ Kapalina: EMULZIN H				
Kotouč	Materiál	Hloubka řezu (mm)		
		0,01	0,02	0,03
2	14 109.4 L-AK1TD.6 ŽS6K	925,918	550,557	442,867
		485,373	797,175	289,352
		635,957	960,437	236,921
5	14 109.4 L-AK1TD.6 ŽS6K	648,112	520,770	394,367
		816,862	732,002	172,224
		805,442	548,474	98,355
7	14 109.4 L-AK1TD.6 ŽS6K	868,121	909,012	383,439
		625,702	879,533	209,685
		1112,139	950,118	92,817
6	14 109.4 L-AK1TD.6 ŽS6K	1195,090	793,519	175,047
		1161,150	905,706	63,853
		1096,360	843,791	102,369

Tabulka č. 18



KRITÉRIUM: R				
$\bar{v}_k = 32,5326 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ $v_o = 0,194 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ Kapalina: EMULZIN H				
Kotouče	Materiál	Hĺoubka řezu (mm)		
		0,01	0,02	0,03
2	14 109.4 L-AK1TD.6 ŽS6K	95,577 44,665 39,556	100,432 118,077 79,666	43,137 12,041 6,829
5	14 109.4 L-AK1TD.6 ŽS6K	93,155 59,038 34,759	25,155 25,186 16,704	21,667 6,247 2,522
7	14 109.4 L-AK1TD.6 ŽS6K	119,071 72,975 51,522	113,311 64,886 29,728	21,695 7,776 2,286
6	14 109.4 L-AK1TD.6 ŽS6K	102,254 68,149 44,078	56,042 30,686 24,456	4,347 0,991 1,111

Tabulka č. 19

Kapalina: ROBOL		Hloubka řezu 0,01 (mm)																						
Kotouč	Tvrdość						14 109.4						L-AK1TD.6						Z56K					
	ST	ZM	U <sub>D</sub>	U <sub>C</sub>	A	T	tg	R	U <sub>D</sub>	U <sub>C</sub>	A	T	tg	R	U <sub>D</sub>	U <sub>C</sub>	A	T	tg	R				
A99B25J9V	G	H	4	4	1	4	4	2	4	4	2	4	4	2	4	4	2	4	4	4	2			
A98 10J10V	L	L	3	3	3	3	3	3	1	1	4	1	1	3	1	1	3	1	1	1	1			
A98 25L9V	J	-	2	2	4	2	1	4	3	3	3	3	2	4	3	3	4	3	2	4	4			
A98 25L10V	L	L	1	1	2	1	2	1	2	2	1	2	3	1	2	2	1	2	2	3	3			
Kapalina: EMULZIN H		14 109.4						L-AK1TD.6						Z56K										
A99B25J9V	G	H	2	2	2	2	2	3	4	4	4	4	3	4	4	4	2	4	4	4	3			
A98 10J10V	L	L	4	4	3	4	3	4	2	2	2	2	2	3	3	3	4	3	2	4	4			
A98 25L 9V	J	-	3	3	1	3	4	1	3	3	1	3	4	1	1	1	1	1	1	1	1			
A98 25L 10V	L	L	1	1	4	1	1	2	1	1	3	1	1	2	2	2	3	2	3	3	2			

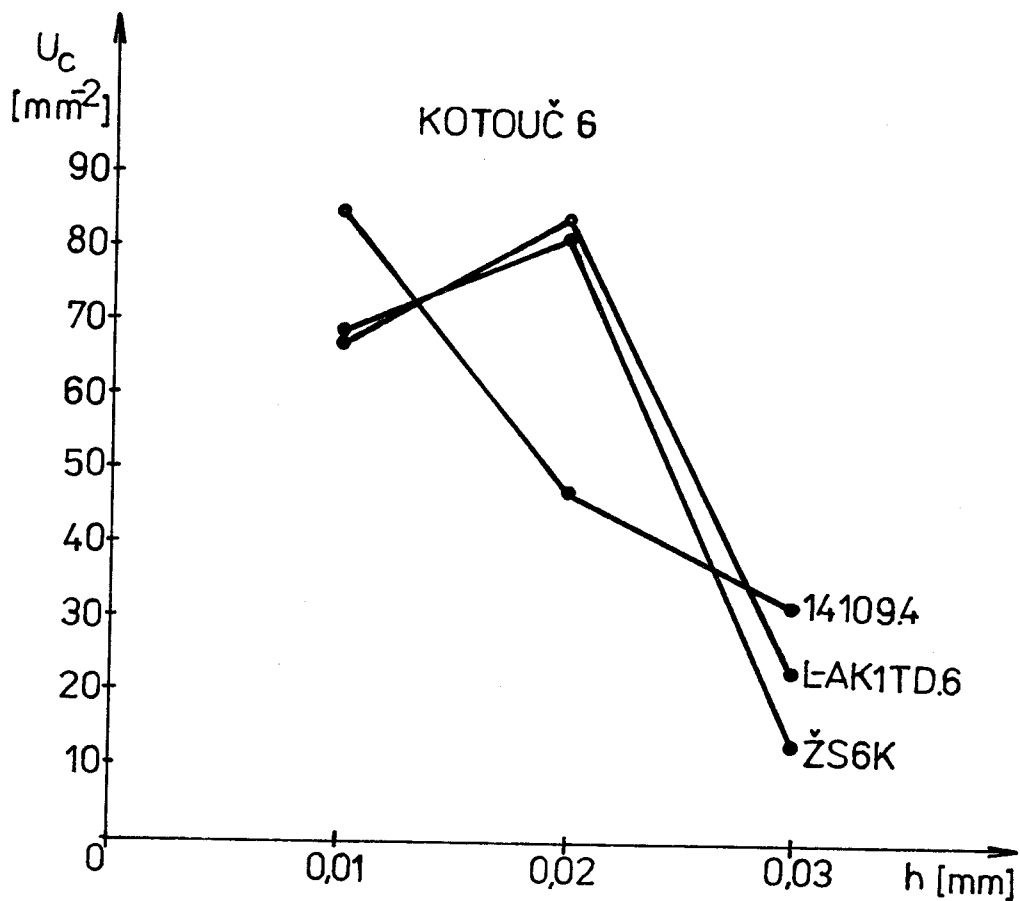
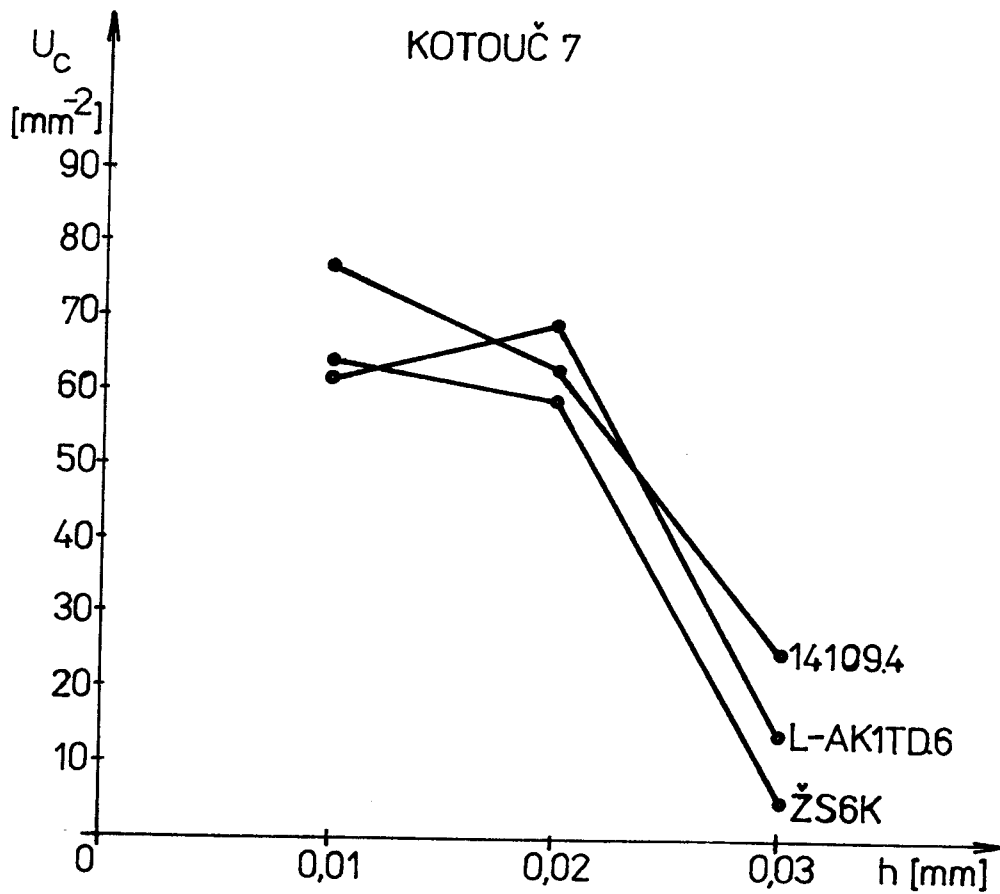
Tabulka č. 20

ST - tvrdost zjištěná metodou Zeiss-Mackensen  
 ZM - tvrdost zjištěná zvukovou metodou

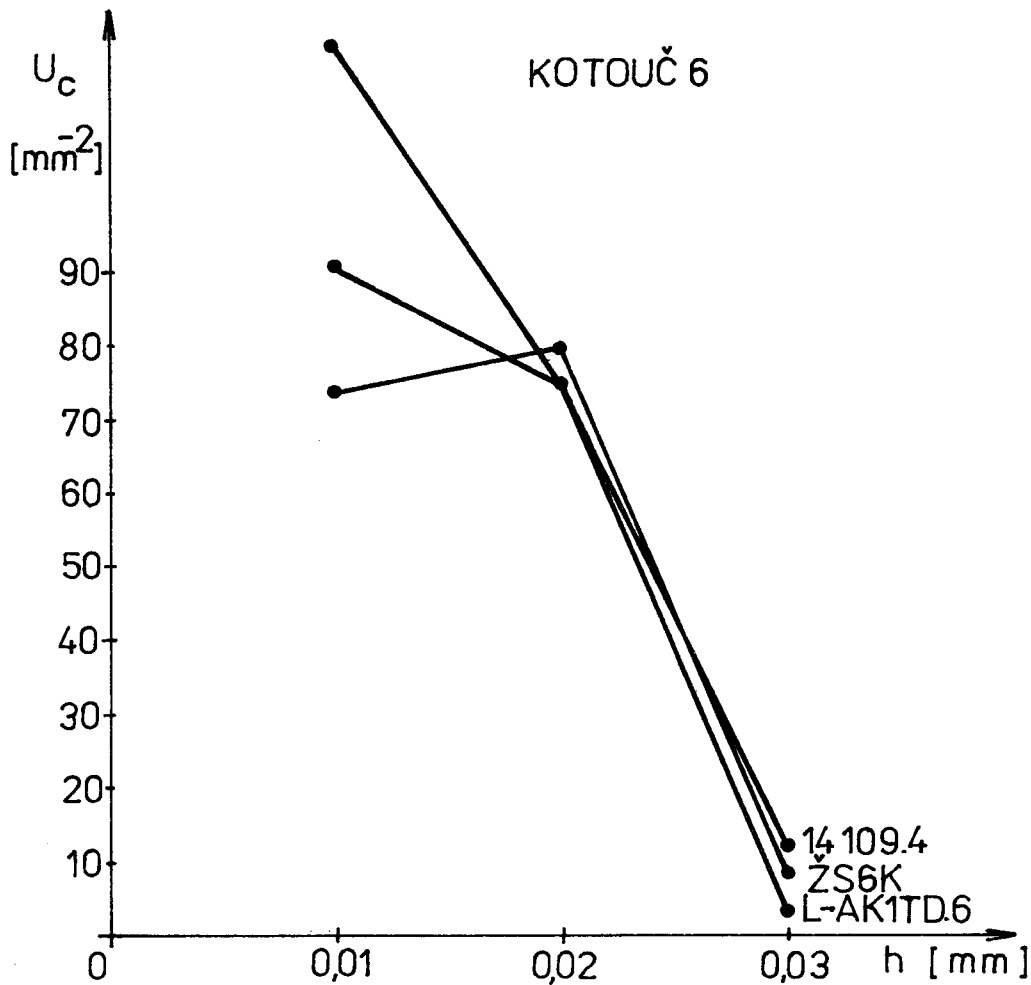
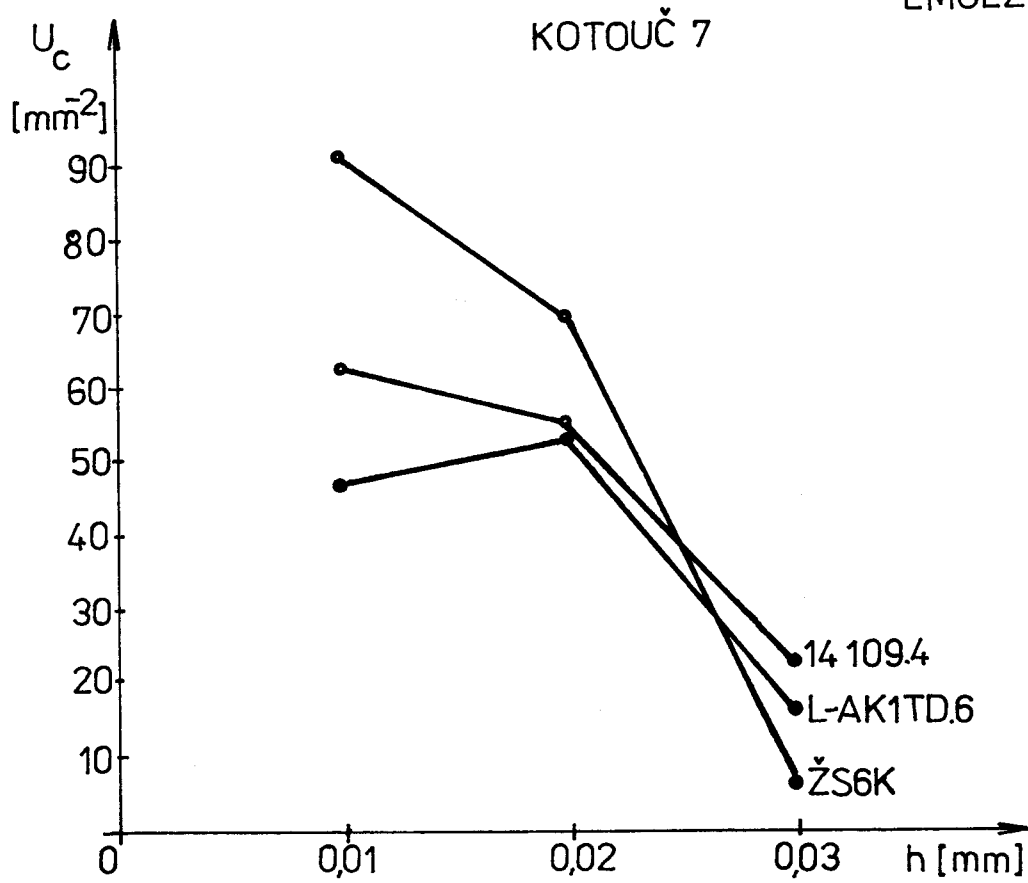
Kapalina: ROBOL		Hĺbka řezu 0,03 (mm)																										
Kotouč	Tvrdość	14 109.4									L-AK1TD.6									ZS6K								
		ST	ZM	U <sub>D</sub>	U <sub>C</sub>	A	T	tg	R	U <sub>D</sub>	U <sub>C</sub>	A	T	tg	R	U <sub>D</sub>	U <sub>C</sub>	A	T	tg	R							
A99B 25 J9V	G	H	1	1	1	1	1	4	1	1	1	1	1	4	4	1	1	1	1	3	1							
A98 10J 10V	L	L	4	4	4	4	4	1	4	4	4	4	2	4	3	3	4	3	2	4								
A98 25L 9V	J	-	3	3	3	3	3	2	3	3	3	3	3	3	4	4	4	4	4	4	3							
A98 25L 10V	L	L	2	2	2	2	2	3	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	1	2							
Kapalina: EMULZIN H		14 109.4									L-AK1TD.6									ZS6K								
A99B 25J 9V	G	H	1	1	1	1	1	3	1	1	1	1	3	1	1	1	1	1	1	3	1							
A98 10J 10V	L	L	2	2	3	2	2	2	3	3	3	3	2	3	3	3	3	3	3	2	2							
A98 25L 9V	J	-	3	3	2	3	4	2	2	2	2	2	1	2	4	4	2	4	4	4	3							
A98 25L 10V	L	L	4	4	4	4	4	1	4	4	4	4	4	4	2	2	4	4	2	1	4							

Tabulka č. 21

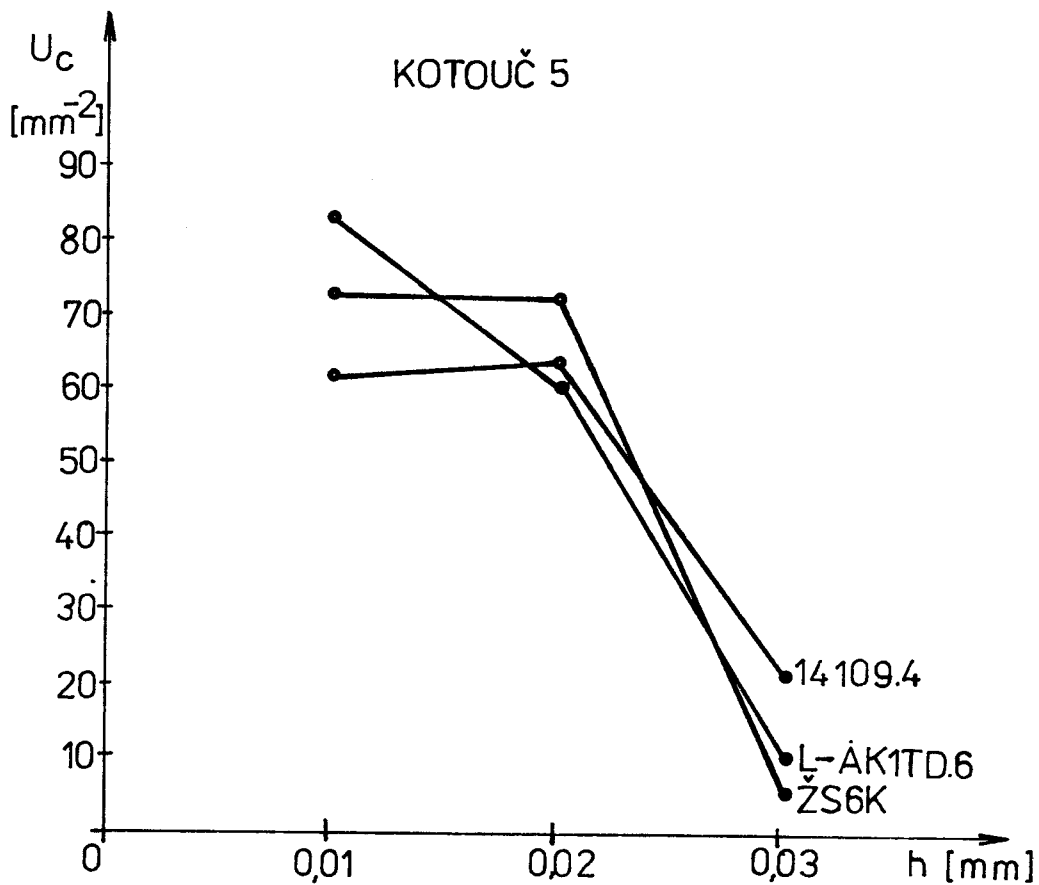
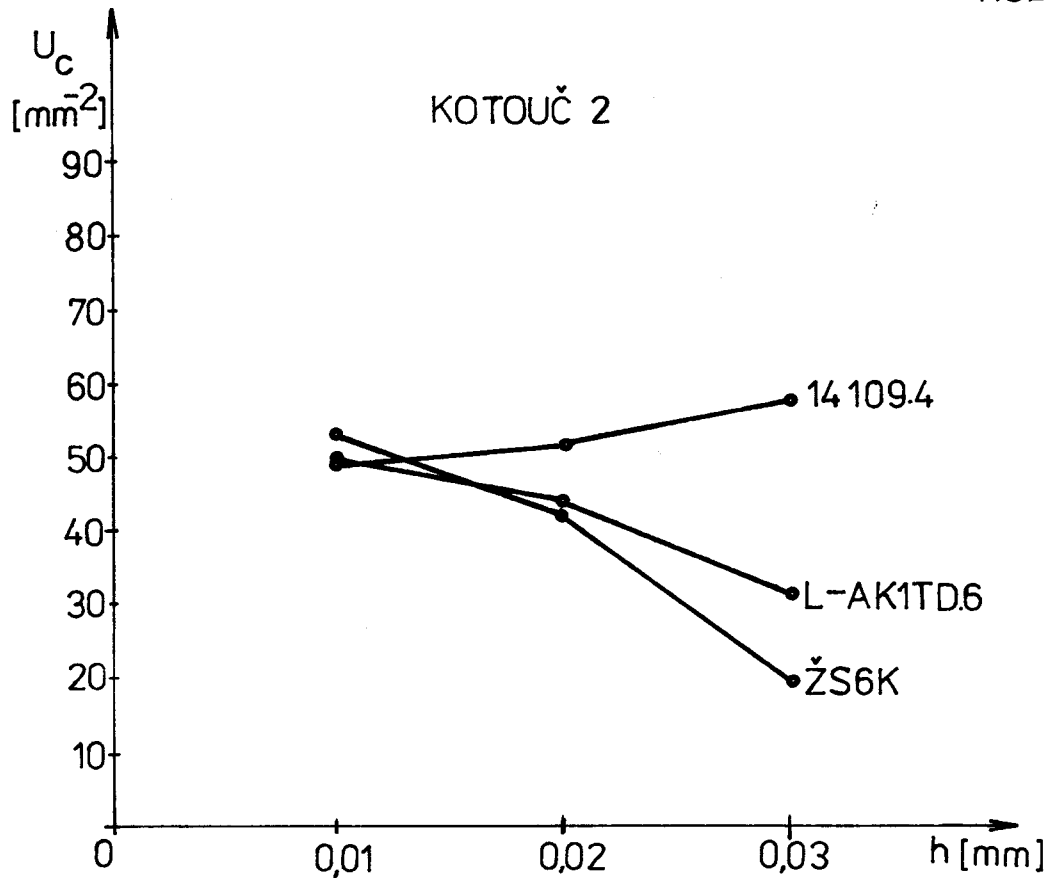
ST - tvrdost zjiřtřená metodou Zeiss-Mackensen  
 ZM - tvrdost zjiřtřená metodou zvukovou

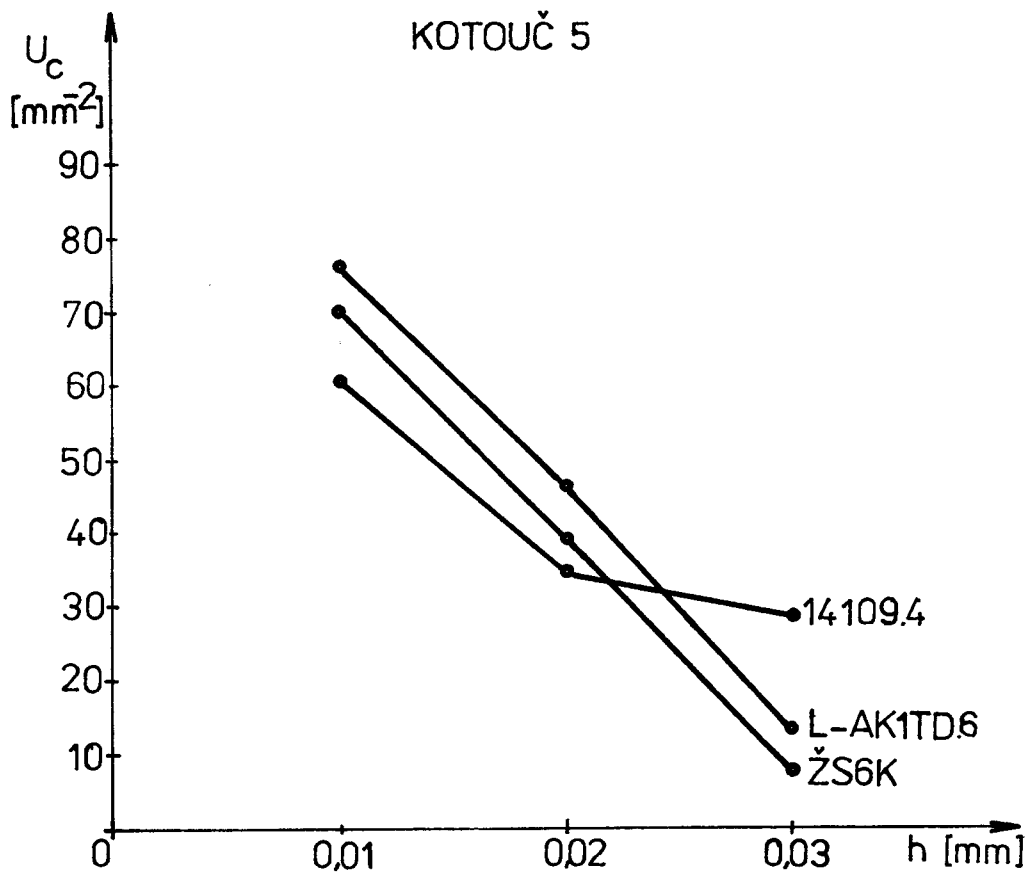
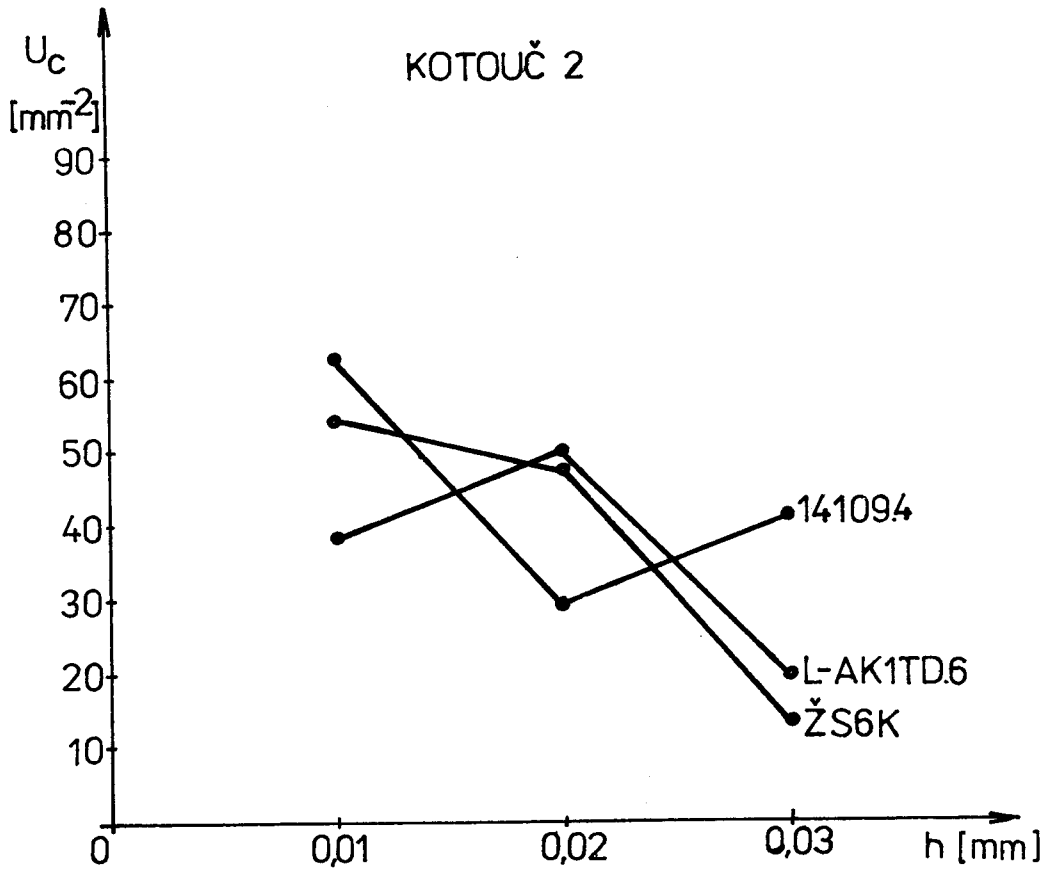


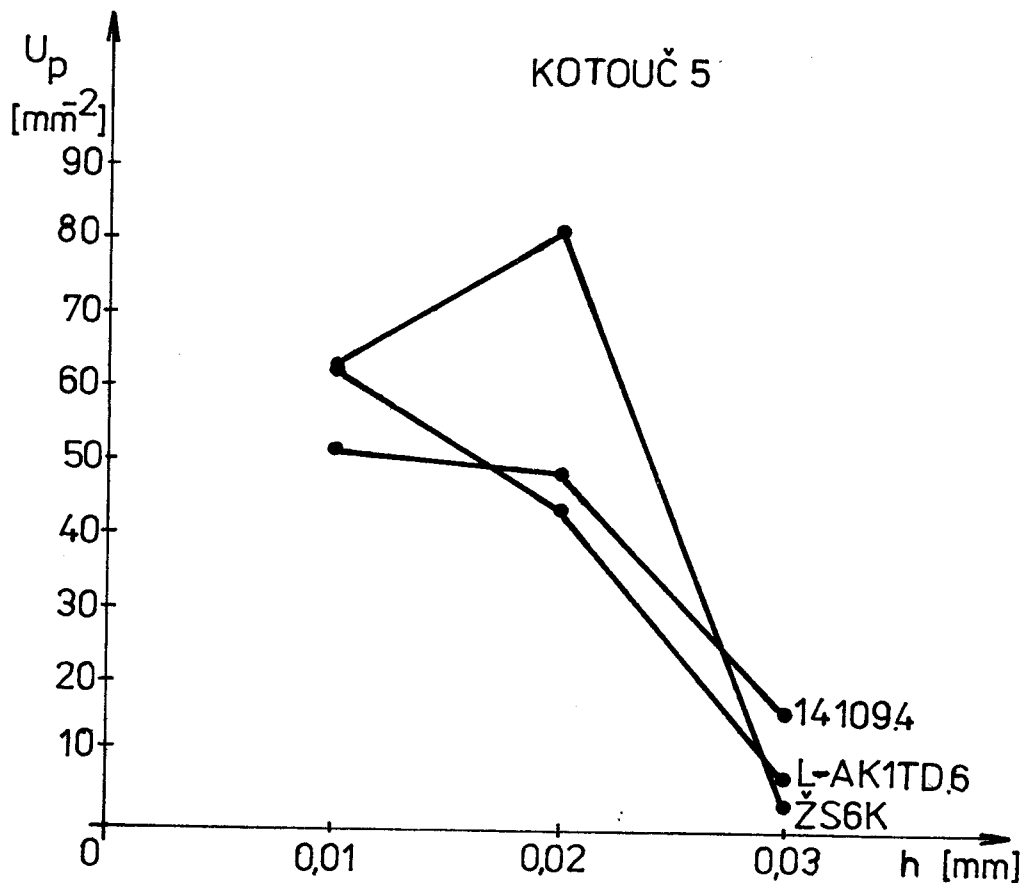
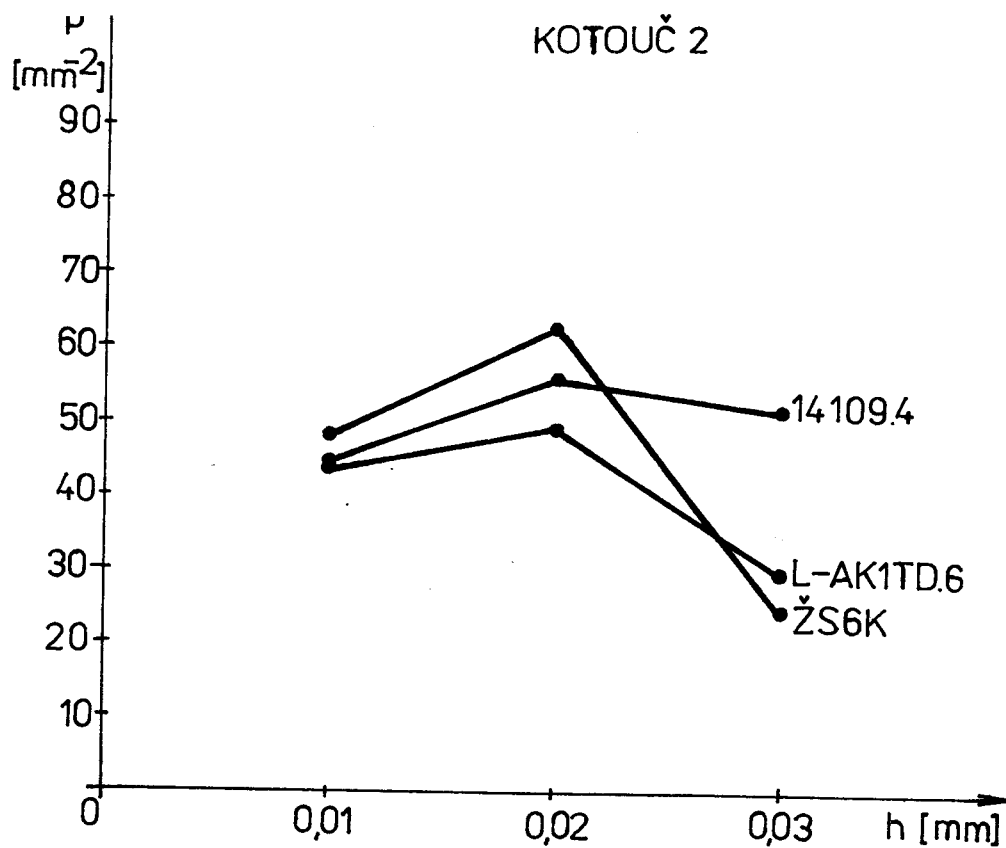
Grafy skutečné závislosti kriteria  $U_c$  na hloubce  $h$



Grafy skutečné závislosti kritéria  $U_c$  na hloubce  $h$

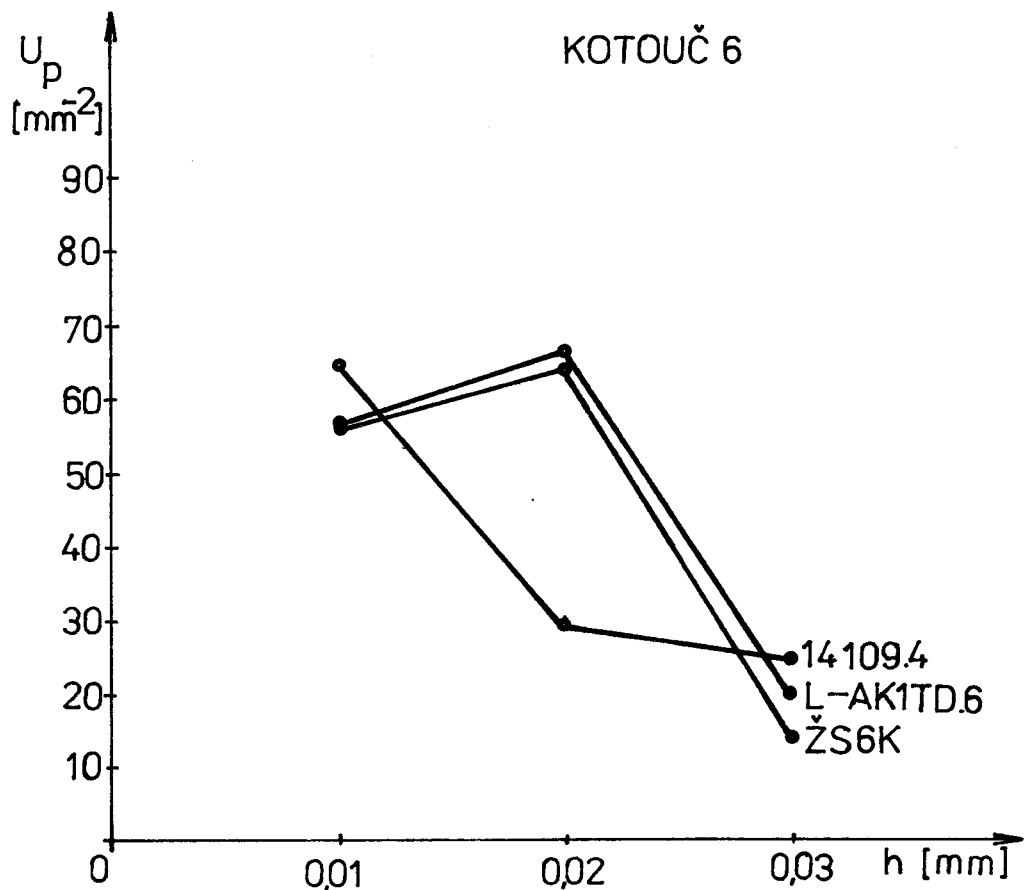
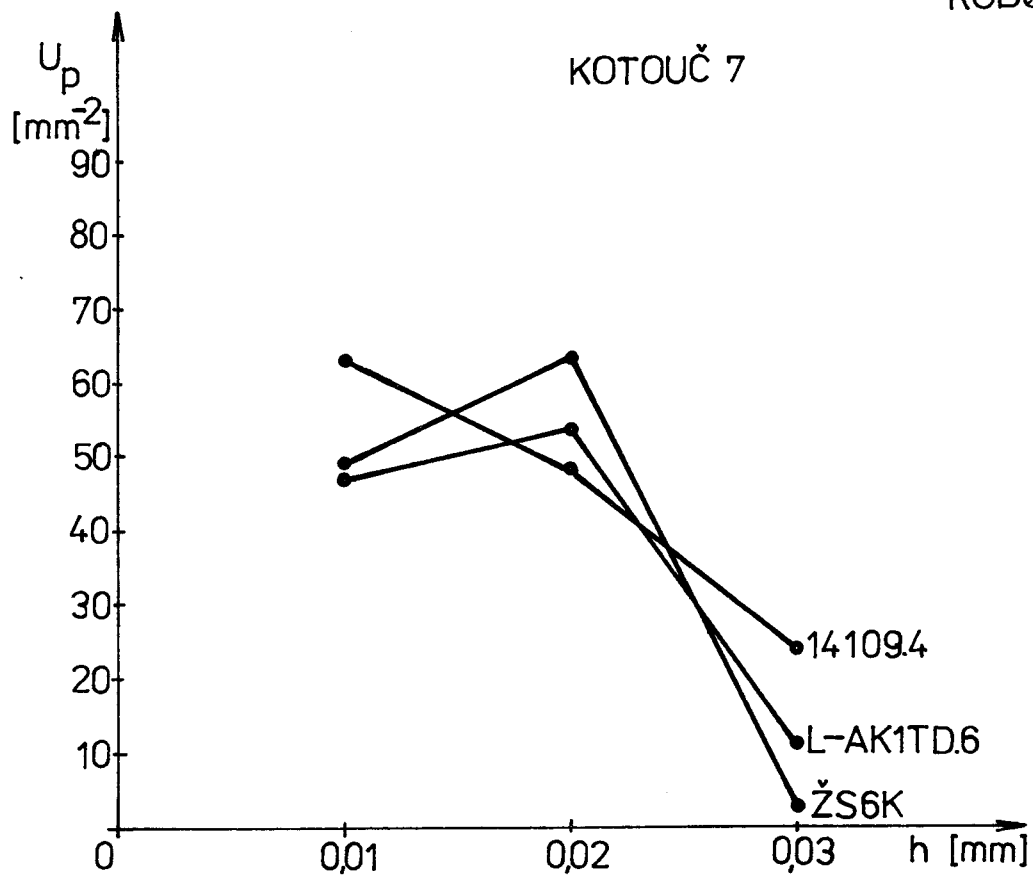
Grafy skutečné závislosti kritéria  $U_c$  na hloubce  $h$

Grafy skutečné závislosti kritéria  $U_c$  na hloubce  $h$

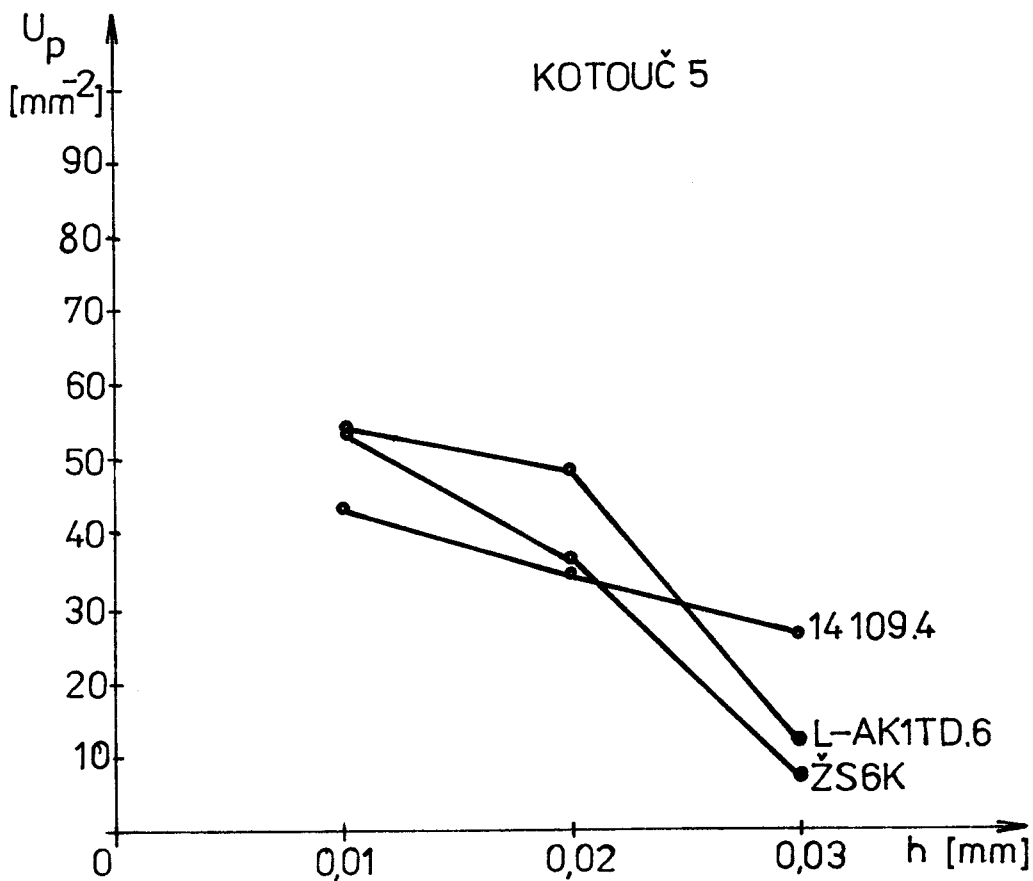
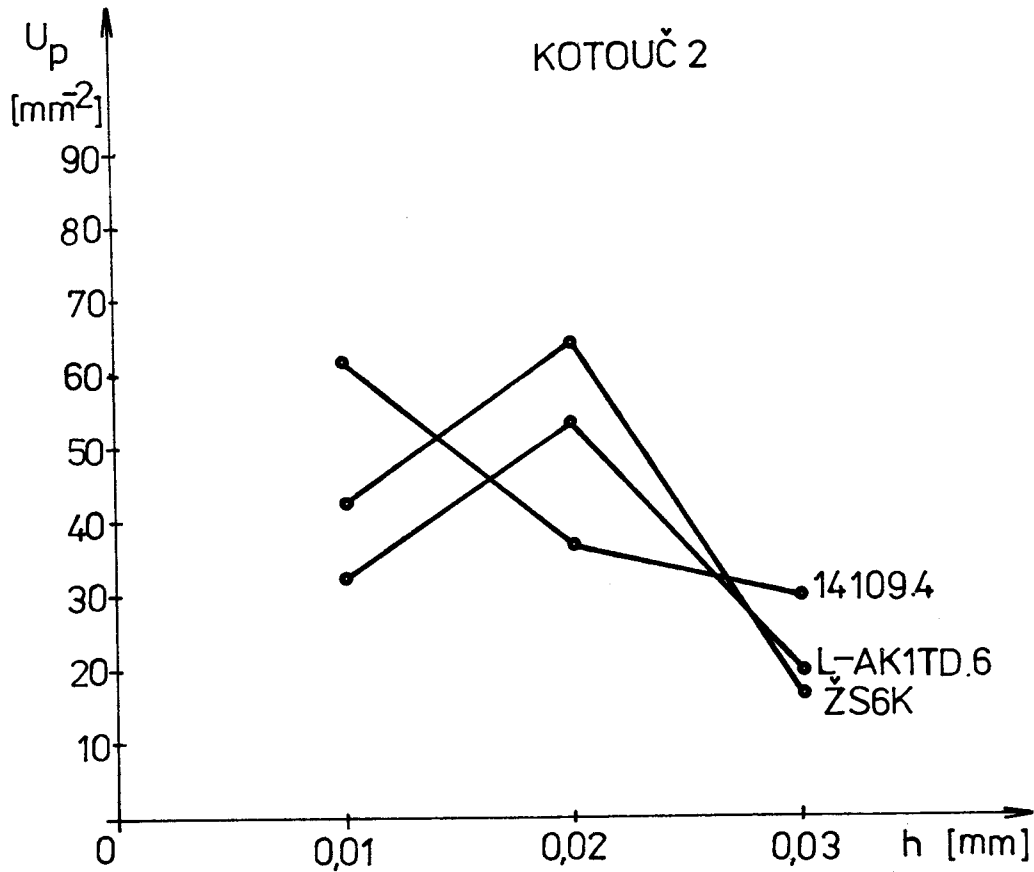


Grafy skutečné závislosti kritéria  $U_p$  na hloubce h

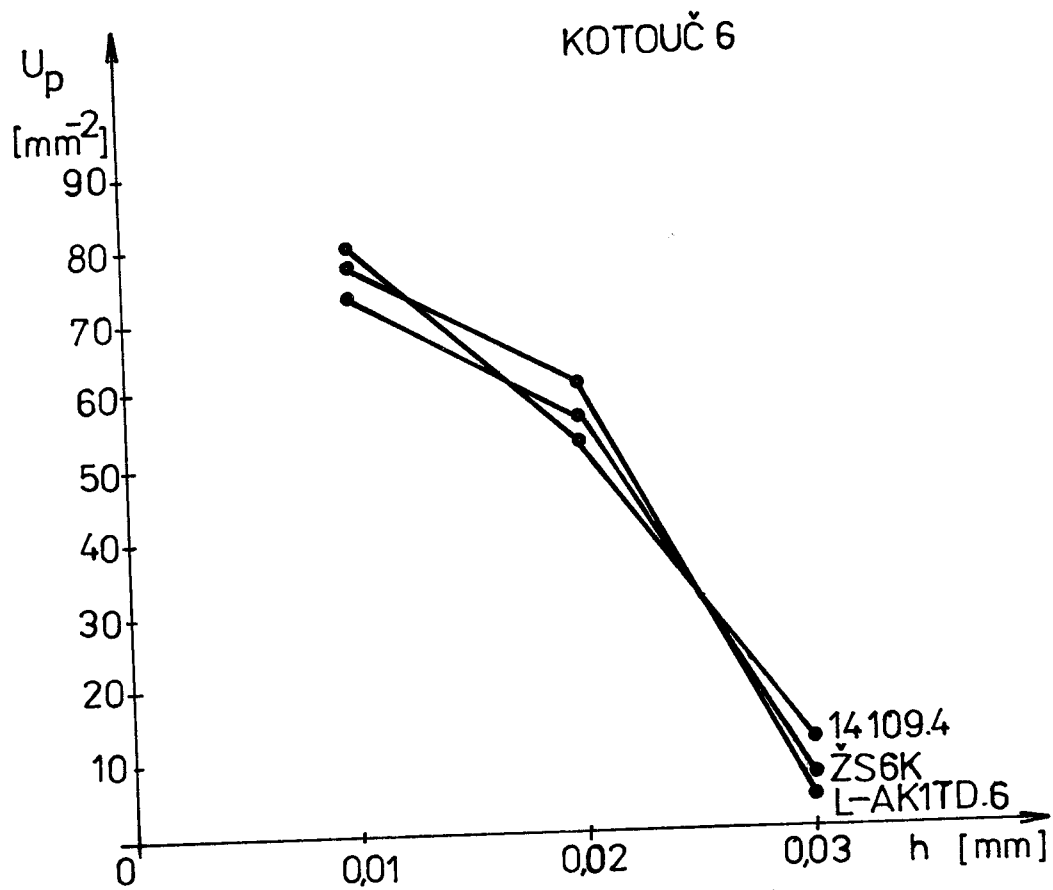
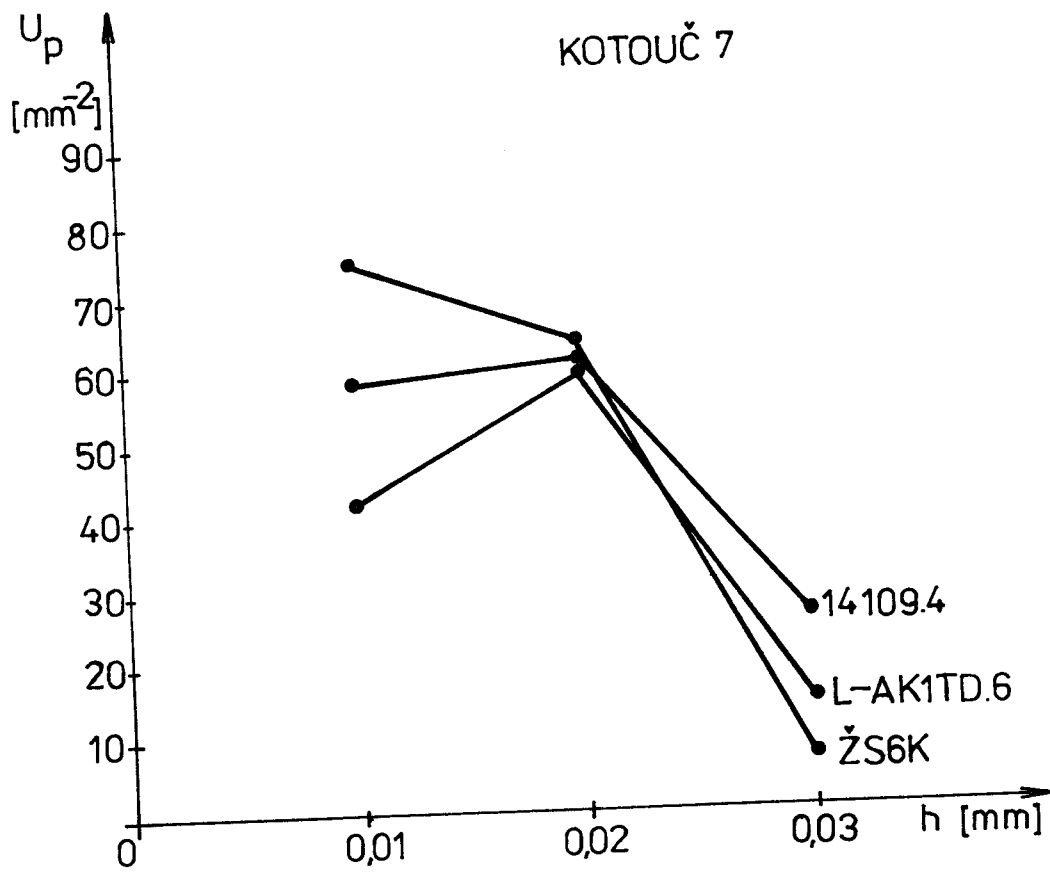




Grafy skutečné závislosti kritéria  $U_p$  na hloubce  $h$



Grafy skutečné závislosti kriteria  $U_p$  na hloubce  $h$



Grafy skutečné závislosti kritéria  $U_p$  na hloubce  $h$