

VYSOKÁ ŠKOLA STROJNÍ A TEXTILNÍ V LIBERCI  
nositelka Řádu práce

Fakulta strojní

Katedra obrábění a montáže

Ober : 23 - 07 - 8 strojírenská technologie

zaměření obrábění a montáž

BEROUŠENÍ TITANOVÝCH SLITIN

KOM - OM - 424

Anna VEVERKOVÁ

Vedoucí práce : Ing. Jaroslav JANOUŠEK  
VÝST LIBEREC

Konzultant : Ing. Přemysl KUBIŠTA  
VÚOSO PRAHA

Počet stran : 72  
Počet příloh : 7  
Počet tabulek : 9  
Počet obrázků : 27

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 Annu Veverkovou .....

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: Broušení slitin titanu .....

### Zásady pro vypracování:

1. Rozbor dosavadních poznatků v obrobitelnosti titanových slitin
2. Volba brousících kotoučů a řezných kapalin z pohledu chemie broušení
3. Měření parametrů potřebných pro sestavení diagramů broušení
4. Návrh a praktické odzkoušení systémů přívodu řezné kapaliny. Pracovní tlaky do 1 MPa.
5. Vyhodnocení zkoušek obrobitelnosti broušením a doporučení dalšího postupu

V 290/86 S

VYSOKÁ ŠKOLA STROJNÍ A TEXTILNÍ  
Ústřední knihovna  
LIBEREC 1, STUDENTSKÁ 5  
POČ 461 17

KOM/OM

Rozsah grafických prací: dle potřeby

Rozsah průvodní zprávy: 50 strany

Seznam odborné literatury:

Režimy rezanija trudnoobrabatyvajemych materialov. Spravočnik. Mašinostrojenie. Moskva 1976

Míkovec, M.: Ůbrábění těžkoobrobitelných materiálů, SNTL Praha 1970

Hönscheid, W.: Abgrenzung werkstoffgevechter Schleifbedingugnen für die Titanlegierung Ti Al 6 V 4. /Disert. práce/ TH Aachen 1975

Chudolin, L.V.: Technika psimenenija smazočno-ochlaždajščich sredstv v metalloobrabotke. Mašinostrojenije. Moskva 1977

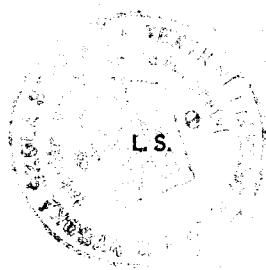
Moser, M.: Microstructures of ceramics. Akadémiai Kiado. Budapest 1980

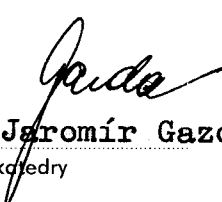
Vedoucí diplomové práce: Ing. Jaroslav Janoušek

Konzultant: Ing. Kubišta Přemysl. VÚOSO Praha

Datum zadání diplomové práce: 30. 9. 1985

Termín odevzdání diplomové práce: 23. 5. 1986



  
Doc. Ing. Jaromír Gazda, CSc.

Vedoucí katedry

  
Doc. Ing. Ján Alaxin, CSc.

Děkan

v Liberci ..... dne 20. 9. .... 19 85

Místopřísežné prohlášení

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

Liberec dne 23. května 1986

*Vuškova Anna*

Úvodem bych chtěla poděkovat Ing. JANOUŠKOVI za odborné vedení při zpracování zadaného úkolu, s. ČIHULOVÍ za praktickou pomoc při měření.

## O B S A H

|                          |  |
|--------------------------|--|
| Úvodní list              |  |
| Zadání diplomové práce   |  |
| Místopřísežné prohlášení |  |
| Poděkování               |  |
| Seznam příloh            |  |
| Seznam použitých symbolů |  |
| Seznam zkratk            |  |

|                                                                                        | Str. |
|----------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 1. Úvod                                                                                | 12   |
| 2. Dosavadní poznatky v obrobitelnosti titanových slitin                               | 13   |
| 2.1. Obrobitelnost obecně                                                              | 13   |
| 2.2. Obrobitelnost těžkoobrobitelných materiálů při broušení                           | 14   |
| 2.3. Poznatky o obrobitelnosti titanových slitin                                       | 16   |
| 2.3.1. Obrobitelnost titanu z hlediska elektronové struktury                           | 24   |
| 3. Technologické podmínky při broušení                                                 | 27   |
| 3.1. Charakteristika brousicích kotoučů                                                | 27   |
| 3.2. Výběr řezných kapalin pro broušení titanu a jejich stručné charakteristiky        | 29   |
| 3.2.1. Vliv chemických reakcí v procesu broušení                                       | 34   |
| 3.2.2. Shrnutí vlastností ŘK z ohledem na chemii broušení                              | 35   |
| 4. Teoreticky a obecně o broušení a měření parametrů pro sestavování diagramů broušení | 36   |
| 4.1. Podstata broušení                                                                 | 36   |
| 4.1.1. Tvoření třísky při broušení                                                     | 37   |
| 4.1.2. Kinematika záběru brousicího kotouče                                            | 39   |

|                              |    |
|------------------------------|----|
| 4.2. Teorie sil při broušení | 46 |
| 4.3. Vlastní měření          | 49 |
| 4.3.1. Popis zařízení        | 49 |
| 4.3.2. Postup měření         | 57 |
| 5. Návrh tlakového chlazení  | 59 |
| 6. Vyhodnocení výsledků      | 61 |
| 7. Závěr                     | 69 |
| Seznam použité literatury    | 71 |
| Přílohy                      |    |

### Seznam příloh

- Příloha č. 1 : Diagramy broušení č. 1 - 11
- Příloha č. 2 : Program na výpočty pomocných kritérií
- Příloha č. 3 : Formulář pro zápis jednotlivých měření
- Příloha č. 4 : Registrační zařízení ULTRA VIOLET  
RECORDER 205  
Záznam z registračního zařízení
- Příloha č. 5 : Universální mikroskop
- Příloha č. 6 : Drsnoměr HOMMEL TESTER T3
- Příloha č. 7 : Záznam sejmutého povrchu z drsnoměru  
HOMMEL TESTER T3

# Seznam použitých symbolů

|                  |                          |                                                                          |
|------------------|--------------------------|--------------------------------------------------------------------------|
| $a$              | / mm /                   | hloubka řezu                                                             |
| $h_{\text{ekv}}$ | / m /                    | ekvivalentní tloušťka třísky                                             |
| $l_z$            | / mm /                   | střední vzdálenost brousicích zrn v rovině rotace                        |
| $\gamma$         |                          | součinitel účinnosti broušení                                            |
| $S$              | / mm <sup>2</sup> /      | plocha pod vyjisk. křivkou normálové síly                                |
| $\alpha_u$       | / ° /                    | úhel tečny k vyjiskřovací křivce normálové síly v počátku vyjiskřování   |
| $O_B$            |                          | obrobitelnost broušením                                                  |
| $U$              |                          | kritérium strmosti práce                                                 |
| $L$              |                          | kritérium strmosti úběru                                                 |
| $q$              |                          | rychlostní poměr                                                         |
| $v_k$            | / m.s <sup>-1</sup> /    | obvodová rychlost brousicího kotouče                                     |
| $v_o$            | / m.min <sup>-1</sup> /  | obvodová rychlost obrobku                                                |
| $d_k$            | / mm /                   | průměr brousicího kotouče                                                |
| $d_o$            | / mm /                   | průměr obrobku                                                           |
| $d_e$            | / mm /                   | ekvivalentní průměr                                                      |
| $b$              | / mm /                   | šířka kotouče                                                            |
| $v_p$            | / mm.min <sup>-1</sup> / | rychlost přísluvu                                                        |
| $n_o$            | / min <sup>-1</sup> /    | otáčky obrobku                                                           |
| $F'_t$           | / N.mm <sup>-1</sup> /   | tangenciální složka řezné síly vztažená na 1mm šířky záběru              |
| $F'_n$           | / N.mm <sup>-1</sup> /   | normálová složka řezné síly vztažená na 1 mm šířky záběru                |
| $f_t, f_n$       |                          | exponenty, vyjadřující vztah mezi složkami řezné síly a $h_{\text{ekv}}$ |

|                   |                                                            |                                                                                              |
|-------------------|------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|
| $\mu$             |                                                            | součinitel tření                                                                             |
| $R_a$             | / $\mu\text{m}$ /                                          | drsnost povrchu bez vyjiskření                                                               |
| $R_a^v$           | / $\mu\text{m}$ /                                          | drsnost povrchu s vyjiskřením                                                                |
| $r, r_v$          |                                                            | exponenty, vyjadřující vztah mezi drsností povrchu $R_a$ , $R_a^v$ a $h_{ekv}$               |
| $m$               |                                                            | poměrný objemový obrus                                                                       |
| $g$               |                                                            | exponent, vyjadřující vztah mezi poměrným objem. obrusem a $h_{ekv}$                         |
| $e$               | / $\text{J} \cdot \text{mm}^{-3}$ /                        | měrná energie broušení vztažená na $1 \text{ mm}^3$ odebraného materiálu                     |
| $e'$              | / $\text{J} \cdot \text{mm}^{-3} \cdot \text{mm}^{-1}$ /   | vztažená na $1 \text{ mm}$ šířky kotouče                                                     |
| $V'$              | / $\text{mm}^3 \cdot \text{mm}^{-1}$ /                     | množství odbroušeného materiálu vztažené na $1 \text{ mm}$ šířky záběru / specifický objem / |
| $Z$               | / $\text{mm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ /                      | výkon broušení                                                                               |
| $Z'$              | / $\text{mm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{mm}^{-1}$ / | měrný výkon broušení, vztažený na $1 \text{ mm}$ šířky záběru                                |
| $v_f$             | / $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ /                         | rychlost přivádění rezné kapaliny do místa řezu                                              |
| $p_f$             | / $\text{MPa}$ /                                           | tlak v systému rezné kapaliny                                                                |
| $Q_f$             | / $\text{l} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ /  | měrné množství rezné kapaliny na $1 \text{ mm}$ šířky záběru                                 |
| $P_{\max}$        | / $\text{kW}$ /                                            | maximální výkon                                                                              |
| $P_{\text{NAPR}}$ | / $\text{kW}$ /                                            | výkon na prázdno                                                                             |
| $\Delta r_s$      | / $\text{mm}$ /                                            | opotřebení brousicího kotouče                                                                |
| $t$               | / $\text{sec}, \text{min}$ /                               | čas                                                                                          |
| $y$               | / $\text{mm}$ /                                            | odtlačení tg. soustavy                                                                       |

# Seznam zkratk

|        |                |
|--------|----------------|
| ŘK     | řezná kapalina |
| tj.    | toje           |
| tzn.   | to znamená     |
| např.  | například      |
| ot.    | otáčky         |
| zp.    | způsob         |
| tl.    | tloušťka       |
| min.   | minimální      |
| max.   | maximální      |
| konst. | konstantní     |
| resp.  | respektive     |
| apod.  | a podobně      |
| n.p.   | národní podnik |
| atd.   | a tak dále     |
| tg.    | technologická  |
| geom.  | geometrická    |
| Mg     | mangan         |
| Ti     | titan          |
| Al     | hliník         |
| N      | dusík          |
| H      | vodík          |
| C      | uhlík          |
| Mo     | molybden       |

|                |                        |
|----------------|------------------------|
| O <sub>2</sub> | kyslík                 |
| Fe             | železo                 |
| Cl             | chlór                  |
| Si             | křemík                 |
| V              | vanad                  |
| KNB            | kubický nitrid bóru    |
| SiC            | karbit křemíku         |
| BN             | nitrid bóru            |
| DB č.          | diagram broušení číslo |

## 1. ÚVOD

Na XVII.sjezdu KSČ byl projednán i mimo jiné rozvoj strojírenské výroby jako nositel vědeckotechnického rozvoje ve všech odvětvích národního hospodářství, zaměřit se na vytvoření nezbytných podmínek pro podstatné zvýšení technické úrovně výroby na základě realizace nejnovějších výsledků vědeckotechnického rozvoje, urychlené zavádění nových výrobních technologií a výrobků na snížení nákladné výroby.

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

Je zřejmé, že nezastupitelnou úlohu v tomto procesu má vědeckovýzkumná základna, jejíž složkou jsou i vysoké školy, které disponují množstvím výzkumných pracovníků a zařízení.

Sepětí praxe s vědou se v široké míře uplatňuje i na VŠST Liberec, což se projevuje v řešení úkolů velkého společenského významu.

Z tohoto důvodu vznikla spolupráce mezi VŠST Liberec a n.p. Motorlet Praha, kde se řeší obrábění materiálů používaných v leteckém průmyslu.

Řešení se ujala katedra obrábění a montáže, se řeší problematika těžkoobrobitelných materiálů mezi něž patří i titanové slitiny, dále sem patří chromniklové oceli, niklové a kobaltové slitiny, litiny s vyššími mechanickými vlastnostmi.

Těžkoobrobitelné materiály, už jak udává sám název se těžko obrábějí, jsou téměř neobrobitelné běžnými nástroji, vyžadují zvláštní technologické postupy a podmínky obrábění v případě procesu broušení berou v úvahu složení pojiva, jeho úpravu, volbu druhu brusných zrn, a ŘK.

A právě o části obrábění titanových slitin - broušením pojednává tato diplomová práce.

## 2. DOSAVIDNÍ POZNATKY V OBROBITELNOSTI TITANOVÝCH SLITIN

### 2.1. Obecně o obrobitelnosti

Obrobitelnost materiálu je třeba chápat jako souhrn vlastností obráběného materiálu z hlediska jeho vhodnosti pro výrobu součástek obráběním.

Obrobitelnost nelze vyjádřit jedním ukazatelem, pojem obrobitelnost zahrnuje různé technologické vlastnosti obráběného materiálu, kterými ovlivňuje intenzitu opotřebení nástroje, řezné podmínky apod. Projev těchto vlastností obráběného materiálu závisí na podmínkách obrábění, proto obrobitelnost není jenom funkcí samotného obráběného materiálu, ale také způsobu obrábění, použitého řezného materiálu apod. Obrobitelnost má tedy podmíněný charakter. Úplné zjištění obrobitelnosti vyžaduje určit závislosti, potřebné pro výpočet řezných sil, trvanlivosti nástrojů a drsnosti povrchu. / 2 /

Obrobitelnost lze definovat, řadou definic, zde jsou napsány pouze tři :

- 1/ Schopnost materiálu být obráběn - prof. KRÍSTEK, F.
- 2/ Obrobitelnost je měřítkem obtížnosti, které klade obráběný materiál třískovému obrábění. / 19 /
- 3/ Obrobitelnost zahrnuje všechny vlastnosti obrobku, které určují jak snadno a s jakým výsledkem se určitý materiál obrábí tj. jak intenzivně se při obrábění otupuje břit nástroje, jaká práce / jaké síly / jsou spojeny s oddělováním třísky, jakého stupně drsnosti se dosáhne a jak snadno a v jaké formě odcházejí třísky, a to vše s přihlédnutím k ekonomickým ukazatelům procesu obrábění.

## 2.2. Obrobitelnost těžkoobrobitelných materiálů

Volba hospodárných řezných podmínek při obrábění je omezena řadou činitelů:

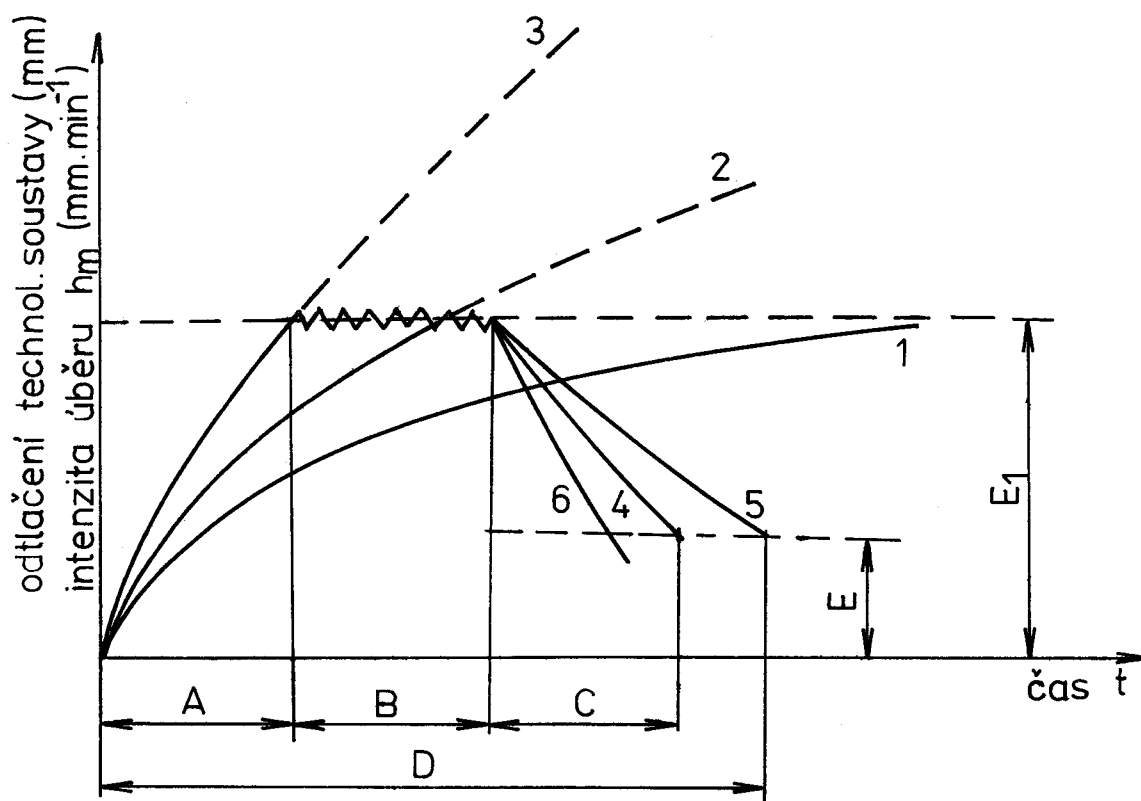
- a/ konstrukcí a výkonem obráběcího stroje
- b/ vlastnostmi nástroje / řezivost nástrojového materiálu, tvar nástroje, geometrie břitu /
- c/ vlastnostmi obrobku / tvar, tuhost upnutí, polotovar obrobku /

Výzkum obrobitelnosti daných materiálů vede především k určení podmínek jejich výkonného obrábění - výběr optimální charakteristiky brousicího nástroje, řezných podmínek, řezné kapaliny atd. Obrobitelnost při broušení závisí na řadě parametrů, z nichž základní jsou:

- správný výběr brousicího nástroje pro dané podmínky obrábění
- technologické podmínky včetně řezné kapaliny
- chemické složení obráběných materiálů a jejich mikrostruktura
- fyzikální / mech./ vlastnosti materiálů.

Pro hodnocení obrobitelnosti se obvykle používá jeden nebo několik ukazatelů, které mají největší význam pro dané podmínky obrábění, např. brusný poměr a řezný výkon při hrubovacím broušení nebo drsnost povrchu při broušení na čisto. Obrobitelnost materiálu určuje výkonnost broušení. Ta je úzce spjata s problematikou cyklu broušení, který má tři etapy / 8 / :

1. vřezávání
2. ustálený režim broušení
3. vyjiskřování



- 1.....zapichování konst. přísuvem
- 2,3...zapichování zrychleným přísuvem
- 4.....dokončovací broušení bez přísuvu / vyjiskřování /
- 5.....zpomalené vyjiskřování
- 6.....zrychlené vyjiskřování
- A.....doba vřezávání se zvýšeným přísuvem
- B.....doba ustáleného procesu
- C.....doba závěrečného broušení bez přísuvu /vyjiskřování/
- D.....doba broušení s konstantním přísuvem
- $E_1$ .....odtláčení technologické soustavy při konst. přísuvu
- E.....odtláčení technologické soustavy na konci vyjiskřování

Obr. 1. Cyklus broušení

V první etapě se zvyšuje intenzita odebrání materiálu a vytváří se předpětí technologické soustavy stroj - nástroj - obrobek - přípravek. V druhé etapě je řezný proces ustálený a intenzita odebrání materiálu do velké míry určuje výchozí předpětí, v závěrečné etapě se brousí zmenšeným nebo nulovým přísuvem a snižuje se intenzita odebrání materiálu. Intenzita odebrání materiálu závisí na tuhosti technologické soustavy.

### 2.3. Poznatky o obrobitelnosti titanových slitin

#### Základní údaje o titanu

Tento kov patří mezi kovy budoucnosti. Z historie je známo, že první tvárný titan, který se objevil v roce 1925, byl vyroben laboratorně. Teprve v roce 1938 průmyslově zpracován.

Titan se vyrábí z minerálu rutilu /  $\text{TiO}_2$  /, nebo častěji se vyskytujícího illmenitu /  $\text{FeTiO}_3$  /, který obsahuje 32 % titanu. V zemské kůře je obsaženo 0,6 % Ti. Chlórováním rud se vyrábí  $\text{TiCl}_4$ , který je výchozí surovinou pro výrobu kovového titanu.  $\text{TiCl}_4$  se redukuje hořčíkem v atmosféře argonu, pak se v elektrické obloukové peci přetavuje ve vakuu nebo v argonu na ingoty. Dále se titan vyrábí elektrolýzou z  $\text{TiCl}_4$  nebo  $\text{TiO}_2$ .

Titan má vysoký bod tání - špatně se odlévá. Titan jako přísada do ocelí v používaném množství / do 0,7 % u austenitických a precipitačně vytvrditelných ocelí / prakticky obrobitelnost neovlivňuje, v některých případech pomáhá k utváření třísky. Do austenitických ocelí se přidává jako stabilizační prvek, má větší afinitu k uhlíku a tvoří karbidy dříve než chrom. Tvrdé částice karbidů titanu jsou v oceli přítomny jako vměstky, které se při

obrábění vytrhávají a tvoří na povrchu matné skvrny. Tyto oceli jsou neleštitelné.

Technické údaje titanu :

|                       |                         |
|-----------------------|-------------------------|
| velká pevnost         | 500 MPa                 |
| po tváření za studena | 800-900 MPa             |
| tvrdost               | 200 HB                  |
| tažnost               | 25 % / v měkkém stavu / |
| měrná hmotnost        | 4540 kg/m <sup>3</sup>  |
| bod tání              | 1765 °C                 |

Velkou nevýhodou titanu je, že se slučuje s uhlíkem a dusíkem / za vyšších teplot / z toho plynou potíže při odlévání.

Mechanické vlastnosti titanu se do 800 °C liší nepatrně nad 800 °C velmi rychle pevnost klesá. Dobrou vlastností je odolnost proti korozi.

Technicky čistý titan je při vhodném druhu řezného materiálu a vhodné geometrii, popřípadě při intenzivním chlazení dobře obrobitelný. Přísadové prvky však obrobitelnost velmi zhoršují slitiny s obsahem 0,2 % C jsou prakticky neobrobitelné.

Při broušení kovového titanu brusnými nástroji z korundu nebo karbidu křemíku, zjistíme, že na povrchu brusných zrn se vytváří povlak titenu, který řezivost brusných zrn zhoršuje. Hlavní nedostatky související s těžkostmi vznikajícími při obrábění titanu jsou tyto

- velká rozpustnost titanu ve většině kovů
- jeho špatná tepelná vodivost a dále velká brousicí rychlost, jako důsledek vyplývajícího velkého střižného úhlu vystupujícího při tvorbě třísky.

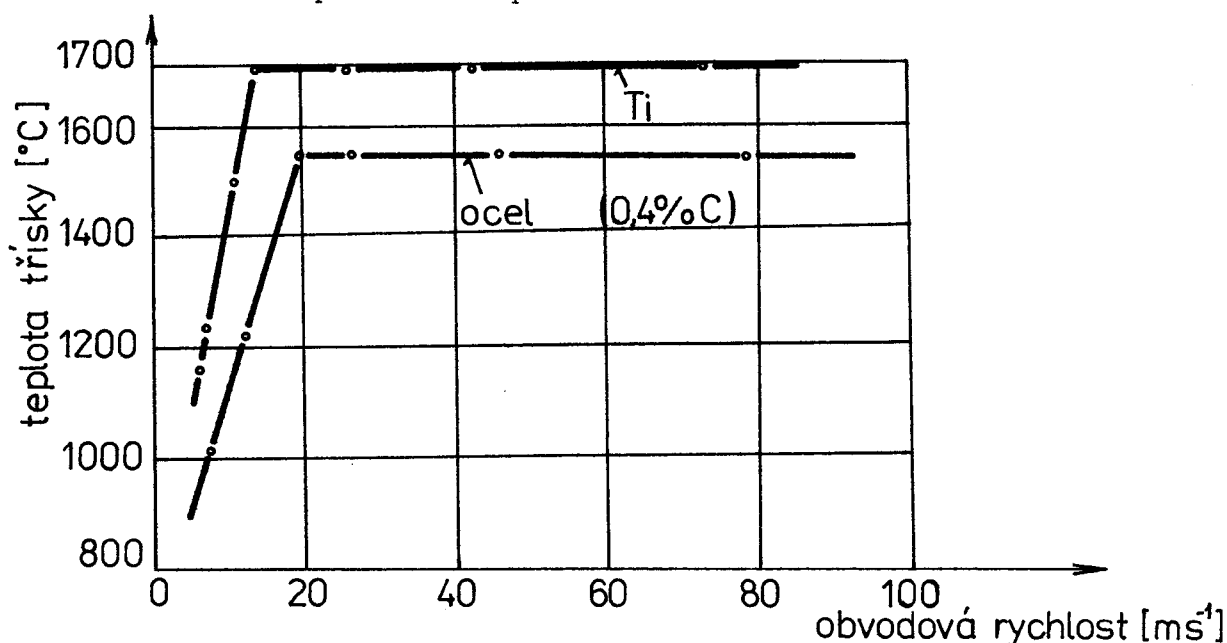
Titanové slitiny patří mezi těžkoobrobitelné materiály, ty lze charakterizovat vyšší pevností, než mají oceli uhlíkové.

Z toho vyplývá, že rostou řezné síly a při procesu broušení vznikají vysoké teploty v zóně záběru zrna brusiva.

Jako základní prvek titanových slitin je titan, ten tvoří slitiny s manganem, chromem, hliníkem, molybdenem / u nichž je pevnost 1200 - 1500 MPa. Vyznačují se silnou afinitou k některým řezným materiálům např. ke slinutým karbidům řady P a k řezné keramice, tvoří nárůstky na břitu nástroje, vzhledem ke své nízké tepelné vodivosti odvádí špatně teplo vznikající při obrábění, a proto způsobuje velké tepelné namáhání břitu nástroje.

Teplota při které se tvoří tříska je přibližně 1697 °C oproti 1547 °C pro ocel.

Na Obr.2 je znázorněn průběh teploty v závislosti na obvodové rychlosti kotouče. Teplota stoupá přibližně do 15 m/sec. a zůstává konstantní i při vyšších rychlostech. Relativně nízká tepelná vodivost titanu zabraňuje tomu, že dochází k rychlému sdílení tepla do obrobku, takže v zóně dochází k poškození povrchu.



Obr.2. Teplota třísky při broušení v závislosti na obvodové rychlosti kotouče.

Vedle poškození, které jsou známy již u klasických ocelových materiálů, jako např. stopy po pálení, vlastní pnutí, trhliny a změny struktury, přichází u titanu v úvahu ještě možnost vzniku silných chemických reakcí s komponenty brousicího kotouče. Z toho plyne nutnost použití vhodné chladicí kapaliny, neboť při teplotě vyšší jak  $327^{\circ}\text{C}$  dochází k reakci titanu s vodou, kyselými látkami a uhlíkem /40/. S reakcí těchto elementů je spojeno zkřehnutí základního materiálu a změna jeho pevnosti. Současně s tím vystupují do popředí reakce s brousicím kotoučem nebo chladicím médiem, což způsobí zvýšení opotřebení kotouče a ovlivnění přesnosti geometrie obrobku.

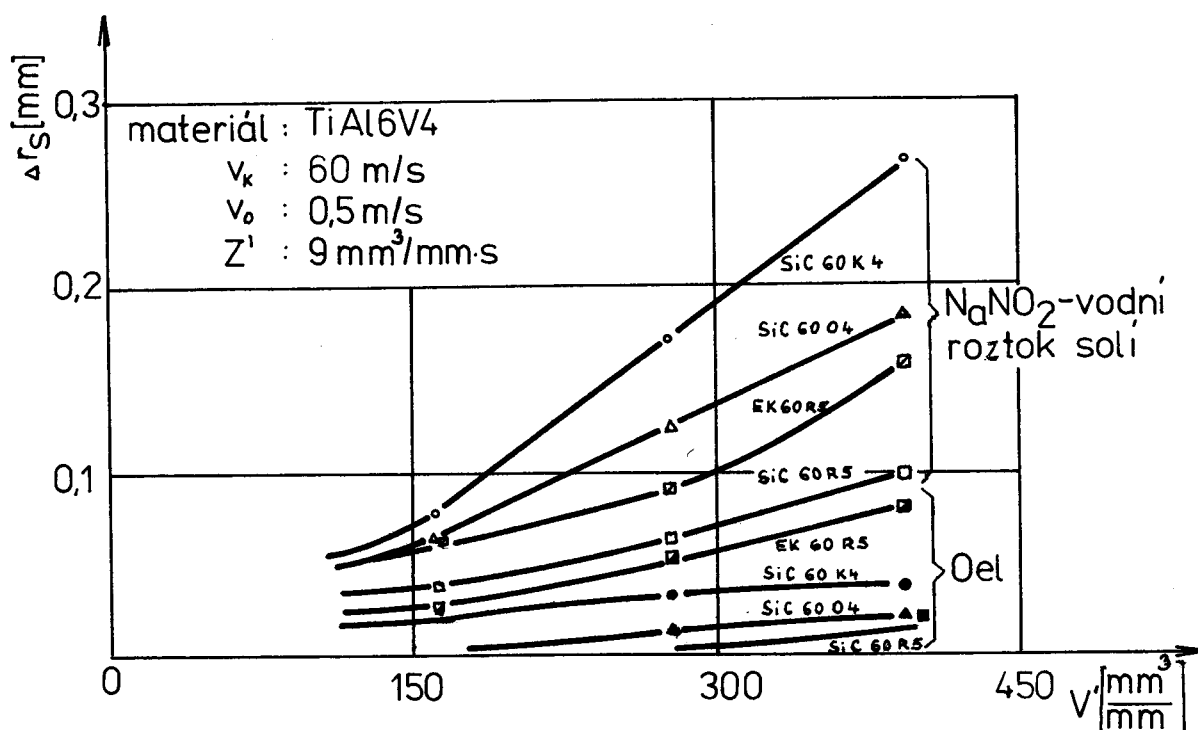
K omezení opotřebení brousicího kotouče a k zamezení výskytu fyzikálně-chemických poruch povrchu obráběné součásti lze použít dva základní přístupy. První spočívá ve volbě vhodných řezných podmínek, která omezuje vznik tepla. Druhý spočívá v možnosti použití vhodné chladicí látky a přívodního systému, což má za úkol odvést co nejrychleji vzniklé teplo ze zóny řezání, popřípadě od povrchu obrobku, dříve než dojde k nedovolenému tepelnému poškození řezné zóny. Při rychlostech kotouče od 2-30 m/s a specifických výkonech  $Z'$  menších než  $1 \text{ mm}^3/\text{mm s}$  je nutné získávat nízké teploty bez další návaznosti na ostatní parametry. Obr.2 nám ukazuje, že v spodní části při nižších obvodových rychlostech dochází k překročení teploty  $1700^{\circ}\text{C}$ .

Ukazuje se jednoznačná tendence používání keramicky vázaných korundových kotoučů ve spojení s chladicími kapalinami při rychlostech od 10-15 m/s, nebo kotoučů z SiC při použití sírochlórovaných brousicích olejů při rychlosti 35 m/s. Chladicí media, která obsahují halogenově tvořící aditiva jsou v současné době používány v leteckém, raketovém průmyslu a jsou to produkty, mající za základ minerální oleje, nebo úplně syntetické kapaliny popřípadě emulgační oleje rozpustné ve vodě. Přičemž,

podíl vodních roztoků na bázi anorganických solí, jako je dusitan draselný, dusitan sodný a dusitan barnatý je nápadně velký.

Přesná klasifikace účinnosti chladicích medií pro obrábění titanu není v současné době ještě přesně zpracována.

Největší zjištěné hodnoty opotřebení brousicího kotouče vznikají při nasazení vodních roztoků např.  $\text{NaNO}_2$ . Podstatného snížení radiálního opotřebení je docíleno nasazením vhodných rezných olejů. Malý účinek chladicích látek na bázi vodních roztoků je zobrazeno na Obr.3.

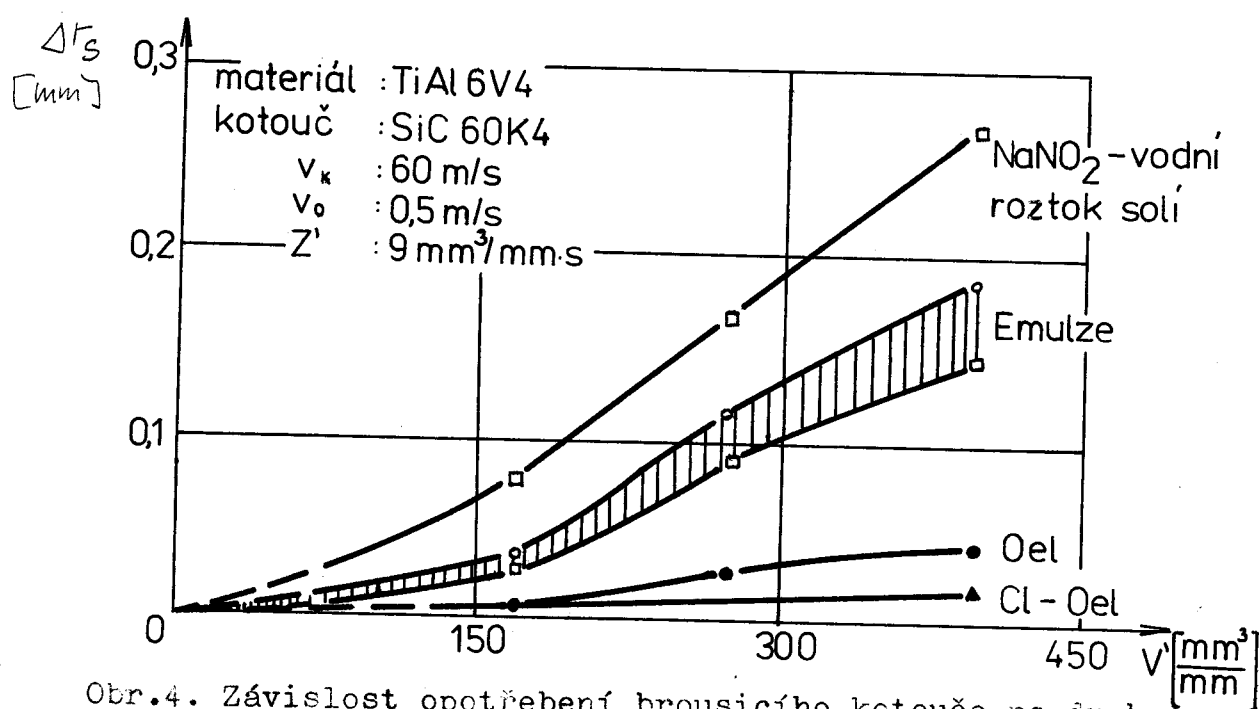


Obr.3 Radiální opotřebení brousicího kotouče v závislosti na specifickém objemu  $V'$  u rozdílných brousicích kotoučů a chladicí látky. / Kotouče jsou značeny německou normou DIN. /

Zvýšení tvrdosti brousicího kotouče vede jak při použití roztoku dusitanu sodného, tak i při nízce legovaných minerálních olejích k citelnému snížení opotřebení, i když na druhou stranu stoupá teplota v zóně řezání a hrozí poškození povrchu.

Současně je nutné podotknout, že použitím keramicky vázaných kotoučů tvrdosti R / tvrdý kotouč / vyžaduje velkou dynamickou tuhost stroje.

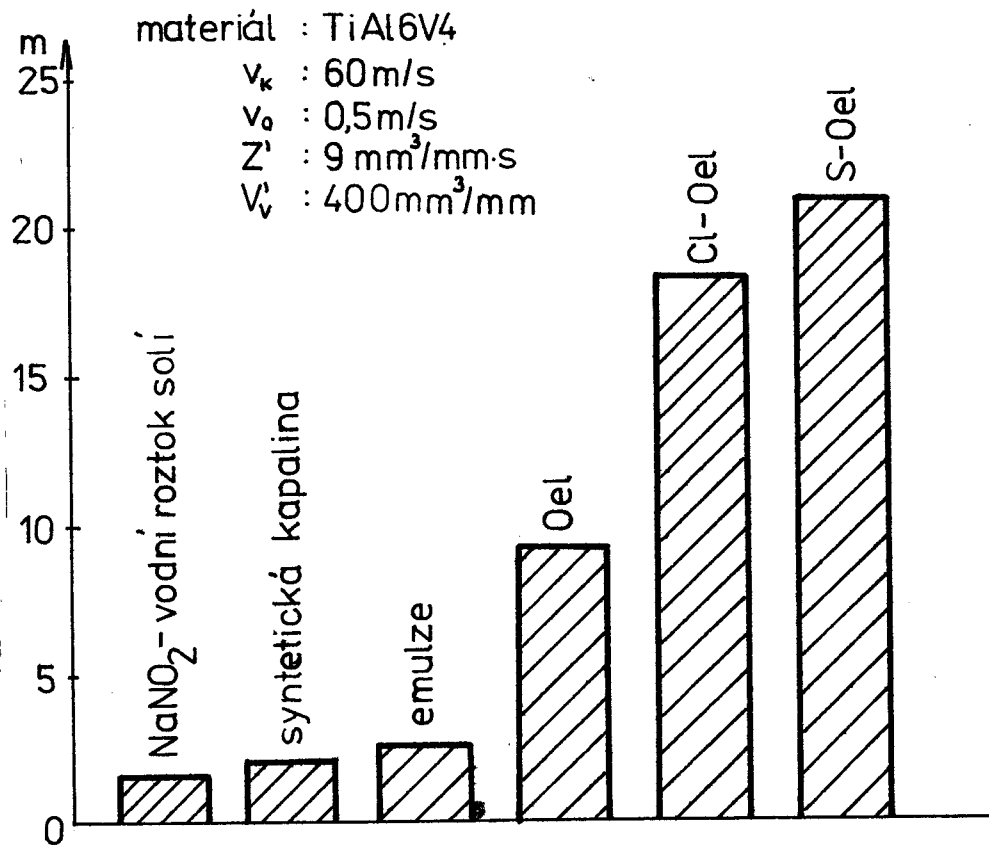
Účinek rozličných chladicích látek ve vztahu k opotřebení brousicího kotouče se nechá shrnout celkově do Obr.4.



Obr.4. Závislost opotřebení brousicího kotouče na druhu chladicí látky a specifickém objemu  $V'$ .

Při zvolených podmínkách broušení nebylo možné získat poměrné obrusy větší než  $G=5$ ; týká se emulze a vodních roztoků. Citelné zvýšení poměrného obrusu je možné při použití řezného oleje. Snížení opotřebení vystupuje do popředí při použití aditiv na bázi chlóru

a síry. Zajímavě se ukazuje skutečnost, že při použití síry o obsahu 9,6 % se docílí opotřebení jako nasazení chlóru, ale s obsahem 20 %. Příčinou je větší teplotní odolnost kovových mýdel na bázi síry, než je tomu tak u chlоровaných aditivů.



Obr.5. Poměrný obrus při nasazení rozličných chladicích látek.



Obr. 6. Závislost poměrného obrusu na různých kombinacích brousícího kotouče a chladicí kapaliny

### 2.3.1. Obrobitelnost titanu z hlediska elektronové struktury

Při zkoumání obrobitelnosti titanu a jeho slitin, byla prokázána, že má velký význam i elektronová struktura.

Převážná část valenčních elektronů není v krystalu kovového titanu, v důsledku kovové vazby, vázáno na jedno místo. Oproti tomu mají sloučeniny zrn obráběcího nástroje typ kovalentní vazby. Při intenzivním styku během broušení obklopí atomy brusných zrn ty elektrony titanu, které nejsou lokalizované. Makroskopicky se tento fakt projevuje " v nalepení se " kovového titanu na brusná zrna. Z tohoto plyne, že pro broušení titanu je výhodný takový obráběcí materiál, u kterého nenastává zachycení elektronů.

Z tohoto plyne, že se jeví nejideálnější čistý diamant, jehož velká tvrdost a jiné vlastnosti technicky vhodné jsou výslednicí krystalické vazby / stavby /. Pro třískové obrábění kovů o velké pevnosti a křehkosti je diamant velmi vhodný. V tomto případě se odstranění povrchových vrstev obráběného křehkého materiálu o velké tvrdosti uskutečňuje bez pozorovatelné deformace, a proto dobrou tepelnou vodivost diamantu nepřekračuje brousicí teplota 500 °C, z toho plyne nedochází k polymorfní přeměně diamantu. Při broušení plastických kovů / např. ocel a slitiny titanu / je odloučení třísky doprovázeno plastickou deformací, která je spojena se závažným vývinem tepla, výsledkem je přeměna diamantu v grafit.

Mezi užitečnými vlastnostmi brusných zrn o velké tvrdosti a schopnosti obrábět byla nalezena těsná souvislost právě s elektronovou strukturou.

Uhlíkové atomy diamantu o tetraedrické koordinaci disponují nejstabilnější  $sp^3$  hybridovou konfigurací

/ tj. sjednocení energeticky různých orbitů daného stavu /. Velká energetická stabilita této konfigurace zajišťuje lokalizaci valenčních elektronů uhlíku.

Při postupu od diamantu ke křemíku, klesá energetická stabilita  $sp^3$  konfigurací, a je nejmenší v případě olova. Velká stabilita statické hodnoty  $sp^3$  konfigurací, resp. tomu odpovídající tuhé hybridické vazby, které jsou příčinou velké tvrdosti diamantu, tato vlastnost, jak bylo pojednáno, klesá u křemíku, a nejnižší je u olova. Elektronová konfigurace kubického nitridu boru je podobná diamantové /  $B-2s2p^3$ ,  $N-2s2p^3$  /, a proto jak jeho tvrdost, tak i obráběcí schopnost se liší jen v malé míře o těchto vlastnostní diamantu.

Na základě předešlého je jasné, proč je nižší tvrdost a obráběcí schopnost karbidu křemíku než diamantu, statistický poměr  $sp^3$  elektronové konfigurace atomů Si i její ch energetická stabilita je totiž nižší než u atomu uhlíku. Z tohoto hlediska má karbid boru příznivější vlastnosti, což se dá vysvětlit poklesem hlavního kvantového čísla  $sp$  valenčních elektronů, resp. větším statistickým poměrem  $sp^3$  konfigurace. Tvrdost karbidu boru, jak je známo, je podstatně nižší než u diamantu a KNB / borazon /, protože vznik  $sp^3$  konfigurace je spojen u atomu boru s elektronovou výměnou, to pak vede k nelokalizovanému přebytku elektronů.

U hexagonálního nitridu boru nastává pokles pevnosti ještě ve větší míře, protože jeho vznik předává atom boru svoje valenční elektrony dusíku. Výsledkem vzniku sloučeniny je elektronová konfigurace /  $B-s^2p-sp^2$  a  $N-s^2p^3+sp^2 = s^2p^6$  /. Vedle vzniku méně stabilní  $s^2$  konfigurace, vede silně asymetrické rozložení elektronové hustoty v mřížce také ke snížení tvrdosti.

Citovaní autoři stanovili pokusnou cestou obráběcí schopnost čtených nekovových materiálů a jejich sloučenin. Výsledky jsou obsaženy v tab. 1.

| Obráběný materiál                                                   | Relativní obráb. schopnost |
|---------------------------------------------------------------------|----------------------------|
| syntetický diamant                                                  | 17,03                      |
| karbid boru                                                         | 13,60                      |
| nitridovaný karbid boru                                             | 10,11                      |
| karbid křemíku / zelený /                                           | 9,67                       |
| karbid křemíku /šedivý /                                            | 9,56                       |
| oxid hliníku                                                        | 4,00                       |
| nitrid křemíku                                                      | 1,03                       |
| nitrid boru                                                         | 0,83                       |
| oxid hořčíku                                                        | 0,42                       |
| 60 mol % BN - 40 mol % $\text{Si}_3\text{N}_4$                      | 0,60                       |
| 60 mol % $\text{Al}_2\text{O}_3$ - 40 mol % $\text{Si}_3\text{N}_4$ | 5,30                       |
| 60 mol % MgO - 40 mol % $\text{Si}_3\text{N}_4$                     | 6,00                       |
| 60 mol % SiC - 40 mol % BN                                          | 8,00                       |
| 60 mol % SiC - 40 mol % $\text{Si}_3\text{N}_4$                     | 4,00                       |

Tab. 1 Relativní obráběcí schopnost důležitých obráběcích materiálů / SAMSONOV, STASOVSKAJA, KAZAKOV /

Své výsledky shrnuli následovně:

Obrusování schopnost nekovových materiálů roste s růstem statistické hmotnosti stabilní hybridické  $\text{sp}^3$  elektronové konfigurace, resp. s růstem její energetické stability / s poklesem hlavního kvantového čísla  $\text{sp}$  /, ale zároveň i s růstem symetrického rozdělení elektronové hustoty v mřížce, a s poklesem statistické hmotnosti

nelokalizovaných, anebo slabě vázaných elektronů. Toto poznání umožňuje vytyčení cest k přípravě metod pro zkoumání a zhotovování materiálů z nekovů o velké obráběcí schopnosti. Tvrdost a obráběcí schopnost jsou samozřejmě jen potřebnými předpoklady pro to, aby se z materiálu pro obrábění dal zhotovit dobrý brusný nástroj. Jinak je nutné podotknout, že dobré brousicí vlastnosti jsou závislé od velmi velkého počtu faktorů.

### 3. TECHNOLOGICKÉ PODMÍNKY PŘI BROUŠENÍ

#### 3.1. Charakteristika brousicích kotoučů

Po konzultaci s výrobcem brousicích kotoučů TST, SZVKE Benátky nad/J. - byly použity tyto kotouče:

- brousicí kotouč C4925L9V / tj. kotouč z karbidu křemíku, zelený, zrnitosti a tvrdosti střední, struktura velmi pórovitá a bylo použito keramického pojiva /
- diamantový kotouč s bakelitovou vazbou  
URDIAMANT 5 - 84, zrnitost Z - 160/125,  
koncentrace 100, vazba B - VIII.

Vlastností a použití těchto nástrojů jsou charakterizovány tvarem a rozměry kotouče, druhem a zrnitostí diamantového prášku, druhem vazby, koncentrací brusiva. Nosné těleso kotouče je obvykle kovové nebo z umělých pryskyřic. Brusivo uložené v pojivu tvoří vlastní aktivní vrstvu na funkční ploše nástroje; tato vrstva je v rozsahu 1 až 3 mm. Chlazení kotoučů se doporučuje všude, kde je to možné. Kotouče s kovovým pojivem se nesmějí používat bez chlazení. Jako chladicí prostředek se doporučuje DIOL, FINOL - roztok sody ve vodě s glycerínem.

Kotouče se čistí nebo orovnávací při ztrátě tvaru a při zanesení aktivní části. V případě silného zanesení aktivní části diamantového kotouče nebo ztráty jeho tvaru je vhodné upnout diamantový brousicí kotouč i s upínací přírubou do vřeteníku brusky a za vydatného chlazení přibrousit jeho aktivní část kotoučem z SiC.

Diamantové kotouče lze orovnávat také přímo v pracovní poloze pomocí přidavného zařízení s otáčejícím se kotoučem z SiC / rolnou /, nebo méně dokonalým způsobem, kdy je úlomek kotouče z SiC vhodně upevněn nebo držen v ruce.

V tab. 2 /1/ jsou uvedeny doporučené hodnoty vhodných zrnitostí diamantů a informativní hodnoty dosažitelné drsnosti povrchu, která je ovšem ve velké míře rovněž závislá na způsobu broušení.

| Zrnitost<br>diamantu | Použití                                                                                                            | Drsnost<br>povrchu Ra<br>/μm/ |
|----------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|
| 200/160<br>160/125   | Pro účinné broušení a hrubování,<br>kde záleží více na úběru než na<br>jakosti výbrusu                             | 1,2                           |
| 125/100<br>100/80    | Nejčastěji používané zrnění pro<br>hrubování a pro předbroušení pro<br>následující dokončení jemnějším<br>kotoučem | 0,8                           |
| 80/63<br>63/50       | Pro jemné dokončovací broušení<br>a ostření řezných nástrojů se SK<br>slnutými karbidy                             | 0,4                           |
| 50/40<br>10/7        | Pro jemné dokončovací broušení<br>a lapování                                                                       | 0,2<br>0,08                   |
| 7/5<br>5/3           | Pro leštění volným i vázaným<br>brusivem                                                                           | 0,05<br>0,03                  |

Tab. 2 Směrné hodnoty pro volbu diamant. brusiva

- brousicí kotouč z kubického nitridu boru / pouze studie /  
Přednosti elborových nástrojů se nejvíce projeví při broušení ocelových součástí zakalených na vysokou tvrdost / HRC 60 a větší /, jejíž opracování klasickými brousicími materiály není dostatečně produktivní.

Při optimálních řezných podmínkách pracuje elborový kotouč v režimu samoostření. Nezanáší se a nepotřebuje orovňání k obnovení řezných vlastností.

Orovňáváním elborových kotoučů se vytváří nebo obnovuje pouze geometrický tvar. / 13, 14, 15 /

Poznámka: Všechny použité kotouče měly tyto max. rozměry

- max. průměr 250 mm

- max. šířka 25 mm

### 3.2. Výběr řezných kapalin pro broušení titanu a jejich stručné charakteristiky

#### A / Účel a druhy řezných kapalin

Řezné kapaliny při broušení odvádějí vzniklé teplo a snižují jeho vývin, zlepšují drsnost povrchu a kvalitu povrchové vrstvy, zvyšují trvanlivost kotouče a odstraňují produkty broušení z místa řezu. Lze je rozdělit do pěti skupin: a/ roztoky elektrolytů

b/ emulze

c/ řezné oleje

d/ syntetické kapaliny

e/ tuhá maziva

ad a/ Základní složkou pro roztoky elektrolytů je voda, která má vynikající chladicí účinek. Nedostatkem jsou korozní vlastnosti, dále má malý smáčecí účinek, proto se do vody přidávají různé soli např. sóda / uhličitán

sodný /, borax, vodní sklo aj. , které se po rozpuštění disocují a vytvářejí roztok elektrolytů.

V ČSSR je produkován na bázi směsi více solí přípravek DIOL, ten obsahuje též aktivní prvek, který ačkoli nemá olejovou mazací složku, zajišťuje jistý mazací účinek. Zkoušky prováděné s elektrolytem při broušení prokázaly snížení brusné síly a měrné spotřeby energie až na úroveň řezných sil dosažených neúčinnějšími emulzními kapalinami.

ad b / Používané emulzní kapaliny jsou typu olej ve vodě, tj. ropné výrobky, někdy i s přísadou aditiv, emulgátorem dispergovány ve vodním prostředí. Důležitým faktorem při přípravě emulze jsou vlastnosti vody, zejména její tvrdost a bakteriální nezávadnost. Tyto vlastnosti ovlivňují výrazně stabilitu emulze v provozu.

Emulze se používají mnohem více než roztoky, protože kromě chladicího účinku mají též mazací. Z toho plyne i příznivější vliv na průběh brusného pochodu.  
/ Nejčastěji používaný EMULZIN H /3-5 %/, ROBOL /3-5 %/, AKVOL /3-5%/, OET /3-5%/.

ad c / Ty dělíme obvykle na :

1. aktivní - obsahují přísady sloučenin síry, chlóru nebo fosforu. / Jejich atomy jsou nepřilíš pevně vázány ve sloučeninách takže při řezných teplotách a tlacích se uvolňují a reagují s kovem obrobku./
2. neadditivované - většinou směsi olejů minerálních s olejem mastným.

Pro vyjádření aktivity olejů za brusného procesu se

v zahraničí uvádějí tři stupně:

- I. Tvrdý olej - silně aktivní / ABRASOL B, P2 DS /
- II. Středně tvrdý olej - mírně aktivní / P3 /
- III. Měkký olej - neaktivní / P0, B2, Řezný olej MS/

Obecně je volba řezné kapaliny pro broušení závislá na technologických požadavcích např. požadované přesnosti, drnlosti. Z těchto hledisek dávají zásadně lepší výsledky oleje než emulze. Také opotřebení kotouče je menší, a tudíž i jeho tvarová stálost je větší.

Při použití olejů se vytváří nepříjemná škodlivá mlha / aerosol /, často i dým. K omezení se používá anti-mľžných přísad do olejů. Řezné oleje se pro broušení skládají z minerálního oleje s tukovými a chemickými aktivními přísadami, podporujícími stálost kapaliny při vysokých teplotách a tlacích. Tyto aktivované oleje se používají ve všech případech, kdy mazací účinek řezné kapaliny je důležitější než chladicí, tj. u broušení Ti, Ni, Al atd. Při broušení špatně obrobitelných a legovaných ocelí se dobře v praxi osvědčil průmyslový olej s přísadou 5 % disulfidmolybdenových preparátů.

ad d / Doposud vyráběné syntetické řezné kapaliny jsou sestaveny na bázi polyglykolů. Výhodou je vysoká stabilita, avšak nevýhodou menší mazací účinek než olejů a jsou dražší. Pokusem o její výrobu byla v ČSSR kapalina STABOFER / n.p. Spolana Velvary /. Používána ve směsi s vodou, ale bylo zjištěno, že není vhodná pro broušení ocelí.

ad e / Použitím tuhých maziv bylo dosaženo pozitivních výsledků u broušení nerez austenitických ocelí. Byly prováděny pokusy " impregnovat " kotoč nasycením sírou

boraxem, chlórparafinem atd. Tyto látky vyplňují póry kotouče a je proto očekávána jejich účast v zóně broušení. Např. u sycení sírou je následek větší životnosti kotouče. Toto však bylo dosaženo spíše vyplněním pórů kotouče sírou a jeho " ztvrdnutí ", nežli reakce síry při oddělování třísky každým zrnem. Ve výzkumném ústavu obrábění a obráběcích strojů se dále zkoumalo zavádění síry do zóny broušení kontaktním způsobem. Tehdy se snížily síly a spotřeba energie při broušení austenitických ocelí až o 50 %. Méně výrazné výsledky byly dosaženy při broušení uhlíkové konstrukční oceli o pevnosti  $R_m = 700 \text{ MPa}$ , přesto však byla prodloužená životnost brousicích kotoučů.

Řezná kapalina musí splňovat tyto podmínky :

1. snižovat tření mezi brusným zrnem a obrobkem vytvářením stabilního filmu
2. chlazení povrchu obrobku
3. čištění brousicích kotoučů
4. korozní ochrana obrobku a pracovního stroje

B / Volba tuzemských rezných kapalin a dovážených

V n.p. Motorlet Praha je v současné době pro broušení používán pouze jeden druh rezné kapaliny tuzemské výroby a to EMULZIN H 5 %. Pouze u speciálních případů, jako je např. profilové broušení závěsu lopatek se používají zahraniční kapaliny SINTOLIN R 30 v koncentraci 1 : 50.

Jedním z cílů práce bylo zjistit, do jaké míry může záměna rezné kapaliny ovlivnit výsledky procesu broušení.

Po konzultaci s pracovníky VÚOSO Praha byly pro broušení titanových slitin zvoleny tyto kapaliny : DIOL, SINTOLIN, ABRASOL B, EMULZIN H.

Charakteristické rysy jednotlivých kapalin :

EMULZIN H : ropný olej s kombinací anioaktivního emulgátoru z dovozu a tuzemského neionogenního tenzidu. Na korozivní zkoušce Herbert-test je negativní ve 2 % a jeho 5 % emulze je stálá i ve vodě vyšší tvrdosti.

ABRASOL B : řezný olej na bázi chrómu a síry, je určen pro broušení těžkoobrobitelných materiálů, např. austenitických ocelí a při výkonném a rychlostním broušení. Obsah VT přísad zaručuje zvýšenou trvanlivost kotouče a zvýšenou přesnost obrobku, bez tepelně narušeného povrchu / 17 /.

DIOL : je vyroben na bázi směsi více solí, jeho roztok ve vodě o koncentraci 1 - 4 % má příznivé vlastnosti na sedimentaci brusiva a odbroušených částí obrobku. Je určen a používán při broušení diamantovými kotouči.

SINTOLIN : zahraniční výroba

### 3.2.1. Vliv chemických reakcí v procesu broušení / 8 /

Výzkum chemických problémů spojených s broušením byl zahájen v posledních letech. Obrábění nových konstrukčních materiálů se zvláštními vlastnostmi pro moderní letecký a raketový průmysl tradiční technologií se setkával většinou s těžkostmi. Velkou starost dělalo obrábění titanu a jeho slitin.

I když dnes se broušení ještě považuje hlavně za mechanickou operaci v nejnovější době přichází stále více do popředí význam chemickým procesů, zvláště při obrábění těžkoobrobitelných materiálu na bázi niklu a titanu.

Při broušení jsou známy nejenom chemické reakce brousicích materiálů, ale chemická reakce sehrává vážnou úlohu též při používání tzv. pomocných brousicích materiálů. Rozumíme tím takovou látku, která usnadňuje průběh brousicího pochodu. Bylo např. zjištěno, že za nepřítomnosti některých brousicích materiálů je broušení nemožné protože za těchto podmínek nedochází k přímému vzniku kovové třísky. Příčinou je to, že čerstvě vzniklé a ještě neznečištěné kovové prvky se ihned navaří na stejné povrchy. Při nedostatku kyslíku je např. zpětná přilnavost třísek tak rychlá, jak rychlost jejich vzniku. Malá přítomnost kyslíku zaručí tvorbu oxidického filmu a k navaření nedojde.

Některé kovy se okysličují tak pomalu, že v době, která je k dispozici, se vytvoří jen velmi slabý oxidický film, který nezabrání navaření třísek, v tomto případě může film tvořit látky, které jsou za tímto účelem přidávány do kotouče nebo se přivádí do prostoru řezání. Látky mohou být sulfidy, chlóridy, které vytvá-

řejí na čerstvém povrchu poměrně rychle sulfidické a chlórídické filmy.

Chemické reakce mezi aktivními přísadami a čerstvě broušeným kovovým povrchem vytvářejí film o malé pevnosti ve smyku, který zabraňuje zakousnutí, naleptání nebo svaření třísek k obráběnému materiálu nebo k broušicímu nástroji. Tyto prostředky zabraňují svařování a jsou účinné zvláště u austenitických nerezavějících ocelí, které jsou zejména náchylné na naleptání a svaření.

Plnidla, přidávána do broušicích nástrojů, nepůsobí vždy cestou chemických reakcí. Některé plní stejný úkol pomocí jednoduchého mazání. Tato vlastnost je zejména charakteristická pro látky, tající mezi 500 - 1000 °C.

### 3.2.2. Shrnutí vlastností řezných kapalin s ohledem na chemii broušení

V pracech / 8,9,10 / se autoři zabývají vlivem druhu řezné kapaliny na proces broušení, respektive na parametry broušení. Shodují se v názoru na závislost poměrného obrusu při působení emulzí, syntetických kapalin i vodních roztoků anorganických solí. Zásadní rozdíl, zejména ve vztahu k poměrnému obrusu, je při použití řezných olejů.

Výsledky svých výzkumů shrnuli SHAW a YANG takto :

1. Obvyklé oleje nejsou účinné při broušení titanu
2. Destilovaná voda má méně příznivý účinek než vzduch
3. Některé anorganické soli, např. s obsahem sodíku a draslíku, jsou zvláště účinné
4. Z hlediska účinnosti mají anionty a kationty stejný význam

Získané hodnoty poměrného obrusu u oleje se pohybují v intervalech 1,1 - 1,9, u roztoku dusitanu sodného kolem hodnoty 5 při koncentraci 1 molu.

Výsledky pokusů podle HÖNSCHEIDA však tyto hodnoty popírají. U silně aktivních olejů stoupá poměrný obrus až k hodnotě 20. Vysvětlení se nechá hledat v rozličných podmínkách experimentů, kde rozhodujícím faktorem může být specifický objem  $V'$  odebraného materiálu.

Z pohledu zbytkových pnutí na povrchu obrobku ukázal řezný olej lepší výsledky než syntetické kapaliny a nebo emulze. Stejně výsledky platí pro srovnání teplot v zóně broušení.

#### 4. TEORETICKY A OBECNĚ O BROUŠENÍ A MĚŘENÍ PARAMETRŮ PRO SESTAVOVÁNÍ DIAGRAMŮ BROUŠENÍ

##### 4.1. Podstata broušení

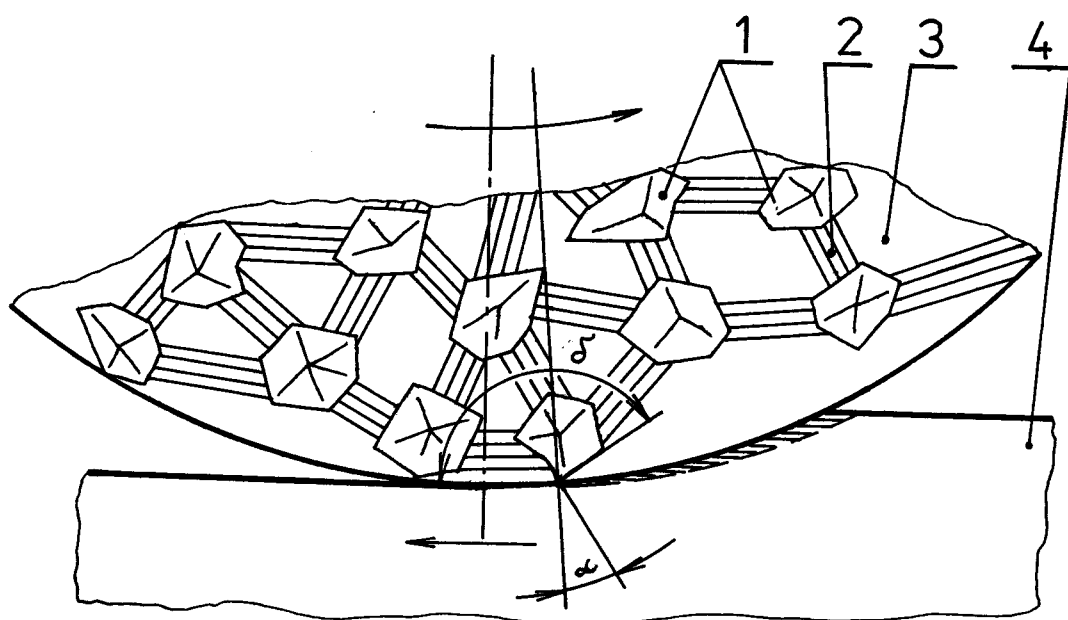
Broušení je metoda třískového obrábění, při kterém jsou z materiálu odebírány velmi jemné třísky prostřednictvím mnohobřitého nástroje, který je vytvořen spojením jemných zrn brusiva s pojivem v jeden celek - brusný kotouč. Zrna brusného kotouče tvoří tvarově nepravidelné zuby, které vytváří ostré břity. Zrna brusiva mají vždy úhel řezu  $\sigma > 90^\circ$  a poměrně velký úhel  $\alpha$  / obr. 7 /.

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

- 1./ Opracování součástí na přesný geometrický tvar a rozměry, s vysokou jakostí povrchové vrstvy.
- 2./ Opracování součástí a materiálů, pro než je jiný způsob obrábění obtížný nebo vůbec nemožný.

3./ Opracování součástí a materiálů, pro než je broušení nejhospodárnější.

Lze očekávat, že význam broušení bude i nadále vzrůstat, neboť se širším uplatňováním metod přesného kování, lití a práškové metalurgie, bude zřejmě hospodárné opracovávat tyto polotovary na čisto již jen broušením.



- 1. brusná zrna
- 2. spojovací můstky
- 3. póry
- 4. materiál

Obr.7. Schéma struktury broušícího kotouče.

#### 4.1.1. Tvoření třísky při broušení

Při tvorbě třísky je nutno brát v úvahu tyto zvláštnosti vyskytující se u procesu broušení :

1./ Různovitost geometrické formy zrn brusiva a

neurčitost jejich vzájemné polohy, které mají za následek nepravidelný úběr třísky jednotlivými zrny.

- 2./ Nestejné, ale vesměs velké záporné úhly čela zrn brusiva, silně ovlivňující charakter jejich práce / primární plastické deformace a tření v oblasti vzniku třísky /.
- 3./ Poměrně slabé upevnění zrna ve vazbě brousicího kotouče, čímž je omezena maximální řezná síla, kterou je toto uložení zrna schopno přenést. Z toho vyplývá samovolné uvolňování zrn brusiva při broušení, tzv. samoostření.
- 4./ Malé průřezy třísek / řádově  $10^{-3} \text{ mm}^2$  / a vysoké řezné rychlosti /  $30 - 100 \text{ ms}^{-1}$  /. Doba záběru zrna brusiva s obrobkem je  $10^{-4} - 10^{-5} \text{ s}$ .

Mechanismus vzniku třísky při broušení závisí především na tom, zda zrno brusiva v brousicím nástroji je vázáno, nebo je volné. Při vázaném zrně brusiva, lze charakterizovat vznik třísky obdobně jako při frézování. Při mikroskopickém sledování třísek u broušení plastických materiálů / ocel, titan / je vidět, že vzniká tříska plynulá, která se v podstatě neliší od třísky vytvořené záběrem jiných nástrojů s kovovým břitem. Určitá část třísek, která byla odebrána břity se zvlášť nevhodnou geometrií, se v důsledku velkých plastických deformací a tření / vnějšího i vnitřního / ohřeje natolik, že se roztaví a vytvoří kapky, nebo dokonce shoří / jiskření /.

Záběr volného zrna brusiva / lapování, leštění apod. / je mnohem neurčitější, neboť zrno kromě translančního pohybu do řezu ještě nepravidelným způsobem rotuje kolem vlastní osy.

#### 4.1.2. Kinematika záběru brousicího kotouče

Při správně zvolených řezných podmínkách a režimu broušení se otupená zrna z brousicího nástroje vylamují, a uvolňují tak místo novým, ostrým zrnům. Jestliže je řezný odpor působící na zrno příliš malý nebo je pevnost pojivových můstků příliš velká, otupená zrna se neuvolní, kotouč špatně řeže a nadměrně zahřívá broušený povrch. V opačném případě se předčasně vylamují ještě dostatečně ostrá zrna brusiva a kotouč se nadměrně opotřebovává.

##### Střední tloušťka třísky

Patří ke zvláštnostem a také k výhodám broušení, že mechanismus samoostření lze regulovat nejen vlastnostmi brousicího kotouče / tvrdostí, strukturou, pojivem apod. /, ale také vlastními řeznými podmínkami. Vhodnou změnou řezných podmínek lze totiž ovlivnit řezné síly působící na jednotlivá zrna, a tím intenzitu jejich vylamování z pojiva. Řezná síla působící na jedno zrno je úměrná průřezu / tloušťce / třísky odebírané tímto zrnem.

Z geometrických poměrů při záběru brousicího kotouče s obrobkem vychází pro střední tloušťku nedeformované třísky, odebírané jednotlivými zrny brusiva, přibližný vztah

$$a_{zstr} = q \cdot l_z \sqrt{\frac{h}{d_{ekv}}} \quad / \text{ mm } /$$

kde  $q = \frac{v_o}{60 \cdot v_k}$

$$d_{ekv} = \frac{d_o \cdot d_k}{d_k \pm d_o} \quad / \text{ mm } /$$

Uvedené vztahy byly odvozeny z geometrických poměrů za předpokladu rovnoměrného rozložení zrn na obvodě kotouče a jeho dokonale tuhého styku s obrobkem. Je možné změnou určitých podmínek broušení regulovat zatížení jednotlivých zrn brusiva, a tím i mechanismus samoostření broušicího nástroje.

Střední tloušťka vrstvy - ekvivalentní tloušťka třísky

Vzhledem k omezené platnosti a složitosti vztahů pro výpočet střední tloušťky a středního průřezu třísky ubírané jednotlivými zrny se v poslední době zavádí do teoretických úvah, výpočtů i experimentálního výzkumu tzv. ekvivalentní tloušťka třísky / dále  $h_{ekv}$  /. Byla takto pojmenována až po obsáhlém výzkumu mezinárodní organizace CIRP, která s dostatečnou přesností vystihuje fyzikální podstatu úběru třísky při broušení.

Při jejím odvození se vychází z porovnání příkonu broušicího a pracovního vřeteníku nebo z kontinuity materiálu vstupujícího a vycházajícího ze zóny řezání. Vrstva odebíraného materiálu o tloušťce  $h$  vstupuje do zóny řezání rychlostí  $v_o$ . Množství vytvořených třísek lze teoreticky spojit v jedinou plynulou vrstvu o tloušťce  $h_{ekv}$ , která odchází z řezné oblasti rychlostí  $v_k$  / obr.8 /.

Dostaneme vztah

$$v_o \cdot h \cdot b = 60 \cdot v_k \cdot h_{ekv} \cdot b$$

$b \quad / \text{ mm } / \dots\dots\dots \text{šířka kotouče}$

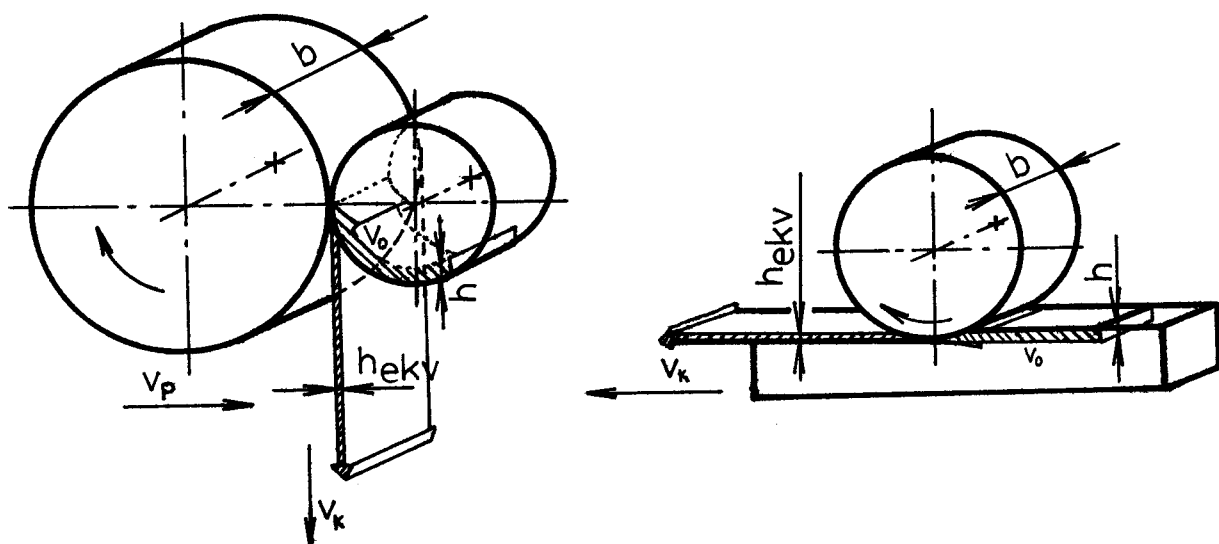
odtud

$$h_{ekv} = \frac{h}{q} = \frac{v_o \cdot h}{60 \cdot v_k} \quad / \text{ mm } /$$

pro zapichovací broušení s rychlostí přísuvu  
 $v_p / \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1} /$  bude

$$h = \frac{v_p}{n_o} \quad / \text{ mm } /$$

$$h_{ekv} = \frac{\pi \cdot v_p \cdot d_o}{60 \cdot 1000 \cdot v_k} \quad / \text{ mm } /$$



Obr. 8. Ekvivalentní tloušťka vrstvy odebírané při broušení / na kulato, na plocho /.

Teoretický rozbor i experimentální výzkum prokázaly, že tato veličina dostatečně výstižně charakterizuje proces broušení, takže lze v závislosti na ní vyjádřit i další důležité činitele broušení, tj. základní vztahy pro sestavování diagramu broušení.

|                                                       |                                                                            |                            |
|-------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|----------------------------|
| měrný objem                                           | $V' = V_1' \cdot h_{ekv}$                                                  | / mm <sup>3</sup> /mm /    |
| měrný výkon                                           | $Z'$                                                                       | / mm <sup>3</sup> / mm.s / |
| tangenciální síla<br>vztažená na 1 mm šířky<br>záběru | $F_t = F_1 \cdot h_{ekv}^f$<br>$f = \operatorname{tg} \beta_1$             | / N /,                     |
| normálová složka řezné<br>síly na 1 mm šířky          | $F_n = \frac{F_1}{\mu} \cdot h_{ekv}^f$<br>$f = \operatorname{tg} \beta_n$ | / N /,                     |
| drsnost povrchu bez<br>vyjiskření                     | $R_a = R_1 \cdot h_{ekv}^r$<br>$r = \operatorname{tg} \alpha$              | / μm /,                    |
| drsnost povrchu po<br>vyjiskření                      | $R_a^v = R_{1v} \cdot h_{ekv}^{rv}$<br>$r_v = \operatorname{tg} \alpha_v$  | / μm /,                    |
| poměrný objemový obrus                                | $m = m_1 \cdot h_{ekv}^q$<br>$v_k \cdot 60$                                | / 1 /                      |
| rychlostní poměr                                      | $q = \frac{v_o}{F_t}$                                                      | / 1 /                      |
| součinitel tření                                      | $\mu = \frac{F_t}{F_n}$                                                    | / 1 /                      |

součinitel tření je prakticky na  $h_{ekv}$  a mění se v rozsahu 0,2 - 0,7.

Měrná energie závisí při broušení na podmínkách úběru a na použití ŘK. Je možné uvést, že jakost

broušeného povrchu bude funkcí  $h_{ekv}$ .

$$e_{0,1} = \frac{F_t}{h_{ekv} \cdot 10^3} = \frac{F_t}{0,1} = 10 F_t \quad / \text{ J} \cdot \text{mm}^{-3} /$$

Tangenciální složku řezné síly je možné určit z užitečného příkonu vřetene

$$F_t = \frac{P_{\max} - P_{\text{na prázdnó}}}{v_k} = \frac{P_s}{v_k} \quad / \text{ N} /$$

Množství odbroušeného materiálu / mezi dvěma orovnávaními /

$$\Delta V = \Delta V_1 \cdot h_{ekv}^r \quad / \text{ mm}^3 \cdot \text{mm}^{-1} /$$

Používaná kritéria, dle výzkumných prací VŠST LIBEREC / 18 /, se ukázalo, že existuje možnost vyjádřit na  $h_{ekv}$  i další kritéria, jako je např. obrobitelnost broušením  $O_B$ , které vychází z plochy a tvaru vyjiskřovací křivky normálové řezné síly a úběru materiálu.

Kritéria :

obrobitelnost broušením  $O_B = U \cdot L$

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

Všechny uvedené vztahy mají exponenciální charakter a lze je po logaritmování znázornit ve tvaru přímek. Tyto grafy kde na obou osách pořadnic jsou potřebné hodnoty vynášeny v logaritmických souřadnicích, se nazývají diagramy broušení Obr. 9. Mimo jiných údajů lze s jejich pomocí vypočítat specifickou energii potřebnou na odbroušení jednotkového objemu materiálu. Diagram broušení lze

dále použít jako základ pro výpočet doplňujících kritérií, jako např. kritérium součinitele účinnosti broušení, eventuálně koeficient obrobitelnosti / 20 /

|                                          |                                                  |
|------------------------------------------|--------------------------------------------------|
| koeficient obrobitelnosti                | $K_{OB} = \frac{\gamma}{\gamma_E}$               |
| kritérium součinitele účinnosti broušení | $\gamma = \frac{m_{0,1}}{e_{0,1}}$               |
| kritérium                                | $S_v = \frac{m_{0,1}}{e_{0,1} \cdot R_{a0,1}^V}$ |

Pro úplnost je nutno poznamenat, že s pomocí diagramů broušení lze stanovit veličiny potřebné pro uskutečňování procesu broušení za předpokladu dodržení vstupních podmínek z nichž byly sestrojeny. Proto je nutné mít k dispozici různé varianty vstupních podmínek. Mimo to, je nutné mít na zřeteli, že každé sestrojení diagramu broušení vyžaduje provedení značného množství zkoušek, což do jisté míry omezuje možnosti jejich použití. Přesto, ale představují značný přínos ve studiu procesu broušení.

Je-li to nutné, doplňuje se diagram broušení ještě o další údaje, např. o graf závislosti průběhu zbytkových pnutí v povrchové vrstvě pro několik variant řezných podmínek.

$$\operatorname{tg} \alpha = r$$

$$\operatorname{tg} \delta = g$$

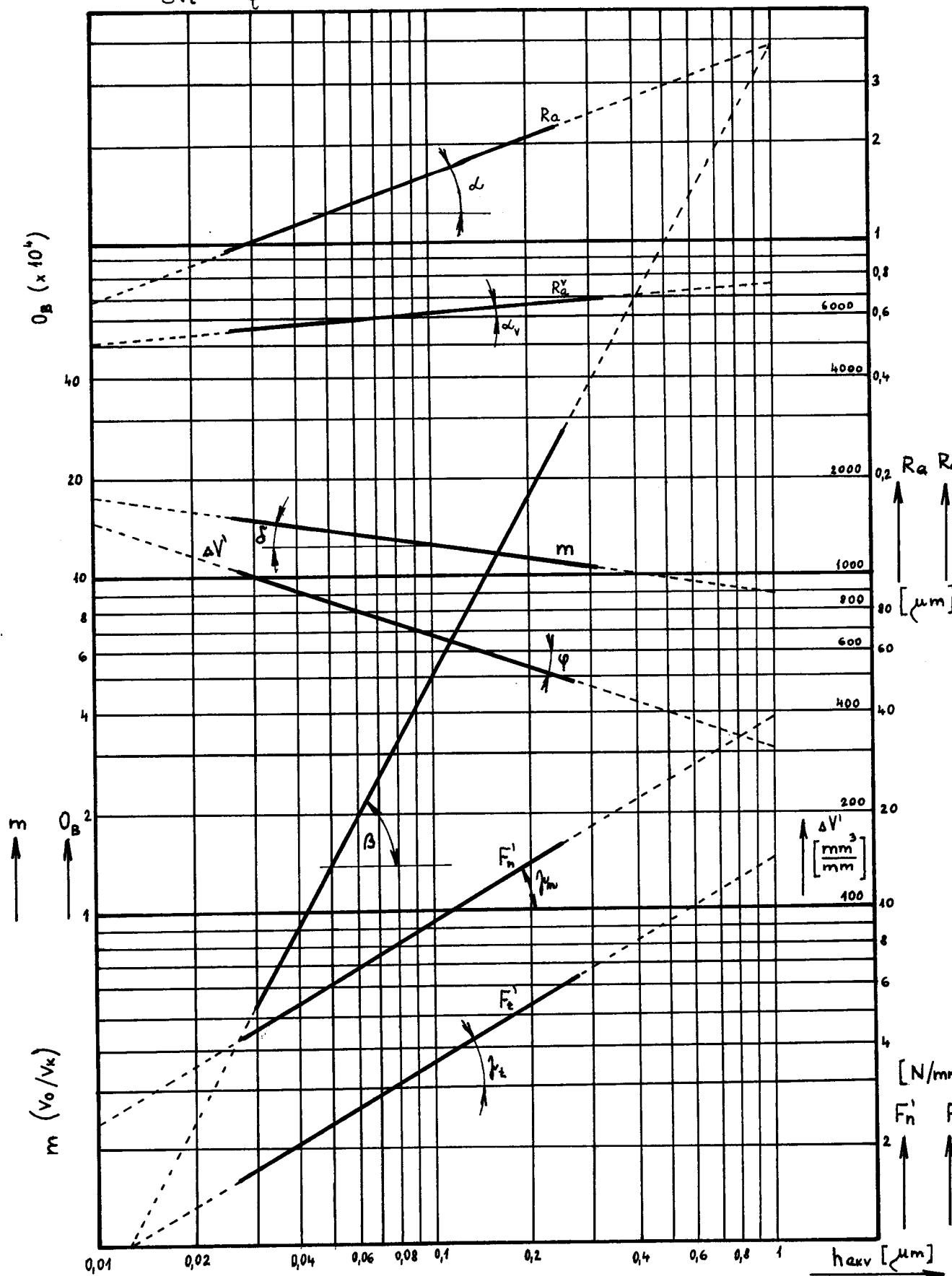
$$\operatorname{tg} \alpha_v = r_v$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \nu$$

$$\operatorname{tg} \beta_n = f_n$$

$$\operatorname{tg} \beta = o$$

$$\operatorname{tg} \beta_t = f_t$$

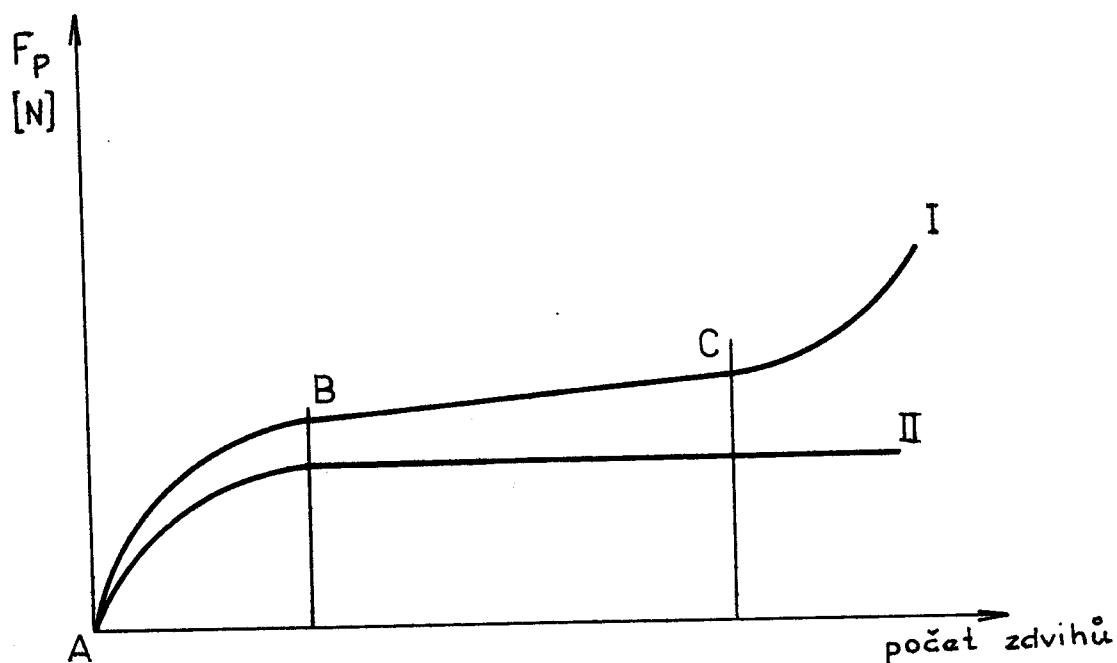


Obr. 9. Diagram broušení

#### 4.2. Teorie sil při broušení

Řezné síly při broušení vznikají vzájemným působením pracovní plochy broušicího nástroje a obrobku. Břity zrn ubírají velmi drobné třísky, kterým odpovídají elementární řezné síly co do velikosti poměrně zanedbatelné, avšak celkové řezné síly mohou dosáhnout značné velikosti, protože při broušení pracuje současně velké množství zrn. Brusné zrno může odebírat třísku jen tehdy, je-li smykové napětí vznikající v průběhu procesu větší než odpovídající pevnost broušeného materiálu ve smyku.

Se zvětšením řezných sil rostou síly mezi prvky v technologické soustavě stroj - přípravek - obrobek - nástroj, zvyšuje se teplota v zóně broušení i na povrchu obrobku, snižuje se přesnost i kvalita broušeného povrchu.



Obr. 10. Průběh změny řezné síly

- I - při otupování broušicího kotouče
- II - s uplatněním efektu samoostření

Při záběru kotouče stálým nebo zrychleným posuvem vzrůstají řezné síly i výkon broušení velmi intenzivně úsek AB / Obr. 10. /. Intenzita růstu řezné síly na tomto úseku závisí hlavně na řezných podmínkách a tuhosti tg. soustavy stroj - nástroj - obrobek.

Výzkumy ukázaly, že uvedený růst sil je způsoben probíhajícím neustáleným režimem úběru materiálu, kdy skutečná hloubka řezu neustále roste úměrně s narůstáním předpětí v tg. soustavě. Nedostatečnou tuhostí této soustavy dochází ke zpoždění skutečného přísuvu u porovnání s nastaveným přísuvem. Při ustáleném režimu, kdy je přísuv prakticky konstantní, se velikost řezné síly stabilizuje úsek BC a vliv dalších činitelů i zanedbatelný.

Výkyvy řezných sil mohou být způsobeny i nesprávným upnutím obrobku, nehomogenitou polotovaru, deformací obrobku vlivem působících sil, nerovnoměrným rozložením teplot nebo vnitřním pnutím.

Po otupení zrn brusiva a zanešení pracovní plochy kotouče se řezné síly prudce zvětšují - úsek CD. Brousí-li se s vyjiskřením / bez přísuvu /, pronikají jednotlivá zrna do menší hloubky a intenzita úběru materiálu se snižuje, a proto se zmenšují i řezné síly.

Při broušení rozeznáváme : výslednou řeznou sílu a řeznou sílu připadající na jedno zrno brusiva. Výsledná řezná síla při broušení  $F$  se skládá z normální nebo-li radiální síly  $F_p$  tangenciální síly  $F_c$  a posuvné / axiální / síly  $F_f$ .

Grafické znázornění řezné síly a její složky při broušení :

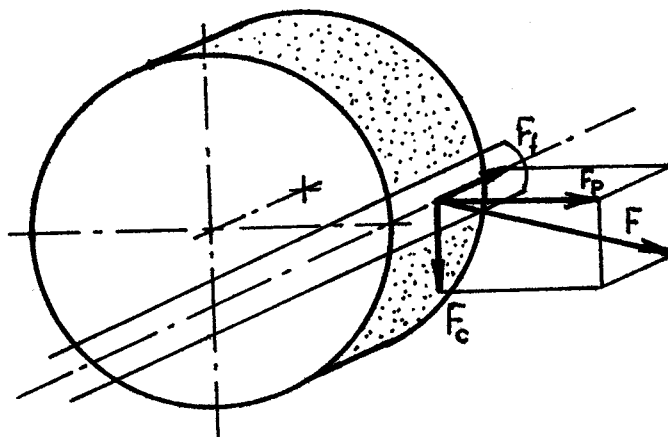
a/ vnějších rotačních ploch obvodem kotouče

b/ rovinném broušení cílem kotouče / Obr. 11. /

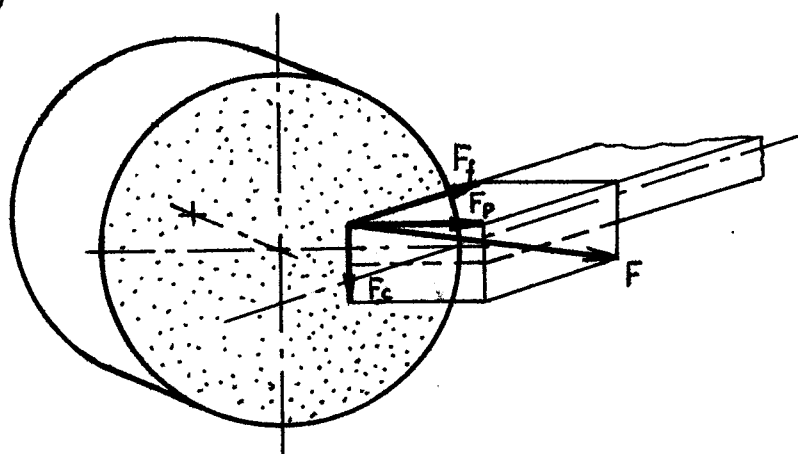
Experimentálně byl zjištěn vztah, že při broušení je vždy

$$F_p > F_c > F_f, \text{ přičemž poměr } \frac{F_p}{F_c} = 1,0 - 3,0.$$

a)



b)



Obr. 11. Grafické znázornění řezné síly

Výsledky získané z výzkumu dynamiky broušení se používají při různých druzích výpočtů. Např. výkon obráběcích strojů, k určení přesnosti obrábění, k zjištění trvanlivosti brousicích kotoučů a dalších tg. výpočtech.

#### 4.3. VLASTNÍ MĚŘENÍ

##### 4.3.1. Popis zařízení

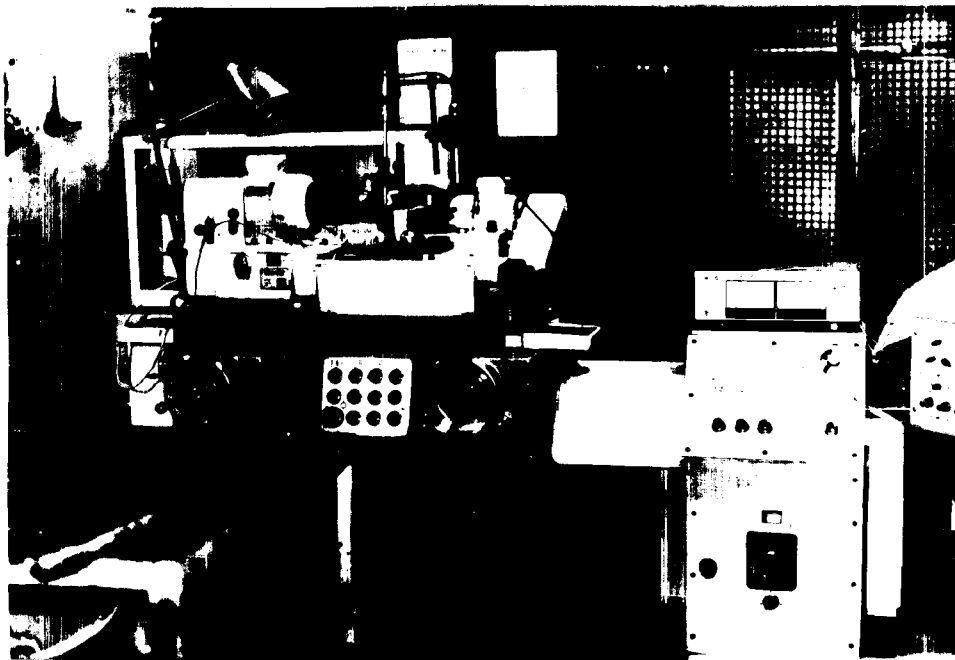
###### a/ Stroj

bruska na kuleto BUA 16 A

Měření experimentu se prováděly při válcovém broušení obvodem kotouče zapichovacím způsobem na brusce BUA 16 A u TOSu Hostivař, která je vybavena dotykovým sledovacím měřidlem MARPOSS FENAR B 101.

Technologické údaje :

|                                     |                                      |
|-------------------------------------|--------------------------------------|
| max. průměr obrobku                 | 160 mm                               |
| vzdálenost hrotů                    | 250 mm                               |
| max. průměr brous. kotouče          | 250 mm                               |
| otáčky brusného vřetena             | 2420, 3290, 1184 min <sup>-1</sup>   |
| otáčky pracovního vřetena           | 250, 355, 500, 710 min <sup>-1</sup> |
| samočinný přísuv brusného vřeteníku | 0,1 - 3 mmø. min                     |



Obr. 12. Bruska BUA 16 A

Při měření byl použit samočinný přísuv brusného  
vřeteníku. Velikost přísuvu byla snímána indukčním sní-  
mačem IWT 302 RFT z DDR. Pro dodržení zapichovacího způ-  
sobu byl nastaven nulový pohyb stolu.

bruska na plocho

Měření experimentu při plochém broušení obvodem  
kotouče bylo provedeno na brusce BPH 20.

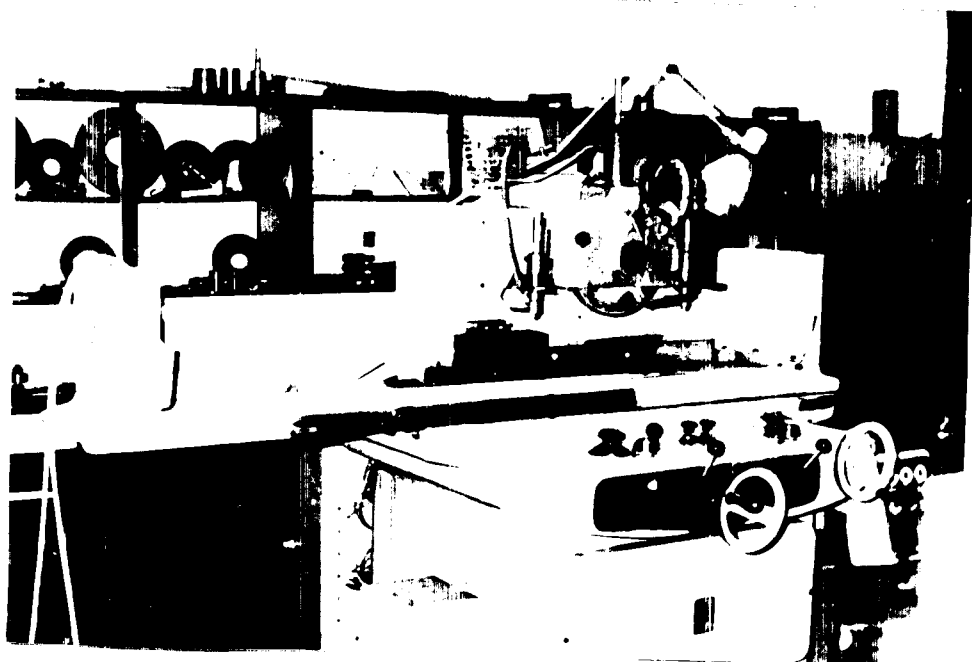
Technologické údaje :

max. průměr brous. kotouče

250 mm

otáčky brusného vřetena

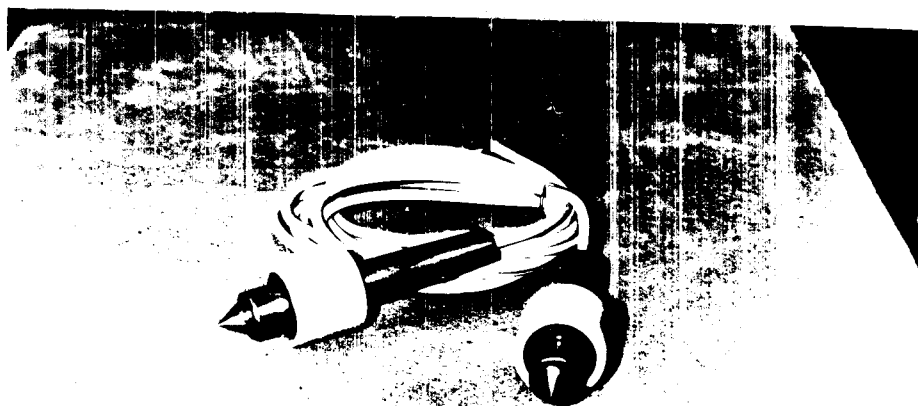
2700, 1420 min<sup>-1</sup>



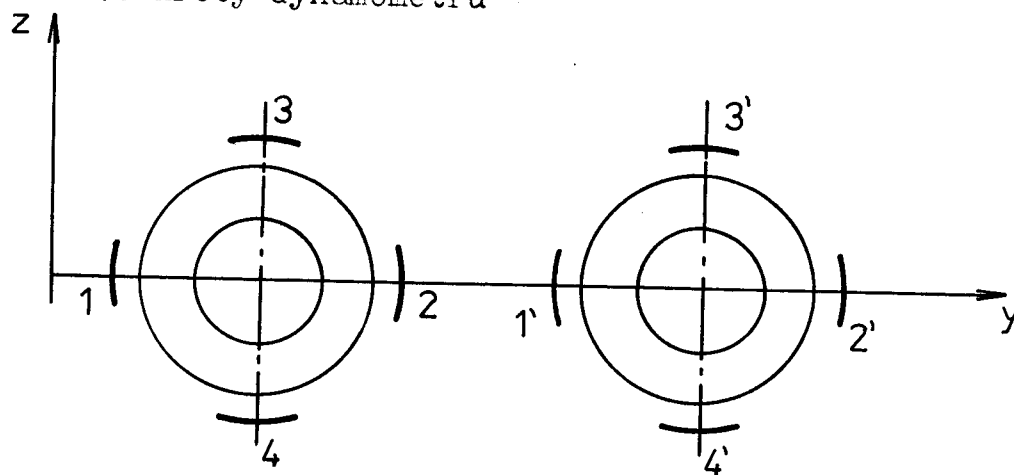
Obr. 13. Bruska BPH 20

b/ Dynamometr  
u brusky na kulato

K měření řezných sil bylo použito návrhu hrotového dynamometru s tenzometry SM - 120, chráněnými proti vniknutí chladicí kapaliny silonovým pouzdrem./ obr. 14 /



Obr. 14. Hroty dynamometru

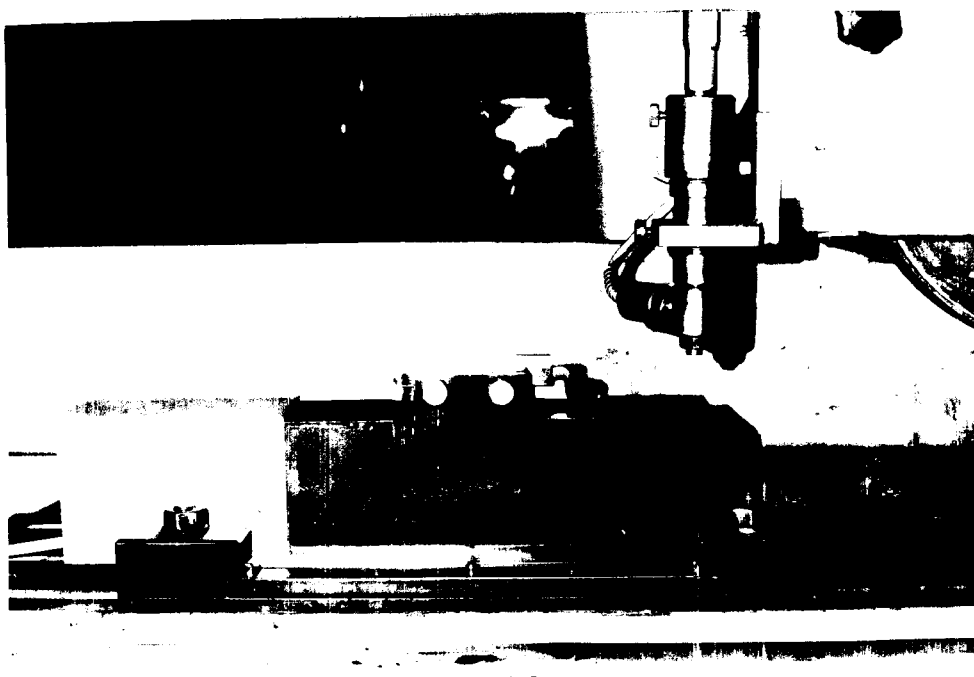


Obr. 15. Uspořádání tenzometrů SM - 120

Tenzometrů bylo použito jako snímačů deformace dynamometru. Radiální složka řezné síly  $F_n$  bude deformovat těla dynamometru ve směru osy y. Tato síla je snímána tenzometry 1, 2, 1', 2'. Umístění tenzometrů v podélné ose dynamometru / x / bylo voleno v bezprostřední blízkosti jeho vetknutí. Uspořádání je na obr. 15.

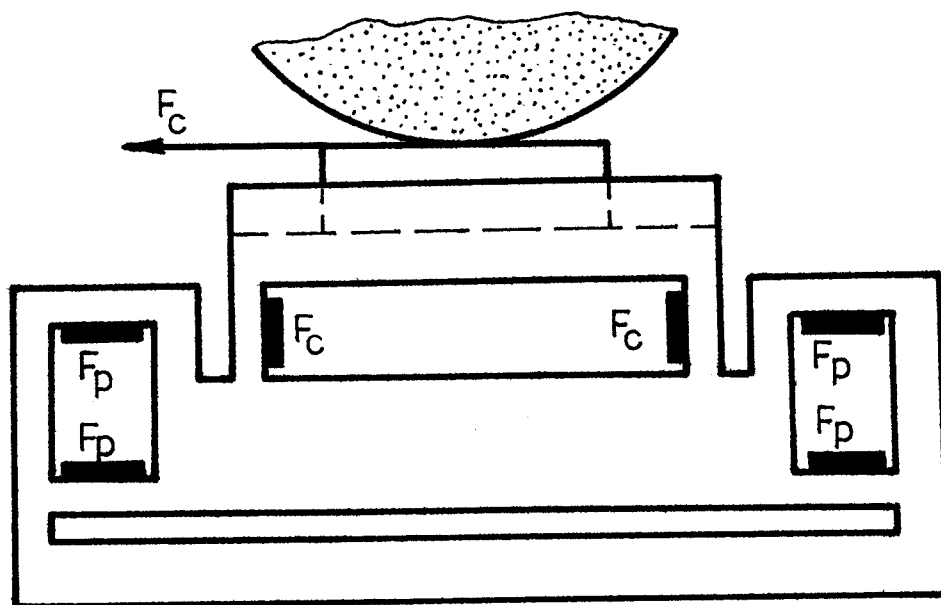
u brusky na plocho

Byl použit dynamometr, který byl zkonstruován pro výzkumný úkol řízený Slovenskou akademií věd. / Obr. 16 /



Obr. 16. Dynamometr použitý u brusky na plocho BPH 20

Konstrukční uspořádání použitého dynamometru je na obr. 17.

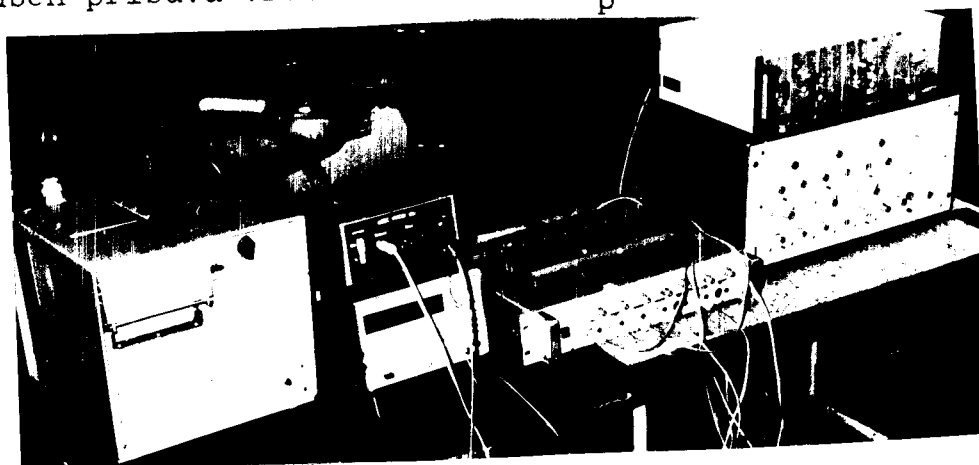


Obr. 17. Konstrukční uspořádání dynamometru

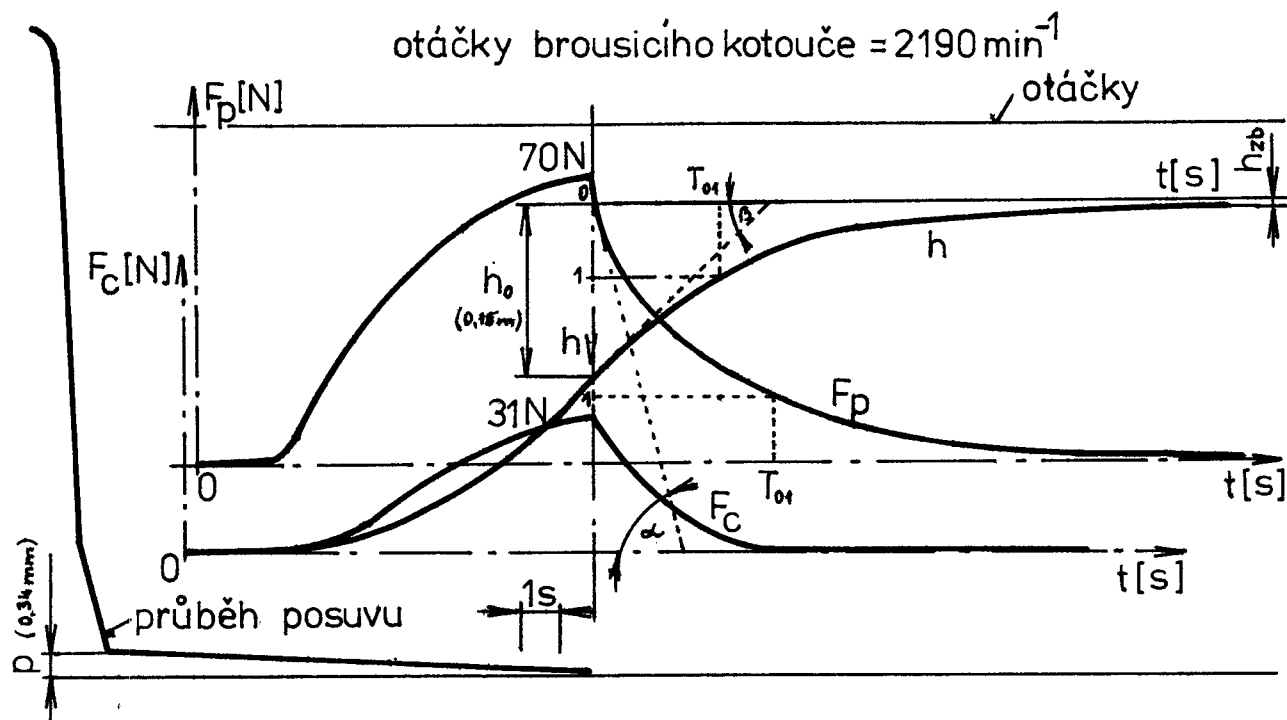
#### c/ Registrační zařízení

Toto zařízení zaznamenávalo při měření tyto veličiny

- radiální složku řezné síly  $F_p$
- tangenciální složku řezné síly  $F_c$
- úbytek materiálu  $h_o$
- průběh přísuvu vřeteníku  $v_p$



Obr. 18. Registrační zařízení

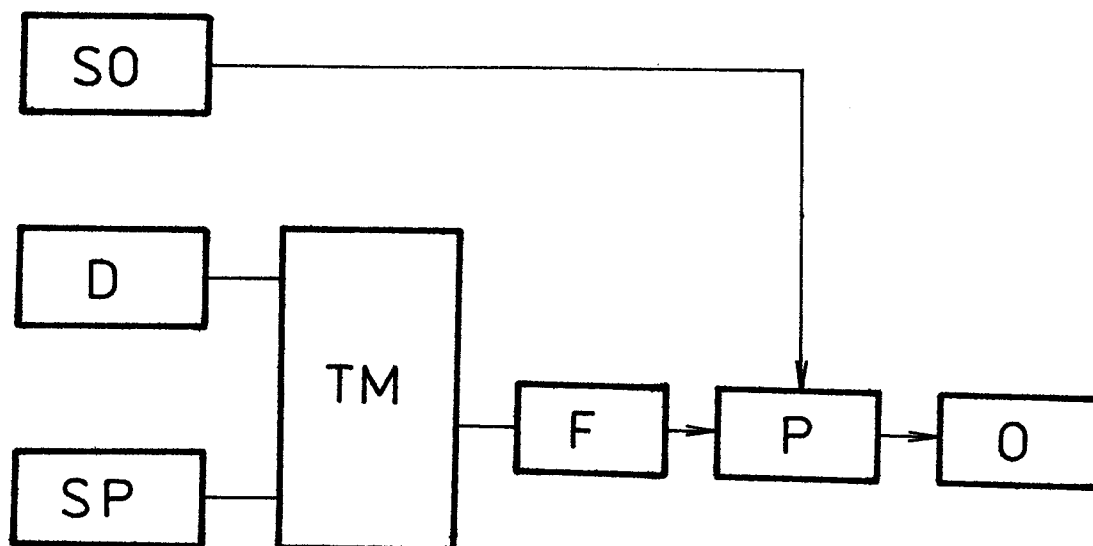


Obr. 19. Záznam vyjiskřovací křivky

Najetím brousicího kotouče do záběru s obrobkem dochází k zatížení dynamometru. Vyvolaná deformace je snímána tenzometry. Elektrický signál tenzometrů je tenzometrickým můstkem veden přes filtr F, dále předzesilovačem P do smyčkového oscilografu O. Blokové schéma je naklesleno na obr. 20.

Elektrický signál v oscilografu řídí osvit fotografického papíru ve směru osy  $n / F_p /$ . Vodorovný pohyb řízeného paprsku světla je zajišťován posuvem papíru. Při měření bylo použito posuvu  $0,5 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ . Přepočty v záznamech na délkové byly použity  $1s = 5,5162$ , pro hodnoty sil bylo prováděno cejchování dle něj pak, prováděny výpočty.

Snímače MARPOSS FENAR jímž je bruska BUA 16 A vyba-  
vena použit, neboť u broušení titanových slitin či titanu  
vzniká velký součinitel tření a docházelo k rozkmitávání  
soustavy.



Obr. 20. Schéma přístrojového zapojení

SO.....snímač otáček MGB 102

D.....dynamometr

SP.....snímač posuvu IWT 302 RFT DDR

TM.....tenzometrický můstek UM - 131

F.....filtr VŠST DP  $f = 200 \text{ Hz}$

P.....předzesilovač HONEYWELL GMBH

O.....smyčkový oscilograf ULTRA VIOLET  
RECORDER 205

#### d/ Vzorky

Pro měření na brusce na kulato byly použity vzorky  
o následujících rozměrech : vzorky VT8

vnější průměr : 65 mm

vnitřní průměr : 20 H8 mm

tloušťka : 5 mm

Pro brusku na plocho dva vzorky VT6.

e/ Použité kotouče / vis. kap. 3.1. /

f/ Použité řezné kapaliny / vis. kap. 3.2. /

Chemické složení a mechanické vlastnosti vzorků materiálů určených k výzkumu jsou v následujících tab. 3, 4, 1, 2.

| Prvek          | VT8    | VT6       |
|----------------|--------|-----------|
| Si             | 0,27   | -         |
| Mo             | 3,31   | -         |
| Ti             | cca 90 | cca 90    |
| Al             | 5,8    | 5 - 6,5   |
| Fe             | 0,13   | -         |
| C              | 0,03   | -         |
| N              | 0,01   | -         |
| H              | 0,0032 | -         |
| O <sub>2</sub> | 0,12   | -         |
| V              | -      | 3,5 - 4,5 |

Tab. 3.1 Chemické složení materiálu vzorků určených k výzkumu řezivosti brousicích kotoučů v % .

| Název        | Označení          | Jednotky | VT8        | VT6        |
|--------------|-------------------|----------|------------|------------|
| mez pevnosti | R <sub>m</sub>    | MPa      | 880 - 1120 | 900 - 1000 |
| mez kluzu    | R <sub>p0,2</sub> | MPa      | 810        | 800 - 900  |
| tažnost      | A <sub>5</sub>    | %        | 9,2        | -          |
| kontrakce    | Z                 | %        | 20         | -          |

pokračování tabulky 4.

| Název                | Označení | Jednotky           | VT8       | VT6       |
|----------------------|----------|--------------------|-----------|-----------|
| vrubová houževnatost | KCU 2    | J.cm <sup>-2</sup> | 30        | 40 - 80   |
| tvrdost              | HB       |                    | 270 - 340 | 320 - 360 |

Tab. 4. Hodnoty mechanických vlastností uvedených vzorků

#### 4.3.2. Postup měření

- 1/ Volba brousicího kotouče
- 2/ Zvuková zkouška kotouče / poklepem dřevěného kladívka na volně zavěšený kotouč / / bez vady zvonový tón /
- 3/ Statické vyvážení kotouče
- 4/ Dynamické vyvážení kotouče
- 5/ Orovnání brousicího kotouče jednokamenným diamantovým orovnávačem / u diamantového kotouče - orovnání SiC kotoučem /
- 6/ Opětovné statické vyvážení a proměření průměru kotouče
- 7/ Orovnání brousicího kotouče / hloubka orovnání 0,04 mm s posuvem 4 mm.s<sup>-1</sup> pro hrubování, po odstranění stop po broušení následovalo 2x jemné orovnání s hloubkou 0,02 mm a jedno vyjiskření s posuvem 2,3 mm.s<sup>-1</sup> / během orovnání bylo přiváděno dostatečné množství ŘK
- 8/ Správné usazení dynamometru
- 9/ Cejchování dynamometru
- 10/ Volba řezných podmínek /  $n_k = \text{konst.}$ ,  $n_o = \text{konst.}$ , nastavení přísuvu, doba vyjiskření, velikost zpomalení, nastavení přídavku na broušení /
- 11/ Příprava snímačů polohy brusného vřeteníku úběru materiálu do výchozí polohy

- 12/ Změření průměru obrobku - výchozí průměr / u brusky na plocho - délka, šířka /
- 13/ Upnutí obrobku mezi hroty / u broušení na plocho - do upínacího místa na dynamometru /
- 14/ Volba ŘK
- 15/ Vyvážení tenzometrického můstku
- 16/ Najetí do nulové polohy brusným vřeteníkem a nastavení konstantní hloubky odebírané vrstvy /  $V = 18 \text{ mm}^3 \cdot \text{mm}^{-1}$  /
- 17/ Zapnutí automatického přísuvu brousicího vřeteníku / vis. pozn. 1 /
- 18/ Snímání údajů do vyjiskřovací křivky - zapnutí regist. zařízení
- 19/ Vypnutí registračního zařízení
- 20/ Zápis naměřených hodnot do protokolu / vis. příloha 3 /
- 21/ Změření drsnosti povrchu obrobku  $R_a$  drsnoměrem HOMMEL TESTER T3, snímače TFE 100, délky dráhy 2 mm / vis. příloha 3 /
- 22/ Broušení bez vyjiskřování 3-4x za stejných podmínek z důvodu možnosti zjistit hodnoty pro výpočet poměrného objemového obrusu / m /, po prvním broušení je provedeno měření drsnosti  $R_a$  bez vyjiskřování
- 23/ Změření průměru obrobku
- 24/ Měření úbytku kotouče planžetovou metodou, profil planžety je vyhodnocen na universálním mikroskopu / vis. příloha 3 /
- 25/ Orovnávání brousicího kotouče a opakování celého postupu / od bodu 5 /, změníme parametry 10, 14 / vis. pozn. 2,3 /
- 26/ Vyhodnocování vyjiskřovací křivky včetně záznamu přísuvu / záznam z ULTRA VIOLET RECORDER 205 / vis. příloha 4 /
- 27/ Výpočet parametrů pro sestavení diagramu broušení / vis. kap. 4.1.2. /

Pozn. 1 : Rychlost přísuvu  $v_p$  byla měřena indukčním snímačem. Z grafického záznamu na registračním zařízení bylo zjištěno, že daný hydraulický systém neumožňuje zachovávat konst. rychlost přísuvu. Pro výsledné hodnoty byly brány hodnoty odečtené ze záznamu. Pro konstantní  $v_p$  by bylo výhodné použít NC řízení.

Pozn. 2 : Od 1/, jen tehdy vyměňujeme-li i brusný kotouč.

Pozn. 3 : U diamantového kotouče nebylo po každém broušení orovnění provedeno.

## 5. NÁVRH TLAKOVÉHO CHLAZENÍ

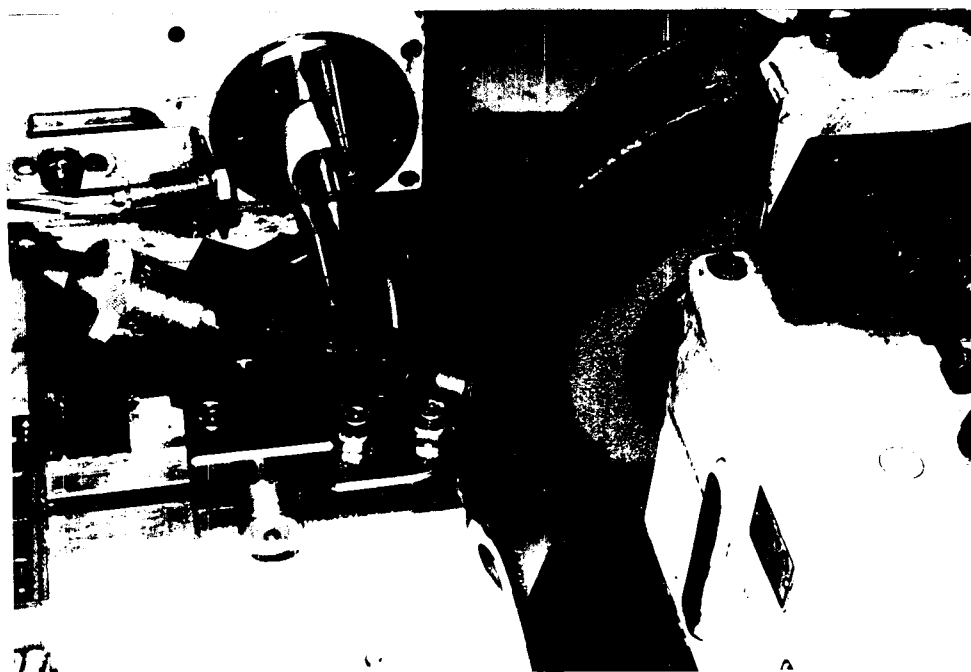
Tlakový způsob chlazení má za cíl znásobit běžné fyzikálně mechanické účinky chlazení. Nasazuje se zvláště v extrémních podmínkách broušení těžkoobrobitelných materiálů, při broušení vysokými a supervysokými reznými rychlostmi, při abrazivním obrábění a zapichovacím broušení na automatických bruskách. / Platí také zásada, že do místa řezu se má dopravit asi 1 litr kapaliny za 1 minutu pro šířku broušícího kotouče 1 mm, nebo 30 -60 litrů za minutu na 1 kW užitečného výkonu broušení. / / 1 /

Tlakovým chlazením dosáhneme efektivnějšího působení ŘK, a to především spočívá ve zlepšení odvodu tepla z exponovaného místa broušení. Nejlepší účinností tlakového chlazení dosáhneme tím, že paprsek přívodu ŘK nasměrujeme tečně do místa styku obrobek - kotouč. Požadujeme, aby rychlost přívodu kapaliny se rovnala obvodové rychlosti kotouče. ŘK je rovnoměrně unášena až do místa broušení a nedochází k rozstříku. Tímto způsobem se způsobem se zlepšuje nejen chlazení, ale i adhézní / mazací / účinek ŘK.

Je konstatováno, že zvýšený tlak má vliv na snižování sil při broušení zhruba o 10 % / 17 /. Ke snížení dojde rovněž u drsnosti obráběného materiálu. Podstatný vliv se však projevuje u kvality povrchu z pohledu zbytkových pnutí, která mají značný vliv na životnost součástí při složitém dynamickém namáhání.

V předcházejících procesech na katedře obrábění a montáže VŠST bylo používáno tlakového chlazení, kdy se chladicí kapalina přiváděla do místa řezu pod tlakem zhruba 0,6 MPa. Ukázalo se však, že předpokládané zlepšení drsnosti a snížení řezných sil nadosáhlo úrovně, která byla očekávána. Negativním se projevilo i značné zhoršení hygieny práce, takže by tento způsob nebylo možné aplikovat bez dostatečného zakrytování pracovního prostoru.

Tuto nevýhodu by mohl odstranit způsob hydroaerodynamického nebo hydrodynamického přívodu chladicí kapaliny / 7 /. Hydrodynamický přívod kapaliny je na obr. 21.



Obr. 21. Hydrodynamický přívod kapaliny

Princip této metody spočívá v urychlení přiváděné kapaliny z vestavěného čerpadla, bez nároků na zvýšení dodávaného množství a tlaku kapaliny. Navržený tvar mezer mezi broušicím kotoučem a krytem by měl zaručit urychlení kapaliny na podstatně vyšší rychlost, než jaké je dosaženo volným výtokem z přívodní hubice při klasickém přívodu kapaliny.

#### 4. VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ

Získané hodnoty z jednoho cyklu, tzn. z měření při nastavení přísuvu na určitou hodnotu, byly zaznamenávány do formuláře / příloha č. 3 /. Jedná se zhruba o 60 údajů. Pro sestavování diagramu broušení bylo používáno od 5 do 14 měření při různých hodnotách ekvivalentní tloušťky třísky  $h_{ekv}$ .

Pro následné výpočty pomocných kritérií, z naměřených hodnot, bylo použito programu zhotoveného v programovacím jazyku BASIC / příloha č. 2 /. Úprava programu došlo na mikropočítači TESLA JVC 80.

Při měření drsnosti povrchu  $R_a^V / R_a /$  bylo prováděno 3 až 5 měření a jako výsledná hodnota byl brán jejich aritmetický průměr.

Vzhledem k velkému počtu měření nebylo ve většině případů prováděno statistické zpracování získaného souboru dat. Bylo používáno pouze tehdy, když naměřené hodnoty vykazovaly velký rozptyl. V některých případech nešlo proložit křivku vyjadřující závislost parametru na  $h_{ekv}$  pro rozptyl hodnot / viz. diagram broušení č.3, 4 /. Zanešeny jsou pouze naměřené hodnoty a v dalších pracích bude nutné tyto průběhy doplnit.

Rozsah  $h_{ekv}$  se pohyboval v intervalu od 0,01 do 0,4  $\mu m$ . Pro vyšší hodnoty  $h_{ekv}$  docházelo v některých případech k rozkmitání soustavy a zřejmě k ovlivnění měřených hodnot.

Tečná složka výsledné řezné síly byla vypočítána ze záznamu oscilografu a kontrolována z rozdílu příkonu na brousicím vřeteníku.

Pro možnost srovnání námi naměřených hodnot s dostupnými výsledky z jiných pracovišť byl počítán specifický objem odebíraného materiálu  $V' / mm^3 \cdot mm^{-1}$  / a specifický výkon  $Z' / mm^3 \cdot mm^{-1} \cdot s^{-1} /$ .

Do diagramů broušení nebyla zpracována hodnota  $\Delta V'$ , která představuje objem materiálu odebraného brousicím kotoučem mezi dvěma orovnáními, vztežený na 1 mm činné šířky záběru brousicího kotouče. ~~Pro získání této hodnoty je zapotřebí zpracovat značný objem materiálu, který však byl v našem případě limitován.~~

Sestavené diagramy broušení dávají dobrou představu o řezivosti brousicích kotoučů a obrobitelnosti materiálu. Umožňují technologovi stanovit technologické podmínky v závislosti na předepsaných výkresových hodnotách.

Během vyhodnocování naměřených hodnot se ukázala nelineární závislost v logaritmických souřadnicích pro některé druhy brousicích kotoučů a řezné kapaliny.

Lineární byla občas jen na relativně malém intervalu  $h_{ekv}$ .

Pro snadnější vyhodnocování výsledků zaznamenaných do diagramů broušení DB.č. 1 až 11, ~~/ příloha č. 1 /~~, byly sestaveny tabulky č. 5 - 9 pro hodnoty  $h_{ekv} = 0,1$ .

Ještě přehlednější je uspořádání ve sloupcových diagramech ~~/ Na obr. 22 /~~. ~~viz str. 18-23~~ ),

Experimenty byly prováděny jak při broušení na plocho, tak při vnějším válcovém broušení obvodem kotouče.

Tab.5 VT8 (BUA 16 A)

| Brousící<br>kotouček | EMULZIN H 5% |           |            |         |                      |             | ABRASOL B |           |            |         |                      |             |
|----------------------|--------------|-----------|------------|---------|----------------------|-------------|-----------|-----------|------------|---------|----------------------|-------------|
|                      | $\eta$       | $m_{0,1}$ | $a'_{0,1}$ | $\xi_v$ | $R_{a0,1}^v [\mu m]$ | $v_k [m/s]$ | $\eta$    | $m_{0,1}$ | $a'_{0,1}$ | $\xi_v$ | $R_{a0,1}^v [\mu m]$ | $v_k [m/s]$ |
| DBČ.1 C4925 L9V      | 0,0220       | 4,02      | 4,7        | 0,016   | 1,35                 | 35          | 0,0580    | 3         | 52         | 0,128   | 0,45                 | 35          |
| DBČ.2                |              |           |            |         |                      |             |           |           |            |         |                      |             |

Tab.6 VT8 (BUA 16 A)

| Brousicí<br>kotouč | DIOL 2% |           |            |          |                          |             | ABRASOL B |           |            |          |                          |             | DB Č.4 |
|--------------------|---------|-----------|------------|----------|--------------------------|-------------|-----------|-----------|------------|----------|--------------------------|-------------|--------|
|                    | $\eta$  | $m_{0,1}$ | $a'_{0,1}$ | $\rho_v$ | $R_{a0,1}^v$ [ $\mu m$ ] | $v_k$ [m/s] | $\eta$    | $m_{0,1}$ | $a'_{0,1}$ | $\rho_v$ | $R_{a0,1}^v$ [ $\mu m$ ] | $v_k$ [m/s] |        |
| DB Č.3 C4925K-L 9V | 0,0149  | 0,70      | 4,7        | 0,0085   | 1,75                     | 15          | 0,1960    | 8,1       | 48         | 0,1688   | 0,86                     | 15          |        |

Tab.7 VT8 (BUA 16 A) Hydrodynamický způsob

| Brousicí<br>kotouč | ABRASOL B |           |            |         |                      |                    | ABRASOL B |           |            |         |                      |                    | DBČ.6 |
|--------------------|-----------|-----------|------------|---------|----------------------|--------------------|-----------|-----------|------------|---------|----------------------|--------------------|-------|
|                    | $\gamma$  | $m_{0,1}$ | $a'_{0,1}$ | $\xi_v$ | $R_{a0,1}^v [\mu m]$ | $v_k [\text{m/s}]$ | $\gamma$  | $m_{0,1}$ | $a'_{0,1}$ | $\xi_v$ | $R_{a0,1}^v [\mu m]$ | $v_k [\text{m/s}]$ |       |
| DBČ.5 C4925K-L 9V  | 0,0489    | 2,35      | 48         | 0,0765  | 0,64                 | 35                 | 0,0930    | 4,0       | 43         | 0,1453  | 0,64                 | 15                 |       |

Tab.8 VT6 (BPH 20)

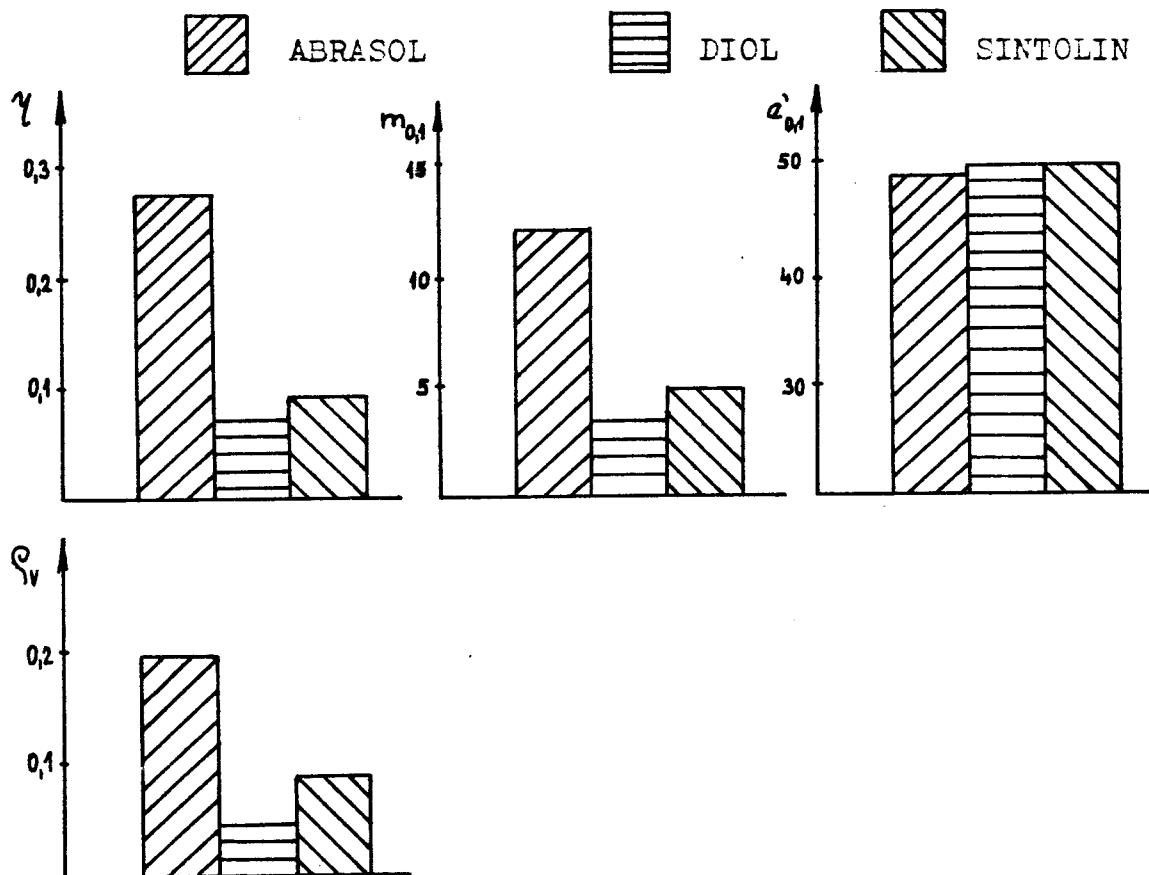
| Brousici kotouč                       | ABRASOL B |           |            |          |                      |             | DIOL 2%  |           |            |          |                      |             |
|---------------------------------------|-----------|-----------|------------|----------|----------------------|-------------|----------|-----------|------------|----------|----------------------|-------------|
|                                       | $\gamma$  | $m_{0,1}$ | $a'_{0,1}$ | $\rho_v$ | $R_{a0,1}^v [\mu m]$ | $v_k [m/s]$ | $\gamma$ | $m_{0,1}$ | $a'_{0,1}$ | $\rho_v$ | $R_{a0,1}^v [\mu m]$ | $v_k [m/s]$ |
| DBČ.7 C49 25 J 9V                     | 0,0500    | 2,9       | 58         | 0,0658   | 0,76                 | 35          | —        | —         | —          | —        | —                    | —           |
| DBČ.8 URDIA 160/125-<br>-100 - B VIII | 0,2463    | 13,26     | 48         | 0,1943   | 4,4                  | 35,13       | 0,0653   | 3,2       | 49         | 0,0435   | 4,5                  | 35,21       |
|                                       |           |           |            |          |                      |             |          |           |            |          |                      | DBČ.9       |

Tab.9 VT6 (BPH 20)

| Brousici kotouč                        | SINTOLIN 5% |           |            |          |                      |             | ABRASOL B |           |            |          |                      |             |
|----------------------------------------|-------------|-----------|------------|----------|----------------------|-------------|-----------|-----------|------------|----------|----------------------|-------------|
|                                        | $\gamma$    | $m_{0,1}$ | $a'_{0,1}$ | $\rho_v$ | $R_{a0,1}^v [\mu m]$ | $v_k [m/s]$ | $\gamma$  | $m_{0,1}$ | $a'_{0,1}$ | $\rho_v$ | $R_{a0,1}^v [\mu m]$ | $v_k [m/s]$ |
| DBČ.10 URDIA 160/125-<br>-100 - B VIII | 0,0896      | 4,39      | 49         | 0,0779   | 4,15                 | 35,21       | —         | —         | —          | —        | —                    | —           |
| C49 25 K-L 9V                          | —           | —         | —          | —        | —                    | —           | 0,2526    | 4,8       | 49         | 0,281    | 9,9                  | 18,4        |
|                                        |             |           |            |          |                      |             |           |           |            |          |                      | DBČ.11      |

BPH 20 - VT6 - URDIA 160/ 125-100 B VIII

$v_k = 35 \text{ m/s}$

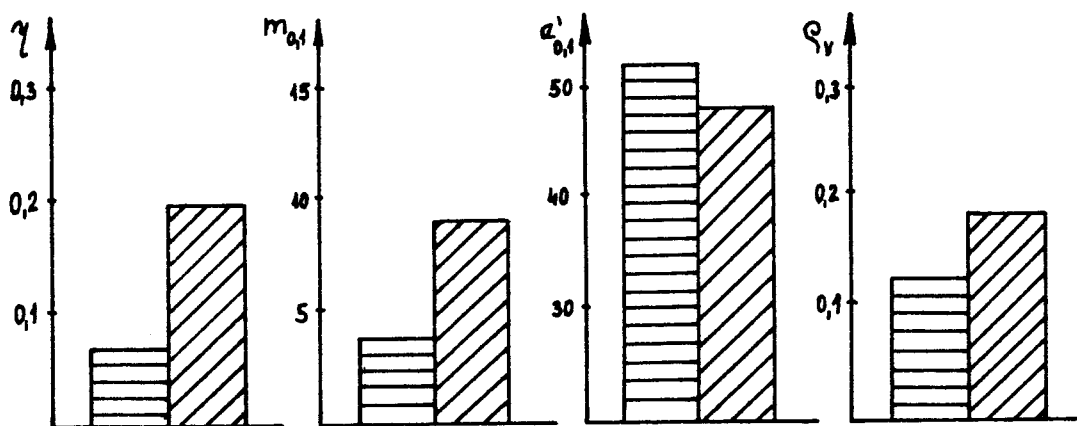


Obr. 22.

BUA 16 A - VT8 - C49 25 J-K 9V

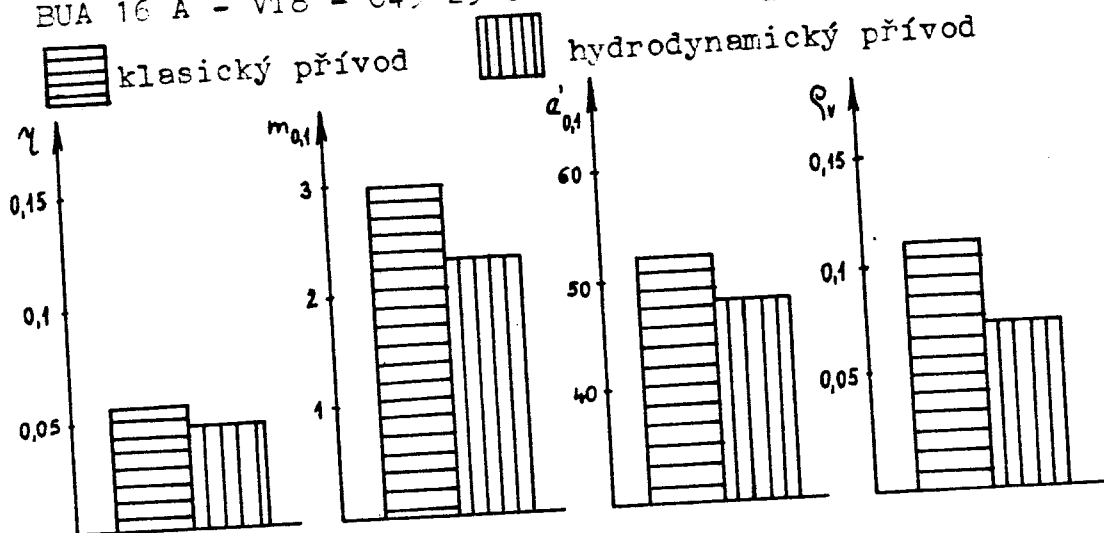
klasický přívod kapaliny - ABRASOL B

Legend:  $v_k = 35 \text{ m/s}$  (horizontal lines),  $v_k = 15 \text{ m/s}$  (diagonal lines)



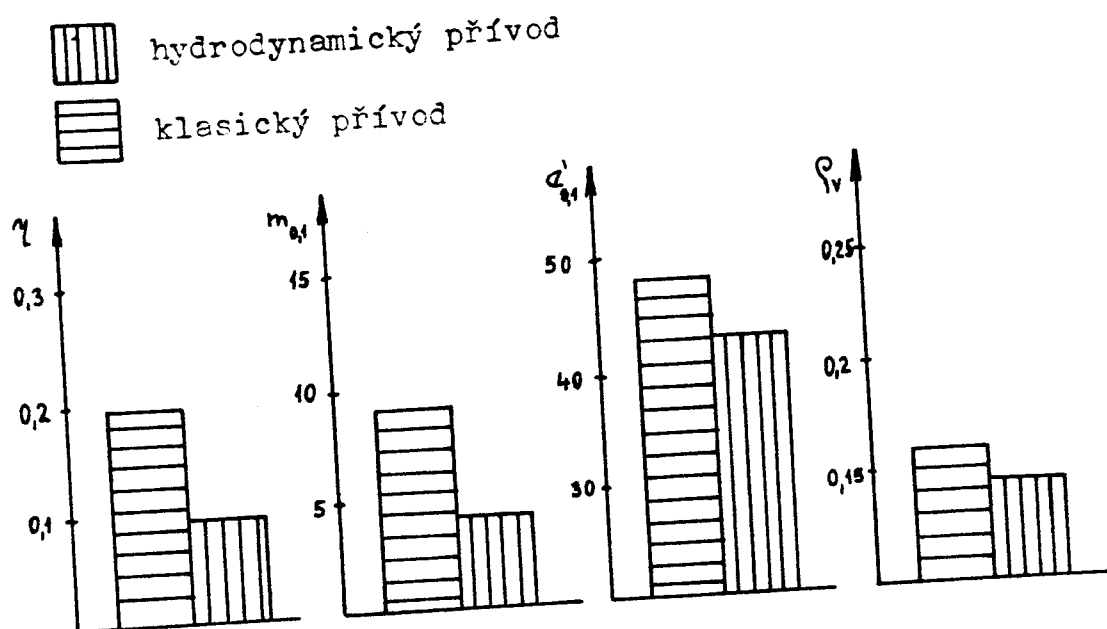
Obr. 23.

BUA 16 A - VT8 - C49 25 J-K 9V  $v_k = 35 \text{ m/s}$  ABRASOL B



Obr. 24.

BUA 16 A - VT8 - C49 25 J-K 9V  $v_k = 15 \text{ m/s}$  ABRASOL B



Obr. 25.

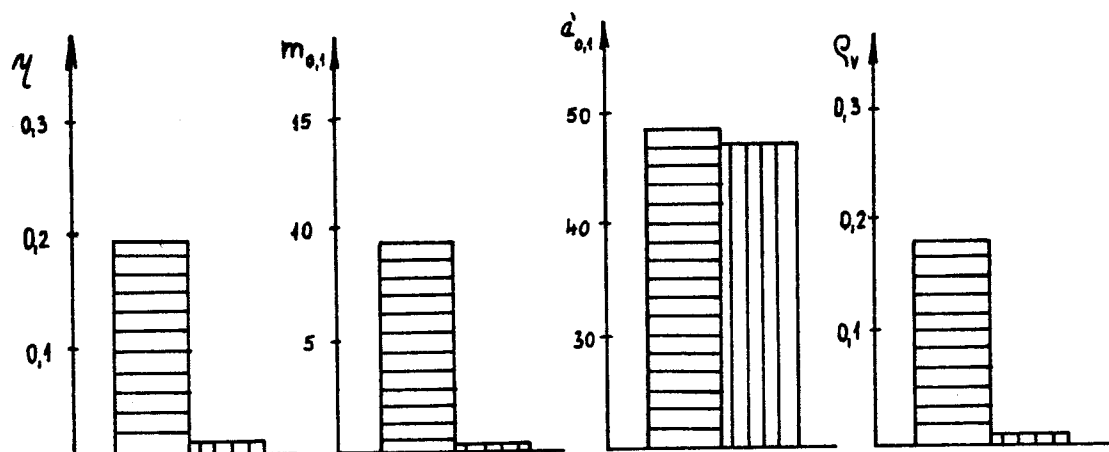
BUA 16 A - VT8 - C49 25 J-K 9V  $v_k = 15 \text{ m/s}$



ABRASOL B



DIOL



Obr. 26.

BPH 20 - VT6 - C49 25 J-K 9V

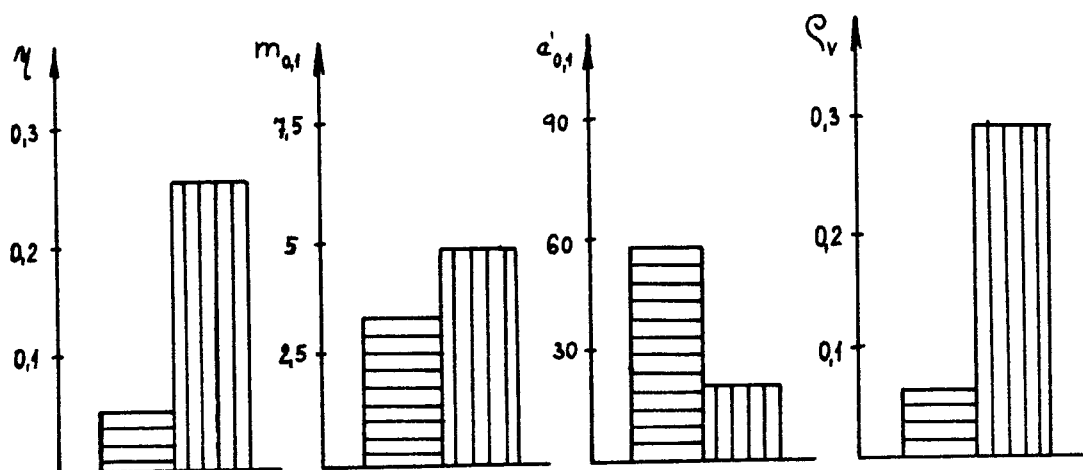
ABRASOL B



$v_k = 35 \text{ m/s}$



$v_k = 18 \text{ m/s}$



Obr. 27.

Byly použity kotouče C49 25 K-L 9V v obou případech a diamantový kotouč s bakelitovou vazbou pouze v případě broušení na plocho. V případě broušení na kúlsto nebylo možné z časových důvodů diamantový kotouč použít, neboť bylo nutné předem provést jeho opracování a to bylo vázáno na výrobu speciálního trnu.

Řezné podmínky byly voleny na základě doporučených hodnot z literatury. Byly použity obvodové rychlosti broušicího kotouče 35 m/s a 15 - 18 m/s. V případě diamantového kotouče s bakelitovou vazbou se doporučuje řezná rychlost okolo 17 m/s. V experimentech se podařilo zvládnout pouze řeznou rychlost 35 m/s. Pro porovnání výsledků bude nutné v dalších pracech aplikovat i doporučenou nižší řeznou rychlost.

Získané výsledky potvrzují závěry práce /10/, které ukazují na nevhodnost syntetických řezných kapalin a emulzí z pohledu poměrného obrusu  $\mu$  ve srovnání s řezným olejem ABRASOL B při broušení diamantovým broušicím kotoučem. Při srovnání specifické energie nejsou rozdíly tak podstatné.

V případě broušení broušicím kotoučem C49 25 K 9V dochází k značným rozdílům i při porovnání měrné energie  $e_{0,1}^*$ .

Úkolem diplomové práce bylo rovněž zkoumat vliv různého přívodu řezné kapaliny do zóny broušení. Podle literatury /7/ byl zvolen hydrodynamický způsob přívodu řezné kapaliny. Výsledky měření ukazují na značné rozdíly při použitých obvodových rychlostech broušicího kotouče. V případě  $v_k = 15$  m/s u použití hydrodynamického přívodu řezné kapaliny dochází ke snížení specifické energie  $e_{0,1}^*$  a drsnosti povrchu  $R_{a0,1}^v$ . Hodnoty poměrného obrusu jsou však nepříznivé. V případě  $v_k = 35$  m/s dochází i k

zhoršení drsnosti po vyjiskření  $R_{a0,1}^v$ . Nižší hodnota specifické energie však přináší předpoklad i menšího tepelného zatížení povrchu součásti a možného zlepšení hodnot zbytkového pnutí, což však bude nutné v dalších pracech potvrdit.

Zajímavé výsledky se ukazují při porovnávání získaných hodnot za různých řezných rychlostí kotouče  $v_k$ .

Sloupcové diagramy na obr. č. 23 - 27, zdůrazňují výhodnost použití nižší řezné rychlosti  $v_k$  z pohledu poměrného obrusu a specifické energie. V obou případech však dochází k mírnému zhoršení drsnosti po vyjiskření při  $h_{ekv} = 0,1$ .

## 7. ZÁVĚR

Diplomová práce chtěla svými výsledky alespoň minimálně přispět k objasnění problémů při broušení tita-  
nových slitin. Měla svým způsobem průzkumný charakter a měla soustředit pozornost dalších řešitelů na konkrétnější oblasti. Pro potřeby průmyslové praxe bude zřejmě nejvhodnější použití diagramů broušení, které informují o celém rozsahu používaných  $h_{ekv}$ ,<sup>i</sup> když je nutné si uvědomit, že pro různé řezné rychlosti  $v_k$  bude mít diagram broušení jiné hodnoty. Pro snazší orientaci při volbě základních technologických podmínek, tj. volba brousicího kotouče a řezné kapaliny slouží vybraná kritéria jako jsou např.  $\gamma$ ,  $\zeta_v$ ,  $m_{0,1}$ ,  $e'_{e,1}$ . Kritérium obrobitelnosti  $O_B$  nebylo možné použít vzhledem k problematickému snímání úběru materiálu sledovacím měřidlem MARPOSS, který svou konstrukcí nevyhovoval pro větší součinitel tření tita-  
nové slitiny.

Získané diagramy broušení je však pro vyčerpávající informace pro uživatele nutné doplnit hodnotami zbytkového pnutí pro různé  $h_{ekv}$  a trvanlivostními závislostmi, které vyjadřují vztah  $m$ ,  $R_a$  na specifickém objemu, hodnoty, které budou mít význam především při nasazení brusek s NC řízením.

Během řešení diplomové práce vyvstala řada otázek, na které bude zapotřebí zodpovědět v dalších pracích. Za prvé bude nutné ověřit průběh závislosti sledovaných parametrů na  $h_{ekv}$ , neboť se potvrzuje již dříve zjištěná skutečnost lineárnosti v logaritmickém vynesení na relativně malém intervalu. Druhým závažným problémem bude stanovení poměru tečné a normálové řezné síly, který vykazuje značné kolísání v oblasti malých ekvivalentních hloubek řezu.

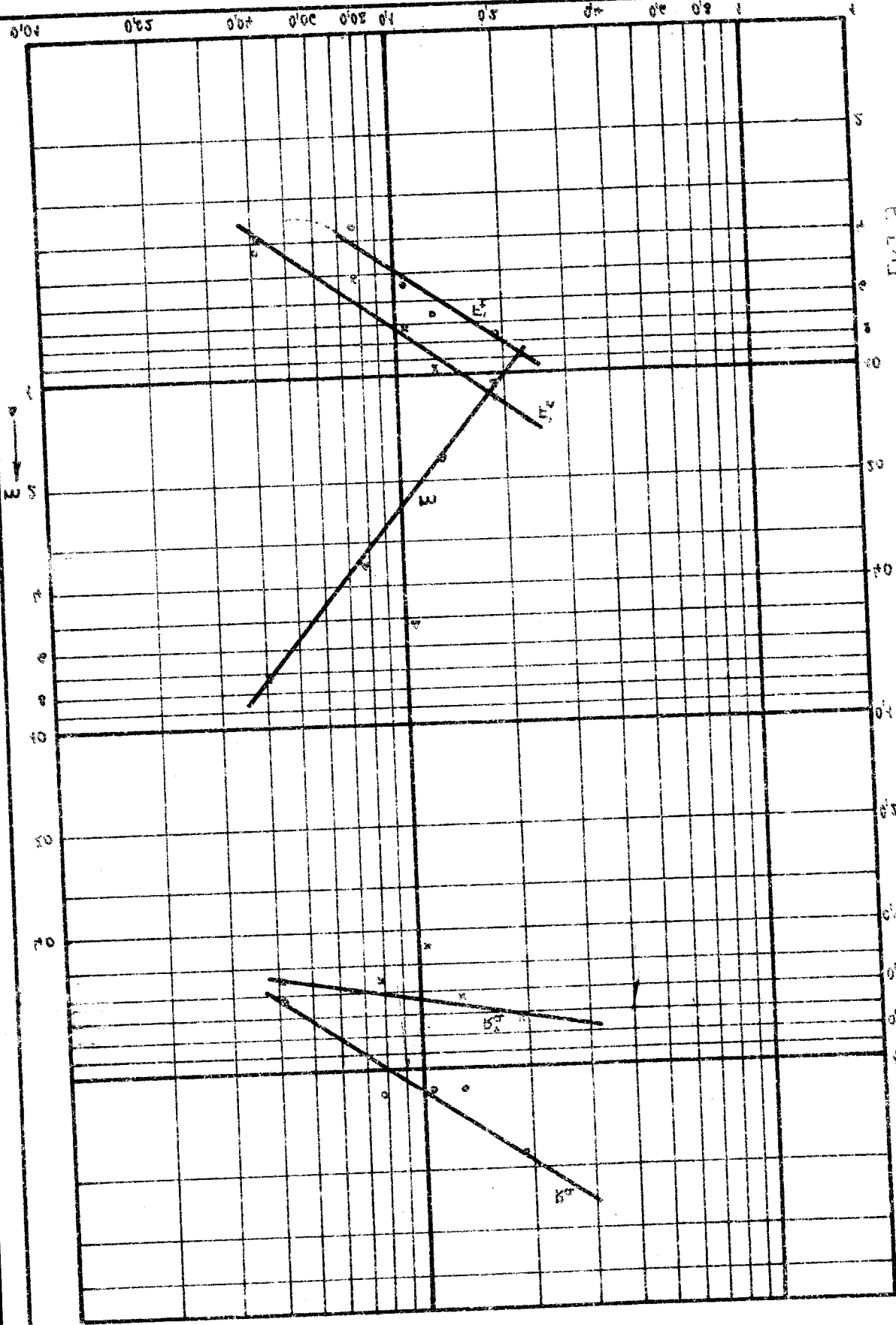
### Seznam použité literatury

- /1/ VIGNER, M.; PŘIKRYL, Z.: Obrábění, SNTL, Pha 1984
- /2/ BUDA, J.; BEKÉS, J.: Teoretické základy obrabania kovov, Brat., SVTL, 1973
- /3/ MIKOVEC, M. : Obrábění materiálů s velkou pevností a tvrdostí, SNTL, Pha 1982
- /4/ PLUHAŘ, J.; KORITA, J. : Strojírenské materiály, SNTL, Pha 1981
- /5/ ČERNOCH, S. : Strojně technická příručka, SNTL, Pha 1977 vydání 13
- /6/ BUMBÁLEK, B.: Metodika sestavování diagramů broušení, VÚ Brno 1981
- /7/ CHUDOBIN, L.V.: Technika primenenija smažočno-ochlaždajuščich sredstv v metalloobrabotke, Mašinostrojenije, Moskva 1977
- /8/ MOSER, M. : Microstructures of ceramics, Akadémiai Kiado, Budapest 1980
- /9/ SHAW, M.C.; YANG, C.T.: Trans. ASME 78, 86, 1966
- /10/ HÖNSCHEID, W.: Abgrenzung werkstoffgerechter Schleifbedingungen für die Titanlegierung TiAl6V4. / Disertační práce /. TH Aachen, 1975
- /11/ BUMBÁLEK, B.: Problematika obrábění těžkoobrobitel. materiálů. Ing. technologie obrábění tvarových ploch u součástí se ztíženou obrobitelností ČSVTL, Brno 1984
- /12/ Výzkumná zpráva, VÚSTE Pha, 1979
- /13/ Výzkumná zpráva, VÚSTE Pha, 1980
- /14/ Výzkumná zpráva, VÚSTE Pha, 1981

- /15/ Výzkumná zpráva, VÚSTE Pha, 1985
- /16/ HIROSHI, E.; KISHI KOZO : Improvement of grinding process for difficult - to grind materials by action the jet infusion of grinding fluids. Proc. Int. Conf. Prod. Eng. TOKYO 1974, str. 665 - 670.
- /17/ SLÁDEK, V.: Vlastnosti a použití speciálních řezných kapalin. In. Efektivní využití nových řezných kap. ve strojírenství ČVTS - VÚOSO Pha 1984
- /18/ GAZDA, J. a kol. : Obrobitelnost kovových materiálů broušením. / Výzkumná zpráva /. VŠST Liberec, SF, KOM, LIBEREC 1985
- /19/ VIEREGGE, G.: Zerspanung der eisenwerkstoffe, 2.vydání, 1970, v stahleisen M.B.H / Düsseldorf
- /20/ KUBIŠTA, P.: Příspěvek k problematice hodnocení pracovních podmínek při broušení. Strojírenská výroba 27, 1979, č.2, str. 109 - 112.



БЛГОРС 8°1



μσκα (mm)

$\downarrow E_0$   $\downarrow E_1$  [M]

|      |      |
|------|------|
| μσκα | 28   |
| μσκα | 0.00 |
| μσκα | 32   |
| μσκα | 32   |
| μσκα | 32   |
| μσκα | 32   |

$\downarrow \delta_0$   $\downarrow \delta_1$  [mm]

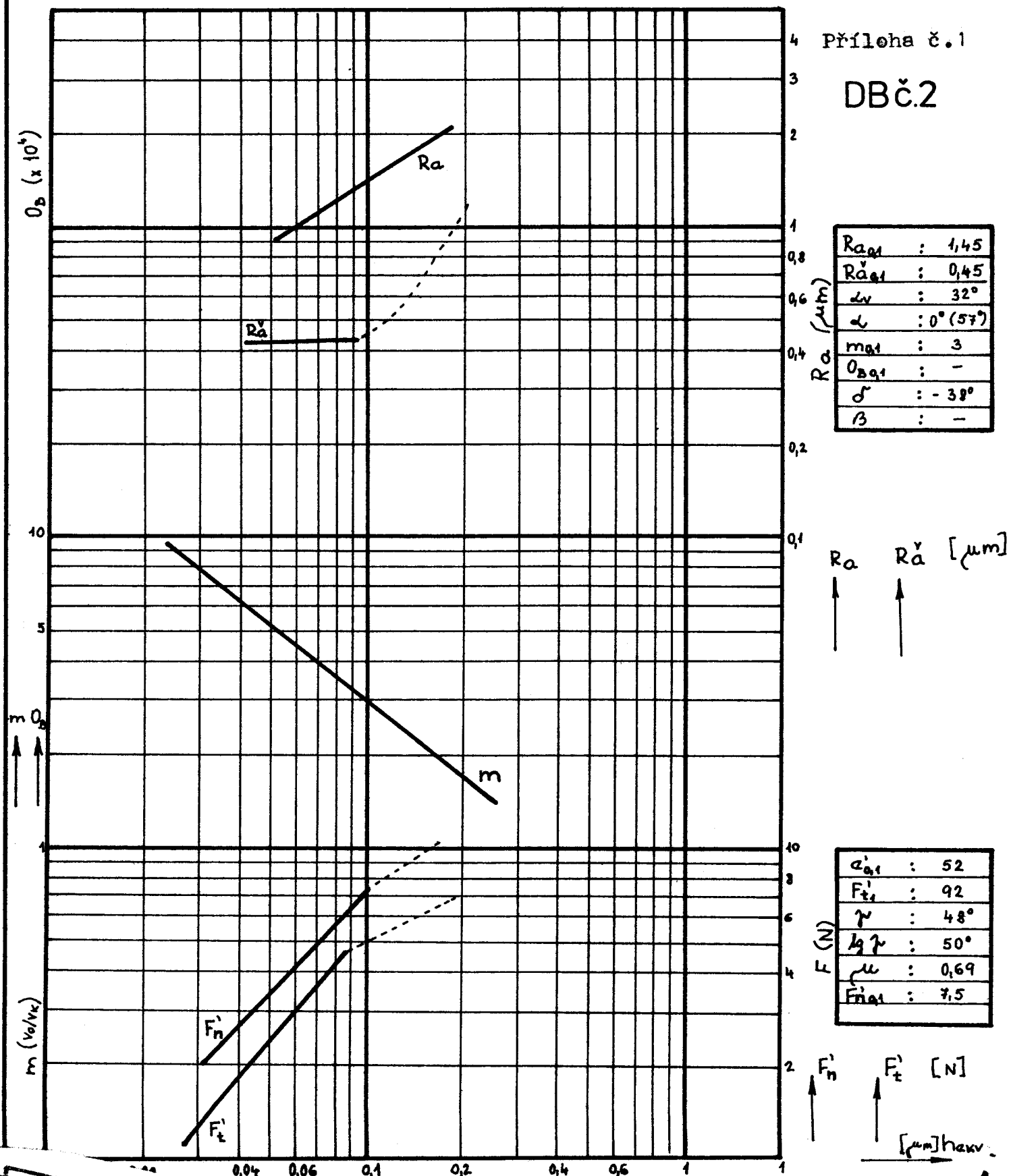
|      |    |
|------|----|
| μσκα | 20 |
| μσκα | 32 |
| μσκα | 32 |
| μσκα | 32 |
| μσκα | 32 |
| μσκα | 32 |

DBC2

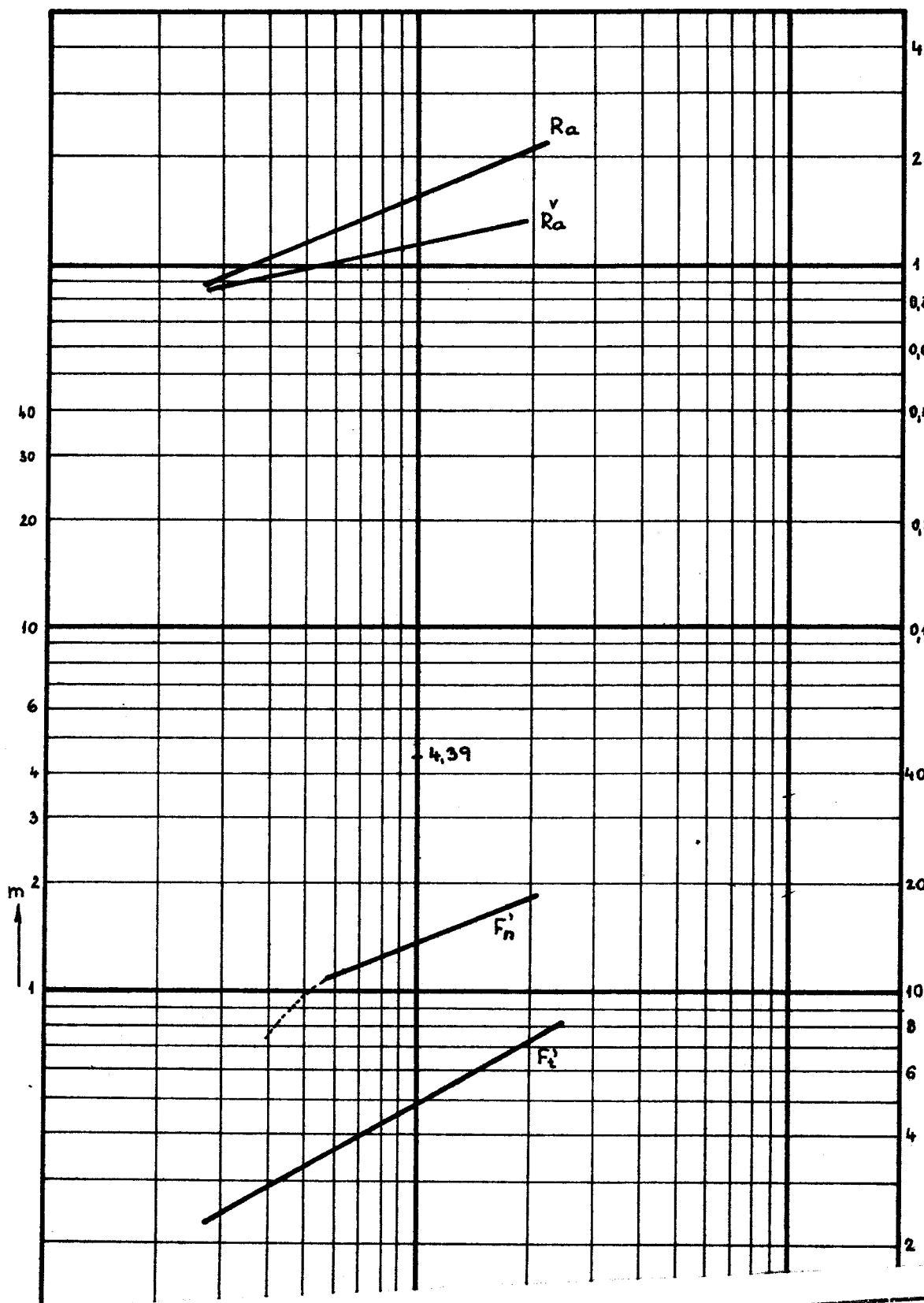
πληροφο 2.1

|                |                  |                 |
|----------------|------------------|-----------------|
| μσκα (mm) : 30 | μσκα (mm) : 0.12 | 21501: BNV 12 V |
| μσκα : 21.88   | μσκα : 32        | μσκα : 32       |
| μσκα (mm) : 32 | μσκα (mm) : 32   | μσκα (mm) : 32  |
| μσκα (mm) : 32 | μσκα (mm) : 32   | μσκα (mm) : 32  |
| μσκα (mm) : 32 | μσκα (mm) : 32   | μσκα (mm) : 32  |
| μσκα (mm) : 32 | μσκα (mm) : 32   | μσκα (mm) : 32  |

|                                   |                                    |  |                                  |                                          |  |
|-----------------------------------|------------------------------------|--|----------------------------------|------------------------------------------|--|
| Materiál: <b>VT8</b>              |                                    |  | Brousicí kotouč: <b>C4925L9V</b> |                                          |  |
| $d_k(\text{mm}) : 243 \div 245$   | $v_k(\text{m/s}) : 35$             |  | Řezná kapalina:                  | $v_f(\text{m/s}) : 0,96$                 |  |
| $d_o(\text{mm}) : 58 \div 60$     | $v_o(\text{m/min}) : 54$           |  | <b>ABRASOL B</b>                 | $P_f(\text{MPa}) : 0,02$                 |  |
| $d_e(\text{mm}) : 48$             | $q(\text{N}/\text{mm}^2) : 38$     |  |                                  | $Q_f(\text{N/min}\cdot\text{mm}) : 0,24$ |  |
| $k_m(\text{N}/\mu\text{m}) : 1,3$ | $V'(\text{mm}^3/\text{mm}) : 18,6$ |  | hl. rov. (mm) : 0,2              | STROJ: BUA 16 A                          |  |



|                          |                                                       |                                                 |                |
|--------------------------|-------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|----------------|
| Material: <b>VT6</b>     |                                                       | Brousící kotouč: <b>URDIA 160/125-100-BVIII</b> |                |
| $d_k(\text{mm}) : 249,1$ | $v_k(\text{m/s}) : 35,21$<br>$v_p(\text{m/s}) : 0,2$  | Řezná kapalina:<br><b>SINTOLIN 5%</b>           |                |
|                          | $Z'(\text{mm}^3/\text{mm} \cdot \text{s}) : 1 \div 5$ | $hl. \text{orov.}(\text{mm}) : 0,25$            | STROJ : BPH 20 |



4 Příloha č.1

DB č.10

|             |        |
|-------------|--------|
| $Ra_{0,1}$  | : 1,55 |
| $Ra'_{0,1}$ | : 1,15 |
| $\Delta v$  | :      |
| $\alpha$    | :      |
| $ma_1$      | : 4,39 |
|             |        |
|             |        |

$Ra$   $Ra' [\mu m]$   
↑ ↑

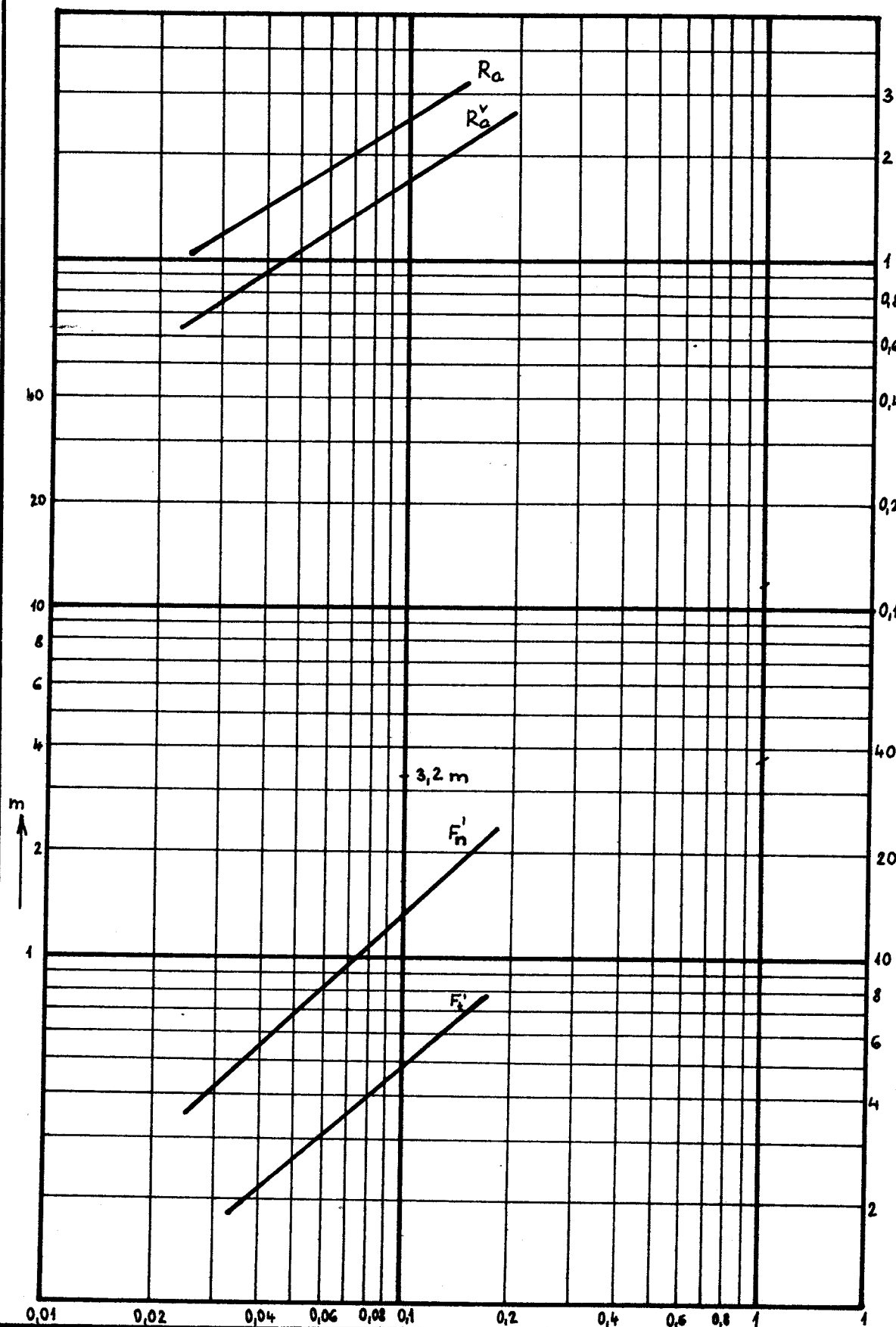
|                 |        |
|-----------------|--------|
| $\alpha'_{0,1}$ | : 49   |
| $F'_{0,1}$      | : 18,5 |
| $\gamma_n$      | : 22°  |
| $\gamma_t$      | : 30°  |
| $\mu_{0,1}$     | : 0,36 |
| $F'_{0,1}$      | : 13,5 |

$Z$   
L

1 1 1 1

VERA [mm]

|                      |       |                                                    |        |
|----------------------|-------|----------------------------------------------------|--------|
| Materiál: <b>VT6</b> |       | Brousicí kotouč: <b>URDIA 160/125-100 - B VIII</b> |        |
| $d_k(\text{mm})$     | 249,1 | $v_k(\text{m/s})$                                  | 35,21  |
|                      |       | $v_p(\text{m/s})$                                  | 0,2    |
|                      |       | Řezná kapalina:                                    |        |
|                      |       | <b>DIOL 2%</b>                                     |        |
|                      |       | $Z'(\text{mm}^3/\text{mm}\cdot\text{s})$           | 1 ÷ 5  |
|                      |       | hl. orov. (mm)                                     | 0,25   |
|                      |       | STROJ                                              | BPH 20 |



Příloha č.1

DB č.9

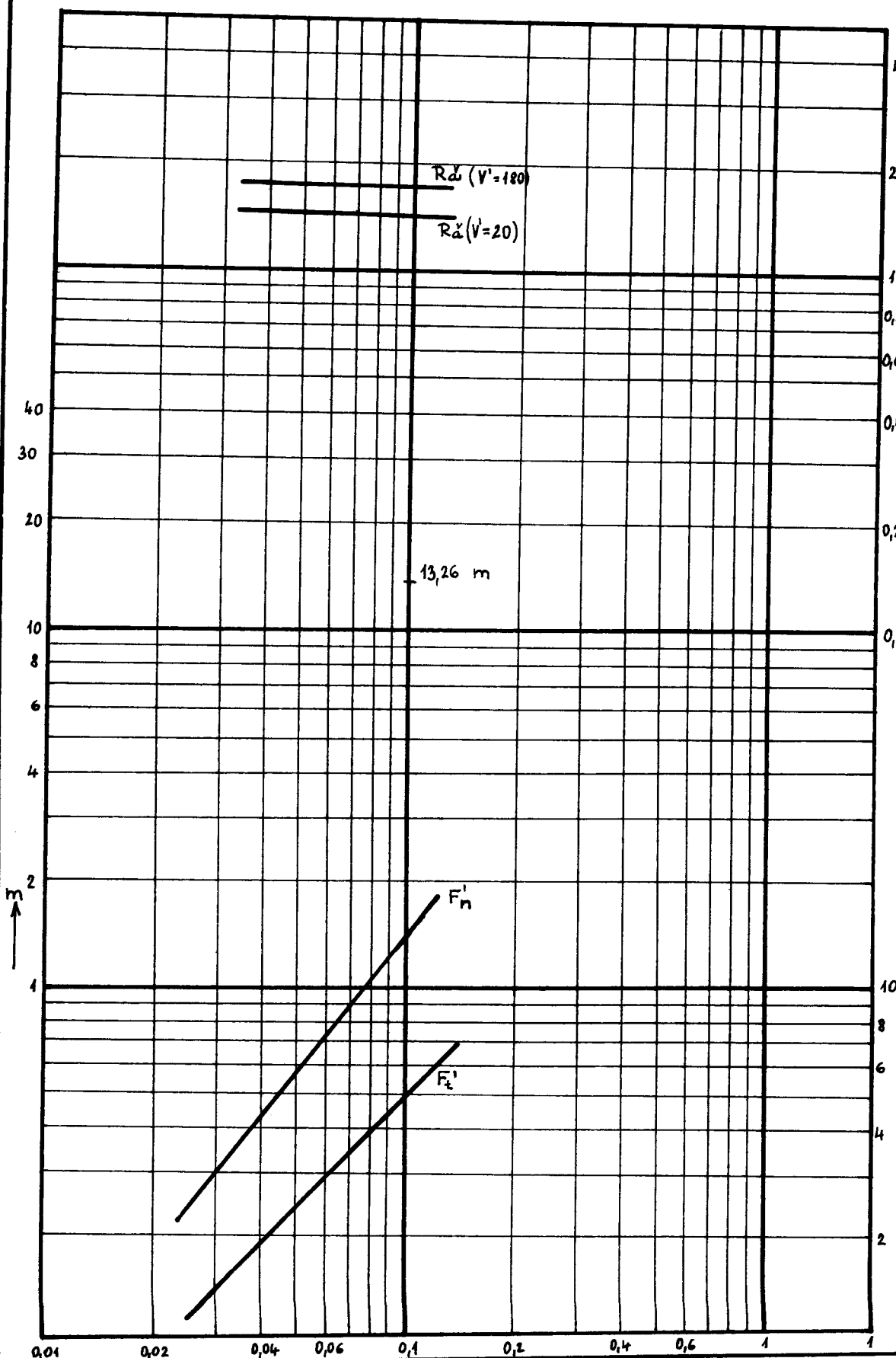
|             |       |
|-------------|-------|
| $Ra_{0,1}$  | : 2,5 |
| $Ra'_{0,1}$ | : 1,5 |
| $\alpha$    | :     |
| $\alpha_v$  | :     |
| $m_{0,1}$   | : 3,2 |
| $\delta$    | :     |

↑  $Ra$  ↑  $Ra'$  [ $\mu\text{m}$ ]

|                 |        |
|-----------------|--------|
| $\alpha'_{0,1}$ | : 49   |
| $F'_{t,0,1}$    | : 37   |
| $\gamma_n$      | : 44°  |
| $\gamma_t$      | : 42°  |
| $\mu_{0,1}$     | : 0,37 |
| $F'_{n,0,1}$    | : 13,2 |

↑  $F'_t$  ↑  $F'_n$  [N]  
→  $h_{0,1}$  [ $\mu\text{m}$ ]

|                      |                                          |                                                    |                |
|----------------------|------------------------------------------|----------------------------------------------------|----------------|
| Materiál: <b>VT6</b> |                                          | Brousicí kotouč: <b>URDIA 160/125-100 - B VIII</b> |                |
| $d_k$ (mm) 248,5     | $v_k$ (m/s) : 35,13<br>$v_p$ (m/s) : 0,2 | Rězná kapalina:<br><b>ABRASOL B</b>                |                |
|                      | $Z'$ (mm <sup>3</sup> /mm·s) 1 ÷ 4       | hl. orov. (mm) : 0,25                              | STROJ : BPH 20 |



4 Příloha č. 1

DBČ.8

$V'$  [mm<sup>3</sup>/mm]

|              |   |        |
|--------------|---|--------|
| $Ra_{0,1}$   | : |        |
| $Ra_{0,1}^v$ | : | 4(1,7) |
| $\alpha_v$   | : |        |
| $\alpha$     | : |        |
| $m_{0,1}$    | : | 13,26  |
| $\sigma$     | : |        |

$Ra$   $R_v$  [μm]

|                 |   |      |
|-----------------|---|------|
| $\alpha'_{0,1}$ | : | 48   |
| $F'_{t1}$       | : | 54   |
| $\beta'_n$      | : | 52°  |
| $\beta'_t$      | : | 46°  |
| $\alpha'_{0,1}$ | : | 0,34 |
| $F'_{n1}$       | : | 14   |

$F'_n$   $F'_t$  [N]  
 $h_{kv}$  [μm]

Material: VT8

Brousicí kotouč: C4925K-L9V

$d_k$  (mm): 234,7 - 236,3

$V_k$  (m/s) : 15

Řezná kapalina:

Hydrodynamický

$d_o$  (mm): 55,3 - 58,9

$V_o$  (m/s) : 52

ABRASOL B

způsob

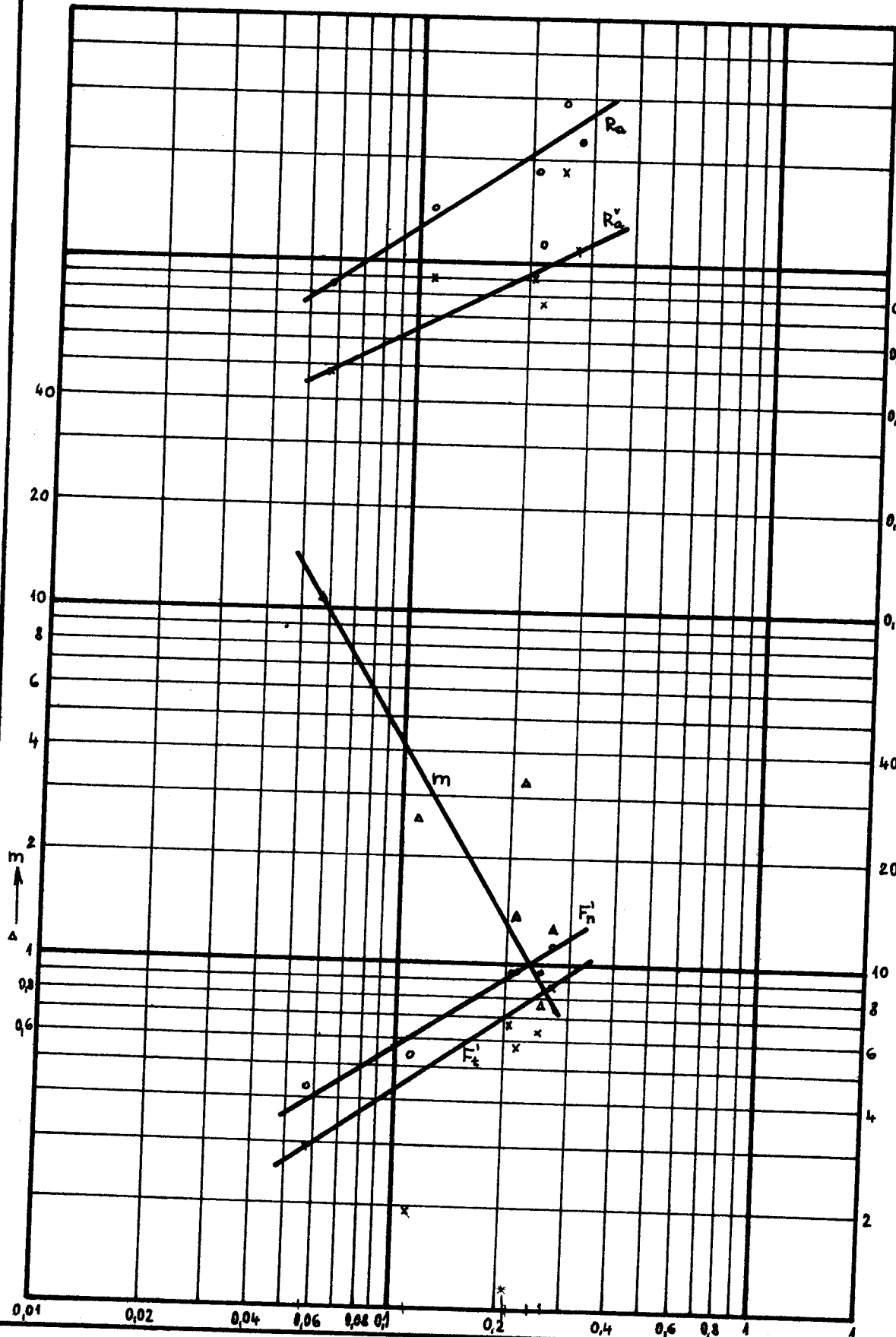
$q$  : 17,31

$V'$  (mm<sup>3</sup>/mm) 21

STROJ: BUA 16 A

Příloha č.1

DBč.6



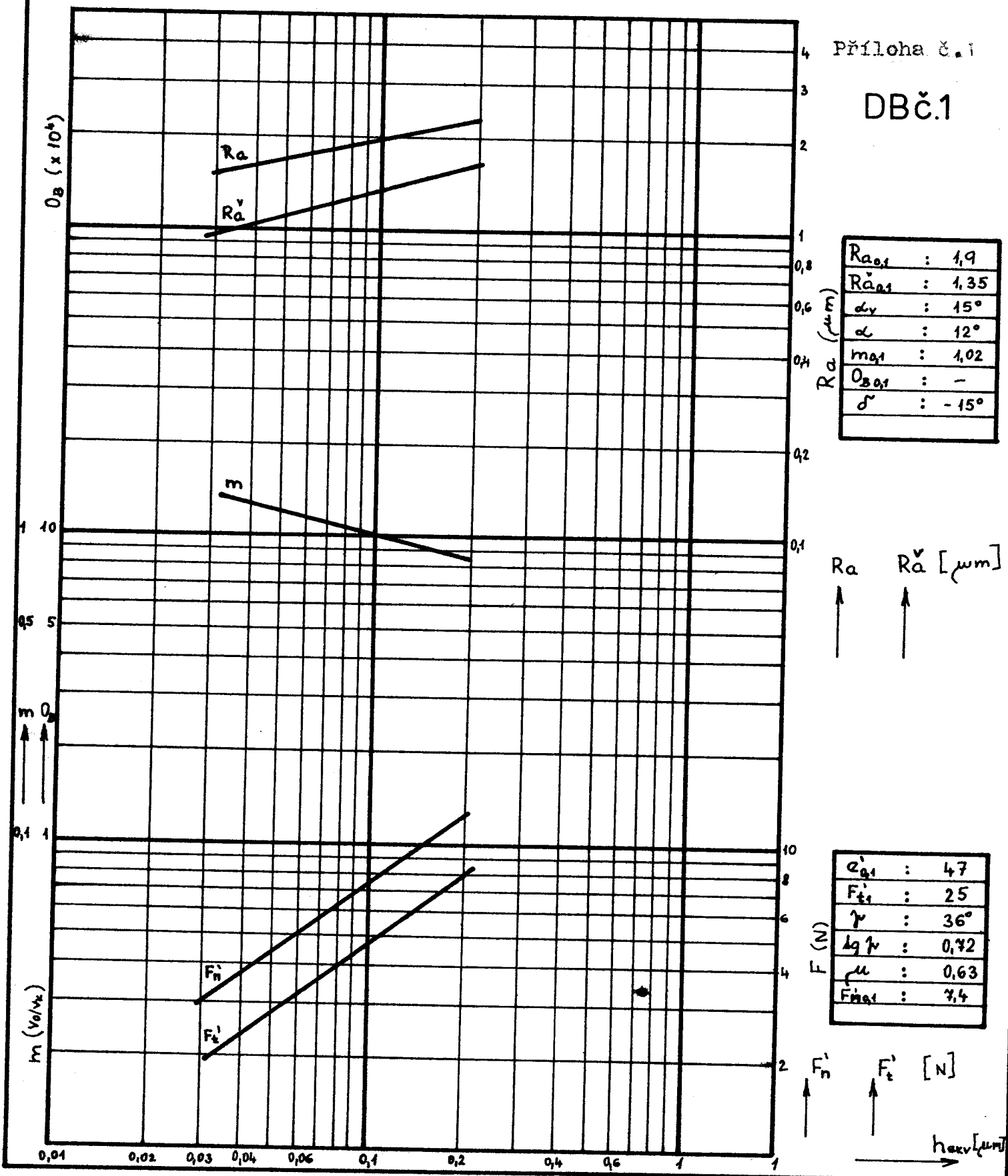
|              |        |
|--------------|--------|
| $Ra_{0,1}$   | : 1,25 |
| $Ra_{0,1}^v$ | : 0,64 |
| $\alpha$     | : 34°  |
| $\alpha_v$   | : 24°  |
| $m_{0,1}$    | : 4,0  |
| $\delta$     | : -65° |

↑  $Ra$  ↑  $Ra_v$  [μm]  
○ x

|             |        |
|-------------|--------|
| $a'_{0,1}$  | : 43   |
| $F'_{t,1}$  | : 21,5 |
| $\gamma_m$  | : 33°  |
| $\gamma_t$  | : 36°  |
| $\mu_{0,1}$ | : 0,74 |
| $F'_{n,1}$  | : 5,8  |

↑  $F'_n$  ↑  $F'_t$  [N]  
○ x  
→  $h_{av}$  [μm]

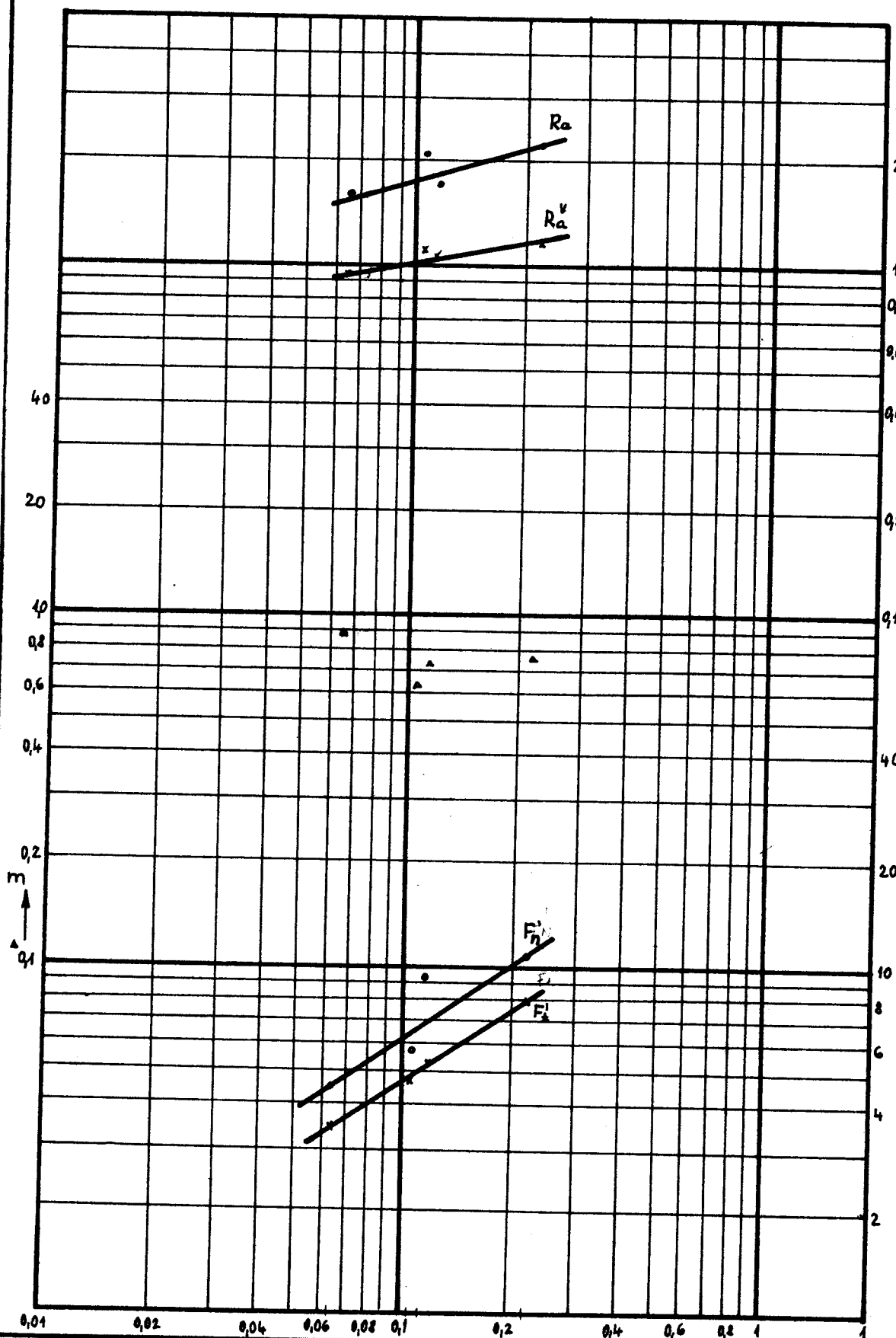
|                                  |                                    |                                  |                                                          |
|----------------------------------|------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------------------------------|
| Materiál: <b>VT8</b>             |                                    | Brousicí kotouč: <b>C4925L9V</b> |                                                          |
| $d_k(\text{mm}): 245 \div 248$   | $v_k(\text{m/s}): 35$              | Řezná kapalina:                  | $v_f(\text{m/s}): 0,96$                                  |
| $d_o(\text{mm}): 61 \div 63$     | $v_o(\text{m/min}): 57$            | <b>EMULZIN H5%</b>               | $P_f(\text{MPa}): 0,02$                                  |
| $d_a(\text{mm}): 49$             | $q(\text{ }^{\circ}/v_o): 37$      |                                  | $Q_f(\text{ }^{\circ}/\text{min} \cdot \text{mm}): 0,24$ |
| $k_m(\text{N}/\mu\text{m}): 1,3$ | $V'(\text{mm}^3/\text{mm}): 16,09$ | hl. orov. (mm): 0,15             | STROJ: BUA 16 A                                          |



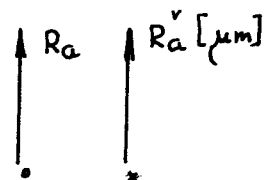
|                            |                                 |                                      |                         |
|----------------------------|---------------------------------|--------------------------------------|-------------------------|
| Materiál: <b>VT 8</b>      |                                 | Brousicí kotouč: <b>C4925 K÷J 9V</b> |                         |
| $d_k$ (mm) : 236,3 ÷ 237,2 | $V_k$ (m/s) : 15                | Řezná kapalina:                      | $V_f$ (m/s) : 0,96      |
| $d_o$ (mm) : 59,4 ÷ 61,06  | $V_o$ (m/min) : 55              | <b>DIOL 2%</b>                       | $P_f$ (MPa) : 0,02      |
|                            | $q$ : 16                        |                                      | $Q_f$ (l/min·mm) : 0,24 |
|                            | $V'$ (mm <sup>3</sup> /mm) : 15 | hl. orov. (mm) : 0,15                | STROJ: BUA 16 A         |

Příloha č.1

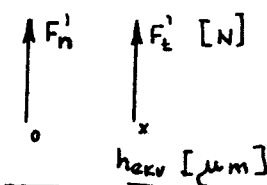
DBČ.3



|              |        |
|--------------|--------|
| $Ra_{0,1}$   | : 1,02 |
| $Ra^v_{0,1}$ | : 1,75 |
| $\alpha$     | : 14°  |
| $\alpha_v$   | : 12°  |
| $m_{0,1}$    | : 0,70 |
| $\delta$     | :      |



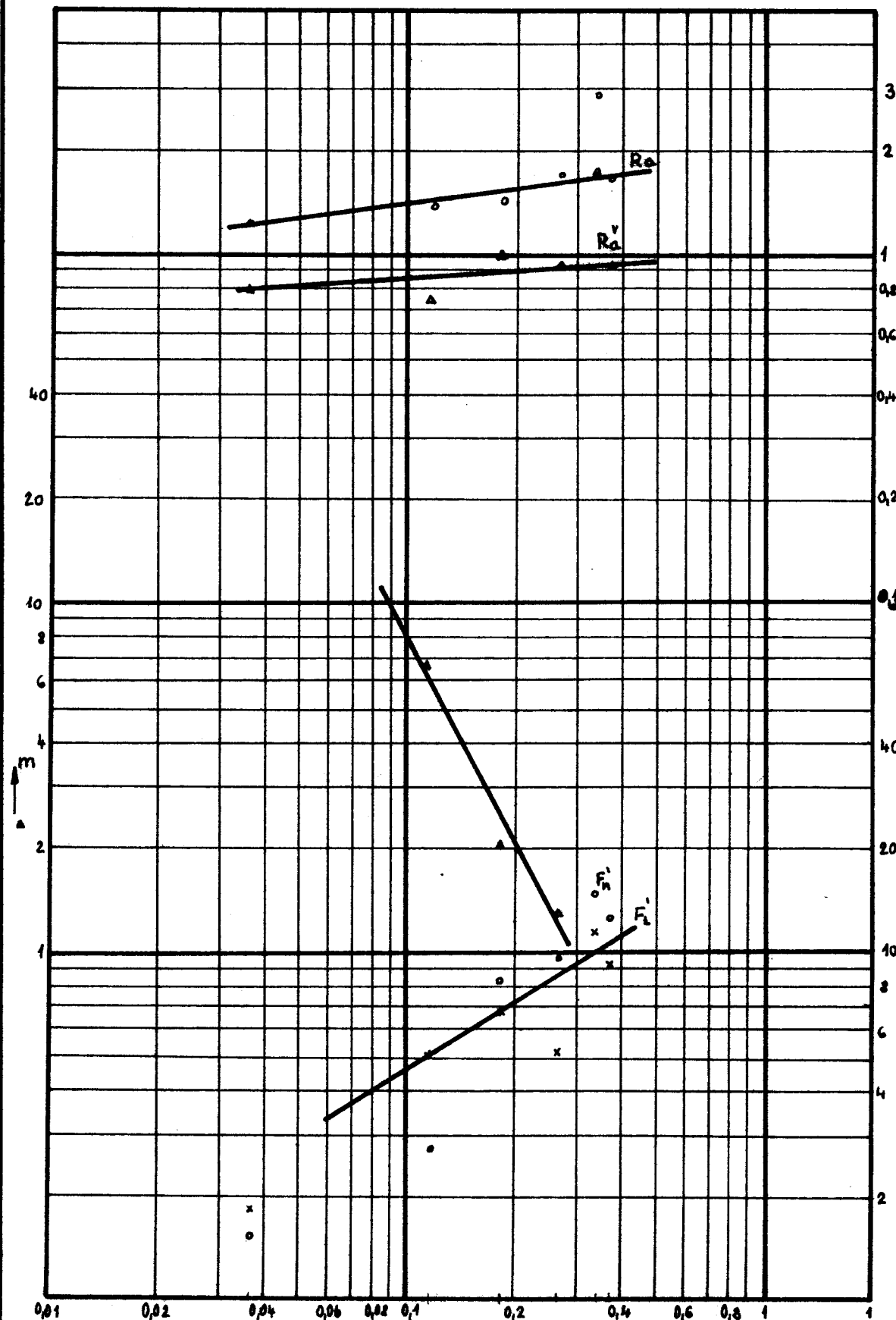
|                 |        |
|-----------------|--------|
| $\alpha'_{0,1}$ | : 47   |
| $F'_{t,1}$      | : 22   |
| $\beta_n$       | : 35°  |
| $\beta_t$       | : 34°  |
| $\mu_{0,1}$     | : 0,76 |
| $F_{n0,1}$      | : 6,2  |



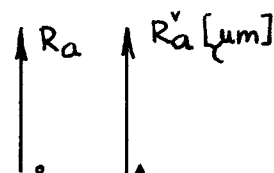
|                                     |                                  |                              |                                          |
|-------------------------------------|----------------------------------|------------------------------|------------------------------------------|
| Materiál: VT8                       |                                  | Brousicí kotouč: C4925J÷K 9V |                                          |
| $d_k(\text{mm}) : 237,8 \div 239,3$ | $v_k(\text{m/s}) : \approx 15$   | Řezná kapalina:              | $v_f(\text{m/s}) : 0,96$                 |
| $d_o(\text{mm}) : 64,9 \div 64,8$   | $v_o(\text{m/min}) : 58$         | ABRASOL B                    | $p_f(\text{MPa}) : 0,02$                 |
|                                     | $q : 15,5$                       |                              | $Q_f(\text{l/min}\cdot\text{mm}) : 0,24$ |
|                                     | $V'(\text{mm}^3/\text{mm}) : 20$ | hl. orovnění(mm): Q15        | STROJ : BUA 16 A                         |

Příloha č.1

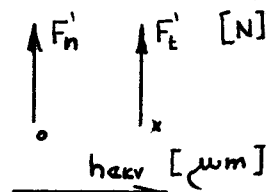
DBČ.4



|              |              |
|--------------|--------------|
| $Ra_{0,1}$   | : 1,38       |
| $Ra_{0,1}^v$ | : 0,86       |
| $\alpha$     | : $8^\circ$  |
| $\alpha_v$   | : $5^\circ$  |
| $ma_1$       | : 8,1        |
| $\sigma$     | : $62^\circ$ |



|                 |              |
|-----------------|--------------|
| $\alpha'_{0,1}$ | : 48         |
| $F_t'$          | : 32         |
| $\beta_n$       | : $42^\circ$ |
| $\beta_t$       | : $43^\circ$ |
| $C'_{0,1}$      | : 0,8        |
| $F_{n,1}'$      | : 4,75       |



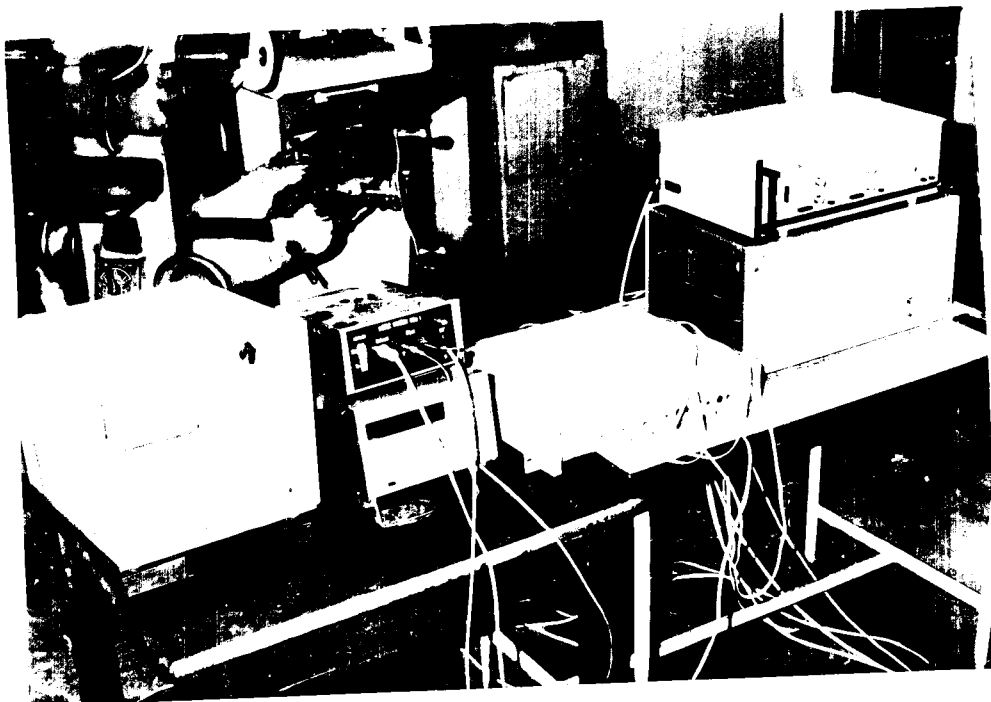


Fig. 1. Schematic diagram of the experimental setup.

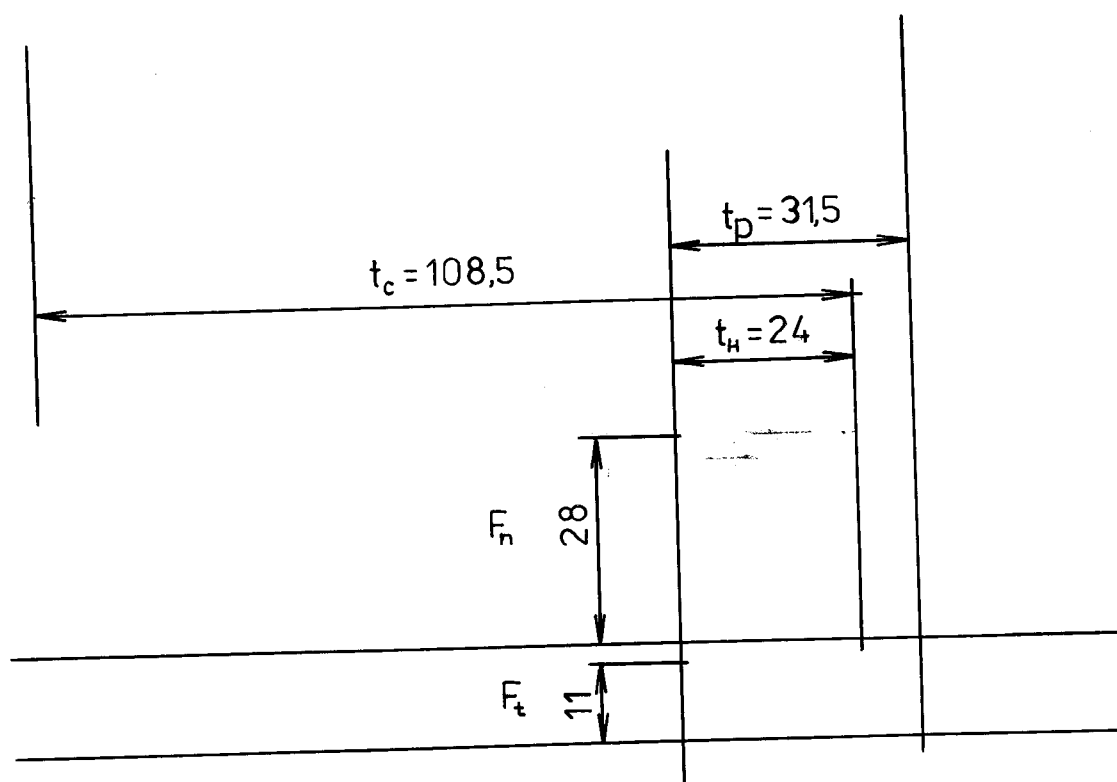
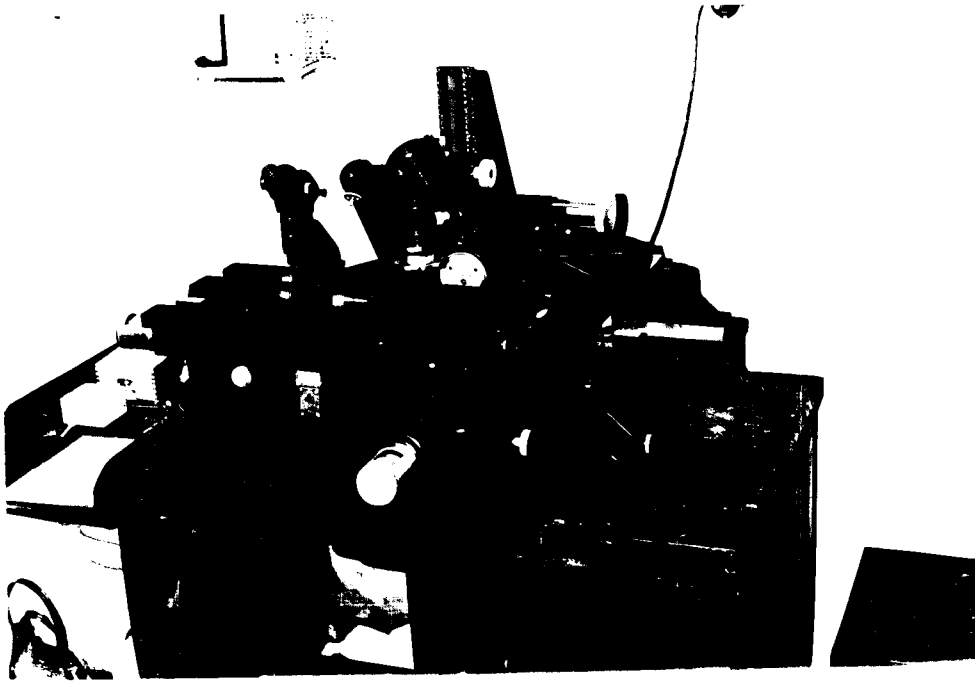


Fig. 2. Block diagram of the control system.

1951-1952



On the left side of the page

DEVIATY TOVREH OZROBKU PO ODBROUSENI  $V'_{H2m} = 176 \text{ mm}^3/\text{mm}$

MĚŘENÍ "m" 2.4.86 1cm = 40  $\mu\text{m}$   
URDIA 160/125-100 - BVIII VT 6  
ABRASOL B

celková SIF