

Vysoká škola strojní a textilní v Liberci  
nositelka Řádu práce  
Fakulta strojní

Obor 23-07-8  
strojírenská technologie

zaměření

obrábění a ekonomika strojírenské výroby

Katedra obrábění a montáže

POROVNÁNÍ TRVANLIVOSTI NÁSTROJOVÝCH MATERIÁLŮ  
PRO OBRÁBĚNÍ KORUNDOVÝCH HMOT

Josef Š t e n c l  
DP - ST

Vedoucí práce: Ing. Jan Frinta, VŠST

Konzultant: Doc. Ing. Jaromír Gazda, CSc, VŠST

Rozsah práce a příloh

Počet stran	71
Počet tabulek	12
Počet obrázků	22
Počet výkresů	-
Počet modelů nebo jiných příloh	-

V Liberci 27. 5. 1983

Vysoká škola: strojní a textilní Fakulta: strojní  
v Liberci  
Katedra: obrábění a montáže Školní rok: 1982/83

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

pro Josefa Š t e n c l a  
obor 23-07-8 strojírenská technologie

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

Název tématu: Porovnání trvanlivosti nástrojových materiálů  
pro obrábění korundových hmet

### Zásady pro vypracování:

1. Hospodářskopolitický význam zadání
2. Volba vhodných nástrojových materiálů na základě dosavadních poznatků
3. Vypracování návrhu metodiky zkoušek trvanlivosti
4. Experimentální zkoušky a vyhodnocení
5. Hodnocení a závěr

Autorské právo se řídí směrnicemi  
MŠK pro státní záv. zkoušky č. j. 31  
727/62-III/2 ze dne 13. července  
1962-Věstník MŠK XVIII, sešit 24 ze  
dne 31. 8. 1962 § 19 aut. z. č. 115/53 Sb.

V 239/83 S  
VYSOKÁ ŠKOLA STROJNÍ A TEXTILNÍ  
Ústřední knihovna  
LIBEREC 1, STUDENTSKÁ 5  
PSČ 461 17

KOM-OM

Rozsah grafických prací: dle potřeby  
Rozsah průvodní zprávy: cca 50 stran  
Seznam odborné literatury:

- Békés, J.: Inžinierska technologia obrabania kovov,  
Alfa, Bratislava
- Přikryl, Z.-Musílková, R.: Teorie obrábění  
SNTL, Praha 1982
- Mádl, J.-Schubert, V. : Základy experimentálních metod a opti-  
malizace v teorii obrábění .  
Skripta ČVUT, Praha  
DP - 1334 /77  
Výzkumné zprávy VÚEK Hradec Králové

Vedoucí diplomové práce: Ing. Jan Frinta

konzultant: Doc. Ing. Jaromír Gazda, CSc

Datum zadání diplomové práce: 15.10.1982  
Termín odevzdání diplomové práce: 27. 5.1983



*Gazda*  
Doc. Ing. Jaromír Gazda, CSc

Vedoucí katedry

*Stříž*  
Doc. RNDr. Bohuslav Stříž, CSc

Děkan

v Liberci dne 11.10. 1982.

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

Liberec 27. května 1983

*Josef Glucl*  
.....

## O B S A H

	strana
1. Hospodářsko-politický význam zadání	4
2. Úvod do problematiky experimentu	5
3. Volba vhodných řezných materiálů	6
3.1. Soubor vybraných řezných materiálů	7
4. Vypracování návrhu metodiky zkoušek trvanlivosti	10
4.1. Korundová keramická hmota	11
4.2. Metoda plánování experimentu	15
4.2.1. Vliv obráběného materiálu na charakter a intenzitu opotřebení řezného nástroje	16
4.2.2. Vliv materiálu řezného nástroje na intenzitu jeho opotřebení	17
4.2.3. Vliv řezných podmínek (v,s,h) na intenzitu opotřebení řezného nástroje	18
4.2.4. Vliv geometrie řezného nástroje na intenzitu jeho opotřebení	18
4.2.5. Vliv drsnosti povrchu řezného nástroje na intenzitu jeho opotřebení	21
4.2.6. Vliv ostatních uvažovaných faktorů na intenzitu opotřebení řezného nástroje	25
4.2.7. Dlouhodobá zkouška trvanlivosti řezného materiálu	27
4.2.8. Způsob měření opotřebení řezného nástroje	28
4.2.9. Návrh tvaru experimentálních rovnic experimentu, určení úrovní faktorů	30
4.2.10. Návrh strukturálního modelu experimentu	33
4.2.11. Návrh funkčního modelu experimentu	36
4.2.12. Volba kritéria opotřebení řezného nástroje	38
4.2.13. Návrh matematického vyhodnocení experimentálních zkoušek	39
4.2.14. Obráběcí stroj	43

4.2.15.	Řezný nástroj	44
4.2.16.	Přípravek	44
4.2.17.	Zařízení na měření opotřebení a času obrábění	46
5.	Experimentální zkoušky a vyhodnocení	47
5.1.	Tabulky naměřených hodnot opotřebení nástroje	47
5.2.	Grafické znázornění závislosti $VB=f(t)$	53
5.3.	Vyhodnocení experimentálních zkoušek	59
5.3.1.	Určení souboru trvanlivosti rezných materiálů	59
5.3.2.	Určení souboru hodnot exponentů ( $m$ ) a ( $y$ ) a konstant ( $c_T$ ) experimentální závislosti $T = f(t)$	62
6.	Hodnocení a závěr	64
6.1.	Byhodnocení experimentálního problému	64
6.2.	Závěr	69
7.	Seznam použité literatury	71

## Seznam použitých symbolů a zkratek

$c_T$	..... konstanta Taylorova vztahu	-
$D$	..... průměr výlisku /polotovaru/	/mm/
$h$	..... hloubka řezu	/mm/
$K$	..... oblast nahrazení funkce $VB=f(t)$	/mm/
$m$	..... exponent v Taylorově vztahu	-
$M17$	..... typové označení keramiky	-
$n$	..... konstanta	-
$r$	..... poloměr špičky nástroje	/mm/
$R_a$	..... střední aritmetická drsnost	/um/
$s$	..... posuv	/mm.ot <sup>-1</sup> /
$t$	..... čas	/min/
$T$	..... trvanlivost ostří nástroje	/min/
$v$	..... řezná rychlost	/m.min <sup>-1</sup> /
$VB$	..... opotřebení na hřbetě	/mm/
$y$	..... exponent v Taylorově vztahu	-
$\delta_o$	..... nástrojový úhel hřbetu (ortog.)	/ ° /
$\phi_o$	..... nástrojový úhel čela (ortog.)	/ ° /
$\epsilon_r$	..... úhel špičky nástroje	/ ° /
$\alpha_r$	..... úhel nastavení hl.ostří	/ ° /
$\lambda_s$	..... nástrojový úhel sklonu ostří	/ ° /
VÚEK	..... Výzkumný ústav elektrotechnické keramiky	

## 1. Hospodářsko-politický význam zadání

Výzkum a vývoj korundových keramických materiálů překročil v posledních letech tak daleko, že jsou k dispozici materiály s vynikajícími mechanickými, elektrickými a chemickými vlastnostmi. Tomu však neodpovídá rozsah aplikací v národním hospodářství. Přitom aplikace korundových materiálů je společensky žádoucí, protože korundové keramické hmoty spoří deficitní barvené kovy a legury. Výroba této keramiky je navíc energeticky méně náročná než hutní výroba kovů. Širší aplikaci brání vedle omezené výrobní kapacity i nedostatek informací a zkušeností z oblasti vlastních aplikací korundových keramických hmot zejména ve strojírenství.

Nutné je aplikovat korundové hmoty všude tam, kde se mohou uplatnit vlastnosti slynutého korundu: vysoká mechanická pevnost, vysoká otěruzdornost, malý koeficient tření, odolnost k zadírání, vysoká odolnost vůči různým chemicky agresivním prostředím a odolnost vůči vysokým teplotám.

Současně s vyhledáváním a ověřováním nových sfér aplikace musí ovšem postupovat i výzkum a vývoj technologie, tak aby nově vyvstávající požadavky na vlastnosti materiálu, nové a složitější tvary, vyšší rozměrovou přesnost apod., mohly být paralelně uspokojovány.

V oblasti otěruzdorných aplikací je těžiště problematiky ve vytváření a obrábění na požadované tvary, tolerance a kvalitu povrchu. Tím je dán i požadavek na výzkum technologie třískového obrábění výlisků v nevypáleném stavu. Velký důraz je kladen na ekonomickou stránku, na volbu vhodných rezných materiálů pro obrábění korundových hmot, na volbu vhodných rezných podmínek a hospodárné využití rezných nástrojů. Řešením uvedeného dílčího problému se z části zabývá i tato práce.



## 2. Úvod do problematiky experimentu

Korundová keramická hmota je moderním materiálem, který je v současné době v neustálém vývoji. Proto každý ověřený posudek týkající se vlastností, použití, obrábění ap. této hmoty je velmi významný. I daný experimentální problém, porovnání nástrojových materiálů pro obrábění korundové keramické hmoty, je problémem novým, dosud nijak neřešeným.

V počáteční fázi experimentu bylo k dispozici tak málo poznatků o korundové keramice a zvláště o jejích vlastnostech ovlivňujících charakter a velikost opotřebení rezných materiálů při jejím obrábění, že bylo nutné realizovat předběžné testy obrábění. Tyto testy spočívající v obrábění polotovarů /výlisků/ z korundové keramické hmoty se staly základem pro analytickou fázi experimentu a ovlivnily i výběr souboru vhodných nástrojových materiálů pro obrábění korundové keramické hmoty. Vlastnosti této hmoty významné pro řešení daného experimentálního problému, zvláště abrazivní působení na rezné materiály, jsou natolik specifické, že tento materiál nelze srovnat s jiným známým materiálem, a tím odpadá i možnost aplikace poznatků z řešení jiných problémů.

### 3. Volba vhodných řezných materiálů

S obráběním korundové keramické hmoty je dosud jen velmi málo zkušeností a není k dispozici literatura týkající se tohoto problému. Tím je ztížen i výběr vhodných řezných materiálů pro obrábění korundové keramické hmoty.

Při řešení tohoto dílčího problému bylo nutno vycházet z ověřených poznatků získaných při obrábění těžkoobrobitelných kovových materiálů, údajů v katalogích výrobců a ze známých aplikací některých řezných materiálů. Rozhodujícím paramterem ovlivňujícím volbu vhodných nástrojových materiálů byl požadavek jejich odolnosti vůči abrazivnímu otěru. Pozornost byla tedy v první řadě věnována sliutým karbidům skupiny K určených pro obrábění materiálů dávajících krátkou třísku. Hlavní složkou těchto sliutých karbidů je karbid wolframu (WC), doporučená aplikace je obrábění, kdy převažujícím faktorem opotřebení je abrazivní otěr.

Obr.č.1 Zařazení československých sliutých karbidů do K skupiny soustavy ISO

K	01	H3			
	10	H1	H2		
	20	G1			H10
	30	G1.1			
	40	G2			

Pežornost byla věnována i moderním zahraničným žezným materiálům na bázi slinutých karbidů. Významným směrem ve vývoji řezných slinutých karbidů jsou povlakové destičky. U těchto destiček je na základním, podkladovém, slinutém karbidu nanasena tenká vrstva karbidu titanu (TiC) nebo nitridu titanu (TiN). Vynikající vlastností a předností povlakových řezných destiček je kombinace vysoké tvrdosti povlaku a houževnatosti jádra základního materiálu. Takovoto spojení zmíněných vlastností nelze zatím dosáhnout žádnou variantou chemického složení ani známou výrobní technologií. Pro tuto přednost jsou povlakové řezné destičky určeny pro široké rozmezí řezných podmínek. Povlaky (TiN) mají vyšší odolnost proti vymílání čela, povlaky karbidu titanu (TiC) jsou velmi tvrdé a zaručují odolnost vůči abrazivnímu působení obráběného materiálu.

Zároveň tu byl požadavek ověření vhodnosti aplikace keramických řezných materiálů pro obrábění korundové keramické hmoty a požadavek vzájemného srovnání československé řezné keramiky a řezné keramiky zahraničních výrobců.

Dle požadavků a možností výběru byl zvolen soubor řezných materiálů, který obsahuje slinuté karbidy zastupující skupinu K, špičkové zahraniční povlakové řezné destičky, řeznou keramiku a směsnou řeznou keramiku.

### 3.1. Soubor vybraných řezných materiálů

S uvedením jednotlivých vybraných řezných materiálů je v této části i složení a některé vlastnosti řezných materiálů. Pro komplexní analýzu experimentálního problému a jeho řešení je znalost komponentního složení a vlastností řezných materiálů významným parametrem.

- (I) G1/K20/ SNUN 120408 /Pramet n.p. Šumperk/  
 Komponentní složení: WC - 94 %; Co - 6 %;  
 Hustota: 14,2 - 14,8 g.cm<sup>-3</sup>  
 Pevnost v ohybu: 1200 MPa  
 Tvrdost: 76 HRC
- (II) H1/K10/ SNUN 120408 /Pramet n.p. Šumperk/  
 Komponentní složení: WC - 95 %; Co - 5 %;  
 Hustota: 14,2 - 14,8 g.cm<sup>-3</sup>  
 Pevnost v ohybu: 1100 MPa  
 Tvrdost: 78 HRC
- (III) H10/K10-K20/ SNUN 120408 /V.Ú. Práškové metalurgie Šumperk/  
 Komponentní složení: WC - 91,5; TaC-1,5%(+NbC);  
 Co - 7 %;  
 Hustota: 14,7 g.cm<sup>-3</sup>  
 Tvrdost: 80 HRC
- (IV) G315/K10-K20-K30/ SNUN 120408 /COROMANT - Švédsko/  
 Řezná destička určená pro soustružení těžkoobrobitelných materiálů.  
 Povlak karbidu titanu (TiC)
- (V) Carbology 523 SNUN 120408 /CARBOLOY - USA/  
 Řezná destička určená pro obrábění těžkoobrobitelných abrazivně působících materiálů.  
 Povlak karbidu titanu (TiC)
- (VI) SN 37 SNUN 120808 / SPK Feldmühle - NSR /  
 (řezná keramika na bázi Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)  
 Hustota: 3,90 - 3,92 g.cm<sup>-3</sup>  
 Velikost zrna: 2,5 - 3 μm  
 Objem pórů: 2,0 - 2,5 %

E - modul:  $4,1 \cdot 10^5$  MPa  
Tvrdość - Vickers: 24000 MPa

(VII) DISAL 100 SNUN 120816 /DIAS n.p. Turnov/

(99 %  $Al_2O_3$ )

Hustota:  $3,9 - 3,92$  g .  $cm^{-3}$   
Velikost zrna:  $1 - 2$   $\mu m$   
Objem pórů: max. 2 %  
E - modul:  $0,17 - 0,22 \cdot 10^6$  MPa  
Tvrdość - Vickers: 21000 MPa  
Pevnost v ohybu: 500-600 MPa

(VIII) HC20201 KA 128-1,2 /WEB Porzellanwerk Auma-NDR/

Hustota:  $4,4$  g .  $cm^{-3}$   
Pevnost v tlaku: 3000 MPa  
Pevnost v ohybu: 300 - 500 MPa  
Tvrdość: 63 HRC

Součástí souboru vybraných řezných materiálů pro obrábění korundové keramické hmoty byly ještě keramické řezné materiály LUXAL 204 /Elektroporcelán n.p./ a řezná keramika ASTROMET /USA/. Intenzita opotřebení těchto materiálů zjištěná při předběžných testech obrábění korundové keramické hmoty M17 však byla natolik vysoká, že by nemělo nejmenší smysl zahrnout tyto keramické řezné materiály do experimentálních zkoušek trvanlivosti. Zmíněné materiály pro obrábění korundové keramické hmoty nejsou vhodné, a byly proto ze souboru vybraných řezných materiálů vyřazeny.

/U slinutých karbidů bude dále uváděno typové označení výrobce a ne značení dle ISO/.

#### 4. Vypracování návrhu metodiky zkoušek trvanlivostí

Vypracování návrhu metodiky zkoušek trvanlivostí je, co do kvalitativního významu, rozhodující částí řešení experimentálního problému. Lze říci, že na důkladnosti a jakosti provedení této části závisí úspěšnost a správnost celého experimentu. Experimentální problém je nutno chápat jako složitý komplex jevů a skutečností navzájem se prolínajících a ovlivňujících. Cílem je provést analýzu těchto jevů a jejich zhodnocení podle významu pro danou problematiku, a v druhé fázi na základě tohoto zhodnocení vypracovat vlastní metodiku experimentálních zkoušek a jejich vyhodnocení. Základní úvahy a obsahová struktura vycházejí z metody plánování experimentu. Přístup k dané problematice dle této metody zaručuje komplexnost chápání významných skutečností a určité rozpětí problémové oblasti a tím i předpoklad kvality návrhů metodiky zkoušek trvanlivostí.

Jedním ze základních parametrů významně ovlivňující návrh metodiky experimentálních zkoušek je obráběný materiál a jeho vlastnosti. Proto je v této části uveden v samostatné kapitole.

#### 4.1. Korundová keramická hmota

K porovnání trvanlivosti řezných materiálů při obrábění korundových keramických hmot v nevypáleném stavu byl použit vývojový typ korundové keramické hmoty vyráběny ve Výzkumném ústavu elektrotechnické keramiky v Hradci Králové.

Typové označení této hmoty je M17.

#### Komponentní složení korundové keramické hmoty M17

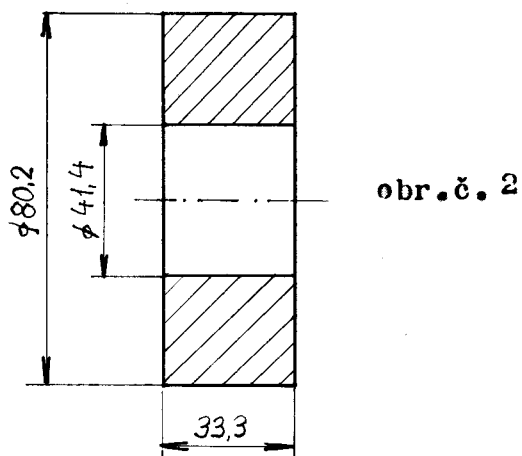
- oxid hlinitý $Al_2O_3$ .....	94,3 %	/Hliníkárný SNP Žiar nad Hronom/
- silikát hořečnatý .....	2,9 %	/zahraniční dovoz/
- stearan hořečnatý org ...	1,5 %	
- voda	1,3 %	

Směs uvedených komponentů má po mletí za polosucha litrovou hmotnost  $1440 \pm 10$  g/l /ukazatel používaný ve VÚEK Hradec Králové/.

Polotovary /výlisky/ jsou vytvářeny suchým lisováním na pístovém lise MAYER; lisovací tlak 50MPa. Keramická hmota má po slisování objemovou hmotnost  $2,618$  g/cm<sup>3</sup>.

#### Tvar a rozměry polotovaru

Rozměry a tvar polotovaru (obr.č.2 ) jsou jedním z činitelů při plánování experimentálních zkoušek. Jsou rozhodující pro volbu použití přípravku.



(Uvedené rozměry jsou středními hodnotami naměřených hodnot rozměrů třech náhodně vybraných výlisků)

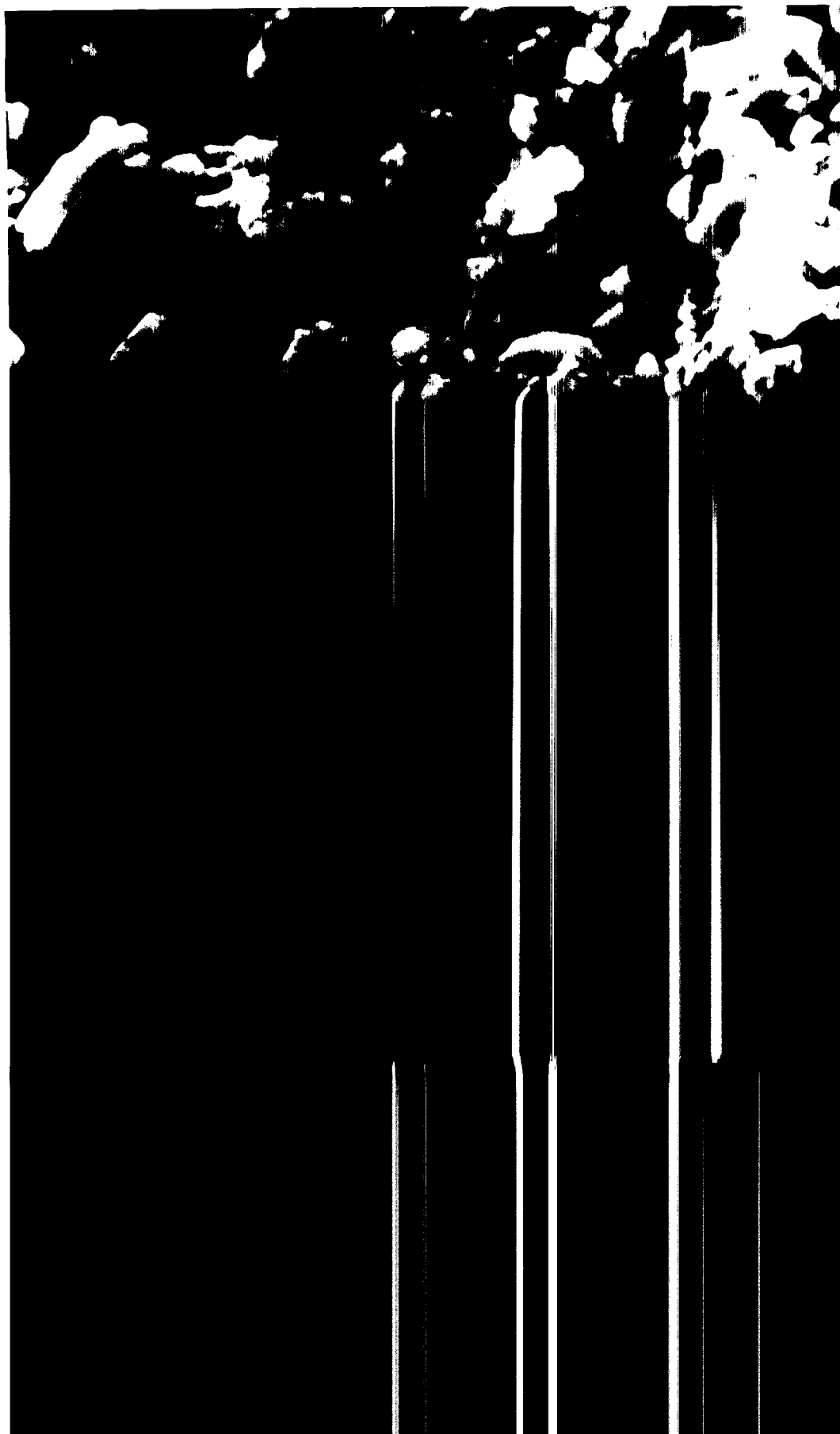
O korundové keramické hmotě M17 - a zvláště o jejích vlastnostech v nevypáleném stavu majících vliv na intenzitu opotřebení a charakter opotřebení ostří nástroje při jejím obrábění - je dosud jen velmi málo ucelených a ověřených poznatků. V průběhu realizace předběžných testů byly proto zhotoveny snímky lomové plochy (obr.č. 3) a obrobené plochy (obr.č. 4) keramické hmoty M17 v nevypáleném stavu. Snímky byly pořízeny na rastrovacím elektronovém mikroskopu TESLA BX-300 po napaření vzorků keramiky zlatem.



Obr.č.3 Snímek lomové plochy korundové keramické  
hmoty M17 v nevypáleném stavu.

Zvětšení: 3000 x

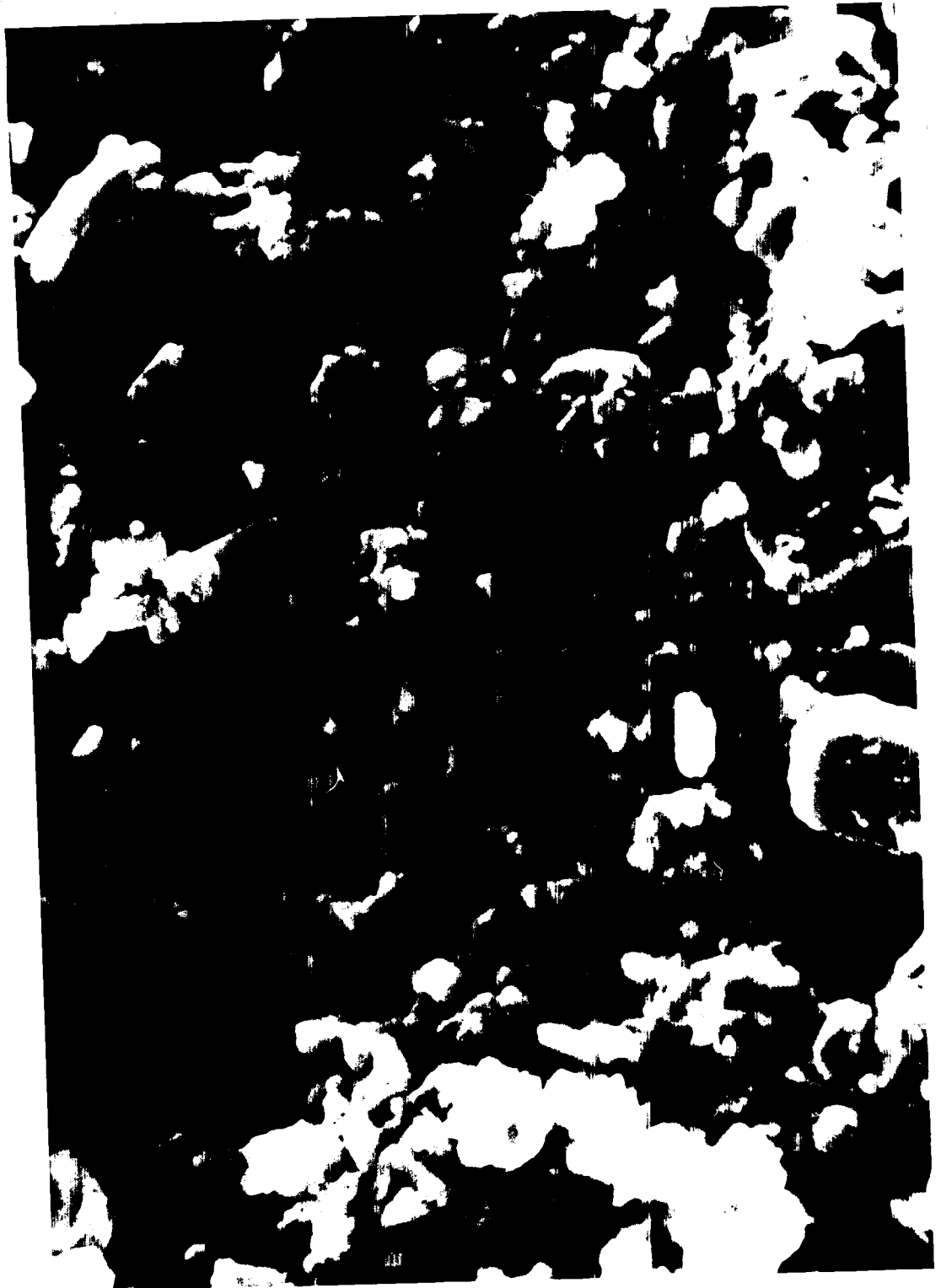
/č.negativu 9044/



Obr.č.3 Snímek lomové plochy korundové keramické  
hmoty M17 v nevypáleném stavu.

Zvětšení: 3000 x

/č.negativu 9044/



Obr.č. 4 Snímek obrobenej plochy korundovej keramickej hmoty M17 v nevypálenom stave.

Zväčšenie: 3000 x

/č.negativu 9046/



#### 4.2. Metoda plánování experimentu

Účinné plánování je primárním problémem při realizaci každého experimentu a umožňuje jeho efektivní provádění a vyhodnocování. Součástí účinného plánování je zredukování rozsahu prováděného experimentu na nejmenší možnou míru, která však musí poskytovat výsledky experimentu v požadované přesnosti. Čím větší se věnuje pozornost sestavení plánu experimentu, tím nižší je pracnost při vlastní realizaci experimentu a tím také budou nižší náklady na řešení experimentálního problému. /3/ Snížení nákladů na provádění experimentu, snížení spotřeby materiálu, strojního času ap. je jedním z cílů plánování experimentu.

V případě úkolu porovnání trvanlivosti nástrojových materiálů pro obrábění korundových keramických hmot v nevypáleném stavu je účinné plánování experimentu zvláště významné. Nejen z důvodu zkrácení času zkoušek a jejich usnadnění, ale hlavně proto, že korundová keramická hmota resp. výlisky z této hmoty, na kterých byly experimentální zkoušky obráběním prováděny, byly k dispozici pouze v omezeném množství. O průběhu realizace experimentu z důvodu ověřeného předpokladu významné změny vlastností - majících vliv na trvanlivost řezných materiálů při obrábění korundové keramické hmoty - stárnutím nevypálených výlisků není možno množství těchto výlisků doplňovat.

Postup při plánování experimentu lze rozdělit na dvě fáze:

- a) analytickou
- b) syntetickou.

## Analytická fáze

V analytické fázi plánování experimentu byla provedena důkladná analýza řešeného problému. Byl posouzen vliv komponentního složení korundové keramické hmoty M17 na charakter a intenzitu opotřebení a zároveň i vliv rezných podmínek a ostatních faktorů, u nichž lze předpokládat možnost významného vlivu na proces obrábění a tedy i výsledek experimentu (drsnot povrchu rezných destiček, difference vlastností jednotlivých rezných destiček ze stejného nástrojového materiálu, difference vlastností hmoty a rozměrů jednotlivých výlisků z korundové keramické hmoty M17, chvění při obrábění ap.).

Na základě této analýzy experimentálního problému byl sestaven přehled činitelů experimentálního problému a určeny závisle a nezávisle proměnné.

Experiment může být obecně popsán základní rovnicí experimentu: /3/

$$y_1, y_2, \dots, y_s, \dots, y_{ss} = f(x_1, x_2, \dots, x_r, \dots, x_{rr}) \quad (1)$$

kde  $y_s$  je s-tá závisle proměnná

ss - počet závisle proměnných

$x_r$  - r-tá nezávisle proměnná /faktor/

rr - počet nezávisle proměnných /faktorů/

### 4.2.1. Vliv obráběného materiálu na charakter a intenzitu opotřebení rezného nástroje

Z předchozích zkušeností při obrábění keramických hmot obdobného komponentního složení a vlastností a z předběžných testů obrábění korundové keramické

hmoty M17 v nevypáleném stavu je zřejmé, že největší vliv na charakter a intenzitu opotřebení řezného nástroje má právě obráběný keramický materiál. Korundová hmota M17, jak už lze usuzovat z jejího komponentního složení je velmi abrazivně působícím materiálem. Lze tedy předpokládat, že převládajícím a rozhodujícím faktorem opotřebení při jejím obrábění je abrazivní otěr.

Hmota M17 obsahuje 94,3 % velmi tvrdého oxidu hlinitého ( $Al_2O_3$ ), který se zde vyskytuje jako produkt procesu mletí suroviny ve formě různě velkých zrn s ostrými hranami (obr.č.3). Tato zrna při obrábění hmoty M17 velmi intenzivně narušují povrch řezných materiálů. A to nejen kobaltová pojiva slynutých karbidů, ale i tvrdé vrstvy karbidu litanu (TiC) u povlakových řezných destiček.

S dosavadními znalostmi a ověřenými poznatky o vlastnostech korundové keramické hmoty M17 v nevypáleném stavu není možno jednoznačně charakterizovat tuto hmotu určitými veličinami, vystihujícími její vliv na trvanlivost řezných materiálů při jejím obrábění.

#### 4.2.2. Vliv materiálu řezného nástroje na intenzitu jeho opotřebení

Vedle obráběného materiálu má rozhodující vliv na intenzitu opotřebení řezného nástroje materiál břítu nástroje.

Vliv řezného materiálu obráběcího nástroje na intenzitu opotřebení a tím i na trvanlivost ostří nástroje při obrábění korundové keramické hmoty je stěžejním úkolem experimentu. Řezný materiál je nezávisle proměnnou kvalitativního charakteru.

#### 4.2.3. Vliv řezných podmínek (v,s,h) na intenzitu opotřebení řezného nástroje

Intenzita opotřebení řezného nástroje je funkcí řezných podmínek - řezné rychlosti (v), posuvu (s), hloubky řezu (h). V průběhu předběžných testů byl zjištěn významný vliv velikosti řezné rychlosti na intenzitu opotřebení nástroje a tím i na jeho trvanlivost, při obrábění korundové keramické hmoty M17. Vliv velikosti posuvu byl zjištěn v porovnání s vlivem řezné rychlosti nižší.

Určení závislosti trvanlivosti řezného nástroje na velikosti řezné rychlosti a na velikosti posuvu při obrábění korundových keramických hmot je jedním z úkolů experimentu. Řezná rychlost a posuv jsou nezávisle proměnnými - a zároveň rozhodujícími faktory kvantitativního charakteru pro řešení daného experimentálního problému.

Z předchozích zkušeností při obrábění keramických hmot obdobného komponentního složení a vlastností je zřejmé, že intenzita opotřebení řezného nástroje, a tím i jeho trvanlivost na hloubce řezu (h) podstatně nezávisí. Pro realizaci experimentu byla proto zvolena konstantní hodnota hloubky řezu. Hloubka řezu je tedy konstantním faktorem.

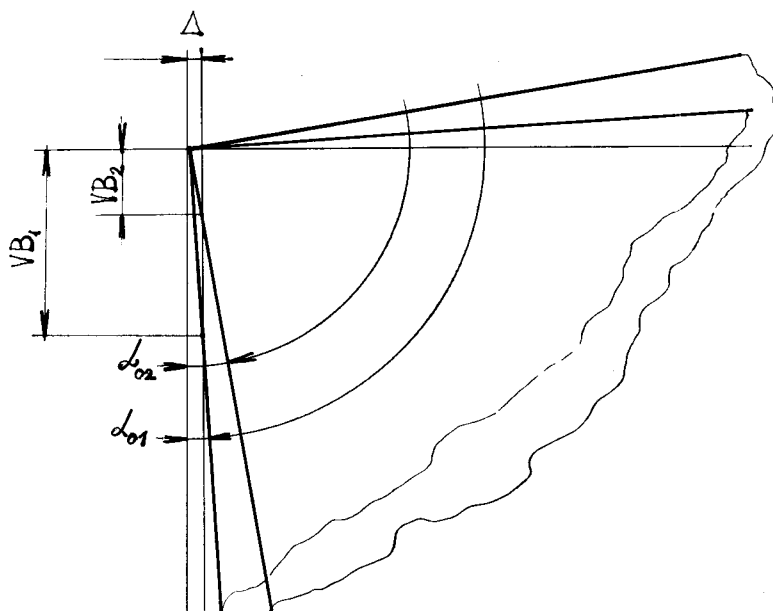
#### 4.2.4. Vliv geometrie řezného nástroje na intenzitu jeho opotřebení

Jedním z významných činitelů působících na trvanlivost řezného nástroje při obrábění korundové keramické hmoty je i geometrie jeho řezné části. Pro prováděný experiment je geometrie řezné části nástroje dostatečně určena těmito faktory:

- nástrojový úhel hřbetu /v ortog.rovině/ ..  $\alpha_0$
- nástrojový úhel čela /v ortog.rovině/ ....  $\beta_0$
- nástrojový úhel sklonu ostří .....  $\lambda_s$
- nástrojový úhel nastavení .....  $\alpha_r$
- nástrojový úhel špičky nože .....  $\epsilon_r$
- poloměr špičky nože .....  $r$

Velikost opotřebení řezného nástroje na hřbetě (VB), kterou v experimentu sledujeme, podstatně závisí na hodnotě nástrojového úhlu hřbetu. Hodnota ( $\alpha_0$ ) významně ovlivňuje velikost tření mezi obrobenou plochou a plochou hřbetu nástroje. Při obrábění korundové keramické hmoty, kde rozhodujícím faktorem opotřebení je abrazivní otěr, je velikost tření mezi obrobenou plochou a hřbetní plochou nástroje obzvlášť významná. Závisí na ní přímo trvanlivost nástroje a tím tedy i ekonomická stránka obrábění, přesnost výroby a jakost obrobené plochy.

Současně má hodnota nástrojového úhlu hřbetu ( $\alpha_0$ ) vliv i na přesnost měření opotřebení řezného nástroje na hřbetě. Čím menší je hodnota ( $\alpha_0$ ), tím větší jsou kladeny nároky na přesnost měření opotřebení (obr.č.5).



obr.č. 5



Při malých hodnotách ( $\alpha_0$ ) je rozhraní mezi opotřebenou a neopotřebenou plochou hřbetu nástroje velmi neostré. /V průběhu předběžných testů bylo zjištěno, že hřbetní plocha nástroje je narušována i vlivem pěchování hmoty mezi obrobenou plochou a plochou hřbetu nástroje, vlivem tvorby nárůstku a vlivem narušování nerovností povrchu hřbetní plochy. Stupeň narušení hřbetní plochy nástroje těmito činiteli silně vzrůstá se zmenšením hodnot  $\alpha_0$ . /

Nástrojový úhel čela ( $\lambda$ ) má svojí hodnotou vliv na intenzitu opotřebení (obr.č.5), závisí na něm řezný odpor, který klade obráběný materiál a pevnost břitu. Má vliv na tvorbu třísky a na míru pěchování obrábění keramické hmoty.

Nástrojový úhel sklonu ostří ( $\lambda_s$ ) svojí hodnotou ovlivňuje odchod třísek po čele nástroje, míru pěchování keramické hmoty, intenzitu opotřebení nástroje a jakost povrchu obrobené plochy.

Nástrojový úhel nastavení ( $\lambda_r$ ) svojí hodnotou ovlivňuje tvar a velikost průřezu třísky a tím i velmi podstatně velikost řezného odporu, který klade obráběný materiál. S tím souvisí i vliv na intenzitu opotřebení ostří nástroje. Současně ovlivňuje, ve vztahu k hloubce řezu ( $h$ ), délku opotřebované plošky na hřbetě nástroje. /Významné pro měření opotřebení na hřbetě/.

Hodnota nástrojového úhlu špičky nože ( $\varepsilon_r$ ) a velikost poloměru špičky nože ( $r$ ) mají významný vliv na jakost povrchu obrobené plochy.

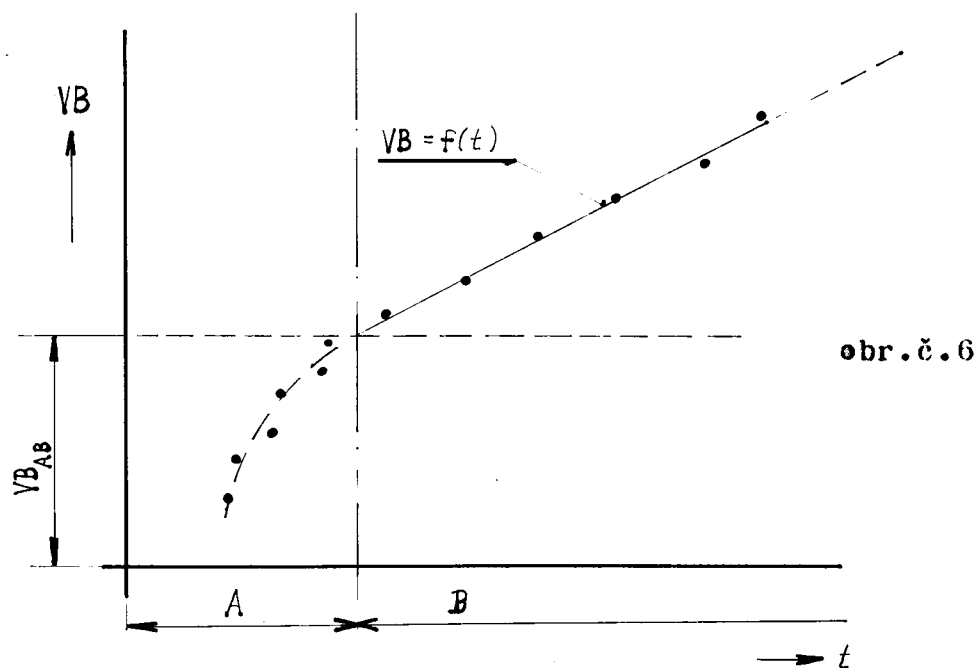
Při realizaci experimentu je geometrie řezného nástroje konstantním faktorem. Je zcela dána použitým nožovým držákem pro mechanické upínání řezných destiček. Diference hodnot geometrie nástroje vzniklé vyjímáním řezných destiček při měření opotřebení a je-

jich opětovným upínáním do nožového držáku jsou při dodržení čistoty dosedacích ploch prokazatelně zanedbatelné.

#### 4.2.5. Vliv drsnosti povrchu řezného nástroje na intenzitu jeho opotřebení

V počáteční časové fázi procesu obrábění novou dosud nestupenou řeznou destičkou dochází nejprve k vyrovnávání výstupků nerovností jejího povrchu. Povrchová vrstva materiálu řezné destičky, jejíž vlastnosti jsou ovlivněny zpracováním řezného materiálu a z toho vyplývajícími mikronerovnostmi povrchu je velice snadno narušována tvrdými zrny oxidu hlinitého - hlavní komponentní složky obráběné keramické hmoty. Tato časová fáze se vyznačuje zvýšenou a nerovnoměrnou intenzitou opotřebení řezného nástroje, tomu odpovídá i tvar funkční závislosti opotřebení řezného nástroje na hřebtě ( $VB$ ) na čase ( $t$ ).

(Obr.č. 6 oblast A)



Po vyrovnaní počátečních mikronerovností je vytvořena na hřbetě nástroje opotřebená ploška, tím je vytvořena i vlastní geometrie ostří nástroje. Drsnost povrchu opotřebené plošky se nadále nijak významně nemění, pouze se tato ploška s postupem opotřebení rezného nástroje zvětšuje. Povrchová vrstva rezného materiálu s vlastnostmi ovlivněnými zpracováním je zcela odstraněna, projevuje se jen na okrajích opotřebené plošky. Nastává druhá časová fáze procesu obrábění, která se vyznačuje nekolísající intenzitou opotřebení a jejím ustálením na hodnotě nižší než v první časové fázi (obr.č. 6 oblast B). Rozhraní obou časových fází je charakterizováno hodnotou opotřebení na hřbetě - v tomto experimentu označenou ( $VB_{AB}$ ). Tato hodnota přímo závisí na velikosti počátečních mikronerovností povrchu rezné destičky.

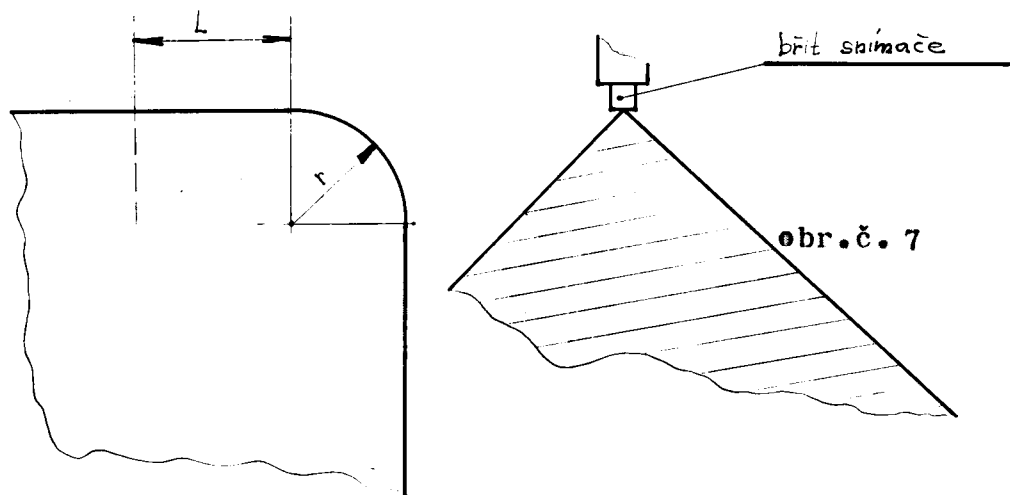
Druhá časová fáze procesu obrábění je významná pro prováděný experiment. protože funkční závislost opotřebení na hřbetě ( $VB$ ) na čase ( $t$ ) lze v této časové fázi nahradit odhadnutými tvarem funkce  $VB = f(t)$ . Nahrazení je nezbytné pro matematické vyhodnocení experimentu.

Třetí časová fáze procesu obrábění /uváděná v literatuře/ charakteristická pro obrábění kovů, během níž dochází k lavinovitému otěru a tím k prudkému vzrůstu intenzity opotřebení nástroje, se u obrábění kerundové keramické hmoty M17 neprojevila /podrobněji v závěru práce/.

Z analýzy vlivu drsnosti povrchu rezného nástroje na intenzitu jeho opotřebení je zřejmé, že velikost počátečních mikronerovností, resp. rozdíly velikosti počátečních mikronerovností u jednotlivých destiček, by mohly ovlivnit správnost výsledku prováděného experimentu. Je tedy nezbytné vliv tohoto faktoru omezit.

Lze to uskutečnit buď shodnou úpravou povrchu všech řezných destiček (např. lapování) a nebo výběrem destiček podle určitého testovacího kritéria, zaručujícím minimální diference jakosti povrchu jednotlivých řezných destiček.

Kritérii testů výběru zvoleny hodnoty střední aritmetické úchyly (Ra), hodnota (Rt) a tvar grafického záznamu nerovností povrchu. Měření uvedených veličin bylo provedeno na HOMMEL testu a to tak, že u všech řezných destiček byly měřeny parametry drsnosti povrchu všech jejích řezných hran ostří v úseku (L), ve kterém je měřeno opotřebení na hřbetě (VB) (obr.č. 7). Současně byly pořízeny záznamy nerovností povrchu řezných hran ostří v tomto úseku:



Po stanovení střední hodnoty střední aritmetické úchyly

$$\bar{Ra} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Ra_i \quad (2)$$

kde (n) značí počet sledovaných řezných hran (Ra<sub>i</sub>) je hodnota střední aritmetické úchyly i-té hrany a po stanovení /zvolení/ přípustné hodnoty difference střední aritmetické úchyly

$$\Delta Ra_i = |Ra_i - \overline{Ra}|$$

( 3 )

byl proveden výběr řezných hran destiček. Hrany, u nichž  $Ra_i$  v úseku L převyšovala zvolenou přípustnou hodnotu, nebyly v průběhu provádění experimentu pro měření trvanlivosti použity.

Hodnota ( $R_t$ ) a grafický záznam nerovností povrchu řezných hran sloužily k zjištění významných lokálních nerovností v úseku (L), které by mohly ovlivnit výsledky experimentu. Řezné hrany, u nichž byly tyto vady zjištěny, rovněž nebyly v průběhu experimentu použity.

Uvedený výběrový test byl aplikován pouze při výběru řezných hran u destiček ze slinutých karbidů, kde  $Ra = 0,998$ .

U destiček z řezné keramiky nebyl tento test vlivem vysokého rozptylu hodnot ( $Ra_i$ ) vhodný. Povrch destiček z řezné keramiky byl proto upraven broušením diamantovým kotoučem.

Úpravou povrchu všech destiček by se sice rozptyl hodnot ( $Ra_i$ ) snížil více než výběrem podle uvedeného testu, ale zároveň by nastal významný odklon od konkrétních podmínek při obrábění výlisků z korundové keramické hmoty M17, kdy řezné destičky nejsou nijak upravovány.

V průběhu realizace a vyhodnocení experimentu uvažujeme drsnost řezných destiček jako konstantní faktor.

#### 4.2.6. Vliv ostatních uvažovaných faktorů na intenzitu opotřebení řezného nástroje

##### Vliv stárnutí obráběcího materiálu

Z předchozích zkušeností je zřejmé, že stárnutím výlisky z korundové keramické hmoty M17 v nevypáleném stavu mění svoje vlastnosti ovlivňující intenzitu opotřebení řezného nástroje při jejich obrábění. Důvod ani vliv stárnutí nebyl dosud nijak podrobně zkoumán a nelze ho tedy popsat žádnou veličinou.

Protože stárnutí obráběného materiálu je značně dlouhodobou záležitostí, stačí k odstranění nežádoucího vlivu stárnutí materiálu na výsledek experimentu, provést experimentální zkoušky ve vhodně zvoleném časovém intervalu.

##### Vliv chvění soustavy SPID

Analýza vlivu chvění soustavy SPID nebyla z důvodu omezených možností při analýze experimentu provedena. Určitý vliv chvění na intenzitu opotřebení řezného nástroje při obrábění korundové keramické hmoty lze předpokládat, zvláště je-li nutno při nižších řezných rychlostech použít pro dosažení potřebného stupně otáček u obráběcího stroje předlehy, čímž se hodnoty parametrů chvění podstatně zvýší.

Protože však se současnými znalostmi nelze vliv chvění na intenzitu opotřebení řezného nástroje při obrábění korundové keramické hmoty popsat určitou veličinou, a ani není možné toto chvění odstranit, je nezbytné považovat chvění soustavy SPID za konstantní faktor.

## Vliv difference vlastností řezného materiálu

Vlastnosti materiálu jednotlivých řezných hran řezné destičky, ovlivňující intenzitu opotřebení při obrábění korundové keramické hmoty, i vlastnosti jednotlivých řezných destiček z téhož materiálu se mohou lišit. Je to způsobeno určitými vlivy při výrobě řezných destiček.

Pokud difference vlastností řezného materiálu není natolik značná, aby její vliv na intenzitu opotřebení byl zřejmý už při provádění experimentální zkoušky, lze jí jen velmi těžko odhalit a vyloučit. Proto je nutné uvažovat každý zkoušený řezný materiál při provádění a vyhodnocování experimentu jako celek.

V analytické fázi plánování experimentu byl uvážěn vliv všech významných činitelů na experimentální problém. Zapišeme-li nyní základní rovnici experimentu bude mít obecný tvar:

$$T = (v, s, \text{obráběný materiál, řezný materiál}) \quad (4)$$

$T$  = trvanlivost řezného materiálu - jediná závisle proměnná

$v$  = řezná rychlost - nezávisle proměnná

$s$  = posuv - nezávisle proměnná

řezný materiál - nezávisle proměnná

obráběný materiál - nezávisle proměnná

( $T, v, s$ ) jsou proměnné kvantitativního charakteru a řezný materiál kvalitativního charakteru.

Daný experimentální problém je možné řešit experimentálním měřením závislosti opotřebení řezného nástroje na hřbetě (VB) na čase obrábění (t). Pro realizaci experimentálních zkoušek je vhodné použít dlouhodobou zkoušku trvanlivosti řezného nástroje. Tato zkouška je sice náročná na spotřebu času a její nevýhodou je i vysoká spotřeba obráběného materiálu, ale zároveň se svým průběhem maximálně přibližuje konkrétním podmínkám obrábění výlisků z korundové keramické hmoty M17 - což je podstatné a rozhodující.

#### 4.2.7. Dlouhodobá zkouška trvanlivosti řezného materiálu

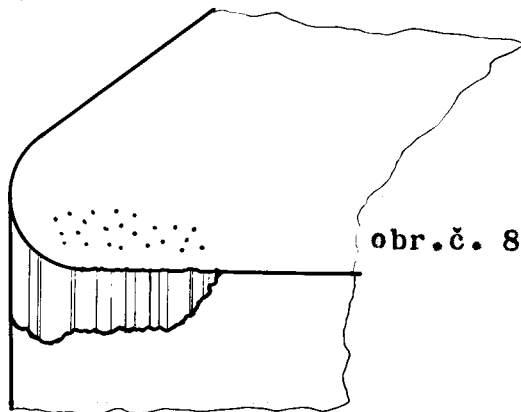
Korundový keramický materiál je obráběn podélným soustružením za určitých řezných podmínek - (v,s,h) po určitý čas (t). Po vhodně zvolených časových intervalech je měřena hodnota opotřebení řezného nástroje na hřbetě (VB) až do okamžiku překročení hodnoty kritériálního opotřebení ( $VB_k$ ). Tím je získána závislost  $VB = f(t)$ . Matematickým vyhodnocením této závislosti lze dosáhnout souboru hodnot trvanlivostí (T) pro zvolenou hodnotu kritériálního opotřebení a za určitých řezných podmínek - (v,s,h). Soubor trvanlivosti je potom vyhodnocen matematicky pro navržený tvar funkcí závislosti  $T = f(v,s)$ .

Tento postup opakujeme pro každý řezný materiál, čímž je dosaženo možnosti porovnání trvanlivostí řezných materiálů při obrábění korundové keramické hmoty za určitých řezných podmínek.



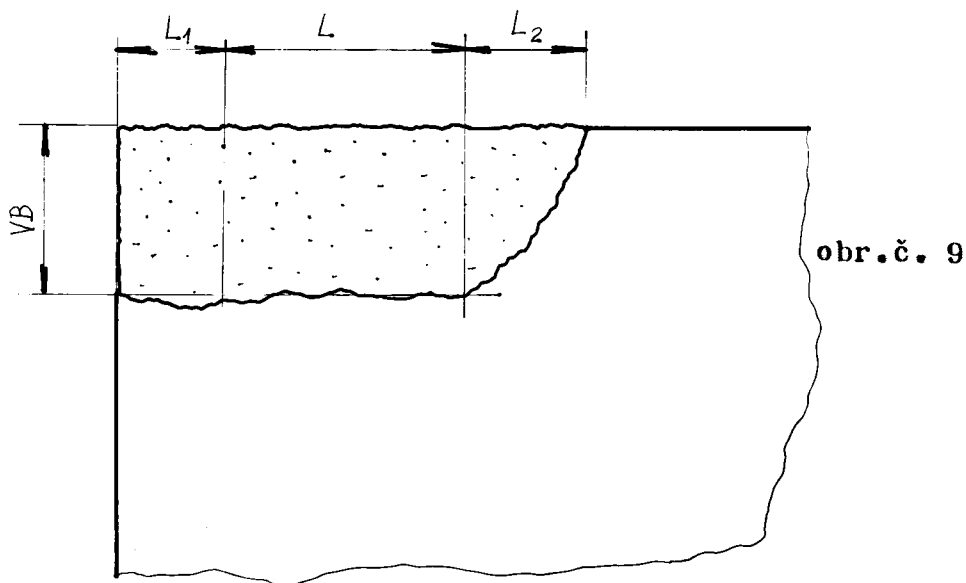
#### 4.2.8. Způsob měření opotřebení rezného nástroje

Řezný nástroj je při obrábění korundové keramické hmoty narušován abrazivním působením tvrdé složky ( $Al_2O_3$ ) této hmoty na ploše hřbetu a na ploše čela nástroje (obr.č. 8). Míra opotřebení čelní plochy je v porovnání s opotřebením hřbetu nástroje zanedbatelná, budeme tedy sledovat, jak je zřejmé i z návrhu dlouhodobé zkoušky trvanlivosti, pouze hodnotu opotřebení na hřbetě nástroje (VB).



obr.č. 8

Hodnotu opotřebení na hřbetě nástroje je vhodné měřit pomocí dílenského mikroskopu. Požadavkem je, aby bylo hodnotu opotřebení možno měřit s přesností 0,01 mm.



obr.č. 9

Na obr.č. 9 je znázorněno detailní schéma měření opotřebení na hřbetě nástroje /řezné destičky/. Hodnota (VB) je střední hodnotou opotřebení na hřbetě v úseku (L). Tento úsek odpovídá úseku (L) měření drsnosti řezné hrany v kap. 3.2.5./.. Úsek ( $L_1$ ) je úsek zvýšeného opotřebení v oblasti špičky nástroje, při experimentálních zkouškách je vhodné tento úsek zvolit  $L_1 = r$ , kde (r) je poloměr špičky nástroje. Úsek ( $L_2$ ) je úsek opotřebení ovlivněného stykem nástroje s povrchem obrobku. Při předběžných testech bylo zjištěno, že hodnota opotřebení při obrábění korundové keramické hmoty v tomto úseku klesá.

Pro správnost a srovnatelnost jednotlivých měření je nutno zaručit vhodnou polohu každé řezné destičky při měření. Rovněž směr a intenzita osvětlení by se, pokud možno neměly u jednotlivých měření měnit.

## Syntetická fáze

Cílem syntetické fáze je provedení syntézy řešeného problému se zřetelem na konkrétní prováděcí experimentu, vycházíme přitom z daného materiálně technického vybavení experimentálního pracoviště.

Konkrétním problémem této fáze plánování experimentu je návrh tvaru strukturálního modelu experimentu a vlastního funkčního modelu měření. Významnou součástí je i návrh matematické části řešení experimentálního problému.

### 4.2.9. Návrh tvaru experimentálních rovnic experimentu, určení úrovní faktorů

Návrh tvaru experimentálních rovnic experimentu je velmi důležitou oblastí plánování experimentu. Na kvalitě návrhu přímo závisí rozsah experimentálních zkoušek a kvalita řešení experimentálního problému. V případě dalších neznalostí o řešeném problému je vždy nutné volit obecnější tvary funkcí.

Po uvážení zkušeností s obráběním keramických hmot obdobného složení a vlastností a zkušeností nabytých v průběhu provádění předběžných testů obrábění korundové keramické hmoty M17 byl pro matematické vyhodnocení experimentálních zkoušek zvolen tvar experimentální rovnice:

$$T = c_T \cdot v^{-m} \cdot s^{-y} \quad ( 5 )$$

Uvedený vztah je zjednodušený tvar Taylorova vztahu, který nejlépe vystihuje závislost trvanlivosti řezného materiálu při obrábění korundové keramické hmoty za určitých řezných podmínek -  $(v, s)$ . Z analytické části plánování experimentu je zřejmé, že hloubka řezu  $h$  se při obrábění korundové keramické hmoty jeví ve vztahu k trvanlivosti řezného nástroje konstantním faktorem - to umožňuje aplikaci takto zjednodušeného Taylorova vztahu.

Pro navržený tvar experimentální rovnice je nutno znát soubor hodnot trvanlivostí  $(T)$ . Návrh matematického vyhodnocení naměřených funkčních závislostí hodnot opotřebení na hřbetě  $(VB)$  v závislosti na čase obrábění  $(t)$ , jímž je souboru trvanlivostí dosaženo, je uveden jako součást matematického řešení experimentálního problému.

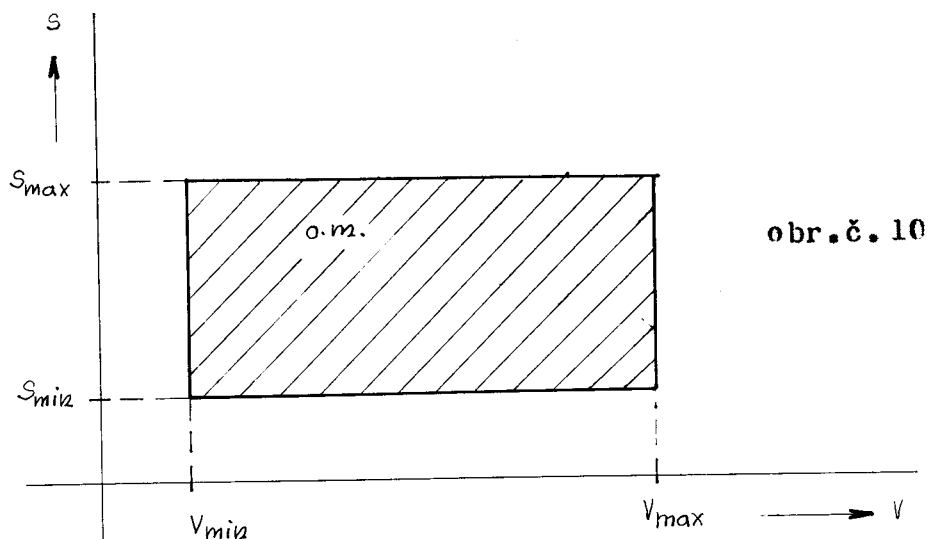
Jestliže má faktor kvalitativní charakter /obráběná korundová keramická hmota, řezný materiál/ jsou jeho úrovně dány zadáním a požadavky experimentálního problému.

U faktorů majících kvantitativní charakter určíme počty úrovní jednotlivých faktorů a tyto úrovně na základě návrhu tvaru základních rovnic experimentu, kvality odhadu a uvažovaných rozsahů jednotlivých faktorů.

Obecně lze říci, že minimální počet úrovní příslušného faktoru je dán počtem konstant příslušné rovnice. Počet úrovní jednotlivých faktorů je závislý též na uvažovaném rozsahu daných faktorů. Čím větší je tento rozsah, tím více se projeví případná nepřesnost návrhu experimentálních rovnic experimentu a tím také musíme volit počet úrovní každého faktoru. /3/.

## Návrh oblasti měření

Nejprve provedeme návrh oblasti měření, ve které se budou vyskytovat hodnoty nezávisle proměnných (obr.č.10). Základním parametrem při návrhu oblasti měření jsou požadavky na řešení experimentálního problému, současně zde vystupuje vliv možnosti a vybavení experimentálního pracoviště.



obr.č. 10

Vymezená oblast měření nám udává mezní hodnoty nezávisle proměnných  $\{v_{min}, v_{max}, s_{min}, s_{max}\}$ . Vymezení oblasti měření a stanovení mezních hodnot nezávisle proměnných je významnou částí plánování experimentu. Spolu s návrhem experimentálních rovnic experimentu ovlivňuje významně rozsah experimentálních zkoušek a tím i spotřebu strojního času a obráběné korundové keramické hmoty.

## Určení úrovní faktorů

Při určování jednotlivých úrovní faktorů se snažíme volit úrovně tak, aby rozdíly mezi velikostmi hodnot sousedních úrovní byly ve zlogaritmovaném tvaru, pokud je to možné, stejné.

V navržené oblasti měření

$$ve \langle v_{\min}, v_{\max} \rangle \text{ Use } \langle s_{\min}, s_{\max} \rangle \quad (6)$$

bude mít každý faktor, po uvážení metod pro volbu počtu úrovní jednotlivých faktorů, tři úrovně. Tedy maximální hodnotu, minimální hodnotu a střední hodnotu. Pro určení středních hodnot /úrovní/ jednotlivých faktorů použijeme vztahy:

$$v_{\text{střední}} = e^{\frac{\ln v_{\max} - \ln v_{\min}}{2}} \quad (7)$$

$$s_{\text{střední}} = e^{\frac{\ln s_{\max} - \ln s_{\min}}{2}} \quad (8)$$

### 4.2.10. Návrh strukturálního modelu experimentu

Strukturálním modelem je stanoven základní rozsah experimentu. Současně je základem pro tabelární zpracování dat. /3/

Základní vztah strukturálního modelu experimentu:

$$M_s = k_1 \cdot k_2 \dots k_p \dots k_{pp} /3/ \quad (9)$$

kde  $M_s$  je počet strukturálních buněk /bodů/ experimentu  
 $k_p$  počet úrovní  $p$  - tého faktoru  
 $pp$  počet faktorů

V případě, že  $k_1 = k_2 = k_p = k_{pp}$ , hovoříme o symetrickém strukturálním modelu.

$$\text{Potom } M_s = k^{pp} \quad (10)$$

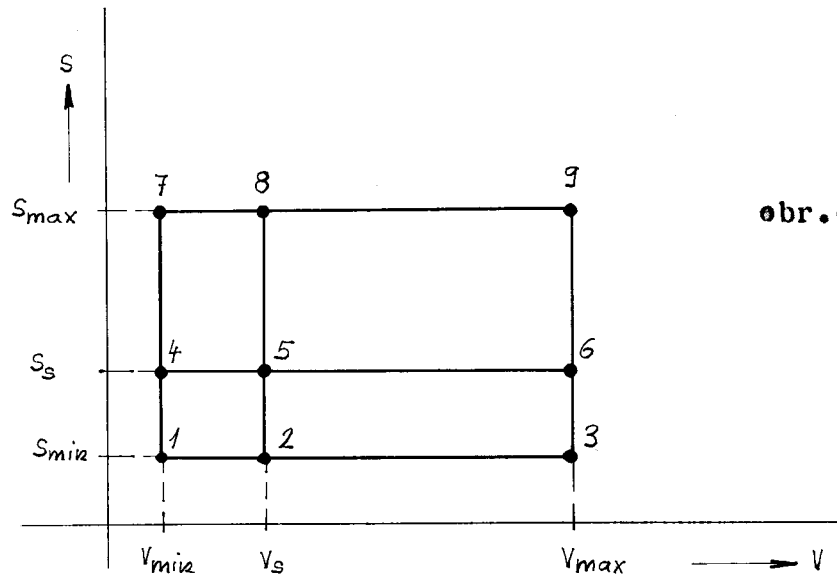
V případě daného experimentálního problému je tedy počet úrovní faktorů shodný, strukturální model experimentu bude tedy symetrický a podle vztahu (10) bude mít devět strukturálních buněk.

#### Zobrazení strukturálního modelu experimentu v souřadnicích - v, s

Zobrazením strukturálního modelu experimentu získáme velmi názorné schema experimentálních zkoušek. Jednotlivé buňky strukturálního modelu číselně označíme a celou oblast měření popíšeme konkrétními hodnotami nezávisle proměnných (obr.č.11). Na číselné značení strukturálních buněk a na dodržení tohoto značení při matematickém řešení experimentálního problému je kladen obzvlášť velký důraz.

Mezní hodnoty faktorů volíme dle požadavků řešení experimentálního problému. Rozsah rezných rychlostí je určen oblastí rezných rychlostí používaných při praktickém obrábění výlisků z korundové keramické hmoty. Přičemž tento rozsah po uvážení možností a vybavení experimentálního pracoviště, a rovněž po uvážení náročnosti na spotřebu obráběného materiálu, volíme o určitou hodnotu širší. Čímž zaručíme universálnost použití výsledků experimentálního problému.

Rozsah posuvů je určen obdobně, současně však s přihlédnutím na požadovanou jakost obrobenej plochy korundové keramické hmoty. Střední hodnoty úrovní faktorů určíme dle vztahů (7) a (8).



obr.č. 11

/číselné označení buněk strukturálního modelu bude dále označováno indexem (j) u příslušných veličin vztahujících se k j-té buňce/

#### Hodnoty úrovní jednotlivých faktorů

řezná rychlost:

$$v_{\max} = 263,1 \text{ m.min}^{-1}$$

$$v_s = 126,5 \text{ m.min}^{-1}$$

$$v_{\min} = 58,3 \text{ m.min}^{-1}$$

posuv:

$$s_{\max} = 0,085 \text{ mm.ot}^{-1}$$

$$s_s = 0,067 \text{ mm.ot}^{-1}$$

$$s_{\min} = 0,053 \text{ mm.ot}^{-1}$$

/Hodnoty úrovní řezné rychlosti jsou dány uvedenou volbou a konkretizovány výpočtem pro možné stupně otáček obráběcího stroje a průměr výlisků z korundové keramické hmoty/.



Velikost hloubky řezu ( $h$ )/konstantního faktoru/ byla volena s ohledem na spotřebu obrábění korundové keramické hmoty při experimentálních zkouškách. Rozhodující však byl požadavek, aby zvolená velikost hloubky řezu při dané geometrii řezného nástroje plně zaručila dostatečně široký úsek ( $L$ ) pro měření velikosti opotřebení na hřbetě nástroje (kapitola 4.2.8; obr.č. 7).

Pro experimentální zkoušky byla volena velikost hloubky řezu  $h = 1,5$  mm.

#### 4.2.11. Návrh funkčního modelu experimentu

Funkční model experimentu určuje, kolik buněk ve strukturálním modelu bude obsahovat výsledky měření a kolik buněk zůstane prázdných. Shoduje-li se funkční model experimentu se strukturálním modelem experimentu, tj. všechny buňky obsahují výsledky měření, označujeme tento funkční model experimentu jako úplný. /3/.

$$(M_f = M_s).$$

Je-li funkční model experimentu menší (užší) než strukturální model experimentu, označujeme jej jako neúplný. ( $M_f < M_s$ ). Hovoříme přitom o omezování strukturálního modelu.

V případě realizace tohoto experimentálního problému je vhodné použít úplného funkčního modelu experimentu. V důsledku omezeného množství výlisků z obráběné korundové keramické hmoty M17 a vyloučení jejich doplnění v průběhu experimentálních zkoušek bylo nutno strukturální model experimentu omezit.

Po uvážení vlivu na vyhodnocení a výsledek experimentálního problému bylo omezení strukturálního modelu experimentu realizováno tak, že strukturální

buňky označené 2, 4, 5 byly ve funkčním modelu experimentu neobsazeny.

Oproti aplikace úplného funkčního modelu experimentu vnese toto omezení strukturálního modelu do vyhodnocení experimentálních zkoušek určitou chybu /zvýšený rozptyl/, avšak srovnání nástrojových materiálů při obrábění korundové keramické hmoty nijak významně neovlivní.

Realizace experimentu je vedena tak, že se provádí měření všech buněk funkčního modelu experimentu. Přitom postupujeme tak, že všechny faktory jsou pro buňku konstantní /v, s/ s výjimkou parametru, který měníme postupně /t/. Naměřené hodnoty opotřebení na hřbetě (VB) a příslušné časy obrábění (t) zapisujeme do tabulky.

Při návrhu počtu opakovaných měření pro každou strukturální buňku funkčního modelu bylo rozhodující omezení množství vylisků z obráběné keramické hmoty a vysoká spotřeba času při realizaci experimentálních zkoušek. Bylo rozhodnuto, že pro každou buňku bude provedeno pouze jedno měření. Je tedy vždy nutno rozhodnout o tom, zda měření bylo zatíženo nepřipustně velkou chybou, a měření u kterého je prokázáno, že touto nepřipustnou chybou zatíženo je, dodatečně opakujeme.

Součástí předběžných testů bylo zjištění difference naměřených hodnot pro dvě a více měření za shodných podmínek /pro strukturální buňku/. Zjištěné difference byly minimální, což bylo významné při rozhodnutí o pouze jednom měření pro každou buňku funkčního modelu experimentu.

### Návrh tabulky naměřených hodnot

Při návrhu tabulky naměřených hodnot opotřebení na hřbetě byla aplikována upravená hierarchická forma zobrazení (obr.č.12).

j		j		
$t_{ij}$	$VB_{ij}$	$t_{ij}$	$VB_{ij}$	

obr.č.12

Index (j) zastupuje číselné označení strukturální buňky funkčního modelu měření. Pro každou j-tou buňku zapisujeme potom pod sebe i-té hodnoty naměřeného opotřebení na hřbetě (VB) a i-té časy obrábění.

#### 4.2.12. Volba kritéria opotřebení řezného nástroje

Aby bylo možno určit pro jednotlivé experimentální zkoušky hodnotu trvanlivosti řezného nástroje, je nezbytné definovat stav břitu nástroje, kdy jej pokládáme za otupený, tj. kdy dosáhne otupení hodnoty kritériálního opotřebení.

Stav otupení břitu lze hodnotit z hlediska buď technologického nebo ekonomického. Vzhledem ke konkrétním podmínkám obrábění korundové keramické

hmoty a k experimentálnímu problému je nutné hodnotit otupení břitů nástroje z hlediska technologického.  
- Břit je považován za otupený, není-li nástroj schopen obrábět dále danou plochu v požadované jakosti.  
/rozměrová přesnost, jakost povrchu/

Při předběžných testech byly realizovány zkoušky obrábění korundové keramické hmoty pro řezné podmínky dané krajními buňkami funkčního modelu experimentu. Byla sledována velikost opotřebení na hřbetě (VB) a současně jakost povrchu obrobenej plochy v závislosti na hodnotě (VB).

Pro strukturální buňku č.9 /tj. pro  $v = 263,1 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$  a  $s = 0,085 \text{ mm} \cdot \text{ot}^{-1}$ / se jakost povrchu obrobenej plochy silněji zhoršovala již při hodnotě opotřebení na hřbetě  $VB = 0,31 \text{ mm}$ . Pro ostatní strukturální buňky funkčního modelu experimentu ke zhoršení jakosti povrchu obrobenej plochy při hodnotě  $VB = 0,31 \text{ mm}$  buď nedocházelo vůbec, nebo jen velmi málo /buňky č.6 a č.3/.

Po vyhodnocení a uvážení všech možných vlivů /chvění vlhkost ap./ a při respektování požadavku úspory obráběného materiálu byla zvolena hodnota kritériálního opotřebení  $VB_k = 0,30 \text{ mm}$ .

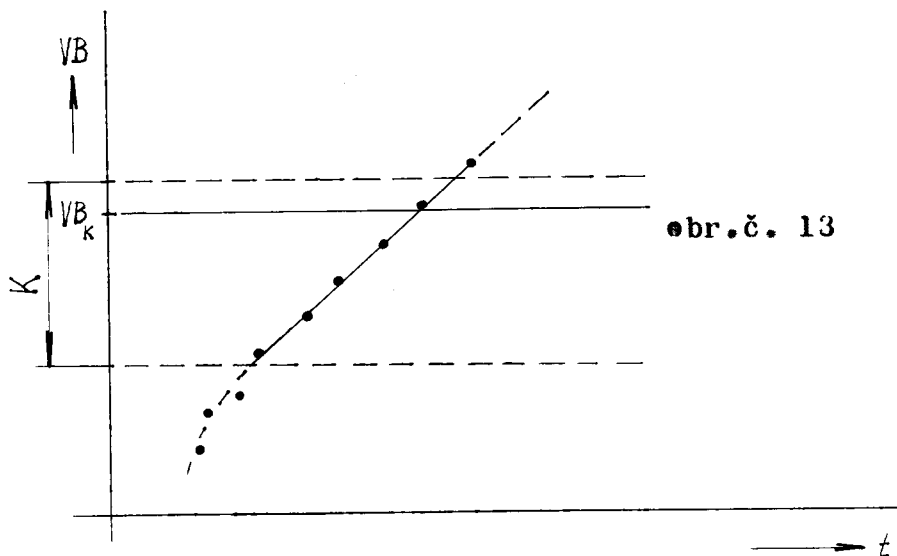
#### 4.2.13. Návrh matematického vyhodnocení experimentálních zkoušek

Při experimentálních zkouškách získáme naměřené hodnoty opotřebení na hřbetě v závislosti na čase obrábění. Destáváme tak funkce  $VB = f(t)$  určitých tvarů pro jednotlivé body /buňky/ funkčního modelu experimentu. Po vymezení oblasti (K), v které lze průběhy těchto funkcí nahradit lineární funkcí, body o souřadnicích /VB; t/ spadajícími do oblasti (K) proložíme přímkou metodou nejmenších čtverců odchylek vyrovnaných hodnot

$(\overline{VB}_{ij} = k_j \cdot t_{ij} + q_j)$  od hodnot získaných měření

$(VB_{ij})$ .

(obr.č.13)



Výchozí vztah: 
$$\sum_{i=1}^n [\overline{VB}_{ij} - VB_{ij}]^2 \rightarrow \min \quad (11)$$

Náhradní lineární funkce předpokládáme ve tvaru:

$$VB_{ij} = k_j \cdot t_{ij} + q_j \quad (12)$$

Řešením pomocí metody nejmenších čtverců získáme hodnoty konstant  $(k_j)$  a  $(q_j)$  náhradních lineárních funkcí pro jednotlivé body funkčního modelu měření.

Řešíme soustavu rovnic:

$$\frac{\partial}{\partial k_j} \sum_{i=1}^n [\overline{VB}_{ij} - VB_{ij}]^2 = 0$$

$$\frac{\partial}{\partial q_j} \sum_{i=1}^n [\overline{VB}_{ij} - VB_{ij}]^2 = 0$$

a řešení zapišeme v maticovém tvaru

$$\begin{vmatrix} n & \sum_{i=1}^n t_{ij} \\ \sum_{i=1}^n t_{ij} & \sum_{i=1}^n t_{ij}^2 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} q_j \\ k_j \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \sum_{i=1}^n VB_{ij} \\ \sum_{i=1}^n VB_{ij} \cdot t_{ij} \end{vmatrix}$$

(13)

Pro hodnotu kritériálního opotřebení ( $VB_k$ ) potom vypočítáme /dosazením do náhradních lineárních funkcí/ jednotlivé hodnoty trvanlivostí ostří nástroje ( $T_j$ ) pro buňky funkčního modelu experimentu.

Dále předpokládáme, že ve zvolené oblasti měření (6.) platí pro trvanlivost ostří rezného nástroje závislost (5.) navržená v kapitole 4.2.9.

Zjednodušený Taylorův vztah linearizujeme na tvar:

$$\ln T_j = \ln c_T - m \cdot \ln v_j - y \cdot \ln s_j \quad (14)$$

zavedeme vhodnou substituci

$$\ln T = R$$

$$\ln c_T = C \quad /c_T = e^C/$$

$$\ln v = V$$

$$\ln s = S$$

a stanovíme hodnoty konstant ( $c, m, y$ ) opět využitím metody nejmenšího součtu čtverců odchylek hodnot vyrovnaných ( $\bar{R}_j = C - m \cdot V_j - y \cdot S_j$ ) od hodnot získaných měření a výpočtem ( $R_j$ ).

$$\text{musí platit: } \sum_{c=1}^n [\bar{R}_j - R_j]^2 \rightarrow \min \quad (15)$$

Řešíme soustavu rovnic:

$$\frac{\partial}{\partial c} \sum_{j=1}^n [\bar{R}_j - R_j]^2 = 0$$

$$\frac{\partial}{\partial m} \sum_{j=1}^n [\bar{R}_j - R_j]^2 = 0$$

$$\frac{\partial}{\partial y} \sum_{j=1}^n [\bar{R}_j - R_j]^2 = 0$$

Řešení soustavy rovnic opět zapíšeme v maticovém tvaru:

$$\begin{vmatrix} n & -\sum_{j=1}^n V_j & -\sum_{j=1}^n S_j \\ \sum_{j=1}^n V_j & -\sum_{j=1}^n V_j^2 & -\sum_{j=1}^n V_j S_j \\ \sum_{j=1}^n S_j & -\sum_{j=1}^n V_j S_j & -\sum_{j=1}^n S_j^2 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} c \\ m \\ y \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \sum_{j=1}^n R_j \\ \sum_{j=1}^n R_j V_j \\ \sum_{j=1}^n R_j S_j \end{vmatrix} \quad (16)$$

/ n = počet buněk /bodů/ funkčního modelu experimentu zahrnutých do výpočtu /

Matematickým řešením /zpracováním/ výsledků experimentálních zkušek získáme soubor hodnot trvanlivostí ( $T_j$ ) ostří nástroje pro jednotlivé j-té buňky funkčního modelu experimentu a hodnoty konstant ( $c_T, m, y$ )

navržené experimentální funkce ( 5 ) pro jednotlivé zkoušené rezné materiály.

Uvedené hodnoty jsou základními pro vyhodnocení experimentálního problému.

K významným oblastem plánování experimentu patří návrh technického vybavení experimentálního pracoviště.

#### 4.2.14. Obráběcí stroj

K experimentálním zkouškám trvanlivosti rezného nástroje při obrábění korundové keramické hmoty byl použit soustruh ŠKODA S140N.

##### Volitelné stupně otáček

A	67	95	48
B	530	750	375
A	190	265	132
B	1500	2100	1060

/A označuje zařazení předlohy; B zařazení otáčkového stupně bez předlohy/

Pro dosažení úrovní rezné rychlosti byly použity tyto otáčkové stupně:

$$\begin{aligned}v_{\max} &= 263,1 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1} \dots\dots\dots 1060 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1} \\v_s &= 126,5 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1} \dots\dots\dots 530 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1} \\v_{\min} &= 58,3 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1} \dots\dots\dots 265 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}\end{aligned}$$



### Volitelné hodnoty posuvů

0,95	0,85	0,75	0,67	0,6	0,53
0,48	0,42	0,38	0,34	0,3	0,27
0,24	0,21	0,19	0,13	0,15	0,13
0,095	0,085	0,075	0,067	0,06	0,053

#### 4.2.15. Řezný nástroj

K experimentálním zkouškám byl použit nožový držák /NAREX/ s průřezem tělesa 25 x 25 mm. Upínání měřených řezných destiček bylo mechanické.

Geometrie břitu je zcela dána tělesem nože a tvarem a rozměry řezné destičky /všechny řezné destičky vyjma řezné keramiky byly typu SNUN 120408/

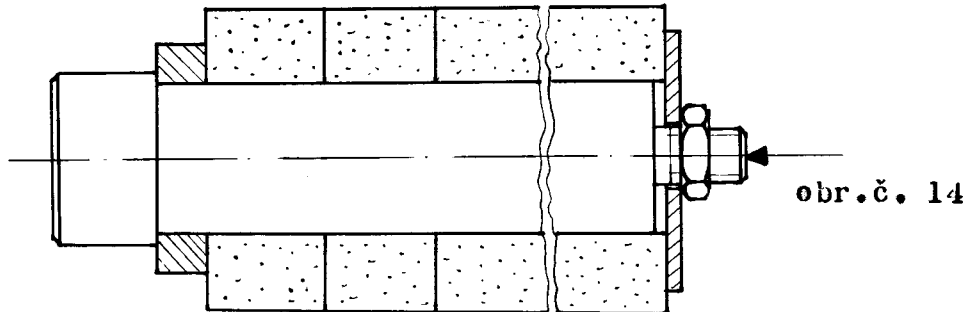
nástrojový úhel hřbetu /v ortog.rovině/;  $\alpha_o = 4^\circ 06'$   
nástrojový úhel čela /v ortog.rovině/;  $\beta_o = -4^\circ 06'$   
nástrojový úhel sklonu ostří;  $\alpha_s = 1^\circ 50'$   
nástrojový úhel nastavení;  $\alpha_r = 70^\circ$   
nástrojový úhel špičky nože  $\epsilon_r = 90^\circ$   
poloměr špičky nože  $r = 0,8 \text{ mm}$

U destiček z řezné keramiky  $r = 1,2 \text{ mm}$

#### 4.2.16. Přípravek

Aby bylo možno při experimentálních zkouškách obrábět korundový keramický materiál podélným soustružením, je nutno použít přípravku pro upevnění většího počtu výlisků současně (obr. č.14).

Byl použit válcový upínací trn umožňující upnutí 19 výlisků. Délka takto vzniklé soustavy je pro realizaci experimentálních zkoušek podélným soustružením už postačující. Aplikací delšího trnu této konstrukce by silně vzrostlo chvění přípravku.



Přípravek byl upnut v universálním sklíčidle obráběcího stroje a opřen otočným hřetem v pinole koníku.

Před vlastním měřením je z každé dosud neobrobené soustavy výlisků odebrána vrstva keramického materiálu 0,5 mm /průměr se zmenší o 1 mm/ za účelem vyrovnání diferencí rozměrů jednotlivých výlisků a odstranění asymetričnosti výlisků. Tím je zaručeno, že při vlastní realizaci měření nebude velikost hloubky řezu ( $h$ ) po obvodu obrobku kolísat.

I když hloubka řezu je volena co nejvhodněji, změní se průměr obrobku po odebrání jedné třísky značně /o 3 mm/. Tímto při odebírání další třísky klesne i řezná rychlost. U úrovní  $v_{\max} = 263,1 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$  a  $v_s = 126,5 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$  je to o 3,79 %, u  $v_{\min} = 58,3 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$  je to o 4,29 %.

Chceme-li dodržet tyto difference úrovní řezné rychlosti jako maximální, je nutné použít větší množství výlisků z kerundové keramické hmoty. Úroveň řezné rychlosti  $v_{\min} = 58,3 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$  byla dosažena použitím soustavy

s průměrem 70 mm při 265 ot . min<sup>-1</sup>. /Soustava byla nejprve využita při měření při  $v_{max}$  nebo  $v_s$  a potom osoustružena na průměr 70 mm/.

#### 4.2.17. Zařízení na měření opotřebení a času obrábění

Pro měření velikosti opotřebení na hřbetě nástroje (VB) byl použit dílenský mikroskop CARL ZEISS-JENA s přesností odečítání 0,001 mm. Osvětlení bylo realizováno vnější přenosnou stolní svítilnou.

Aby byla zajištěna shodná poloha všech řezných destiček, při měření opotřebení, na podložním stole mikroskopu, byl vyroben přípravek z organického skla, který toto dostatečně zajistil.

K měření času obrábění byly použity elektromechanické stopky. /METRA Blansko/.

## 5. Experimentální zkoušky a vyhodnocení

Realizace experimentálních zkoušek je praktickou fází experimentu na jejíž kvalitě, a současně na kvalitě vyhodnocení experimentálních zkoušek, závisí kvalita vyhodnocení celého experimentálního problému. Proto je nutno provádění experimentálních zkoušek a jejich vyhodnocení věnovat obzvlášť velkou pozornost; a uvažovat při nich závěry problémových kapitol analytické fáze i syntetické fáze plánu experimentu.

### 5.1. Tabulky naměřených hodnot opotřebení nástroje

Pro každý řezný materiál z vybraného souboru řezných materiálů pro obrábění korundové keramické hmoty M17 byly realizovány experimentální zkoušky obrábění, tj. dlouhodobá zkouška trvanlivosti /dle návrhu v kapitole 4.2.7./ pro každou strukturální buňku /bod/ funkčního modelu experimentu. Naměřené hodnoty opotřebení nástroje na hřbetě (VB) v závislosti na čase obrábění (t) byly uspořádány do tabulek. Každá tabulka obsahuje uspořádané dvojice hodnot ( $VB_{ij}$ ) a ( $t_{ij}$ ) pro jednotlivé j-té strukturální body funkčního modelu experimentu pro jeden řezný materiál z vybraného souboru.

Tabulka č. 1

Naměřené hodnoty opotřebení na hřbetě nástroje (VB) v závislosti na čase obrábění (t) pro jednotlivé body funkčního modelu měření.

Řezný materiál: 61 SNUN 12 04 08 / Pramet n.p. Šumperk /

j = 9		j = 8		j = 7		j = 6		j = 3		j = 1	
t  min	VB  mrn	t  min	VB  mrn	t  min	VB  mrn	t  min	VB  mrn	t  min	VB  mrn	t  min	VB  mrn
6	0,214	24	0,229	24	0,210	8	0,200	8	0,205	30	0,190
8	0,255	27	0,253	30	0,230	10	0,229	10	0,220	36	0,215
10	0,280	30	0,278	36	0,250	12	0,251	12	0,235	42	0,240
12	0,290	33	0,299	42	0,270	14	0,278	14	0,255	50	0,270
14	0,311	36	0,311	50	0,289	16	0,302	16	0,272	60	0,282
16	0,334			58	0,315	18	0,320	18	0,290	70	0,302
								20	0,308		

/ j označuje číslo bodu funkčního modelu měření /

Tabulka č. 2

Naměřené hodnoty opotřebení na hřbetě nástroje (VB) v závislosti na čase obrábění (t) pro jednotlivé body funkčního modelu měření.

Řezný materiál: H1 SNUN 120408 / Pramet n.p. Šumperk /

j = 9		j = 8		j = 7		j = 6		j = 3		j = 1	
t  min	VB  mrn	t  min	VB  mrn	t  min	VB  mrn	t  min	VB  mrn	t  min	VB  mrn	t  min	VB  mrn
8	0,191	18	0,204	36	0,196	8	0,193	10	0,204	42	0,214
10	0,215	24	0,249	42	0,216	10	0,225	12	0,223	48	0,227
12	0,237	27	0,269	48	0,226	12	0,252	14	0,242	54	0,249
14	0,262	30	0,290	60	0,249	14	0,285	16	0,261	60	0,262
16	0,287	33	0,310	78	0,285	16	0,313	18	0,283	72	0,295
18	0,313			90	0,308			20	0,305	84	0,325

/ j označuje číslo bodu funkčního modelu měření /

Tabulka č. 3

Naměřené hodnoty opotřebení na hřbetě nástroje (VB) v závislosti na čase obrábění (t) pro jednotlivé body funkčního modelu měření.

Řezný materiál: H10 SNUN 120408 /V.Ú. Práškové metalurgie Šumperk /

j = 9		j = 8		j = 7		j = 6		j = 3		j = 1	
t  min	VB  mrn	t  min	VB  mrn	t  min	VB  mrn	t  min	VB  mrn	t  min	VB  mrn	t  min	VB  mrn
10	0,202	24	0,226	42	0,200	10	0,210	12	0,186	36	0,205
12	0,227	29	0,250	48	0,220	12	0,230	16	0,223	48	0,216
14	0,255	32	0,274	54	0,234	14	0,253	20	0,258	60	0,239
18	0,289	36	0,299	60	0,248	16	0,269	24	0,290	72	0,266
20	0,313	40	0,322	66	0,271	18	0,292	26	0,309	84	0,293
21	0,335			72	0,292	20	0,308	28	0,329	96	0,318
				78	0,305						
				84	0,320						

/ j označuje číslo bodu funkčního modelu měření /

Tabulka č. 4

Naměřené hodnoty opotřebení na hřbetě nástroje (VB) v závislosti na čase obrábění (t) pro jednotlivé body funkčního modelu měření.

Řezný materiál: 6 315 SNUN 120408 / Coromant - Švédsko /

j = 9		j = 8		j = 7		j = 6		j = 3		j = 1	
t  min	VB  mrn	t  min	VB  mrn	t  min	VB  mrn	t  min	VB  mrn	t  min	VB  mrn	t  min	VB  mrn
4	0,191	12	0,230	28	0,181	4	0,201	4	0,211	24	0,213
6	0,226	15	0,250	34	0,200	6	0,237	6	0,233	27	0,231
8	0,254	18	0,270	40	0,230	8	0,266	8	0,259	33	0,242
10	0,279	21	0,286	50	0,259	12	0,281	10	0,284	42	0,259
12	0,304	24	0,302	60	0,293	14	0,299	12	0,309	51	0,260
14	0,326			70	0,323	16	0,324			60	0,302
										66	0,323

/ j označuje číslo bodu funkčního modelu měření /



Tabulka č. 5

Naměřené hodnoty opotřebení na hřbetě nástroje (VB) v závislosti na čase obrábění (t) pro jednotlivé body funkčního modelu měření.

Řezný materiál: Carboloy 523

/ Carboloy - USA /

j = 9		j = 8		j = 7		j = 6		j = 3		j = 1	
t  min	VB  mrn	t  min	VB  mrn	t  min	VB  mrn	t  min	VB  mrn	t  min	VB  mrn	t  min	VB  mrn
3	0,210	12	0,212	30	0,212	6	0,200	8	0,213	36	0,222
4	0,233	18	0,249	36	0,240	8	0,266	9	0,244	42	0,234
5	0,241	21	0,270	42	0,258	10	0,247	10	0,241	48	0,250
6	0,252	24	0,290	48	0,271	12	0,265	11	0,258	60	0,276
7	0,264	27	0,320	54	0,290	14	0,296	12	0,277	66	0,283
8	0,277			60	0,304	16	0,302	14	0,299	72	0,290
9	0,289			66	0,315			16	0,322	78	0,296
10	0,296									84	0,302
11	0,308										
12	0,324										

/ j označuje číslo bodu funkčního modelu měření /

## 5.2. Grafické znázornění závislosti $VB = f(t)$

Pro každý vybraný zkoušený rezný materiál je vhodné současně funkční závislosti  $VB = f(t)$  graficky zobrazit. Pro jednotlivé rezné materiály dostáváme tak vždy šest grafických závislostí  $VB = f(t)$  za určitých rezných podmínek odpovídajících příslušné j-té strukturní buňce (bodu) funkčního modelu experimentu. Grafické závislosti velikosti opotřebení na hřbetě ( $VB$ ) na čase obrábění ( $t$ ) jsou velice názorným vyjádřením výsledků experimentálních zkoušek a proto jsou i významné při posuzování vhodnosti vybraných rezných materiálů pro obrábění keramické hmoty M17 za určitých rezných podmínek ( $v, s$ ). Současně je z grafických závislostí  $VB = f(t)$  zřejmý vliv velikostí úrovní faktorů ( $v$ ) a ( $s$ ) na intenzitu opotřebení rezného nástroje.

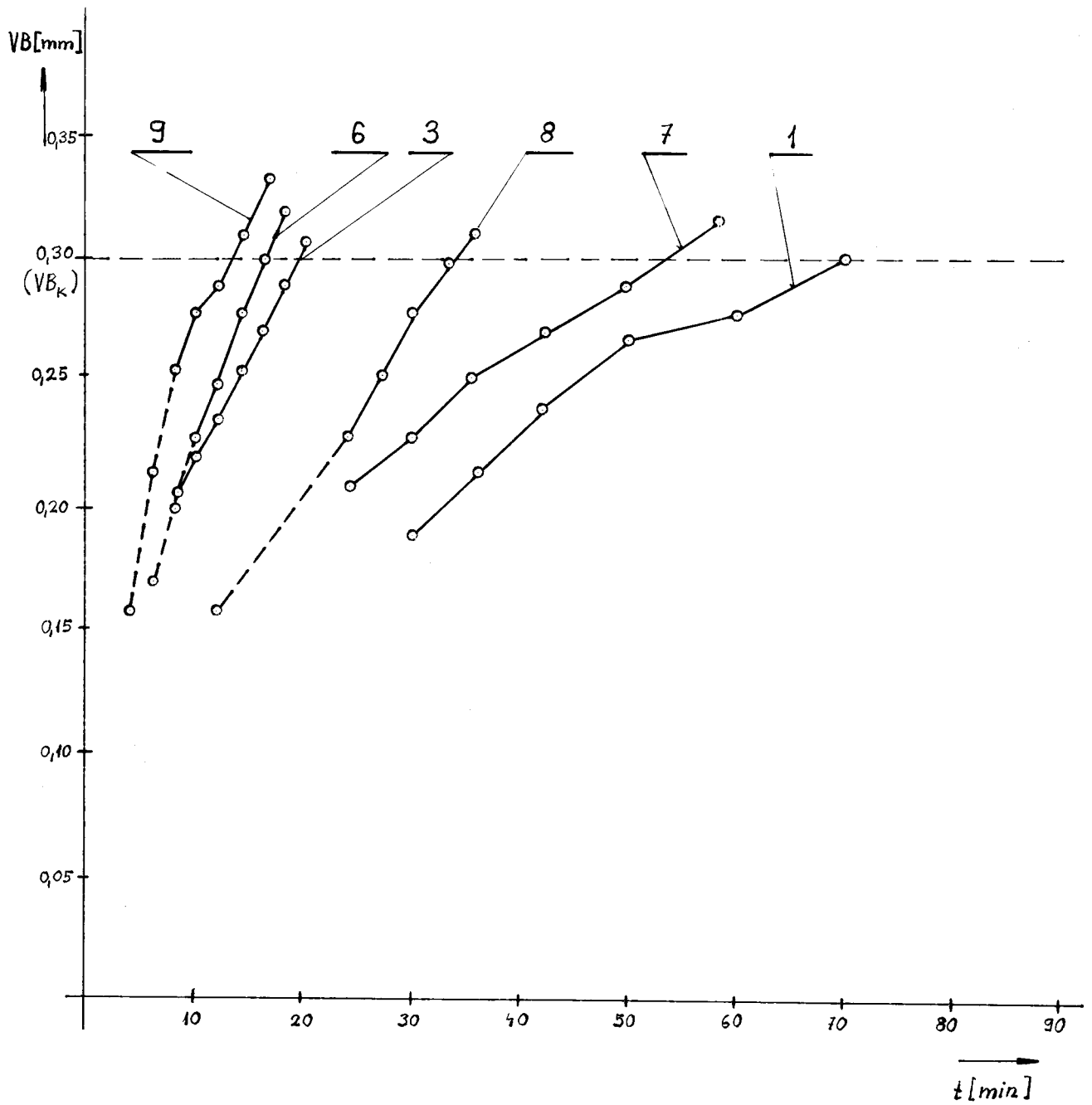
Šířka oblasti ( $K$ ), ve které lze průběhy funkcí  $VB = f(t)$ , získané experimentálními zkouškami, nahradit lineární funkcí pro matematické vyhodnocení experimentálního problému (kapitola 4.2.13) byla pro každou funkční závislost  $VB = f(t)$  stanovena jednotlivě podle konkrétního tvaru průběhu této závislosti. Při grafickém znázornění je část závislosti spadající do oblasti ( $K$ ) vynesena plnou čarou, části závislosti přesahující tuto oblast jsou vyneseny čárkovane.

Obr.č. 15

Grafické závislosti  $VB = f(t)$  pro jednotlivé j-té strukturální buňky (body) funkčního modelu experimentu.

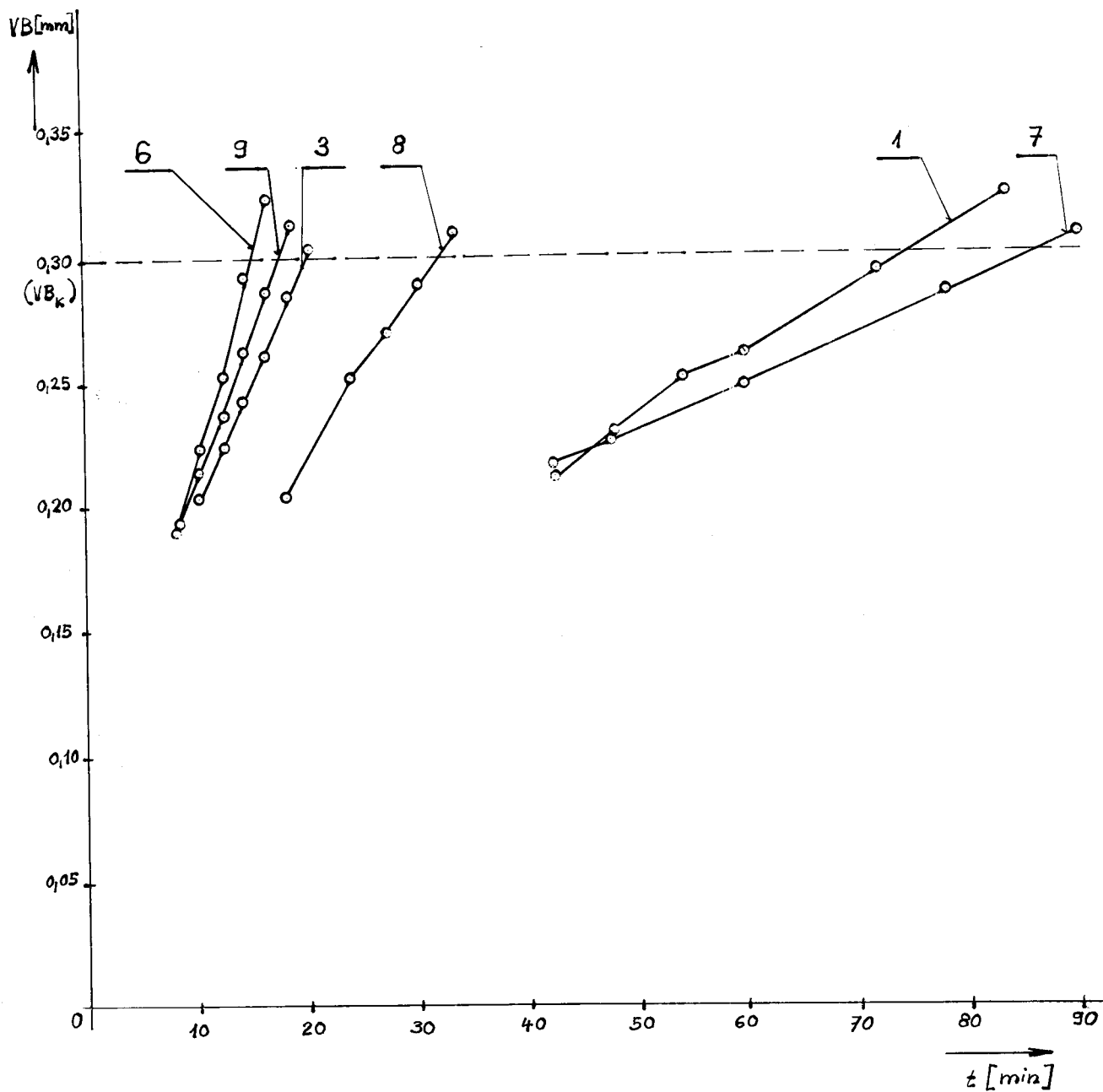
Řezný materiál: G1 SNUN 120408 /Pramet n.p. Šumperk/

$VB_k = 0,30$  mm



Obr.č.16

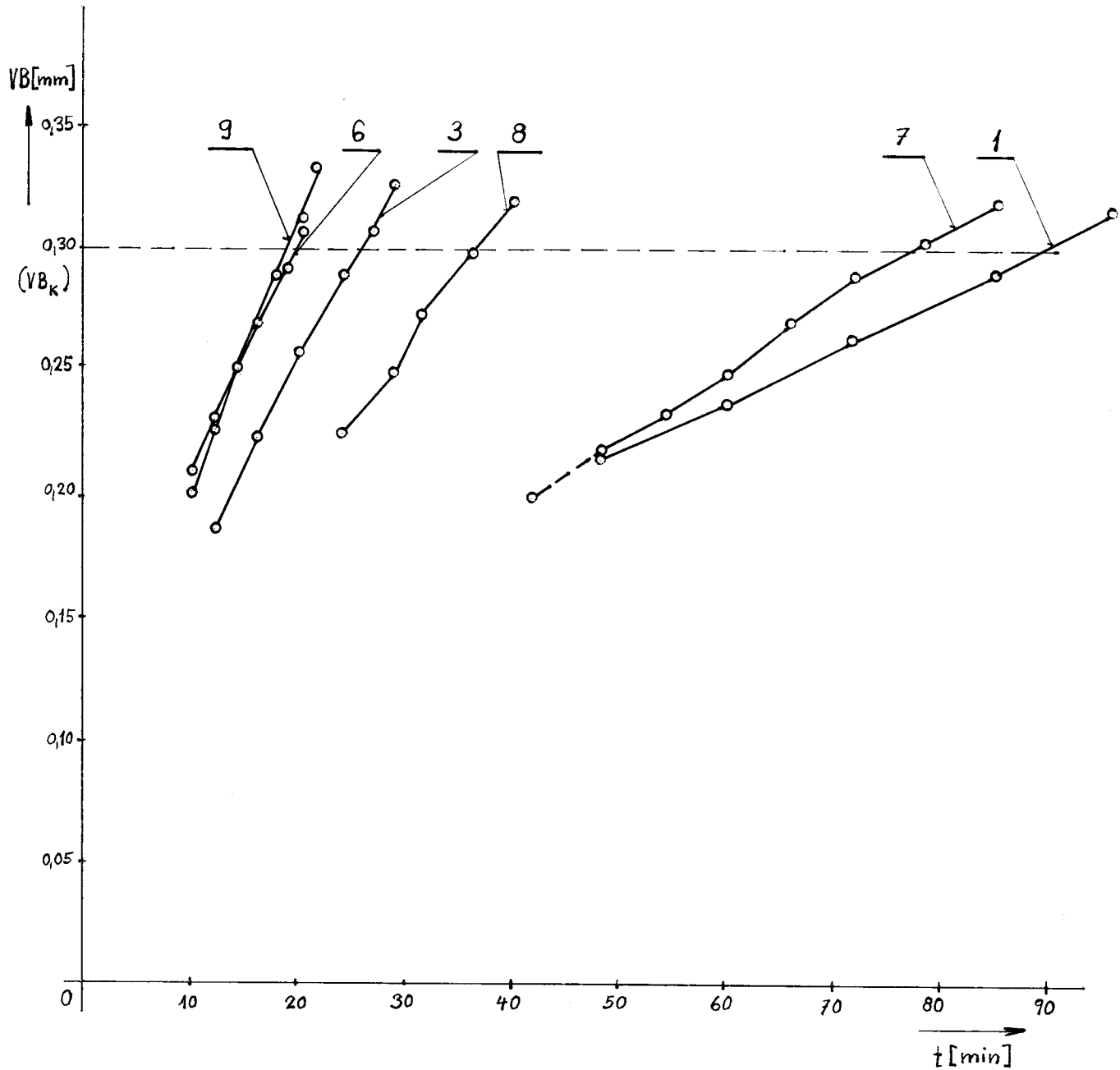
Grafické závislosti  $VB = f(t)$  pro jednotlivé j-té  
strukturální buňky (body) funkčního modelu experimentu.  
Řezný materiál: Hl SNUN 120408 /Pramet n.p. Šumperk/  
 $VB_k = 0,30$  mm



Obr.č. 17

Grafické závislosti  $VB = f(t)$  pro jednotlivé j-té strukturální buňky (body) funkčního modelu experimentu.

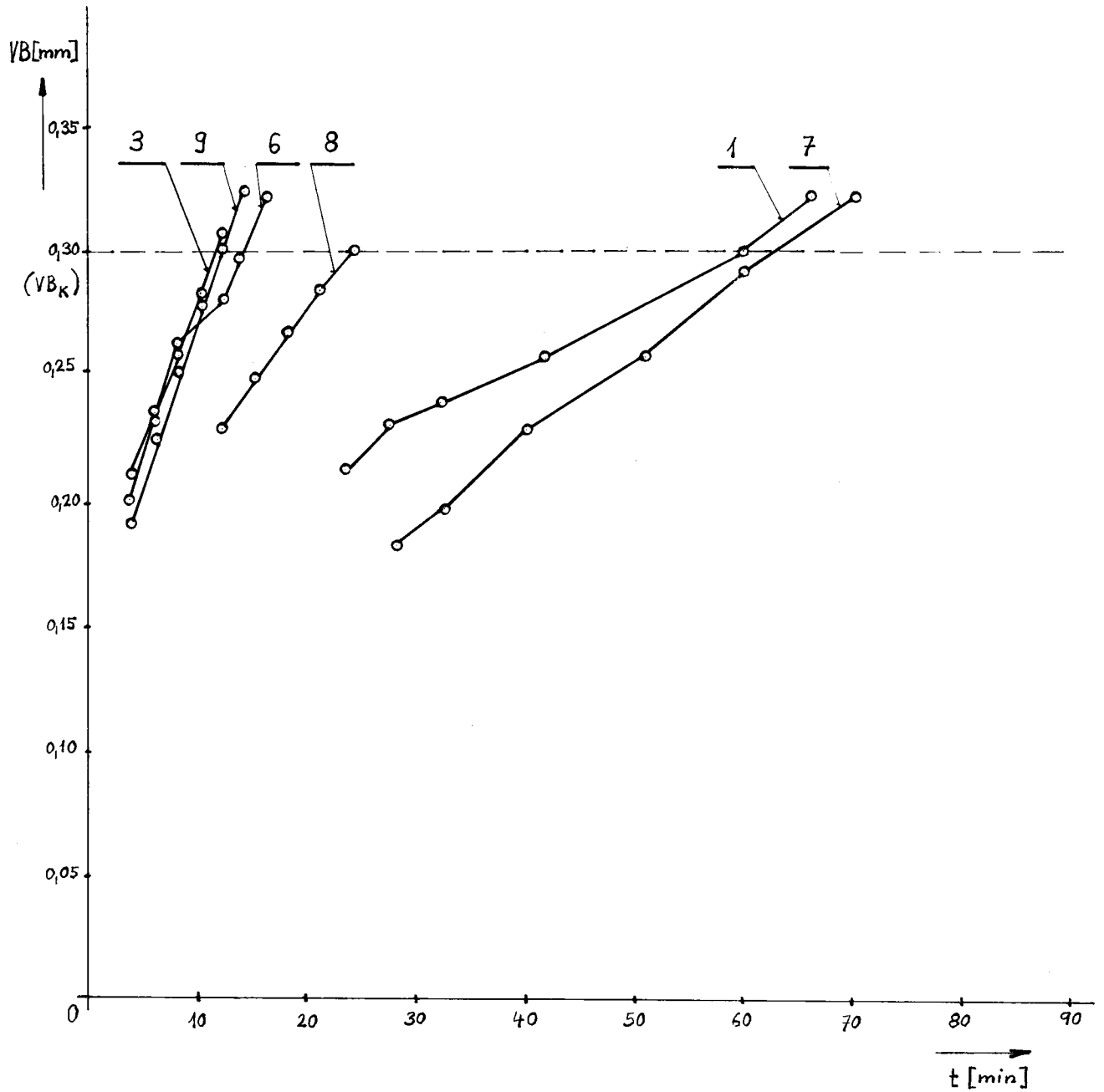
Řezný materiál: H10 SNUN 120408 /V.Ú. Práškové metalurgie  
 $VB_k = 0,30$  mm Šumperk/



Obr.č. 18

Grafické závislosti  $VB = f(t)$  pro jednotlivé j-té strukturální buňky (body) funkčního modelu experimentu.

Řezný materiál: G315 SNUN 120408 / COROMANT - Švédsko /  
 $VB_k = 0,30$  mm



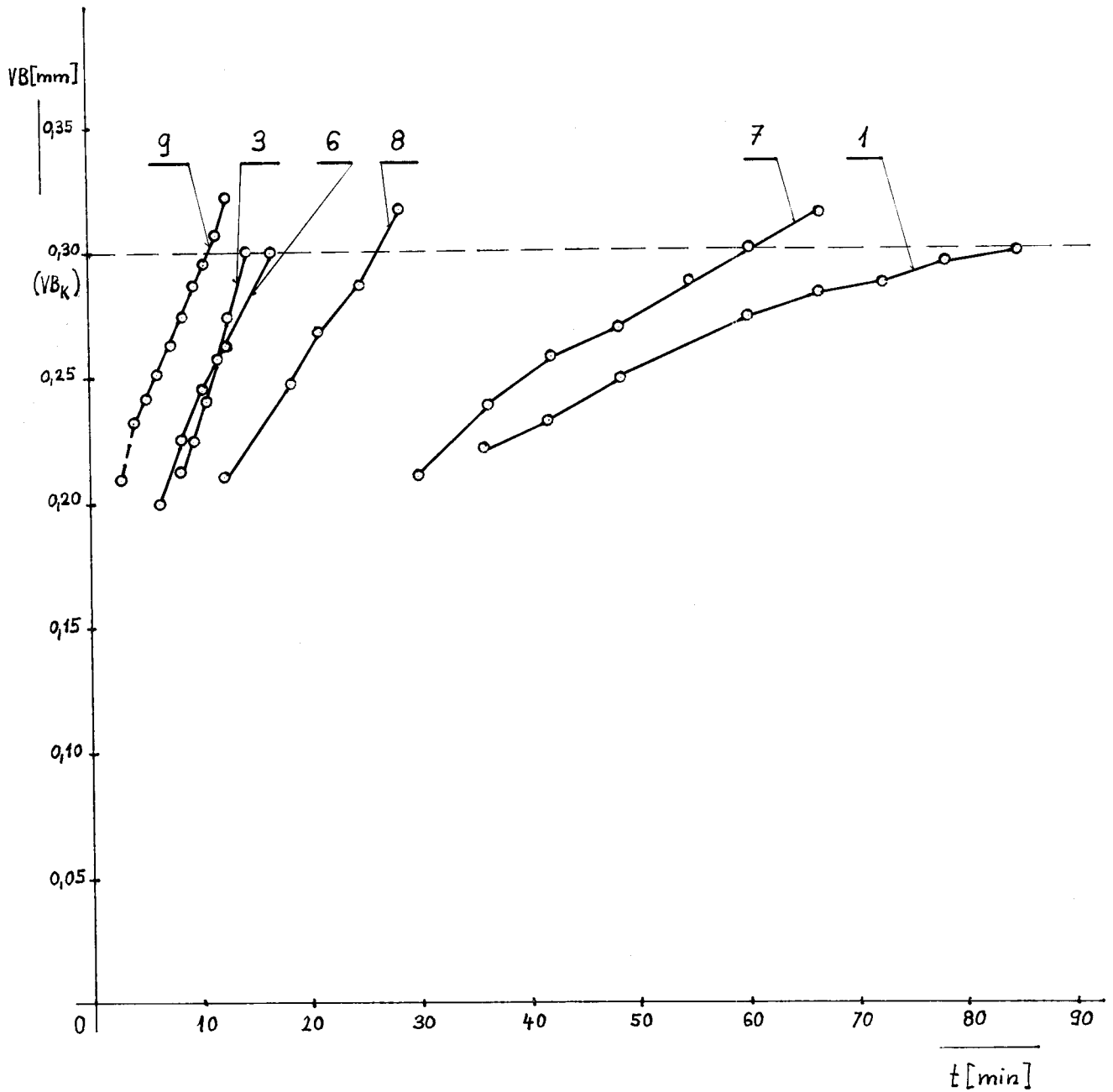
Obr.č. 19

Grafické závislosti  $VB = f(t)$  pro jednotlivé j-té strukturální buňky (body) funkčního modelu experimentu.

Řezný materiál: Carboloy 523

/ CARBOLOY - USA /

$VB_k = 0,30$  mm



### 5.3. Vyhodnocení experimentálních zkoušek

Vyhodnocení experimentálních zkoušek bylo provedeno dle navržené matematické části vyhodnocení (kapitole 4.2.13). V první části byl stanoven soubor trvanlivostí řezných materiálů pro zvolenou hodnotu kritériálního opotřebení ( $VB_k$ ) při obrábění korundové keramické hmoty M17. Ve druhé části potom byl získaný soubor trvanlivostí vyhodnocen pro navržený tvar experimentální rovnice experimentu (5) (kapitola 4.2.9. a 4.2.13).

#### 5.3.1. Určení souboru trvanlivostí řezných materiálů

Matematickým vyhodnocením funkčních závislostí  $VB = f(t)$  pro hodnotu kritériálního opotřebení ( $VB_k$ ) dostáváme hodnoty trvanlivostí ( $T_j$ ) příslušící jednotlivým  $j$ -tým strukturálním buňkám funkčního modelu experimentu pro každý testovaný řezný materiál.

Funkční závislosti  $VB = f(t)$  byly při vyhodnocení nahrazeny navrženou lineární funkcí (12.) v oblasti nahrazení ( $K$ ). Nejmenší počet bodů o souřadnicích  $\{VB_{ij}; t_{ij}\}$  spadajících do této oblasti, jimiž je náhradní funkce přeložena, je roven 5 - to zaručuje dostatečnou přesnost nahrazení a vyhodnocení.

Získaný soubor trvanlivostí ( $T_j$ ) řezných materiálů při obrábění korundové keramické hmoty M17 je základem pro další matematické vyhodnocení experimentálních zkoušek /proto jsou hodnoty ( $T_j$ ) uvedeny s přesností třech desetinných míst/ a pro celkové vyhodnocení experimentálního problému. Pro přehlednost byl soubor trvanlivostí uspořádán do tabulky.



Soubor trvanlivostí řezných materiálů /tab.č. 6/

G1	j	9	8	7	6	3	1
	$T_j$ /min/	12,634	33,714	52,896	16,060	19,185	66,219
H1	j	9	8	7	6	3	1
	$T_j$ /min/	17,024	31,443	85,969	15,073	19,673	74,223
H10	j	9	8	7	6	3	1
	$T_j$ /min/	18,762	36,282	76,393	19,012	24,884	88,369
G315	j	9	8	7	6	3	1
	$T_j$ /min/	11,119	23,400	62,415	15,149	11,307	59,967
Carb. 523	j	9	8	7	6	3	1
	$T_j$ /min/	10,114	24,908	58,746	15,173	14,134	79,406

U řezných destiček z keramických materiálů při experimentálních zkouškách vzrůstala velikost opotřebení na hřbetě (VB) tak intenzívně, že stanovení funkčních závislostí velikosti (VB) na čase obrábění (t) by bylo velice náročné. Časové intervaly měření velikosti opotřebení by byly, pro zajištění získání funkčních závislostí  $VB = f(t)$  se srovnatelnou jakostí jako u řezných destiček ze slynutých karbidů, natolik krátké, že experimentální zkoušky pro strukturální buňky funkčního modelu experimentu s vysokými hodnotami úrovní faktoru (v)/např. buňky č. 3; 6; 9/ by byly jen těžko

realizovatelné s daným vybavením experimentálního pracoviště. Získání funkčních závislostí  $VB = f(t)$  by u řezných materiálů s tak nízkou trvanlivostí ani nemělo zásadní význam. Pro srovnání řezných materiálů při obrábění kerundové keramické hmoty, což je hlavním úkolem řešení experimentálního problému postačí, když u těchto keramických řezných materiálů stanovíme hodnoty opotřebení na hřbetě (VB) v závislosti na čase obrábění (t) v oblasti hodnot okolo kritériálního opotřebení ( $VB_k$ ) a to pouze pro strukturální buňky funkčního modelu experimentu s minimálními a maximálními hodnotami úrovní faktorů (v) a (s) /tj. pro s.buňky č. 1 a č.9/.

Tabulka č. 7

j = 9	SN 37	t/min/	0,25	0,5
	SPK Feldmühle	VB/mm/	0,340	-
	DISAL 100	t/min/	0,25	0,5
	/SNMN 120816/	VB/mm/	0,420	-
	HC 20-01	t/min/	0,25	0,5
	/KA 128-1,2/	VB/mm/	0,180	0,310

Tabulka č. 8

j = 1	SN 37	t/min/	1	2
	SPK Feldmühle	VB/mm/	0,331	-
	DISAL 100	t/min/	1	2
	/SNMN 120816/	VB/mm/	0,380	-
	HC 20-01	t/min/	1	2
	/KA 128-1,2/	VB/mm/	0,195	0,325

5.3.2. Určení souboru hodnot exponentů ( $m$ ) a ( $y$ ) a konstant ( $c_T$ ) experimentální závislosti  $T=f(v,s)$

Soubor trvanlivostí řezných materiálů ( $T_j$ ) při obrábění kerundové keramické hmoty, pro hodnotu kritériálního opotřebení ( $VB_k$ ), získaný v kapitole (5.3.1.) je v této části vyhodnocen pro navržený tvar experimentální rovnice experimentu (5).

Při návrhu funkčního modelu experimentu (kapitola 4.2.12) bylo navrženo zúžení strukturálního modelu, při kterém byly neobsazeny strukturální buňky /body/ č. 2, 4, 5. Pro vyhodnocení zůstává tedy 6 obsazených buněk. Neobsazené strukturální buňky /2, 4, 5/ jsou buňky, ve kterých se vyskytují střední úrovně faktorů ( $v,s$ ) a to buď obou /buňka č.5/ a nebo alespoň jednoho z nich. Jak je však ze zobrazení funkčního modelu experimentu patrné, pro maximální úroveň posuvu ( $s$ ) je kombinace úrovní řezné rychlosti úplná /buňky č. 7, 8, 9/ a současně pro maximální úroveň řezné rychlosti ( $v$ ) je kombinace úrovní posuvu úplná /buňky č. 3, 6, 9/. Vyrovnání pro navržený tvar experimentální rovnice, při kterém bude strukturální buňka č. 1 doplňující pro minimální úrovně faktorů ( $v,s$ ), bude sice méně kvalitní než pro úplný funkční model experimentu, ale naprosto postačující pro daný experimentální problém.

Tab.č.9 Soubor hodnot  $c_T$ ,  $m$ ,  $y$

řezný materiál	$c_T$	$m$	$y$
G1	674,142	0,884	0,445
H1	4336,305	1,014	0,037
H10	914,154	0,911	0,478
G315	3192,641	1,049	0,104
Carb. 523	4215,729	1,095	0,111

Hodnoty exponentů  $(m)$  a  $(y)$  navrženého tvaru experimentální rovnice jsou rovněž významné pro celkové hodnocení experimentálního problému /spolu se souborem trvanlivostí řešených materiálů/.

## 6. Hodnocení a závěr

### 6.1. Vyhodnocení experimentálního problému

Vyhodnocení experimentálního problému -  
- porovnání nástrojových materiálů pro obrábění korundové keramické hmoty - je konečnou fází experimentu. Základní zhodnocení lze provést s využitím souboru trvanlivostí řezných materiálů /tabulka č. 6 / a doplnit jej zhodnocením dle hodnot exponentů (m) a (y) navržené experimentální rovnice ( 5 ).

#### Hodnocení s využitím souboru trvanlivostí řezných materiálů

Jednotlivé hodnoty trvanlivostí ( $T_j$ ) řezných materiálů nám udávají čas, po který je schopen nástroj z příslušného řezného materiálu obrábět polotovár z korundové keramické hmoty M17 s požadovanou přesností rozměrů a s požadovanou jakostí povrchu, tj. do dosažení hodnoty opotřebení na hřbetě nástroje ( $VB$ ) rovnající se hodnotě kritériálního opotřebení ( $VB_k$ ) za daných řezných podmínek ( $v, s$ ) určených úrovněmi těchto faktorů  $j$ -té strukturální buňky funkčního modelu experimentu.

Pro každou strukturální buňku tedy dostáváme hodnoty trvanlivostí jednotlivých řezných materiálů /tj. pět hodnot/. Řezný materiál, který je u  $j$ -té buňky zastoupen nejvyšší hodnotou trvanlivosti ( $T_j$ ) je po nejdelší čas schopen obrábět korundovou keramickou hmotu M17 s požadovanými technologickými parametry, za řezných podmínek ( $v, s$ ) určených úrovněmi faktorů ( $v, s$ ) této  $j$ -té strukturální buňky funkčního modelu experimentu. Lze tedy takto stanovit určité pořadí

vhodnosti testovaných nástrojových materiálů při obrábění korundové keramické hmoty M17 za příslušných řezných podmínek (v, s) pro každou j-tou strukturální buňku (tab.č.10).

Tab.č.10 Hodnocení řezných materiálů dle souboru trvanlivostí

pořadí vhodnosti buňka j	1	2	3	4	5
9	H10	H1	G1	G315	Carb.523
8	H10	G1	H1	Carb.523	G315
7	H1	H10	G315	Carb.523	G1
6	H10	G1	Carb.523	G315	H1
3	H10	H1	G1	Carb.523	G315
1	H10	Carb.523	H1	G1	G315

Hodnocení dle hodnot exponentů (m) a (y)

Velikost exponentu (m) navržené experimentální rovnice (5) určuje citlivost intenzity opotřebení řezného materiálu na velikost řezné rychlosti (v). Čím je hodnota exponentu (m) vyšší, tím je i vyšší citlivost intenzity opotřebení příslušného řezného materiálu na velikost řezné rychlosti. Lze tedy uspořádat testované řezné materiály dle citlivosti intenzity jejich opotřebení na velikost řezné rychlosti, tj. podle velikosti exponentu (m) /tab.č.11/.

obdobně velikost exponentu (y) určuje citlivost intenzity opotřebení řezného materiálu na velikost posuvu (s). Lze tedy provést uspořádání řezných materiálů i dle citlivosti intenzity jejich opotřebení na velikost posuvu, tj. podle velikosti exponentu (y)/tab.č. /.

Tabulka č. 11

stupeň citlivosti	1	2	3	4	5
materiál	Carb.523	G315	H1	H10	G1
m	1,095	1,049	1,014	0,911	0,844

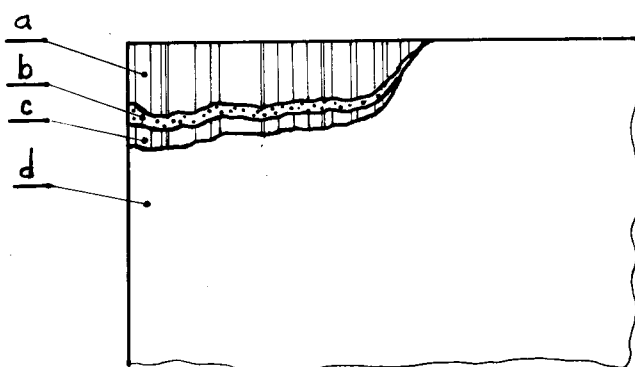
Tabulka č. 12

stupeň citlivosti	1	2	3	4	5
materiál	H10	G1	Carb.523	G315	H1
y	0,478	0,445	0,111	0,104	0,037

Z uvedených schémat hodnocení (tabulky č. 10, 11 a 12) je zřejmé, že nejlépe lze využít pro obrábění korundové keramické hmoty M17 vývojový typ slijnutého karbidu V.Ú. Práškové metalurgie Šumperk označený H10. Tento řezný materiál je v rámci vybraného souboru charakteristický i nízkou citlivostí intenzity opotřebení na velikost řezné rychlosti ( $v$ ). Oproti tomu je zde, v rámci vybraného souboru řezných materiálů, vysoká citlivost intenzity opotřebení na velikost posuvu ( $s$ ).

Nejméně vhodné pro obrábění korundové keramické hmoty M17 jsou z vybraného souboru řezných materiálů materiály G315 /Coromant - Švédsko/ a Carboloy 523 /Carboloy - USA/, ačkoliv řezné destičky tohoto označení jsou povlakovány karbidem titanu (TiC) a byl u nich tedy předpoklad, že budou nejlépe odolávat působení tvrdých zrn oxidu hlinitého ( $Al_2O_3$ ). V průběhu experimentálních zkoušek však bylo zjištěno, že tvrdý povlak karbidu titanu je abrazivním působením zrn oxidu hlini-

tého narušován velmi intenzívně a to natolik, že vrstva karbidu titanu je opotřebována v určitém časovém předstihu oproti základnímu materiálu řezných destiček. Navíc je narušována soudržnost vrstvičky karbidu titanu se základním materiálem /vrstva (TiC) je jako by odlamována, čímž je obnažen základní materiál, který se až potom opotřebovává/ tím se vytváří úzká zóna neopotrebovaného základního materiálu řezné destičky (obr.č.20; a obrázky č.21 a č.22).



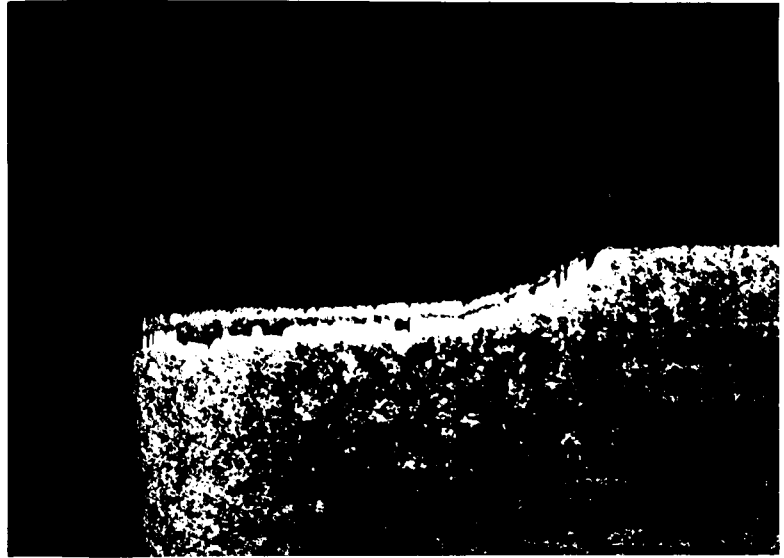
obr.č. 20

- a - zóna opotřebení základního materiálu řezné destičky
- b - zóna obnaženého neopotrebovaného základního materiálu
- c - zóna opotřebení vrstvičky karbidu titanu
- d - neopotřeбенý povrch řezné destičky

/zóna (b) je silněji patrná u opotřebení řezné destičky G315, zatímco u řezné destičky označené Carboloy 523 splývají téměř zóny (a) a (c)/



Obr.č.21 Opotřebení na hřbetě řezné destičky G315  
/Coromant/. č.neg.desky 10641  
Zvětšení: 50 x (Kolmé osvětlení)



Obr.č.22 Opotřebení na hřbetě řezné destičky  
Carboloy 523 /Carboloy/ č.neg.desky 10642  
Zvětšení: 50 x (kolmé osvětlení)



/Na uvedených snímcích je zóna (a) hůře viditelná, je to způsobeno vlivem kolmého osvětlení/.

Už v analytické fázi plánu experimentu (kapitola 4.2.5.) bylo uvedeno, že při obrábění korundové keramické hmoty M17 nedochází s postupem opotřebení na hřbetě k lanovitému otěru a tím k prudkému vzrůstu intenzity opotřebení nástroje, jak je tomu obvykle při obrábění kovů. Tato fáze opotřebení se u žádného z testovaných rezných materiálů neprojevila, ačkoli z důvodu objasnění tohoto lokálního problému bylo pokračováno vždy u jedné rezné hrany, ve zkoušce trvanlivosti i po překročení kritériálního opotřebení. Až do hodnot opotřebení na hřbetě (VB), kdy už další pokračování dlouhodobé zkoušky trvanlivosti bylo v důsledku úplného vytrhávání elementů hmoty znemožněno, se však tato fáze opotřebení neprojevila. Funkční závislost  $VB = f(t)$  byla nadále téměř lineární. /Nepatrný rozptyl způsobený vytrháváním hmoty/.

## 6.2. Závěr

V závěru je nutno konstatovat na prvním místě závažnou skutečnost:

Experimentální zkoušky byly realizovány a celý experimentální problém vyhodnocen pro korundovou keramickou hmotu typového označení M17. A POUZE PRO KORUNDOVOU KERAMICKOU HMOTU M17 JSOU VÝSLEDKY EXPERIMENTU SMĚRODATNÉ A SPRÁVNÉ, nikoliv pro korundovou keramickou hmotu obecně. /V průběhu realizace předběžných testů byla provedena zkouška obrábění dvou jiných typů korundové keramické hmoty, procentuální komponentní uložení těchto hmot bylo shodné se složením hmoty M17, avšak

působení na řezný materiál a vliv na intenzitu jeho opotřebení byl s vlivem hmoty M17 naprosto nesrovnatelný. U jedné z těchto hmot byla při jejím obrábění intenzita opotřebení řezného nástroje až dvojnásobná. Typy korundových keramických hmot, které byly obráběny se liší pouze sérií dodávky hlavní suroviny ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), která patrně diferencí svých vlastností zmíněný jev způsobuje/.

V průběhu realizace zkoušek nedošlo k žádnému jevu, který by mohl významně ovlivnit vyhodnocení a výsledky experimentálního problému. Lze tedy, i při zanedbání náhodných chyb, považovat výsledky experimentálního problému, porovnání nástrojových materiálů pro obrábění korundové keramické hmoty, za směrodatné a správné a tím i reprodukovatelné.

## 7. Seznam použité literatury

- /1/ Mikovec M.: Obrábění materiálů s vysokou  
pevností a tvrdostí  
SNTL Praha 1982
- /2/ Feldmühle schneidkeramik SPK  
NSR 1972
- /3/ Mádl J.,  
Schubert V.: Základy experimentálních metod  
a optimalizace v teorii obrábění  
ČVUT Praha 1978 (2.vyd.)
- /4/ Texas instruments: Individuels  
programmieren - programmierbare  
TI 58/59 USA 1977
- /5/ Buda J.,  
Békéš J.: Teoretické základy obrabania kovov  
Bratislava 1977 (2.vyd.)
- /6/ Lukáš L.: Návrh metodiky stanovení obrobitel-  
nosti materiálů z izostaticky  
lisované keramiky  
/DP - ST 1533/80 / 1980