

Vysoká škola: strojná a textilní

Fakulta: strojná

Katedra: obrábění a montáže

Školní rok: 1986/87

# ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

pro Josef Hetych

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: Měření teplot při frézování titanových slitin

### Zásady pro vypracování:

1. Politicko-hospodářský význam diplomového zadání
2. Metody měření teplot při obrábění
3. Vliv rezných podmínek na teplotu
4. Návrh metodiky měření
5. Vlastní zkoušky, vyhodnocení, závěry

V304/175

VYSOKÁ ŠKOLA STROJNÁ A TEXTILNÍ  
Ústřední knihovna  
LIBEREC 1, STUDENTSKÁ 6  
PŠČ 461 17

Kom / 017

Rozsah grafických prací: dle potřeby

Rozsah průvodní zprávy: 50 - 60 stran textu

Seznam odborné literatury:

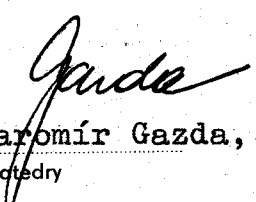
- Přikryl, Z. - Musílková, R.: Teorie obrábění. Praha, SNTL 1982  
Sýkora, K.: Technická měření ve strojírenství. Praha, SNTL 1965  
Cocchadze, V. V.: Izmerenie temperatur pri rezanii mettalov.  
Vestnik mašinostrojenija 1963,11,s. 66 - 69

Vedoucí diplomové práce: Ing. Karel Bukač

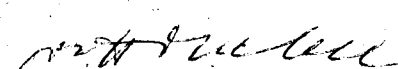
Datum zadání diplomové práce: 6. 10. 1986

Termín odevzdání diplomové práce: 11. 5. 1987

L.S.

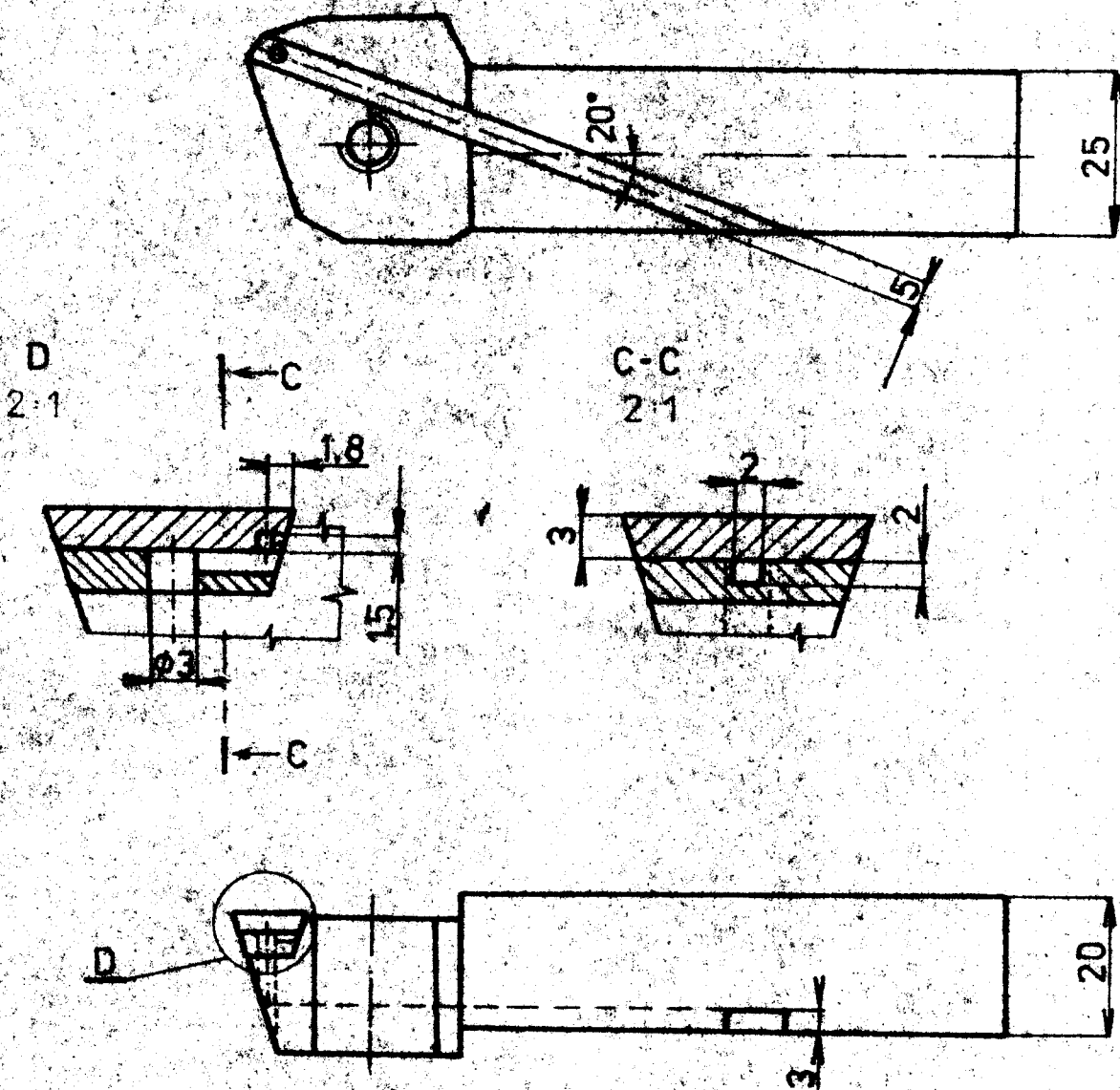
  
Doc. Ing. Jaromír Gazda, CSc.

Vedoucí katedry

  
Doc. Ing. Ján Alaxin, CSc.

Děkan

v Liberci dne 30. 9. 1986



J. HETÝCH, Kletýň

1:1

(2:1)

VŠST

NŮŽ

ČSN 22 38502

4-KOM-OM-482-00-01

Vysoká škola strojní a textilní Liberec  
nositelka Řádu práce

Fakulta strojní

Katedra obrábění a montáže

obor 23 - 07 - 8 strojírenská technologie  
zaměření obrábění a montáž

MĚŘENÍ TEPLOT PRO FRÉZOVÁNÍ TITANOVÝCH SLITIN

KOM - OM - 482

Josef Hetych

Vedoucí práce : ing. Karel Bukač / VŠST /

Konzultant :

Počet stran : 66

Počet příloh

a tabulek : 14

Počet obrázků : 33

Počet výkresů : 1

Počet modelů :

nebo jiných příloh :

Datum : 11. května 1987

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

*Josef Hetych*

V Liberci, dne 11. května 1987

## Obsah

Seznam symbolů	6
1. Politicko - hospodářský význam zadání	8
2. Teploty při obrábění	10
2.1 Zdroje tepla a tepelná bilance při obrábění	10
3. Vliv řezných podmínek na teplotu řezání	13
3.1 Vliv materiálu obrobku na teplotu řezání	14
3.2 Vliv materiálu nástroje na teplotu řezání	14
3.3 Vliv řezné rychlosti na teplotu řezání	15
3.4 Vliv tloušťky třísky na teplotu řezání	16
3.5 Vliv šířky třísky na teplotu řezání	16
3.6 Vliv tvaru třísky na teplotu řezání	16
3.7 Vliv úhlu nastavení na teplotu řezání	18
4. Měření teplot při obrábění	18
4.1 Přehled metod měření teploty při obrábění	18
4.2 Metody měření teplot při obrábění	19
4.2.1 Termoelektrický jev	19
4.2.2 Umělý termočlánek s jedním cizím kovem	21
4.2.3 Umělý termočlánek se dvěma cizími kovy	23
4.2.4 Přírozený termočlánek	25
4.2.5 Dvounožová metoda	28
4.3 Určení teploty při obrábění na základě změn struktury materiálu obrobku a nástroje	29
4.4 Měření teploty při obrábění optickými metodami	30
5. Titan a jeho slitiny	32
5.1 Vlastnosti titanu	32
5.2 Titanové slitiny a jejich vlastnosti	33
5.3 Titanové slitiny vyráběné v ČSSR	34
5.4 Obrábění titanu a jeho slitin	35

5.5	Nástrojové materiály a nástroje pro obrábění titanu a jeho slitin	36
5.5.1	Nástrojové oceli vhodné pro obrábění titanu	36
5.5.2	Doporučené slinuté karbidy pro obrábění titanu	36
5.6	Frézování titanu a jeho slitin	39
6.	Metodika měření teploty při čelním frézování přirozeným termočlánkem	42
6.1	Celkové uspořádání měření	42
6.2	Úprava nože pro měření teplot při čelním frézování	49
6.3	Cejchování	49
6.4	Metodika měření	53
7.	Výsledky měření	55
7.1	Vliv řezné rychlosti na teplotu řezání	56
7.2	Vliv posuvu na teplotu řezání	56
7.3	Vliv hloubky řezu na teplotu řezání	57
8.	Regresní analýza	61
9.	Vyhodnocení měření	63
10.	Závěr	65
	Seznam použité literatury	66

Seznam symbolů.

Symbol	Význam	Jednotky
$Q_C$	celkové množství tepla za 1 sek.	[W]
$F_Z$	tangenciální složka řezné síly	[N]
$v$	řezná rychlost	[m . s <sup>-1</sup> ]
$Q$	teplota řezání	[°C]
$Q_{př}$	teplota řezání naměřená metodou přirozeného termočlánku	[°C]
$c_1, c_2, c_3,$	konstanty	
$a, b', x, y,$	konstanty	
$z$	konstanta	
$\underline{a}$	tloušťka třísky	[mm]
$b$	šířka třísky	[mm]
$\kappa$	úhel nastavení	[°]
TES	termoelektrická síla	[mV]
U	napětí termočlánku	[mV]
$T_1$	teplota teplého spoje	[°C]
$T_2$	teplota studeného spoje	[°C]
$\alpha_a, \alpha_b$	termoelektrické napětí kovu a, b vzhledem k platině	[mV/100 °C]
RO	rychlořezná ocel	
SK	slinutý karbid	
$\alpha_0$	ortogonální úhel hřbetu	[°]
$\gamma_0$	ortogonální úhel čela	[°]
$\lambda_s$	úhel sklonu ostří	[°]
$\kappa_r$	úhel nastavení	[°]
$h$	hloubka řezu	[mm]
$s_z$	posuv na zub	[mm . zub <sup>-1</sup> ]



Symbol	Význam	Jednotky
$\sigma_{Kt}$	mez kluzu v tahu	[MPa]
$\sigma_{Pt}$	mez pevnosti v tahu	[MPa]
A	tažnost	[%]
$\rho$	měrná hmotnost	[kg . m <sup>-3</sup> ]
E	modul pružnosti	[MPa]
$T_t$	teplota tání	[°C]
$\lambda$	tepelná vodivost	[W . m <sup>-1</sup> . K <sup>-1</sup> ]
$\alpha$	délková roztažnost	[K <sup>-1</sup> ]
$c_{20}$	měrné teplo	[J . kg . K <sup>-1</sup> ]
d, k, c,	konstanty /parametry/	
d', k',	odhady parametrů d, k	
c'	odhad parametru c	

## 1. Politicko - hospodářský význam zadání

Jak vyplývá z hlavních směrů hospodářského a sociálního rozvoje naší společnosti, je hlavním cílem, který Komunistické strana Československa trvale sleduje, zvyšování životní úrovně lidu, uspokojování potřeb obyvatelstva, upevňování jeho životní a sociální jistoty a vytváření stále příznivějších podmínek pro harmonický rozvoj člověka.

Hlavní těchto úkolů v 8. pětiletce je rozhodujícím způsobem určováno rozvojem průmyslové výroby, která se má do roku 1990 zvýšit o 15 - 18 procent. I nadále zůstává základním článkem rozvoje národního hospodářství strojírenství a elektrotechnika. Strojírenská výroba vzroste do roku 1990 v souhrnu o více než 30 procent. Znamená to, že se strojírenský průmysl musí orientovat na přednostní zabezpečení růstu technicko - ekonomické úrovně výrobků. Přitom je nutné vytvořit potřebné předpoklady k rekonstrukci, modernizaci a lepšímu využívání stávající výrobní základny.

Naše strojírenství má být i v 8. pětiletce nositelem vědeckotechnického pokroku ve všech odvětvích národního hospodářství. Proto je nutné, aby se strojírenství zaměřilo na vývoj a výrobu nové generace strojů a zařízení, které by přispěly k zavádění takových technologií, jež by zabezpečily růst produktivity práce, zvýšení kvality výrobků a snížení materiálové a energetické náročnosti výrobků. Z těchto důvodů musí strojírenství zvyšovat podíl elektronizace a automatizace ve vyráběném sortimentu. Základem se musí stát urychlené uplatňování vědeckotechnického pokroku ve výrobní praxi, a to takovým způsobem, aby se sama věda

stala materiální výrobní silou.

Ani vysoké školy nestojí stranou tohoto úsilí a předávají výsledky své práce do praxe a přispívají tak k rozvoji našeho národního hospodářství.

Tento úkol v sobě zahrnuje požadavky kontrátní praxe a měl by přispět k dalšímu rozšíření poznatků o teplotních jevech při čel-  
ním frézování slitin titanu. V této práci jsou popsány některé vhodné způsoby měření teplot při obrábění, dále je zde uvedeno roz-  
dělení slitin titanu a jejich charakteristiky. V experimentální části práce je proveden návrh metodiky měření, výsledky měření a jejich vyhodnocení.

## 2. Teploty při obrábění.

### 2.1 Zdroje tepla a tepelná bilance při obrábění.

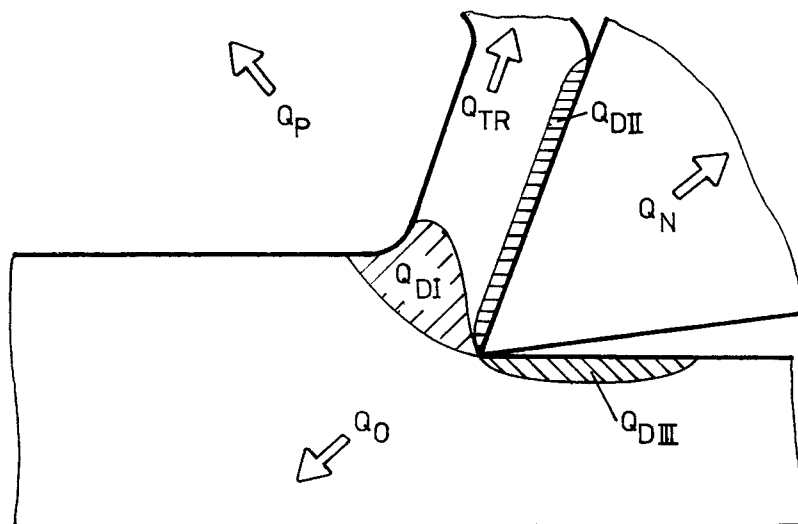
Vznik třísky při obrábění a její odvod je doprovázen vznikem určitého množství tepla. Toto teplo vzniká transformací vynaložené práce. V teplo se přeměňuje téměř veškerá práce vynaložená na proces řezání s výjimkou práce pružných deformací a práce utejené, přičemž podíl těchto dvou složek nepřesahuje 5% a ve většině případů bývá maximálně 2% celkové práce vynaložené na proces řezání. Zbytek, tj. 98%, se transformuje v teplo [1]. Celkové množství tepla vznikající při obrábění za jednu sekundu lze bez velkých chyb vypočítat z výrazu:

$$Q_C = F_Z \cdot v \quad [\text{W}]$$

$F_Z$       tangenciální složka řezné síly [N]

$v$         řezná rychlost [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ]

Ke vzniku tepla při obrábění dochází v těchto zdrojích /obr. 2.1./



obr. 2.1

$Q_{DI}$  - v oblasti primárních plastických deformací, transformací práce primární plastické deformace.

$Q_{DII}$  - na styčné ploše třísky s čelem nástroje, transformací práce sekundární plastické deformace.

$Q_{DIII}$  - v oblasti terciálních plastických deformací, transformací práce vynaložené na deformaci obrobeného povrchu.

$Q_{TC}$  - třením třísky o čelo nástroje.

$Q_{TH}$  - třením hřbetu nástroje o obrobek.

Teplo vzniklé v uvedených zdrojích se rozvádí do třísky  $/Q_{TR}/$ , nástroje  $/Q_N/$ , obrobku  $/Q_O/$  a okolního prostředí  $/Q_P/$ .

Z podmínky tepelné rovnováhy vyplývá rovnice, která vyjadřuje tzv. tepelnou bilanci procesu řezání:

$$Q_{DI} + Q_{DII} + Q_{DIII} + Q_{TC} + Q_{TH} = Q_{TR} + Q_N + Q_O + Q_P$$

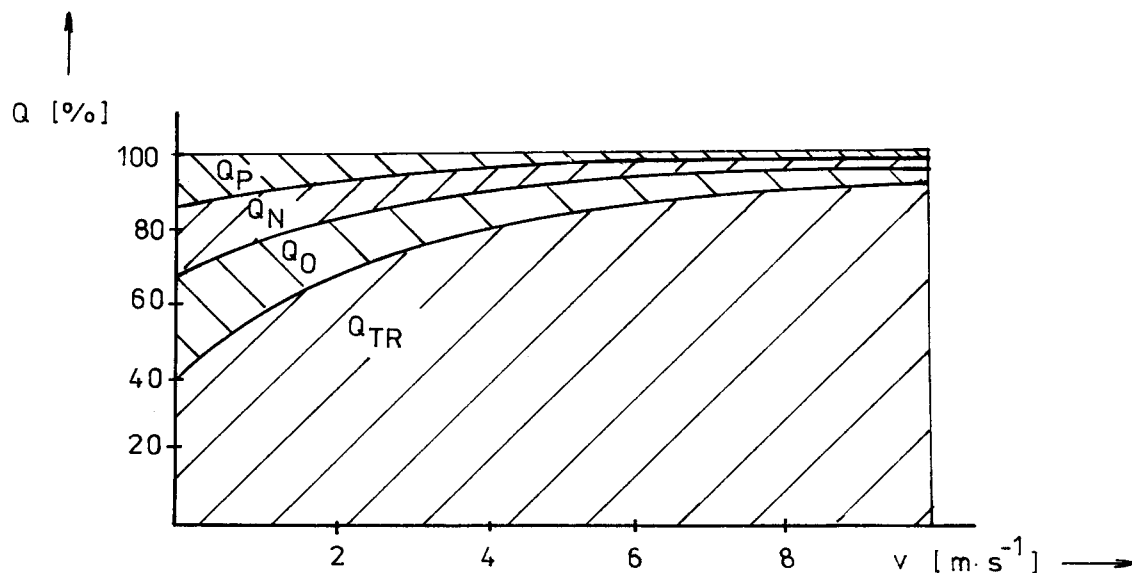
Tepelná bilance je též naznačena na obr. 2.1..

Tuto tepelnou bilanci lze kvantitativně stanovit teoreticky i experimentálně.

Při teoretickém studiu tepelné bilance řezného procesu využijeme teorií sdílení tepla. Teoretický rozbor tepelné bilance řezného procesu umožňuje posoudit kvalitativně vliv základních parametrů na vznik a rozvod tepla při řezání. Z praktického hlediska je však teoretický rozbor nevýhodný, protože při odvozování vztahů popisujících tepelnou bilanci řezného procesu je třeba vytvořit řadu zjednodušujících předpokladů /o gradientu teplot, o vlivu napětí na tepelné toky apod./, navíc se ve výrazech pro jednotlivé složky tepla vyskytují veličiny, které je třeba určit experimentálně. Z těchto důvodů je stanovení tepelné bilance řezného procesu výpočtem pracné a nepřesné, používá se ho zpravidla tam, kde je přímé měření tepla buď obtížné, nebo prakticky nemožné. Výsledky experi-

mentálního studia tepelné bilance řezného procesu jsou v zobrazení shodě s teoretickými závěry. Navíc jsou méně přesné a převážně podobně i přesnější než výsledky výpočtu.

Na obr. 2.2 je znázorněn vliv řezné rychlosti na tepelnou bilanci [3/].



obr. 2.2

Relativní velikosti jednotlivých složek tepla jsou ve vzájemném poměru:  $Q_{TR} > Q_O > Q_N > Q_P$ .

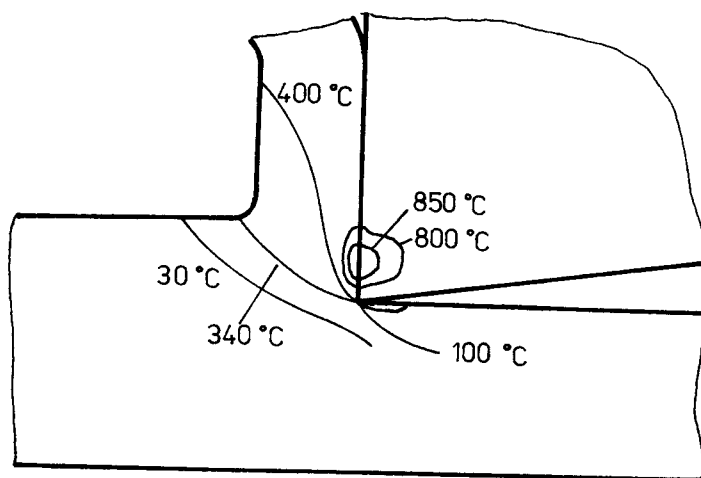
Se zvyšující se rychlostí roste procentuální podíl  $Q_{TR}$  na celkovém teple, na úkor ostatních složek. Tyto skutečnosti souvisejí s tím, že nejdůležitější zdroje tepla  $Q_{DI}$ ,  $Q_{DII}$  a  $Q_{DC}$  jsou vázány na třísku a jejich vliv na  $Q_O$ ,  $Q_N$  a  $Q_P$  závisí na možnostech přestupu tepla z třísky do nástroje, obrobku a prostředí.

Na rozdělení tepla mezi nástroj, obrobek a třísku mají tedy vliv tepelné vlastnosti materiálů nástroje a obrobku.

### 3. Vliv řezných podmínek na teplotu řezání. /1/

Teplota řezání  $Q$  je střední teplota celé styčné plochy nástroje s třískou a obrobkem, tj. aktivní části čela a hřbetu současně, je funkcí fyzikálních vlastností obráběného materiálu, materiálu nástroje, řezných podmínek, geometrie nástroje a řezného prostředí.

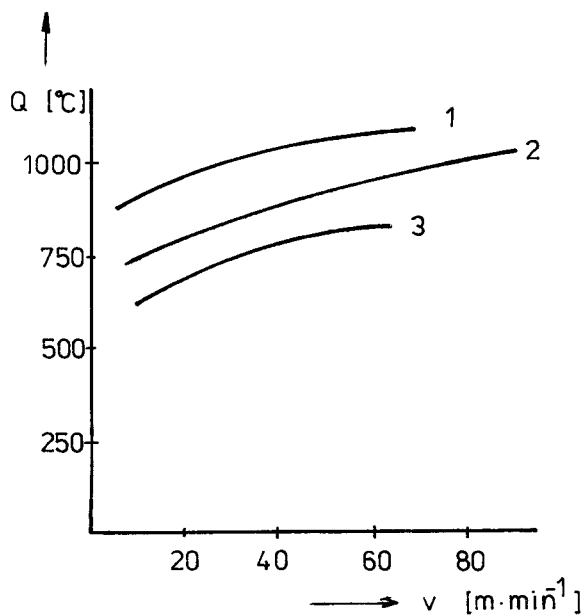
Teplota a teplotní pole nástroje jsou důležité hodnoty, které nás zajímají především proto, že teplota povrchových vrstev čela a hřbetu má výrazný vliv na stav těchto vrstev a na intenzitu otupování nástroje. Z hlediska opotřebení nástroje nás zajímají především maximální teploty na čele a na hřbetě a rozložení teplot na těchto plochách. Stanovení teplotního pole nástroje je však experimentálně náročné, a proto se spokojujeme se stanovením středních teplot /střední teplota je průměrná teplota všech hmotných bodů třísky, nástroje, nebo obrobku/ na čele a na hřbetě, nebo stanovením střední teploty celé styčné plochy nástroje s obrobkem a třískou, tj. teploty řezání. Na obr. 3.1 je uveden příklad rozložení teplot v třísce, nástroji a obrobku.



obr. 3.1

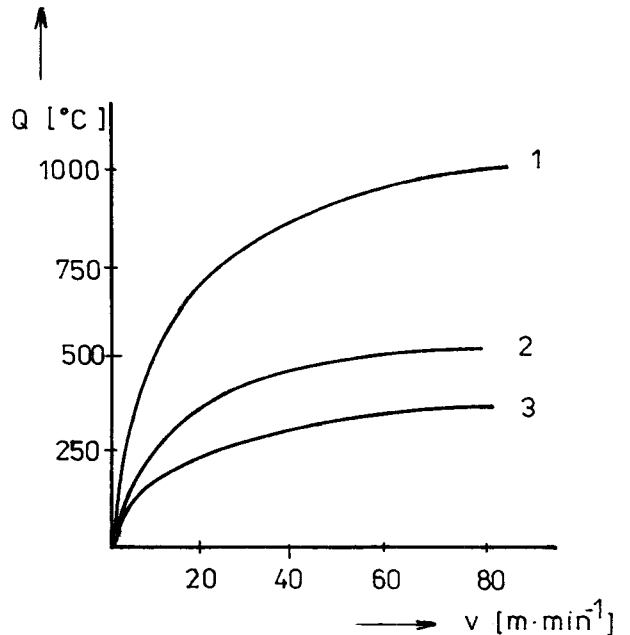
### 3.1 Vliv materiálu obrobku na teplotu řezání.

Vliv mechanických a tepelných vlastností obráběného materiálu na teplotu řezání  $Q$  je naznačen na obr. 3.2 i obr. 3.3.



- 1 - ocel  $\sigma_{Pt} = 1520$  MPa
- 2 - ocel  $\sigma_{Pt} = 645$  MPa
- 3 - ocel  $\sigma_{Pt} = 325$  MPa

obr. 3.2



- 1 - ocel
- 2 - hliník
- 3 - měď

obr. 3.3

Experimentálně stanovené závislosti teploty řezání  $Q$  na mechanických vlastnostech obráběného materiálu lze popsat funkcemi:

$$Q = c_1 \cdot \sigma_{Pt}^a \quad /1/$$

$$Q = c_2 \cdot HB^{b'} \quad /2/$$

Kde konstanty  $c_1$ ,  $c_2$ ,  $a$ ,  $b'$  jsou pro každý materiál různé.

### 3.2 Vliv materiálu nástroje na teplotu řezání.

Materiál nástroje působí na teplotu řezání svým vlivem na množství vzniklého a odvedeného tepla. O tom, který z těchto vli-



vů převládne rozhoduje chemické složení, fyzikální vlastnosti a struktura materiálu nástroje.

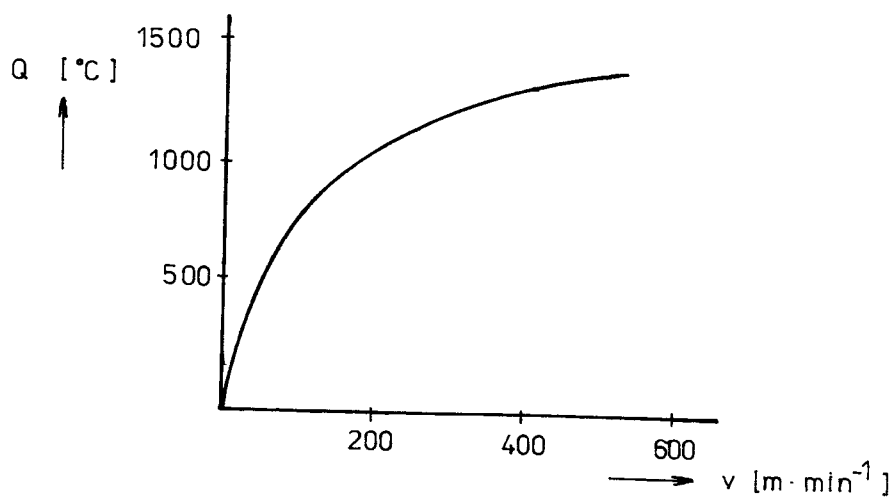
U nástrojů ze slinutých karbidů se výrazněji projevuje vliv většího součinitele tření na množství vzniklého tepla, než vliv jejich tepelné vodivosti na odvod tepla.

U nástrojů z rychlořezných ocelí je rozhodující jejich vliv na množství odvedeného tepla, a proto je u nich rozhodující jejich tepelná vodivost.

Obecně platí, že vliv řezných podmínek na teplotu řezání je větší u nástrojů z rychlořezné oceli, než u nástrojů ze slinutých karbidů a keramických materiálů. Dále platí, že při stejných řezných podmínkách je teplota stykových míst u nástrojů z rychlořezných ocelí nižší než u nástrojů ze slinutých karbidů. Je to důsledek lepší tepelné vodivosti nástrojů z rychlořezných ocelí.

### 3.3 Vliv řezné rychlosti na teplotu řezání.

Z řezných podmínek nejvíce působí na teplotu řezání  $Q$  řezná rychlost /obr. 3.4/. Z počátku teplota řezání s rostoucí řeznou rychlostí roste, po dosažení určité výše se růst zpomalí a křivka závislosti  $Q = f(v)$  směřuje asymptoticky k teplotě, která se blíží k teplotě tavení materiálu obrobku.



obr. 3.4

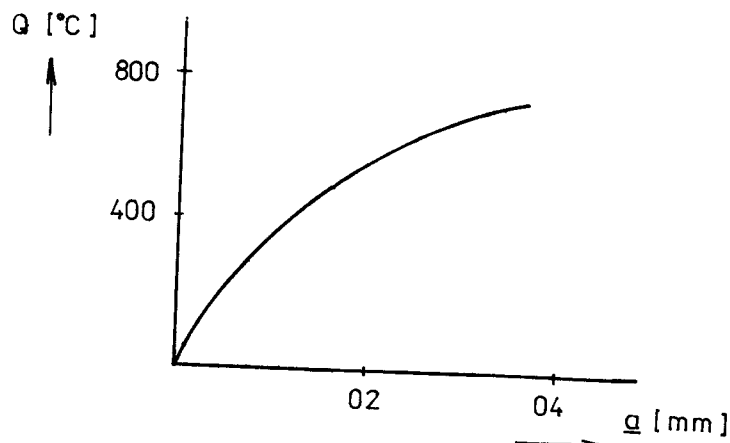
Závislost lze vyjádřit vztahem

$$Q = c_1 \cdot v^x \quad /3/$$

Exponent  $x$  leží v intervalu  $\langle 0, 1 \rangle$  a  $c_1$  je materiálová konstanta.

### 3.4 Vliv tloušťky třísky na teplotu řezání.

Tloušťka třísky  $a$  ovlivňuje teplotu řezání méně než řezná rychlost obr. 3.5.



obr. 3.5

Závislost lze vyjádřit vztahem

$$Q = c_2 \cdot a^y \quad /4/$$

### 3.5 Vliv šířky třísky na teplotu řezání.

Šířka třísky  $b$  má na teplotu řezání ještě menší vliv než tloušťka třísky obr. 3.6, kde  $v_3 > v_2 > v_1$ .

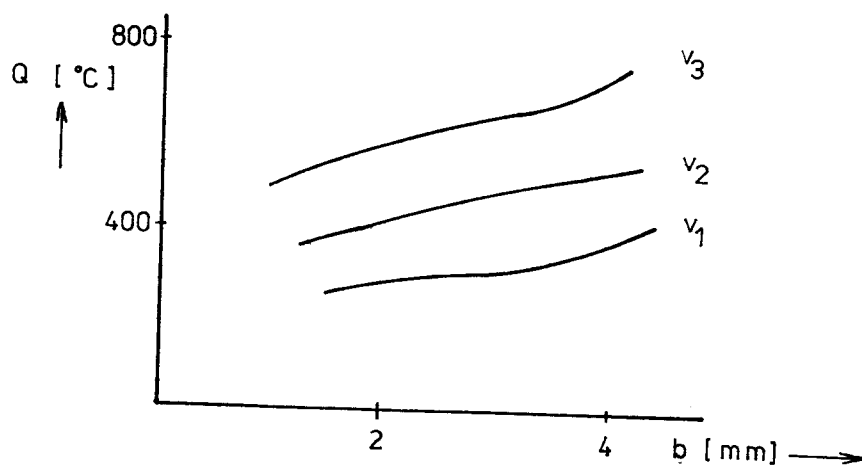
Matematicky lze tuto závislost vyjádřit vztahem

$$Q = c_3 \cdot b^z \quad /5/$$

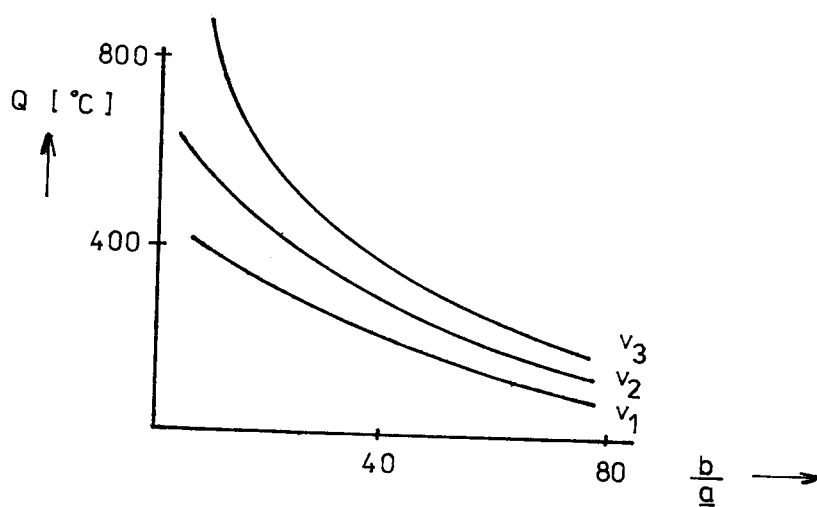
### 3.6 Vliv tvaru třísky na teplotu řezání.

Tvar třísky je určen poměrem  $\frac{b}{a}$  a jeho vliv na teplotu řezání souvisí s vlivem šířky třísky  $a$  a tloušťky třísky  $b$ . S rostoucím poměrem  $\frac{b}{a}$  teplota řezání klesá a to tím více u větších řezných rychlostí. Graficky je závislost teploty řezání  $Q$  na tvaru

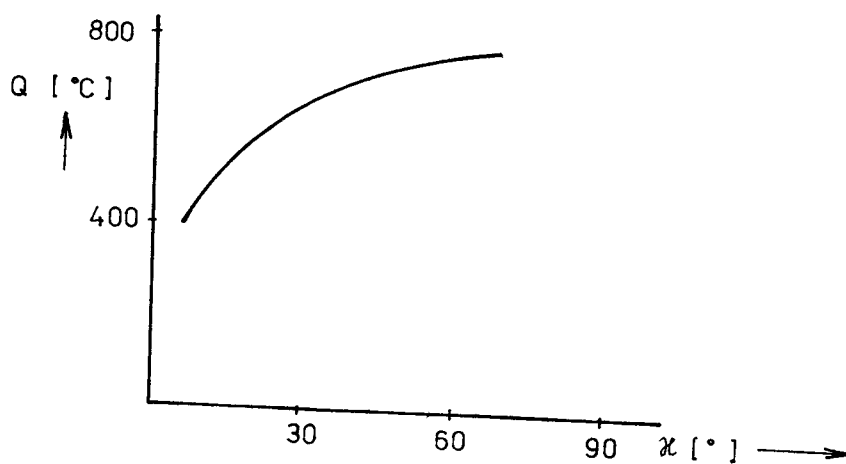
třísky naznačena na obr. 3.7, kde  $v_1 < v_2 < v_3$ .



obr. 3.6



obr. 3.7



obr. 3.8

### 3.7 Vliv úhlu nastavení na teplotu řezání.

Vliv úhlu nastavení  $\alpha$  a poloměru špičky nože  $r$  na teplotu řezání  $Q$  se projevuje stejně jako vliv tvaru třísky. Zmenšuje-li se úhel nastavení, zvětšuje se délka styku břitu s třískou a teplota řezání klesá /obr. 3.8/.

## 4. Měření teplot při obrábění.

### 4.1 Přehled metod měření teploty při obrábění.

Pro měření teploty při obrábění se používá celá řada metod, které využívají různé fyzikální principy. Při měření teploty řezání se téměř vždy setkáme s obtížemi, které vyplývají z malého rozměru místa styku nástroje a obrobku. Je zde obtížné umístění měřicího čidla a navíc se výsledky měření, získané různými metodami, liší.

Pro předběžnou orientaci je nyní uvedeno rozdělení metod měření teploty řezání. Nejdůležitější a nejpoužívanější metody měření teploty řezání jsou popsány v kapitole 4.2.

#### I. Kontaktní metody

##### a/ měření teploty termočlánky:

- umělý termočlánek - s jedním cizím kovem
  - se dvěma cizími kovy
  - kombinovaná metoda
- přirozený termočlánek - jednonožová metoda
  - dvojnožová metoda

##### b/ určení teploty na základě změn struktury:

- přirozené změny struktury materiálu - nástroje
  - obrobku
  - třísky

- změny vyvolané přísadami - termofilní nětčry
- přísadové prvky

## II. Bezkontaktní metody

určení teploty z tepelného záření:

- teplotní snímač - pomocí termistorů
- fotochemický snímač - infračervená fotografie
- fotoelektrický snímač - infračervený měnič teplotního obrazu
- infračervený televizní přenos teplotního obrazu

### 4.2 Metody měření teplot při obrábění.

Z metod měření teploty při obrábění uvedených v kapitole 4.1 se nejvíce používají metody založené na termoelektrickém jevu a metody využívající změny struktury materiálů obrobku. Tyto metody pak dávají obraz o teplotách uvnitř materiálu. Dále se používají i metody bezkontaktní, které nám umožňují získat průběhy teploty na povrchu tělesa měřením z určité vzdálenosti.

#### 4.2.1 Termoelektrický jev.

Podstatou termoelektrického jevu, objeveného ruským vědcem akademikem Epinusem počátkem minulého století a později upřesněným Sebeckem, Peltierem a Thomsonem, je toto /5/:

1/ Jestliže v obvodu složeném ze dvou vodičů z různých kovů spojených mezi sebou v bodech 1 a 2 /obr. 4.1/ budeme ohřívát jeden z těchto bodů, vznikne v obvodu elektromotorická síla, která je funkcí rozdílu teploty spojených míst vodičů /Sebeckův jev z roku 1821/.

2/ Elektrický proud, tekoucí obvodem ze dvou různých bodů, způsobí rozdíl teplot mezi oběma místy, v nichž se oba kovy spojují /Peltierův jev z roku 1854/.

3/ V obvodu z jednoho materiálu způsobí elektrický proud změnu teploty /Thomsonův jev z roku 1854/.

4/ Vznik elektromotorického napětí v jednom vodiči vlivem různých teplotních gradientů podél vodiče nebyl u kovových materiálů zjištěn /jev duální k Thomsonovu/.

Na základě uvedených jevů byl zkonstruován termočlánek z drátů dvou kovů, které dávají dostatečně velkou termoelektrickou sílu /TES/.

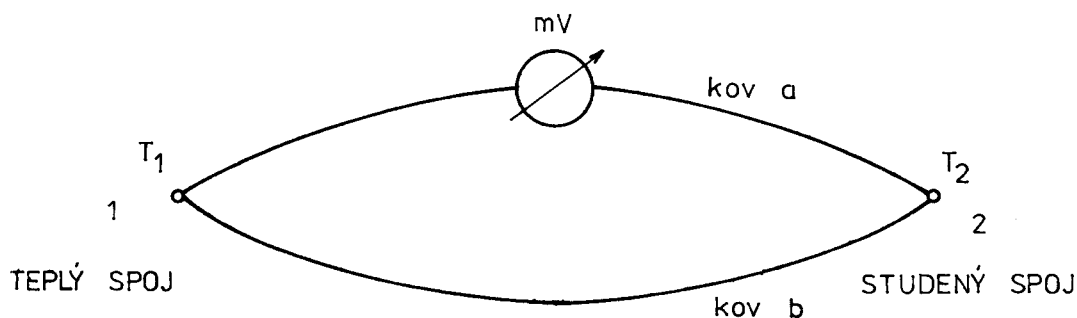
Na obr. 4.1 je naznačen princip tohoto termočlátku. Napětí vznikající v termočlátku popisuje rovnice:

$$U = (T_1 - T_2) \cdot (\alpha_a + \alpha_b) \quad [\text{mV}] \quad /6/$$

$T_1$  - teplota teplého spoje [ $^{\circ}\text{C}$ ]

$T_2$  - teplota studeného spoje [ $^{\circ}\text{C}$ ]

$\alpha_a, \alpha_b$  - termoelektrické napětí kovu a, b vzhledem k platině [ $\text{mV}/100^{\circ}\text{C}$ ]



obr. 4.1

Při použití termočlátku rozhoduje o přesnosti měření sekundární termoelektrické napětí, které může být vyvoláno nehomogenitou materiálu drátů termočlátku, nebo jinou krystalickou strukturou. Proto dráty pro přesné měření vždy před zhotovením snímače zřídíme není-li zaručeno, že to bylo výrobcem provedeno /4/.

Vlastní spoj obou drátů je nejdůležitější částí snímače, bývá

vytvořen spojením dvou drátů z různých kovů stejného průměru buď mechanicky, svařením, nebo pájením. Vzájemný styk obou termočlánekových drátů musí být dokonalý a musí být odstraněny přechodové odpory. Zdrojem chyb může být i místní deformace spoje. Proto se termoelektrické články určené pro přesná měření nemají přehýbat v ostré úhlu, zkrucovat apod. /4/. Oba dráty termoelektrického článku musí být vzájemně elektricky izolovány. Izolační odpor má být nejméně 20 M $\Omega$ . K izolaci termočlánekových drátů lze pro nízké teploty použít trubičky z PVC, pro vyšší teploty lze použít smaltování a pro teploty nad 200 °C se používají skleněné, nebo keramické trubičky.

Materiál obou kovů termočlánku určuje velikost termoelektrického napětí. Na výrobu drátů termočláneků se nejčastěji používají buď velmi čisté kovy např. Cu, Fe, Ni, Pt, W, Mo, nebo slitiny kovů, které jsou známy pod obchodními názvy např.: chromel - 90% Ni, 10% Cr; alumel - 1% Si, 2% Al, 0,17% Fe, 2% Mn a zbytek Ni; kopel - 56,5% Cu, 43,5% Ni; konstantan - 55% Cu, 45% Ni; chromnikl - 10% Cu, 45% Ni a zbytek dezoxidantní přísady.

V tab. 4.1 jsou uvedena některá nejpoužívanější spojení drátů dvou kovů a vlastnosti jejich spojení /5/.

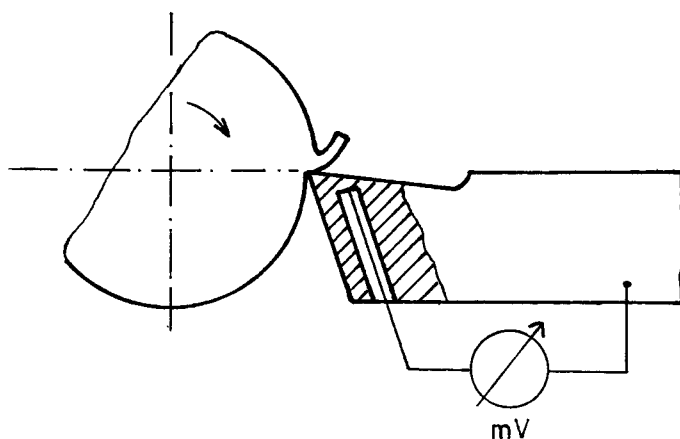
Princip termoelektrického jevu využívá celé řada metod měření teploty při obrábění. Tyto metody se liší v konstrukci a zapojení termočlánku a jsou popsány v kapitolách 4.2.2 až 4.2.5.

#### 4.2.2 Umělý termočlánek s jedním cizím kovem.

Schema měření teploty umělým termočlánekem s jedním cizím kovem je na obr. 4.2. Termoelektrická síla vzniká mezi materiálem nástroje a materiálem termočlánekového drátu. Tato metoda vyžaduje zhotovení vývrtu v nástroji, do něhož je použit termočlánekový drátek

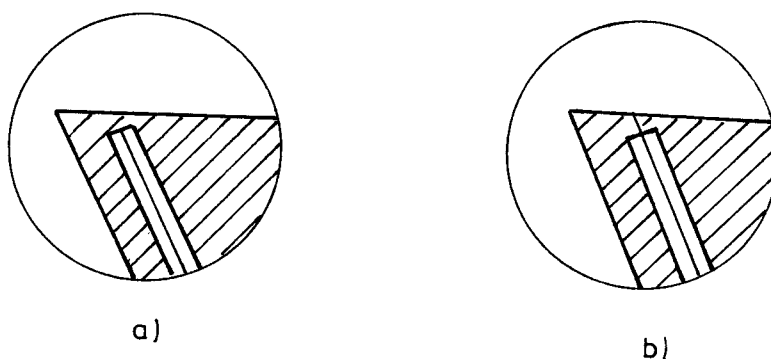
materiály drátků	max. teplota trvalého použití [°C]	TEB [mV/100 °C]
měď - konstantan	400	4,25
železo - konstantan	600	5,35
nikl - chromnikl	900	4,04
chromel - alumel	1100	4,00
platina - rhodium	1300	0,02
wolfram - molybden	2200	0,16

tab. 4.1



obr. 4.2

umístěn. Spojení termočláňkového drátku s nástrojem může být provedena jedním ze způsobů uvedených na obr. 4.3.



obr. 4.3



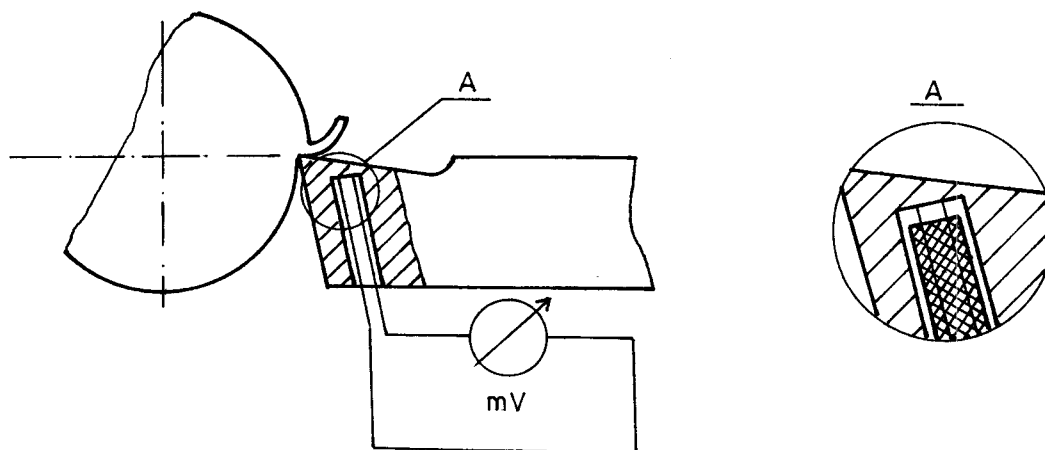
Na obr. 4.3a je naznačeno spojení termočlánekového drátku na dno vývrtu přivařením. Přivaření termočlánekku je snažší než u metody měření teploty umělým termočlánekem se dvěma cizími kovy /kap. 4.2.3/. Tuto metodu lze dobře použít při zjišťování teplotního pole nástroje.

Na obr. 4.3b je uveden druhý způsob uspořádání. Termočlánekový drát je protažen tenkým průvrtem až na čelo nástroje a je od nástroje zcela izolován. Při obrábění zajišťuje vodivé spojení termočlánekových kovů tříska odcházející po čele nástroje. Tento způsob je výhodný při určování teploty přímo na čele nástroje. Přesnost měření může být snižována případným tvořením nárůstku v místě vyvedení termočlánekového drátku na čelo nástroje /2/.

Nevýhodou této metody je nutnost cejchování každé použité kombinace nástrojového materiálu a materiálu termočlánekového drátu.

#### 4.2.3 Umělý termočlánek se dvěma cizími kovy.

Tato metoda využívá k měření teploty při obrábění termoelektrické napětí vzniklé na termočlánekku, který je umístěn v nástroji obr. 4.4.



obr. 4.4

Teplý spoj termočládku se pomocí vývrtu umísťuje pod rovinnu čela do míst odebírání třísky. Studený spoj je většinou vystaven okolní teplotě a pro přesnost měření je třeba dbát na to, aby nebyl v oblasti zdrojů tepla, proto ho umísťujeme co nejdále od oblasti vysoké teploty. Provádí se to pomocí tzv. kompenzačního /prodlužovacího/ vedení. U obecných kovů termoelektrického článku používáme kompenzační vedení ze stejných kovů, pro články z drahých kovů se používá kompenzační vedení z náhradních kovů, obvykle z mědi a niklu, přičemž termoelektrické napětí této dvojice musí být shodné s daným článkem v rozsahu možného kolísání teploty okolí /4/. Používané kombinace spojení drátků dvou kovů a vlastnosti jejich spojení jsou uvedeny v tab. 4.1.

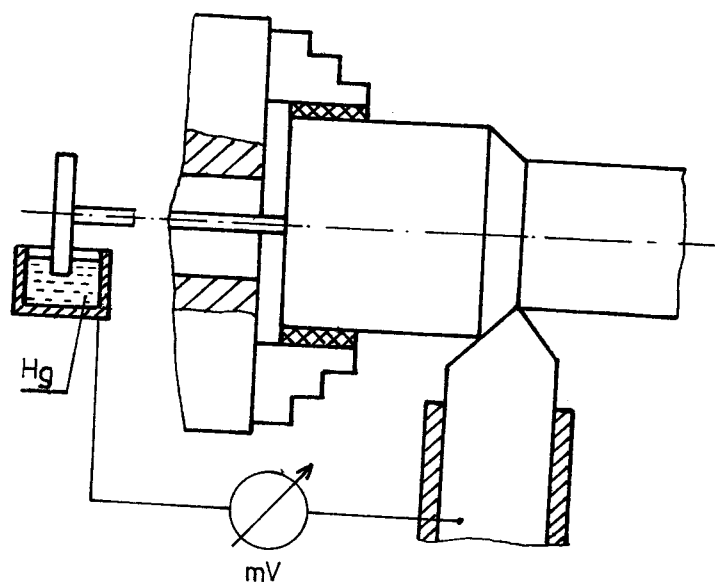
Pro přesné měření se studený spoj umísťuje v tzv. Dewarově nádobě vyplněné směsí vody a ledu, tj. v prostředí o konstantní teplotě 0 °C. Pro průmyslové použití se však tento způsob nehodí a je vhodný jen pro laboratorní měření.

Příprava termočládku a provedení vývrtu v nástroji je pracné, obtížné je zvláště přivaření termočládku na dno vývrtu, navíc nelze zjistit kvalitu a polohu provedeného spoje. To snižuje přesnost přiřazení teploty a místa pro stanovení teplotního pole nástroje. Vzhledem k tomu, že v blízkosti čela nástroje je teplotní gradient velmi velký, se potom můžeme dopustit velké chyby při zjišťování teplotního pole nástroje /2/.

Tato metoda se i přes uvedené nedostatky, které lze částečně odstranit, používá a je provozně spolehlivá. Její velkou výhodou je to, že je známá cejchovní křivka použitého termočládku, a proto odpadá cejchování.

#### 4.2.4 Přirozený termočlánek.

Tato metoda je založena na vzniku termoelektrické síly mezi obráběným materiálem a nástrojem. Teplým spojením přirozeného termočlásku je elektricky vodivé spojení mezi nástrojem a obrobkem, které vzniká v místě odebírané třísky vlivem působících řezných sil a tlaků. Na obr. 4.5 je schema měření teploty přirozeným termočlánkem při soustružení.

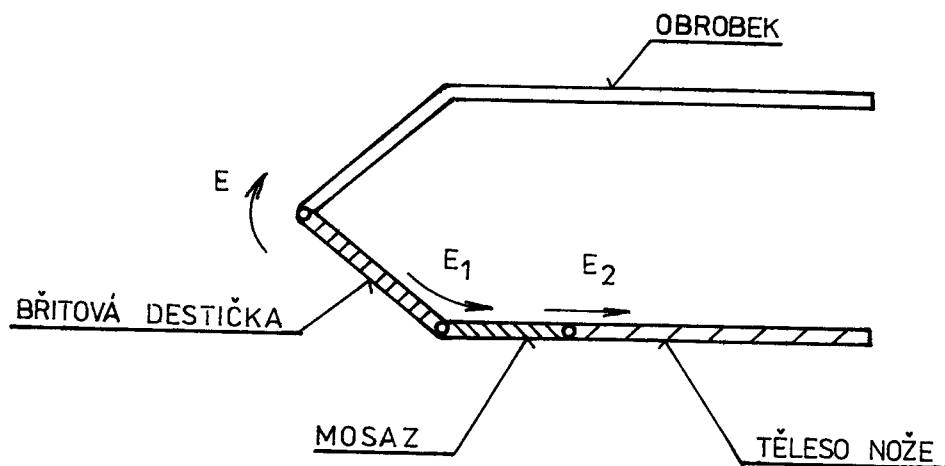


obr. 4.5

Teplota stykových ploch nástroje, obrobku a třísky není konstantní, proto měřená termoelektrická síla odpovídá střední teplotě těchto stykových ploch. Nevýhodou této metody je nutnost odizolovat nástroj a obrobek navzájem. Pro zvýšení přesnosti a spolehlivosti měření je třeba odizolovat nástroj a obrobek také od stroje. Za nevýhodu lze považovat i to, že se neměří střední teplota na čele, ale celková střední teplota stykových míst na čele a na hřbetě. Dále u této metody vznikají potíže s tím, že se vždy jeden

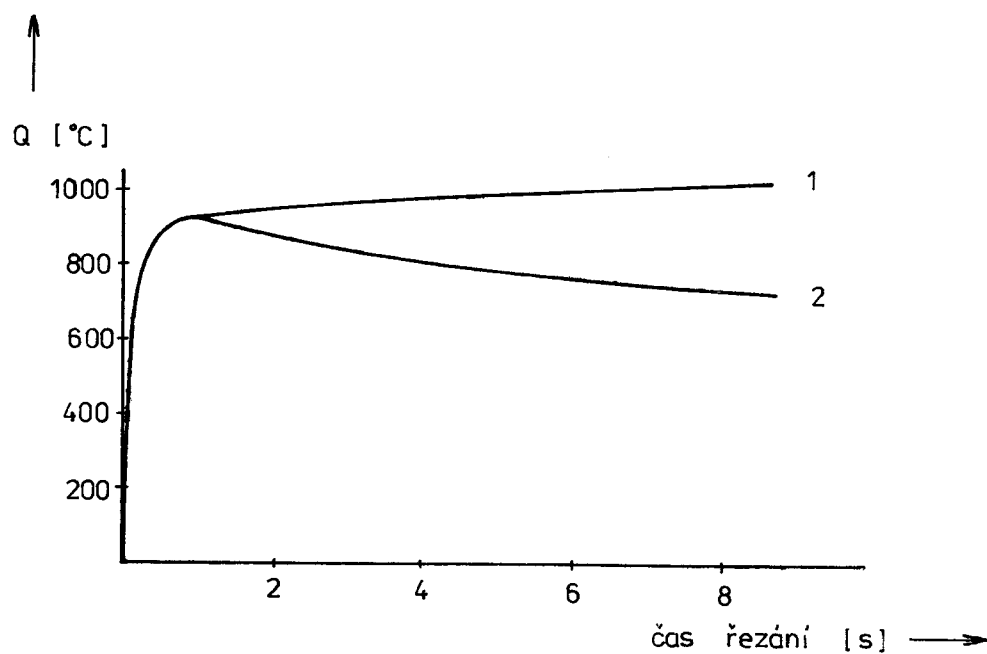
z členů dvojice obrobek - nástroj pohybuje a je velmi obtížné z něho snímat elektromotorickou sílu. Pro tento účel se používají různé rotační přenašeče. Dále je nutné zajistit odchod třísky z prostoru obrábění, protože může být příčinou nežádoucích elektricky vodivých spojení nástroje a obrobku.

Měření teploty přirozeným termočlánkem dává spolehlivé výsledky pro celistvé nástroje. U nástrojů opatřených mosazí pájenou břitovou destičkou se objevují při prohřátí celého průřezu nože tzv. parazitní termočlánky mezi slinutým karbidem a mosazí / $E_1$ / a mezi mosazí a materiálem tělesa nože / $E_2$ /. Tato okolnost je znázorněna na obr 4.6.



obr. 4.6

Vliv parazitních termočlánků se projeví asi po pěti sekundách obrábění po prohřátí nože poklesem termoelektrické síly obr. 4.7. Negativní vliv parazitních termočlánků lze omezit vyvedením termoelektrické síly přímo z břitové destičky, to však vyžaduje zhotovení vývrtu v držáku nože, ale tím se tato metoda stává přesnější a je potlačena její hlavní výhoda tj. pohotovost a jedno-



1 - celistvý nůž

2 - nůž s břitovou destičkou

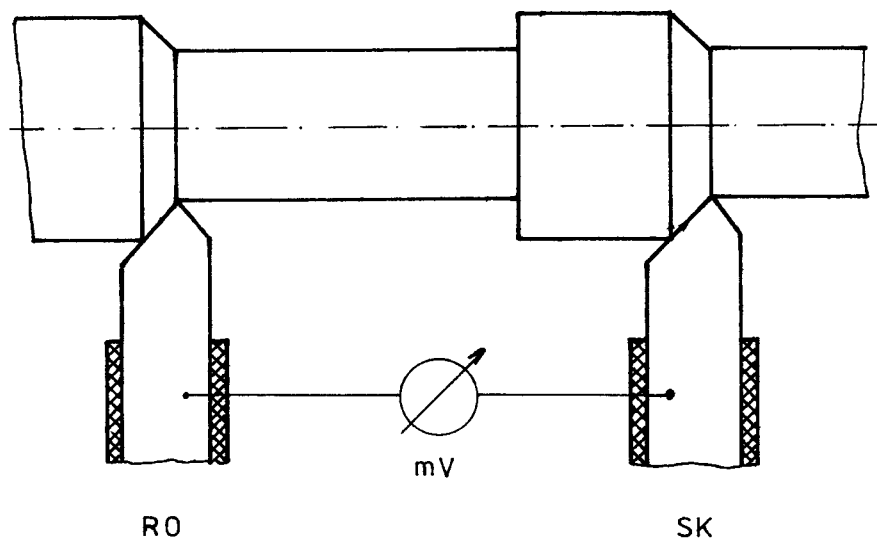
obr. 4.7

dučnost. Další výhodou metody přirozeného termočláčku je nenáročnost a spolehlivost. Za nevýhodu této metody lze považovat nutnost cejchování každé použité kombinace obráběného a řezného materiálu.

Uvedená metoda se využívá pro provozní měření teploty při obrábění.

#### 4.2.5 Dvounožová metoda.

Tato metoda je známa i pod názvem termočuo. Princip uspořádání je na obr. 4.8. Metoda využívá k měření teploty při obrábění termoelektrické síly, které vzniká mezi dvěma současně pracujícími noži. Materiál nožů je volen tak, aby při měřených teplotách dosahovala termoelektrická síla měřitelných hodnot. Nejčastěji se volí kombinace materiálů nožů rychlořezná ocel - slinutý karbid. Podmínkou pro získání správných výsledků měření je, aby teplota vznikající při obrábění byla na obou nožích stejná [2].



obr. 4.8

Oba nože musí mít tedy stejné rozměry i geometrii a musí pracovat za stejných podmínek v homogenním obrobku. Je žádoucí, aby i součinitel vedení tepla pro oba nástrojové materiály byly stejné, jinak by vlivem nestejných součinitelů tepla mohlo docházet k nestejnému odvodu tepla z místa řezání a tím i ke vzniku rozdílu teplot na jednotlivých nožích. Výhodou této metody je vedle jednoduchosti realizace skutečnost, že cejchovní křivka není závislá na použitém materiálu obrobku. Materiál obrobku tvoří pouze elektricky vodivý spoj termočlánku, termoelektrická síla vzniká mezi jednotlivými noži.

Při použití dvojice nožů rychlořezná ocel - slinutý karbid ovlivňují přesnost měření nepříznivě působící termoelektrické síly parazitních termočlánků slinutý karbid - mosaz a mosaz - ocel držáku nože. Vliv parazitních termočlánků se projevuje až po prohřátí celého průřezu nože viz. kap. 4.2.4. Je proto nutné provádět zaznamenávání výsledků měření na počátku obrábění, dříve než dojde k prohřátí nože /4/, /6/.

Výhodou této metody je, že při použití k měření teplot při soustružení není třeba používat rotační přenašeč. Při frézování a dalších způsobech obrábění při nichž koná nástroj rotační pohyb tato výhoda nevzniká.

#### 4.3 Určení teploty při obrábění na základě změn struktury materiálu obrobku a nástroje.

Každé teplotě odpovídá určitá změna struktury a fyzikálních vlastností materiálu nástroje a obrobku. Tato změna je založena na změně energie vzájemných vazeb atomů a k jejímu uskutečnění je nutno dodat určitou energii z okolí. Transport této energie je funkcí času a k jeho uskutečnění je potřeba určité doby.

Proto se touto metodou nemůže určovat okamžitá změna teploty, ale lze jí stanovit stacionární pole. Způsoby měření teploty touto metodou lze rozdělit do dvou skupin.

Do první skupiny lze zařadit metody využívající přirozené změny struktury materiálu nástroje. Tato metoda potom zahrnuje určení dosažené teploty ze změn tvrdosti nástroje z rychlořezné oceli. Spojením bodů o stejné tvrdosti potom dostaneme křivky, které přibližně odpovídají izotermám. Další metoda je založena na sledování difuze materiálu třísky do nástroje, z rozsahu difuze lze potom určit teplotu na čele nástroje.

Ve druhé skupině se používají dva možné postupy:

a/ Nanášení teplocitlivých látek na nástroj, nebo obrobek.

Nanášení těchto látek se provádí buď posypáváním prášky kovů o známé tavné teplotě, nebo použitím nátěrů na bázi kovových solí. Tyto nátěry známé pod názvem "thermocolor", reagují na dosaženou teplotu tím, že mění svou barvu.

b/ Přidávání přísad do materiálu nástroje, nebo obrobku.

Metoda je založena na přidávání přísad do materiálu nástroje, nebo obrobku, většinou jde o kovy nebo slitiny o známé tavné teplotě. Velikost teploty při obrábění se určuje ze změn struktury těchto přísad, případně ze změn koncentrace těchto přísad v základním materiálu.

Tato metoda se v praxi téměř nepoužívá pro svoji velkou pracnost a malou přesnost, navíc je příliš zdlouhavá.

#### 4.4 Měření teploty při obrábění optickými metodami.

Optické metody slouží k určení izoterm charakterizující tvar teplotního pole. Měří se bod po bodu, po celé ploše nástroje, obrobku i třísky, obvykle při ortogonálním řezání.



Používají se optické pyrometry, fotopyrometry a radiální pyrometry. Optické pyrometry pracují na principu spektrální zářivosti určité vlnové délky.

Fotopyrometry zachycují část vysílaného spektra na fotografický film s emulzí citlivou na infračervené záření.

Radiační pyrometry opticky zpracovávají celé spektrum záření a soustřeďují ho na převodní člen např. termočlánek.

Spojitě měření záření spočívají v zobrazení teplotního pole buď na fotografický film, nebo v elektronickém zpracování na televizní obrazovku. Čechování se obvykle provádí snímáním teploty elektricky ohřívané tyčky ze slinutých karbidů jejíž teplota se kontroluje termočlánkem.

Pro spojitě měření teplotních polí se používá infrakamera firmy Barnes Engineering a termovizní systém firmy AGA /3/.

Infrakamera Barnes poskytuje černobílý obraz, jehož rozložení jasů odpovídá rozložení teplot na povrchu sledovaného objektu. Nejmodernější provedení těchto přístrojů umožňuje získat barevný termogram k snažšímu rozlišení teplotních polí /3/.

Spektrální citlivost je v rozsahu vlnových délek (0,7 - 35)  $\mu\text{m}$ , což odpovídá teplotám (-170 + 250)  $^{\circ}\text{C}$ . Čas pro zobrazení jednoho snímku je v rozmezí, dle použité optiky, 1 - 6 minut. Proto se tato metoda hodí pouze pro statické děje.

Švédská firma AGA Infrared System vyrábí celou řadu termovizních přístrojů a systémů pro měření teploty. Kamera této firmy umožňuje získat analogický obraz teplotního pole jak pozitivní tzn. teplejší zóny jsou světlejší než studené, tak i negativní.

Je možné zobrazení pouze dvou libovolných izoterm uvnitř termogramu. Termogram lze z obrazovky přefotografovat, nebo snímat filmovou kamerou. Je možno využít i magnetického záznamu obrazu.

## 5. Titan a jeho slitiny.

### 5.1 Vlastnosti titanu.

Titan je zařazen v Mendělejevě periodické soustavě prvků ve skupině IV pod pořadovým číslem 22. Jeho elektronová konfigurace je  $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^2 4s^2$  a jeho atomová hmotnost je 47,9. Patří mezi vysokotavitelné kovy tj. kovy s teplotou tání vyšší než je teplota tání železa /1539 °C/.

Titan se vyskytuje ve dvou alotropických modifikacích /9/:

a/ Modifikace  $\alpha$  je stálá do 882 °C a má hexagonální mřížku s těsně uloženými atomy.

b/ Modifikace  $\beta$  je stálá při teplotách vyšších než 882 °C a má krychlovou prostorově středěnou mřížku.

Významnou vlastností titanu je jeho vysoká odolnost proti korozi zejména v chlóru v chlorových sloučeninách, kterým žádný jiný kov neodolává. Korozní účinek na titan mají pouze čtyři kyseliny: fluorovodíková, sírová, solná a fosforečná /9/, /10/. Další charakteristickou vlastností titanu je jeho nízká měrná hmotnost a vysoká pevnost. Titan má velký poměr meze kluzu a meze pevnosti, což má velký vliv na tváření za studena. Mechanické vlastnosti titanu značně závisí na obsahu nečistot zejména kyslíku, dusíku a uhlíku. Nečistoty značně omezují tváření za studena, které je charakteristické velkým zpevněním. Za vyšších teplot titan rychle ztrácí pevnost, proto lze jeho příznivých vlastností využít jen do 300 °C. Titan lze dobře zpracovávat ze tepla. Velmi nepříznivou vlastností titanu je příliš vysoký součinitel tření spojený s velkým otěrem a náchylností k zadírání. Titan má malou tepelnou vodivost. Důležité mechanické a tepelné vlastnosti titanu jsou uvedeny v tab. 5.1.

mez kluzu	$\sigma_{kt} = 190 \text{ MPa}$
mez pevnosti	$\sigma_{Pt} = 300 \text{ MPa}$
tažnost	$A = 40\%$
měrná hmotnost	$\rho = 4,5 \cdot 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
modul pružnosti	$E = 1,1 \cdot 10^5 \text{ MPa}$
tvrdost	120 HB
teplota tání	$T_t = 1655 \text{ }^\circ\text{C}$
tepelná vodivost	$\lambda = 16,7 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
délková roztažnost	$\alpha = 8,41 \cdot 10^6 \text{ K}^{-1}$
měrné teplo	$c_{20} = 544 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

tab. 5.1

## 5. 2 Titenové slitiny a jejich vlastnosti.

Titan tvoří slitiny s mnoha prvky. Slitiny titanu lze rozdělit podle různých hledisek. Nejběžnější je rozdělení podle vlivu jednotlivých prvků na mřížku obou modifikací, ve kterých se titan vyskytuje.

Rozeznáváme tři skupiny titanových slitin:

- 1/ slitiny typu  $\alpha$
- 2/ slitiny typu  $\alpha + \beta$
- 3/ slitiny typu  $\beta$

### 1/ Slitiny typu $\alpha$ .

Fázi  $\alpha$  stabilizují prvky: C, O, N, Al, Sn. Slitiny  $\alpha$  se vyznačují vysokou odolností proti žáru, vysokými mechanickými vlastnostmi až do  $600 \text{ }^\circ\text{C}$ , nejsou choulostivé na tepelné zpracování a mají

omezenou tvářitelnost za studena. Používají se především slitiny s obsahem Al do 7%.

## 2/ Slitiny typu $\alpha + \beta$

Vzájemný poměr fází  $\alpha$  a  $\beta$  je dán charakterem rovnovážného diagramu, obsahem legujících prvků a podmínkami zpracování. Tyto slitiny jsou tvořeny prvky stabilizujícími fázi  $\beta$ /V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Mo, Nb/ a prvky stabilizujícími fázi  $\alpha$  nejčastěji Al. Velmi nepříznivě působí v těchto slitinách kyslík, dusík a uhlík. Tyto prvky mají nepříznivý vliv na strukturu slitiny a její mechanické vlastnosti. Obsah uhlíku má být menší než 0,1% /při větším obsahu se tvoří karbid titanu/, obsah kyslíku nemá být větší než 0,2% /11/.

Vyrábějí se slitiny s třemi až čtyřmi legujícími prvky, přičemž obsah jednoho z přidávaných prvků může být vyšší než 10% /9/. Předností těchto slitin je velká pevnost při normální teplotě a dobrá tvářitelnost za studena.

## 3/ Slitiny typu $\beta$

Tyto slitiny jsou výrobně nejobtížnější a lze je vyrobit zvýšením obsahu prvků stabilizujících fázi  $\beta$ , především Mo, Nb, V. Obsah přidávaných prvků je vysoký - až 30% /11/.

Slitiny typu  $\beta$  se vyznačují vysokou pevností do teploty 500 °C, dají se dobře tvářet a svařovat.

## 5.3 Titanové slitiny vyráběné v ČSSR. /12/

Titanové slitiny se vyrábějí buď tavením, nebo práškovou metalurgií. Slitiny vyráběné tavením v obloukových pecích se označují VT. Slitiny vyráběné práškovou metalurgií se označují IMP.

V ČSSR se vyrábějí titanové slitiny v Poldi SONP Kladno v sortimentu:

Poldi T110

/VT 3 - 1/

Poldi T90

/VT 6, ve světě označené Ti6Al4V/

Obě slitiny mají strukturu  $\alpha + \beta$ .

#### 5.4 Obrábění titanu a jeho slitin.

Titan a jeho slitiny patří mezi těžkoobrobitelné materiály, pro které je třeba volit tuhé obráběcí stroje v dobrém technickém stavu s vymezenými vůlemi posuvových mechanismů, saní suportů a ložisek vřetena. Upnutí nástrojů a obrobků musí zaručit dostatečnou tuhost celé soustavy stroj - nástroj - obrobek. Nedostatečná tuhost této soustavy způsobuje chvění a urychlené opotřebení, nebo poškození břitu nástroje.

Při obrábění titanu a jeho slitin nastává rychlé zpevnění obrobeného povrchu. Minimální hloubka třísky se doporučuje 0,07mm, aby břit nástroje zabíral pod zpevněnou vrstvou /11/. Nástroj musí být dokonale ostrý. Otupený nástroj zvětšuje hloubku zpevněné povrchové vrstvy 6 až 8 krát a stupeň zpevnění povrchové vrstvy se zvýší až dvojnásobně /10/.

Při obrábění titanu a jeho slitin se projevují charakteristické obtíže: a/ Titan a jeho slitiny působí na povrch nástroje ze slitinutých karbidů i rychlořezných ocelí a vyznačuje se sklonem k tvoření slitin, zvláště za vyšších teplot, a přitavuje se.

b/ Styková plocha mezi nástrojem a třískou je velmi malá a řezná hrana je proto vystavena velkému tlakovému a tepelnému namáhání.

c/ Titan má malou tepelnou vodivost, proto je podstatně horší odvod tepla z místa řezu do obrobeného materiálu.

d/ Titan má nepříznivě vysoký součinitel tření spojený s velkým otěrem a náchylností k zadírání.

Uvedené obtíže jsou hlavními příčinami neobvykle vysokých teplot na řezné hraně při obrábění titanu a jeho slitin.

Z uvedeného je zřejmé, že obrobitelnost titanu a jeho slitin je špatná. Musí se volit nízké řezné rychlosti, vhodné řezné materiály a vhodná geometrie nástroje. Nástroje se musí často ostřit a místo řezu se musí účinně chladit.

## 5.5 Nástrojové materiály a nástroje pro obrábění titanu a jeho slitin

### 5.5.1 Nástrojové oceli vhodné pro obrábění titanu.

Pro obrábění těžkoobrobitelných materiálů se používají jen rychlořezné oceli výkonné a vysoce výkonné. Používají se zejména tam, kde druh nástroje nebo povaha operace nedovolí použít nástroj s slinutým karbidem. Používají se dále tam, kde je nutno obrábět nižší, pro slinuté karbidy nevhodnou, řeznou rychlostí.

Jako perspektivní se jeví nově vyvíjené tzv. supertvrdé rychlořezné oceli, které mají zvýšený obsah uhlíku /až 1,4%/ a různě vysoké procento přísady vanadu, dosahují tvrdosti až 70 HRC.

V tab. 5.2 jsou uvedeny některé doporučené rychlořezné oceli pro obrábění titanu /12/.

### 5.5.2 Doporučené slinuté karbidy pro obrábění titanu.

Pro volbu optimálního druhu slinutého karbidu je rozhodující charakter namáhání břitu nástroje, tj. nejen mechanicky, ale i na otěr. Slinuté karbidy mají vysokou tvrdost /až 91 HRA/ a odolnost proti otěru i při teplotách 700 až 1000 °C, pevnost v tlaku je 4000 až 5000 MPa /12/.

V tab. 5.3 jsou uvedeny některé doporučené slinuté karbidy pro obrábění titanu /12/.

Označení ČSN a Poldi	stř. obsah hl. přísad [ % ]	Doporučené použití
19 851 Maximum Speciál 45	C - 1,4 Cr - 4,2 W - 7,0 Mo - 3,8 V - 1,85 Co - 5,0	Náročnější nástroje /soustružnické nože, frézy, vrtáky, vjstružníky, záhlubníky, závitníky/. Pro obrábění mat. nejvyšších pevností a mat. se silně abrasivním účinkem v pří- padech, kdy není možno nástroje z SK použít.
19 857 MKG	C - 0,95 Cr - 0,42 W - 10,25 V - 2,35 Co - 9,75	Velmi namáhané obráběcí nástroje /soustružnické nože hrubovací, hob- lovací a obrážecí nože, frézy aj./ k obrábění zvláště obtížně obrobi- telných materiálů.
19 852 Maximum Speciál 75 Mo	C - 0,85 Cr - 4,2 W - 6,25 Mo - 5,0 V - 1,85 Co - 4,75	Značně namáhané nástroje /tvarové nože, odvalov. frézy, obrážecí no- že na ozubení, zévitníky ap./ při požadavku na vyšší houževnatost. pro velké řezné rychlosti i pro silně přerušovaný řez.
19 856 Maximum Speciál 556	C - 0,95 Cr - 4,2 W - 10,25 V - 2,35 Co - 5,0	Velmi namáhané obráběcí nástroje /soustružnické nože, frézy, vrtáky, zévítové nástroje, odvalov. frézy aj./ pro velmi výkonné obrábění těžkoobrobitelných materiálů.

tab. 5.2

Označení SK dle ISO	Pracovní podmínky	Některé firemní SK			
		Diadur	Harthu	Widia	Seco
K 10	soustružení, frézování vrtání, vystružování, protahování aj.	H1 H2	HG110 HG15	TH10 TH05	H13 SU41
M 10	soustružení při středních až vysokých řezných rychlostech a malých až stř. průřezech třísky	U1	HU10	AT10 AT15	SU41
M 20	soustružení, frézování při stř. řezných rychlostech a stř. průřezech třísky	U2	HU10	AT15 AT20	SU41 S
M 30	soustružení, frézování, hoblování při stř. řezných rychlostech a středních až velkých průřezech třísky	U3	HU30		

tab. 5.3



## 5.6 Frézování titanu a jeho slitin.

Obtíže při frézování titanu a jeho slitin jsou způsobeny nalepováním /přítavováním/ třísek na břity fréz, což způsobuje jejich vydrolování případně i vylomení. Toto nalepování lze snížit na nejmenší míru volbou sousledného frézování, vhodnou geometrií břitu a správnými řeznými podmínkami. Je nutné, aby byl frézovaný kus dobře upnut a stroj měl vymezenou vůli v pohybovém mechanismu tak, aby bylo zabráněno případnému chvění. Při práci se slitinutými karbidy je lépe pracovat za sucha. Při frézování s rychlořeznými frézami je naopak zapotřebí vydatného chlazení, nejlépe emulzí vrtacího oleje /9/.

U válcových fréz je vhodný větší úhel stoupání šroubovice a menší počet zubů frézy, aby byl zajištěn plynulý záběr a dobrý odchod třísek.

Geometrie řezného břitu fréz pro frézování titanu a jeho slitin je různá podle druhu řezného i obráběného materiálu. V tab. 5.4 je uvedena doporučená geometrie břitů fréz /13/. Romanov však uvádí poněkud jinou geometrii břitů fréz, ta je uvedena v tab. 5.5 /11/.

Z tabulek 5.4 a 5.5 je zřejmé, že se doporučená geometrie břitů fréz pro frézování titanu a jeho slitin podle obou autorů liší v některých parametrech, zejména v úhlu nastavení hlavního a vedlejšího ostří.

Pro frézování titanu a jeho slitin se volí menší řezná rychlost, větší tloušťka třísky a větší posuv. Hloubka řezu se volí obvykle 0,6 až 1,25 mm /11/, ale je možno volit až 3 mm /13/.

geometrie	materiál nástroje	
	RO	SK
úhel hřbetu $\alpha$	12° - 16°	10° - 12°
úhel čela $\varphi$	5° - 10°	0° - 5°
úhel sklonu $\lambda$	10° - 15°	5° - 10°
úhel nastavení hl. břitu $\kappa$	25° - 60°	25° - 55°
úhel nastavení vedl. břitu $\kappa'$	15° - 20°	10° - 15°

tab. 5.4

geometrie	materiál nástroje	
	RO	SK
úhel hřbetu $\alpha$	12°	12°
úhel čela $\varphi$	0°	0° - 10°
nastavení hl. břitu $\kappa$	30°	60°
nastavení vedl. břitu $\kappa'$	6°	6°

tab. 5.5

mat. nástroje	obráběný mat.	řezná rych- lost [m.min <sup>-1</sup> ]	posuv na zub [mm]	
			hrubování	hlazení
RO	čistý Ti	12 - 18	0,10 - 0,25	0,05 - 0,12
	slitiny	6 - 11	0,08 - 0,20	0,04 - 0,10
SK	čistý Ti	55 - 80	0,10 - 0,25	0,05 - 0,12
	slitiny	30 - 50	0,08 - 0,20	0,04 - 0,10

tab. 5.6

mat. nástroje	obráběný mat.	řezná rych- lost [m.min <sup>-1</sup> ]	posuv na zub [mm]	
			hrubování	hlazení
RO	čistý Ti	10 - 16	0,10 - 0,25	0,05 - 0,10
	slitiny	5 - 10	0,08 - 0,20	0,03 - 0,08
SK	čistý Ti	30 - 60	0,10 - 0,25	0,05 - 0,10
	slitiny	15 - 30	0,08 - 0,20	0,03 - 0,08

tab. 5.7

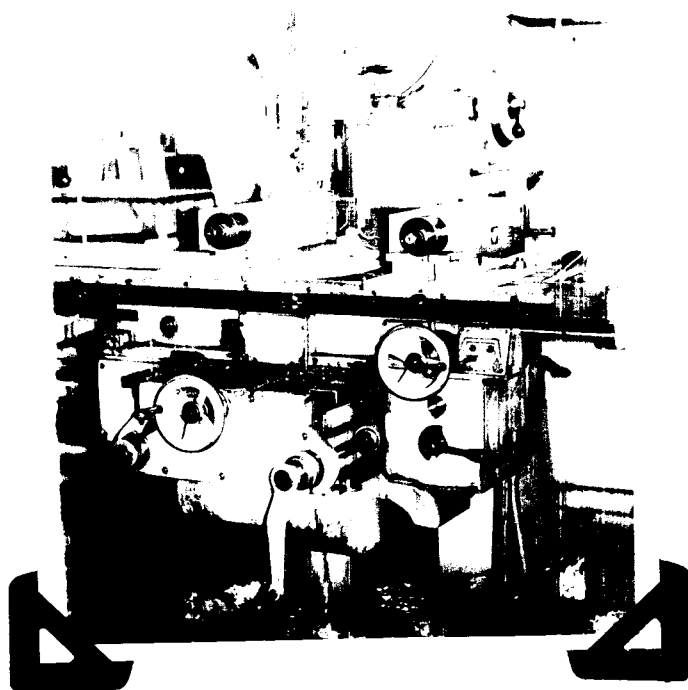
V tab. 5.6 jsou uvedeny doporučené řezné podmínky pro nástroje z rychlořezné oceli a nástroje ze slinutého karbidu, pro frézování titanu a jeho slitin jak je uvádí Mikovec /9/.

V tab. 5.7 jsou uvedeny řezné podmínky pro frézování titanu a jeho slitin podle Štětiny /13/. Uvedené řezné podmínky jsou pro frézování rovných a tverových ploch pro trvanlivost ostří asi 90 minut. Při frézování povrchové kúry je nutno násobit řeznou rychlost koeficientem 0,8 /9/, /13/.

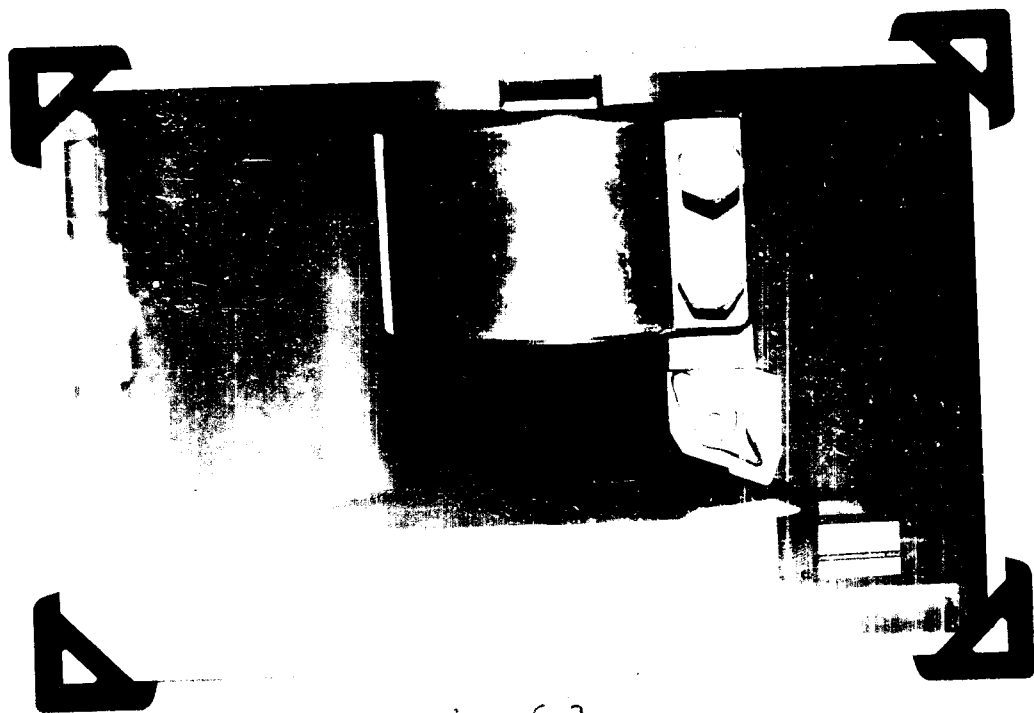
6. Metodika měření teploty při čelním frézování přirozeným termočlánkem.

6.1 Celkové uspořádání měření.

Měření bylo provedeno v dílnách KOM na frézce FA 4A - v.č. 60340 obr. 6.1. Uspořádání měření je znázorněno na obr. 6.2. K měření byl použit upravený soustružnický nůž s vyměnitelnou břitovou destičkou a obráběný materiál titanová slitina VT 6. Nůž byl upnut do dvounožové frézovací hlavy obr. 6.3.



obr. 6.1

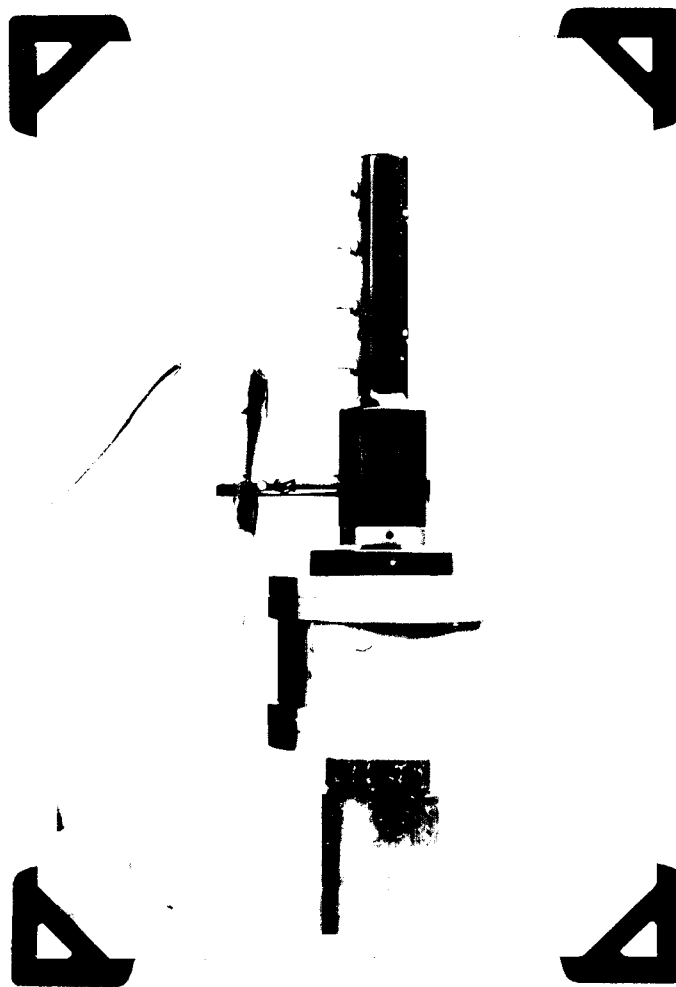


obr. 6.3

Ve frézovací hlavě byla, pro vyvedení termoelektrické síly, vyfrézována drážka souběžně s ložnou plochou nožového držáku a v návaznosti na tuto drážku byl v upínacím trnu vyvrtán otvor. Upínací tyč byla vyrobena z tlustostěnné trubky jejíž otvor sloužil k vyvedení termoelektrické síly na rotační přenašeč.

Termoelektrická síla byla, pro odstranění vlivu parazitního termočlásku břitová destička - nožový držák, vyvedena přímo z upravené břitové destičky nože izolovaným konstantanovým drátem, který se slinutým karbidem jakosti H10 nevykazuje termoelektrickou sílu. Konstantanový drát byl v místě upínací tyče, kde se již teplota v průběhu obrábění nemění, nahrazen připájeným měděným vodičem a tím byl vytvořen studený spoj přirozeného termočlásku obr. 6.2. Termoelektrická síla byla z vřetene frézky vyvedena pomocí rtuťového rotačního přenašeče Vibrometr SA obr 6.4.

K zajištění funkce metody přirozeného termočlásku je nutno odizolovat navzájem nástroj a obrobek.

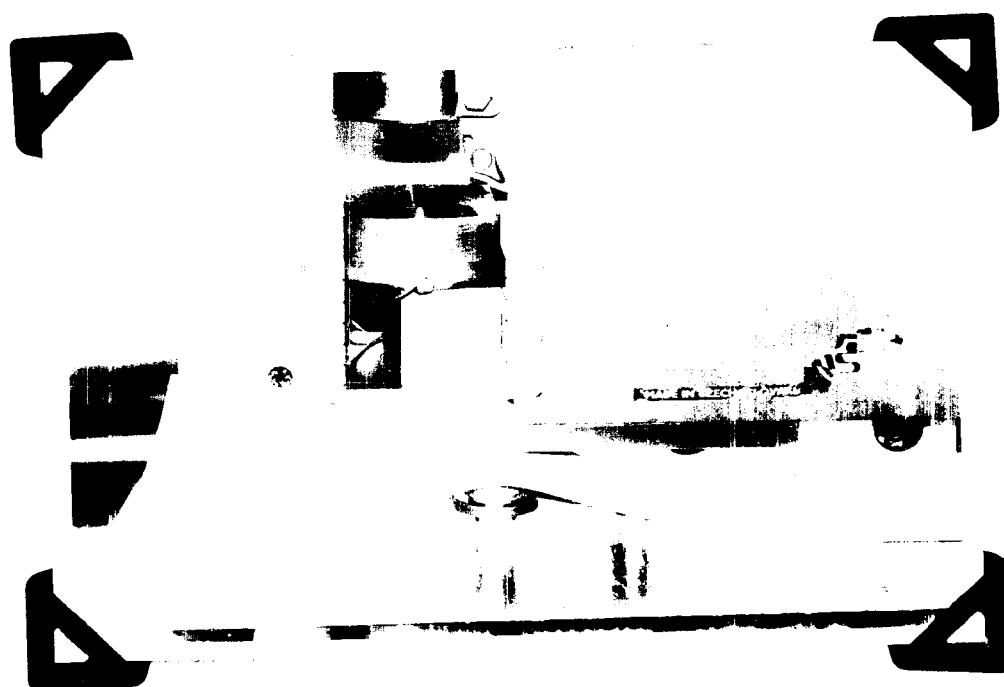


obr. 6.4

Jako nejvýhodnější řešení se jevílo odizolovat obrobek od stroje, a tím i nástroje, přičemž odizolování nástroje od stroje není nutné. Odizolování obrobku od stroje je naznačeno na obr 6.5.

Obrobek byl od stroje odizolován tak, že byl upnut do svěráku, který byl odizolován od stroje podložnou deskou uracartu 50 x 50 cm. Svěrák byl ke stolu frézky upnut dvěma šrouby M 16, a obr. 6.6 je zřejmé upnutí i odizolování svěráku od stroje. Šrouby bylo nutno zakrýt z důvodu možného nežádoucího spojení, svěrák - stroj, třís-kami vznikajícími při obrábění.

Vodivé spojení obrobku s oscilografem bylo zajištěno izolovaným měděným vodičem, který byl přivařen kondenzátorovou svěřeškou na

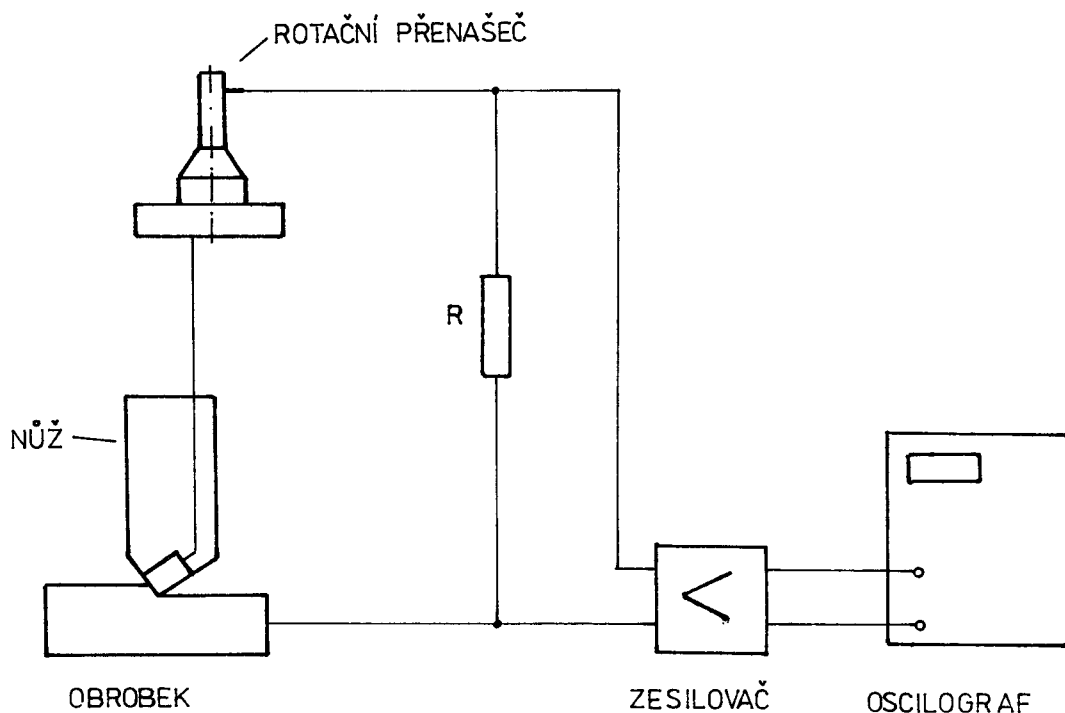


obr. 6.5

dno vývrtu v obrobku. Tento spoj byl pro ochranu proti mechanickému poškození zalit epoxidovou pryskyřicí obr. 6.5. Odizolování obrobku od stroje bylo kontrolováno univerzálním měřicím přístrojem Metra Blansko.

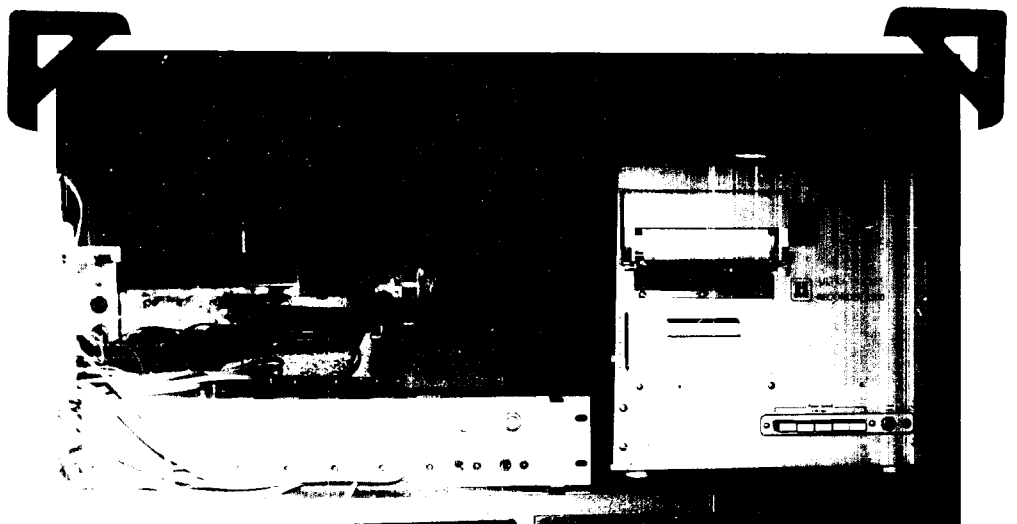
Termoelektrická síla byla snímána oscilografem ULTRA Violet Rekorder 2 500 firmy Honeywell, kterému byl pro zesílení snímaného termoelektrického napětí, předřazen zesilovač D - C Amplifier od téže firmy / obr. 6.10 /.

Protože nůž při frézování cyklicky vchází a vychází ze záběru, což způsobuje rozpojování přirozaného termočlánku, bylo nutno na vstup zesilovače zařadit paralelně odpor, aby k rozpojování vstupu zesilovače nedocházelo. Byl použit odpor  $R = 1 \text{ k}\Omega$ . Na obr. 6.7 je schema zapojení celého měření.



obr. 6.7





## 6.2 Úprava nože pro měření teplot při čelním frézování.

Pro měření byl vybrán nůž ČSN 223850.2 s vyměnitelnou břitovou destičkou ze slinutého karbidu H10 s geometrií:

$$\alpha_0 = 10^\circ, \gamma_0 = 6^\circ, \lambda_s = 0^\circ, \alpha_r = 70^\circ$$

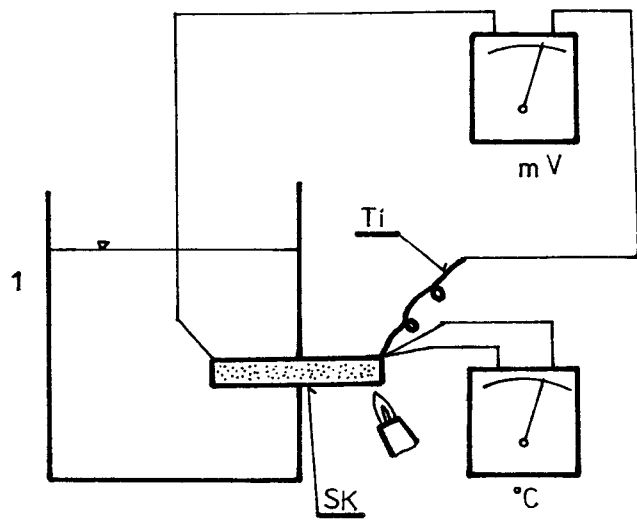
K břitové destičce byl, na dno malého otvoru vyhloubeného elektroerozivním způsobem, přivařen kondenzátorovou svářečkou konstantanový drát. Pro ochranu tohoto spoje před mechanickým poškozením byl celý otvor zalit epoxidovou pryskyřicí. Pro vyvedení konstantanového drátku od břitové destičky byla v podložné destičce vybroušena drážka o průřezu 2x2 mm. V nožovém držáku byla vyfrézována drážka o průřezu 5x3 mm pro odvedení konstantanového drátku do upínacího trnu. Provedené úpravy nože jsou patrné z výkresu 4-KOM-OM-482-00-01.

## 6.3 Cejchování.

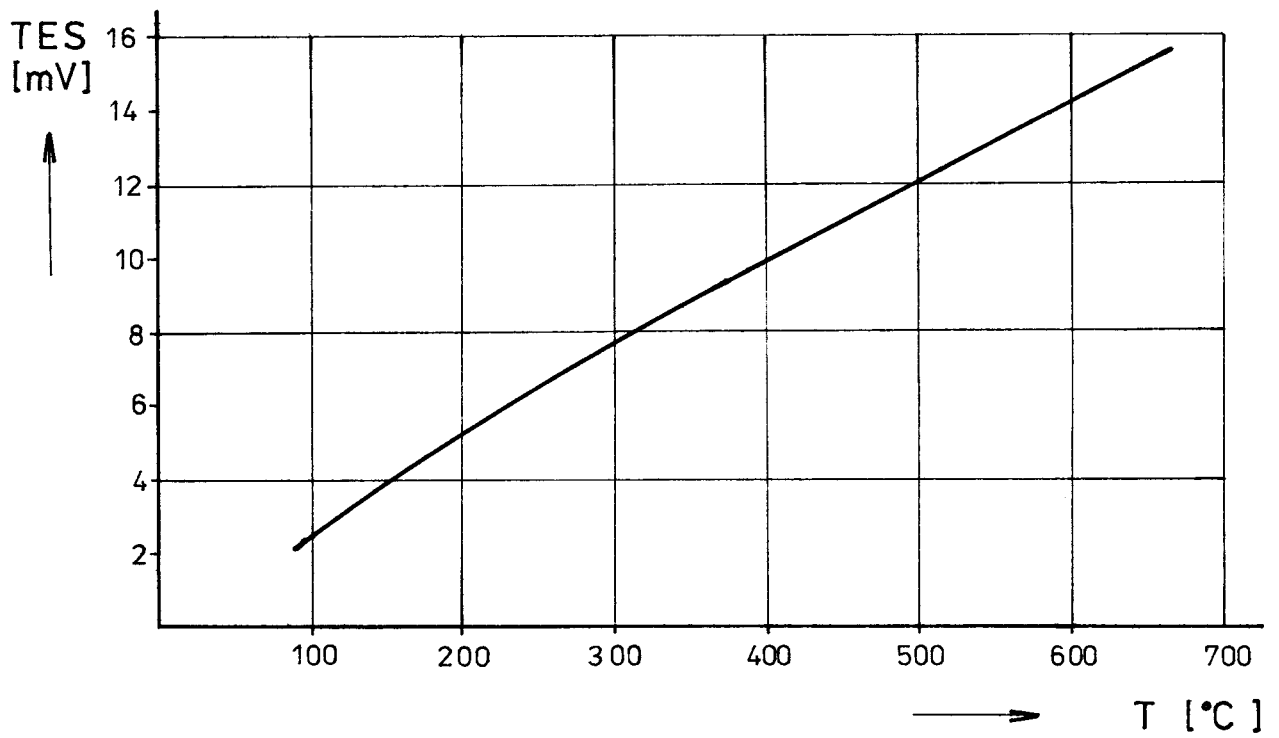
Nevýhodou metody přirozeného termočláčku je nutnost cejchovat každou použitou kombinací nástrojový materiál - obráběný materiál /viz. kap. 4.2.4/.

Cejchovní křivka přirozeného termočláčku slinutý karbid - titanová slitina byla převzata z literatury /12/. Na obr. 6.8 je schéma zapojení při cejchování přirozeného termočláčku.

Slinutý karbid byl v nádobce 1 připájen mosaznou pájkou. Kondenzátorovou svářečkou byla ke slinutému karbidu přivařena dlouhá tříska z titanové slitiny, tím byl vytvořen termočlánek slinutý karbid - slitina titanu. Na volný konec třísky byl stejným postupem přivařen měděný vodič, který odváděl termoelektrické napětí k milivoltmetru. Obdobně bylo provedeno vodivé spojení slinutého karbidu s milivoltmetrem prostřednictvím izolovaného měděného vo-



obr. 6.8



graf 6.1

diče, tím byl vytvořen studený spoj přirozeného termočlánku a pro zajištění jeho stálé teploty byl chlazen vodou. Pro snímání teploty v místě styku slinutý karbid - tříška titanové slitiny, byl co nejblíže tohoto místa styku přivařen kondenzátorovou svářečkou termoelektrický článek Ni - CrNi. Teplota v místě styku byla odečítána na milivoltmetru ocejkovaném ve stupních Celsia připojeném na termoelektrický článek Ni - CrNi.

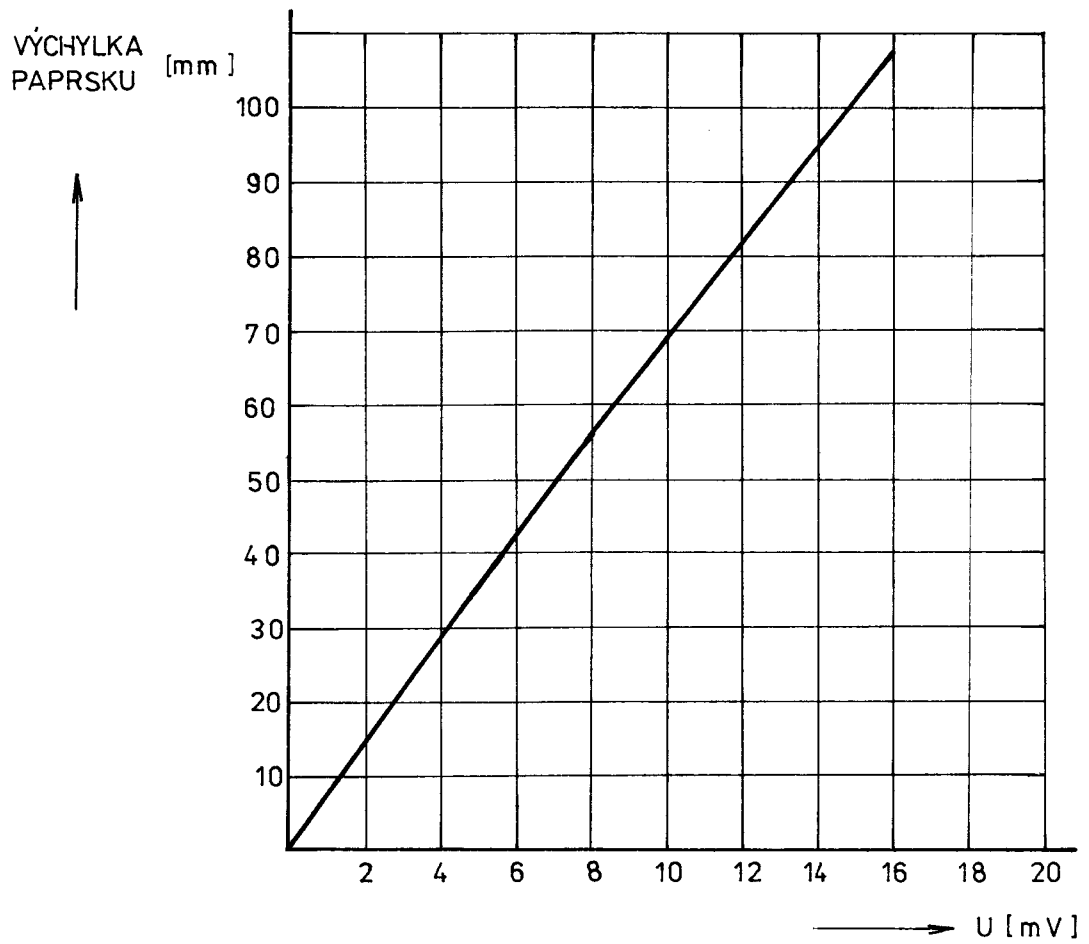
Cejchování bylo prováděno tak, že se místo styku termočlánků ohřívalo nepřímě, od spodu, kyslíko-acetylenovým plamenem na teplotu vyšší než byla předpokládaná měřená teplota. Nepřímý chřev byl volen proto, aby se rovnoměrně prohřálo místo spoje termočlánků a bylo dosaženo lokálně homogenního teplotního pole. Po ohřátí se tyčinka pomalu ochlazovala, tím byla dosažena požadovaná teplota, která byla odečítána, současně se také odečítalo napětí v milivoltech získané přirozeným termočlánkem. Z naměřených hodnot byla sestavena tabulka 6.1 a sestrojena cejkovnní křivka přirozeného termočlánku graf 6.1.

T [°C]	100	200	300	400	500	600
TES [mV]	2,4	5,2	7,6	9,8	12	14,1

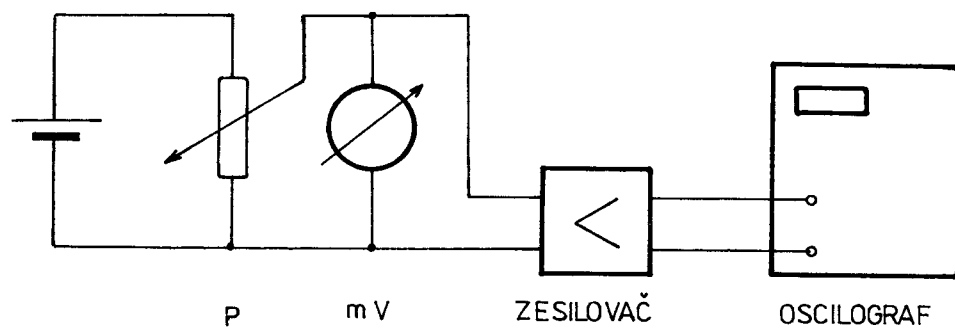
tab. 6.1

Dále bylo nutno provést cejkování oscilografu, tj. přiřadit výchylce paprsku oscilografu určité napětí. Na obr. 6.9 je zobrazeno schema zapojení při cejkování oscilografu.

Cejchování se provádělo tak, že se potencionetrem P zvolna zvyšovalo napětí, které se kontrolovalo připojeným milivoltmetrem. Napětí se zvyšovalo po 1 mV a ke každé nastavené hodnotě napětí se odečítal výchylka paprsku oscilografu v milimetrech. Takto by-



graf 6.2



obr. 6.9

la získána tabulka 6.2 z níž byl sestrojen graf 6.2 závislosti výchylky paprsku oscilografu na napětí.

U [mV]	1	2	3	4	5	6	7	8
výchylka paprsku [mm]	7	14	22	29	36	42	50	56

U [mV]	9	10	11	12	13	14	15
výchylka paprsku [mm]	63	69	75	82	88	95	101

tab. 6.2

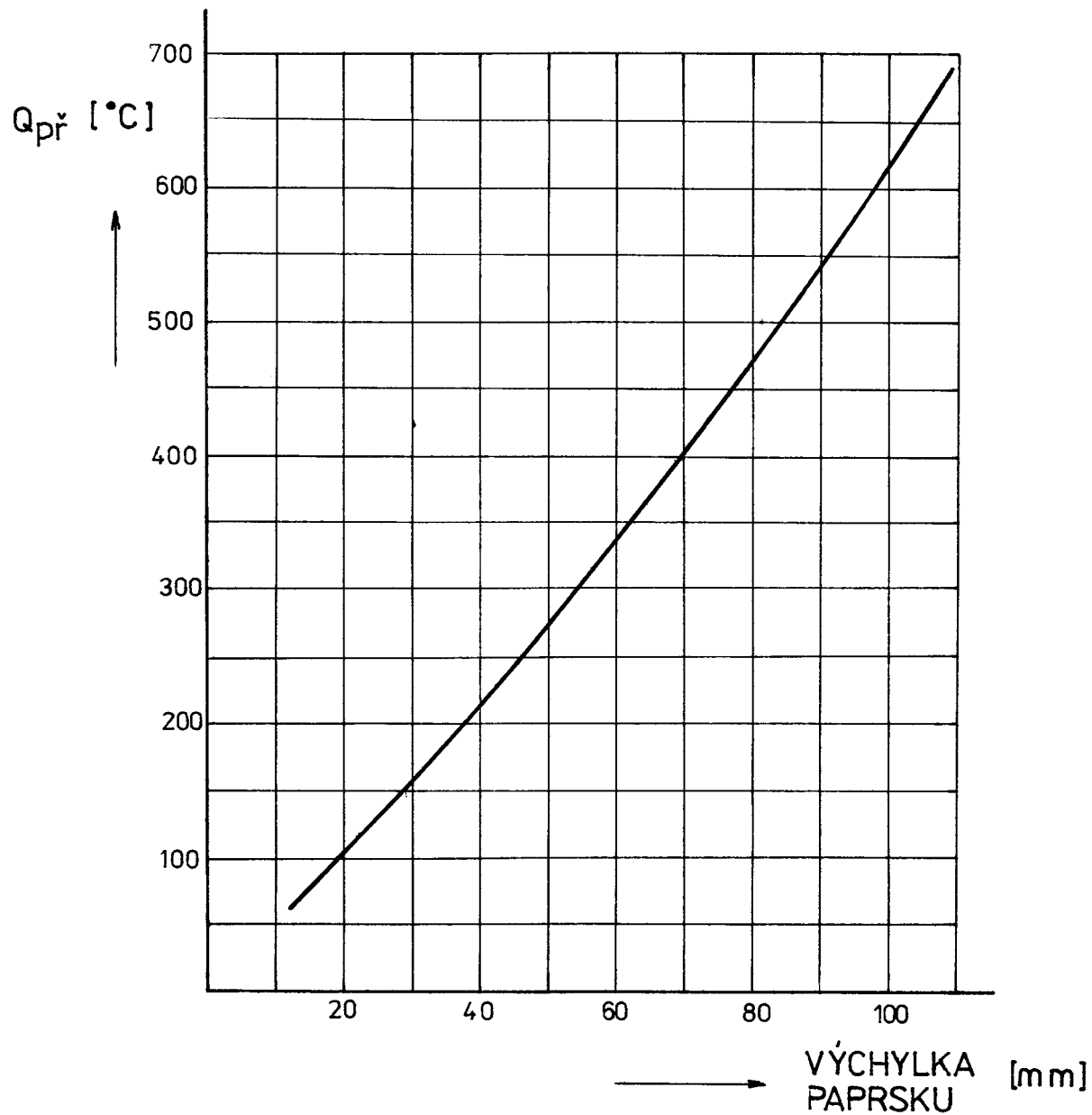
Z obou cejchovních křivek /graf 6.1 a graf 6.2/ byla získána tabulka 6.3 a podle ní byla sestrojena křivka závislosti teploty na výchylce paprsku oscilografu /graf 6.3/. Podle této křivky byly naměřené hodnoty napětí vyhodnocovány.

výchylka paprsku [mm]	20	30	40	50	60	70	80	90	100
T [°C]	110	160	215	275	335	405	470	540	630

tab. 6.3

#### 6.4 Metodika měření.

Před měřením bylo nutno na zesilovači nastavit takové zesílení, aby se na oscilografu zachytil celý rozsah hodnot teplot při měření. Rychlost záznamu oscilografu byla zvolena 0,5 a 1,5 cm/sec. Tyto rychlosti nám zaručily dostatečnou vzdálenost jednotlivých záznamů termoelektrického napětí. Po každém měření bylo nutno nechat nástroj i obrobek vychladnout na teplotu okolí.



graf 6.3

Naměřené hodnoty byly odečítány ze záznamu oscilografu a vyhodnoceny dle grafu 6.3.

V příloze I je uveden příklad záznamu měření a způsob odečítání výchylky paprsku oscilografu ze záznamu.

## 7. Výsledky měření.

Při měření jsme zjišťovali vliv řezných podmínek na teplotu řezání. Při návrhu řezných podmínek jsme vycházeli z hodnot doporučených literaturou /9/, /10/, /11/. Vzhledem k tomu, že jsme k měření použili dvounožovou frézovací hlavu, ve které byl upnut pouze jeden soustružnický nůž, volili jsme menší hloubky řezu, abychom snížili rázová napětí vznikající při vcházení nože do záběru, tím jsme břitovou destičku chránili pře poškozením.

Provedli jsme měření vlivu rychlosti, posuvu a hloubky řezu na teplotu řezání.

Při měření závislosti teploty řezání na řezné rychlosti jsme se pohybovali v rozmezí řezných rychlostí  $(21,78 - 122,4) \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ . Při měření jsme pracovali s konstantní hloubkou řezu  $h = 0,5 \text{ mm}$  a konstantním posuvem na jeden zub  $s_z = 0,16 \text{ mm} \cdot \text{zub}^{-1}$ .

Při měření vlivu velikosti posuvu na teplotu řezání jsme pracovali s konstantní řeznou rychlostí  $v = 0,72 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  a konstantní hloubkou řezu  $h = 0,5 \text{ mm}$ . Velikost posuvu jsme měnili v rozmezí  $s_z = (0,08 - 0,448) \text{ mm} \cdot \text{zub}^{-1}$ .

Závislost hloubky řezu na teplotu řezání jsme měřili při konstantní řezné rychlosti  $v = 0,72 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  a konstantním posuvem  $s_z = 0,16 \text{ mm} \cdot \text{zub}^{-1}$ . Hloubku řezu jsme měnili v rozmezí  $h = (0,05 - 1,5) \text{ mm}$ .

Pro všechna měření byly určeny matematické závislosti teploty řezání na příslušných řezných podmínkách. Matematické závislosti byly vypočteny dle vztahů uvedených v kap. 8.



### 7.1 Vliv řezné rychlosti na teplotu řezání.

V tab. 7.1 jsou uvedeny hodnoty naměřených teplot  $/Q_{př}/$ , z nichž byl sestrojen graf 7.1 a určena matematická závislost teploty řezání na řezné rychlosti.

$s_z = 0,16 [\text{mm} \cdot \text{zub}^{-1}]$ $h = 0,5 [\text{mm}]$		
$v [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$	dílky [mm]	$Q_{př} [^{\circ}\text{C}]$
0,363	53	280
0,518	61	345
0,72	70	405
1,03	80	470
1,44	90	540
2,04	104	650

tab. 7.1

Matematická závislost teploty řezání na řezné rychlosti je dána vztahem:

$$Q = 464,449 \cdot v^{0,477} \quad /7/$$

### 7.2 Vliv posuvu na teplotu řezání.

Velikost naměřených teplot řezání  $/Q_{př}/$  je uvedena v tab. 7.2. Z uvedených hodnot byl sestaven graf 7.2 závislosti teploty řezání na posuvu.

Matematická závislost teploty řezání na posuvu je dána vztahem:

$$Q = 634,954 \cdot s_z^{0,239} \quad /8/$$

$v = 0,72 \text{ [m.s}^{-1}\text{]}$ $h = 0,5 \text{ [mm]}$		
$s_z \text{ [mm.zub}^{-1}\text{]}$	dílky [mm]	$Q_{př} \text{ [}^\circ\text{C]}$
0,08	62	350
0,112	67	385
0,16	70	405
0,224	75	435
0,32	82	480
0,448	88	535

tab. 7.2

### 7.3 Vliv hloubky řezu na teplotu řezání.

V tab. 7.3 jsou uvedeny velikosti teplot řezání  $/Q_{př}/$ .  
 Z uvedených hodnot byl sestaven graf 7.3 a určena matematická závislost teploty řezání na hloubce řezu vztahem:

$$Q = 462,344 \cdot h^{0,116}$$

131

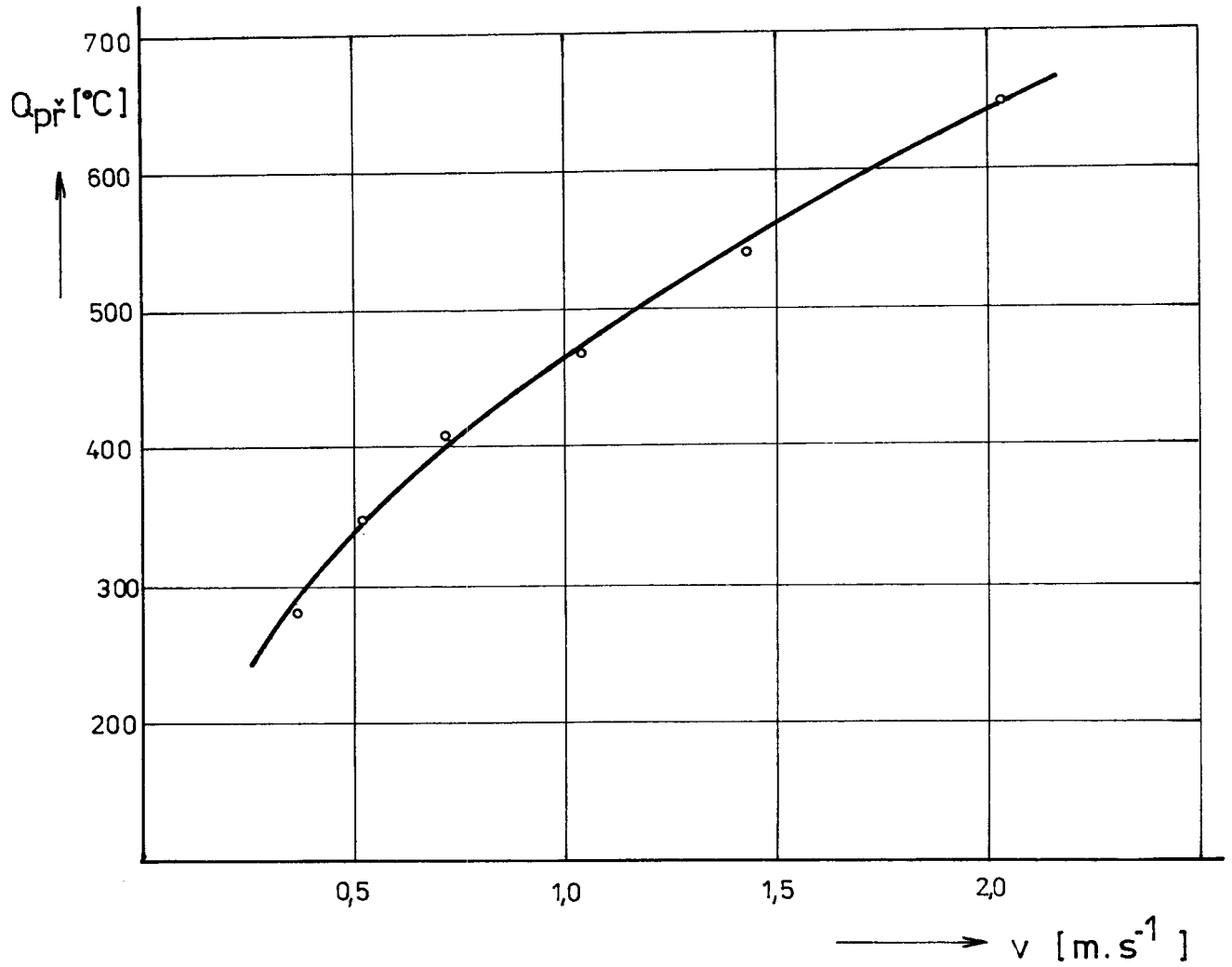
$v = 0,72 \text{ [m.s}^{-1}\text{]}$ $s_z = 0,16 \text{ [mm.zub}^{-1}\text{]}$		
$h \text{ [mm]}$	dílky [mm]	$Q_{př} \text{ [}^\circ\text{C]}$
0,05	58	325
0,15	64	360
0,25	70	405
0,5	74	430
0,75	77	450
1,00	78	455
1,25	82	480
1,50	84	484

tab.7.3

Vliv řezné rychlosti na teplotu řezání.

$$s_z = 0,16 \text{ [mm.zub}^{-1}\text{]}$$

$$h = 0,5 \text{ [mm]}$$

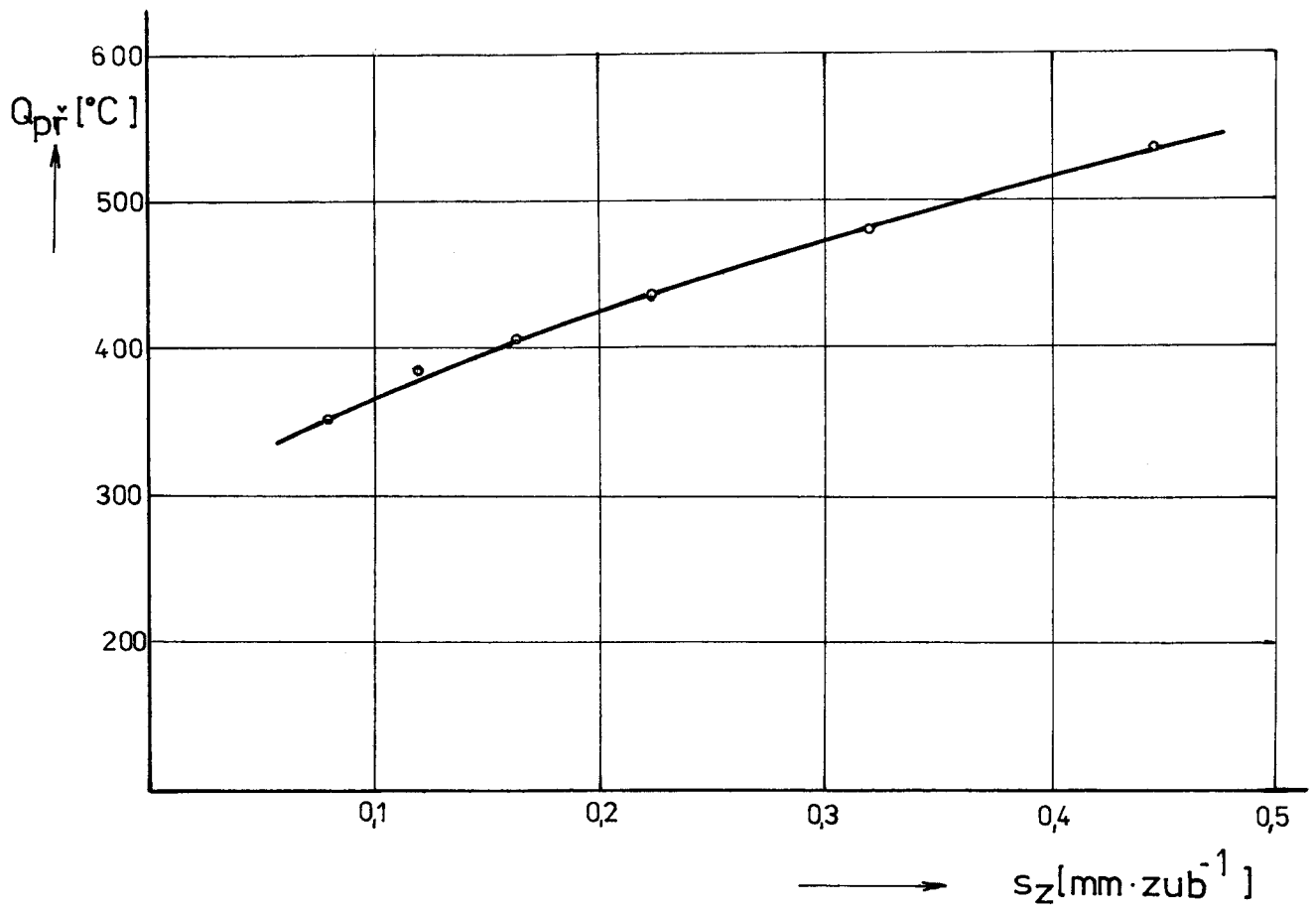


graf 7.1

Vliv posuvu na teplotu řezání.

$$v = 0,72 \text{ [m}\cdot\text{s}^{-1}\text{]}$$

$$h = 0,5 \text{ [mm]}$$

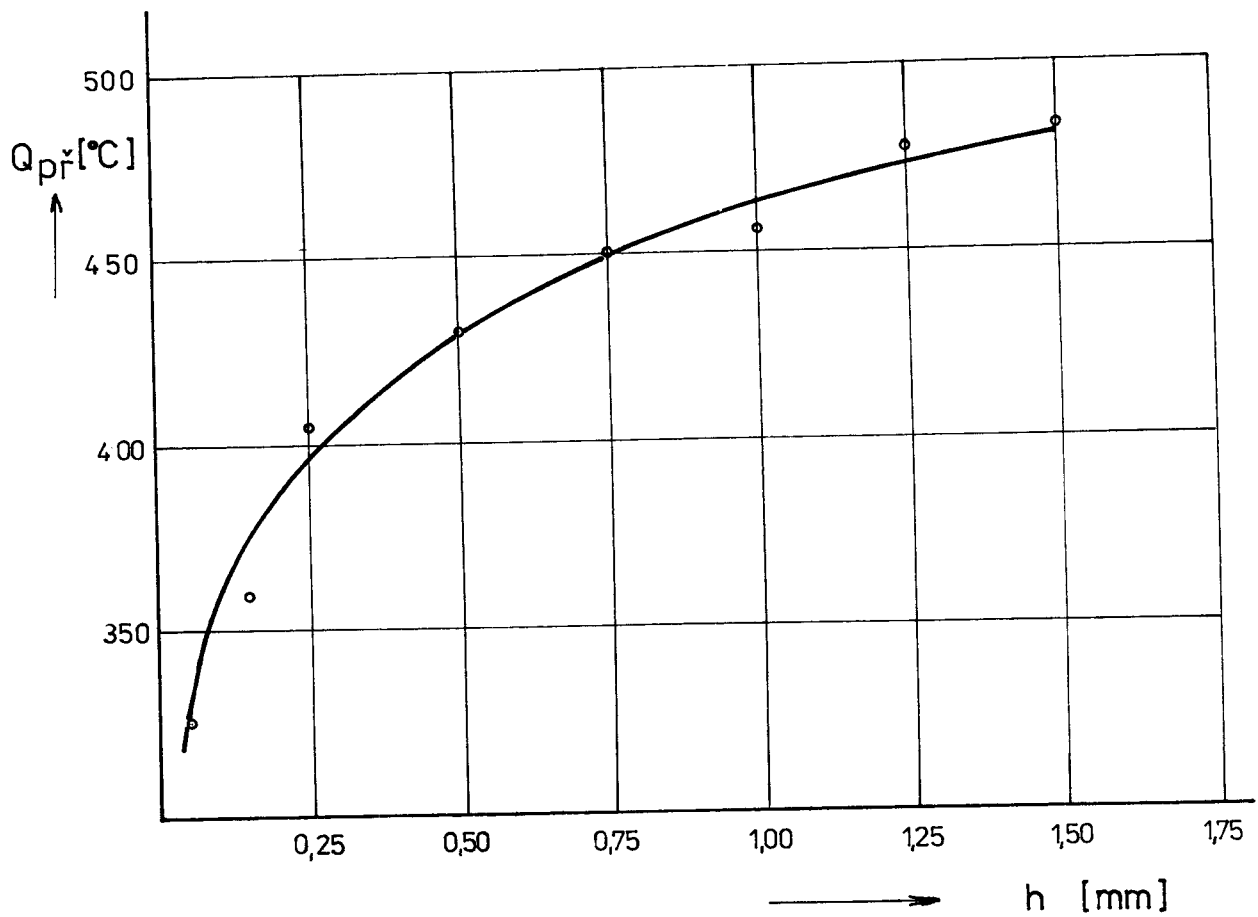


graf 7.2

Vliv hloubky řezu na teplotu řezání.

$$v = 0,72 \text{ [m.s}^{-1}\text{]}$$

$$s_z = 0,16 \text{ [mm.zub}^{-1}\text{]}$$



graf 7.3

## 8. Regresní analýza. /13/

O naměřených závislostech teploty řezání na řezných podmínkách předpokládáme, že je lze popsat rovnicemi ve tvaru /viz. kap. 3./:

$$y = d \cdot x^k, \quad /10/$$

kde  $y$  představuje teplotu řezání, která přísluší daným řezným podmínkám  $x$ . Konstanty  $d$ ,  $k$  jsou parametry jejichž odhad byl proveden pro každý soubor bodů  $x_i, y_i$ , tj. pro soubory naměřených bodů závislostí teploty řezání na řezné rychlosti, posuvu, a na hloubce řezu.

Použijeme-li k odhadu parametrů  $d$ ,  $k$  metodu nejmenších čtverců musíme rovnici /10/ upravit:

$$\ln y = \ln d + k \cdot \ln x, \quad /11/$$

$$y' = c + k' \cdot x', \quad /12/$$

$$y' = \ln y, \quad /13/$$

$$x' = \ln x, \quad /14/$$

$$c = \ln d. \quad /15/$$

Rovnice /12/ je rovnice obecné přímky, pro kterou lze napsat podmínku nejmenších čtverců ve tvaru:

$$S = \sum_{i=1}^n (y_i - c' - k' \cdot x_i)^2 = \min., \quad /16/$$

kde  $c'$ ,  $k'$  jsou odhady parametrů  $c$ ,  $k$ .

Odhady  $c'$ ,  $k'$  lze určit z rovnic:

$$\frac{\partial S}{\partial c'} = 0, \quad /17/$$

$$\frac{\partial S}{\partial k'} = 0. \quad /18/$$

Rovnice /17/, /18/ mají tedy tvar:

$$n \cdot c' + \left( \sum_{i=1}^n x_i' \right) \cdot k' = \sum_{i=1}^n y_i' , \quad /19/$$

$$\left( \sum_{i=1}^n x_i' \right) \cdot c' + \left( \sum_{i=1}^n x_i'^2 \right) \cdot k' = \sum_{i=1}^n x_i' \cdot y_i' . \quad /20/$$

Rovnice /19/, /20/ se nazývají normální rovnice. po jejich úpravě lze potom provést odhady parametrů  $c$  ,  $k$  :

$$k' = \frac{\sum_{i=1}^n x_i' \cdot y_i' - \frac{\left( \sum_{i=1}^n x_i' \right) \cdot \left( \sum_{i=1}^n y_i' \right)}{n}}{\sum_{i=1}^n x_i'^2 - \frac{\left( \sum_{i=1}^n x_i' \right)^2}{n}} , \quad /21/$$

$$c' = \frac{\sum_{i=1}^n y_i'}{n} - k' \cdot \frac{\sum_{i=1}^n x_i'}{n} . \quad /22/$$

Z rovnice /15/ :

$$d' = e^{c'} , \quad /23/$$

kde  $d'$  je odhad parametru  $d$ .

## 9. Vyhodnocení měření.

Výsledkem měření jsou grafické a matematické funkční závislosti teploty řezání na řezných podmínkách při čelním frézování titanové slitiny VT6.

Ze závislosti řezné rychlosti na teplotu řezání /graf 7.1/ je zřejmé, že s rostoucí řeznou rychlostí roste i teplota řezání. Růst teploty řezání je poměrně strmý s nejvyšší naměřenou teplotou  $Q_{př} = 650^{\circ}\text{C}$  při řezné rychlosti  $2,04 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Matematicky lze popsat vliv řezné rychlosti na teplotu řezání rovnicí:

$$Q = 464,449 \cdot v^{0,477}$$

Vliv velikosti posuvu na teplotu řezání je patrný z grafu 7.2. Se zvětšující se hodnotou posuvu vzrůstá i teplota řezání. Vzrůst teploty řezání je v celém rozmezí posuvů  $s_z = (0,08 - 0,448) \text{ mm}\cdot\text{zub}^{-1}$  téměř konstantní. Funkční závislost teploty řezání na velikosti posuvu je dána vztahem:

$$Q = 634,954 \cdot s_z^{0,239}$$

Průběh závislosti hloubky řezu  $h$  na teplotě řezání je patrný z grafu 7.3. S rostoucí hloubkou řezu teplota řezání stoupá. Vzestup teploty řezání je zpočátku velmi strmý, ale při větších hodnotách hloubky řezu je nárůst teploty velmi malý. Matematicky lze popsat závislost teploty řezání na hloubce řezu rovnicí:

$$Q = 462,344 \cdot h^{0,116}$$

Naměřené grafické závislosti vlivu řezných podmínek na teplotu řezání odpovídají svým průběhem průběhům uvedených v odborné literatuře viz. kap. 3.

Měřením teplot při čelním frézování slitin titanu se ve své diplomové práci zabýval též i J. Rokos, který však k měření teploty použil umělý termočlánek se dvěma cizími kovy Ni - CrNi vestavěný do



břitové destičky pod rovinu čela. Porovnáme-li výsledky naměřené J. Rokosem s výsledky naměřenými v této práci, při stejných rezných podmínkách a s nožem se stejnou geometrií, jsou námi získané hodnoty teplot řezání značně vyšší. Rozdíly v těchto teplotách jsou až 300°C i vyšší. Je zřejmé, že hodnoty teplot naměřené metodou termočlánu se dvěma cizími kovy a metodou použitou v této práci, tj. metodou přirozeného termočlánu, jsou velice odlišné a závisí na použité metodě.

Nevýhodou metody umělého termočlánu se dvěma cizími kovy je to, že nám umožňuje získat pouze teplotu v místě umístění termočlánu, a že na velikost naměřené teploty má značný vliv vzdálenost umístění termočlánu od místa řezu, navíc je v blízkosti čela nástroje značný teplotní gradient /viz. kap. 4.2.3/. Z uvedených důvodů je zřejmé, že nelze výsledky naměřené metodou umělého termočlánu se dvěma cizími kovy považovat za dostatečně správné, protože nám nedávají přehled o skutečných teplotách přímo v místě styku nástroje s obrobkem. Z výhod metody přirozeného termočlánu uvedených v kap. 4.2.4 a z naměřených výsledků můžeme předpokládat, že výsledky získané v této práci metodou přirozeného termočlánu se více přibližují skutečným teplotám v místě styku nástroje s obráběným materiálem. Musíme mít ovšem na zřeteli, že i námi použitá metoda může být zatížena velkou chybou. Zvláště problematické a obtížné je zejména vlastní cejchování přirozeného termočlánu slinutý karbid - slitina titanu. Velikosti naměřených teplot ovlivnily i hodnoty rezných podmínek. Při jejich návrhu jsme vycházeli z doporučených rezných podmínek z nichž jsme vybírali menší hodnoty zvláště u hloubky řezu.

## 10. Závěr.

Úkolem této práce bylo navrhnout vhodnou metodu měření teploty při čelním frézování titanových slitin a určit vliv řezných podmínek na teplotu.

Z měření vlivu řezných podmínek na teplotu řezání vyplývá, že největší vliv na teplotu řezání má řezná rychlost, jak je patrné z naměřených hodnot grafu 7.1 i z matematické závislosti teploty řezání na řezné rychlosti /7/.

Menší vliv na teplotu řezání má posuv, což vyplývá z naměřených hodnot, grafu 7.2 a z matematické závislosti /8/.

Nejmenší vliv na teplotu řezání má hloubka řezu, jak je zřejmé z naměřených hodnot, grafu 7.3 a z matematické závislosti /9/.

Seznam použité literatury:

- /1/ Příklad, Z. - Musílková, R.: Teorie obrábění, Praha,  
SNTL - Alfa 1982
- /2/ Bukač, K. - Gabriel, V.: Teploty při frézování, Výzkumná  
práce VŠST Liberec 1975
- /3/ Vrabec, M.: Teplotní jevy při čelním frézování, Kandidátská  
disertační práce, Praha, ČVUT 1985
- /4/ Zehnula, K.: Snímače neelektrických veličin, Praha, SNTL 1977
- /5/ Jenčík, J. - Kuhn, L.: Technické měření ve strojnictví, Praha,  
SNTL 1982
- /6/ Turičín, A. M.: Elektrické měření neelektrických veličin,  
Praha, SNTL 1958
- /7/ Pluhař, J. - Korrita, J.: Strojírenské materiály, Praha,  
SNTL 1982
- /8/ Draský, J. a kol.: Teploty při obrábění, Výzkumná práce  
VŠST Liberec 1976
- /9/ Mikovec, M.: Obrábění těžkoobrobitelných materiálů, Praha,  
SNTL 1963
- /10/ Sedláček, V.: Titan a jeho slitiny, Praha, SNTL 1963
- /11/ Štětina, K.: Konstrukční a technologické vlastnosti technicky  
čistého titanu, Praha, SVJMT 1963
- /12/ Kvapil, R.: Vliv řezných podmínek na teploty a síly při obrá-  
bění slitin titanu, Výzkumná zpráva VŠST Liberec  
1986
- /13/ Rektorys, K.: Přehled užití matematiky, Praha, SNTL 1973
- /14/ Rokos, J.: Vliv řezných podmínek a geometrie nástroje na tep-  
loty při frézování titanových slitin, Diplomové  
práce VŠST Liberec 1986

V závěru bych chtěl poděkovat s. ing. K. Bukačovi za cenné rady, které mně poskytl v průběhu zpracování diplomové práce a pracovníkům dílen KOM za významnou pomoc při realizaci vlastních měření.

Příklad záznamu měření.

$$v = 1,44 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$s_z = 0,16 \text{ mm} \cdot \text{zub}^{-1}$$

$$h = 0,5 \text{ mm}$$



Příloha I