



evropský  
sociální  
fond v ČR



EVROPSKÁ UNIE



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,  
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY



OP Vzdělávání  
pro konkurenceschopnost

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

**Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava**



# **Experimentální metody v obrábění**

**učební text**

**Robert Čep  
Jana Petru**

**Ostrava 2011**

Recenze: doc. Ing. Michal Hatala, PhD.

Fakulta výrobných technológií so sídlom v Prešove, TU v Košiciach, SK

Název: Experimentální metody v obrábění  
Autoři: doc. Ing. Robert Čep, Ph.D., Ing. et Ing. Mgr. Jana Petřů, Ph.D.  
Vydání: první, 2011  
Počet stran: 143  
Náklad: 50  
Vydavatel a tisk: VŠB – TUO, Fakulta strojní, Katedra obrábění a montáže

Studijní materiály pro studijní obor Strojírenství Fakulty strojní  
Jazyková korektura: nebyla provedena.

**Určeno pro projekt:**

Operační program Vzdělávání pro konkurenceschopnost

Název: Zvyšování kompetencí studentů technických oborů prostřednictvím modulární inovace studijních programů

Číslo: CZ.1.07/2.2.00/15.0459

Realizace: VŠB – Technická univerzita Ostrava

Projekt je spolufinancován z prostředků ESF a státního rozpočtu ČR

© Robert Čep, Jana Petřů

© VŠB – Technická univerzita Ostrava

ISBN 978 – 80 – 248 – 2533 – 5

## Obsah:

<b>1. METALOGRAFICKÉ STUDIUM UKONČENÝCH ZMĚN V ZÓNĚ ŘEZU A VYHODNOCENÍ KOŘENE TŘÍSKY</b>	<b>1</b>
1.1 Přímé pozorování změn v zóně řezání	2
1.2 Studium ukončených změn v zóně řezání	5
<b>2. TVORBA A TVAROVÁNÍ TŘÍSKY</b>	<b>15</b>
2.1 Fyzikální základy procesu řezání	15
2.2 Plastická deformace při ortogonálním řezání	16
2.3 Oblasti deformace	17
2.4 Technologické charakteristiky třísek (koeficient pěchování)	18
2.5 Tříska a objemový součinitel pěchování	19
<b>3. ZDROJE TEPLA A TEPELNÁ BILANCE</b>	<b>24</b>
3.1 Tepelná bilance	24
3.2 Teplota řezání	26
3.3 Měření tepla při obrábění	27
<b>4. MĚŘENÍ TEPLoty PŘI OBRÁBĚNÍ</b>	<b>32</b>
4.1 Měření teploty pomocí termočlánků	33
4.1.1 Umělý termočlánek	34
4.1.2 Poloumělý termočlánek	35
4.1.3 Přirozený termočlánek	36
4.1.4 Termoduo	37
4.1.5 Čejchování termočlánků	39
4.2 Měření teploty pomocí termistorů	41
4.3 Měření teploty pomocí pyrometrů	42
4.3.1 Úhrnné pyrometry	43
4.3.2 Fotoelektrické pyrometry	44
4.3.3 Fotografické měření	45
4.4 Teplotní indikátory	46
<b>5. MĚŘENÍ OPOTŘEBENÍ NÁSTROJŮ</b>	<b>50</b>
5.1 Klasifikace typů opotřebení	51
5.2 Přímé metody měření opotřebení	58
5.3 Nepřímé metody měření opotřebení	63
<b>6. OBROBITELNOST MATERIÁLŮ</b>	<b>68</b>
6.1 Značení obrobitelnosti materiálů	69
6.2 Dlouhodobé zkoušky obrobitelnosti	72
<b>7. KRÁTKODOBÉ ZKOUŠKY OBROBITELNOSTI</b>	<b>76</b>
7.1 Přímé metody zjišťování obrobitelnosti	77
7.2 Nepřímé metody zjišťování obrobitelnosti	78
<b>8. MĚŘENÍ SLOŽEK SÍLY ŘEZÁNÍ</b>	<b>84</b>
8.1 Nepřímé měření sil a momentů	88
8.2 Čejchování dynamometrů	89
<b>9. PŘÍMÉ MĚŘENÍ SIL A MOMENTŮ</b>	<b>92</b>
<b>10. KMITÁNÍ PŘI OBRÁBĚNÍ</b>	<b>101</b>
10.1 Rozdělení kmitů při obrábění	102
10.2 Teorie kmitavého pohybu	104
<b>11. TUHOST TECHNOLOGICKÉ SOUSTAVY A PŘESNOST A KVALITA OBROBENÉHO POVRCHU</b>	<b>113</b>
11.1 Druhy odchylek a příčiny jejich vzniku	114
<b>12. ZBYTKOVÁ POVRCHOVÁ NAPĚTÍ PO OBRÁBĚNÍ</b>	<b>125</b>
12.1 Destruktivní metody měření zbytkových napětí	126
12.2 Polodestruktivní metody měření zbytkových napětí	127
12.3 Nedestruktivní metody měření zbytkových napětí	128
<b>13. VLIV PARAMETRŮ NA TEORETICKOU A SKUTEČNOU DRSNOST POVRCHU</b>	<b>133</b>
13.1 Mikrogeometrie obrobeného povrchu	133
13.2 Výpočet teoretické drsnosti povrchu	134

# 1. METALOGRAFICKÉ STUDIUM UKONČENÝCH ZMĚN V ZÓNĚ ŘEZU A VYHODNOCENÍ KOŘENE TŘÍSKY

Po úspěšném a aktivním absolvování této KAPITOLY

## Budete umět:

- Budete umět popsat plastickou deformaci v řezné zóně.
- Definovat experimentální stanovování mikrozměn.
- Získáte přehled o procesech během obrábění.
- Definovat ukončené změny v zóně řezání.

**Budete umět**

## Budete schopni:

- Budete schopni popsat oblasti plastické deformace.
- Popsat princip přímého pozorování.
- Popsat analýzu procesu plastické deformace.

**Budete schopni**



**Čas ke studiu: 3 hodiny**



## Výklad

Plastická deformace v zóně řezání je složitý proces, který ovlivňuje velké množství činitelů. Je to především obráběný materiál a faktory důležité z hlediska řezného procesu:

- jeho chemické složení,
- mechanické a fyzikální vlastnosti,
- způsob výroby (tepelné případně mechanické zpracování),
- struktura.

Je potřebné si uvědomit, že vyšší uvedené aspekty obráběného materiálu jsou navzájem závislé a nemožné je chápat odděleně. Mimo to se tyto vlastnosti můžou v podmínkách plastické deformace v zóně tvoření třísky výrazně měnit (například v důsledku vysoké teploty, rychlosti deformace apod.). Řezný proces je charakteristický vysokou intenzitou plastické deformace, intenzivním třením v kontaktu nástroje a třísky jako i nástroje a obrobené plochy [13].

Součástí řezného procesu jsou i průvodní jevy, jako je například zpevnění, fázové a chemické přeměny, abrazivní procesy, difúze apod. Vzhledem na složitost procesů, které probíhají v zóně tvoření třísky a především na velký počet faktorů, které ho ovlivňují, není možné při teoretickém studiu využít zákony fyziky pevné fáze teorie plasticity, mechaniky pevné fáze a termomechaniky. Teoretické studium je potřebné konfrontovat s experimentálním stavem.

Experimentální studium spolu s teoretickým umožňuje komplexní posouzení a zevšeobecnění, které je důležité například z hlediska intenzifikace, anebo optimalizace řezného procesu. Jak ukazuje [13] experimentální studium plastických deformací při obrábění je možné vykonávat dvojím způsobem:

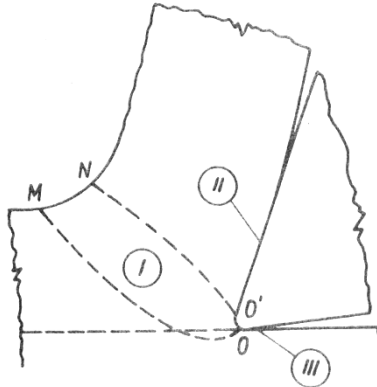
- kontinuálně během samotného řezání (přímé pozorování probíhajících změn),
- po ukončení řezného procesu (studium ukončených změn).



Jak všeobecně víme, při obrábění plastických kovů a slitin dochází k plastické deformaci ve třech oblastech (*obr. 1.1*):

1. oblast primární plastické deformace (OMNO') – oblast I,
2. v kontaktu čela nástroje a třísky – oblast II,
3. v kontaktu hřbetové plochy nástroje a obrobené plochy – oblast III.

Současně je možné pozorovat i další oblasti s deformovanou strukturou (textura třísky, tvorba nárůstku) a pozorovat další průvodní jevy plastických deformací.



*Obr. 1.1 Oblasti plastické deformace v zóně řezání [13]*

Průběh a velikost deformací závisí na stavu a velikosti napjatosti. K posouzení charakteru a intenzity deformace v oblastech I, II a III a dalších průvodních jevů je možné sledovat následovné charakteristiky [13]:

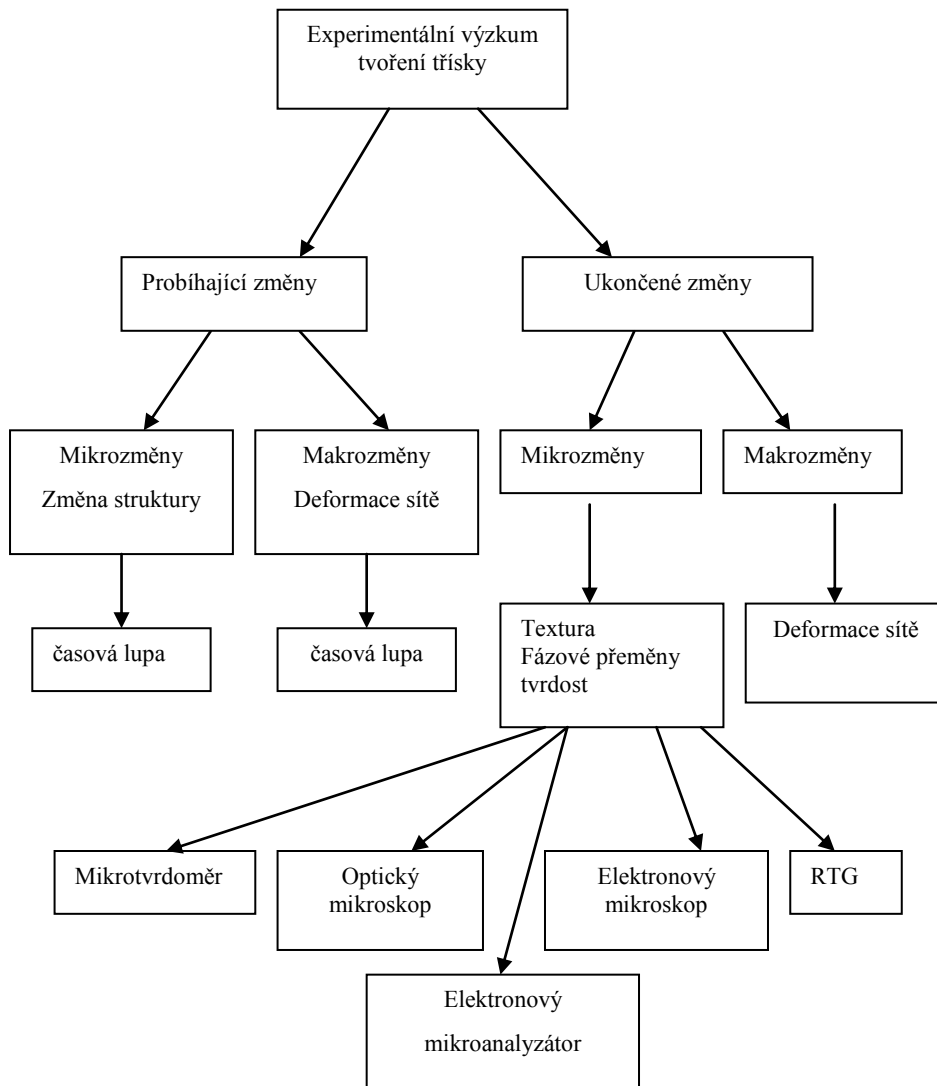
1. polohu, tvar a velikost oblasti primárních deformací (OMNO', úhel primární plastické deformace apod.),
2. velikost deformace v oblasti I – charakterizovanou poměrným skluzem,
3. hloubku a tvar deformované vrstvy v oblasti II – velikost sekundární deformace, tvar a stavba nárůstku,
4. intenzita a hloubka deformace v oblasti III,
5. stav napjatosti obrobené plochy a pracovní části nástroje,
6. velikost součinitele stlačení třísky, objemového součinitele tvaru třísky.

Rozdělení pro experimentální stanovování charakteristik - z bodu 1 až 4 je na *obr. 1.2*.

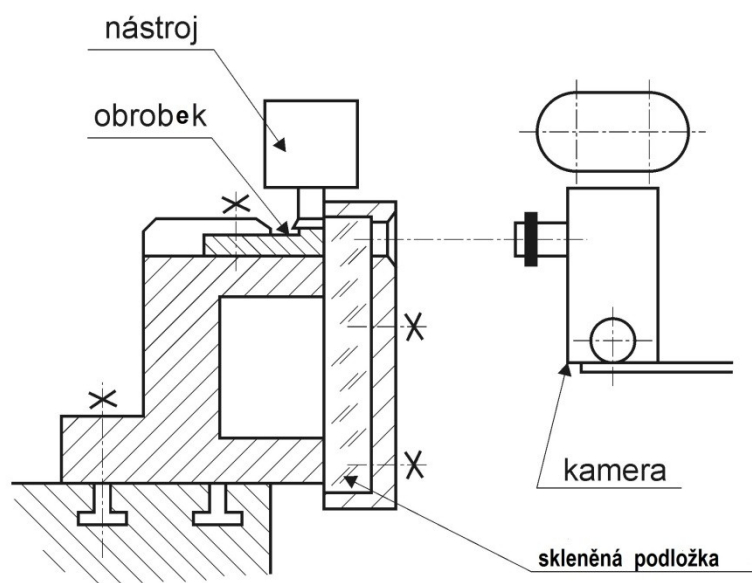
## **1.1. Přímé pozorování změn v zóně řezání**

Experimentální metody pro přímé pozorování mikrozměn v deformovaném objemu jsou založené na rychlostním fotografickém snímání jednotlivých stádií deformace na boční ploše obráběných vzorků.

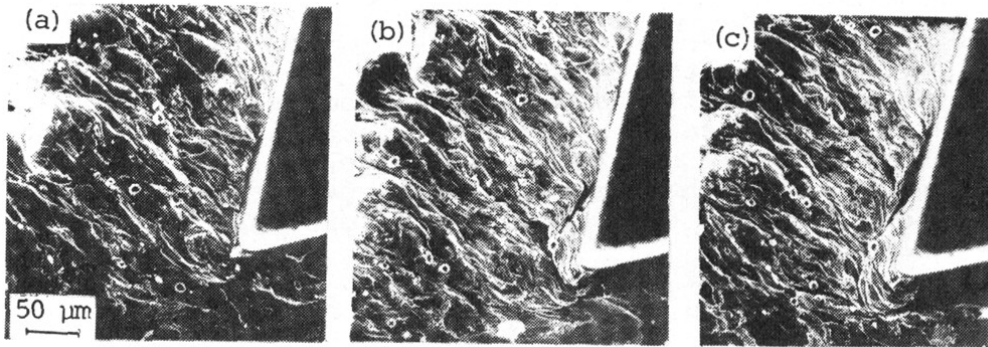
Použitá kamera pro rychlostní snímání se nazývá „časová lupa“. Podstata je ve fotografování sledovaného videa vysokou snímkovou frekvencí a promítnutí s frekvencí podstatně nižší. Běžně je možné dosáhnout 4 000 obrázků za sekundu a s přídatným zařízením až 18 000 obrázků za sekundu. Studium mikrozměn vyžaduje pečlivě připravenou boční - snímací plochu obrobku, tj. vyleštěnou a naleptanou. K zamezení příčného tečení materiálu a zaručení stálé vzdálenosti filmované plochy od objektivu, bývá k boční ploše přiložená tvrdá skleněná deska – *obr. 1.3* [13].



Obr. 1.2 Experimentální stanovování charakteristik z bodu 1 až 4 [13]

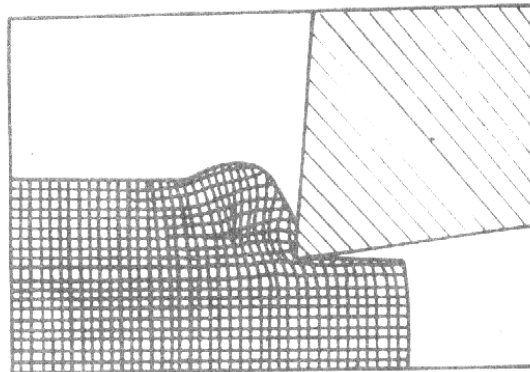


Obr. 1.3 Zamezení bočního tečení [13]

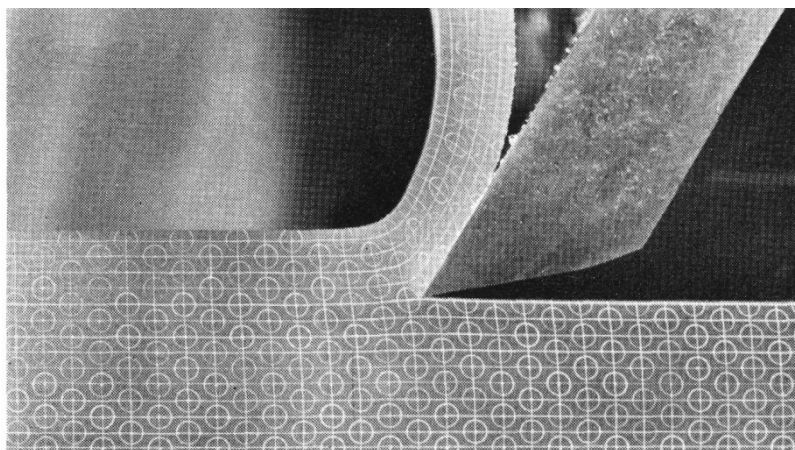


Obr. 1.4 Série fotografií tvorby nárůstku při obrábění oceli nástrojem z rychlořezné oceli,  $a_p = 0,09\text{mm}$ , úhel čela  $20^\circ$  SEM [11]

Přímé pozorování makrozměn není natolik obtížné v porovnání se změnami mikrozměn. V tomto případě, jde opět o rychlostní filmování boční plochy časovou lupou nebo přímé pozorování pod mikroskopem za relativně nízkých řezných rychlostí.



Obr. 1.5 Schematické znázornění deformace mřížky [13]



Obr. 1.6 Deformace kombinované mřížky při obrábění mědi, SEM  $\gamma_o = 31^\circ$  [11]

Boční plocha má mřížku různé kresby (čtvercový, obdélníkový nebo kruhový rastr). Deformace elementů takovéto mřížky umožňuje nejen vymezení jednotlivých deformačních oblastí, ale také stanovit charakter a intenzitu deformace ve směru zvolených souřadnic (obr. 1.6).

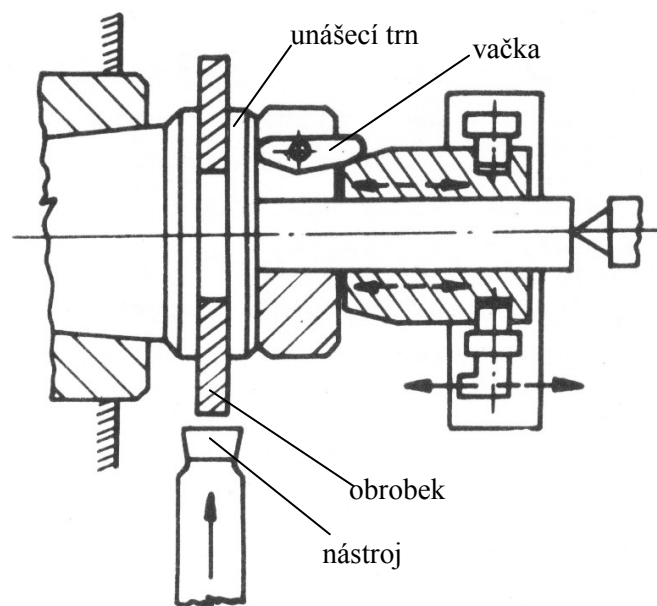
Při použití časové lupy má tento způsob experimentálního studia velký praktický význam, především při sledování elementární třísky a při tvorbě a rozpadu nárůstku. Schematické znázornění deformace mřížky je uvedené na obr. 1. 5.

Nevýhodou přímého pozorování plastické deformace v zóně řezání je skutečnost, že použité řezné rychlosti jsou v porovnání s prakticky aplikovatelnými velmi nízké. I přesto, že například faktor teploty je možné eliminovat ohřevem vzorků, jsou tu některé faktory řezného procesu, jako například tření (koeficient tření), rychlost deformace a podobně, které mohou být a obvykle jsou v reálných podmínkách výrazně odlišné od experimentálních. Analyzovat zónu řezání za reálných podmínek umožňuje studium ukončených změn.

## 1.2. Studium ukončených změn v zóně řezání

Studium ukončených změn v podstatě představuje analýzu kořenů třísek po ukončení řezání. Kořen třísky je tříska spojená s obráběným materiálem za daných podmínek, která se získá okamžitým přerušením řezu. K tomuto účelu slouží přerušovače řezu. Rozdělujeme je na 2 základní skupiny:

1. přerušovače s okamžitým zastavením obrobku,
2. přerušovače s rychlým vyvedením nástroje ze záběru.



Obr. 1.7 Schematické znázornění přerušovače na straně obrobku [13]

Přerušení řezu na straně obrobku je schematicky znázorněné na obr. 1.7. Obrobek je upnutý na trn a hlavní řezný pohyb se přenáší unášecí. V okamžiku přerušení řezu se obrobek uvolní a volně přetáčí na trnu. Takovýto způsob přerušení se používá především při vrtání a řezání závitů nebo při nízkých řezných rychlostech.

Byly vyvinuté techniky, které umožňují velmi rychlé přerušení řezu odsunutím obrobku ze zóny řezání založené na aplikaci směrovaného výbuchu. Jednou z těchto technik je i zařízení zaměřené především na analýzu zóny řezání při frézování a broušení [25]. Fotografie tohoto zařízení je na obr. 1.8. Toto zařízení umožňuje velmi rychlé přerušení řezání bez nežádoucí deformační zóny řezání při přerušení kontaktu nástroje a obrobku. Je založené na dvou soustavách střižných kolíků 10 a 11 a pístu 13 uloženého prostřednictvím prstence 9 a rázového kroužku 7. Píst 13 vykonává axiální pohyb při přestřihnutí střižných kolíků 10 a 11. K pístu je připevněná pohyblivá část obrobku 5. Tato část je pohyblivá jen v té fázi experimentu, kdy dochází k přerušení kontaktu nástroje a obrobku. Část 5 se pohybuje v axiálním směru spolu s pístem 13. V prvotní fázi experimentu je samozřejmě nepohyblivá. Pohyblivá část obrobku 5 je uložena v nepohyblivé 4, která vymezuje pohyblivou část v radiálním směru.

Celé zařízení potom pracuje následovně. Ve vhodném okamžiku, kdy řezný proces probíhá právě na pohyblivé části 5, je prostřednictvím elektrického impulsu zapálena nálož ve spalovací komoře přes rozbušku 18. Tak jako vzrůstá tlak v komůrce, zvětšují se i síly působící na pomocné střižné kolíky 10

až dojde k jejich přestřihnutí. Tím dochází k uvolnění rázového kroužku 7 a jeho axiálnímu pohybu směrem dolů. Vzdávající tlak kroužku 7 způsobí přestřihnutí podložky 8, čímž se inicializuje působení na píst 13. Ten potom způsobí přestřihnutí hlavních střížných kolíků 11 (vyrobené ze šedé litiny) a velmi rychlý pohyb pístu 13 a s ním spojené pohyblivé části obrobku 5. Axiální pohyb pístu 13 je zastavený v komoře naplněné plastickou hmotou (například plastelínou). Takto je část 5 ochráněná vůči mechanickému poškození.

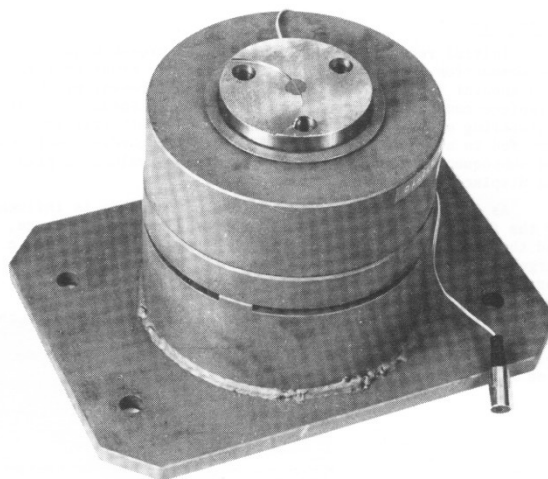
Důležitým rysem tohoto zařízení je skutečnost, že tlak má jistý čas na tom, aby narůstal během pohybu kroužku 7 po přestřihnutí pomocných střížných kolíků. Tím je dosaženo, že okamžitý tlak působící na hlavní střížné kolíky je velmi vysoký, což je příznivý aspekt z hlediska rychlého přerušení řezu.

Jak ukazuje tab. 1.1, charakteristiky procesu jako je tlak na začátku pohybu pístu a volný pohyb v axiálním směru kroužku 7 je ovlivněný počtem pomocných kolíků, hmotností nálože jako i délkou tohoto pohybu. Větší počet pomocných kolíků vede samozřejmě k zvětšení tlaku při začátku pohybu pístu. Mnohem menší vliv už má hmotnost nálože. Na základě vykonaných experimentů se doporučuje aplikovat nálož hmotnosti 400 mg, 2 mm volný pohyb kroužku 7 a 6 pomocných střížných kolíků.

Při broušení je přerušení kontaktu nástroje a obrobku mnohem náročnější než v případě jiných řezných procesů vzhledem na vysoké řezné rychlosti při broušení. V zásadě by čas na přerušení kontaktu nástroje a obrobku měl být kratší než je jedna desetina času kontaktu brusného zrna a obrobku. Při hloubce řezu 0,01 mm to představuje 50  $\mu$ s. Jak ukazuje tab. 1.1, vyšší prezentované zařízení umožňuje překonání této vzdálenosti za méně než je 50  $\mu$ s.

Tab. 1.1 Vliv počtu pomocných kolíků, pohybu rázového kroužku a hmotnosti nálože na tlak v komoře a pohyb obrobku [25]

Počet pomocných střížných kolíků	Volný pohyb rázového kroužku (mm)	Nálož (mg)	Tlak (MPa)		Čas ( $\mu$ s) na posunutí	
			Na začátek pohybu	Max.	0,01 mm	0,05 mm
3	1	400	27	58	41	68
3	2	400	35	65	4	11
3	2	500	52	108	3	12
6	2	400	51	58	4	9



Obr. 1.8 Fotografie zařízení na přerušení řezu prostřednictvím výbuchu při broušení a frézování [5]

Další metoda umožňuje přerušení řezu na straně obrobku a využívá princip exploze [22]. Umožňuje analyzovat proces plastické deformace při vysokých řezných rychlostech v rozsahu od 1000 do 2000 m.min<sup>-1</sup>. Nástroj 1 je vrhnutý na obrobek 2 vysokou rychlostí, která je vyvozovaná tlakem plynu v komoře 3 během exploze nálože. Tak jak roste tlak v komoře 3, zvyšuje se i zatížení hlavního

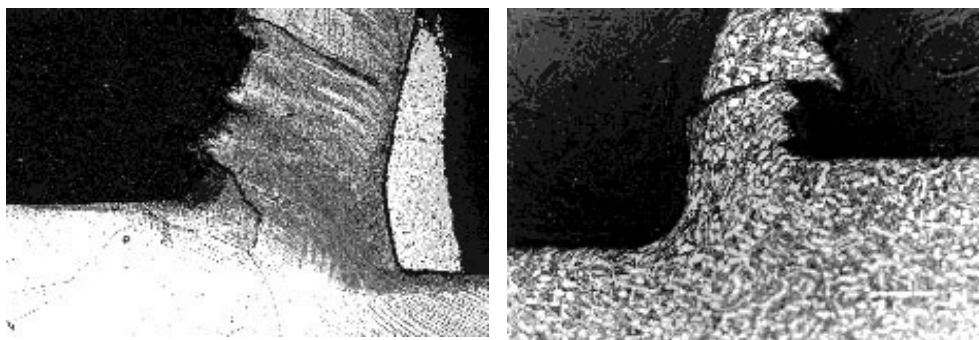
střížného kolíku 4. Při jeho přestřihnutí je realizovaný hlavní řezný pohyb. Taktéž obrobek je umístěn na střížných kolících 5. Při jejich přestřihnutí dojde k přerušení kontaktu nástroje a obrobku, čím se zamezí nežádoucí sekundární deformaci v zóně řezání. Tato deformace by vznikla postupným zpomalováním pohybu nástroje při jeho vnikání do obrobku vlivem řezného odporu. Zachycený kořen třísky by už nebylo možné vztahovat k řezné rychlosti udělené nástroji při jeho pohybu v axiálním směru.

Metoda získávání kořenů třísek pomocí vnitřních pnutí je možné aplikovat i na frézování. Pomocí získaných kořenů třísek při frézování je možné zjistit:

- velikost úhlu primární plastické  $\phi_1$ , který je ovlivňovaný obráběným materiálem, řeznými parametry, geometrií řezného nástroje, řezným materiálem apod.,
- formování třísky,
- tvoření nárůstku a zabrzděné vrstvy,
- formování obrobené plochy,
- mikrotvrdot v jednotlivých oblastech kořene třísky.

Metoda vnitřních pnutí byla aplikovaná na studiu zóny řezání při frézování titanových a niklových slitin jak ukazuje obr. 1.9. Zóna řezání a vznik třísky při frézování niklových slitin je doprovázena vysokou intenzitou plastické deformace. Stlačení třísek dosahuje hodnoty průměrně vyšší než 2,5. Tříska ze zóny odchází plynule v tvaru šroubovice. Ze strany nástroje se na tříse pravidelně objevuje zabrzděná vrstva.

Z metalografických výbrusů kořenů třísek je možné určit úhel primární plastické deformace  $\phi_1$ , který pro niklové slitiny nabývá hodnot 16 až 25° v závislosti od řezných podmínek. Při titanových slitinách je  $\phi_1 = 30$  až 40° v závislosti od řezných podmínek. Pro frézování niklových slitin je charakteristické intenzivní zpevňování obrobeného povrchu, jakož i intenzivní zpevňování obráběného materiálu v zóně tvoření třísky. Při titanových slitinách je zpevnění při frézování poměrně malé, což verifikuje poznatek o jejich malém sklonu ke zpevňování vyplývajícímu z odlišného procesu plastické deformace v zóně řezání. Sledovat mikrotvrdot v jednotlivých oblastech zóny řezání je možné na základě získaných kořenů třísek při frézování niklové a titanové slitiny.



*a – niklová slitina EI 698 VD,*

*$v_c = 20 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$  [20],*

*leptané 3% Marble, zvětšení 100x*

*b – titanová slitina VT 3-1,*

*$v_c = 40 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$*

*leptané 10% HF [16], zvětšení 100x*

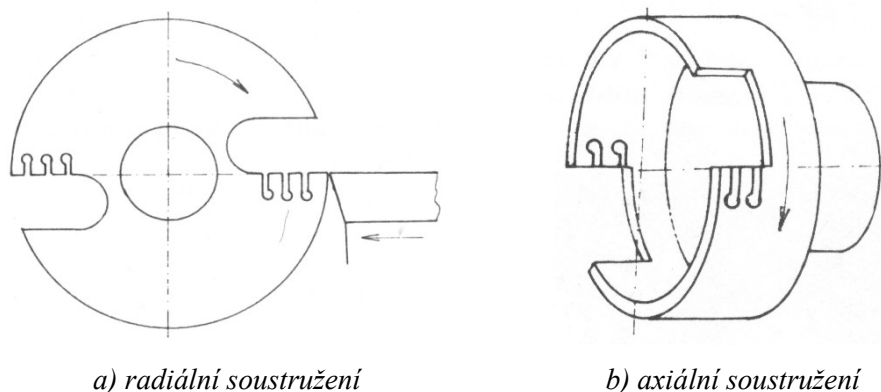
*Obr. 1.9 Kořeny třísek při frézování titanové a niklové slitiny,  $f_z = 0,102 \text{ mm}$ , světelná mikroskopie*

Metodu založenou na vytrhnutí určité části obráběného materiálu vlivem vnitřních napětí od řezné síly je možné aplikovat i na soustružení. Vhodná úprava na získání kořenů třísek při volném řezu je na obr. 1.10.

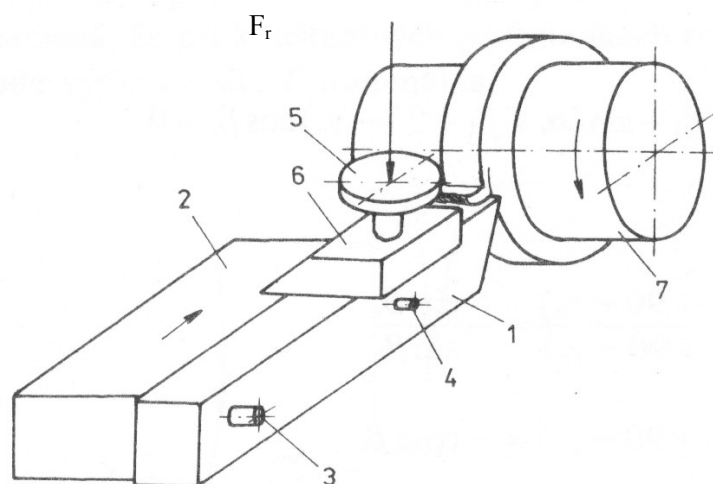
Typickým přerušovačem s rychlým vyvedením nástroje je přípravek na obr. 1.11. Na tělese 2 je okolo otočného čepu 3 uložený nástroj 1, přičemž jeho poloha je fixovaná kolíkem z křehkého materiálu 4 (šedé litiny). Nárazovou silou, vyvozanou například kladivem nebo závažím uloženým na příslušném vedení, se přestříhne fixační kolík 4 a nástroji je udělený rotační pohyb okolo čepu 3, přičemž řezná hrana nástroje dosáhne řeznou rychlost a oddělí se od třísky.

Prostřednictvím tohoto přípravku je možné realizovat analýzy procesu plastické deformace a jejich aspektů především při soustružení. Pomocí získaných kořenů třísek je možné analyzovat tytéž

charakteristické projevy v zóně řezání jako při frézování, když je na přerušení použita metoda vnitřních pnutí v obrobku. Stejně je možné kořeny třísek analyzovat prostřednictvím světelné nebo elektronové mikroskopie.



Obr. 1.10 Tvar obrobku na získávání kořenů třísek při soustružení metodou vnitřních pnutí [4]



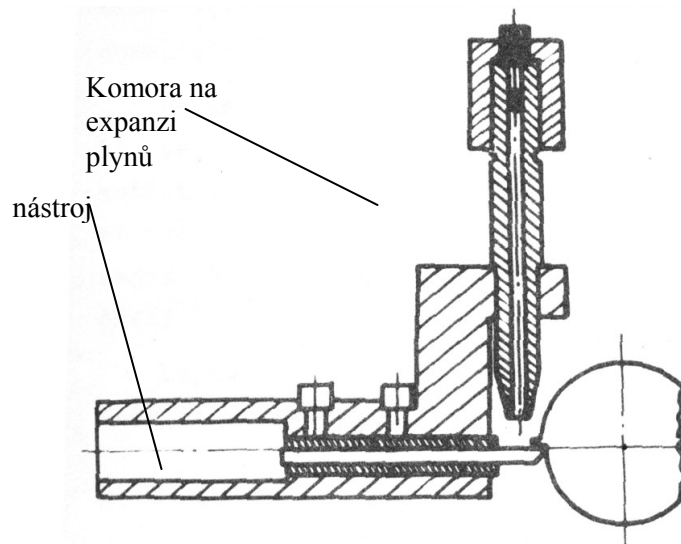
Obr. 1.11 Přípravek na přerušení řezání při soustružení [4],  
1 – nástroj, 2 – držák nástroje, 3 – otočný čep, 4 – střížný kolík, 5 – úderník, 6 – držák úderníku, 7 – obrobek

Rázovou sílu je možné vyvodit:

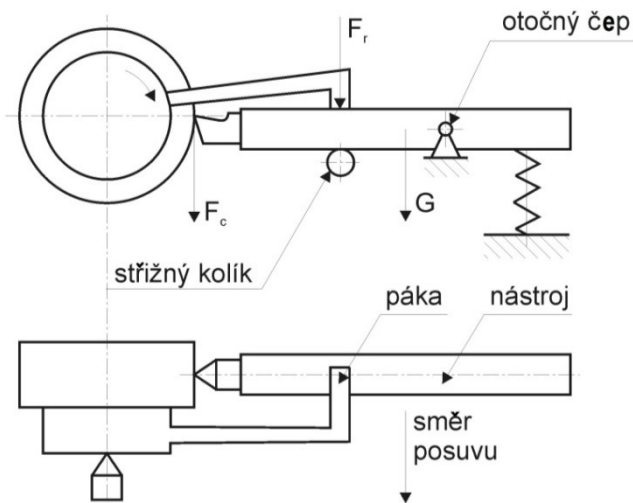
- volným pádem závaží z určité výšky, přičemž ke zvýšení účinnosti je možné použít energii předepjaté pružiny nebo stlačeného média,
- využitím expanzních plynů při explozi prachové nálože jak to ukazuje obr. 1.12 (v tomto případě dochází k destrukci nástroje v místě vetknutí),
- využitím energie řezného pohybu jak to ukazuje obr. 1.13 (na řezný pohyb je fixovaná páka - tato z řezu odsune nástroj, který vykonává vedlejší řezný pohyb, tedy posuv  $f$ )

Při nedestruktivních přerušování se fixační kolík vysouvá mechanicky pomocí páky. Tento typ je vhodný však jen pro malé řezné rychlosti a malé průřezy třísek. Dalším způsobem nedestruktivního přerušování je vysunutí fixačního kolíku prostřednictvím expanzních plynů. Expanze plynů působí na mezikruhovou plochu pístu spojeného s fixačním čepem a vystřelí ho proti olovené vložce. U tohoto přerušovače je současně vykonané elektrické řízení okamžiku přerušování a jeho synchronizace s relativní polohou nástroje vůči obrobku. Schematické znázornění je na obr. 1.14. Tento způsob synchronizovaného přerušovaného řezu je používán především při obrábění přerušovaným řezem.

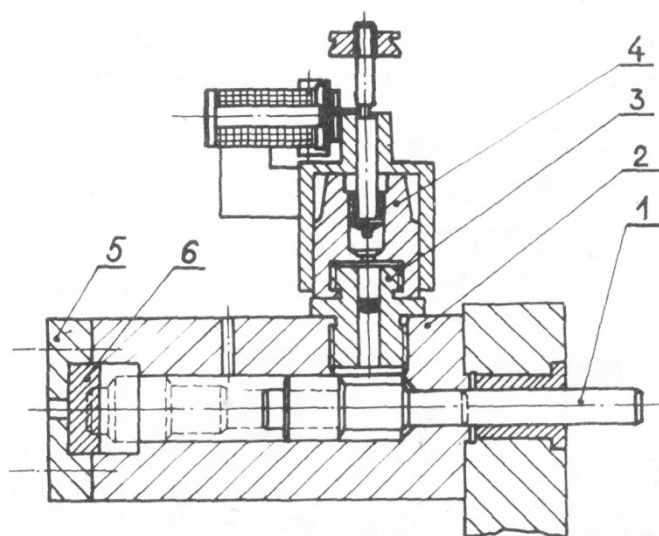




Obr. 1.12 Využití expanze plynů při explozi prachové nálože na přerušení řezu [13]



Obr. 1.13 Využití energie řezného pohybu na přerušení řezu [13]



Obr. 1.14 Vysunutí fixačního kolíku prostřednictvím expanze plynů [13]  
 1 – fixační čep, 2 – hrubostěnný válec, 3 – nábojová komora, 4 – uzávěr,  
 5 – víko válce, 6 – tlumící podložka



Kořeny třísek získané při přerušení řezu je potřebné náležitě připravit na metalografické pozorování. V první řadě je potřebné je vyřezat z obrobku bez toho, aby došlo k jejich tepelnému ovlivnění. Následně se kořeny třísek zalejí do bakelitu nebo jiné vhodné hmoty. Typický příklad přípravy kořene třísky pro pozorování pod metalografickým mikroskopem je následný:

1. zarovnání vzorků na brusce –  $\text{Al}_2\text{O}_3$  kotouč zrnitosti přibližně 60,
2. předbroušení na hrubo brusným papírem zrnitosti 160 až 200,
3. broušení na metalografických brusných papírech ve směrech kolmých na sebe až po odstranění rýh po předcházejícím broušení,
4. leštění pastou nebo roztokem,
5. leptání roztokem kyseliny v závislosti od materiálu kořene třísky.

Při klasické černobílé metalografii dochází při leptání k tomu, že na povrchu se vytvoří mikrorelief, který má odlišné zobrazení fází a mezifázových rozhraní v odrazeném světle. Jestliže leptání není dostatečně účinné, anebo nežádoucí, může se na zlepšení kontrastu použít některá z optických metod. Jejich bližší popis uvádí [19]. Sem patří:

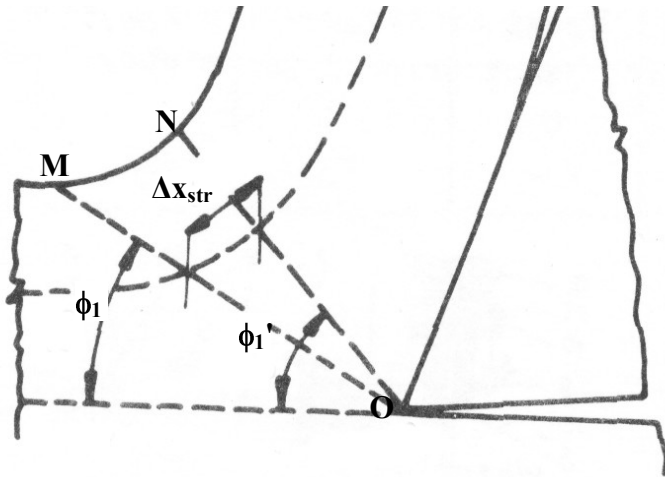
- šikmé osvětlení a tmavé pole,
- polarizované světlo,
- fázový kontrast,
- interferometrie.

Kromě černobílého obrazu je možné využít i barevnou metalografii jako ji detailně popisuje [19]. Nejde o fotografování konvenčních připravených vzorků na barevný film. Barevná metalografie je metalografická metoda, při které se uplatní barva fází jako faktor, který rozšiřuje informace o struktuře. Barevná metalografie je založená na interferenci světla v důsledku rozdělení dopadajícího světla na složky odrazené na rozhraní vzduch – vrstva a na rozhraní – vrstva kov. Interferenční jev závisí od vlnové délky světla ve vzduchu, tloušťky filmu a indexu lomu. Fáze naleptaná do různé hloubky bude mít potom i rozdílnou hloubku filmu, co v konečném důsledku vede k jejich barevnému rozlišení. Barevnou metalografii využila ve svojí práci Kasajová [9] při soustružení tvárných litin. Příklad barevné metalografie podle Kasajové je na přední straně obálky ( $v_c = 70 \text{ m.min}^{-1}$ , zvětšení 200x, feritická tvárná litina).

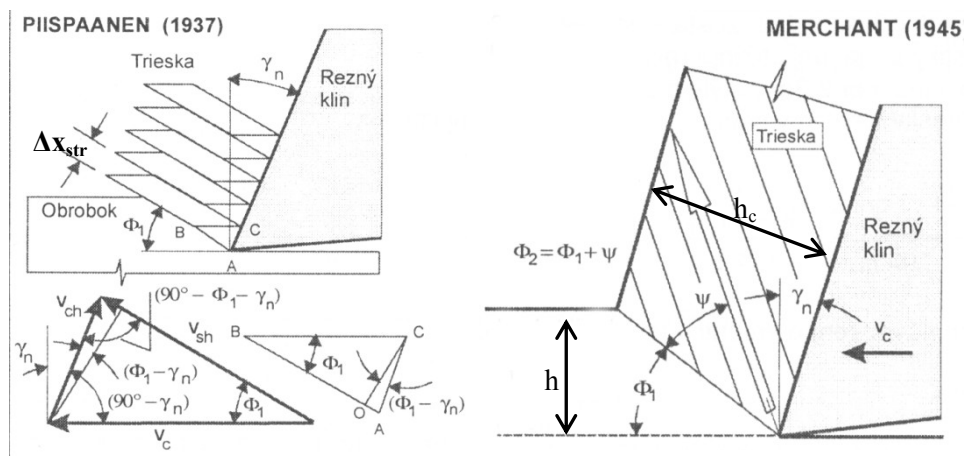
Pro metalografické studium kořenů třísek se obvykle používá zvětšení 100 až 200x, někdy i více. Na kořenech třísek je možné určit následné aspekty [13]:

1. velikost a tvar oblasti primární plastické deformace – I (poloha a tvar hranic OM a ON, úhel primární plastické deformace  $\varphi_1$  a  $\varphi_1'$ , obr. 1.15),
2. šířku deformační oblasti I –  $\Delta x_{str}$  pro určení deformační rychlosti, obr. 1.15,
3. kinetické charakteristiky pohybů elementů při transformaci,
4. velikost a tvar oblasti sekundární plastické deformace II (úhel sekundární plastické deformace  $\varphi_2$ ).

V některých případech není možné určit všechny charakteristiky v zóně řezání, vzhledem na skutečnost, že charakter plastické deformace se mění s takovými vlivy jako je obráběný materiál, geometrie nástroje, řezné podmínky apod. V souvislosti s tím existují i různé modely tvoření třísky, které například nevymezují oblast primární plastické deformace, ale jen hranici definovanou úhlem  $\varphi_1$ , která odděluje nedeformovaný kov od deformovaného. Není vždy možné určit například úhel sekundární plastické deformace nebo oblast primární plastické deformace může mít výrazně odlišný tvar od oblasti, která je zobrazená na obr. 1.15. Při hodnocení a analýze kořenů třísek je proto potřebné zohlednit specifický charakter procesů a zohlednit je při následovné analýze. Příklad kořene třísky se zobrazením některých charakteristik je na obr. 1.17.



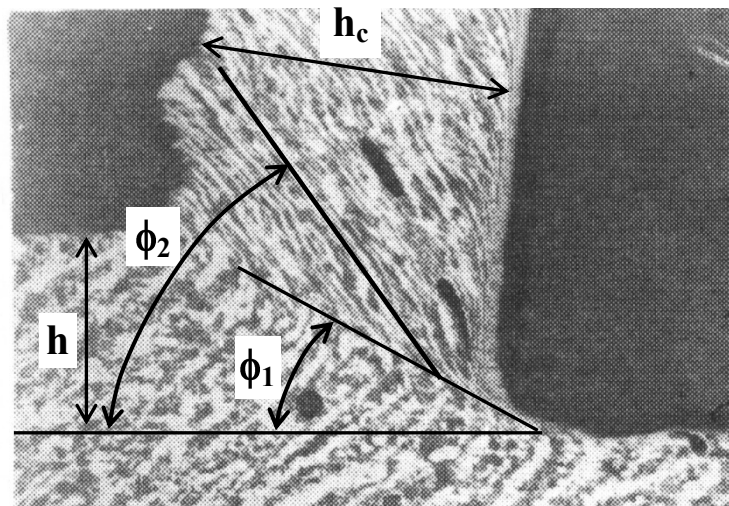
Obr. 1.15 Schematické znázornění některých parametrů v zóně řezání [13]



Interpretace kinematických poměrů v tříске [18]

Úhel primární a sekundární plastické deformace [15]

Obr. 1.16 Plynulá tříska a její modelové vyjádření geometrickými charakteristikami [2]



Obr. 1.17 Kořen třísky při obrábění uhlíkové feriticko – perlitické struktury [5]

Na základě kořenu třísky, jako je například na obr. 1.16 a 1.17 je možné určit následovné geometrické a kinematické charakteristiky [2]:

$$\text{Koeficient stlačení třísky } K \quad K = \frac{h_c}{h} = \frac{\cos(\Phi - \gamma_1)}{\sin \Phi} \quad (1.1)$$

$$\text{Úhel hranice primární plastické deformace } \varphi_1 \text{ (}^\circ\text{)} \quad \text{tg} \Phi = \frac{\cos \gamma_1}{K - \sin \gamma_1} \quad (1.2)$$

$$\text{Úhel textury } \varphi_2 \text{ (}^\circ\text{)} \quad \Phi_2 = \Phi_1 - \rho \quad (1.3)$$

$$\text{Doplňkový úhel } \psi \text{ (}^\circ\text{)} \quad \cot g \Psi = \cot g \Phi + g(\Phi - \gamma_1) \quad (1.4)$$

$$\text{Rychlost odvodu třísky } v_{ch} \text{ (m.min}^{-1}\text{)} \quad v_{ch} = v_c \frac{\sin \Phi}{\cos(\Phi - \gamma_1)} \quad (1.5)$$

$$\text{Deformace třísky } \gamma_{sh} \quad \gamma_{sh} = \frac{\cos \gamma_1}{\cos(\Phi - \gamma_1) \cdot \sin \Phi} \quad (1.6)$$

$$\text{Střížná rychlost } v_{sh} \text{ (m.min}^{-1}\text{)} \quad v_{sh} = v_c \frac{\cos \gamma_1}{\cos(\Phi - \gamma_1)} \quad (1.7)$$

$$\text{Rychlost deformace } \dot{\gamma}_{sh} \text{ (s}^{-1}\text{)} \quad \dot{\gamma}_{sh} = v_c \frac{\cos \gamma_1}{\cos(\Phi - \gamma_1) \cdot \Delta_{str}} \quad (1.8)$$

Jak ukazují výše uvedené vztahy, kořenu třísek umožňují určit některé veličiny přímo jejich odčítáním z fotografie jako je například  $\varphi_1$ ,  $\varphi_2$ ,  $K$  (prostřednictvím měření velikosti  $h$  a  $h_c$ ). Další veličiny jsou obvykle odvozené na základě rovnic 1.1 až 1.8. Detailnější souhrn dalších možností pro určení veličin výše uvedených jako i dalších charakteristik je uvedený v [2].

Zachycené kořeny třísek je možno analyzovat prostřednictvím elektronové mikroskopie například i z hlediska tvorby a šíření trhlin. Na základě takových fotografií je možné analyzovat:

- hustotu, tvorbu, šíření, tvar a rozměry mikrotrhlin pro různé typy třísek a obráběné materiály,
- hustotu, tvorbu, šíření, tvar a rozměry mikrotrhlin v různých místech v zóně řezání,
- vliv řezných podmínek, geometrie nástroje jako i dalších aspektů na hustotu, tvorbu, šíření, tvar a rozměry mikrotrhlin
- posuzovat vliv inkluzí, fází apod. na formování mikrotrhlin při obrábění ocelí a slitin v porovnání například s obráběním čistých kovů.

Taková analýza [3] poukazuje na skutečnost, že nestabilita řezného procesu ovlivňuje i vznik a šíření mikrotrhlin v zóně řezání. Poukazuje na to, že při malých řezných rychlostech je hustota a rozměry mikrotrhlin menší v porovnání s vyššími řeznými rychlostmi. Mikrotrhliny se tvoří při všech typech stříhaných třísek. Hustota mikrotrhlin bývá obvykle nejvyšší v oblasti blízko řezné hrany nástroje.



## Shrnutí kapitoly

V této kapitole jsme se dozvěděli o analýze kořenů třísek, přerušovačích řezu, principu exploze, a metalografické pozorování. Dále o rychlostním fotografickém snímání, časová lupě, mikrozměnách a makrozměnách.



## Kontrolní otázky

1. Co jsou nejdůležitější faktory z hlediska řezného procesu?
2. Jaké jsou průvodní jevy během řezného procesu?
3. Ve kterých oblastech dochází k plastické deformaci?
4. V čem spočívá metoda přímého pozorování mikrozměn?
5. Jak musíme upravit snímací plochu obrobku pro studium mikrozměn?
6. Jaké jsou dvě základní skupiny přerušovačů řezu?
7. Co je možné zjistit z metalografických výbrusů kořenů třísek?
8. Z čeho lze vyvodit rázovou sílu?
9. Na jakém principu je založená barevná metalografie?



## Další zdroje

1. BAYOUMI, A.E. – XIE, J.Q.: *Some metallurgical aspects of chip formation in cutting Ti-6Al-4V alloy*, Material Science and Engineering A190, 1995, p. 173-180
2. BEŇO, J.: *Teória rezania kovov*, Viena Košice 1999
3. BROWN, R.H. – LUONG, H.S.: *Some new observations of the deformation zone in orthogonal cutting of a mild steel*, CIRP 1/1974 p.7 – 9
4. BUDA, J. - BÉKÉS, J.: *Teoretické základy obrábání kovov*, ALFA Brat. 1977
5. BUDA, J. - SOUČEK, J. - VASILKO, K.: *Teória obrábání*, ALFA Bratislava, 1983
6. CZÁN, A. – NOVÁK, S.: *Identifikácia technologických charakteristík pri vrtaní titánovej zliatiny VT 9*, Materiálové inžinierstvo 18/6, str. 33-39
7. GENTE, A. - HOFFMESISTEK, W.: *Chip Formation in Machining Ti6Al4V at Extremely High Cutting Speeds*, CIRP 1/2001, p.49 – 52
8. GRZESIK, W.: *The role of coating in controlling the cutting process when turning with coated indexable inserts*, Materials Processing Technology 79/1998, p. 133-143
9. KASAJOVÁ, M.: *Štúdium obrábatelnosti vysokoakostných grafitických liatin odlievaných s využitím keramických filtrov*, DDP, Sjf, ŽU Žilina, 1996
10. KANJI, U. - IWATA, K.: *Chip formation mechanism in single crystal cutting of brass*, CIRP 1/1980, p. 41
11. KAZUAKI, I. - KANJI, U.: *The significance of dynamic crack behaviour in chip formation*, CIRP 1/1976, p.65
12. KOMANDURI, R. - CHANDRASEKARAN, N. - RAFFKONADURI, L.M. CHANDRASEKARAN, R.: *Orientation effects in nanometric cutting of single crystal materials: an MD simulation approach*, CIRP 1/1999, p.67 – 70
13. MÁDL, J. - SCHUBERT, V.: *Experimentální metody a optimalizace v teorii obrábění*. Praha : ČVUT Praha, 1985
14. MAKINO, R. - KISHI, K. - HOSHI, K. - OKUSHIMA, K.: *The mechanism of the formation of built-up edge in cutting of 60Cu-40Zn brass*, CIRP 1/1975, p. 47 – 50
15. MERCHANT, M.E.: *Mechanics of the Metal Cutting Process*, Journal of Applied physics, 16/1945, p. 267 – 275
16. NESLUŠAN, M.- CZÁN, A.: *Obrábání titánových a niklových zliatin*, EDIS Žilina, 2001, ISBN 80-7100-933-4
17. OHBUCHI, Y. - MATSUO, T.: *Force and chip formation in single-grit orthogonal cutting with shaped CBN and diamond grains*, CIRP 1/1991 p.327 – 331
18. PIISPANEN, V.: *Theory of Formation of Metal Chips*, Journal of applied physics,

- 1-/1948, p. 876 – 881
19. SKOČOVSKÝ, P. - ŠIMAN, I.: *Štruktúrna analýza liatin*, ALFA, Bratislava, 1989
  20. VALKO, R.: *Intenzifikácia obrábania Ni zliatin pri frézovaní a vrtaní*, KDP, KTI, SJF, ŽU 1997
  21. VASILKO, K. - BOKUČAVA, G.: *Brúsenie kovových materiálov*, ALFA Bratislava, 1988
  22. VENKATESH, V. - PHILIP, P.K.: *Investigation of def. in high speed orthogonal machining of a plain carbon steel using a ballistic set-up*, CIRP 1/1972, p.9 – 13
  23. WAGER, J.G. - BROWN, R. H.: *A new quick-stop device for milling and grinding*, CIRP 1/ 1980, p. 15 – 18



## CD-ROM

Na prvém videu je zobrazeno vyhodnocení jednotlivých parametrů kořene třísky online při zvětšení na optickém mikroskopu NEOPHOT II.

Na druhém videu je vidět jak se získává kořen třísky pomocí mechanického pákového přerušovače pomocí uvolnění pružiny. Dále je popsán další postup pro vedoucí k vyhodnocení kořene třísky.



## Klíč k řešení

- O 1.1. Chemické složení, mechanické a fyzikální vlastnosti, způsob výroby a struktura.
- O 1.2. Zpevnění, fázové a chemické přeměny, abrazivní procesy, difúze apod.
- O 1.3. Oblast primární plastické deformace, v kontaktu čela nástroje a třísky, v kontaktu hřbetové plochy nástroje a obrobené plochy.
- O 1.4. Metoda spočívá na rychlostním fotografickém snímání jednotlivých stádií deformace na boční ploše obráběných vzorků.
- O 1.5. Vyleštit a naleptat.
- O 1.6. Přerušovače s okamžitým zastavením obrobku a přerušovače s rychlým vyvedením nástroje ze záběru.
- O 1.7. Úhel primární plastické deformace  $\varphi_1$ .
- O 1.8. Volným pádem závaží z určité výšky, využitím expanzních plynů při explozi prachové nálože nebo využitím energie rezného pohybu
- O 1.9. Barevná metalografie je založená na interferenci světla v důsledku rozdělení dopadajícího světla na složky odražené na rozhraní vzduch – vrstva a na rozhraní – vrstva kov.

## 2. TVORBA A TVAROVÁNÍ TŘÍSKY

Po úspěšném a aktivním absolvování této KAPITOLY

### Budete umět:

- Popsat fyzikální základy procesu řezání.
- Popsat plastickou deformaci při ortogonálním řezání.
- Popsat a rozeznat oblasti deformace při obrábění.
- Popsat technologické charakteristiky třísek.

**Budete umět**

### Budete schopni:

- Popsat probíhající děje při tvorbě třísky.
- Rozeznat jednotlivé druhy třísek.
- Vypočítat koeficient pěchování třísky.
- Vypočítat objemový součinitel pěchování.

**Budete schopni**



**Čas ke studiu: 2,5 hodiny**



**Výklad**

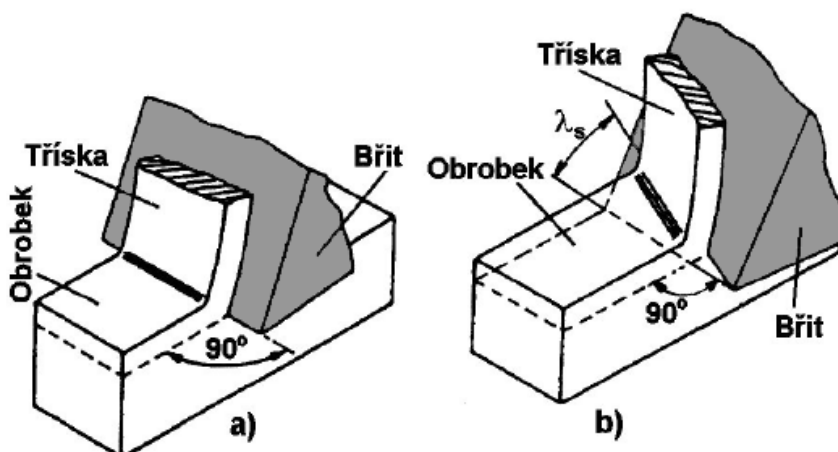
### 2.1. Fyzikální základy procesu řezání

Prioritním výstupem jsou parametry obrobené plochy. Při řezání působí obráběcí nástroj na obrobek a vyvolává v materiálu napětí, proti kterému klade materiál odpor. V důsledku toho se ustálí pole řezání, které má výrazné charakteristiky stavu napjatosti, teploty a deformace. Proces řezání se může realizovat jako ortogonální nebo obecné řezání.

V případě **ortogonálního řezání** je ostří nastaveno kolmo na směr řezného pohybu a daná problematika se řeší v rovině. Typickým příkladem ortogonálního řezání je zapichování, frézování nástrojem s přímými zuby, protahování apod. Schematicky je znázorněno na obr. 2.1 a).

Při **obecném řezání** je třeba řešit řezný proces v prostoru. Příkladem je podélné soustružení, vrtání, frézování nástrojem se zuby ve šroubovici apod. Schematicky je obecné řezání uvedeno na obr. 2.1 b).

Mechanismus vzniku a oddělování třísky je různý u krystalických a nekrystalických látek. Většina technických materiálů běžně používaných ve strojírenské praxi jsou materiály krystalické. A právě teoretické a experimentální studie těchto materiálů se provádějí zejména pro případ ortogonálního řezání.



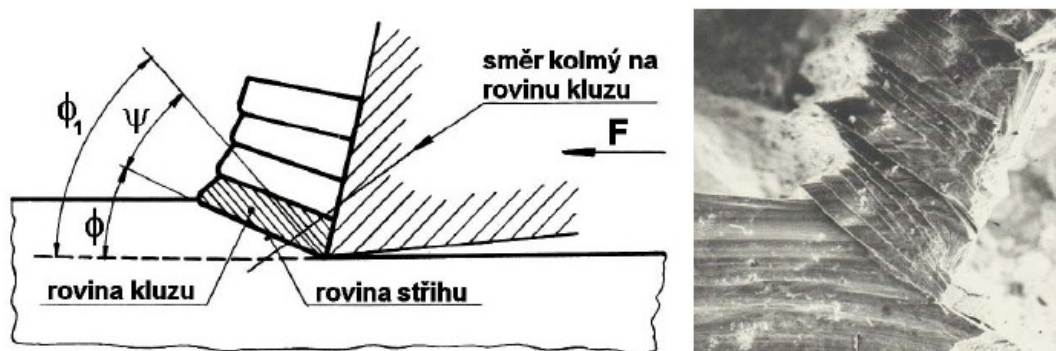
Obr 2.1 Realizace řezného procesu: a) ortogonální řezání, b) obecné řezání

## 2.2. Plastická deformace při ortogonálním řezání

Při řezném procesu dochází v oblasti tvoření třísky k pružným a následně k plastickým deformacím vlivem vnikání nástroje do materiálu obrobku. Břit nástroje je tlačěn do obrobku silou  $F$ .

Napětové pole v zóně řezání se rozkládá na napětové pole v obrobku a nástroji. Pružné deformace jsou rozloženy do celého objemu obrobku, deformace plastické zahrnují jen zónu řezání. O rozložení napětí v zóně řezání je možné usuzovat z dostupných fotoelasticimetrických, případně jiných metod.

Smyková napětí rostou do té míry, než dojde k plastické deformaci materiálu obrobku před břitem nástroje (posuv vrstev v kluzných rovinách pod úhlem  $\Phi_1$ ). Pohyb nástroje pokračuje, roste plastická deformace a dochází k přechování a posunu vrstev materiálu ve směru kolmém ke kluzným rovinám. Oddělováním třísky se v podstatě ukončuje proces plastická deformace. Plastický lom nastává působením kluzné síly zatím co křehký lom působením síly normálové.



Obr 2.2 Vznik třísky

Při dalším pohybu nástroje roste napětí v materiálu, až dosáhne vyšší hodnoty, než je mez stříhu obráběného materiálu a dojde k oddělení segmentu třísky pod úhlem stříhu  $\Phi$ . Rozdíl mezi úhly  $\Phi_1$  a  $\Phi$  se pohybuje v rozmezí  $\psi = (0 \div 30)^\circ$ , nízké hodnoty úhlu  $\psi$  vykazují tvárné materiály (např. ocel), vysoké hodnoty naopak materiály křehké (např. šedá litina).



## 2.3. Oblasti deformace

Při vnikání břitu nástroje do obráběného materiálu vznikají pružné a následně plastické deformace v těchto oblastech:

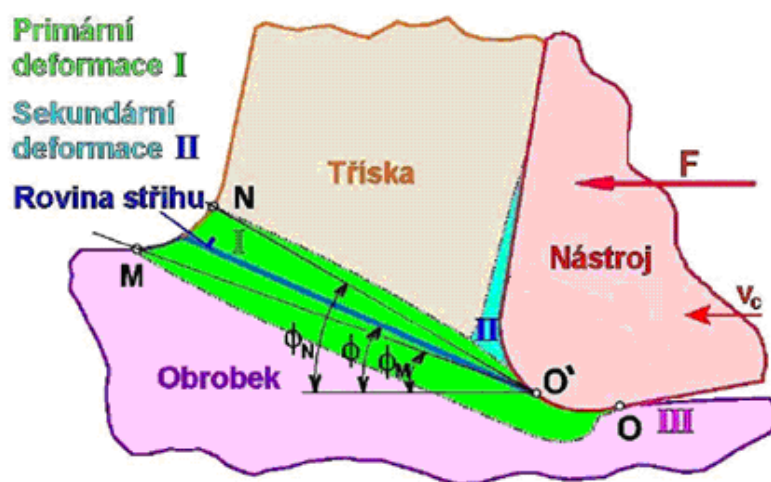
- před břitem nástroje, v oblasti primární plastické deformace, která se značí **I** a vymezuje body **OMNO'**;
- v povrchových vrstvách styku třísky a čela nástroje je oblast sekundární plastické deformace, která je označena **II**;
- v povrchové vrstvě obrobené plochy vzniká oblast terciární plastické deformace **III**.

Velikost a tvar oblasti **OMNO'** a stav napjatosti jsou proměnlivé a závisí zejména na fyzikálních vlastnostech obráběného materiálu, především na jeho deformační a zpevňovací schopnosti. S rostoucí řeznou  $v_c$ , ale zejména posuvovou rychlostí  $v_f$  se tato oblast značně zužuje (ve vysokorychlostním resp. „HSC“ obrábění) a tím obě roviny téměř splývají. Rovněž záleží na řezném prostředí (chlazení), geometrii řezného nástroje a jemu předurčené kinematice (vzhledem k obrobku).

Při zvětšování nástrojového úhlu čela  $\gamma_n$  klade nástroj menší odpor proti odchodu třísky, tříska tak odchází snadněji, a proto je méně deformována. Při zvětšování nástrojového úhlu  $\kappa_r$  se šířka třísky zmenšuje, což se projeví v poklesu velikosti koeficientu pěchování třísky, ale pouze do určité hodnoty tohoto úhlu. Při volbě optimálních řezných podmínek je nutno mít tyto zákonitosti na zřeteli.

Plastická deformace obráběného materiálu v procesu řezání způsobuje:

- oddělení třísky od obrobku (oblast **I**);
- mechanické zatížení nástroje řeznými odpory;
- tepelné zatížení nástroje;
- opotřebení nástroje (na čele v důsledku **II**, na hřbetu v důsledku vlivu **III**);
- změnu textury materiálu v tříске i v povrchové vrstvě obrobené plochy;
- vznik zbytkových napětí v povrchové vrstvě obrobené plochy;
- pěchování třísky (průřez a délka třísky neodpovídají teoretickým hodnotám).



Obr 2.3 Oblasti plastických deformací v zóně řezání



## 2.4. Technologické charakteristiky třísek (koeficient pýchování)

Při používání stále vyšších řezných rychlostí na obráběcích strojích vystupuje do popředí problematika odvádění třísek z místa jejich vzniku a velikosti prostoru, který zabírají. V důsledku plastické deformace dochází k pýchování třísky při jejím odchodu z místa řezu, což má za následek rozdíl mezi průřezem odřezávané vrstvy a průřezem vzniklé třísky.

Pro stanovení **součinitele pýchování** lze vycházet z rovnosti objemů odřezávané vrstvy a vzniklé třísky za jednotku času:

$$S \cdot v_c \cdot 10^3 = S_1 \cdot v_t \cdot 10^3 \quad [\text{dm}^3 \cdot \text{min}^{-1}], \text{ kde} \quad (2.1)$$

$S$  - jmenovitá plocha průřezu [ $\text{mm}^2$ ],

$S_1$  - plocha průřezu vzniklé třísky [ $\text{mm}^2$ ],

$v_c$  - rychlost řezání [ $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ ],

$v_t$  - rychlost odchodu třísky [ $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ ].

Součinitel pýchování třísky  $\lambda$  se pak po úpravě vypočítá ze vztahu:

$$\lambda = \frac{S_1}{S} = \frac{v_c}{v_t} > 1 \quad [-]. \quad (2.2)$$

Plochy průřezu třísky  $S$  a  $S_1$  lze vyjádřit ve tvaru:

$$S = h \cdot l \quad [\text{mm}^2], \quad (2.3)$$

$$S_1 = h_1 \cdot l_{a1} \quad [\text{mm}^2], \text{ kde} \quad (2.4)$$

$h$  - jmenovitá tloušťka řezu [ $\text{mm}$ ],  $h_1$  je tloušťka odřezávané třísky [ $\text{mm}$ ],

$l_a$  - je jmenovitá šířka řezu [ $\text{mm}$ ],  $l_{a1}$  je šířka odřezávané třísky [ $\text{mm}$ ].

Z praktického hlediska můžeme předpokládat, že  $l_{a1} \cong l_a$ , tudíž

$$\lambda = \frac{h_1}{h} [-]. \quad (2.5)$$

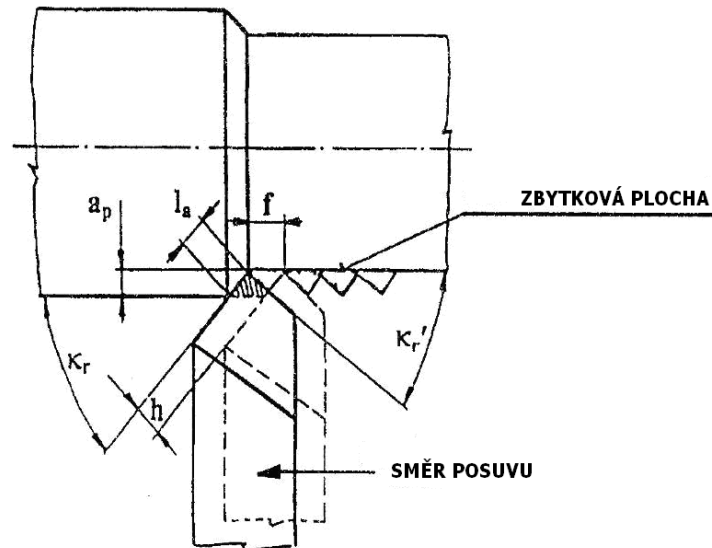
Tloušťku odřezávané třísky  $h_1$  lze změřit např. třmenovým mikrometrem s kulovými doteky a pro danou hodnotu  $h$  se vypočítá součinitel pýchování.

Pro výpočet součinitele pýchování lze také použít délkovou metodu založenou na měření délky vzniklé třísky:

$$\lambda = \frac{l}{l_1} [-], \text{ kde} \quad (2.6)$$

$l$  - relativní délka dráhy nástroje [ $\text{mm}$ ],

$l_1$  - délka vzniklé třísky [ $\text{mm}$ ].



Obr 2.4 Tvar a rozměr odřezávané vrstvy materiálu z obrobku

Další použitelnou možností pro výpočet součinitele přechování třísky je metoda hmotnostní. Vychází z parametrů odřezávané vrstvy materiálu obrobku při použití vztahu:

$$\lambda = \frac{10^3 \cdot G_t}{S \cdot l_f \cdot \rho_t} \quad [-], \text{ kde} \quad (2.7)$$

$G_t$  - hmotnost vzniklé třísky [g],

$\rho_t$  - hustota obráběného materiálu [g.cm-3].

Velikost součinitele přechování třísky se může pohybovat v rozmezí od 1,1 až 10 a lze ho použít jako kritéria pro posouzení intenzity primární plastické deformace.

## 2.5. Tříska a objemový součinitel přechování

Tříska je deformovaná odřezávaná vrstva materiálu z obrobku. Při vnikání řezného klínu do obráběného materiálu se tento materiál nejprve pružně a pak plasticky deformuje, čímž klade odpor (řezný odpor) proti vnikání řezného klínu.

V rámci procesu řezání se utvářejí a následně oddělují třísky trhané (obr. 2.5), nebo stříhané (obr. 2.5). K oddělování trhaných třísek dochází za předpokladu, že platí:

$$\frac{\tau}{\sigma} < 1, \quad (2.8)$$

kde  $\tau$  je tečné napětí a  $\sigma$  je normálové napětí. V případě, že normálová napětí  $\sigma$  převyšují tečná napětí  $\tau$ , vzniká tříska trhaná (drobivá). Trhaná tříska se obvykle tvoří při obrábění tvrdých a křehkých materiálů. Vzniká vylamováním jednotlivých elementů nepravidelných tvarů bez vzájemné souvislosti. Tříska odchází ve tvaru nepravidelných úlomků, šupin, drobných elementů apod. Při tvorbě tohoto typu třísky můžeme očekávat kvalitativně horší obrobený povrch součásti.

V opačném případě, platí-li nerovnost:

$$\frac{\tau}{\sigma} > 1 \quad (2.9)$$

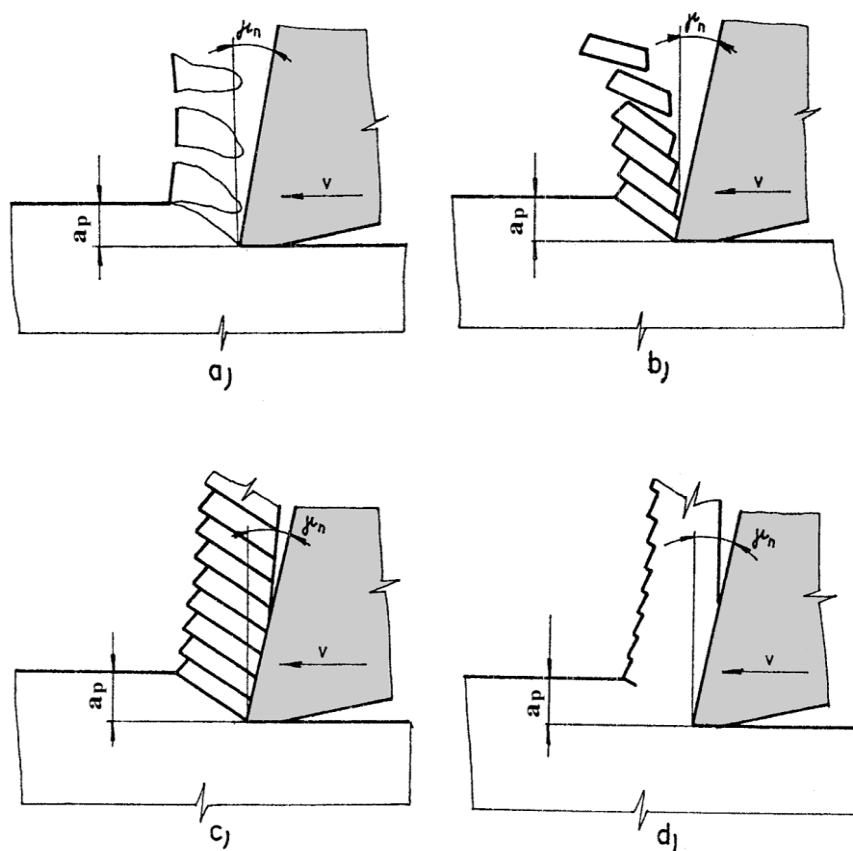
přičemž tečná napětí  $\tau$  převyšují normálová napětí  $\sigma$ , je oddělovaná tříska stříhaná. Podle stupně plastičnosti může být stříhaná tříska:

- plynulá, což je nejobvyklejší druh stříhané třísky (obr. 2.5 d). Tvoří se při obrábění tvárných materiálů. Jednotlivé elementy třísky mají velkou soudržnost a jsou od sebe těžko rozlišitelné. Povrch třísky na straně přivrácené k čelu nástroje bývá hladký. Plynulá tříska odchází po čele nástroje ve tvaru více či méně se svinujícího pásku (šroubovice) jako souvislý celek.
- stupňovitá, která se skládá z jednotlivých spolu spojených elementů, které se od sebe zřetelně liší svým tvarem i velikostí (podle obr. 2.5 c). Tříska tohoto typu vzniká při obrábění tvrdých a tvárných materiálů. Při její tvorbě dochází k odstřížení jednotlivých částic, dobře patrných na vnějším povrchu třísky. Tyto částice jsou rozlišitelné i na straně přivrácené k čelu nástroje a lze je od sebe lehce oddělit. Tříska odchází po čele v kratších celcích, složených z jedné nebo více částic, ve tvaru různě tvarovaných pásků (šroubovice, kroužky, obloučky apod.).
- elementová, přičemž (dle obr. 2.5 b) lze pozorovat, že se tříska skládá z postupně odstříhnutých částic, které jsou od sebe snadno rozlišitelné.

Tříska, jako vedlejší doprovodný produkt procesu řezání, má mít určité vlastnosti z hlediska rozměrů a tvaru, a to z důvodu lepší manipulovatelnosti při odvodu ze stroje a další dopravy. Proto by měly zaujímat co nejmenší objem. Tvar třísky je důležitý také pro efektivní využití nástroje (dlouhá plynulá tříska se namotává na nástroj a zvyšuje nebezpečí poškození a dosažení požadovaných vlastností obrobeného povrchu. Proto je snaha dosáhnout vždy dělení třísky.

Tvar vzniklé třísky závisí na řadě faktorů, z nichž nejdůležitějšími jsou:

- vlastnosti obráběného materiálu zejména z pohledu jeho obrobitelnosti;
- geometrie nástroje a tvaru břitů (úhel čela  $\gamma$ , lamače, utvařeče třísek);
- materiálu nástroje (řezivost a vznikající tření);
- řezné podmínky (rychlost řezání  $v_c$ , posuv  $f$ ).



Obr 2.5 Oddělování třísek trhaných a stříhaných

Tvarování a lámání třísek má značný význam na „třískové hospodářství“, bezpečnost a plynulost práce u automatizovaných obráběcích strojů, zejména pak u bezobslužných obráběcích strojů a pracovišť. Jako kritérium vhodného tvaru třísky se používá tzv. objemový součinitel.

Objemový součinitel třísek  $\omega$  lze vyjádřit:

$$\omega = \frac{V_t}{V_m} [-], \text{ kde} \quad (4.10)$$

$V_t$  představuje objem volně ložených třísek (například volně vložené do odměrného válce) [dm<sup>3</sup>] a  $V_m$  představuje objem odebraného materiálu po stejnou dobu obrábění [dm<sup>3</sup>].

Tab. 2.1 – Hodnoty objemového součinitele třísek  $\omega$  pro vybrané typy třísek

TVAR TŘÍSEK		w	TVAR TŘÍSEK		w
	STUŽKOVÉ DLOUHÉ	400 a více		SPIRÁLOVÉ PLOCHÉ	10 až 20
	STUŽKOVÉ SMOTANÉ	300 až 400		OBLOUKOVITÉ SPOJENÉ	8 až 10
	VINUTÉ DLOUHÉ	80 až 150		ELEMENTÁRNÍ	4 až 6
	VINUTÉ KRÁTKÉ	40 až 60			

Dosažení specifikovaných požadavků na tvar a s tím související objem produkce třísek se zajišťuje především vhodnou volbou řezných parametrů a geometrie nástrojů se záměrem optimálního utváření třísek. Snížení hodnoty objemového součinitele třísek (násobek objemu třísky vzhledem k odebranému objemu materiálu z povrchu polotovaru) lze klasicky dosáhnout lámáním a utvářením třísek prostřednictvím různých lamačů a utvařečů třísek.

Utvařeče třísek mohou být vybrušované a předlisované, vyjiskřované, nebo mechanické (příložné). Nejjednoduššími utvařeči jsou žlábkové utvařeče s vytvořeným žlábkem či stupínkem na čele celistvých nožů nebo pájených destiček. Další skupina utvařečů je charakterizována kontinuálním žlábkem různého průřezu podél ostří, kolem celého obvodu z jedné nebo obou stran vyměnitelné destičky. Třetí skupinu tvoří utvařeče s tzv. sekundárním utvářením třísky. Jsou to žlábkové utvařeče třísek se sekundárním utvařečem menších rozměrů vytvořeným v rohu destičky. Sekundární utvařeč ve spojení s primárním rozlišuje oblast utváření.

Lamače třísek mají tvar destičky a jsou mechanicky upnuté, postavené ve vzdálenosti 1,5 až 6 mm od ostří a skloněné pod úhlem 40 až 50° k čelu břitu. Zmenšují poloměr svinování třísky a způsobují lámání odcházející třísky na menší kusy. Funkci utvařeče, případně lamače třísek přebírá také žlábek vznikající na čele břitu jeho postupným otupováním.



## Shrnutí kapitoly

V této kapitole jsme se dozvěděli, jak se tvoří tříska při obrábění a její fyzikální základy, dále oblasti deformací, zejména oblast primární plastické deformace. Technologické charakteristiky třísek (koeficient pěchování). Dále potom technologické charakteristiky třísek (koeficient pěchování) a druhy vznikajících třísky a objemový součinitel pěchování.



## Kontrolní otázky

1. Jakými metodami se může realizovat proces řezání?
2. V jakém okamžiku dojde k odstříhnutí třísky?
3. Z čeho se vychází při stanovování součinitele pěchování třísky?
4. Jaké metody stanovování součinitele pěchování třísky znáte?
5. Na čem především závisí tvar vzniklé třísky?
6. Jaké znáte typy stříhaných třísek?
7. Kdy dojde k oddělování trhaných třísek?
8. Kdy dojde k oddělování stříhaných třísek?



## Další zdroje

1. BILÍK, O. *Obrábění II. (1.Díl): Fyzikálně mechanické záležitosti procesu obrábění*. Ostrava: Vysoká škola báňská –TU Ostrava, 1994. 132 s. ISBN 80-7078-228-5.
2. BILÍK, O. *Obrábění II. (2.Díl)*. Ostrava: Vysoká škola báňská –TU Ostrava, 2001. 118 s. ISBN 80-7078-994-1.
3. KOČMAN, K., PROKOP, K. *Technologie obrábění*. Brno: Akademické nakladatelství CERN Brno, s.r.o., 2001. 274 s. ISBN 80-214-196-2.
4. HAVRILA, M., ZAJAC, J., BRYCHTA, J., JURKO, J. *Top trendy v obrábění 1. část – Obrávané materiály*. Žilina: MEDIA/ST, s. r. o., 2006. ISBN 80-968954-2-7.
5. JURKO, J., ZAJAC, J., ČEP, R., *Top trendy v obrábění 2. část – Nástrojové materiály*. Žilina: MEDIA/ST, s. r. o., 2006. ISBN 80-968954-2-7.
6. VASILKO, K., HAVRILA, M., NOVÁK – MARCINČIN, J., MÁDL, J., ZAJAC, J. *Top trendy v obrábění 3. část – Technologická obrábění*. Žilina: MEDIA/ST, s. r. o., 2006. ISBN 80-968954-2-7.
7. HUMÁR, A. *TECHNOLOGIE I TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ – 1. část*. Studijní opory pro magisterskou formu studia "Strojírenská technologie". Brno: VUT Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2003. 138 s. Dostupné na World Wide Web: <[http://www.fime.vutbr.cz/opory/pdf/TI\\_TO-1cast.pdf](http://www.fime.vutbr.cz/opory/pdf/TI_TO-1cast.pdf)>.

8. HUMÁR, A. *TECHNOLOGIE I TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ – 2. část*. Studijní opory pro magisterskou formu studia "Strojírenská technologie". Brno: VUT Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2004. 94 s. Dostupné na World Wide Web: <[http://www.fme.vutbr.cz/opory/pdf/TI\\_TO-2cast.pdf](http://www.fme.vutbr.cz/opory/pdf/TI_TO-2cast.pdf)>.
9. HUMÁR, A. *TECHNOLOGIE I TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ – 3. část*. Interaktivní multimediální text pro bakalářský a magisterský studijní program "Strojírenství". Brno: VUT Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2005. 57 s. Dostupné na World Wide Web: <[http://www.fme.vutbr.cz/opory/pdf/TI\\_TO-3cast.pdf](http://www.fme.vutbr.cz/opory/pdf/TI_TO-3cast.pdf)>.
10. HUMÁR, A. *Výrobní technologie II* [online]. Studijní opory pro podporu samostudia v oboru "Strojírenská technologie" BS studijního programu "Strojírenství". VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2002. 84 s. Dostupné na World Wide Web: <[http://www.fme.vutbr.cz/opory/pdf/VyrobníTechnologie\\_II.pdf](http://www.fme.vutbr.cz/opory/pdf/VyrobníTechnologie_II.pdf)>.
11. STEPHENSON, D. A., AGAPIOU, J. S. *Metal Cutting Theory and Practice*. New York: Marcel Dekker, Inc., 1996. 905 s. ISBN 0-8247-9579-2.



## CD-ROM

Na videu jsou zobrazeny, dvě metody, určování koeficiente pěchování třísky – délková a hmotnostní. Předchází jim záznam získávání třísek na trubkovém přípravku, v jehož obvodu jsou vyvrtány otvory pro snazší identifikaci délky třísky.



## Klíč k řešení

- O 2.1 Ortogonální nebo obecné.
- O 2.2 Při překonání meze stříhu obráběného materiálu.
- O 2.3 Pro stanovení součinitele pěchování lze vycházet z rovnosti objemů odřezávané vrstvy a vzniklé třísky za jednotku času.
- O 2.4 Hmotnostní, délková a poměr tloušťek třísky odvedené a teoretické.
- O 2.5 Vlastnosti obráběného materiálu (obrobitelnosti), geometrie, řezné parametry a materiál nástroje
- O 2.6 Plynulá, stupňovitá, elementová
- O 2.7 Když tečné napětí  $\tau$  je nižší než normálové  $\sigma$
- O 2.8 Když tečná napětí  $\tau$  převyšují normálová napětí  $\sigma$

## 3. ZDROJE TEPLA A TEPELNÁ BILANCE

Po úspěšném a aktivním absolvování této KAPITOLY

### Budete umět:

- Popsat a stanovit jednotlivé oblasti přivedeného a odvedeného tepla při obrábění.
- Stanovit a změřit teplo při obrábění.

**Budete umět**

### Budete schopni:

- Stanovit zdroje tepla při obrábění.
- Určit rovnici tepelné bilance.
- Stanovit metody měření tepla při obrábění.

**Budete schopni**



**Čas ke studiu: 2 hodiny**



**Výklad**

### 3.1. Tepelná bilance

Při určování tepelné bilance v zóně řezání při práci s nástroji s definovanou geometrií je postup odlišný. Jak je uvedeno výše, teplo v zóně řezání vzniká přeměnou mechanické práce. Při obrábění se 95 až 98 % mechanické práce přemění na teplo. Celkové množství tepla  $Q$  je nevrtná veličina, která se neustále obnovuje ve zdrojích tepla určených zónou řezání. Samotná zóna řezání tak umožňuje vymezení následujících zdrojů tepla, resp. tvorby tepla, (obr. 3.1).

- teplo  $Q_{sh}$  – generované deformací ve střižné rovině v oblasti primární plastické deformace,
- teplo  $Q_{tr}$  – generované třením čela nástroje a třísky,
- teplo  $Q_f$  – generované třením hřbetu nástroje a obrobku.

Teplo má u některých členů technologické soustavy kumulativní charakter. Při soustružení se kumuluje v nástroji, při frézování v obrobku, apod. Tento efekt je důležitý např. z hlediska opotřebení nástrojů.

Teplo se šíří vedením a konvekcí do:

- obrobku –  $Q_o$ ,
- nástroje –  $Q_n$ ,
- třísky –  $Q_t$ ,
- prostředí –  $Q_p$ ,

v závislosti od teplotního gradientu. Jak je obecně známé, teplotní pole je nehomogenní a kvazistacionární.

Vznik třísky při obrábění a její odvod z místa řezu je doprovázen vznikem určitého množství tepla. Ke vzniku tepla dochází transformací vynaložené práce. V teplo se přeměňuje téměř veškerá práce vynaložená na proces řezání, s výjimkou práce pružných deformací a práce utajené. Podíl těchto dvou složek na celkové vynakládané práci je poměrně malý a nepřesahuje 5 %. Ve většině případů (vysoká tuhost soustavy stroj - nástroj - obrobek, velmi intenzivní deformace odřezávané vrstvy) představují práce pružných deformací a práce utajená (spotřebovaná na deformaci mřížky a vytvoření nových povrchů) maximálně 2 % celkové práce řezání. Zbytek, tj. minimálně 98 %, se transformuje v teplo. Proto lze celkové množství tepla  $Q_C$  vznikající za sekundu při obrábění vypočítat bez velkých chyb z výrazu [10, 20]:

$$Q = F_c \cdot v_c \cdot t \quad (\text{J}), \text{ kde} \quad (3.1)$$

$Q$  – celkové teplo [J],

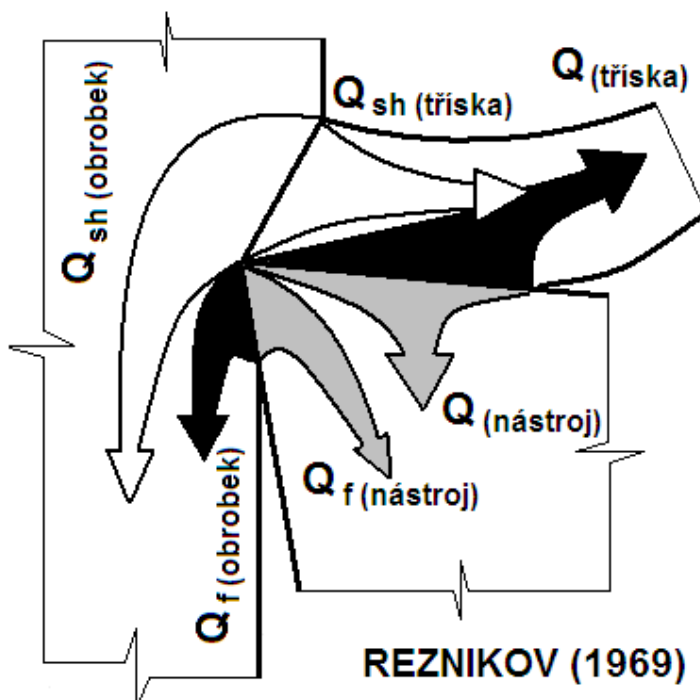
$F_c$  – řezná složka síly obrábění [N],

$v_c$  – řezná rychlost [ $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ ],

$t$  – čas obrábění [min].

Vzniklé teplo výrazně ovlivňuje řezný proces, protože:

- negativně působí na řezné vlastnosti nástroje,
- ovlivňuje mechanické vlastnosti obráběného materiálu,
- ovlivňuje petchování a zpevňování obráběného materiálu,
- ovlivňuje podmínky tření na čele i hřbetě nástroje.



Obr 3. 1 Vznik a šíření tepla v zóně řezání [2, 21]



Tepelná bilance představuje jednu z forem bilance energie, která vypovídá o tom, že v daném místě a daném časovém úseku je množství tepla odvedené rovno teplu do místa přivedené. Pro podmínky v zóně řezu nástrojem s definovanou geometrií to znamená [10, 20]:

$$Q = F_c \cdot v_c = Q_{sh} + Q_{tr} + Q_f = Q_o + Q_n + Q_p + Q_t \quad [\text{J}] \quad (3.2)$$

Celkové množství tepla, které se v zóně tvorby třísky vytvoří možné určit na základě známé řezné rychlosti a změření tangenciální složky řezné síly  $F_c$ . Množství tepla, které se vytvoří v oblasti plastické primární deformace  $Q_{sh}$  lze určit na základě rovnice 3.3.

$$Q_{sh} = F_{sh} \cdot v_{sh} \quad [\text{J}] \quad (3.3)$$

$F_{sh}$  stejně jako  $v_{sh}$  je možné určit na základě rozkladu, resp. rovnic uvedených v předchozím textu.  $F_{sh}$  lze určit na základě měření složek síly řezání  $F_c$  a  $F_p$ . Velikost  $v_{sh}$  závisí od úhlu primární plastické deformace.

Množství tepla, které se vytvoří třením čela nástroje o třísku  $Q_{tr}$  je možné určit obdobně na základě rovnice 3.4.

$$Q_{tr} = F_t \cdot v_{ch} \quad [\text{J}] \quad (3.4)$$

$F_t$  podobně jako  $v_{ch}$  je opět možné určit na základě rozkladu, resp. rovnic uvedených výše.  $F_t$  je možné určit na základě měření složek síly řezání  $F_c$  a  $F_p$ . Velikost  $v_{ch}$  opět závisí na úhlu primární plastické deformace.

Množství tepla, které vzniká třením hřbetu nástroje a obrobené plochy  $Q_f$  lze určit podobně z rovnice 3.5, při zjednodušení, že záření tepla do prostředí  $Q_p$  se pohybuje od 1 do 3 % v závislosti způsobu obrábění, řezných podmínek a podobně.

$$Q_f = Q - (Q_{sh} + Q_{tr} + Q_p) \quad [\text{J}] \quad (3.5)$$

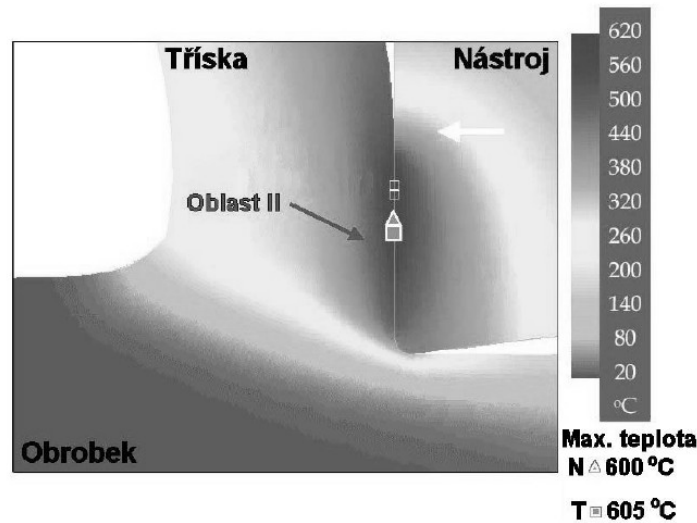
## 3.2. Teplota řezání

Teplotní pole (obr 3.2) nástroje nás zajímá především, protože teplota povrchových vrstev čela a hřbetu má výrazný vliv na stav těchto vrstev na charakter jejich vzájemného působení s materiálem obrobku a v souvislosti s tím i na podstatu a intenzitu otupování nástroje. Teplota na čele a hřbetě závisí na vzdálenosti konkrétního bodu od ostří nástroje ve směru odchodu třísky, resp. ve směru řezné rychlosti, a že dosahuje maxima v určité vzdálenosti od ostří. Rozdíl mezi nejvyšší a nejnižší teplotou na čele dosahuje v tomto případě až 450 °C, na hřbetě pouze 100 až 300 °C. Absolutní hodnoty mezních teplot a střední teploty na čele jsou přitom o 50 až 100 % vyšší než na hřbetě. Jen při obrábění materiálů křehkých (tvorí třísku elementární) a při malých tloušťkách třísky ( $h < 0,05$  mm) mohou teploty na hřbetě převyšovat teploty na čele.

Z hlediska opotřebení nástroje nás zajímají jak maximální teploty na čele a na hřbetě, tak i rozložení teplot na těchto plochách. Stanovení teplotního pole čela a hřbetu je experimentálně velmi náročné. Proto se často spokojíme jen se stanovením středních teplot na těchto plochách, popř. stanovením střední teploty celé styčné plochy nástroje s třískou a obrobkem, tj. aktivní části čela a hřbetu současně. Střední teplota bude pochopitelně nižší než maximální teplota na břitu, má však výhodu, že ji lze stanovit podstatně snadněji. V teorii obrábění je tato střední teplota nazývána teplota řezání  $\theta$  a charakterizuje do určité míry teplotní namáhání pracovních ploch nástroje.

Metody experimentálního studia tepelných jevů jsou zaměřeny do dvou oblastí:

1. stanovení celkového množství tepla a podíl odvedeného tepla do jednotlivých oblastí,
2. stanovení teploty a teplotního pole obrobku, nástroje a třísky.



Obr 3. 2 Příklad teplotního pole [8]

### 3.3. Měření tepla při obrábění

Pro experimentální stanovování množství tepla, které vzniká při procesu obrábění, se používají **kalorimetry**, což je vlastně tepelně izolovaná nádoba naplněná do určité výše kapalinou se zabudovaným přesným teploměrem, případně s míchadlem. Každý kalorimetr musí být svou konstrukcí uzpůsoben daným podmínkám obrábění. Obecný postup při měření kalorimetrem spočívá v ponoření ohřátého předmětu (v našem případě tříška, obrobek, nástroj) po obrábění do lázně, kde předá část svého tepla. Po vyrovnání teplot se množství odevzdaného tepla předmětem, rovná množství tepla přijatého kapalinou. Toto množství se potom jednoduše určí změřením počáteční a konečné teploty kapaliny v kalorimetru. Tato metoda se vyznačuje svojí jednoduchostí jak použitého zařízení, tak i postupem měření a zpracování výsledků. Nevýhodou jsou zejména tepelné ztráty stěnami, hladinou, upínacím zařízením, apod. a také podstata vlastní metody. Využívá se především při obrábění osovými nástroji se svislou osou rotace (vrtání, frézování, ...). Naopak při soustružení je konstrukce kalorimetru složitější a měření obtížnější.

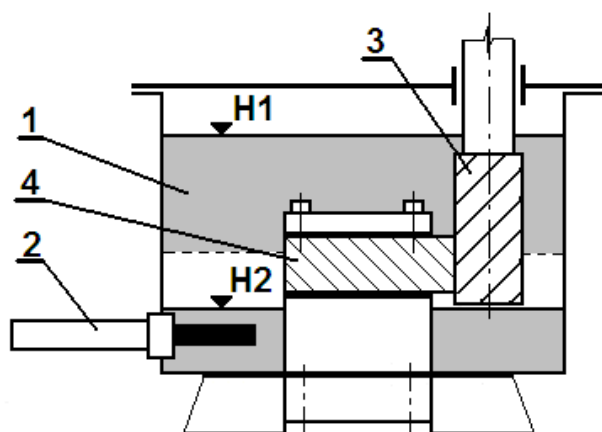
Kalorimetrickými metodami lze stanovit [10]:

- celkové množství tepla vznikajícího při obrábění,
- množství tepla odcházejícího třískou,
- množství tepla odcházejícího do nástroje a obrobku,
- střední teplotu třísky, případně obrobku či nástroje.

Pro **měření celkového množství tepla** bývají obrobek i pracovní část nástroje ponořeny do kapaliny kalorimetru (obr. 3.3) po hladinu označenou H1. K zamezení odvodu tepla je obrobek a případně i nástroj odizolován.

Postup měření je následující:

1. po ustavení nástroje vůči obrobku změříme a zaznamenáme teplotu kapaliny v kalorimetru ustálenou za klidu,
2. obrábíme za předem stanovených rezných podmínek a po vyrovnání teploty kapaliny, nástroje, obrobku a třísek změříme ustálenou konečnou teplotu.



- 1 – kalorimetr s víkem
- 2 – setinový teploměr
- 3 – válcová stopková fréza
- 4 – obráběná materiál
- H1 – hladina kapaliny pro měření celkového tepla
- H2 – hladina kapaliny pro měření tepla v tříске

Obr 3. 3 Kalorimetr na měření celkového tepla při válcovém frézování [10]

Celkové množství tepla potom vypočítáme ze vztahu [10]:

$$Q = (m_v \cdot c_v + m_o \cdot c_o + m_n \cdot c_n + V_k) \cdot (\Theta_k - \Theta_o) \quad [J] \quad (3.6)$$

$Q_k$  – celkové množství tepla v kalorimetru [J],

$m_v$  – hmotnost vody v kalorimetru [kg],

$m_o$  – hmotnost obrobku před obráběním [kg],

$m_n$  – hmotnost ponořené části nástroje [kg],

$V_k$  – vodní hodnota kalorimetru [ $J \cdot K^{-1}$ ],

$c_v, c_o, c_n$  – specifická tepla vody, obrobku a nástroje [ $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ ],

$\Theta_k$  – konečná teplota [K],

$\Theta_o$  – počáteční teplota [K].

V důsledku ztrát je celkové teplo (viz. rovnice 3.1) vycházející z celkové práce řezání nižší než teplo naměřené v kalorimetru. Porovnáním obou zjištěných tepel, lze v rámci dané přesnosti zjistit teplotní ztráty kalorimetru ze vztahu:

$$Q_z = Q - Q_k \quad [J] \quad (3.7)$$

Při **měření tepla v třískách** jsou nástroj a obrobek mimo kapalinu. Hladina je v takové výši aby třísky mohly padat s co nejkratší trajektorií do kapaliny, jak je uvedeno na obr. 5.3 pro hladinu H2. Postup měření je obdobný jako u stanovení celkového tepla, tedy změření počáteční a konečné ustálené teploty. Teplo přivedené třískami do kapaliny lze určit ze vztahu [10]:

$$Q_t = m_t \cdot c_t + V_k \cdot (\Theta_k - \Theta_o) \quad [J] \quad (3.8)$$

$Q_t$  – množství tepla v tříске [J],

$m_t$  – hmotnost třísek v kapalině [kg],

$c_t$  – specifické teplo třísek (stejně jako obrobku, tedy  $c_t = c_o$ ) [ $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ ],

Hmotnost třísek v kapalině určíme jednoduše jako rozdíl hmotnosti obrobku před obráběním a po obrábění.

Postup **měření tepla v nástroji a obrobku** je obdobný jako stanovování tepla v třískách, kdy nástroj a obrobek jsou mimo kapalinu a vychází z obr. 3.3. Rozdíl je v tom, že musíme zamezit padání třísek do kapaliny, aby nám neovlivnili výsledek měření. Po ukončení procesu obrábění se celý nástroj

nebo obrobek co nejrychleji ponoří do kapaliny a postupuje se stejným způsobem naměřením ustálených konečné a počáteční teploty. Množství tepla v nástroji (rovnice 3.9) a v obrobku (rovnice 3.10) stanovíme následovně [10]:

$$Q_n = m_v \cdot c_v + n_n \cdot c_n + \zeta_k) \cdot (\Theta - \vartheta) \quad [\text{J}] \quad (3.9)$$

$$Q_o = m_v \cdot c_v + n_o \cdot c_o + \zeta_k) \cdot (\Theta - \vartheta) \quad [\text{J}] \quad (3.10)$$

$Q_n$  – množství tepla v nástroji,  
 $Q_o$  – množství tepla v obrobku.

Postup měření je v tomto případě nejnáročnější a výsledek je v důsledku přenosu nástroje nebo obrobku také méně přesný.

Při **měření tepla obsaženého v třískách**, lze určit i střední teplotu třísky. Vychází se z předpokladu, že po dopadu třísek do kapaliny dojde k vyrovnání jejich teplot v důsledku odevzdání tepla třísek kapalině v kalorimetru. Potom mají-li třísky před dopadem do kapaliny střední teplotu  $\Theta_t$ , ztrácí při ochlazení na teplotu  $\Theta_k$  množství tepla v množství:  $m_t \cdot c_t \cdot (\Theta - \vartheta)$ . Toto množství tepla navýší teplotu kapaliny z teploty počáteční  $\Theta_o$  na konečnou teplotu  $\Theta_k$ . Potom platí:

$$m_v \cdot c_v \cdot (\Theta - \vartheta) = n_t \cdot c_t \cdot (\Theta - \vartheta),$$

odtud potom jednoduše určíme střední teplotu třísek ze vzorce [10]:

$$\Theta = \frac{n_v \cdot c_v \cdot (\Theta - \vartheta)}{m_t \cdot c_t} + \vartheta \quad [\text{J}] \quad (3.11)$$

Podobným způsobem lze vypočítat i střední teploty obrobku nebo nástroje. Přesnost měření potom závisí na rychlosti dopadu třísek do kapaliny, nebo na době od ukončení řezání po ponoření nástroje či obrobku do kapaliny v kalorimetru.



## Shrnutí kapitoly

V této kapitole jsme se dozvěděli, jaké jsou zdroje tepla vznikající při obrábění a kam se teplo při obrábění odvede. Dále jsme určili rovnici tepelné bilance a popsali metody měření tepla celkového, třísek, obrobku a nástroje při obrábění pomocí kalorimetrů.



## Kontrolní otázky

1. Napište rovnici tepelné bilance.
2. Kde může teplo při obrábění vznikat?
3. Kam se teplo vzniklé při obrábění odvádí?
4. Kam se odvádí, pokud možno, největší část tepla?
5. Jaké přístroje se používají pro stanovení množství tepla při obrábění?
6. Co vše lze stanovit (jaká tepla) pomocí kalorimetrických metod?



## Další zdroje

1. BILÍK, O. *Obrábění II. (1.Díl): Fyzikálně mechanické záležitosti procesu obrábění*. Ostrava: Vysoká škola báňská –TU Ostrava, 1994. 132 s. ISBN 80-7078-228-5.
2. BILÍK, O. *Obrábění II. (2.Díl)*. Ostrava: Vysoká škola báňská –TU Ostrava, 2001. 118 s. ISBN 80-7078-994-1.
3. KOČMAN, K., PROKOP, K. *Technologie obrábění*. Brno: Akademické nakladatelství CERN Brno, s.r.o., 2001. 274 s. ISBN 80-214-196-2.
4. HAVRILA, M., ZAJAC, J., BRYCHTA, J., JURKO, J. *Top trendy v obrábění 1. část – Obrávané materiály*. Žilina: MEDIA/ST, s. r. o., 2006. ISBN 80-968954-2-7.
5. JURKO, J., ZAJAC, J., ČEP, R., *Top trendy v obrábění 2. část – Nástrojové materiály*. Žilina: MEDIA/ST, s. r. o., 2006. ISBN 80-968954-2-7.
6. VASILKO, K., HAVRILA, M., NOVÁK – MARCINČIN, J., MÁDL, J., ZAJAC, J. *Top trendy v obrábění 3. část – Technológia obrábění*. Žilina: MEDIA/ST, s. r. o., 2006. ISBN 80-968954-2-7.
7. HUMÁR, A. *TECHNOLOGIE I TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ – 1. část*. Studijní opory pro magisterskou formu studia "Strojírenská technologie". Brno: VUT Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2003. 138 s. Dostupné na World Wide Web: <[http://www.fme.vutbr.cz/opory/pdf/TI\\_TO-1cast.pdf](http://www.fme.vutbr.cz/opory/pdf/TI_TO-1cast.pdf)>.
8. HUMÁR, A. *TECHNOLOGIE I TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ – 2. část*. Studijní opory pro magisterskou formu studia "Strojírenská technologie". Brno: VUT Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2004. 94 s. Dostupné na World Wide Web: <[http://www.fme.vutbr.cz/opory/pdf/TI\\_TO-2cast.pdf](http://www.fme.vutbr.cz/opory/pdf/TI_TO-2cast.pdf)>.
9. HUMÁR, A. *TECHNOLOGIE I TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ – 3. část*. Interaktivní multimediální text pro bakalářský a magisterský studijní program "Strojírenství". Brno: VUT Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2005. 57 s. Dostupné na World Wide Web: <[http://www.fme.vutbr.cz/opory/pdf/TI\\_TO-3cast.pdf](http://www.fme.vutbr.cz/opory/pdf/TI_TO-3cast.pdf)>.
10. HUMÁR, A. *Výrobní technologie II* [online]. Studijní opory pro podporu samostudia v oboru "Strojírenská technologie" BS studijního programu "Strojírenství". VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2002. 84 s. Dostupné na World Wide Web: <[http://www.fme.vutbr.cz/opory/pdf/VyrobníTechnologie\\_II.pdf](http://www.fme.vutbr.cz/opory/pdf/VyrobníTechnologie_II.pdf)>.
11. STEPHENSON, D. A., AGAPIOU, J. S. *Metal Cutting Theory and Practice*. New York: Marcel Dekker, Inc., 1996. 905 s. ISBN 0-8247-9579-2.



## Klíč k řešení

O 3.1  $Q_{sh} + Q_{tr} + Q_f = Q_o + Q_n + Q_p + Q_t$

O 3.2  $Q_{sh}$  – generované deformací ve střížné rovině v oblasti primární plastické deformace,  $Q_{tr}$  – generované třením čela nástroje a třísky,  $Q_f$  – generované třením hřbetu nástroje a obrobek.

- O 3.3 Do obrobku –  $Q_o$ , nástroje –  $Q_n$ , třísky –  $Q_t$ , prostředí –  $Q_p$ ,
- O 3.4 Do třísek.
- O 3.5 Kalorimetry.
- O 3.6 Celkové množství tepla vznikajícího při obrábění, množství tepla odcházejícího třískou, množství tepla odcházejícího do nástroje a obrobku, střední teplotu třísky, případně obrobku či nástroje.

## 4. MĚŘENÍ TEPLoty PŘI OBRÁBĚNÍ

Po úspěšném a aktivním absolvování této KAPITOLY

### Budete umět:

- Popsat a použít metody měření teploty pomocí termočlánků.
- Popsat a použít metody měření teploty pomocí termodua.
- Popsat a použít metody měření teploty pomocí termistorů.
- Popsat a použít metody měření teploty pomocí pyrometrů.
- Popsat a použít metody měření teploty pomocí teplotních indikátorů.

**Budete umět**

### Budete schopni:

- Vyjmenovat metody měření teploty při obrábění.
- Změřit teplotu obrábění různými metodami.

**Budete schopni**



**Čas ke studiu: 4 hodiny**



**Výklad**

Pro měření teploty lze využít celou řadu fyzikálních nebo chemických jevů [1]. Vzhledem k náročnosti a specifickým podmínkám procesu obrábění lze použít pouze některé z metod. Při experimentální stanovení a při praktických měření se využívá především těchto jevů:

1. termoelektrický jev (termočlánky),
2. změna elektrického odporu (termistory),
3. tepelné záření (pyrometry, termovize, fotometrie),
4. změna struktury (teploměrné křídly a barvy).

Obecně se zařízení pro měření teploty skládají ze snímače teploty, převodových a přenosových členů a indikátoru měřené veličiny. Při měření teploty v procesu řezání se snímače umísťují přímo do soustavy stroj – nástroj – obrobek a podle druhu, provedení a umístění použitého snímače jsou převážně označovány jednotlivé měřicí metody. Experimentální metody měření teploty a teplotních polí lze v podstatě rozdělit na [10]:

Teplotu je možné měřit na obrobku, řezném klíně a v třísece s použitím následujících postupů:

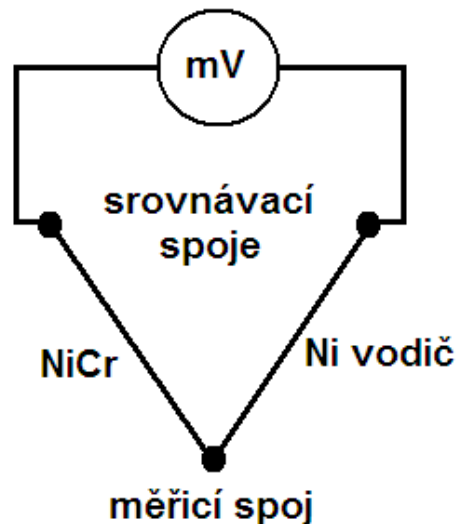
- měření termočlánkem (např. dva cizí kovy, jeden cizí kov, přímý termočlánek) hlavní problémy spojené s použitím této metody souvisí s eliminací tzv. parazitních termoelektrického napětí a s nevyhnutelnou kalibrací (závislost pro výstupní teplotu a termoelektrické napětí),

- obrazovým záznamem teplotního pole prostřednictvím pyrometrů, infračervené fotografie nebo termovizní kamery,
- kalorimetrické měření jsou vhodné pro měření tepla a teploty podle ohřátí kapaliny (se známým měrným teplem), které nastane vložení ohřátého předmětu (třísky, nástroj, obrobek),
- fázové změny vyvolané teplotou v tříске nebo v řezném klíně, při nástrojích je daná metodika omezená pouze na rychlořezné oceli,
- měření teplotního pole teplotními indikátory,
- fotografické měření teplotního pole,
- měření teploty termistory.

Teplotním polem se rozumí rozložení teplot v obrobku, nástroji a tříске při procesu obrábění. Obvykle se ovšem určuje teplota na povrchu těchto těles a to z důvodu obtížnosti určení teploty v jednotlivých bodech. Proto se zpravidla při experimentálním měření omezuje pouze na stanovení teplot v určitém místě nástroje, obrobku nebo třísky nebo stanovením střední teploty oblasti řezu. V teorii obrábění se tato teplota nazývá také teplotou řezání a lze s ní do určité míry charakterizovat teplotní namáhání břitu nebo obrobitelnost obráběného materiálu.

#### 4.1. Měření teploty pomocí termočlánků

Při měření termočlánky se využívá tzv. termoelektrického jevu. Tento jev využívá vzniku termoelektrického napětí (termoelektromotorické síly), v obvodu tvořeného dvěma různými vodiči, jejichž konce jsou vodivě spojeny, jestliže jsou oba spoje udržovány na různých teplotách. Při obrábění se ho využije tak, že měřicí spoj je umístěn do místa měření teploty  $\Theta_m$  a srovnávací spoj je udržován na známé teplotě  $\Theta_o$  (obvykle teplota okolí). K těmto vodičům je pak připojen milivoltmetr (obr 4.1). Velikost vznikajícího termoelektrického napětí však závisí nejen na rozdílu teplot, ale i na druhu materiálů obou vodičů, tvořících termočlánek.



Obr. 4.1 Schéma zapojení termočlánku

Pro praktická měření teploty lze využít jen některé dvojice kovů nebo slitin. Musí být sestaveny tak, aby vzniklé termoelektrické napětí bylo dostatečně velké v rozsahu předpokládaných teplot.



Tab. 4.1 – Hodnoty objemového součinitele třísek  $\omega$  pro vybrané typy třísek

Konstantan	-39	Uhlík	-3,5	Cín	-0,5	Molybden	6,5
Kobalt	-21	Hliník	-1,5	Rhodium	1,0	Železo	12,5
Nikl	-20	Hořčík	-1,5	Iridium	1,0	Křemík	44,0
Platina	-5	Olovo	-0,5	Zinek	1,5		
Stříbro	1,5	Měď	2,0	Wolfram	2,5		

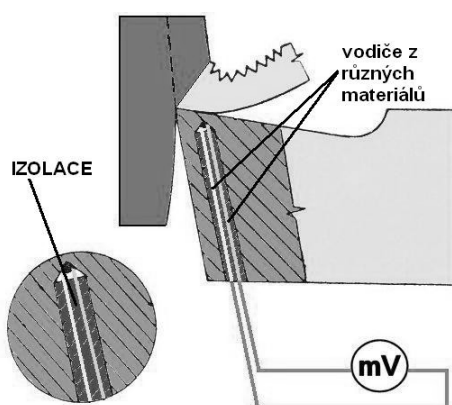
Je vhodné kombinovat vodiče tak, aby tvořily pokud možno lineární charakteristiku, časovou stabilitu a odolnost proti korozi a chemickým vlivům. Jako materiály vhodné na výrobu vodičů pro termočlánky se používá mnoho materiálů.

V tab. 4.1 jsou uvedeny hodnoty termoelektrických napětí (střední hodnoty) pro nejpoužívanější materiály. Při obrábění se k měření teplot a teplotních polí užívají nejen dva druhy vodičů, ale s výhodou i jako vodič materiál nástroje nebo obrobku. Podle provedení je lze rozdělit do těchto skupin:

1. umělý,
2. poloumělý,
3. přirozený,
4. termoduo.

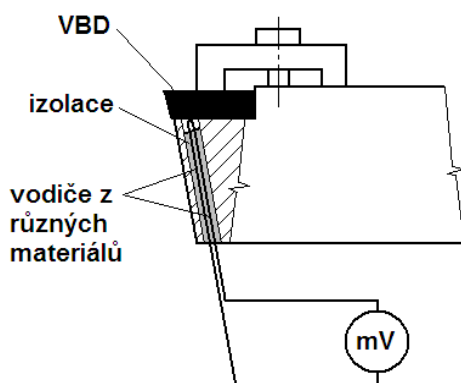
#### 4.1.1. Umělý termočlánek

Podstatou **umělého termočlánku** je přímé umístění termočlánku do místa řezu (měření teploty). S pomocí těchto dvou cizích vodičů lze měřit teplotu v různých místech nástroje i obrobku, vyjma stykových ploch bříty s třískou a plochou řezu. Nejčastěji se používá k měření teploty na bříty nástroje (obr. 4.2).



Obr. 4.2 Schéma zapojení umělého termočlánku [8]

Upravený a izolovaný termočlánek se vloží na dno otvoru v nástroji. Vlastní zabudování termočlánku do nástroje je poměrně složité a lze jen obtížně určit přesnou polohu umístění měřicího spoje termočlánku. Tato poloha zároveň mění i podmínky vedení tepla a často znehodnocuje obráběcí nástroj.



Obr. 4.3 Umělý termočlánek pro nástroj s vyměnitelnou břitovou destičkou [10]

Proto se častěji používá nástrojů s vyměnitelnou břitovou destičkou (slnutý karbid nebo rychlořezná ocel). Termočlánek je stabilně zabudovaný v nástroji a snímá tak teplotu na dolní ploše břitové destičky (obr. 4.3).

Pro izolaci, která je velmi důležitým článkem, se nejčastěji používají skleněné, popř. keramické kapiláry. Srovnávací spoj je umístěn na svorkách milivoltmetru a je udržován na teplotě okolí. Výhodou těchto termočláneků je známost charakteristiky závislosti termonapětí na teplotě (normalizované termočláanky). Nejvíce používané kombinace a jejich vlastnosti jsou uvedené v tab. 4.2.

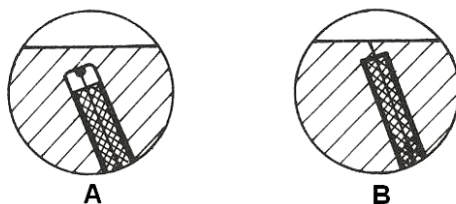
Tab. 4.2 – Nejvíce používané kombinace umělých termočláneků a jejich vlastnosti

označení	+ přívod	- přívod	teplotní rozsah v (°C)	rozsah v (mV)
J	Fe	Cu – Ni	-210 °C - 1200 °C	-8,1 – 69,5
K	Ni - Cr	Ni - Al	-270 °C – 1372 °C	-6,4 – 54,9
T	Cu	Cu – Ni	-270 °C – 400 °C	-6,2 – 20,8
R	Pt (13%) – Rh (13%)	Pt	-210 °C - 1200 °C	-0,2 – 21
G	W	W (26%) – Re (26%)	-50 °C – 1768 °C	0 – 38,5
D	W (3%) – Re (3%)	W (25%) – Re (25%)	0 °C - 2320 °C	0 – 39,5
E	Ni – Cr	Cu - Ni	0 °C - 2320 °C	-9,8 – 76,4

#### 4.1.2. Poloumělý termočlánek

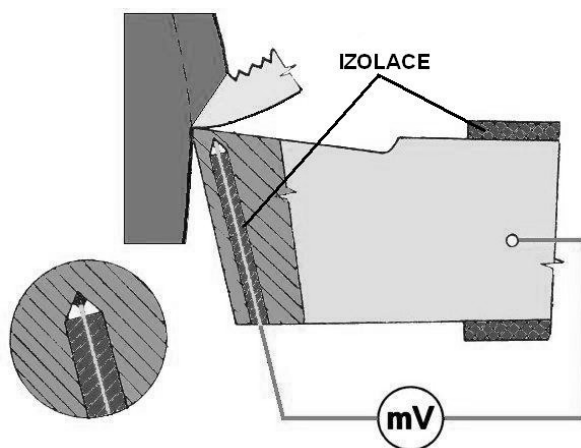
Při **poloumělém termočláunku** tvoří jeden vodič termočláunku materiál nástroje nebo obrobku a druhý cizí vodič vodivě spojený v místě řezu. Na rozdíl od umělých termočláneků jsou více použitelné vzhledem k malým rozměrům cizího vodiče, který lze snáze umístit do místa měření. Jeho využití závisí na možnostech umístění izolovaného vodiče do místa řezu a jeho vodivé spojení s materiálem obrobku nebo nástroje. Schéma zapojení je na (obr. 4.5). Používají se dvě možnosti zapojení (obr. 4.4). První z možností je uspořádání s přivařeným vodičem na dno otvoru (obr. 4.4A) a druhá varianta s vyvedením izolovaného vodiče až na povrch čela břitu (obr. 4.4B). Při řezání deformuje odcházející tříška místo řezu a vytváří tak měřicí spoj termočláunku spolu s břitem nástroje.

Tohoto se dá s výhodou využít při stanovení teploty v oblasti styku třísky s čelem nástroje. Při měření teplotních polí na čele nástroje se používá rozmístění několika cizích vodičů systematicky rozmístěných po čele nástroje. Nástroj a obrobek musí být elektricky odizolovány.

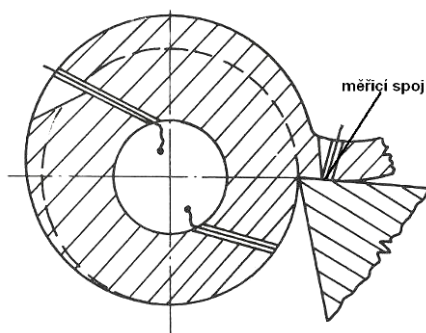


Obr. 4.4 Možnosti zapojení poloumělého termočláňku [10]

Další možností využití poloumělých termočláňků je měření teplot v oblasti primární plastické deformace, kdy je cizí vodič zabudován do odřezávané vrstvy na obrobku (obr. 4.6). Při plastické deformaci této vrstvy a její transformaci v třísku dojde k vodivému spojení a tím pádem měřicího spoje termočláňku. Další aplikace poloumělého termočláňku (při broušení a frézování) jsou uvedeny v dalším textu.



Obr. 4.5 Schéma zapojení poloumělého termočláňku [8]

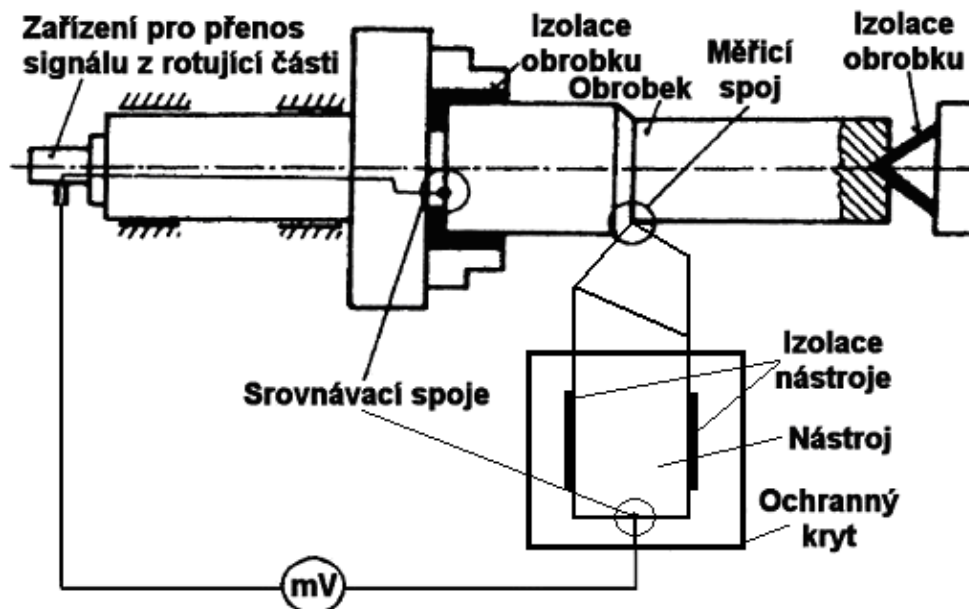


Obr. 4.6 Schéma měření teploty v oblasti plastické deformace [10]

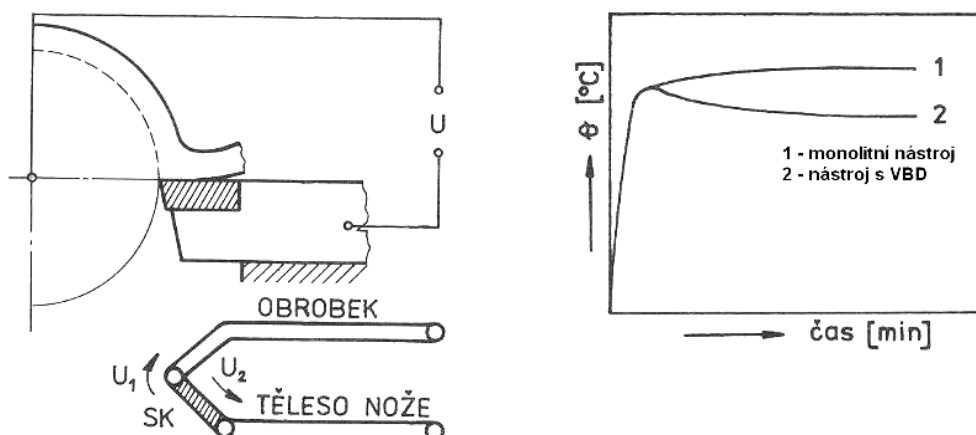
### 4.1.3. Přirozený termočláňek

**Přirozený termočláňek**, jak název napovídá, je bez přídavného cizího vodiče. Jedním z vodičů je materiál nástroje a druhým materiál obrobku. Měřicí spoj je přímo v místě styku břitu nástroje s obrobkem, tzn. na ploše styku třísky s čelem a hřbetu s plochou řezu. Termoelektrické napětí je potom úměrné střední teplotě v oblasti styku – teplotě řezání [20]. Na ploše styku vzniká soustava elementárních termočláňků s různou teplotou v jednotlivých bodech. Výsledné napětí je

proto aritmetickým průměrem termoelektrických napětí těchto mikročlánků. Schéma měření je na (obr. 4.7). Nutnou podmínkou je vzájemné odizolování nástroje a obrobku. Při běžných měřeních většinou postačuje odizolování nástroje od obráběcího stroje, ale pro zvýšení spolehlivosti a přesnosti měření je účelné odizolovat od stroje i obrobek. Nevýhodou přirozených termočlánků je nutnost obtížného a zdlouhavého cejchování systémů pro každou dvojici materiálů nástroje a obrobku.



Obr. 4.7 Schéma zapojení přirozeného termočlánku [8]



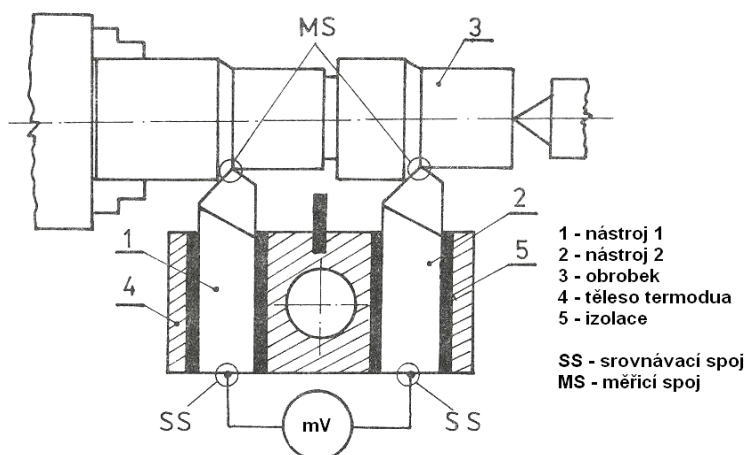
Obr. 4.8 Úbytek napětí a teploty na parazitním termočlánku [8]

#### 4.1.4. Termoduo

Tato metoda je poměrně jednoduchá a nenáročná na přípravu experimentu v porovnání s předchozími metodami. Pro celistvé nástroje dává spolehlivé výsledky. U nástrojů s pájenými nebo vyměnitelnými břitovými destičkami se však postupně prohřívá i styková plocha mezi destičkou a držákem a dochází k tzv. parazitním termočlánkům (obr. 4.8).

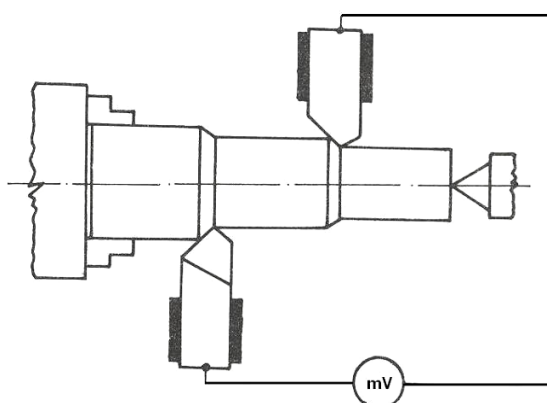
V důsledku vzniku parazitních termočlánků mezi destičkou a tělesem nástroje dochází k postupnému poklesu výsledného termoelektrického napětí na výsledném termočlánku nástroj – obrobek  $U$ . Na tom, jak se podaří eliminovat, či vyloučit parazitní termočlánky přímo závisí i přesnost měření. Tyto se projevují již po 5 – 10 sekundách od začátku měření poklesem napětí a teploty řezání.

Princip termodia spočívá v současném záběru dvou nástrojů z různých materiálů, stejné geometrie, při stejných řezných parametrech, které spolu tvoří vlastní termočlánek. Uspořádání a schéma je na obr. 4.9. Obráběný materiál tvoří s každým z nástrojů měřicí spoj a slouží jako tepelný a elektrický vodič. Materiály obou nástrojů se musí lišit chemickým složením, aby výsledné termoelektrické napětí bylo dostatečně velké a spolehlivě měřitelné. S výhodou lze použít dvojici nástrojů z rychlořezné oceli a slinutého karbidu. Podmínkou pro správnou funkci je odizolování obou nástrojů od stroje a mezi sebou. Výhodou této metody je, že po ocejchování dvojice řezných materiálů lze stanovit teplotu řezání pro jakýkoliv, elektricky vodivý, materiál obrobku.



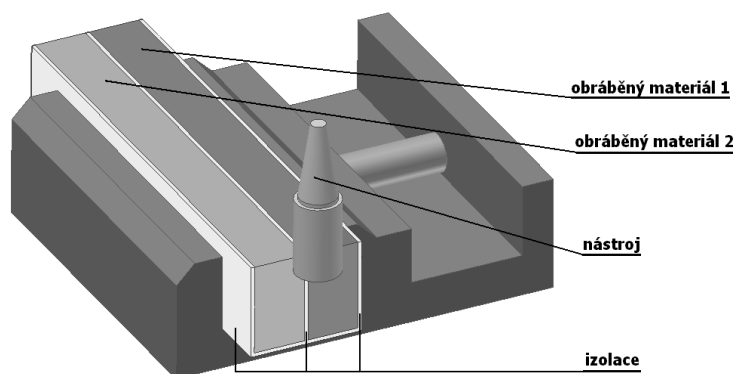
Obr. 4.9 Schéma zapojení termodia [10]

Nevýhodou termodia v uspořádání na obr. 4.9 je velká spotřeba obráběného materiálu, omezená délka obrábění daná roztečí obou nožů spolu s tuhostí upnutí a nutnost úpravy polotovaru na současný záběr obou nožů. Do jisté míry se tyto nedostatky dají eliminovat uspořádáním s noži proti sobě (obr. 4.10). I přes obrábění různými rychlostmi, je chyba vzniklá při použití běžných hloubek řezu téměř zanedbatelná. Výhodou je nastavení minimální rozteče obou nástrojů a možnost měřit i na menších průměrech obrobků, při relativně malé spotřebě materiálu. Toto uspořádání se dá využít i při stanovení obrábělnosti materiálů na základě krátkodobé zkoušky podle teploty řezání [10].



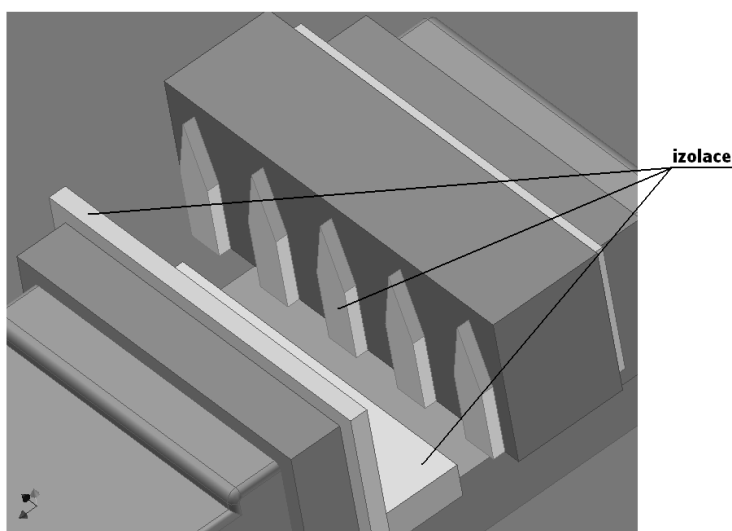
Obr. 4.10 Termodio s uspořádáním nástrojů proti sobě [10]

Tyto druhy termodia jsou použitelné pouze pro soustružení. Pokud chceme stejnou metodu použít i při jiných způsobech obrábění (frézování, vrtání, a pod.). Je nutné konstrukci upravit. Celá úprava spočívá v záměně funkce obrobku a nástroje. Obrábí jedním nástrojem a obrábí se dva nástrojové materiály různého chemického složení (obr. 4.11).



Obr. 4.11 Schéma termodua pro frézování stopkovou frézou [23]

Důležitou podmínkou je nejen odizolování obrobků vzájemně, ale i obrobků od celé soustavy. Důvodem je zamezení vzniku parazitních termočlánků. Tyto termočlánky mohou vznikat i v důsledku špatného odchodu třísky z místa řezu, proto je nutné věnovat tomuto problému patřičnou pozornost. Vhodný způsob izolace je na obr. 4.12, kde tvar izolátorů zabraňuje usazování třísek na povrchu obrobků.



Obr. 4.12 Izolace obrobku u frézovacího termodua [23]

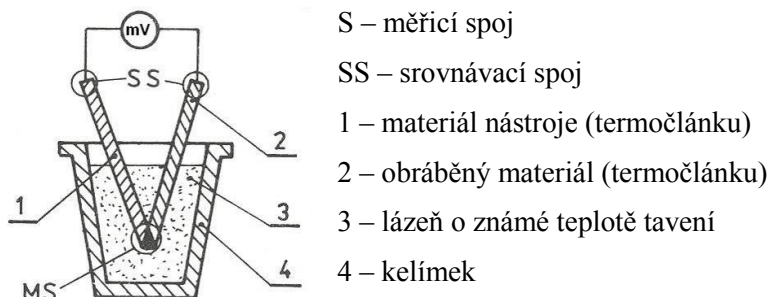
#### 4.1.5. Cejchování termočlánků

Pro stanovení závislosti termoelektrického napětí na teplotě je nejprve nutné konkrétní termočlánek ocejchovat. Tato cejchovní křivka nám potom umožní převést naměřené hodnoty termoelektrického napětí v mV na teplotu ve °C. Cejchování lze provádět třemi základními způsoby:

1. v lázních čistých kovů a slitin
2. v elektrických pecích s teplotní regulací
3. cejchování plamenem

Při **cejchování v lázni čistých kovů a slitin** se známou teplotou tavení se jedná o poměrně jednoduchý a hojně používaný způsob cejchování termočlánků. Pro cejchování je nutné vyrobít tyčinky vhodného průměru a dostatečné délky z materiálu shodného s konkrétním termočlánkem. Cejchování se zpravidla provádí v elektrických kelímkových pískách, kdy se do lázně z materiálu o

známé teplotě tavení (tuhnutí, varu) ponoří cejchovaný termočlánek, zapojený do termoelektrického obvodu (obr. 4.13). Měřicí spoj je obvykle svařen nebo mechanicky stlačen. Srovnávací spoje je vhodné udržovat při stálé teplotě pomocí termostatu, např. v nádobě s proudící vodou nebo ledem). Byly použity kovy o známé teplotě tavení (tab. 4.3).

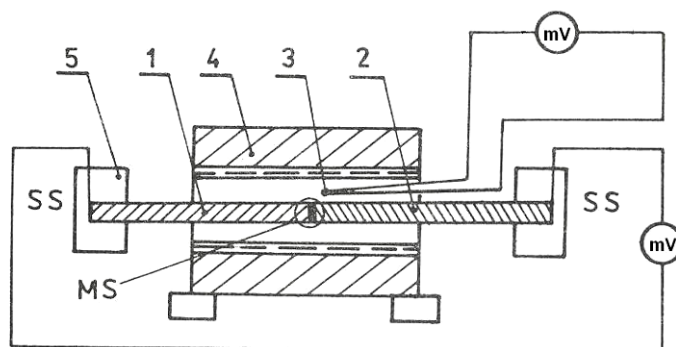


Obr. 4.13 Izolace obrobku u frézovacího termodua [23]

Tab. 4.3 – Střední hodnoty elektrických napětí

Látka	Teplota tavení (°C)	Elektrické napětí (mV)
Cín	232	1,3
Olovo	327	1,95
Hliník	658	4,05
Měď	1 083	6,5

Při cejchování v elektrických pecích s teplotní regulací se používají dva termočláanky. Jeden o známé charakteristice a druhý cejchovaný z obráběného materiálu a materiálu nástroje (obr. 4.14). Při postupném zvyšování teploty se ve vhodných intervalech odečítají ve stejném okamžiku hodnoty termoelektrického napětí obou termočláneků. Je vhodné použít inertní prostředí v peci, aby se tak zabránilo oxidaci měřicího spoje.



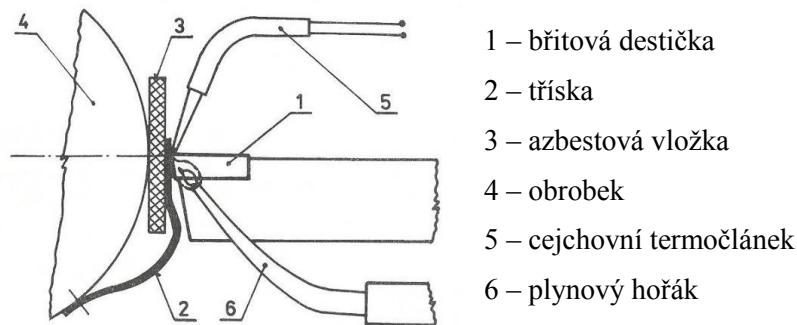
Obr. 4.14 Schéma cejchování v elektrických pecích [10]

MS – měřicí spoj,  
 SS – srovnávací spoje,  
 1 – materiál nástroje,  
 2 – obráběný materiál,  
 3 – cejchovní termočlánek,  
 4 – regulační píčka,  
 5 – termostat

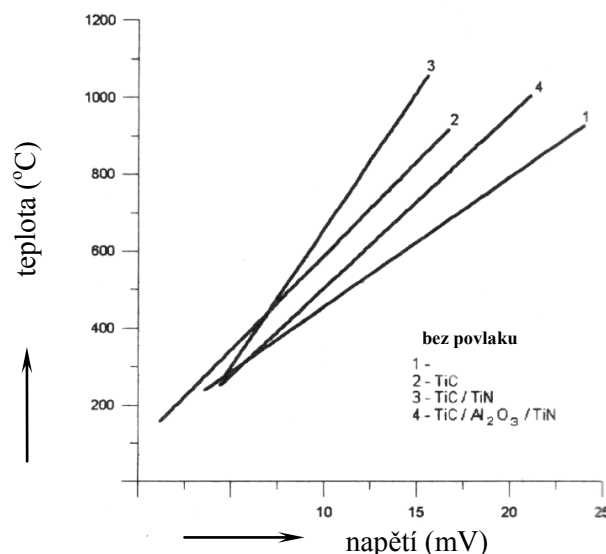


Při **cejchování plamenem** je měřicí spoj vytvořen přitlačením špičky nože k třísce odebrané z obráběného materiálu, která je od místa řezu oddělena azbestovou podložkou a vodivě spojena s obrobkem (obr. 4.15). Do místa styku je umístěn i cejchovní termočlánek se známou termoelektrickou charakteristikou. Stálá teplota je udržována plynovým hořákem. Výstupní hodnoty termoelektrických napětí se odečítají ve stejný okamžik na příslušných milivoltmetrech (obr. 4.16). Tento způsob cejchování je relativně jednoduchý a lehce realizovatelný, ovšem při nižší přesnosti a používá se většinou pouze pro orientační cejchování. Detailní popis této metody je uveden v literatuře [7].

literatuře [7].



Obr. 4.15 Schéma cejchování plamenem [10]



Obr. 4.16 Příklad cejchovacích křivek pro antikorozi ocel 18/8 a různé typy povlaků břitové destičky [7]

## 4.2. Měření teploty pomocí termistorů

**Měření teploty termistory** je založeno na principu využití teplotní závislosti elektrického odporu materiálu. U kovů s rostoucí teplotou elektrický odpor roste, naopak u polovodičů klesá. Vzhledem ke specifickým podmínkám procesu obrábění se téměř výhradně používají polovodičové materiály, které se nazývají termistory. Pod tímto pojmem se rozumí nelineární elektrické součásti, které mají vysokou závislost elektrického odporu na teplotě.



Termistory jsou vyráběny v širokém rozmezí hodnot odporu od  $0,1 \Omega$  až do několika  $M\Omega$ . Pro účely měření se používají nejčastěji perličkové termistory ve skleněném držáku. Průměr perličky bývá  $0,2$  až  $3$  mm. Výhodou termistorů je velká citlivost a malá hmotnost čidla, což umožňuje měření velmi malých a rychlých teplotních změn, bodové měření teploty, měření povrchových teplot apod. Běžný měřicí rozsah teploty je od  $-60$  °C až do  $+200$  °C (výjimečně až do  $400$  °C). Nevýhodnou vlastností termistorů je jejich časová nestálost. Zlepšení lze dosáhnout výběrem a umělým stárnutím.

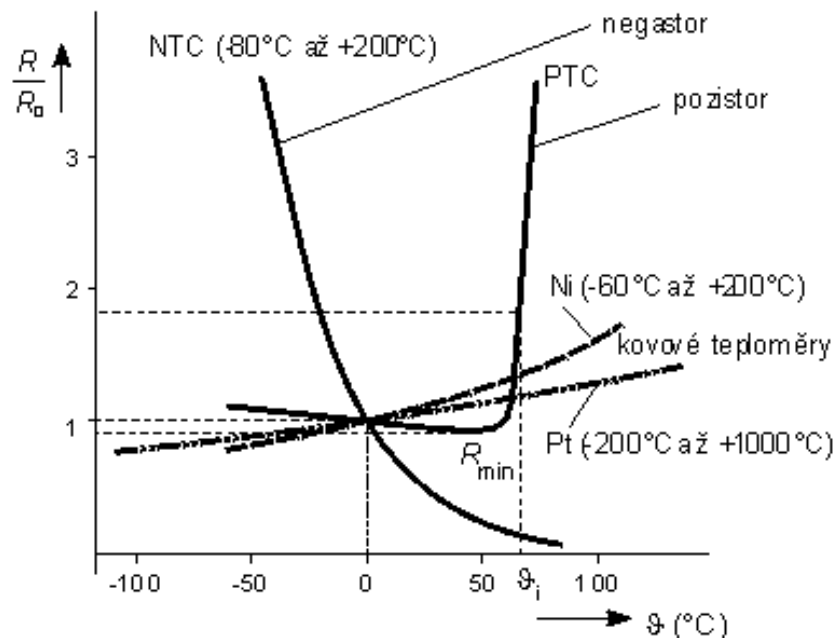
Změna odporu polovodičového termistoru oproti kovovému je asi 10 větší a jsou silně nelineární podle vztahu [23]:

$$R = R_0 \cdot e^{-B \cdot \left( \frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right)} \quad (\Omega) \quad (4.1)$$

$R, R_0$  – odpory termistorů při teplotě  $T, T_0$  ( $\Omega$ ),

$B$  – aktivační energie (J).

Na obr. 4.17 je charakteristická závislost odporu NTC termistoru v porovnání s PTC termistorem a platinovým a niklovým odporovým teploměrem.



Obr. 4.17 Charakteristika závislosti termistorů na teplotě [23]

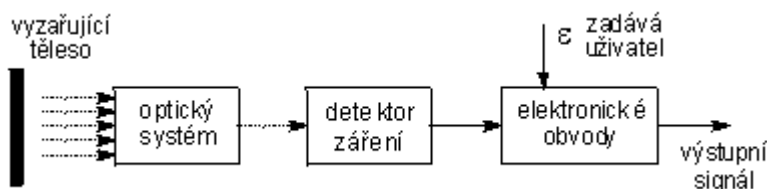
### 4.3. Měření teploty pomocí pyrometrů

**Pyrometry** jsou to bezdotyková měřidla k měření teploty na základě tepelného záření, které vysílají měřené objekty do chladnějšího okolí. Při experimentálním studiu při obrábění se jich využívá především k měření povrchové soustavy stroj – nástroj – obrobek. Používají se, podle jejich využití, dva základní druhy:

1. úhrnné pyrometry (radiační nebo také širokopásmové)
2. fotoelektrické pyrometry (pásmové nebo také úzkopásmové)

### 4.3.1. Úhrnné pyrometry

Úhrnné pyrometry využívají celkového tepelného záření, které vyzařuje těleso v celém spektru vlnových délek. Tepelné záření je soustředěno optickou soustavou na teploměrné čidlo (přijímač, obr. 4.18). Tím bývá nejčastěji termočlánek nebo odporový teploměr. Termoelektrické napětí se potom měří nejčastěji milivoltmetrem se stupnicí, která je kalibrována přímo ve °C.



Obr. 4.18 Schéma úhrnného pyrometru

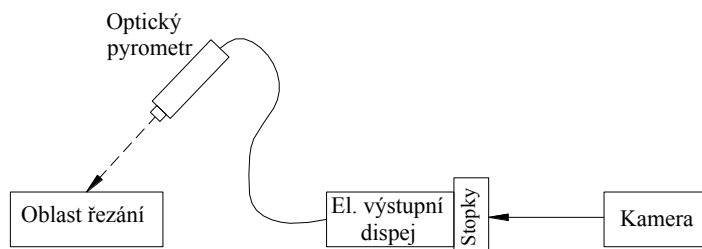
Všechny radiační pyrometry pracují s malými chybami pouze v případech, kdy emisivita  $\varepsilon \rightarrow 1$ . Tuto podmínku splňují dobře uzavřené prostory, objekty bez lesku apod. Aby pyrometr měřil teplotu zářiče správně, musí být zaručeno, že na přijímač záření dopadají jen tepelné paprsky zářiče. Zdrojem častých chyb je rušivě působící denní světlo; např. těleso ozářené sluncem nelze měřit.

Ke zpracování signálu se u současně vyráběných přístrojů využívá moderních elektronických obvodů řízených mikroprocesorem. Do paměti se ukládají údaje o maximální a minimální měřené teplotě, střední hodnota teploty a údaj o rychlosti změny teploty. Na displeji je k dispozici měřený údaj i hlášení o poruchových stavech.



Obr. 4.19 Optický pyrometr MAURER KTR 1085 s číslicovým výstupem

Měřicí soustava byla složena z pěti částí (obr. 4.19 a 4.20). Pyrometr byl zaměřen na oblast řezání, konkrétně přímo na špičku nástroje. Výstup z tohoto optického pyrometru byl připojen do elektronického výstupního displeje ALMEMO u něhož v těsné blízkosti byly i digitální stopky, které spolu s číslicovým displejem byly v průběhu měření zaznamenávány digitální kamerou.



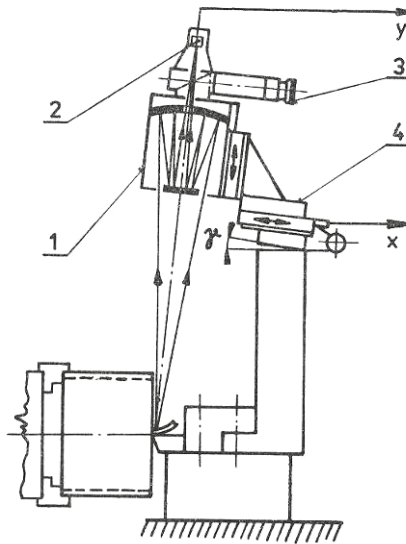
Obr. 4.20 Blokové schéma zapojení pyrometru MAURER KTR 1085

### 4.3.2. Fotoelektrické pyrometry

Při měření fotoelektrickými pyrometry se využívá pouze určité šíře spektra tepelného záření, které je vymezen optikou, filtry a spektrální citlivostí fotoelektrického čidla. Jako čidla se používají fotonky, fotočlánky, fotodiody, apod. Výhodou těchto měřidel je velmi rychlá reakce na změnu teploty a dostatečná přesnost a citlivost v daném spektrálním pásmu.

Pásmových pyrometrů lze s výhodou použít tam, kde mezi měřeným objektem a pyrometrem jsou plyny s absorpčními pásmy v oblasti infračerveného záření ( $\text{CO}_2$ , vodní pára apod.). V tomto případě se používá pyrometrů s takovými čidly, kdy se absorpce neuplatňuje. Při obrábění se těchto pyrometrů využívá především pro měření teploty na povrchu třísky (obr. 4.21), břitu nástroje nebo povrchu obrobku.

Do této skupiny pyrometrů můžeme zařadit i jasový pyrometr (obr. 4.22), u něhož se využívá k měření teploty úzkého spektrálního pásma v oblasti viditelného záření. Přístroj pracuje kompenzační měřicí metodou, při níž se porovnává záře měřeného objektu se září srovnávacího zdroje při určité vlnové délce, vymezené barevným filtrem. Provádí-li se porovnávání záře subjektivně, tzn., že čidlem pyrometru je lidské oko, hovoříme o optickém pyrometru.

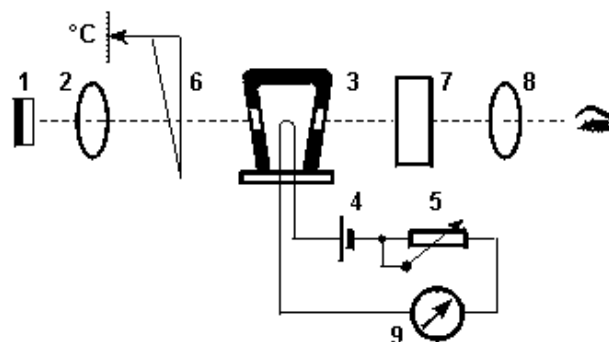


Obr. 4.21 Schéma měření teploty třísky pásmovým pyrometrem [10]

- 1 – optická soustava,
- 2 – fotoodpor,
- 3 – okulár
- 4 – posuvový mechanismus s odměřováním, x, y – výstupní signály

Obraz měřeného objektu je vytvářen objektivem v rovině vlákna pyrometrické žárovky. Wolframové vlákno žárovky je žhveno proudem z baterie, jehož velikost se reguluje reostatem. Pozorovatel sleduje obraz objektu a vlákno žárovky okulárem přes červený filtr, který vymezuje vlnovou délku. Záře vlákna žárovky se reguluje až do okamžiku, kdy vlákno svou září splyne se září pozorovaného objektu. Měřicí přístroj zařazený v obvodu žárovky je opatřen teplotní stupnicí.

- 1 – měřený objekt
- 2 – objektiv
- 3 – pyrometrická žárovka
- 4 – baterie
- 5 – reostat
- 6 – šedý klín
- 7 – červený filtr
- 8 – okulár
- 9 – měřicí přístroj



Obr. 4.22 Jasový pyrometr [6]

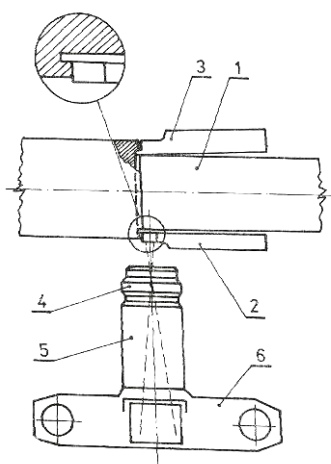
U některých typů optických pyrometrů je žhavicí proud vlákna konstantní a porovnání září se provádí zasouváním šedého klínu. Zasunutí šedého klínu je funkcí měřené teploty.

Optické pyrometry umožňují měření v rozsahu 700 °C až 2 300 °C. Přesnost je závislá na rozsahu; na nejnižším rozsahu do 1 500 °C je  $\pm 25$  °C.

### 4.3.3. Fotografické měření

**Fotografické měření teplotního pole** je založeno na citlivosti fotografického materiálu na infračervené záření vysílané měřeným tělesem. Umožňuje nám změřit teplotní pole povrchu tělesa, jehož teplota se výrazně mění. Tepelné záření je přes optiku snímáno na fotografickou desku s emulzí citlivou na infračervené světlo. Po vyvolání je zřejmý obraz teplotního pole. Čím vyšší stupeň černé barvy, tím je teplota měřeného tělesa vyšší. Nevýhodou je nutnost srovnávacího měření se známým rozložením teplot, jako srovnávacího teplotního měřítka.

Příklad a schéma měření je na obr. 4.23, kde dochází k soustružení čelní plochy dvěma nástroji. Při tomto uspořádání je měřená plocha velmi dobře dostupná snímací kameře. Dnes je možné využít pro snímání i infračervené CCD kamery.

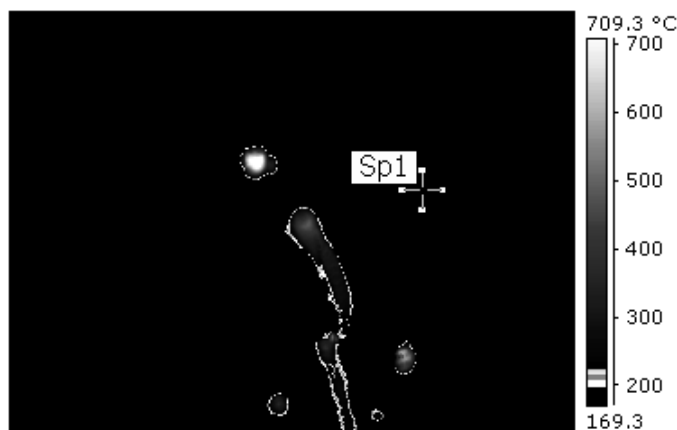


- 1 – obrobek,
- 2 – zkušební nástroj,
- 3 – zapichovací nůž,
- 4 – objektiv,
- 5 – tubus,
- 6 – fotopřístroj

Obr. 4.23 Schéma měření termokamerou [10]

Dnes existuje řada dalších a přesnějších metod měření teploty při řezání. Vyžadují ale moderní měřicí zařízení. V současné době jsou již značně rozšířeny termografické (**termovizní**) systémy, využívané ke snímání, zobrazování a vyhodnocování teplotních polí v mnoha oborech činnosti. Významné je i jejich použití ke sledování výrobních procesů a technologických zařízení prostřednictvím pevně (stabilně) zabudovaných termovizních systémů. On-line sledování míst s kritickou teplotou je přínosem nejen při sledování a řízení technologických procesů a zařízení, ale umožňuje také následně dokumentovat kvalitu výrobku.

Z hlediska studia teplotních jevů při procesu obrábění představuje termovize velmi přesnou a progresivní metodu v experimentálním výzkumu teplot při řezání. Předností této metody je záznam i velmi rychlé změny teploty, což je důležité především pro posouzení dynamických jevů. Uspořádání je v podstatě obdobné jako u termokamery tzn., že termovize je umístěna na suportu a objektiv je zaměřen přímo do oblasti řezu. Velkou výhodou tohoto profesionálního systému je možnost vybrat si ze snímku jeden či více bodů, kde můžeme mj. zjistit okamžité teploty v místě řezu či zobrazit celé teplotní pole obráběcího nástroje (obr. 4.24). Důležitou věcí je správné nastavení emisivity měřeného materiálu obrobku. V odborné literatuře se vyskytuje velké množství údajů o emisivitě oceli. U většiny literárních údajů o emisivitě oceli je jen mlhavý údaj o typu oceli – většinou se autoři omezují na udání základní třídy. Např. emisivita použité oceli 12 060 je udávána v rozmezí 0,85 – 0,92 [23].



Obr. 4.24 Analýza místa řezu po úpravě v ThermaCam QuickView 1.3 [23]

#### 4.4. Teplotní indikátory

**Teplotními indikátory** jsou to termochemické teploměry, kterými se dají určovat místa se stejnou teplotou, tzv. izotermy. Po nanesení těchto látek na povrch zkoumané součásti nastává po dosažení její určité teploty ke změně barvy, či skupenství. Teplotní pole získat poměrně rychle, bez náročných příprav na měření a bez poškození nástroje, či obrobku. Nevýhodou tohoto měření je nemožnost získání přehledu o teplotě v místě styku obráběcího nástroje s třískou a výroba těchto látek je pouze pro malý rozsah teplot.

Mezi nejpoužívanější indikátory patří [10]:

1. teploměrné barvy (thermocolors)
2. teploměrné tužky (thermocrayons)
3. teploměrné křídly nebo vosky

**Teploměrné barvy** jsou to chemické nátěry, které také při dosažení určité teploty (tzv. teplota zvratu) změni svou původní barvu. Jsou buď ve formě prášku a před použitím se rozmíchají v alkoholu, nebo jsou v tekutém stavu, případně jako sprej. Nanášejí se před ohřevem. Teplotní rozsah bývá od 40°C do 1400°C. V místě kde se dosáhne teploty zvratu, se změni barevná stopa.

**Teploměrné tužky** na rozdíl od barev se nanášejí obvykle na ohřátý povrch. Bývají jednozvrtné nebo dvojitě zvrtné (dosahují dvou barevných změn při dvou teplotách zvrtnutí). Teplotní rozsah bývá až do 1400°C.

**Teploměrné vosky a křídly** při dosažení určité teploty mění pevné skupenství na kapalné, popřípadě změni i svou původní barvu. Nanášejí se taktéž na ohřátý povrch a dodávají se v sadách pro určitý rozsah teplot.



## Shrnutí kapitoly

V této kapitole jsme se seznámili s metodami měření teplot při obrábění. Konkrétně s metodami založenými na principu měření pomocí termočlánků, termodua, termistorů, pyrometrů a teplotních indikátorů.



## Kontrolní otázky

1. Vyjmenujte metody měření teploty při obrábění?
2. Jakého jevu se používá při měření termočlánky?
3. Jaké termočlánky znáte?
4. Jaké jsou metody cejchování termočlánků?
5. Jaké znáte teplotní indikátory?
6. Jaké znáte typy pyrometrů?
7. Na jakém principu funguje měřená teplot pomocí termistorů?
8. Popište princip měření pomocí termodua.



## Další zdroje

1. AHLBORN, E.: *Návod k obsluze – Univerzální převodník ALMEMO 8390-1*, AHLBORN und Regelungstechnik GmbH, Holzkirchen. 2000
2. BEŇO, J.: *Teória rezania kovov*, Viena Košice 1999
3. BOJTOŠ, P.: *Vplyv rezných kvapalín na proces brúsenia ložiskovej ocele*, DDP Sjf, ŽU 2000
4. CZÁN, A. – NOVÁK, S.: *Monitoring of temperatures in milling stainless steel*, OM 2000, Krakow, p. 33-41
5. CZÁN, A. - TUROŠÁKOVÁ, E.: *Meranie teploty pri frézovaní niklovej zliatiny*, Obrábanie 2000, Súľov 3.-4. 10. 2000, str. 52-57
6. GAŠPÁREK, J.: *Dokončovacie spôsoby obrábania*, ALFA Bratislava, 1979
7. GRZESIK, W.: *The role of coating in controlling the cutting process when turning with coated indexable inserts*, Materials Processing Technology 79/1998, p. 133-143
8. HUMÁR, A.: *Slinuté karbidy a rezná keramika pro obrábění*. Brno : CCB spol. s r. o. Brno ISBN 80-85825-10-4
9. JEAGER, J.C.: *Moving Source of Heat and the Temperature at Sliding Contact*, Proc. of the Royal Society of New South Wales, 76/1942, p. 203-224

10. MÁDL, J. - SCHUBERT, V.: *Experimentální metody a optimalizace v teorii obrábění*. Praha : ČVUT Praha, 1985
11. MASLOV, J.N.: *Teorie broušení kovů*, SNTL Praha, 1979
12. MILLS, B. - WAKEMAN, D. W. - ABOUKHASHABA, A. - CHISHOLM, A. W. J.: *A new technique for determining the temperature distribution in high speed steel cutting tools using scanning electron microscopy*, CIRP, vol.,1/1980, pp . 73
13. NESLUŠAN, M.: *Analýza tepelnej bilancie pri brúsení titánovej a niklovej zliatiny*, Habilitačná práca, Sjf, ŽU 2002
14. NESLUŠAN, M.- CZÁN, A.: *Obrábanie titánových a niklových zliatin*, EDIS Žilina, 2001, ISBN 80-7100-933-4
15. NESLUŠAN, M. – PILC, J. – JURKO, J.: *Telepná bilancia pri brúsení niklových a titánových zliatin*, Materiálové inžinierstvo 2/2003, str.53 – 61, ISSN 1335-0803
16. NESLUŠAN, M. – ŠTEKLÁČ, D.: *Energy partitioning when grinding Ni-base superalloy EI 698 VD*, OM 2000, Krakow, p. 203-209
17. NESLUŠAN, M. – ŠTEKLÁČ, D.: *Prerozdeľovanie tepla pri brúsení titánovej zliatiny VT 9*, Komunikácie, 3/2000, str. 15-20
18. PEKLENIK, J.: *Ermittlung von geometrischen and physicalischen Kenngrößen für die Grundlagenforschung des schleifens*, PhD. Thesis, 1957, Aachen
19. PÍŠKA, M.- FOREJT, M. - HUMÁR, A. - JANÍČEK, D.: *Experimentální metody – syllabus*. Brno : VUT Brno, 2003. 83 s. Dostupné na <http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/?page=opory>
20. PŘIKRYL, Z. - MUSILÍKOVÁ, R.: *Teorie obrábění*. 3. opravené vydání, Praha : SNTL Praha, 1982
21. REZNIKOV, A.N.: *Teplofizika rezania*, Mašinstrojenie Moskva 1969
22. ROWE, S.C. - BLACK, B. - MILLS, H.S. - QI, M.N. - MORGAN, M.: *Experimental investigation of heat transfer in grinding*, Ananals of the CIRP, vol., 1/1995, pp. 329
23. ŠTĚPÁNEK, R.: *Identifikace teploty při obrábění : doktorská disertační práce*. Ostrava : Fakulta strojní VŠB-TU Ostrava, 2006.
24. UEDA, T. - SATO, M. - SUGITA, T. - NAKAYAMA, K.: *Thermal behaviour of cutting grain in grinding*, Ananals of the CIRP, vol, 1/1995, pp.325
25. VASILKO, K. - BOKUČAVA, G.: *Brúsenie kovových materiálov*, ALFA Bratislava, 1988



## CD-ROM

Na prvním videu je zobrazeno měření teploty pomocí optického pyrometru. Nejprve je vidět jak správně zaměřit optiku na hrot nástroje a poté měření při konkrétních řezných parametrech.

Na druhém videu je vidět jak se měří teplota v místě řezu pomocí termodua. Měření je vykonáno při různých řezných parametrech. Je vidět hodnoty termoelektrického napětí, které je potom nutné přepočítat pomocí převodní tabulky na hodnoty v °C.



## Klíč k řešení

- O 4.1 Pomocí termočlánků, termodua, termistorů, pyrometrů a teplotních indikátorů.
- O 4.2 Při měření termočlánky se využívá tzv. termoelektrického jevu. Tento jev využívá vzniku

termoelektrického napětí (termoelektromotorické síly), v obvodu tvořeného dvěma různými vodiči, jejichž konce jsou vodivě spojeny, jestliže jsou oba spoje udržovány na různých teplotách.

- O 4.3 Uměly, poloumělý, přirozený a termodua.
- O 4.4 Cejchování v lázni čistých kovů a slitin, cejchování v elektrických pecích s teplotní regulací, cejchování plamenem .
- O 4.5 Teploměrné barvy (thermocolors), teploměrné tužky (thermocrayons), teploměrné křídly nebo vosky
- O 4.6 úhrnné pyrometry (radiační nebo také širokopásmové) a fotoelektrické pyrometry (pásmové nebo také úzkopásmové).
- O 4.7 Měření teploty termistory je založeno na principu využití teplotní závislosti elektrického odporu materiálu. U kovů s rostoucí teplotou elektrický odpor roste, naopak u polovodičů klesá.
- O 4.8 Princip termodua spočívá v současném záběru dvou nástrojů z různých materiálů, stejné geometrie, při stejných řezných parametrech, které spolu tvoří vlastní termočlánek.



## 5. MĚŘENÍ OPOTŘEBENÍ NÁSTROJŮ

Po úspěšném a aktivním absolvování této KAPITOLY

### Budete umět:

- Znat klasifikaci typů opotřebení.
- Znat formy opotřebení podle normy ISO 3685.
- Aplikovat přímé metody měření opotřebení.
- Aplikovat nepřímé metody měření opotřebení.

**Budete umět**

### Budete schopni:

- Sledovat a měřit opotřebení pomocí přímých metod.
- Sledovat a měřit opotřebení pomocí nepřímých metod.
- Rozlišit a poznat jednotlivé typy opotřebení.

**Budete schopni**



**Čas ke studiu: 4 hodiny**

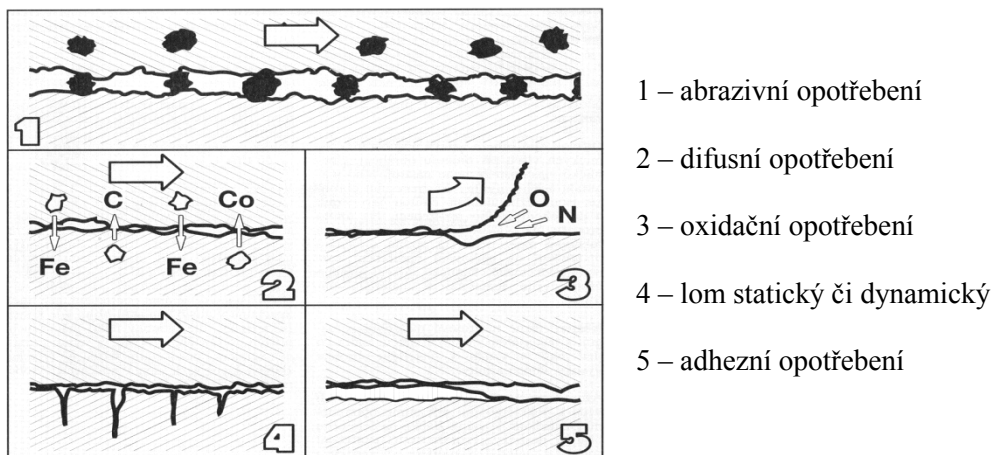


**Výklad**

Při obrábění vzniká velké množství tepla, které se vyvíjí na ploše hřbetu a čela nástroje. Tepelná zatížení značně namáhají materiál břitu nástroje a v některých případech (např. frézování) vytváří dynamický faktor v okamžiku, kdy jeden břit z materiálu vystupují a opět do něj vniká [11]. Procesem utváření třísky se průběžně vytváří čistý kovový povrch při vysokém tlaku a teplotě, který má sklon k chemickým reakcím nebo k difúzním procesům. Většina obráběných materiálů obsahuje tvrdé částice různého druhu. Tyto částice nezdědka dosahují tvrdosti materiálu břitu nástroje. Dochází tak k brousicímu nebo abrazivnímu efektu.

Kombinací výše uvedených mechanických, tepelných, chemických a abrazivních faktorů (*obr. 5.1*) dochází ke složitému zatěžování břitu nástroje. Toto se pak projevuje opotřebením nástroje. K základním mechanismům opotřebení patří zejména [13, 21]:

- abraze (brusný otěr vlivem tvrdých mikročástic obráběného materiálu i mikročástic uvolněných z nástroje),
- adheze (vznik a okamžité následné porušování mikrosvarových spojů na stýkajících se vrcholcích nerovností čela a třísky, v důsledku vysokých teplot a tlaků, chemické příbuznosti materiálů a kovově čistých styčných povrchů),
- difúze (migrace atomů z obráběného do nástrojového materiálu a naopak, a z ní vyplývající vytváření nežádoucích chemických sloučenin ve struktuře nástroje),
- oxidace (vznik chemických sloučenin na povrchu nástroje v důsledku přítomnosti kyslíku v okolním prostředí),
- plastická deformace (důsledek vysokého tepelného a mechanického zatížení, kumulovaného v čase), která se může ve svém nejnepríznivějším důsledku projevit ve formě tzv. lavinového opotřebení,
- křehký lom (důsledek vysokého mechanického zatížení, např. přerušovaný řez, nehomogenita a vměstky v obráběném materiálu, atd.).



Obr. 5.1 – Hlavní mechanismy opotřebení břitů nástrojů [9]

Abraze a adheze jsou též obvykle označovány jako fyzikální mechanismy opotřebení, difúze a oxidace jako chemické, všechny působí v průběhu času plynule, s tím, že časový okamžik začátku jejich působení nemusí být vždy shodný. Plastická deformace a křehký lom jsou naproti tomu mechanismy, které působí náhle, v daném okamžiku a obvykle způsobí okamžité ukončení činnosti nástroje (náhlá změna tvaru břitu nástroje, lavinové opotřebení nebo ulomení špičky). Hřbet nástroje se opotřebovává především v důsledku abraze a oxidace, čelo v důsledku adheze, difúze, abraze a oxidace. Na skutečnost, zda se nástroj bude více opotřebovávat na hřbetě nebo na čele (příp. na špičce), mají výrazný vliv i další faktory, jako je např. geometrie nástroje, druh operace (hrubování, dokončování) a v neposlední řadě i řezné podmínky (řezná rychlost, posuv, šířka záběru ostří, řezné prostředí). V podstatě lze proces obrábění sledovat tolika způsoby, kolik signálů o svém okamžitém stavu vysílá do svého okolí [22].

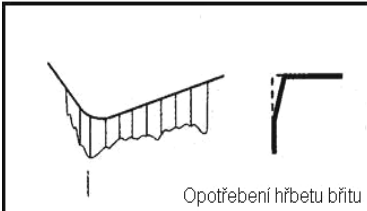
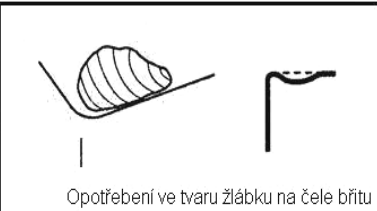
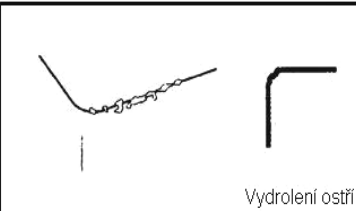
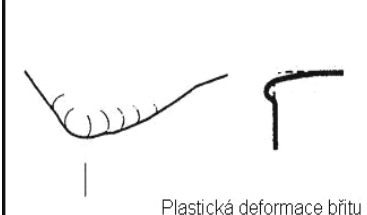

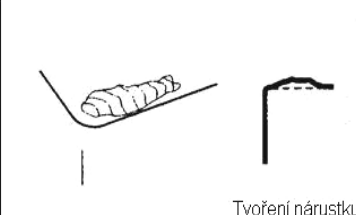
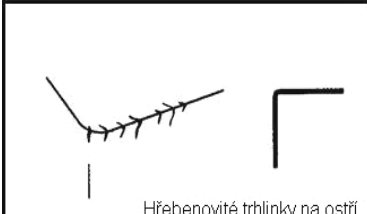
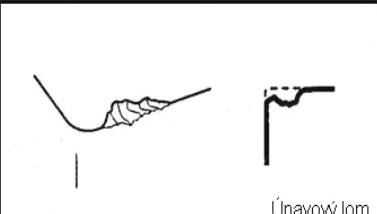
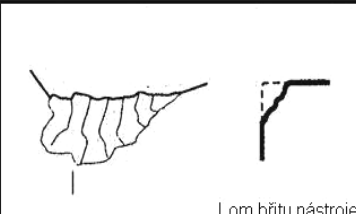
## 5.1. Klasifikace typů opotřebení

Klasifikace typů opotřebení břitu nástroje byla provedena za účelem vytvoření báze pro posouzení operací obrábění a tím i možnosti ovlivnění produktivity. Mimo to jsou pro volbu správných druhů řezných nástrojových materiálů a pro určení odpovídajících parametrů obrábění k dispozici následující kritéria obrábění:

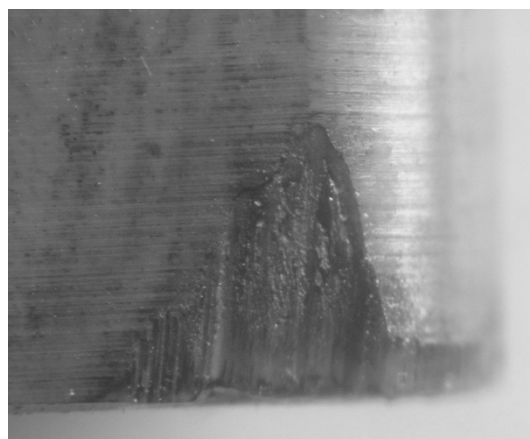
- přesnost rozměrů,
- jakost obrobené plochy
- kontrolovaný odchod třísky.

Pohled na břit při zvětšení a posouzení, jaká opotřebení jsou na něm viditelná, umožňuje kontrolovat vhodnost trvanlivosti, její spolehlivost a dokonce i možnost jejího prodloužení. Pro každý proces existuje optimální průběh opotřebení. Správný nástroj a odpovídající řezné podmínky, kvalifikovaná odborná pomoc, vlastní zkušenost, dobrá jakost materiálu obrobku a dobré podmínky pro obrábění jsou důležitými předpoklady pro vznik optimálního průběhu opotřebení. V tab. 5.1 je uvedena klasifikace jednotlivých typů opotřebení, tak jak je ve své literatuře uvádí firma Sandvik Coromant [17].

Tab. 5.1 Klasifikace druhů (typů) opotřebení [17]

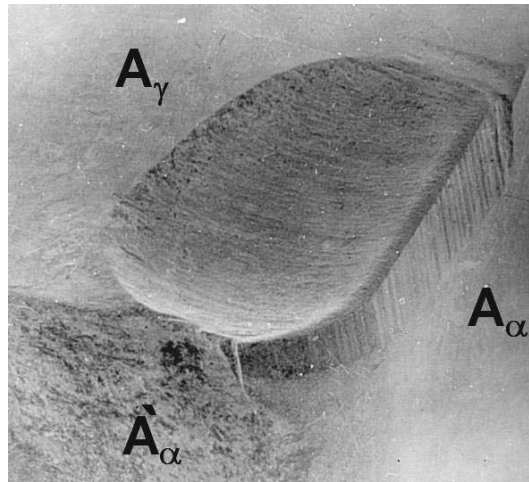
 Opotřebení hřbetu břítu	 Opotřebení ve tvaru žlábků na čele břítu	 Vydrolení ostří
 Plastická deformace břítu	 Opotřebení ve tvaru vrubu na hřbetě břítu	 Tvoření nárustku
 Hřebenovité trhlínky na ostří	 Únavový lom	 Lom břítu nástroje

**Opotřebení hřbetu břítu** patří mezi abrazivní formy opotřebení a projevuje se na hřbetní ploše břítu (obr. 5.2). Plochy hřbetu u hlavního ostří, vedlejšího ostří, poloměru špičky a na čelní fasetce jsou před utvářením, během utváření a po utváření třísky zvláště vystaveny působení materiálu obrobku. Opotřebení hřbetu je všeobecně obvyklým typem opotřebení. Stejněměrně se zvětšující opotřebení hřbetu je často považováno za ideální. Příliš velké opotřebení hřbetu má za následek zhoršení jakosti obrobku, nepřesnost rozměrů a narůstání tření, které vzniká změnou geometrie břítu.



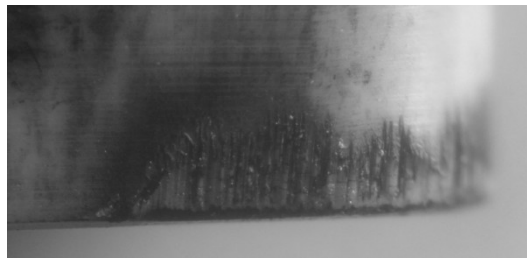
Obr. 5.2 Opotřebení na hřbetu nástroje [4]

**Opotřebení ve tvaru žlábků na čele** je důsledkem působení mechanismů difúzního opotřebení a abraze. Žlábek vzniká částečně úběrem rezného materiálu nástroje vyvolaného brousícím pochodem, které vzniká působením tvrdých částic obsažených v materiálu, ale zejména difúzí v místě břítu s nejvyšší teplotou, tzn. v kontaktním místě mezi třískou a materiálem břítu. Tvrdost za tepla a malá afinita mezi materiálem obrobku a břítu nástroje snižují tendenci ke vzniku tohoto opotřebení. Mimořádně velké opotřebení v podobě žlábků může změnit geometrii břítu a ovlivnit tak tvar třísky, změnit směr působení rezných sil a zeslabit břit (obr. 5.3).



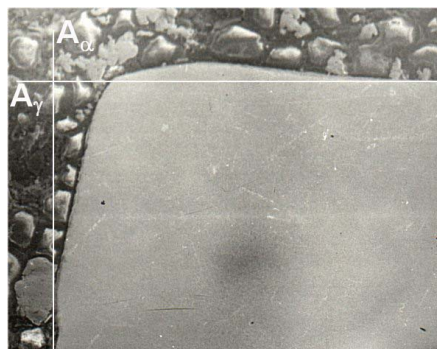
Obr. 5.3 Opotřebení ve tvaru žlábků [23]

**Vydrolení ostří** je formou opotřebení, při níž se břit místo stejnosměrného opotřebení vydroluje (obr. 5.4). Toto opotřebení je způsobeno špičkami zatížení a vede k tomu, že se drobné částičky řezného nástrojového materiálu začnou oddělovat z povrchu břitu. Nejčastější příčinou tohoto typu opotřebení je obrábění přerušovaným řezem. Pečlivé sledování břitu ukáže, kde je možné očekávat vydrolování. Odlupování materiálu a trhliny jsou příznaky, které upozorňují na možnost lomu břitu. Dalšími faktory způsobující tento typ opotřebení mohou být nevhodná volba řezného materiálu, nebo nevhodná volba ostří.



Obr. 5.4 Vydrolení ostří nástroje [4]

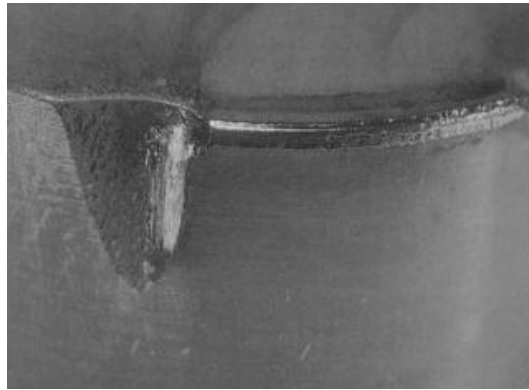
**Plastická deformace břitu** vzniká působením kombinace vysokých teplot a řezných tlaků na břit (obr. 5.5). U řezného materiálu nástroje, který těmto zatížením odolává a plasticky se nedeformuje, je tvrdost za tepla rozhodujícím faktorem. Typická deformace (vyboulení) břitu ještě více zvyšuje teploty a má za následek změnu geometrie břitu, změny v odchodu třísek a může velmi rychle dosáhnout kritického stádia. Toto opotřebení lze zmenšit použitím vhodného řezného materiálu s vyšší otěruvzdorností, správného zaoblení ostří a volbou správné geometrie.



Obr. 5.5 Plastická deformace břitu [23]

**Opotřebení ve tvaru vrubu na hřbetě břitu** patří k typickým adhezním opotřebením. Může však stejně dobře souviset s jevem oxidačního opotřebení. Vruby vznikají v místě kontaktu břitu s bokem třísky (*obr. 5.6*). Toto opotřebení se omezuje přesně na to místo, kudy proniká vzduch do oblasti obrábění.

Opotřebení ve tvaru vrubu na vedlejším hřbetu břitu má mechanické příčiny. Jejich původcem jsou tvrdé částice materiálu obrobku. Mimořádně velké opotřebení ve tvaru vrubu ovlivňuje utváření třísky a může vést k lomu destičky.



*Obr. 5.6 Opotřebení ve tvaru vrubu [17]*

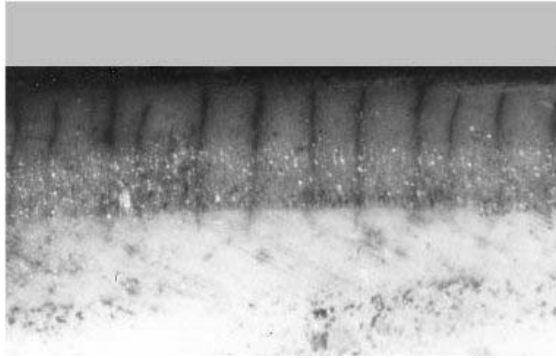
**Tvoření nárůstku** je v převážné většině případů fenoménem, vztahující se k teplotám a řezným rychlostem. Může však být způsobena i odlupováním vrstev v místě břitu nebo jinými formami opotřebení. Mimo změny geometrie břitu působí tato forma opotřebení negativně, protože se mohou částice materiálu odlomit (*obr. 5.7*). Afinita břitu k materiálu hraje v tomto případě rozhodující roli. Nízké teploty a vysoké tlaky vyvolávají mezi materiálem třísky a čelem nástroje efekt svařování.

Velká část moderních způsobů obrábění probíhá nad oblastí tvorby nárůstku a mnohé moderní řezné materiály nemají při správném použití k této formě opotřebení sklony. Prvním negativním důsledkem tvorby nárůstku je zhoršená jakost obrobku. Nadměrná tvorba nárůstků může vést až k lomu VBD.



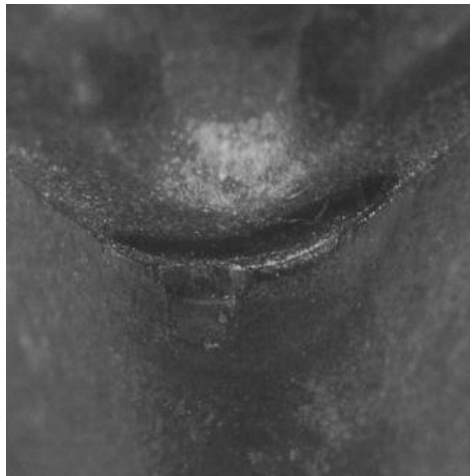
*Obr. 5.7 Tvorba nárůstku na hřbetě [17]*

**Vznik hřebenových trhlinek** na ostří je formou únavového opotřebení, které vzniká tepelným šokem. Zvláště změna teplot při frézování často vede k tomuto druhu opotřebení. Trhlinky se tvoří kolmo na ostří. Přitom se mohou částice řezného materiálu mezi jednotlivými trhlinkami vylamovat a vyvolat tak náhlý lom břitu. Změnou tloušťky třísky se při obrábění změní rovněž teploty. Použití chladicích kapalin se nedoporučuje, protože zvyšuje rozdíl teplot při záběru břitu do materiálu obrobku a při výstupu z něj.



*Obr. 5.8 Vznik hřebenovitých trhlinek [23]*

**Únavový lom** je typickým následkem mimořádně velkých změn velikosti řezných sil. Tento druh lomu vzniká vlivem součtu neustále se měnících různých zatížení, kdy působení jednotlivých zatížení není dostatečně intenzivní, aby mělo za následek lom. Způsob vřezávání nástroje do materiálu obrobku a změna velikosti a směru působení řezné síly mohou být pro pevnost a houževnatost VBD příliš náročné. Lomové plochy probíhají paralelně s ostřím.



*Obr. 5.9 Únavový lom [17]*

**Lom břitu nástroje** je osudným koncem každého břítu (*obr. 5.10*). Totální lom je často velmi nebezpečný a mělo by se mu za každých okolností zabránit. Lom břitu nástroje je nutné v každém případě považovat za konec trvanlivosti. Změny geometrie, oslabení břitu, nárůst teplot a sil mohou vést ke značným škodám. Křehký lom může být způsoben různými faktory. Velmi často je zvolený materiál břitu málo houževnatý na to, aby mohl zvládnout všechny požadavky na obrábění.

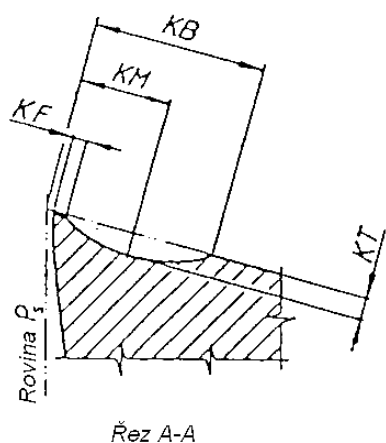


*Obr. 5.10 Lom břitu nástroje [17]*

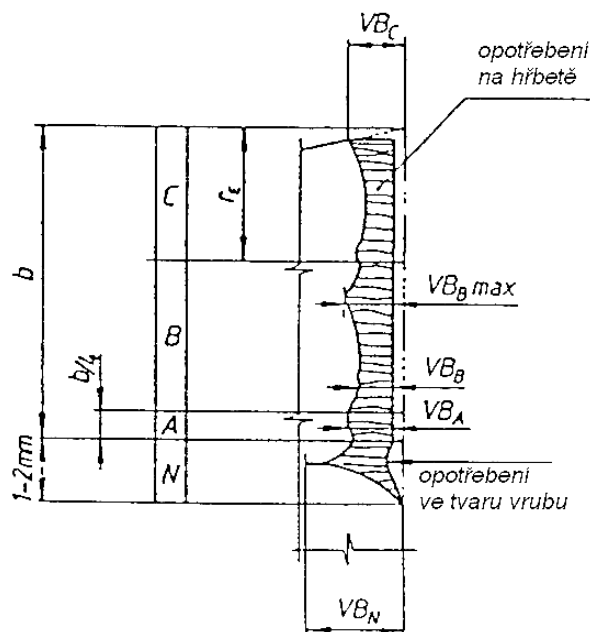
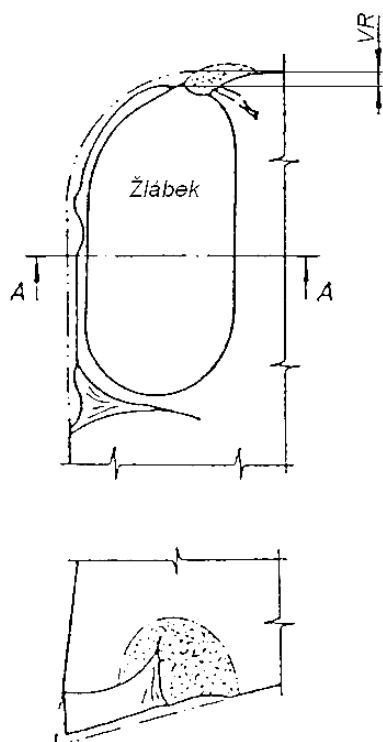
Toto jsou nejdůležitější formy opotřebení. Ne všechny případy lze považovat za formu pravého opotřebení. Je však nutné na ně nahlížet jako na příčinu, způsobující rychlý lom destičky a proto se jí musí bezpodmínečně zabránit. Vyvážené opotřebení zajišťuje optimální trvanlivost a potom je možné použít břit bezpečně, spolehlivě a s opakovatelnou přesností [4].

Pochopení mechanismů opotřebení a analyzování typů opotřebení vedou ke správné volbě řezných nástrojových materiálů, geometrií břitů, podmínek obrábění a rovněž materiálů obrobků. S dobrou znalostí mechanismů a typů opotřebení se snadno volí výkonné řezné materiály, správná geometrie břitu a efektivní podmínky obrábění. Toto má za následek optimální způsoby obrábění z hlediska nákladů.

Otupení (opotřebení) břitu obráběcího nástroje lze určovat dle řady autorů. Norma ISO 3685 uvádí následující formy (obr. 5.11) opotřebení s jednotlivými charakteristikami.

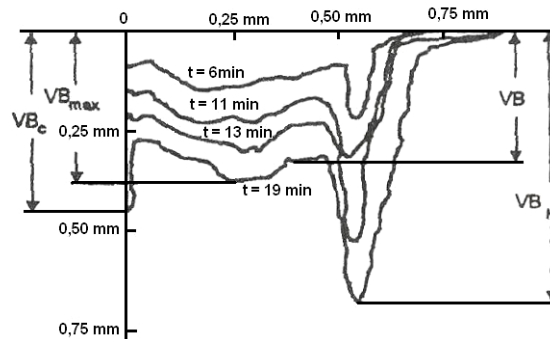


- VB - opotřebení na hřbetě
- VB<sub>C</sub> - opotřebení v oblasti špičky nástroje
- VB<sub>N</sub> - opotřebení ve formě vrubu
- VB<sub>B</sub> - opotřebení přímé části ostří (průměrné)
- VB<sub>Bmax</sub> - opotřebení maximální
- KT - hloubka žlábků
- KF - vzdálenost žlábků od čela
- KM - střední vzdálenost žlábků
- KB - šířka žlábků
- VR - radiální opotřebení

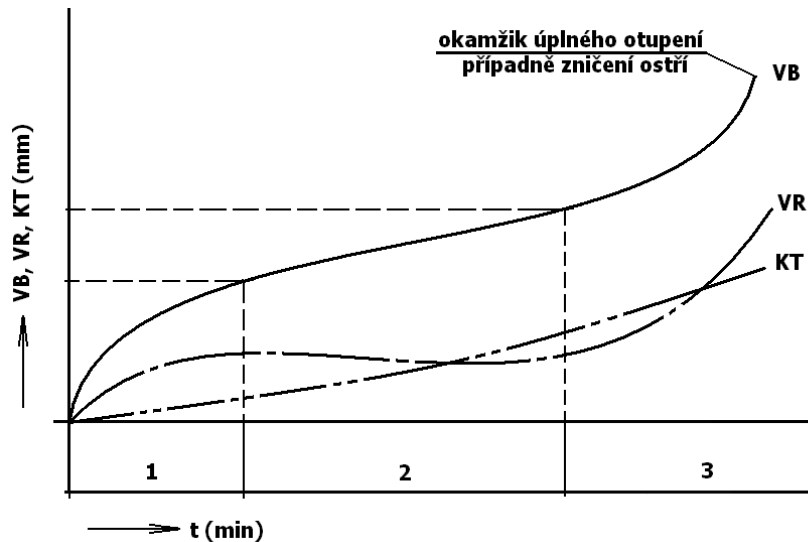


Obr. 5.11 Formy opotřebení dle ISO 3685 [8]

Pro měření opotřebení nástrojů je hlavní ostří rozděleno do 4 oblastí, které jsou zobrazeny na obr. 5.11. Oblast C je poloměru ostří, oblast B je přímá část ostří mezi oblastmi C a A, oblast A je čtvrtina délky opotřebení nejvíce vzdálená od radiusu nástroje a oblast N je mimo kontakt nástroje a obrobku přibližně 1 - 2 mm za hlavním ostřím nástroje [9]. Po nasazení nového nebo přestřehného nástroje dochází k jeho postupnému opotřebování (obr. 5.12).



Obr. 5.12 Časová mapa opotřebení [11]



Obr. 5.13 Typické průběhy opotřebení VB, VR a KT na době řezání [1]

1 – oblast zrychleného záběhového opotřebení

Obecně souvisí se záběhem nástroje a je způsobeno vysokým měrným tlakem na vrcholcích nerovností nástroje.

2 – oblast lineárního opotřebení

Dochází k lineárnímu nárůstu opotřebení a intenzita je konstantní.

3 – oblast zrychleného nadměrného opotřebení

Je to obvykle spojeno s limitní teplotou řezání a poklesem tvrdosti nástroje, nastává velmi rychlé, většinou lavinovité opotřebení.

Experimentální studium opotřebení a otupování břitů je základem pro určení empirických údajů pro optimalizaci řezných parametrů, resp. trvanlivosti břitů. Významná část výzkumu byla v poslední době zaměřena přímo na monitorizaci a měření opotřebení nástroje, protože stav výsledného obrobku plně závisí na stavu samotného nástroje. Důvodem pro tento výzkum je zavádění automatizovaných pružných výrobních systémů a adaptivní kontroly obráběcích strojů. Nevýhodou měření některých metod je nepříznivě ovlivněna jednou z následujících negativních stránek, které musí být překlenuty [9, 14, 22]:



- odchod třísek z místa řezu (navíjení na obrobek i nástroj, lámání, zničení nebo poškození snímače),
- procesní kapalinou,
- vibracemi a chvěním stroje,
- dobou odezvy, která bývá poměrně dlouhá,
- nízká citlivost a mění se fyzikální vlastnosti materiálu nástroje a obrobku,
- metody měření nejsou aplikovatelné pro měření se podmínky řezání.

Pro zjišťování velikosti opotřebení se používají metody přímé a nepřímé.

## 5.2. Přímé metody měření opotřebení

Přímé metody je těžké aplikovat v důsledku toho, že otupující se plochy jsou nedostupné pro měřicí přístroje. Pak je nutné obrábění přerušit, což ovlivňuje charakter otupení v dalších etapách experimentu. Krom toho se ve většině případů nástroj snímá z nožového držáku a to přináší změny podmínek obrábění při dalším upnutí a ustavení. Mezi přímé metody patří:

1. metoda váhová (hmotnostní)
2. metoda radioaktivních izotopů (radioizotopová)
3. metoda mikrometrická
4. metoda optická (stínová)
5. metoda nanosené odporové vrstvy
6. metoda pneumatická

Jako nejjednodušší se jeví měření opotřebení při broušení, kdy stanovit úbytek brusného kotouče většinou nečiní velké problémy. Obvykle se měří vzdálenost obrobené plochy od osy kotouče [5]. U ostatních technologií je měření složitější a proto byla vyvinuta řada metod., většinou složité a nákladné, nebo mají omezené použití.

**Při váhové metodě** jako míru opotřebení zde bereme úbytek hmotnosti řezného břitu. Tuto metodu nelze použít přímo během procesu obrábění na obráběcím stroji, ale je poměrně přesná a váhový rozdíl určuje míru opotřebení. Nevýhodou je pokud se při obrábění tvoří nárůstek. Potom zůstává část břitu ulpěná na destičce a znemožňuje přesné určení hmotnostního úbytku na nástroji. Lze ji použít téměř výhradně u nástrojů s vyměnitelnými břitovými destičkami se zřetelem na malé úbytky hmoty při otupování nástroje.

$$\Delta t = M_1 - M_2 \quad (\text{g}) \quad (5.1)$$

$\Delta M$  – úbytek hmoty (g),

$M_1$  – hmotnost destičky před otupením (g),

$M_2$  – hmotnost destičky po otupení (g).

**Metoda radioaktivních izotopů (radioizotopová)** je nejcitlivější a nejpřesnější metoda určování váhového úbytku destičky v závislosti na čase. Umožňuje určit váhové úbytku v řádech až  $10^{-3}$  mg [15]. Využívá toho, že největší část opotřebovaného materiálu nástroje odchází třískou a jen zanedbatelné množství opotřebovaného nástrojového materiálu zůstává na obrobené ploše a neobrobené ploše místa řezu. Zcela minimální část materiálu nástroje odchází do ovzduší.

Radioaktivním článkem je materiál nástroje. Aktivaci nástroje lze dosáhnout dvěma způsoby:

1. Zavedením radioizotopu již při hutnickém procesu. Potom lze přesně stanovit specifickou aktivitu nástrojového materiálu a změnu aktivity v průběhu času.
2. Ozáření hotového nástroje proudem neutronů v reaktoru. Vznikne tak směs radioizotopových prvků tvořící nástrojový materiál.

Postup měření je následující. Za daných řezných podmínek se odebere stanovené množství třísek aktivním nástrojem. Z obrobené a neobrobené vrstvy plochy řezu se odebere tenká vrstvy neaktivním nástrojem. Oba vzorky třísek se vloží do měřicího bloku, který se skládá ze zkumavek a

Geiger-Müllerových nebo scintilačních počítačů [15]. Ty jsou zapojeny na indikační zařízení skládající se ze zdroje vysokého napětí a číslicového reduktoru. Na základě aktivity třisek  $I_{tr}$  (počet impulzů za minutu) je možné stanovit množství nástrojového materiálu, který ulpěl na třísece, ploše řezu a obrobené ploše. Pro stanovení tíhového úbytku nástroje je nutné znát specifickou aktivitu  $i_n$  v impulzech za minutu stanovenou stejným způsobem jako aktivita třisek podle [15].

$$i_n = \frac{I_n}{M_n} \quad (5.2)$$

$i_n$  – specifická aktivita nástroje,

$I_n$  – aktivita nástroje,

$M_n$  – zkoumané množství nástrojového materiálu.

Hmotnost opotřebeného materiálu nástroje se potom stanoví podle [15]:

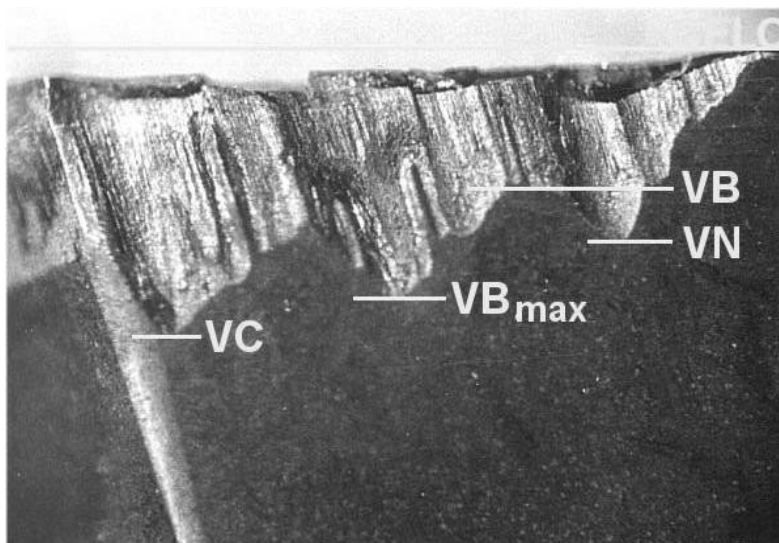
$$m_{mat} = \frac{\tau_{tr}}{i_n} \quad (g) \quad (5.3)$$

$m_{mat}$  – hmotnost opotřebeného materiálu,

$I_{tr}$  – aktivita třisek.

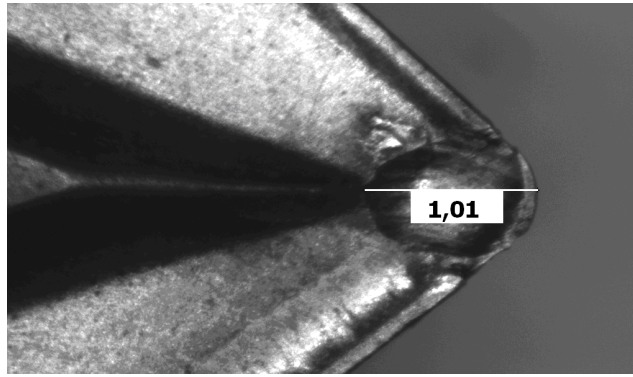
Tato metoda sebou nese riziko zdravotního ohrožení a při práci a manipulaci je nutné dbát přísných bezpečnostních opatření a používat rukavic, manipulátorů a olověných zástěr a desek.

Při **mikrometrické metodě** je velikost opotřebení je určována přímým měřením lineárních rozměrů. Zjišťujeme ji nejčastěji dílenskými mikroskopy s křížovým stolem. Hloubku žlábků měříme číselníkovými úchylkoměry, komparátory, a pod. (obr. 5.16). Tuto metodu nelze použít přímo in real time při obrábění.

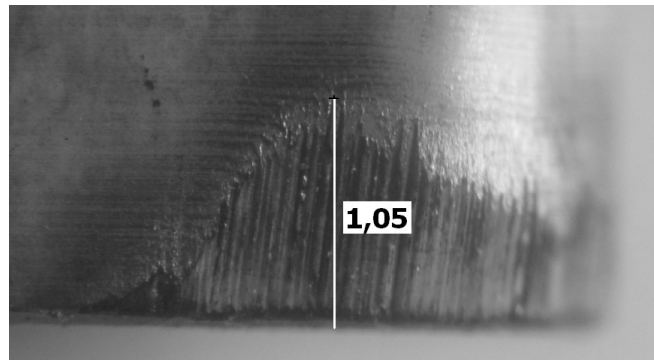


Obr. 5.16 Příklad opotřebení na hřbetě nástroje [13]

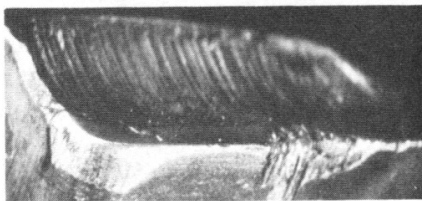
Některé software dovolují vyhodnocovat velikost opotřebení přímo on-line na mikroskopu. Takovým příkladem je např. IMPOR BASIC. Nejprve je nutné zkalibrovat optiku na dané zvětšení a potom lze měřit přímo hodnoty opotřebení a zaznamenávat kóty do obrazu, který lze potom, uložit (obr. 5.17 a 5.18).



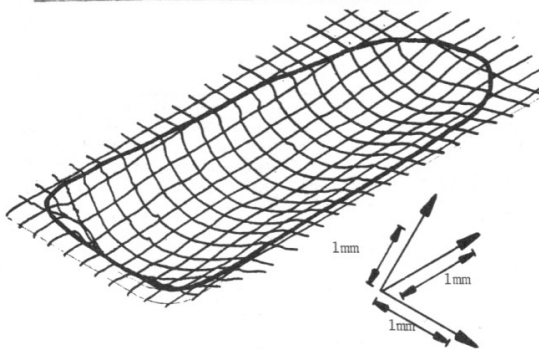
Obr. 5.17 Měření opotřebení na čele KB pomocí software IMPOR



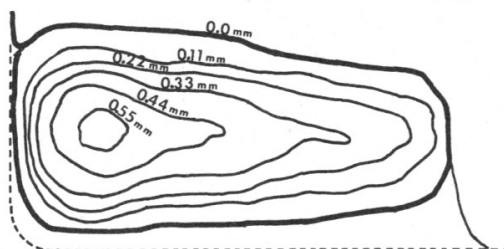
Obr. 5.18 Měření opotřebení na hřbetě  $VB_{Bmax}$  pomocí software IMPOR



a) Fotografie kráteru na čele



b) Profil kráteru vytvořený souřadnicovým měřicím

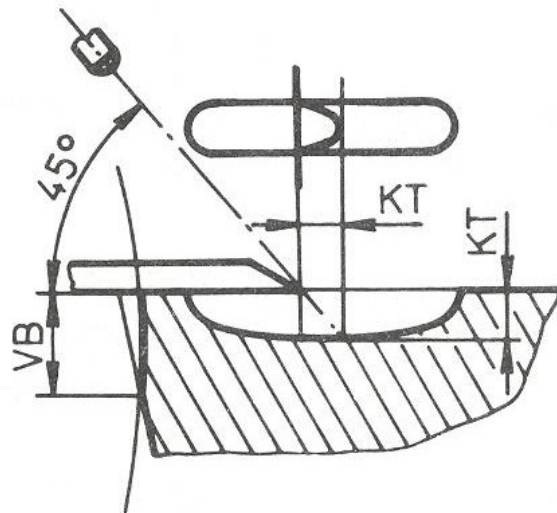


c) Mapa kráteru vytvořená na základě údajů z obr. b)

Obr. 5.19 Příklad opotřebení na čele nástroje, profilu kráteru a jeho mapy [16]

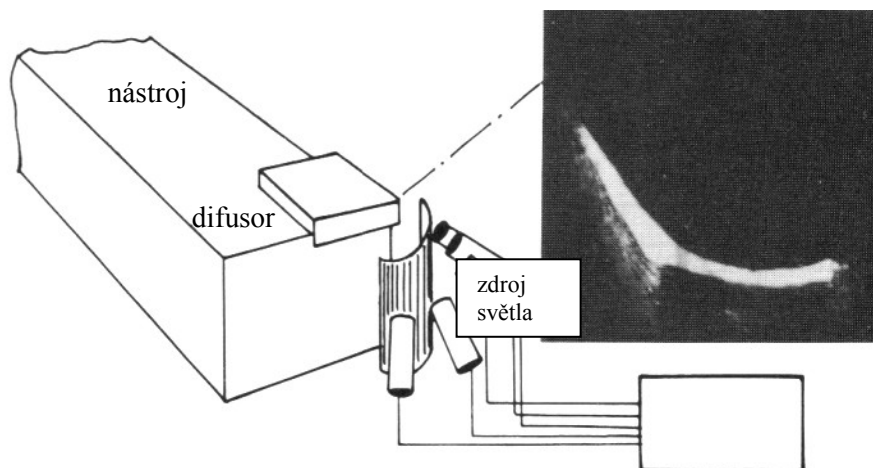
Také je možné využít 3D souřadnicové stroje na vytvoření skutečného obrazu opotřebení [16]. Na obr. 5.19 je příklad takového měření. Tato metoda umožňuje vytvořit reálný trojrozměrný obraz a je vhodná především pro měření opotřebení na čele nástroje. Na základě údajů je možné potom vytvořit charakteristickou mapu opotřebení a z ní odečíst parametry opotřebení jako  $KT$ ,  $KM$  a podobně.

**Optická (stínová) metoda** se používá k měření hloubky žlábků. Umístíme-li ostrou hranu na čelo a osvětlíme ji paprskem světla pod úhlem  $45^\circ$ , pak vzdálenost tečny ke stínu je rovna hloubce žlábků  $KT$  (obr. 5.20).

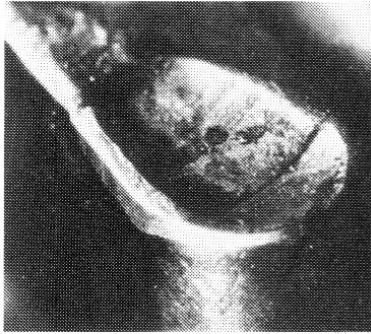


Obr. 5.20 Schéma měření stínovou metodou [1]

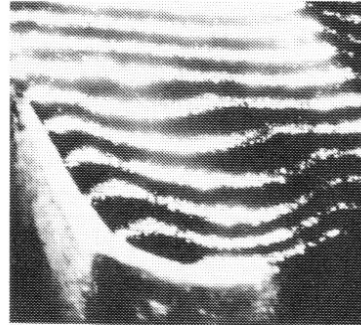
Další metodou, jež využívá na měření opotřebení vytváření stínů je metoda založená na měření opotřebení na čele nástroje. Na čele nástroje je difusorem (obr. 5.21) vytvořena charakteristická mřížka, která je snímána prostřednictvím kamery, přičemž deformace mřížky souvisí s vytvářením kráteru na čele nástroje (obr. 5.22). Na základě obrazu z kamery je možné vytvořit skutečný trojrozměrný obraz opotřebení čela nástroje.



Obr. 5.21 Způsob osvětlení čela nástroje [6]



a) opotřebení na čele nástroje

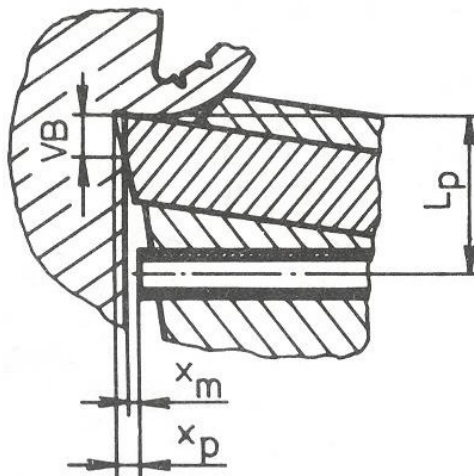


b) světelný obraz opotřebení

Obr. 5.22 Porovnání opotřebení na čele nástroje a světelného obrazu opotřebení [6]

Při **použití nanesené odporové vrstvy** může být opotřebení nástroje měřeno snížením nebo zvýšením elektrického odporu. Je to v podstatě vytvoření odporového obvodu na hřbetu nástroje. Nevýhodou této metody je ovlivnění snímače odchodem třísky, změnou teploty a chladicí kapalinou [22].

**Pneumatická metoda** je poměrně spolehlivá a konstrukčně jednoduchá. Měření úbytku vyměnitelné břitové destičky ve směru kolmém k ploše řezu nebo ve směru radiálním. Princip měření je na obr. 5.23.



Obr. 5. 23 Princip měření pneumatickou metodou [1]

Geometrické poměry lze odvodit s uvažováním vlivu drsnosti na velikost měřené hodnoty opotřebení pro nůž s  $\kappa_r = 90^\circ$  podľa [1]:

$$VB = VB_o + \zeta_m \cdot VB_o^{0,81}$$

$$VB_o = \left( \zeta_p - \frac{L_p \cdot f}{\pi \cdot D_o} - \zeta_m \right) \frac{1}{\operatorname{tg} \alpha} \quad (\text{mm}) \quad (6.4)$$

- $K_m$  – konstanta daná konstrukcí měřidla (určuje se empiricky),
- $x_p$  – vzdálenost trysky od obrobku (obr. 6.20) (mm),
- $x_m$  – vzdálenost nástroje od nástroje (obr. 6.20) (mm),
- $L_p$  – vzdálenost osy trysky od špičky nástroje (mm),
- $f$  – posuv (mm),
- $D_o$  – průměr obrobku (mm),
- $\alpha_n$  – úhel hřbetu ( $^\circ$ ).

Hodnota  $x_m$  se určuje pro tlak vzduchu změřený z cejchovní křivky daného měřidla.



### 5.3. Nepřímé metody měření opotřebení

Metody nepřímé se opírají o některé znaky, které proces opotřebování doprovází a provádí se přímo při procesu řezání. Všechny tyto metody jsou pouze přibližné [9, 14]. Patří sem [1, 9, 14, 22]:

1. vznik lesklého proužku na povrchu obrobku
2. vzrůst složek řezné síly
3. zvýšení výkonu řezání
4. zvýšení teploty řezání
5. vznik chvění nebo nežádoucího doprovodného zvuku
6. změna barvy a tvaru třísky
7. změna rozměrů obrobku
8. zhoršení drsnosti povrchu
9. emise signálů v pásmu ultrazvuku (akustická emise)

**Optické metody** se jeví jako slibné, ovšem spolehlivost může při praktickém použití činit velké problémy.

*Metoda založená na odrazu světla* využívá určité množství světla ve světelném paprku, které dopadá na ostří nástroje. Charakteristika odraženého světla pak závisí na stavu opotřebení povrchu nástroje [22]. Tato metoda je jednoduchá a dá se použít pro frézování a broušení.

*Metoda zpracování odraženého paprsku založená na optické Fourierově transformaci* k měření opotřebení povrchu brusného kotouče. Optický obrazec nese několik informací (šířku odlesku poškozených zrn, plochu poškozených zrn, velikost a počet zrn). Stav brusného kotouče lze určit v reálném čase ze střední plochy odlesku poškozených zrn.

*Metoda využívající televizní kamery* je určena především pro soustružení. Nástroj se po pracovním cyklu přemístí do testovací polohy před televizní kameru. Sejmутý obraz je analyzován pomocí mikroprocesor, tak aby poskytl informace o poškození a velikosti opotřebení [22]. Nástroj je postupně osvětčován ze 4 stran (pod různými úhly), aby bylo možné zhotovit 3D obraz opotřebení nástroje. Z odlesků a vržených stínů jsou pak vypočteny skutečné rozměry opotřebení. Takto lze hlídat, pokud zadáme předem kritéria, dovolené opotřebení nástroje.

**Měření pomocí síly řezání a krouticího momentu** využívá skutečnost, že s rostoucí velikostí opotřebení roste obvykle i řezný odpor. Podstatou měření jednotlivých složek řezné síly a krouticího momentu je měření deformací, ke kterým dochází v soustavě stroj – nástroj – obrobek – přípravek během obrábění. Obě tyto veličiny lze měřit pomocí dynamometrů a krouticí moment též na vřeteníku.

*Měření sil pomocí dynamometrů* je pravděpodobně jednou z nejrozšířenějších veličin ve strojírenské výrobě. Více o měření pojednává kapitola 4.

Pro *měření osové síly* lze použít tenzometry umístěné v krouzcích na ložiskách posuvových šroubů. Metoda je použitelná pro soustružení nebo vrtání umístěním snímacích kroužků do vřeteníku stroje.

*Metoda měřící dynamickou složku řezné síly* je zaměřena na spektrální analýzu síly. Hledá se určitá závislost mezi opotřebením nástroje a rozmístěním piků nebo amplitud dynamické složky síly řezání [22].

Měření výkonu slouží k určení řezných sil pomocí wattmetru nebo pomocí měření proudu. Metoda je málo citlivá na změny při kontinuálním opotřebením nástroje a je vhodná spíše pro určení katastrofického opotřebením nástroje.

Měření opotřebením při **detekci mezery mezi nástrojem a obrobkem** je založeno na změně vzdálenosti mezi obráběným povrchem a bodem na ostří nebo držáku nástroje.

#### a) *Metody dotykové*

Využívá se zde mechanického kontaktu s obráběným povrchem.

*Pomocí elektrického mikrometru*, kdy je mechanický dotyk v kontaktu s obráběným povrchem ze strany ostří nástroje. Se zvětšujícím se opotřebením se dotyk přemísťuje a výstup z měniče dává údaje o opotřebením.

*Měření využívající vířivých proudů*,\_tomto případě je mechanický dotyk vyroben z karbidu wolframu (pro svou velkou otěruvzdornost).

b) *Metody bezkontaktní*

*Pneumatická* – využívá pneumatického snímače, který měří vzdálenost mezi tryskou, umístěnou pod ostřím a obráběným povrchem. Výhodou je, že stlačený povrch se očistí od procesní kapaliny.

*Metoda ultrazvukového mikrometru* – využívá času průchodu ultrazvukového pulsu vyslaného z vysílače, odraženého od obráběného povrchu a registrovaného přijímačem [22].

*Metoda optického mikrometru* – paprsek HeNe laseru je zaměřen na obrobený povrch pod určitým úhlem se odráží a je registrován fotodetektořem. Změna od nastaveného úhlu je proporcionální opotřebením nástroje [22].

Při *metodě kapacitní* se mezi obrobek a nástroj vkládá kovová destička. Při zapojení do jednosměrného napětí se vytvoří kondensátor s konstantní kapacitou mezi nástrojem a destičkou a současně, protože nástroj a obrobek jsou vodivě spojeni třískou, kondensátor mezi destičkou a obrobkem. Kapacita se mění v závislosti na změně rozměru obrobku.

**Měření prostřednictvím vibrací** spočívá na korelaci mezi vibracemi obráběcího stroje a opotřebením nástroje. Úspěšně byla aplikována pouze v laboratoři.

a) *pomocí akcelerometru*

Snímač tvoří většinou piezoelektrický akcelerometr snímající vibrace a samobuzené kmity. Nevýhodou je ovlivňování monitorovaného stroje okolními vibracemi a hlukem. Pokud změříme vertikální vibrace, lze z amplitudy nalézt limitní opotřebením nástroje. Pokud frekvence rozdělíme do diskretních pásem, je možné analýzou získat spojitost mezi opotřebením nástroje a spektrem. Z modelování vibrací z akcelerometru lze registrovat signál citlivý na opotřebením umístěním snímače na držák nástroje.

b) *metoda využívající kyvadlo*

Opotřebením nástroje je oceňováno útlumem vibrací impulsně generovaných úderem kyvadlového kladívka. Vibrace jsou snímány tenzometry umístěnými na držáku nože. Výhodou je, že tato metoda není závislá na řezných podmínkách.

c) *metoda využívající kolísání otáček vřetene*

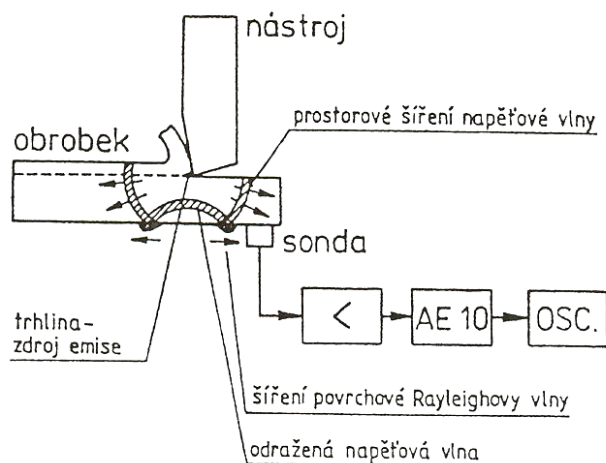
Opotřebením nástroje je identifikováno prostřednictvím oscilace řezné rychlosti, nebo otáček vřetene. Umožňuje identifikovat především lom nástroje na základě charakteristických projevů v signále případně frekvenčním spektrogramu.

**Měření zvuku pomocí akcelerometru** umístěného v blízkosti držáku jsou snímány zvukové vibrace od tření hřbetu nástroje. Získané frekvence jsou rozděleny na vysoké a nízké a jejich poměr poskytuje informaci o opotřebením nástroje [22].

*Pomocí mikrofonu*, kdy jsou zvuky sbírány a analyzovány metodou spektrální analýzy. Na spektru se s růstem opotřebením začínou objevovat nárůstky amplitud některých frekvencí.

Při **měření akustické emise** jsou registrovány a vyhodnocovány ultrazvukové povrchové napěťové vlny, které nesou informaci o procesu probíhající v kořeni třísky. Výhodou je jednoduché umístění snímače (např. do trysky přívodu řezné kapaliny [22]). Je to jedna z perspektivních metod a má předpoklady použití ve výrobní praxi. Ovšem má svá ohraničení. Schéma měření je na *obr. 5.24*.

Signálů akustické emise je vhodný ke sledování stavu obráběcího nástroje zejména v oblasti ultrazvuku, pro jeho široký frekvenční rozsah. Výhodou tohoto rozsahu je eliminace vlivu prostředí a vlastních kmitů stroje, které leží převážně ve slyšitelné, pásmu zvukového spektra. Signál akustické emise je měřitelný nepřetržitě během celého procesu obrábění, což je dáno tím, že jeho vznik je spojen s fyzikální podstatou tvorby třísky.



Obr. 5.24 Schéma experimentálního zařízení na měření akustických emisí [22]

Podle nejnovějších výzkumů je možné použít speciální fólie, která je citlivá na povrchové napěťové vlny a nanáší se přímo na břitovou destičku [22]. Širší průmyslové použití této metody ke sledování stavu nástroje je bohužel brzděno řadou negativních faktorů. Velikost opotřebení ovlivňuje také teplotu řezání a existují proto metody založené na jejím měření. Další možností je měření pomocí elektrického odporu. Tato metoda je nepřesná vlivem výkyvu teplot v oblasti kontaktu.



## Shrnutí kapitoly

V této kapitole jsme si popsali klasifikaci typů opotřebení, které vznikají na řezných nástrojích. Seznámili jsme se s normou ISO 3685, která popisuje formy opotřebení. Dále jsme si popsali přímé a nepřímé metody měření opotřebení.



## Kontrolní otázky

1. Vyjmenujte alespoň 5 typů opotřebení.
2. Jak se značí opotřebení na hřbetě?
3. Jak se značí hloubka žlábků na čele nástroje?
4. Jak se značí radiální opotřebení?
5. Jaké opotřebení se značí KB?
6. Do kolika oblastí se dělí hlavní ostří pro měření opotřebení?
7. Jaký je typický průběh opotřebení?
8. Vyjmenujte přímé metody měření opotřebení.
9. Vyjmenujte alespoň 5 metod nepřímého měření opotřebení.
10. Co je to mikrometrická metoda?





## Další zdroje

1. BILÍK, O.: *Obrábění II*. Ostrava : VŠB-TU Ostrava, 1994. ISBN 80-7078-228-5
2. BRINKSMEIER, E. : [Monitoring of grinding wheel wear](#) , Ananals of the CIRP, vol,1/1992, pp. 373
3. BRYCHTA, J.: *Problematika renovace funkčních ploch kovacích zápusťek v podmínkách automobilového závodu TATRA Kopřivnice*: DDP, VŠB-TU Ostrava, 1998
4. ČEP, R.: *Zkoušky nástrojů z řezné keramiky při přerušovaném řezu : doktorská disertační práce*. Ostrava : Fakulta strojní VŠB-TU Ostrava, 2005
5. GAŠPÁREK, J.: *Dokončovacie spôsoby obrábania*, ALFA Bratislava, 1979
6. GIUSTI, F. - SANTOCHI, M. – TANTUSSI, G.: [On line sensing of flank and crater wear of cutting tools](#), CIRP, 1/1987, pp. 41
7. GOMES DE OLIVEIRA, J.F. – DORNFELD, D.A. - WINTER, B.: [Dimensional characterization of grinding wheel surface through acoustic emission](#), Ananals of the CIRP, vol, 1/1994, p. 291
8. ISO 3685 : 1990. *Tool Life Testing With Single Point Turning Tools*. 1990
9. JURKO, J.: *Opotrebenie rezných nástrojov*, Prešov, 2005, ISBN 80-8073-255-8
10. KOČMAN, K. – PROKOP, J.: *Prediction of Grinding Wheel Wear Parameters*, Manufacturing technology 1/2001, p.26 - 32
11. KOČMAN, K. - PROKOP, J.: *Technologie obrábění*. Brno : Akademické nakladatelství CERM Brno, 2001. ISBN 80-214-1996-2
12. MÁDL, J. - SCHUBERT, V.: *Experimentální metody a optimalizace v teorii obrábění*. Praha : ČVUT Praha, 1985
13. PÍŠKA, M. - FOREJT, M. - HUMÁR, A. - JANÍČEK, D.: *Experimentální metody – sylabus*. Brno : VUT Brno, 2003. 83 s.
14. POPPEOVÁ, V.: *Monitorovanie opotrbenia rezných nástrojov*, EDIS Žilina, 2001, ISBN 80-7100-700-5
15. PŘIKRYL, Z. - MUSILÍKOVÁ, R.: *Teorie obrábění*, SNTL Praha, 1982.
16. SAMUELS, J. - TANI, M. - BEISWENGER, C. I.: *Measurements of crater wear using replica molds*, CIRP 1/1976, pp. 77
17. SANDVIK Coromant: *Příručka obrábění*. Praha : Scientia s.r.o. Praha, 1997, 910 s. ISBN 91-97 22 99-4-6
18. SHIBATA, J. - GOTO, T. - YAMAMOTO. M. - TSUWA. H.: [Characteristics of air flow around a grinding wheel and their availability for assessing the wheel wear](#), CIRP, vol, 1/1982, p. 233
19. TÖNSHOFF, T. - FRIEMUTH, J.C. – BECKER, R.: *Process Monitoring in Grinding*, CIRP 51/2/2002, p.551 - 671
20. VASILKO, K. - BOKUČAVA, G.: *Brúsenie kovových materiálov*, ALFA Bratislava 1988
21. VASILKO, K. - HRUBÝ, J. - LIPTÁK, J.: *Technológia obrábania a montáže*. Bratislava : Alfa Bratislava, 1991 496 s. ISBN 80-05-00807-4.
22. ŽIŽKA, J.: *Použití akustické emise ke sledování stavu řezného nástroje*. Liberec : TU Liberec, 2003. 106. s ISBN 80-7083-687-1
23. HUMÁR, A.: *Technologie I – technologie obrábění – sylabus*. Brno : VUT Brno, 2003, <http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/?page=opory>



## CD-ROM

Na videu je vidět narůstající opotřebení (mapa opotřebení) při obrábění a jeho online vyhodnocení pomocí software až do dosažení kritéria opotřebení.



## Klíč k řešení

- O 5.1 Opotřebení hřbetu bříty, opotřebení ve tvaru žlábků na čele, vydrolení ostří, plastická deformace bříty, opotřebení ve tvaru vrubu na hřbetě bříty, tvoření nárůstku, vznik hřebenových trhlinek, únavový lom a lom bříty nástroje
- O 5.2 VB
- O 5.3 KT
- O 5.4 VR
- O 5.5 Šířka žlábků.
- O 5.6 Dělí se do 4 oblastí –A, B, C, N
- O 5.7 1 – oblast zrychleného záběhového opotřebení,  
2 – oblast lineárního opotřebení,  
3 – oblast zrychleného nadměrného opotřebení.
- O 5.8
- metoda váhová (hmotnostní)
  - metoda radioaktivních izotopů (radioizotopová)
  - metoda mikrometrická
  - metoda optická (stínová)
  - metoda nanosené odporové vrstvy
  - metoda pneumatická
- O 5.9
- vznik lesklého proužku na povrchu obrobku
  - vzrůst složek řezné síly
  - zvýšení výkonu řezání
  - zvýšení teploty řezání
  - vznik chvění nebo nežádoucího doprovodného zvuku
  - změna barvy a tvaru třísky
  - změna rozměrů obrobku
  - zhoršení drsnosti povrchu
  - emise signálů v pásmu ultrazvuku (akustická emise)
- O 5.10 Při mikrometrické metodě je velikost opotřebení je určována přímým měřením lineárních rozměrů. Zjišťujeme ji nejčastěji dílenskými mikroskopy s křížovým stolem. Hloubku žlábků měříme číselníkovými úchylkoměry, komparátory, apod

## 6. OBROBITELNOST MATERIÁLŮ

Po úspěšném a aktivním absolvování této KAPITOLY

### Budete umět:

- Obecné pojmy a terminologii obrobiteľnosti.
- Stanovit základní kritéria obrobiteľnosti a součinitel obrobiteľnosti.
- Popsat různé způsoby stanovení obrobiteľnosti.
- Určit faktory, na kterých obrobiteľnost závisí.

**Budete umět**

### Budete schopni:

- Zhodnotit průběh měření obrobiteľnosti.
- Zařadit testované materiály do třídy obrobiteľnosti.
- Objektivně stanovit obrobiteľnost u netestovaných materiálů.

**Budete schopni**



**Čas ke studiu:** 1,5 hodiny



### Výklad

Pod pojmem obrobiteľnost označujeme souhrnný vliv fyzikálních vlastností a chemického složení kovů na průběh a na ekonomické, popř. kvalitativní výsledky procesu řezání. Lze ji obecně posuzovat z hlediska vlivu materiálu obrobku na intenzitu ořezu, energetické bilance procesu řezání a také jejich vlivu na proces tvoření třísky a vytváření nového povrchu na obrobku.

Existuje úzký vztah stupně obrobiteľnosti kovů k velikosti jednotlivých faktorů, které jsou součástí procesu řezání, jako např. součinitel tření třísky po čele nástroje, plochy řezu na hřbetě břitu, velikost měrné deformační práce, stupeň zpevnění v odřezávané vrstvě materiálu, velikost mezních kluzných napětí ve střižné rovině a velikost jeho úhlu  $\beta$ , apod. [10].

Z hlediska technologie obrábění je obrobiteľnost jednou z nejdůležitějších vlastností materiálu a lze ji také definovat jako míru schopnosti daného konkrétního materiálu být zpracováván některou z metod obrábění. Je hlavním činitelem pro volbu řezných podmínek a pro funkci nástroje při všech metodách obrábění.

Obrobiteľnost závisí na mnoha faktorech, z nichž nejdůležitější jsou:

- způsob výroby a tepelné zpracování obráběného materiálu,
- mikrostruktura obráběného materiálu,
- chemické složení obráběného materiálu,
- fyzikální a mechanické vlastnosti obráběného materiálu,
- metoda obrábění,
- pracovní prostředí,
- geometrie nástroje,
- druh a vlastnosti nástrojového materiálu.

Z hlediska charakteristik obrobiteľnosti a řezivosti je možné obrobiteľnost a řezivost rozdělit na obrobiteľnost a řezivost absolutní a relativní. Nutno podotknout, že obrobiteľnost a řezivost spolu úzce (neoddělitelně) souvisí a řada kritérií obrobiteľnosti je současně i kritérii řezivosti.

*Absolutní obrobiteľnost*, resp. řezivost jsou charakterizovány buď funkčním vztahem a parametry spolu souvisejícími nebo určitou velikostí dané veličiny charakterizující obrobiteľnost, resp. řezivost.

*Relativní obrobiteľnost*, resp. řezivost jsou charakterizovány bezrozměrnými čísly, které udávají poměr velikostí určité veličiny, a sice poměr velikosti této veličiny vztahující se k danému materiálu obrobku, resp. k nástroji a velikostí této veličiny odpovídající etalonovému (referenčnímu) materiálu obrobku, resp. nástroji.

Obrobiteľnost, resp. řezivost hodnotíme především z hlediska intenzity opotřebování břitu, dále též z hlediska teplotního, silového, technologického a kvalitativního. Nejčastěji vycházíme z intenzity opotřebování břitu.

Nejdůležitějším kritériem tohoto typu je komplexní Taylorův vztah. Dalšími kritérii jsou jednoduchý Taylorův vztah a hodnota řezné rychlosti  $v_T$  odpovídající určité trvanlivosti břitu, což patří do absolutní kategorie. K relativním charakteristikám, které vycházejí z intenzity opotřebování břitu, patří především index obrobiteľnosti  $K_v$ :

$$K_v = \frac{v_{T/VB} \text{ zkoušeného materiálu}}{v_{T/VB} \text{ etalonového materiálu}} \quad (6.1)$$

případně

$$K_v = \frac{c_{v_{zk.mat}}}{c_{v_{et.mat}}} \cdot T \left( \frac{1}{m_{et}} - \frac{1}{m_{zk}} \right), \text{ kde} \quad (6.2)$$

$v_{T/VB}$  zkoušeného materiálu odpovídá  $v_{15zk}$  (m.min<sup>-1</sup>), což je řezná rychlost  $v_c$  při trvanlivosti  $T_n = 15$  minut pro zkoušený (sledovaný) materiál,

$v_{T/VB}$  etalonového materiálu odpovídá  $v_{15et}$  (m.min<sup>-1</sup>), což je řezná rychlost  $v_c$  při trvanlivosti  $T_n = 15$  minut pro referenční (etalonový) materiál.

Existuje několik možností, jak rychle, dostatečně přesně a objektivně stanovit obrobiteľnost, zatím neznámé kombinace – nově vyvinutý řezný a rovněž doposud „neotestovaný“, nově zaváděný vysoce houževnatý (pevný a tvrdý) obráběný materiál. Jedná se konkrétně o tyto vybrané, níže uvedené možnosti:

- míra závislosti na řezné rychlosti,
- dosažená drsnost obroběné plochy,
- velikost opotřebení břitu nástroje,
- množství energie potřebné k odřezání dané vrstvy materiálu,
- vztah k dosahované teplotě řezání,
- druh a tvar tvořící se třísky.

## 6.1. Značení obrobiteľnosti materiálů

Pokud je obrobiteľnost posuzována hodnotou  $v_T$ , jedná se prakticky o vyhodnocování úběru obráběného materiálu (velikost objemu materiálu odebraná za jednotku času) pomocí daného nástroje při smluveném konstantním průřezu třísky (např. pro podélné soustružení: hloubka třísky  $a_p = 2$  mm, posuv na otáčku  $f = 0,2$  mm), v daném řezném prostředí. Pro potřeby vyhodnocování obrobiteľnosti

jsou technické konstrukční materiály rozděleny do devíti základních skupin, označovaných malými písmeny:

- a – litiny,
- b – oceli,
- c – těžké neželezné kovy (měď a slitiny mědi),
- d – lehké neželezné kovy (hliník a slitiny hliníku),
- e – plastické hmoty,
- f – přírodní nerostné hmoty,
- g – vrstvené hmoty,
- v – tvrzené litiny pro výrobu válců.

V jednotlivých skupinách je vždy vybrán jeden konkrétní materiál, který slouží jako etalon obrobitelnosti a ve vztahu k tomuto materiálu je pak stanovována relativní obrobitelnost všech ostatních materiálů celé skupiny.

Třídy jsou označovány číslem umístěným před písmeno, které určuje danou skupinu materiálů (např. 11a. 14b. atd.). Odstupňování střední hodnoty indexu obrobitelnosti v jednotlivých třídách je dáno geometrickou řadou s kvocientem  $q = 10^{1/10} = 1,26$  (třída referenčního (etalonového) materiálu má hodnotu  $q = 1$ ), což znamená, že hodnota řezné rychlosti  $v_{cT}$  v dané třídě je vždy 1,26 krát vyšší (nižší), než hodnota  $v_{cT}$  v sousední třídě. Materiály v třídách s nižším číslem, než má třída referenčního (etalonového) materiálu mají horší obrobitelnost než referenční (etalonový) materiál. Materiály v třídách s vyšším číslem mají lepší obrobitelnost.

Relativně nejhorší obrobitelnost (nejnesnadněji se obrábějící) v dané skupině má vždy materiál zařazený do třídy s nejnižším číslem. Nejlepší obrobitelnost má materiál zařazený do třídy s nejvyšším číslem. Příklad dělení skupiny oceli na třídy, včetně hodnot  $K_v$ , je uveden v tab. 6.1. Obrobitelnost, jak již bylo uvedeno, je především vlastností obráběného materiálu. Přesto však **musí být posuzována v úzké souvislosti s řezivostí nástroje** (nástrojového materiálu), který je zvolen a použit pro zkoušky obrobitelnosti.

Tab. 6.1: Hodnoty součinitele  $K_v$  (indexu) obrobitelnosti pro jednotlivé třídy skupiny ocelí [1]

Třída	$K_v$			Třída	$K_v$		
	vyjádřeno kvocientem	střední hodnot	rozsah		vyjádřeno kvocientem	střední hodnot	rozsah
1b	$1,26^{-13}$	0,050	0,045-0,054	11b	$1,26^{-3}$	0,50	0,45-0,56
2b	$1,26^{-12}$	0,065	0,055-0,069	12b	$1,26^{-2}$	0,63	0,57-0,71
3b	$1,26^{-11}$	0,080	0,070-0,089	13b	$1,26^{-1}$	0,80	0,72-0,89
4b	$1,26^{-10}$	0,10	0,09-0,11	<b>14b</b>	<b><math>1,26^0</math></b>	<b>1,00</b>	<b>0,90-1,12</b>
5b	$1,26^{-9}$	0,13	0,12-0,14	15b	$1,26^1$	1,26	1,13-1,41
6b	$1,26^{-8}$	0,16	0,15-0,17	16b	$1,26^2$	1,59	1,42-1,78
7b	$1,26^{-7}$	0,20	0,18-0,22	17b	$1,26^3$	2,00	1,79-2,24
8b	$1,26^{-6}$	0,25	0,23-0,28	18b	$1,26^4$	2,50	2,25-2,82
9b	$1,26^{-5}$	0,32	0,29-0,35	19b	$1,26^5$	3,15	2,83-3,55
10b	$1,26^{-4}$	0,40	0,36-0,44	20b	$1,26^6$	4,00	3,56-4,47

Podle normy CNN je pro ocel doporučován pouze jeden etalonový materiál, a to ocel 12 050.1. Na základě praktických zkušeností se ukazuje, že by bylo vhodné využívat pro každou třídu obrobitelnosti jiný referenční materiál. Doporučené materiály etalonů, druhů používaných nástrojů a doporučených řezných podmínek uvádí následující tabulky.

Tab. 6.2: Doporučené referenční materiály [1]

Třída obrobitelnosti	18b / 1	17b / 2	16b / 3	15b / 4	14b / 5
Etalon	12 010 HB105	11 373 HB130	12 040 HB160	14 220 HB160	12 050 HB190
Třída obrobitelnosti	13b / 6	12b / 7	11b / 8	10b / 9	9b / 10
Etalon	12 050 HB250	12 060 HB250	12 060 HB280	12 061 HB280	15 330 HB350
Třída obrobitelnosti	12b / 21	12b / 22	9b / 23	8b / 24	8b / 25
Etalon	17 020	17 021	17 248	17 238	17 352

Tab. 6.3: Doporučené nástroje pro zkoušky obrobitelnosti [1]

Metoda obrábění	Doporučené nástroje
Soustružení	VBD typu SNGN 120408 nebo SPGN 120408, SK P20, průřez držáku 25x25 mm, úhel $\chi_r = 70^\circ$ (PN223850.1 nebo PN223850.2).
Vrtání	Vrták $\varnothing$ 10 mm, ČSN 221140, strojní ostření s tolerancí délky ostří 0,2 mm. Pro vrtáky se slinutým karbidem doporučen druh K10.
Frézování	Frézovací hlava PN 222462.15 nebo PN 222462.25 o průměru 125 mm, počet zubů 10. Po upnutí destiček je dovolené maximální házení axiální 0,03 mm, házení radiální 0,05 mm.

Tab. 6.4: Doporučené řezné podmínky pro zkoušky obrobitelnosti [1]

Metoda obrábění	Řezné podmínky		
	Řezná rychlost (m.min <sup>-1</sup> )	Posuv (mm)	Hloubka řezu (mm)
Soustružení	80, 100, 125	0,25	2,0
VBD z SK	<u>160</u> , 200, 250		
Vrtání RO	12, 18, <u>24</u> , 30, 35	0,12	3 D
Vrtání SK	28, 36, 44, 52, 60	0,08	2 D
Frézování	80, 110, <u>139</u>	$f_z = 0,1$ mm	2
VBD z SK	176, 220, 278		šířka fréz. 0,5 D

Pozn.: podtržené velikosti řezných rychlostí jsou přednostní

Jednotné stále platné normativy zařazují oceli do tříd obrobitelnosti na základě zkoušek bez chlazení, prováděných slinutými karbidy typu P10-P20, které mají ve srovnání s dnes již velmi často používanými povlakovanými SK a jinými řeznými materiály, vyznačujícími se zejména podstatně jemnější a pravidelnější zrnitostí mnohem nižší řezivost.

Stupeň obrobitelnosti určitého materiálu je zpravidla různý při obrábění různými metodami (soustružení, frézování, broušení, apod.) Proto je třeba zkoušky obrobitelnosti provádět pro jednotlivé způsoby obrábění zvlášť. Z hlediska provádění rozlišujeme zkoušky dlouhodobé a krátkodobé. Dále se dají rozdělit na metody přímé a nepřímé. U přímých metod se bezprostředně stanoví hodnota řezné rychlosti pro zvolenou trvanlivost [1].

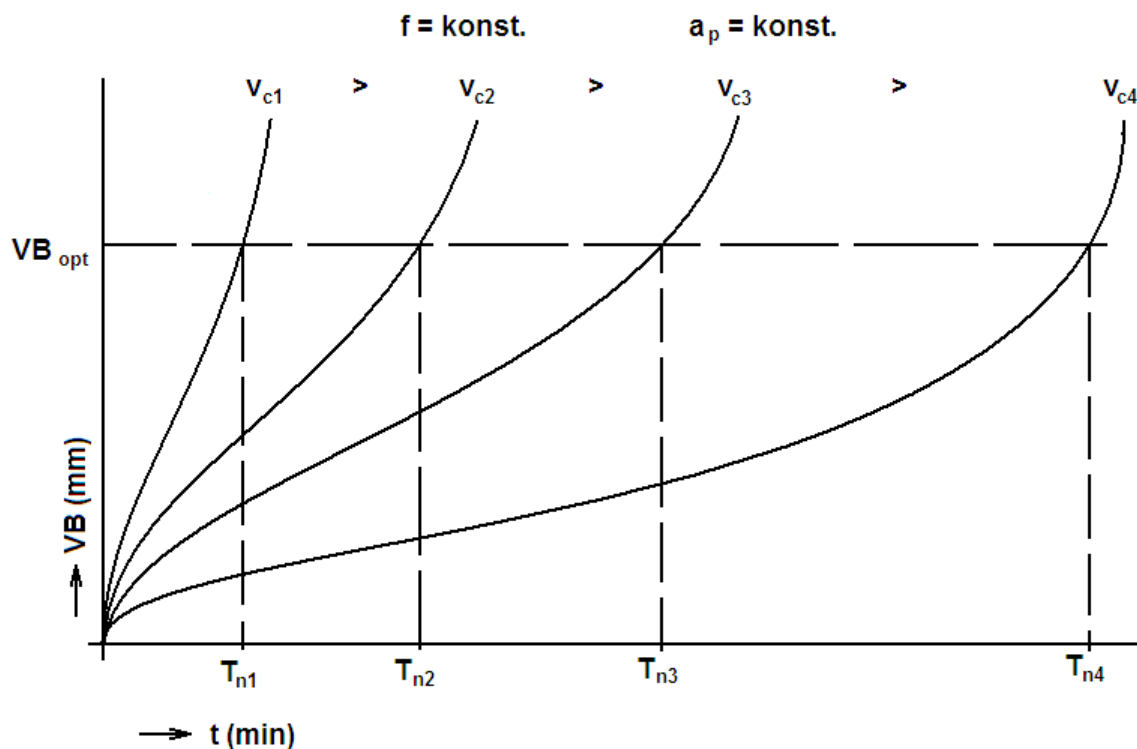
## 6.2. Dlouhodobé zkoušky obrobitelnosti

Dlouhodobá zkouška trvanlivosti je v podstatě jen jedna [10]. Hlavním parametrem je zde hodnota řezné rychlosti a provádí se soustružením nebo frézováním dohodnutými konstantními řeznými parametry, druhem řezného nástroje a geometrií více odstupňovanými řeznými rychlostmi až do optimálního otupení břitu.

Tato zkouška je považována za základní a podle ní se posuzuje míra objektivnosti ostatních zkoušek obrobitelnosti [7]. Lze je využít i k určování řezivosti nástrojů. Nevýhodou je velká spotřeba obráběného materiálu a náročnost na čas zkoušky.

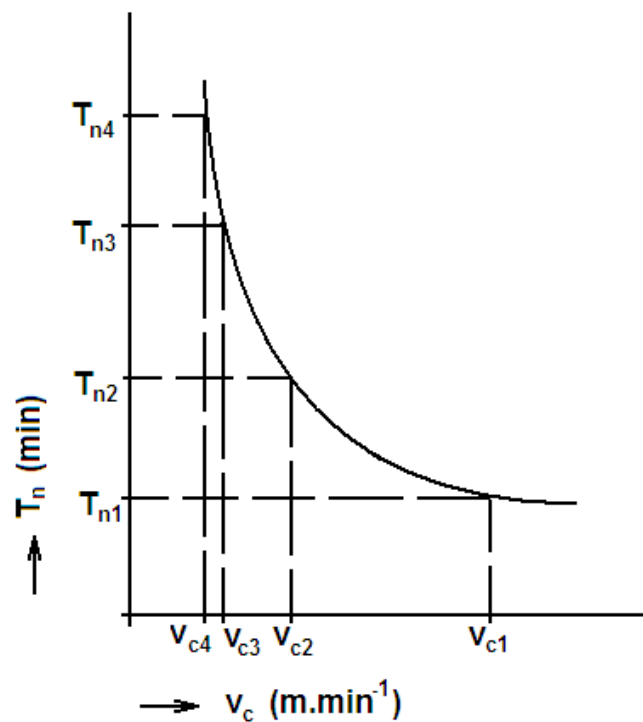
Dlouhodobá zkouška trvanlivosti má následující průběh:

1) změří se časový průběh opotřebení na hřbetu nástroje  $VB_B$  pro několik hodnot rychlostí (tab. 6.4) při konstantních řezných parametrech a sestrojí se křivky otupení (obr. 6.1).



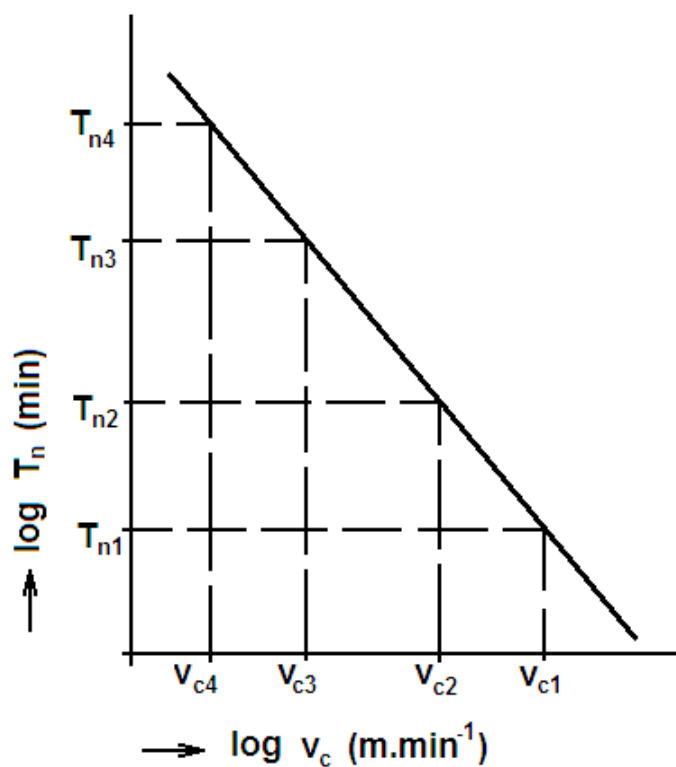
Obr. 6.1 Křivky otupení při proměnné řezné rychlosti,  $f = \text{konst.}$ ,  $a_p = \text{konst.}$

2) Určí se kritérium opotřebení  $VB_{opt}$  a tím se stanoví pro každou řeznou rychlost odpovídající trvanlivost břitu (obr. 6.2).



Obr. 6.2 Stanovení jednotlivých trvanlivostí na základě kritéria opotřebení

3) Sestrojí se závislost  $T_n = f(v_c)$  v logaritmických souřadnicích a pro vybranou trvanlivost je možné stanovit index obrobitelnosti při srovnání řezní rychlosti zkoumaného materiálu s řeznou rychlostí materiálu etalonového (obr. 6.3).



Obr. 6.3 Závislost trvanlivosti na řezné rychlosti





## Shrnutí kapitoly

V této kapitole jste se dozvěděli obecné pojmy a terminologii obrobitelnosti. Jak se obrobitelnost určuje, jaké jsou její významné charakteristiky, na jakých faktorech závisí. Naučili jste se taky, jaké jsou způsoby stanovování obrobitelnosti, za jakých pohledů je možno ji sledovat a jak ji hodnotíme.



## Kontrolní otázky

1. Vysvětlete pojem obrobitelnost.
2. Vyjmenujte nejdůležitější faktory obrobitelnosti.
3. Jaký je rozdíl mezi absolutní a relativní obrobitelností?
4. K čemu slouží referenční materiál a který je pro ocele doporučován?
5. Jaké skupiny materiálů pro možnosti hodnocení obrobitelnosti? Vyjmenujte alespoň 5 z nich.
6. Co je kritériem dlouhodobé zkoušky obrobitelnosti a proč?
7. Jaký průběh má dlouhodobá zkouška trvanlivosti?
8. Proč se naměřené hodnoty převádějí do logaritmických souřadnic?
9. Které řezné parametry jsou při dlouhodobé zkoušce obrobitelnosti konstantní?
10. V jakém typu grafu stanovujeme průběh závislosti trvanlivosti na řezné rychlosti?



## Další zdroje

1. BILÍK, O.: *Obrábění II – 2 díly*. Ostrava : VŠB-TU Ostrava, 1994. 138 s. ISBN 80-7078-228-5
2. BUDA, J. - BÉKÉŠ, J.: *Teoretické základy obrábění kovov*, ALFA Bratislava, 1977
3. BUDA, J. - SOUČEK, J. - VASILKO, K.: *Teória obrábění*, ALFA Bratislava, 1983
4. DÍBALOVÁ, M.: *Obrobiteľnosť brúsením*, Autoreferáty dizertačnej práce, STU Bratislava, 2005
5. GAŠPÁREK, J.: *Dokončovacie spôsoby obrábění*, ALFA Bratislava, 1979
6. JAŠÍK, M.: *Diagramy brúsenia pri brúsení bainitickej ložiskovej ocele 100CR6*, DP SjF, ŽU 2006
7. MÁDL, J. - SCHUBERT, V.: *Experimentální metody a optimalizace v teorii obrábění*. Praha : ČVUT Praha, 1985
8. MIKOVEC, M.: *Obrábění materiálů s velkou pevností a tvrdostí*, SNTL Praha, 1982
9. OŠŤÁDAL, B.: *Broušení slitiny EI 698 VD*, Strojirenství 9, 1985, str. 305-308
10. PŘIKRYL, Z. - MUSILÍKOVÁ, R.: *Teorie obrábění*. 3. opravené vydání, Praha : SNTL Praha, 1982
11. ŠTEKLÁČ, D.: *Technológia výroby valivých ložísk - návody na cvičenia*, ALFA Bratislava, 1987
12. ŠTEKLÁČ, D.: *Návrh skúšky obrábiteľnosti brúsením*, Vedecká konferencia VŠB – TU Ostrava 2005, 7. – 9.9. 2005, ISBN 80-248-0895-1



## CD-ROM

Na videu je vidět vyhodnocení dat naměřených pro dlouhodobou zkoušku obrobitelnosti pro jednotlivé hodnoty řezné rychlosti, získání  $T - vc$  závislosti a její převedení do logaritmických souřadnic a určení koeficiente obrobitelnosti.



## Klíč k řešení

- O 6.1 Obrobitelnost je souhrnný vliv fyzikálních vlastností a chemického složení kovů na průběh a na ekonomické, popř. kvalitativní výsledky procesu řezání.
- O 6.2 Obrobitelnost závisí zejména na: způsobu výroby a tepelném zpracování obráběného materiálu, mikrostruktúře obráběného materiálu, chemickém složení obráběného materiálu, fyzikálních a na mechanických vlastnostech obráběného materiálu, metodě obrábění, pracovním prostředí, geometrii nástroje, druhu a vlastnostech nástrojového materiálu.
- O 6.3 Absolutní obrobitelnost, je spolu související funkční vztah a parametr nebo určitá velikost veličiny charakterizující obrobitelnost.  
Relativní obrobitelnost, je bezrozměrné číslo, které udává poměr velikostí určité veličiny mezi materiálem obrobku a referenčním materiálem.
- O 6.4 Pro ocele je to podle normy materiál 12 050.1 a ve vztahu k tomuto materiálu je určována relativní obrobitelnost.
- O 6.5 a – litiny, b – oceli, c – těžké neželezné kovy (měď a slitiny mědi), d – lehké neželez. kovy (hliník a slitiny hliníku), e – plastické hmoty, f – přírodní nerostné hmoty, g – vrstvené hmoty, v – tvrzené litiny pro výrobu válců.
- O 6.6 Kritériem je předem stanovená velikost opotřebení  $VB_B$ .
- O 6.7 Nejprve se změří se časový průběh opotřebení na hřbetu nástroje  $VBB$  pro několik řezných rychlostí. Dále se určí kritérium opotřebení  $VB_{opt}$  a tím se stanoví pro každou řeznou rychlost odpovídající trvanlivost břítu. Nakonec se sestrojí se závislost  $T_n = f(vc)$  v logaritmických souřadnicích a pro vybranou trvanlivost je možné stanovit index obrobitelnost při srovnání řezní rychlosti zkoumaného materiálu s řeznou rychlostí materiálu referenčního.
- O 6.8 Kvůli jednoduššímu odečítání hodnot trvanlivosti, protože zlogaritmováním se křivka závislosti stane přímkou.
- O 6.9 Konstantní je průřez třísky, tedy hloubka řezu  $x$  posuv.
- O 6.10 V grafu v logaritmických souřadnicích.

## 7. KRÁTKODOBÉ ZKOUŠKY OBROBITELNOSTI

Po úspěšném a aktivním absolvování této KAPITOLY

### Budete umět:

- Způsoby zjišťování obrobitelnosti přímými metodami.
- Způsoby zjišťování obrobitelnosti nepřímými metodami.
- Popsat různé způsoby stanovení obrobitelnosti.
- Určit faktory, na kterých obrobitelnost závisí.

**Budete umět**

### Budete schopni:

- Zhodnotit průběh měření obrobitelnosti.
- Rychle zařadit testované materiály do třídy obrobitelnosti.
- Objektivně stanovit obrobitelnost u netestovaných materiálů.

**Budete schopni**



**Čas ke studiu: 2 hodiny**



**Výklad**

Tyto zkoušky jsou méně objektivní, ale mají výhodu v nesrovnatelně kratší době trvání a nižší spotřebě materiálu. Rychlé a dostatečně přesné stanovování obrobitelnosti materiálu zejména třískovým obráběním s definovatelnou řeznou geometrií břitu nástroje je při současném bouřlivém vývoji neustále nově vyvíjených vysoce pevných, tvrdých a přitom zvláště houževnatých technických materiálů na programu dne.

Jsou vhodné pro rychlé rozřídění skupiny materiálu podle stupně obrobitelnosti, pro ověření eventuální změny stupně obrobitelnosti u jednotlivých dodávek stejného druhu materiálu nebo pro rychlé určení relativního stupně obrobitelnosti z jednotlivých taveb a u nově vyvíjených materiálů.

Podle principu a použitého kritéria lze tyto zkušební metody dále rozdělit na přímé a nepřímé. Metody založené na přímém zjišťování intenzity opotřebení za zostřených či jinak smluvně upravených podmínek. Nepřímé metody vycházejí ze známého, resp. předpokládaného vztahu mezi opotřebením břitu a charakteristickými parametry řezného procesu [7]. Jsou založeny převážně na zjišťování energetických parametrů.

#### Přímé metody zjišťování obrobitelnosti:

- čelní krátkodobá zkouška,
- mikrozkouška trvanlivosti,
- snížení míry opotřebení,
- použití nástroje se sníženou řezivostí,
- zvýšením řezné rychlosti.

#### Nepřímé metody zjišťování obrobitelnosti:

- dynamická metoda (měření sil při obrábění),

- měření tvrdosti obrobku,
- mikrometrická metoda (při stejné hodnotě drsnosti),
- porovnání tvaru třísky,
- Leyensetterova metoda,
- vrtání při konstantním tlaku,
- pomocí teploty řezání,
- měření hloubky zpevněné vrstvy.

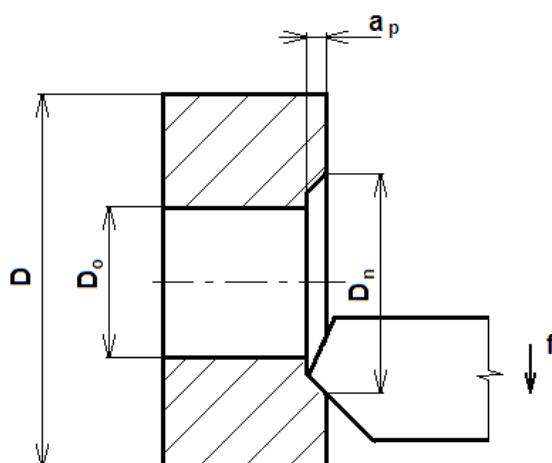
## 7.1. Přímé metody zjišťování obrobiteľnosti

Při **čelní zkoušce** se soustruží mezikruží na čele disku o průměrech  $D_o$  a  $D$ . Soustruží se z průměru  $D_o$  při konstantních otáčkách, posuvu a hloubce řezu. Řezná rychlost s rostoucím obráběným průměrem narůstá. Měří se, na jakém průměru  $D_n$  dosáhne nástroj předem dané hodnoty opotřebení (obr. 7.1). Kritériem je potom porovnání řezné rychlosti zkoumaného materiálu s řeznou rychlostí odpovídající etalonovému materiálu.

$$K_v = \frac{v_{czk}}{v_{cet}} \quad (7.1)$$

$v_{czk}$  – řezná rychlost zkoumaného materiálu ( $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ ),  
 $v_{cet}$  – řezná rychlost etalonového materiálu ( $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ ).

Nevýhodou této metody je nutnost výroby obrobku s velkým poměrem průměru k délce (disku).



Obr. 7.1 Schéma čelní zkoušky obrobiteľnosti [1]

**Mikroskouška obrobiteľnosti** je vhodná pouze u nástrojů, jejichž funkční plochy jsou pečlivě lapovány. Tím se výrazně sníží velikost opotřebení v počáteční fázi obrábění a lze tak získat hodnoty pro sestavení závislosti  $T_n = f(v_c)$  velmi rychle při malé spotřebě obráběného materiálu. Vychází z hodnot otupení na hřbetu  $VB_B = 0,1$  mm. Lze konstatovat, že příslušné závislosti  $T_n - v_c$  jsou prakticky rovnoběžky [1].

**Zkouška za snížené míry opotřebení** vychází z dlouhodobé zkoušky obrobiteľnosti, ale pro její časovou náročnost se volí kritérium obrobiteľnosti  $v_{c5}$  (obrábění řeznou rychlostí po dobu 5 minut) a mezní míra opotřebení 0,2 až 0,3 mm [10]. Jiný autor uvádí mezní míru opotřebení 0,1 až 0,25 mm [7]. Tím se dosáhne snížení trvanlivosti a krátkodobosti zkoušky. Tato zkouška ovšem nezaručuje plnou objektivitu hodnocení indexu obrobiteľnosti. Obrábí se za běžných podmínek jako u dlouhodobé zkoušky.

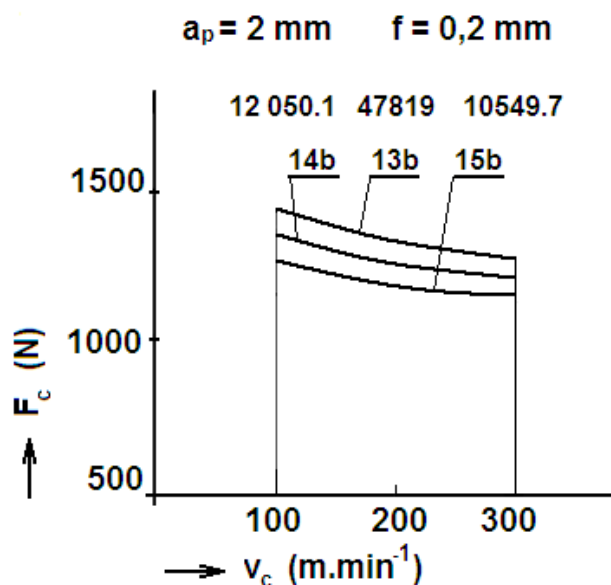
Pokud vhodným tepelným zpracováním **snížíme řezivost nástroje**, dosahuje tento nástroj rychlejšího opotřebování v porovnání s původním nástrojem za stejných řezných podmínek. Tím opět dosáhneme efektu krátkodobé zkoušky. Druhou možností je úprava břitu nástroje (malý úhel špičky a břitu) [7].

Použijeme li **zvýšenou řeznou rychlost**, než se běžně doporučují, dosáhneme za těchto zостřených řezných podmínek snížení trvanlivosti břitu nástroje a tím i krátkodobosti zkoušky. Závislost  $T_n - v_c$  se pak extrapoluje od nižších hodnot trvanlivosti k vyšším nebo se použije přímo nižší hodnota trvanlivosti pro relativní porovnání obrobitelnosti či řezivosti např.  $v_{c7}$ , pro  $T_n = 7$  min [7].

Podstata **dynamické metody** spočívá v teoreticky dokázané a experimentálně potvrzené skutečnosti, že houževnatější (z hlediska obrobitelnosti) materiál, při jinak naprosto stejných řezných podmínkách, ale i ostatních parametrech procesu řezání, klade větší měrný řezný odpor.

Jestliže si předem důkladně připravenými a zodpovědně provedenými dlouhodobými zkouškami „otestujeme“ referenční (etalonový) materiál s doposud z hlediska obrobitelnosti novým neznámým hutním materiálem (vzorkem), můžeme pak stanovit příslušné závislosti a porovnáním vytvořit patřičné „převodové mechanismy“ prostřednictvím nichž, jsme pak schopni dostatečně přesně a časově i ekonomicky značně výhodněji určit obrobitelnost krátkodobou zkouškou.

Průběhy závislosti řezné složky síly obrábění  $F_c$  (v tomto uváděném případě vnějším podélném soustružení) na řezné rychlosti  $v_c$  jsou uvedeny na *obr. 7.2*. Průběhy těchto uvedených závislostí byly testovány za striktně dodržovaných parametrů a technologických podmínek, které stanovuje platná norma. Závislosti zbývajících složek síly řezání  $F_f$  a  $F_p$  se z důvodu podstatně menší významnosti v tomto případě neuvádějí.



Obr. 7.2 Závislost řezné složky síly obrábění na řezné rychlosti

## 7.2. Nepřímé metody zjišťování obrobitelnosti

Při **měření tvrdosti obrobku** se do materiálu vtlačí kužel z tvrdokovu a měří se průměr vtisku etalonového (referenčního) materiálu a zkoumaného materiálu. Index obrobitelnosti se potom určí ze vztahu:

$$K_v = \frac{d_e}{d_{zk}}, \text{ kde} \quad (7.2)$$

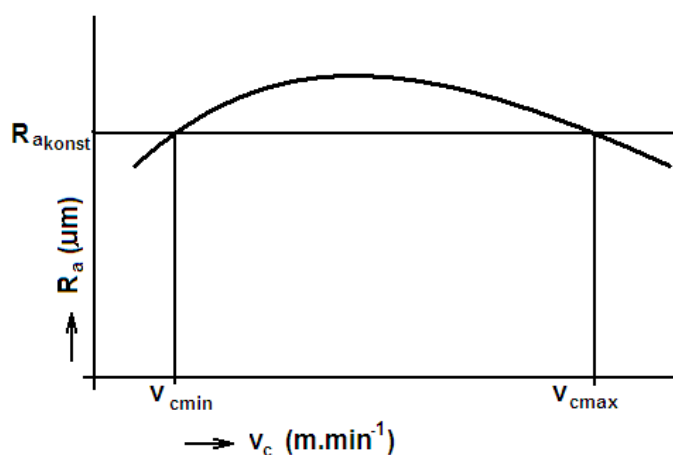
$d_e$  – průměr vtisku do etalonového materiálu (mm),  
 $d_{zk}$  – průměr vtisku do zkoumaného materiálu (mm).

Výhodou je nenáročnost na velikost zkoumaného i etalonového materiálu možnost využití klasických tvrdoměrů.

**Mikrometrická metoda** spočívá v porovnání rozdílu řezných rychlostí zkoumaného a referenčního (etalonového) materiálu při odpovídajících stejných hodnotách drsnosti (obr. 7.3). Toto měření je pouze doplňkové a nelze jej použít jako samostatné kritérium [7, 10]. U některých materiálů je odlišná závislost mezi řeznou rychlostí a  $R_a$  jako na obr. 7.6. V tom případě je určení obrobiteľnosti touto metodou obtížné. Index obrobiteľnosti se potom vypočítá ze vztahu:

$$K_v = \frac{(v_{cmax} - v_{cmin})_e}{(v_{cmax} - v_{cmin})_{zk}}, \text{ kde} \quad (7.3)$$

$(v_{cmax} - v_{cmin})_e$  – rozdíl řezných rychlostí etalonového materiálu ( $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ ),  
 $(v_{cmax} - v_{cmin})_{zk}$  – rozdíl řezných rychlostí zkoušeného materiálu ( $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ ).



Obr. 7.3 Mikrometrická metoda [1]

**Porovnání tvaru třísky** je založeno na porovnání tvaru a druhu třísky. Měří se např. poloměr svinované třísky nebo koeficient pýchování třísky u zkoumaného a etalonového materiálu za stejných řezných podmínek [1]. Stejně jako u předchozí metody je tento parametr stanovování obrobiteľnosti pouze doplňkový a nelze jej použít samostatně. Používá se převážně u automatových ocelí, resp. při obrábění daného materiálu na automatech nebo poloautomatech [10]. Index obrobiteľnosti se potom určí ze vztahu:

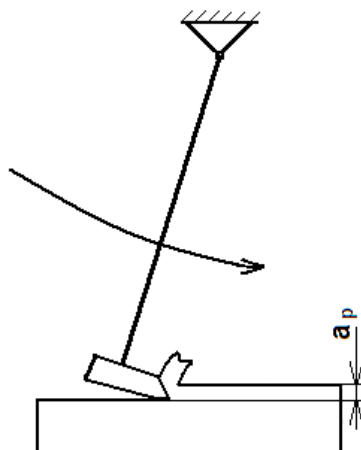
$$K_v = \frac{(r_{te} - r_{tzk})_e}{(r_{te} - r_{tzk})_{zk}}, \text{ kde} \quad (7.4)$$

$r_{te}$  – poloměr svinované třísky etalonového materiálu (mm),  
 $r_{tzk}$  – poloměr svinované třísky zkoumaného materiálu (mm),  
 $K_{zk}$  – koeficient pýchování třísky testovaného materiálu,  
 $K_e$  – koeficient pýchování třísky referenčního materiálu.

**Leyensetterova metoda** je obdobou Charpyho kladiva. Na kyvadle je připevněn nůž, který do vzorku vyryje žlábek (obr. 7.4) [1]. Veličina, která charakterizuje hodnotu indexu obrobiteľnosti, je velikost (délka) žlábků, případně hloubka vniknutí nože do obou materiálů (zkoumaného a etalonového) při jeho spuštění z určité výšky. Index obrobiteľnosti je potom:

$$K_v = \frac{a_{pz_k}}{a_{pe}}, \text{ kde} \quad (7.5)$$

$a_{pz_k}$  – hloubka vniknutí nože do zkoumaného materiálu (mm),  
 $a_{pe}$  – hloubka vniknutí nože do referenčního materiálu (mm).

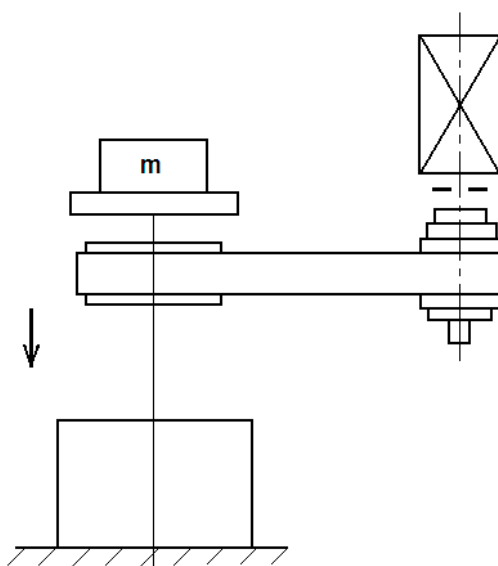


Obr. 7.4 Schéma funkce Leyešetterova kladiva [1]

**Metoda vrtání při konstantním tlaku** spočívá v měření hloubky vrtaného otvoru až do úplného otupení vrtáku [1]. Měří se hloubka jak v referenčním, tak i ve zkoumaném materiálu (obr 7.5). Index obrobiteľnosti se potom stanoví:

$$K_v = \frac{h_{zk}}{h_e}, \text{ kde} \quad (7.6)$$

$h_{zk}$  – vyvrtaná hloubka otvoru do zkoušeného materiálu (mm),  
 $h_e$  – vyvrtaná hloubka otvoru do referenčního materiálu (mm).



Obr. 7.5 Schéma vrtání při konstantním tlaku

Jistou obdobou této metody je vrtání konstantní posunovou silou, při zvolené řezné rychlosti a průměru nástroje (vrtáku) [7]. Vrtá se vždy do konstantní hloubky (konstantní dráha řezu) a současně se měří čas vrtání. Kritériem pro stanovení hodnoty obrobiteľnosti je buď čas vrtání, nebo častěji velikost posuvu. Aby se vyloučil vliv příčného ostří, vrtá se obvykle do předvrtaných otvorů. Čím vyšší dosažený posuv při konstantních pracovních podmínkách, tím lepší je pak obrobiteľnost daného materiálu. Výhodou je velká rychlost zkoušky.

Princip **metody pomocí teploty** spočívá v měření teploty řezání obrábění (střední teploty řezání) etalonového a zkoumaného materiálu při identických pracovních podmínkách [1, 7, 10]. Tato metoda se vyznačuje poměrně vysokým stupněm objektivnosti [10]. Nevýhodou je, že ji lze použít při určování stupně obrobiteľnosti vždy jedné skupiny materiálu (např. uhlíkové oceli, slitiny hliníku, apod.).

Zkouška se provádí za konstantních řezných parametrů a to buď metodou přirozeného termočlánku (viz. kapitola 5), nebo pomocí termodu a to kvůli vyloučení vlivu chemického složení zkoumaného materiálu [7, 10]. Je vhodné zkoušku provést při konstantním průřezu třísky ( $a_p, f = \text{konst.}$ ) a při minimálně třech hodnotách řezné rychlosti. Čím nižší je teplota řezání, tím lepší je i stupeň obrobiteľnosti daného materiálu. Předností je relativně malá spotřeba obráběného materiálu. Index obrobiteľnosti se stanoví ze vztahu:

$$K_v = \frac{\Theta}{\Theta_{\dots}}, \text{ kde} \quad (7.7)$$

$\Theta_e$  – střední teplota řezání etalonového materiálu (°C),  
 $\Theta_{zk}$  – střední teplota řezání zkoumaného materiálu (°C).

Podstata **metody měření hloubky zpevněné vrstvy** je v měření mikrotvrdosti zpevněné vrstvy těsně pod obrobeným povrchem etalonového a referenčního materiálu. Index obrobiteľnosti je dán vztahem:

$$K_v = \frac{HM_e}{HM_{zk}}, \text{ kde} \quad (7.8)$$

$HM_e$  – hloubka zpevněné vrstvy etalonového materiálu ( $\mu\text{m}$ ),  
 $HM_{zk}$  – hloubka zpevněné vrstvy testovaného materiálu ( $\mu\text{m}$ ).



## Shrnutí kapitoly

V této kapitole jste se dozvěděli obecné pojmy a terminologii stanovení obrobiteľnosti pomocí krátkodobých metod. Jak se obrobiteľnost určuje, jaké jsou její významné charakteristiky, na jakých faktorech závisí a to, že ji lze stanovit přímými a nepřímými metodami založených převážně na zjišťování energetických parametrů. Dozvěděli jste se, že krátkodobé zkoušky obrobiteľnosti slouží k rychlému rozřídění materiálů do tříd a skupin obrobiteľnosti.





## Kontrolní otázky

1. Proč jsou krátkodobé zkoušky méně objektivní.
2. Porovnejte výhody a nevýhody krátkodobých zkoušek obrobiteľnosti.
3. Jak se dělí krátkodobé zkoušky obrobiteľnosti a proč?
4. Na čem jsou převážně založeny krátkodobé zkoušky obrobiteľnosti?
5. Vyjmenujte přímé metody zjišťování krátkodobé zkoušky obrobiteľnosti.
6. Vyjmenujte nepřímé metody zjišťování krátkodobé zkoušky obrobiteľnosti.
7. Čeho obdobou je metoda zjišťování pomocí Leyensetterovy metody?
8. Popište stručně metodu hodnocení obrobiteľnosti pomocí teploty.



## Další zdroje

1. BILÍK, O.: *Obrábění II – 2 díly*. Ostrava : VŠB-TU Ostrava, 1994. 138 s. ISBN 80-7078-228-5
2. BUDA, J. - BÉKÉS, J.: *Teoretické základy obrábění kovov*, ALFA Bratislava, 1977
3. BUDA, J. - SOUČEK, J. - VASILKO, K.: *Teória obrábění*, ALFA Bratislava, 1983
4. DÍBALOVÁ, M.: *Obrobiteľnosť brúsením*, Autoreferáty dizertačnej práce, STU Bratislava, 2005
5. GAŠPÁREK, J.: *Dokončovacie spôsoby obrábění*, ALFA Bratislava, 1979
6. JAŠÍK, M.: *Diagramy brúsenia pri brúsení bainitickej ložiskovej ocele 100CR6*, DP SjF, ŽU 2006
7. MÁDL, J. - SCHUBERT, V.: *Experimentální metody a optimalizace v teorii obrábění*. Praha : ČVUT Praha, 1985
8. MIKOVEC, M.: *Obrábění materiálů s velkou pevností a tvrdostí*, SNTL Praha, 1982
9. OŠŤÁDAL, B.: *Broušení slitiny EI 698 VD*, Strojirenství 9, 1985, str. 305-308
10. PŘÍKRYL, Z. - MUSILÍKOVÁ, R.: *Teorie obrábění*. 3. opravené vydání, Praha : SNTL Praha, 1982
11. ŠTEKLÁČ, D.: *Technológia výroby valivých ložísk - návody na cvičenia*, ALFA Bratislava, 1987
12. ŠTEKLÁČ, D.: *Návrh skúšky obrábatel'nosti brúsením*, Vedecká konferencia VŠB – TU Ostrava 2005, 7. – 9.9. 2005, ISBN 80-248-0895-1



## CD-ROM

Na prvním videu je zobrazena čelní zkouška obrobiteľnosti pro dvoje řezné parametry. Koeficient obrobiteľnosti získáme poměrem průměrů, které nástroj obrobí do svého otupení.

Na druhém videu je zobrazena krátkodobá metoda stanovování obrobiteľnosti při vrtání za konstantního tlaku. Jsou vrtány dva materiály vrtákem stejného průměru a stejným zatížením pomocí závaží.



## Klíč k řešení

- O 7.1 Protože nepostihují všechny parametry, které vstupují do procesu hodnocení obrobitelnosti, ale vždy jen 1 podle kterého je vyhodnocována.
- O 7.2 Výhodou krátkodobých zkoušek je nesrovnatelně kratší doba trvání a nižší spotřeba materiálu. Nevýhodou je jejich menší objektivnost.
- O 7.3 Rozdělují se na přímé a nepřímé. Metody přímé jsou založené na zjišťování intenzity opotřebení za zotřených či jinak smluvně upravených podmínek. Nepřímé metody vycházejí ze známého, resp. předpokládaného vztahu mezi opotřebením bříty a charakteristickými parametry řezného procesu.
- O 7.4 Jsou založeny převážně na zjišťování energetických parametrů procesu obrábění jako např. měření sil při obrábění, měření tvrdosti obrobku, drsnost povrchu, porovnání tvaru třísky, konstantní tlak, teplota řezání, apod.
- O 7.5
- čelní krátkodobá zkouška,
  - mikrozkouška trvanlivosti,
  - snížení míry opotřebení,
  - použití nástroje se sníženou řezivostí,
  - zvýšením řezné rychlosti.
- O 7.6
- dynamická metoda (měření sil při obrábění),
  - měření tvrdosti obrobku,
  - mikrometrická metoda (při stejné hodnotě drsnosti),
  - porovnání tvaru třísky,
  - Leyensetterova metoda,
  - vrtání při konstantním tlaku,
  - pomocí teploty řezání,
  - měření hloubky zpevněné vrstvy.
- O 7.7 Charpyho kladivo
- O 7.8 Princip metody pomocí teploty spočívá v měření teploty řezání obrábění (střední teploty řezání) etalonového a zkoumaného materiálu při identických pracovních podmínkách. Index obrobitelnosti je potom určen poměrem mezi teplotou etalonového ku zkoumanému materiálu.

## 8. MĚŘENÍ SLOŽEK SÍLY ŘEZÁNÍ

Po úspěšném a aktivním absolvování této KAPITOLY

### Budete umět:

- Definovat sílu řezání a její jednotlivé složky.
- Přímé metody měření složek řezání.
- Schéma rozdělení složek řezání.

**Budete umět**

### Budete schopni:

- Měřit síly při obrábění a jejich identifikaci.

**Budete schopni**



**Čas ke studiu:** 1,5 hodiny



### Výklad

Mechanismus tvorby třísky prokazuje, že při vnikání řezného klínu do materiálu obrobku vzniká v obráběném materiálu stav napjatosti, který způsobuje v mezní situaci jeho dělení. Proces tohoto dělení doprovází menší anebo větší plastické, ale i elastické deformace. Kromě jevů deformačních se při tomto procesu prosazují i poměry silové.

Poznání těchto silových poměrů procesu řezání nám umožní získat přehled o mechanickém namáhání soustavy obrábění, a tím i podklady pro řešení celé technologické soustavy jak z hlediska pevnosti, tak i její tuhosti včetně dynamické stability řezného procesu.

Dále je možné získat podklady pro určení příkonu obráběcího stroje, zajištění energetické účinnosti řezného procesu i posuzování jeho tepelných jevů, pro hodnocení a posuzování těchto tepelných jevů při procesu řezání, pro hodnocení trvanlivosti řezného nástroje, respektive jeho životnosti, ale také pro posouzení podmínek přesnosti, jakož i celkové ekonomické bilance třískového obrábění.

Zvlášť významnou veličinou tohoto procesu je síla obrábění (řezání), kterou je nutno chápat jako veličinu časově proměnnou. Stav napjatosti v obráběném materiálu způsobuje řezný odpor  $R$ , který síla řezání (obrábění) musí při řezném procesu neustále překonávat (*obr. 8.1*).

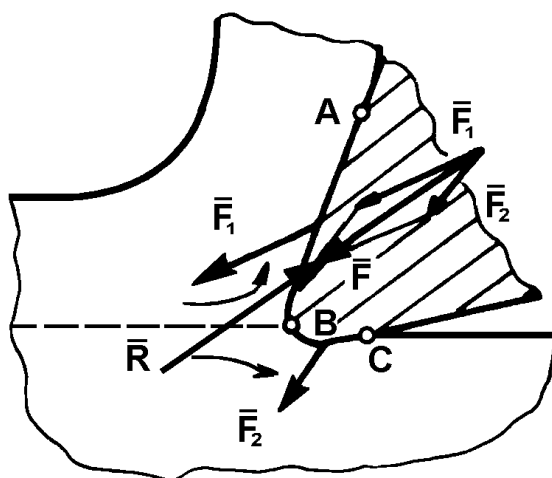
Pro podmínku rovnováhy pak platí:

$$F = - R (N) \quad (4.1)$$

$F$  – síla obrábění (N),  
 $R$  – řezný odpor (N).

Síla řezání (vznikající při obrábění) je jevem dynamickým. Při obrábění v závislosti na čase její okamžitá velikost  $F_{ok}$  kolísá ( $\pm$  až 20 %), a to i při řezání (obrábění) za konstantních řezných podmínek. Je to způsobeno zejména rozptylem mechanických vlastností obráběného (testovaného)

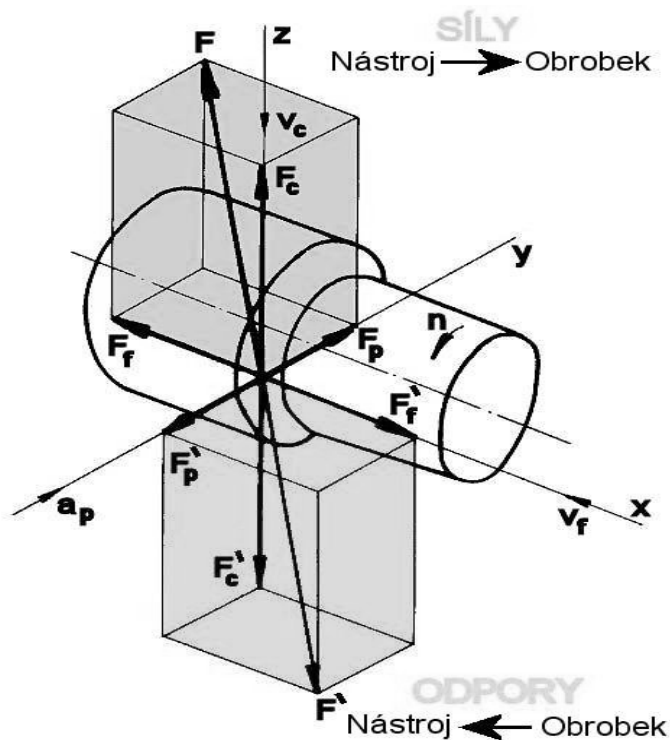
materiálu a mechanikou tvorby třísky. Zejména z tohoto důvodu je pro věrohodnost naměřených výsledků prováděný experiment vždy několikrát opakovat.



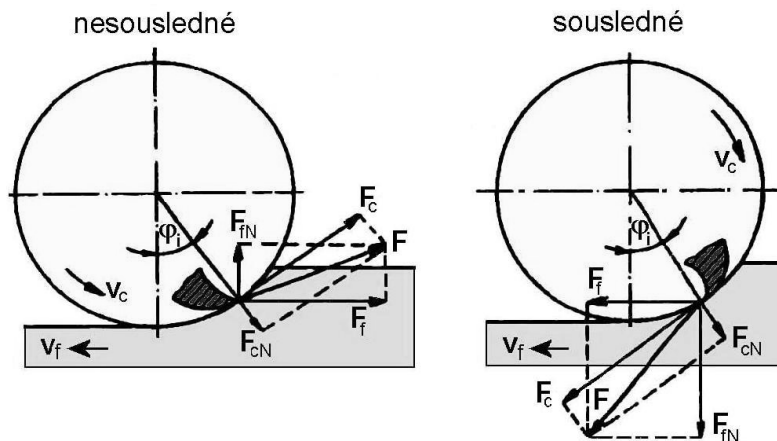
Obr. 8.1 Síla řezání (obrábění) a její rozklad při soustružení [11]

Síla obrábění (vznikající při řezání)  $F$  je výslednicí dvou složek, a to aktivní složky řezání  $F_1$  a složky pasivní  $F_2$ . Aktivní složku řezání pak lze dále rozkládat na řeznou složku síly obrábění  $F_c$  a složku posuvu  $F_f$ . Typický rozklad řezné síly na složky je pro soustružení na obr. 8.2, pro frézování na obr. 8.3 a pro vrtání na obr. 8.4.

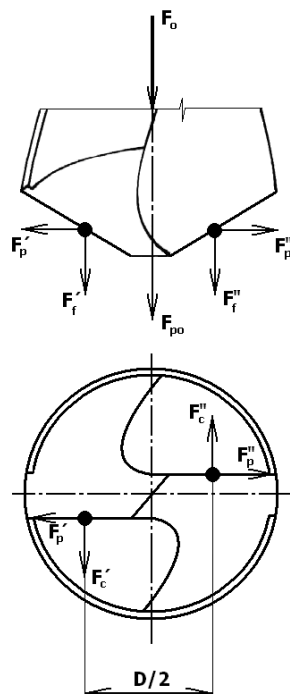
Poměr velikostí jednotlivých složek je dán především určitou technologií obrábění a geometrií nástroje (např.  $F_c : F_p : F_f = 1 : 0,4 : 0,25$ ). Ze všech složek síly řezání má zpravidla největší význam řezná (tangenciální) složka  $F_c$ . Je základem pro formulaci omezujících podmínek zejména při optimalizaci řezných parametrů.



Obr. 8.2 Schéma rozložení složek síly řezání při soustružení [11]



Obr. 8.3 Schéma rozložení složek síly řezání při frézování,  $F$  - celková řezná síla,  $F_c$  - řezná síla,  $F_{cN}$  - kolmá řezná síla,  $F_f$  - posuvová síla,  $F_{fN}$  - kolmá posuvová síla [11]



Obr. 8.4 Schéma rozložení složek síly řezání při vrtání [11]

Závislost řezné složky síly soustružení  $F_c$  na posuvu (neuvažujeme-li aspekty a parametry HSC – vysokorychlostního a HFC – vysokoposuvového obrábění) má stoupající tendenci. Stejný průběh má závislost řezné složky síly obrábění  $F_c$  na tloušťce obráběné vrstvy  $a_p$ .

Je to zřejmé z rovnice (4.2):

$$F_c = c_{F_c} \cdot a_p^{x^{F_c}} \cdot f^{y^{F_c}} \quad (\text{N}) \quad (4.2)$$

$c_{F_c}$  – konstanta,  
 $x^{F_c}$  – exponent pro hloubku třísky,  
 $y^{F_c}$  – exponent pro posuv.

Analogicky to platí pro složku  $F_p$  i  $F_f$ .

Mimo posuvu a tloušťky obráběné vrstvy (hloubky řezu) ovlivňují absolutní velikost i vzájemný poměr velikosti složek také:

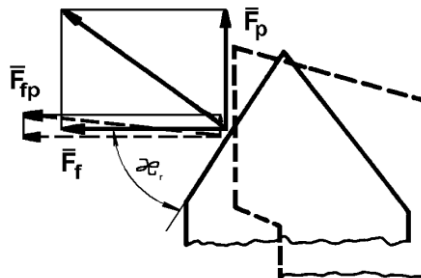
- řezná rychlost,
- geometrie břitu,
- stav otupení břitu,
- pevnost a tvrdost obráběného materiálu,
- řezné prostředí.

Vliv popisovaných pracovních podmínek na absolutní velikost složek síly soustružení také souvisí s jejich vlivem na velikost práce řezání, popřípadě na velikost měrného řezného odporu. Řezná rychlost ovlivňuje v podstatě stejně všechny tři složky. Její vliv na velikost řezné složky  $F_c$  je analogický s jejím vlivem na měrný řezný odpor.

Geometrické parametry břitu mají na sílu řezání rovněž veliký vliv. Na jednotlivé složky síly soustružení má marginální vliv zejména úhel čela. Jeho vliv na řeznou složku  $F_c$  je také v souladu s jeho vlivem na měrný řezný odpor. Není však v celém rozsahu řezných podmínek stejný. Podstatně větší vliv má na pasivní složku  $F_p$  a na složku posuvovou  $F_f$ . Se snižujícím se úhlem čela se posuvová složka síly soustružení složka pasivní budou zvětšovat.

Také vliv úhlu nastavení na rozložení síly soustružení má značný vliv. Platí to rovněž o poloměru zaoblení ostří a podobně. Úhel sklonu ostří  $\lambda_s$  působí na směr odcházející třísky, čímž také ovlivňuje velikost deformační práce i práci vzniklou třením. Jelikož ovlivňuje jako úhel nastavení hlavního ostří  $\kappa_r$  směr vektoru síly soustružení  $F$ , není jeho vliv na velikost jednotlivých složek stejný. Úhel hřbetu taktéž ovlivňuje velikost řezné složky síly soustružení (obr.8.5). Vliv na složku  $F_c$  lze posoudit z jeho vlivu na měrný řezný odpor. Konečně poloměr špičky břitu  $\epsilon_r$  řezného nástroje má na velikost síly obrábění a její složky vliv, který je zpravidla protichůdný vlivu  $\kappa_r$ . Silně na složky  $F_c$  a  $F_f$  působí zejména řezné prostředí.

Výpočty síly obrábění jsou u různých technologií obrábění odlišné. Většina jich však vychází z geometrie průřezu odřezávané vrstvy. Níže uvedené vztahy pro soustružení nutno chápat jako základ pro výpočet sil při obrábění. Vztahy je pak možné vzájemně vhodně kombinovat, resp. doplňovat dalšími výpočty.



Obr. 8.5 Vliv úhlu nastavení  $\kappa_r$  na pasivní  $F_p$  a posuvovou složku  $F_f$

Pokles pasivní složky  $\overline{F}_p$  a růst posuvové složky  $\overline{F}_f$  se zvětšujícím se úhlem nastavení  $\kappa_r$  je dán natáčením jejich výslednice  $\overline{F}_{fp}$ , která zůstává přibližně ve stejné pozici k ostří. Úhel sklonu ostří  $\lambda_s$  ovlivňuje stáčení třísky, a tím i deformaci třísky spojenou s jejím třením po ploše čela břitu.

Proces řezání v celé své složitosti probíhá za působení síly řezání  $F$ , vyvolané ostřím řezného nástroje. Působením síly řezání je přezkoumán řezný odpor obráběného materiálu. Při studiu silových poměrů je nutno vycházet z podmínek energetické rovnováhy, respektive z podmínek rovnováhy sil.

Lze konstatovat, že z hlediska experimentálního studia silových poměrů při třískové obrábění jde v podstatě o přímé nebo nepřímé stanovení síly řezání, o přímé nebo nepřímé stanovení složek síly řezání a momentů působících v řezném procesu při různých pracovních podmínkách.

## 8.1. Nepřímé měření sil a momentů

Metody pro nepřímé měření sil vycházejí převážně z výkonu elektromotoru obráběcího stroje. Ze známého vztahu pro užitečný výkon při obrábění

$$P_{u\dot{z}} = F_c \cdot v_c \quad (\text{W}) \quad (4.3)$$

$P_{u\dot{z}}$  – užitečný výkon (W),  
 $F_c$  – tangenciální (řezná) složka síly obrábění (řezání) (N),  
 $v_c$  – řezná složka rychlosti obrábění ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ).

plyne, že nepřímým měřením lze z výkonu hnací jednotky stanovit pouze tangenciální složku síly řezání. Tuto složku lze rovněž stanovit nepřímým měřením z točivého (krouticího) momentu.

Jednou z metod je **stanovení tangenciální (řezné) složky z výkonu**. Při měření výkonu elektromotoru obráběcího stroje se převážně používá wattmetrů, které v porovnání s jinými metodami měření výkonu střídavého proudu dávají přímý údaj. Většina klasických obráběcích strojů je poháněna elektromotory asynchronními na třífázový proud. Dle požadavků na přesnost se pro měření výkonů používá i různých zapojení wattmetrů (např. WATTREG 10 a WATTREG 20), které jsou určeny pro měření časových závislostí činného nebo jalového výkonu ve střídavé trojfázové soustavě.

Při stanovení tangenciální složky síly obrábění se vychází z užitečného výkonu, potřebného k vlastnímu řezání (obrábění). Nejprve se proto změří výkon nezatíženého obráběcího stroje, tj. výkon chodu naprázdno  $P_o$ , potom se proměří celkový výkon obráběcího stroje při obrábění  $P_c$ . Pro užitečný výkon  $P_{u\dot{z}}$  pak platí:

$$P_{u\dot{z}} = P_c - P_o \quad (\text{W}) \quad (4.4)$$

$P_c$  – celkový výkon obráběcího stroje (W),  
 $P_o$  – výkon při chodu naprázdno (W),

Pro tangenciální složku síly řezání se vychází ze vztahu 4.3 a z toho plyne

$$F_c = \frac{P_{u\dot{z}}}{v_c} \quad (\text{W}) \quad (4.5)$$

Uvedená metoda nepřímého stanovení tangenciální složky síly obrábění je poměrně jednoduchá, nevyžaduje nákladnou speciální měřicí techniku a je možné ji použít u všech způsobů obrábění. Nevýhodou této metody je omezená přesnost měření, způsobená rozdílnou účinností stroje při zatížení a při chodu naprázdno a zanedbání vlivu ostatních složek síly řezání na výkon elektromotoru obráběcího stroje.

**Stanovení tangenciální (řezné) složky síly obrábění z  $M_k$**  se využívá při vrtání. Také tato nepřímá metoda stanovení tangenciální složky síly obrábění vychází z měření celkového výkonu pomocí přenosného univerzálního zapisovacího přístroje. Po změření výkonu se vysune nástroj ze záběru a při stejných otáčkách se vřetenem obráběcího stroje zatěžuje vhodnou mechanickou brzdou tak, až se dosáhne stejného údaje na registračním přístroji jako při předchozím obrábění. Z podmínky rovnováhy točivého momentu od tangenciální složky síly řezání a točivého momentu vyvolaného mechanickou brzdou plyne:

$$M_k = \frac{F_c \cdot D}{2} = M_{kb} \quad (\text{N.m}) \quad (4.6)$$

$M_{kb}$  – točivý moment vyvolaný mechanickou brzdou (N.m),  
 $D$  – průměr nástroje nebo obrobku (mm),  
 $M_k$  – točivý moment od tangenciální složky síly obrábění (N.m).

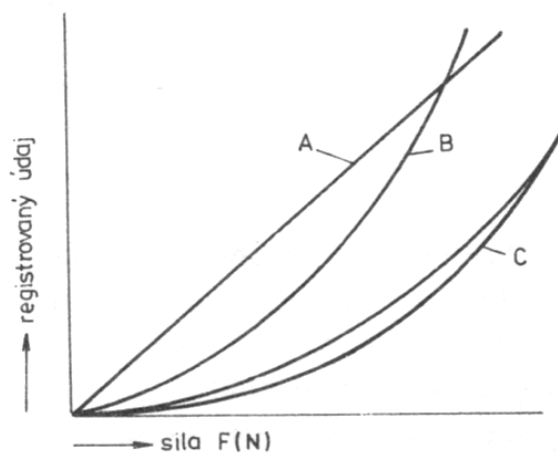
Výsledky měření při aplikaci nepřímé metod stanovení tangenciální složky síly obrábění z točivého momentu nejsou ovlivňovány rozdílnou účinností obráběcího stroje při zatížení a chodu naprázdno, jsou však ovlivňovány proměnlivostí součinitele tření na brzdě. Tato metoda se při experimentálním studiu dynamiky řezného procesu se používá méně často.

## 8.2. Cejchování dynamometrů

Přesnost měření jednotlivých složek síly řezání a točivých momentů je podmíněna celou řadou faktorů, ale i správností cejchování. Cejchováním se rozumí porovnání údajů dynamometru se skutečnou hodnotou sledované veličiny.

Dynamometr se postupně zatěžují měnicí se silou známé předem velikosti a na měřidle (číselníkovém úchylkoměru) se odečítá odpovídající výchylka. Výsledky se zaznamenávají tak, že se přímo vyjadřuje vztah mezi skutečným zatížením dynamometru v místě působení složky síly řezání a údajem na měřicím zařízení. Výsledkem cejchování je sestavení cejchovní křivky, která je grafickým vyjádřením závislosti mezi danou složkou síly řezání a odpovídající veličinou (např. mA, mV, apod.). Cejchování je vhodné provádět v celém měřicím rozsahu a to jak při zatěžování, tak i při odlehčování, aby bylo možné případnou hysterezi, nebo nelinearitu dynamometru eliminovat (obr. 4.10). Při cejchování vícesložkových dynamometrů je nutné uvedený způsob cejchování aplikovat pro každou složku síly řezání i točivý moment. Přesnost měření se odvíjí od vzájemného ovlivňování jednotlivých složek síly řezání, které je možné stanovit při jejich odděleném cejchování.

Cejchování se obvykle provádí přímo na obráběcích strojích nebo na upravených pracovištích. Zatěžující síla se zpravidla nastavuje pomocí pákového mechanismu a závaží. Pro vyvození větších sil se používají mechanické nebo hydraulické ruční lis. Rozhodující je zatěžování dynamometru v místě předpokládaného působení složky síly obrábění. Protože je dovoleno použití různých soustružnických nožů (v rámci rozsahu dynamometru), je délka vyložení těchto nožů různá. Z toho důvodu je nutné pro složky síly obrábění (řezání)  $F_c$  a  $F_f$  přepočítávat cejchovací hodnoty v poměru vyložení cejchovacího hranolu a soustružnického nože. Při cejchování se mezi zatěžovací šroub a cejchovací hranol vkládá třmenový mechanický dynamometr, jehož deformaci lze vyvodit zatěžovacím šroubem.



Obr. 8.6 Příklady cejchovacích křivek,  
A – ideální lineární závislost, B – nelineární závislost, C – křivka s hysterezí [3]





## Shrnutí kapitoly

V této kapitole byl popsán princip vzniku síly řezání a její rozklad na jednotlivé složky u vybraných metod obrábění (soustružení, frézování, vrtání). Dále jste se mohli dozvědět, jak se měří tyto složky nepřímými metodami a jak se cejchují dynamometry.



## Kontrolní otázky

1. Jaké síly vznikají při obrábění?
2. Vysvětlete rovnici rovnováhy.
3. Jaké znáte způsoby nepřímého měření sil?
4. Popište vznik síly řezání.
5. Jak je obecně definována síla?
6. Jaký vliv má geometrie řezného klínu na síly řezání?
7. Jakým způsobem se cejchuje dynamometr?



## Další zdroje

1. AKASAWA, T. - TAKESHITA, H. - UEHARA, K.: *Hot machining with cooled cutting edge*, CIRP 1/1987 p.37 - 41
2. BEŇO, J.: *Teória rezania kovov*, Viena Košice 1999, ISBN 80-7099-429-0
3. BUDA, J. - BÉKÉS, J.: *Teoretické základy obrábania kovov*, ALFA Bratislava, 1977
4. BUDA, J. - SOUČEK, J. - VASILKO, K.: *Teória obrábania*, ALFA Bratislava, 1983
5. BURYTA, D – SOWERBY, R. – YELLOWLEY, I.: *Stress distribution on the rake face during ortogonal cutting*, Journal of Mach Tools Manufact 1994, p. 721 – 739
6. ENDRES, W.J - DEVOOR, R.E. - KAPOOR, S.G.: *Dual mechanism approach to the prediscion of machining forces*, Journal of engineering for industry, ASME 1995, p.527 – 541
7. GRZESIK, W.: *The role of coating in controlling the cutting process when turning with coated indexable inserts*, Materials Processing Technology 79/1998, p. 133-143
8. GRZESIK, W.: *Experimental investigation of the influence of adhesion on the frictional conditions in the cutting process*, Tribology international, 32/1999, p-15 – 23
9. HAHN, R. S. - LINDSAY, R. P.: *Principles of Grinding', Parts I., 2 and 3*, Machinery Magazine, July- September, 1971 (3 edition)
10. U. HÖGLUND, U. - SVAHN, O.: *Cutting edge wear in microscale physical conditions-wear processes*, CIRP, 1/1976, pp. 99
11. HUMÁR, A.: *Technologie I – technologie obrábění – syllabus*. Brno : VUT Brno, 2003, <http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/?page=opory>
12. MÁDL, J. - SCHUBERT, V.: *Experimentální metody a optimalizace v teorii obrábění*. Praha : ČVUT Praha, 1985.
13. MERCHANT, M.E.: *Mechanics og the Metal Cutting Process*, Journal of Applied

- physics, 16/1945, p. 267 – 275
14. MERCHANT, M.E. – ERNST, H.: *Chip formation, friction and high quality machined surface*, ASME Ohio, 1941, p.299 – 378
  15. MIKILIC, D. – SEKULIC, M. – GOSTIMIROVIC, M. - UZELAC, S.: *Size of the torque and axial force dependence on the friction force on edge of the drill and transversal blade work*, MMA 2000 Novi Sad, p. 19-20
  16. NESLUŠAN, M. - CZÁN, A.: *Obrábanie titánových a niklových zliatin*, EDIS Žilina, 2001, ISBN 80-7100-933-4
  17. POPPEOVÁ, V.: *Monitorovanie opotrebenia rezných nástrojov*, EDIS Žilina, 2001, ISBN 80-7100-700-5
  18. SHAW, M.C.: *Metal cutting principles*, Oxford, Clarendon, 1989



## CD-ROM

Video ukazuje, jak se cejchuje dynamometr v laboratořích Katedry obrábění a montáže. Postupně zobrazuje cejchování všech tří složek řezné síly –  $F_c$ ,  $F_p$  a  $F_f$  pro zatěžovací a odlehčovací křivky, jejímž zprůměrováním vznikne cejchovací křivka dynamometru.



## Klíč k řešení

- O 8.1  $F_c$  – řezná složka síly obrábění,  $F_f$  – posuvová složka síly obrábění,  $F_p$  – pasivní složka síly obrábění.
- O 8.2 Stav napjatosti způsobuje řezný odpor, který musí síla řezání překonat. Rovnicí rovnováhy se rozumí rovnováha mezi řeznou silou a řezným odporem  $F = -R$ .
- O 8.3 Tyto metody vycházejí z výkonu elektromotoru a jsou to stanovení tangenciální složky síly obrábění z krouticího momentu  $M_k$  a stanovení tangenciální (řezné) složky z výkonu pomocí wattmetru.
- O 8.4 Síla obrábění (vznikající při řezání)  $F$  je výslednicí dvou složek, a to aktivní složky řezání  $F_1$  a složky pasivní  $F_2$ . Aktivní složku řezání pak lze dále rozkládat na řeznou složku síly obrábění  $F_c$  a složku posuvu  $F_f$ . Síla řezání (vznikající při obrábění) je jevem dynamickým. Při obrábění v závislosti na čase její okamžitá velikost  $F_{ok}$  kolísá až o  $\pm 20\%$ .
- O 8.5 Definice síly je postavena na pohybové rovnici posuvného pohybu  $F = m \cdot a$ . Obecná definice síly je tedy „Působení okolních těles na těleso sledované“.
- O 8.6 Na jednotlivé složky síly soustružení má marginální vliv zejména úhel čela. Se snižujícím se úhlem čela se posuvová složka síly soustružení a složka pasivní budou zvětšovat. Značný vliv na rozložení síly soustružení má také úhel nastavení. Platí to rovněž o poloměru zaoblení ostří a podobně. Úhel sklonu ostří  $\lambda_s$  působí na směr odcházející třísky, čímž také ovlivňuje velikost deformační práce i práci vzniklou třením. Úhel nastavení hlavního ostří  $\kappa_r$  má vliv na směr vektoru síly soustružení  $F$ . Úhel hřbetu taktéž ovlivňuje velikost řezné složky síly soustružení. Poloměr špičky bříty  $\epsilon_r$  řezného nástroje má na velikost síly obrábění a její složky vliv, který je zpravidla protichůdný vlivu  $\kappa_r$ .
- O 8.7 Dynamometr se postupně zatěžuje měnicí se silou předem známé velikosti a na měřidle (číselníkovém úchylkoměru) se odečítá odpovídající výchylka. Výsledky se zaznamenávají tak, že se přímo vyjadřuje vztah mezi skutečným zatížením dynamometru v místě působení složky síly řezání a údajem na měřicím zařízení. Výsledkem cejchování je sestavení cejchovní křivky, která je grafickým vyjádřením závislosti mezi danou složkou síly řezání a odpovídající veličinou, nejlépe v celém rozsahu měření.

## 9. PŘÍMÉ MĚŘENÍ SIL A MOMENTŮ

Po úspěšném a aktivním absolvování této KAPITOLY

### Budete umět:

- Teorii k měření deformací během obrábění pomocí dynamometrů.
- Základní požadavky kladené na dynamometry.
- Základní rozdělení dynamometrů.

**Budete umět**

### Budete schopni:

- Provést měření pomocí dynamometru.
- Vyhodnotit naměřené deformace při obrábění.

**Budete schopni**



**Čas ke studiu: 2 hodiny**



### Výklad

Přímé měření složek síly řezání a jejich točivých momentů se zakládá na měření deformací v soustavě stroj – nástroj – obrobek během obrábění prostřednictvím dynamometrů. Dynamometr jakožto měřicí přístroj musí zaručit nezávislost měřicí veličiny na provozních vlastnostech přístroje. Dále se od něj požaduje schopnost měřit sledovanou veličinu ve zvoleném rozsahu s maximální přesností, musí zaručit stálost naměřených hodnot s časem včetně její reprodukovatelnosti. Z těchto uvedených charakteristik plynou základní požadavky kladené na dynamometry:

1. **Tuhost dynamometrů** je dána velikostí zatěžující síly  $F$ , která způsobí deformaci  $y$ . Velikost této deformace závisí na tvaru a provedení deformačního elementu – čidla, na celkovém konstrukčním provedení dynamometru i na použité měřicí metodě. Dostatečná tuhost dynamometru je zásadní při měření dynamickým.
2. **Citlivost dynamometrů** souvisí s citlivostí použité měřicí metody i s tuhostí konstrukčního provedení dynamometru. Dynamometr musí mít takovou citlivost, že nejmenší odečítaná jednotka při dodržení dostatečné přesnosti odečítaná odpovídala celkové hodnotě měřené veličiny.
3. **Stálost údajů dynamometrů** je závislá na tuhosti, citlivosti a přesnosti od stanovení nulové polohy až po zachycení údajů o sledované veličině, a to po celou dobu měření.
4. **Reprodukovatelnost údajů** dynamometrů úzce souvisí s výše uvedenými charakteristikami.
5. **Setrvačnost dynamometrů** závisí přímo úměrně na hmotnosti soustavy. Zejména při dynamických měřeních, kdy je nesmírně nutné sledovat jak skutečné hodnoty maximálních a minimálních hodnot měřené síly řezání, tak i její časový průběh, by měla být setrvačnost co možná nejmenší.
6. **Konstrukce dynamometrů** musí zajistit, aby se složky řezné síly vzájemně neovlivňovaly.

Aparatura na měření složek řezné síly se zpravidla skládá ze tří částí:

1. Pružný člen – přebírá vnější zatížení a překonává jisté změny (deformace, změna polohy apod.),
2. Snímač – mění mechanickou veličinu změny pružného členu na hodnotu analogického parametru měřící aparatury,
3. Přijímač – zesiluje a zpracovává signál snímače, případně zapisuje velikost zatížení.

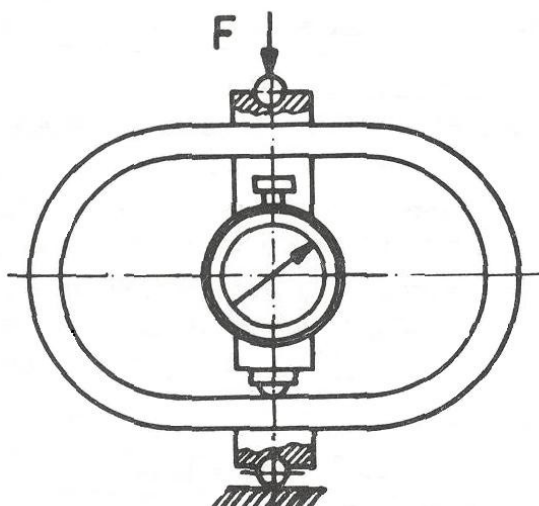
Základní rozdělení dynamometrů:

Rozdělení dynamometrů lze provést dle následujících hledisek:

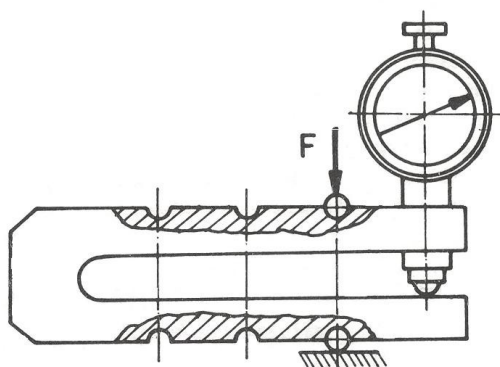
1. Podle *počtu měřených složek* síly řezání jde o dynamometry jednosložkové, dvousložkové, tříložkové a pro měření točivých (krouticích) momentů.
2. Podle *aplikované měřicí metody*, respektive dle způsobu přenosu působení síly z deformačního členu na indikační. V tomto případě se jedná o dynamometry mechanické, hydraulické, pneumatické, elektrické (indukční, kapacitní, odporové, využívající piezoelektrického jevu), optické a podobně.
3. Podle *metody obrábění* to jsou dynamometry pro soustružení, frézování, vrtání, broušení atd., případně dynamometry univerzální.

Zpravidla se používají **mechanické dynamometry** pro cejchování jiných druhů dynamometrů, protože u nich lze většinou vyloučit nežádoucí rušivé vlivy a jsou dále charakteristické naprosto lineárním vztahem mezi sledovanou silou a vlastními naměřenými údaji.

U mechanických dynamometrů se působení síly přenáší přímo nebo znásobeně mechanickým převodem na měřicí prvek, jako je například číselníkový úchylkoměr. O velikosti síly se usuzuje z deformace silových pružin, kroužků, třmenů, nosníků, membrán, případně podle hloubky vtláčení kuličky do materiálu o známé tvrdosti. Hlavním představitelem této skupiny dynamometrů jsou dynamometry třmenové. Pro zatížení až do 10 000 N a dynamometry kruhové nebo také prstencové (*obr. 9.2*) pro zatížení ještě vyšší (*obr. 9.1*). Mechanické dynamometry jsou jednoduché, spolehlivé, vyznačují se stálostí údajů a stálou přesností v rozmezí 0,5 – 2 %. K nevýhodám mechanických dynamometrů patří závislost jejich údajů na teplotě, obtížná změna rozsahu měření, nutnost vymezování vůlí v mechanismech, únava materiálu a velká setrvačnost systémů, která nedovoluje jejich použití pro měření dynamická.



Obr. 9.1 Mechanický dynamometr prstencový [12]



Obr. 9.2 Mechanický dynamometr třmenový [12]

Podstatou **hydraulických dynamometrů** je přenos účinku měření síly nebo momentu na píst nebo membránu hydraulického obvodu, jejichž pohyb způsobuje změnu tlaku v kapalině. Tato změna je potom snímána pomocí manometru, nebo jiným přístrojem. Výhodou těchto dynamometrů je jednoduchá konstrukce a možnost snadného měření více složek současně. Nevýhodou naopak nízká citlivost, požadavky na dokonalé utěsnění systému a velká setrvačnost. Proto se nedají použít pro dynamická měření. V současné době se používají spíše výjimečně.

Podstatou **pneumatikých dynamometrů** je snímač deformace pneumatickým systémem klapka – tryska, který využívá dynamických vlastností vzduchu procházejícího štěrbinou. Jsou principiálně založeny na měření změny tlaku nebo průtoku v závislosti na změně výtokového průřezu mezi klapkou a tryskou v deformačním elementu. Předností je snadná obsluha a údržba, vysoká spolehlivost a citlivost v porovnání s elektrickými způsoby a relativně nízké náklady na pořízení a provoz.

**Elektrické dynamometry** patří mezi nejrozšířenější a nejvíce používané dynamometry v technické praxi. Mezi základní přednosti elektrických dynamometrů patří:

- a) snadný přenos dálkového signálu s celou řadou možných úprav,
- b) možnost snímání signálu při rotujících a pohybujících se součástech,
- c) využití miniaturních měřicích elementů,
- d) možnost vhodné registrace zachycených signálů různých průběhů a frekvencí,
- e) snadná dostupnost napájecích zdrojů a čistota provozu.

Dle způsobu mechanicko-elektrické transformace je možné rozlišovat dva základní systémy elektrických dynamometrů:

1. *Systémy parametrické*, které jsou založeny na změně jednoho z parametrů elektrického obvodu – indukčnosti  $L$ , kapacity  $C$  a odporu  $R$ .
2. *Systémy generátorové*, které jsou založeny na vzniku napětí nebo proudu při deformaci elementů. Podstatou může být i mimo jiné piezoelektrický jev.

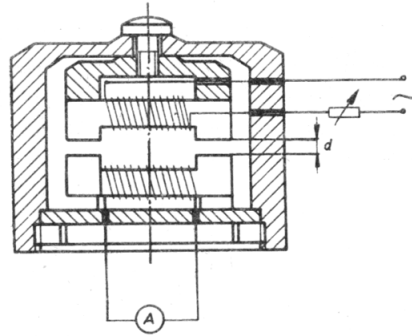
U **elektrických dynamometrů indukčních** v důsledku působení měřené síly ke změně indukčnosti v obvodu použitého snímače. Probíhající mechanicko-elektrická transformace se dá vyjádřit např. blokovým schématem.

Snímače pro indukční dynamometry s ohledem na uspořádání magnetického obvodu je možné rozdělit následovně:

- a) snímače s malou vzduchovou mezerou, tedy snímače s uzavřeným magnetickým obvodem,
- b) snímače s otevřeným magnetickým obvodem,
- c) snímače se stálým magnetickým obvodem.

V elektrických indukčních dynamometrech se převážně používají snímače pracující s malou vzduchovou mezerou. Působením zátěžové síly se mění šířka vzduchové mezery. Tím se mění impedance magnetického obvodu a v důsledku toho i indukčnosti cívky. Změna indukčního odporu vyvolá změnu impedance cívky (obr. 9.3). Odpor magnetického obvodu indukčního snímače se skládá

z odporu feromagnetické části a z odporu vzduchové mezery. Funkční závislost impedance na délce vzduchové mezery  $Z = f(a)$  má hyperbolický průběh.



Obr. 9.3 Indukční snímač sil [3]

U **elektrických dynamometrů kapacitních** se využívá pro měření velikosti deformace změny kapacity snímačů. Nejjednodušším kapacitním snímačem je deskový kondenzátor. Pro experimentální studium dynamiky řezného procesu se však používá výhradně kapacitních snímačů pracujících s proměnnou vzdáleností mezi deskami či elektrodami. Kapacitní snímače mají dostatečně velikou citlivost a malou hmotnost. Jsou velmi citlivé na okolní vlivy a velmi náročné na měřicí techniku. Z těchto důvodů se používá kapacitních snímačů velmi zřídka.

**Piezelektrické dynamometry** využívají pro snímání deformace piezelektrického jevu, který je charakterizován vznikem elektrického náboje na povrchu některých krystalů při mechanickém zatížení. Mezi nejužívanější piezelektrické materiály patří především křemen, dále potom materiály na bázi titaničitanu barnatého, Seignettovy soli a podobně. Základem piezelektrického snímače pro tyto druhy dynamometrů je měřicí destička vhodně vyříznutá z příslušného krystalu. Při zatěžování je velikost náboje přímo úměrná velikosti působící síly a s poklesem zatížení se lineárně snižuje, až zcela vymizí při zatížení nulovém. V současnosti jsou k dispozici moderní piezelektrické dynamometry KISTLER, speciálně konstruované pro potřeby obrábění (obr. 9.4). Příklad záznamu z měření složek řezné síly při broušení je na obr. 8.16 v kapitole 8.



a) pro frézování



b) pro soustružení



c) pro vrtání



d) pro broušení

Obr. 9.4 Dynamometry KISTLER pro měření složek řezné síly



U **elektrických odporových dynamometrů** se využívá pro měření velikosti deformace změny odporu snímačů. Nejužívanějším odporovým snímačem jsou odporové tenzometry, kde je změna odporu způsobena deformací vodiče nebo polovodiče. Odporový tenzometr se deformuje spolu s deformačním elementem, neboť je s tímto elementem pevně spojen. Změna odporu vodiče je přímo úměrná deformaci, která vzniká na deformačním elementu v důsledku působení síly řezání (obrábění) nebo točivého (krouticího) momentu. Při deformaci vodiče dochází ke změně délky a průřezu vodiče, taktéž dochází ke změně měrného odporu materiálu vodiče.

Nejpoužívanějším odporovým materiálem u kovových tenzometrů je konstantan (slitina Cu-Ni) s velkým měrným odporem a hodnotou součinitele deformační citlivosti  $k = 2$ . Podle technologie výroby se dělí kovové tenzometry na drátkové, fóliové a napařované.

Drátkové tenzometry mají měřicí mřížku z odporového drátu o průměru 0,01 až 0,05 mm nalepenou na tenkou izolační podložku z papíru nebo pryskyřice. K měřicí mřížce jsou připájeny měděné a postříbřené přívodní drátky. Drátkový tenzometr je potom přilepen na místo snímání deformace speciálním acetátovým nebo pryskyřicovým lepidlem. Měřicí mřížka může mít i tvar spirály, která je vetkaná do základového materiálu z umělého hedvábí nebo skleněné tkaniny. Odporový drátkový tenzometr má měřicí mřížku z konstantanu uloženou na tenkou papírovou podložku.

Drátkové odporové tenzometry mají malý rozptyl hodnoty odporu, součinitele deformační citlivosti i teplotních součinitelů. Tyto skutečnosti mají veliký význam pro vyloučení rušivých vlivů při současném měření větším počtem tenzometrů. Z těchto důvodů je použití drátkových tenzometrů při dynamometrickém měření sil nejrozšířenější.

Fóliové tenzometry se liší od drátkových tenzometrů technologií výroby. Měřicí mřížka je vytvořena z tenké fólie o tloušťce přibližně 0,012 až 0,015 mm. Požadovaný tvar měřicí mřížky je vyroben fotochemickou cestou, která je analogická metodě výroby tištěných spojů. Výhodou fóliových tenzometrů je jejich necitlivost vůči stranovým namáháním, poměrně velké přípustné zatížení proudové s ohledem na velké ochlazovací plochy a možnost vytvoření libovolného tvaru tenzometru. Fóliové odporové tenzometry se dále vyznačují dokonalejším spojením měřicí mřížky se základní fólií i lepšími podmínkami pro převod deformace na mřížku. Jsou proto v porovnání s odporovými tenzometry drátkovými přesnější a stabilnější.

Napařovací tenzometry představují v odporové tenzometrii další vyšší vývojový stupeň. Podstatou napařovacích odporových tenzometrů je postupné napařování jednotlivých vrstev přímo na měřené místo deformačního elementu. Napařování umožňuje vyrobit snímač velmi malých rozměrů a tloušťky. Na vyleštěné měřené místo se nanáší postupně nejdříve vrstva izolační, potom vrstva pro spojovací a napájecí sekci a nakonec v požadovaném uspořádání vrstva odporová. Po dokončení se snímač pokryje ochrannou vrstvou.

Vedle kovových tenzometrů se také používají tenzometry polovodičové. Podstatou polovodičových tenzometrů je využití piezorezistentních vlastností některých polovodičových materiálů (např. křemík, germanium), dotovaných dalšími příměsemi. Odporovým elementem je orientovaný výřez ve tvaru tenkého pásku z monokrystalu polovodiče, který svůj odpor při deformaci velmi silně mění. Odporové polovodičové tenzometry se vyznačují vysokou hodnotou součinitele deformační citlivosti, která je při porovnání s odporovými snímači až o dva řády vyšší. Polovodičové tenzometry rozlišují oblast použití odporové tenzometrie. Jejich výroba je ale velmi pracná a tedy i nákladná. S tímto bezprostředně souvisí i vysoké ceny těchto polovodičových tenzometrů.

**Měření odporových změn** lze provádět buďto potenciometricky nebo s využitím zapojení můstkového. Pro měření malých odporových změn se používá prakticky metoda můstková. Při měření s tenzometry v zapojení můstkovém se postupuje zpravidla tak, že buď odpory  $R_1$ ,  $R_2$  jakož i  $R_3$ ,  $R_4$ , nebo všechny čtyři odpory mají stejné jmenovité hodnoty odporů. V takovém případě je můstkové zapojení symetrické. Při toleranci jmenovité hodnoty zařazených odporů a při předpětí na deformačním členu dynamometru vzniká po zapojení tenzometrů do měřicího obvodu vždy určité napětí. Toto napětí je obvykle větší než napětí vzniklé při vlastním měření. Proto se musí můstek před měřením vyvážit. Vyvážení se provádí vyvažovacími obvody, kterými jsou vybaveny tenzometrické aparatury. Jestliže se při vyváženém můstku změní jeden ze zařazených odporů o hodnotu  $\Delta R$ , vyvolanou deformací tenzometru, můstek se rozváží. Velikost změny odporu lze stanovit metodou nulováním nebo metodou výchylkovou.

*Metoda nulovací* spočívá ve vyvážení můstku přidáním odporu do ostatních větví tak, aby opět nastal rovnovážný stav. Tento způsob lze použít pouze pro měření statická, kdy je na vyvážení dostatek času. Zde se používají vyvážené můstky, které jsou vybaveny automatickým vyvažováním pomocí servomechanismu. Nulovací metoda se při měření řezných sil prakticky nepoužívá.

*Výchylková metoda* spočívá ve stanovení výchylky galvanometru, která je přímo úměrná změně odporu a tedy i měřené deformaci. Za předpokladu, že odpory  $R_1$  až  $R_4$  mají stejnou jmenovitou hodnotu, je možné změnu jednoho z odporů o hodnotu  $\Delta R$  matematicky vyjádřit. Tyto nevyvážené můstky se používají jak pro statická, tak i pro dynamická měření.

**Dvousložkový elektrický dynamometr** pro soustružení je konstruován jako držák soustružnického nástroje, ustavený na dva stejné nosníky souměrně umístěné k zatěžující síle. Tenzometry jsou nalepeny pouze na jednom z těchto měrných nosníků. Dynamometr lze použít pro měření složek síly řezání  $F_c$  a  $F_p$ . Na dynamometru nejsou pohyblivé části, tuhost měrných článků je v místech, kde jsou nalepeny tenzometry snížena do té míry, aby byla zajištěna co největší tuhost při maximální citlivosti. Měrné nosníky jsou od držáku soustružnického nože odizolovány. Pro zamezení vzájemného ovlivňování jednotlivých naměřených složek jsou tenzometry nalepeny tak, aby napětí v místě tenzometru pro snímání  $F_c$  bylo od složky  $F_c$  maximální a od složky  $F_p$  nulové.

Dvousložkový elektrický dynamometr pro vrtání je jeden kompaktní nosník, na koncích upevněný v základové desce. Uprostřed je měrný nosník upraven tak, aby bylo možné upnout vrtaný materiál. Tenzometry jsou nalepeny pro snímání osové síly a pro snímání točivého (kroucího) momentu.

Pokud je nosník dokonale upnut na obou koncích tak, aby veškeré deformace probíhaly pouze v oblasti pružných deformací a ne v důsledku posuvu celého nosníku, lze hovořit o dynamometru, zabezpečujícího bezvadnou funkci v průběhu předpokládané životnosti.

**Třísložkový dynamometr** se skládá z pláště o vysoké tuhosti, z tělesa držáku nože a měřících článků, jejichž nedílnými součástmi jsou tenzometrické snímače. Samostatnou část podobně jako u předchozích dynamometrů představuje část elektrická. Proti vniknutí třisek k snímacím článkům je tento dynamometr opatřen pevným krytem. Tento dynamometr používá zpravidla 8 snímacích článků. Těleso nožového držáku je uloženo na snímacích člancích obsahujících deformační tělíska s nalepenými tenzometry. Uložení držáku v tělese dynamometru je provedeno přes kuličky, které spočívají v kulových lůžkách nebo působí přes plochou opěru. Při této konstrukci dynamometru je nutné v porovnání s dynamometrem dvousložkovým dbát na přesné vyložení nástroje v souladu s délkou vyložení cejchovacího hranolu.

**Univerzální dynamometr** je stejně jako dynamometry předchozí řešen bez pohyblivých částí, a to monolitickým celkem základové desky s bočními stěnami opatřenými odnímatelnými kryty. V přední desce je otvor pro řezný nástroj, v horní otvor pro vyvedení částí měrného hranolu, který svým tvarem a rozměry umožňuje upnutí jak soustružnického nože, tak přípravku pro univerzální použití na dalších obráběcích strojích. Dynamometr je určen pro snímání složek síly řezání  $F_c$ ,  $F_f$  a  $F_p$ , ale i kroucího (točivého) momentu.

Pro uložení měrného hranolu, přenos síly řezání a točivého momentu je použito 16 snímacích článků, přitlačovaných přes kuličku stavěcími šrouby jak v krytech, tak v základové desce. Stavěcími šrouby lze vymezovat axiální vůli snímacích článků. Zatímco pro snímání složky  $F_c$  slouží články 1 až 8, pro  $F_f$  článek 11, 12, 15 a 16, a pro  $F_p$  články 9, 10, 13 a 14, pro snímání točivého momentu  $M_k$  jsou k dispozici články 9 až 16.

Předkládaný univerzální elektrický odporový dynamometr lze použít pro měření složek síly obrábění při soustružení, frézování, vrtání, broušení apod. s možností snímání tří složek a točivého momentu a to do níže uvedených hodnot:

složka $F_c$	do	5900 N,
složka $F_p$	do	9500 N,
složka $F_f$	do	2000 N.

Točivý (kroucí) moment lze tímto dynamometrem měřit do hodnoty

$$M_k = 620 \text{ Nm.}$$



Rozměry a tvar základové desky univerzálního dynamometru připouštějí jeho upnutí na různých typech obráběcích strojů. Například při soustružení lze současně s měřením velikosti i průběhu složek síly řezání měřit velikosti i průběhy teploty řezání. Porovnání vlastností jednotlivých dynamometrů je uveden v tab. 9.1.

Tab. 9.1: Porovnání vlastností jednotlivých dynamometrů [3]

metóda merania	zkreslení	rozměry	rozsah	přesnost	porucovost	setrvačnost	cejchování	spolehlivost	náklady	obsluha
piezoelektrická	+	+	+	+	0	++	-	--	--	--
kapacitní	+	-	+	+	0	++	+	0	--	--
uhlíkového odporu	+	+	+	+	0	++	0	-0	+	++
kapalinového odporu	+	+	+	0	0	0	0	0-	+	+
indukční	+	++	+	+	+	++	+	+	+	+
magnetická	+	++	+	+	+	++	+	+	+	+
tenzometrická	+	++	+	+	+	++	+	+	+	++

+ výhodná charakteristika, 0 středně výhodná charakteristika, - nevýhodná charakteristika



## Shrnutí kapitoly

V této kapitole jste se dozvěděli obecné pojmy a o terminologii měření deformací v soustavě stroj – nástroj – obrobek během obrábění prostřednictvím dynamometrů. Dozvěděli jste se, jaké jsou kladené požadavky na dynamometry, jaké máme základní rozdělení dynamometrů a jaké je jejich hlavní opodstatnění.



## Kontrolní otázky

1. Co jsou dynamometry a k čemu se používají?
2. Vyjmenujte základní požadavky kladené na dynamometry.
3. Z jakých subjektů se skládá aparatura na měření složek řezné síly?
4. Jaké je základní rozdělení dynamometrů?
5. Jak se dále dělí dynamometry podle počtu měřených složek?
6. Jak se dále dělí dynamometry podle aplikované měřicí metody?
7. Jak se dále dělí dynamometry podle metody měření?
8. Jaké dynamometry se používají pro cejchování jiných druhů dynamometrů?
9. Jakými metodami lze stanovit velikost změny odporu?



## Další zdroje

1. AKASAWA, T. - TAKESHITA, H. - UEHARA, K.: *Hot machining with cooled cutting edge*, CIRP 1/1987 p.37 - 41
2. BEŇO, J.: *Teória rezania kovov*, Vienaľa Košice 1999, ISBN 80-7099-429-0
3. BUDA, J. - BÉKÉS, J.: *Teoretické základy obrábania kovov*, ALFA Bratislava, 1977
4. BUDA, J. - SOUČEK, J. - VASILKO, K.: *Teória obrábania*, ALFA Bratislava, 1983
5. BURYTA, D – SOWERBY, R. – YELLOWLEY, I.: *Stress distribution on the rake face during ortogonal cutting*, Journal of Mach Tools Manufact 1994, p. 721 – 739
6. ENDRES, W.J - DEVOOR, R.E. - KAPOOR, S.G.: *Dual mechanism approach to the prediction of machining forces*, Journal of engineering for industry, ASME 1995, p.527 – 541
7. GRZESIK, W.: *The role of coating in controlling the cutting process when turning with coated indexable inserts*, Materials Processing Technology 79/1998, p. 133-143
8. GRZESIK, W.: *Experimental investigation of the influence of adhesion on the frictional conditions in the cutting process*, Tribology international, 32/1999, p-15 – 23
9. HAHN, R. S. - LINDSAY, R. P.: *Principles of Grinding', Parts I:, 2 and 3*, Machinery Magazine, July- September, 1971 (3 edition)
10. U. HÖGLUND, U. - SVAHN, O.: *Cutting edge wear in microscale physical conditions-wear processes*, CIRP, 1/1976, pp. 99
11. HUMÁR, A.: *Technologie I – technologie obrábění – syllabus*. Brno : VUT Brno, 2003, <http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/?page=opory>
12. MÁDL, J. - SCHUBERT, V.: *Experimentální metody a optimalizace v teorii obrábění*. Praha : ČVUT Praha, 1985.
13. MERCHANT, M.E.: *Mechanics of the Metal Cutting Process*, Journal of Applied physics, 16/1945, p. 267 – 275
14. MERCHANT, M.E. – ERNST, H.: *Chip formation, friction and high quality machined surface*, ASME Ohio, 1941, p.299 – 378
15. MIKILIC, D. – SEKULIC, M. – GOSTIMIROVIC, M. - UZELAC, S.: *Size of the torque and axial force dependence on the friction force on edge of the drill and transversal blade work*, MMA 2000 Novi Sad, p. 19-20
16. NESLUŠAN, M. - CZÁN, A.: *Obrábanie titánových a niklových zliatin*, EDIS Žilina, 2001, ISBN 80-7100-933-4
17. POPPEOVÁ, V.: *Monitorovanie opotrbenia rezných nástrojov*, EDIS Žilina, 2001, ISBN 80-7100-700-5
18. PRINS, O.D.: *The influence of wear on the temperature distribution at the rake face*, CIRP, 3/1971, pp. 579
19. SAMUELS, J. - TANI, M. - BEISWENGER, C.- HAM, I.: *Measurements of crater wear using replica molds*, CIRP, 1/1976, pp. 77
20. SHAW, M.C.: *Metal cutting principles*, Oxford, Clarendon, 1989
21. SPAANS, C.: *A comparison of an ultrasonic method to determine the chip-tool contact length with some other methods*, CIRP 1/1971, p.485 – 491



## CD-ROM

Na videu je vidět jak se měří jednotlivé složky síly obrábění pomocí již ocejchovaného dynamometru. Je vidět jak se mění velikosti napětí při různých řezných parametrech a pro jednotlivé složky síly. Pro získání skutečných hodnot v Newtonech, je potřeba napětí převést pomocí cejchovací křivky.



## Klíč k řešení

- O 9.1 Dynamometry nám slouží k přímému měření složek síly řezání a jejich točivých momentů. Jejich princip se zakládá na měření deformací v soustavě stroj – nástroj – obrobek během obrábění. Dynamometr jakožto měřicí přístroj musí zaručit nezávislost měřicí veličiny na provozních vlastnostech přístroje.
- O 9.2
- Tuhost dynamometrů.
  - Citlivost dynamometrů.
  - Stálost údajů dynamometrů.
  - Setrvačnost dynamometrů.
  - Reprodukovatelnost údajů.
  - Konstrukce dynamometrů.
- O 9.3
- Pružný člen.
  - Snímač.
  - Přijímač.
- O 9.4
- Podle počtu měřených složek síly.
  - Podle aplikované měřicí metody, respektive dle způsobu přenosu působení síly z deformačního členu na indikační.
  - Podle metody obrábění.
- O 9.5
- Jednosložkové.
  - Dvousložkové.
  - Třísložkové.
  - Pro měření točivých (krouticích) momentů.
- O 9.6
- Mechanické.
  - Hydraulické.
  - Pneumatické.
  - Elektrické.
  - Optické.
- O 9.7
- Pro soustružení.
  - Pro frézování.
  - Pro vrtání.
  - Pro broušení.
  - Univerzální.
- O 9.8 Mechanické dynamometry.
- O 9.9 Velikost změny odporu lze stanovit metodou nulování nebo metodou výchylkovou.

## 10. KMITÁNÍ PŘI OBRÁBĚNÍ

Po úspěšném a aktivním absolvování této KAPITOLY

### Budete umět:

- Budete umět detailně popsat problematiku kmitání.
- Získáte všeobecný přehled o moderních měřicích metodách.
- Definovat pojmy z oblasti kmitů
- Definovat pojem kmitavého pohybu

**Budete umět**

### Budete schopni:

- Budete schopni popsat princip vibračních snímačů.
- Popsat problematiku budících sil
- Popsat frekvenční analýzu
- Uvést příklady vzniku kmitavého pohybu

**Budete schopni**



**Čas ke studiu: 3 hodiny**



**Výklad**

O kmitání, kmitech, oscilací nebo o vlnění hovoříme tehdy, když nějaká fyzikální veličina nabývá v čase opakovaně střídavé hodnoty okolo svojí rovnovážné hodnoty, přičemž její hodnota nepřekročí hranice jistého intervalu hodnot.

Při mechanickém kmitání je kmitající veličinou nějaká mechanická veličina. Jde o fyzikální jev, kdy hmotný bod anebo tuhé těleso má v čase řezné polohy v prostoru, tak že se pohybují v určitém intervalu vzdálenosti, který nepřekročí, okolo střední hodnoty, kterou nazýváme rovnovážná poloha, a přitom se postupně vrací do některé ze svých předcházejících poloh. Střední polohu by hmotný bod, anebo těleso zaujali, kdyby silová soustava na ne působící měla nulovou výslednici.

Polohu tuhého tělesa, anebo hmotného bodu v prostoru určuje jeho polohový vektor. Jestliže je možné určit v jakémkoliv okamžiku amplitudu a fázi tohoto vektoru, je možné popsat i mechanické kmitání. Při mechanickém kmitání se v čase neustále mění hodnoty určující veličiny kmitání (poloha, rychlost, zrychlení) a dochází při tom k přeměně energie. Hovoříme proto, že mechanické kmitání je dynamický děj [11, 12].

Kmitavý pohyb je průvodním jevem při provozu téměř každého strojního zařízení, čili kmitání systému je průvodním jevem práce na obráběcích strojích. Ve skutečnosti je kmitání v obráběcích strojích velmi složitým jevem. Každý stroj je komplikovaná soustava hmotných a pružných těles. Při obrábění kovů vznikají složité procesy kmitání v soustavě stroj-nástroj-obrobek. Kmitání, které vzniká v soustavě stroj-nástroj-obrobek, je někdy tak malé, že nemá žádný nepříznivý účinek. Jsou však i

takové případy, kdy je kmitání při řezání kovů velmi intenzivní. Stroj při takovém kmitání vydává zvláštní zvuk anebo nástroj charakteristicky zvučí. Nepříznivé účinky intenzivního kmitání se při řezání kovů projevují ve více směrech [2]:

1. obrobek má charakteristickou vlnitost, v důsledku čehož se snižuje přesnost geometrického tvaru a zvětšuje se drsnost povrchu,
2. nástroje z nástrojových ocelí se rychle otupují a nástroje ze spékaných karbidů se lámou,
3. zvyšuje se opotřebení stroje,
4. zvuk charakteristického tónu zhoršuje pracovní prostředí.

Ve většině případů je kmitání obráběcích strojů v průběhu provozu považované za škodlivý jev. Na druhé straně se realizují technologie, kdy se mechanické kmitání řezného procesu záměrně budí. Obvykle je to s cílem zvyšování řezivosti nástroje, tvarování třísky apod. [15, 19].

Kmitání a kmitavé systémy můžeme rozdělit podle různých hledisek. Podle tvaru dráhy pohybu, kterou vykonávají tělesa, můžeme rozdělit kmitání a kmitavé systémy na:

- translační (tělesa vykonávají periodický pohyb přímočarý),
- rotační (tělesa vykonávají periodický pohyb otáčivý).

Podle počtu stupňů volnosti rozeznáváme systémy s jedním stupněm volnosti, s dvěma stupni apod.

Podle existence vnější budící síly rozdělujeme kmitání na:

- vlastní kmitání (bez vnější budící síly),
- vynucené kmitání (s vnější budící silou),
- samobuzené kmitání (se zpětnou vazbou mezi působící silou a kmitáním systému).

Podle přítomnosti tlumení v systému dělíme kmitání na netlumené a tlumené. Dále můžeme rozdělit kmitání na periodické a neperiodické, na harmonické a neharmonické.

## 10.1. Rozdělení kmitů při obrábění

Vlastní kmity v soustavě stroj-nástroj-obrobek, případně v některých uzlech této soustavy jsou vyvolané nárazem. Ve většině případů je vliv vlastních kmitů na proces obrábění zanedbatelný, protože kmitání se rychle utlumí. Perioda a frekvence vlastních kmitů nezávisí od počáteční výchylky ani od počáteční rychlosti kmitající částice. Zaobírat se vlastním kmitáním při obrábění má význam jen v souvislosti s určováním charakteru kmitavých procesů. Nepříznivý vliv na obrábění mají hlavně vynucené a samobuzené kmity.

Příčinou vzniku vynucených kmitů jsou síly periodicky měnící se s časem, které působí na kmitající systém stroj-nástroj-obrobek. Vynucené kmitání se objevuje na stroji, i když běží naprázdno a neobrábí.

Vynucené kmitání můžeme rozdělit z hlediska původu budící síly [2]:

- a) kmitání, když budící síla nesouvisí s procesem řezání,
- b) kmitání, když budící síla souvisí s procesem řezání.

Zvláštním druhem vynucených kmitů jsou parametrické kmity. Ve všeobecnosti se od vynucených kmitů liší způsobem vnějšího působení. Při vynucených kmitech, je daná určitá vnější síla, která vyvolává kmity, ale parametry samostatné soustavy zůstávají konstantní. Parametrické kmity vyvolává periodická změna určitého fyzikálního parametru. Tímto parametrem, který se mění, je při řezání proměnlivá tuhost jednotlivých součástí obráběcího stroje. Zdrojem parametrických kmitů mohou být například hřídele namáhané ohybem a zeslabené drážkami. Průhyb rotujícího hřídele oslabeného drážkami, když je zatížený silami na něm upevněných těles, se bude měnit v závislosti od polohy drážky. Podle polohy drážky se bude měnit i jeho tuhost.

Změny průřezu třísky během řezání jsou charakteristické pro některé způsoby obrábění. Například při frézování se neustále mění průřez třísky, čím se mění i hlavní řezná síla. Při soustružení

a broušení se může velikost řezné síly měnit v důsledku nerovnoměrných přídavek na obrábění a ve spojitosti s házením obráběného předmětu anebo brusného kotouče.

Vynucené kmity nejčastěji vznikají při frézování, a to ve všech případech práce s válcovými a čelnými frézami. Vynucené kmity při frézování mají frekvenci přímo úměrnou počtu otáček frézy. Vynucené kmity při soustružení vznikají v důsledku házení obrobku a jejich frekvence se rovná počtu otáček obrobku.

Při broušení vznikají vynucené kmity, které se skládají z dvou druhů kmitů, a to z kmitů, u kterých se frekvence rovná počtu otáček obrobku, a z kmitů, u kterých se frekvence rovná počtu otáček brusného kotouče. První druh kmitů vzniká v důsledku házení obrobku, druhý v důsledku házení brusného kotouče.

Kmity nevyvolané řezáním jsou zvýšeně nebezpečné jen na strojích pro jemné dokončování, protože jejich amplitudy jsou malé, a více menší než amplitudy kmitů druhé skupiny. Kmity vyvolané řezáním jsou nebezpečné, protože mají velkou amplitudu a vznikají při obrábění na všech strojích při hrubování, ale i při hlazení a těžko se eliminují [2].

#### **a) Budící síla nesouvisí s procesem řezání**

Tato kategorie vynuceného kmitání se v praxi vyskytuje často. Patří sem tyto případy:

1. kmitání vyvolané periodickou silou, zdrojem jsou periodické rázy vznikající v okolních strojích,
2. kmitání vyvolané nevyváženými rotujícími částmi stroje, obrobku anebo nástroje,
3. kmitání způsobené setrvačnými silami při přímočarém vratném pohybu vlastního mechanismu stroje,
4. kmitání vznikající v převodovém mechanismu stroje,
5. kmitání způsobené různou tuhostí některých částí systému stroj - nástroj.

#### **b) Budící síla souvisejí s procesem řezání**

Do této kategorie vynuceného kmitání patří:

1. kmitání způsobené nerovnoměrným přídavkem na obrábění,
2. kmitání vyvolané charakterem práce stroje.

Při obrábění se často střetáváme s kmitáním, které způsobuje vlnitost obráběné plochy a značné změny řezné síly, které ohrožují životnost nástroje a stroje.

Samobuzené kmitání nepotřebuje na rozdíl od vynuceného kmitání ke svému vzniku a udržení žádnou vnější periodicky působící sílu. Vzniká a udržuje se působením síly vznikající v průběhu kmitání. Periodická síla se ztratí, jako se ztratí kmitání. Frekvence samobuzeného kmitání není určená funkcí vnějšího zdroje, ale vlastnostmi kmitajícího systému. Je velmi blízká vlastní frekvenci některého řídicího členu systému. Samobuzené kmity při obrábění mohou být *skoroharmonické* nebo *relaxační* [2].

Z hlediska příčin vzniku je možno samobuzené kmitání rozdělit do dvou skupin:

- kmitání vyvolané činitelem, který s procesem řezání nesouvisí,
- kmitání vyvolané činitelem, který přímo souvisí s procesem řezání.

#### **a) Budící síla nesouvisí s procesem řezání**

Do této kategorie patří dvě typické formy kmitání:

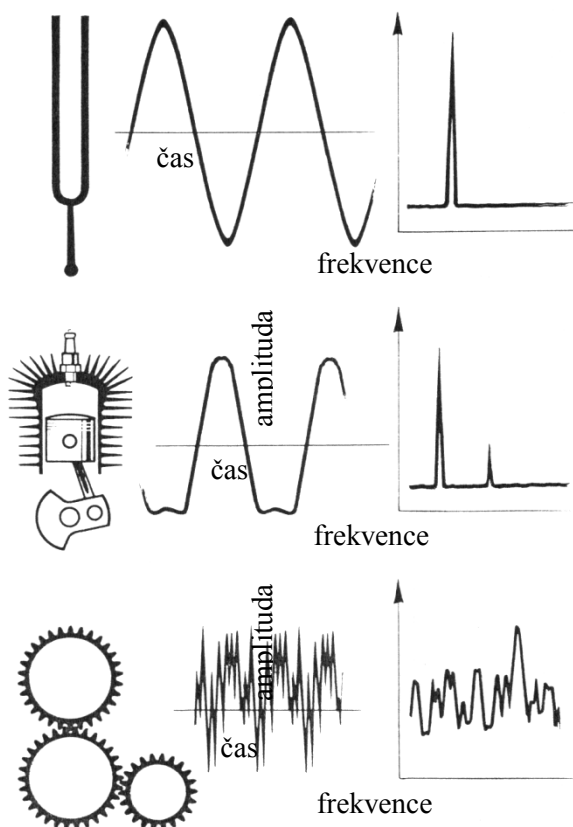
- je to především relaxační kmitání, které se vyskytuje na obráběcích strojích při obrábění velmi malými posuvovými rychlostmi,
- kmitání vznikající při použití kopírovacích systémů se zpětnou vazbou.

#### **b) Budící síla souvisejí s řezným procesem**

Tento druh samobuzeného kmitání se vyskytuje při obrábění nejčastěji. Projevuje se výraznou vlnitostí obrobené plochy a je provázen hlukem. Kmity vyvolává samotná řezná síla. Takové kmity se nazývají *skoro harmonické samobuzené kmity*. Frekvenci kmitů v zásadě neurčují řezné poměry, ale tuhost a hmota částí systémů stroj-nástroj-obrobek. Zpravidla je blízká frekvenci vlastních kmitů soustavy, anebo některého jejího člena. Amplituda kmitů při konstantních podmínkách je stejná. Při samobuzeném kmitání existuje tzv. zpětná vazba mezi řeznou silou, která vyvolává kmitavý pohyb, a naopak, její periodická změna je podmíněná existencí samobuzených kmitů. Kdyby nebyly samobuzené kmity, nebyly by ani periodické změny řezné síly [2].

## 10.2. Teorie kmitavého pohybu

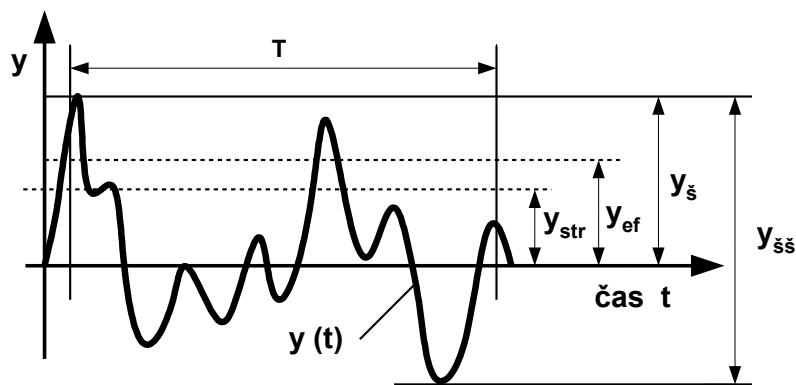
Ve všeobecnosti je frekvence počet opakování úplného cyklu během jedné sekundy. Příklad jednoduchého kmitavého pohybu s jedinou výraznou frekvencí je na *obr. 10.1a*, s dvěma frekvencemi na *obr. 10.1b* (jde o pohyb pístu v motoru). Ve většině případů se signál skládá z více frekvencí (*obr. 10.1c*) a obvykle je obtížné určit na základě takovýchto signálů jejich zdroje. Proto tyto signály rozkládáme na jednotlivé frekvence a jim příslušné amplitudy. Takovýto rozklad se nazývá frekvenční analýza. Graf, který je výsledkem takového rozkladu se nazývá frekvenční spektrogram. Frekvenční spektrogramy umožňují identifikovat frekvence s výraznými amplitudami a následně zdroje kmitání.



Obr. 10.1 Příklady signálů kmitavého pohybu [1, 2]

Úroveň vibrací může být určena různými způsoby. Na *obr. 10.2* jsou zobrazené nejpoužívanější vyjádření úrovně:

- $y_{šš}$  - úroveň signálu špička – špička,
- $y_{š}$  - špičková úroveň signálu,
- $y_{str}$  - střední hodnota,
- $y_{ef}$  - efektivní hodnota.



Obr. 10.2 Charakteristické hodnoty [1, 2]

Úroveň špička - špička se používá na vyjádření maximálního rozkmitu signálu a je důležitá z hlediska celkových posunutí v soustavě, analýz vůlí a napětí.

Špičková úroveň je praktická hodnota používaná na indikaci velmi krátkých, ale výrazných impulzů avšak nebere do úvahy průběh celého signálu.

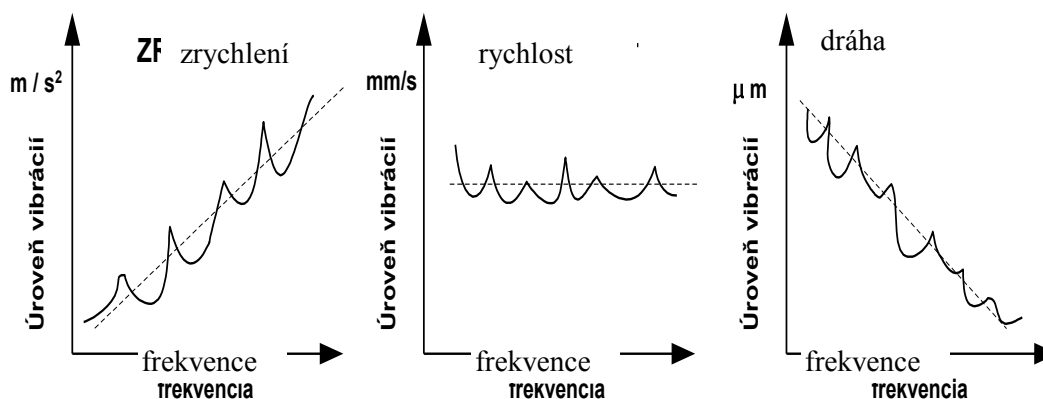
Střední hodnota se prakticky používá jen omezeně proto, že není přímo propojená na žádnou fyzikální veličinu.

$$y_{str} = \frac{1}{T} \int_0^T |y(t)| dt \quad (10.1)$$

Efektivní (RMS) hodnota je nejspolehlivější parametr vzhledem na skutečnosti, že bere do úvahy nejen amplitudy signálu, ale i její průběh a je jí možné přímo vztahovat k energii, takže k celkové destruktivní schopnosti vibrací.

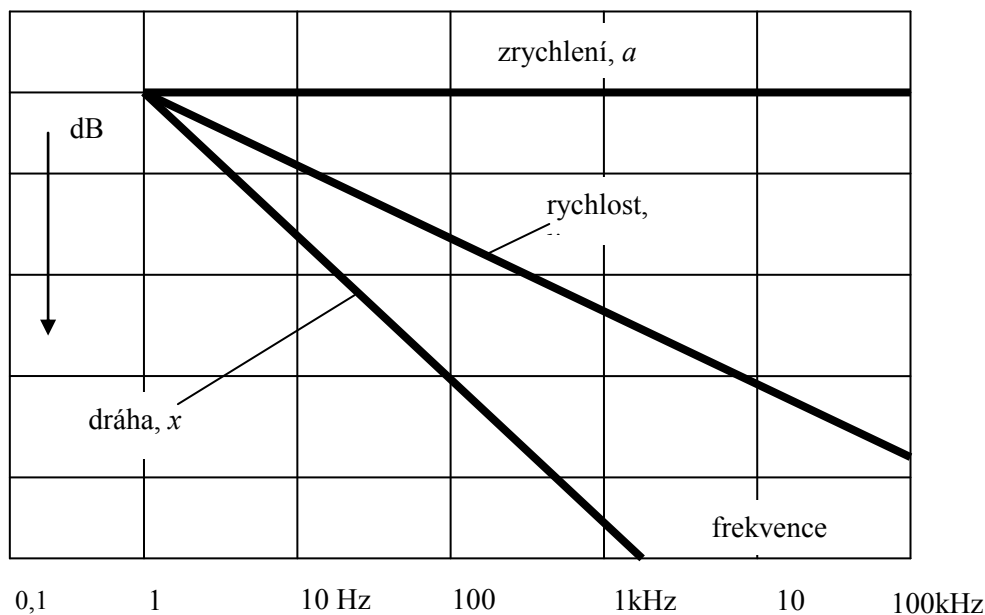
$$y_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T y^2(t) dt} \quad (10.2)$$

Podle použitého druhu snímače a elektronické vyhodnocované části je možné kmitání měřit jako dráhu, rychlost, anebo zrychlení. Každá z těchto veličin rozdílným způsobem charakterizuje frekvenční spektrum vibrací. Na obr. 10.3 jsou uvedené příklady frekvenčních spekter vibrací v pásmu od 50 do 10000 Hz měřených v různých jednotkách.



Obr. 10.3 Parametry hodnotící kmitání [1, 2]





Obr. 10.4 Vztah mezi dráhou, rychlostí a zrychlením [11, 12]

Jak ukazuje obr. 10.3, ve frekvenčním spektru dráhy jsou dominantní výrazné amplitudy nízkých frekvencí, naopak ve frekvenčním spektru zrychlení jsou dominantní výrazné amplitudy vysokých frekvencí, což vyplývá z fyzikální podstaty těchto parametrů. Výstupnou veličinou je obvykle zrychlení. Na určení velikosti rychlosti a dráhy je možné využít funkční závislost jednotlivých parametrů, jako to ukazuje obr. 10.4. Velikost rychlosti je možné vypočítat na základě rovnice 10.3 podle [11, 12].

$$v = \int(a)dt \quad (\text{m}\cdot\text{s}^{-1}) \quad (10.3)$$

V případě, že se jedná o harmonický kmitavý pohyb, je možné přímo psát:

$$v = \frac{A}{2\pi} \quad (\text{m}\cdot\text{s}^{-1}) \quad (10.4)$$

kde,  $A$  je amplituda kmitání,

$f$  je frekvence.

Velikost dráhy je možné vypočítat na základě rovnice 10.5:

$$x = \int(v)dt \quad (\text{m}) \quad (10.5)$$

V případě, že jde o harmonický kmitavý pohyb, je možné přímo psát:

$$x = \frac{A}{2\pi f^2} \quad (\text{m}) \quad (10.6)$$

Velikost rychlosti kmitavého pohybu je teda možné získat integrací zrychlení (velikost dráhy kmitavého pohybu integrací rychlosti). Při určování rychlosti, respektive dráhy, je možné využít i informace z frekvenčního spektra a to následovně:

1. signál zrychlení se rozloží na harmonické složky, výsledkem je frekvenční spektrogram,
2. ze spektrogramu se pro každou frekvenci určí velikost amplitudy,
3. pro každou frekvenci a příslušnou amplitudu se vypočítá amplituda rychlosti, respektive dráhy na základě rovnice 10.3, respektive 10.5, čímž se získají frekvenční spektrogramy pro rychlost, respektive dráhu,
4. z frekvenčního spektrogramu se zpětně vytvoří (složí z harmonických složek) signál rychlosti, respektive zrychlení.

Při analýze kmitavého pohybu je možné využít kromě vyjádření vyšší uvedených veličin v absolutních hodnotách i jejich relativního vyjádření v decibelech podle rovnice 10.7 [1, 2]:

$$N = 20 \cdot \log_{10} \left( \frac{a}{a_{ref}} \right) \quad (\text{dB}) \quad (10.7)$$

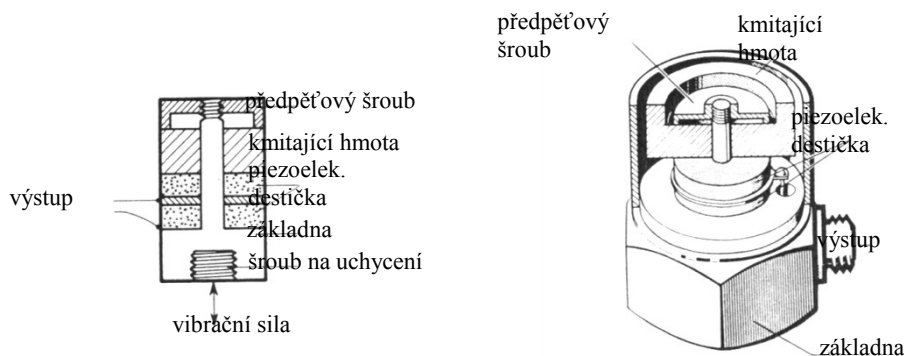
kde N je vybraná veličina v decibelech,  
a je měřená veličina  
 $a_{ref}$  jej referenční hodnota.

V některých případech je přímo zesilovač vybavený moduly, které realizují integraci v reálném čase. V tomto případě, že je zesilovač vybavený přepínačem mezi zrychlením, rychlostí a dráhou. Při volbě snímané veličiny je vhodné vybrat tu, pro kterou je frekvenční spektrum nejvyváženější, ve snímaném měřicím rozsahu. Z tohoto hlediska se obvykle využívá pro analýzu kmitavého pohybu zrychlení a rychlost.

Z charakteru mechanických soustav vyplývá, že výraznější změny polohy (dráhy) se vyskytují jen při nízkých frekvencích, čímž se tato veličina stane obvykle nevhodnou pro analýzu mechanického kmitání. Obvykle se využívá na identifikaci nevyváženosti rotujících částí.

V současnosti je zrychlení výstupnou veličinou převážně většiny vibračních snímačů, proto se jim někdy říká „akcelerometry“. Jejich konstrukce a fyzikální princip, který využívají je různý. Nejčastěji se však používají piezoelektrické snímače. Mají široký frekvenční aj dynamický rozsah a vykazují linearitu v celém měřicím rozsahu i během dlouhodobé činnosti. Jejich velkou výhodou je, že nepotřebují napájení. Jejich hlavní částí je piezoelektrická destička, na povrchu které se vytváří napětí vlivem zatěžování.

Konstrukce piezoelektrického akcelerometru je možné vidět na obr. 10.5. Piezoelektrická destička je vsazena do snímače tak, že když snímač kmitá, hmota nad piezoelektrickou destičkou na ni silou působí. Toto silové působení je přímo úměrné zrychlení (sila = hmotnost hmoty x zrychlení).



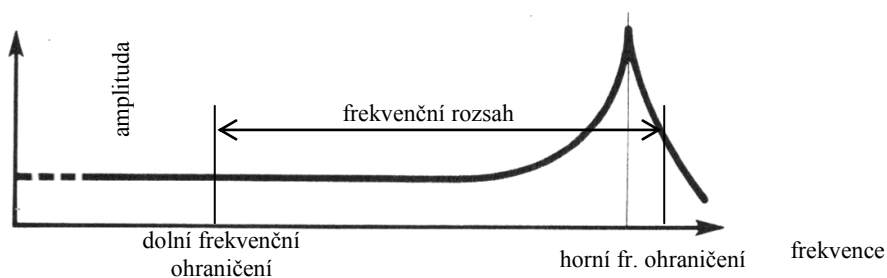
Obr. 10.5 Konstrukce piezoelektrického akcelerometru [1, 2]

Výrobci v současnosti poskytují širokou škálu akceleračních snímačů, které se od sebe liší frekvenčním, dynamickým rozsahem, citlivostí, hmotností, rozměrem apod. Některé umožňují měřit

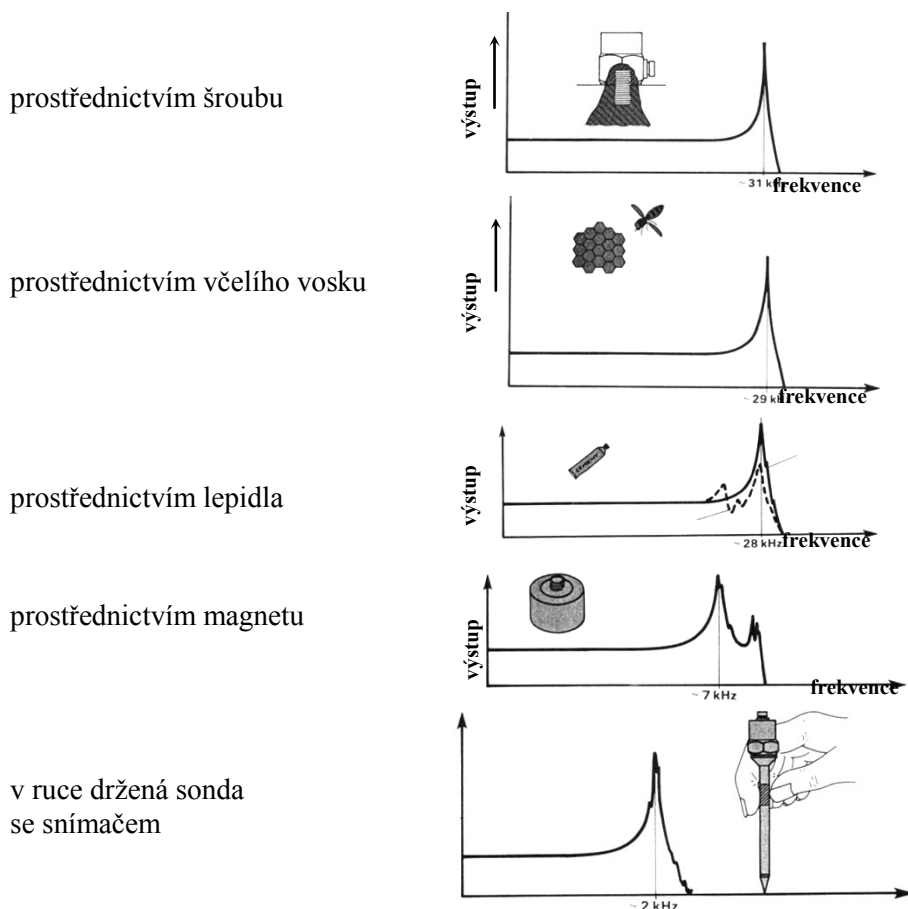
zrychlení i ve třech směrech, při vysokých teplotách, při velmi nízké intenzitě kmitání, při velkých mechanických rázech.

Při výběru snímače je potřebné vzít do úvahy vícero už výše uvedených aspektů. Citlivost je často prvním parametrem, který ovlivňuje výběr snímače. Se zvyšující se citlivostí snímače obvykle roste i jeho hmotnost a rozměry. Toto může být problematické, když se snímač umísťuje na malé, respektive tenké tělesa, u kterých může výrazněji změnit jejich hmotnost a následně teda i intenzitu kmitavého pohybu. Hmotnost snímače by neměla být větší než 1% hmotnosti tělesa, na které je snímač přichycený. Dalším parametrem je dynamický rozsah. Běžné piezoelektrické snímače mají dynamický rozsah až do  $\pm 100000 \text{ m.s}^{-2}$ .

V souvislosti s frekvenčním rozsahem akcelerometru je potřebné brát do úvahy dolní a horní frekvenční ohraničení. Mezi dolním a horním ohraničením leží oblast využitelného frekvenčního rozsahu (obr. 10.6). Dolní frekvenční ohraničení souvisí s vlivem změny teploty okolí a vlastnostmi zesilovače. Obvykle je dolní frekvenční ohraničení pod hranicí 1Hz. Horní frekvenční ohraničení je určené rezonanční frekvencí kmitající hmoty v akcelerometru.



Obr. 10.6 Frekvenční rozsah akcelerometru [1, 2]



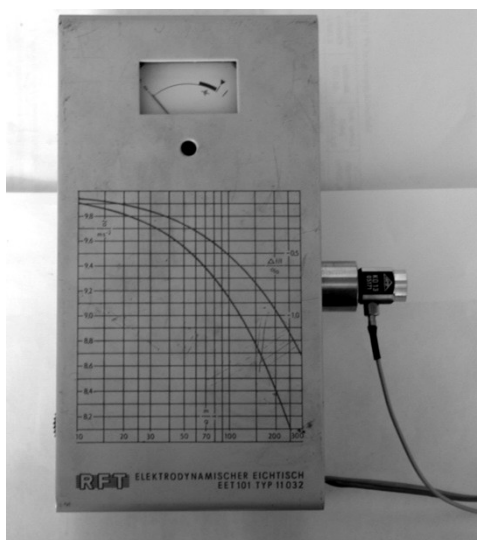
Obr. 10.7 Frekvenční ohraničení pro jednotlivé způsoby přichycení snímače [1, 2]

Frekvenční rozsah může být omezený i v souvislosti se způsobem připevnění snímače na měřené těleso (jako ukazuje *obr. 10.7*). Volba způsobu připevnění závisí i od vlastností materiálu měřeného tělesa, jeho povrchu, teploty okolí, vlhkosti, dostupnosti místa, kde má být snímač připevněný apod.

Přesnost měření ovlivňuje celá řada dalších faktorů [1, 2]:

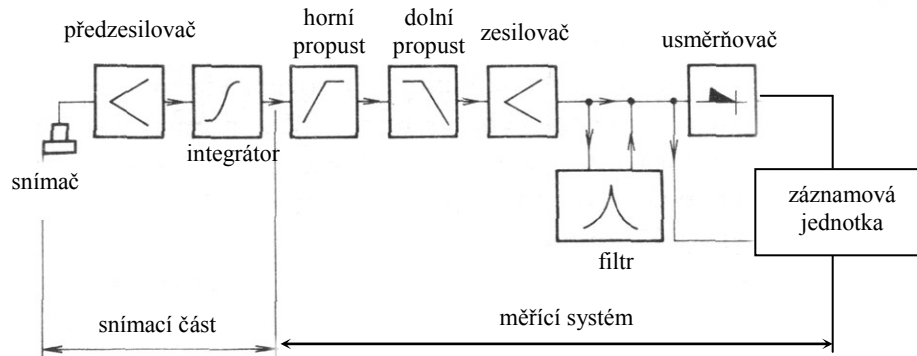
- vliv vlhkosti,
- fluktace teploty,
- teplota okolí (běžné akcelerometry je možné použít do teploty 250 °C, pro speciální účely jsou určeny akcelerometry s pracovní teplotou i nad 400°C),
- radiace,
- akustický a elektromagnetický šum,
- koroze,
- vibrace v příčném směru apod.

Na kalibraci akceleračních snímačů je možné použít tzv. „dynamické stolečky“. Jejich součástí je kmitající člen, který kmitá známou frekvencí a známou amplitudou (případně je známa RMS hodnota harmonického kmitavého pohybu - obvykle 10 m.s<sup>-2</sup>) a na který se připevňuje akcelerační snímač. Příklad takového stolečku je na *obr. 10.8*.



*Obr. 10.8 Dynamický stoleček EET 101 s akceleračním snímačem [8]*

Měření mechanického kmitání se bude vždy vztahovat k určité veličině a na ní bude záležet způsob zpracování signálu. Nejjednodušším měřicím zařízením by byl měřicí řetězec složený ze snímače, zesilovače a záznamové jednotky. Takový řetězec by byl schopný měřit určitou veličinu pro jednoduchý harmonický pohyb. Vzhledem k tomu, že v praxi bývá mechanické kmitání složené z více složek, je vhodné do měřicího řetězce včlenit další části. Na *obr. 10.9* je příklad moderního měřicího řetězce. Snímačem se mění zrychlení mechanického kmitání na odpovídající elektrický signál. Předzesilovačem se přizpůsobuje vysoká vstupní impedance snímače nižší vstupní impedance dalšího člena měřicího řetězce. Integrátor umožňuje stanovit velikost rychlosti případné polohy. Tyto tři členy tvoří snímací část. Horní a dolní frekvenční propusti slouží na nastavení požadovaného frekvenčního rozsahu a na omezení nežádoucích vlivů za jejich hranicemi [11, 12]. Usměrňovač vyhodnocuje například efektivní hodnotu, maximální rozkmit a podobně. V současnosti je možné některé části realizovat prostřednictvím specializovaných programů v počítači (záznam signálu, filtrace, určování maximálního rozkmitu, RMS hodnoty apod.).



Obr. 10.9 Měřicí řetězec pro měření mechanického kmitání [11, 12]



## Shrnutí kapitoly

V této kapitole jsme se dozvěděli, co jsou to kmity, vynucené kmity, budící síla, parametrické kmity a samobuzené kmitání. Dále potom kmitavý pohyb, frekvenční analýza a akcelerometr.



## Kontrolní otázky

1. Co jsou to kmity?
2. Co je příčinou vzniku vynucených kmitů?
3. Jaké je základní rozdělení vynuceného kmitání?
4. Co je zdrojem parametrických kmitů?
5. Z jakého důvodu vznikají vynucené kmity při soustružení?
6. Co znamená frekvenční analýza?
7. Z čeho se skládá piezoelektrický akcelerometr?
8. Co ovlivňuje přesnost měření a výběr akcelerometrem?
9. K čemu slouží tzv. dynamické stolečky?



## Další zdroje

1. BRÜEL, KRAEG.: *Measuring vibration*, Denmark, 1982
2. BUDA, J. - BÉKÉS, J.: *Teoretické základy obrábání kovov*, ALFA Bratislava, 1977
3. BUDA, J. - SOUČEK, J. - VASILKO, K.: *Teória obrábání*, ALFA Bratislava, 1983
4. INASAKI, I – KARPUSCHEWSKI, B.: *Grinding chatter – origin and suppression*, CIRP 2/2001 p.515 – 535
5. LIPTÁK, J. - MIHALČÁK, P. - PANOCH, J. - RADOŠÍNSKA, K.: *Výskum brúsenia a využitie ultrazvuku pre obrábanie Ni a Ti zliatin*. VHČ č.18/83-30/60,

- Bratislava, 1984
6. MAŇKOVÁ, I. - BEŇO, J.: *Technologické a materiálové činitele obrábania*, Viena Košice, 2004, ISBN 80-7099-701-X
  7. MAŇKOVÁ, I.: *Vybrané aspekty monitorovania stavu nástroja v procese rezania*, Košice, 2004, ISBN 80-8073-1837
  8. MINICH, R.: *Analýza chvenia pri brúsení ložiskovej ocele*, DDP Sjf, ŽU 2004
  9. MINICH, R. – TUREK, S. – NESLUŠAN, M.: *Experimental analysis of chatter when grinding*, Transcom 2003, p.27-31, ISBN 80-8070-084-2
  10. MITAŠÍK, J.: *Štúdium kmitania pri brúsení 14 109.4*, DP Sjf, ŽU 2005
  11. NAVRÁTIL, M.: *Měření mechanického kmitání*, Úvod do teorie snímačů, Nakladatelství technické literatury, Praha, 1981
  12. NAVRÁTIL, M. – PLUHAŘ, O.: *Měření a analýza mechanického kmitání*, Metody a přístroje, Nakladatelství technické literatury, Praha, 1986
  13. NESLUŠAN, M. – TUREK, S. – MINICH, R.: *Využitie kmitania pri monitorizácii procesu brúsenia*, Technologické inžinierstvo ISSN 1336-5967, 1/2004, str.34-38
  14. NESLUŠAN, M. – TUREK, S. – MINICH, R.: *Štúdium kmitania pri brúsení na základe analýzy zložiek reznej sily*, Strojárska technológia 2004, 29.-30.9.2004, Súľov, str.177-184, ISBN 80-8070-300-0
  15. PECHÁČEK, F.: *Intenzifikácia skvalitňovanie presného brusenia keramických materiálov aplikáciou výkonového ultrazvuku*, Trnava, 2006
  16. SADÍLEK, M. – KRATOCHVÍL, J.: *Skracování strojního času při frézování kapes*, SYMDOK 2005, Terchová 22. – 23. 9.2005
  17. SADÍLEK, M.: *Zvyšování jakosti povrchu naklopeným nástrojem při kopírovacím frézování*, Mezinárodní vědecká konference, Ostrava 7. – 9. 9. 2005, ISBN 80-248-0895-1
  18. BILÍK, O. - SADÍLEK, M.: *Crane hook forging die milling*, SYMDOK 2004, 29.30.9. 2004, Súľov, ISBN 80-8070-300-0
  19. VASILKO, K. – DRAVECKÝ, J.: *Torzné kmitanie nástroja pri sústružení*, Symdok 2006, Súľov 13. – 14.9.2006, ISBN 80-969546-6-0



## Klíč k řešení

- O 10.1 O kmitání, kmitech, oscilací nebo o vlnění hovoříme tehdy, když nějaká fyzikální veličina nabývá v čase opakovaní střídavé hodnoty okolo svojí rovnovážné hodnoty, přičemž její hodnota nepřekročila hranice jistého intervalu hodnot.
- O 10.2 Příčinou vzniku vynucených kmitů jsou síly periodicky měnící se s časem, které působí na kmitající systém stroj-nástroj-obrobek. Vynucené kmitání se objevuje na stroji, i když běží naprázdno a neobrábí.
- O 10.3
- kmitání, když budící síla nesouvisí s procesem řezání,
  - kmitání, když budící síla souvisí s procesem řezání.
- O 10.4 Parametrické kmity vyvolává periodická změna určitého fyzikálního parametru. Tímto parametrem, který se mění, je při řezání proměnlivá tuhost jednotlivých součástí obráběcího stroje. Zdrojem parametrických kmitů mohou být například hřídele namáhané ohybem a zeslabené drážkami.
- O 10.5 Vynucené kmity při soustružení vznikají v důsledku házení obrobku a jejich frekvence se rovná počtu otáček obrobku.
- O 10.6 Frekvenční analýza je, když se signál skládá z více frekvencí a tyto signály rozkládáme na jednotlivé frekvence a jim příslušné amplitudy. Obvykle je obtížné určit na základě takovýchto signálů jejich zdroje.
- O 10.7 Hlavní částí je piezoelektrická destička, na povrchu které se vytváří napětí vlivem

zatěžování. Mají široký frekvenční aj dynamický rozsah a vykazují linearitu v celém měřicím rozsahu i během dlouhodobé činnosti. Jejich velkou výhodou je, že nepotřebují napájení.

- O 10.8 Přesnost měření akcelerometry ovlivňuje celá řada parametrů. Patří mezi ně citlivost, hmotnost, dynamický rozsah, frekvenční ohraničení.
- O 10.9 Dynamické stolečky se používají na kalibraci akceleračních snímačů. Jejich součástí je kmitající člen, který kmitá známou frekvencí a známou amplitudou. Případně je známa RMS hodnota harmonického kmitavého pohybu - obvykle  $10 \text{ m.s}^{-2}$ .

# 11. TUHOST TECHNOLOGICKÉ SOUSTAVY A PŘESNOST A KVALITA OBROBENÉHO POVRCHU

Po úspěšném a aktivním absolvování této KAPITOLY

## Budete umět:

- Vyjmenovat druhy odchylek při obrábění
- Popsat co způsobují odchylky zapříčiněné rozměrovým opotřebením nástroje?
- Popsat co způsobují odchylky, které způsobují upínací síly?
- Popsat co způsobují odchylky způsobené změnami teploty?
- Popsat co způsobují odchylky zapříčiněné zatížením stroje?
- Popsat co způsobují odchylky zapříčiněné nepřesností výrobního stroje?
- Popsat co způsobují odchylky teoretické odchylky?

**Budete umět**

## Budete schopni:

- Analyzovat a potažmo eliminovat, popř. vyloučit odchylky, které vznikají při obrábění.

**Budete schopni**



**Čas ke studiu: 3,5 hodiny**



## Výklad

Přesností obrábění rozumíme stupeň shodnosti obrobené součástky s výkresem součástky a technickými požadavky. Konstruktor, který vychází z podmínek práce stroje anebo přístroje, určí stupeň přesnosti součástek a jejich vzájemnou polohu v montovaném celku. Přesnost součástek definují tolerance rozměrů a odchylky tvaru a vzájemné polohy. Technické možnosti současné výroby jsou značné. Při realizaci technologického procesu naproti tomu vznikají odchylky od zadaných rozměrů, které mají systematicky a náhodný charakter.

Nepřesnosti tvaru, rozměrů a polohy součástek můžeme charakterizovat takto:

- odchylky skutečných rozměrů od nominálních, které jsou definovány tolerancí,
- odchylky od správného geometrického tvaru (ovalita, kuželovitost apod.),
- odchylky vzájemné polohy součástek a montážních jednotek (odchylky rovnoběžnosti, kolmosti,...).

V reálných výrobních podmínkách závisí odchylky od mnoha činitelů, a proto není možné vyrobit úplně stejné součástky ani v rozsahu několika kusů vyráběných za sebou.



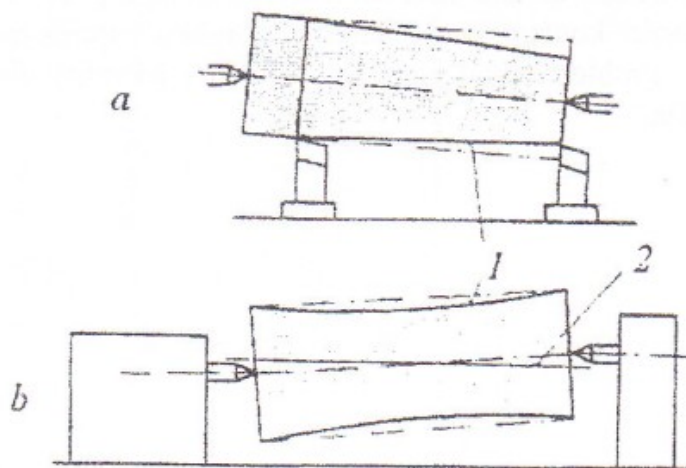
## 11.1. Druhy odchylek a příčiny jejich vzniku

Odchylky, které vznikají při obrábění, můžeme rozdělit do několika skupin:

**1. Teoretické odchylky** jsou odchylky geometrického tvaru součástek od teoretického tvaru. Např. při soustružení součástek tvarovým kotoučovými noži, které nemají realizovanou korekci profilu, vznikají modifikace profilu a rozměrů. Při frézování ozubení modulovou kotoučovou frézou se modifikuje evolventní profil zubů, protože teoretický profil platí jen pro určitý modul zubu.

**2. Odchylky zapříčiněné nepřesností výrobního stroje** závisí od přesnosti práce stroje. Možno je sledovat bez zatížení a při zatížení řeznou silou. Nepřesnosti, které má stroj bez zatížení, vyplývají ze součtu nepřesností jeho součástek a je možné je změřit. Např. častou chybou při montáži je odchylka souososti hrotů soustruhu a jeho lůžka. Při vzniku této chyby vzniká kuželová součástka (obr. 11.1a). Tvořící přímka (dráha hrotu nože) je šikmá k ose obrobku. Pokud je tato odchylka v rovině kolmé na lůžko stroje, bude mít součástka profil rotačního hyperboloidu (obr. 11.1b). Tvořící přímka je mimoběžná k ose obrobku.

Příčinou vzniku ovalnosti součástky je házení vřetene stroje. Špatné vyvážení součástek stroje, přípravku anebo polovýrobku má za příčinu vibrace soustavy obrábění a vznik hranatosti obrobku.



Obr. 11.1 Typické případy nepřesnosti stroje a jejich vliv na tvar obrobku. A - nesouosost hrotů v základní rovině, b - nesouosost hrotů v rovině kolmé na lůžko stroje. 1 - profil obrobku, 2 - dráha nože [1]

**3. Odchylky zapříčiněné zatížením stroje** vznikají proto, že technologická soustava se působením řezných sil, upínacích sil a dalších faktorů pružně deformuje. Tyto deformace vznikají vlivem vůli ve stykových spojeníh stroje pružnou deformací jeho částí, přípravků, nástrojů a součástek. Pružné deformace soustavy způsobují rozptyl rozměrů součástek v dávce a jsou základní příčinou vzniku vlnitosti.

Charakteristickým příkladem působení pružných deformací je obrábění na bruskách. Přesto se broušení na nových strojích musí uskutečňovat vyjiskřením, tedy několikanásobným přechodem brusného kotouče po obrobené ploše bez přísuvu. Velikost deformace závisí na schopnosti součástek a uzlů odolávat působícím silám a vyjadřuje ji tuhost. Tuhost pružné technologické soustavy  $c$ ,  $\text{N}\cdot\text{mm}^{-1}$  je poměr řezné síly, které působí ve směru kolmo na obrobenou plochu k posunutí hrotu nástroje:

$$c = \frac{F_p}{y}, \quad (11.1)$$

kde  $F_p$  je radiální síla, N,

$y$  - posunutí nástroje ve směru osy  $y$ , mm,

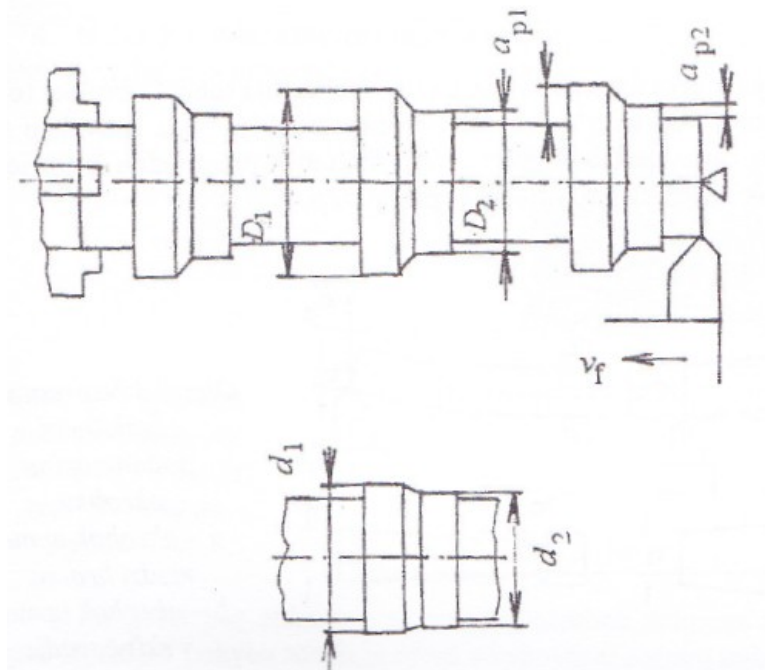
Obrácená hodnota tuhosti vyjadřuje poddajnost pružné soustavy  $w$ ,  $\text{mm}\cdot\text{N}^{-1}$ .

$$w = \frac{1}{c} = \frac{y}{F_p} \quad (11.2)$$

Při známé tuhosti je potom velikost deformace možné určit ze vztahu:

$$y = \frac{F_p}{c} = \tau_p \cdot w \quad (11.3)$$

Experimentálně se dá stanovit velikost deformace technologické soustavy v provozu podle obr. 11.2. Pokud použijeme dostatečně tuhý obrobek, jehož průběh můžeme proti deformaci stroje zanedbat, je možné při soustružení identifikovat posunutí obrobku u koníku a vřeteníku.



Obr. 11.2 Zkušební obrobek na stanovení tuhosti soustruhu [1]

Soustruží se krátké úseky obrobku se dvěma hloubkami řezu  $a_{p1}$  a  $a_{p2}$ , při ostatních konstantních řezných podmínkách ( $f, v_c = \text{konst.}$ ). Po obrobení se změří výška vzniknutého rozdílu ( $d_1 - d_2$ ), který vznikl odtlačením suportu.

Označme nepřesnost polovýrobku  $\Delta_r = d_1 - d_2$  (11.4)

A nepřesnost obrobené plochy  $\Delta_s = l_1 - l_2$  (11.5)

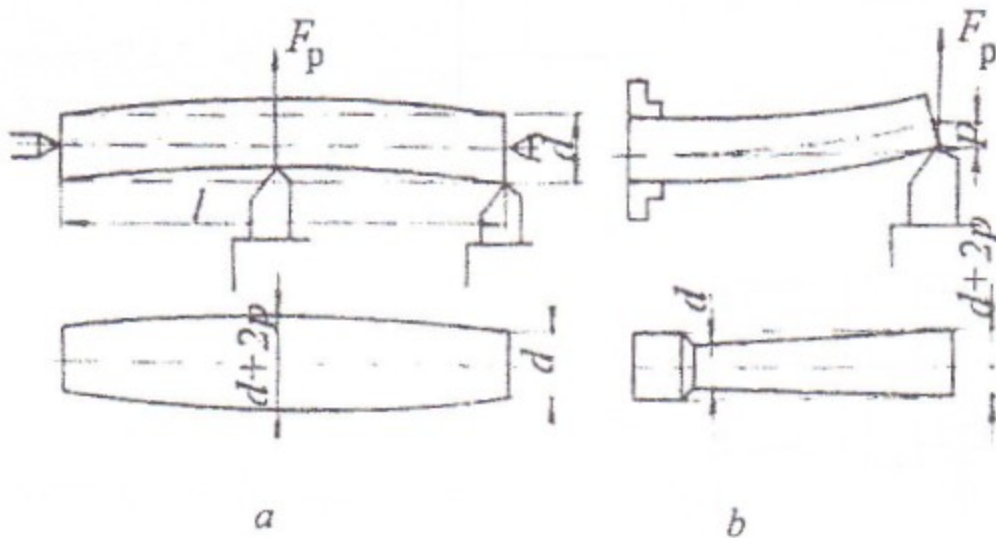
Při daných hodnotách  $a_{p1}$  a  $a_{p2}$  bude hodnota  $D_s$  tím menší, čím menší je odtlačení obrobku, tedy čím větší je tuhost stroje. Poměr  $\varepsilon = \frac{\Delta_r}{\Delta_s}$  (11.6) ukazuje, kolikrát se při obrábění zmenšila nepřesnost obrobku, nazýváme ho zpřesnění. Při stejných řezných podmínkách a geometrii nástroje může být tento parametr mírou tuhosti stroje podle vztahu:

$$k = \frac{F_p}{p} = \frac{\lambda \cdot C_{Fc} \cdot a_p \cdot f^{0,75}}{p} = \frac{\lambda \cdot C_{Fc} (D_1 - d_2) \cdot f^{0,75}}{d_1 - d_2} \quad (11.7)$$

$$z \text{ toho: } k = \lambda_F \cdot C_{Fc} \cdot f^{0,75} \cdot \varepsilon \quad (11.8)$$

kde  $\lambda$  je poměr mezi  $F_p$  a  $F_z$ ,  
 $C_{Fz}$  - konstanta.

Příkladem vzniku odchylek geometrického tvaru je nedostatečná tuhost obrobku (obr. 11.3). Při upnutí v hrotech nástroje vlivem průhybu obrobku odebrává víc materiálu při hrotech jako ve středu. Obrobek bude mít soudkovitý tvar, přičemž uprostřed bude jeho průměr zvětšený o dvojnásobek posunutí osy hřídele (průhyb)  $p$ .



Obr. 11.3 Nepřesnosti zapříčiněné poddajností obrobek [1]  
 a – obrobek upnutý mezi hroty  
 b – obrobek upnutý ve sklíčidle

Velikost deformace můžeme přibližně určit jako průhyb nosníku  $p$ , mm, uloženého na dvou podporách a zatíženého silou  $F_p$ .

$$p = \frac{F_p l^3}{48 \cdot E \cdot I}, \text{ kde} \quad (11.9)$$

$l$  - délka hřídele, mm,

$E$  - modul pružnosti, MPa,

$$I - \text{moment setrvačnosti, mm}^4; \text{ pro hřídele kruhového průřezu: } I = \frac{\pi D^4}{4}. \quad (11.10)$$

Dovolená odchylka od geometrického tvaru nemá převýšit 1/5 tolerančního pole:

$$2 \cdot p < \delta \text{ resp. } p < \frac{\delta}{2}, \quad (11.11)$$

kde  $\delta$  je tolerance, mm.

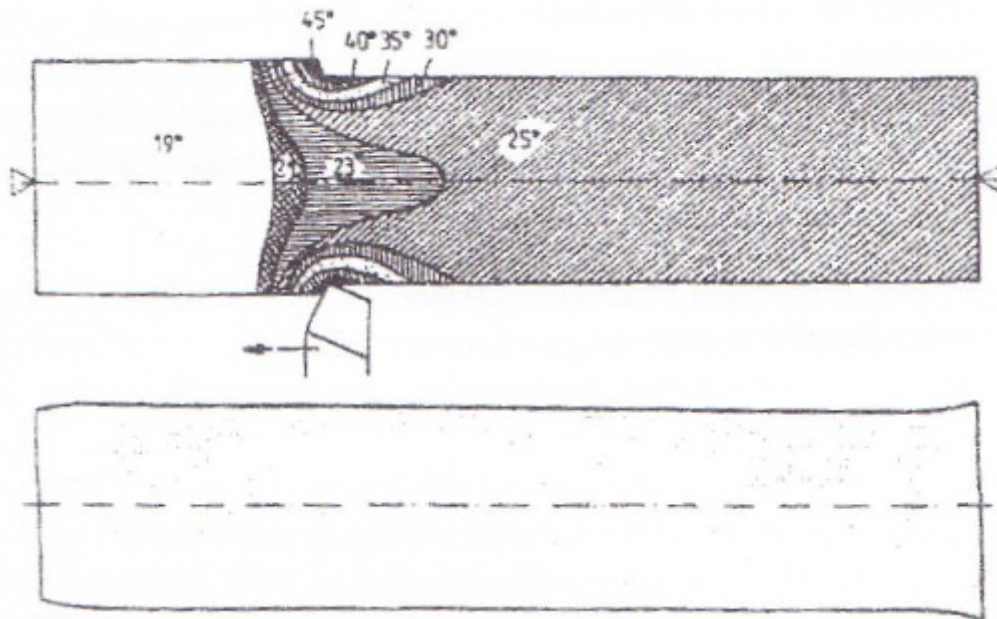
Při obrábění hřídelí upnutých ve sklíčidle anebo v pouzdře působením síly  $F_p$  může vzniknout odchylka podle obr. 11.2b. Tuhost polovýrobku se v tomto případě zvětšuje přibližováním ke sklíčidlu. Velikost průhybu můžeme určit tak, že obrobek považujeme za vetknutý nosník:

$$p = \frac{F_p \cdot l^3}{3 \cdot E \cdot I} \quad (11.12)$$

Vliv síly  $F_p$  na průhyb můžeme zmenšit:

- rozdělením operace na hrubovací a dokončovací, kterou je třeba realizovat na přesnějších stroji,
- - správnou volbou geometrie nože, např. úhel nastavení hlavní řezné hrany zvětšit na  $90^\circ$ , a tím se výrazně zmenší síla  $F_p$  (přitom úměrně vzroste síla  $F_f$ , která nemá vliv na deformaci technologické soustavy).

**4. Odchytky způsobené změnami teploty.** Jejich příčinou jsou meteorologické podmínky (teplota vzduchu v provozu) a ohřev obrobku teplem, které vzniká při obrábění (obr. 11.4).



Obr. 11.4 Teplotní pole v obrobku při soustružení a výsledný tvar obrobku po vychladnutí [1]

Při práci bez chlazení se válcový obrobek ohřívá axiálně pohyblivým zdrojem tepla. Rychlost pohybu zdroje se rovná minutovému posuvu nože.

Při vcházení do záběru je obrobek a nástroj studený. Málo se tepelně deformují.

V druhé fázi se před nožem pohybuje stabilní teplotní pole. V této fázi nastává konstantní deformace obrobku a nástroje tepelnou roztažností. Velikost deformace závisí na rozměrech ohříváných objektů a od střední teploty obrobku, resp. nástroje, podle vztahu:

$$\Delta l = l_n \cdot \alpha_n \cdot (\theta_n - \theta) + d \cdot \alpha_p \cdot (\theta_p - \theta) \quad (11.13)$$

Kde  $l_n$  je velikost vyložení nože, mm,

$\alpha$  - koeficient lineární teplotní roztažnosti materiálu nástroje,  $\text{mm} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ ,

$\theta$  - střední teplota vyložené části nože,  $^\circ\text{C}$ ,

$d$  - průměr obrobku, mm,

$\alpha_p$  - koeficient lineární teplotní roztažnosti materiálu polovýrobku,  $\text{mm} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ ,

$\theta_p$  - střední teplota polovýrobku v průřezu proti hrotu nože,  $^\circ\text{C}$ ,

$\theta$  - teplota okolí,  $^\circ\text{C}$ .

V třetí fázi se teplo koncentruje na konci polovýrobku, a tím zvyšuje teplotní deformaci nástroje i obrobku. Po vychladnutí se v tomto místě průměr obrobku zmenší. Střední teplotu polovýrobku je možné vyjádřit vztahem:

$$\theta_r = \frac{Q}{c \cdot \rho \cdot V}, \quad (11.14)$$

kde  $Q$  je teplo, J,

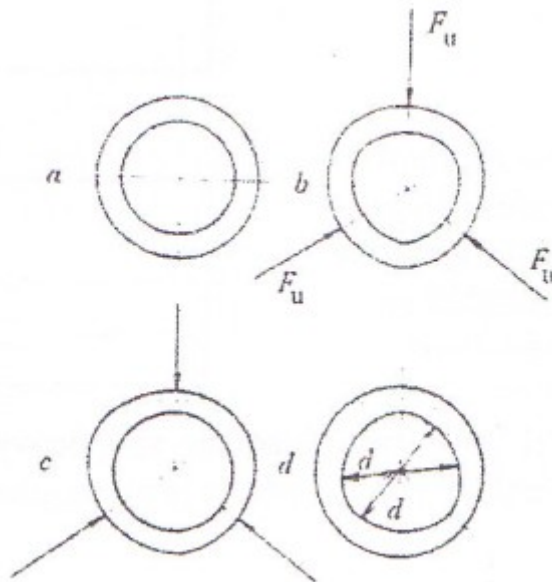
$c$  - měrné teplo materiálu polovýrobku,  $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ ,

$\rho$  - hustota materiálu polovýrobku,  $kg \cdot m^{-3}$ ,

$V$  - objem polovýrobku,  $m^3$ .

Z provozního hlediska třeba dodat, že rozměry obrobků se mají měřit až po vychladnutí, jinak se teplotní roztažnost zohledňuje při kompenzaci údajů měřidla. Při intenzivním chlazení zóny obrábění je možné teplotní deformace eliminovat.

**5. Odchytky, které způsobují upínací síly.** Při upínání součástek se deformuje nejen obrobek, ale i povrch součástí v místě kontaktu s upínacím elementem. Tyto odchytky se výrazně projevují např. při upínání tenkostěnných pouzder, skříní, trubek apod. Vliv deformace tenkostěnného kroužku upínacími silami je na obr. 11.5.



Obr. 11.5 Vliv pružné deformace tenkostěnného kroužku na geometrický tvar obrobene plochy [1]

Jestliže má otvor před upnutím správný geometrický tvar (a), po upnutí se kroužek zdeformuje (b). Po obrobení otvoru vznikne správný kruhový profil (c), ale po jeho odepnutí se obrobek vrátí do původního stavu a otvor je zdeformovaný. Je zajímavé, že tato odchytky se nedá odhalit dvoubodovým měřením (v každém směru naměříme stejný průměr). Deformaci kroužku můžeme zbránit upínáním po celém obvodu (vícebodové sklíčidlo, pouzdro).

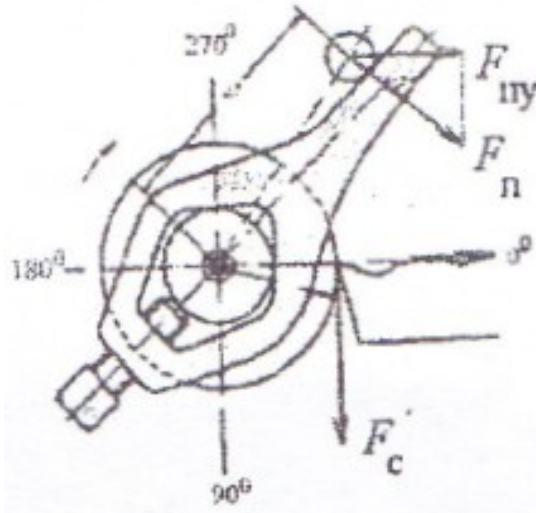
Při soustružení mezi hroty a pohonu obrobku od unášecího srdce (obr. 11.6), se bude ekvivalentní síla zvětšovat v průběhu jedné otáčky o hodnotu:

$$\Delta'_c = \frac{F_C \cdot r}{\rho} \cdot \cos \alpha \cdot \frac{l}{x}, \quad (11.15)$$

kde  $F_C$  je hlavní řezná síla, N,

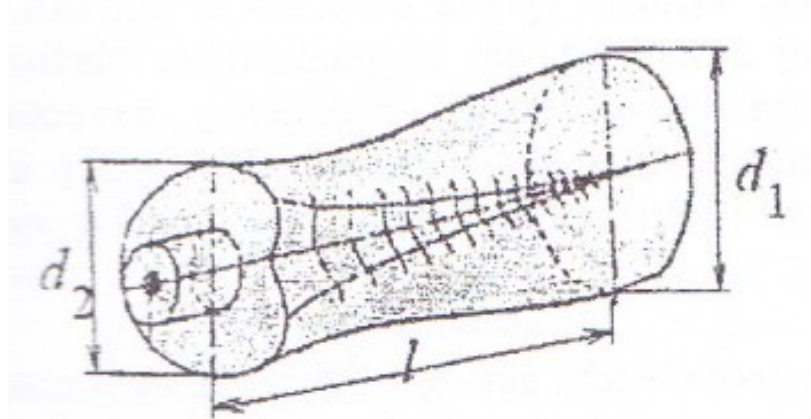
$r$  - poloměr obráběné plochy, mm,

$\rho$  - poloměr, na kterém působí palec unášeče, mm,  
 $x$  - vzdálenost mezi nožem a levým čelem obrobku, mm.



Obr. 11.6 Schéma upevnění obrobku unášečem.  $F_u$  - upínací síla [1]

Při přemístění nože od koníka k vřeteníku a změně úhlu mezi silami  $F_{ny}$  a  $F_n$  se bude  $\Delta'_p$  měnit. Proto se bude tvar hotového obrobku odlišovat od válce (obr. 11.7).

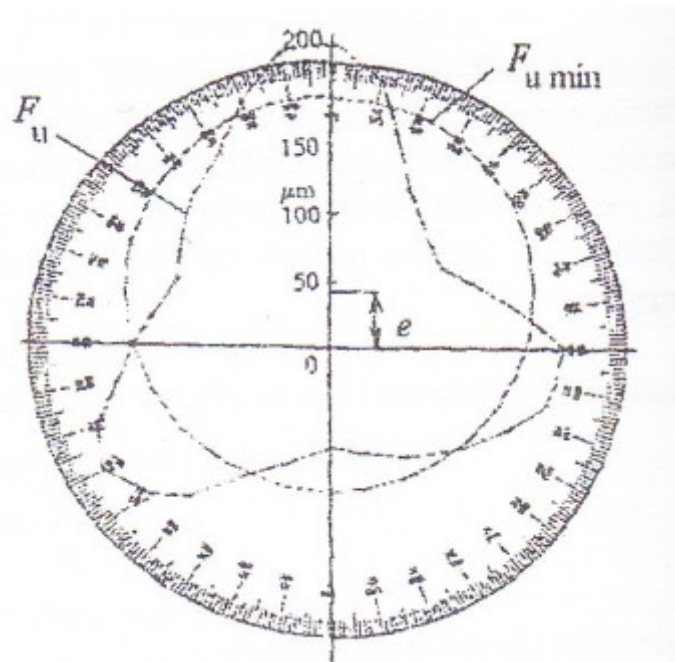


Obr. 11.7 Konečný tvar obrobku po soustružení mezi hroty [1]

Obrobek má větší průměr v místě koníku ( $d_1$ ), protože posunutí koníku je větší jako vřeteníku. V důsledku postupného průhybu je jeho profil deformovaný na soudkovitý. Při upínání se vytváří srdcovka.

Při upínání do sklíčidla je situace ještě složitější (obr. 11.8.). Tuhost sklíčidla je vyšší jako koníku, ale jednotlivé čelisti mají rozdílnou poddajnost. Při měření kruhovitosti obrobku při upnutí minimální upínací silou  $F_u$  bylo identifikováno posunutí osy obrobku, které odpovídá házení vřetene (sklíčidla) ( $e$ ). Při zvětšení upínací síly byl naměřený deformovaný trojúhelníkový profil posunutý o házení. Lze vidět rozdíly v poddajnosti jednotlivých čelistí.





Obr. 11.8 Profil obrobku v blízkosti tříčelistového sklíčidla [1]

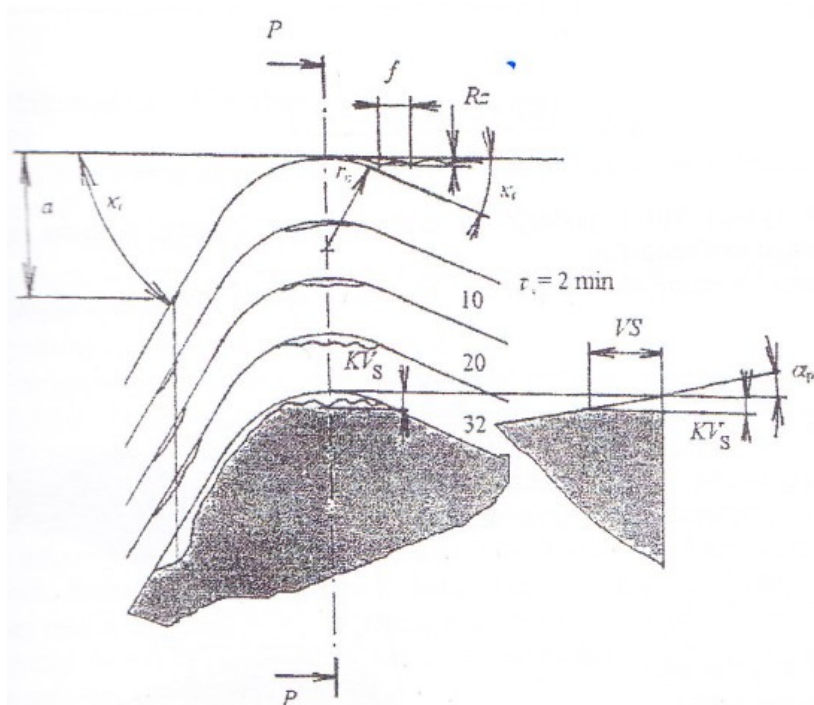
Velikost odchytky závisí na velikosti upínací síly, proto má její hodnota velký význam. Skutečný tvar obrobku je v tomto případě na obr. 11.9.



Obr. 11.9 Tvar obrobku soustruženého při upnutí ve sklíčidle [1]

Lze vidět, že tuhost technologické soustavy má výrazný vliv na přesnost obrobku. Můžeme konstatovat, že od tuhosti technologické soustavy závisí i produktivita obrábění. Při nedostatečné tuhosti soustavy je potřebné upravit řezné podmínky a zvětšit počet dokončovacích přechodů. Podobně je možné identifikovat geometrické odchytky u dalších typů obráběcích strojů (frézka, brusky,...). Při jejich hodnocení je potřebné vycházet z konkrétní konstrukce obráběcího stroje.

**6. Odchytky zapříčiněné rozměrovým opotřebením nástroje.** Úbytkem hrotu nástroje vlivem rozměrového opotřebení  $KV_y$  se např. při soustružení vnější válcové plochy průměr obrobku zvětšuje a vnitřní zmenšuje. Už v prvních fázích obrábění nastává modifikace hrotu nástroje vlivem úbytku materiálu od původní řezné hrany v místě, kde končí kontakt hlavní řezné hrany s obráběnou plochou. Konečný profil opotřebeného nástroje má vlnitou řeznou hranu, která je radiálně „posunutá“. Vznikem hřebínků na hrotě nástroje se mění i kvalita obrobeného povrchu, protože v jisté fázi dochází k zahlazování nerovností opotřebeného povrchu. Na obr. 11.10 jsou znázorněné fáze rozměrového opotřebení hrotu nástroje v daném případě v průběhu  $\tau_{\text{p}} = 12 \text{ min}$  obrábění.



Obr. 11.10 Postupné zvětšování rozměrového opotřebení soustružnického nože v závislosti na čase obrábění [1]

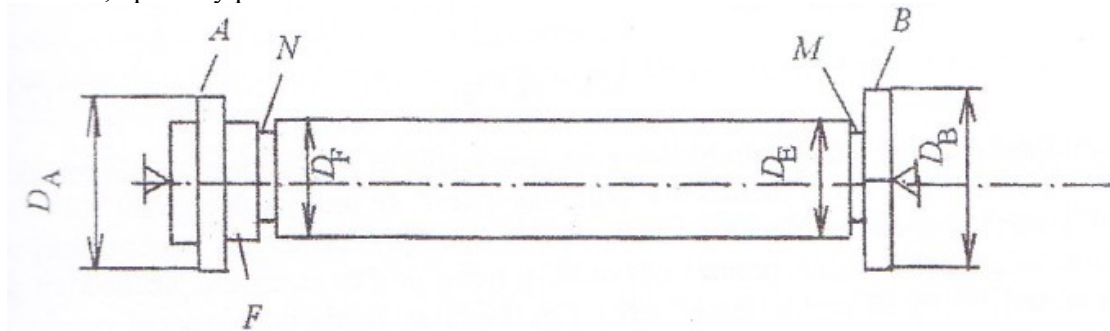
Při uvažování jen rozměrového opotřebení nástroje se rozměr obráběné součástky změní o hodnotu:

$$\Delta = \Delta.KV = \Delta.VS.tg\alpha_p \quad (11.16)$$

Rozměrové opotřebení se dá určit:

- výpočtem ze šířky opotřebení v místě hrotu nástroje ( $VS$ ),
- měřením kuželovitosti obrobku,
- měřením rozměru nástroje v zadní rovině.

Při určování rozměrového opotřebení měřením kuželovitosti obrobku se použije zkušební obrobek, upravený podle obr. 11.11.



Obr. 11.11 Tvar obrobku na zkoušky rozměrového opotřebení.

Hřídel soustružíme mezi hroty bez přestavení nástroje na nákržcích  $A$  a  $B$ . Potom při určité hloubce řezu  $a_p$  osoustružíme část hřídele mezi zápichy  $M$  a  $N$ . V zápichu  $N$  posuv vypneme a hřídel a nástroj necháme vychladnout. Potom bez změny nastavení nože osoustružíme úsek  $F$  za předpokladu, že teplotní deformace částí  $A, B, E$  a  $F$  je stejná, dostaneme:

$$D_F = D_E + \Delta.KV_S - (D_A - D_B). \quad (11.17)$$

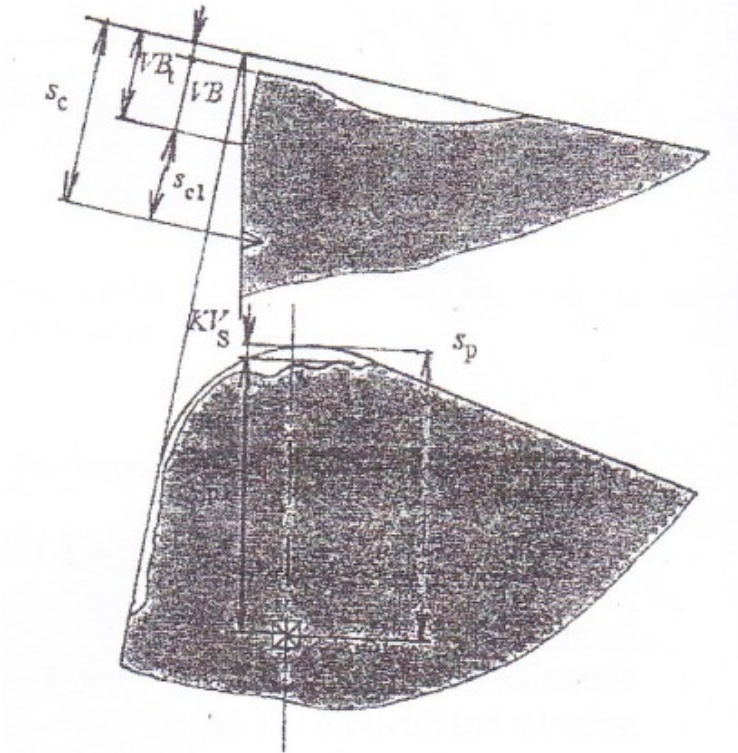


Odtud:

$$KV_S = \frac{(D_F - \varnothing_E) - (D_B - \varnothing_A)}{2} \quad (11.18)$$

Měřením se vyloučil vliv poddajnosti technologické soustavy a změna rozměru způsobená teplotní roztažností.

Přímé měření rozměrového opotřebení nástroje v zadní rovině se realizuje podle obr. 11.12.



Obr. 11.12 Způsob přímého měření rozměrového opotřebení nástroje [1]

Na novém nástroji se vytvoří vpich mikrotvrdoměrem a zaznamená se jeho vzdálenost od řezné hrany  $s_p$ . Po určitém čase obrábění se změří vzdálenost  $s_{pl}$ . rozměrové opotřebení bude:

$$KV_S = s_p - s_{pl} \quad (11.19)$$

Závislost rozměrového opotřebení na čase obrábění se řadí podobnou křivkou jako  $VB$ .

Tato hodnota je funkční, protože udává šířku třecí plošky nástroje o přechodovou plochu. Alternativně by se mohla měřit šířka  $VB_t$ , která se měří od původní polohy řezné hrany. Dá se určit podobně jako  $KV_S$ . Na hřbetě nástroje se vytvoří vpich a teoretická hodnota šířky opotřebení se vyhodnotí jako:

$$VB_t = s_c - s_{cl} \quad (11.19)$$

Další odchylky můžou nastat nesprávnou volbou nastavení základny obrobku a dodatečným uvolňováním zbytkových napětí, které vznikají při výrobě polovýrobnků a obrábění součástek.



## Shrnutí kapitoly

V této kapitole jste se dozvěděli, jaké jsou druhy odchylek vznikajících při obrábění. Dále jak se dají rozpoznat a jak jim odcházet nebo je vyloučit z procesu obrábění.



## Kontrolní otázky

1. Jaké jsou příčiny vzniku odchylek při obrábění?
2. Co způsobují odchylky zapříčiněné rozměrovým opotřebením nástroje při soustružení vnitřního a vnějšího průměru?
3. U jakých součástí se projevují odchylky, které způsobují upínací síly?
4. Co je příčinou vzniku odchylky způsobené změnami teploty?
5. Proč a jak vznikají odchylky zapříčiněné zatížením stroje?
6. Od čeho závisí odchylky zapříčiněné nepřesností výrobního stroje?
7. Co jsou to teoretické odchylky?



## Další zdroje

1. VASILKO Karol. *Analytická teória trieskového obrábania*. COFIN Prešov, 2007. ISBN 978-80-8073-759-7.
2. BUDA, J. - SOUČEK, J. - VASILKO, K.: *Teória obrábania*, ALFA Bratislava, 1983
3. MAŇKOVÁ, I. - BEŇO, J.: *Technologické a materiálové činitele obrábania*, Viena Košice, 2004, ISBN 80-7099-701-X
4. MAŇKOVÁ, I.: *Vybrané aspekty monitorovania stavu nástroja v procese rezania*, Košice, 2004, ISBN 80-8073-1837
5. NESLUŠAN, M. – TUREK, S. – BRYCHTA, J. – ČEP, R. – TABAČEK, M.: *Experimentálne metódy v trieskovom obrábaní*. EDIS Žilina, 2007. ISBN 978-80-8070-711-8.
6. MÁDL, J. - SCHUBERT, V.: *Experimentální metody a optimalizace v teorii obrábění*. Praha : ČVUT Praha, 1985
7. Bilík, O. *Obrábění II. (1.Díl): Fyzikálně mechanické záležitosti procesu obrábění*. Ostrava: Vysoká škola báňská –TU Ostrava, 1994. 132 s. ISBN 80-7078-228-5.
8. Bilík, O. *Obrábění II. (2.Díl)*. Ostrava: Vysoká škola báňská –TU Ostrava, 2001. 118 s. ISBN 80-7078-994-1.
9. BRYCHTA, Josef; ČEP, Robert; NOVÁKOVÁ, Jana, PETŘKOVSKÁ, Lenka. *Technologie II – 1. díl*. Ostrava : Ediční středisko VŠB – TU Ostrava. ISBN 978–80–248–1641–8.
10. BRYCHTA, Josef; ČEP, Robert; NOVÁKOVÁ, Jana, PETŘKOVSKÁ, Lenka. *Technologie II – 2. díl*. Ostrava : Ediční středisko VŠB – TU Ostrava. ISBN 978–80–248–1822–1.



## Klíč k řešení

- O 11.1
- Teoretické odchylky
  - Odchylky zapříčiněné nepřesností výrobního stroje
  - Odchylky zapříčiněné zatížením stroje
  - Odchylky způsobené změnami teploty.
  - Odchylky, které způsobují upínací síly
  - Odchylky zapříčiněné rozměrovým opotřebením nástroje.
- O 11.2 Úbytkem hrotu nástroje vlivem rozměrového opotřebením se při soustružení vnější válcové plochy průměr obrobku zvětšuje a vnitřní zmenšuje.
- O 11.3 Tyto odchylky se výrazně projevují např. při upínání tenkostěnných pouzder, skříní, trubek apod.
- O 11.4 Jejich příčinou jsou meteorologické podmínky (teplota vzduchu v provozu) a ohřev obrobku teplem, které vzniká při obrábění.
- O 11.5 Vznikají proto, že technologická soustava se působením řezných sil, upínacích sil a dalších faktorů pružně deformuje. Tyto deformace vznikají vlivem vůli ve stykových spojeních stroje pružnou deformací jeho částí, přípravků, nástrojů a součástek.
- O 11.6 Závisí od přesnosti práce obráběcího stroje. Možno je sledovat bez zatížení a při zatížení řeznou silou. Nepřesnosti, které má stroj bez zatížení, vyplývají ze součtu nepřesností jeho součástek a je možné je změřit.
- O 11.7 Jsou odchylky geometrického tvaru součástek od teoretického tvaru.

## 12. ZBYTKOVÁ POVRCHOVÁ NAPĚTÍ PO OBRÁBĚNÍ

Po úspěšném a aktivním absolvování této KAPITOLY

### Budete umět:

- Rozdělit metody měření povrchových napětí.
- Popsat vybrané metody měření povrchových napětí.

**Budete umět**

### Budete schopni:

- Orientovat se mezi metodami měření povrchových napětí.
- Vybrané metody aplikovat.

**Budete schopni**



**Čas ke studiu:** 1,5 hodiny



**Výklad**

Zjišťování zbytkových napětí se provádí, buď v těsné blízkosti povrchu, nebo v celém průřezu součásti. Podle napjatosti je možné měřením stanovit napjatost prostou, rovinnou nebo prostorovou [35]. Přehled metod měření zbytkových napětí je uveden v tab. 12.1.

Metody zjišťování zbytkových pnutí lze v podstatě rozdělit do tří skupin:

- **DESTRUKTIVNÍ**, kdy dochází ke zničení součásti. Tato skupina zahrnuje většinu metod mechanických, založených na měření deformaci při odstraňování vrstev materiálu,
- **POLODESTRUKTIVNÍ**, kdy je možné provést měření na záměrně přidané části povrchu, která se po měření odstraní. Sem patří například metoda otvoru,
- **NEDESTRUKTIVNÍ**, při kterých nedochází ani ke zničení součásti, ani k případné úpravě součásti pro měření. Do této skupiny patří většina metod fyzikálních [2].

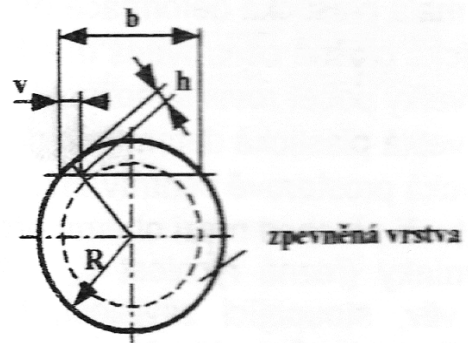
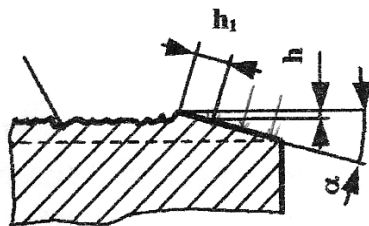
Tab. 12.1 Metody zjišťování zbytkových napětí [1, 8]

Metoda zjišťování zbytkových napětí	Tvar součásti	Způsob měření	
Mechanické	plochý tvar	deformace pásků	změna délky
			změna zakřivení
		vrtání děr	válcová díra
			mezikruží
	rotační tvar	změna rozměru válce	odstranění povrchové vrstvy
		trubka	rozříznutí trubky
			odstranění povrchové vrstvy
			odstranění vnitřní vrstvy
		kroužek	rozříznutí
			změna křivosti
	podélné pásy z kroužků		
	obecný tvar	metoda sítí	deformace sítě
křehké laky		vznik trhlin	
křehké modely		vznik trhlin	
Fyzikální RTG	obecný tvar	difrakce	vzdálenost meziatomových rovin
Fyzikální ultrazvuk		šíření vln	změna rychlosti
			odraz vln
			vnitřní tlumení
Elektrické	obecný tvar	změna proudu	změna potenciálu procházejícího proudu
			změna velikosti vířivých proudů
			změna indukčního toku
Magnetické	obecný tvar	změny magnetismu	magnetická indukce
			zbytkový magnetismus
Akustické	obecný tvar	prozvučitelnost	četnost akustických emisí
Chemické	obecný tvar	difúze vodíku	trhliny na povrchu
		změna chemické aktivity	změna struktury

## 12.1. Destruktivní metody měření zbytkových napětí

Do této kategorie metod měření zbytkových napětí patří například **měření mikrotvrdomosti**. K reálným hodnotám stupně a hloubky zpevnění je možné dojít měřením mikrotvrdomosti v ovlivněné zóně povrchu. Když se použije tato metoda při malé hloubce ovlivněné vrstvy, vzniká problém v metodice měření. Podle hloubky ovlivněné vrstvy je možné použít metodu postupného odleptávání povrchových vrstev, metodu kolmých řezů a metodu šikmých řezů [3].

zpevněná vrstva



Obr. 12.1 Výbrus vzorku pro hodnocení zpevnění povrchové vrstvy – metoda šikmých řezů [3]

Vpichy se provádějí ve více rovinách vedle sebe a v každé hloubce se vyhodnotí průměrná hodnota mikrotvrdosti. Stupeň zpevnění povrchu v % se určí dle vztahu:

$$K_Z = \frac{HM_Z}{HM_N} \cdot 100$$

(12.1)

kde  $K_Z$  - stupeň zpevnění povrchu [%],  
 $HM_Z$  - mikrotvrdost materiálu zpevněného,  
 $HM_N$  - mikrotvrdost materiálu nezpevněného.

## 12.2. Polodestruktivní metody měření zbytkových napětí

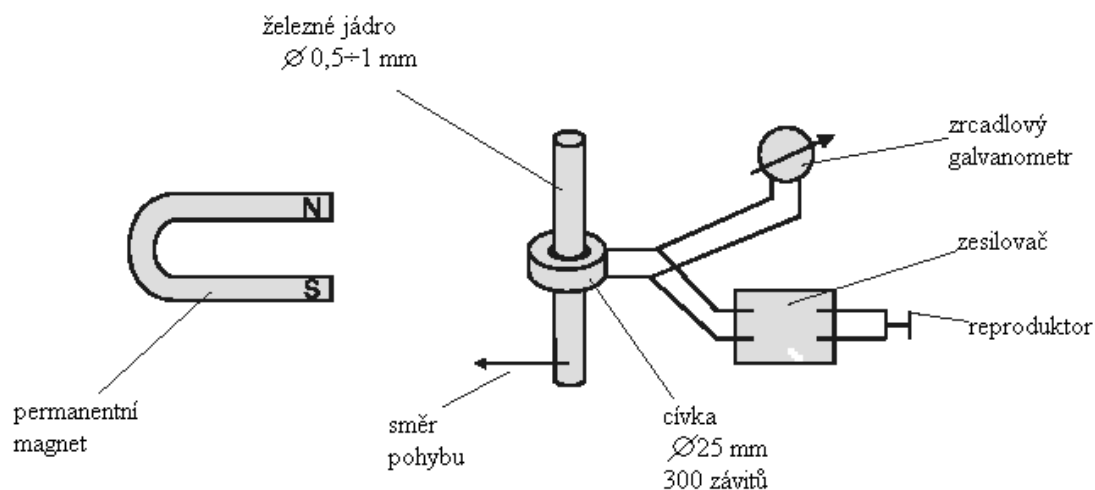
Jednou z polodestruktivních metod měření zbytkových napětí je **vyvrtávací metoda**. Vyvrtávací metoda zjišťování zbytkových pnutí patří mezi mechanické, semidestruktivní metody. Při narušení celistvosti vyvrtáním malého otvoru na povrchu součásti se uvolní zbytkové deformace. Tyto deformace se měří tenzometrickou růžicí, která je nainstalována na povrchu konstrukce. Růžice je složena většinou ze tří odporových tenzometrů a otvor se vrtá do průsečíku jejich os. Vrtání se provádí po krocích a na konci každého kroku se provede měření uvolněných deformací. Takto se získá rozložení zbytkových deformací v daném místě do určité hloubky pod povrchem součásti. Tyto získané deformace se poté vyhodnocují dle různých teorií, na jejichž základě se určuje rozložení zbytkových napětí v daném místě [4].



Obr. 12.2 Vyvrtávací zařízení [4]

### 12.3. Nedestruktivní metody měření zbytkových napětí

Mezi nedestruktivní metody pro měření zbytkových pnutí patří **metoda využívající Barkhausenův šum**. Barkhausenův šum byl poprvé popsán v roce 1919 profesorem Heinrichem Georgem Barkhausenem (obr. 12.3). Přiblížíme či vzdálíme-li magnet od jádra, je v reproduktoru slyšitelné chrastění či praskání. Tento šum, jak ukázal paralelní vývoj kvantové mechaniky, souvisí s nespojitostmi v procesu magnetizace feromagnetického materiálu. Později se ukázalo, že efekt závisí na tvrdosti ocelového jádra v cívce (s rostoucí tvrdostí intenzita praskání klesá) [5].



Obr. 7.3 Původní Barkhausenovo uspořádání [6]

Feromagnetické materiály si lze představit jako materiály složené z malých magnetických oblastí podobných tyčovým magnetům, které se nazývají domény. Každá doména se magnetizuje podél krystalograficky vyznačených směrů.

Domény jsou přitom navzájem odděleny hranicemi, kterým se říká doménové (Blochovy) stěny. Vnější magnetické pole přitom způsobuje pohyb doménových stěn. Aby se doménová stěna mohla pohnout, doména na jedné straně stěny se musí zvětšit a doména na druhé straně se smrští. Výsledkem je pak změna celkové magnetizace vzorku [6].

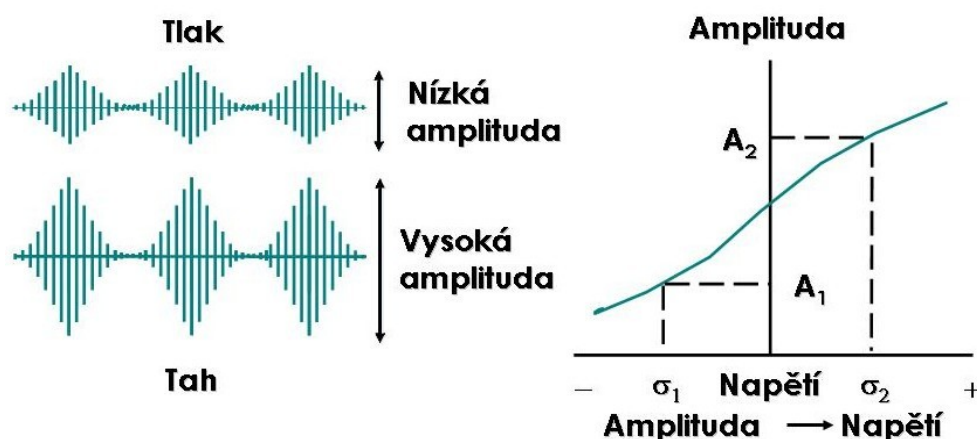
Je-li cívka z vodivého drátu umístěna v blízkosti vzorku v době, kdy se doménová stěna pohybuje, související změna magnetizace vzorku indukuje v cívce elektrický puls. Posloupnost těchto pulsů se zobrazí na monitoru počítače v určité křivce. Z této křivky můžeme potom určit zbytkové pnutí v povrchu materiálu. Tato změna magnetizace není nepřetržitý proces, spíše se doménové stěny pohybují v jednotlivých náhlých skocích [6].

Barkhausenův šum má pro většinu materiálů frekvenční spektrum začínající na magnetizačním kmitočtu a končící přibližně na 250 kHz. Signál je exponenciálně tlumen v závislosti na vzdálenosti, kterou projde uvnitř materiálu. Primární příčinou tlumení jsou vířivé proudy indukované při šíření signálu vznikajícího pohybem domén.

Útlum určuje hloubku, ze které lze ještě informaci získat (měřicí hloubku). Při běžných aplikacích se měřicí hloubka pohybuje mezi 0,01 mm až 1,5 mm. Hlavní faktory, které ovlivňují tuto hloubku jsou:

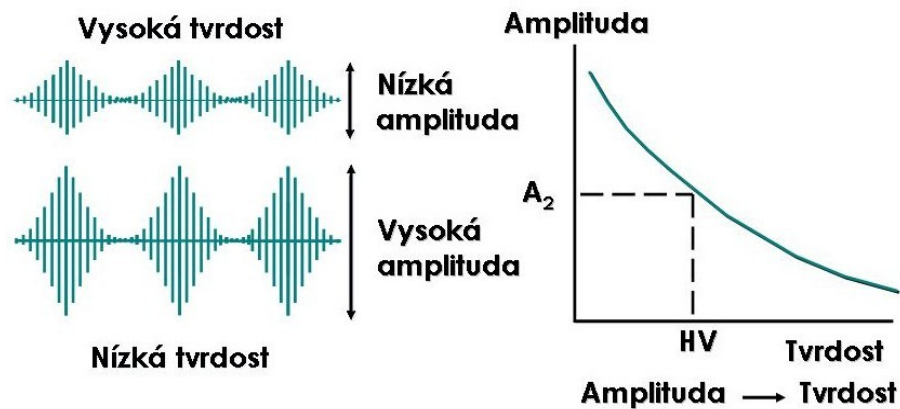
- a) frekvenční rozsah generovaného signálu,
- b) vodivost a permeabilita zkoušeného materiálu [7].

Většina běžných vad povrchu, jako je spálení po broušení, nezakalené hrany, plochy nebo oduhličené oblasti, nějakým způsobem ovlivňují napětí či mikrostrukturu a mohou být indikovány magnetoelastickými metodami. Množství dynamických procesů jako je tečení nebo únava materiálu se projevuje změnami v napětí a mikrostruktura, proto mohou být také sledovány magnetoelasticky (obr. 12.4 a 12.5).



Obr. 12.4 Vliv napětí na snímání signálu Barkhausenova magnetického šumu [6]





Obr. 12.5 Vliv tvrdosti na snímaný signál Barkhausenova magnetického šumu [6]



## Shrnutí kapitoly

V této kapitole jste se dozvěděli, kde se provádí měření povrchových napětí a jakými metodami. Rozdělili jsme je na destruktivní, polodestruktivní a nedestruktivní a s vybranými metodami jsme se seznámili podrobněji.



## Kontrolní otázky

1. Jaké jsou metody měření povrchových napětí?
2. Popište, jak lze definovat metody spadající mezi destruktivní zkoušky.
3. Popište, jak lze definovat metody spadající mezi polodestruktivní zkoušky.
4. Popište, jak lze definovat metody spadající mezi nedestruktivní zkoušky.
5. Kam lze zařadit metodu Barkhausenova šumu?
6. Mezi které metody lze zařadit vyvrtávací metodu?
7. Vyjmenujete alespoň 4 druhy měření spadající mezi mechanické metody?
8. Kde se měří povrchová napětí?



## Další zdroje

1. BUMBÁLEK, B.; BUMBÁLEK L. Zbytková napětí a jejich význam při řešení integrity povrchu. *Strojírenská technologie*, ročník XI, 3/2006, s. 9-17. ISSN 1211-4162.
2. BILÍK, O.; KUBIŠ, M. *Návody ke cvičení z teorie obrábění*, 1. vydání, Ostrava: VŠB Technická Univerzita Ostrava, Ostravské tiskárny, 1991. ISBN 80-7078-121-1.
3. BILÍK, O. *Obrábění II - 1.díl – Fyzikálně mechanické zákonitosti procesu obrábění*, 2.

vydání, Ostrava: VŠB Technická Univerzita Ostrava, Ediční středisko VŠB-TU, 1999. ISBN 80-7078-962-X.

4. KONDERLA, R. *Vliv geometrie frézovací hlavy na napětí v povrchové vrstvě obrodku*. Ostrava, 2008. 71 s. Diplomová práce. VŠB - Technická univerzita.
5. MALEC, J. Některé nepříliš známé pojmy. *Strojírenská technologie*, ročník XI, 3/2006, s. 4-5. ISSN 1211-4162.
6. OCHODEK, V. Residual stress evaluation in spirally welded pipes for gas pipeline. In. 6th International Conference on Barkhausen Noise and Micromagnetic Testing, ICBM 6, 9-10 July 2007, Valenciennes, University of Valenciennes, France, ISBN 951-98400-7-9.
7. TÖNSHOFF, H.; K., KARPUSCHEWSKI, B. Residual stress determination of ferromagnetic sheets. *Technické informace a aplikační zprávy o spektrometrech a o přístrojích pro detekci strukturních a napěťových změn v materiálech* [CD-ROM]. Žďár nad Sázavou, 2004, [cit. 2010-04-12]. Adresář: [file:///E:/Stresstech/uvod\\_a\\_teorie/Zbytkova\\_pnuti.pdf](file:///E:/Stresstech/uvod_a_teorie/Zbytkova_pnuti.pdf).
8. Arunachalam, R.M.; Mannan, M.A.; Spowage, A.C. *Surface integrity when machining age hardened Inconel 718 with coated carbide cutting tools* [online] 2004, [cit. 2010-10-05]. Dostupné z: [http://www.sciencedirect.com/science?\\_ob=ArticleURL&udi=B6V4B-4CXMPNJ-1&user=822117&coverDate=11%2F30%2F2004&alid=1485443506&rdoc=1&fmt=high&orig=search&origin=search&zone=rslt\\_list\\_item&cdi=5754&sort=r&st=13&docanchor=&view=c&ct=25&acct=C000044516&version=1&urlVersion=0&userid=822117&md5=2ad285d5f3afa5480b301e7a34ddb3&searchtype=a](http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleURL&udi=B6V4B-4CXMPNJ-1&user=822117&coverDate=11%2F30%2F2004&alid=1485443506&rdoc=1&fmt=high&orig=search&origin=search&zone=rslt_list_item&cdi=5754&sort=r&st=13&docanchor=&view=c&ct=25&acct=C000044516&version=1&urlVersion=0&userid=822117&md5=2ad285d5f3afa5480b301e7a34ddb3&searchtype=a).



## CD-ROM

Animace zobrazuje postup a vyhodnocení vybrané metody (odvrtávací metoda) stanovování povrchových napětí po obrábění.



## Klíč k řešení

- O 12.1 Metody měření povrchových napětí se dají rozdělit na destruktivní, polodestruktivní a nedestruktivní.
- O 12.2 Metody kdy dochází ke zničení součásti. Tato skupina zahrnuje většinu metod mechanických, založených na měření deformaci při odstraňování vrstev materiálu.
- O 12.3 Metody kdy je možné provést měření na záměrně přidané části povrchu, která se po měření odstraní. Sem patří například metoda otvoru.
- O 12.4 Metody, při kterých nedochází ani ke zničení součásti, ani k případné úpravě součásti pro měření. Do této skupiny patří většina metod fyzikálních.
- O 12.5 Nedestruktivní.
- O 12.6 Destruktivní.
- O 12.7 Patří sem: vrtání děr, změna rozměru válce, trubka, kroužek, deformace pásků, metoda sítí, křehké laky, křehké modely.
- O 12.8 Zjišťování zbytkových napětí se provádí, buď v těsné blízkosti povrchu, nebo v celém průřezu součásti.



# 13. VLIV PARAMETRŮ NA TEORETICKOU A SKUTEČNOU DRSNOST POVRCHU

Po úspěšném a aktivním absolvování této KAPITOLY

## Budete umět:

- Definovat základní parametry kvality obrobené plochy.
- Popsat mikrogeometrii obrobené plochy.
- Stanovit teoretickou drsnost v závislosti na řezné geometrii a řezných parametrech nástroje.

**Budete umět**

## Budete schopni:

- Vypočítat teoretickou drsnost.

**Budete schopni**



**Čas ke studiu: 3 hodiny**



**Výklad**

Kvalita obrobeného povrchu jako integrovaná charakteristika strojových součástí, je definována:

- Geometrií obrobeného povrchu
- Fyzikálně-mechanickými vlastnostmi povrchové vrstvy, zejména odchylkami od ideálního tvaru
- Fyzikálně-chemickým stavem povrchu.

## 13.1. Mikrogeometrie obrobeného povrchu

Stav a kvalita povrchové vrstvy obrobeného kovu ovlivňují únavovou pevnost, odolnost proti opotřebení, protikorozní stabilitu, kvalitu montáže apod. je známé, že dynamicky namáhané součástky se zpravidla začnou porušovat na povrchu. Obrobená plocha se tvoří jako obalová plocha trajektorií pracovního pohybu bodů řezné hrany nástroje a od základních geometrických ploch zadaných výkresem, tedy od roviny, válcové plochy apod. se zásadně liší. Např. podélně soustružená plocha je šroubovitá, čelně soustružená spirálová, hoblovaná žlábkovitá. Avšak i takové pojetí obrobené plochy je idealizací jejího skutečného stavu. Geometrický sled postupných poloh bodů řezné hrany je přetvořený v závislosti od jednotlivých fyzikálních procesů, které zákonitě provázejí obrábění.

Teoretický sled poloh řezné části nástroje, daný kinematickým schématem se mění v důsledku následujících faktorů:

- Pružnou a plastickou deformací v průběhu tvoření třísky.
- Dynamickými jevy, tedy kmitáním technologické soustavy.

- Přesností výrobního zařízení.

Vliv plastické deformace na skutečný obrobený povrch se zakládá zejména na adhezních silách mezi obrobkem a nástrojem a na tvoření nárůstku. Nárůstek se odděluje od ploch řezného nástroje, přilepuje se na obrobený povrch a vytváří na něm vyvýšeniny. Ty se můžou v procesu řezání odtrhávat a na povrchu se objeví vytrhané plošky.

Při obrábění litiny a kovů v křehkém stavu nevzniká „čistě“ řezání. V důsledku napjatosti se některá zrna odtrhávají od základního materiálu, čím vznikají odchylky od teoretického povrchu ve tvaru nepravidelných prohloubení.

Vliv kmitání se projevuje tím, že narůstá teoretický sled pohybů řezné hrany, jednak má vliv na oddělování nárůstku od ploch nástroje.

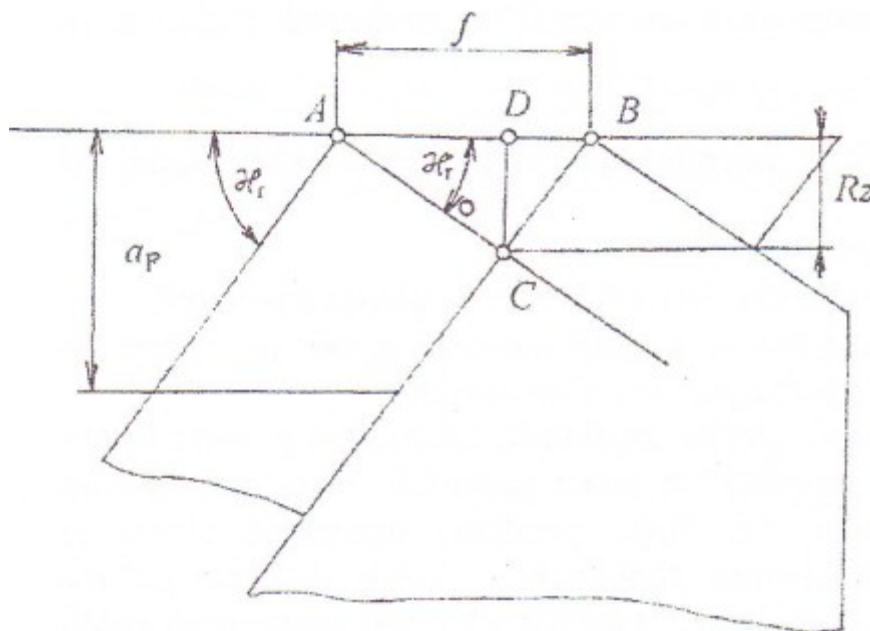
Vliv tření hřbetu nože o obrobek se projevuje i tím, že nerovnosti řezné hrany se kopírují na obráběný povrch.

Drsnost povrchu, definovaná na výkrese, lze považovat za limitní hodnotu, která se má v technologickém procesu dosáhnout. Jednoduchý geometrický přístup k identifikaci mikrogeometrie obrobeného povrchu vychází z prostého kopírování tvaru řezného klínu na obrobený povrch.

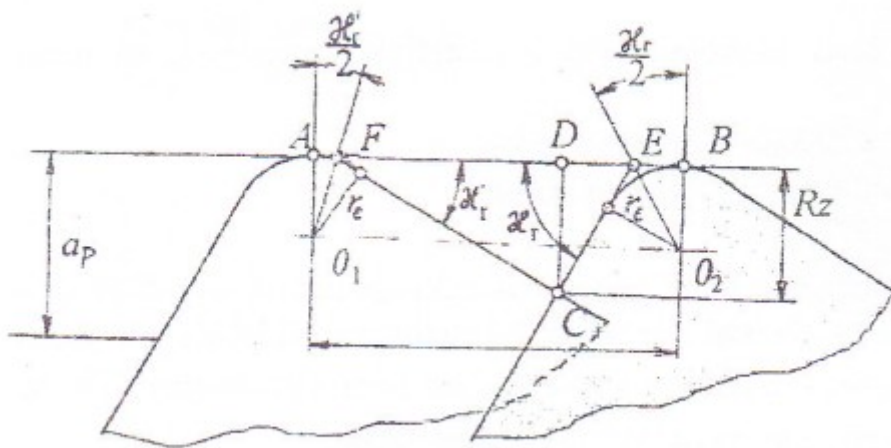
## 13.2. Výpočet teoretické drsnosti povrchu

Mohou nastat tři případy:

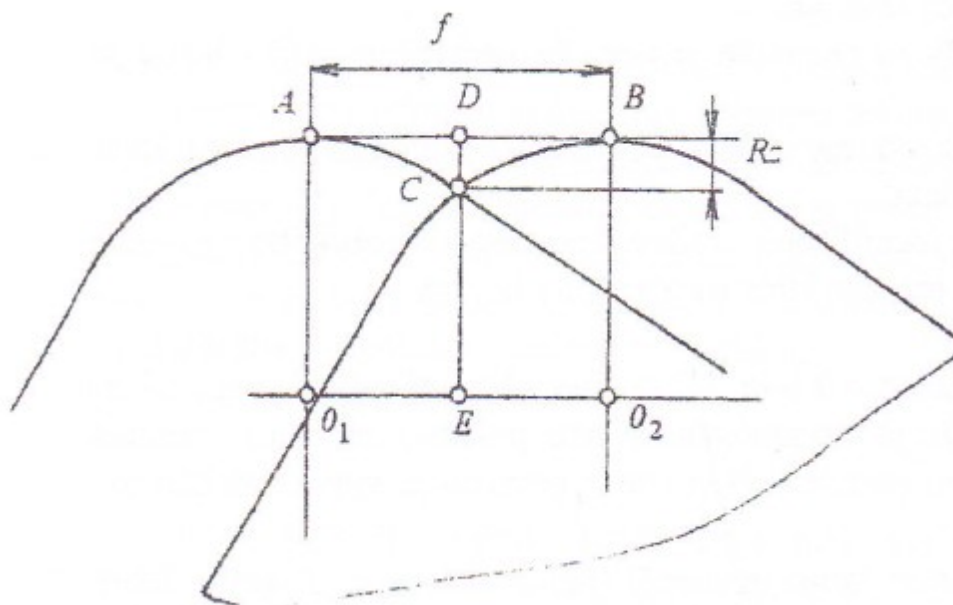
- **Hrot nástroje není zaoblený, tedy  $r_e = 0$**  (obr. 13.1). Tento limitní případ znamená, že posuv můžeme zanedbat, protože je mnohem menší jako poloměr zaoblení nástroje a odpovídá hrubování velkými posuvy. Nerovnost povrchu je vytvářena hlavní a vedlejší řeznou hranou.
- **Hrot nože je zaoblený a poloměr hrotu je menší jako posuv:  $r_e \leq f$**  (obr. 13.2). Nerovnost povrchu je vytvářena zaobleným hrotem i úseky hlavní a vedlejší řezné hrany. Lze to považovat za polohrubování.
- **Hrot nože je zaoblený, přičemž poloměr  $r_e \geq f$** . Profil povrchu je vytvořený jen zaobleným hrotem nástroje. Tento případ odpovídá dokončování povrchu (obr. 12.3), proto nás z hlediska kvality povrchu zaujmají nejvíce.



Obr. 13.1 Schéma pro výpočet teoretické nerovnosti obrobeného povrchu při obrábění nástrojem s minimálním poloměrem hrotu [1]



Obr. 13.2 Schéma „polohrubování“ povrchu [1]



Obr. 13.3 Schéma dokončování povrchu [1]

Sledujeme první případ. Z obr. 13.1. Platí [10, 13]:

$$f = 4D + 3D = \frac{Rz}{\operatorname{tg}\kappa} + \frac{Rz}{\operatorname{tg}\kappa} = Rz \cdot \frac{\operatorname{tg}\kappa + \operatorname{g}\kappa}{\operatorname{tg}\kappa \cdot \operatorname{g}\kappa}. \quad (13.1)$$

Odtud:

$$Rz = f \cdot \frac{\operatorname{tg}\kappa \cdot \operatorname{g}\kappa}{\operatorname{tg}\kappa + \operatorname{g}\kappa}. \quad (13.2)$$

Podle tohoto vztahu teda Rz roste se zvětšováním obou úhlů nastavení (v čitateli je součin, ve jmenovateli součet) a lineární na posuvu.

V případě nástroje s poloměrem hrotu (obr. 13.2) bude:

$$Rz = \sqrt{D^2 - C^2} = \sqrt{D^2 - CO_1^2 - EO_1^2}$$

$$ED = 4O_1 = \frac{f}{r_\varepsilon} \quad (13.3)$$

Po dosazení:

$$Rz = \frac{f}{r_\varepsilon} - \sqrt{r_\varepsilon^2 - \frac{f^2}{2}} \quad (13.4)$$

Dostali jsme rovnici na výpočet teoretické výšky nerovností profilu. Pro praktické použití se používá jednodušší tvar rovnice:

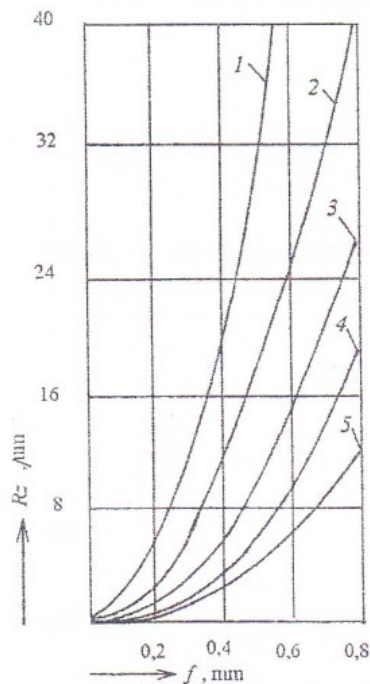
Po úpravě:

$$\frac{f^2}{4} = Rz \cdot r_\varepsilon - Rz^2 \quad (13.5)$$

Protože člen  $Rz^2$  je velmi malý v porovnání s  $2 \cdot Rz \cdot r_\varepsilon$ , lze ho zanedbat a dostáváme:

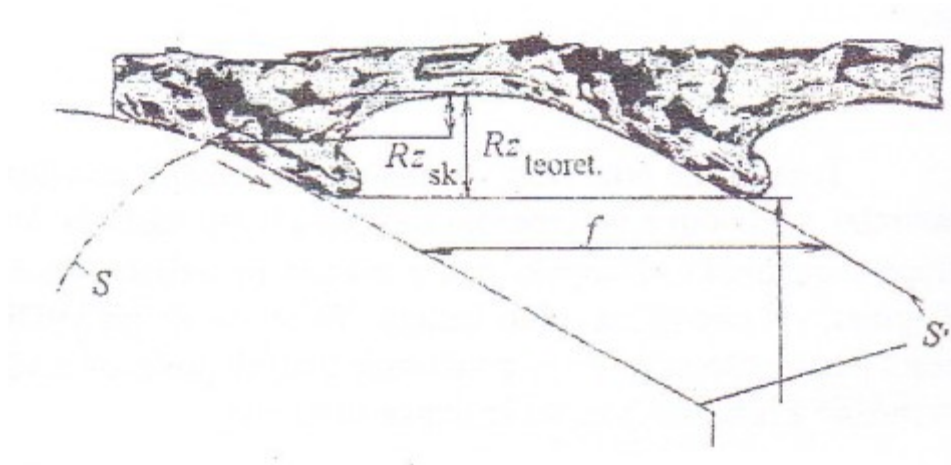
$$Rz = \frac{f^2}{8r_\varepsilon} \quad (13.6)$$

**Tento často používaný vztah udává funkční závislost mezi teoretickou nerovností povrchu, posuvem a poloměrem zaoblení hrotu nástroje.** Vyplývá z něho, že  $Rz$  s nárůstem posuvu  $f$  stoupá parabolicky. Naopak, podle zákona hyperboly klesá s nárůstem  $r_\varepsilon$ . Na obr. 13.4 je diagram, vytvořený z tohoto vztahu. Lze vidět, že  $Rz$  při vyšších posuvech prudce stoupá. Proto cesta na zmenšování  $Rz$  vede k používání malých posuvů a větších poloměrů hrotu (pokud je to možné z hlediska vzniku kmitání soustavy).



Obr. 13.4 Teoretická závislost mezi  $Rz$  posuvem a poloměrem hrotu nástroje. 1-5, postupně  $r_\varepsilon = \dots$  mm [1]

Skutečná výška nerovností profilu je vyšší než teoretická. Proces tvoření povrchu je totiž provázen vznikem některých defektů na obrobene ploše, které jsou důsledkem plastické deformace. V důsledku plastického zvětšování šířky třísky  $b_1$  oproti šířce odřezávané vrstvy  $b$  dochází na povrchu obrobene plochy ke vzniku hřebínků, které jsou orientovány podél vedlejší řezné hrany (obr. 13.5)



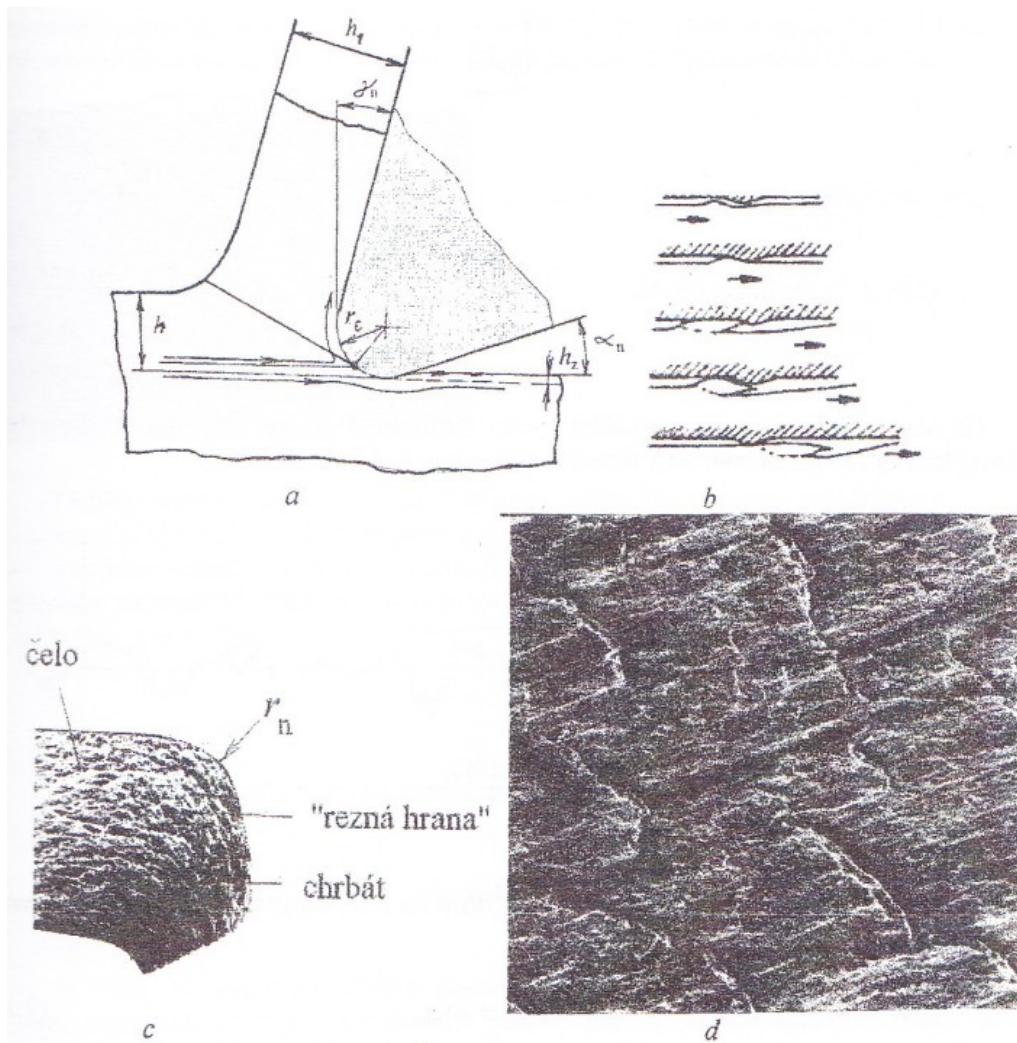
Obr. 13.5 příčný řez obrobeneým povrchem (řez rovinou  $P_r$ ).  $R_{z_{sk}}$  - skutečná výška nerovností profilu,  $R_{z_{teoret.}}$  - teoretická výška profilu [1]

Uvedené úvahy se týkaly příčné nerovnosti povrchu (měřené kolmo na vektor řezné rychlosti). Mimo to existuje i podélná drsnost, která se měří ve směru vektoru řezné rychlosti. V případě velkých rozdílů mezi příčnou a podélnou nerovností povrchu charakterizujeme takový povrch jako orientovaný. Podélná nerovnost vzniká v důsledku vtlačení materiálu pod zaoblenou řeznou hranu, podle obr. 13.6. Na obr. 13.6c je pohled na „řeznou hranu“ elektrolyticky ostřené nástroje při zvětšení 1200x. V daném případě je opsán poloměr hrany  $40\mu\text{m}$ . V důsledku jeho existence dochází při malých  $h$  k vtlačení materiálu pod řezný klín.

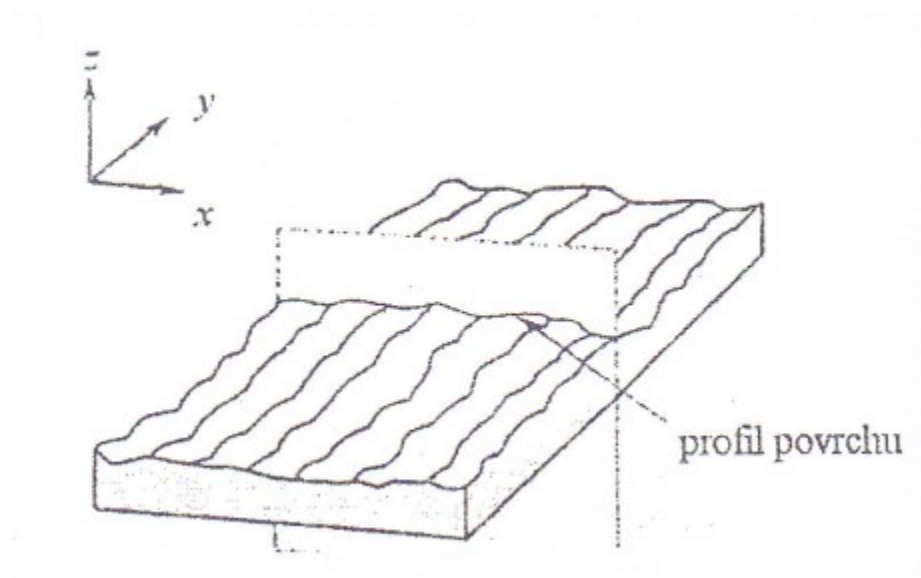
V důsledku pružné a plastické deformace spojené s přilnutím na hřbetě nástroje, zůstávají na obrobeneým povrchu šupinky, které tvoří podélnou nerovnost povrchu (obr. 13.6d).

Teoretickou představu o mikronerovnosti obrobeneého povrchu získáme z profilových křivek. Jsou to průsečnice povrchu s rovinami kolmými na povrch. Parametry nerovnosti povrchu získané z profilových křivek charakterizuje norma STN ISO 4287. Definuje profil povrchu a souřadnicovou soustavu na sledování povrchu podle obr. 13.7.





Obr. 13.6 a- pohyb materiálu podél zaoblené řezné hrany,  
 b - vznik mikrotřísky na obrobeném povrchu,  
 c - pohled na řeznou hranu nástroje ostřené elektrolyticky,  
 d- obrobený povrch s podélnou mikronerovností [1]



Obr. 13.7 Definice profilu povrchu [1]

Na obr. 13.8 je definice největší výšky nerovností profilu  $R_z$  z reálného průběhu profilové křivky, která se hodnotí v rozsahu základní délky.

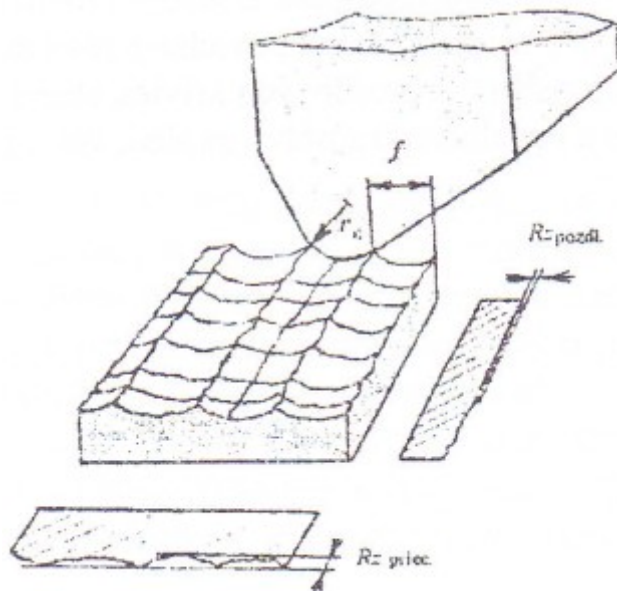


Obr. 13.8 Definice největší výšky nerovností profilu  $R_z$  z profilografu obrobeného povrchu [1]

Platí:

$$R_z = \sigma_{p_{\max}} + \sigma_{v_{\max}} \quad (13.7)$$

Nerovnost, která je definovaná na obr. 13.7 můžeme považovat za „příčnou“ ( $R_{z_{\text{pří}}}$ ). Při orientovaných površích v případě podélného měření nerovnosti povrchu dostaneme podstatně odlišnou velikost ( $R_{z_{\text{podl}}}$ ), (obr. 13.9).



Obr. 13.9 Definice příčné a podélné nerovnosti povrchu [1]

Neorientované povrchy, které vznikají při elektrických metodách obrábění, otryskávání, leptání, mají ve všech směrech stejnou hodnotu  $R_z$ . Na obr. 13.10 je příklad tryskaného povrchu součástky. Plocha je tvořená krátery, které mají různou hloubku a jsou náhodně rozmístěny. Podobné povrchy vznikají při elektrických metodách obrábění.



Obr. 13.10 Otryskaný povrch součástky [1]

Dalšími charakteristikami povrchu, které se uvádí na výkrese součástky jsou:

- střední aritmetická odchylka profilu  $R_a$
- střední kvadratická odchylka profilu  $R_q$

Střední aritmetická odchylka profilu  $R_a$  je definovaná jako střední hodnota absolutních odchylek profilu  $Z(x)$ :

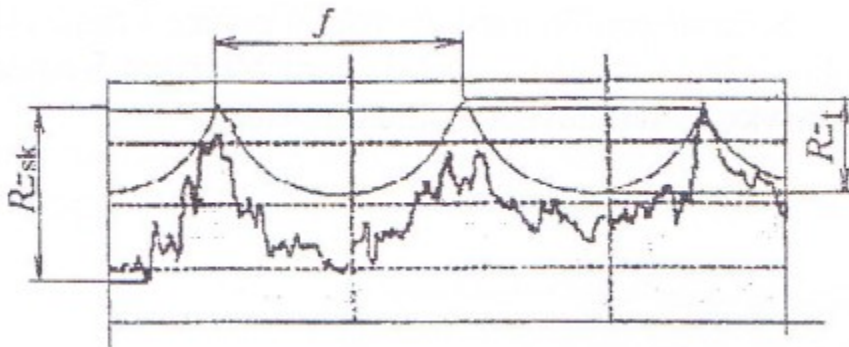
$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |Z(x)| dx. \quad (13.8)$$

Střední kvadratická odchylka profilu  $R_q$  je definovaná:

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{l} \int_0^l Z(x)^2 dx}. \quad (13.9)$$

V praxi se používají ještě další charakteristiky povrchu, např. únosnost povrchu, reprezentovaná křivkou materiálového podílu profilu (změna sumární délky dotyku povrchu v závislosti na hloubce profilu).

Pokud je na výkrese součástky definována  $R_z$ , není problém pro technologa určit maximální posuv  $f$  na jeho dosáhnutí. Rozdíl mezi teoretickou a skutečnou hodnotou  $R_z$  je na obr. 13.11.



Obr. 13.11 Definice teoretické a skutečné  $R_z$  z profilografu povrchu [1]



Aby bylo možné stanovit potřebný posuv, považujeme  $R_z \approx R_{z_s}$ . Potom je možné stanovit maximální posuv z teoretického vztahu pro  $R_z$ :

$$f_{\max} \leq \sqrt{8 \cdot R_z \cdot r_\epsilon} \quad (13.10)$$

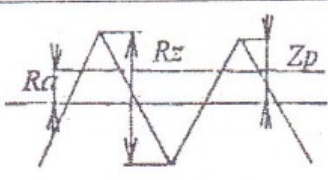
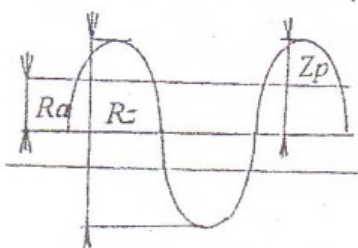
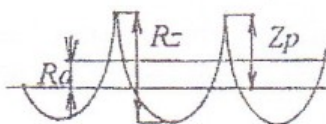
V případě, že na výkrese je zadaná hodnota  $R_a$  musíme znát vztah mezi  $R_a$  a  $R_z$ .

Běžně platí:

$$\frac{R_z}{R_a} \approx 4 \Rightarrow f_{\max} = \sqrt{2 \cdot R_a \cdot r_\epsilon} \quad (13.11)$$

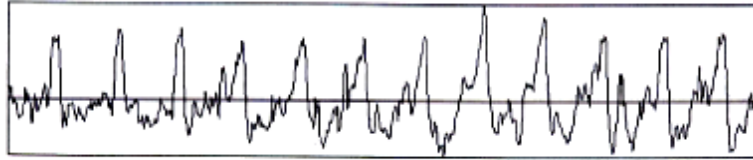
Při přesnějším určování tohoto poměru však musíme vědět, o jaký tvar profilu (anebo způsob obrábění) jde. V tabulce 13.1 je tento poměr definovaný pro některé případy profilu povrchu.

Tab. 13.1 Vztah mezi  $R_a$  a  $R_z$  při rozdílném tvaru profilu [1]

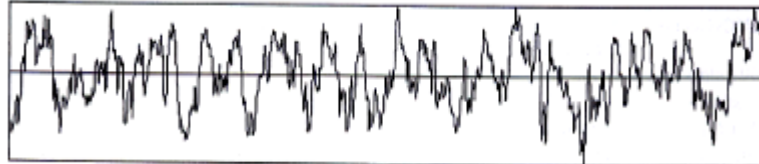
Spůsob obrábění	Idealizovaný profil	$R_z, \mu\text{m}$	$R_a, \mu\text{m}$	$Z_p, \mu\text{m}$	$\frac{R_z}{R_a}$
Nástroj bez polomeru hrotu		20	5	10	4
Nástroj so zaobleným hrotom Tvárnený povrch		20	6,3	10	3,2
Brúsený povrch		20	3,65	15,4	5,4

Lze vidět, že vztah mezi  $R_a$  a  $R_z$  se liší.

Současné profiloměry umožňují přímé vyhodnocení všech parametrů profilu. Na obr. 13.12 a 13.13 je vzor záznamu z profiloměru Mitutoyo Surfest 301.



Obr. 13.13 Profil drsnosti soustruženého povrchu [2]



Obr. 13.13 Profil drsnosti broušeného povrchu [2]



## Shrnutí kapitoly

této kapitole jsme se dozvěděli, co vše zahrnuje kvalita obrobené plochy a jaké parametry mají vliv na teoretickou drsnost povrchu. Dále jsme se naučili vypočítat teoretickou drsnost povrchu, když hrot nástroje není zaoblený, hrot nože je zaoblený a poloměr hrotu je menší jako posuv  $r_e \leq f$  a hrot nože je zaoblený, přičemž poloměr  $r_e \geq f$ .



## Kontrolní otázky

1. Co znamená  $R_a$ ,  $R_q$  a  $R_z$ ?
2. Jak se vypočítá střední aritmetická odchylka profilu?
3. Jak se vypočítá střední kvadratická odchylka profilu?
4. Jak se vypočítá teoretická drsnost  $R_z$ ?
5. Jaké případy mohou nastat při výpočtu teoretické drsnosti?
6. Kterému typu obrábění odpovídá, když hrot není zaoblený?
7. Kterému typu obrábění odpovídá, když hrot nože je zaoblený a poloměr hrotu je menší jako posuv:  $r_e \leq f$ ?
8. Kterému typu obrábění odpovídá, když hrot nože je zaoblený, přičemž poloměr  $r_e \geq f$ ?



## Další zdroje

1. VASILKO Karol. *Analytická teória trieskového obrábania*. COFIN Prešov, 2007. ISBN 978-80-8073-759-7.
2. BUDA, J. - SOUČEK, J. - VASILKO, K.: *Teória obrábania*, ALFA Bratislava, 1983
3. MAŇKOVÁ, I. - BEŇO, J.: *Technologické a materiálové činitele obrábania*, Viena Košice, 2004, ISBN 80-7099-701-X
4. MAŇKOVÁ, I.: *Vybrané aspekty monitorovania stavu nástroja v procese rezania*,

- Košice, 2004, ISBN 80-8073-1837
5. NESLUŠAN, M. – TUREK, S. – BRYCHTA, J. – ČEP, R. – TABAČEK, M.: *Experimentálne metódy v trieskovom obrábání*. EDIS Žilina, 2007. ISBN 978-80-8070-711-8.
  6. MÁDL, J. - SCHUBERT, V.: *Experimentální metody a optimalizace v teorii obrábění*. Praha : ČVUT Praha, 1985
  7. Bilík, O. *Obrábění II. (1.Díl): Fyzikálně mechanické záležitosti procesu obrábění*. Ostrava: Vysoká škola báňská –TU Ostrava, 1994. 132 s. ISBN 80-7078-228-5.
  8. Bilík, O. *Obrábění II. (2.Díl)*. Ostrava: Vysoká škola báňská –TU Ostrava, 2001. 118 s. ISBN 80-7078-994-1.
  9. BRYCHTA, Josef; ČEP, Robert; NOVÁKOVÁ, Jana, PETŘKOVSKÁ, Lenka. *Technologie II – 1. díl*. Ostrava : Ediční středisko VŠB – TU Ostrava. ISBN 978–80–248–1641–8.
  10. BRYCHTA, Josef; ČEP, Robert; NOVÁKOVÁ, Jana, PETŘKOVSKÁ, Lenka. *Technologie II – 2. díl*. Ostrava : Ediční středisko VŠB – TU Ostrava. ISBN 978–80–248–1822–1.



## CD-ROM

Na videu jsou zobrazeny dva případy obrábění (poloměrem nástroje – dokončování a lineární částí ostří se zaoblením – polodokončování) a změřena drsnost povrchu při daných řezných parametrech. Dále je porovnávána s teoretickou drsností, která je vypočítána dle vztahů v kapitole.



## Klíč k řešení

- O 13.1  $R_a$  – střední aritmetická odchylka profilu,  $R_q$  – střední kvadratická odchylka profilu,  $R_z$  – maximální výška nerovností.
- O 13.2 
$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l Z(x) dx$$
- O 13.3 
$$R_q = \sqrt{\frac{1}{l} \int_0^l Z(x)^2 dx}$$
- O 13.4 
$$R_z = \frac{f^2}{8r_e}$$
- O 13.5
- Hrot nástroje není zaoblený, tedy  $r_e = 0$
  - Hrot nože je zaoblený a poloměr hrotu je menší jako posuv:  $r_e \leq f$
  - Hrot nože je zaoblený, přičemž poloměr  $r_e \geq f$
- O 13.6 Hrubování.
- O 13.7 Polohrubování.
- O 13.8 Dokončování.