

**UNIVERZITA PARDUBICE**  
**Dopravní fakulta Jana Pernera**

**Zařízení pro měření rezných sil při třískovém  
obrábění**

**Bc. Michal Bucek**

**Diplomová práce**

**2013**

**Univerzita Pardubice**  
**Dopravní fakulta Jana Pernera**  
Akademický rok: 2012/2013

## **ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE**

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Michal Bucek**  
Osobní číslo: **D11890**  
Studijní program: **N3708 Dopravní inženýrství a spoje**  
Studijní obor: **Dopravní prostředky: Silniční vozidla**  
Název tématu: **Zařízení pro měření řezných sil při třískovém obrábění**  
Zadávací katedra: **Katedra dopravních prostředků a diagnostiky**

### **Z á s a d y   p r o   v y p r a c o v á n í :**

Tenzometrická měření sil  
Základní metody třískového obrábění  
Řezné síly při obrábění  
Návrh a realizace přípravku pro měření

Rozsah grafických prací: podle pokynů vedoucího diplomové práce

Rozsah pracovní zprávy: 30 - 40 stran textu a přílohy

Forma zpracování diplomové práce: tištěná

Seznam odborné literatury:

Kocman K.: Technologické procesy obrábění. CERM Brno, 2011, ISBN 978-80-7204-722-2

Wilson, Jon S.: Sensor Technology Handbook. Elsevier. 2005. 978-0-7506-7729-5

Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Pavel Švanda, Ph.D.


Katedra mechaniky, materiálů a částí strojů

Datum zadání diplomové práce: 15. února 2013

Termín odevzdání diplomové práce: 23. května 2013

  
prof. Ing. Bohumil Čulek, CSc.  
děkan

L.S.

  
doc. Ing. Miroslav Tesař, CSc.  
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 15. února 2013

Prohlašuji:

Tuto práci jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Tuto práci jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury. Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Souhlasím s prezenčním zpřístupněním své práce v Univerzitní knihovně.

V Pardubicích dne 20. 5. 2013

Michal Bucek

## Anotace:

Účelem Diplomové práce „Zařízení pro měření řezných sil při třískovém obrábění“ je vytvořit přípravek schopný vyhodnocovat mechanické zatěžování obrobků obráběných na NC frézách a posoudit díky němu, jaké jsou ideální řezné podmínky. Tato práce zároveň obsahuje teoretický popis procesu obrábění i podstaty řezných sil.

**Klíčová slova:** třískové obrábění, řezné síly, nc obrábění

## Title:

Device for Cutting Forces Measuring During Chip Machining

## Anotation:

The purpose of the thesis "Apparatus for measuring cutting forces in machining" is to create a product capable of evaluating the mechanical loading of workpieces machined on NC milling machines and judge him by what the ideal cutting conditions. This work also includes theoretical description of the machining process and substance of cutting forces.

**Key words:** machining, cutting forces, nc machining

## Poděkování

Chtěl bych poděkovat společnosti JHV Engineering nejen za poskytnutí prostoru a zařízení pro výrobu jednotlivých dílů přípravku, ale i za podporu a vstřícnost během celého magisterského studia. Zároveň bych rád poděkoval doc. Ing. Pavlu Švandovi Ph.D. za vynikající vedení této diplomové práce.

# Obsah:

<b>SEZNAM ILUSTRACÍ A TABULEK:</b> .....	<b>8</b>
<b>1) ÚVOD:</b> .....	<b>10</b>
<b>2) TENZOMETRICKÁ MĚŘENÍ SIL:</b> .....	<b>11</b>
KOVOVÉ TENZOMETRY: .....	11
POLOVODIČOVÉ TENZOMETRY:.....	13
ZAPOJENÍ TENZOMETRŮ DO WHEATSTONOVA MŮSTKU: .....	13
LEPIDLA:.....	14
<b>3) ZÁKLADNÍ METODY TRÍSKOVÉHO OBRÁBĚNÍ .....</b>	<b>15</b>
<b>3) ZÁKLADNÍ METODY TRÍSKOVÉHO OBRÁBĚNÍ .....</b>	<b>15</b>
SOUSTRUŽENÍ: .....	15
<i>Hrotové soustruhy:</i> .....	15
<i>Čelní soustruhy:</i> .....	16
<i>Svislé soustruhy:</i> .....	16
<i>Revolverové soustruhy:</i> .....	16
<i>Automatické soustruhy:</i> .....	17
<i>Číslicově řízené soustruhy:</i> .....	17
FRÉZOVÁNÍ:.....	18
<i>Konzolové frézky:</i> .....	18
<i>Stolové frézky:</i> .....	19
<i>Rovinné frézky:</i> .....	19
<i>Nástrojářské frézky:</i> .....	20
<i>Kopírovací frézky:</i> .....	20
<i>Odvalovací frézky:</i> .....	21
<b>4) VZNIK TRÍSKY.....</b>	<b>21</b>
PLASTICKÉ DEFORMACE PŘI TVORBĚ TVÁRNÉ TRÍSKY .....	23
<i>Tvorba nárůstku</i> .....	24
<b>5) ŘEZNÉ KAPALINY:.....</b>	<b>25</b>
VLASTNOSTI A ÚČINKY ŘEZNÝCH KAPALIN: .....	26
<b>6) ŘEZNÉ PODMÍNKY PŘI OBRÁBĚNÍ.....</b>	<b>29</b>
KINEMATIKA ŘEZNÉHO PROCESU:.....	29
ŘEZNÉ SÍLY:.....	30
<i>Řezné síly při soustružení [1]</i> .....	31
<i>Řezné síly při válcovém frézování [1]:</i> .....	33
<b>7) KONSTRUKCE PŘÍPRAVKU.....</b>	<b>36</b>
VÝKRESOVÁ DOKUMENTACE: .....	38
<b>8) PŘÍKLAD PROGRAMOVACÍHO KÓDU PŘI NC OBRÁBĚNÍ: .....</b>	<b>43</b>
<b>9) MĚŘENÍ NA PŘÍPRAVKU:.....</b>	<b>45</b>
KALIBRACE TENZOMETRŮ: .....	45
OBRÁBĚNÍ S PŘÍPRAVKEM:.....	47
<b>10) ZÁVĚR - ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ.....</b>	<b>50</b>
<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....</b>	<b>51</b>

## Seznam ilustrací a tabulek:

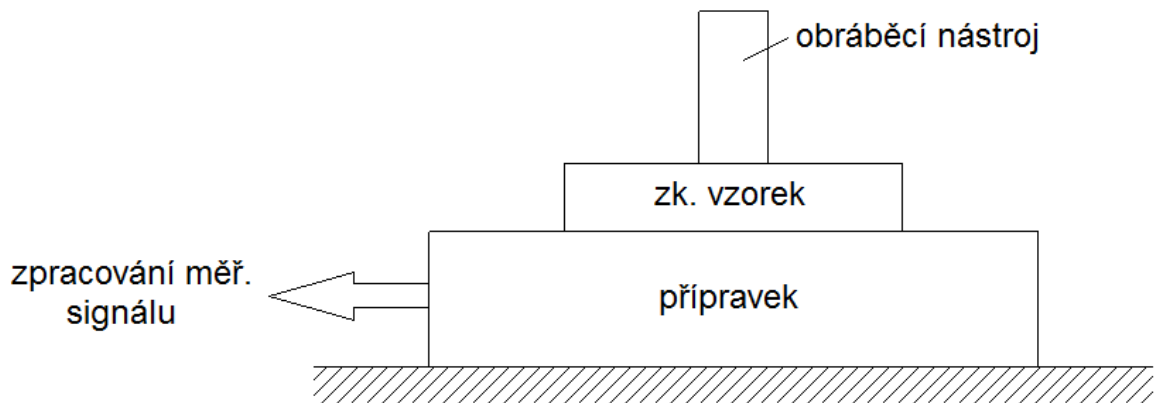
Obrázek 1 -	blokové schéma měření	10
Obrázek 2 -	drátkový tenzometr	12
Obrázek 3 -	fóliový tenzometr	13
Obrázek 4 -	polovodičový tenzometr s podložkou	13
Obrázek 5 -	zapojení tenzometrů do Winstonova můstku	14
Obrázek 6 -	hlavní části univerzálního hrotového soustruhu	15
Obrázek 7 -	svislý soustruh	16
Obrázek 8 -	NC univerzální soustruh kombinovaný s frézou	17
Obrázek 9 -	univerzální frézka	18
Obrázek 10 -	stolová frézka Strojtos	19
Obrázek 11 -	nástrojářská frézka	20
Obrázek 12 -	schéma odvalovací frézky	21
Obrázek 13 -	deformace částic v materiálu a směr tvoření třísky	22
Obrázek 14 -	druhy tvářených třísek	22
Obrázek 15 -	rozdělení oblastí při tvorbě třísky	23
Obrázek 16 -	pěchování třísky	24
Obrázek 17 -	přívod řezné kapaliny	26
Obrázek 18 -	kinematika řezného procesu	30
Obrázek 19 -	rozklad celkové řezné síly $F$ při podélném soustružení	32
Obrázek 20 -	rozklad celkové řezné síly na zubu nástroje při rovinném frézování válcovou frézou s přímými zuby	33
Obrázek 21 -	řezné síly na zubu válcové frézy v pracovní rovině $P_{fe}$	34
Obrázek 22 -	počet zubů v záběru při válcovém frézování	35
Obrázek 23 -	rameno	36
Obrázek 24 -	bočnice	36
Obrázek 25 -	základní deska	37
Obrázek 26 -	celá sestava	38
Obrázek 26 -	měřicí přípravek s nalepenými a připájenými tenzometry	45
Obrázek 27 -	tenzometrické měřidlo TEN2072C	45
Obrázek 28a -	svislá kalibrace tenzometrů	46
Obrázek 28b -	vodorovná kalibrace tenzometrů.	46



Obrázek 29 - obrábění na NC fréze	47
Obrázek 30 - rozmístění zkušebních otvorů	47
Graf 1 Průběhy zatížení vzorku č. 1 v čase (1., 2. a 3. otvor)	48
Graf 2 - Průběhy zatížení vzorku č. 2 v čase (vrtání, frézování 68, 100, 140 mm/min)	49

## 1) Úvod:

Cílem této práce je zkonstruovat takový přípravek, který půjde samostatně upevnit na desku NC tříosé frézky, který ponese zkušební vzorky z libovolného materiálu a především bude moci stanovit, do jaké míry je takový vzorek zatěžován obráběcími silami. Díky tomu půjde stanovit poměr mezi rychlostí obrábění a opotřebením řezných nástrojů. Tento přípravek nám tedy pomůže stanovit ideální podmínky pro obrábění.



obr.1 - blokové schéma měření

Konstruované součásti budu nejprve modelovat v programu Pro-Engineer, posléze z nich vytvořím výkresy a na základě výkresů je vyfrézuji na tříosé nc-frézce. Některé součásti budou povrchově upravovány. Takovéto povrchové úpravy nechám zhotovit u firmy, která se na ně specializuje.

## 2) Tenzometrická měření sil:

Při měření mechanických veličin je tenzometr jeden z nejdůležitějších prvků techniky elektrického měření. Tenzometry jsou používány k měření povrchového napětí. Protože tento technický termín obsahuje tah i tlak rozlišují se negativním a pozitivním znaménkem. Tak jsou tenzometry používány jak pro snímání expanze (tah), tak i kontrakce (tlak).

Tenzometry obecně musí vyhovovat několika základním požadavkům:

- a) Poměrná změna odporu (citlivost) musí být co největší
- b) Aby se nežádoucí vliv odporů v měřicím obvodu a jejich změny udržely na pokud možno nejmenší hodnotě, musí být celkový odpor snímače co možná největší.
- c) Teplotní koeficient odporu by se měl blížit roztažnosti materiálu měřené součásti, aby byly minimální chyby způsobené kolísáním teploty.
- d) Je výhodné, vykazuje-li vodič snímače v co největším rozsahu lineární závislost mezi poměrnou deformací a změnou odporu drátku.

Tenzometry se dělí do dvou základních skupin:

- kovové
- polovodičové

### ***Kovové tenzometry:***

Kovové tenzometry využívají změny odporu kovového tělíska při změně jeho délky a plochy průřezu. Základním vztahem je vzorec pro určení elektrického odporu vodiče:

$$R = \frac{\rho \cdot l}{S} \quad [1]$$

$\rho$  = měrný elektrický odpor,  $S$  = obsah průřezu vodiče,  $l$  = délka vodiče

Minimální změna odporu se dá vyjádřit pomocí parciální derivace:

$$dR = \frac{dR}{d\rho} d\rho + \frac{dR}{dl} dl + \frac{dR}{dS} dS \quad [2a]$$

$$dR = \frac{l}{S} d\rho + \frac{\rho}{S} dl - \frac{\rho \cdot l}{S^2} dS \quad \frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dl}{l} - \frac{dS}{S} \quad [2b]$$

po dosazení:

$$S = \frac{\pi \cdot a^2}{4}; dS = \frac{2 \cdot \pi \cdot a}{4} da; \frac{ds}{S} = \frac{2 \cdot da}{a} \quad [3a]$$

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dl}{l} - \frac{2 \cdot da}{a} \quad [3b]$$

následuje další dosazení:

$$\varepsilon_l = \frac{dl}{l}; \varepsilon_t = \frac{da}{a}; \frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_l} = \mu; \frac{2 \cdot da}{a} = 2 \cdot \pi \cdot \varepsilon_l; \frac{d\rho}{\rho} = k \cdot \varepsilon_l \quad [4a]$$

$$\frac{dR}{R} = k \cdot \varepsilon_l + \varepsilon_l - 2 \cdot \pi \cdot \varepsilon_l \quad \frac{dR}{R} = \varepsilon_l (k + 1 - 2 \cdot \pi) \quad [4b]$$

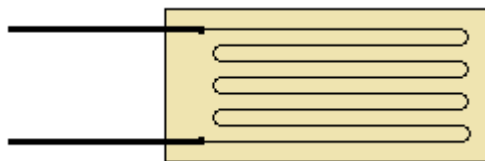
$$\frac{dR}{R} = k \cdot \varepsilon_l \quad [5]$$

Konstanta  $k$  vyjadřuje citlivost tenzometru a mívá hodnotu přibližně 2.  $R$  je nominální odpor tenzometru. (120Ω, 350 Ω, 600 Ω)

Kovové tenzometry se podle provedení dělí na:

- drátkové
- fóliové
- vrstvené

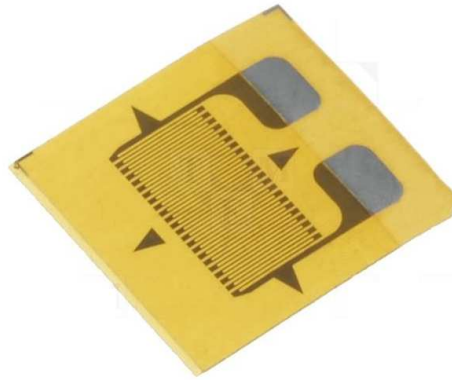
**Drátkové tenzometry** jsou nejstarším provedením. Jsou vhodné pro využití při vysokých teplotách.



Obr. 2 - drátkový tenzometr

**Fóliové tenzometry** mají díky menší tloušťce aktivní části lepší odvod ztrátového tepla. Díky tomu je lze více proudově zatížit a tím zvětšit i výstupní signál. U fóliových vodičů se vyžaduje citlivost pouze v podélném směru. Potlačení příčné citlivosti je zajišťováno výrazně zvětšenou tloušťkou vodivé cesty v místech "ohybů".

Díky větší délce vodiče je u fóliových tenzometrů dosahována větší změna odporu.

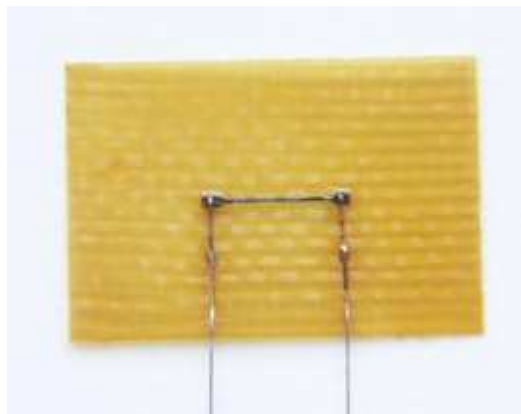


Obr. 3 - fóliový tenzometr [5]

**Vrstvené tenzometry** vznikají tak, že se na nosné destičce ve vakuu naprašováním vytvoří aktivní vrstva.

***Polovodičové tenzometry:***

Tyto tenzometry využívají piezorezistenci křemíku a germania. Ta je způsobená specifickou strukturou energetických pásů, které jsou v materiálu použity. Polovodičové tenzometry mají až stokrát větší deformační citlivost než kovové.



Obr. 4 - polovodičový tenzometr s podložkou [6]

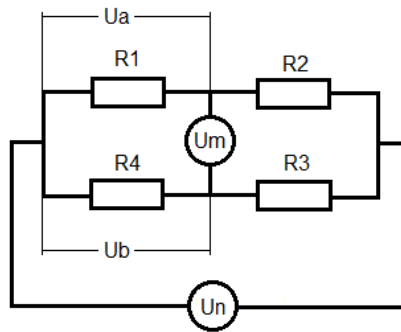
Jejich nevýhodou je nelineární vztah pro poměrnou změnu odporu:

$$\frac{dR}{R} = k_1 * \varepsilon + k_2 * \varepsilon^2 \quad [6]$$

Znaménko konstanty k se navíc může u polovodičových tenzometrů měnit.

***Zapojení tenzometrů do Wheatstonova můstku:***

Vzhledem k tomu, že je samotná změna odporu těžce přímo měřitelná, zapojují se tenzometry tak, abychom vyhodnocovali výstupní napětí.



Obr. 5 - zapojení tenzometrů do Wheatstonova můstku

### ***Lepidla:***

Lepidlo, kterým se snímač lepí k papíru a papír k součásti, je nejchoulostivější částí celého snímače. Musí mít perfektní přilnavost k materiálům, které se v praxi používají, musí vydržet co nejvyšší teplotu a nezměknout. Povolování při dlouhotrvajícím zatížení – tzv. plazivý efekt (creep-effect) musí být zanedbatelný. Zároveň by mělo odolávat olejům a vodě. Musí také dobře sledovat deformace materiálu, na který je nalepeno a to jednak co do časového sledu, tak i co do velikosti deformace. První jmenovaná vlastnost omezuje horní mezní kmitočet, který lze ještě snímačem měřit v případě dynamického zatěžování. Druhou je dána přesnost měřené hodnoty napětí materiálu.

Lepidla, která jsou založena na bázi termoplastů jsou obvykle hygroskopická. Tato vlastnost však nemusí vadit, protože se vhodným nátěrem snímače po nalepení dá dosáhnout netečnosti snímače vůči okolí. Takováto lepidla však nesnesou vyšší teploty. Některá měknou při teplotě 75°C, u jiných se vhodným složením dá dosáhnout až 100°C. Obecně se u pracovních teplot tenzometrů do 300 °C využívá lepidel epoxidových, do 400 °C polyimidových a pro teploty nad 400°C anorganických. [2]

### 3) Základní metody třískového obrábění

#### **Soustružení:**

Tato metoda se využívá při zhotovování výrobků rotačních tvarů. Používány jsou obvykle jednobřité nástroje. Jedná se o velmi častý způsob obrábění nejen díky své relativní jednoduchosti. Řezná rychlost je určena rychlostí rotačního pohybu obrobku. Nástroj zde vykonává přímočarý nebo obecný pohyb. Soustruhy se dělí na hrotové, čelní, svíslé, revolverové a automatické.

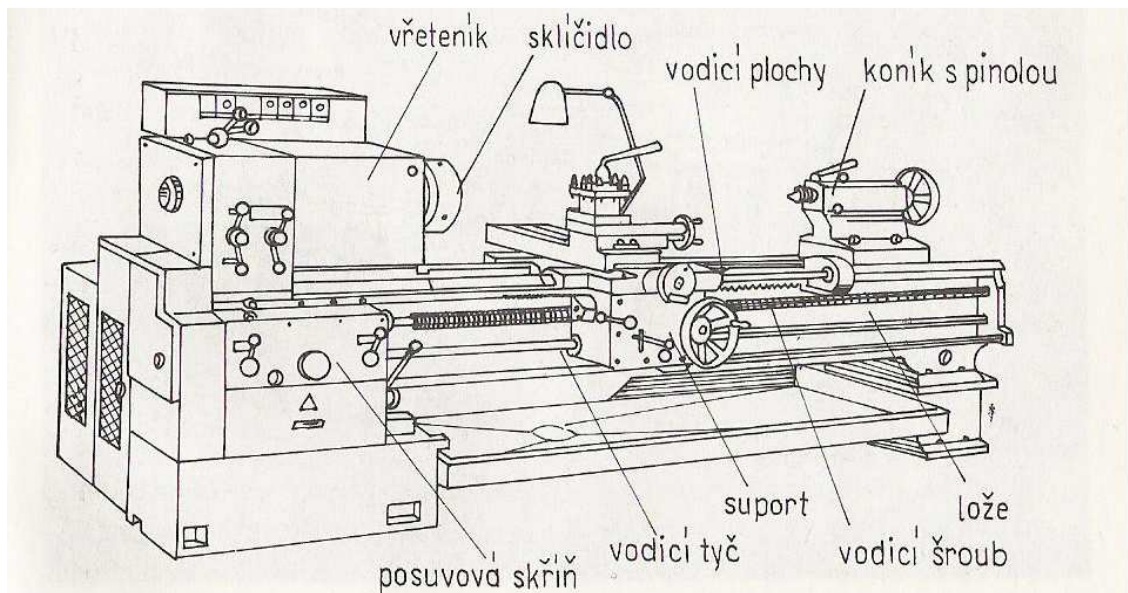
#### **Hrotové soustruhy:**

Na hrotových soustruzích se obrábí válcové plochy. Ty se upínají mezi hroty, do sklíčidla, do lísni desky, na trny apod. Dělí se na stolní, univerzální a produkční.

**Produkční soustruhy** - Jsou využívány v sériové výrobě, mají oproti ostatním soustruhům menší rozsah otáček. Neobsahují vodící šroub.

**Stolní soustruhy** - Tyto soustruhy jsou určeny pro výrobu součástek s malými rozměry.

**Univerzální soustruhy** - Dají se využít i na řezání závitů. Obsahují vodící šroub a jsou charakteristické velkým rozsahem posuvů i otáček.



Obr. 6 - hlavní části univerzálního hrotového soustruhu [7]

Hrotové soustruhy se dále rozdělují podle největší vzdálenosti hrotů a oběžného průměru nad ložem soustruhu.

Z hlediska největšího oběžného průměru se dělí hrotové soustruhy na:

- malé ( $D < 315$  mm)
- střední ( $D > 315$  mm ;  $D < 630$ )
- velké ( $D > 800$  mm)

### **Čelní soustruhy:**

Tyto soustruhy jsou určeny k výrobě rozměrných součástí přírubového typu. Obrobek je upnut k lícni desce, support a lože jsou samostatnou částí. K nevýhodám těchto soustruhů patří obtížné upnutí a ustavení obrobku. [10]

### **Svislé soustruhy:**

I svislé soustruhy jsou vhodné pro obrábění rozměrnějších obrobků. Jejich výhodou oproti čelním soustruhům je snazší upínání. Je to díky vodorovné desce, ke které je obrobek uchycen. Ta se otáčí kolem svislé osy rotace. Můžeme je rozdělit na jednostojanové a dvoustojanové.



Obr. 7 - svislý soustruh [8]

### **Revolverové soustruhy:**

Revolverové soustruhy mohou při jednom upnutí provést několik operací jako jsou vrtání, soustružení nebo řezání závitů. Najdou uplatnění v sériové výrobě. Nástroje potřebné k obrábění jsou upnuty do revolverové hlavy. [10] Podle průměru materiálu, který projde otvorem vřetena, dělíme revolverové soustruhy na:

- malé ( $\varnothing$  obrobku 12 - 25 mm)
- střední ( $\varnothing$  obrobku 32 - 63 mm)



- velké (Ø obrobku 80 - 315 mm)

### **Automatické soustruhy:**

Tyto soustruhy nacházejí uplatnění u velkosériových výrob. Vačkové a narážkové mechanismy zde zajišťují automatický provoz. Nevýhodou je časová náročnost seřizování.

### **Číslicově řízené soustruhy:**

Obrábění je u těchto soustruhů řízeno předem napsaným programem. Díky tomu lze vytvářet nejrůznější tvary a kombinace obráběcích procesů pouhým přepsáním NC kódu. Automatizace je v tomto případě velmi pružná a dovoluje větší možnosti. Soustruh může vykonat celý program najednou, (obsahuje-li zásobník s potřebnými nástroji) nebo může v takzvaném režimu "po bloku" provést vždy jeden pohyb / operaci a pokračovat až po potvrzení obsluhou. Některé NC (numeric control - číslicově řízené) soustruhy mohou obsahovat radiálně umístěné vřeteno, do kterého lze upnout další nástroje jako vrták, výstružník nebo fréza. Velkou výhodou u takovýchto kombinovaných obráběcích strojů je možnost vyrábět díly v racionálním čase, které mají pro samostatný soustruh nebo frézku nevhodný tvar. Příkladem jsou rotační tělesa s otvory nebo plochami po obvodu.



Obr. 8 - NC univerzální soustruh kombinovaný s frézou

## ***Frézování:***

Frézování je způsob obrábění, při kterém břity otáčejícího-se nástroje odebírají materiál obrobku. Téměř vždy se posouvá obrobek, většinou kolmo k ose vřetena (nástroje). Ve svislém směru dochází k přísuvu buď obrobku nebo nástrojem. Při frézování přicházejí zuby frézy jednotlivě do záběru a odřezávají krátké třísky proměnné tloušťky.

Frézky se dělí do jednotlivých kategorií:

### **Konzolové frézky:**

Konzolové frézky se využívají k obrábění tvarových a rovinných ploch na malých a středně velkých obrobcích. Jsou vhodné pro kusovou a malosériovou výrobu. Obsahují konzolu, pomocí níž lze upnout obrobek vůči nástroji. Podle provedení se dělí na:

- vertikální - Vřeteno zaujímá svislou polohu.
- horizontální - Vřeteno zaujímá vodorovnou polohu.
- univerzální - Vřeteno lze nastavit v rozmezí mezi svislou a vodorovnou polohou.



Obr. 9 - univerzální frézka

Nosnou částí konzolových frézek je stojan. Bývá vyroben z litiny a obsahuje nádrže s chladicí kapalinou. V přední části stojanu je na svislém vedení umístěna konzola. Ta obsahuje převody umožňující vertikální posuvy. Další důležitou součástí konzolových frézek je podélný stůl. Ten obsahuje podélné T-drážky, do kterých lze upnout svěrák nebo přímo obrobek pomocí upínek.

Podélný stůl je umístěn na příčných saních a pomocí nich ho lze příčně nastavovat. Na příčných saních může být i točnice umožňující v případě víceosých frézek vodorovné otáčení části stolu a tím i obrobku.

V horní části stojanu se nachází vřeteník a v něm je pomocí axiálně-radiálních ložisek umístěno duté vřeteno. K vnějšímu kuželovitému konci vřetena se pak upínají nástroje. Některé frézky mohou obsahovat výsuvné rameno. To se dá příčně přestavit. [1]

### **Stolové frézky:**

K frézování objemných výrobků se využívají stolové frézky. Zde se horizontálně pohybuje stůl s obrobkem, zatímco vertikální posuv je zajištěn vřetenem. Výhodou je vysoká tuhost takovéto konstrukce. Ta zajišťuje dostatečnou přesnost obrábění.



Obr. 10 - Stolová frézka Strojtos

### **Rovinné frézky:**

Rovinné frézky jsou určeny k obrábění největších obrobků. (až 10 tun) Zároveň lze na stůl těchto frézek upnout více obrobků menší velikosti a obrábět je najednou. Vzhledem k

tomu, že obsahují několik vřeteníků, jsou tyto frézky velmi produktivní. Jednotlivé díly rovinných frézek mají stavebnicový charakter - např. stojany, příčníky, frézovací vřeteníky nebo lože. [4]

### **Nástrojářské frézky:**

Nástrojářské frézky se využívají při obrábění menších obrobků se složitějšími tvary. Umožňují vykonávání velkého rozsahu frézovacích prací a lze u nich nastavovat obrobky do různých poloh. Lze s nimi vrtat, brousit, frézovat, případně obrážet. Uplatnění nachází především při výrobě měřidel, kovových modelů, šablon, zápustek nebo forem.



Obr. 11 - nástrojářská frézka [8]

### **Kopírovací frézky:**

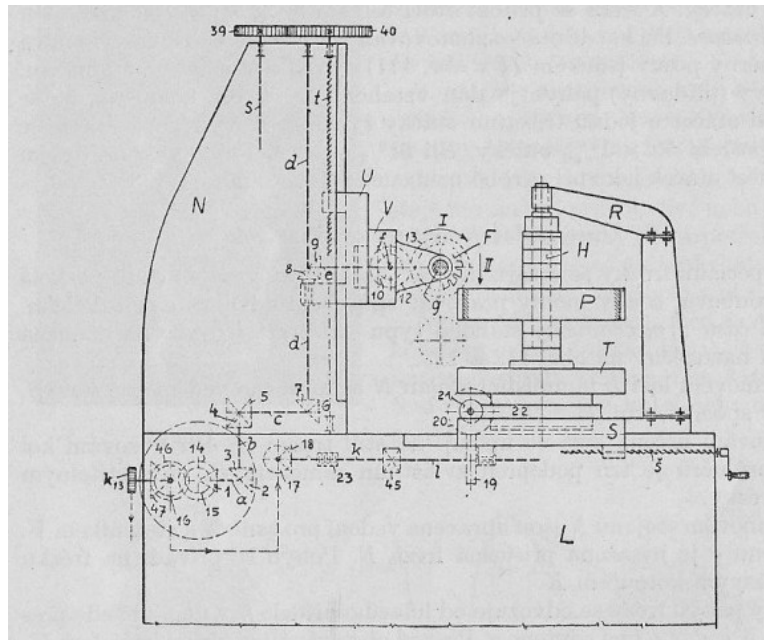
Tyto frézky mohou vykonávat i klasické frézování rovinných nebo šikmých či kolmých ploch. Jejich charakteristickým využitím je ale frézování pomocí přenosu tvaru vzorku na obrobek. Tímto způsobem se s výhodou vyrábí vačky, šablony, zápustky a další podobné součástky. [4]

## Odvalovací frézky:

Odvalovací frézky se používají k výrobě ozubených kol. Mohou vytvářet přímá ozubení, šikmá ozubení, řetězová či šneková kola. Frézy, které se zde uplatňují, mají zuby umístěné do šroubovice. Frézy vždy musí splňovat poměr:

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{m}{D} \quad [7]$$

$\beta$  = sklon zubů       $m$  = modul ozubení       $D$  = průměr nástroje na hlavách zubů



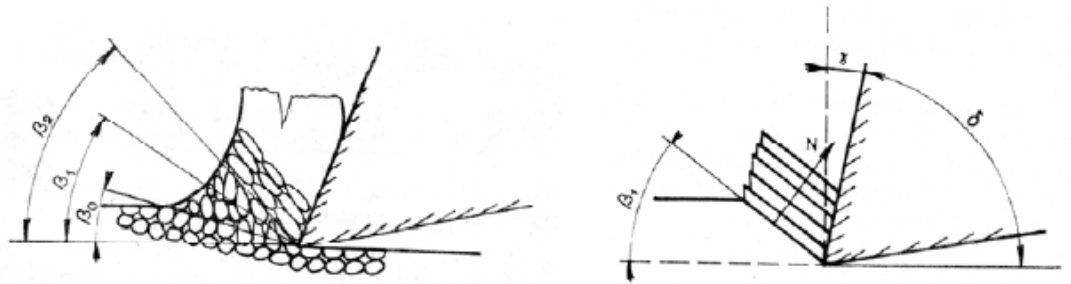
Obr. 12 - schéma odvalovací frézky [9]

Pro výrobu ozubených kol je nezbytné, aby nástroj (odvalovací fréza) vykonala vždy stejný počet otáček, jako je požadovaný počet zubů výrobku. To je zajištěno převodovým ústrojím. [1]

## 4) Vznik třísky

Při třískovém obrábění se oddělují u obrobku částice materiálu. Tato oddělená část se nazývá tříska. Fyzikální, chemické a další vlastnosti obrobku určují soudržnost elementů třísky. Dále je tato soudržnost ovlivněna geometrií řezného nástroje a řeznými podmínkami.

Při obrábění materiálu vniká činná část řezného nástroje ve tvaru klínu do obrobku. Soudržnost částic obráběného materiálu se narušuje a dochází k postupnému oddělování vrstvy materiálu. Tyto oddělené částice se pěchují na čele řezného nástroje a se svou deformací tvoří třísku. [10]



Obr. 13 - deformace částic v materiálu a směr tvoření třísky [10]

Podle napjatosti v místě řezání a podle toho, jak dochází k oddělování materiálu rozlišujeme třísky:

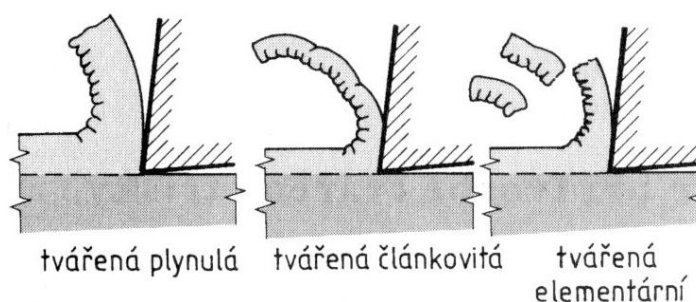
- odlamovanou
- stříhanou

Odlamovaná třísky vzniká, pokud obrábíme křehké materiály. Z obráběného povrchu obrobku jsou pod tlakem břitu nástroje odlamovány samostatné částice materiálu. Dochází tedy k oddělování, aniž by mu předcházela plastická deformace. Podle nastavených řezných podmínek a podle toho, jaký materiál obrábíme, vznikají různé třísky. Jejich částice mohou mít tvar úlomků, malých zrněk nebo šupin.

Ke vzniku stříhané třísky dochází u takových obrábění, při kterých je stav v oblasti řezání plastický. Stříhané třísky se dále rozlišují podle souvislosti a soudržnosti částic a podle plasticity obráběného materiálu.

- článkovitá
- drobivá
- plynulá

U článkovité třísky se jednotlivé částice liší vrstvami na vnitřní straně. Na vnější straně nástroje je vrstva stupňovitá a snadno se odlamuje, zatímco na straně čela nástroje je vrstva hladká. [10]



Obr. 14 - druhy tvářených třísek [10]

Pokud se částice postupně odlamují, jde o drobivou třísku. Ta se nazývá též elementární.

V plynulé tříске jsou jednotlivé částice spojeny v souvislém pásu. Tyto pásy se mohou stáčet do šroubovic nebo spirál, případně se může vyskytovat jako přímé pásy.

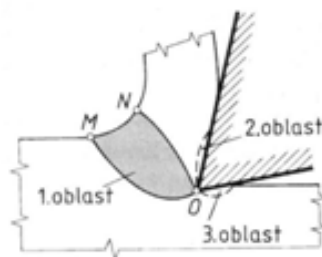
Pro bezpečnost provozu je nejvhodnější drobivá tříska. Ta se na rozdíl od plynulé třísky nenamotává na obrobek a lze jí snadno odklízet z obráběcího prostoru, ať už proudem vzduchu, nebo chladicí emulze. K tomu, aby se vytvářely vhodné třísky, se používají různě upravené nástroje – tzv. děliče třísky. [1]

### ***Plastické deformace při tvorbě tvárné třísky***

Při řezání jsou břitem nástroje způsobovány plastické deformace. Ty se vyskytují ve třech oblastech:

- 1. oblast - oblast **primárních plastických deformací** Leží mezi čarami OM a ON a patří do odřezávané vrstvy
- 2. oblast - oblast **sekundárních plastických deformací** Tou je nepatrná vrstva plochy styku třísky a čela nástroje
- 3. oblast - oblast **plastických deformací**, Tvoří jí povrchová vrstva řezné plochy

První oblast se nejvíce podílí na deformaci třísky. Rozměry a tvar této oblasti se odvíjí od geometrie břitu, vlastností obráběného materiálu, řezných podmínek a zároveň na řezném prostředí. Poloha této oblasti vůči čelu nástroje je při ustálených řezných podmínkách stejná.

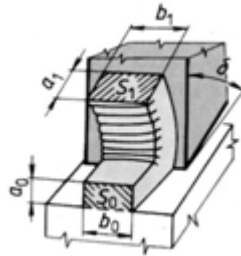


Obr. 15 - rozdělení oblastí při tvorbě třísky [10]

**Pěchování třísky:** Díky plastickým deformacím mění průřez odřezávané vrstvy při přeměně v třísku své rozměry. Průřez odcházející třísky má vždy větší rozměry než průřez odřezávané vrstvy. Délka třísky je však menší než délka odřezávané vrstvy [1].

### Součinitel pěchování třísky:

Značí se  $K$ . Pomocí něj lze posoudit intenzitu primární plastické deformace při obrábění. Jedná se o poměr průřezu třísky ( $S_1=a_1b_1$ ) k průřezu odřezávané vrstvy ( $S_0=a_0b_0$ ), případně poměr délky odřezávané vrstvy  $l_0$  k délce třísky  $l_1$ .



Obr. 16 - pěchování třísky [10]

### Objemový součinitel třísky

Jedná se o poměr objemu třísek při jejich hromadění vůči objemu, který zaujímal materiál před obrobením.

$$K_{Vo} = \frac{V_t}{V_m} > 1 \quad [8]$$

Pokud má břit nevhodnou geometrii a řezné podmínky nejsou příznivé, zaujímají třísky velký prostor. Objemový součinitel pak může dosahovat hodnoty až 400. Tím je ohrožena plynulost práce a třísky se z obráběcího stroje špatně odstraňují. Z toho důvodu je snaha o co nejmenší  $K_{vo}$ . [4]

$K_{vo}$  se dá zmenšit několika způsoby:

- volbou vhodného materiálu, který má snahu tvořit drobnou třísku
- změnou řezných podmínek
- změnou geometrie břitu
- u nástrojů s výměnnými plátky použitím děličů třísek

### Tvorba nárůstku

Prostřednictvím tření třísky o čelo nástroje se odírá zoxidovaná vrstva a při působení vysokých teplot a tlaků se v místě styku s čelem nástroje projevují adhezní síly, což má za následek navaření třísky k čelu nástroje. Další pohyb třísky je možný až ve chvíli, kdy dojde k porušení soudržnosti materiálu třísky. Část třísky ale zůstává navařena a tvoří takzvaný nárůstek. Nárůstek se vyznačuje vysokou tvrdostí (dvakrát až šestkrát větší tvrdost než materiál třísky) a pevností (díky sekundárnímu tváření).

- nárůstek tak přebírá funkci břitu



- Jak vrstvy nárůstku přibývají, nárůstek postupně mění velikost úhlu řezu  $\delta$  a skutečného úhlu řezu  $\delta_{sk}$
- Obvykle se odtrhne část nárůstku. Odtrhne-li se celý, odtrhává se i s částí břitu nástroje
- Jakmile se odtrhne nárůstek, celý děj se opakuje s frekvencí 100 až 1000 Hz
- K tvorbě nárůstku při obrábění ocelí dochází při teplotě 300 až 400°C
- Při teplotách vyšších než 600°C se nárůstek netvoří
- Tvorba nárůstku může být omezena použitím maziv. Ty snižují tření a čistotu plochy styku kovů
- Břit je sice stabilní částí nárůstku chráněn před oděrem, avšak opotřebení nástroje je větší kvůli vylamování ostří
- Jakost obráběného materiálu a s nárůstkem zhoršuje. Částičky rozrušeného nárůstku se zachycují na obrobené ploše a tím zvyšují její drsnost. [4]

## 5) Řezné kapaliny:

Řezná kapalina má za účel především odvádět teplo z místa řezání a to jednak dokonalým chlazením, nebo mazáním, kdy pomocí přívodu řezné kapaliny dochází ke zmenšování vnějšího i vnitřního tření. Takovýto požadavek předurčuje pro obrábění tyto prostředky v kapalné formě.

Možností je využít konzistentní prostředky (např. tuky nebo prášková maziva). Ty sice při obrábění sníží tření, avšak neumožní intenzivní odvod tepla z místa řezání. Takovéto prostředky se uplatňují pouze ojediněle. Příkladem je dořezávání závitů nebo ruční vrtání.

Z možnosti plynných prostředků se v současnosti využívá pouze chlazení vzduchem, do kterého jsou rozptýlena v drobných kapičkách řezná kapalina. Tato technologie se nazývá chlazení mlhou.

Nejrozšířenější možností při obrábění kovů tedy zůstávají kapaliny. Ty kromě mazacího a chladicího účinku mají navíc i čistící funkci. Kapalina také nesmí způsobovat korozi obrobků a obráběcích strojů. Zároveň musí být zdravotně i ekologicky nezávadná.



Obr. 17 - Přívod řezné kapaliny

Jedním z průvodních jevů, které provází proces řezání, je tvorba nárůstku. Řezná kapalina ovlivňuje teplotu řezání, velikost tření i velikost plastické deformace a tím ovlivňuje i tvorbu nárůstku.

Pokud je v řezné kapalině obsažena složka zmenšující tření, dojde s použitím této kapaliny ke snížené tvorbě nárůstku a tím je zlepšena i jakost obrobeného povrchu. [1]

### ***Vlastnosti a účinky řezných kapalin:***

Podle účinku na proces řezání se řezné kapaliny rozdělují na dvě hlavní skupiny. Jednou jsou kapaliny s převažujícím chladícím účinkem, druhou tvoří kapaliny s převažujícím mazacím účinkem. Technologické a provozní hlediska pak klade na kapalinu další požadavky. Celkově jsou na řezné kapaliny kladeny tyto nároky:

- mazací účinek
- chladící účinek
- čistící účinek
- ochranný účinek
- provozní stálost
- zdravotní nezávadnost
- přiměřené náklady

**Mazacím účinkem** se rozumí schopnost kapaliny vytvářet na povrchu kovu vrstvu, která zabrání styku kovových povrchů a sníží tření, ke kterému dochází mezi obrobkem a nástrojem. Ke kapalnému tření zde nemůže docházet vzhledem k vysokým tlakům, které při řezání vznikají. V případě, že se řezná kapalina chemicky váže k materiálu obrobku v mikroskopické povrchové mezní vrstvě, nebo má velkou afinitu ke kovu, může docházet k meznímu tření. Z toho důvodu přináší mazací účinek zmenšení řezných sil, zlepšení jakosti obrobeneho povrchu i zmenšení spotřeby energie. Mazací účinek je proto vyžadován při provádění náročných operací, jako je výroba závitů nebo ozubení. Zároveň u dokončovacích operací. [10]

**Chladicí účinek** je schopnost řezné kapaliny odvádět teplo z místa řezu. Smáčí-li kapalina povrch kovu a existuje-li spád mezi kapalinou a povrchem, je vždy odvod tepla zajištěn. V praxi je tento jev vždy zajištěn. K odvodu tepla při řezání dochází proudem řezné kapaliny oplachující nástroj, obrobek i třísky, který tak přejímá vzniklé teplo. Chladicí účinek tedy závisí na smáčecím účinku, na rychlosti vypařování při určitých teplotách, na výparném teple, na měrném teple a na tepelné vodivosti. Chladicí účinek řezné kapaliny bude tedy tím větší, čím větší budou tyto hodnoty. Důležité je však i průtokové množství. [10]

**Čistící účinek** znamená, že přívod řezné kapaliny odstraňuje z místa řezání třísky a jedná-li se například o broušení, vyplavuje zanesené póry brusného kotouče a tím zlepšuje jeho vlastnosti. Dalším významem je zabránění slepování částic vzniklých při řezání a vyvolání jejich usazování. [10]

**Ochranný účinek** se projevuje tak, že řezná kapalina nenapadá kovy a nezpůsobuje korozi. Pokud by kapalina tento účinek neměla, bylo by nutné výrobky mezi operacemi konzervovat a samotné stroje by časem začaly korodovat. Aby byl tento účinek dosažen, jsou do kapaliny dodávány přísady, jež pasivují kovy vůči nežádoucím účinkům. Zároveň je důležité, aby řezná kapalina nebyla agresivní pro gumová těsnění a nerozpouštěla nátěry obráběcích nátěrů. [10]

**Provozní stálost** se projevuje v době, za kterou je třeba vyměnit řeznou kapalinu. Je-li kapalina olejového typu, projevuje se její stárnutí tvorbou pryskyřičnatých usazenin. Produkty stárnutí jsou zhoršovány vlastnosti řezné kapaliny, ty také způsobují její rozklad, ztrátu ochranných schopností, korozi, hnilobný rozklad a zmenšení mazacího účinku. Provozní stálost se odvíjí od fyzikálně-chemických vlastností řezné kapaliny a od teploty. [10]

**Zdravotní nezávadnost** je velmi důležitá, neboť při práci na obráběcích strojích přichází obsluha do kontaktu s řeznou kapalinou. Proto nesmí mít kapalina špatné účinky na zdraví. Nesmí být jedovatá ani obsahovat látky poškozující pokožku nebo sliznici. Zároveň

nesmí vydávat do okolí nepříjemný zápach. Zdravotní nezávadnost řezných kapalin se odvíjí od jejich čistoty a provozní stálosti. Důležité je však i zajistit základní hygienická opatření, jako je umývání, větrání nebo ochrana pokožky.

Přiměřené náklady se projevují především ve spotřebě kapaliny. Při rozhodování o volbě řezné kapaliny je třeba posoudit její vliv na proces obrábění, tedy na trvanlivost nástroje, jakost obrobku, ostření či spotřebu energie. Dále je třeba posoudit její provozní stálost, spotřebu, výměnu a náklady na její likvidaci. [10]

## 6) Řezné podmínky při obrábění

### *Kinematika řezného procesu:*

Pro posouzení řezných podmínek je třeba nejprve definovat základní kinematické veličiny a jejich vztahy. [1] Například pro soustružení, vrtání nebo frézování platí:

#### **Hlavní pohyb:**

Je to relativní pohyb mezi nástrojem a obrobkem. U frézování ho vykonává nástroj, u soustružení je realizován obrobkem.

#### **Směr hlavního pohybu:**

Jedná se o směr okamžitého pohybu uvažovaného bodu ostří vzhledem k obrobku.

#### **Řezná rychlost $v_c$ :**

Je definována jako okamžitá rychlost hlavního pohybu uvažovaného bodu na ostří vzhledem k obrobku.

#### **Posuvový pohyb:**

Posuvový pohyb je relativní pohyb nástroje vůči obrobku. Společně s hlavním pohybem zajišťuje odstraňování materiálu z obráběné plochy. Na rozdíl od hlavního pohybu se nejedná o rotaci, obrobek (frézování) resp. nástroj (soustružení) se jím pohybuje posuvně.

#### **Směr posuvového pohybu:**

Je definován jako směr okamžitého posuvového pohybu myšleného bodu ostří vzhledem k obrobku.

#### **Posuvová rychlost $v_f$ :**

Je to okamžitá rychlost posuvového pohybu myšleného bodu na ostří vzhledem k obrobku.

#### **Řezný pohyb:**

Řezný pohyb vzniká složením hlavního pohybu a posuvového pohybu.

#### **Směr řezného pohybu:**

Jedná se o směr okamžitého řezného pohybu myšleného bodu na ostří vzhledem k obrobku.

#### **Rychlost řezného pohybu $v_e$ :**

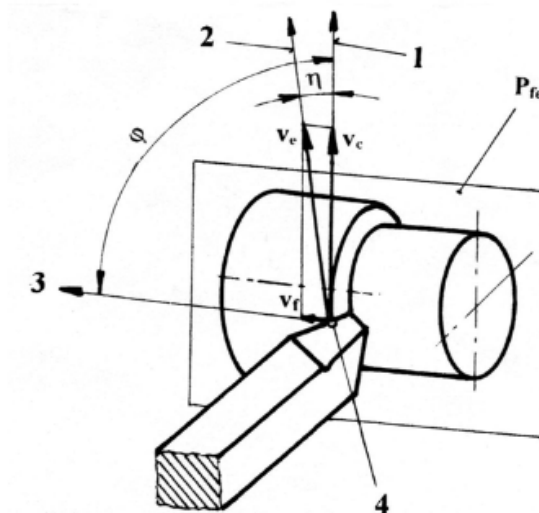
Rychlost řezného pohybu je okamžitá rychlost myšleného bodu na ostří vzhledem k obrobku.

#### **Úhel posuvového pohybu $\varphi$ :**

Je definován jako úhel mezi směry hlavního a současného posuvného pohybu. Určuje se v pracovní boční rovině  $P_{fe}$ .

### Úhel řezného pohybu $\eta$ :

Je definován jako úhel mezi směry hlavního a řezného pohybu. Určuje se v pracovní boční rovině  $P_{fe}$ .



Obr. 18 - Kinematika řezného procesu [1]

### Řezné síly:

Pro vytvoření třísky a její odvod z místa řezu se spotřebuje určité množství práce, která je třeba k překonání odporu materiálu proti pronikání břitu nástroje do povrchu obrobku. Tento odpor se nazývá řezný odpor  $R$  a síla, která je potřeba k překonání tohoto odporu, se jmenuje řezná a značí se  $F$ .

Znalost silových poměrů řezání je třeba především:

- ke určení tuhosti a pevnosti konstrukce obráběcího stroje, jeho jeho součástí
- ke stanovení tuhosti a pevnosti upínačů obrobku i nástroje
- k pevnostním výpočtům nástrojů a k jejich návrhu
- ke určení správných řezných podmínek pro dosažení požadované přesnosti obrábění apod.

Řezné odpory a řezné síly nejsou stále stejné, naopak v průběhu obrábění se mění v závislosti na změně původních vlastností obráběného materiálu, tak i nástroje (např. opotřebením). Především se odvíjí od upnutí polotovaru, jeho tvaru, tuhosti obráběcího stroje apod.

Řezný odpor při obrábění se skládá z:

- a) - z odporu obráběného materiálu vůči plastické deformaci při tvorbě třísky

b) - z odporu proti tření mezi třískou a čelem nástroje dále mezi obrobenou plochou a hřbetem nástroje

Řezné síly překonávající řezné odpory při obrábění, působí na obrobek, nástroj, stroj i upínací pomůcky. Mění tuhost celé soustavy, a tím je ovlivněna i přesnost obrábění.

Řezný proces je chápán jako vzájemné působení nástroje a obrobku ve složité silové soustavě. Díky identifikaci a analýze této silové soustavy můžeme optimalizovat technologické podmínky obráběcího procesu.

Působením řezné části nástroje na obrobek je vyvolána celková řezná síla. Ta se značí symbolem  $\mathbf{F}$ . Předpokládá se, že vektor celkové řezné síly  $\mathbf{F}$  je umístěn do jednoho hlavního bodu ostří nástroje  $\mathbf{D}$ . Všechny roviny a směry potřebné k identifikaci celkové řezné síly  $\mathbf{F}$  jsou definovány v tomto hlavním bodě ostří  $\mathbf{D}$ .

Při analyzování silových poměrů řezného procesu se  $\mathbf{F}$  rozkládá do příslušných geometrických složek v podle záměrů dané analýzy.

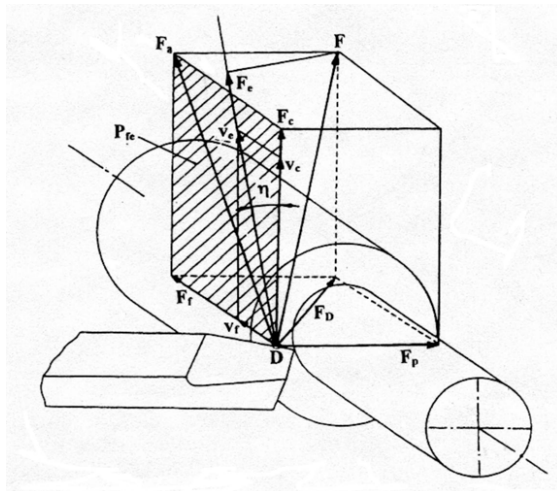
Obvykle se celková řezná síla  $\mathbf{F}$  rozkládá do směru řezné rychlosti a směrů k němu kolmých. Postupy analýzy těchto řezných sil se různě určují pro jednotlivé metody obrábění. [4]

Přípravek, jehož konstrukce je cílem této práce, bude sloužit k posouzení působení řezných sil. Je-li například rychlost posuvu nebo hloubka přísuvu příliš velká, zhoršuje se kvalita obrobeného povrchu (zvětšená drsnost) a dochází k mnohem většímu opotřebení nástrojů. Právě díky optimalizaci řezných sil v obráběcím procesu lze zvýšit životnost nástrojů a kvalitu výrobků, což vede k ekonomičtějšímu provozu.

Na velikost řezných sil mají vliv kromě řezných podmínek i geometrie nástroje nebo materiál, ze kterého je nástroj vyroben a konečně i obráběný materiál. Stanovování řezných sil je poměrně složitý proces a vychází z empirických poznatků. Z toho důvodu jsou důležité technologie poskytující přehled o reálném zatěžování při obrábění a proto je významný i přípravek, jenž je náplní této práce.

### **Řezné síly při soustružení [1]**

Jednotlivé síly geometricky rozložené z celkové řezné síly při podélném soustružení válcové plochy jsou zobrazeny na obr. 19.



**D** – hlavní bod ostří; **F** – celková řezná síla; **F<sub>a</sub>** – aktivní síla; **F<sub>c</sub>** – řezná síla; **F<sub>D</sub>** – dimenzionální síla; **F<sub>e</sub>** – pracovní síla; **F<sub>f</sub>** – posuvová síla; **F<sub>p</sub>** – pasivní síla;  $\eta$  - úhel řezného pohybu

Obr. 19 - Rozklad celkové řezné síly **F** při podélném soustružení [1]

**F<sub>p</sub>** - **Pasivní síla** je složka celkové řezné síly. Je kolmá na pracovní boční rovinu **P<sub>fe</sub>** a na směr výslednice řezného pohybu.

**F<sub>a</sub>** - **Aktivní síla** je vyjádřena průmětem celkové řezné síly **F** do pracovní boční roviny **P<sub>fe</sub>**.

**F<sub>e</sub>** - **Pracovní síla** Leží v pracovní boční rovině **P<sub>fe</sub>**. Je vyjádřena pravoúhlým průmětem celkové řezné síly **F** do směru řezného pohybu.

**F<sub>c</sub>** - **Řezná síla** Je to složka celkové řezné síly **F**. Je identifikovaná pravoúhlým průmětem do směru hlavního pohybu, do takzvaného směru vektoru řezné rychlosti.

**F<sub>D</sub>** - **Dimenzionální síla** je složka celkové řezné síly **F**. Získá se jako kolmý průmět do základní roviny.

**k<sub>c</sub>** - **Měrná řezná síla** se vyjadřuje řeznou silou na jednotku plochy řezu. Definuje se jako poměr řezné síly **F<sub>c</sub>** a plochy jmenovitého průřezu třísky **A<sub>D</sub>**:

$$k_c = \frac{F_c}{A_D} [N * mm^{-2}] \quad [9]$$

**F'<sub>c</sub>** - **Řezná síla na jednotku šířky řezu** znamená poměr řezné síly **F<sub>c</sub>** a jmenovité šířky řezu (třísky) **b<sub>D</sub>**:

$$F'_c = \frac{F_c}{b_D} [N * mm^{-1}] \quad [10]$$

Známe-li potřebné empirické vztahy, můžeme provést výpočet vybraných složek celkové řezné síly. Např. pro podélné soustružení válcové plochy se využívají mocninové závislosti:

$$F_c = C_{F_c} * a_p^{x_{fc}} * f^{y_{F_c}} [N] \quad [11a]$$

$$F_p = C_{F_p} * a_p^{x_{fp}} * f^{y_{F_p}} [N] \quad [11b]$$



$$F_f = C_{Ff} * a p^{x_{Ff}} * f^{y_{Ff}} \text{ [N]} \quad [11c]$$

Exponenty  $x_{F_c}$ ,  $x_{F_p}$ ,  $x_{F_f}$ ,  $y_{F_c}$ ,  $y_{F_p}$ ,  $y_{F_f}$  a konstanty  $C_{F_z}$ ,  $C_{F_p}$ ,  $C_{F_f}$  pro dané podmínky vycházejí z empirických zkoušek.

Celková řezná síla se pro vypočtené složky  $F_c$ ,  $F_p$ ,  $F_f$  stanoví ze vztahu

$$F = \sqrt{F_c^2 + F_p^2 + F_f^2} \text{ [N]} \quad [12]$$

Jestliže známe velikost měrné řezné síly  $k_c$  [ MPa ] můžeme vypočítat řeznou sílu  $F_c$  na základě vztahu :

$$F_c = k_c \cdot A_D = k_c \cdot h_D \cdot b_D \text{ [ N ]} \quad [13]$$

$h_D$  – jmenovitá tloušťka třísky [ mm ]

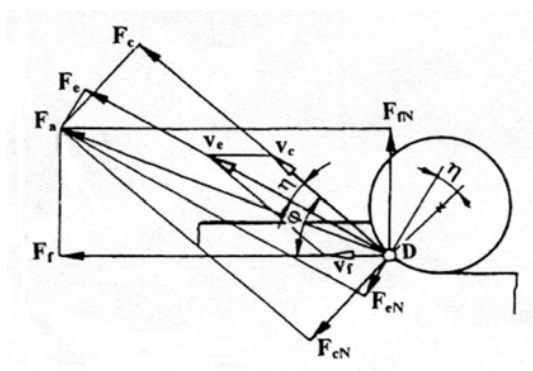
$b_D$  – jmenovitá šířka třísky [ mm ]

$A_D$  – jmenovitý průřez třísky [ mm<sup>2</sup> ]

$$k_c = \frac{C_{kc}}{h_D^{u_{kc}}} \text{ [MPa]} \quad [14]$$

$u_{kc}$ ,  $C_{kc}$ , - konstanty, stanovují se empiricky.

### Řezné síly při válcovém frézování [1]:

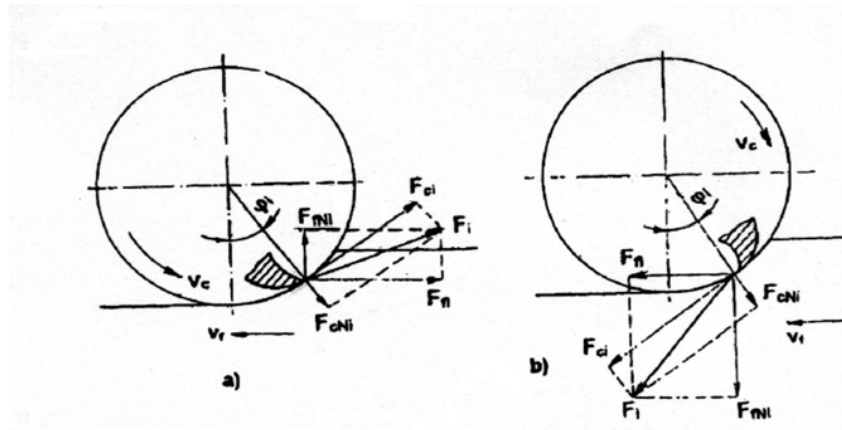


- D**– hlavní bod ostří;
- F<sub>a</sub>**– aktivní síla;
- F<sub>c</sub>**– řezná síla;
- F<sub>e</sub>**– pracovní síla;
- F<sub>eN</sub>**– kolmá pracovní síla;
- F<sub>f</sub>**– posuvová síla;
- F<sub>fN</sub>**– kolmá síla posuvu;
- φ** - úhel posuvového pohybu;
- η** - úhel řezného pohybu

Obr. 20 Rozklad celkové řezné síly na zubu nástroje při rovinném frézování válcovou frézou s přímými zuby [4]

Málokdy je při frézování v záběru jen jeden zub. Obvykle se do záběru dostávají minimálně dva. Počet zubů v záběru se značí –  $n_z$ .

V případě válcového frézování nástrojem s přímými zuby je celková řezná síla na zubu označována jako  $F_i$  – Ta se dále rozkládá na složky  $F_{ci}$  a  $F_{cNi}$ , resp. na složky  $F_{fi}$  a  $F_{fNi}$



Obr.21 Řezné síly na zubu válčové frézky v pracovní rovině  $P_{fe}$  [4]

**a** - nesousledné frézování ; **b** - sousledné frézování

$F_{cNi}$  – kolmá řezná síla,  $F_{ci}$  – řezná síla,  $F_i$  – celková řezná síla;

$F_{fNi}$  - kolmá posuvová síla,  $F_{fi}$  – posuvová síla

$F_{ci}$  - **Řezná síla** se vyjadřuje na základě průřezu třísky  $A_{Di}$  a měrné řezné síly  $p_i$ :

$$F_{ci} = p_i * A_{Di} = p_i * a_p * f_z * \sin \varphi_i \quad [15]$$

$k_{ci}$  - Měrná řezná síla je vyjádřena:

$$k_{ci} = \frac{C_{Fc}}{h_i^{1-x}} = \frac{C_{Fc}}{(f_z * \sin \varphi_i)^{1-x}} \quad [16]$$

Tuto rovnici lze dosadit do předchozího vzorce. Vznikne:

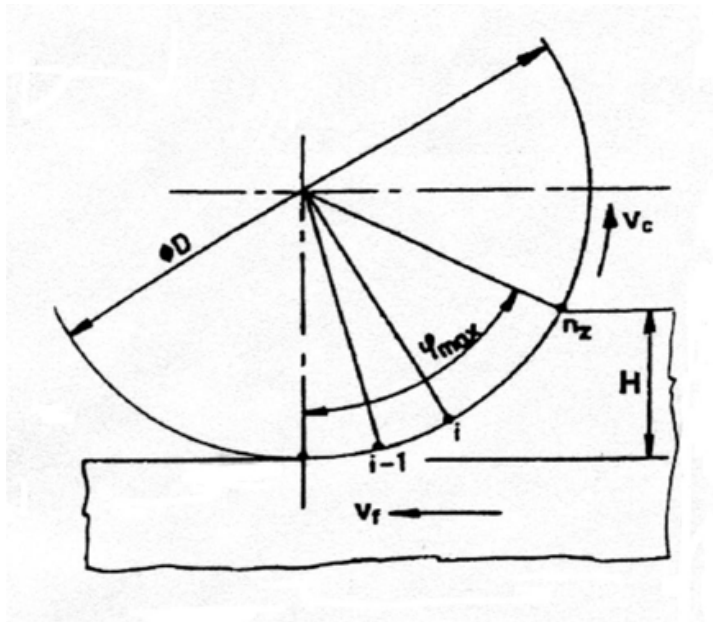
$$F_{ci} = C_{Fc} * a_p * f_z^x * \sin^x \varphi_i \quad [N] \quad [17]$$

Ohledně výkonu a krouticího momentu na vřetenu frézky je důležitá celková řezná síla  $F_c$ .

Ta pro válčové frézování nabývá velikosti :

$$F_c = \sum_i F_{ci} = C_{Fc} * a_p * f_z^x * \sum_i \sin^x \varphi_i \quad [18]$$

V tomto vztahu je  $i$  vyjádřením polohy v současném záběru. Platí, že  $i < 1, n_z >$ . Hodnota proměnné  $n_z$  je určena na základě obr.:



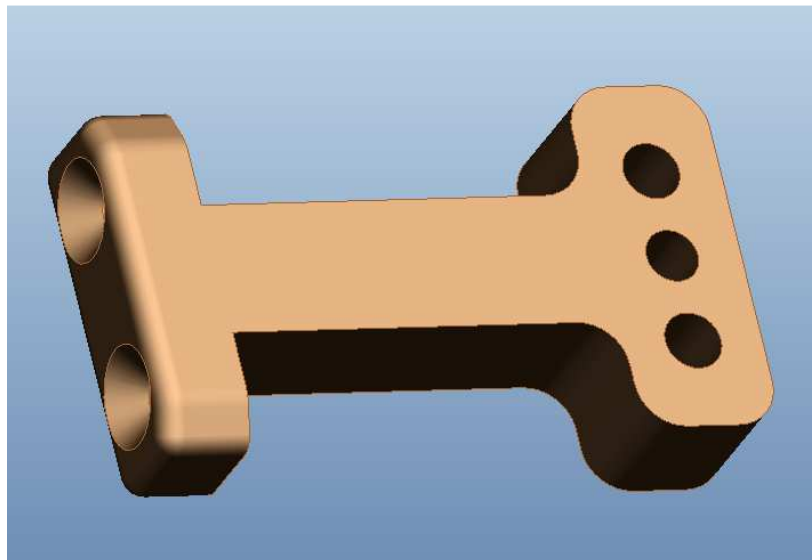
Obr. 22 - Počet zubů v záběru při válcovém frézování [4]

$z$  – počet zubů frézy.

$$n_z = \frac{\varphi_{max}}{360} * z \quad [19]$$

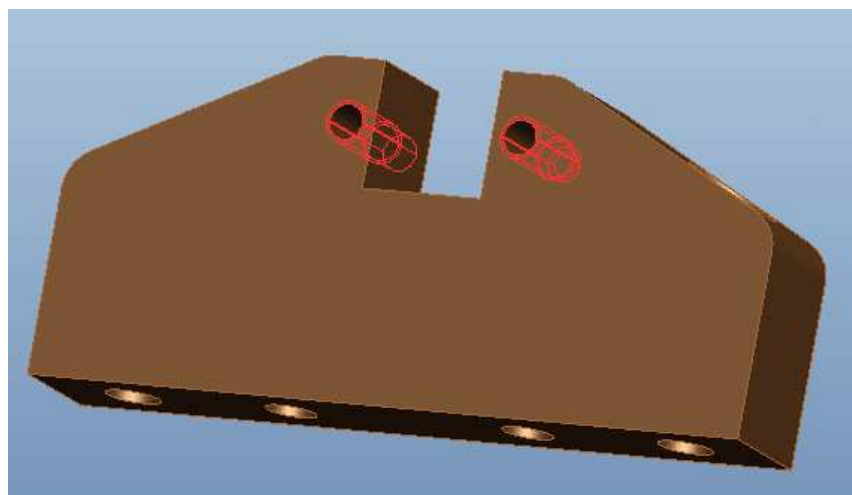
## 7) Konstrukce přípravku

K měření zatěžujících sil budou použity tenzometry. Ty je třeba umístit na takovou část přípravku, kde se dá zatížení nejlépe měřit. Zkušební vzorky tedy budou umístovány na dvojici ramen, které budou pod vlivem řezných sil namáhány na ohyb a toto namáhání budou tenzometry snímat.



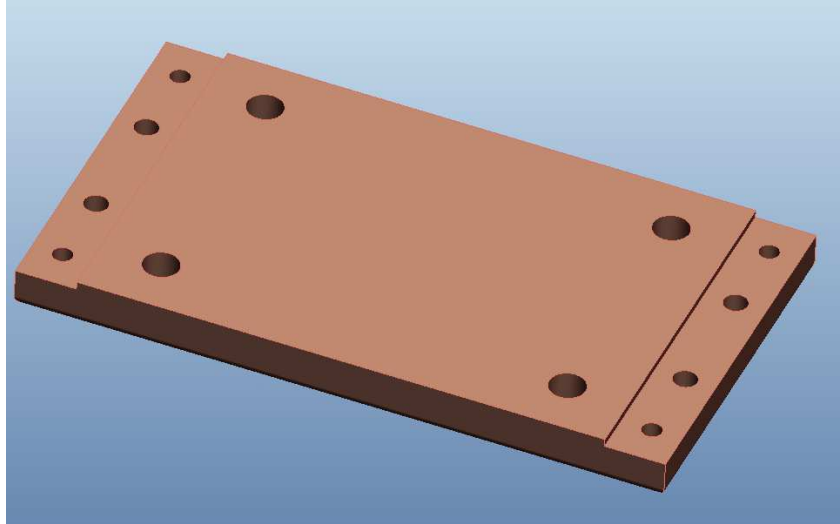
obr. 23 - rameno

Takováto ramena musí být vhodným způsobem uchycena ke stolu frézky. K tomu nám poslouží dvojice bočnic, které budou uchyceny k základní desce a které budou pokud možno statické. (nebudou přenášet pohyb ramen) Ramena jsou do desky svrchu zalisována a z vnějšku zajištěna dvojicí šroubů se zápustnou hlavou. Takovýto způsob napomáhá k co nejpevnějšímu vetknutí ramen a koncentraci ohybu do měřených míst.



obr. 24 - bočnice

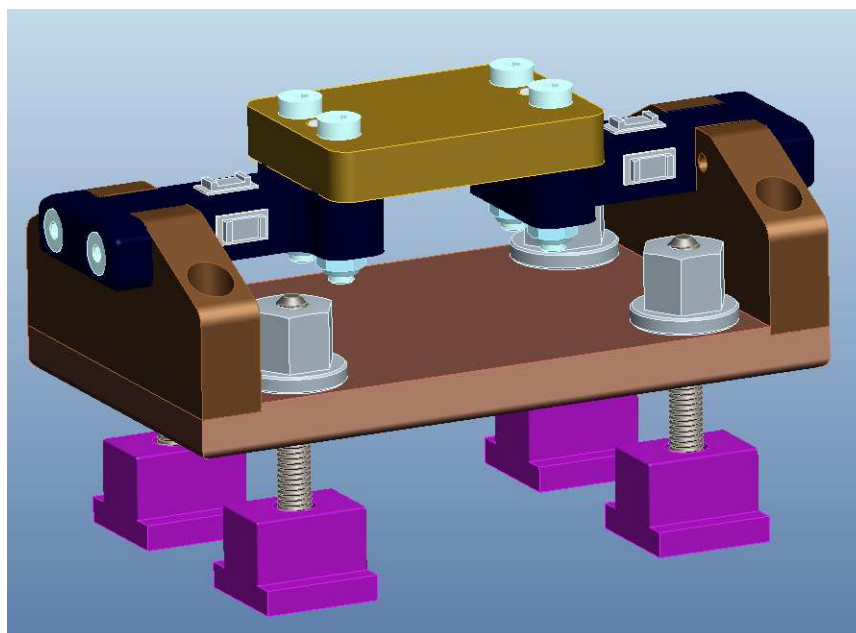
Bočnice jsou pomocí kolíků s "h" tolerancí usazeny k základní desce a přišroubovány dvojicí šroubů M6x35. Bočnice jsou vyrobeny z oceli třídy 19313 a základní deska z oceli 15142 a všechny tři prvky jsou tepelně zpracovány. Tím je zajištěna jejich maximální tuhost oproti duralovým ramenům a jejich ohýbání je tím omezeno na minimum.



obr. 25 - základní deska

Samotný zkušební vzorek jsem zvolil jako obyčejnou desku z oceli třídy 11320 tak, aby nebyl příliš drahý a zároveň aby kladl obráběcímu nástroji dostatečný odpor. K ramenům je vzorek nasazen přes kolíky s rozměrem 6h7. Otvory ve vzorku, do kterého kolíky zapadají, však má rozměr "6+0,05+0,1". To způsobí, že mezi kolíky a stěnou otvoru bude minimální vůle zajišťující volné nasazení vzorku. Šrouby M6, které zabraňují vertikálnímu posuvu však mají vnější průměr přibližně 5,85 mm a otvory pro ně mají průměr 6,5 mm (o poznání větší vůle). Další důležitý fakt je ten, že je vzorek přišroubován pomocí samojistící matice pouze minimálním momentem. Díky němu se vzorek nemůže vertikálně posouvat, avšak nevyvíjí na rameno díky minimálnímu utažení téměř žádný tlak. Díky tomu nepůsobí mezi ramenem a vzorkem téměř žádná adheze a veškeré horizontální namáhání ramen od vzorku je přenášeno výhradně přes kolík umístěný ve střední podélné rovině ramene. Tím je dosaženo výhodnější namáhání ramen ohybem, nikoli smykem.

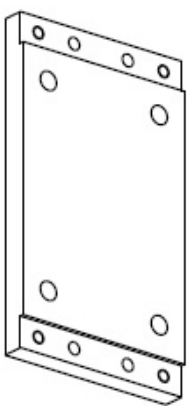
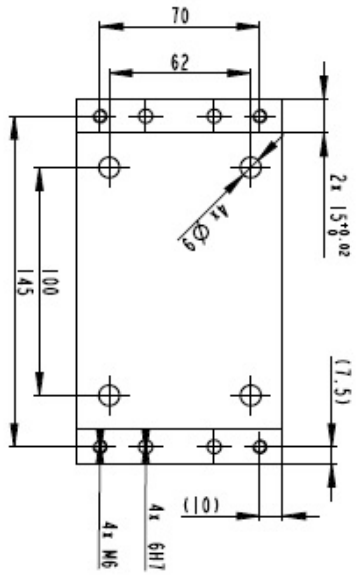
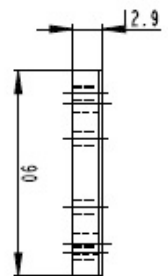
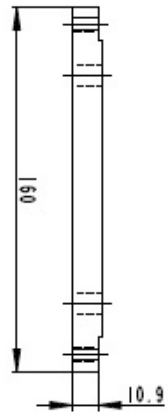
Uchycení přípravku ke stolu frézky zajišťuje čtveřice závitových tyčí a upínek. Příčná rozteč otvorů pro toto upnutí odpovídá rozteči upínacích "T-drážek" ve stolu.



obr. 26 - celá sestava

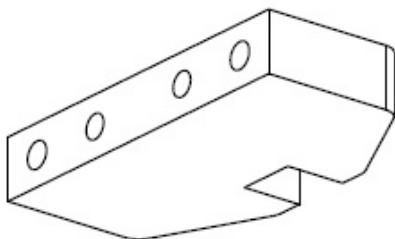
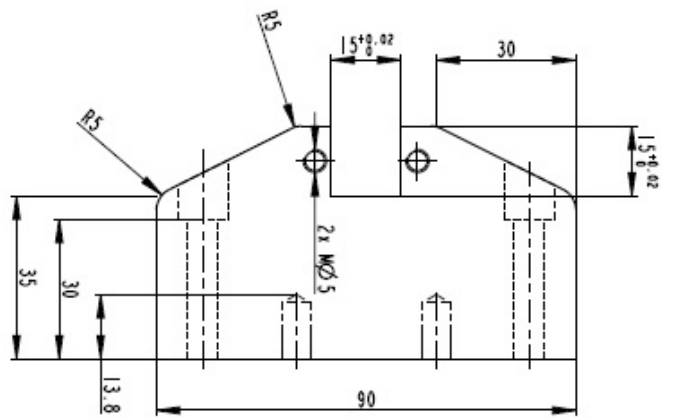
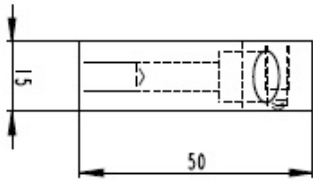
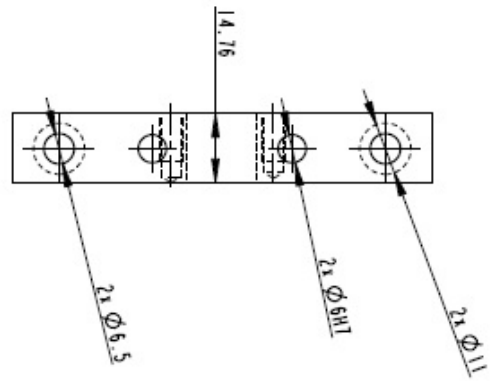
***Výkresová dokumentace:***

32 /  $\nabla$  /  $\nabla$  /  $\nabla$  /  
0.3x45°



ROZTECE LICOVANÝCH OTVORŮ V TOLERANCI  $\pm 0.02$ , OSTATNÍ OTVORY  $\pm 0.1$   
KALIT NA S8+/ -2HRC, ČERNIT

Es.	160 x 90 x 12.9	Pořizovací	15 142
Název - rozměr			
Technický výkres je důležitým vlastním přílohou k výrobě.			
Měřítko	1:2	TOLEROVANÍ ISO 8015 NETOLEROVANÉ ROZMĚRY ISO 2768-MK	Forma A3
upce	Kreslil: BUČEK Název dílu <b>DESKA</b>	Datum:	Hmotnost: Výkres sestavy: <b>01 DESKA</b>
			Lisť 1/1 Revize

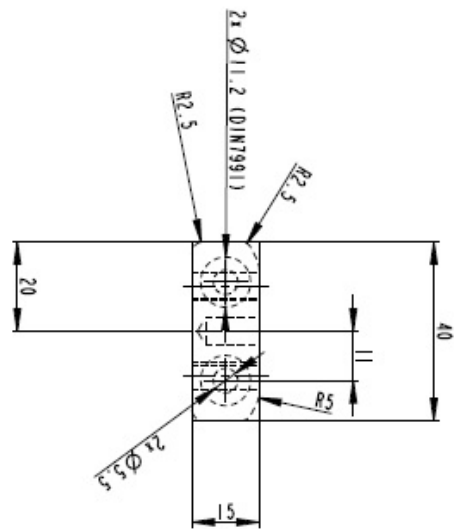
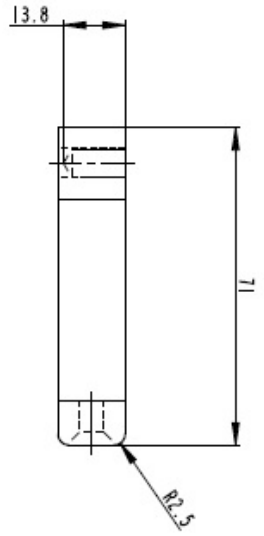


32 / / /  
0.3x45°

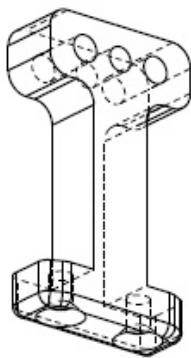
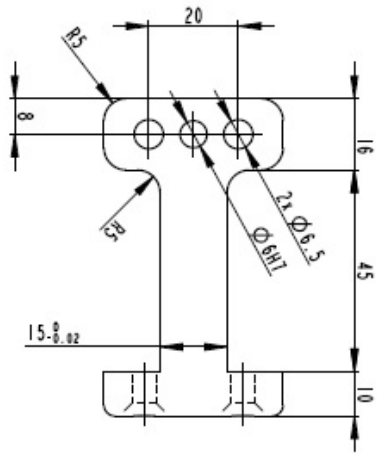
ROZTEČE LICOVANÝCH OTVORŮ V TOLERANCI  $\pm 0.02$ , OSTATNÍ OTVORY  $\pm 0.1$   
KALITÍ NA 58+/-2HRC, ČERNITÍ

Ks. 90 x 50 x 15		Přístroj: 19 313	
Materiál: Hněz - Izomer		Materiál: 19 313	
Texto výřez je dle vlnin vlastních Michala Barta.		Info: www.jbr.cz	
Meritko 1:1	TOLEROVANÍ ISO 8015 METOLOVANE ROZMERY ISO 2768-mK	Forma: A3	Úroveň: 1/1
Úroveň: 1:1	Kreslí: BUCEK	Dotum:	Vykres sestavy:
Úroveň: 1:1	BOCNICE		Revize: A





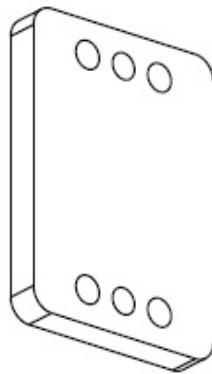
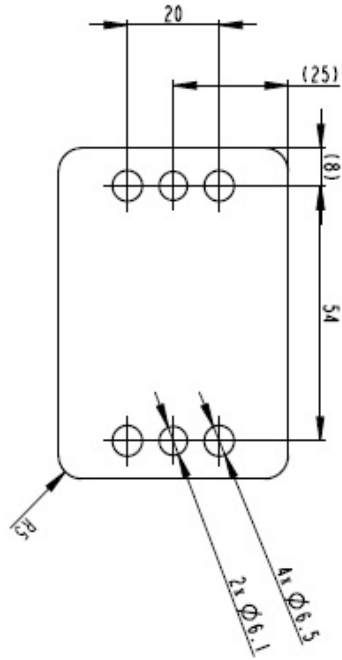
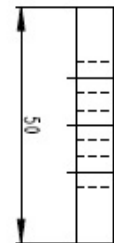
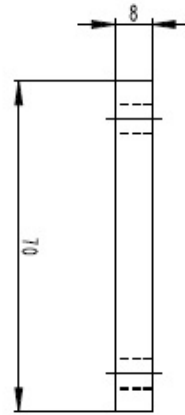
32 /  $\sqrt{\text{V}}$   
0.3x45°



ROZTEČE LICOVANÝCH OTVORU V TOLERANCI  $\pm 0.02$ , OSTATNÍ OTVORY  $\pm 0.1$

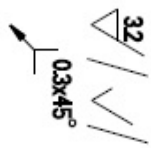
FNC

Číslo	71x40x15	Podstavec	EN 5083 H111
Název - rozměr			
Texte vyřez je uvedením vlastností Michala Březos.			
Měřítka	1:1	Forma	A 3
TOLEOVANÍ ISO 8015		Imitost:	
NETOLEOVANÉ ROZMĚRY ISO 2168-nk		Výřez sestavy:	
Kreslí: BUCEK M	Dotup:	03 RAMENO	Revize
upce	RAMENO		A



ROZTECE LICOVANÝCH OTVORŮ V TOLERANCI  $\pm 0,02$ , OSTATNÍ OTVORY  $\pm 0,1$

Es.	Název - číslo: 102598	Polstředí:	11360
Texto výtisk je dusem vlastním Michala Baco.			
Meřítko	1:1	TOLEROVANÍ ISO 8015 NETOLEROVANÉ ROZMĚRY ISO 2168-MK	Formát A3
úPEC	Kreslil: BUCHEM	Datum:	Hmotnost: Výkres sestavy:
	Název dílu <b>PRIPRAVEK</b>		<b>04 PRIPRAVEK</b>
		Info: www.jhv.cz	Revize <b>A</b>
			List 1/1



## 8) Příklad programovacího kódu při NC obrábění:

Zde uvádím názorný příklad NC programovacího jazyka v řídicím systému Heidenhain. Jedná se konkrétně o program, kterým je obráběno duralové rameno měřicího přípravku.

```
0 BEGIN PGM RAMENO MM
1 ; DIL
2 ;
3 BLK FORM 0.1 Z X+0 Y-40.5 Z-15
4 BLK FORM 0.2 X+72 Y+0.5 Z+0
5 TOOL CALL 71 Z S2000
6 L Z+20 R0 FMAX M13
7 CYCL DEF 200 VRTANI ~
  Q200 = 2 ;BEZPEC. VZDALENOST ~
  Q201 = -1 ;HLOUBKA ~
  Q206 = 150 ;POSUV NA HLOUBKU ~
  Q202 = 1 ;HLOUBKA PRISUVU ~
  Q210 = 0 ;CAS.PRODLEVA NAHORE ~
  Q203 = +0 ;SOURADNICE POVRCHU ~
  Q204 = 20 ;2. BEZPEC.VZDALENOST
8 CALL LBL 1
9 CALL LBL 2
10 CALL LBL 99
11 TOOL CALL 145 Z S1350
12 L Z+20 R0 FMAX M13
13 FN 0: Q201 =-13.8
14 FN 0: Q202 =+3
15 CALL LBL 1
16 CALL LBL 99
17 TOOL CALL 146 Z S400
18 L Z+20 R0 FMAX M13
19 CYCL DEF 201 VYSTRUZENI ~
  Q200 = 2 ;BEZPEC. VZDALENOST ~
  Q201 = -13.5 ;HLOUBKA ~
  Q206 = 50 ;POSUV NA HLOUBKU ~
  Q211 = 0 ;CAS. PRODLEVA DOLE ~
  Q208 = 200 ;POSUV NAVRATU ~
  Q203 = +0 ;SOURADNICE POVRCHU ~
  Q204 = 20 ;2. BEZPEC.VZDALENOST
20 CALL LBL 1
21 CALL LBL 99
22 TOOL CALL 101 Z S1250
23 L Z+20 R0 FMAX M13
24 CYCL DEF 200 VRTANI ~
  Q200 = 2 ;BEZPEC. VZDALENOST ~
  Q201 = -18 ;HLOUBKA ~
  Q206 = 150 ;POSUV NA HLOUBKU ~
  Q202 = 3 ;HLOUBKA PRISUVU ~
  Q210 = 0 ;CAS.PRODLEVA NAHORE ~
```

Formální část každého Heidenhain programu. Popisuje začátek a konec programu.

Block form - Udává souřadnice, na kterých se nachází obráběný materiál. První řádek obsahuje vždy nižší hodnotu mezi konkrétních os. Toto rozmezí závisí na umístění pomyslného nulového bodu. Polohu tohoto bodu volí programátor podle svých zkušeností a citu.

Tool call znamená vyvolání nástroje podle tabulky nástrojů. Ta je v paměti obráběcího stroje a obsahuje vlastnosti přiřazené konkrétnímu nástroji. Údaj S určuje počet otáček za minutu, jakým se má točit vřeteno.

Příkazy začínající "L " jsou lineární posuvy na určené souřadnice (X,Y,Z). Symbol R určuje kterým bodem nástroje má na danou souřadnici nástroj "přijet". (0= středem) F je určení rychlosti posuvu [mm/min]. Je-li zadána hodnota FMAX, posouvá se nástroj maximální možnou rychlostí. M13 je příkaz pro roztočení vřetena + zapnutí chlazení emulzí.

Definice cyklu udává parametry pro vybraný obráběcí cyklus. Tento cyklus bude stroj využívat, dokud mu v programu není určen jiný.

Q203 = +0 ;SOURADNICE POVRCHU ~  
Q204 = 20 ;2. BEZPEC.VZDALENOST

25 CALL LBL 2  
26 CALL LBL 99  
27 TOOL CALL 58 Z S3000  
28 L Z+20 R0 FMAX M13  
29 L X+16 Y+8 R0 FMAX  
30 L Z+0 R0 FMAX  
31 CALL LBL 88  
32 L Z+150 R0 FMAX M91  
33 L X+200 R0 FMAX  
34 L M30  
35 LBL 1  
36 L X+63 Y-20 R0 FMAX M99  
37 LBL 0  
38 LBL 2  
39 L X+63 Y-10 R0 FMAX M99  
40 L Y-30 R0 FMAX M99  
41 LBL 0  
42 LBL 88  
43 L X+16 Y+8 R0 FMAX  
44 L IZ-1 R0 FMAX  
45 L X+10 RL F300  
46 L Y-12.5  
47 RND R5  
48 L X+55  
49 RND R5  
50 L Y+0  
51 RND R5  
52 L X+71  
53 RND R5  
54 L Y-40  
55 RND R5  
56 L X+55  
57 RND R5  
58 L Y-27.5  
59 RND R5  
60 L X+10  
61 RND R5  
62 L Y-50  
63 L IZ+25 R0 FMAX  
64 L X+16 Y+8 R0 FMAX  
65 L IZ-25 R0 FMAX  
66 CALL LBL 88 REP15  
67 LBL 0  
68 LBL 99  
69 L Z+150 R0 FMAX M91  
70 L X+200 R0 FMAX M0  
71 LBL 0  
72 END PGM RAMENO MM

CALL LBL = "vyvolej label"  
V programu se často využívá tzv. labelů. Jedná se o soubory příkazů, které jsou definovány po ukončení aktivní části programu a během obrábění se na tyto labely odkazujeme. Vyplatí se v případech, kdy na stejných souřadnicích obrábíme více nástroji. Dalším využitím může být obrábění po libovolné dráze, které se vždy opakuje stejně, jen v jiné hloubce. V takovém případě je vhodné tuto dráhu i s přísuvem definovat v samostatném labelu a program zadat pouze několikanásobné zopakování tohoto labelu.

Příkazem FN 0: začíná tzv. parametrický příkaz. Stroj takovýto příkaz "chápe" tak, že si jako aktuálně připravený cyklus ponechá předchozí, změní v něm však hodnoty, které jsou parametrickým příkazem zadány.

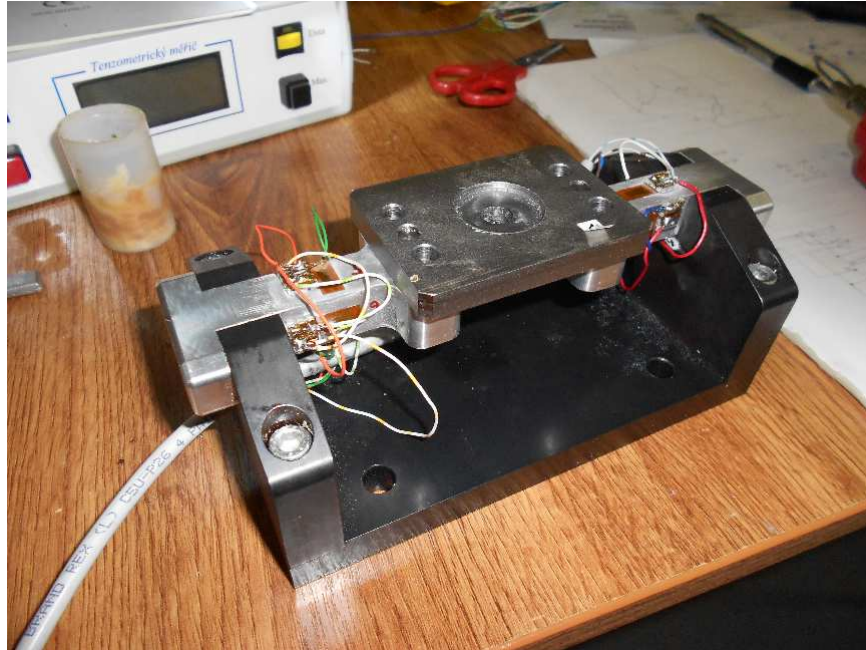
M30 je příkaz pro ukončení programu.

Labely 1 a 2 jsou definovány jako lineární najetí středem nástroje maximální rychlostí na zadané souřadnice a příkazem M99 vykonání aktuálního cyklu

Na začátku labelu 88 nástroj vykoná přísuv o 1 mm níž. [příkaz IZ = "inkrementálně" = o zadanou hodnotu jinak (+/-), než je aktuální pozice] Rychlostí 300 mm/min najede na X souřadnici tak, aby následujícím pohybem tuto souřadnici kopíroval zleva. (krok 45) Dále nástroj zvnějšku obrábí tvar ramene. Na konci (krok 63) se nástroj vysune o 25 mm výš, v této bezpečné výšce přejede na původní pozici, vrátí se opět o 25 mm níž a celý label se 15-krát zopakuje.

## 9) Měření na přípravku:

Pro měření zatížení využívám dvě čtveřice tenzometrů. Na každém rameni jsou naproti sobě umístěny dva tenzometry aktivní a na stranách otočených o 90° jsou tenzometry kompenzační. Přípravek tak obsahuje dva plné Wheatstonovy můstky, z nichž u jednoho jsou aktivní tenzometry umístěny pro měření svislého zatížení a na druhém rameni pro měření vodorovného zatížení.



Obr. 26 - měřící přípravek s nalepenými a připájenými tenzometry

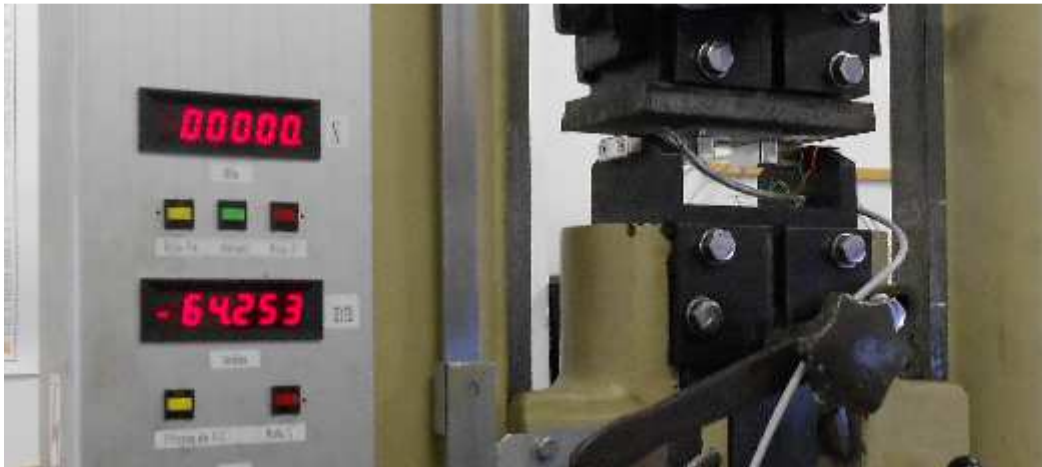
### *Kalibrace tenzometrů:*

Tenzometry jsou připojeny pomocí dvou čtyřpólových konektorů typu XLR k dvoukanálovému měřidlu TEN2072C.



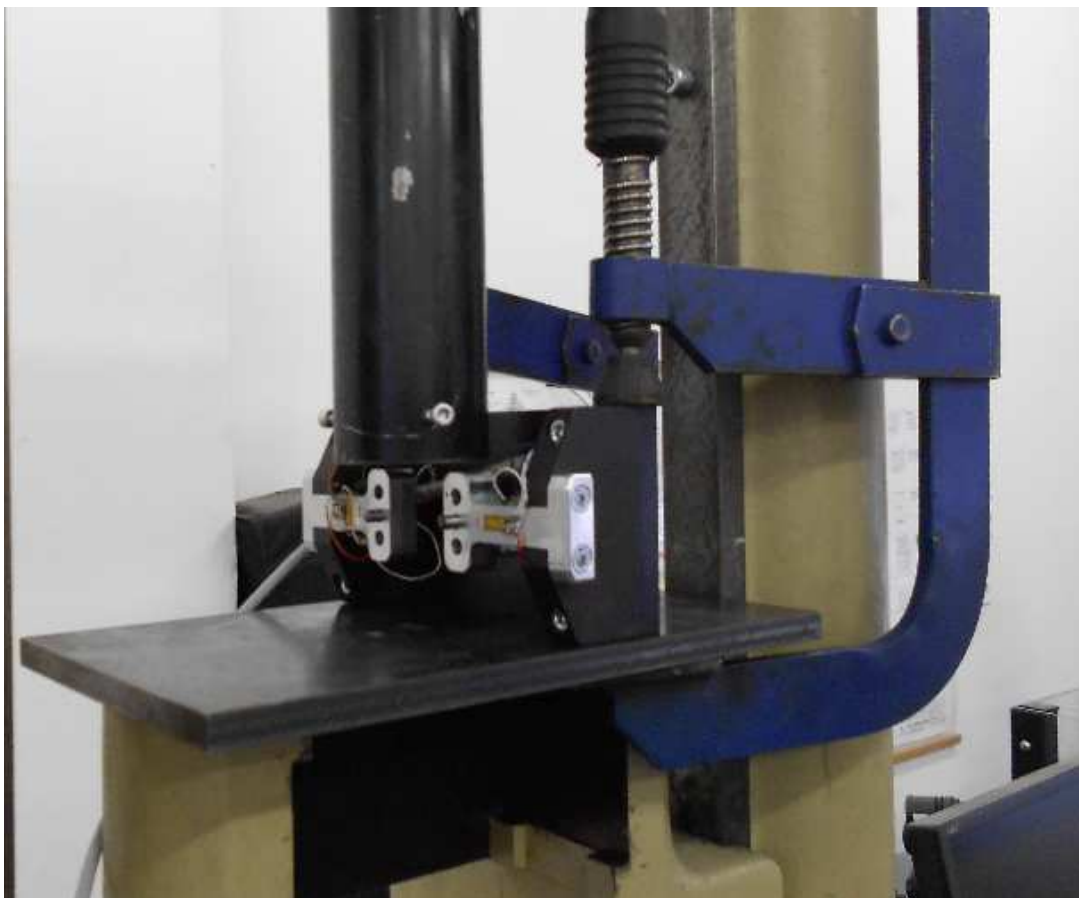
Obr. 27 - Tenzometrické měřidlo TEN2072C

Po připájení kabelů proběhla kalibrace obou tenzometrických můstků, respektive nastavení jejich kalibračních konstant. Pro tento účel byl přípravek umístěn do trhacího zařízení Zwick/Roell Z010.



Obr. 28a - Svislá kalibrace tenzometrů

Na vzorek byla vyvinuta známá síla a ta pak byla porovnána s údajem uvedeným na měřidlu. Podle procentuálního rozdílu byla upravena konstanta tenzometrů, tak, že při dalším zatížení přípravku silou odpovídala naměřená hodnota zatěžovací síle.

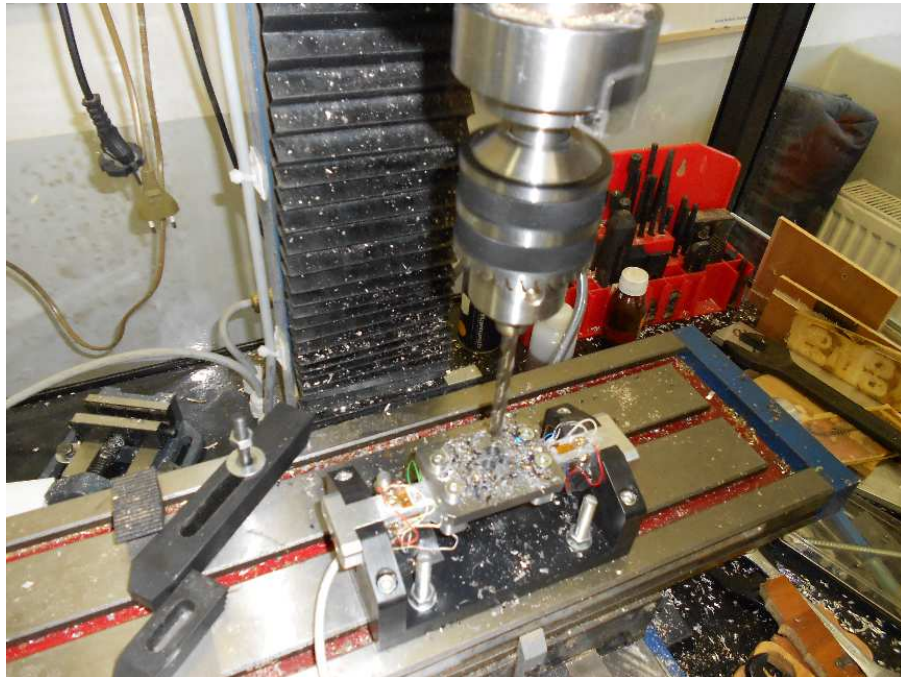


Obr. 28b - vodorovná kalibrace tenzometrů.

### ***Obrábění s přípravkem:***

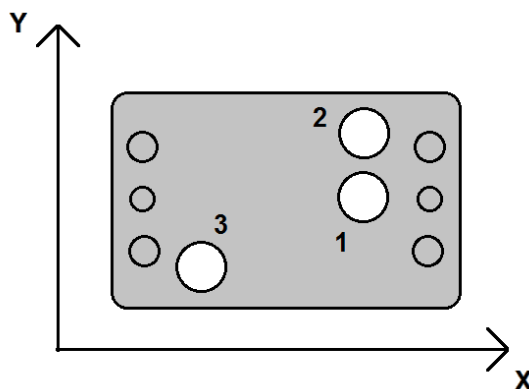
Po kalibraci tenzometrů byl přípravek upnut ke stolu NC frézy pomocí čtyř závitových tyčí M8. Ty jsou zašroubovány zespodu do "T-drážkových" matic a svrchu přitaženy "obyčejnými maticemi" (DIN 934). V základní desce přípravku jsou pro tento účel čtyři otvory o průměru 9 mm.

Jako první jsem zvolil vrtání vrtákem o průměru 7.5 mm. Cyklus byl definován s přísvem 2 mm a rychlostí přísvu 100 mm/min.



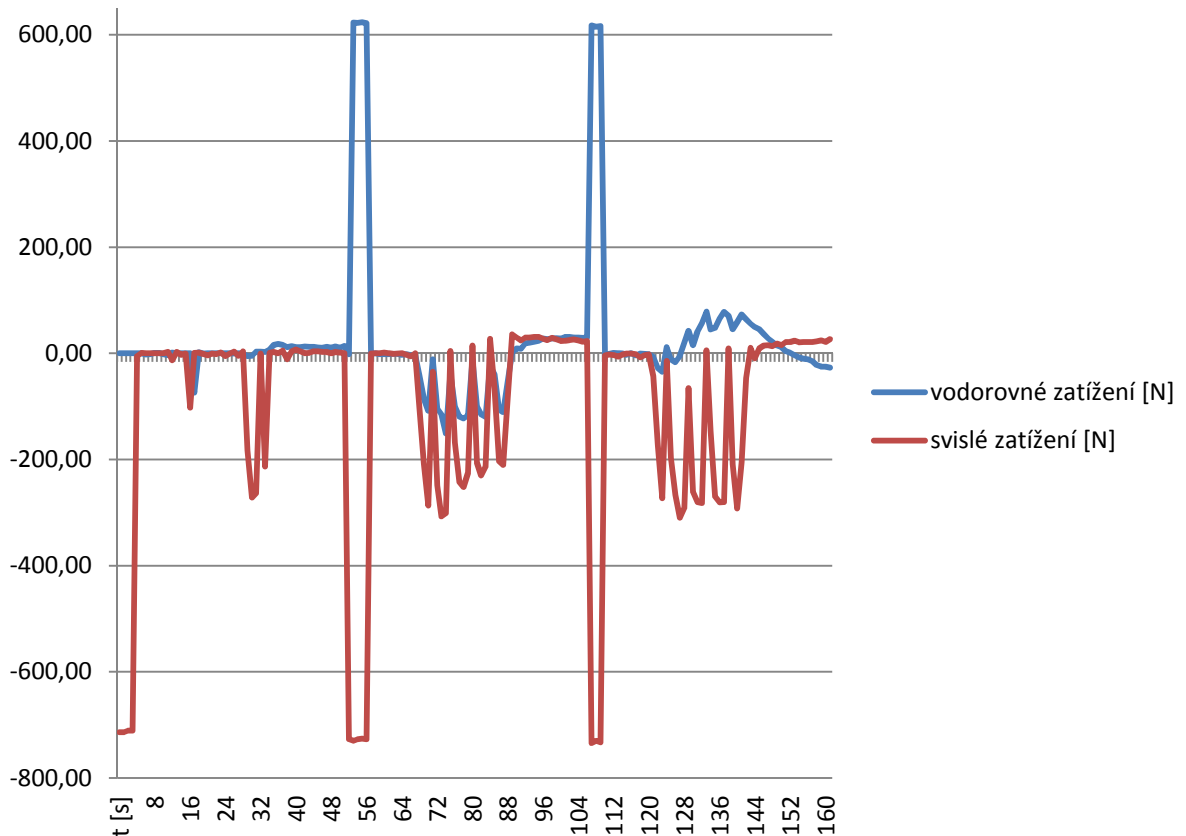
Obr. 29 - obrábění na NC fréze

První otvor byl navrtán ve středové rovině zkušební vzorku. Toto vrtání odpovídá prvnímu měření. (viz graf 1) Z grafu lze vyčíst jen minimální svislé zatížení. To je způsobeno polohou otvoru. Jelikož bylo vrtáno svisle v podélné rovině, nebyl vzorek téměř nijak namáhán na krut a napětí tedy odpovídá ohybu odpovídající rovině.



Obr. 30 - rozmístění zkušebních otvorů

Druhé vrtání probíhalo na stejné X - souřadnici, ale s vyšší hodnotou v Y- ose. V tomto případě již není vzorek namáhán pouze na ohyb, ale také na krut (a se vzorkem také ramena). Přípravek tento jev zachycuje jako zvýšené namáhání ve vodorovné ose, které svou frekvencí přesně odpovídá svislému zatěžování.



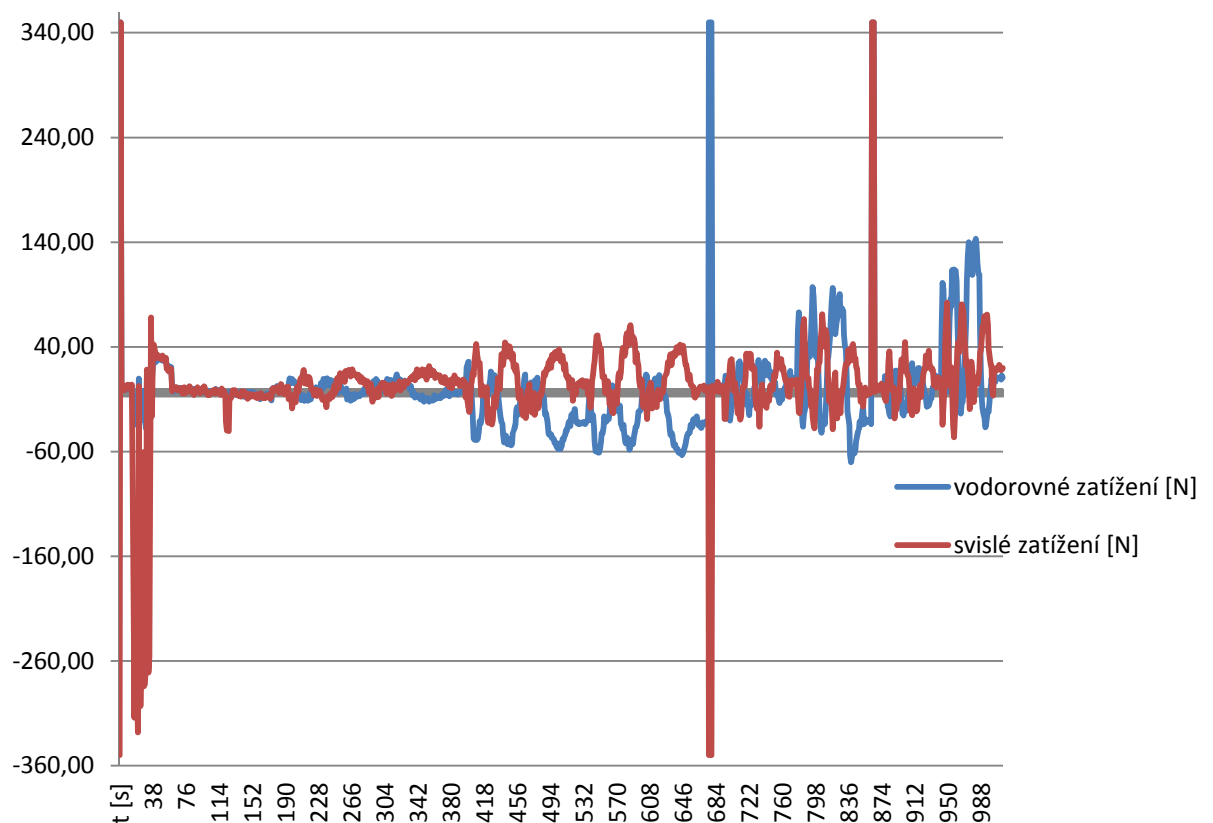
Graf 1 Průběhy zatížení vzorku č. 1 v čase (1., 2. a 3. otvor)

Třetí otvor byl navrtán rovněž mimo svislou podélnou osu avšak na opačnou stranu od ní. Charakter zatížení se v tomto případě liší pouze tím, že ve vodorovné rovině je vzorek namáhán opačným směrem.

Na následujícím vzorku bylo nejprve provedeno vrtání stejným nástrojem (vrták průměr 7,5 mm) Důvod byl především technologický, neboť čelní obrábění není pro použitou frézu vhodné. Do vytvořeného otvoru jsem posléze vyfrézoval pomocí dvoubřité monolitické frézy o průměru 6 mm kruhovou kapsu. Ta měla průměr 30 mm, přísun měl hodnotu 1 mm a cyklus byl nastaven tak, že prvním přísuvem nástroj obráběl v hloubce 0,5 mm a následujícím přísuvem 1 mm. Na tomto vzorku byly použity hned tři rychlosti posuvu.



První frézování následující pro předvrtání otvoru, bylo provedeno s posuvem 68 mm/min. Po něm byla nastavena hodnota posuvu 100 mm/min, fréza opět obráběla prvním přísuvem pouze 0,5 mm materiálu a druhým 1 mm. Konečně třetí rychlost posuvu byla nastavena na hodnotu 140 mm/min a cyklus se opakoval. Na grafu 2 je dobře vidět přímou úměru mezi rychlostí obrábění a silami, kterými je obrobek zatěžován.



Graf 2 - Průběhy zatížení vzorku č. 2 v čase (vrtání, frézování 68, 100, 140 mm/min)

Graf 2 vykresluje řezné síly při celém procesu od předvrtání přes nižší rychlosti posuvu až po relativně vysoké posuvy. Je na něm dobře vidět i rozdíl mezi obráběními s malou hloubkou přísuvu (0,5 mm) a vyšší hloubkou přísuvu (1 mm).

## 10) Závěr - zhodnocení výsledků.

Cílem této diplomové práce bylo vytvořit přípravek, jenž bude schopen měřit zatěžovací síly při třískovém obrábění a porovnávat tak různé řezné podmínky z hlediska mechanického působení nástroje na obrobek. Podařilo se mi zkonstruovat a vyrobit přípravek, který je dostatečně kompaktní, je vytvořen z kvalitních materiálů, které se v současnosti v praxi využívají a díky tomu lze předpokládat jeho vysokou životnost. Při pokusném obrábění se v datech zřetelně projevují tendence změny obráběcích sil způsobených změnou rychlosti posuvu či hloubky přísuvu. Výstupní data dostatečně přesně popisují průběh obrábění. Tím jsou tedy vstupní požadavky splněny.

Nevýhodou tohoto přípravku je, že měří pouze relativně a zjištěné hodnoty nelze přiřadit žádné konkrétní řezné síle. Navíc je určen pouze pro obráběcí stroje pracující se statickým obrobkem a rotujícím nástrojem. (frézy, vrtačky apod.) To však vyplývá z požadavků na tento přípravek a bylo tedy s těmito vlastnosti počítáno již v konstrukci.

Přípravek může sloužit v laboratořích dopravní fakulty Jana Pernera jako praktický podklad k výuce předmětů souvisejících s třískovým obráběním. V kombinaci s vertikální NC frézou, měřicím zařízením TEN2072C a osobním počítačem, které jsou rovněž v laboratořích přítomny, je schopen na místě vytvořit potřebná data k přehlednému zobrazení míry zatěžování obrobku respektive nástroje.

## Seznam použité literatury

- [1] KOCMAN, Karel. *Technologické procesy obrábění*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2011. ISBN 978-80-7204-722-2.
- [2] NĚMEC, Jindřich. *Odporové tenzometry v praxi*. Praha: Nakladatelství technické literatury, 1967. ISBN 04-007-67.
- [3] Odporové tenzometry z pohledu využití v automatizovaných soustavách. HRUBANT, Ladislav a Jan HRUBANT. *Odbornecasopisy.cz* [online]. [cit. 2013-05-13]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/download/au070427.pdf>
- [4] KOCMAN K., PROKOP J.:TECHNOLOGIE VÝROBY II, sylabus [https://www.google.cz/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&ved=0CC4QFjAA&url=http%3A%2F%2Fust.fme.vutbr.cz%2Fobraben%2Fopory-save%2FTechnVyroby\\_II.pdf&ei=fT2RUa2fBsSztAa4hoCwDA&usg=AFQjCNGeNQXTfzdT\\_zwedE6GeVFyF80seg&bvm=bv.46340616,d.Yms](https://www.google.cz/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&ved=0CC4QFjAA&url=http%3A%2F%2Fust.fme.vutbr.cz%2Fobraben%2Fopory-save%2FTechnVyroby_II.pdf&ei=fT2RUa2fBsSztAa4hoCwDA&usg=AFQjCNGeNQXTfzdT_zwedE6GeVFyF80seg&bvm=bv.46340616,d.Yms)
- [5] TF-2/350-P - Čidlo: fóliový tenzometr. T.M.E. ELECTRONIC COMPONENTS. <Http://www.tme.eu/cz/> [online]. [cit. 2013-05-13]. Dostupné z: [http://www.tme.eu/cz/details/ten-tf-2\\_350-p/dotyková-cidla/tf-2350-p/](http://www.tme.eu/cz/details/ten-tf-2_350-p/dotyková-cidla/tf-2350-p/)
- [6] Princip a výroba tenzometrů. V.T.Z. <Http://www.vtsz.cz/> [online]. [cit. 2013-05-13]. Dostupné z: <http://www.vtsz.cz/polovodicove-tenzometry.php>
- [7] Druhy soustruhů. TLUMIKOVO. <Http://www.tumlikovo.cz/> [online]. [cit. 2013-05-13]. Dostupné z: <http://www.tumlikovo.cz/druhy-soustruhu/>
- [8] Soustruh svislý (karusel). TOP-BAZAR. <Http://www.top-bazar.cz> [online]. [cit. 2013-05-13]. Dostupné z: <http://www.top-bazar.cz/stroje/kovovyroba/soustruh-svisly-karusel-112703/>
- [9] Výroba ozubení odvalováním. TUMLIKOVO. <Http://www.tumlikovo.cz> [online]. [cit. 2013-05-13]. Dostupné z: <http://www.tumlikovo.cz/vyroba-ozubeni-odvalovaci-frezou/>
- [10] Technologie strojního obrábění. STŘEDNÍ ŠKOLA ŽĎÁR NAD SÁZAVOU. <Http://sstzr.cz/> [online]. [cit. 2013-05-18]. Dostupné z:

[https://www.google.cz/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&ved=0CC0QFjAA&url=http%3A%2F%2Fmail.sstzr.cz%2Fweb%2Fdownload%2Fcat1%2Ftechnologie-strojniho-obrabeni.pdf&ei=t3GXUa-6JcGYO6yKgIAJ&usg=AFQjCNH7Te4cB0OhpNKSSCCKWnCI\\_DdyLw](https://www.google.cz/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&ved=0CC0QFjAA&url=http%3A%2F%2Fmail.sstzr.cz%2Fweb%2Fdownload%2Fcat1%2Ftechnologie-strojniho-obrabeni.pdf&ei=t3GXUa-6JcGYO6yKgIAJ&usg=AFQjCNH7Te4cB0OhpNKSSCCKWnCI_DdyLw)