



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

## APLIKACE MIKRO-SOUSTRUŽENÍ VE VYSOCE PŘESNÉ VÝROBĚ ZA POUŽITÍ DIAMANTOVÝCH NÁSTROJŮ

MICRO-TURNING APPLICATIONS IN HIGH PRECISION MANUFACTURING PERFORMED BY DIAMOND  
TOOLS

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Josef Švorc

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jan Žídek

# Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie  
Student: **Josef Švorc**  
Studijní program: Strojírenství  
Studijní obor: Základy strojírenského inženýrství  
Vedoucí práce: **Ing. Jan Židek**  
Akademický rok: 2016/17

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

## **Aplikace mikro-soustružení ve vysoce přesné výrobě za použití diamantových nástrojů**

### **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

Mikro-soustružení je moderní způsob výroby rotačních součástí např. mikro-pinů. Problémem této výrobní technologie je deformace obrobku. Touto metodou je možné vyrábět obrobky o průměru 100 µm.

### **Cíle bakalářské práce:**

Cílem bakalářské práce je vypracovat literární rešerši zaměřenou na mikro-soustružení. V rámci bakalářské práce bude zpracován přehled z vybrané výrobní technologie obsahující základní informace a nejnovější poznatky.

### **Seznam literatury:**

CHENG, K., HUO, D. Micro cutting: fundamentals and applications. New York: John Wiley & Sons Inc., 2013.

CÂMARA, M.A., J.C. Campos RUBIO, A.M. ABRÃO a J.P. DAVIM. State of the Art on Micromilling of Materials, a Review. Journal of Materials Science & Technology [online]. 2012, 28(8), 673-685 [cit. 2016-12-06]. DOI: 10.1016/S1005-0302(12)60115-7. ISSN 10050302. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1005030212601157>.

RYSAVA, Z., S. BRUSCHI, S. CARMIGNATO, F. MEDEOSI, E. SAVIO a F. ZANINI. Micro-drilling and Threading of the Ti6Al4V Titanium Alloy Produced through Additive Manufacturing. Procedia CIRP. 2016, 46, 583-586. DOI: 10.1016/j.procir.2016.04.030. ISSN 22128271. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2212827116301858>.

BRUSCHI, S., G. TRISTO, Z. RYSAVA, P.F. BARIANI, D. UMBRELLO a L. DE CHIFFRE. Environmentally clean micromilling of electron beam melted Ti6Al4V. Journal of Cleaner Production. 2016, 133, 932-941. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.06.035. ISSN 09596526. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652616307107>.

HANSEN, H.N., K. CARNEIRO, H. HAITJEMA a L. DE CHIFFRE. Dimensional Micro and Nano Metrology. CIRP Annals - Manufacturing Technology. 2006, 55(2), 721-743. DOI: 10.1016/j.cirp.2006.10.005. ISSN 00078506. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1660277306000065>.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17

V Brně, dne

L. S.

---

prof. Ing. Miroslav Píška,  
CSc.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický,  
Ph.D.  
děkan fakulty

## ABSTRAKT

Bakalářská práce je zaměřená na téma mikro-soustružení. Práce má formu literární rešerše, která si klade za cíl zpracovat přehled z dané výrobní technologie. Nejprve se zabývá definicí samotného tématu a dále fyzikálními vlastnostmi a jevy, které při mikro-obrábění nastávají. Následně pojednává o konstrukci mikro-soustružnických strojů a jejich rozdělení do kategorií a vzájemně je porovnává. Dále se zabývá řeznými nástroji vhodnými pro tento způsob obrábění a jejich výrobou a tvarováním. Poslední část práce je zaměřena na aplikaci a využití mikro-soustružení v průmyslu a na tvorbu nerotačních součástí a mikro-struktur.

### Klíčová slova

mikro-soustružení, ultra přesné soustružení, mikro-soustružnická centra, řezné nástroje, diamantové řezné nástroje, mikrostruktury, mikro-komponenty

## ABSTRACT

Bachelor thesis is focused on micro-turning. The work takes the form of a literary research, which aims to make an overview of the production technology. First, it deals with the definition of the topic itself and with the physical properties and phenomena that occur during micro-machining. Then it discusses the construction of micro lathes and their division into categories and compares them to each other. It also deals with the cutting tools suitable for this machining process and their production and shaping. The last part of the thesis is focused on the application and utilization of micro-turning in industry and on the creation of non-rotational components and micro-structures.

### Key words

micro-turning, high precision turning, micro-turning centers, cutting tools, diamond cutting tools, microstructure, micro-components

## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ŠVORC, J. *Aplikace mikro-soustružení ve vysoce přesné výrobě za použití diamantových nástrojů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 38 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jan Žídek.

---

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Aplikace mikro-soustružení ve vysoce přesné výrobě za použití diamantových nástrojů** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

---

Datum

---

Josef Švorc

## **PODĚKOVÁNÍ**

Děkuji tímto Ing. Janu Žídkovi za čas věnovaný konzultacím a za cenné připomínky a rady, které byly přínosem pro vypracování této bakalářské práce.

---

**OBSAH**

ABSTRAKT .....	4
PROHLÁŠENÍ .....	5
PODĚKOVÁNÍ.....	6
OBSAH.....	7
ÚVOD .....	8
1 DEFINICE MIKRO-SOUSTRUŽENÍ.....	9
2 FYZIKÁLNÍ VLIVY V MIKRO-SOUSTRUŽENÍ.....	10
2.1 „Size effect“ (Velikostní efekt) .....	10
2.2 Minimální jmenovitá šířka záběru ostří .....	11
2.3 Celková řezná síla.....	12
2.3.1 Ohýbání a ohybové napětí v obrobku.....	14
2.4 Excentrické účinky v obrobku.....	16
3 STROJE PRO MIKRO-SOUSTRUŽENÍ.....	18
3.1 Ultra přesné soustruhy .....	19
3.2 Průmyslová a laboratorní mikro-soustružnická centra.....	20
3.3 Porovnání .....	22
4 OBRÁBĚCÍ NÁSTROJE .....	24
4.1 Diamantové nástroje .....	24
4.1.1 Metody výroby diamantu .....	25
4.2 Další řezné materiály.....	26
4.3 Výroba řezných nástrojů.....	26
5 APLIKACE A VYUŽITÍ MIKRO-SOUSTRUŽENÍ.....	28
5.1 Tvorba nerotačních součástí .....	28
5.1.1 „Fast Tool Servos“ (Vysokorychlostní nástrojové servopohony) ..	28
5.1.2 „Fly Cutting“ (Oběžný řezný nástroj).....	30
5.2 Materiály obrobků.....	30
5.3 Využití mikro-soustružení .....	32
ZÁVĚR .....	34
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ .....	35
SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ .....	38

## ÚVOD

Základní princip mikro-soustružení se od běžného soustružení v podstatě neliší, obrobek koná hlavní pohyb a nástroj vykonává vedlejší pohyb. Velký rozdíl je však v rozměrech obrobku a konstrukci strojů, které jsou vybaveny speciálními vřeteny a posuvovými mechanismy.

Současná technika a průmysl mají směr a tendenci vše zmenšovat a vytvářet tak kompaktnější a rozměrově menší součásti, názorným příkladem jsou elektronická zařízení, která se za poslední řadu let výrazně zmenšila (mobilní telefony, počítače, mikroprocesory). Rozměry některých výrobků jsou natolik malé, že výrobci se stávají velkými odběrateli elektronových mikroskopů, aby byly schopni své výrobky vyrábět a pozorovat je. Tento trend je i ve strojírenství, a proto je zapotřebí obráběcích metod, které budou schopné vyrábět rozměrově menší součásti.

S některými výrobky vyráběných pomocí mikro-soustružení je člověk v kontaktu každý den. Mezi tyto díly se řadí například součástky hodinek (stěžejka, setrvačka), některé díly automobilů (palivová čerpadla), biomedicínské implantáty a šrouby pro fixaci kostních dlah.

Mikro-soustružení lze provozovat na konvenčních ultra přesných soustruzích či na průmyslových nebo speciálně vytvářených laboratorních mikro-soustružnických centrech. Je však zapotřebí geometricky velmi specifických řezných nástrojů, které jsou tvarovány různými metodami, mezi které patří například elektroerozivní obrábění a obrábění iontovým paprskem. Kvůli svým vlastnostem jsou často využívané nástroje z diamantu, které umožňují výrobu geometricky velmi přesných břitů.

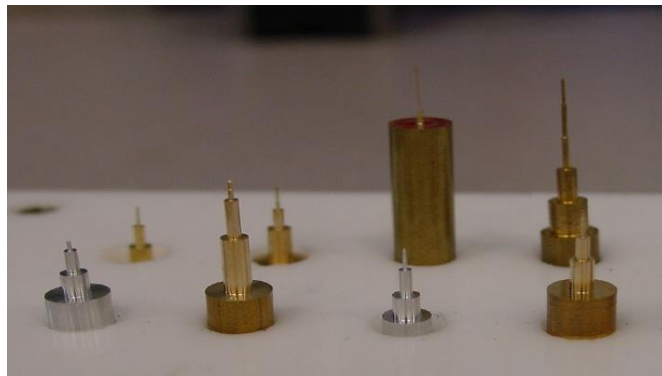
## 1 DEFINICE MIKRO-SOUSTRUŽENÍ

Mikro-soustružení je jednou z metod mikro-obrábění, do které spadá např.: mikro-frézování, mikro-broušení, mikro-vrtání.

Mikro-soustružení je efektivní způsob výroby cylindrických a rotačních symetrických součástí, jako u běžného konvenčního soustružení. Hlavní odlišností od běžného soustružení je velikost obrobků, která se u mikro-soustružení pohybuje v desítkách mikrometrů. Mikro-soustružení je možné provádět na ultra přesných strojích nebo na mikro-soustružnických centrech. Vřetena těchto strojů dosahují otáček mezi  $1000 \div 15\,000 \text{ min}^{-1}$ . Hodnota průměrné aritmetické úchylky profilu obrobené plochy  $R_a$  činí  $10 \div 100 \text{ nm}$  a velikostí posuvu na otáčku kolem  $10 \text{ nm}$ .

Jedním z důležitých aspektů daného způsobu obrábění je řezná síla, která má tendenci deformovat obrobek a dále ovlivňuje výrobní přesnost a limituje rozměry obrobků. Vzniklý povrch po obrobení může získat zrcadlový lesk, kterého se využívá například v optice (Fresnelova čočka) nebo v mechatronice (povrch pevných disků) [1]. Mikro-soustružením lze vyrábět dále součásti, jako jsou například mikro-hřídele (viz obr. 1.1), mikro-čepy, šrouby a další, které mají v průměru  $10 \div 100 \mu\text{m}$  a využívají se v hodinářském průmyslu (stěžeжка, regulační šrouby na vyvážení setrvačky), automobilním průmyslu (hřídel vstřikovacího čerpadla) a elektronice.

Na obr. 1.2 je znázorněno porovnání metod výroby a vědeckých zaměření v závislosti na rozměrové přesnosti a velikosti objektu.



Obr. 1.1 Fotografie s ukázkami vyrobených mikro-hřídelí [2].



Obr. 1.2 Porovnání metod výroby a vědeckých zaměření [3].

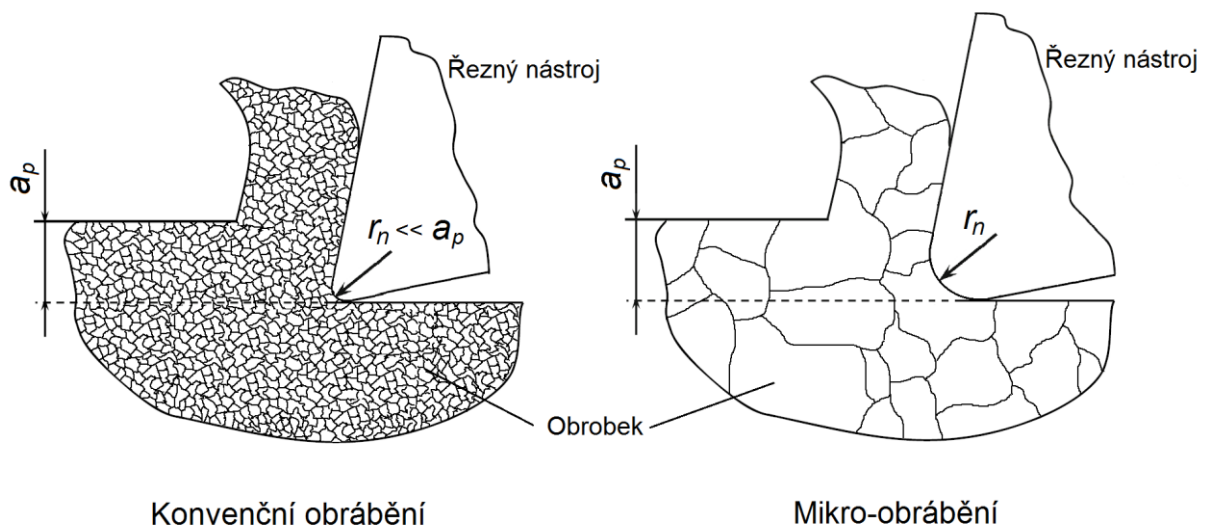
## 2 FYZIKÁLNÍ VLIVY V MIKRO-SOUSTRUŽENÍ

### 2.1 „Size effect“ (Velikostní efekt)

Zmenšování velikosti obrobků na desítky či stovky mikrometrů, přináší jisté problémy a jeden z nich je „size effect“ (velikostní efekt). Tento efekt má dva hlavní faktory, které ho ovlivňují. První je poloměr zaoblení ostří nástroje  $r_n$  a druhý je minimální šířka záběru hlavního ostří  $a_p$ , ovlivňující mechanismus odebrání vrstvy materiálu a tvorbu třísky. Dalším faktorem je velikost zrn obráběného materiálu.

Obr. 2.1.1 znázorňuje porovnání konvenčního obrábění s mikro-obráběním a dále, že mikrostruktura a velikosti zrn při mikro-obrábění jsou srovnatelně velké s poloměrem zaoblení ostří nástroje a minimální hloubkou záběru. Typická velikost zrn obráběných materiálů se pohybuje mezi 100nm až 100 $\mu$ m, přičemž minimální hloubka záběru může být pouze pár mikrometrů. Při konvenčním makro-obrábění je materiál považován za izotropní a homogenní, toto však u mikro-obrábění nelze uplatnit z důvodů, že tvorba třísky a obrobená plocha vzniká individuálně v zrnech materiálů. Jelikož materiál nelze považovat za izotropní a homogenní, vzniká tak problematika s počítačovým modelováním a simulacemi dané obráběcí metody.

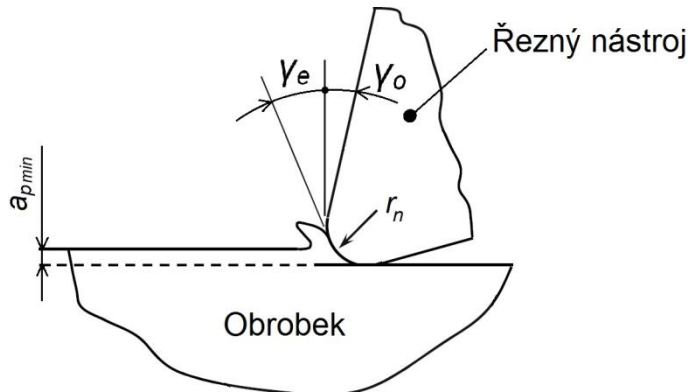
Mikrostruktura má dále vliv na tvorbu třísky, mechanismu odebrání vrstvy a změnu velikosti řezné síly v průběhu obrábění. Ovládnutím těchto aspektů je získávána kontrola nad výslednou kvalitou obráběného povrchu [1].



Obr. 2.1.1 Porovnání konvenčního obrábění s mikro-obráběním v závislosti na velikosti zrn, minimální šířce záběru a poloměru ostří [1].

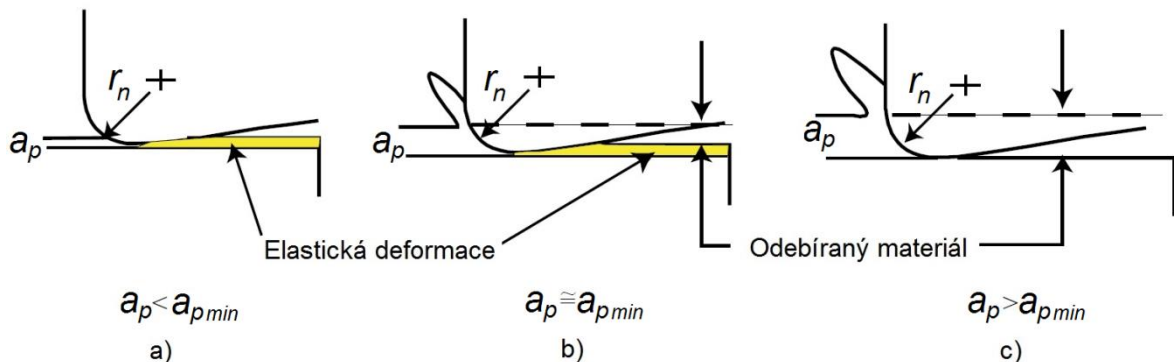
## 2.2 Minimální jmenovitá šířka záběru ostří

V mikro-soustružení nemusí tříška vznikat, pokud požadovaná šířka záběru  $a_p$  je menší než je minimální jmenovitá šířka záběru ostří  $a_{pmin}$ . V této situaci dochází k rýhování či skluzu nástroje po povrchu obrobku. Tento problém souvisí s „size effect“ a tedy, že šířka záběru je velikostně srovnatelná s poloměrem zaoblení ostří nástroje  $r_n$ . Ačkoliv geometrie nástroje může být kladná a tedy i úhel čela  $\gamma_o$  (v ortogonální rovině) je kladný, na špičce nástroje dochází při malé šířce záběru (která je menší než minimální jmenovitá šířka záběru), že efektivní uhel čela  $\gamma_e$  je záporný. Grafický popis změny úhlu čela je na obr. 2.2.1 [4].



Obr. 2.2.1 Znárodnění záporné geometrie při šířce záběru srovnatelné s minimální jmenovitou šířkou záběru [5].

Minimální jmenovitá šířka záběru je šířka záběru hlavního ostří nástroje, při které dochází k odebrání materiálu ve formě třísky a s co nejmenší elastickou deformací neodebírané vrstvy na obrobku v průběhu obrábění. Obr. 2.2.2 znázorňuje tvorbu třísky nástrojem s poloměrem zaoblení ostří  $r_n$ , měnící se šířkou záběru  $a_p$  a minimální jmenovitou šířkou záběru představuje  $a_{pmin}$ . V případě, že šířka záběru je menší než minimální jmenovitá (viz obr. 2.2.2 (a)) dochází pouze k elastické deformaci povrchu obrobku, nikoliv ke vzniku třísky. Pokud je šířka záběru přibližně totožná s minimální jmenovitou šířkou záběru (viz obr. 2.2.2(b)), začíná proces odebrání materiálu kdy část odebírané vrstvy je ve formě třísky odstraněna a část se elasticky deformuje a povrch je tvářen nástrojem. Jakmile, velikost šířky záběru hlavního ostří překročí minimální hloubku záběru (viz obr. 2.2.2 (c)), elastická deformace je výrazně redukována a odebíraná vrstva je odstraňována v podobě třísky [1,4].



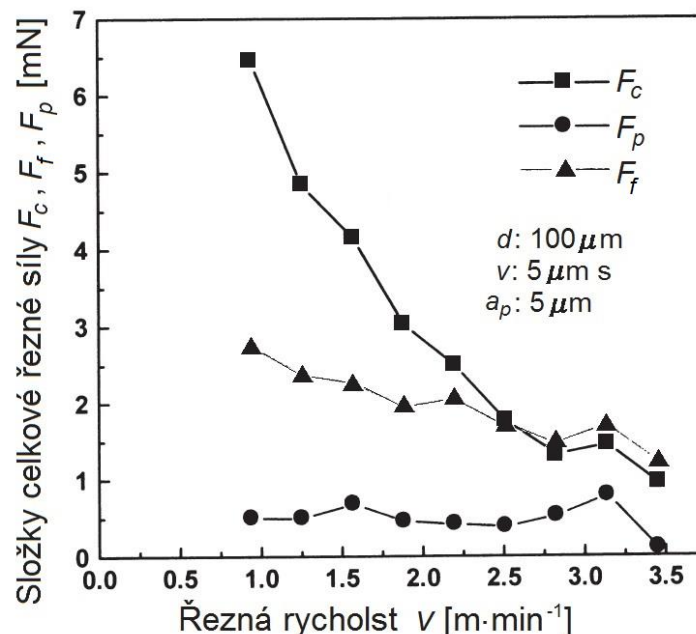
Obr. 2.2.2 Schematicky znázorněn efekt minimální jmenovité šířky záběru [3].

Minimální jmenovitá šířka záběru závisí především na poměru šířky záběru a velikosti poloměru zaoblení ostří nástroje, dále na obráběném materiálu a jeho mechanických vlastnostech a také na tribologických podmínkách mezi obrobkem a řezným nástrojem [4,6].

Znalost minimální jmenovité šířky záběru je nezbytná pro nastavení řezných podmínek, pro zajištění řádného a plynulého úběru materiálu a vyhnutí se možnému rýhování a skluzu nástroje. Tato hodnota však nemůže být přesně vyčíslena, protože je závislá na druhu materiálu, a proto se udává v rozsahu mezi 5 % a 40 % velikosti poloměru zaoblení ostří nástroje [1,4,6,7].

### 2.3 Celková řezná síla

Se snižujícím se průměrem obrobku na desítky mikrometrů, dochází ke snížení tuhosti obrobku, tedy schopnosti odolávat řezné síle, aby se obrobek nevychyloval a neohýbal. Proto je průběh celkové řezné síly jedním z nejdůležitějších faktorů ovlivňující přesnost obrábění. Hodnota celkové řezné síly musí být dostatečně malá, aby nezpůsobovala v obrobku plastickou deformaci. Redukování velikosti celkové řezné síly výrazně souvisí s měrnou produktivitou obrábění *MPO*, snížením vychýlení nástroje, též jeho opotřebení a s výslednou úchylnou přesnosti. Vzájemný vztah mezi jednotlivými složkami celkové řezné síly a řeznou rychlostí je znázorněn na obr. 2.3.1 při obrábění mosazi, kde je uvažována stejná šířka záběru  $5\ \mu\text{m}$  s posuvem za sekundu  $5\ \mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ , z toho lze usoudit, že řezná síla klesá s rostoucí řeznou rychlostí [4,8].



Obr. 2.3.1 Pokles velikosti jednotlivých složek celkové řezné síly v závislosti na rostoucí řezné rychlosti, při konstantním posuvu a šířce záběru [8].

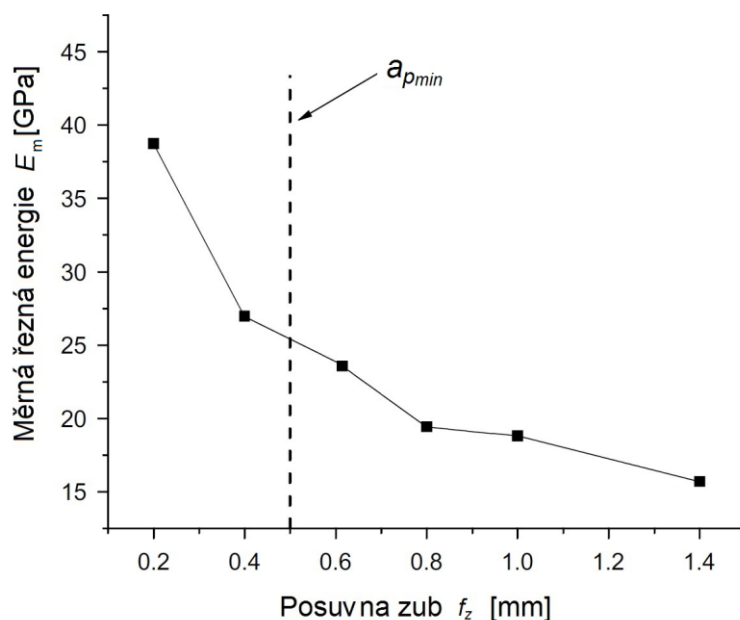
Řezná síla (tangenciální složka celkové řezné síly) přímo souvisí s formováním třísky na čele nástroje, s vyhnutím a deformací řezného nástroje i případnou jeho destrukcí. Malé hloubky záběru způsobují negativní geometrii nástroje (viz obr. 2.2.1), zvyšují tření na čele nástroje a elastickou deformaci obrobku podél hlavního hřbetu a to vše ovlivňuje měrnou řeznou energii  $E_m$  [ $J \cdot mm^{-3}$ ,  $N \cdot mm^{-2}$ , MPa] [4]. Měrná řezná energie při ortogonálním řezu je popisována, jako energie spotřebována na odstranění jednotky objemu a vypočítá se pomocí vztahu (2.1) [1].

$$E_m = \frac{P}{MPO} = \frac{F_c \cdot v}{v \cdot b \cdot a_p} = \frac{F_c}{b \cdot a_p} \quad [J \cdot mm^{-3}, N \cdot mm^{-2}, MPa] \quad (2.1)$$

kde:

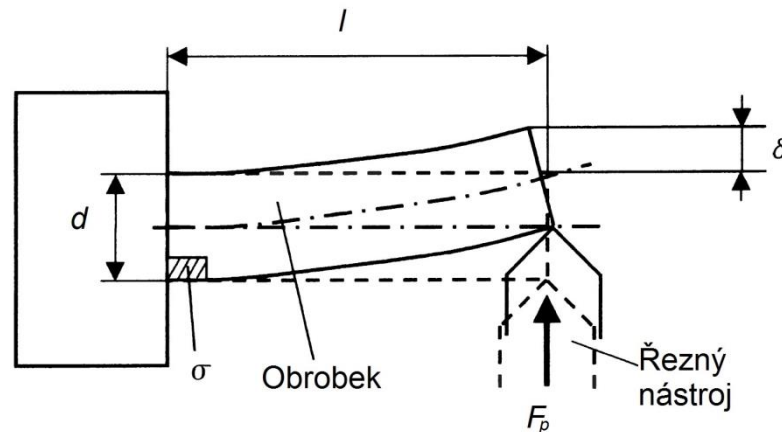
$P$	[ $N \cdot mm \cdot s^{-1}$ ]	- energie spotřebovaná na řezný proces
$MPO$	[ $mm^3 \cdot s^{-1}$ ]	- měrná produktivita obrábění, tedy množství odebraného materiálu za jednotku času
$F_c$	[N]	- řezná síla (tangenciální složka celkové řezné síly)
$v$	[ $m \cdot min^{-1}$ ]	- řezná rychlost
$b$	[mm]	- jmenovitá šířka řezu
$a_p$	[mm]	- šířka záběru hlavního ostří nástroje

Na obr. 2.3.2 je znázorněna závislost měrné řezné energie na šířce záběru zubu při mikro-frézování a jak lze vidět s klesající plochou řezu měrná řezná energie narůstá. Závislosti měrné řezné energie na ploše záběru má stejný charakter i u mikro-soustružení a mikro-broušení [1].



Obr. 2.3.2 Měrná řezná energie v závislosti na posuvu na zub  $f_z$  v mikro-frézování [9].

## 2.3.1 Ohýbání a ohybové napětí v obrobku



Obr. 2.3.3 Mikro-hřídel vyhnutá od působení síly [8].

Obr. 2.3.3 znázorňuje ohyb obrobku při mikro-soustružení, a to představuje další problematiku při obrábění velmi malých průměrů u mikro-čepů a mikro-hřídelí pohybující se v desítkách či stovkách mikrometrů.

Lze stanovit z obr. 2.3.3 pomocí pasivní síly (radiální složka celkové řezné síly)  $F_p$  a vychýlení obrobku  $\delta$  tuhost daného obrobku a to pomocí vztahu (2.1).

$$k = \frac{F_p}{\delta} \quad [N \cdot mm^{-1}] \quad (2.2)$$

kde:

$k$	$[N \cdot mm^{-1}]$	- tuhost obrobku
$F_p$	$[N]$	- pasivní síla (radiální složka celkové řezné síly)
$\delta$	$[mm]$	- vychýlení obrobku

Vychýlení obrobku  $\delta$  může být vypočtené pomocí vztahu (2.3).

$$\delta = \frac{F_p \cdot l^3}{3 \cdot E \cdot I_x} = \frac{64 \cdot F_p \cdot l^3}{3 \cdot \pi \cdot E \cdot d^4} \quad [mm] \quad (2.3)$$

kde:

$F_p$	$[N]$	- pasivní síla (radiální složka celkové řezné síly)
$l$	$[mm]$	- délka hřídele (obrobku)
$E$	$[MPa]$	- modul pružnosti v tahu (youngův modul)
$I_x$	$[mm^4]$	- kvadratický moment průřezu
$d$	$[mm]$	- průměr hřídele

Ze vztahu (2.2) a (2.3) lze dosazením docílit vztahu (2.4) pro výpočet tuhosti  $k$  [1].

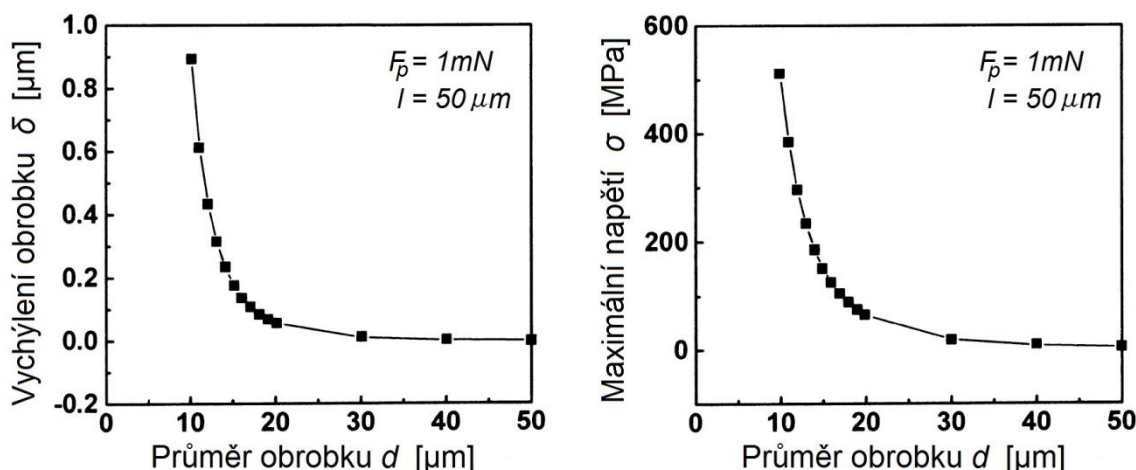
$$k = \frac{3 \cdot E \cdot I_x}{l^3} = \frac{3 \cdot \pi \cdot E \cdot d^4}{64 \cdot l^3} \quad [N \cdot mm^{-1}] \quad (2.4)$$

Ohybové napětí  $\sigma$  na konci hřídele v místě vyznačeném na obr. 2.3.3 se vypočítá pomocí vztahu (2.5) [1,8].

$$\sigma = \frac{M_o}{W_o} = \frac{32 \cdot F_p \cdot l}{\pi \cdot d^3} \quad [MPa] \quad (2.5)$$

kde:

$M_o$  [N·mm] - ohybový moment deformující těleso  
 $W_o$  [mm<sup>3</sup>] - modul průřezu v ohybu



Obr. 2.3.4 Grafy znázorňující vychýlení obrobku a ohybového napětí v závislosti na velikosti průměru obráběného obrobku [8].

Vychýlení rotační hřídele o délce 50  $\mu\text{m}$  a maximální ohybové napětí od působící radiální síly 1 mN a jejich závislost na velikosti průměru dané hřídele zobrazuje obr. 2.3.4. Při průměru obrobku 20  $\mu\text{m}$  je hodnota vychýlení 0,04  $\mu\text{m}$  a ohybové napětí 80 MPa to je nižší než hodnota, která by způsobila plastickou deformaci [8].

Při porovnání tuhosti a ohybového napětí obráběné mikro-hřídele A a hřídele běžných rozměrů B ze stejného materiálu. Kde hřídel A má délku  $l_A$  a průměr  $d_A$  a hřídel B má délku  $l_B$  a průměr  $d_B$ . Tyto hřídele mají stejný štíhlostní poměr  $d/l$  a rozměrové měřítko  $M$  je definované jako  $l_B/l_A$ . Vztahy mezi modulem pružnosti v tahu, délkou, průměrem, kvadratickým momentem a hmotností jsou definovány v (2.6) [1].

$$E_B = E_A, \quad l_B = M \cdot l_A, \quad d_B = M \cdot d_A, \quad I_{xB} = M^4 \cdot I_{xA}, \quad m_B = M^3 \cdot m_A \quad (2.6)$$

Dosazením vztahu (2.6) do (2.2) vznikne spojitost mezi tuhostmi hřídele A a B.

$$k_B = \frac{3 \cdot E_B \cdot I_{xB}}{l_B^3} = \frac{3 \cdot E_A \cdot M^4 \cdot I_{xA}}{M^3 l_A^3} = M \cdot k_A \quad [N \cdot \text{mm}^{-1}] \quad (2.7)$$

Ze vztahu (2.8) [1] lze odvodit, že se snižujícím se měřítkem, stejně rychle klesá i tuhost v ohybu daného materiálu. Pokud je hřídel A i B namáhány stejně velkou silou za stejných podmínek, tedy hloubka záběru a posuv jsou nastaveny tak, aby vyvolali stejné velké silové zatížení, dosazením vztahu (2.6) do rovnice (2.5) vznikne vztah (2.8) a (2.9) [1].

$$\sigma_B = \frac{32 \cdot F_p \cdot l_B}{\pi \cdot d_B^3} = \frac{32 \cdot F_p \cdot M \cdot l_A}{\pi \cdot M^3 d_A^3} = \frac{1}{M^2} \cdot \sigma_A \quad [MPa] \quad (2.8)$$

$$\sigma_A = M^2 \cdot \sigma_B \quad (2.9)$$

Vztah (2.8) ukazuje, že pod stejně velkým zatížením, hodnota maximálního ohybového napětí na hřídeli A je  $M^2$  krát větší než napětí na hřídeli B a to znamená, že obrobky vytvářené pomocí mikro-soustružení mají větší pravděpodobnost, že dosáhnou maximálního ohybového napětí při procesu obrábění.

## 2.4 Excentrické účinky v obrobku

Aby byla dosažena optimální rezná rychlost, musí se se zmenšujícím průměrem obrobků vzrůstat i otáčky vřetene, které jsou zpravidla vyšší než otáčky při běžném konvenčním soustružení. Nicméně radiální házení vřeten při mikro-soustružení není jednoduché snížit a ve skutečnosti mohou mít větší míru nepřesnosti než konvenční vřetena. Proto je potřeba analyzovat „size effect“ na vychýlení mikro-hřídele při zatížení dostředivou silou od vřetene při radiálním házení vřetene.

Porovnání dvou hřídelí (stejně z kapitoly 2.3.1), které jsou uchyceny ve dvou vřetenech, jejichž radiální házení má hodnotu  $\varepsilon_A$  a  $\varepsilon_B$ , která představují vychýlení těžiště průřezu (kolmého na osu otáčení) od osy otáčení. A úhlová rychlost  $\omega_A$  mikro-hřídele A je  $M$  krát vyšší než úhlová rychlost  $\omega_B$  hřídele B při zachování stejné obvodové rychlosti (viz vztah 2.10). Dostředivá síla od vřetene se vypočítá dle vztahu (2.11) [1].

$$\varepsilon_B = \varepsilon_A, \quad \omega_A = M \cdot \omega_B \quad (2.10)$$

$$F_e = m \cdot \omega^2 \cdot \varepsilon \quad (2.11)$$

kde:

$\varepsilon$	[m]	- excentricita
$\omega$	[rad·s <sup>-1</sup> ]	- úhlová rychlost
$F_e$	[N]	- dostředivá síla působící na obrobek

Vychýlení hřídelí a ohybového napětí za působení dostředivé síly od vřetene na hřídel A a hřídel B je možné získat použitím vztahů (2.3) a (2.5). Využitím rovností ve vztahu (2.6) a (2.10) po dosazení do rovnice (2.11) vzniká vztah (2.12) mezi dostředivými silami u jednotlivých hřídelí [1].

$$F_{eB} = m_B \cdot \omega_B^2 \cdot \varepsilon_B = M^3 \cdot m_A \cdot M^{-2} \cdot \omega_A^2 \cdot \varepsilon_A = M \cdot F_{eA} \quad [N] \quad (2.12)$$

Dosazením vztahů (2.6) a (2.10) do rovnice (2.3) vznikne rovnost mezi vychýlením hřídelí (2.13) A a B [1].

$$\delta_B = \frac{F_{eB} \cdot l_B^3}{3 \cdot E_B \cdot I_B} = \frac{M \cdot F_{eA} \cdot M^3 \cdot l_A^3}{3 \cdot E_A \cdot M^4 \cdot I_A} = \delta_A \quad [mm] \quad (2.13)$$

A ohybové napětí lze získat z rovností (2.6) a (2.10) a následným dosazením do rovnice (2.5) a tím vzniká vztah (2.14) a (2.15) [1].

$$\sigma_B = \frac{32 \cdot F_{eB} \cdot l_B}{\pi \cdot d_B^3} = \frac{32 \cdot M \cdot F_{eA} \cdot M \cdot l_A}{\pi \cdot M^3 d_A^3} = \frac{1}{M} \cdot \sigma_A \quad [MPa] \quad (2.14)$$

$$\sigma_A = M \cdot \sigma_B \quad (2.15)$$

Výsledek rovnosti (2.16) znázorňuje, že i zmenšený hřídel A poměrem  $M$  a úhlová rychlost otáčení vřetene zvětšená stejným poměrem způsobí, že vychýlení hřídele  $\delta_A$  při působení dostředivé síly od vřetene způsobí stejně velké vychýlení  $\delta_B$  i u větší hřídele B. A ohybové napětí od působící síly v hřídele A je  $M$  krát větší než na hřídele B. To znamená, že mikro-hřídele jsou více citlivé na dostředivé síly od vřetene a působí velké vychýlení obrobků a je větší pravděpodobnost, že napětí v obrobku přesáhne hodnotu maximálního ohybového napětí při procesu obrábění.

### 3 STROJE PRO MIKRO-SOUSTRUŽENÍ

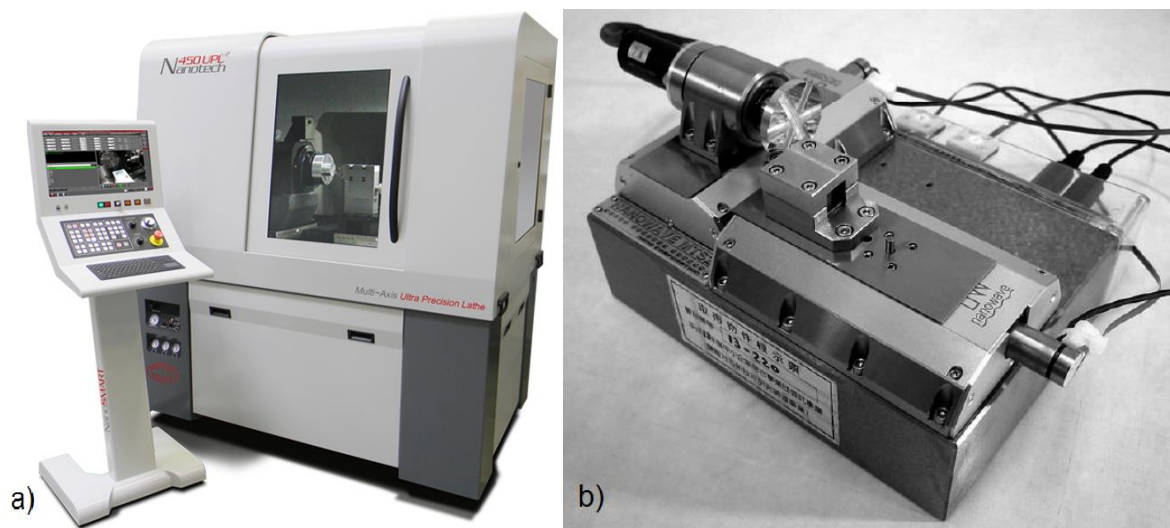
Při výrobě mikro-komponentů aplikovaných v nejrůznějších průmyslových odvětvích od automobilního průmyslu přes biomedicínu, hodinářství, mechatroniku a optiku. Jsou na tyto výrobky kladeny velké požadavky a to především:

- vysoká rozměrová přesnost (běžně menší než  $1\ \mu\text{m}$ )
- geometrická přesnost (úchylna kruhovitosti běžně kolem  $50\ \text{nm}$ )
- průměrná aritmetická úchylna profilu obrobené plochy  $R_a$  činí  $10\div 100\ \text{nm}$

Tyto požadavky znamenají pro výrobní stroje vysoké nároky na konstrukci a prostředí, v kterém jsou používány. Hlavní nároky jsou tedy:

- statická a dynamická tuhost
- nízké vibrace (dobré tlumící vlastnosti)
- vysoká přesnost posuvů
- vysoká přesnost řízení posuvů
- vysoká teplotní stabilita
- vysoká vlastní frekvence stroje

Metoda mikro-soustružení se provádí pouze na ultra přesných soustružích (viz obr. 3.1 (a)) nebo na mikro-soustružnických centrech (viz obr. 3.2 (b)) [1,4,10].



Obr. 3.1 Stroje pro mikro-soustružení. a) Nanotech 450UPL v2 (Moore Nanotechnology Systems, USA) [11]. b) Laboratorní mikro-soustružnické centrum [12].

### 3.1 Ultra přesné soustruhy

Jsou komerčně vyráběné stroje pro vysoce přesné obrábění, které jsou velmi nákladné a rozměrné. Ve většině případů jsou tyto stroje zcela jednoúčelově zaměřené na dané odvětví průmyslu, například na obr. 3.1.1 je ultra přesný soustruh od společnosti DAC International specializovaný na čočky pro využití v optice [13].

U těchto strojů se pokládá největší důraz na výslednou rozměrovou přesnost a kvalitu povrchu, a proto je velmi důležité, aby pohony posuvů a vřeteno se pohybovali s co největší přesností.



Obr. 3.1.1 DAC ALM Lens Lathe (DAC International, USA) [13].

U konstrukce rámu, která nese jednotlivé části stroje je velmi důležité, aby měla co nejlepší statickou a dynamickou tuhost a samozřejmě i co nejmenší tepelnou roztažnost. Volba materiálu konstrukce je tedy zásadní pro chod celého stroje. Nejčastěji se volí litina a granit (viz obr. 3.1.1), protože mají nízkou teplotní roztažnost, dobře tlumí chvění a vibrace mají velkou statickou tuhost. V poslední době se začíná používat minerální litina neboli polymerbeton. Minimální teplotní roztažnost při provozu je také docílena chlazením jednotlivých částí stroje vodou, která udržuje tepelně ovlivněné části na konstantní teplotě a zaručuje tak minimální roztažnost. Je samozřejmostí, že takové stroje musí být umístěny v ideálních prostorech s konstantní teplotou a minimálními vibracemi v okolí stroje [4,10].



Obr. 3.1.2 Aerostatická vřetena od firmy Toshiba [14].

Přesné vřeteno je jednou z nejdůležitějších součástí celého soustruhu, protože i drobné radiální či axiální házení vřetena má velký dopad na kvalitu a přesnost povrchu. Nejčastěji používanými vřeteny jsou aerostatická vřetena (viz obr. 3.1.2) a hydrostatická vřetena, kvůli absenci ložisek, tedy třecích elementů mohou dosahovat tyto vřetena mnohem vyšších otáček, která jsou především potřebná u mikro-frézování (až  $200\,000\text{ min}^{-1}$ ). Aerostatická mají menší tuhost a teplotní deformaci než olejová hydrostatická, ale jsou vhodná pouze pro nižší nebo střední zatížení. Hydrostatická vřetena jsou vhodnější pro větší stroje s vyšším zatížením. Radiální a axiální házení těchto vřeten se pohybuje do  $0,1\ \mu\text{m}$ .

Pohony posuvů jsou nejčastěji řešeny pomocí lineárního motoru nebo piezoelektrického pohonu. Výhodou piezoelektrického pohonu je, že nevznikají odchylky spojené s třením a opotřebením a nemá žádnou vůli, ale je vhodný pouze na velmi malé polohování (desetiny milimetru). Zatímco pomocí lineárního motoru je možné polohovat na mnohonásobně větší vzdálenosti (desítky až stovky milimetrů) a odchylka rovinnosti na vzdálenost  $100\text{ mm}$  je  $0,1\ \mu\text{m}$ . Jeho další výhodou je i vyšší tuhost, zrychlení a opakovatelnost [1,4,10].

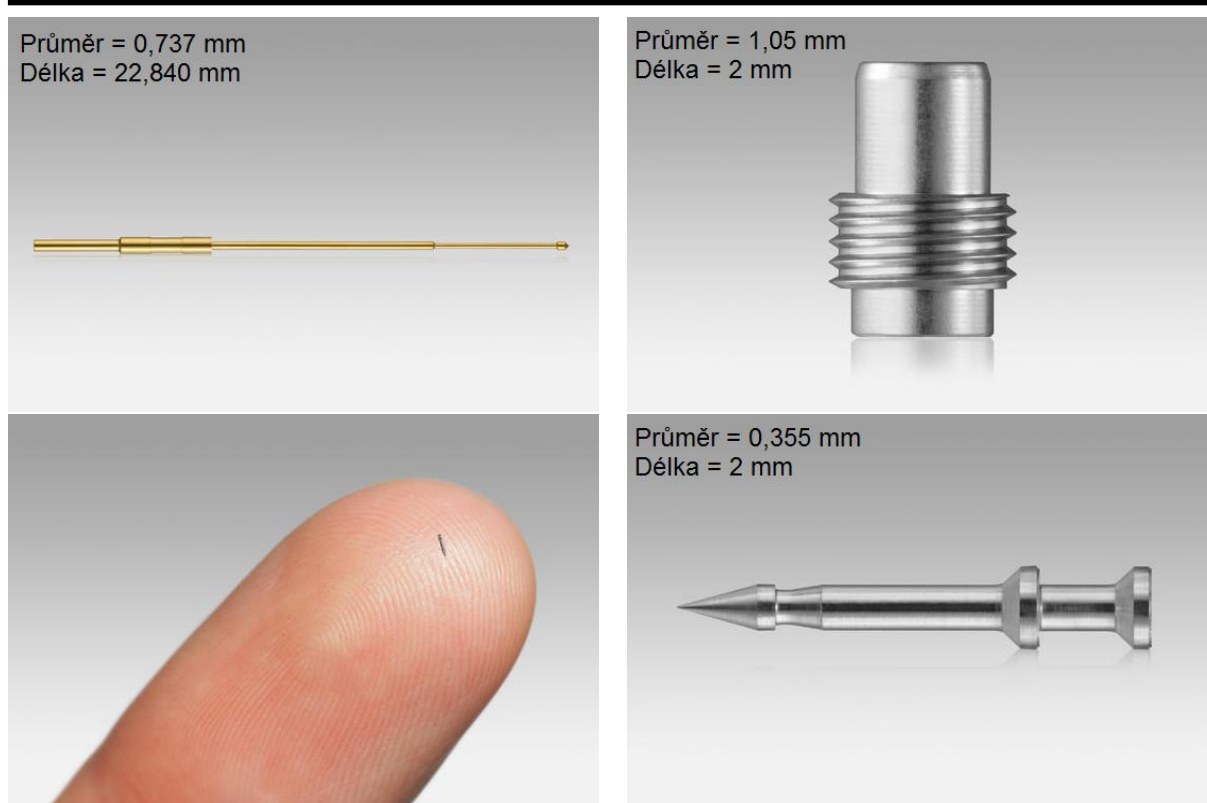
### 3.2 Průmyslová a laboratorní mikro-soustružnická centra

Hlavní zaměření mikro-soustružnických center je vyrábět co nejmenší součástky s vysokou přesností. Průmyslová centra jsou komerčně vyráběné stroje pro automatizovanou výrobu, avšak laboratorní centra jsou vyvíjeny vědci a inženýry pro vědecké účely a testování. Hlavním rozdílem je velikost těchto strojů.

Největší zastoupení v průmyslových centrech mají soustruhy švýcarského typu, které byly navrženy na výrobu součástí pro hodinářství, tedy pro velmi malé a přesné rotační součásti, jako například šrouby, stěžejky a hřídele. Tyto stroje se nyní dají použít v mnoha jiných aplikacích kde je pro tyto miniaturní součástky využití, například automobilní průmysl, medicínský průmysl a elektronice [1]. Na obr. 3.2.1 lze vidět jeden ze strojů společnosti Tornos SA a na obr. 3.2.2 jsou zobrazeny součástky vyrobeny pomocí mikro-soustruhu švýcarského typu.



Obr. 3.2.1 Švýcarský typ soustruhu Tornos Swiss Nano (Tornos SA, Švýcarsko) [15].



Obr. 3.2.2 Příklad součástí obráběných švýcarským typem soustruhu [16].

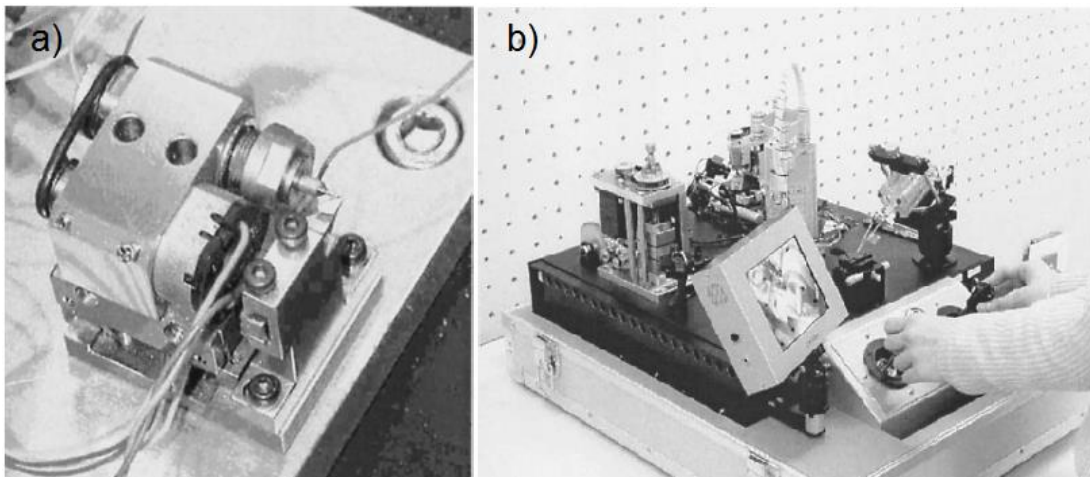
Laboratorní mikro-soustružnická centra jsou velmi malá a přesná centra, která se liší od průmyslových mikro-soustružnických center hlavně svojí velikostí, která je v porovnání mnohonásobně menší, a proto jsou velmi praktické a lehce přenosné.

Mezi tyto laboratorní centra se řadí například mikro-soustružnické centrum, které prezentoval Makoto Tanaka [17] (viz obr. 3.2.3 (b)). Rozměry tohoto přenosného stolního centra činí 500 x 700 mm. Toto centrum obsahuje mikro-frézku, mikro-lis a mimo jiné mikro-soustruh, který se řadí mezi jedny z nejmenších na světě a je 32 mm dlouhý, 25 mm široký a 30,5 mm vysoký. Soustruh vyvinul T.Kitahara a kol. [18] a je zobrazen na obr. 3.2.3 (a). Vřeteno se otáčí maximálními otáčkami  $10\,000\text{ min}^{-1}$  je poháněno stejnosměrným motorem o výkonu 1,5 W. Velikost posuvu je 50 nm a pohon posuvu je obstarán pomocí piezoelektrického motoru s polohovou přesností  $0,5\text{ }\mu\text{m}$ . Rozměrová přesnost obrobků je  $1,5\text{ }\mu\text{m}$  a minimální průměr, kterého bylo experimentálně dosaženo při obrábění mosazi je  $60\text{ }\mu\text{m}$  [1,17,18].

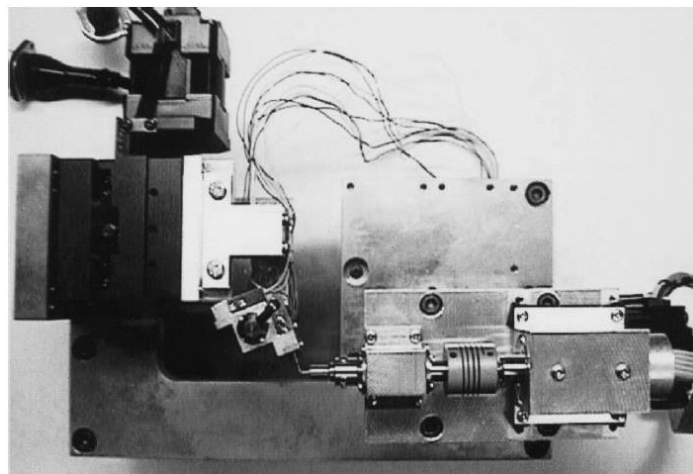
Dalším laboratorní mikro-soustružnické centrum je zobrazeno na obr. 3.2.4, které vyvinul Lu a kol. [8]. Toto centrum lze umístit pod optický mikroskop a následně kontrolovat a řídit průběh obrábění. Výkon stejnosměrného motoru pohánějící vřeteno je pouhých 0,5 W a otáčky vřetena mají rozsah  $3\,000\div 15\,000\text{ min}^{-1}$ . Minimální průměr, který lze upnout do sklíčidla je 0,3 mm a minimální průměr, který lze vysoustružit z mosazi je  $10\text{ }\mu\text{m}$ . Centrum je vybavené mikro-dynamometrem, který zaznamenává jednotlivé složky celkové řezné síly v průběhu obrábění [1,8].

Huo a kol. [19] postavili malé laboratorní mikro-soustružnické centrum o rozměrech 400 x 600 mm pro výrobu mikro-součástek z mědi, hliníku či oceli. Pro pohon vřetene se používá aerostatické vřeteno a pohon posuvů zajišťují lineární motory.

V porovnání s průmyslovými centry mají laboratorní centra jednodušší design a skládají se z méně komponentů, nejsou komerčně prodávány a jsou vyvíjeny pro laboratorní účely.



Obr. 3.2.3 a) Mikro-soustruh [18]. b) Laboratorní mikro-soustružnické centrum [17].



Obr. 3.2.4 Laboratorní mikro-soustružnické centrum [8].

### 3.3 Porovnání

Ultra přesné soustruhy, které zabírají svojí rozlohou několik metrů čtverečných a představují vysokou investici a velkou energetickou náročnost nejsou vždy nejvhodnější variantou pro výrobu mikro-komponentů. Zatímco mikro-soustružnická centra mají výhody oproti komerčním ultra přesným strojům, že mají menší vliv na životní prostředí, nižší náklady na výrobu a pořizovací cenu a jsou flexibilnější.

V porovnání mikro-soustružnická centra s ultra přesnými soustruhy vyžadují menší množství materiálu a méně komponentů na výrobu. Tím získávají mikro-soustružnická centra vyšší vlastní frekvenci, kvůli menší celkové hmotnosti stroje oproti ultra přesným strojům. Vyšší vlastní frekvence je žádaná vlastnost pro takové stroje, kvůli vyššímu rozsahu otáček vřetene bez nebezpečí rezonance stroje vzniklé od řezné síly. Mikro-soustružnická centra mají z pravidla nižší amplitudu vibrací než ultra přesné soustruhy [1,10].

Mikro-soustružnické centra zpravidla potřebují pro svůj chod plochu menší jak 1 m<sup>2</sup> včetně ovládacího zařízení, výjimkou jsou některá průmyslová centra, která mají velké zásobníky polotovarů. Tato plocha je pouze malou částí, kterou vyžadují ultra přesné soustruhy.

Konvenční ultra přesné soustruhy vyžadují pro svůj chod a dosažení výsledné přesnosti prostory s udržovanou konstantní teplotou a složitá zařízení pro izolaci vibrací. U mikro-soustružnických center není zapotřebí investovat do vybavení kontrolující teplotu a izolující vibrace, protože je dostačující vhodný výběr místa pro dané zařízení. U prostornějších zařízení je tato možnost komplikovanější [1,8,10].

Tabulka 3.3.1 porovnává vybrané aspekty mikro-obrábění za použití ultra přesných soustruhů a mikro-soustružnických center.

Tab. 3.3.1 Porovnání mezi mikro-soustružnickými centry a ultra přesnými soustruhy [1].

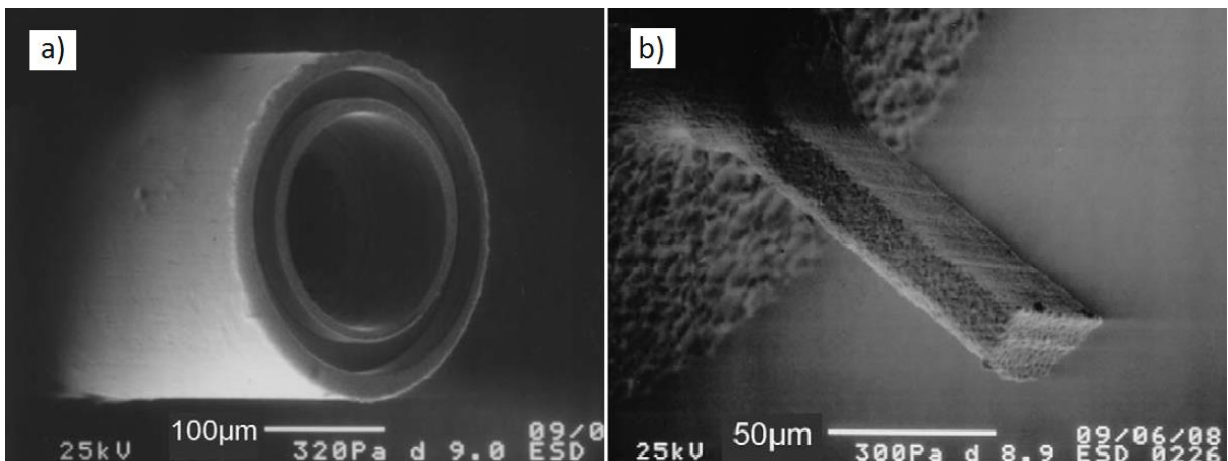
	Mikro-soustružnická centra	Ultra přesné soustruhy
Materiál nástroje	Slinutý karbid, Povlakované slinuté karbidy, KNB, Diamant (monokrystalický/polykrystalický)	Přírodní diamant (monokrystalický)
Minimální průměr obrobku	10 ÷ 2000 $\mu\text{m}$	1 mm a více (desítky milimetrů)
Rozměrová přesnost	< 10 $\mu\text{m}$	< 1 $\mu\text{m}$
Výsledný povrch	< 100 nm Ra	< 20 nm Ra
Rozloha stroje	Kolem 1 m <sup>2</sup>	Běžně 3 ÷ 5 m <sup>2</sup>
Minimální jmenovitá šířka záběru	1 ÷ 10 $\mu\text{m}$	0,1 ÷ 10 $\mu\text{m}$
Aplikace	Různé aplikace, které vyžadují mikro-komponenty.	Elektrotechnický a optický průmysl.

## 4 OBRÁBĚCÍ NÁSTROJE

Materiály mikro-soustružnických nástrojů a jejich správná volba jsou nezbytné pro mikro-soustružnický proces. Oproti mikro-frézování, kde mikro-frézy musí mít miniaturní rozměry (průměr menší než 1 mm) při mikro-soustružení tomu tak nemusí být. Výjimkou jsou například nože pro vnitřní soustružení (viz obr. 4.1 a)) a upichovací nože (viz obr. 4.1 b)).

Rozměry nástrojů a obzvláště poloměr zaoblení ostří  $r_n$  určují minimální dosažitelné rozměry obrobků a kvalitu povrchu. Poloměr zaoblení ostří nástroje určuje ostrost hlavního ostří nástroje a ovlivňuje tak minimální jmenovitou šířku záběru ostří  $a_{pmin}$  a efektivní uhel čela  $\gamma_e$ .

Nástroje vyrobené z přírodního monokrystalického diamantu jsou používány v ultra přesném obrábění, jejich nevýhodou je však afinita uhlíku mezi nástrojem a obrobkem. Pro obrábění materiálů, které pomocí diamantových nástrojů nelze obrábět se používají nástroje ze slinutých karbidů a kubický nitrid boru [1,20].



Obr.4.1 a) Vysoustružený otvor v mosazném polotovaru [20]. b) Mikro-soustružnický nástroj ze slinutého karbidu o šířce 50  $\mu\text{m}$  [20].

### 4.1 Diamantové nástroje

Nástroje s břity vyrobené z diamantu se v mikro-obrábění využívají převážně kvůli své vysoké tvrdosti a výrazně menšímu poloměru zaoblení ostří  $r_n$  oproti ostatním rezným materiálům. Vysoká tvrdost výrazně redukuje opotřebení funkčních ploch nástroje a umožňuje obrábět i velmi tvrdé a křehké materiály jako je například keramika nebo slitiny křemíku. Diamantové nástroje jsou využívány převážně při obrábění pomocí ultra přesných soustruhů, kde se malého poloměru zaoblení ostří využívá na výrobu vysoce kvalitních povrchů.

Mezi vlastnosti diamantu patří vysoká teplota tavení více jak 4000  $^{\circ}\text{C}$  a extrémní chemická inertnost, vysoká tepelná vodivost a modul pružnosti, nízký koeficient tření, který usnadňuje odvádění třísky a snižuje tak opotřebení funkčních ploch nástroje. Diamant krystalizuje v kubické soustavě a krystaly mají nejčastěji tvar osmistěnu. Homogenní struktura diamantu dovoluje naostřit rezné nástroje s velmi malým poloměrem zaoblení ostří až 20 nm a to sníží i minimální jmenovitou šířku záběru ostří [1,21].

Mezi nepříznivé vlastnosti patří křehkost, která souvisí s konstrukcí stroje a zamezením rázů a vibrací. Dále diamantové nástroje nejsou vhodné k obrábění železných kovů z důvodu afinity k uhlíku. Při obrábění železných kovů pomocí diamantových nástrojů dochází v nástroji k difuzi uhlíku z rezného nástroje do obráběného materiálu a způsobuje tak opotřebení funkčních ploch zejména čela nástroje. Z části lze tomuto jevu předejít snížením rezné rychlosti a tak snížit teplotu v místě řezu a snížit difuzi uhlíku [4].

Proto je vhodné diamantové nástroje používat na obrábění materiálů jako jsou například polymery (zvláště PMMA), mosaz, měď, nikl, hliník a jeho slitiny a tvrdých a křehkých materiálů, mezi které patří keramika, křemík, sklo, germanium [1,4,21].

#### 4.1.1 Metody výroby diamantu

Zdroj diamantů pro výrobu nástrojů lze rozdělit na dvě skupiny:

- přírodní (monokrystalické)
- syntetické diamanty
  - vyrobené pomocí vysokých tlaků a teplot (tzv. HPHT metoda)
  - syntetické diamantové povlaky pomocí metody CVD při nízkém tlaku

Přírodní diamanty jsou velmi drahé a jejich zdroje jsou omezeny. Nejznámějším využitím přírodních monokrystalických diamantů je v klenotnictví. Syntetické diamanty lze vyrábět pomocí dvou metod. Obě metody se provádějí za velmi vysokých teplot, které dosahují hodnot až 2000 °C.

Metodou HPHT (High Pressure High Temperature) za vysokých teplot a velmi vysokých tlaků jsou napodobeny termodynamické poměry v přírodě. Uhlík je stlačován v segmentové formě a její vnitřní část je vyhřívána až na teplotu 1500 °C. Při stlačování je dodáván roztavený kov, který slouží jako katalyzátor pro snížení kinetické bariéry a pomáhá přeměně krystalové mřížky. Pro vytvoření správné struktury je nezbytné stlačovaný uhlík zahřívát na teplotu v rozsahu 1000 ÷ 1500 °C a tlak uvnitř formy dosahuje až 10 GPa. Touto metodou může vznikat monokrystalický i polykrystalický diamant, kde jsou zrna diamantu uložena v pojivové matici [22,23,24].

Metoda CVD (Chemical Vapour Deposition) je založena na nanášení povlaku syntetického diamantu na vhodný podklad, kterým může být například křemík, karbid křemíku, karbid wolframu či karbid molybdenu. Při povlakování dochází ke kondenzaci par směsi vodíku a metanu, na kterou působí kladné částice uvolňované žhavicím se vláknem nebo mikrovlnou plazmou. Dochází k chemické reakci a vzniku malých kapiček uhlíku, které směřují k povrchu podkladu, na němž krystalizují ve formě diamantu. Proces povlakování probíhá za teplot přibližně 700 ÷ 1200 °C při tlaku nižším než je atmosférický (běžně 1 ÷ 26 kPa). Povlaky mohou být monokrystalické i polykrystalické stejně jako u předchozí metody. Diamantové povlaky vzniklé touto metodou CVD mohou mít tloušťku menší než 10 nm, ale lze vytvořit i povlak s tloušťkou 500 μm [1,22,23,24].

HPHT metoda umožňuje růstu větších diamantů, které jsou vhodné i pro těžší soustružení a dovoluje úběru tlustších třísek než metoda CVD [1].

## 4.2 Další řezné materiály

Ve většině případů se v mikro-soustružnických procesech využívá diamantových nástrojů. Kvůli afinitě, kterou má diamant k železným kovům je nezbytné, pro obrábění těchto kovů využívat i jiných řezných materiálů. Mezi další řezné materiály používané v mikro-soustružení tedy patří:

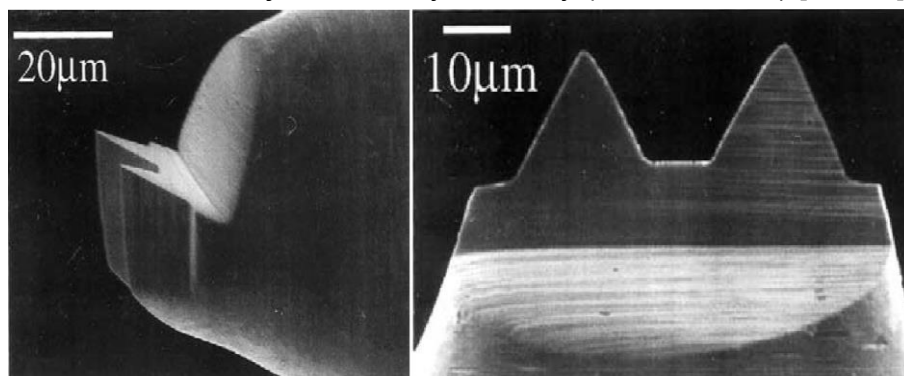
- slinuté karbidy (i povlakované slinuté karbidy)
- rychlořezná ocel
- PKNB (polykrystalický kubický nitrid bóru)

Mezi výhody těchto materiálů lze zařadit, již zmíněnou možnost obrábět jimi železné kovy, ale i podstatně nižší pořizovací náklady oproti diamantovým nástrojům. Běžně jsou slinuté karbidy a PKNB používané, kvůli svojí tvrdosti a pevnosti v širokém rozsahu teplot. Nevýhodou je však větší poloměr zaoblení ostří  $r_n$  (u slinutých karbidů až  $1 \div 3 \mu\text{m}$ ), ovlivňuje výslednou kvalitu povrchu a minimální jmenovitá šířka záběru ostří  $a_{pmin}$  při obrábění. Při povlakování slinutých karbidů je důležité, aby výsledná vrstva povlaku měla malou tloušťku (kolem  $1 \mu\text{m}$ ) a nevětšovala tak poloměr zaoblení ostří nástroje. Polykrystalický kubický nitrid bóru byl vyvinut pro obrábění materiálů s vysokou tvrdostí, jako jsou například kalené oceli, rychlořezné oceli a bílé litiny. Disponuje výbornými otěruvzdornými vlastnostmi, a proto má i dlouhou trvanlivost [1,4,21].

## 4.3 Výroba řezných nástrojů

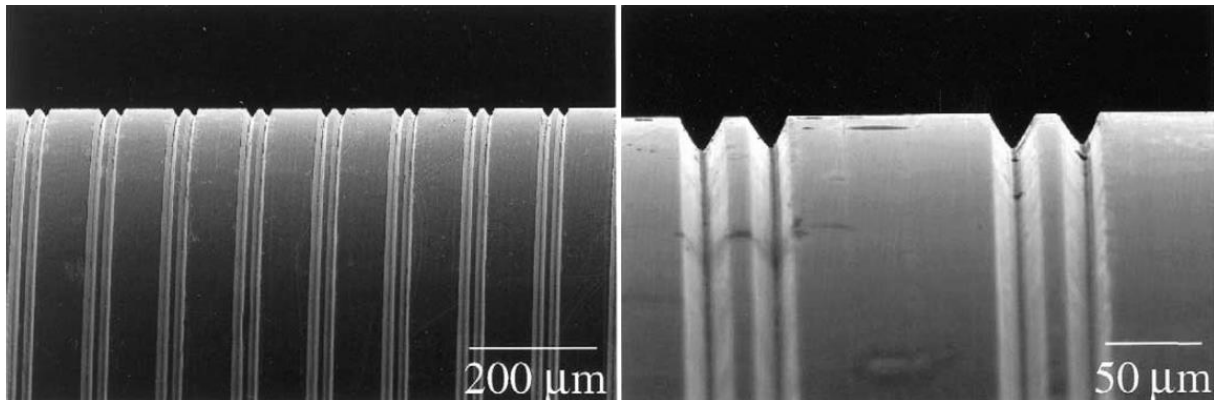
Při výrobě řezných nástrojů pro mikro-soustružení se hlavně dbá na velikost poloměru zaoblení ostří  $r_n$  a na výslednou kvalitu povrchu nástroje zejména na plochu čela řezného nástroje. Kvalita povrchu ovlivňuje opotřebení nástroje v průběhu procesu obrábění a tím i jeho trvanlivost [1,4].

Mezi metody výroby řezných nástrojů patří elektroerozivní obrábění EDM (Electrical Discharge Machining), Elektroerozivní drátové obrábění WEDG (Wire electrical Discharge Grinding) a obrábění iontovým paprskem FIB (Focused Ion Beam). Těmito metodami je dosahováno dobré kvality nástrojů, vysoké přesnosti, malých poloměru zaoblení ostří (od  $20 \text{ nm}$  u diamantu) a vysoké kvality povrchu nástroje ( $R_a 50 \text{ nm}$  a méně). Dále pomocí těchto metod lze vytvářet tvarově náročné a miniaturní nástroje například závitové a tvarové nože (viz obr. 4.3.1) [25], kterým lze následně soustružit velice jemné závitové a drážky (viz obr. 4.3.2) [1,4,25].

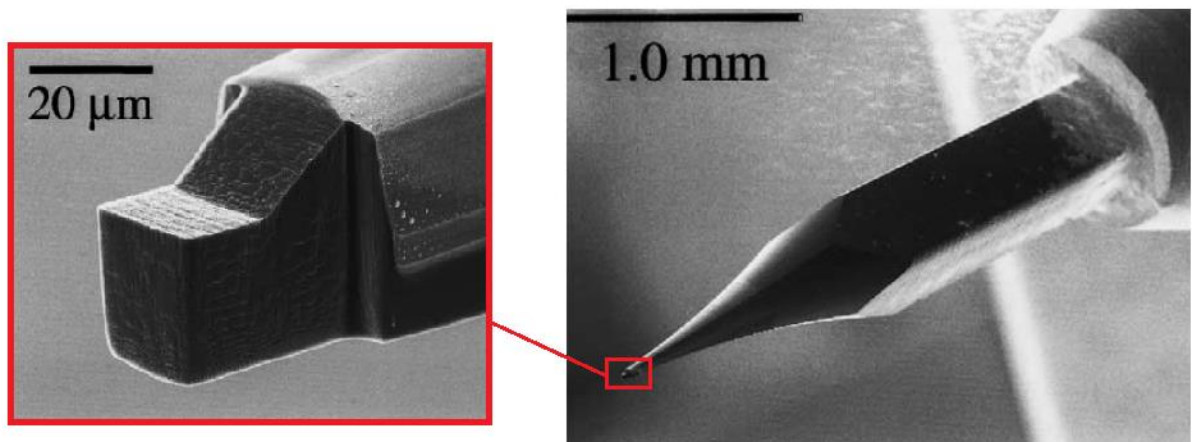


Obr. 4.3.1 Dvoubřítý tvarový nůž z rychlořezné oceli tvarovaný pomocí FIB [25].

Je velice důležité u takto malých nástrojů (viz obr. 4.3.3) správně volit řezné podmínky, protože nástroje jsou velmi křehké a může dojít k jejich destrukci při obrábění. Proto musí být obráběcí stroje velmi tuhé, stabilní a izolované od působení vnějších vlivů, tím se minimalizují rázy a vibrace při procesu obrábění. EDM, WEDG a FIB jsou využívány pro tvarování mnohých řezných nástrojů z různých materiálů (diamant, slinutý karbid, PKNB, rychlořezná ocel), ale výrobní časy v porovnání s cenou vyrobeného nástroje nejsou velmi efektivní. Z tohoto důvodu jsou často pro tvarování jednodušších a tvarově méně náročných řezných nástrojů využívány metody mikro-řezání laserem nebo mechanické broušení, které je konvenčně využíváno i pro broušení řezných nástrojů [1].



Obr. 4.3.2 Zobrazuje vysoustružené drážky pomocí tvarového nástroje na obr. 4.3.1 do polyetherketonového vlákna o průměru 3 mm [25].



Obr. 4.3.3 Řezný nástroj vyrobený z monokrystalu diamantu pomocí metody FIB [25].

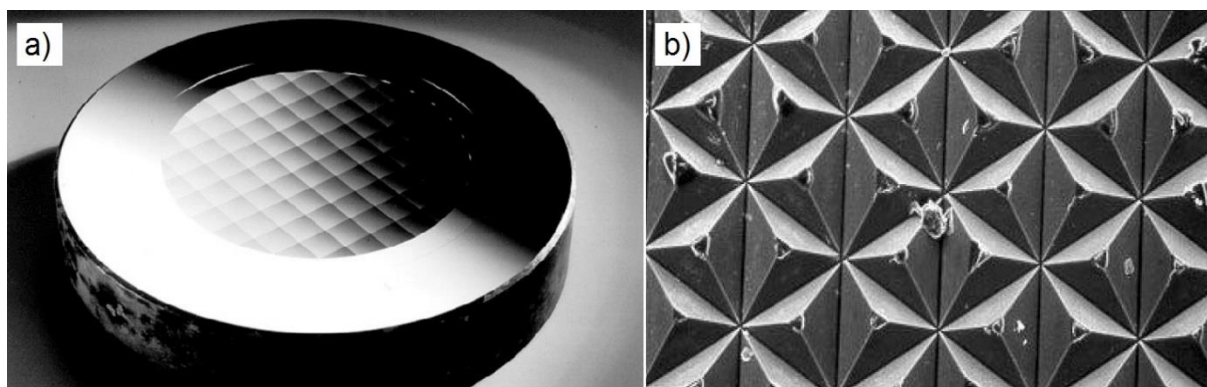
## 5 APLIKACE A VYUŽITÍ MIKRO-SOUSTRUŽENÍ

Mikro-soustružení je důležité odvětví mechanického mikro-obrábění s mnoha výhodami, mezi které lze zařadit široké spektrum obráběných materiálů, vysoká výrobní přesnost a kvalita povrchu. Součástky, které vyžadují vysokou rozměrovou přesnost a zrcadlový povrch (např.: optické a laserové čočky) je možné vyrábět pomocí této metody za použití ultra přesných soustruhů s diamantovými nástroji bez potřeby další úpravy povrchu broušením, lapováním a leštěním, které by muselo v jiném případě následovat pro dosažení těchto požadavků [1].

### 5.1 Tvorba nerotačních součástí

V definici mikro-soustružení (kap. 1) je psáno, že se jedná o efektivní metodu výroby cylindrických a rotačních symetrických součástí. Mikro-soustružení lze mimo jiné využívat na tvorbu nerotačních symetrických součástí a mikrostruktur (viz obr 5.1.1), která mají hlavní uplatnění v optických a laserových zařízeních [1,26].

Mezi způsoby výroby těchto struktur patří „*Fast Tool Servos*“ (Vysokorychlostní nástrojové servopohony) a „*Fly cutting*“ (Oběžný řezný nástroj). V případě těchto způsobů se výhradně používají diamantové nástroje, kvůli svým vlastnostem a malému poloměru zaoblení ostří  $r_n$ .



Obr. 5.1.1 a) Multi-plošné integrované zrcátko pro tvarování laserového paprsku [27].  
b) Struktura reflexní lepicí pásky používaná na dopravní značení [26].

#### 5.1.1 „*Fast Tool Servos*“ (Vysokorychlostní nástrojové servopohony)

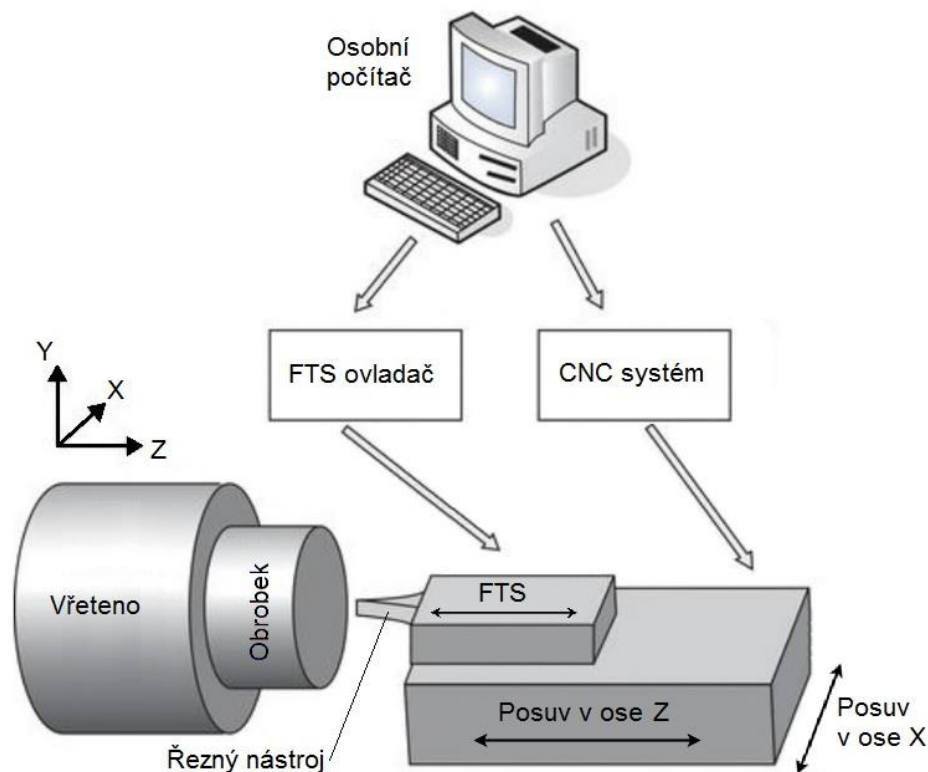
„*Fast tool servos*“ (dále jako FTS) představují doplňkové zařízení s vysokou polohovou přesností, velkou tuhostí a výrazně rychlou dynamickou odezvou pro konvenční ultra přesné soustruhy. Je schopné pohybovat (kmitat) s nástrojem v jedné ose s vysokou frekvencí až 1500 Hz, ale na malé vzdálenosti. FTS jsou obvykle využívány pro výrobu součástí, jako jsou například formy pro kontaktní čočky, oválné písty pro automobilní průmysl a Fresnelovy čočky. Na obr. 5.1.1 a) je zobrazeno zrcátko pro tvarování laserového paprsku vyrobené pomocí FTS [27].

Na obr. 5.1.1.1 je znázorněn princip ultra přesného soustružení a umístění doplňkového zařízení FTS. Toto zařízení je instalované na suportu, který zajišťuje pohyb v ose X a Z. Pohyb, který vykonává FTS je rovnoběžný s osou otáčení vřetene soustruhu a zároveň kolmé k ose X [1,28].

CNC systém ultra přesného soustruhu vyhodnocuje pohyb suportu v ose X a Z, zároveň snímá úhel natočení vřetene kolem osy otáčení. Na základě těchto informací CNC systém řídí pohyb nástroje pomocí FTS a dané změny polohy v závislosti na souřadnici osy X a úhlu natočení vřetene.

Pohyby na větší vzdálenosti zajišťují lineární motory posuvů a jemné polohování nástroje při dokončujících operacích obstarává FTS. Existují tři základní typy provedení tohoto zařízení, a to piezoelektrické FTS, aerostatické FTS a hybridní FTS. Piezoelektrické FTS dosahuje nejvyšších rychlostí kmitání (1500 Hz) a maximální zrychlení nástroje až ( $5000 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ ), ale pouze na krátký rozsah posuvu (35  $\mu\text{m}$ ). Aerostatické FTS jsou navrhované na vyšší rozsah posuvu až 10 mm, ale maximální frekvence kmitání dosahuje 600 Hz. Hybridní FTS kombinují vlastnosti obou předchozích zařízení a tedy vyšší rozsah posuvu (25 mm) a frekvenci kmitání 1500 Hz.

Typickým materiálem řezných nástrojů pro dané zařízení je monokrystalický diamant, který se však používá převážně na ultra přesné dokončovací operace, které si žádají dokonalou optickou kvalitu povrchu (optické a laserové čočky). V jiných případech lze použít nástroje i ze slinutých karbidů, kubického nitridu bóru KBN [1,28].

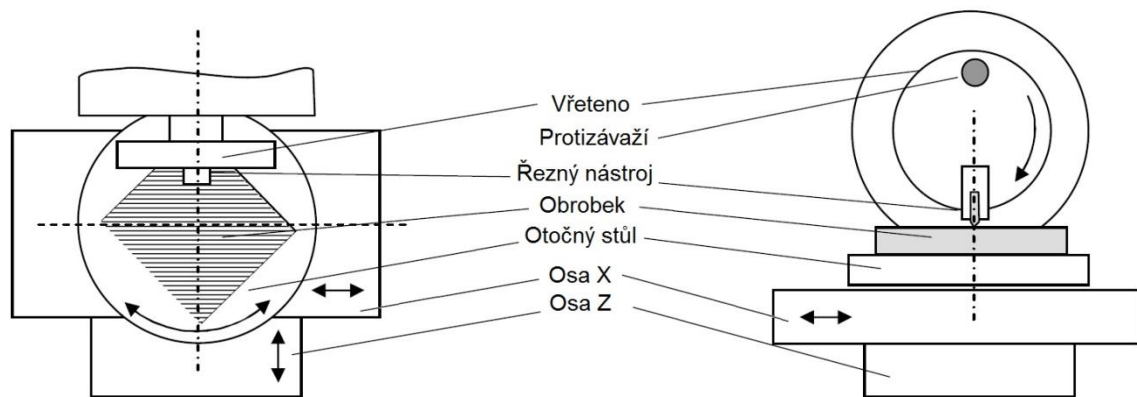


Obr. 5.1.1.1 Znáznornění umístění FTS na ultra přesném soustruhu [1].

### 5.1.2 „Fly Cutting“ (Oběžný rezný nástroj)

„Fly Cutting“ je další způsob na výrobu nerotačních struktur zejména pole opakujících se hranolů, jehlanů a dalších tvarů na povrchu obrobku. Vznikají tak speciální reflexní a zrcadlové povrchy. Na obr. 5.1.1 b) je zobrazena struktura tvořená pravidelnými čtyřstěny (hrana čtyřstěnu měří 160 nm), jedná se o reflexní lepící pásku, která byla vyprodukována pomocí formy, jejíž povrch byl obráběn pomocí „Fly Cutting“.

Na obr 5.1.2.1 je zobrazen princip obrábění „Fly Cutting“, kde diamantový nástroj je umístěn na disku většího průměru. Disk je vyvážený pomocí protizávaží a upevněný ve vřetenu. Obrobek je upevněný na suportu na otočném stole. Pohybem suportů a otočného stolu je docílena výsledná struktura na obrobku. Některé ultra přesné soustruhy jsou pro tento způsob obrábění kompatibilní, v opačném případě se jedná o specializované ultra přesné soustruhy na tento daný způsob obrábění [1,10,26].



Obr. 5.1.2.1 Princip obrábění „Fly cutting“ [26].

## 5.2 Materiály obrobků

Mikro-soustružením na ultra přesných soustruhách či průmyslových a laboratorních centrech lze obrábět materiály, které jsou měkké i tvrdé, tak i tvárné i křehké.

Některé materiály nejsou vhodné pro obrábění pomocí diamantových nástrojů a to především, kvůli afinitě k uhlíku a jedná se především o železné kovy, jak již bylo zmíněno v kap. 4.1. Do kategorie těžce obrobitelných materiálů pomocí diamantových nástrojů se řadí dále kovy, které s diamantem reagují a při obrábění dochází k chemickému opotřebení nástroje. Jedná se převážně o čisté materiály, které mají nespárované elektrony v d-orbitalu. Diamantem těžce obrobitelné materiály lze obrábět pomocí jiných rezných materiálů, které jsou uvedeny v kap. 4.2. tabulka 5.2.1 zobrazuje čisté materiály obrobitelné diamantem bez působení chemického opotřebení na břit nástroje [1,21,29].

Mezi často obráběné materiály patří i řada polymerů, ocelí, sklo a keramika, které jsou uvedeny v tabulce 5.2.2.

Tab. 5.2.1 Čisté materiály diamantem obrobitelné a neobrobitelné [29].

Prvek	Značka prvku	Teplota tání [°C]	Obrobitelný
Cín	Sn	232	ANO
Olovo	Pb	373	ANO
Zinek	Zn	420	ANO
Hořčík	Mg	649	ANO
Hliník	Al	660	ANO
Germanium	Ge	937	ANO
Stříbro	Ag	962	ANO
Zlato	Au	1064	ANO
Měď	Cu	1083	ANO
Křemík	Si	1410	ANO
Cer	Ce	799	NE
Nikl	Ni	1453	NE
Titan	Ti	1660	NE
Kobalt	Co	1495	NE
Vanad	V	1890	NE
Tantal	Ta	2996	NE
Železo	Fe	1535	NE
Niob	Nb	2468	NE
Wolfram	W	3410	NE
Chrom	Cr	1857	NE
Molybden	Mo	2617	NE
Mangan	Mn	1244	NE

Tab. 5.2.2 Nejběžněji obráběné materiály [1].

Kovy a polokovy	Měď a její slitiny	
	Hliník a jeho slitiny	
	Zlato	
	Stříbro	
	Zinek	
	Hořčík	
	Oceli	
	Germanium	
	Polymery	Nylon
		Akryl
Sklo a keramika	Polykarbonát	
	Sklo	
	Oxidická keramika	
	Křemičitá keramika a další	

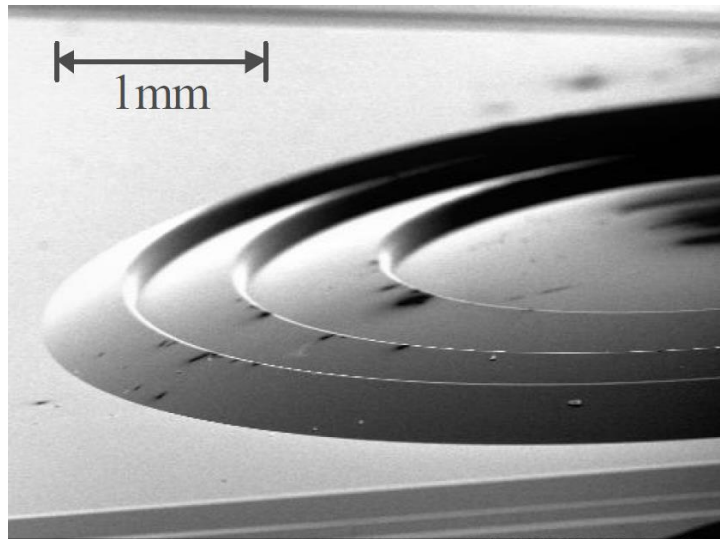
### 5.3 Využití mikro-soustružení

Mikrostruktury a mikro-komponenty jsou široce využívány v mnoha odvětví průmyslu, jak již bylo zmíněno v předchozích kapitolách. Jedná se o strojní mikro-součásti, například mikro-šrouby, mikro-hřídele, ozubená kola či mikro-čepy používané v automobilním průmyslu a hodinářství. Různé biomedicínské implantáty jsou sešroubované pomocí mikro-šroubů, které jsou vytvářeny pomocí mikro-soustružení na ultra přesných soustruzích. Malé formy například pro kontaktní čočky nebo formy s mikro-strukturou lze vytvářet pomocí této metody obrábění. Další aplikace mikro-součástí je v optice a elektronice, kde se pomocí mikro-soustružení vytvářejí nejrůznější čočky a optické prvky.

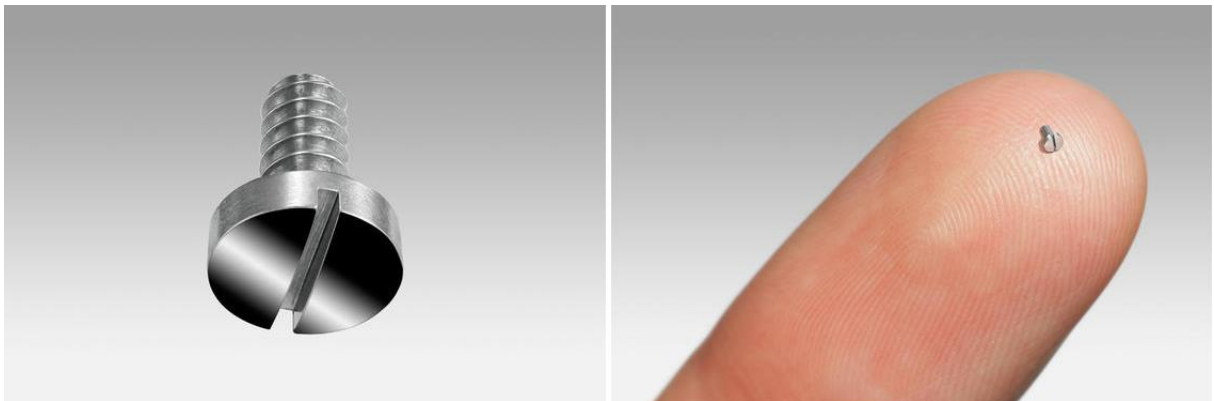
V tabulce 5.3.1 jsou uvedeny příklady aplikací mikro-komponentů a mikrostruktur, které jsou vyráběny pomocí metody mikro-soustružení [1,26].

Tab. 5.3.1 Aplikace a využití mikro-součástí a mikrostruktur [1].

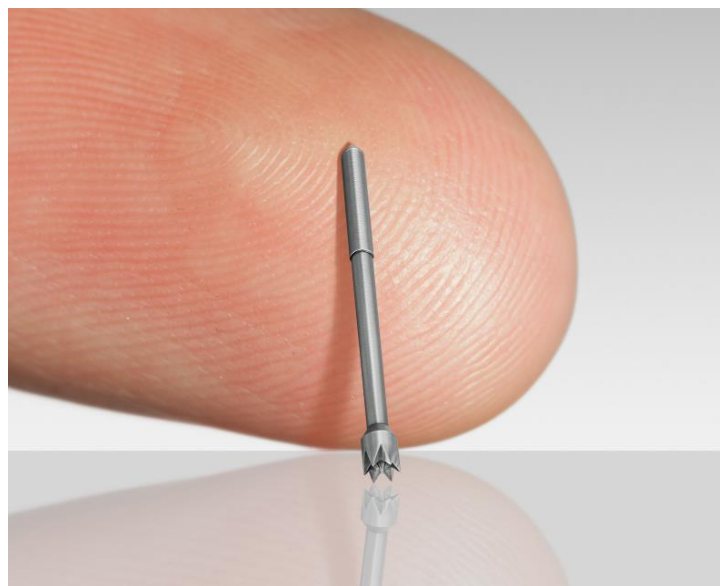
Oblast aplikace	Příklad
Automobilní průmysl	LED světla automobilů Display promítající na čelní sklo (Head-up display) Mikro-hřídel pro palivové čerpadlo Vroubkované hřídele Sací a výfukové ventily
Optický průmysl	Filtry Reflexní plochy (viz obr. 5.1.1 b)) Fresnelovy čočky (viz obr. 5.3.1) Difrakční optické prvky Formy pro kontaktní čočky Specifická zakřivená zrcadla
Biomedicínské inženýrství	Implantáty pro neurochirurgii Zubařské nástroje a vrtáky Šrouby pro naslouchadla Šrouby pro fixaci kostních dlah Buněčný systém Kapilární elektroforéza
Hodinářství	Stěžeжка Setrvačka Regulační šrouby na vyvážení setrvačky Šrouby pro kompletaci hodinek (viz obr. 5.3.2)
Mechatronika a elektronika	Mikro-čepy Mikro-konektory Pružinové kontakty Vakuová upínací deska Funkční plochy aerostatických vřeten



Obr. 5.3.1 Fresnelova čočka z PMMA [26].



Obr. 5.3.2 Miniaturní šroub pro hodinářský průmysl [16].



Obr. 5.3.3 Část pružinového kontaktu [16].

---

## ZÁVĚR

Bakalářská práce zpracovala literární rešerši o výrobní technologii mikro-soustružení a její aplikaci pro výrobu mikro-komponentů a vysoce přesných součástí.

První kapitola pojednávala o definici mikro-soustružení a následně samotným seznámením a charakterizací tématu. Byly zde uvedeny některé příklady aplikace a základní parametry, kterými se mikro-soustružení liší od běžného konvenčního soustružení.

Z následující kapitoly zaměřené na fyzikální vlivy vyplívají hlavní problematika této technologie. „*Size effect*“ je jeden z aspektů ovlivňující kvalitu a výrobní přesnost mikro-soustružení. Zmenšující se rozměry obrobků jsou příčinou, že velikosti zrn obráběného materiálu jsou srovnatelně velké s poloměrem zaoblení ostří  $r_n$  a šířkou záběru hlavního ostří  $a_p$ . To má za následek, že obráběný materiál nelze považovat za izotropní a homogenní. Velikost poloměru zaoblení ostří  $r_n$  výrazně ovlivňuje minimální jmenovitou šířka záběru hlavního ostří  $a_{pmin}$  a určuje tak hranici, kdy dochází pouze k elastické deformaci obrobku, nebo k úběru materiálu a tvorbě třísky. Další části této kapitoly se zabývali celkovou řeznou silou a velikostmi jednotlivých složek. Ohybovým napětím, které vzniká při obrábění štíhlých hřídelů a excentrickými účinky, které jsou způsobené velmi nepříznivým radiálním házením vřetene.

Třetí kapitola se zabývala konstrukcí a požadovanými parametry pro mikro-soustružnické stroje. Tato kapitola byla rozdělena na dvě hlavní části a tedy na ultra přesné soustruhy, které jsou konvenčně vyráběné a často jsou velice nákladné a prostorově objemné, a proti nim stojí malá, kompaktní a často využívaná průmyslová a laboratorní mikro-soustružnická centra.

Předposlední kapitola byla zaměřena na řezné nástroje, jejich materiály, aplikaci a tvarování do podoby soustružnického nástroje. Nejčastěji používaným materiálem pro tvorbu nástrojů je diamant, kvůli svým vlastnostem a možnosti jej tvarovat a dosahovat tak velmi malého poloměru zaoblení ostří  $r_n$ . Nevýhodou diamantových nástrojů je však vysoká křehkost a afinita k uhlíku, která má negativní účinky na opotřebení nástroje při obrábění železných kovů. Nástroje lze tvarovat za pomoci elektroerozivních metod EDM, WEDG a obrábění pomocí iontového paprsku FIB.

Poslední kapitola shrnula aplikace mikro-soustružení a materiály možné touto metodou obrábět. Představuje způsoby výroby nerotačních mikro-součástí a mikrostruktur pomocí mikro-obrábění. Jedná se hlavně o způsob obrábění pomocí FTS, které je schopné velmi rychle pohybovat nástrojem v závislosti na úhlu natočení vřetene a tím tak vytvářet nerotační součásti. A dále způsob „*Fly cutting*“, kterým je možné vytvářet mikrostruktury ve tvaru hranolů či jehlanů. Způsob uspořádání řezného nástroje a obrobku se však od běžného soustružení v tomto případě výrazně liší.

---

**SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ**

- [1] CHENG, K. a Dehong HUO. *Micro-cutting: fundamentals and applications*. 2013. ISBN 9780470972878.
- [2] AZIZUR RAHMAN, M., M. RAHMAN, A. SENTHIL KUMAR a H.S. LIM. CNC microturning: an application to miniaturization. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* [online]. 2005, 45(6), 631-639 [cit. 2017-05-05]. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2004.10.003. ISSN 08906955. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0890695504002597>
- [3] CHAE, J., S.S. PARK a T. FREIHEIT. Investigation of micro-cutting operations. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* [online]. 2006, 46(3-4), 313-332 [cit. 2017-05-05]. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2005.05.015. ISSN 08906955. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0890695505001306>
- [4] PILJEK, Petar; KERAN, Zdenka; MATH, Miljenko. Micromachining—Review of Literature from 1980 to 2010. *Interdisciplinary description of complex systems*, 2014, 12(1), 1-27 [cit. 2017-05-05].
- [5] CHAE, J., S.S. PARK a T. FREIHEIT. Investigation of micro-cutting operations. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* [online]. 2006, 46(3-4), 313-332 [cit. 2017-05-05]. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2005.05.015. ISSN 08906955. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0890695505001306>
- [6] DORNFELD, D., S. MIN a Y. TAKEUCHI. Recent Advances in Mechanical Micromachining. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* [online]. 2006, 55(2), 745-768 [cit. 2017-05-05]. DOI: 10.1016/j.cirp.2006.10.006. ISSN 00078506. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1660277306000077>
- [7] DUCOBU, François; RIVIÈRE-LORPHÈVRE, Edouard; FILIPPI, Enrico. Chip formation in Micro-cutting. *J Mech Eng Autom*, 2013, 3: 441-448.
- [8] LU, Zinan a Takeshi YONEYAMA. Micro cutting in the micro lathe turning system. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* [online]. 1999, 39(7), 1171-1183 [cit. 2017-05-05]. DOI: 10.1016/S0890-6955(98)00092-3. ISSN 08906955. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0890695598000923>
- [9] LAI, Xinmin, Hongtao LI, Chengfeng LI, Zhongqin LIN a Jun NI. Modelling and analysis of micro scale milling considering size effect, micro cutter edge radius and minimum chip thickness. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* [online]. 2008, 48(1), 1-14 [cit. 2017-05-05]. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2007.08.011. ISSN 08906955. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S089069550700154X>
- [10] LUO, Xichun, Kai CHENG, Dave WEBB a Frank WARDLE. Design of ultraprecision machine tools with applications to manufacture of miniature and micro components. *Journal of Materials Processing Technology* [online]. 2005, 167(2-3), 515-528 [cit. 2017-05-05]. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2005.05.050. ISSN 09240136. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0924013605005935>

- 
- [11] Nanotech 450UPL v2. *Nanotechnology Systems* [online]. [cit. 2017-05-05]. Dostupné z: <http://www.nanotechsys.com/machines/nanotech-450uplv2-ultra-precision-lathe-1/>
- [13] DAC ALM Lens Lathe. *DAC International, Inc.* [online]. [cit. 2017-05-05]. Dostupné z: <http://www.dac-intl.com/products/diamond-turning-equipment/2-axis-alm-lens-lathe-series-iv/>
- [14] Aerostatic Bearing Technology. *TOSHIBA MACHINE CO.,LTD* [online]. [cit. 2017-05-05]. Dostupné z: [http://www.toshiba-machine.co.jp/en/technology/tech\\_catalog/f1.html](http://www.toshiba-machine.co.jp/en/technology/tech_catalog/f1.html)
- [15] Tornos SwissNano. *TORNOS SA* [online]. [cit. 2017-05-05]. Dostupné z: <https://www.tornos.com/en/content/newsletters/experience-tornos-promise-%E2%80%98we-keep-you-turning%E2%80%99-amb-2016>
- [16] Realized parts. *Polydec SA décolletage* [online]. [cit. 2017-05-05]. Dostupné z: <https://www.polydec.ch/en/realized-parts/fields-of-activity/all/>
- [17] TANAKA, Makoto. Development of desktop machining microfactory. *Riken Review*, 2001, 34.
- [18] KITAHARA, Tokio, et al. Development of Micro-lathe. *Kikai Gijutsu Kenkyusho Shoho/Journal of Mechanical Engineering Laboratory*, 1996, 50(5), 117-123.
- [19] HUO, D a K CHENG. A dynamics-driven approach to the design of precision machine tools for micro-manufacturing and its implementation perspectives. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture* [online]. 2008, 222(1), 1-13 [cit. 2017-05-05]. DOI: 10.1243/09544054JEM839. ISSN 09544054. Dostupné z: <http://journals.sagepub.com/doi/10.1243/09544054JEM839>
- [20] EGASHIRA, Kai, Mitsuo IWATA a Yosuke NOMURA. Boring and face grooving using micro turning tools. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* [online]. 2011, 60(1), 81-84 [cit. 2017-05-05]. DOI: 10.1016/j.cirp.2011.03.075. ISSN 00078506. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S000785061100076X>
- [21] ČMIEL, Milan. *Vývoj nástrojů s PKD, CVD vrstvou a CVD povlakem pro dokončování děr*. Brno, 2009. Diplomová práce (Ing.). Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, [cit. 2017-09-09].
- [22] STRADĚJOVÁ, Alena. *Supertvrdé řezné materiály a jejich efektivní využití*. Brno, 2009. Diplomová práce (Ing.). Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, [cit. 2017-09-09].
- [23] Synthetic diamond. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2017 [cit. 2017-05-05]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Synthetic\\_diamond#cite\\_note-48](https://en.wikipedia.org/wiki/Synthetic_diamond#cite_note-48)
- [24] ELEMENT SIX LTD. Shannon, Ireland. *CVD Diamond Synthesis*. [online]. [cit. 2009-02-19]. Dostupný z WWW: <<http://www.e6cvd.com/cvd/page.jsp?pageid=335>>.
-

- 
- [25] PICARD, Y.N, D.P ADAMS, M.J VASILE a M.B RITCHEY. Focused ion beam-shaped microtools for ultra-precision machining of cylindrical components. *Precision Engineering* [online]. 2003, 27(1), 59-69 [cit. 2017-05-05]. DOI: 10.1016/S0141-6359(02)00188-5. ISSN 01416359. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0141635902001885>
- [26] DAVIES, Matthew A., Ernst-Bernhard KLEY, Hans Peter HERZIG, Christopher J. EVANS, Rashmi R. VOHRA, Brent C. BERGNER a Steven R. PATTERSON. *Application of precision diamond machining to the manufacture of microphotonics components* [online]. In: . s. 94-108 [cit. 2017-05-05]. DOI: 10.1117/12.506373. Dostupné z: <http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?doi=10.1117/12.506373>
- [27] WECK, M, S FISCHER and M VOS. 1997. Fabrication of microcomponents using ultraprecision machine tools. *Nanotechnology* [online]. 8(3), 145-148. Dostupné z: <http://stacks.iop.org/0957-4484/8/i=3/a=007?key=crossref.107245e7724794231fbc3ab3e0cb3a0d>
- [28] TRUMPER, David L. a Xiaodong LU. Fast Tool Servos: Advances in Precision, Acceleration, and Bandwidth. *Towards Synthesis of Micro-/Nano-systems* [online]. Springer London, 2007, s. 11 [cit. 2017-05-05]. DOI: 10.1007/1-84628-559-3\_2. ISBN 9781846285585. Dostupné z: [http://link.springer.com/10.1007/1-84628-559-3\\_2](http://link.springer.com/10.1007/1-84628-559-3_2)
- [29] PAUL, Ed, Chris J. EVANS, Anthony MANGAMELLI, Michael L. MCGLAUFLIN a Robert S. POLVANI. Chemical aspects of tool wear in single point diamond turning. *Precision Engineering* [online]. 1996, 18(1), 4-19 [cit. 2017-05-05]. DOI: 10.1016/0141-6359(95)00019-4. ISSN 01416359. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0141635995000194>

## SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Zkratka	Jednotka	Popis
CVD	[ - ]	- chemical vapour deposition
EDM	[ - ]	- electrical discharge machining
FIB	[ - ]	- focused ion beam
FTS	[ - ]	- fast tool servos
HPHT	[ - ]	- high pressure high temperature
KNB	[ - ]	- kubický nitrid bóru
MEMS	[ - ]	- mikroelektromechanické systémy
PKNB	[ - ]	- polykrystalický kubický nitrid bóru
PMMA	[ - ]	- polymethylmethakrylát
WEDG	[ - ]	- wire electrical discharge grinding

Symbol	Jednotka	Popis
$E$	[MPa]	- modul pružnosti v tahu (youngův modul)
$E_m$	[J·mm <sup>-3</sup> , N·mm <sup>-2</sup> ]	- měrná řezná energie
$F_c$	[MPa] [N]	- řezná síla (tangenciální složka celkové řezné síly)
$F_e$	[N]	- dostředivá síla působící na obrobek
$F_p$	[N]	- pasivní síla (radiální složka celkové řezné síly)
$F_f$	[N]	- posuvová síla (axiální složka celkové řezné síly)
$I_x$	[mm <sup>4</sup> ]	- kvadratický moment průřezu
$M_o$	[N·mm]	- ohybový moment deformující těleso
$MPO$	[mm <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> ]	- měrná produktivita obrábění, tedy množství odebraného materiálu za jednotku času
$P$	[N·mm·s <sup>-1</sup> ]	- energie spotřebovaná na řezný proces
$Ra$	[μm]	- průměrná aritmetická úchytky profilu drsnosti
$W_o$	[mm <sup>3</sup> ]	- modul průřezu v ohybu
$a_p$	[mm]	- šířka záběru hlavního ostří nástroje
$a_{pmin}$	[mm]	- minimální jmenovitá šířka záběru hlavního ostří
$b$	[mm]	- jmenovitá šířka řezu
$d$	[mm]	- průměr hřídele
$f_z$	[mm]	- posuv na zub
$k$	[N·mm <sup>-1</sup> ]	- tuhost obrobku
$l$	[mm]	- délka hřídele
$r_n$	[mm]	- poloměr zaoblení ostří nástroje
$v$	[mm·s <sup>-1</sup> ]	- řezná rychlost
$\gamma_e$	[°]	- efektivní úhel čela v ortogonální rovině
$\gamma_o$	[°]	- úhel čela v ortogonální rovině
$\delta$	[mm]	- vychýlení obrobku
$\sigma$	[MPa]	- ohybové napětí
$\omega$	[rad·s <sup>-1</sup> ]	- úhlová rychlost