



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

## TECHNOLOGIE A METODY VÝROBY VELMI PŘESNÝCH VNITŘNÍCH ROTAČNÍCH PLOCH

TECHNOLOGIES AND METHODS FOR ACCURATE INNER ROTARY SURFACES FINISHING

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

JAROSLAV LONDA

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. OSKAR ZEMČÍK, CSc.

BRNO 2011

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie  
Akademický rok: 2010/2011

## **ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

student(ka): Jaroslav Londa

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

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:

### **Technologie a metody výroby velmi přesných vnitřních rotačních ploch**

v anglickém jazyce:

### **Technologies and methods for accurate inner rotary surfaces finishing**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

1. Rešerše literatury k danému tématu.
2. Technologie a metody dokončování vnitřních rotačních ploch.
3. Porovnání jednotlivých metod.
4. Závěz s doporučením pro strojírenskou praxi.

Cíle bakalářské práce:

Studie zaměřená na technologie a metody dokončování vnitřních rotačních ploch s doporučením využití pro strojírenskou praxi.

Seznam odborné literatury:

1. ZEMČÍK, O. Technologická příprava výroby. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2002. 158 s. ISBN 80-214-2219-X.
2. ZEMČÍK, O. Nástroje a přípravky pro obrábění. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2003. 193 s. ISBN 80-214-2336-6
3. KÖNIG, W. Fertigungsverfahren band 1,2,3. 4. Aufl. Düsseldorf: VDI-Verlag GmbH, 1999. 416 s. ISBN 3-18-401054-6
4. Firemní podklady dle dalšího zpřesnění a určení (Sandvik Coromant, Gühring, Fette, Pramet, Mitsubishi, Iscar, Seco, apod.
5. REICHARD, A. Fertigungstechnik 1,2. 10. Aufl. Hamburg: Handwerk und technik, 1993. 420 s. ISBN 3-582-02311-7

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Oskar Zemčík, CSc.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2010/2011.

V Brně, dne 26.10.2010

L.S.

---

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.  
Ředitel ústavu

---

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.  
Děkan fakulty

## ABSTRAKT

Tato bakalářská práce popisuje některé z konvenčních a nekonvenčních metod výroby velmi přesných vnitřních rotačních ploch. Zabývá se jejich popisem, nástroji, stroji a využitím. Také obsahuje srovnání všech metod z hlediska přesnosti rozměrů a drsnosti povrchu.

### **Klíčová slova**

Dokončování, obrábění, vnitřní rotační plochy, broušení, honování, vystružování, lapování, nekonvenční metody.

## ABSTRACT

This bachelor thesis describes some of the conventional and unconventional methods for accurate inner rotary surfaces finishing. It deals with their definition, tools, machines and usage. It also contains comparison of all methods in term of dimensional accuracy and surface roughness.

### **Key words**

Finishing, machining, inner rotary surfaces, grinding, honing, reaming, lapping, unconventional methods.

## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

LONDA, Jaroslav. *Název: Technologie a metody výroby velmi přesných vnitřních rotačních ploch*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. s. 54, Vedoucí práce Ing. Oskar Zemčík, CSc.

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma **Technologie a metody výroby velmi přesných vnitřních rotačních ploch** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum

.....  
Jaroslav Londa

**Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval panu Ing. Oskaru Zemčikovi, CSc. za rady a připomínky při vypracování bakalářské práce.

**OBSAH**

Abstrakt.....	4
Prohlášení.....	5
Poděkování.....	6
Obsah.....	7
Úvod.....	9
1 BROUŠENÍ.....	10
1.1 Charakteristika.....	10
1.2 Metody broušení.....	10
1.2.1 Axiální broušení.....	10
1.2.2 Planetové broušení.....	11
1.2.3 Bezhroté broušení.....	11
1.3 Řezné podmínky.....	12
1.3.1 Základní vztahy.....	12
1.4 Nástroje.....	13
1.4.1 Brousící kotouče a jejich vlastnosti.....	13
1.4.2 Materiály brusiva kotoučů.....	15
1.5 Stroje.....	15
1.5.1 Brusky na díry.....	15
1.5.2 Hrotové brusky.....	15
2 LAPOVÁNÍ.....	17
2.1 Charakteristika.....	17
2.2 Lapovací nástroje.....	17
2.3 Lapovací stroje.....	19
3 HONOVÁNÍ.....	20
3.1 Charakteristika.....	20
3.2 Řezné podmínky.....	21
3.2.1 Výpočtové vztahy.....	21
3.3 Honovací nástroje.....	22
3.4 Honovací stroje.....	23
4 SUPERFINIŠOVÁNÍ.....	24
4.1 Charakteristika superfinišování.....	24
4.2 Řezné podmínky.....	25
4.3 Nástroje.....	25
4.4 Stroje.....	25
5 JEMNÉ SOUSTRUŽENÍ.....	26
5.1 Popis metody.....	26
5.2 Řezné podmínky.....	26
5.3 Nástroje.....	28
5.4 Stroje.....	29
6 VYHRUBOVÁNÍ A VYSTRUŽOVÁNÍ.....	30
6.1 Charakteristika.....	30
6.2 Řezné podmínky.....	30
6.3 Nástroje.....	31
6.4 Stroje.....	32
7 LEŠTĚNÍ.....	33
7.1 Charakteristika.....	33

7.2 Leštící nástroje.....	33
7.2.1 Kotouče a tělíška .....	33
7.2.2 Kartáče .....	34
7.3 Stroje .....	34
8 VÁLEČKOVÁNÍ.....	35
8.1 Popis válečkování.....	35
8.1.1 Statické válečkování .....	35
8.1.2 Dynamické válečkování .....	36
8.2 Nástroje .....	36
8.3 Stroje .....	37
9 VYHLAZOVÁNÍ, KALIBROVÁNÍ .....	38
9.1 Vyhlazování .....	38
9.1.1 Nástroje pro vyhlazování .....	38
9.2 Kalibrování.....	39
10 NEKONVENČNÍ METODY OBRÁBĚNÍ .....	40
10.1 Popis.....	40
10.2 Elektroerozivní obrábění .....	40
10.3 Elektrochemické obrábění .....	42
10.3.1 Hloubení tvarů a dutin .....	43
10.3.2 Elektrochemické honování .....	44
10.3.3 Elektrochemické leštění .....	44
10.4 Chemické obrábění.....	44
10.4.1 Leptání.....	44
10.5 Obrábění ultrazvukem.....	45
10.5.1 Princip.....	45
10.5.2 Použití .....	46
10.6 Obrábění laserem .....	47
10.6.1 Vrtání laserem .....	47
11 SROVNÁNÍ DOKONČOVACÍCH METOD .....	48
Závěr.....	50
Resumé.....	51
Seznam použité literatury.....	52
Seznam použitých zkratk a symbolů .....	54



## ÚVOD

V oblasti obrábění se často setkáváme se strojními součástmi, které vyžadují dokonalé opracování, jak z hlediska jakosti povrchu, tak rozměrové přesnosti či vzhledu. Tyto požadavky ve většině případů nelze splnit běžnými obráběcími metodami, a proto je třeba použít některé z konvenčních či nekonvenčních dokončovacích metod.

Vnitřní rotační plochy dokážeme vyrobit klasickým soustružením, kde není potřeba následného dokončování, stejně tak jako při vrtání. Těmito metodami dokážeme vyrobit danou plochu s přesností IT12 – IT6. Tato práce se však zabývá výrobou velmi přesných vnitřních rotačních ploch, kde potřebujeme dosáhnout přesnosti povrchu lepších jako IT6.

Už při navrhování součásti a následném technologickém opracování je třeba si zvolit správnou dokončovací metodu. Každá metoda má své specifické podmínky, svůj vlastní průběh procesu a ve výsledku nám udávají rozdílné hodnoty jakosti povrchu. Liší se taky náklady, což je v dnešní době taktéž důležitý faktor. Obvyklé hodnoty přesnosti dokončovacích operací jsou asi IT4 – IT7 a drsnosti povrchu  $R_a = 0,2 - 1,6 \mu\text{m}$ . Při použití lepších technologií i lepší. Navíc u vnitřních rotačních ploch rozlišujeme plochy válcové, kuželové a tvarové, takže je potřeba pro daný tvar zvolit správný nástroj a technologii, aby byl výsledek co nejlepší.

Rozdělení dokončovacích metod obrábění:

### - Konvenční

- S úběrem materiálu - broušení
  - lapování
  - honování
  - superfinišování
  - leštění
- Bez úběru materiálu - válečkování, kuličkování
  - vyhlazování
  - kalibrování

### - Nekonvenční

- Elektroerozivní obrábění
- Elektrochemické obrábění
- Chemické obrábění
- Obrábění ultrazvukem a laserem

# 1 BROUŠENÍ

## 1.1 Charakteristika

Broušení je v dnešní době jednou z nejpoužívanějších dokončovacích metod obrábění jak rovinných tak válcových či tvarových vnitřních a vnějších ploch. Pomocí mnohobřitého nástroje, jenž je tvořen zrný tvrdých materiálů (brusiv), které jsou spojeny vhodným pojivem, jsme schopni obrábět materiály s vysokou pevností a tvrdostí jako jsou kalené oceli či různé keramiky.

Při broušení je v záběru velké množství zrn (břitů). Každé zrno má jiný geometrický tvar a úhly čela jsou záporné. Broušení je tedy obrábění nástrojem s nedefinovaným ostřím.

Hlavní řezný pohyb je rotační a koná ho nástroj, posuv pak koná obrobek. Charakteristická je taky vysoká řezná rychlost, která může být až 100 m/s. Ta má pak za následek vysoké teploty třísek, jež se pohybují v rozmezí od 800 do 1200 °C a je proto třeba ochlazovat obrobenou plochu. Část tepla však přechází do povrchové vrstvy materiálu, ve kterém vznikají nežádoucí zbytková napětí ovlivňující spolehlivost a životnost obrobku.

Broušením se dosahují velmi vysoké jakosti a přesnosti povrchu. U broušení na čisto je to IT5 až IT7, u jemného broušení pak IT3 až IT4.<sup>1</sup>

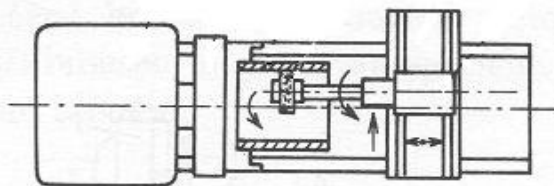
## 1.2 Metody broušení

Pro broušení vnitřních rotačních ploch se využívají tyto metody:

- Axiální broušení
- Planetové broušení
- Bezhruté broušení

### 1.2.1 Axiální broušení

Axiální broušení, nebo taky broušení s podélným posuvem se používá tehdy, když je šířka brousícího kotouče menší než délka obráběné součásti. Kotouč se uvnitř rotační plochy otáčí rychlostí  $v_c$  a zároveň se axiálně posouvá rychlostí  $v_{fa}$ . Obrobek, který je v tomto případě upnut mezi hroty, se taktéž otáčí svou rychlostí a úběr materiálu je zajištěn kolmým přísuvem kotouče na obrobek.

Obr.1.1 Axiální broušení<sup>4</sup>

### 1.2.2 Planetové broušení

Používá se pro broušení větších součástí. Obrobek je pevně upnut na stole. Vřeteno s brousícím kotoučem se otáčí kolem své osy rychlostí  $v_c$ , obíhá po obvodu obráběné díry a zároveň se posouvá ve směru osy díry.

Obr.1.2 Planetové broušení<sup>5</sup>

### 1.2.3 Bezhraté broušení

Skládá se ze tří kotoučů, mezi které se obrobek vkládá. Jsou to kotouče podávací, upínací a opěrný. Princip je podobný jako u broušení axiálního, avšak bezhraté broušení se může použít jen u součástí, které mají vnitřní povrch sousedý s vnějším povrchem, tzn. pouze pro válcové plochy.

Obr.1.3 Kotouče pro bezhraté broušení<sup>6</sup>

### 1.3 Řezné podmínky

Řezné podmínky závisí především na velikosti sil, podle nichž pak volíme tvrdost brusného kotouče (měkké pro menší síly, tvrdé pro velké síly).

Řezná rychlost je dána obvodovou rychlostí kotouče a volíme ji podle způsobu broušení a druhu pojiva v brusném kotouči. Běžné rychlosti se pohybují v rozmezí 10 až 40 m/s (klasické kotouče s keramickým pojivem), výjimečně mohou dosahovat rychlostí 100 až 180 m/s (speciální kotouče).<sup>8</sup>

#### 1.3.1 Základní vztahy<sup>2</sup>

Řezná rychlost:

$$v_c = \frac{\pi \cdot d \cdot n}{60 \cdot 1000} \quad [\text{m/s}] \quad (1.1)$$

Kde:  $d$  [mm] – průměr kotouče

$n$  [ $\text{min}^{-1}$ ] – otáčky kotouče

Řezná síla:

$$F_C = 25 \cdot v_w^{0.6} \cdot f_a^{0.6} \cdot a_e^{0.5} \quad [\text{N}] \quad (1.2)$$

Kde:  $v_w$  [m/min] – obvodová rychlost obrobku

$f_a$  [mm] – axiální posuv stolu na jednu otáčku

$a_e$  [mm] – pracovní záběr

Řezná síla se dá vyjádřit taky jako:

$$F_C = k_c \cdot A_D \quad [\text{N}] \quad (1.3)$$

Kde:  $k_c$  [Mpa] – měrná řezná síla

$A_D$  [ $\text{mm}^2$ ] – průřez třísky

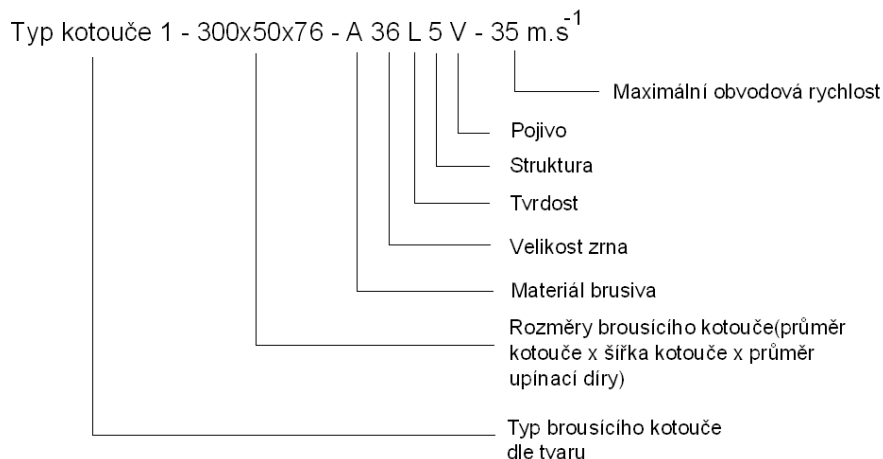
## 1.4 Nástroje

### 1.4.1 Brousící kotouče a jejich vlastnosti

Mezi nejrozšířenější typy nástrojů patří brousící kotouče a brousící tělíška. Dále pak můžeme do typů nástrojů zařadit brousící a orovnávací kameny či speciální segmenty nebo pilníky.

Základem brousícího kotouče je těleso vyrobeno nejčastěji z kompozitních materiálů, slitin Al, bronzu, oceli atd. Vybraný materiál musí splňovat požadavky na tuhost, pevnost, tepelnou vodivost a popřípadě taky na odolnost proti vibracím. Na povrchu tělesa je pak nanesena vrstva brusných zrn spojených pojivem, kterým je materiál obráběn.

Brousící kotouč má tendenci samoostření, tzn. zrna, která jsou opotřebená, se vylamují a odkrývají tak ostrá zrna.



Obr.1.4 Příklad označení brousícího kotouče<sup>8</sup>

Označení brousících kotoučů obsahuje veškeré jeho složení, tvar, rozměry a použití. Některé parametry jsou udávány normou, avšak stále více firem, které brousící kotouče vyrábí, si volí své vlastní označení.

Při výběru typu kotouče a jeho rozměrů závisí nejvíce na jeho použití a způsobu upnutí. Průměr kotouče by se měl volit pokud možno co největší. Čím větší průměr, tím lepší jsou potom kinematické a tepelné podmínky pro broušení. Na opracování otvorů by měl mít průměr brousícího kotouče asi 80% průměru otvoru.

Šířku brousící vrstvy naopak volím co nejmenší kvůli lepšímu odvodu tepla. Tloušťka vrstvy by se měla pohybovat v rozmezí 1,5 až 4 mm v závislosti na druhu pojiva.

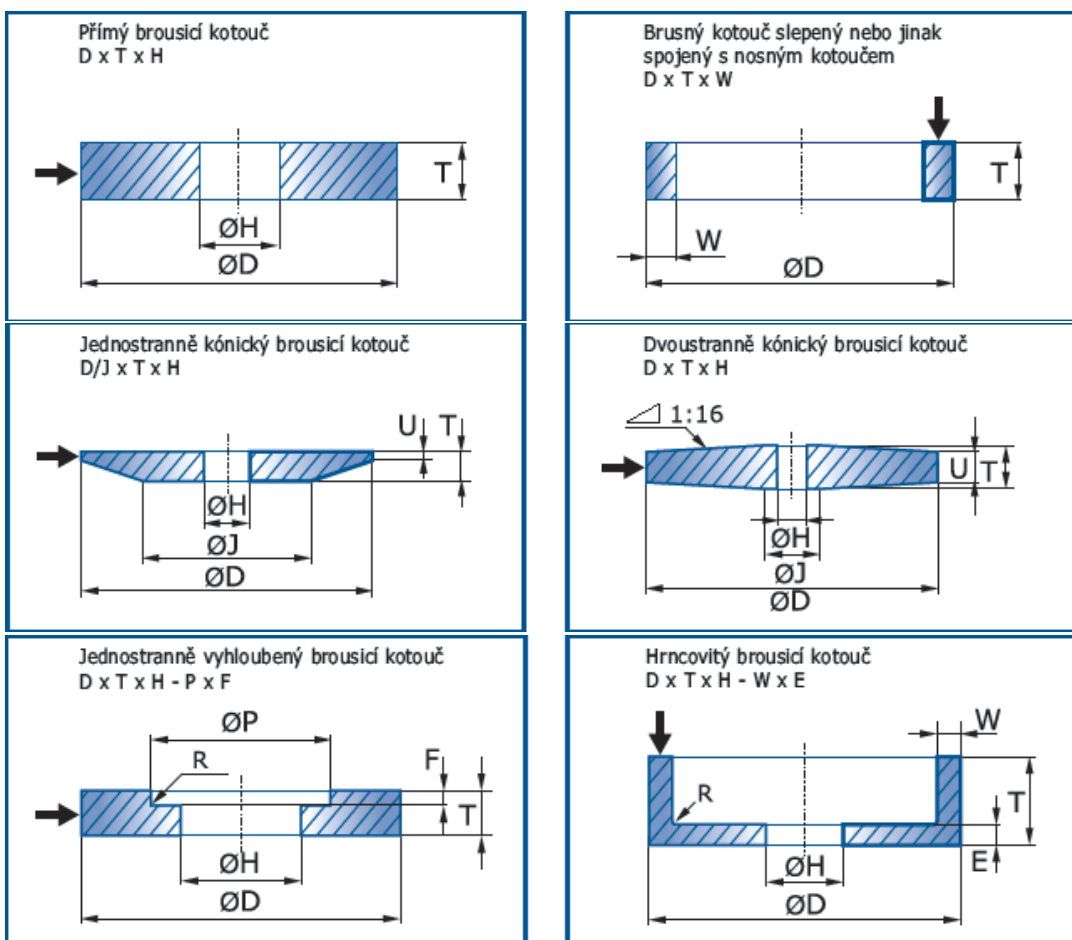
Kvalitu broušení určuje hlavně zrnitost, tvrdost a koncentrace. Zrnitost, jež vychází z velikosti zrn, pak výrazně ovlivňuje výkon broušení a výslednou drsnost povrchu.

Podle charakteru operace broušení jsou doporučeny následující velikosti zrn brusiva (standart FEPA) <sup>17</sup>:

- Hrubovací broušení: 181 – 126  $\mu\text{m}$
- Dokončovací broušení: 91 – 64  $\mu\text{m}$
- Jemné a dokončovací broušení: 54 – 20  $\mu\text{m}$
- Leštění: 15 – 1  $\mu\text{m}$

Koncentrace brusiva vyjadřuje hmotnost diamantu nebo KNB v 1  $\text{cm}^3$  vrstvy brousícího materiálu. Za základ je považována koncentrace 100, kde 1  $\text{cm}^3$  brousící vrstvy obsahuje 0,88 g brusiva.

Koncentrace dělíme na vysokou, střední a nízkou. Vysoké koncentrace (100 až 150) nám zaručuje vyšší životnost brusného kotouče avšak horší samoostřící vlastnosti. Střední koncentrace (50 až 75) má jemnější zrna brusiva než u vysoké koncentrace a nízká koncentrace (25 až 50) má až extrémně jemná zrna. Zaručuje nám velice dobré samoostření, ale životnost brousících kotoučů se snižuje. <sup>17</sup>



Obr.1.5 Výběr ISO tvarů brousících kotoučů <sup>9</sup>

### 1.4.2 Materiály brusiva kotoučů<sup>29</sup>

Umělý korund (oxid hlinitý  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) - bílý (označení A99)  
- růžový (označení A98)  
- hnědý (označení A96)  
- černý (označení A95)

Karbid křemíku ( $\text{SiC}$ ) - zelený (označení C49)  
- černý (označení C48)

Karbid boru ( $\text{B}_4\text{C}$ ) - označení B

Kubický nitrid boru ( $\text{N}_2\text{B}_3$ ) - označení BN

Diamant (umělý i přírodní) - označení D



Obr.1.6 Brousící kotouče pro vnitřní plochy<sup>7</sup>

## 1.5 Stroje

Stroje pro broušení se nazývají brusky. Pro broušení vnitřních rotačních ploch se používají brusky hrotové, planetové nebo speciální brusky na díry.

### 1.5.1 Brusky na díry

Jsou to speciální brusky určené přímo pro broušení děr a vnitřních ploch. Konstruují se jako planetové, sklíčidlové a bezhroté. Nejvíce se používá sklíčidlová bruska na díry, kde se obráběná součást upne do sklíčidla.

### 1.5.2 Hrotové brusky

Používají se pro broušení vnitřních i vnějších rotačních ploch obrobku, který je upnut mezi hroty. Nejčastěji používanou brusku pro broušení děr a vnitřních válcových ploch je univerzální hrotová bruska.



Obr.1.7 Univerzální hrotová bruska<sup>28</sup>



## 2 LAPOVÁNÍ

### 2.1 Charakteristika <sup>1</sup>

Lapováním se dosahuje vůbec nejlepších rozměrových přesností a nejnižších hodnot drsnosti povrchu. Je to druh dokončovacího obrábění, které se používá převážně pro rovinné plochy, avšak běžně se používá i pro vnější a vnitřní rotační plochy a plochy tvarové. Konkrétně při obrábění vnitřních rotačních ploch se používá pro díry kluzných ložisek či různé válce. Lapováním je možno obrábět běžné oceli, ale taky kalené nebo nitridované povrchy.

Podstatou lapování je přivedení volného brusiva mezi lapovací nástroj a obrobek, čímž dochází k úběru materiálu. Brusivo je přiváděno kapalinou anebo měkkou pastou.

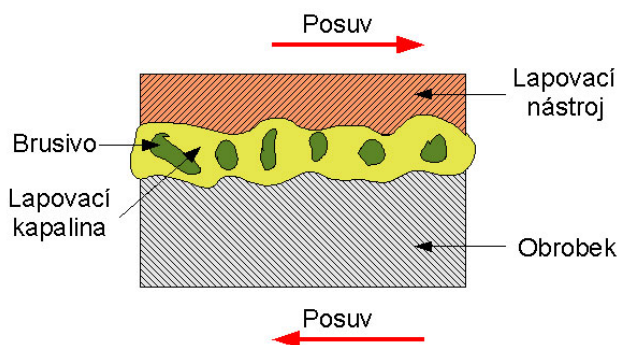
Operací před lapováním je obvykle broušení, kde je třeba ponechat přídavek na obrábění, který by měl být v rozmezí 0,005 až 0,03 mm.

Podle úběru materiálu se rozlišuje lapování hrubovací, jemné a velmi jemné. Při hrubovacím lapování, u kterého je činná plocha kotoučů rýhovaná, dochází vlivem velkého množství zrn k zarovnání nerovností na povrchu. U velmi jemného lapování je činná plocha kotoučů hladká a povrch se leští.

Lapování má však i své nevýhody. Samotný proces trvá poměrně dlouhou dobu a navíc je na závěr nutné očištění obrobku (například petrolejem). Oproti ostatním dokončovacím metodám má navíc vyšší náklady a proto, když je to možné, nahradíme lapování jinou metodou.

Tab.2.1 Dosažitelné přesnosti a drsnosti <sup>2</sup>

LAPOVÁNÍ	Přesnost rozměrů IT		Drsnost povrchu Ra [μm]	
	střední	rozsah	střední	rozsah
Hrubovací	4	3 - 5	0,2	0,16 - 0,40
Jemné	2	1 - 3	0,1	0,08 - 0,16
Velmi jemné			0,03	0,01 - 0,04



Obr.2.1 Princip lapování <sup>27</sup>

## 2.2 Lapovací nástroje

Nástroje pro lapování mají negativní tvar obráběných ploch. Mohou se vyrábět z jemnozrnné perlitické litiny, měkké oceli, olova, z mědi atd. Pro velmi jemné lapování se používají tvrdě chromované nástroje anebo nástroje z kalených ocelí.

Tvar nástroje je dán jeho použitím pro danou lapovanou plochu. Pro ruční lapování vnitřních rotačních ploch používáme lapovací trny a pro strojní lapování pak využíváme bezhrotý zapichovací nebo průběžný způsob, kde je nástrojem kotouč s brusivem.

Na nástroje jsou kladeny poměrně vysoké požadavky co se geometrického tvaru a přesnosti rozměrů týče. Při strojním lapování děr se trny přestavují po celé délce, aby se co nejvíce snížilo jejich opotřebení. Proto je třeba pro vylapování otvoru použít sady několika trnů s různými průměry.

Otvory s většími průměry se strojně lapují pomocí honovacích hlav s litinovými lištami namísto brousících kamenů.



Obr.2.2 Lapovací trny<sup>10</sup>

Brusiva pro lapování se používají podle materiálu obrobku. Pro běžné a kalené oceli se používá umělý korund ( $Al_2O_3$ ). Litina, polovodičové materiály, sklo nebo keramika vyžadují brusiva z karbidu křemíku ( $SiC$ ). Karbid bóru ( $B_4C$ ) je vhodný pro velmi tvrdé materiály jako jsou slinuté karbidy, u kterých můžeme použít taktéž mikroprášky z diamantu či kubického nitridu bóru. Nositelem těchto brusiv je obvykle petrolej s přídatkem oleje a kyseliny olejové (3 - 5%).<sup>1</sup>

Složení lapovacích past je různé. Základním prvkem je brusivo, které však navíc obsahuje živočišné tuky, petrolej, oleje a některé kyseliny.

### **2.3 Lapovací stroje**

Lapovací stroje můžou být buď univerzální, které jsou vhodné pro lapování jak rovinných, tak rotačních součástí anebo speciální, které využíváme pro dokončování určitých druhů součástí, jako jsou např. boky zubů kol a čepy klikových hřídelí.

Stroje pro lapování otvorů rozlišujeme dle typu vřeten. Otvory se středními rozměry se lapují na stroji se svislým vřetenem a pro dlouhé otvory používáme stroje s vodorovným vřetenem.

### 3 HONOVÁNÍ

#### 3.1 Charakteristika

Honování je řízená dokončovací operace za nízkých rychlostí, kde k obrobení plochy dochází abrazivním účinkem zrn brusiva, které tvoří honovací kámen s pojivem. Honováním se dokončují povrchy vnitřních i vnějších válcových ploch, v případě kuželových ploch je třeba použít přídatného zařízení. Můžeme honovat díry průchozí i neprůchozí o průměrech v rozmezí od 1,6 mm až 750 mm. Moderní stroje zvládnou průměry až 1250 mm. Délky honovaných děr mohou být různé, maximálně však 24 m.<sup>13</sup>

Honováním se dají spravit různé nerovnosti, ovalita či kuželovitost, avšak není možné opravit směr nebo polohu osy díry.

Velikosti přídavek se volí jako dvojnásobek velikosti rozměrové nebo tvarové přesnosti u běžných obrobků (obvykle 0,02 – 0,08 mm). U speciálních obrobků, u kterých je potřeba honovat hůře dostupná místa a vytvořit tak kvalitní povrch, je možné volit i větší přídávky. U těchto obrobků se provádí nejdříve hrubovací honování a poté jemné honování na čisto. Před samotným honováním se obrobky brousí anebo vyvrtávají.

Honování se provádí zpravidla honovacími kameny, které jsou mechanicky nebo pneumaticky přitlačovány na plochu obrobku. Velikost přitlaku se volí podle druhu obráběného materiálu a pohybuje se obecně kolem 0,35 až 1,4 MPa. Tyto kameny jsou umístěny v honovacích hlavách obvykle po 3 až 12 kamenech v závislosti na průměru díry. Honovací hlava koná dva pohyby, a to pohyb rotační a pohyb přímočarý vratný. Mezi těmito pohyby je poměr 2:1. Honuje se jednou hlavou anebo více hlavami, které však mají kameny s menší zrnitostí. Důležité je taky nastavení náběhu a přeběhu, které by mělo mít délku asi 1/3 délky honovacího kamene. V případě nesprávného seřízení a nastavení se vytvoří nepřesné díry soudkovitého, kuželovitého nebo vypouklého tvaru.

Teplu, které nám při honování vzniká, je třeba regulovat a společně s třískami odvádět. Proto používáme chladicí kapalinu, obvykle ve směsi dvou nebo více složek a olej, který udržuje konstantní teplotu obrobku a zamezuje nepříznivým změnám.

Nejčastěji se používá honování při výrobě spalovacích motorů a hydraulických prvků jako je vedení ventilů nebo šoupátek. Dále pak třeba pro bubny či ojnice.

Tab.3.1 Dosažitelné drsnosti a přesnosti rozměrů<sup>2</sup>

Honování	Přesnost rozměrů IT	Drsnost povrchu Ra [μm]
	Rozsah	rozsah
Hrubovací	5 - 6	0,2 – 0,5
Dvoufázové	4 - 5	0,1 – 0,2
Jemné	3 - 4	0,025 – 0,1

### 3.2 Řezné podmínky

Jako vhodná řezná rychlost se používá okolo  $150 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ . Měrný tlak mezi honovacím nástrojem a obrobkem je proměnlivý a pohybuje se v rozmezí 200 až 1000 kPa. Tento tlak má vliv na rychlost úběru materiálu. Doporučuje se začít honování s nižším měrným tlakem a tlak postupně zvyšovat dokud se dosáhne ideálních podmínek. Použitím vysokého tlaku hned u začátku honování vznikne hrubý povrch.<sup>13</sup>

#### 3.2.1 Výpočtové vztahy<sup>4</sup>

Obvodová rychlost součástky:

$$v_0 = \frac{D \cdot \pi \cdot (n_1 + n_2)}{1000} \quad [\text{m}/\text{min}] \quad (3.1)$$

Kde: D [mm] – průměr otvoru

$n_1$  [ $\text{min}^{-1}$ ] – otáčky honovací hlavice

$n_2$  [ $\text{min}^{-1}$ ] – otáčky obrobku

Osová rychlost:

$$v_a = \frac{2 \cdot z \cdot L_z}{1000} \quad [\text{m}/\text{min}] \quad (3.2)$$

Kde: z [ $\text{min}^{-1}$ ] – počet dvojzdvihů

$L_z$  [mm] – délka zdvihu honovací hlavice

Výsledná rychlost:  $v_c = \sqrt{v_0^2 + v_a^2} \quad [\text{m}/\text{min}] \quad (3.3)$

Délka zdvihu honovací hlavice:

$$L_z = L + l_1 + l_2 - l \quad [\text{mm}] \quad (3.4)$$

Kde: L [mm] – délka otvoru

$l_1$  [mm] – dolní přeběh

$l_2$  [mm] – horní přeběh

l [mm] – délka kamene

Úhel křížení stop  $2\alpha$ :

$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{v_a}{v_0} = \frac{2 \cdot z \cdot L_z}{\pi \cdot D \cdot (n_1 + n_2)} \quad (3.5)$$

Nejlepší úběr třísky má při hodnotě  $\alpha=45^\circ$ .

### 3.3 Honovací nástroje

Nástrojem pro honování je honovací hlava, která se skládá z honovacích kamenů, jenž jsou v hlavě uloženy podél její osy po 3 až 12 kusech. Kameny mají tvar kvádrů a na obrobek jsou přitlačovány tlakem  $p_k$ . Honovací hlavy se pak upínají pomocí kloubů nebo pevně do vřetene tak, aby vznikla vazba mezi honovacími kameny a plochou obrobku.

Honovací kameny jsou podobně jako u brousících kotoučů tvořeny brusivem, jejichž zrna bývají z umělého korundu, karbidu křemíku nebo diamantu. Pojivo, které drží zrna pohromadě, pak může být keramické, kovové nebo pryskyřičné. Zrnitost se volí podle požadované drsnosti povrchu a taky podle rychlosti obrábění. Zpravidla se pohybuje v rozmezí 8 - 710  $\mu\text{m}$ , avšak nejčastěji se používá zrnitost 32 - 142  $\mu\text{m}$ .<sup>13</sup>



Obr.3.1 Honovací hlava<sup>11</sup>



Obr.3.2 Honovací kameny<sup>11</sup>

### 3.4 Honovací stroje

Stroje jsou ruční, kde se používají vrtačky a posuv je tak konán ručně nebo vřetenem vrtačky, a strojní, které se vyrábějí buď jako jednovřetenové nebo vícevřetenové. V obou případech jde o stroje s vertikálním vřeteníkem. Na těchto honovačkách je možné dokončovat plochy o průměru až 400 mm a délce až 500 mm. Pro delší součásti se pak používají horizontální honovačky. Čas honování se pohybuje obvykle do 3 minut (u středně velkých součástí).

Zlepšení kvality a zrychlení obráběcího procesu se dosáhne tzv. vibračním honováním na speciálních honovačkách, kde nástroj, příp. obrobek, koná rychlý rotační nebo posuvný kmitavý pohyb.



Obr.3.3 Vertikální honovací stroj<sup>12</sup>

## 4 SUPERFINIŠOVÁNÍ

### 4.1 Charakteristika superfinišování

Superfinišování je dokončovací metoda, při níž je možno obrábět vnitřní i vnější rotační a rovinné plochy. Je to vysoce produktivní metoda, u které dosahujeme vysoké kvality povrchu pomocí superfinišovacích kamenů.

Při výrobě rotačních součástí se řezný pohyb skládá ze dvou pohybů. Rotační pohyb koná obrobek, kdežto pohyb superfinišovacích kamenů je kmitavý a kolmý na směr pohybu součásti. Kameny jsou na součást pneumaticky nebo hydraulicky přitlačovány, tak aby odebíraly dané množství materiálu. Mezi plochu obrobku a kamenů je přiváděna řezná kapalina, většinou ve formě oleje nebo petroleje.

Superfinišování je možno provádět ve dvou etapách. Při první se obrobek hrubuje, zrna kamenů se zařezávají do předpracované plochy a vzniklé třísky se lehko odplavují. Tímto vzniká povrch o poměrně dobré jakosti, ale na dotyk je matný. Proto při druhé etapě se obrobek leští, při čemž se téměř neodebírá žádný materiál, ale pouze se zahlazují nerovnosti a dokončená plocha má lesklý povrch.

Proces superfinišování pracuje za určitého přitlačného tlaku, který se však v průběhu snižuje, až nakonec dojde k vytvoření tenké kapalinné vrstvy mezi obrobkem a kameny, které po této vrstvě už jen kloužou, avšak neodebírají žádný materiál. Po dosažení tohoto stavu se proces superfinišování sám zastaví, což znamená, že by mělo být dosaženo požadované drsnosti. Pokud by tomu tak nebylo, musela by se zvýšit přitlačná síla kamenů na obrobek a proces by pak pokračoval.

Pro superfinišování, kterému většinou předchází broušení nebo jemné soustružení, se dává přídavek na obrábění v rozmezí 2 až 12  $\mu\text{m}$ , který však závisí na výsledné požadované drsnosti.

Nejčastější použití superfinišování je v automobilovém průmyslu, zejména pro dokončování klikových hřídelí, pístních čepů a ložisek.

Tab.4.1 Dosahované přesnosti rozměrů a drsnosti povrchu <sup>2</sup>

Superfinišování	Přesnost rozměrů IT		Drsnost povrchu Ra [ $\mu\text{m}$ ]	
	střední	rozsah	střední	rozsah
Dokončovací	4	3 - 5	0,2	0,05 – 0,40
Jemné	3	2 - 4	0,05	0,025 – 0,100



## 4.2 Řezné podmínky <sup>1</sup>

Řezné rychlosti jsou při superfinišování poměrně malé. Obvodová rychlost obrobku  $v_o$  se pohybuje v rozmezí 10 až 80 m.min<sup>-1</sup>. Kmitavý pohyb kamenů má frekvenci 5 až 60 Hz (500 – 3000 min<sup>-1</sup>) s amplitudou 2 až 6 mm a rychlost posunovacího zdvihu  $v_f$  je obvykle okolo 2 – 15 m.min<sup>-1</sup>.

Pro přitlačení kamenů je potřeba přitlačný tlak  $p_k=0,1$  až 0,4 MPa.

Neúčinnějšího úběru dosahujeme při úhlu záběru  $\alpha=40 \div 60^\circ$ .

## 4.3 Nástroje

Úběr materiálu je prováděn pomocí superfinišovacích kamenů (1 až 4 kusy). Tyto kameny jsou vyráběny zpravidla ze stejných materiálů jako u broušení nebo honování. Pro obrábění ocelí se používá  $Al_2O_3$  s keramickou nebo bakelitovou vazbou, pro obrábění ocelí s nižší pevností, litin a neželezných kovů se používá SiC. Superfinišování vysokolegovaných nástrojových a konstrukčních ocelí se provádí nástroji z kubického nitridu bóru. Pro velmi tvrdé materiály (např. slinuté karbidy) se využívá diamantového prášku v organické vazbě. Podle požadované drsnosti povrchu se volí zrnitost v rozmezí od 180 do 600  $\mu m$ , v některých případech i jemnější. Kameny jsou upevňovány do superfinišovacích hlav mechanicky, nebo se nalepují na ocelové podložky. <sup>1</sup>

## 4.4 Stroje

V dnešní době jsou stroje konstruovány tak, aby byly schopny pojmout různě veliké a tvarově rozmanité součásti. Patří k nim stroje jednovřetenové a vícevřetenové, které jsou určeny spíše do sériové výroby. Pro malosériovou výrobu se používají speciální přídavná zařízení, která se upínají buď na soustruh, nebo hrotovou brusku. Pro vnitřní superfinišování ložisek se používají speciální stroje.



Obr.5.1 Superfinišovací zařízení Supfina Race <sup>14</sup>

## 5 JEMNÉ SOUSTRUŽENÍ

### 5.1 Popis metody

Soustružení patří mezi nejrozšířenější metody obrábění rotačních ploch. Je to druh třískového obrábění pomocí geometricky určeného břitu, jehož hlavní řezný pohyb je rotační a koná ho obrobek. Vedlejší pohyb (posuv a přísuv) koná jednobřítý nástroj, který je pevně upnut a je přímočaře veden podél obráběné plochy.

Soustruh tedy slouží k obrábění především vnějších a vnitřních rotačních ploch, ale můžeme na něm taky vyrábět zápichy, vrtat, vyvrtávat, vystružovat, řezat závity, vroubkovat, válečkovat atd.

Nejpřesnější a nejméně drsné plochy dosáhneme pomocí jemného soustružení, které patří již k dokončovacím metodám a je třeba na něj ponechat nějaký přídavek. Hodnoty přesnosti rozměrů jsou IT6 – IT7 a drsnosti povrchu  $R_a = 0,4$  až  $1,6 \mu\text{m}$  s nástrojem ze slinutého karbidu. U nástroje z diamantu je povrch ještě kvalitnější a to se stupněm přesnosti IT 5 – 6 a drsností  $R_a = 0,2$  až  $0,8 \mu\text{m}$ .<sup>17</sup>



Obr.9.1 Vnitřní jemné soustružení<sup>15</sup>

### 5.2 Řezné podmínky

Řezná rychlost nejvíce závisí na materiálu obrobku, druhu nástroje, na velikosti průřezu nebo na geometrii břitu. Charakteristickým prvkem u jemného soustružení je vysoká řezná rychlost.

Dá se taky spočítat jako <sup>2</sup>:

$$v_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} \quad [\text{m/min}] \quad (5.1)$$

Kde: D [mm] – průměr obrobku

n [ $\text{min}^{-1}$ ] – otáčky

Přídavky pro jemné soustružení se obvykle volí 0,2 až 0,5 mm na obráběný průměr. Posuv závisí na požadované jakosti a velikosti součásti a je 0,005 až 0,05 mm. Dále se volí hloubka řezu 0,03 až 0,3.

Tab.5.1 Řezné rychlosti při soustružení<sup>16</sup>

Materiál obrobku	Řezné rychlosti $v_c$ [m/min]								
	hrubování			Na čisto			Jemné sous.		
	f > 0,3			f = 0,3 – 0,05			f < 0,05		
	Materiál nástroje			Materiál nástroje			Materiál nástroje		
	RO	SK	KM	RO	SK	KM	RO	SK	KM
Uhlíková ocel do 800 MPa	15	60	-	20	90	150	60	150	300
	až	až	-	až	až	až	až	až	až
	40	140	-	60	180	400	100	250	600
Uhlíková ocel nad 800 MPa	10	40	-	15	70	120	50	120	350
	až	až	-	až	až	až	až	až	až
	35	100	-	50	140	300	80	200	500
Legované oceli	8	35	-	15	45	-	30	60	-
	až	až	-	až	až	-	až	až	-
	35	110	-	50	160	-	60	150	-
Šedá litina	15	30	-	20	60	120	-	-	-
	až	až	-	až	až	až	-	-	-
	30	90	-	50	100	200	-	-	-
Slitiny hliníku	20	80	-	40	120	150	80	150	300
	až	až	-	až	až	až	až	až	až
	80	200	-	100	300	600	120	350	800

### 5.3 Nástroje

Při jemném soustružení se nejčastěji používají moderní soustružnické nože s vyměnitelnými břitovými destičkami, které jsou vyrobeny buď z řezné keramiky, slinutého karbidu (SK), kubického nitridu bóru (CBN) nebo diamantu. Polykrystalický diamant má ve srovnání se slinutým karbidem vyšší tvrdost či lomovou houževnatost. Zejména při použití u těžkoobrobitelných materiálů se nám PD jeví jako ideální řezný materiál, jelikož produktivita obrábění je na vysoké úrovni a náklady nejsou nijak vysoké. U složitějších případů, kdy je třeba obrábět vysoce tvrdý, kalený materiál se používají povlakované břitové destičky. Povlak je většinou z TiC nebo TiN. Navíc je doporučeno u takto tvrdých materiálů volit záporný úhel čela. Destičky mají více břitů a po otupení jednoho stačí destičku pouze otočit.

Při jemném soustružení pracují nástroje za vysokých řezných rychlostí. Při použití nástroje z SK to může být až 250 m/min. U PKD je optimální řezná rychlost 20 – 150 m/min a u CBN pak 80 – 160 m/min.



Obr.9.2 Nástroj pro vnitřní soustružení<sup>11</sup>



Obr.9.3 Břitové destičky z CBN<sup>17</sup>

## 5.4 Stroje

Soustružnické stroje se dělí podle konstrukčního hlediska na hrotové, svislé, revolverové, čelní a speciální. Dále se pak mohou dělit podle stupně automatizace a to na ručně ovládané, poloautomatické a automatické.

Hrotové soustruhy se používají pro výrobu hřídelí a součástí různých tvarů a rozměrů, které jsou upnuty ve sklíčidle, mezi hroty, v kleštinách atd. Tyto stroje jsou určeny pro malosériovou a kusovou výrobu.

Na univerzálních hrotových soustruzích lze vyrábět vnitřní a vnější rotační plochy, vrtat, řezat závity, zapichovat, vypichovat atd. Jsou charakteristické tím, že obsahují vodící šroub, jehož pomocí můžeme řezat závity s jakýmkoliv stoupáním. Součástí tohoto soustruhu je taky kopírovací zařízení, díky němuž můžeme vyrábět např. vačky.

Dalším strojem je svislý soustruh neboli karusel. Vyrábí se ve dvou variantách. Jednostojanový a dvoustojanový. Obrobek, který koná hlavní pohyb (rotační) se upíná k otočnému stolu. Na těchto soustruzích se obrábí střední a velké rotační plochy (vnitřní i vnější) o malých délkách. Dále se pak mohou pomocí karuselu řezat závity a s využitím brousícího vřeteníku brousit vnitřní i vnější povrchy.



Obr.9.4 Svislý soustruh firmy FermaT<sup>18</sup>

## 6 VYHRUBOVÁNÍ A VYSTRUŽOVÁNÍ

### 6.1 Charakteristika

Mezi nejběžnější metody výroby děr patří vrtání, po kterém pak následuje vyhrubování a vystružování, aby se dosáhlo přesnějších rozměrů a lepších drsností povrchu. Samotné vystružování se řadí již k dokončovací metodám a většinou je to poslední operace, po které výjimečně následuje broušení nebo válečkování. U děr o průměrech do 10 mm se převážně jenom vystružuje. U větších děr se pak nejdříve vyhrubuje a až po té se povrch dokončí vystružováním.

Vyhrubování probíhá vícebřitým nástrojem (3 – 4 břitým), vystružování pak mnohobřitým nástrojem.

Drsnosti povrchu, kterých při vyhrubování dosahujeme, se pohybují v rozmezí 1,6 – 3,2  $\mu\text{m}$  a stupně přesnosti IT9 – IT12. Pro výrobu přesných rotačních ploch je tedy nezbytné vystružování, díky kterému dosahujeme drsností povrchu 0,4 – 1,6  $\mu\text{m}$  (v případě lepších nástrojů i 0,15  $\mu\text{m}$ ) a přesnosti rozměrů IT5 – IT7.<sup>17</sup>

### 6.2 Řezné podmínky

Na vystružovaný povrch jsou kladeny poměrně vysoké nároky, aby bylo možné dosáhnout co nejlepšího výsledku. Vstupní parametry, jako jsou řezné rychlosti, posuvy, či přídavky závisí na velikosti díry a druhu obráběného materiálu. Od toho se odvíjí typ použitého nástroje.

Pro vyrábění přesných děr je potřeba volit dostatečně velký přídavek na obrábění, který je 0,1 až 0,4 mm a hloubka záběru, jenž je u vystružování 0,1 – 0,3 mm. Posuv na otáčku se u běžných materiálů pohybuje kolem 0,05 až 1,1 mm/ot.

U vystružování se již nepracuje s tak vysokými řeznými rychlostmi jako u jemného soustružení. I tak ovšem během procesu vzniká teplo, které se stejně jako třísky z místa obrábění špatně odvádějí a je potřeba nástroj řádně chladit a mazat, obvykle nějakou emulzí nebo olejem. Rychlosti u vyhrubování jsou přibližně stejné jako rychlosti vystružování, záleží však na materiálu obrobku. Pohybují se v rozsahu od 10 – 100 m/min.

Důležitým parametrem je výkon vrtání, který se dá spočítat jako<sup>16</sup>:

$$P_h = 2 \cdot \pi \cdot M_k \cdot n \quad [\text{W}] \quad (6.1)$$

Kde:  $M_k$  [N.mm] – krouticí moment

$n$  [ $\text{min}^{-1}$ ] – otáčky

Tab.6.1 Řezné podmínky pro vyhrubování a vystružování<sup>3</sup>

Obráběný materiál		$v_c$ [m/min]	$f_o$ [mm]
Šedá litina	Vyhrubování	6 - 10	0,2 – 0,7
	Vystružování	10 - 30	0,1 – 1
Ocel Rm=600MPa	Vyhrubování	15 – 18	0,2 – 0,7
	Vystružování	7 – 15	0,1 – 0,8
Ocel Rm=1000MPa	Vyhrubování	6 – 8	0,2 – 0,7
	Vystružování	2 – 6	0,2 – 6
Al slitiny	Vyhrubování	30 – 50	0,5 – 2
	vystružování	30 - 60	0,5 – 2

### 6.3 Nástroje<sup>17</sup>

Výhrubníky jsou tři až pětibřité nástroje s břity ve šroubovici o stoupání 20°. Zlepšují rozměrovou, tvarovou a polohovou přesnost a kvalitu povrchu ( $R_a = 3,2$  až 1,6). Mohou se vyrábět s kuželovou stopkou nebo jako nástrčné s břity ze slinutých karbidů nebo rychlořezné oceli.

Vystružníky jsou rozměrové nástroje s větším počtem břitů jak výhrubníky (6 až 18 dle průměru díry). Zuby mohou být rovné nebo ve šroubovici. Skládají se z řezného kužele, vedení, krčku a stopky. Vyrábějí se z RO nebo také se vsazenými břitovými destičkami ze slinutých karbidů.

Mezi poměrně nové a kvalitní vystružovací nástroje patří výstružníky s břity z cermetu. Cermet je v mnoha ohledech podobný slinutému karbidu, liší se však chemickým složením. Při použití těchto nástrojů vykazuje obrobena plocha velice nízkou drsnost povrchu a rozměrovou přesnost. Za pomoci těchto nástrojů se dá pracovat s vysokými řeznými rychlostmi, které mohou být až  $180 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ . Navíc trvanlivost se nezkracuje, naopak je dokonce delší. Největší výhodou těchto cermetových nástrojů je jejich poměr ceny k výkonu.

Další novinkou jsou výstružníky firmy August Beck a jejich typy HNC pro vystružování tvrdých materiálů, např. nerez ocelí. Dokážou obrábět materiály o tvrdosti až 63 HRC. Břity jsou vyrobeny ze slinutého karbidu, které mají speciální geometrii a jsou opatřeny zvláštním povlakem.

Obr.8.1 Výstružník s břity z cermetu <sup>17</sup>Obr.8.2 Výstružník HNC pro průchozí otvory <sup>17</sup>

## 6.4 Stroje

Stejně jako pro vrtání, se i pro vyhrubování a vystružování používají běžné vrtačky. Je taky možné pomocí stopkového upnutí obrábět ve vyvrtávacích nebo frézovacích centrech.

Vrtačky se dělí dle konstrukce a použití na sloupové, stolní, stojanové, otočné, souřadnicové či speciální.

Obr.8.3 Sloupová vrtačka <sup>19</sup>



## 7 LEŠTĚNÍ

### 7.1 Charakteristika

Leštění patří k dokončovacím metodám s úběrem materiálu, avšak úběr je zde velice malý a slouží hlavně pro zlepšení vzhledu. Dosahuje se lesklého povrchu, avšak leštěním už nedochází ke zvýšení přesnosti tvaru a rozměrů součásti. Pouze se zbavujeme nežádoucích nečistot, malých nerovností nebo vrstviček oxidů. Leštění se často používá před dalšími povrchovými úpravami.

První fází bývá obvykle hrubování brousícími zrnny, které jsou pevně vázány na textilní povrch pásů, kotoučů nebo brousících pláten. Následuje jemné leštění zrnny volně rozptýleny v oleji nebo leštící pastě, které jsou nanášeny na textilní kotouče či pásy. Nakonec se doleštuje samotným kotoučem nebo pásem přitlačovaným na povrch součásti. Díky vysoké rychlosti dojde k zahřátí povrchu a plastické deformaci nerovností.

Jako hrubovací, neboli přípravnou fází pro leštění je tzv. kartáčování. K úběru materiálu dochází pomocí kovových vláken umístěných na kotouči o různém průměru. Pro jemnější povrch se používají mosazné nebo bronzové drátky.

Mezi nepoužívanější metody leštění patří:

- Mechanické leštění
- Chemické leštění
- Elektrochemické leštění
- Leštění laserem

### 7.2 Leštící nástroje

#### 7.2.1 Kotouče a tělíška

Používají se kotouče lamelové, které tvoří pásy z brousících pláten, bavlna nebo kůže. Použité tkaniny mají různou tuhost. Lamely jsou příkládány k obrobku kolmo anebo zešikma.

Dále mohou být kotouče plstěné nebo kotouče tvořené vlákny z žíní nebo umělých hmot. Tyto vlákna se dají použít taky pro kombinaci s lamelami. Speciální skupinu tvoří tuhé kotouče, které jsou vyrobeny ze dřeva, gumy nebo kovu.

Pro vnitřní plochy se nejčastěji používají leštící tělíška, která mohou být různého tvaru, dle typu použití. Obvykle se vyrábí buď jako plstěná anebo elastická.

Obvodová rychlost kotouče je obvykle 25 až 40 m/s.

Obr.4.1 Plstěná leštící tělíska<sup>20</sup>

### 7.2.2 Kartáče

Kartáče se používají pro leštění na hrubo, u kterého dosahujeme matného povrchu, který pak leštíme kotouči nebo tělíska. Kartáče mohou být tvořeny vlákny z umělých hmot, žíní nebo kovových drátků (ocel, mosaz, bronz).

Obr.4.2 Leštící ocelový kartáč<sup>21</sup>

### 7.3 Stroje

Leštění se může provádět ručně nebo strojně. Pro ruční leštění se používají běžné ruční brusky. Strojní leštění se provádí většinou na víceúčelových lapovacích strojích.

Obr.4.3 Ruční leštění<sup>21</sup>

## 8 VÁLEČKOVÁNÍ

### 8.1 Popis válečkování

Válečkování je dokončovací metoda, při které nedochází k žádnému úběru materiálu. Mohou se jím dokončovat vnější i vnitřní rotační plochy, rovinné i tvarové plochy, závity, zápichy nebo drážky. Princip spočívá ve valení otočného nástroje (válečků) po povrchu obrobku, kde dochází k plastické deformaci. Výsledkem je vyšší přesnost rozměrů a lepší vzhled. Zvyšuje se tvrdost, pevnost a odolnost proti otěru. Válečky jsou k obrobku přitlačovány mechanicky přes vodící šroub, hydraulicky anebo pružinami. Výsledná drsnost  $Ra=0,4$  až  $0,005 \mu\text{m}$ , přesnost rozměrů IT7 až IT4 a hloubka zpevnění povrchové vrstvy je  $0,1$  až  $10 \text{ mm}$ .<sup>1</sup>

Válečkování se dělí na:

- Zapichovací nebo podélné
- Statické
- Dynamické
- Přímé
- Šikmé

#### 8.1.1 Statické válečkování

Na váleček, který se odvaluje po součásti, působí konstantní síla. Velikost této síly se pohybuje od  $500$  do  $5000 \text{ N}$ . Mezi nástrojem a obrobkem díky této síle dochází ke tření. Pro zlepšení podmínek a výsledku je lepší použít mazání (olej nebo příměsi). Drsnosti povrchu se pohybují od  $0,1$  do  $0,4 \mu\text{m}$ . Pro statické válečkování se používají univerzální nástroje, jejichž konstrukce není tolik složitá. V praxi se válečkování používá pro válce motorů, hřídele, čepy, trubky atd.

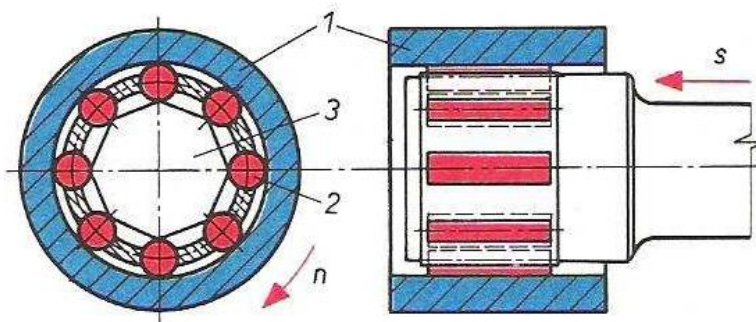
Tab.8.1 Pracovní podmínky vnitřního válečkování<sup>2</sup>

Válečkováný průměr [mm]	Vnitřní válečkování	
	Otáčky [ $\text{min}^{-1}$ ]	Posuv na otáčku [mm]
5	100	0,15
12	700	0,3
40	400	1,0
65	250	1,8
95	200	2,7

Doporučené otáčky lze v případě speciálních požadavků snížit nebo zvýšit o 50%, posuv na otáčku zvýšit o 30%.

### 8.1.2 Dynamické válečkování

Na součást již nepůsobí stálá síla, ale silové impulsy (rázy). Jejich frekvence je 10 až 5000 cyklů/s v závislosti na druhu zdroje, který vyvolává ráz, což mohou být např. vačky pneumatických pulsátorů. Dynamickým válečkováním dosahujeme vyššího zpevnění povrchu než u statického válečkování, ale drsnost povrchu je však horší ( $R_a = 0,2 \div 0,8 \mu\text{m}$ ).



Obr.6.1 Vnitřní válečkování<sup>22</sup>

## 8.2 Nástroje

Konstrukce nástrojů závisí na jeho využití, ploše obrobku a požadované přesnosti. Mohou se vyrábět v různých variantách a kombinacích. Pro vyhlazování se používají odpružené nástroje a pro zpevňování nebo kalibrování se používají nástroje pevné.

Jednou z možností je použití válečkovacího nástroje složeného z válečků, vyrobených z oceli nebo karbidu, které jsou uloženy ve tvářecím těle. Druhou možností je použití nástroje s diamantovou ploškou, u kterého je použití obdobné jako u soustružnických nožů. Speciální skupinu tvoří hydraulické nástroje, které mají místo válečků kuličky a používají se pro průchozí otvory, slepé otvory, kuželové otvory či otvory se zvláštním tvarem. V dnešní době se vyskytují i nástroje s vestavěným mikrometrem, které je možné nastavit na obrábění jiných průměrů.

Válečky je možno nahradit i kuličkami, kterými se dají obrábět krom běžných vnitřních a vnějších rotačních ploch i plochy tvarové. Kuličky mají s obrobkem menší stykovou plochu a tak není zapotřebí používat velkých přítlačných sil. Dosahují se stejné drsnosti jako u válečků, avšak jejich nevýhodou je především to, že mají tendenci více kopírovat nerovnosti povrchu po předešlém obrábění.

Používají se i nástroje kombinované jako jsou vyvrtávací hlavy s válečkovacím nástrojem ve společném tělese. Tyto nástroje jsou ideální pro dosažení vyšších přesností a výkonu.

Pořizovací cena válečkovacích nástrojů není příliš vysoká a po konci životnosti, která může být až několik set tisíc obrobků, stačí pouze obstarat nové válečky (kuličky) nebo diamantové plošky.



Obr.6.2 Nástroj pro vnitřní válečkování<sup>23</sup>

### 8.3 Stroje

Pro válečkování není třeba konstruovat a stavět nějaké speciální stroje. Provádí se převážně na běžných soustruzích, CNC soustruzích a obráběcích centrech, díry se mohou válečkovat taky na vrtačkách či vyvrtávačkách.

Pro praxi je to velkou výhodou, hlavně z hlediska ekonomiky a úspory času, jelikož na jednom stroji lze provést více operací a nemusí se kupovat další stroje.

## 9 VYHLAZOVÁNÍ, KALIBROVÁNÍ

### 9.1 Vyhlazování

Vyhlazování (hlazení) patří k dalším dokončovací metodám bez úběru materiálu. Je vhodné jak pro vnitřní a vnější rotační plochy, tak pro čelní rovinné plochy. Princip spočívá ve vyvolání plastické deformace za studena v povrchové vrstvě pomocí přitlačení nástroje (tlak) a vzájemném pohybu tohoto nástroje po obrobku (smyk). Nástroj je tvořen hrotem kuželového tvaru, který je připevněn k ocelovému tělesu, které se pak upíná do stroje.

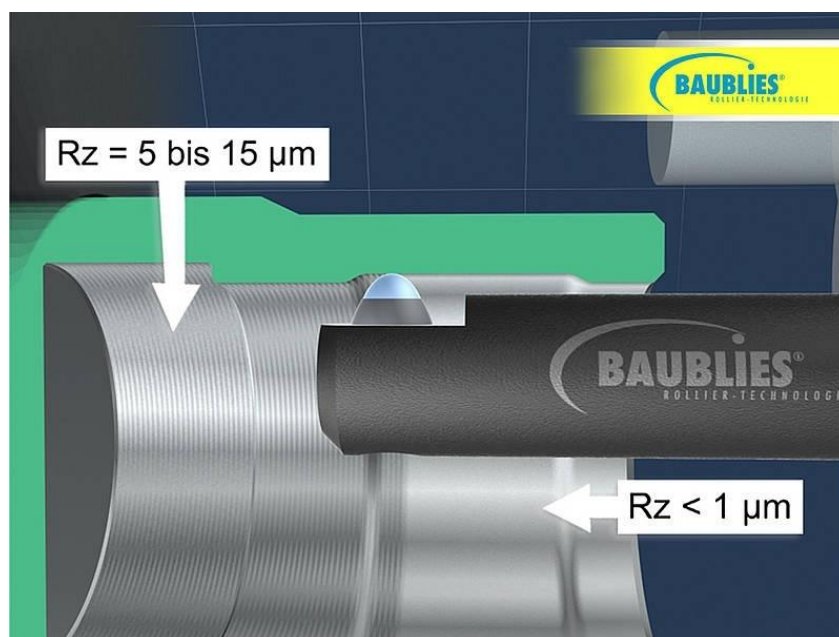
Při hlazení dochází především ke zvýšení tvrdosti a zlepšení drsnosti povrchu. Výsledek závisí hlavně na tvaru a materiálu nástroje, přitlačné síle, která se pohybuje od 80 do 1000 N a rychlosti pohybu. Ta je u hlazení přibližně 40 - 100 m.min<sup>-1</sup>, posuv pak 0,02 - 0,1 mm.ot<sup>-1</sup>. Jelikož vzniká kvůli tření nežádoucí teplo, tak je třeba nástroj mazat a chladit. Proto se používají různé oleje a emulze.

Tvrdost, které se při vyhlazování dosahuje pomocí diamantového kužele je asi 65 HRC a drsnost kolem  $R_a=0,2 \mu\text{m}$ . V jiném případě se drsnost povrchu pohybuje v rozmezí  $0,1 \div 0,4 \mu\text{m}$ .<sup>1</sup>

#### 9.1.1 Nástroje pro vyhlazování

Pracovním prvkem je kuželový hrot, který obvykle bývá z kalené oceli, slinutého karbidu, spékaného korundu, kubického nitridu bóru nebo syntetického diamantu. Zvolený materiál má poté velký vliv na výsledný povrch součásti.

Nástroj je umístěn do držáků, které se pak upínají do běžných soustruhů. Není tedy zapotřebí žádných speciálních strojů.

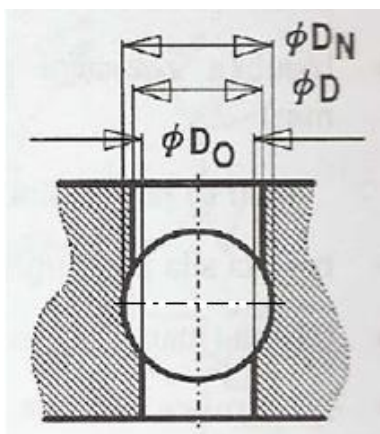


Obr.7.1 Diamantový vyhlazovací nástroj firmy Baublies<sup>24</sup>

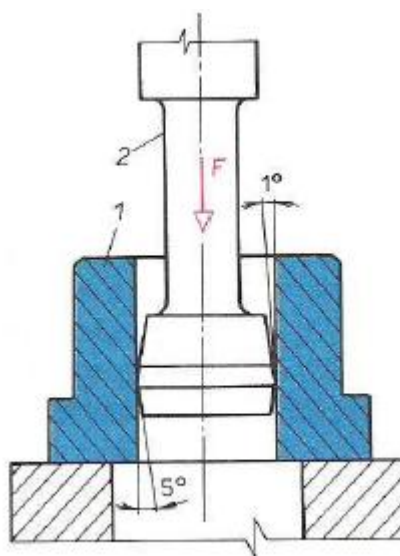
## 9.2 Kalibrování

Dokončovací metoda vnitřních a vnějších ploch bez úběru materiálu. Přímočarý pohyb nástroje, jehož rozměry jsou v případě vnitřních ploch větší o tisíce mm, vytváří plastickou deformaci a upravuje tak povrch obrobku. Mezi nástroje patří kalená kulička, speciální trn nebo objímka. Pohyb nástroje je zajišťován mechanicky, hydraulicky, rázem tlakové kapaliny nebo taky výbuchem.

Výsledný povrch obrobku po kalibrování má přesnost rozměrů IT6 ÷ IT4 a drsnost povrchu  $Ra=0,4 \pm 0,005 \mu\text{m}$ . Průběh kalibrování může být rozložen do více chodů, kdy se postupně zvětšuje rozměr nástroje.<sup>1</sup>



Obr.7.2 Kalibrovací kulička<sup>22</sup>



Obr.7.3 Speciální trn<sup>22</sup>

## 10 NEKONVENČNÍ METODY OBRÁBĚNÍ<sup>1, 26</sup>

### 10.1 Popis

Je to obrábění, u kterého na daný obrobek nepůsobí běžné mechanické síly, ale je založeno na fyzikálním nebo chemickém principu úběru materiálu nebo jejich kombinací. Nevzniká tedy žádná tříska jako u konvenčních třískových metod.

Díky těmto metodám jsme schopni obrábět tvrdší a houževnatější materiály, ve výsledku je důležité taky ekonomické využití. Nekonvenční metody jsou v mnoha případech jediným řešením pro obrobení složitějších a náročnějších prvků.

Vzhledem k minimálním mechanickým vlivům se snižuje i tepelné zatížení obrobku, nevýhodou pak může být vysoká náročnost na energii a produktivita.

### 10.2 Elektroerozivní obrábění

Patří do skupiny elektrotepelného obrábění, které jsou založeny na odtavování a odpařování mikroobjemu materiálu, který je zahřán na vysokou teplotu pomocí velké koncentrace energie. Samotný proces probíhá elektrickými výboji mezi anodou (nástrojová elektroda) a katodou (na obrobku). Tyto dvě elektrody jsou umístěny v nádobě s tekutým dielektrikem (kapalina s vysokým elektrickým odporem). Důležitým upozorněním je to, že touto metodou se smí obrábět pouze materiály, které jsou elektricky vodivé.

Lze dosáhnout dvou druhů výbojů. Prvním je oblouk, neboli stacionární výboj a druhým je jiskra, což je nestacionární výboj. Výboje probíhají mezi anodou a katodou ve vzdálenosti 0,01 až 0,5 mm. Jeho intenzita se potom volí na základě dané vzdálenosti mezi elektrodami, parametrech přístroje a znečištění, popř. vodivosti dielektrika.

Nástrojové elektrody jsou zhotovovány tak, že každá slouží právě pro jeden účel. Volba materiálu nástroje, jeho výrobu a upnutí do stroje je velice důležité pro správné obrobení a většinou závisí hlavně na materiálu součásti. Jako materiály se používají elektrolytická měď, ocel, mosaz a dále taky slitiny wolframu a mědi, wolframu a stříbra, chromu a mědi. Z nekovových materiálů je to grafit, který je vůbec nejpoužívanějším materiálem pro elektroerozivní obrábění nebo směs grafitu a mědi.

Mezi další metody, které pracují na bázi elektroerozivního obrábění, patří řezání drátovou elektrodou, které se používá převážně pro dělení velmi tvrdých a houževnatých materiálů. Následuje elektrokotáční obrábění, které se dá zařadit spíše do speciálních metod, díky níž se dají opracovávat svary. Nakonec se dá zmínit i anodomechanické obrábění, která už ovšem svým principem částečně zasahuje do chemického obrábění a používá se pro tvarové broušení tvrdých materiálů.

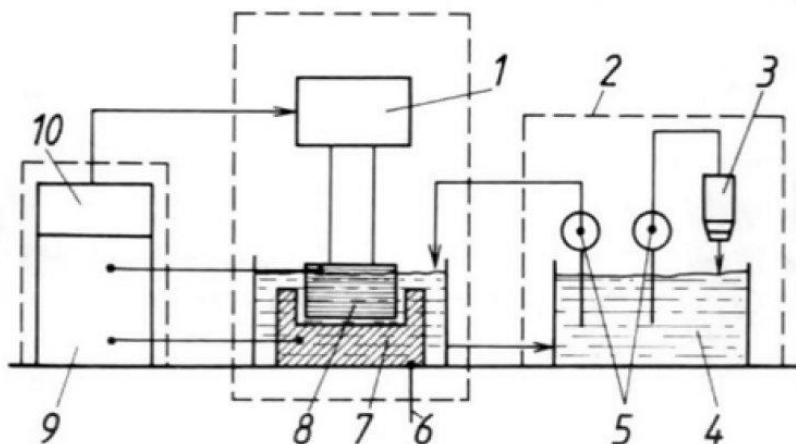


Elektroerozivní obrábění se nejčastěji používá pro výrobu dutin a zápustek forem či výrobu složitějších tvarů. Proces je řízen CNC systémem.

Dosahujeme drsnosti povrchu  $R_a = 0,8$  až  $0,4 \mu\text{m}$ , v lepších případech dokonce  $0,2 \mu\text{m}$ .



Obr.10.1 Nástrojové elektrody z mědi<sup>25</sup>



1 – pracovní hlava, 2 – filtrační zařízení, 3 – filtr, 4 - dielektrikum, 5 – čerpadlo, 6 – pracovní stůl, 7 – obrobek, 8 – nástrojová elektroda, 9 – generátor, 10 – CNC řídicí systém

Obr.10.2 Schéma elektroerozivního stroje<sup>26</sup>

### 10.3 Elektrochemické obrábění

Je to opět beztržisková metoda obrábění, jejíž základní podstatou je elektrolyza. Stejně jako u elektroerozivního obrábění je možno obrábět pouze elektricky vodivé materiály.

Základem jsou elektrody ponořené do dielektrika. Vlivem elektrolyzy a průchodem stejnosměrného proudu elektrolytem se obráběná plocha (anoda) rozpouští a nástroj (katoda) se tak vpíjí do obrobku a kopíruje jeho povrch. Úběr materiálu závisí na mezeře mezi těmito dvěma elektrodami, která je v rozmezí od 0,05 až 1 mm. Dále pak teplota, rychlost proudění a složení elektrolytu, pro nějž se používá NaCl, HCl, NaClO<sub>3</sub>, NaNO<sub>3</sub> nebo NaOH.

Mezi špatně obrobitelné materiály touto metodou patří např. šedá litina nebo slitiny obsahující mnoho uhlíku.

Přesnosti rozměrů se liší v závislosti na složitosti obráběné součásti. U jednodušších tvarů je to přibližně 0,01 mm a u složitějších pak 0,05 až 0,2 mm. Hodnota drsnosti povrchu Ra = 0,2 až 2 μm.

Využití elektrochemického obrábění je rozšířené v mnoha odvětvích strojírenské technologie. Jsou to např.:

- obrábění proudícím elektrolytem:

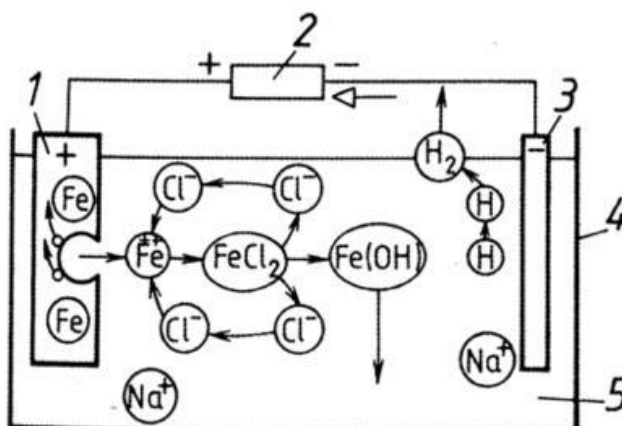
- hloubení tvarů a dutin zápustek
- hloubení otvorů o malých průměrech
- dělení materiálu a odstraňování otřepů

- obrábění s mechanickým odstraňováním

- honování
- lapování
- broušení

- povrchové obrábění bez odstranění produktů vzniklých chem. reakcí

- povrchové značení
- leštění



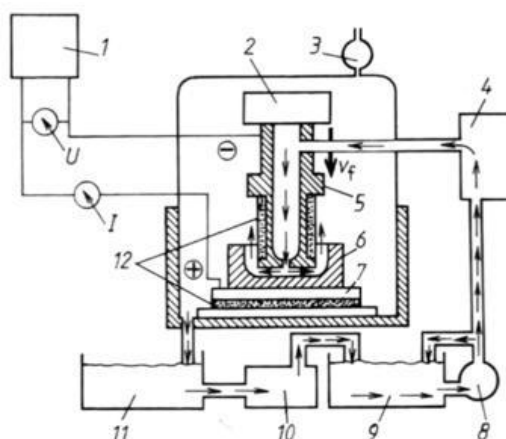
1 – obrobek (anoda), 2 – napájecí zdroj, 3 – nástroj (katoda), 4 – pracovní vana, 5 – elektrolyt

Obr.10.3 Princip elektrochemického obrábění<sup>26</sup>

### 10.3.1 Hloubení tvarů a dutin

Pro obrábění tvarů a dutin (převážně zápustek nebo forem) se používá elektrochemické obrábění proudícím elektrolytem. Princip je tedy v tom, že nástrojová elektroda se vtačuje do obrobku příslušnou rychlostí 0,5 až 100 mm/min. Tato rychlost nejvíce závisí na velikosti a tvaru obráběné plochy, pracovním proudem elektrolytu, rychlosti rozpouštění anody a teplotě elektrolytu. Elektrolyt by měl vyplňovat celou pracovní mezeru a jeho přísun být plynulý.

Nástroje pro hloubení děr jsou většinou vyrobeny z mosazi, mědi grafitu, korozivzdorné oceli nebo směsi grafitu s mědí. Pro přesné obrobení plochy není důležitý jen materiál nástroje, ale taky správná korekce jeho tvaru.



1 – napájecí zdroj, 2 – mechanismus posuvu, 3 – odsávání, 4 - filtr, 5 – nástroj, 6 – obrobek, 7 – pracovní stůl, 8 – čerpadlo, 9 – zásobník elektrolytu, 10 – filtr, 11 – nádrž s elektrolytem, 12 – izolace

Obr.10.4 Schéma zařízení pro elektrochemické hloubení dutin<sup>26</sup>

### **10.3.2 Elektrochemické honování**

Princip elektrochemického honování je stejný jako u klasického honování. Na záporný pól je nepojena honovací hlava s nevodivými lištami, na kladný pól je pak připojena součást, která je odizolována od rámu stroje.

Nevodivé lišty, jež tvoří honovací nástroj, jsou vyrobeny z SiC nebo z diamantu. Velmi důležitá pro výsledný povrch a průběh práce je velikost a stabilita pracovní mezery a rozptýlení elektrolytu po této mezeře.

Elektrolyt tvoří vodní roztoky  $\text{NaNO}_3$  nebo  $\text{NaNO}_2 + \text{Na}_2\text{CO}_3$ . Produktivita elektrochemického honování je až 6 krát vyšší než u honování klasického, avšak dosažené parametry se už příliš neliší.

### **10.3.3 Elektrochemické leštění**

Základem je anodické rozpouštění nerovností povrchu materiálu, ponořeného do elektrolytu, kde probíhá stejnosměrný proud. Nástroj (katoda), jenž je vyroben z olova musí mít větší plochu než obrobek. Jako elektrolyty se používají HCl,  $\text{H}_2\text{SO}_4$  nebo  $\text{H}_3\text{PO}_4$ .

Rychlost úběru materiálu je 0,5 až 0,8  $\text{mm}^3/\text{min}$  a jakosti povrchu  $R_a$  se dá dosáhnout i menší než 1  $\mu\text{m}$ .

Elektrochemické leštění se používá při dokončování tenkostěnných trubek a fólií nebo při čištění vnitřků nádob jako jsou cisterny.

## **10.4 Chemické obrábění**

Mezi základní operace chemického obrábění patří leptání a termické odstraňování otřepů.

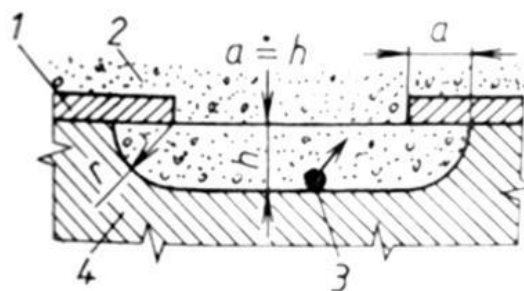
### **10.4.1 Leptání**

Mezi nástrojem a obrobkem probíhá chemická reakce, díky níž dochází k řízenému úběru materiálu. Nástroj tvoří kyselina nebo hydroxid. Místa, která se neobrábí, se zakryjí speciální maskou (většinou speciální laky nebo pryskyřice) v několika vrstvách. Samotné leptání se provádí v leptacím roztoku.

Leptání není určeno pro všechny materiály, takže se používá hlavně pro hliník a jeho slitiny, měď, mosaz, titan, konstrukční uhlíkové ocele atd.

Rychlost obrábění se pohybuje od 0,01 až 0,4  $\text{mm}/\text{min}$ , hloubka odebírané vrstvy je přibližně 10  $\mu\text{m}$ , avšak v praxi to může být dokonce jenom několik setin milimetru. Leptáním nelze obrobit ostré hrany a obrobek je nutné vkládat do lázně pod úhlem 45°.

Největší využití má leptání při výrobě mělkých, tvarově složitých reliéfů, dále při obrábění tenkostěnných součástí nebo na výrobu děr do tenkostěnných trubek a fólií.



1 – maska, 2 – nástroj (chemická leptací látka), 3 – odebrané (odleptané) částice materiálu obrobku, 4 - obrobek

Obr.10.5 Princip chemického obrábění<sup>26</sup>

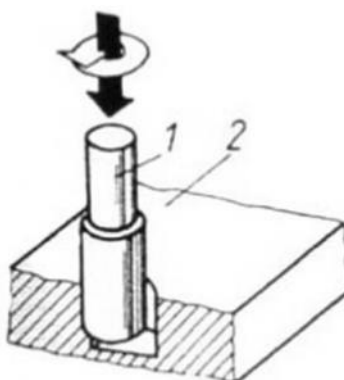
## 10.5 Obrábění ultrazvukem

Ultrazvukové obrábění patří k nekonvenčním metodám abrazivního obrábění. Dochází k řízenému rozrušování materiálu obrobku pohybem zrn abrazivního materiálu za působení kavitace. Celý proces je založen na mechanickém úběru materiálu.

### 10.5.1 Princip

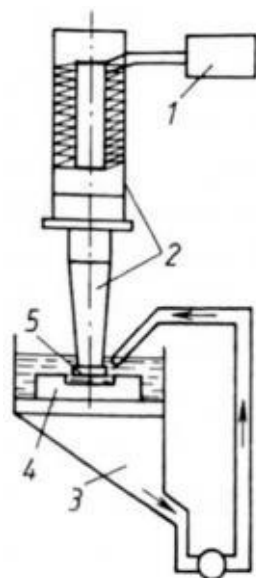
Abrazivní zrna jsou přiváděna mezi obrobek a nástroj. Tento nástroj, kmitající o frekvenci 18 až 25 kHz přitlačuje zrna stálou silou na obráběný povrch a tak se tvar nástroje překopíruje do obrobku. Pohyb nástroje je kolmý k obráběné součásti. Velký vliv má zde i kavitace, která zvyšuje úběr materiálu. Je ovlivňována teplotou kapaliny, ve které celý proces probíhá.

Nástroje používané pro obrábění ultrazvukem se vyrábějí z korozivzdorných a konstrukčních ocelí nebo mosazi či mědi, jejich pracovní část má tvar obráběné plochy. Jejich opotřebení je závislé převážně na materiálu nástroje a obrobku a na pracovních podmínkách.



Obr.10.6 Nástroj pro kruhové díry<sup>26</sup>

Zařízení pro ultrazvukové obrábění tvoří 3 hlavní části. První z nich je generátor ultrazvukových kmitů, který mění elektrický proud o frekvenci 50 Hz na frekvenci 18 až 25 Hz, tedy frekvenci potřebnou pro ultrazvuk. Druhou částí je systém pro vytvoření mechanických kmitů. Ten mění elektromagnetické kmity na mechanické kmity. Posledním prvkem je systém pro přívod brousících zrn a kapaliny, které je potřeba přivést mezi nástroj a obrobek. Tento systém zajišťuje dokonalý přísun nových zrn a jejich odvádění dovnitř a mimo pracovní mezeru. Jako kapalina se používá voda, petrolej nebo líh, brousící zrna jsou pak vyrobeny z diamantu, karbidu bóru, karbidu křemíku, kubického nitridu bóru nebo kysličníku hlinitého.



1 – generátor ultrazvukových kmitů, 2 – systém pro vytvoření mechanických kmitů, 3 – přívod brousících zrn a kapaliny, 4 – obrobek, 5 - nástroj

Obr.10.7 Schéma a skutečné provedení zařízení pro obrábění ultrazvukem<sup>26</sup>

### 10.5.2 Použití

Obrábění ultrazvukem se využívá v několika technologických operacích:

- Řezání – většinou tyčí z křemene, rubínu nebo jiných tvrdých materiálů (do tloušťky 5 mm)
- Hloubení průchozích otvorů – nástroj tvaru trubky
- Hloubení dutin – pro obrábění keramiky a skla
- Broušení rovinných ploch

Výsledné přesnosti rozměrů se pohybují od 0,02 do 0,05 mm (při obrábění do hloubky 3 mm a ploše max. 50 mm<sup>2</sup>). Dosahované drsnosti povrchu jsou pak Ra = 0,4 – 1,6 μm.

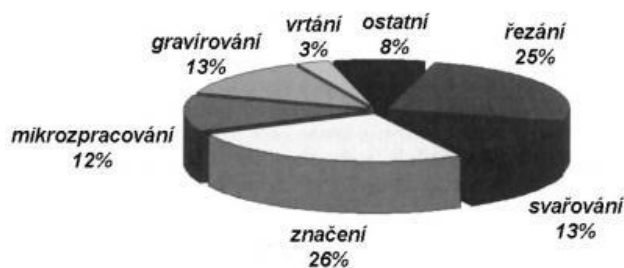
## 10.6 Obrábění laserem

Základním principem je přeměna světelné energie na tepelnou. Slovo laser je zkratkou pro Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation a dalo by se přeložit jako zesílení světla pomocí vynucené emise záření.

Laser pracuje na bázi indukované emise neboli vynuceného záření. To je vyvoláno dopadem záření na atom prvku, kdy záření donutí elektron, který obíhá kolem jádra, přijmout energii a tím vystoupat na vyšší energetickou hladinu. Při dalším příjmu energie a rovnováhy sil v atomu je elektron přinucen se vrátit na svoji původní hladinu, přičemž vyzáří přijatou energii do prostoru. Vzniklé záření je monochromatické (má jednu specifickou vlnovou délku) a koherentní (fotony se pohybují ve svazku jedním směrem a v průřezu jsou pravidelně rozloženy).

V dnešní době existuje několik druhů laserů a dělí se podle různých hledisek. Podle aktivního prostředí se dělí na pevnolátkové, plynové, kapalinové a plazmatické. Dle vlnových délek optického záření na infračervené, ultrafialové a rentgenové. Dále se mohou dělit na základě typu buzení, časového režimu používání a délek generovaného pulzu.

Laser patří k nejmodernějším metodám obrábění a v technologii se nejčastěji používá pro svařování, vrtání, řezání, tepelné zpracování, značení kovů, povrchové úpravy atd.



Obr.10.8 Procento rozdělení jednotlivých technologií<sup>26</sup>

### 10.6.1 Vrtání laserem

Působením soustředěného paprsku o vysoké hustotě a výkonu dochází k odstranění roztaveného a odpařovaného materiálu. Používají se pulzní lasery, jelikož je potřeba pro vyvrtání otvoru menší energie impulsu. Často používané jsou lasery rubínové a typu YAG.

Laserové vrtání se aplikuje hlavně na malé průměry děr a tenké materiály jako jsou fólie. Průměr závisí na energii, průměru paprsku, frekvenci a době trvání impulsů. Na tvar má vliv poloha ohniska laserového paprsku. Jestliže leží ohnisko na povrchu předmětu, tak vznikají válcové otvory. V případě kuželového otvoru leží ohnisko nad vrtaným povrchem.

Pro laserové vrtání se používají speciální vrtačky s optickými soustavami, které zajišťují soustředění paprsku na malou plochu.

## 11 SROVNÁNÍ DOKONČOVACÍCH METOD

Každá metoda má své specifické vlastnosti a parametry. Na tomto základě se pak liší výsledná kvalita obrobeného povrchu. V následující tabulce je přehled dokončovacích metod včetně jejich dosahovaných přesností rozměrů a drsností povrchu.

Tab.11.1 Porovnání konvenčních dokončovacích metod<sup>1, 2, 3, 17</sup>

Dokončovací metody		Přesnost rozměrů IT	Drsnost povrchu Ra [ $\mu\text{m}$ ]
Broušení	Dokončovací	5 – 7	0,4 – 1,6
	Jemné	3 – 4	0,05 – 0,4
Lapování	Hrubovací	3 – 5	0,16 – 0,4
	Jemné	1 – 3	0,08 – 0,16
	Velmi jemné	1 - 2	0,01 – 0,04
Honování	Hrubovací	5 – 6	0,2 – 0,5
	Dvoufázové	4 – 5	0,1 – 0,2
	Jemné	3 – 4	0,025 – 0,1
Superfinašování	Dokončovací	3 – 5	0,05 – 0,4
	Jemné	2 – 4	0,025 – 0,1
Jemné soustružení	SK	6 – 7	0,4 – 1,6
	Diamant	5 – 6	0,2 – 0,8
Vystružování	-	5 – 7	0,15 – 0,8
Válečkování	Statické	4 – 7	0,05 – 0,4
	dynamické	4 – 7	0,2 – 0,8
Vyhlazování	-	4 – 6	0,1 – 0,4
Kalibrování	-	4 - 6	0,005 – 0,4



Tab.11. 2 Porovnání nekonvenčních dokončovacích metod<sup>1, 26</sup>

<b>Dokončovací metoda</b>	<b>Přesnost rozměrů [mm]</b>	<b>Drsnost povrchu Ra [μm]</b>
<b>Elektroerozivní obr.</b>	<b>0,05 – 0,2</b>	<b>0,4 – 0,8</b>
<b>Elektrochemické obr.</b>	<b>0,01 – 0,2</b>	<b>0,2 – 2</b>
<b>Ultrazvuk</b>	<b>0,02 – 0,05</b>	<b>0,4 – 1,6</b>

Z tabulek pro konvenční i nekonvenční metody lze vyčíst, že vůbec nejlepší metodou z hlediska přesnosti rozměrů a drsnosti povrchu je lapování, u kterého je při použití nejlepších nástrojů a při jemném úběru materiálu možné dosáhnout přesnosti rozměrů IT1 – IT2 a drsnosti povrchu až  $Ra = 0,01 \mu\text{m}$ . V případě přihlídnutí pouze k hodnotě drsnosti povrchu  $Ra$  bychom však zjistili, že právě kalibrováním lze dosáhnout nejnižší hodnoty, a to konkrétně  $Ra = 0,005 \mu\text{m}$ .

## ZÁVĚR

Tato práce se zabývá výrobou velmi přesných vnitřních rotačních i tvarových ploch a postupně popisuje jednotlivé metody, kterými jsme schopni dosáhnout výsledných parametrů, které tyto rotační plochy vyžadují.

Každá metoda má v praxi své využití. Je třeba hlavně dbát jak na technologický postup, volbu správného nástroje či stroje, tak i na ekonomickou stránku celé výroby. Mezi běžně nepoužívanější patří pravděpodobně jemné soustružení a vystružování. Vývoj těchto metod směřuje poslední dobou rychle dopředu. Stále se objevují nové nástroje (převážně břitové destičky), stroje, materiály či povlaky, které zlepšují povrch obrobené plochy. Proto je možné dosahovat již takových přesností a drsností povrchu jako například u broušení. V oblasti strojů se rozšiřují i soustružnická a frézovací CNC centra, na kterých je možné provádět více operací současně a vyrábět tvary, které jsme na klasických strojích vyrobit nemohli. Jejich výhodou je vysoká rychlost, přesnost a efektivnost.

U metod, kde se pracuje s brousícími nástroji, nebo nástroji, která jsou brusivem opatřena, se neustále pracuje na vývoji jejich složení, ať už samotného brusiva nebo pojiv. Broušení, jenž patří mezi nejstarší dokončovací metody, si stále drží velice hojné využití právě díky novým trendům a v dnešní době se uplatňuje i při opracovávání těch nejtvrdších materiálů. Honování, lapování či superfinišování taktéž nezaostávají a je možné sledovat hlavně vývoj nových strojů pro tyto operace. Využívají se v automobilovém průmyslu, či leteckém průmyslu pro výrobu hřídelí, čepů nebo vnitřních kroužků valivých ložisek.

Další kapitolou jsou nekonvenční metody, které jsou založeny na fyzikálním nebo chemickém úběru materiálu. Tyto metody jsou vhodné tam, kde není možné použít běžných dokončovacích metod. V této bakalářské práci jsou zaznamenány pouze ty nejnámější a nepoužívanější, avšak nekonvenčních metod je velké množství. V praxi se nejvíce využívají pro řezání, úpravu povrchu, značení kovů a mnoho dalších. Jejich nevýhodou je však vysoká pořizovací cena a energetická náročnost. Proto se, pokud je to možné, volí pro dokončení povrchu raději konvenční metody.

V poslední kapitole je zobrazeno srovnání jednotlivých metod na základě přesnosti rozměrů a drsnosti povrchu.

S výrobou velmi přesných vnitřních rotačních ploch se setkáváme v mnoha odvětvích strojírenství, od zhotovení malých dílů, ložisek, hřídelí, až po velké otvory, vyžadující kvalitní opracování. Současné technologie pro jejich výrobu jsou velice spolehlivé a dá se čekat, že jejich zdokonalování bude pokračovat i nadále.

## RESUMÉ

V této práci je možné nahlédnout do problematiky obrábění velmi přesných vnitřních rotačních ploch. Seznamuje nás s metodami, kterými lze dosáhnout požadované přesnosti rozměrů a drsnosti povrchu. Na obráběné povrchy jsou kladeny vysoké požadavky, a proto je důležité vybrat správnou metodu tak, aby náklady nebyly příliš vysoké a samotné provedení bylo přesné a efektivní. Každá z metod má své výhody a nevýhody, od nichž se pak odvíjí jejich použití v praxi. Dokončování vnitřních rotačních ploch je v dnešní době velice důležitou součástí výroby přesných dílů v automobilovém průmyslu či leteckém průmyslu. Je tedy zcela běžné, že na jejich výrobu se bere velký ohled a technologie se stále vyvíjí dopředu.

**SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY**

1. MÁDL, J., et al. Technologie obrábění: 3. díl. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2000. 81 s.
2. HUMÁR, A., Technologie I, Technologie obrábění – 3. část, 2005
3. KOČMAN, K.; PROKOP, J. Technologie obrábění. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s. r. o., 2001. 270 s. ISBN 80 – 214 – 1996 – 2.
4. Dokončovací metody obrábění. [online]. [cit. 2011-04-11]. Dostupné z www: <[jirijosifko.blog.cz/1002/dokoncovacicimetryobrabeni](http://jirijosifko.blog.cz/1002/dokoncovacicimetryobrabeni)>.
5. Planetové broušení. [online]. [cit. 2011-05-10]. Dostupné z www: <<http://www.leechind.com/jiggrinding.htm>>
6. Bezhruté broušení. [online]. [cit. 2011-05-10]. Dostupné z www: <[http://www.dragonabrasives.com/centerless\\_grinding\\_wheel.htm](http://www.dragonabrasives.com/centerless_grinding_wheel.htm)>
7. Brousící nástroje. [online]. [cit. 2011-05-10]. Dostupné z www: <http://www.gd-wholesale.com/wholesale-dir/a12c/e760f/grinding-wheel-s-1.html>
8. Wwww.sps-ko.cz [online]. Broušení. Dostupné z www: <[http://www.sps-ko.cz/documents/STT\\_obeslova/Broušení.pdf](http://www.sps-ko.cz/documents/STT_obeslova/Broušení.pdf)>
9. Brousící a honovací nástroje. [online]. [cit 2011-04-11]. Dostupné z www: <<http://www.atlantic-bonn.de>>
10. Lapovací trny. [online]. [cit. 2011-05-10]. Dostupné z www: <http://cgi.ebay.com/FLEXOLAP-INTERNAL-BLIND-HOLE-LAPPING-ARBOR-LAP-HONE-/280506028197>
11. Nástroje pro strojní obrábění. [online]. [cit. 2011-04-23]. Dostupné z www: <<http://www.directindustry.com>>
12. Wwww.honing.in [online]. [cit. 2011-04-23]. Honovací stroje. Dostupné z www: <<http://honing.in/honing-machines.html>>
13. Wwww.techportal.cz [online]. [cit. 2011-04-21]. Honování. Dostupné z www: <<http://www.techportal.cz/1/1/honovani-cid33890>>
14. Superfinašovací stroje. [online]. [cit. 2011-04-18]. Dostupné z www: <<http://www.supfina.com/EN/97.htm>>
15. Jemné soustružení. [online]. [cit. 2011-05-04]. Dostupné z www: <[http://news.thomasnet.com/company\\_detail.html?cid=577635](http://news.thomasnet.com/company_detail.html?cid=577635)>
16. Soustružení a vrtání. [online]. [cit. 2011-05-04]. Dostupné z www: <<http://www.elitalycea.wz.cz/files/tep/tep17.pdf>>
17. MM Průmyslové centrum. [online]. Dostupné z www: <<http://www.mmspektrum.com>>
18. Wwww.fermatmachinery.com [online]. [cit. 2011-05-04]. Dostupné z www: <<http://www.fermatmachinery.com/sk/139-vertikalne-sustruhy>>

19. Wwww.vrtacky.com [online]. [cit. 2011-04-25]. Stroje pro vrtání. Dostupné z www: <<http://www.vrtacky.com/sloupove-vrtacky>>
20. Wwww.narex-makita.cz [online]. [cit. 2011-04-28]. Leštící tělíska. Dostupné z www: <<http://www.narex-makita.cz/mikronaradi/nastroje/cistenilesteni/proxxon-28800>>
21. Nástroje a stroje pro leštění.[online]. [cit. 2011-04-28]. Dostupné z www: <<http://www.bono-naradi.cz>>
22. Dokončování vnitřních a vnějších ploch. [online]. Dostupné z www: <[http://www.sps-ko.cz/documents/STT\\_obeslova/Dokončovaci\\_metody\\_obrabeni.pdf](http://www.sps-ko.cz/documents/STT_obeslova/Dokončovaci_metody_obrabeni.pdf)>
23. Wwww.yamasaltd.en.ecplaza.net [online]. [cit. 2011-04-30]. Válečkovací nástroje. Dostupné z www: <<http://yamasaltd.en.ecplaza.net/3.asp>>
24. Vnitřní válečkování. [online]. [cit. 2011-04-30]. Dostupné z www: <<http://www.baublies.de/de/index.html>>
25. Wwww.gravocom.cz [online]. [cit. 2011-05-08]. Měděné elektrody. Dostupné z www: <<http://www.gravocom.cz/produkty/technicke-gravirovani/medene-elektrody-5.html>>
26. ŘASA, J; KEREČENINOVÁ, Z. Nekonvenční metody obrábění. [online]. 2007. [cit. 2011-05-08]. Dostupné z www: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni>>
27. Lapování. [online]. [cit. 2011-05-15]. Dostupné z www: <<http://strojirenstvi-ucivo.blogspot.com/2011/03/31518-lapovani.html>>
28. Wwww.hiwtc.com [online]. [cit. 2011-05-16]. Soustružnické stroje. Dostupné z www: <<http://www.hiwtc.com/photo/products/25/04/16/41628.jpg>>
29. ZEMČÍK, O. Technologická příprava výroby. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2002. 158 s. ISBN 80-2142219-X.

**SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ**

Zkratka/Symbol	Jednotka	Popis
d	mm	Průměr nástroje
n	min <sup>-1</sup>	Otáčky
v <sub>c</sub>	m/s	Řezná rychlost
F <sub>c</sub>	N	Řezná síla
v <sub>w</sub>	m/min	Obvodová rychlost
f <sub>a</sub>	mm	Axiální posuv stolu za jednu otáčku
a <sub>e</sub>	mm	Pracovní záběr
k <sub>c</sub>	MPa	Měrná řezná síla
A <sub>D</sub>	mm <sup>2</sup>	Průřez třísky
v <sub>a</sub>	m/min	Osová rychlost
z	min <sup>-1</sup>	Počet dvojzdvihů
L <sub>z</sub>	mm	Délka zdvihů honovací hlavice
L	mm	Délka otvoru
l <sub>1</sub>	mm	Dolní přeběh
l <sub>2</sub>	mm	Horní přeběh
l	mm	Délka kamene
M <sub>k</sub>	N.mm	Krouticí moment
PKD	-	Polykrystalický diamant
CBN	-	Kubický nitrid bóru
SK	-	Slinutý karbid
RO	-	Rychlořezná ocel
NO	-	Nástrojová ocel
CNC	-	Computer Numerical Control