



České vysoké učení technické v Praze

Fakulta strojní

Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie

---

# **Návrh technologie výroby zkušebních vzorků pro metrologickou úlohu**

## **Design of technology for the production of test specimens for a metrology**

Bakalářská práce

Marek Veselý

Studijní program: TZSI – 2301R000

Studijní obor: Bez oboru

Vedoucí práce: Ing. Pitrmuc Zdeněk

**Praha, 2021**

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Veselý** Jméno: **Marek** Osobní číslo: **482616**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávající katedra/ústav: **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**  
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**  
Studijní obor: **bez oboru**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Návrh technologie výroby zkušebních vzorků pro metrologickou úlohu**

Název bakalářské práce anglicky:

**Design of technology for the production of test specimens for a metrological task**

Pokyny pro vypracování:

- 1) Popis metrologické úlohy a návrh geometrie vzorků
- 2) Lícovací soustava a užití komunálních měřidel
- 3) Vhodné výrobní technologie - popis, kinematika, dosažitelné parametry
- 4) Volba vhodného materiálu
- 5) Návrh výrobního postupu

Seznam doporučené literatury:

DAVIM, J. P., ed. Modern machining technology: a practical guide. Cambridge: Woodhead Publishing, 2011. Woodhead Publishing in mechanical engineering. ISBN 978-0-85709-099-7.  
MÁDL, Jan a Jaroslav BARCAL. Základy technologie II. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2002. ISBN 80-01-02610-8.  
STEPHENSON, David A. a John S. AGAPIOU. Metal cutting theory and practice. Third edition. Boca Raton: CRC Press/Taylor & Francis Group, [2016]. ISBN 1-4665-8753-9.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

**Ing. Zdeněk Pitrmuc, ústav technologie obrábění, projektování a metrologie FS**

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **30.04.2021** Termín odevzdání bakalářské práce: **29.07.2021**

Platnost zadání bakalářské práce: \_\_\_\_\_

Ing. Zdeněk Pitrmuc  
podpis vedoucí(ho) práce

Ing. Libor Beránek, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.  
podpis ořkána(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

\_\_\_\_\_ Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_ Podpis studenta

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady uvedené v příložené seznamu použité literatury.

Nemám závažný důvod pro použití tohoto školního díla ve smyslu Zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorských zákonů).

V Praze dne 20.07.2021

Podpis

.....

## **Poděkování**

Děkuji tímto Ing. Zdeňkovi Pitrmucovi z ČVUT za odborné vedení mé práce, za cenné připomínky a rady při vypracovávání bakalářské práce.

## **Anotace**

Tato bakalářská práce má za cíl navrhnout technologii výroby zkušebních vzorků pro metrologickou úlohu. Teoretická část práce popisuje technologii broušení, a to zejména její teorii, typy broušení, řezné podmínky, brusné nástroje, a nakonec dosahované parametry. Praktická část práce se zabývá návrhem technologie výroby zkušebních vzorků pro metrologickou úlohu.

**Klíčová slova:** teorie broušení, brusné nástroje, řezné podmínky, lícovací soustava, komunální měřidla, výrobní postup

## **Annotation**

The aim of this bachelor thesis is to propose a technology for the production of test samples for a metrological task. The theoretical part of the thesis describes the grinding technology, especially its theory, types of grinding, cutting conditions, grinding tools, and finally the parameters achieved. The practical part of the thesis deals with the design of the technology of production of test samples for metrological task.

**Keywords:** grinding theory, grinding tools, cutting conditions, facing system, municipal gauges, manufacturing process

# Obsah

Úvod.....	1
1 Teorie broušení .....	2
1.1 Podstata broušení .....	2
1.2 Geometrie při broušení.....	3
1.3 Síly při procesu broušení.....	5
1.4 Tepelné jevy při broušení.....	7
1.5 Obrobitelnost materiálu při broušení .....	9
1.5.1 Obrobitelnost ocelí.....	9
1.5.2 Obrobitelnost litiny .....	9
2 Základní typy broušení .....	9
2.1 Broušení rotačních ploch.....	10
2.1.1 Podélné oscilační broušení vnějších ploch „dokulata“ .....	10
2.1.2 Zapichovací obvodové broušení vnějších ploch „dokulata“.....	11
2.1.3 Bezhruté broušení vnějších ploch .....	11
2.1.4 Obvodové podélné broušení vnitřních ploch „dokulata“ .....	13
2.1.5 Bezhruté broušení vnitřních ploch.....	13
2.2 Broušení rovinných ploch .....	14
2.2.1 Obvodové rovinné broušení.....	14
2.2.2 Čelní broušení .....	15
2.3 Tvarové broušení.....	16
3 Řezné podmínky při broušení .....	16
3.1 Doporučené řezné podmínky pro různé druhy broušení .....	17
3.1.1 Řezné podmínky při podélném oscilačním broušení vnějších ploch „dokulata“ .....	17
3.1.2 Řezné podmínky při bezhrutém broušení .....	17
3.1.3 Řezné podmínky při vnitřním broušení .....	17
3.1.4 Řezné podmínky při rovinném broušení.....	18
4 Brusné kotouče .....	18
4.1 Brusivo .....	19
4.1.1 Přírodní brusné materiály.....	20
4.1.2 Syntetické brusné materiály .....	20
4.2 Pojivo .....	22
4.2.1 Silikátové pojivo .....	23
4.2.2 Pyskyřicové pojivo .....	23

4.2.3	Kovové pojiva.....	23
4.2.4	Ostatní pojiva.....	23
4.3	Vlastnosti brusných kotoučů.....	24
5	Dosahované parametry při procesu broušení.....	26
6	Vzorky pro metrologickou úlohu.....	27
6.1	Popis metrologické úlohy.....	27
6.2	Návrh geometrie vzorku.....	27
7	Lícování.....	28
7.1	Základní pojmy.....	28
7.2	Druhy uložení.....	29
7.3	Soustava tolerancí a uložení ISO.....	29
8	Komunální měřidla.....	30
8.1	Třmenový mikrometr.....	32
9	Použité výrobní technologie.....	33
9.1	Soustružení.....	33
9.2	Frézování.....	35
10	Volba vhodného materiálu.....	38
11	Výrobní postup.....	39
11.1	Zkušební vzorek 1.....	39
11.2	Zkušební vzorek 2.....	46
	Závěr.....	54
	Bibliografie.....	55
	Seznam obrázků.....	58
	Seznam tabulek.....	60
	Seznam příloh.....	61

## Úvod

Technologie broušení je způsob obrábění kovů, který je velmi starý. Už v dávné minulosti využíval člověk přírodního brusiva k tomu, aby naostřil své pracovní nástroje.

Vývoj této technologie se značně zrychlil vynálezem umělého brusného kotouče a sestavením prvních univerzálních brusek. Neustálé zlepšování brusek a zdokonalování vlastností brusných kotoučů umožnilo, že se broušení stalo jedním z velmi produktivních způsobů přesného obrábění různých materiálů.

Používání brusným kotoučům se zrnem z kubického nitridu boru umožnilo efektivně brousit různé železné materiály, a to zejména vysokolegované oceli. V současné době se strojní součásti obrábějí s přesností na zlomky mikrometru a s drsností pár desetin až setin  $\mu\text{m}$ , čehož se dosahuje hlavně broušením a dalším dokončovacím obráběním.

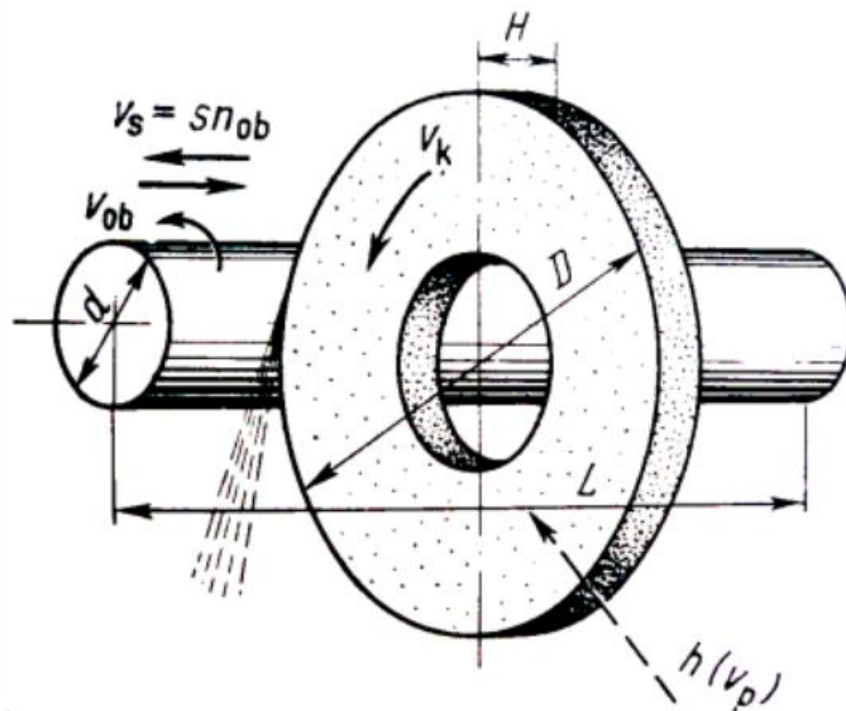
Na tyto všechny okolnosti navazuje moje bakalářská práce, která technologii broušení využívá jako dokončovací metodu ve výrobním postupu zkušebními vzorků pro metrologickou úlohu.



# 1 Teorie broušení

## 1.1 Podstata broušení

Broušení je jedna z metod obrábění kovů. Jedná se o hromadné rychlostní mikrořezání povrchových vrstev těles velmi jemnými zrny brusiva, které jsou sloučené v brusný nástroj. Při broušení se využívá vysokých rychlostí, a to nejčastěji do  $50 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , ve speciálních případech může rychlost dosahovat až  $100 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . Při broušení se dosahuje vysoké přesnosti obrábění, ale také ho můžeme využít při předběžném obrábění polotovarů – čištění výkovek nebo odlitků. [1] [2]



Obr. 1 - Schéma broušení vnějších válcových ploch posuvem podél osy obrobku [1]

$v_k$  – obvodová rychlost kotouče [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ]

$v_{ob}$  – obvodová rychlost [ $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ ]

$v_s$  – podélný posuv [ $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ]

$h(v_p)$  – přířuv [ $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ]

$D; d$  – průměr brusného kotouče a obrobku [ $\text{mm}$ ]

$H$  – šířka brusného kotouče [ $\text{mm}$ ]

$L$  – délka broušené plochy obrobku [ $\text{mm}$ ] [1]

Jednotlivé druhy obrábění kovů se zásadně neliší, protože tříška se vytváří na řezných plochách různými obráběcími nástroji vždy stejně, a nezávisí tak na konstrukci či tvaru nástroje. Ve všech případech je řezání postupný kluz nebo smyk jednotlivých třísek (částic), vyvozený klínem, na který působí řezná síla. Toto všechno platí i pro

broušení, ale i přesto má broušení mnoho zvláštností, kterými se výrazně liší od obrábění kovovým nástrojem:

1. Pracovní plocha kotouče je tvořena velkým počtem zrn brusiva, které jsou nepravidelně rozmístěné.
2. Brusný kotouč (nástroj) nemá celistvý břit.
3. Zrna brusiva mají různou výšku.
4. Určitá závislost mezi šířkou a tloušťkou vrstvy materiálu, která je odebíraná jednotlivými zrny brusiva.
5. Zrna brusiva mají nepravidelný tvar a zaoblené vrcholy, které mají většinou záporný úhel čela.
6. Zrna brusiva mají vysokou tvrdost, dobrou tepelnou odolnost, jsou ostrá, křehká a rozkládají se v průběhu obrábění.
7. Při vysoké obvodové rychlosti a malé hloubce řezu každé zrno prakticky hned odebírá velké množství třísek za jednotku času.
8. Každé zrno brusiva působí na broušenou plochu dynamicky, což má za následek růst okamžité teploty mikrořezání. [1] [2]

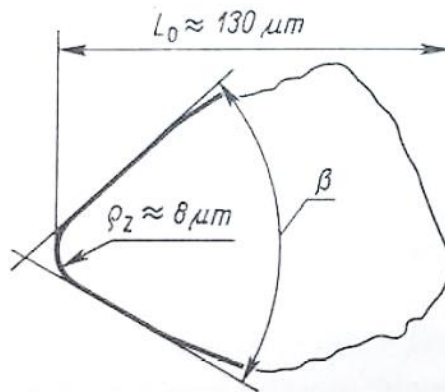
Parametr technologie	Technologie s definovanou geometrií břitu	Broušení
Počet pracovních břitů	jednotky	desítky
Velikost třísky	mm <sup>2</sup>	μm <sup>2</sup>
Řezná rychlost	m.min <sup>-1</sup>	m.s <sup>-1</sup>
Povrch obrobku	definovaná	nedefinovaná
Opotřebení břitu	Otěr, plastická deformace, křehký lom	lom, vylovení zrn, otěr
Rychlost deformace	10 <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup>	10 <sup>5</sup> –10 <sup>9</sup> s <sup>-1</sup>

Tabulka 1 - Srovnání technologie s definovaným ostřím a broušením [3]

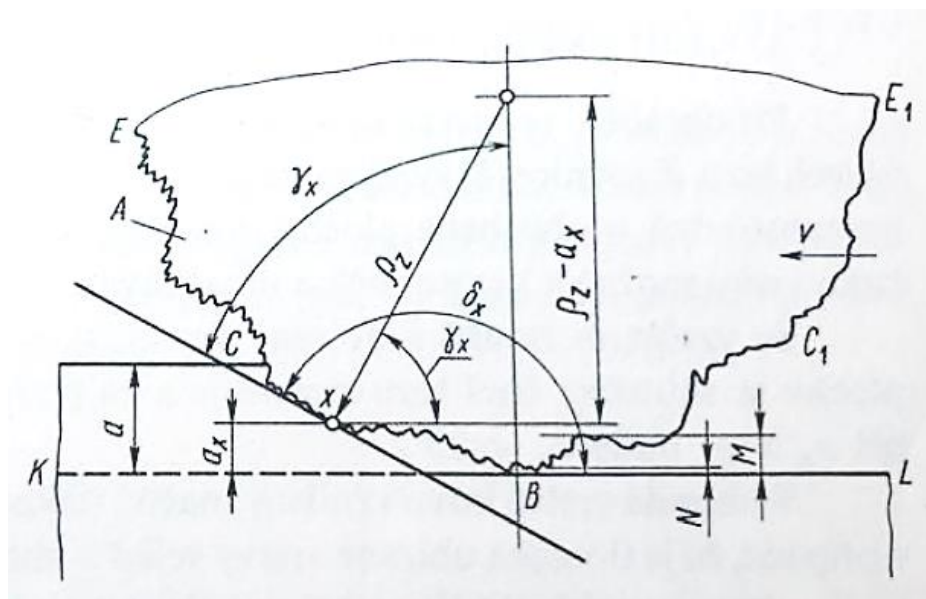
## 1.2 Geometrie při broušení

Zrna brusiva mají nepravidelný tvar mnohostěnů a jejich vrcholy jsou zaoblené. Přestože toto zaoblení není velké, je k němu potřeba vždy přihlížet, protože tloušťky třísek odebíraných jednotlivými zrny při mikrořezání, jsou srovnatelné s velikostí poloměru zaoblení zrna  $\rho_z$ .

Vycházíme-li z tohoto geometrického tvaru zrna, základní vztahy se určí pro mikrořezání při práci pro jakýkoliv brusného nástroj. Kvůli zaoblení vrcholů zrn vznikají záporné úhly čela, které mají za následek rostoucí dynamickou pevnost zrn a jejich odolnost proti silám, které na ně působí.



Obr. 2 - Profil ostrého zrna brusiva v 500násobném zvětšení [1]



Obr. 3 - Schéma zrn brusiva při jeho činnosti [1]

*A – základní řezný element*

*M – mikrovýstupek*

*N – submikrovýstupek*

*KL – přímka řezu*

Na obr. 2 vidíme příklad profilu zatím neotupeného, nepoužitého zrna pozorovaného při 500násobném zvětšení. Poloměr zaoblení jednoho vrcholu zrna je  $\rho_z = 8 \mu m$ . Dynamickou pevnost mají pouze zrna, která mají zaoblené vrcholy.

Na každém zrně brusiva musí rozeznávat (obr. 3)

1. Čelní plochu ECB, po které při řezání odchází tříška
2. Hřbetní plochu EC<sub>1</sub>E<sub>1</sub> obrácenou, k již obrobené ploše

Povrch zrna brusiva má určitou drsnost, která způsobuje jeho vnitřní nedokonalost. Uvedené nedokonalosti v průběhu mikrořezání ještě vzrůstají. Výstupky M a N mají

funkci samostatných dílčích břitů, které ubírají třísky 10krát až 100krát tenčí než hlavní břit zrna. Kvůli zaoblení břitu vznikají tenké třísky a tím i tupější skutečné úhly řezu.

V důsledku zaoblení břitu bude v určitém bodě X skutečný úhel čela:

$$\gamma_x = \arcsin \frac{\rho_z - a_x}{\rho_z} \quad (1)$$

Skutečný úhel řezu v bodě X bude:

$$\sigma_x = \frac{\pi}{2} + \arcsin \frac{\rho_z - a_x}{\rho_z} \quad (2)$$

$a_x$  – Tloušťka ubírané vrstvy v bodě X [mm]

$\rho_z$  – Poloměr zaoblení zrna [mm]

Tupý úhel způsobuje doplňkovou sílu, která stlačuje deformovanou vrstvu materiálu a způsobuje:

1. Zvětšuje odpor proti kluzu jednotlivých částic třísky, způsobeným větším třením ve střižné rovině
2. Vzrůst vnějšího tření mezi obráběným kovem a nástrojem

Při broušení se vrstvy kovu, různě vzdálených od břitu, deformují při rozdílných úhlech řezu. Z rovnice (2) vyplývá, že  $a_x \rightarrow 0$ ,  $\sigma_x \rightarrow 180^\circ$ , a tudíž pro vrstvy materiálu, které jsou blízko u obráběné plochy dosahuje úhel řezu takové hodnoty, při níž již řezání není možné a kov se odmačkává.

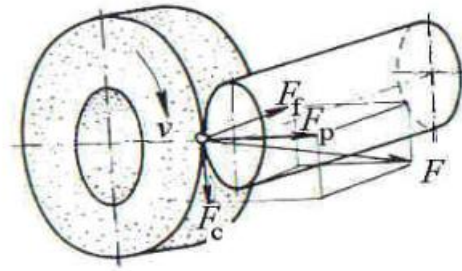
S zvyšující se tloušťkou ubírané vrstvy se skutečný úhel řezu zmenšuje, a to za podmínky, že  $a_x = \rho_z$  bude  $\delta_x = 90^\circ$ ; při  $a_x > \rho_z$  bude  $\delta_x < 90^\circ$ . [1]

### 1.3 Síly při procesu broušení

Při broušení působí na brusný kotouč odstředivé a řezné síly. Řezné síly vznikají vzájemným působením pracovních ploch brusného kotouče a obrobku. Protože jsou řezné síly vzhledem k odstředivým silám malé, tak se při úvahách o pevnosti brusného kotouče zanedbávají.

Při broušení pracuje velké množství zrn současně a dále také každé zrn odebírá jinou tloušťku materiálu. Na obráběnou součást působí výsledná síla F, která je součtem elementárních sil od těchto jednotlivých zrn. Jak je vidět na Obr. 4 rozkládá se na tři složky:

- Tangenciální síla  $F_c$
- Radiální síla  $F_p$
- Axiální síla  $F_f$



Obr. 4 - Rozklad řezných sil při broušení [4]

Protože brusná zrna mají záporné úhly čela, předpokládá se, že řezná síla  $F_p$  bude vždy větší jak síla  $F_c$ . V praxi bylo dokázáno, že radiální síla  $F_p$  je o 1,5÷3krát větší než řezná síla  $F_c$ . Síla  $F_f$  je mnohem menší než síla  $F_c$ .

Řezné síly při broušení lze určit analytickým výpočtem. Ten vychází z určení skutečného průřezu odbíraného kovu jedním zrnem  $S_z$ , z počtu současně zabírajících zrn, ze zvolené hloubky řezu  $a_p$ , zrnitosti a struktury brusného kotouče.

Řezná síla na jedno zrno:

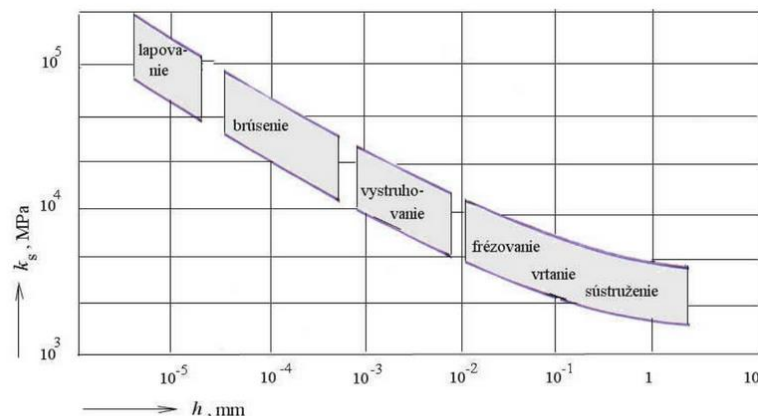
$$F_{1c} = k_b \cdot h_z \cdot \frac{b}{2} \quad (3)$$

$h_z$  – střední hodnota hloubky odřezávané vrstvy [mm]

$b$  – střední šířka řezné části zrna

$k_b$  – měrná řezná síla při broušení

Velikost měrné řezné síly je v rozsahu 20 000÷35 000 MPa. Je podstatně větší, než měrná síla při soustružení, frézování a vrtání, kde nabývá maximální hodnoty kolem 4500 MPa.



Obr. 5 - Porovnání měrných řezných sil při různých způsobech obrábění [5]

Řezná síla na obvodě brusného kotouče  $F_c$  při počtu  $z$  zrn v záběru bude:

$$F_c = k_b \cdot h_z \cdot \frac{b}{2} \cdot z \quad (4)$$

Pomocí matematického zpracování údajů, byla pro rotační broušení stanovena závislost:

$$F_c = C_{Fc} \cdot v_s^{0,7} \cdot f^{0,7} \cdot a_p^{0,6} \quad (5)$$

$C_{Fc}$  – konstanta (při broušení kalené oceli je 22, nekalené oceli 21 a litiny 20)

$v_s$  – obvodová rychlost broušené součásti [ $m \cdot min^{-1}$ ]

$f$  – podélný posuv na otáčku [ $mm$ ]

$a_p$  – hloubka řezu [ $mm$ ]

Řeznou sílu můžeme také vyjádřit v závislosti na obvodové rychlosti brusného kotouče  $v_k$  [ $m \cdot s^{-1}$ ]. Pro obrábění oceli platí:

$$F_c = 25 \cdot \frac{v_s}{v_k} \cdot a_p^{0,53} \cdot f^{0,53} \quad (6)$$

Pro obrábění litin platí:

$$F_c = 21 \cdot \frac{v_s}{v_k} \cdot a_p^{0,33} \cdot f^{0,33} \quad (7)$$

Vliv některých technologických faktorů na velikost řezných sil při broušení:

- Se zvyšující obvodovou rychlostí brusného kotouče roste hodnota tangenciální složky  $F_c$  a radiální složka  $F_p$  roste přímo měrně.
- Při využití řezných kapalin je řezná síla  $F_c$  asi o 20% menší než při práci bez chlazení.
- S velkým otupením nástroje se řezné síly zvětší 2÷2,5krát.
- Radiální síla nemá stálou hodnotu, protože počet zrn v záběru se neustále mění. [1] [4] [2]

## 1.4 Tepelné jevy při broušení

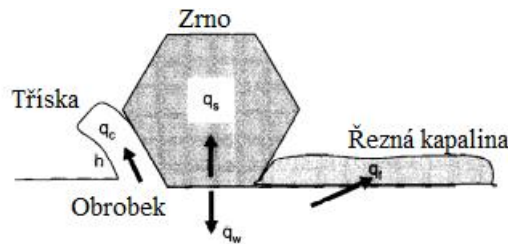
Na povrchu obrobku se při broušení vytváří velký počet míst s vysokými teplotami, jejichž působením se povrch intenzivně zahřívá. Tento tepelný proces na povrchu obrobku se vyznačuje vysokou rychlostí místního ohřevu, krátkou prodlevou na této teplotě a rychlím ochlazením. Většina mechanické práce se při procesu mikrořezání transformuje v teplo a pouze malá část (desetiny procent) se spotřebují na přeměnu krystalické mřížky obráběného materiálu.

Při broušení máme 4 druhy tepelných toků:

1. Tepelný tok, který je odváděn v třískách
2. Tepelný tok vznikající mezi zrnem a obrobkem, které je dále sdíleno mezi brusným kotoučem a obrobkem.
3. Tepelný tok, který je odváděn pomocí řezné kapaliny.
4. Tepelný tok, který je vyzářen a odchází z obrobku.

Tepelný tok přecházející do obrobku ( $q_w$ ) se vypočítá, jako celkový tepelný tok ( $q$ ) mínus tepelný tok odváděný v třískách ( $q_{ch}$ ), brusivem ( $q_s$ ) a řeznou kapalinou ( $q_f$ )

$$q_w = q - q_s - q_f - q_{ch} \quad (8)$$



Obr. 6 – Tepelné toky proudící do obrobku, třísky, zrna a řezné kapaliny [6]

Při broušení přechází do obrobku nejvíce tepla (až 80 %) a nejméně tepla se ztrácí vyzařováním do okolního prostředí. Vysoké teploty mohou způsobit poruchy povrchové vrstvy obrobku (opal nebo trhliny) a obrobek se poruší.

Při broušení rozeznáváme 3 druhy teplot:

1. Okamžitou teplotu  $\Theta_o$  – Vzniká v místě záběru zrna brusiva a nabývá vysokých teplot po krátkou dobu
2. Stykovou teplotu  $\Theta_d$  – V oblasti styku kotouče a obrobku.
3. Střední teplotu  $\Theta_s$  – Ustálená teplota na povrchu broušeného obrobku.

Při broušení např. kalené oceli za těžkých řezných podmínek, kdy na zrno působí velké síly, může se okamžitá teplota přiblížit teplotě tavení broušeného kovu. O takto vysokých teplotách, které vznikají při broušení materiálu s vysokou pevností, svědčí i proud jisker, vznikající i při použití značného množství řezné kapaliny. Tyto teploty zlepšují plastičnost obráběného kovu, a tím i příznivě ovlivňují odebírání třísek procesu mikrořezání.

Vznik a rozdělení tepla v procesu broušení závisí na všech aspektech broušení: Na typu brusného kotouče, řezných podmínkách, mechanických a fyzikálních vlastnostech obráběného materiálu, vlastnostech řezné kapaliny apod. Například zvětší-li se zatížení zrna, vzniká v místě jeho řezu větší množství tepla za časovou jednotku, a zvyšuje se teplota. Zatížení na zrno se zvyšuje při zvětšení podélného i příčného posuvu nebo při zvýšení obvodové rychlosti obrobku.

Teplotu při broušení jde snížit zmenšením intenzity zdrojů tepla a jeho lepším odváděním. Toho lze dosáhnout:

1. Technologicky – Výběrem optimálního způsobu broušení, vhodným typem brusného kotouče, řezných podmínek a řezné kapaliny apod.
2. Konstrukčně – Vhodnou konstrukcí kotoučů pro dané podmínky broušení, vylepšením čistících a chladících zařízení pro řeznou kapalinu apod. [1]  
[6]

## 1.5 Obrobitelnost materiálu při broušení

Obrobitelnost materiálu broušením je souhrn technologických vlastností materiálu, charakterizující jeho schopnost být obráběn. Obrobitelnost zahrnuje řadu ukazatelů: produktivitu k obrábění, měrnou spotřebu brusného nástroje a jeho trvanlivost, velikost řezných sil, teplotu broušení a kvalitu obrobených ploch. Pro její hodnocení se často používá několik ukazatelů, které mají největší význam pro dané podmínky obrábění jako např. drsnost povrchu při broušení na čisto nebo brusný poměr a řezný výkon při hrubovacím broušení.

Obrobitelnost při broušení závisí na několika parametrech, z nichž základní jsou: použité řezné podmínky, správný brusný nástroj pro dané podmínky broušení, chemické a mechanické vlastnosti obráběného materiálu. [1]

### 1.5.1 Obrobitelnost ocelí

Obrobitelnost ocelí závisí na fyzikálních a chemických vlastnostech, jako např. struktura, chemické složení, pevnost atd.

Železo, které je obsažené v oceli, prudce snižuje její obrobitelnost diamantovým brusným kotoučem při vysokých řezných rychlostech, jelikož se kotouč rychle otupuje, obrobená plocha má špatnou kvalitu a měrná spotřeba diamantu je vysoká. Legující karbidy, které jsou v oceli a zvyšují její pevnost, zpravidla zhoršují její obrobitelnost. Tepelně odolné a tvrdé karbidy ( $W_2C$ ;  $WC$ ;  $TiC$ ;  $MO_2C$  atd.) způsobují intenzivnější opotřebení zrna brusiva, růst řezných sil, příkonu a snížení produktivity.

Mezi nejhůře obráběné oceli, patří ocel s austenitickou strukturou. Postupné zlepšení obrobitelnosti nastává při struktuře obsahující převážně martenzit, sorbit nebo perlit. [1]

### 1.5.2 Obrobitelnost litiny

Obrobitelnost litiny při broušení hlavně závisí na jejím chemickém složení a struktuře. V její základné formě je obsažena přebytečná fáze, která je tvořena grafitem nebo volným karbidem, který způsobuje rozdíl ve fyzikálních a mechanických vlastnostech litiny a její obrobitelnosti. Jedním ze základních činitelů určujících výkonnost broušení je stav její uhlíkové fáze, která závisí na mnoha okolnostech např. na tvaru grafitu. [1]

## 2 Základní typy broušení

Broušení se může uskutečňovat rozdílnými metodami, které se definují pro vhodná kritéria. Příslušné metody se rozdělují podle níže uvedených charakteristik.

Podle tvaru obrobeného povrchu a způsobu jeho vytváření se rozliší:

- Rovinné broušení – výsledkem je rovinná plocha
- Broušení do kulata – výsledkem je rotační plocha
- Broušení na otáčivém stole – broušení s rotačním posuvem
- Tvarovací broušení – broušení ozubených kol, závitů atd.



- Kopírovací broušení – broušení s řeznou změnou posuvu, NC stroje
- Broušení tvarovými brusnými kotouči – profil brousícího kotouče určuje konečný profil obrobku

Podle aktivní části brousícího kotouče se specifikuje:

- Obvodové broušení – broušení obvodem kotouče
- Čelní broušení – broušení vnitřních povrchu obrobku

Podle vzájemné polohy obrobku a brusného kotouče se charakterizuje:

- Vnější broušení – broušení vnější části obrobku
- Vnitřní broušení – Broušení vnitřního povrchu obrobku

Podle hlavního posuvu stolu (pohybu obrobku), vůči brusnému kotouči:

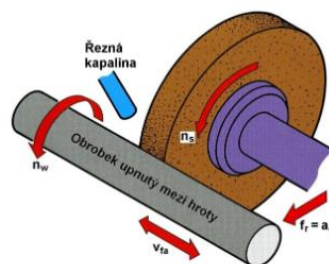
- Axiální broušení – osa brusného kotouče je umístěna rovnoběžně, s hlavním posuvem stolu
- Tangenciální broušení – hlavní posuv stolu je rovnoběžný s vektorem obvodové rychlosti kotouče
- Radiální broušení – vzhledem k brusnému kotouči je hlavní posuv stolu radiální
- Obvodové zápichové broušení – posuv stolu je plynulý radiální
- Čelní zápichové broušení – posuv stolu je plynulý axiální [7]

## 2.1 Broušení rotačních ploch

### 2.1.1 Podélné oscilační broušení vnějších ploch „dokulata“

Hlavní rotační pohyb  $n_s$  [min<sup>-1</sup>] vykonává brusný kotouč. Pomocný rotační pohyb  $n_w$  (kruhový posuv) vykonává obrobek. K uvedeným rotačním pohybům se dále přidává podélný posuv v axiální směru, který vykonává stůl s obrobkem. Podélný posuv  $f_a$  [mm] se udává na otáčku obrobku nebo hodnotu rychlosti  $v_{fa}$  [mm.min<sup>-1</sup>]. Radiální posuv pro nastavení hloubky řezu  $a_e$  probíhá přerušovaně v jedné nebo obou úvratích stolu a koná jej brousící vřeteník.

Používá se především pro broušení delších válcových a kuželových ploch (dlouhé a štíhlé součást jsou podepírané lunetou). Součást je upnuta na stůl obráběcího stroje. [8] [2]

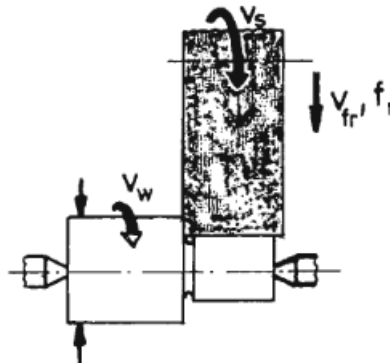


Obr. 7 - Axiální obvodové broušení vnějších ploch s podélným posuvem [8]

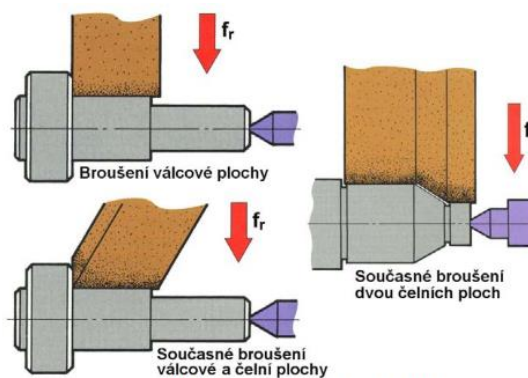
### 2.1.2 Zapichovací obvodové broušení vnějších ploch „dokulata“

Nástroj vykonává radiální posuv ke směru osy obrobku. Velikost tohoto posuvu  $f_r$  se udává v mm na otáčku obrobku nebo hodnotou radiální rychlosti  $v_{fr}$  [ $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ]. Délka plochy, kterou tímto způsobem brousíme většinou nepřesahuje 100 mm, a to z důvodu růstu aktivní plochy brousícího kotouče a tím i řezných sil a příkonu pro obrábění (až o 80% vyšší než u axiálního broušení).

Používá se při broušení válcových, kuželových nebo tvarových ploch, a to zejména v sériové výrobě menších a tuhých obrobků. [2] [8]



Obr. 8 - Radiální obvodové broušení vnějších ploch [2]

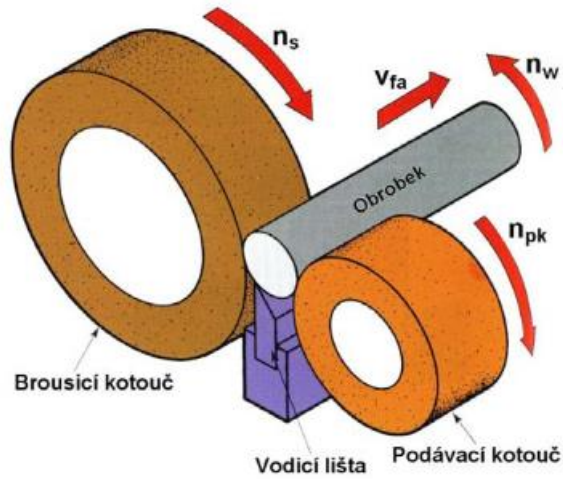


Obr. 9 - Způsoby radiálního broušení vnějších ploch [8]

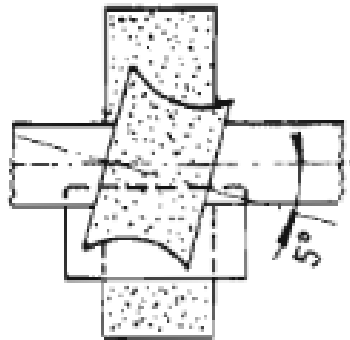
### 2.1.3 Bezhraté broušení vnějších ploch

Způsob broušení, kdy se obrobek není upnutý, ale je vložen mezi 2 kotouče, z kterých je jeden brusný a druhý podávající. Střed obrobku je podpírán vodící lištou. Osa obrobku musí být mírně nad osami kotoučů (5–15 mm). Při natočení podávajícího kotouče se rozloží jeho obvodová rychlost  $v_{pk}$  na dvě složky: vodorovnou  $v_{fa}$  (zajišťuje axiální posuvový pohyb) a svislou  $v_w$  (otáčí obrobkem příslušnou obvodovou rychlostí). Zvětšováním nebo zmenšováním úhlu  $\alpha$  se řídí rychlost posuvu.

Tato metoda je velmi produktivní a využívá se v hromadné i velkosériové výrobě. Často se využívá při broušení součástí valivých ložisek (základní průměry oběžné dráhy vnějších a vnitřních kroužků radiálních ložisek). [8] [2]

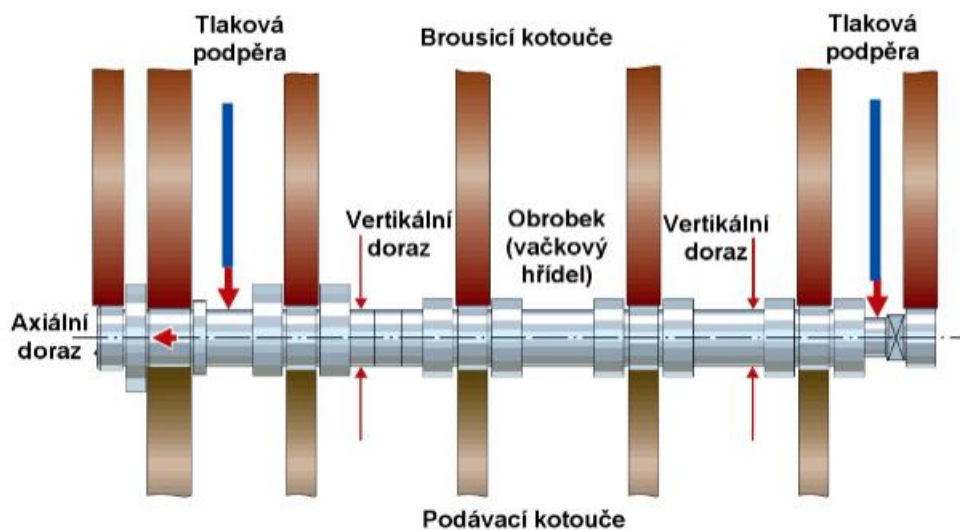


Obr. 10 - Bezhruté broušení vnějších ploch [8]



Obr. 11 - Natočení podávacího kotouče o úhel [2]

Další metodou bezhrutého broušení je bezhruté broušení zapichovacím způsobem. Využívá se pro součásti, které mají nákrůžek nebo u kuželových a tvarových ploch. Někdy se i využívá u sousých válcových ploch bez středících důlků. [8]

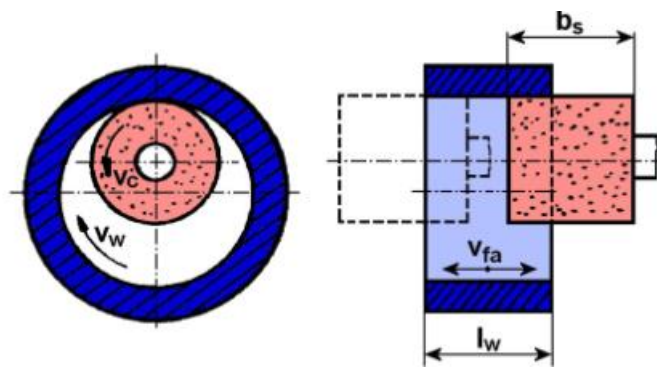


Obr. 12 - Bezhruté zapichovací broušení válcových ploch [8]

### 2.1.4 Obvodové podélné broušení vnitřních ploch „dokulata“

Proces vnitřního broušení ovlivňují zejména geometrické rozměry součásti, a to především průměr broušeného otvoru. Maximální velikost brusného kotouče je  $0,7 \div 0,9$  násobek průměru broušené díry. Proto u malých děr musíme použít malý průměr brusného kotouče. Podmínky broušení jsou špatné, protože brousící zrna, která vstupují do aktivního procesu oddělování třísky jsou velmi namáhaná. Malý brusný kotouč se tak rychle opotřebuje, zanášá se, ztrácí řeznou schopnost i geometrický tvar, je potřeba ho často ovrňovat a musí mít vysoké otáčky, které jdou těžce zabezpečit. Při broušení kotoučem malého průměru je i průměr brousícího vřetena malý, což při velkém vyložení snižuje jeho tuhost. Aby mohl být zabezpečen geometrický tvar otvoru (nebezpečí kuželovitosti díry), je potřeba nízkých hodnot pasivní síly. Proto se v porovnání s vnějším broušením při nižších řezných rychlostech. Tyto vlastnosti nejsou dobré, a proto se vnitřní broušení používá jen v případech, kdy nelze použít jiný způsob výroby přesné díry.

Využívá se především, při obrábění součástí, kdy je délka větší než šířka brusného kotouče. Kotouč se otáčí uvnitř díry a posouvá se ve směru osy. Obrobek se otáčí kolem své osy proti směru pohybu brusného kotouče. [8] [7]

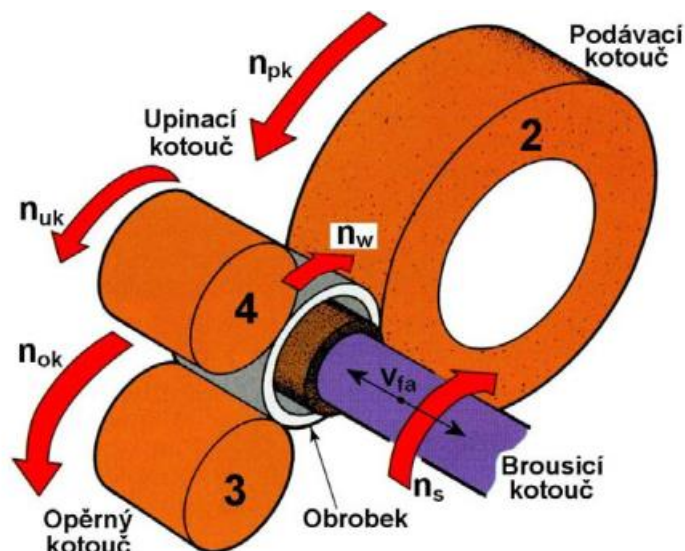


Obr. 13 - Axiální broušení vnitřních válcových ploch [8]

### 2.1.5 Bezhraté broušení vnitřních ploch

Tato metoda je srovnatelná s axiálním broušením (jsou zachovány veškeré základní pohyby obroku i brusného kotouče). Rozdíl je v upnutí obroku, kdy se obrobek vkládá mezi 3 kotouče: upínací – přitlačuje součást ke kotoučům 2 a 3 a tím zajistí upnutí v průběhu broušení; podávací kotouč – zajišťuje otáčení součásti; opěrný – určuje polohu součásti. Tento způsob broušení lze použít u součástí, které mají válcový vnější povrch sousedící s broušeným vnitřním povrchem. Geometrické odchylky vnějšího povrchu (oválnost, hranatost) vyvolávají nepřesnosti při otáčení, protože se součást ustavuje od vnějšího povrchu.

Tímto způsobem broušení dokážeme dosáhnout větší přesnosti v porovnání s axiálním vnitřním broušením. [7] [8]



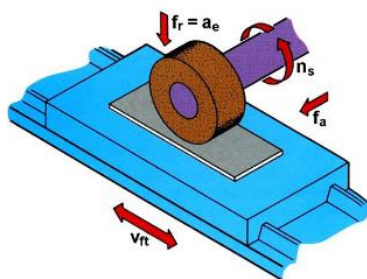
Obr. 14 - Bezhraté obvodové broušení vnitřních ploch [8]

## 2.2 Broušení rovinných ploch

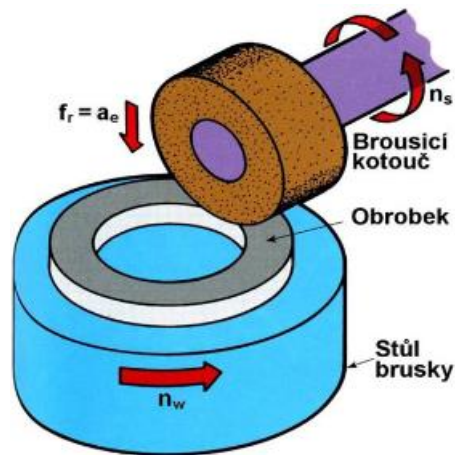
### 2.2.1 Obvodové rovinné broušení

Při broušení obvodem kotouče se obrobek může přímočaře posouvat nebo otáčet. Při přímočarém posuvu obrobku se otáčí brusný kotouč obvodovou rychlostí  $v_c$ , obrobek vykonává podélný vratný pohyb posuvovou rychlostí  $v_{ft}$ . V jedné nebo obou úvratích se příčně posouvá kotouč vzhledem k obrobku o hodnotu  $f_a$  a po obroušení celé plochy se radiálním posuvem  $f_r$  nastaví hodnota broušení opakovaně až po celkový přídavek na broušení.

Patří k nejpřesnějším způsobům obrábění rovinných ploch. Používá se po předcházejícím frézování nebo hoblování, kdy plochu brousíme tzv. „načisto“, při broušení přesných rovinných ploch, při výrobě nástrojů, měřidel a přípravků. V některých případech se používá místo frézování, a to zejména u velmi tvrdých materiálů. [7] [8]



Obr. 15 - Obvodové rovinné broušení (posuvný pohyb obrobku) [8]



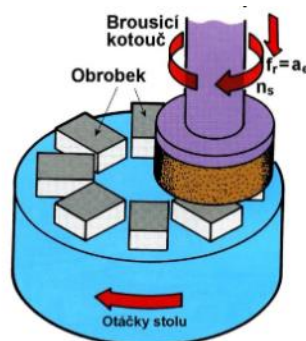
Obr. 16 - Obvodové rovinné broušení (rotační pohyb obrobku) [8]

### 2.2.2 Čelní broušení

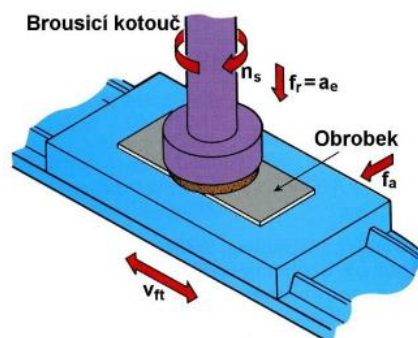
Broušení čelem kotouče není tak přesné jako broušení obvodem kotouče, ale je výkonnější. Součást se otáčí nebo se přímočaře otáčí.

Při přímočarém pohybu stolu se brousí zejména menší součásti, např. čelná plochy ozubených kol, čela kroužků kuličkových ložisek, pístní kroužky atd.

Při broušení čelem kotouče se pro větší průměry používají nejčastěji segmentové hlavy. Mají několik výhod – vyšší využití brousícího materiálu, lepší odstranění třísek, styčné plochy nástroje s obrobkem jsou menší a broušená součást se zahřívá méně, řezná kapalina má lepší přístup do místa broušení. [7] [8]



Obr. 17 – Čelní broušení (otáčivý pohyb obrobku) [8]



Obr. 18 - Čelní broušení (přímočarý pohyb obrobku) [8]

## 2.3 Tvarové broušení

Ve výrobě je mimo jednoduchých rovinných, válcových a kuželových tvarů nutné často brousit i tvarové povrchy, které mají i někdy i značně složitý tvar, např. u kotoučových nožů, šablon, nebo různých tvarových kalibrů. Takové tvary se můžou brousit dvěma způsoby:

- a) Profilovými kotouči
- b) Kotouči s obvyklým tvarem, přičemž kopírovací pohyb se vykonává pomocí brusného kotouče nebo součásti, dále můžeme využít CNC brusky, kdy je tvar definován číslicově v programovaných blocích a realizován pomocí číslicového řízení. [7]

## 3 Řezné podmínky při broušení

Řezné podmínky se volí z hlediska geometrického tvaru a drsnosti při maximálním úběru materiálu za jednotku času a dodržení žádané přesnosti povrchu. Zvolit správné řezné podmínky je složité a ovlivňuje je spousta činitelů, a to především materiál obrobku, materiál nástroje a způsob broušení. [9]

**Obvodová rychlost brusného kotouče (řezná rychlost)  $v_c$**  – Zvýšení rychlosti kotouče s ostatními rychlostmi konstantními má na následek snížení brusné síly, zlepšení drsnosti, zvýšení měrné energie broušení a tím i snížení účinnosti procesu broušení. Účelem zvýšení obvodové rychlosti kola je umožnit zvětšit posuv, čímž se zvětší rychlost výroby při stejné kvalitě a efektivitě procesu.

Obvodová rychlost brusného kotouče se volí podle způsobu broušení a podle druhu pojiva. U běžně používaného keramického pojiva se pro vnější broušení využívá řezná rychlost 30 až 35  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ , u moderních kotoučů až 100  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ . [9] [6]

**Posuv  $f$**  – Při zvětšení posuvu a ostatních rychlostech konstantních se zvyšují brusné síly, zhoršuje se drsnost, snižuje se živostnost brusky a energie broušení. Proces broušení je energeticky účinnější, pokud nadměrné zvýšení posuvu nevede k vysokému opotřebení brusného kotouče, nízkému poměru broušení a znehodnocení brusného kotouče.

Posuv se při podélném broušení volí 0,3 až 0,5 šířky brusného kotouče, při broušení čelem na čisto 0,1 – 0,2 šířky kotouče. [9] [6]

**Obvodová rychlost obrobku  $v_w$**  – Zvyšováním rychlosti obrobku při konstantním úběru má malý vliv na celý proces broušení. Příliš vysoká rychlost obrobku může mít za následek chvění v procesu broušení.

Obvodová rychlost obrobku, se v závislosti na materiálu obrobku a požadované jakosti povrchu volí 20 až 40  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ . [9] [6]

### 3.1 Doporučené řezné podmínky pro různé druhy broušení

#### 3.1.1 Řezné podmínky při podélném oscilačním broušení vnějších ploch „dokulata“

Druh práce	$v_c$ [m.s <sup>-1</sup> ]	$v_w$ [m.mm <sup>-1</sup> ]	$f_a$ [mm]
Na hrubo ocel	25-35	15-20	(0,6-0,8). $b_s$
Na hrubo litina	25	15-22	(0,75-0,85). $b_s$
Na čisto ocel	25-35	8-15	(0,2-0,4). $b_s$
Na čisto litina	25	12-16	(0,3-0,5). $b_s$

Tabulka 2 - Řezné podmínky při obvodové broušení vnějších ploch [7]

$b_s$  – šířka brusného kotouče

#### 3.1.2 Řezné podmínky při bezhrotém broušení

Druh práce	Průměr broušené součásti $d_w$ [mm]	Přídavek na průměr $2 a_e$ [mm]	Úhel nastavení $\alpha$ [°]	Obvodová rychlost podávacího kotouče $v_w$ [m.min <sup>-1</sup> ]
Hrubování	do 10	0,04 až 0,06	3 až 4	150 až 80
	10 až 25	0,06 až 0,1	2,5 až 3,5	120 až 50
	25 až 75	0,1 až 0,3	2 až 3,5	50 až 10
	75 až 150	0,2 až 0,4	1 až 2,5	25 až 80
Broušení na čisto	---	0,005 až 0,02	1,5 až 2	120 až 50

Tabulka 3 - Řezné podmínky při bezhrotém broušení – průběžný způsob [7]

Druh práce	Radiální posuv na 1 otáčku obrobku $f_r$ [mm]	Obvodová rychlost podávacího kotouče $v_w$ [m.min <sup>-1</sup> ]
Hrubování	0,005 až 0,02	10 až 25
Broušení na čisto	0,03 až 0,01	10 až 35

Tabulka 4 - Řezné podmínky při bezhrotém broušení – zapichovací způsob [7]

#### 3.1.3 Řezné podmínky při vnitřním broušení

Druh práce	Podélný (axiální posuv) $f_a$ [mm]	Pracovní (radiální posuv) $a_e$ [mm]	Obvodová rychlost obrobku $v_w$ [m.min <sup>-1</sup> ]
Jednoduché brusky	---	---	---
Hrubování	(0,4 až 0,7). $b_s$	0,005 až 0,02	20 až 40
Broušení na čisto	(0,25 až 0,4). $b_s$	0,0025 až 0,01	20 až 40
Poloautomatické brusky	---	---	---
Hrubování	(0,4 až 0,75). $b_s$	0,0025 až 0,005	50 až 150
Broušení na čisto	(0,25 až 0,4). $b_s$	0,0015 až 0,0025	50 až 150

Tabulka 5 - Řezné podmínky při vnitřním broušení [7]

$b_s$  – šířka brusného kotouče



Při volbě obvodové rychlosti obrobku (broušené díry)  $v_w$  se musí brát v úvahu následující technologické faktory:

- **Materiál a druh tepelného zpracování** – Čím vyšší je tvrdost broušení součásti a větší sklon k tvorbě opalů a trhlin, tím vyšší by měla být obvodová rychlost obrobku.
- **Druh brusného kotouče** – Se zvyšováním tvrdosti kotouče je potřeba zvyšovat i obvodovou rychlost obrobku  $v_w$ . Při požadavcích na vyšší drsnost, je třeba hodnotu  $v_w$  snížit.

Při broušení kalené oceli se může obvodová rychlost  $v_w$  zvýšit cca. až o 10 %. [7]

### 3.1.4 Řezné podmínky při rovinném broušení

Druh práce	Radiální posuv $f_r$ [mm]	Axiální posuv $f_a$ [mm]	Tangenciální rychlost posuvu stolu $v_{ft}$ [m.min <sup>-1</sup> ]
<b>Rovinné broušení obvodové</b>	---	---	---
<b>a) Přímočarý pohyb stolu</b>	---	---	---
- <b>Hrubování</b>	0,01 až 0,04	(0,4 až 0,7). $b_s$	8 až 30
- <b>Broušení na čisto</b>	0,005 až 0,01	(0,2 až 0,3). $b_s$	15 až 20
<b>b) Kruhový pohyb stolu</b>	---	---	---
- <b>Hrubování</b>	0,005 až 0,015	(0,3 až 0,6). $b_s$	20 až 60
- <b>Broušení na čisto</b>	0,005 až 0,01	(0,2 až 0,25). $b_s$	40 až 60
<b>Rovinné broušení čelní</b>	---	---	---
<b>a) Přímočarý pohyb stolu</b>	---	---	---
- <b>Hrubování</b>	0,015 až 0,04	---	4 až 12
- <b>Broušení na čisto</b>	0,005 až 0,01	---	2 až 3
<b>b) Kruhový pohyb stolu</b>	---	---	---
- <b>Hrubování</b>	0,015 až 0,03	---	10 až 40
- <b>Broušení na čisto</b>	0,005	---	10 až 40

Tabulka 6 - Řezné podmínky při rovinném broušení [7]

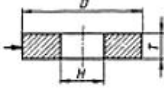
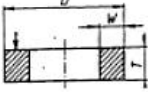
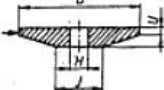
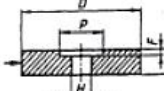

$b_s$  – šířka brusného kotouče

U rovinných brusek, které pracují s celistvými kotouči se občas vřetenem skloní k obráběné ploše o několik stupňů (max. 4°), aby se styčná plocha nástroje a součásti zmenšila. Tím se zlepší řezné podmínky, ulehčí se odstranění třísek a chlazení, ale obráběná plocha bude mít hroší rovinnost. [7]

## 4 Brusné kotouče

Brusné kotouče se skládají z brusných zrn, které zajišťují ostří a pojiva, které drží brusná zrna pohromadě a tvoří tak spolu celý nástroj. Mezi faktory, které musíme vzít v úvahu při výběru kotouče patří brusivo (typ, vlastnosti, velikost zrna), pojivo (typ, tvrdost, kvalita, tuhost, pórovitost a tepelná vodivost) a design kotouče (tvar, velikost a materiál). Základní hmota kola je pórovitá, což je důležitá vlastnost pro účinné odvádění chladicí kapaliny a třísek. Rychlost výroby a účinnost broušení je ovlivněno materiálem

brusného zrna, velikostí zrna, tvrdostí a vlastnostmi orovnávaní a ostření; a podle typu pojivového materiálu a jeho vlastností zachování a obnovy zrna. Brusné kotouče musí být tvrdé, aby odolaly řezným silám, ale také musí být navrženy tak, aby se postupně vylamovala otupená zrna a byla tak zajištěná stálá účinnost řezání. Brusné kotouče mají velikost od 6 mm až do 1 m v průměru a od 1 do 525 mm v tloušťce. Vyrábí se mnoho typů kol, z nichž některé můžeme vidět na obr. 19. [10]

Typ	Vyobrazení	Označení - charakteristika
1		Kotouče ploché Typ 1 – profil – D x T x H
2		Kotouče prstencové Typ 2 – D x T x W
3		Kotouče jednostranně zkosené Typ 3 – D/J... x T/U... x
5		Kotouče s jednostranným vybráním Typ 5 – D x T x H – P..., F
6		Kotouče hrcovité Typ 6 – D x T x H – W..., E

Obr. 19 - Označování tvarů a rozměrů brusných kotoučů [7]

## 4.1 Brusivo

Mezi materiály používané jako brusivo patří přírodní minerály a syntetické materiály. Brusné materiály lze považovat za řezné nástroje s geometricky neurčenými hranami, které se vyznačují vysokou tvrdostí, ostrými hranami a dobrou řeznou schopností. Na brusné materiály jsou kladeny následující požadavky:

- Vysoká tvrdost a houževnatost – Uspodnění vytváření třísek a udržení ostrosti zrn po delší dobu.
- Vysoká tepelná odolnost – Brusný materiál musí vydržet vysoké teploty, ale také rychlé změny teplot.
- Chemická odolnost – Nesmí docházet k chemickým reakcím, které ničí brusný materiál, i při vyšších tlacích a teplotách, při interakci se vzduchem, chladicí kapalinou nebo obráběným materiálem.

Kromě toho jsou na materiál kladeny různé požadavky z hlediska lomu nebo v závislosti na použitém procesu broušení. Žádný materiál nemůže splnit všechny tyto požadavky, a proto se na různé brusné operace, používají různé brusné materiály. [11] [12]

### 4.1.1 Přírodní brusné materiály

Mezi přírodní materiály řadíme křemen (pazourek), korund, smirek, granát a diamant. S výjimkou diamantu mají tyto materiály nedostatečnou pevnost, a proto se nevyužívají. Mezi další důvody nepoužití patří nedostatečná a nereprodukovatelná kvalita přírodních brusných zrn. Jedinou výjimkou je diamant, který se dodnes používá v technologii průmyslového broušení. [11]

#### Křemen

Křemen je triagonální krystal, který je složený ze  $\text{SiO}_2$  a nečistot ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{NaCl}$ ,  $\text{CaCO}_3$ ). Je odolný vůči chemikáliím a mechanickému zvětrávání. Využívá se především pro broušení dřeva, pískování, ale také pro leštění kovů. [11] [12]

#### Korund

Korund se převážně skládá z makrokrystického oxidu hlinitého ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), jehož obsah určuje jeho řezné vlastnosti. Přírodní korund má obsah oxidu hlinitého od 80 do 95 %. Ve srovnání s jinými přírodními brusnými materiály má vysokou tvrdost a dobrou houževnatost. Přírodní korund se využívá v brusných kotoučích s gumovým pojivem, ale také v nevázané formě pro leštění optických skel. [11]

#### Přírodní granát

Granát je přírodní materiál, který se skládá z mnoha přírodních minerálů. Transparentní nebo atraktivně zbarvené granáty se využívají pro šperky, ale velké krystaly se využívají pro brusiva. Hodnota granátu je daná drobivostí. Drobivost je přítomnost trhlin podél rovin štěpení. Využívá se pro brusný papír na jemné broušení dřeva, dále se využívá v nevázané formě při leštění optických komponent. [11] [12]

#### Diamant

Diamant je chemicky čistý uhlík, který krystalizuje jako přírodní produkt pod extrémním tlakem a teplem po dlouhou dobu. Vlastnosti diamantu jsou identické se syntetickým diamantem. Diamant se používá v lepené formě pro broušení v různých diamantových nástrojích a volná forma pro leštění. Využívá se především pro broušení a řezání skla, keramických výrobků a karbidů.

Použití diamantu pro broušení oceli není možné, protože při broušení vzniká smykové zatížení a vysoké teploty při nízkých tlacích. Tyto podmínky jsou příznivé pro difúzi uhlíku z diamantu do obráběného materiálu, ve kterém se uhlík snadno rozpustí. [11]

### 4.1.2 Syntetické brusné materiály

Syntetické brusné materiály v široké míře nahradily přírodní brusiva. Nejdůležitějšími syntetickými brusnými materiály jsou:

- Syntetický korund ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )
- Karbid křemíku ( $\text{SiC}$ )
- Kubický nitrid boru (CBN)

- Karbid boru ( $B_4N$ )
- Syntetický diamant

Karbid křemíku a syntetický korund patří běžným brusným materiálům, zatímco CBN, karbid boru a syntetický diamant představují super abrazivní materiály. [13]

Materiál	Tvrdość v kN/mm <sup>2</sup>
Syntetický korund	20
Karbid křemíku	28
Karbid boru	48
Syntetický diamant	70

Tabulka 7 - Tvrdość syntetických brusných materiálů [13]

### **Syntetický korund**

Korund je krystalický oxid hlinitý ( $Al_2O_3$ ). Několik jeho druhů se využívá v procesu broušení. Při výrobě se využívají následující metody, které do určité míry určují jeho vlastnosti:

- Tavení surového bauxitu v elektrických pecích pro výrobu normálního hnědého a monokrystalického korundu.
- Tavení čistého oxidu hlinitého ( $Al_2O_3$ ) v elektrických pecích pro výrobu bílého korundu, růžového korundu a červeného korundu.
- Slinování mletého surového bauxitu za účelem výroby bauxitového korundu.
- Slinování gelu hydroxidu hlinitého pro vznik sol – gelového korundu. [11]

### **Syntetický normální korund**

Skládá se z korundu s nepatrnou příměsí strusky a feroslity. Je vhodný pro broušení materiálů, které mají velkou pevnost v tahu jako je: ocel, temperovaná litina nebo také bronz. [1]

### **Syntetický bílý korund**

V porovnání s umělým korundem má lepší homogenitu chemického složení a fyzikální vlastnosti. Zrna jsou nepravidelné mnohostěny, které připomínají osmistěn. Je vhodný pro broušení nerezových ocelí. [1]

### **Syntetický monokorund**

Obsahuje vysoké procento krystalického oxidu hlinitého. Monokorund vyniká dobrými řeznými podmínkami a používá se při broušení legovaných ocelí s malou tepelnou vodivostí, a to i při hrubování i broušení na čisto. [1]

### **Karbid křemíku**

Karbid křemíku je brusný materiál, který se získává tavením směsi křemičitého písku, koksu, pilin a soli v elektrických pecích při teplotách 2100 až 2200 °C. Karbid křemíku rozdělujeme na dva druhy. Zelený karbid křemíku je tvrdší, ale méně houževnatý. Využívá se pro broušení těžko obrobitelných slinutých karbidů. Černý karbid křemíku mívá černou nebo temně modrou barvu a kovový lesk. Využívá se především pro broušení kovů, které mají malou pevnost v tahu jako např. litiny, měď, mosaz, hliník a křehké druhy bronzu. [11] [1] [12]

### **Kubický nitrid boru (CBN)**

Kubický nitrid boru je alotropická krystalická forma nitridu boru, který svou tvrdostí odpovídá tvrdosti diamantu. Vyrábí se pyrolýzou amoniaku chloridu boritého požitím katalyzátoru při tlacích 50 až 90 kbar a teplotách 1800 až 2700 °C. Oblíbenost CBN je dána jeho tvrdostí, tepelným odporem, který je vyšší jak u diamantu, což umožňuje práci při 1900 °C a chemickou odolností vůči železným slitinám. CBN se používá k broušení vysoce kvalitních nástrojových ocelí. Vzhledem k chemické odolnosti nemá žádnou afinitu k nízkouhlíkovému obsahu oceli, čehož se využívá při broušení vysokorychlostních ocelí. [12] [11]

### **Karbid boru**

Obsahuje krystalický karbid boru a malé množství příměsí. Vyrábí se v elektrických pecích z technické kyseliny borité a uhlíčitého materiálu s malým obsahem popela ropného koksu. Používá se pro broušení litiny, mědi, mosazi, měkkého bronzu, lehkých slitin, slinutých karbidů, keramických hmot, skla a kamene. [1]

### **Syntetický diamant**

Nejvíce zastoupenou skupinou diamantových brusiv, jsou brusiva, která se vyrábějí synteticky. Pro výrobu slouží jako výchozí surovina uhlík v grafitové formě. Syntéza se provádí při tlacích 70 až 120 kbar a teplotách kolem 2000 °C v přítomnosti kovových katalyzátorů. Velkou výhodou je, že při broušení zachovává tvrdost i při vysokých teplotách. Využívá se pro broušení křehkých materiálů jako např. litiny, slinuté karbidy, sklo a keramika. [1] [11]

## **4.2 Pojivo**

Pojivo drží brusná zrna pohromadě v kotouči. Pojivo by mělo mít dostatečnou tuhost a schopnost zadržet brusná zrna během broušení, ale přesto uvolňovat otupená zrna. Pojivo musí odolávat řezným silám, teplotám a chemicky odolávat chemickému působení řezné kapaliny. Rozlišujeme tři hlavní typy pojiv: silikátová pojiva, pryžová pojiva a kovová pojiva. [10]

<b>Mechanická vlastnosti</b>	<b>Pryskyřicové pojivo</b>	<b>Silikátové pojivo</b>	<b>Kovové pojivo</b>
Tvrdost podle Brinella (HB)	228	380	278

*Tabulka 8 - Mechanické vlastnosti (tvrdost) hlavních typů pojiv [12]*

### 4.2.1 Silikátové pojivo

Silikátová pojiva jsou tvořena přírodními křemičitany, červeným a bílým jílem, kaolínem, živcem a přísadami (frity). Frity jsou sklovité, dříve roztavené a rozdrčené organické a anorganické směsi, které slouží jako tavidla a dávají pojivu určité vlastnosti. Mimo jiné pomáhají snižovat teplotu výpalu směsi pojiva. Pro brusné kotouče se tyto směsi skládají převážně ze silikátů boru nebo ze skla obsahující hořčík. Vlastnosti silikátových pojiv lze shrnout takto:

- Jsou křehké, a tedy velice citlivé na náraz.
- Mají vysoký modul pružnosti.
- Jsou odolná vůči teplotě, ale jsou citlivé na změnu teplot.
- Chemicky odolné vůči oleji a vodě. [11]

### 4.2.2 Pryskyřicové pojivo

Pryskyřicová pojiva se skládají ze syntetických pryskyřic nebo z kombinací syntetických pryskyřic a plniv. Pro konkrétní typy brusných kotoučů, aplikace nebo různé metody je k dispozici velké množství pryskyřic. I když v dnešní době existuje velké množství syntetických pryskyřic, tak je stále nejvíce využívána fenolová pryskyřice. Pryskyřicová pojiva mají tyto vlastnosti:

- Nejsou citlivá na náraz.
- Umožňují vysoké otáčky.
- Umožňují vysokou kvalitu povrchu, kvůli vysoké pružnosti. [11]

### 4.2.3 Kovové pojiva

Kovová pojiva existují ve více variantách. Na rozdíl od silikátových a pryžových pojiv mají zvýšenou tepelnou vodivost. Kovová pojiva mají následující vlastnosti:

- Vysoká odolnost vůči opotřebení.
- Vysoká tepelná vodivost.
- Zvýšená tvorba třecího tepla.

Kovová pojiva mají hlavní význam pro brusná kola ze super abrazivních materiálů. Pro výrobu se používají tyto kovy: měď, kobalt a stříbro. [11] [14]

### 4.2.4 Ostatní pojiva

#### Pryžové pojivo

Pryžové pojivo se skládá převážně ze syntetického kaučuku, síry a oxidu zinečnatého pro urychlení vulkanizace. Brusné kotouče s pryžovým pojivem se využívají v brusných řezných kotoučích a v podávacích kotoučích pro bezhroté broušení. [11]

#### Magnezitové pojivo

Je to zřídka používaný druh pojiva. Vyrábí se z magnezitu nebo spáleného hořčíku, který se s vodou přeměňuje na hydroxid hořečnatý. Magnetizové pojivo produkuje měkký

brusný kotouč. Tato brusná kola se používají v tenkých, tepelně citlivých nástrojích pro suché broušení. [11]

### Šelak

Šelak je rozpuštěný v alkoholu nebo ve vodě a je smíchaný s alkalickými roztoky (borax, amoniak atd.), dnes funguje jen zřídka jako pojivo pro brusné kotouče, i když je zcela vodoodpudivý. [11]

## 4.3 Vlastnosti brusných kotoučů

Všechny brusné kotouče a nástroje jsou charakterizovány mnoha parametry, např. materiálem brusiva, jeho velikostí – zrnitostí, pojivem, tvrdostí a dalšími parametry. Vlastnosti a jejich značení je uvedeno v normě ČSN. Norma určuje tyto základní parametry brusných kotoučů: materiál brusiva, zrnitost brusiva, tvrdost, sloh a pojivo. [15]

### Zrnitost

Zrnitost je parametr, který určuje velikost použitých zrn v materiálu brusného kotouče. V současné době je zrnitost označena mezinárodní normou FEPA „F“ 42-D-1986, která zahrnuje současně ČSN 22 4012 a ISO 8486:86. Dle normy FEPA je zrnitost: číslo, které udává počet ok síta na jeden palec (25,4 cm), kterým ještě brusivo při prosévání propadne. Čím větší číslo, tím hustší síto, a tedy jemnější brusivo. Například číslo 400 udává zrnitost, která je získána sítem o čtyř stech ok na jeden palec. Při volbě zrnitosti platí:

- Tvrdý a křehký materiál vyžaduje jemnější zrno než materiál měkký a houževnatý.
- Čím lepší drsnost povrchu, tím jemnější zrno.
- Na úběr většího množství materiálu se volí větší zrno. [8] [15]

Zrnitost (dle FEPA)	Název
7, 8, 10, 12	velmi hrubá
14, 16, 20, 22, 24, 30	hrubá
35, 40, 46, 54, 60	střední
70, 80, 90, 100, 120	jemná
150, 180, 220, 240	velmi jemná
280, 320, 400, 500, 600	zvlášť jemná
800, 1000, 1200	extrajemná

Tabulka 9 - Značení zrnitosti dle FEPA [15]

### Tvrdost

Tvrdost je charakterizována jako odpor proti uvolnění zrn z povrchu kotouče a závisí hlavně na pevnosti pojiva. Značí se písmeny E až Z. Když je brusné zrno otupené, narůstá řezný odpor a tření o materiál, až se zrno z vazby vylomí. Tím se odkryjí spodní, dosud neotupená zrna. U správně zvoleného kotouče má probíhat samoostření, tj. brusný kotouč se má včasným vylomením zrn udržovat stále ostrý. U kotouče, který je příliš

měkký, dochází k vylomení zrn předčasně, již při malém otupení a kotouč rychle ubývá, ztrácí tvar a rozměry. U příliš tvrdého kotouče se otupená zrna nevytlamují, povrch kotouče se zalepuje broušeným materiálem, kotouč nebrousí a broušený předmět se nadměrně zahřívá. [15]

Označení	Název
G, H	velmi měkký
I, J, K	měkký
L, M, N, O	střední
P, Q, R, S	tvrdý
T, U	velmi tvrdý
V, W, Z	zvlášť tvrdý

Tabulka 10 - Značení tvrdosti brusných kotoučů [15]



Obr. 20 - Volba brusného kotouče z pohledu tvrdosti [8]

### Sloh (struktura)

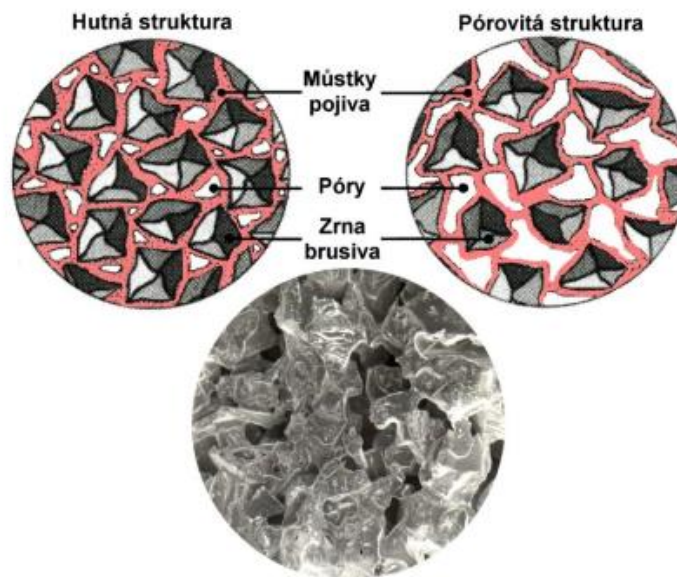
Je to poměr objemu připadající na póry a objemu vyplněného brusnými zrny a pojivem. Mezi jednotlivými zrny musí být dostatek pórů, aby se třísky nepěchovaly mezi zrny a mihly volně vypadávat. Pórovitost kotouč usnadňuje chlazení kotouče chladicí kapalinou. Pro volbu struktury platí:

- Čím tvrdší a křehčí materiál, tím hutnější musí být kotouč.
- Čím je větší dotyková plocha, tím pórovitější musí být kotouč.
- Čím větší je množství odebraného materiálu, tím pórovitější musí být brusný kotouč, aby se nezanášel. [15] [8]

Označení slohu	Název	Pórovitost
1, 2	velmi hutný	5–10 %
3, 4	hutný	10–20 %
5, 6	polohutný	20–30 %
7, 8	pórovitý	30–40 %
9, 10	velmi pórovitý	40–50 %
11, 12, 13, 14, 15	zvlášť pórovitý	nad 50 %

Tabulka 11 - Označení struktury brusného nástroje [15]





Obr. 21 - Struktura brusného kotouče [8]

## 5 Dosahované parametry při procesu broušení

Technologie broušení se většinou používá jako dokončovací operace, a proto požadujeme, aby tomu odpovídala jakost obrobených ploch a přesnost rozměrů. Tyto parametry závisí na přesnosti a tuhosti brusky, velikosti zrna a dalších vlastnostech kotouče, na řezných podmínkách a na způsobu broušení.

V tab.11 jsou uvedeny přesnosti rozměrů a jakosti obrobené plochy, dosahované při různých způsobech broušení. [9]

Tvar broušení plochy	Způsob broušení	Přesnost rozměrů IT	Jakost obrobené plochy Ra [ $\mu\text{m}$ ]
Rovinná	Hrubování	---	---
	Čelem	9 až 11	0,8 až 6,3
	Obvodem	8 až 11	0,8 až 3,2
	Načisto	---	---
	Čelem	5 až 7	0,2 až 1,6
	Obvodem	5 až 7	0,2 až 1,6
	Jemné broušení	3 až 5	0,025 až 0,4
Vnitřní válcová	Hrubování	9 až 11	1,6 až 3,2
	Načisto	5 až 7	0,4 až 1,6
	Jemné broušení	3 až 6	0,05 až 0,4
Vnější válcová	Hrubování	9 až 11	1,6 až 3,2
	Načisto	5 až 7	0,4 až 1,6
	Jemné broušení	3 až 6	0,025 až 0,4

Tabulka 12 - Přesnost a jakost ploch obrobených broušením [9]

## 6 Vzorky pro metrologickou úlohu

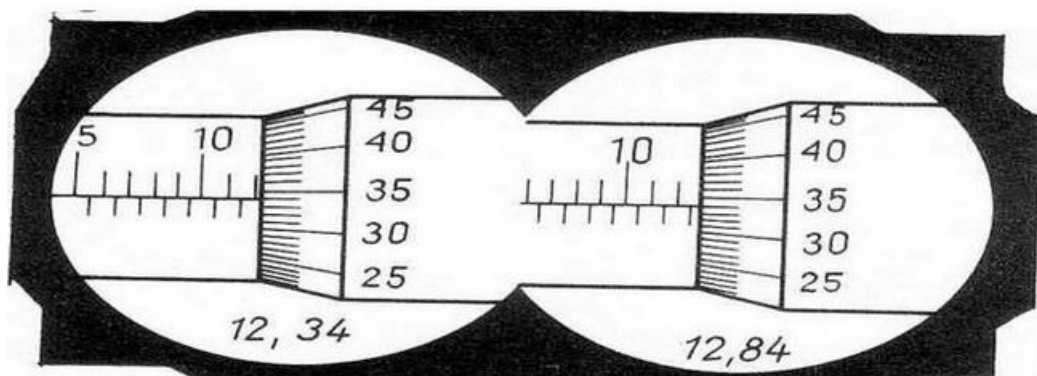
### 6.1 Popis metrologické úlohy

Studenti se v předmětu základy technologie 2 učí měřit mechanickým mikrometrem. Pro tyto účely budou sloužit navržené a vyrobené vzorky.

Studenti se ze začátku úlohy seznámí s využíváním a ovládáním mikrometru. Poté dostanou vyrobené vzorky, na kterých si vlastnoručně vyzkoušejí měření a odečítání ze stupnice mikrometru. Po měření studenti vyhodnocují vlastní měření a výsledky zanášejí do líčovací soustavy, kde řeší, jestli daný vzorek vyhovuje zadané toleranci nebo jestli se jedná o zmetkový kus, který lze nebo nelze opravit.

### 6.2 Návrh geometrie vzorku

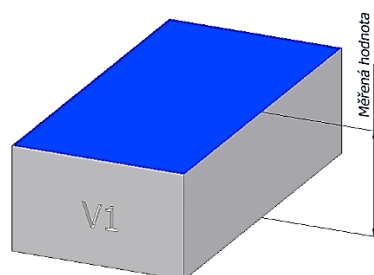
Pro metrologickou úlohu jsou navrženy 2 typy vzorků. Vzorky se liší rozměry, ale také tvarem. Každý vzorek je vyroben ve 4 velikostech. Do vzorků je zahrnuto pedagogické hledisko, a to takové, že dva vzorky jsou vyrobeny v podobných rozměrech, které se liší maximálně o 0,5 mm, protože svislá ryska milimetrové stupnice u mikrometru je ve spodní části posunutá o 0,5 mm, což studenti velmi často zapomínají a dělají při odečítání hodnot chyby. Toto hledisko lze vidět na obr.22.



Obr. 22 - Příklad pedagogického hlediska [16]

#### Zkušební vzorek 1

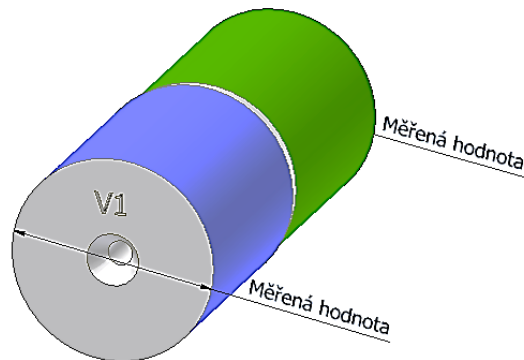
Jedná se o jednoduchý hranatý vzorek, na kterém je vyrobena jedna měřená hodnota. Tento vzorek bude sloužit pro měření mikrometrem, který má rozsah měření 0–25 mm.



Obr. 23 – Zkušební vzorek 1

## Zkušební vzorek 2

Jedná se o válcový vzorek, na kterém budou dvě měřené rozměry, které jsou odděleny zápichem. Tento typ vzorku bude sloužit pro měření mikrometre, který má rozsah 25–50 mm.



Obr. 24 – Zkušební vzorek 2

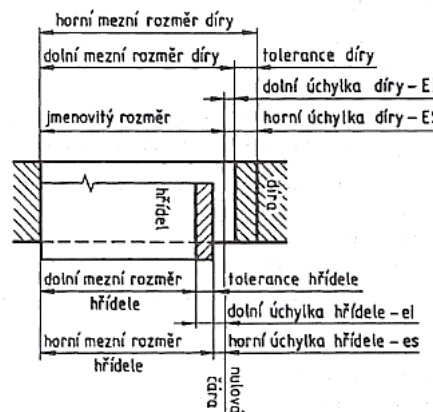
## 7 Lícování

Rozměry vyráběných součástí nelze vždy vyrobit s absolutní přesností. Proto jsou stanoveny povolené nepřesnosti, tzv. úchytky skutečných tvarů, rozměrů a polohy od teoretických hodnot. Při styku dvou a více ploch se mluví o lícování, což je všeobecné označení pro rozměrovou a tvarovou přesnost sdružených ploch spojovaných součástí, které jsou potřebné k dosažení jejich správného funkčního stylu. [17]

### 7.1 Základní pojmy

Jak už bylo řečeno, při výrobě nelze dosáhnout předepsaného rozměru s absolutní přesností. Proto se zavádějí v lícování dva mezní rozměry (obr. 25), a to:

- Horní mezní rozměr** – Největší povolený rozměr.
- Dolní mezní rozměr** – Nejmenší dovolený rozměr.



Obr. 25 - Lícování děr a hřídelí (základní pojmy) [17]

**Jmenovitý rozměr** – Předepsaný rozměr součásti, který je vyznačen na výkrese a od něhož se počítají úchylky rozměrů.

**Tolerance** – Rozsah dovolené nepřesnosti, to je rozdíl mezi horním a dolním mezním rozměrem součásti.

**Úchylka** – Rozdíl mezi rozměrem skutečným a jmenovitým.

**Mezní úchylka** – Krajní dovolená úchylka. Může být horní nebo dolní.

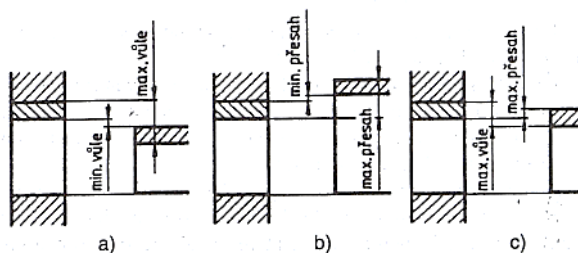
**Horní úchylka** – Rozdíl mezi horním mezním rozměrem a rozměrem jmenovitým.

**Dolní úchylka** – Rozdíl mezi dolním mezním rozměrem a rozměrem jmenovitým.

[18]

## 7.2 Druhy uložení

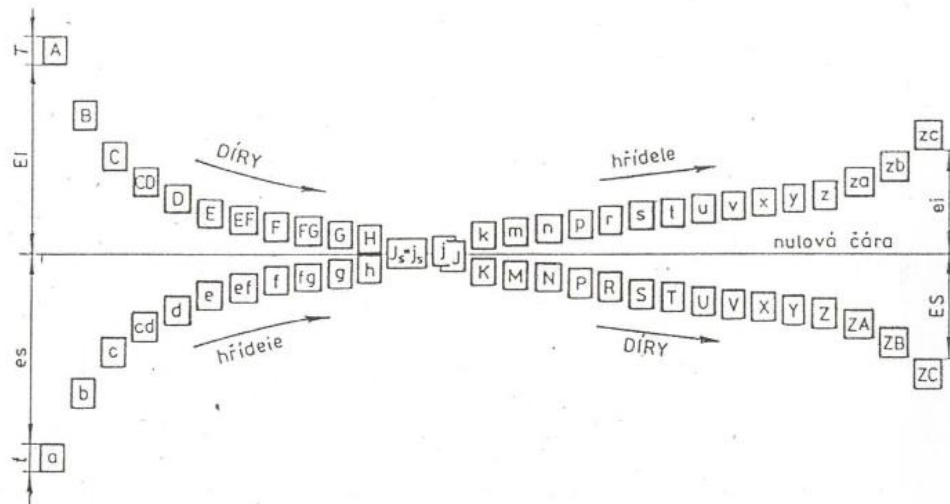
- Uložení s vůlí** – U nichž je zaručená určitá minimální vůle. Hřídel je vždy menší než díra. Příkladem je uložení hřídele v kluzném ložisku.
- Uložení s přesahem** – U nichž je pevnost spojení zabezpečena přesahem. Hřídel je vždy větší jak díra. Příkladem je nalisování ozubeného kola na hřídel.
- Uložení přechodné** – U nichž se u spojovaných součástí může vyskytnout jak vůle, tak i přesah, podle toho, je-li skutečný rozměr díry nebo hřídele blíže hornímu nebo dolnímu meznímu rozměru. [18]



Obr. 26 - Základní druhy uložení [17]

## 7.3 Soustava tolerancí a uložení ISO

Soustava se používá pro předepsání rozměrů v hromadné výrobě, kde je vymezena tolerančním polem. Toleranční pole má vůči nulové čáře definovanou polohu pomocí písmen abecedy. Velká písmena jsou pro díry např. A= největší díra, a naopak pro hřídele jsou užívána malá písmena abecedy např. a= největší hřídel. Tolerance, tj. poloha a velikost vůči nulové čáře, je jednoznačně určena mezními úchylkami.



Obr. 27 - Polohy tolerančních polí hřídelů a děr [19]

Celá soustava vychází z poznatků, že nepřesnosti ve strojírenství rostou se třetí odmocninou tolerovaného rozměru a nepřesnosti při měření rostou s rozměrem lineárně. Pro výpočet tolerancí byla zavedena toleranční jednotka (pro rozsah do 500 mm, pro rozměry větší jak 500 mm jsou předepsány odlišné stavy).

$$i = 0,45 \cdot \sqrt[3]{D} + 0,001 \cdot D \quad (9)$$

$i$  – Toleranční jednotka [ $\mu\text{m}$ ]

$D$  – Výpočtový rozměr [mm] (geometrický průměr krajních hodnot rozsahu rozměrů, pro který se určuje tolerance  $D = \sqrt{D_1 \cdot D_2}$ )

Ze vzorců je vidět, že se toleranční jednotka nevypočítává pro každý jednotlivý rozměr, ale je stanovena pro určitý rozsah rozměrů ( $D_1 \div D_2$ ).

Dle potřeb strojírenství jsou velikosti tolerančních polí odstupňovány od nejvyšší až po nejnižší. Tato soustava zavádí 20 tolerančních stupňů, která se označují od nejpřesnějších IT01 až po hrubé IT18. [19] [20]

IT 01 až IT 6	pro výrobu kalibrů a měřidel
IT 5 až IT 12	pro uložení v přesném a všeobecném strojírenství
IT 11 až IT 16	pro výrobu polotovarů
IT 16 až IT 18	pro konstrukce
IT 11 až IT 18	pro stanovení mezních úchylek netolerovaných rozměrů

Tabulka 13 - Oblast použití jednotlivých tolerancí soustavy ISO [20]

## 8 Komunální měřidla

Pod pojmem komunální měřidla lze rozumět jednodušší přenosná měřidla na měření rozměrů. Jejich provedení se dělí na mechanické, elektrické a mechanicko-optické. Kvůli větší přesnosti a eliminaci subjektivních chyb se většinou vyrábějí v digitálním provedení. Patří sem tyto měřidla: [21]

### Posuvná měřítka

Do této kategorie patří: klasická s noniem, digitální, hloubkoměry a výškoměry.

Využívají se pro měření délek, ale jejich přesnost může být pouze v desetinách milimetru. Rozsah měření je až do 1 m. [21]



Obr. 28 - Digitální posuvné měřítko Mahr [22]

### Mikrometrická měřidla

Do této kategorie patří: třmenové mikrometry, hloubkoměry a dutinoměry.

Jsou určena pro měření délek a jejich přesnost může být až tisícina milimetru. Rozsah může být až 1 m. [21]



Obr. 29 - Digitální třmenový mikrometr Mahr [22]

### Číselníkové úchylkoměry

Jedná se také o délkové měřidlo, ale měří pouze odchylku od zadané hodnoty s přesností na setiny až tisíciny. Vyrábí se většinou s převodem ozubenými koly, ale také je i v digitálním provedení. [21]

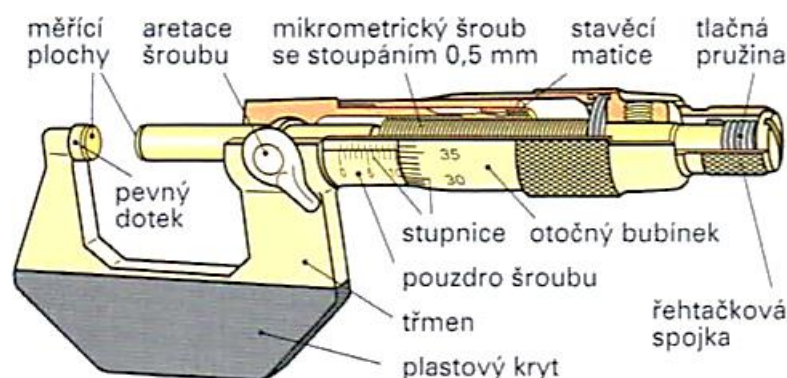


Obr. 30 - Číselníkový úchylkoměr Mahr [22]

## 8.1 Třmenový mikrometr

Je to jedno z nejpoužívanějších měřidel ve strojírenství. Využívá se pro měření vnějších rozměrů a dokáže měřit s přesností na setiny milimetru. Kvůli konstrukčním důvodům je jejich rozsah malý, a to z pravidla 25 mm. Jsou vyráběny jak mechanickým, tak i digitálním provedení. [23]

### Popis třmenového mikrometru



Obr. 31 - Konstrukce třmenového mikrometru [24]

Základem mikrometru je bubínek s přesně broušeným mikrometrickým šroubem, který má stoupání 0,5 mm a je ukotven v pouzdru pro šroub. Po pouzdru pro šroub se posouvá otočný bubínek. S mikrometrickým šroubem tvoří jeden celek pohyblivý měřící dotek. Otáčením mikrometrického šroubu dochází k zasouvání, nebo vysouvání měřícího dotyku. Je potřeba si uvědomit, že na přesnost měření má vliv stav povrchů měřících dotyků, dále stav mikrometrického šroubu a také konstantní síla přitlaku (5 až 10 N) měřícího dotyku k měřenému objektu, která je zajištěna pomocí řehtačkové spojky.

Na rukojeti mikrometru se nachází dvě stupnice. Jedna je pevná (milimetrová) a lze jí vidět na pouzdru pro šroub. Druhá stupnice je otočná a jde najít po obvodu otočného bubínku. Otočná stupnice je rozdělena na 50 dílků. Jednou otočkou kolem dokola se posune pohyblivý dotyk o 0,5 mm. [25] [24] [23]

## Porovnání mechanického a digitálního mikrometru

V tabulce se porovnávají dva třmenové mikrometry od firmy Mahr:

- MICROMAR 40 EWR DIGITÁLNÍ MIKROMETR
- MICROMAR 40 A TŘMENOVÝ MIKROMETR

	DIGITÁLNÍ TŘMENOVÝ MIKROMETR	ANALOGOVÝ TŘMENOVÝ MIKROMETR
Rozsah měření [mm]	0–25	0–25
Rozlišení [mm]	0,001	0,01
Mezní chyba [ $\mu\text{m}$ ]	2	4
Cena [Kč]	8700	1400

Tabulka 14 - Porovnání mikrometrů [22]

Z tabulky je patrné, že digitální mikrometr dokáže měřit s větší přesností než analogový mikrometr. To stejné lze říct o mezní chybě, která je u digitálního mikrometru o polovinu menší jak u analogového mikrometru. Největší rozdíl je, ale v ceně mikrometrů, kde je velký rozdíl a při nákupu by se mělo zvážit i možnost, jestli je opravdu potřebná taková přesnost mikrometru.

## 9 Použité výrobní technologie

Pro výrobu vzorků budou použity 3 hlavní technologie. Základní technologie bude soustružení a frézování, jako dokončovací metoda bude využito broušení, které je celé definováno v rešerši této práce.

### 9.1 Soustružení

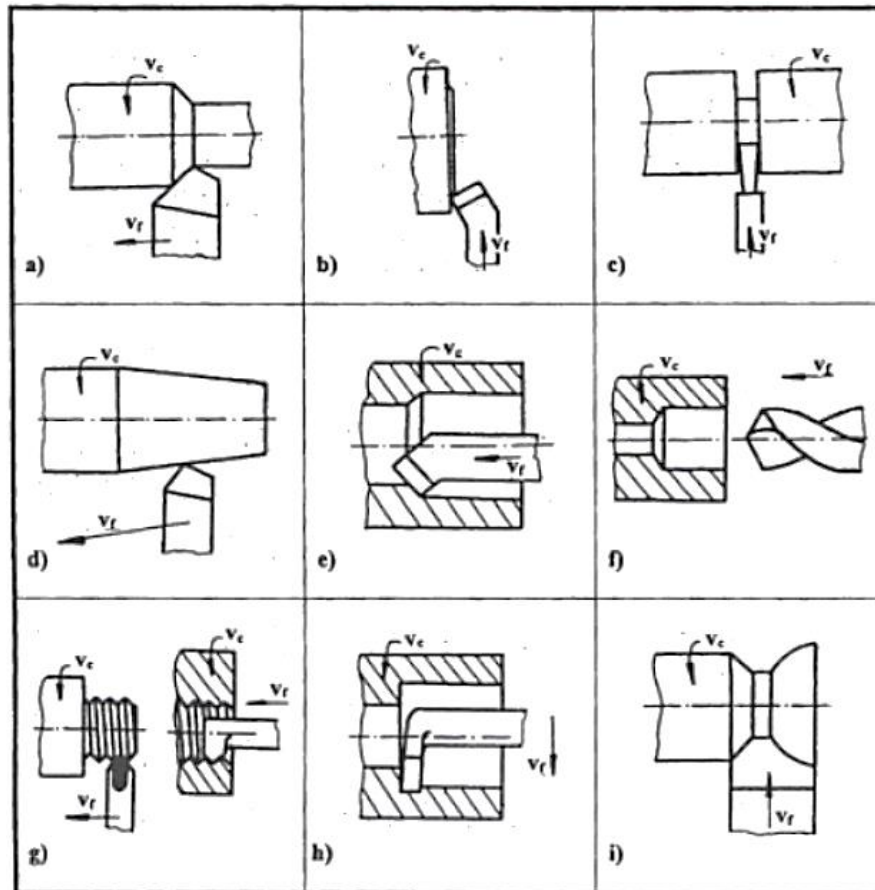
Soustružení je obrábění rotačních ploch, a to zpravidla jednobřitým nástrojem s jasně definovanou geometrií břitu.

Soustružení patří po vrtání mezi nejstarší obráběcí operace. Většina součástí ve strojírenství je tvořena rotačními nebo rovinnými plochami. V této době se proto více než třetina obráběcích operací provádí pomocí soustružení.

Na soustružích jde obrábět válcové, kulové, kuželové i obecné rotační plochy a závity. Mimo soustružení lze na soustružích dělat další osové operace, jak vrtání, vyhrubování, vystružování, řezání závitů závitníky nebo závitovými čelistmi.

Při soustružení dochází k odřezávání přebytečné vrstvy materiálu (přídavek na obrábění) řeznou částí nástroje. Odřezávána vrstva se odděluje od obrobku v podobě třísky. Aby docházelo k oddělování třísky od obrobku, musí mít činná část nástroje klínový břit, který je tvrdší než obráběný materiál. Obrobek dostává postupně požadované rozměry, tvar, drsnost povrchu, ale i některé mechanické vlastnosti. [9] [8]





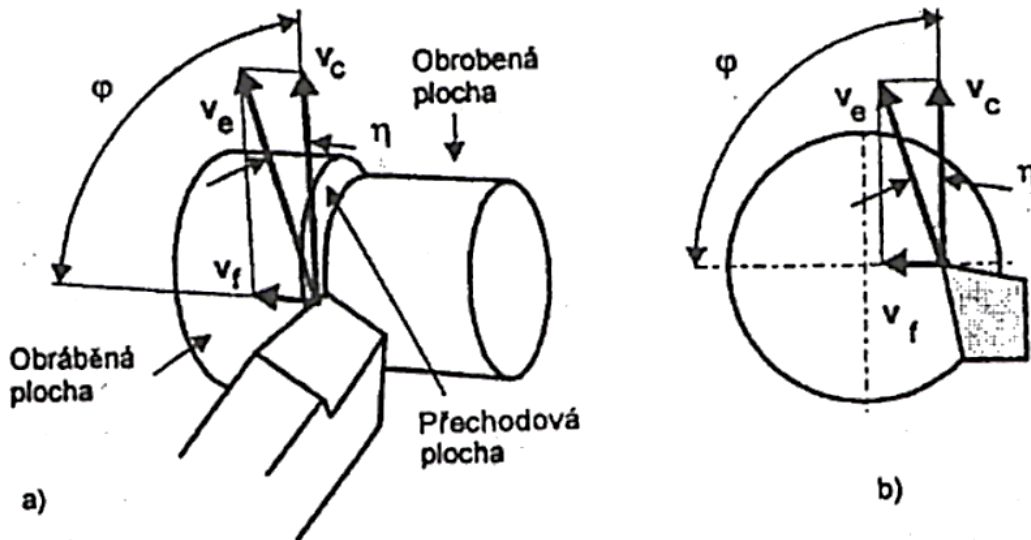
Obr. 32 - Přehled základních operací při soustružení [7]

- a) podélné soustružení
- b) čelní soustružení
- c) upichování
- d) soustružení kužele
- e) soustružení díry
- f) vrtání děr
- g) řezání vnitřních a vnějších závitů
- h) soustružení vnitřních zápichů
- i) soustružení tvarové plochy tvarovým nožem

### Kinematika soustružení

**Hlavní řezný pohyb ( $v_c$ )** – Je rotační a vykonává ho obrobek. Z povrchu rotujícího obrobku dochází prostřednictvím nože k odřezávání třísky.

**Posuvný pohyb ( $v_f$ )** – Je vedlejší, obvykle přímočarý a koná ho nástroj. Tento pohyb je potřebný k tomu, aby nůž postupně odřezával třísky požadovaného průřezu. Posouvá-li se nůž ve směru osy rotace obrobku (axiálně), pak mluvíme o podélném soustružení a **výsledný řezný pohyb ( $v_c$ )** má tvar šroubovice. Posouvá-li se však ve směru kolmém k ose rotace (radiálně), jedná se o přímé (čelní) soustružení a výsledný řezný pohyb má tvar Archimédovy spirály. [8]



Obr. 33 - Vektory pohybu při soustružení [7]

- a) Podélné soustružení  
b) Příčné soustružení

### Dosahované parametry při soustružení

Přesnost rozměrů obrobku a jakost obrobené plochy závisí především na řezných podmínkách, geometrii břitu nástroje, obráběném materiálu a pevnosti systému stroj – nástroj – obrobek – přípravek a řezném prostředí.

Při hrubování chceme co největší objem odebraného materiálu za jednotku času, zatím co při obrábění na čisto a jemném soustružení požadujeme dodržení předepsaných parametrů obráběné plochy. Běžně lze dosáhnout těchto hodnot přesnosti a drsnosti: [9]

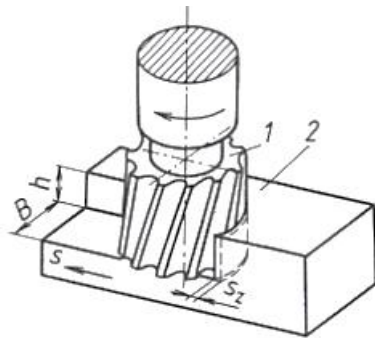
Způsob obrábění	Přesnost rozměrů IT	Drsnost povrchu Ra [ $\mu\text{m}$ ]
Hrubování	11 až 14	12,5 až 50
Načisto	9 až 11	1,6 až 12,5
Jemné soustružení nástrojem		
ze slinutého karbidu	7 až 8	0,4 až 1,6
z diamantu	5 až 6	0,2 až 0,6

Tabulka 15 - Dosahované parametry při soustružení [9]

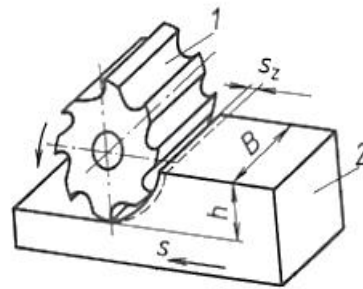
## 9.2 Frézování

Frézování je obrábění rovinných nebo tvarových ploch, vnitřních nebo vnějších, vícebřitým nástrojem s definovanou geometrií břitu.

Z technologického hlediska se v závislosti na použitém nástroji rozlišuje frézování válcové (frézování obvodem) a frézování čelní (frézování čelem). Od těchto základních způsobů se odvozují některé další způsoby, jako frézování okružní nebo planetové. [7]



1 – fréza, 2 – obrobek,  $B$  – šířka obrobku,  $h$  – hloubka řezu,  $s$  – posuv,  $s_z$  – posuv na zub



1 – fréza, 2 – obrobek,  $B$  – šířka obrobku,  $h$  – hloubka řezu,  $s$  – posuv,  $s_z$  – posuv na zub

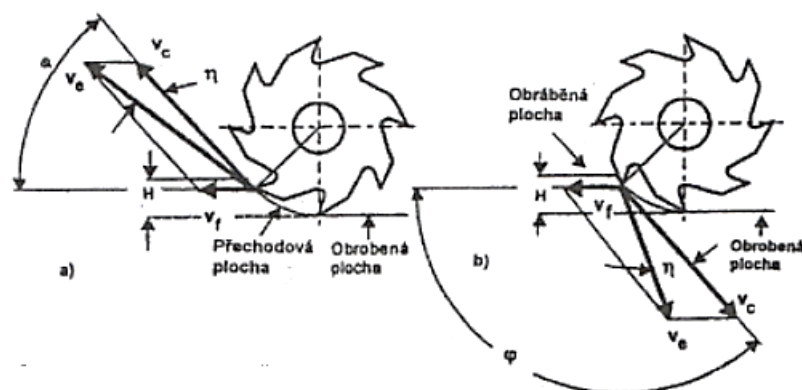
Obr. 35 - Frézování čelem čelní frézy [7]

Obr. 34 - Frézování obvodem válcové frézy [7]

### Kinematika frézování

Hlavní řezný pohyb při frézování je rotační a vykonává ho nástroj. Vedlejší pohyb je posuv, který je obvykle přímočarý a vykonává ho obrobek. U moderních strojů jsou posuvy plynule měnitelné a mohou se realizovat ve více směrech zároveň. Řezný proces je přerušovaný, protože každý zub odřezává krátké třísky většinou proměnlivé tloušťky.

Válcové frézování se uplatňuje při práci s válcovými a tvarovými frézami. Zuby frézy jsou pouze na obvodu nástroje, hloubka odebírané vrstvy  $H$  se nastavuje kolmo na osu frézy a na směr posuvu. Obrobená plocha je rovnoběžná s osou otáčení frézy. V závislosti na kinematice obráběcího procesu se rozlišuje frézování nesousledné (protisměrné) a sousledné (sousměrné). [7] [8]



Obr. 36 - Kinematika válcového frézování [7]

- a) Nesousledné frézování
- b) Sousledné frézování

### Nesousledné frézování

Smysl rotace nástroje je proti směru posuvu obrobku. Obrobená plocha vzniká při vnikání nástroje do obrobku. Tloušťka třísky se postupně mění z nulové hodnoty na hodnotu maximální.

#### Výhody:

- menší opotřebení nástroje,
- počáteční záběr zubů nezávisí na hloubce řezu.

#### Nevýhody:

- zhoršená jakost obrobené plochy,
- směr síly frézování s ohledem na upnutí (odtahuje obrobek od stolu). [7] [8]

### Sousledné frézování

Smysl rotace nástroje je ve směru posuvu obrobku. Maximální tloušťka třísky vzniká při vnikání zubu frézy do obrobku. Obrobená plochy vzniká, když zub vychází ze záběru.

#### Výhody:

- vyšší trvanlivost nástrojů,
- použití vyšších řezných rychlostí a výkonů,
- jednodušší upínání (řezná síla přitlačuje obrobek ke stolu).

#### Nevýhody:

- silová zátěž každého zubu při záběru. [7] [8]

### Dosahované parametry

Velký sortiment nástrojů a řada způsobů frézování umožňují dosáhnout široké škály jakosti obrobené plochy. Kromě geometrie nástroje a způsobu frézování je přesnost rozměrů, tvaru i jakosti obrobeného povrchu ovlivněna mnoha dalšími parametry, jako jsou řezné podmínky, přesnost seřízení nebo naostřené nástroje, tuhost stroje atd. [9]

Způsob obrábění	Přesnost rozměrů IT	Drsnost povrchu Ra [μm]
Válcovou frézou RO		
hrubování	10 až 13	6,3 až 25
načisto	8 až 11	1,6 až 6,3
Čelní frézou RO		
hrubování	10 až 13	6,3 až 25
načisto	6 až 11	1,6 až 3,2
Frézovací hlavou s břity SK	7 až 11	1,6 až 6,3

Tabulka 16 - Dosahované parametry při frézování [9]

## 10 Volba vhodného materiálu

Materiál musí splňovat tři základní požadavky: korozivzdornost, feromagnetičnost a tvrdost.

Korozivzdornost je požadována z důvodu, že se studentům často potí dlaně a není žádoucí, aby vyrobený vzorek začal hned korodovat. Feromagnetičnost je potřebná, protože se jeden typ vzorků bude vyrábět na rovinné brusce, kde se pro upevnění obrobku využívá magnet. Tvrdost materiálu je žádoucí z důvodu, aby měřicí dotyky mikrometru, které jsou vyrobeny z karbidu nezanechaly ve vzorku stopy po měření.

Po konzultaci s vedoucím práce a se zjištěním dostupnosti materiálu, byly vybrány dva materiály. Jedná se o nerezové oceli 15-5 PH H1025 a 13-8 PH H1000.

### Nerezová ocel 15-5 PH H1075

Nerezová ocel 15-5 PH je martenzitická precipitačně vytvrzovaná ocel, která má výbornou kombinaci vysoké pevnosti, dobré korozní odolnosti a dobrých mechanických vlastností při teplotách až 316 °C. Ve složení má hlavní zastoupení chrom, nikl a měď. Využívá se převážně v leteckém průmyslu nebo v ropném a plynárenském průmyslu. [26]

%	NI	CR	MN	CU	SI	NB+TA	C	P	S	FE
Min.	3,5	14	-	2,5	-	0,15	-	-	-	-
Max.	5,5	15,5	1	4,5	1	0,45	0,07	0,04	0,03	Bilance

Obr. 37 - Chemické složení 15-5 PH H1075 [26]

Stav	H1075
Maximální pevnost v tahu [MPa]	1061,8
Modul pružnosti [MPa]/x10 <sup>5</sup>	1,97
0,2% mez kluzu [MPa]	861,9
Tvrdost podle Brinella	331

Tabulka 17 - Základní mechanické vlastnosti 15-5 PH [26]

### Nerezová ocel 13-8 PH H1000

Nerezová ocel 13-8 PH je martenzitická, precipitačně zpevněná nerezová ocel, která má výbornou pevnost, vysokou tvrdost, vynikající tuhost a dobrou korozní odolnost. Ve složení převládá chrom, nikl a molybden. Využívá se pro letecké komponenty, v petrochemickém a jaderném průmyslu. [27]

%	NI	CR	MO	C	P	S	SI	MN	N	AL	FE
Min.	7,5	12,25	2	-	-	-	-	-	-	0,90	-
Max.	8,5	13,25	2,5	0,05	0,01	0,008	0,1	0,2	0,1	1,35	Bilance

Obr. 38 - Chemické složení 13-8 PH H1000 [27]

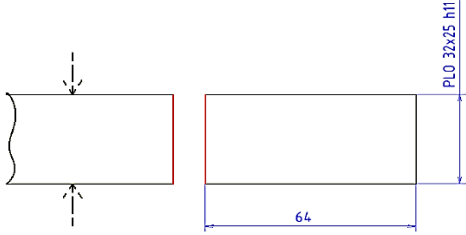
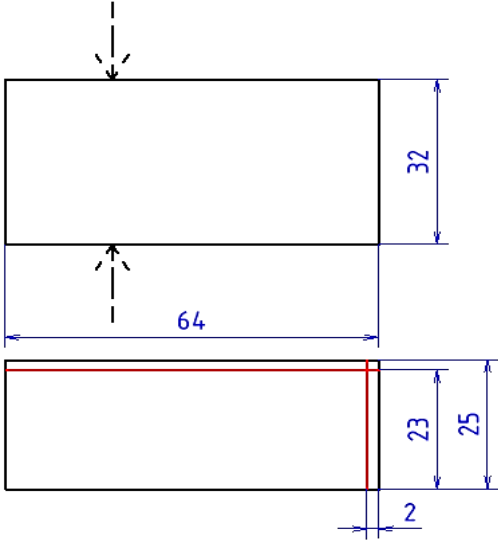
Stav	H1075
Maximální pevnost v tahu [ksi]	205
Modul pružnosti [MPa]/x10 <sup>5</sup>	2
Min. Tvrdost dle Rockwella	43

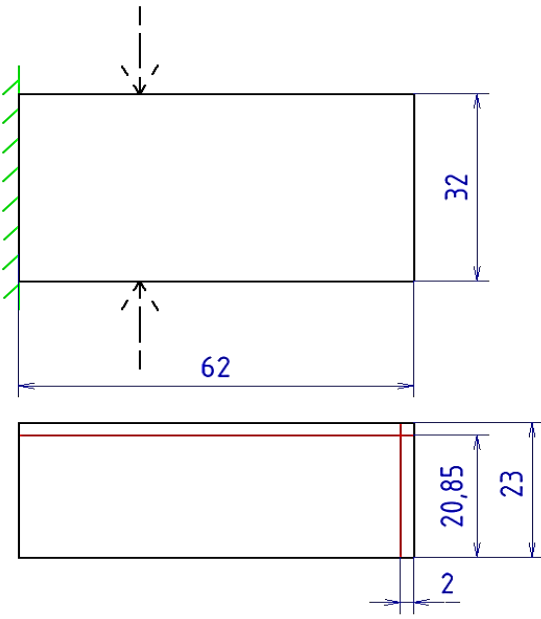
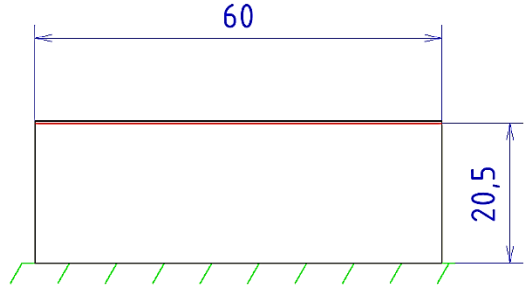
Tabulka 18 - Základní mechanické vlastnosti [27]

## 11 Výrobní postup

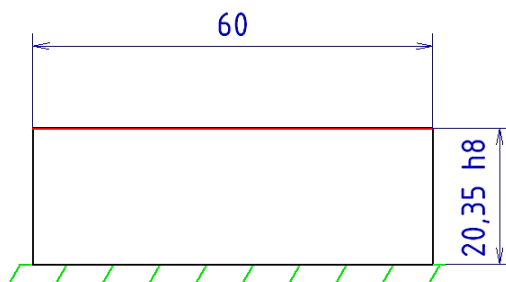
### 11.1 Zkušební vzorek 1

Polotovar a materiál je uveden ve výrobní výkresu součásti viz. příloha 1

Č. op	Pracoviště (stroj)	Náčrt	Nářadí	Řezné podmínky			
		popis práce		v <sub>c</sub>	f <sub>z</sub>	a <sub>p</sub>	i
5	Pásová pila Opti S 181 G	<p>a) Upnout tyč za šířku 32 mm b) Řezat v délce 64 mm c) Kontrolovat uříznutou délku</p> 	<p>Pilový pás M42 Bi-matal  Posuvné měřítko</p>				
10	Frézka Haas VF - 2	<p>a) Upnout obrobek do strojního svěráku za šířku 32 mm b) Zarovnat čelo o 2 mm c) Frézovat tloušťku 25 mm na tloušťku 23 mm d) Kontrola frézovaného rozměru</p> 	<p>Fréza s VBD  Stopková fréza  Posuvné měřítko</p>	120	0,2	1	2

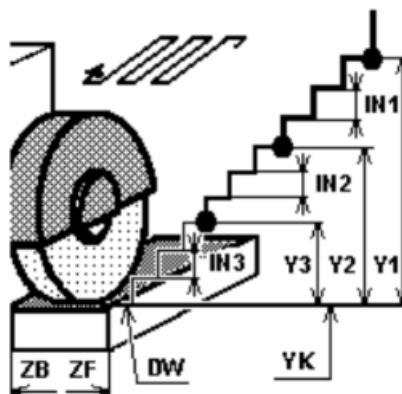
20	Frézka Haas VF - 2	<p>a) Otočit obrobek, upnout do strojního svěráku za šířku 32 mm a axiálně dorazit na doraz ve svěráku</p> <p>b) Zarovnat čelo o 2 mm</p> <p>c) Frézovat tloušťku 23 mm na tloušťku 20,85 mm</p> <p>d) Kontrola frézovaného rozměru</p> 	Fréza s VBD Stopková fréza Posuvné měřítko	120	0,2	1	3
30	Bruska BRH 20 CNC	<p>a) Upnout obrobek za plochu 60 x 32 mm</p> <p>b) Brousit tloušťku 20,85 mm na tloušťku 20,5 mm</p> <p>c) Kontrola broušeného rozměru 20,5 mm</p> 	Kotouč brusný T1 250x20x76 Tyrolit Třmenový mikrometr 0-25 mm				

40	Bruska BRH 20 CNC	<p>a) Otočit obrobek a upnout za plochu 60 x 32 mm</p> <p>b) Brousit tloušťku 20,5 mm na tloušťku 20,35 h8 mm</p> <p>c) Kontrola rozměru 20,35 h8</p>	<p>Kotouč brusný T1 250x20x76 Tyrolit</p> <p>Třmenový mikrometr 0–25 mm</p>				
----	----------------------	---	---	--	--	--	--



Tabulka 19 - Výrobní postup vzorek 1

### Řezné podmínky pro broušení



Obr. 39 - Ukázka cyklu [28]

### Broušení na rozměr 20,5

Hrubovací cyklus:

- řezná rychlost:  $v_c = 31$  m/s
- přejezdy:  $z_b$  a  $z_f = 2$  mm
- přejezdy:  $d_w$  a  $y_k = 2$  mm
- axiální posuv stolu:  $f_a = 7$  mm/zdvih
- rychlost posuvu stolu:  $v_{ft} = 15$  m/s
- hloubka řezu:  $a_p = 0,02$
- počet řezů:  $i = 12$  (uvažují 5 řezů pro vyjiskření)

Dokončovací cyklus:

- řezná rychlost:  $v_c = 31$  m/s



- přejezdy:  $z_b$  a  $z_f = 2$  mm
- přejezdy:  $d_w$  a  $y_k = 2$  mm
- axiální posuv stolu:  $f_a = 2$  mm/zdvih
- rychlost posuvu stolu:  $v_{ft} = 15$  m/s
- hloubka řezu:  $a_p = 0,006$
- počet řezů:  $i = 14$  (uvažuji 5 řezů pro vyjiskření)

### **Broušení na rozměr 20,35 h8**

#### Hrubovací cyklus

- řezná rychlost:  $v_c = 31$  m/s
- přejezdy:  $z_b$  a  $z_f = 2$  mm
- přejezdy:  $d_w$  a  $y_k = 2$  mm
- axiální posuv stolu:  $f_a = 7$  mm/zdvih
- rychlost posuvu stolu:  $v_{ft} = 15$  m/s
- hloubka řezu:  $a_p = 0,01$
- počet řezů:  $i = 10$  (uvažuji 5 řezů pro vyjiskření)

#### Dokončovací cyklus:

- řezná rychlost:  $v_c = 31$  m/s
- přejezdy:  $z_b$  a  $z_f = 2$  mm
- přejezdy:  $d_w$  a  $y_k = 2$  mm
- axiální posuv stolu:  $f_a = 2$  mm/zdvih
- rychlost posuvu stolu:  $v_{ft} = 15$  m/s
- hloubka řezu:  $a_p = 0,005$
- počet řezů:  $i = 10$  (uvažuji 5 řezů pro vyjiskření)

### **Použité nástroje**

#### **Rovinná fréza**



*Obr. 40 - Rovinná fréza [29]*

Pro frézování byla zvolena fréza o průměru 80 mm s vyměnitelnými břitovými destičkami.

- břitový držák 80A06R – S45 SE09-C
- vyměnitelná břitová destička SEMT 09T3AF SN

Technické údaje:

- počet zubů z: 6
- posuv  $f_z$ : 0,12 – 0,35 mm.zub<sup>-1</sup>
- hloubka záběru  $a_p$ : 0,45 – 0,5 mm [29]

### Stopková fréza



Obr. 41 - Stopková fréza [29]

Pro zarovnání čela byla zvolena monolitní stopková fréza R4N N NUPU.

Technické údaje:

- počet zubů z: 4
- průměr D: 20 mm
- délka frézy L: 100 mm
- činná délka frézy  $l_1$ : 40 mm [29]

### Brusný kotouč



Obr. 42 - Brusný kotouč [30]

Pro broušení byl zvolen brusný kotouč T1 250x20x76 TYROLIT, který je vyroben z světle růžového korundu s keramickým pojivem.

- Zrnitost: 60 (střední)
- Broušený materiál: oceli a nerez oceli do 58 HRC [30]

## Použité strojní vybavení

Stroje uvedené ve výrobním postupu byly voleny v mezích dostupných na Ú12134.

### **Pásová pila**



*Obr. 43 - Pásová pila [31]*

Pro řezání polotovarů byla zvolena pásová pila OPTISAW S 181 G

Technické údaje:

- řezná oblast: 180 x 240 mm
- rozměry pilového pásu: 2360 x 20 x 0,9 mm
- rychlost pilového pásu: 45 / 65 / 77 m/min
- příkon: 750 W
- rozměry: 1275 x 1100 x 450 mm [31]

### **Frézka**



*Obr. 44 - Frézka Haas VF-2 [32]*

Pro frézování byla zvolena vertikální frézka Haas VF-2. [32]

Technické údaje:

- výkon: 22,4 kW
- otáčky: 8100 ot. /min
- maximální rychlost posuvu f: 16,5 m/min
- maximální průměr nástroje: 89 mm
- osy: 3

- kapacita nástrojů: 20
- kužel: ISO 40 [32]

### **Bruska**



*Obr. 45 - Rovinná bruska [28]*

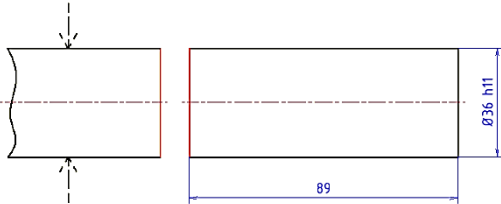
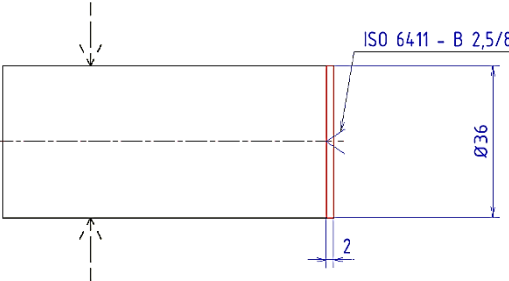
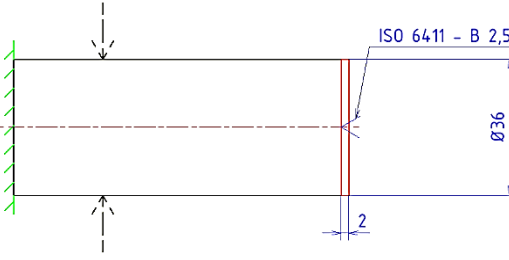
Pro broušení vzorků byla zvolena rovinná bruska BRH 20 CNC s řídicím systémem Mikronex.

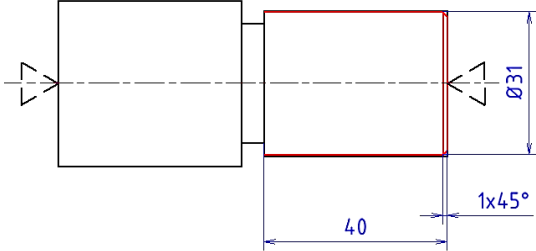
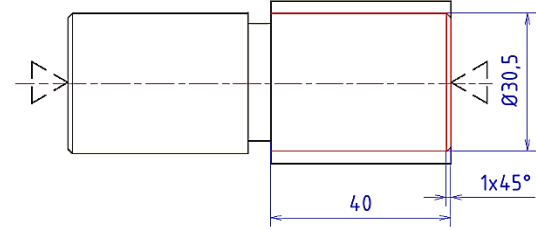
Technické údaje:

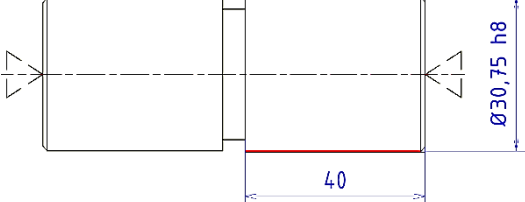
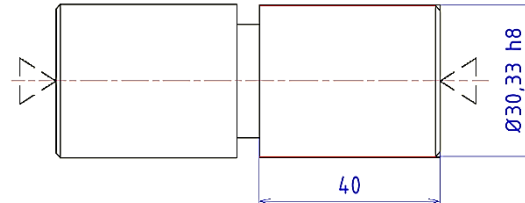
- výkon: 2,2 kW
- brousící kotouč: 250x76x20 mm
- nejmenší inkrement přídavku: 0,0005 mm
- otáčky brousícího vřetena: 2670, 3820 ot. /min [28]

## 11.2 Zkušební vzorek 2

Polotovar a materiál je uveden ve výrobní výkresu součásti viz. příloha 2

Č. op	Pracoviště (stroj)	Náčrt		Nářadí	Řezné podmínky			
		popis práce			$v_c$	$f$	$a_p$	$i$
5	Pásová pila Opti S 181 G	a) Upnout tyč za $\varnothing 36$ mm b) Řezat v délce 89 mm c) Kontrolovat uříznutou délku 		Pilový pás M42 Bi- matal  Posuvné měřítko				
10	Univerzální hrotový soustruh Optiturn D 320x920	a) Upnout tyč za $\varnothing 36$ mm b) Zarovnat čelo o 2 mm c) Navrtat středící důlek ISO 6411-B 2,5/8 		Stranový nůž ubírací pravý ČSN 22 3716  Středící vrták B 2,5				
20	Univerzální hrotový soustruh Optiturn D 320x920	a) Otočit obrobek, upnout za $\varnothing 36$ mm a axiálně zarazit ve vřetenu pomocí dorazu b) Zarovnat čelo o 2 mm c) Navrtat středící důlek ISO 6411-B 2,5/8 		Stranový nůž ubírací pravý ČSN 22 3716  Středící vrták B 2,5				

30	Soustruh S 280 CNC SlovtoS	<p>a) Upnout mezi hroty b) Hrubovat <math>\varnothing 36</math> mm na <math>\varnothing 31,5</math> mm v délce 45 mm c) Soustružit zápich <math>\varnothing 26</math> v délce 5 mm d) Soustružit na čisto <math>\varnothing 31,5</math> mm na <math>\varnothing 31</math> mm v délce 40 mm e) Srazit hranu <math>1 \times 45^\circ</math> f) Kontrola rozměru <math>\varnothing 31</math> mm</p> 	T1 T2 T3  Posuvné měřítko	145 100 160	0,2 0,1 0,1	2,25 1,1 0,5	2 5 1
40	Soustruh S 280 CNC SlovtoS	<p>a) Otočit obrobek a upnout mezi hroty b) Hrubovat <math>\varnothing 36</math> mm na <math>\varnothing 31</math> mm v délce 40 mm c) Soustružit na čisto <math>\varnothing 31</math> mm na <math>\varnothing 30,5</math> mm v délce 40 mm d) Srazit hranu <math>1 \times 45^\circ</math> e) Kontrola rozměru <math>\varnothing 30,5</math> mm</p> 	T1 T2  Posuvné měřítko	145 160	0,2 0,1	2,25 0,5	2 1

50	Bruska BUA 16 CNC	<p>a) Upnout obrobek mezi hroty b) Brousit <math>\varnothing 31</math> mm na <math>\varnothing 30,75</math> h8 mm v délce 40 mm c) Kontrola broušeného rozměru <math>\varnothing 30,75</math> h8 mm</p> 	<p>Kotouč brusný T1 250x20x7 6 Tyrolit</p> <p>Třmenový mikrometr 25–50 mm</p>				9 18
60	Bruska BUA 16 CNC	<p>a) Otočit obrobek a znovu upnout mezi hroty b) Brousit <math>\varnothing 30,5</math> mm na <math>\varnothing 30,33</math> h8 mm v délce 40 mm c) Kontrola broušeného rozměru <math>\varnothing 30,33</math> h8 mm v délce 40 mm</p> 	<p>Kotouč brusný T1 250x20x7 6 Tyrolit</p> <p>Třmenový mikrometr 25–50 mm</p>				8 14

Tabulka 20 - Výrobní postup vzorek 2

### Volba řezných podmínek pro broušení

Řezné podmínky pro obě strany vzorku budou stejné, jen se budou lišit v počtu řezů. Počet řezů bude uveden v tabulace výrobního postupu (první číslo je pro hrubovací cyklus a druhé číslo je pro cyklus na čisto)

### Řezné podmínky

Broušení rozdělím hrubovací a dokončovací cyklus.

Hrubovací cyklus:

- řezná rychlost:  $v_c = 31$  m/s
- unášivá rychlost obrobku:  $v_w = 30$  m/min
- axiální posuv kotouče:  $f_a = 7$  mm/ot.
- hloubka řezu:  $a_e = 0,02$  mm
- dráha náběhu a přeběhu: 3 mm

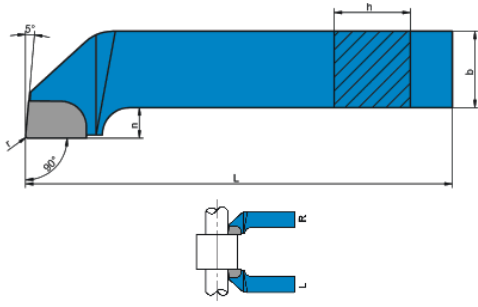
Dokončovací cyklus:

- řezná rychlost:  $v_c = 31$  m/s
- unášivá rychlost obrobku:  $v_w = 30$  m/min
- axiální posuv kotouče:  $f_a = 4$  mm/ot.
- hloubka řezu:  $a_e = 0,004$  mm
- dráha náběhu a přeběhu: 3 mm

### Použité nástroje

#### Stranový nůž ubírací pravý 25x25

Parametr	Hodnota	Jedn.
h	25	mm
b	25	mm
L	140	mm
n	10	mm
r	0,8	mm
Hmotnost	0,7	kg

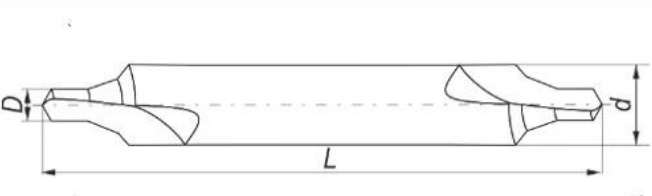


Obr. 46 - Stranový nůž ubírací pravý [33]

- Broušená destička ze slinutého karbidu S20 [33]

#### Středící vrták B 2,5

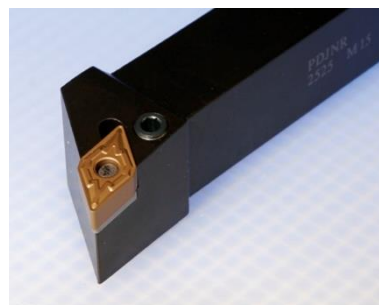
Parametr	Hodnota	Jednotky
D	2,5	mm
d	10	mm
L	56	mm



Obr. 47 - Středící vrták B 2,5 [34]

- Středící vrták vyroben z rychlořezné oceli [34]

#### Hrubovací nůž vnější (T1)



Obr. 48 - Hrubovací nůž vnější [29]



Pro hrubovací operace byl zvolen stranový nůž uběrací levý s vyměnitelnou břitovou destičkou.

- nožový držák PDJNL 2525 M15
- vyměnitelná břitová destička PDJNL 2525 M15

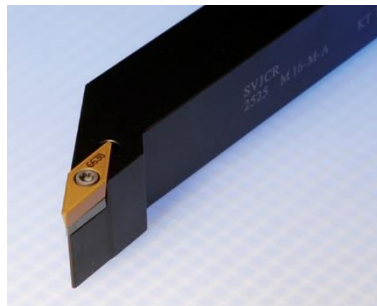
Parametry nástroje:

- poloměr zaoblení špičky –  $r_e = 0,8$  mm
- úhel nastavení hlavního -  $\kappa_r = 93^\circ$
- úhel nastavení vedlejšího ostří -  $\kappa'_r = 32^\circ$

Doporučené rezné podmínky:

- rezná rychlost –  $v_c = 140$  až  $240$  m.min<sup>-1</sup>
- posuv –  $f = 0,1$  až  $0,4$  mm
- šířka záběru –  $a_p = 1$  až  $3,5$  mm [29]

### Dokončovací nůž (T2)



Obr. 49 - Dokončovací nůž [29]

Pro soustružení na čisto byl zvolen stranový nůž ubírací levý s vyměnitelnou břitovou destičkou.

- nožový držák SVJCL 25 25 M16
- vyměnitelná břitová destička VBMT 16 04 08 E

Parametry nástroje:

- poloměr zaoblení špičky –  $r_e = 0,8$  mm
- úhel nastavení hlavního -  $\kappa_r = 93^\circ$
- úhel nastavení vedlejšího ostří -  $\kappa'_r = 35^\circ$

Doporučené rezné podmínky

- rezná rychlost –  $v_c = 150$  až  $220$  m.min<sup>-1</sup>
- posuv –  $f = 0,08$  až  $0,45$  mm
- šířka záběru –  $a_p = 0,2$  až  $4$  mm [29]

### Zapichovací nůž (T3)



Obr. 50 - Zapichovací nůž [29]

Pro soustružení zápichu byl zvolen zapichovací nůž levý.

- nožový držák GFIL 2020 K 04
- vyměnitelná břitová destička VBMT 04 16 02 L6

Parametry nástroje:

- poloměr zaoblení špičky –  $r_e = 0,4$  mm

Doporučené řezné podmínky

- řezná rychlost –  $v_c = 100$  až  $140$  m.min<sup>-1</sup>
- posuv –  $f = 0,05$  až  $0,3$  mm [29]

### Brusný kotouč T1 Tyrolit

Pro broušení vzorku 2 byl zvolen stejný kotouč jako pro vzorku 1.

### Použité strojní vybavení

Stroje uvedené ve výrobním postupu byly voleny v mezích dostupných na Ú12134.

### Pásová pila

Pro řezání polotovarů vzorku 2 byla zvolena stejná pila jako pro řezání polotovarů vzorku 1.

### Univerzální hrotový soustruh



Obr. 51 - Univerzální hrotový soustruh [35]

Pro zarovnání čel a navrtání středících důlků byl vybrán univerzální hrotový soustruh Optiturn D 320 x 920

Technické údaje:

- příkon: 1500 W
- otáčky: 65–1800 ot. /min
- posuv podélný: 0,052 - 1,392 mm/ot.
- posuv příčný: 0,014 – 0,380 mm/ot.
- rozměry: 1685 x 1320 x 750 mm [35]

### CNC soustruh



Obr. 52 - CNC soustruh [36]

Pro soustružení vzorku byl zvolen CNC soustruh S 280 CNC Slovtos.

Technické údaje:

- otáčky: 50–4000 ot. /min
- výkon: 5,5 kW
- opakovaná přesnost polohování: <0,008
- maximální délka obrobku: 500 mm
- rozměry: 1760 x 1700 x 1600 [36]

### Bruska



Obr. 53 - hrotová bruska [37]

Pro dokončovací operaci broušení byla zvolena hrotová bruska BUA 16 CNC, která pro své řízení využívá řídicí systém MIKRONEX.

Technické údaje:

- brusný kotouč: 250 x 76 x 20
- otáčky brousícího vřetena: 2420, 3290 ot/min
- maximální průměr obrobku: 160 mm
- nejmenší inkrement přídavku: 0,0005 mm
- maximální rychlost posuvu stolu: 5000 mm/min
- výkon: 1,1 kW [37]

## Závěr

V úvodu práce jsem se snažil nastínit historii a obecné poznatky technologie broušení, protože je to klíčové z pohledu docílení přesného rozměru, jenž je podstatou nevržených zkušebních vzorků pro metrologickou úlohu. Na začátku teoretické části jsem rozebral teorii broušení, kde například píšou o geometrii břitů, tepelných jevech při broušení nebo také o obrobitelnosti materiálu broušením. Dále jsem uvedl základní metody broušení, z nichž jsou některé využity ve výrobním postupu. Na toto navazuje kapitola o řezných podmínkách, kde uvádím i doporučené řezné podmínky pro vybrané metody broušení. Poté jsem se zaměřil, na brusné nástroje, a to jak na jejich vlastnosti, tak na jejich provedení z hlediska materiálů. Celá teoretická část je zakončena ukázkou dosahovaných parametrů technologie broušení.

Praktická část se zejména zaměřuje na výrobní postup zkušebních vzorků pro metrologickou úlohu. Zprvu jsem popsal metrologickou úlohu, pro kterou budou vzorky sloužit a definoval pojmy (lícovací soustava, komunální měřidla), která se objevují v popsané metrologické úloze. Na toto navazuje návrh geometrie zkušebních vzorků, který je sice velmi jednoduchý, ale pro metrologickou úlohu naučný a není složitý na výrobu. Pro vzorky jsem dle dostupnosti a předurčených kritérií navrhnul dva materiály. Při výrobě vzorků se mimo technologie broušení využívá i soustružení a frézování, které jsem v práci popsal. Hlavním výstupem práce je výrobní postup, který umožňuje výrobu série zkušebních vzorků v reálných podmínkách halových laboratořích

## Bibliografie

- [1] MASLOV, Je. *Teorie broušení kovů*. 1. vydání. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1979.
- [2] MÁDL, Jan a Jaroslav BARCAL. *Základy technologie II*. Vyd. 2. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2007. ISBN 978-80-01-03733-1.
- [3] MÁDL, Jan. *Jakost obráběných povrchů*. Vyd. 1. Ústí nad Labem: Univerzita J.E. Purkyně v Ústí nad Labem, ÚTRŮV, 2003. ISBN isbn80-7044-539-4.
- [4] KAROL, Vasilko. *Analytická teória trieskového obrábania*. 1. Prešov: FVT, 2007. ISBN 978-80-8073-759-7.
- [5] VASILKO, Karol. *Teória a praxe trieskového obrábanie*. První. Prešov: FVT, 2009. ISBN 9788055301523.
- [6] ROWE, W. B. *Principles of modern grinding technology*. 1. Norwich, NY: William Andrew, 2009. ISBN isbn:978-0-81-552018-4.
- [7] KOČMAN, Karel a Jaroslav PROKOP. *Technologie obrábění*. 1. Brno: CERM, 2001. ISBN isbn80-214-1996-2.
- [8] ČEP, Robert a Jana PETRŮ. *Technologie obrábění*. 1. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2013. ISBN 978-80-248-3012-4.
- [9] ŘASA, Jaroslav a Vladimír GABRIEL. *Strojírenská technologie 3*. 2. vyd. Praha: Scientia, 2005. ISBN isbn80-7183-337-1.
- [10] STEPHENSON, Davis A. a Jonh S. AGAPIOU. *Metal cutting theory and practice*. Third edition. Boca Raton: CRC Press/Taylor, 2016. ISBN 1-4665-8753-9.
- [11] KLOCKE, Fritz. *Manufacturing Processes 2*. First. Germany: Laboratory for Machine Tools and Production Engineering of RWTH Aachen University, 2009. ISBN 978-3-540-92258-2.
- [12] MARINESCU, Ioan D. *Tribology of abrasive machining processes*. Norwich, NY: William Andrew Pub., 2004. ISBN 0-8155-1490-5.
- [13] TSCHÄTSCH, Heinz. *Applied machining technology*. Dordrecht: Springer, 2009. ISBN 978-3-642-01006-4.
- [14] *What are Metal Bond Grinding Wheels and What Benefits Do They Offer?* [online]. New Haven, Indiana: Continental Diamond Tool Corporation [cit. 2021-06-24]. Dostupné z: <https://www.cdtusa.net/blog/metal-bond-grinding-wheel-benefits>

- [15] ŠTAJNOCHR, Lubomír. *Broušení nástrojů*. 1. vyd. Praha: Grada, 2000. Profi & hobby. ISBN isbn80-7169-809-1.
- [16] OUTRATA, Jiří. *Technologie ručního zpracování kovů pro 1. ročník kovodělných oborů: pro 1. ročník odborných učilišť a učňovských škol*. 3., nezm. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1981. Řada strojírenské literatury.
- [17] ŘASA, Jaroslav, Jindřich KAFKA a Václav HANĚK. *Strojírenská technologie 4: návrhy nástrojů, přípravků a měřidel : zásady montáže*. 1. vyd. Praha: Scientia, pedagogické nakladatelství, 2003. ISBN isbn80-7183-284-7.
- [18] *Příručka lícování*. 1. Praha: Českomoravská společnost normalizační, 1940.
- [19] HAVLÍK, Jiří a Tadeáš SZLACHTA. *Základy strojírenství I*. 2. vyd. Ostrava: VŠB - Technická univerzita, 2003. ISBN isbn80-248-0477-8.
- [20] NOVÁ, Jana. *Soustava a předepisování tolerancí dle ČSN, EN a ISO, se zaměřením na přesnost rozměrů a geometrie* [online]. České Budějovice, 2013 [cit. 2021-06-11]. Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích.
- [21] MÁDL, Jan. *Technologie obrábění*. Vyd. 2., přeprac. V Praze: Nakladatelství ČVUT, 1999. ISBN isbn978-80-01-03752-2.
- [22] *Kalibrační laboratoř Zindler* [online]. Zlín: Zindler [cit. 2021-06-17]. Dostupné z: <https://www.klz.inshop.cz/>
- [23] BUMBÁLEK, Leoš. *Kontrola a měření: pro SPŠ strojní*. Vyd. 1. Praha: Informatorium, 2009. ISBN isbn978-80-7333-072-9.
- [24] DILLINGER, Josef. *Moderní strojírenství pro školu i praxi*. Vyd. 1. Praha: Europa-Sobotáles, 2007. ISBN isbn978-80-86706-19-1.
- [25] *Třmenový mikrometr: popis, měření* [online]. In: . Chrastava: VybavenáDílna [cit. 2021-06-17]. Dostupné z: <https://vybavenadilna.cz/trmenovy-mikrometr-popis-mereni/>
- [26] *Alloy 15-5* [online]. Blackburn,UK: NeoNickle [cit. 2021-06-24]. Dostupné z: <https://www.neonickel.com/cs/alloys/nerezove-oceli/alloy-15-5/>
- [27] *Alloy 13-8* [online]. Blackburn,UK: NeoNickle [cit. 2021-06-24]. Dostupné z: <https://www.neonickel.com/cs/alloys/nerezove-oceli/alloy-13-8/>
- [28] BRH 20 CNC. *Mikronex* [online]. Praha [cit. 2021-07-18]. Dostupné z: <http://www.mikronex.cz/BRH20CNC.pdf>
- [29] Pramet ecat. *Dormer Pramet* [online]. 2014 [cit. 2021-07-17]. Dostupné z: <http://ecat.pramet.com/default.aspx>

- [30] Kotouč T1 250x20x76. *Prodej brusiva* [online]. Česká Třebová [cit. 2021-07-27]. Dostupné z: <https://www.prodejbrusiva.cz/kotouc-t1-250x20x762-98a60k9v40-34162642-tyrolit>
- [31] Pásová pila na kov OPTIsaw S 181 G. *První hanácká* [online]. Olomouc, 2018 [cit. 2021-07-17]. Dostupné z: <https://www.bow.cz/produkt/3300182/pasova-pila-na-kov-optisaw-s-181-g>
- [32] VF-2. *Haas* [online]. Oxford: Haas [cit. 2021-07-18]. Dostupné z: <https://www.haascnc.com/cs/machines/vertical-mills/vf-series/models/small/vf-2.html>
- [33] Nůž ubírací stranový pravý NNBE ISO 6. *Markagro s.r.o* [online]. Sviadnov [cit. 2021-07-17]. Dostupné z: <https://eshop.markagro.cz/nuz-ubiraci-stranovy-iso6-nnbe-f/1371-nuz-ubiraci-stranovy-pravy-nnbe-iso6-velikost-2525-s20-p20-pro-ocel.html>
- [34] Navrtávák DIN 333-B. *Markagro s.r.o* [online]. Sviadnov [cit. 2021-07-17]. Dostupné z: <https://eshop.markagro.cz/navrtavani-otvoru/5464-navrtavak-din333-bnwr-d-hss-25-mm-fenes.html>
- [35] Soustruh OPTITURN D 320 x 920. *Svářecký-obchod.cz* [online]. Rožnov pod Radhoštěm [cit. 2021-07-17]. Dostupné z: <https://www.svarecky-obchod.cz/kovoobrabeci-stroje/soustruhy/4374-soustruh-optiturn-d-320-x-920.htm>
- [36] Univerzálny CNC hrotový sústruh S280. *Slovtos* [online]. Jasová [cit. 2021-07-17]. Dostupné z: <https://www.slovtos.sk/produkt/13/univerzalny-hrotovy-sustruh-s280>
- [37] BAU 16 CNC - hrotová bruska. *Mikronex* [online]. Praha [cit. 2021-07-17]. Dostupné z: <http://www.mikronex.cz/BUA16CNC.pdf>



## Seznam obrázků

OBR. 1 - SCHÉMA BROUŠENÍ VNĚJŠÍCH VÁLCOVÝCH PLOCH POSUVEM PODÉL OSY OBROBKU [1].....	2
OBR. 2 - PROFIL OSTRÉHO ZRNA BRUSIVA V 500NÁSOBNÉM ZVĚTŠENÍ [1].....	4
OBR. 3 - SCHÉMA ZRN BRUSIVA PŘI JEHO ČINNOSTI [1].....	4
OBR. 4 - ROZKLAD ŘEZNÝCH SIL PŘI BROUŠENÍ [4] .....	6
OBR. 5 - POROVNÁNÍ MĚRNÝCH ŘEZNÝCH SIL PŘI RŮZNÝCH ZPŮSOBECH OBRÁBĚNÍ [5] ..	6
OBR. 6 – TEPELNÉ TOKY PROUDÍCÍ DO OBROBKU, TŘÍSKY, ZRNA A ŘEZNÉ KAPALINY [6] ..	8
OBR. 7 - AXIÁLNÍ OBVODOVÉ BROUŠENÍ VNĚJŠÍCH PLOCH S PODÉLNÝM POSUVEM [8]..	10
OBR. 8 - RADIÁLNÍ OBVODOVÉ BROUŠENÍ VNĚJŠÍCH PLOCH [2] .....	11
OBR. 9 - ZPŮSOBY RADIÁLNÍHO BROUŠENÍ VNĚJŠÍCH PLOCH [8].....	11
OBR. 10 - BEZHROTÉ BROUŠENÍ VNĚJŠÍCH PLOCH [8].....	12
OBR. 11 - NATOČENÍ PODÁVACÍHO KOTOUČE O ÚHEL [2] .....	12
OBR. 12 - BEZHROTÉ ZAPICHOVACÍ BROUŠENÍ VÁLCOVÝCH PLOCH [8].....	12
OBR. 13 - AXIÁLNÍ BROUŠENÍ VNITŘNÍCH VÁLCOVÝCH PLOCH [8] .....	13
OBR. 14 - BEZHROTÉ OBVODOVÉ BROUŠENÍ VNITŘNÍCH PLOCH [8] .....	14
OBR. 15 - OBVODOVÉ ROVINNÉ BROUŠENÍ (POSUVNÝ POHYB OBROBKU) [8].....	14
OBR. 16 - OBVODOVÉ ROVINNÉ BROUŠENÍ (ROTAČNÍ POHYB OBROBKU) [8] .....	15
OBR. 17 – ČELNÍ BROUŠENÍ (OTÁČIVÝ POHYB OBROBKU) [8].....	15
OBR. 18 - ČELNÍ BROUŠENÍ (PŘÍMOČARÝ POHYB OBROBKU) [8].....	15
OBR. 19 - OZNAČOVÁNÍ TVARŮ A ROZMĚRŮ BRUSNÝCH KOTOUČŮ [7].....	19
OBR. 20 - VOLBA BRUSNÉHO KOTOUČE Z POHLEDU TVRDOSTI [8].....	25
OBR. 21 - STRUKTURA BRUSNÉHO KOTOUČE [8] .....	26
OBR. 22 - PŘÍKLAD PEDAGOGICKÉHO HLEDISKA [16] .....	27
OBR. 23 – ZKUŠEBNÍ VZOREK 1 .....	27
OBR. 24 – ZKUŠEBNÍ VZOREK 2 .....	28
OBR. 25 - LÍCOVÁNÍ DĚR A HŘÍDELÍ (ZÁKLADNÍ POJMY) [17] .....	28
OBR. 26 - ZÁKLADNÍ DRUHY ULOŽENÍ [17] .....	29
OBR. 27 - POLOHY TOLERANČNÍCH POLÍ HŘÍDELŮ A DĚR [19] .....	30
OBR. 28 - DIGITÁLNÍ POSUVNÉ MĚŘÍTKO MAHR [22].....	31
OBR. 29 - DIGITÁLNÍ TŘMENOVÝ MIKROMETR MAHR [22] .....	31
OBR. 30 - ČÍSELNÍKOVÝ ÚCHYLKOMĚR MAHR [22].....	32
OBR. 31 - KONSTRUKCE TŘMENOVÉHO MIKROMETRU [24].....	32
OBR. 32 - PŘEHLED ZÁKLADNÍCH OPERACÍCH PŘI SOUSTRUŽENÍ [7] .....	34
OBR. 33 - VEKTORY POHYBU PŘI SOUSTRUŽENÍ [7].....	35
OBR. 34 - FRÉZOVÁNÍ OBVODEM VÁLCOVÉ FRÉZY [7] .....	36
OBR. 35 - FRÉZOVÁNÍ ČELEM ČELNÍ FRÉZY [7] .....	36
OBR. 36 - KINEMATIKA VÁLCOVÉHO FRÉZOVÁNÍ [7].....	36
OBR. 37 - CHEMICKÉ SLOŽENÍ 15-5 PH H1075 [26].....	38
OBR. 38 - CHEMICKÉ SLOŽENÍ 13-8 PH H1000 [27].....	38
OBR. 39 - UKÁZKA CYKLU [28].....	41
OBR. 40 - ROVINNÁ FRÉZA [29] .....	42
OBR. 41 - STOPKOVÁ FRÉZA [29] .....	43
OBR. 42 - BRUSNÝ KOTOUČ [30].....	43
OBR. 43 - PÁSOVÁ PILA [31] .....	44
OBR. 44 - FRÉZKA HAAS VF-2 [32].....	44
OBR. 45 - ROVINNÁ BRUSKA [28].....	45
OBR. 46 - STRANOVÝ NŮŽ UBÍRACÍ PRAVÝ [33].....	49
OBR. 47 - STŘEDÍCÍ VRTÁK B 2,5 [34].....	49
OBR. 48 - HRUBOVACÍ NŮŽ VNĚJŠÍ [29] .....	49
OBR. 49 - DOKONČOVACÍ NŮŽ [29] .....	50

OBR. 50 - ZAPICHOVACÍ NŮŽ [29] .....	51
OBR. 51 - UNIVERZÁLNÍ HROTOVÝ SOUSTRUH [35] .....	51
OBR. 52 - CNC SOUSTRUH [36] .....	52
OBR. 53 - HROTOVÁ BRUSKA [37] .....	52

## Seznam tabulek

TABULKA 1 - SROVNÁNÍ TECHNOLOGIE S DEFINOVANÝM OSTŘÍM A BROUŠENÍM [3].....	3
TABULKA 2 - ŘEZNÉ PODMÍNKY PŘI OBVODOVÉ BROUŠENÍ VNĚJŠÍCH PLOCH [7] .....	17
TABULKA 3 - ŘEZNÉ PODMÍNKY PŘI BEZHROTÉ BROUŠENÍ – PRŮBĚŽNÝ ZPŮSOB [7] .....	17
TABULKA 4 - ŘEZNÉ PODMÍNKY PŘI BEZHROTÉ BROUŠENÍ – ZAPICHOVACÍ ZPŮSOB [7]	17
TABULKA 5 - ŘEZNÉ PODMÍNKY PŘI VNITŘNÍM BROUŠENÍ [7] .....	17
TABULKA 6 - ŘEZNÉ PODMÍNKY PŘI ROVINNÉM BROUŠENÍ [7].....	18
TABULKA 7 - TVRDOST SYNTETICKÝCH BRUSNÝCH MATERIÁLŮ [13].....	21
TABULKA 8 - MECHANICKÉ VLASTNOSTI (TVRDOST) HLAVNÍCH TYPŮ POJIV [12].....	22
TABULKA 9 - ZNAČENÍ ZRNITOSTI DLE FEPA [15] .....	24
TABULKA 10 - ZNAČENÍ TVRDOSTI BRUSNÝCH KOTOUČŮ [15] .....	25
TABULKA 11 - OZNAČENÍ STRUKTURY BRUSNÉHO NÁSTROJE [15] .....	25
TABULKA 12 - PŘESNOST A JAKOST PLOCH OBROBENÝCH BROUŠENÍM [9] .....	26
TABULKA 13 - OBLAST POUŽITÍ JEDNOTLIVÝCH TOLERANCÍ SOUSTAVY ISO [20] .....	30
TABULKA 14 - POROVNÁNÍ MIKROMETRŮ [22].....	33
TABULKA 15 - DOSAHOVANÉ PARAMETRY PŘI SOUSTRUŽENÍ [9].....	35
TABULKA 16 - DOSAHOVANÉ PARAMETRY PŘI FRÉZOVÁNÍ [9].....	37
TABULKA 17 - ZÁKLADNÍ MECHANICKÉ VLASTNOSTI 15-5 PH [26].....	38
TABULKA 18 - ZÁKLADNÍ MECHANICKÉ VLASTNOSTI [27].....	39
TABULKA 19 - VÝROBNÍ POSTUP VZOREK 1 .....	41
TABULKA 20 - VÝROBNÍ POSTUP VZOREK 2 .....	48

## **Seznam příloh**

- Příloha 1                      Výrobní výkres zkušebního vzorku 1  
Příloha 2                      Výrobní výkres zkušebního vzorku 2

## Příloha 1

