

**ČESKÉ VYSOKÉ  
UČENÍ TECHNICKÉ  
V PRAZE**

**FAKULTA  
STROJNÍ**



**BAKALÁŘSKÁ  
PRÁCE**

**2023**

**EDUARD  
BALLOŠ**



**České vysoké učení technické v Praze**

**Fakulta strojní**

**Ústav technologie obrábění, projektování  
a metrologie**

**Progresivní způsoby broušení**

**Bakalářská práce**

**Autor:** Eduard Balloš

**Vedoucí práce:** Ing. Vítězslav Rázek, CSc.

**Studijní program:** B 2342 Teoretický základ strojního inženýrství

**Studijní obor:** 2301R000 Studijní program je bezoborový

**Praha 2023**

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Balloš** Jméno: **Eduard** Osobní číslo: **501342**  
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:

**Progresivní způsoby broušení**

Název bakalářské práce anglicky:

**Progressive grinding methods**

Pokyny pro vypracování:

1. Rozbor zadané problematiky.
2. Nástroje a řezné podmínky.
3. Parametry řezného procesu a dosahovaná kvalita povrchů.
4. Zhodnocení a návrh výrobních aplikací.

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:


**Ing. Vítězslav Rázek, CSc. ústav technologie obrábění, projektování a metrologie FS**


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


Datum zadání bakalářské práce: **31.03.2023**

Termín odevzdání bakalářské práce: **31.07.2023**

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

  
Ing. Vítězslav Rázek, CSc.  
podpis vedoucí(ho) práce

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

  
doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.  
podpis děkana(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.

27.4.2023

Datum převzetí zadání



Podpis studenta

## Prohlášení

Tímto prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně pod vedením Ing. Vítězslava Rázka, CSc., a to pouze pomocí podkladů uvedených v seznamu použité literatury v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací, vydaným ČVUT v Praze 1. 7. 2009.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č.121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne: .....

.....

Podpis autora

## **Poděkování**

Rád bych poděkoval vedoucímu své práce Ing. Vítězslavu Rázkovi, CSc. za vedení a rady při tvorbě bakalářské práce. Velké poděkování patří firmě PRECIZ, s.r.o., za umožnění zpracování tématu bakalářské práce v jejich prostorách. Chtěl bych poděkovat vedoucímu výroby Ing. Martinu Tomašíkovi za konzultace a směřování mé bakalářské práce k žádaným výsledkům. Poděkování patří také všem, kteří mi při práci pomáhali a předávali cenné znalosti týkající se dané problematiky.

## Anotace

Práce pojednává o metodě obrábění materiálu broušením. V první teoretické části je zpracovaná obecná teorie k této metodě. Jsou zde zmíněny jednotlivé druhy brusek a druhy broušení. Dále jsou rozebrány brousící materiály, k nimž se váží tvary a druhy brousících kotoučů. Pro ucelení teoretické části jsou zmíněny základní vzorce parametrů řezného procesu.

Praktická část je zaměřena na proces broušení ve firmě PRECIZ, s.r.o. Stručně je rozebrána konstrukce vertikální brusky a výrobní postup aplikovaný při výrobě zakázek ve firmě. Dále už se práce orientuje na měření výkonnosti broušení nových strojů MSB Schmittwerke. Výstupem práce jsou nejvhodnější brousící parametry zvolené na základě ukazatele efektivity broušení G faktoru. Progresivita brousícího procesu je zachycena ve vývoji broušení ve firmě PRECIZ, s.r.o. s ohledem na ekonomiku výroby.

<b>Název diplomové práce:</b>	Progresivní způsoby broušení
<b>Autor práce:</b>	Eduard Balloš
<b>Vedoucí práce:</b>	Ing. Vítězslav Rázek, CSc.
<b>Konzultant:</b>	Ing. Martin Tomašík
<b>Akademický rok:</b>	2022/2023
<b>Vysoká škola:</b>	ČVUT v Praze, Fakulta strojní
<b>Ústav:</b>	12134 – Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie
<b>Vedoucí ústavu:</b>	Ing. Libor Beránek, Ph.D.
<b>Rozsah práce:</b>	69 stránek, 4 tabulky, 53 obrázků
<b>Klíčová slova:</b>	Broušení, posuv, přísuv, otáčky, brousící nástroj, G faktor

## Annotation

The thesis deals with the method of material machining by grinding. In the first theoretical part the general theory of this method is elaborated. The different types of grinding machines and types of grinding are mentioned. Then the grinding materials to which the shapes and types of grinding wheels are related are discussed. To complete the theoretical part, the basic equations of the cutting process parameters are mentioned.

The practical part focuses on the grinding process in the company PRECIZ, s.r.o. The construction of the vertical grinding machine and the production process applied in the production of orders in the company are briefly discussed. Then the work focuses on the measurement of grinding performance of the new MSB Schmittwerke machines. The output of the thesis are the most suitable grinding parameters selected based on the grinding efficiency index G factor. The progressivity of the grinding process is shown in the development of the grinding at PRECIZ, s.r.o. with respect to the economics of production.

<b>Title of the final thesis:</b>	Progressive grinding methods
<b>Author:</b>	Eduard Balloš
<b>Supervisor:</b>	Ing. Vítězslav Rázek, CSc.
<b>Consultant:</b>	Ing. Martin Tomašík
<b>Academic year:</b>	2022/2023
<b>University:</b>	CTU in Prague, Faculty of Mechanical Engineering
<b>Department:</b>	12134 – Department of machining technology, designing and metrology
<b>Head of department:</b>	Ing. Libor Beránek, Ph.D.
<b>Extent:</b>	69 pages, 4 tables, 53 pictures
<b>Keywords:</b>	Grinding, feed, infeed, revolutions, grinding tool, G factor

# Obsah

1. Úvod.....	10
2. Proces broušení.....	10
3. Druhy brusek.....	13
3.1. Hrotové brusky .....	13
3.2. Bezhraté.....	14
3.3. Brusky na díry .....	14
3.4. Rovinné brusky .....	15
3.5. Další druhy brusek.....	16
4. Druhy broušení .....	16
4.1. Broušení vnějších válcových ploch.....	17
4.2. Broušení vnitřních válcových ploch.....	19
4.3. Broušení rovinných ploch .....	20
5. Brousící nástroje .....	22
6. Obecné podmínky pro volbu brousícího nástroje .....	32
7. Řezné kapaliny .....	33
8. Parametry řezného procesu.....	33
9. Dynamika procesu broušení .....	34
10. Kinematika procesu broušení.....	35
11. Praktická část.....	37
11.1. Charakteristika výrobního procesu .....	38
11.2. Proces měření.....	44
11.3. Výsledky.....	51
11.4. Progres v broušení.....	60
12. Závěr .....	65
13. Seznam tabulek .....	66
14. Seznam obrázků .....	66
15. Použitá literatura .....	67



## Seznam použité symboliky

symbol	[jednotka]	vysvětlení
$F_c$	[N]	řezná síla
$F_p$	[N]	pasivní síla
$F_f$	[N]	posuvová síla
$v_c$	[m/s]	řezná rychlost
$v_f$	[m/min]	posuvová rychlost
$v_w$	[m/s]	obvodová rychlost obrobku
$d_s$	[mm]	průměr broušícího kotouče
$d_w$	[mm]	průměr obrobku
$n_s$	[ot/min]	otáčky broušícího kotouče
$n_w$	[ot/min]	otáčky obrobku
$h_{eq}$	[mm]	ekvivalentní tloušťka třísky
$a_e$	[mm]	hloubka řezu
$Ra$	[ $\mu$ m]	průměrná aritmetická úchylka povrchu
$f$	[m/min]	posuv
$m$	[kg]	hmotnost
$H_{br}$	[MPa]	mikrotvrdost brusiva
$H_{ob}$	[MPa]	mikrotvrdost obráběného materiálu
$k_H$	[-]	poměr mikrotvrdostí

## 1. Úvod

Broušení je jedním z nejstarších způsobů obrábění materiálu. Je těžké doložit, kam až sahají jeho prvopočátky, ale technologie je známá již od dálné minulosti, kdy člověk používal nejrůznější přírodní brusiva (křemen, pískovec) k ostření předmětů jako bylo kopí, sekera či nůž. Z tohoto pohledu by se dalo říct, že technologie byla využívána již od pravěku. Dlouhou dobu trvalo, než se technologie posunula někam dál. Jako mezikrok posloužilo postupné osvojování metody tavení kovů a jejich následné formování do požadovaných tvarů. Zjištěním, že pomocí broušení lze vyrobit ostří znamenalo revoluci v pracovních nástrojích člověka. K opravdovému rozvoji však došlo až v druhé polovině 19. století, tedy v období průmyslové revoluce, kdy docházelo k mnoha technologickým inovacím a přechodu od ruční výroby ke strojové. Tehdy strojírenství stanulo před úkolem rychle a hospodárně vyrábět velké množství přesných součástí. To znamenalo rozvoj obráběcího procesu broušení. Vše se více urychlilo v roce 1859 kdy byl zhotoven první umělý brousicí kotouč a o rok později první univerzální bruska. [1]

Neustálé zlepšování brousicích materiálů a brusek vedlo k tomu, že se z broušení stala velmi produktivní, a hlavně velmi přesná metoda obrábění různých materiálů od dřevěných, přes kovové až po keramické či umělohmotné.

Odhady ukazují, jak je rozšířená tato metoda v průmyslu. Co se týče všeobecného strojírenství, podíl brusek je přibližně 10 až 12 % ze všech obráběcích strojů. V závodech s hromadnou výrobou toto číslo stoupne na 25 % a v automobilovém průmyslu a průmyslu ložisek se dostáváme až k číslu 60 %. Takový podíl jen dokazuje, nepostradatelný přínos broušení v dnešní průmyslové výrobě. [1] [2]

## 2. Proces broušení

Broušení je přesný způsob obrábění, kdy velmi jemnými zrny brusiva stmelеныmi pojivem v nástroj, dochází k odebírání povrchových vrstev materiálu. Proces je občas označován jako vysokorychlostní mikrořezání (odírání). To z toho důvodu, že jsou odebírány velmi malé třísky vysokou řeznou rychlostí. Řezná rychlost se nejčastěji pohybuje od 10 do 80 m/s, ve speciálních případech může dosahovat až 100 m/s. [1] [3]

Broušení patří mezi abrazivní metodu obrábění. „Abrazivní metody obrábění jsou charakterizovány použitím nástrojů s nedefinovanou geometrií břitu a představují nejvíce využívané aplikace při obrábění strojírenských součástí, u kterých jsou kladeny vysoké požadavky na přesnost tvaru a rozměrů a drsnost povrchu obrobených ploch.“ [2]

Broušení se používá k opracování materiálu, kostření nástrojů nebo k dělení materiálu. Při opracovávání jde především o odstranění povrchových vad či nerovností s cílem dosáhnout požadované drsnosti povrchu, přesnosti rozměru a rovinnosti. Metoda umožňuje obrábění velmi tvrdých materiálů. [3]

Zdroj [2] na Obr. 1 ukazuje parametry ploch, dosahované abrazivními metodami obrábění včetně broušení.

Obráběné plochy	Metoda obrábění		Přesnost rozměrů IT		Drsnost povrchu Ra [ $\mu\text{m}$ ]	
			střední	rozsah	střední	rozsah
vnější rotační	Broušení	hrubovací	10	9 + 11	2,40	0,80 + 3,20
		dokončovací	5	5 + 6	0,40	0,20 + 0,60
		jemné	4	3 + 5	0,20	0,05 + 0,40
	Lapování	dokončovací	4	3 + 4	0,10	0,05 + 0,20
		jemné	2	1 + 2	0,03	0,012+0,050
	Superfinašování	dokončovací	4	3 + 5	0,20	0,05 + 0,40
	jemné	3	2 + 4	0,06	0,025+0,100	
vnitřní rotační	Broušení	hrubovací	10	9 + 11	2,40	1,60 + 3,20
		dokončovací	6	5 + 7	0,80	0,40 + 1,60
		jemné	5	3 + 6	0,20	0,05 + 0,40
	Honování	hrubovací	7	6 + 8	0,40	0,20 + 0,80
		dokončovací	6	5 + 7	0,15	0,10 + 0,20
		jemné	4	3 + 5	0,07	0,05 + 0,10
	Lapování	dokončovací	4	3 + 5	0,20	0,01 + 0,40
		jemné	2	1 + 3	0,03	0,012+0,050
rovinné	Broušení	hrubovací	10	9 + 11	2,40	1,60 + 3,20
		dokončovací	6	5 + 7	0,80	0,40 + 1,60
		jemné	5	3 + 6	0,20	0,05 + 0,40
	Lapování	dokončovací	4	3 + 5	0,20	0,10 + 0,40
		jemné	2	1 + 3	0,03	0,012+0,050

Obr. 1 - Dosahované parametry obrobených ploch pro abrazivní metody obrábění [2]

Tím, že je při broušení z povrchu materiálu odebíráno velké množství drobných třísek, při malých řezných silách, je dosahováno velmi dobrých vlastností součásti, protože do ní není vnášeno dodatečné pnutí, jako například v případě soustružení či frézování. [1]

Z těchto důvodů je metoda považována především za dokončovací, ale v řadě případů ji lze hospodárně využít i pro hrubovací operace.

Přesto, že je metoda v dnešní době dobře zvládnutá i rozšířená, existuje spousta proměnných faktorů, které proces broušení ovlivňují a tvoří ho značně složitým. Mezi hlavní faktory můžeme zařadit druh obráběného materiálu, druh brusiva, druh pojiva, tvrdost, strukturu kotouče, řeznou kapalinu, přesnost či tuhost brusky. Velmi problematickým faktorem je také proměnlivost vlastností brousícího kotouče. Proces broušení proto vyžaduje pečlivou přípravu, plánování a provedení. [1]

Závislost různých parametrů shrnul ve své publikaci Teorie broušení kovů Jevgenij Nikiforovič Maslov následovně.

„Na broušení má vliv mnoho faktorů. V obecném případě, když označíme zkoumanou veličinu písmenem  $A$  ( $T$  – trvanlivost kotouče,  $F_z$  – řezná síla,  $Ra$  – drsnost povrchu broušené plochy,  $\theta_{ok}$  – okamžitá teplota broušení), dostaneme:

$$A = f(C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, l, d, D, H, n_k, n_{ob}, h, s, C_6, C_7, C_8) \quad (2.1)$$

kde  $C_1$  až  $C_8$  jsou součinitele charakterizující postupně obráběný materiál, druh brusiva, pojivo, tvrdost, strukturu kotouče, řeznou kapalinu, přesnost a tuhost brusky, kvalitu brousícího kotouče.

Stanovit závislost parametru  $A$  na jednotlivých součinitelích experimentální metodou je velmi složité v důsledku proměnlivosti vlastností brousícího kotouče. Zrna brusiva mají tvar nepravidelných mnohostěnů se zaoblenými vrcholy. I když je, co do absolutní velikosti, toto zaoblení nevelké, je třeba k němu vždy přihlížet, protože tloušťky třísek ubíraných jednotlivými zrny při mikrořezání jsou srovnatelné s velikostí poloměru zaoblení zrna  $\rho_z$  ( $\mu\text{m}$ ).

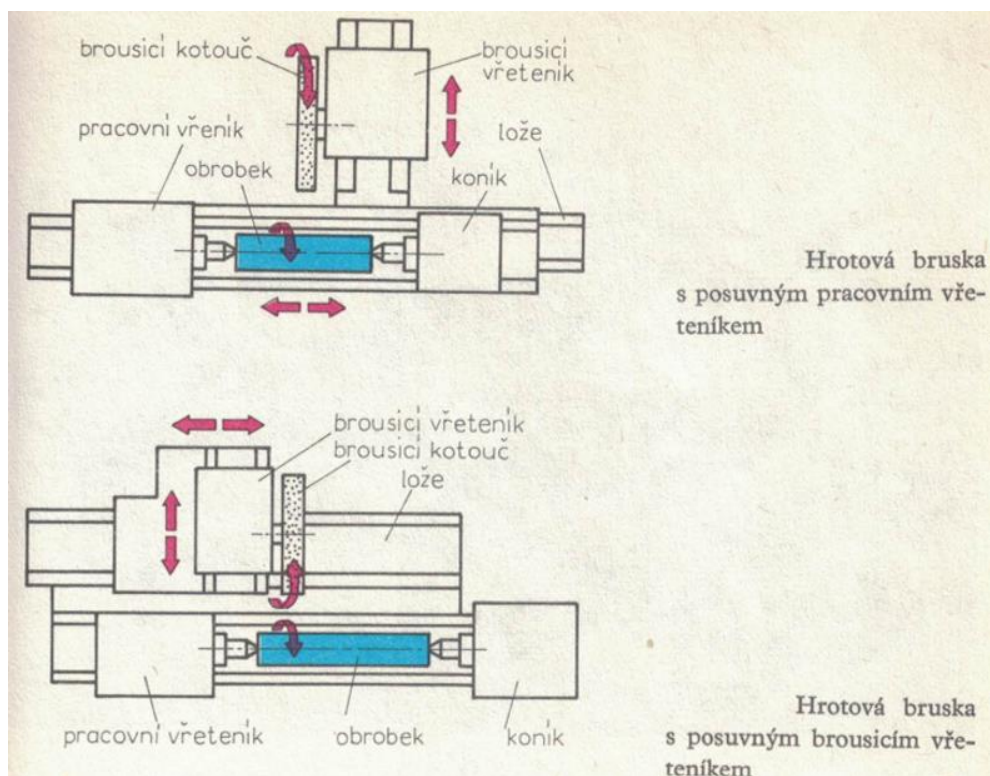
Budeme-li vycházet z tohoto geometrického tvaru zrna, určíme základní vztahy pro mikrořezání při práci s jakýmkoli brousícím nástrojem. Zaoblením vrcholů zrn na nich vznikají záporné úhly čela, které zvyšují dynamickou pevnost zrn a jejich odolnost proti silám, které na ně působí.“ [1]

### 3. Druhy brusek

1. Hrotové brusky
2. Bezhraté brusky
3. Brusky na díry
4. Rovinné brusky
  - 4.1. Vodorovné rovinné brusky
  - 4.2. Svislé rovinné brusky
5. Další druhy brusek
  - 5.1. Univerzální brusky
  - 5.2. Speciální brusky
  - 5.3. Pásové brusky

#### 3.1. Hrotové brusky

Jejich primární použití je k broušení rotačních válcových obrobků upnutých mezi hroty. Díky možnosti natočení pracovního stolu a pracovního vřeteníku lze brousit i rotační kuželové plochy. Dále hrotové brusky umožňují broušení čelních rovinných ploch a za využití dalších přídatných zařízení taky vnitřní válcové a kuželové plochy. [3] [4]



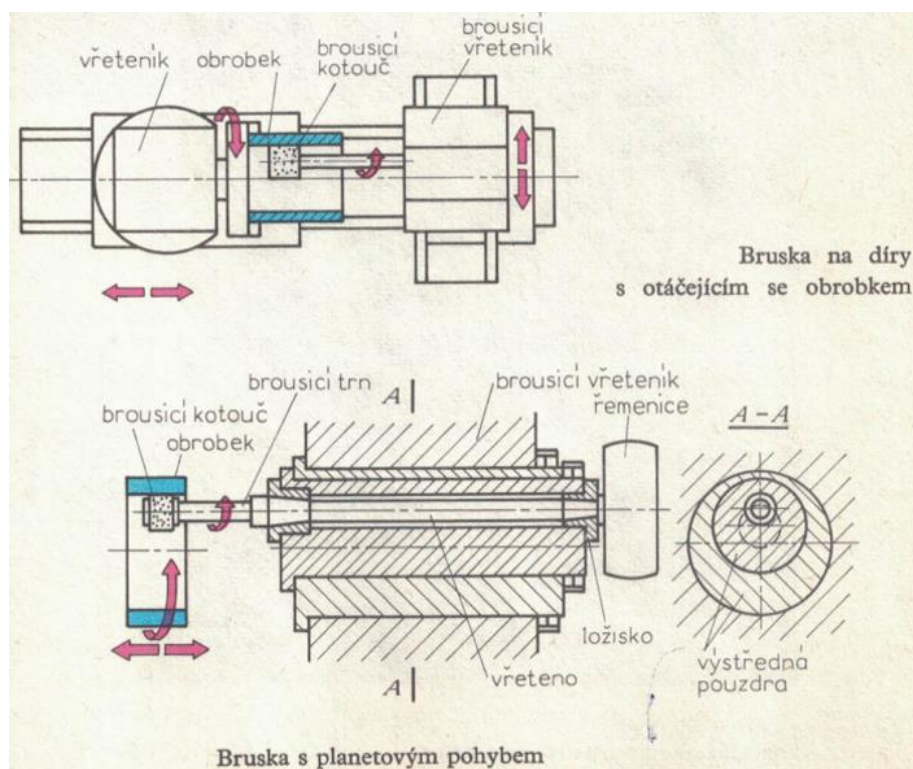
Obr. 2 - Hrotové brusky [3]

## 3.2. Bezhraté

Tyto brusky se skládají ze dvou samostatných vřeteníků, každý s vlastním elektromotorem. Broušící vřeteník s broušícím kotoučem má zpravidla konstantní otáčky. Naopak vřeteník podávacího kotouče může mít otáčky proměnné. Vřeteník podávacího kotouče se dá posouvat po vedení lože, čímž se nastavuje vzdálenost obou kotoučů na daný průměr obrobku. Vřeteníky mají stejný smysl otáčení. Obrobek se otáčí v opačném smyslu než broušící kotouč. Obrobek je vložen mezi broušící a podávací kotouč. Současně se opírá o vodící lištu. Vychýlením osy podávacího kotouče lze dosáhnout posuvu obrobku, viz Obr. 8. [3] [4]

## 3.3. Brusky na díry

Brusky na díry se dělí na brusky s otáčejícím se obrobkem a brusky s planetovým pohybem broušícího kotouče. Brusky první skupiny jsou vhodné pro broušení děr souosých s vnějším rotačním povrchem. Podle rozměrů se pak rozlišuje, zda-li koná pracovní posuv obrobek nebo vřeteník. U větších obrobků to je broušící vřeteník, u menších obrobek. Brusky s planetovým pohybem broušícího kotouče slouží k broušení děr v rozměrných nerotačních součástech, které se upínají na pevný pracovní stůl. Broušící vřeteník vykonává všechny nutné pohyby. Otáčí se kolem vlastní osy, obíhá na určitém průměru a zajišťuje axiální posuv. [3]



Obr. 3 - Brusky na díry [3]

### 3.4. Rovinné brusky

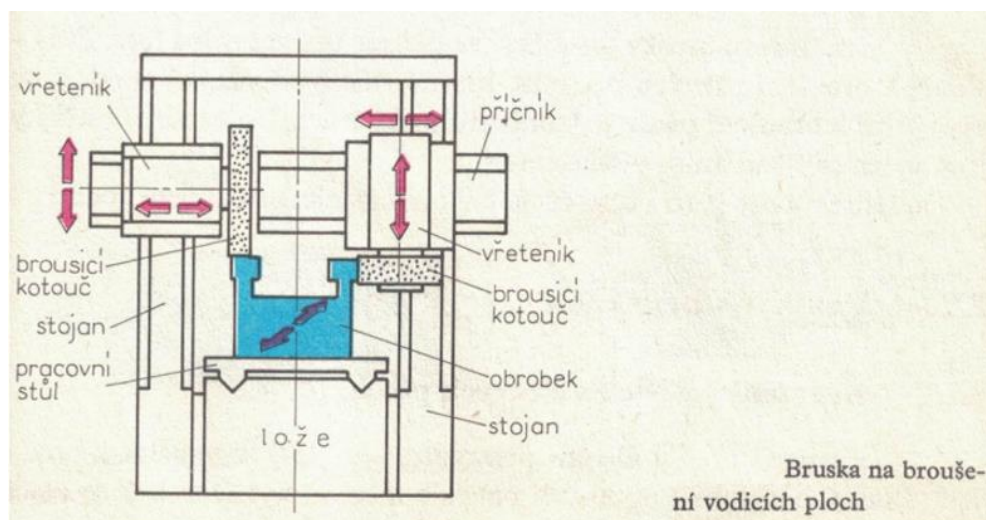
Rovinné brusky se rozdělují podle způsobu práce, tedy podle toho, pracují-li obvodem nebo čelem kotouče. Dále podle polohy osy vřetena na svislé a vodorovné. [3]

#### Vodorovné rovinné brusky

Vyznačují se vodorovnou osou vřetene a patří mezi nejrozšířenější druhy brusek. Nejčastěji disponují elektromagnetickou upínací deskou umístěnou na pracovním stole pro upevnění obrobku. Dle konstrukce vykonává stůl přímočarý vratný nebo otáčivý pohyb. Na vedení stojanu jsou příčné saně umožňující pohyb broušícího vřeteníku. Metoda není příliš produktivní, ale dosahuje vysoké přesnosti broušených ploch. [2] [4]

#### Svislé rovinné brusky

Osa vřetene je svislá a bruska pracuje čelem kotouče. (Existují i případy, kdy bruska pracuje obvodem jako na Obr. 4.) Upnutí obrobku je nejčastěji realizováno elektromagnetickou deskou na pracovním stole, který koná pouze přímočarý vratný pohyb. Další technologickou variantou provedení svislé rovinné brusky zobrazuje Obr. 37. Zde přímočarý vratný pohyb vykonává broušící vřeteník a stůl pohyb nekoná. Z toho důvodu musí být průměr kotouče větší než šířka obrobku. Broušící vřeteník je svisle posuvný po stojanu. Používá se speciálních tvarů broušících kotoučů ať už prstencovitých, hrncovitých nebo segmentových. Tento druh broušení disponuje vysokým výkonem broušení, avšak na úkor přesnosti a drsnosti povrchu. [2] [4]



Obr. 4 - Příklad rovinné brusky [3]

## 3.5. Další druhy brusek

### Univerzální brusky

Disponují vysokou variabilitou nastavitelnosti. Je na nich možné brousit různé nástroje a nestandardní tvary. Používají se například k broušení fréz nebo výstružníků. [3]

### Speciální brusky

Skupina speciálních brusek přísluší k jednoúčelově zaměřeným strojům. Jsou navrženy přímo tak, aby co nejlépe vyhovovali k broušení jednoho druhu nástrojů. Můžeme sem zařadit brusky pro broušení klikových hřídelí, závitů, ozubení nebo brusky k ostření. [3] [4]

### Pásové brusky

Konstrukcí výrazně odlišná skupina brusek. Na dvou rovnoběžných válkách obíhá napnutý broušící pás. Ten podobně jako broušící kotouč, při kontaktu s obrobkem, ubírá materiál. Provedení pásových brusek se dle použití výrazně liší. [5]

## 4. Druhy broušení

Broušení je poměrně rozmanitá metoda nabízející hned několik technologických variant. Možnosti vycházejí z konstrukce stroje, jak naznačeno výše, z geometrie obrobku a požadavků na výsledek obrábění. Základní rozdělení vychází většinou z geometrie obrobku. V případě, kdy je obrobek plochý, označuje se proces jako rovinné broušení. Je-li obrobek rotační, nejčastěji válcový, proces označujeme jako broušení válcových ploch. Toto rozdělení se dá dále konkretizovat a dělení může být následující. [3]

### 1. Broušení válcových ploch

#### 1.1. Broušení vnějších válcových ploch

##### 1.1.1. Broušení s podélným posuvem

##### 1.1.2. Broušení hloubkové

##### 1.1.3. Broušení zapichovací

##### 1.1.4. Broušení bezhroté

#### 1.2. Broušení vnitřních válcových ploch

##### 1.2.1. Vnitřní broušení s podélným posuvem

##### 1.2.2. Planetové broušení

### 2. Broušení rovinných ploch

#### 2.1. Broušení obvodem kotouče

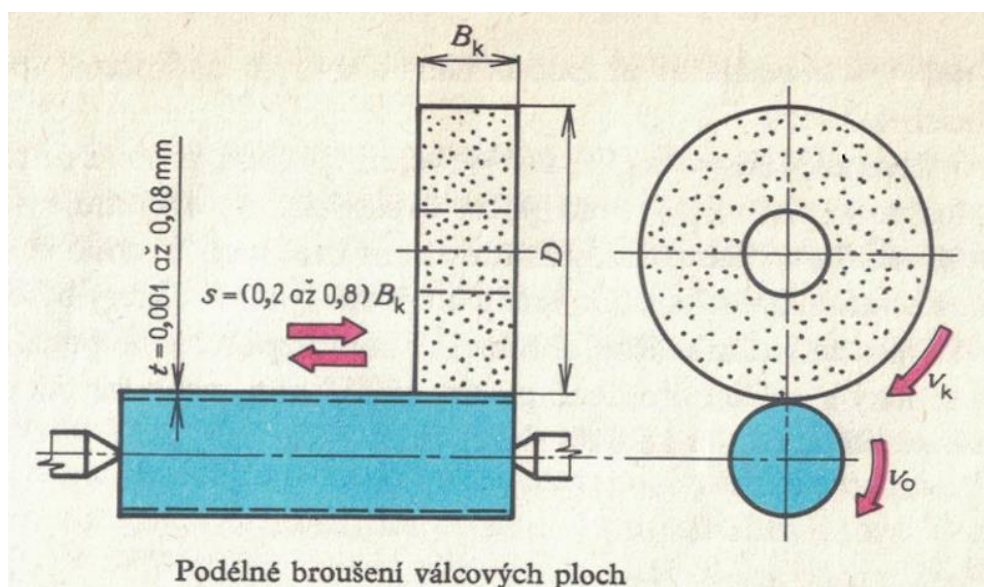
#### 2.2. Broušení čelem kotouče



## 4.1. Broušení vnějších válcových ploch

### Broušení s podélným posuvem

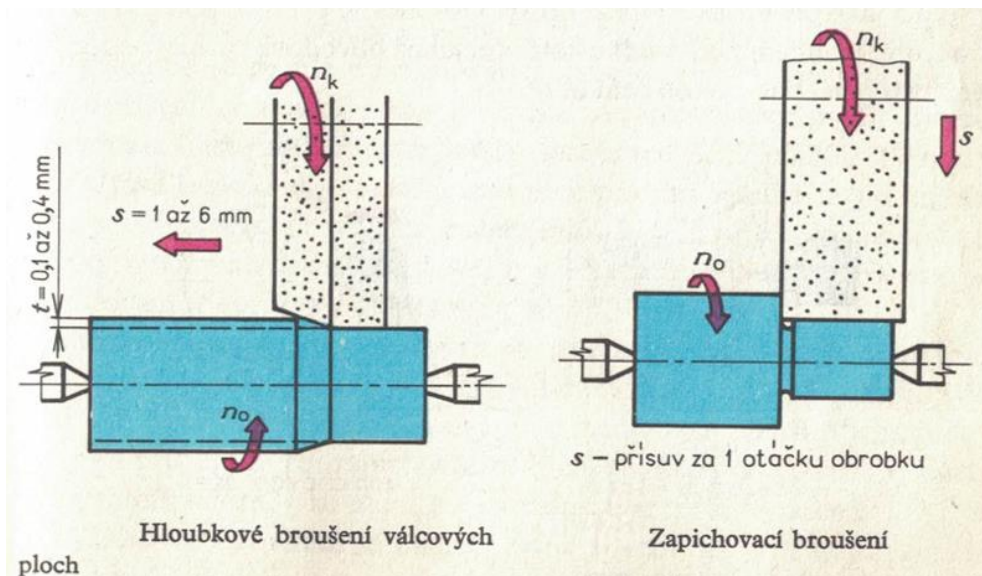
Nejčastěji se používá k broušení dlouhých obrobků. Ve většině případů se do obrobku navrtají středící důlky k upnutí obrobků. Přenos otáčivého pohybu je zajištěn čelním unašečem nebo unášecím srdcem. Na Obr. 5, zobrazeny pouze hroty. V místě kontaktu se brousící kotouč otáčí proti směru otáčení obrobku. Obvodová rychlost kotouče je přibližně 60krát (rozsah 30 až 100krát) větší. Podélný posuv při broušení válcových ploch koná stůl brusky s obrobkem nebo brousící vřeteník s brousícím kotoučem. [3]



Obr. 5 - Podélné broušení válcových ploch [3]

### Broušení hloubkové

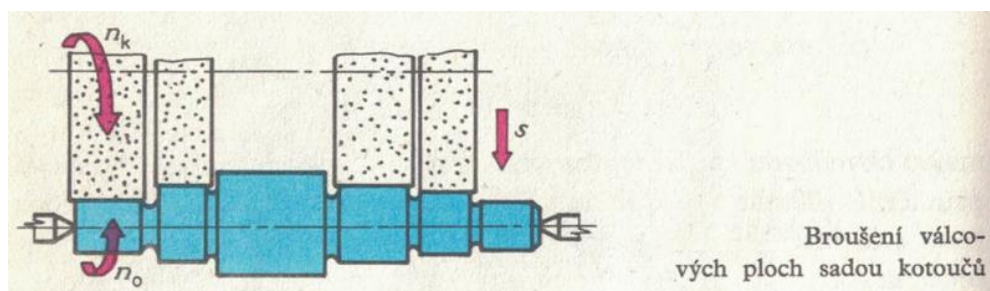
Velmi produktivní metoda spočívající v odebrání celého přídávku, který je mezi 0,1 až 0,4 mm na jeden zdvih. Dosahuje se o 25 až 75 % větší produktivity než v případě běžného broušení. Nevýhodou je, že během broušení dochází ke značnému úbytku brousícího kotouče, který musí být navíc kuželovitě orovnan, jinak značně trpí jeho hrana. Někdy se musí povrchu obrobku ještě několika průchody ohladit. Použití je vhodné u kratších a tužších obrobků. [3]



Obr. 6 - Hlubkové a zapichovací broušení [3]

### Broušení zapichovací

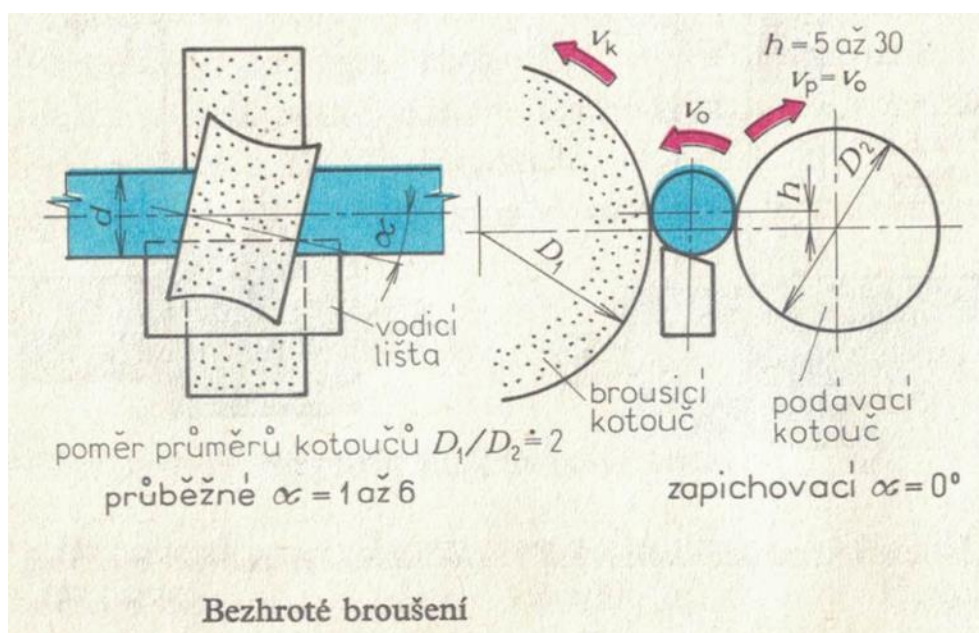
Kotouč je o něco širší než broušená plocha a koná radiální přísuv. Na broušenou plochu připadá maximální počet brousících zrn a tím se proces stává velmi produktivní. Uvádí se, že produktivita je až o 80 % větší než při normálním broušení. Při potřebě broušení více různých ploch najednou je možné využít rozdílné kotouče složené v sadu (Obr. 7). Obdobou zapichovacího broušení je také postupné zapichovací broušení. Brousíme obrobek delší, než je šířka kotouče. Zapíchnutím se obrousí nahrubo kus o něco menší, než je šířka kotouče. Vyjede se ze záběru, posune se obrobek a znovu se zapíchne. Takto se obrobí celá délka obrobku. Pro zahlazení nerovných přechodů se následně použije metoda s podélným posuvem. [3] [6]



Obr. 7 - Zapichovací broušení sadou kotoučů [3]

## Broušení bezhroté

Výhodou bezhrotého broušení je, že není potřeba vyvrtávat středící důlky. Obrobek je volně uložen na opěrnou vodící lištu mezi brousicí a podávací kotouč. Osa obrobku je o 5 až 30 mm výš, než jsou osy kotoučů. V praxi se využívá dvou základních způsobů broušení. Zapichovací bez posuvu obrobku a průběžné s jeho posuvem. Toho je dosaženo vyosením podávacího kotouče přibližně o 1 až 6° jak ukazuje Obr. 8. [3]



Obr. 8 - Bezhraté broušení [3]

## 4.2. Broušení vnitřních válcových ploch

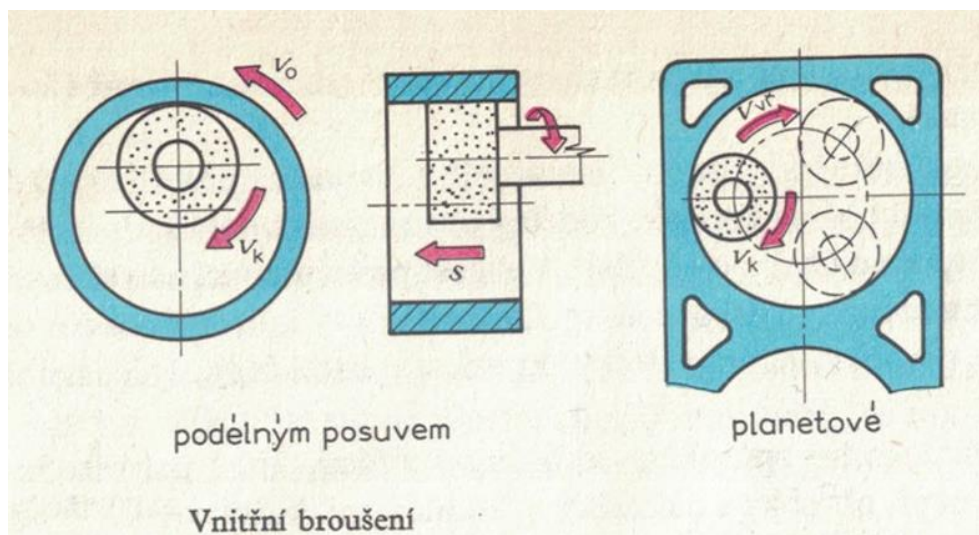
Tímto způsobem broušení se zhotovují přesné vnitřní válcové a kuželové díry. Oproti vnějšímu broušení je proces značně obtížnější i nákladnější. V řadě příkladů se mu proto v praxi snažíme vyhnout a nahradit jiným technologickým řešením. Průměr kotouče je menší než broušená díra a nabývá hodnot 0,7 až 0,9 násobku průměru díry. Malá velikost kotouče znamená jeho rychlejší opotřebení. Rovněž je potřeba značně zvýšit otáčky brousícího vřeteníku, aby se dosáhlo požadované řezné rychlosti. [3] [6]

### Vnitřní broušení s podélným posuvem

Nejvíce se uplatňuje při obrábění kalených součástí nebo součástí z velmi tvrdých materiálů. Dále je vhodné pro otvory s drážkami nebo slepé díry. Kotouč zajišťuje podélný posuv i přísuv do hloubky. Otáčí se v opačném smyslu než obrobek. Aby brousící kotouč dosáhl požadované řezné rychlosti, často musí pracovat při vysokých otáčkách. To někdy může způsobovat chvění a zhoršení kvality povrchu.

## Planetové broušení

Používá se při broušení děr takových obrobků, které nelze upnout do sklíčidla nebo čelistí v brusce na díry. Většinou se jedná o broušení velkých děr u těžkých kusů. Obrobek je nehybně upnut na stůl brusky a všechny pracovní pohyby vykonává brousící vřeteno. Otáčení kolem své osy, obíhání kolem osy obrobku, posuvný pohyb a přísuv. Přesnost tohoto obrábění je nižší, protože vyložení vřetena je málo tuhé. Někdy se může používat i k broušení vnějších povrchů (vyčnívajících čepy). [3] [6]

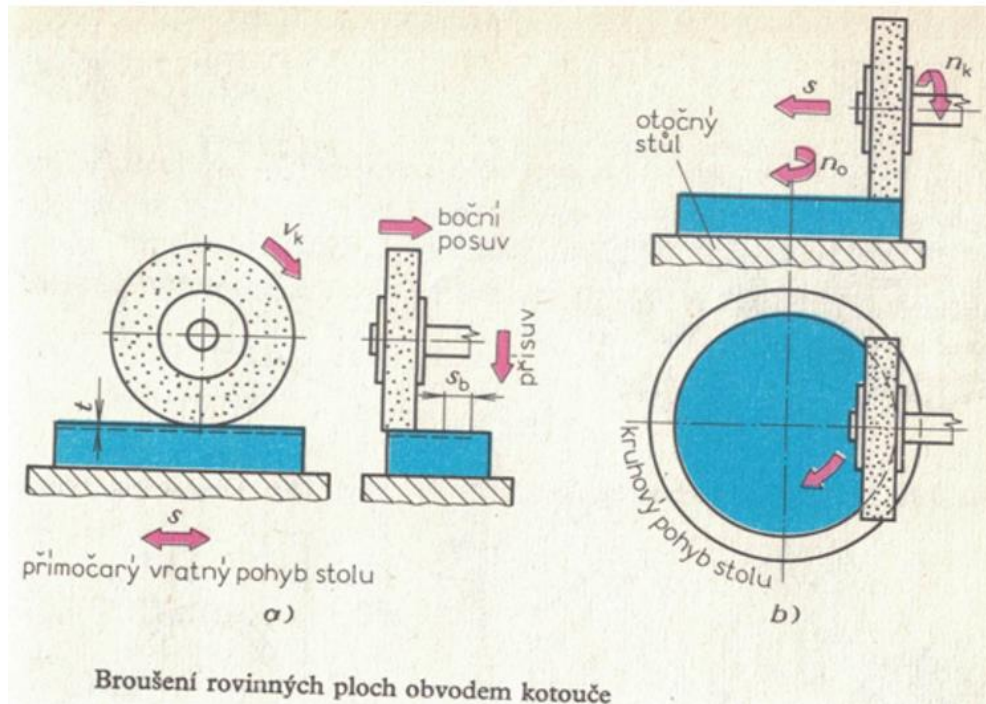


Obr. 9 - Vnitřní broušení [3]

## 4.3. Broušení rovinných ploch

### Broušení obvodem kotouče

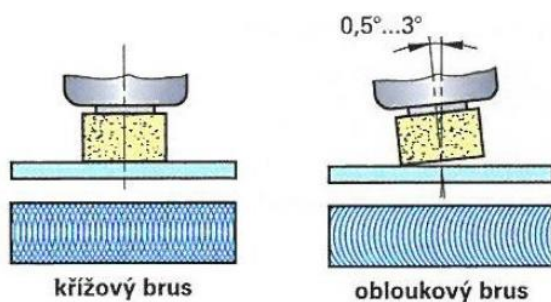
Při broušení obvodem kotouče vykonává stůl brusky přímočarý vratný nebo kruhový pohyb. Příčný posuv a svislý přísuv vykonává brousící kotouč. Broušení obvodem kotouče je nejpřesnější způsob broušení ploch. Z důvodu malé styčné plochy mezi kotoučem a obrobkem dochází jen k malému zahřívání, a proto se obrobek deformuje jen nepatrně. [3]



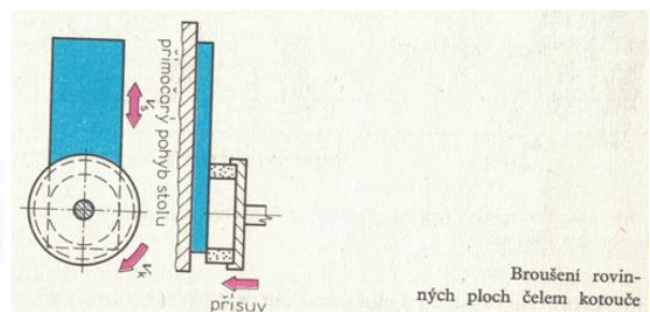
Obr. 10 - Broušení rovinných ploch obvodem kotouče [3]

### Broušení čelem kotouče

Tento způsob broušení je vhodný pro širší obrobky. Zpravidla bývá průměr broušícího kotouče větší než šířka broušené plochy. Metodou lze ubírat velký přídavek a obrábění je velmi produktivní z důvodu velké styčné plochy mezi obrobkem a kotoučem. Nevýhodou je broušení o nižší přesnosti. Při broušení čelem kotouče dochází ke značnému vzniku tepla. Proto lze vřeteno vzhledem k ploše obrobku vyklonit (Obr. 12). Vyklonění osy vřetene mění vlastnosti broušení. Charakteristickou je stopa výbrusu, která se změní z běžného křížového brusu na obloukový brus. Vznik tepla lze snížit i volbou segmentového kotouče. [3] [6]



Obr. 12 - Křížový a obloukový brus [18]



Obr. 11 - Broušení rovinných ploch čelem kotouče [3]

## 5. Brousicí nástroje

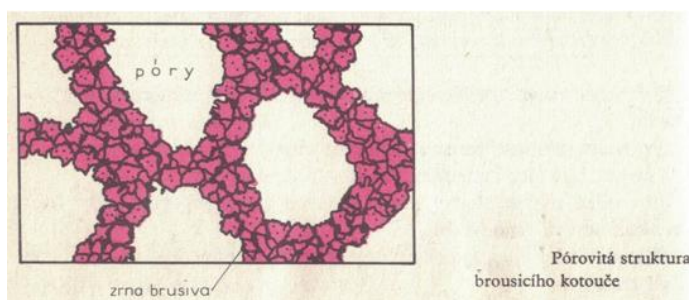
Jsou to mnohobřité řezné nástroje různých tvarů a velikostí. Skládají se ze dvou hlavních složek. Těmi je brusivo a pojivo. Brusivem jsou ostrohranná brousicí zrna, tvořící jednotlivé břity nástroje. V nástroji jsou rozmístěna nahodile a mají proměnnou geometrii. V průběhu broušení se z pojiva mohou zrna vylamovat a tím dochází k tzv. samoostření nástroje.

Pojivem je složka, stmelující zrna brusiva k sobě a zajišťující požadovaný tvar nástroje. V nástroji se dále vyskytují póry (vzduchové mezery). Ty slouží jako prostor k odvodu třísky. Brousicí nástroj musí být značně tepelně odolný, protože z důvodu tření a plastické deformace dochází při procesu ke zvyšování teploty. Teplota v místě broušení může dosahovat 400 až 600 °C i více. Z tohoto důvodu je nutné, aby i za zvýšení teplot byla dodržena nerovnost:

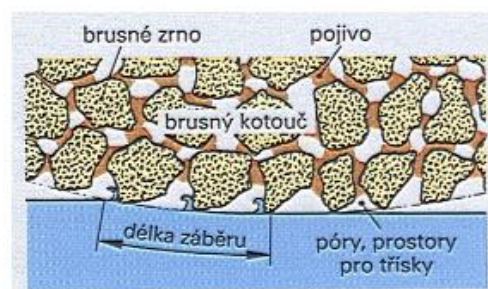
$$k_H = \frac{H_{br}}{H_{ob}} \geq 1,5 \text{ až } 2 \quad (5.1)$$

To je, aby tvrdost brusiva  $H_{br}$  byla nejméně 1,5 až 2krát větší, než tvrdost obráběného materiálu  $H_{ob}$ . [1]

Brousicí nástroj je charakterizován tvarem, velikostí, druhem brusiva, pojivem, zrnitostí, tvrdostí, strukturou. [1] [3] [7]



Obr. 14 - Struktura brousicího kotouče [3]



Obr. 13 - Brousicí kotouč při záběru [27]

## Brusiva a jejich rozdělení

Brusivo je krystalická látka nebo hmota zrnitého, někdy mikrokrystalického slohu, jejíž zrna jsou tak tvrdá, houževnatá a ostrohranná, že jimi lze obrušovat jiné měkčí hmoty. Používají se zrna přírodního i umělého původu. Záleží také na velikosti zrn, označované jako zrnitost. Drcením se dosahuje různých velikostí brusiva. [6] [7]

## Dle původu brousicích zrn

### Přírodní

Charakteristickým znakem přírodních brusiv je, že se často vyskytují nečisté s příměsí jiných prvků. Jejich zrna jsou nestejněměrná a nabývají proměnných vlastností. Výjimkou je diamant, jež vyniká vysokou tvrdostí, dobrou tepelnou vodivostí, vysokým modulem pružnosti a hodí se k obrábění všech materiálů. Kromě diamantu patří mezi využívaná přírodní brusiva korund a křemen. [1] [6]

### Korund $Al_2O_3$

Minerál skládající se z převážně krystalického oxidu hlinitého  $Al_2O_3$ , jehož podíl se udává mezi 80–90 % s příměsí dalších minerálů. Vyznačuje se velkou tvrdostí a malou křehkostí. Po diamantu je to nejtvrděší nerost. V přírodě krystalizuje v hexagonální krychlové soustavě a přírodní barva je od šedé po černavou. Korund znečištěný magnetovcem a jinými příměsí tvoří horninu zvanou smirek. [1] [8]

### Smirek

Nerost na bázi korundu. Obsahuje asi 60 %  $Al_2O_3$ . Příměsí do něho vmísené snižují jeho brousicí vlastnosti, protože nejsou tolik tvrdé. [1] [6]

### Křemen $SiO_2$

Minerál obsahující až 97 %  $SiO_2$ . Krystalizuje v klencové soustavě a je to jeden z nejrozšířenějších minerálů. [1] [9]

### Přírodní diamant

Přírodní diamant je modifikací uhlíku, krystalické struktury, která obvykle obsahuje nevelké množství příměsí různých chemických prvků. Přírodní diamant se dobývá na rýžovištích nebo v primárních ložiscích. Ta jsou na světě velmi omezená. Diamanty vytěžené z těchto nalezišť mají různý tvar, velikost i barvu. Barvu určují příměsí v diamantech obsažené. Diamant vyniká svou tvrdostí, dobrou tepelnou vodivostí a vysokým modulem pružnosti. [1]

## Umělé

Přírodní brusiva jsou v dnešní době již zpravidla nahrazována brusivy umělými. Hlavním důvodem je především zajištění požadovaného prvkového složení a stejnoměrnosti zrn určitých vlastností. Při jejich výrobě velmi záleží na technologickém postupu a na přísadách, kterými lze jejich vlastnosti ovlivňovat. Mezi nejvyužívanější umělé brusiva patří umělý korund, karbid křemíku, karbid boru a syntetický diamant. Jejich výroba probíhá tavením v pecích. Vznikají tak velké kusy brousicího materiálu. Tyto kusy se po vychladnutí drtí na zrna či prášek. [1] [6] [10]

### Umělý korund $Al_2O_3$

Pro svou tvrdost je jedním z nejpoužívanějších brousících materiálů. Výchozí látkou pro jeho výrobu je bauxit. Vyrábí se tavením v elektrických pecích, proto občas může nést označení elektrokorund nebo elektricky tavený korund. Podle obsahu oxidu hlinitého má elektrokorund různou barvu, strukturu a vlastnosti. Vyrábí se v několika jakostech jako korund růžový, bílý nebo hnědý. [1]



Obr. 16 - Růžový korund A98 [19]



Obr. 17 - Bílý korund A99 [20]



Obr. 15 - Hnědý korund A96 [17]



### Karbid boru $B_4C$

Obsahuje krystalický karbid boru, do 94 % a malé množství příměsí. Výroba probíhá v elektrických pecích z technické kyseliny borité a uhlíčitého materiálu s malým obsahem popela ropného koksu. [1]



Obr. 18 - Karbid boru [21]

### Karbid křemíku $SiC$

Rovněž označován jako karborundum je sloučenina křemíku a uhlíku. Vyrábí se v elektrických pecích za vysokých teplot (2100–2200 °C). Karbid křemíku bývá dvojího druhu. Zelený karbid křemíku a černý karbid křemíku. Zelený obsahuje 97 % SiC a je tvrdší. Černý obsahuje 95 % SiC, ale je houževnatější. [1]



Obr. 19 - Černý karbid křemíku [22]



Obr. 20 - Zelený karbid křemíku [23]

### Kubický nitrid boru $KNB$

Velmi tvrdý materiál vzniklý syntézou dusíku a boru. Udávaný poměr těchto látek je 43,6 % boru a 56,4 % dusíku. Jeho krystalická mřížka je stavbou podobná té diamantu, ale obsahuje atomy dusíku a boru. Rozměry mřížky jsou poněkud větší než u diamantu. Tím se spolu s nižší valencí elektronů vysvětluje jeho nižší tvrdost oproti diamantu. [1]

## Syntetický diamant

Umělý diamant se získává pomocí katalyzátoru z materiálu obsahujícího uhlík. Tímto materiálem pro výrobu umělého diamantu nejčastěji bývá grafit. Katalyzátorem potom kov. Například chrom, nikl, železo nebo kobalt. Katalyzátor se za vysokého tlaku a teploty taví a atomy uhlíku mění svou hexagonální strukturu charakteristickou pro grafit na krychlovou, která je typická pro diamant. Přitom se mění podstatně vlastnosti materiálu a z měkkého grafitu vzniká velmi tvrdý materiál – diamant. [1]



Obr. 21 - Syntetický diamant [7]

## Pojiva

Materiál spojující brousící zrna. Je to zásadní přísada kromě brousících zrn, která má vliv na vlastnosti brousícího nástroje. Množství, druh a zpracování pojiva určují tvrdost nástroje. Proto je možné ze stejných zrn vytvořit nástroje různých tvrdostí. Nejlepším způsobem pro volbu pojiva by bylo předem stanovit obráběný materiál a na základě tohoto výběru volit pojivo. To by bylo však příliš složité, a proto se standardně využívá jen několik druhů pojiv. Pojiva nemají brousící účinek. [6]

Dělí se na organická neboli elastická pojiva, a na anorganická pojiva. Mezi organická patří pryžová, šelaková a pryskyřičná. Mezi anorganická patří pojiva magnezitová, silikátová, keramická a kovová. [7]

Nejběžnějšími jsou pojiva keramická, silikátová, magnezitová a pojiva z umělé pryskyřice (bakelitová). [3]

Keramické pojivo se používá u 75 % všech kotoučů. Je velmi tvrdé, ale taky křehké. Křehkost se někdy snižuje napouštěním plastickou hmotou. Tvrdost se snižuje částečným narušováním slinuté vazby. Řezné rychlosti kotoučů s keramickým pojivem se pohybují od 35 do 50 m/s. [3] [6]

Silikátové (křemičité) pojivo je oproti keramickému méně pevné, ale pružnější. Jeho výroba je rychlejší a využívá se především k výrobě velkých kotoučů. Využívá se pro menší řezné rychlosti do 25 m/s. Hodí se jen pro broušení za sucha. [3]

Magnezitové pojivo se používá především k broušení za sucha, protože s vlhkostí ztrácí pevnost. Používá se do rychlostí do 15 m/s a je vhodné na jemný výbrus. [6]

Bakelitové pojiva, tedy pojiva z umělé pryskyřice jsou velmi pevná a pružná. Jsou méně citlivá k nárazům a bočním tlakům. Používají se při vysokých řezných rychlostech 80-100 m/s. Protože je vzniklá vazba značně pórovitá, kotouče se příliš nezahřívají, nesnesou však zahřátí přes 180 °C. [3] [6]

## Tvrdost kotouče

Tvrdostí kotouče se myslí odolnost brusiva vůči vydrolení, tedy odpor, který pojivo klade proti vylomení nebo uvolnění zrna z nástroje v průběhu procesu broušení. Volí se dle broušeného materiálu a způsobu broušení. Tvrdost je správně volena, vylomí-li se zrno v momentě kdy je otupené. Pro tvrdost obecně platí, že se volí tím měkčí, čím je tvrdší broušený materiál a čím je větší styčná plocha s broušeným předmětem. Důležitým poznatkem je fakt, že tvrdost kotouče není dána tvrdostí zrn, ale právě tvrdostí pojiva. [6]

## Zrnitost brusiva

Jedná se o velikost zrn v broušicím nástroji. Existuje více možností označení. Často bývá zrnitost označována číslem od 4 do 1000 a určuje se podle počtu ok síta na jeden palec délky, kterým zrna propadnou. [6]

Další normy jako například norma ČSN 22 4012, rozlišuje zrnitost podle měrného rozměru zrna v mikrometrech. Měrným rozměrem je jeho šířka. Této hodnotě následně norma přidělí číslo zrnitosti.

Zrnitost se volí dle požadované drsnosti povrchu broušeného obrobku. Čím menší zrnitost, tím lepší drsnost povrchu. Dále platí, že čím více materiálu chceme ubírat, tím hrubší zrno volíme. Hrubší zrno volíme také při vyšších řezných rychlostech a při velké styčné ploše mezi obrobkem a nástrojem. Velká zrna a velký úběr s sebou přináší značné zvyšování teploty, proto čím menší zahřátí obrobku lze dopustit, tím jemnější zrnitost se volí. [3]

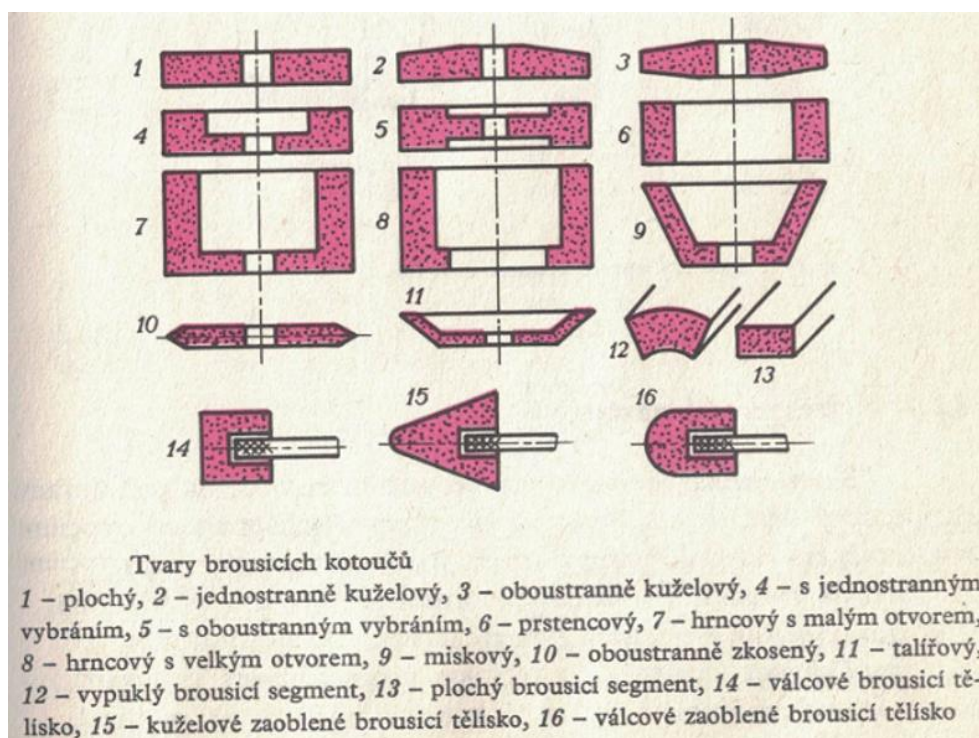
## Sloh (struktura) nástroje

Sloh určuje kvantitativní poměr objemu brusiva, pojiva a pórů v kotouči. Dle normy jsou kotouče rozděleny do odpovídajících tříd od 1 do 13. Čím vyšší je číslo struktury, tím větší jsou v kotouči póry a tím jsou zrna dále od sebe. [3]

Sloh kotouče se volí dle broušeného materiálu, způsobu broušení a požadované drsnosti. Hutné kotouče brousí jemněji, pórovité brousí výkonněji a chladněji. Dále jsou pórovité kotouče vhodnější při broušení s velkou styčnou plochou, hutné kotouče lépe vyhovují k broušení s malou styčnou plochou. [3] [6]

## Tvary brousicích kotoučů

Existuje široká škála tvarů brousicích kotoučů. Každý tvar je popsán normou, ve které jsou popsány jeho rozměry. V závislosti na tvaru kotouče se volí druh jeho upnutí na hřídeli. V praxi nejčastěji používané brousicí kotouče jsou vyobrazeny na obrázku Obr. 22. [3] [6]



Obr. 22 - Přehled tvarů brousicích kotoučů [3]

## Označování brousících kotoučů

Specifikace označování standardních brousících kotoučů

Charakteristika	Vyjádření	Označení	
		ČSN 22 4501	ČSN ISO 525 (22 4503)
3 - Materiál brousících zrn	SiC černý	C 48	C
	SiC zelený	C 49	
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> bílý	A 99 B	A
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> barvený	A 99	
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> růžový	A 94	
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> manganový	A 98 M	
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> hnědý	A 96	
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> zirkonový	A 97 E	
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> mikrokrystalický	A 97 M	
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> polokřehký	A 97 P	
4 - Zrnitost	velmi hrubá	250, 200, 160	<i>není</i>
	hrubá	125, 100, 80, 63	4, 5, 6, 7, 8, 10, 12, 14, 16, 20, 22, 24
	střední	50, 40, 32, 25	30, 36, 40, 46, 54, 60
	jemná	20, 16, 12, 10	70, 80, 90, 100, 120, 150, 180
	velmi jemná	8, 6, 5	220, 240, 280, 320, 360, 400, 500, 600, 800, 1000, 1200
	zvlášť jemná	4, 3, M32, M22, M15	<i>není</i>
5 - Tvrdost	velmi měkký	G, H	<i>není</i>
	měkký	I, J, K	A, B, C, D, E, F, G, H, I, J, K
	střední	L, M, N, O	L, M, N, O, P, Q
	tvrdý	P, Q, R, S	R, S, T, U, V, W, X, Y
	velmi tvrdý	T, U	<i>není</i>
	zvlášť tvrdý	V, W, Z	
6 - Sloh (struktura)	velmi hutný	1, 2	0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, atd.
	hutný	3, 4	
	polohutný	5, 6	
	pórovitý	7, 8	
	velmi pórovitý	9, 10	
	zvlášť pórovitý	11, 12, 13	
7 - Pojivo	keramické	V	V
	silikátové	S	<i>není</i>
	pryžové	R	R
	pryžové s výztuží	RF	RF
	umělá pryskyřice	B	B
	umělá pryskyřice s výztuží	BF, BF-Flex	BF
	šelakové	E	E
	magnezitové	Mg	Mg
	polyuretanové	U	<i>není</i>

Obr. 24 - Varianty označování brousících kotoučů [2]

1	2	3	4	5	6	7	8
<b>1</b>	<b>300 x 50 x 76</b>	<b>A</b>	<b>36</b>	<b>L</b>	<b>5</b>	<b>V</b>	<b>35 m s<sup>-1</sup></b>
Rozměry (2): vnější průměr - 300 mm, šířka - 50 mm, průměr upi- nací díry - 76 mm							

Obr. 23 - Příklad označení brousícího kotouče dle normy ČSN 22 4503 [2]

## Orovnávání brousicích kotoučů

Orovnání kotouče je důležité pro dosažení požadovaného geometrického tvaru kotouče, někdy taky přesného profilu pro tvarové broušení. Dále orovnění slouží k očištění kotouče od broušeného materiálu, k odstranění tupých zrn a k obnovení řezivosti. Některé brousicí kotouče sice mají schopnost samoostření, ale i ty je občas nutné orovnat pro zajištění jejich přesného geometrického tvaru. [3] [6]

„Hlavní způsoby orovnění: tužkovými diamantovými orovnávači, diamantovými zrny upevněnými ve speciálních držácích, diamantovými jedno kamenovými nástroji (nože, jehly), nástroji vyrobenými z diamantového prášku, orovnávacími kolečky, či brusky.“ [1]

V případě, že nástroj neobsahuje diamant, používá se například karbid křemíku. Způsoby orovnění využívají principu soustružení, obrušování nebo odvalování. [6]



Obr. 25 - Diamantový orovnávač kotoučů [24]

## Vyvažování kotoučů

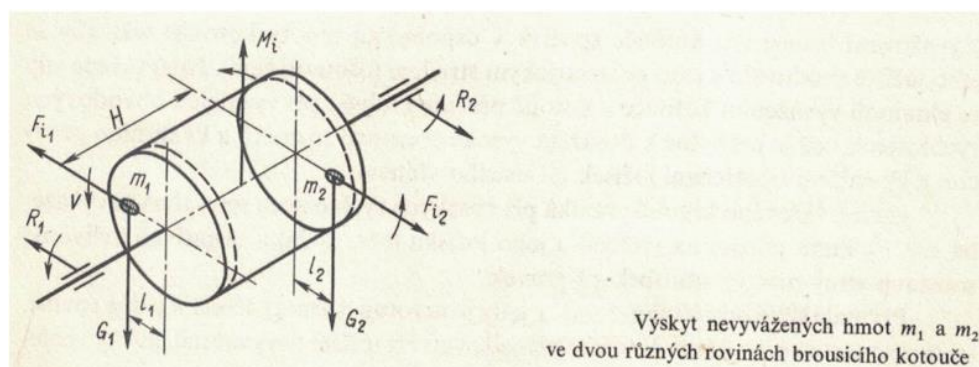
Vyvážení kotouče je důležité z hlediska přesnosti broušení a funkce brusky. Vyvažování spočívá v uspořádání hmoty kotouče tak aby se jeho těžiště shodovalo s jeho geometrickým středem (osou rotace). Je-li těžiště vychýleno z této polohy dochází ke vzniku nevyvážených sil. V takových případech potom kotouč při vysokých otáčkách pracuje neklidně, snižuje se přesnost rozměrů a povrchu a dochází k většímu opotřebení ložisek brousicího vřetena. Vyvažování kotoučů se dělí na statické a dynamické. Jen statické vyvážení se používá u úzkých kotoučů s šířkou do 0,1 násobku jeho průměru, kdy jsou rotující hmoty téměř v jedné rovině. Při nasazení na vyvažovací trn se nejhmotnější část kotouče ustálí ve spodní poloze. Tuto nevyváženost je potřeba vyrovnat. [1] [7]

Dynamické vyvažování je o něco složitější, protože nevyváženost se vyskytuje podél délky kotouče, nikoli jen v jedné rovině. K vyvážení větších kotoučů se využívá speciálních vyvažovacích strojů. [1] [7]

Moderní brusky mají integrováno zvláštní příslušenství pro automatické vyvažování nerovnoměrného rozložení hmoty v brousicím kotouči. Tato funkce se používá vždy při zahájení operace broušení. Dosahuje se tak výrazné úspory přípravných časů.



Obr. 26 - Problematika statického vyvažování [1]



Obr. 27 - Problematika dynamického vyvažování [1]

## 6. Obecné podmínky pro volbu brousícího nástroje

Volba kotouče je velmi obtížná a záleží na spoustě činitelích. Patří mezi ně vlastnosti broušeného materiálu, druh zvolené brousící operace, typ stroje, řezná rychlost, rychlost posuvu, styková plocha brousícího kotouče nebo chlazení. Obecné podmínky odpovídající zdroji [3], jsou sepsány níže.

- Čím větší úběr tím větší zrno
- Čím větší řezné rychlosti a velká styková plocha, tím hrubší zrno
- Malá přípustnost ohřátí obrobku znamená volbu jemnějšího zrna
- Čím tvrdší je broušený předmět, tím měkčí kotouč
- Měkký kotouč pro přesnější broušení (tvrdost dána pojivem a strukturou)
- Hutná struktura pro broušení hladkých, tvrdých a křehkých předmětů při malé styčné ploše
- Pórovitá struktura pro broušení houževnatého materiálu při velké styčné ploše
- Nesmí-li se obrobek příliš ohřívát, volí se zvlášť pórovitý kotouč

Měkký kotouč	PODMÍNKY	Tvrdý kotouč
Tvrdý, křehký	Obráběný materiál	Měkký, houževnatý
Velká	Kontaktní plocha	Malá
Vysoká	Řezná rychlost	Nizká
Nizká	Posuvová rychlost ( $v_{ft}$ , $v_w$ )	Vysoká
Dobrá	Přesnost brusky	Špatná
Zkušený	Pracovník	Nezkušený

Obr. 28 - Doporučení k volbě brousícího kotouče [4]



## 7. Řezné kapaliny

Nedílnou součástí většiny obráběcích procesů je přítomnost řezné kapaliny. Jejich výhod se využívá i při většině broušicích operací. Lze však brousit i za sucha. Přínos řezné kapaliny spočívá především v odvodu tepla z oblasti tvoření, snižuje práci vlivem tření, snižuje intenzitu otupování nástroje, zlepšuje jakost obrobené plochy, napomáhá k odvodu třísek z místa řezu a také z nástroje. Důsledky těchto efektů je vyšší kvalita, produktivita práce i trvanlivost kotouče. [6]

Řezné kapaliny lze členit na kapaliny s převládajícím chladícím efektem a kapaliny s převažujícím mazacím účinkem. V současné době však toto rozdělení příliš nevystihuje sortiment kapalin dostupných na trhu, protože vzniká tendence zvyšování mazacího efektu i u kapalin s převážně chladícím efektem a tím se rozdíl mezi oběma skupinami stírá. Podle složení řezné kapaliny dělíme na vodní roztoky, emulzní kapaliny, zušlechtné řezné oleje a syntetické a polysyntetické kapaliny. [11]

## 8. Parametry řezného procesu

Protože je broušení často využíváno jako dokončovací operace, je potřeba volit řezné podmínky s ohledem na dodržení požadované přesnosti rozměrů, geometrického tvaru a drsnosti. Volba těchto podmínek však není jednoduchá, protože je ovlivněna mnoha činiteli. Především materiálem obrobku, materiálem nástroje a způsobem broušení. Svou roli hraje i způsob chlazení a zvolená řezná kapalina. [3] [6]

Mezi nastavitelné parametry se řadí například, řezná rychlost, podélný posuv kotouče a přířuv. Řezná rychlost je obvodová rychlost na největším průměru broušícího kotouče. Podélný posuv je vzdálenost, o kterou se obrobek posune vůči broušícímu kotouči za jednu otáčku obrobku. Volí se s ohledem na šířku broušícího kotouče. Přířuv určuje hloubku odbrušovaného materiálu. Tento pohyb vykonává broušící kotouč po projetí celé dráhy obrobku, a to buď v jedné úvrati stolu nebo v obou. [3]

Dle použité literatury [3] se v praxi volí řezné podmínky z tabulek zohledňujících daný způsob broušení. Pro daný druh broušení lze najít rovněž parametry pro hrubování i obrábění na čisto. Obr. 29 ukazuje možné nastavení parametrů pro broušení obvodem a čelem kotouče, kde  $v_k$  značí obvodovou rychlost kotouče,  $v_s$  rychlost posuvu,  $s$  hodnotu příčného posuvu v úvrati a  $h$  značí hloubku řezu.

Řezné podmínky pro rovinné broušení				
Způsob broušení	$v_k$ (m s <sup>-1</sup> )	$v_s$ (m min <sup>-1</sup> )	$s$ (mm)	$h$ (mm)
Obvodem kotouče				
Hrubování oceli	25 až 35	5 až 35	(0,3 až 0,7) B	0,008 až 0,015
Hrubování litiny	20 až 30	7 až 45	(0,3 až 0,7) B	0,005 až 0,008
Na čisto	20 až 40	5 až 20	1 až 2	0,005 až 0,015
Čelem kotouče				
Hrubování oceli	20 až 30	10 až 40		0,01 až 0,07
Hrubování litiny	15 až 25	12 až 50		0,005 až 0,04
Na čisto	20 až 40	10 až 25		0,003 až 0,01

Obr. 29 - Ukázka tabulky pro volbu řezných podmínek pro rovinné broušení [3]

## 9. Dynamika procesu broušení

Řezné síly při broušení vznikají vzájemným působením ploch obrobku a broušícího kotouče. Ve stykové ploše se do záběru dostává velké množství břitů s nedefinovanou geometrií a ubírají drobné třísky. Řezné síly od těchto břitů jsou co do velikosti poměrně zanedbatelné, celková řezná síla však může dosáhnout značné velikosti, a to až takové, že limitujícím faktorem broušení je příkon samotné brusky.

Řezná síla se přenáší i do samotné technologické soustavy stroj-přípravek-obrobek-nástroj, proto i ta musí splňovat jisté kvalitativní nároky tak, aby byla jakost procesu co nejlepší.

S rostoucí řeznou silou dochází k většímu opotřebenému kotouče, zkrácení jeho trvanlivosti, zvyšuje se teplota v zóně broušení i na povrchu obrobku. Klesá přesnost broušení i kvalita povrchu. [1]

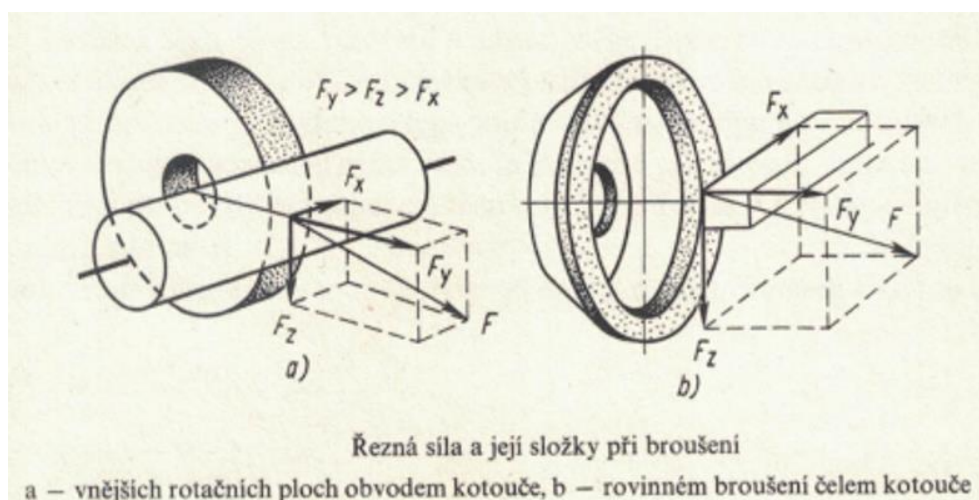
V kontextu celkové řezné síly doplňujeme ještě další tři síly, z kterých se skládá. Tyto síly se rozkládají do tří na sebe kolmých směrů. Ve směru řezné rychlosti působí řezná síla  $F_z$  ( $F_c$ ). Síla kolmá k broušené ploše se nazývá pasivní  $F_y$  ( $F_p$ ). Síla působící ve směru podélného posuvu je označována jako posuvová  $F_x$  ( $F_f$ ). Obvykle platí nerovnost: [1]

$$F_p > F_c > F_f \quad (9.1)$$

Často se uvádí i poměr sil  $F_y$  ( $F_p$ ) a  $F_z$  ( $F_c$ ), který dosahuje hodnot od 1,2 do 3.

$$\frac{F_y}{F_z} = 1,0 \text{ až } 3,0 \quad (9.2)$$

„Velikost řezných sil závisí zejména na obráběném materiálu, způsobu broušení, řezných podmínkách (velký vliv má zejména průřez třísky), dále na zrnitosti brusiva, druhu a tvrdosti pojiva a struktuře broušícího kotouče. S narůstajícím otupováním broušícího kotouče se řezná síla zvětšuje, v konečném důsledku až na několiknásobek své počáteční hodnoty.“ [2]



Obr. 30 - Řezné síly a jejich složky při broušení [1]

## 10. Kinematika procesu broušení

Při broušení rozlišujeme dva základní druhy pohybů. První pohyb je pracovní. Jedná se o rotační pohyb vykonávaný pracovním nástrojem a bývá označován jako hlavní řezný pohyb. Druhý pohyb se nazývá vedlejší. Jde buď o pohyb přímočarý nebo rotační a je zpravidla vykonávaný obrobkem. Výsledný pohyb je výslednicí těchto dvou. [12]

Hlavní řezný pohyb je charakterizovaný řeznou rychlostí popsanou rovnicí,

$$v_c = \frac{\pi \cdot d_s \cdot n_s}{60 \cdot 1000} \text{ [m/s]} \quad (10.1)$$

kde  $d_s$  je průměr broušícího kotouče a  $n_s$  jsou jeho otáčky. Jednotky řezné rychlosti se udávají v metrech za sekundu.

Podobně lze popsat i obvodovou rychlost obrobku,

$$v_w = \frac{\pi \cdot d_w \cdot n_w}{1000} [m/min] \quad (10.2)$$

kde  $d_w$  je průměr obrobku a  $n_w$  jsou otáčky obrobku. Na rozdíl od řezné rychlosti, obvodová rychlost obrobku se udává v metrech za minutu. [12]

### Ekvivalentní tloušťka třísky

Z důvodu nedefinované geometrie zrn broušícího kotouče a jeho proměnných vlastností, je velmi složité vypočítat tloušťku třísky odebírané každým z nich. Jsou tím značně zkomplikovány a omezeny vztahy pro výpočet parametrů třísky. Z toho důvodu se u broušení přistupuje k teoretické hodnotě, označované jako ekvivalentní tloušťka třísky, která zajišťuje kontinuitu třísky v tom smyslu, že materiál vstupující do oblasti řezání z ní musí také vystupovat. Materiál vstupuje do místa řezání rychlostí posuvu  $v_f$  a tloušťka odebíraného materiálu odpovídá hodnotě hloubky řezu  $a_e$ . Na druhé straně potom materiál odchází v podobě třísek řeznou rychlostí  $v_c$ . Tyto třísky lze spojit v teoretickou vrstvu odpovídající hodnotě  $h_{eq}$ . Rovnice je na jedné straně přenásobena hodnotou 60, tak aby se jednotkově shodovala. Řezná rychlost  $v_c$  je vyjádřena v metrech za sekundu, kdežto rychlost posuvu v metrech za minutu. [2] [12]

$$h_{eq} \cdot v_c \cdot 60 = a_e \cdot v_f \quad (10.3)$$

Po úpravě dostáváme vztah:

$$h_{eq} = \frac{a_e \cdot v_f}{v_c \cdot 60} \quad (10.4)$$

Experimentálními pokusy a teoretickými rozbory se podařilo prokázat, že díky hodnotě ekvivalentní tloušťky třísky lze s dostatečnou přesností popsat proces broušení a tudíž stanovit, pro obrábění užitečné hodnoty, jako řezné síly, řezné odpory nebo výkony. [2]

Hodnota ekvivalentní tloušťky třísky závisí na druhu broušení, proto se od sebe vztahy pro jednotlivé metody mírně liší. Výše je uveden vztah výpočtu ekvivalentní tloušťky třísky pro rovinné obvodové tangenciální broušení s přímočarým pohybem stolu. [2] [12]

## 11. Praktická část

Praktická část bakalářské práce byla prováděna ve firmě PRECIZ, s.r.o. Téma bakalářské práce zapadalo do aktuálních požadavků, které firma řeší v souvislosti s automatizací broušení. Práce navazuje na dřívější dosažené výsledky ve zvyšování produktivity vlivem použití výkonnostního brusiva a nyní se zaměřuje na zvýšení produktivity využitím automatizovaného strojního vybavení.

### O firmě PRECIZ s.r.o.

Firma PRECIZ, s.r.o. byla založena roku 1995 jako dceřiná společnost německé firmy Präzi-Flachstahl AG. Své původní sídlo tehdy měla v pronajatém objektu ve Zlínském kraji v průmyslovém areálu společnosti Moravan a.s. v Otrokovicích. O několik let později v důsledku nutnosti zvýšení výrobních kapacit došlo k rozhodnutí vybudování vlastního nového výrobního závodu v nedalekých Napajedlech, kam se roku 2008 celý závod přesunul. K dalšímu rozšíření výrobních kapacit došlo v roce 2014 kdy byla dostavena další výrobní hala. V těchto prostorách firma funguje až do současnosti.

Od samého počátku se firma zaměřuje na výrobu vysoce kvalitních a přesných dílů z nástrojové oceli. Své uplatnění výrobky nacházejí především ve všeobecném strojírenství jako speciální díly pro obráběcí stroje, nástroje a přípravky. Další specifickou oblastí, kterou se firma zabývá je výroba přesně broušené oceli podle normy DIN 59350. Své výrobky firma distribuuje především do zemí EU.

Firma vidí svůj závazek k zákazníkům a přesvědčení o svých produktech již ve svém názvu PRECIZ. Nejvyšší důraz je kladen na přesnost a kvalitu prodávaných výrobků. Společně s rychlými dodávkami lhůtami se pak firma stává spolehlivým obchodním partnerem pro své zákazníky. Usiluje tak o upevnění a postavení značky PRECIZ jako synonymum kvality a spolehlivosti. [13]



Obr. 31 - Výrobní hala firmy PRECIZ, s.r.o. [25]

## 11.1. Charakteristika výrobního procesu

„Výrobní proces strojírenského závodu je daný souhrnem technologických, manipulačních, kontrolních a řídicích činností, jejichž cílem je měnit tvar, rozměry, složení, jakost a spojení výchozích materiálů a polotovarů z hlediska požadovaných technickoorganizačních podmínek jednotlivých výrobků.“ [14]

Tento postup není předem daný a každá firma si jej může přizpůsobit podle vlastních potřeb a požadavků. Pro účely práce a lepší porozumění procesu ve firmě PRECIZ, s.r.o. je postup seřazen dle po sobě jdoucích operací.



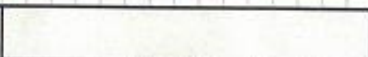
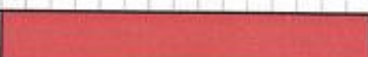

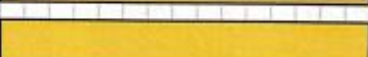


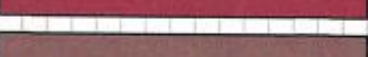


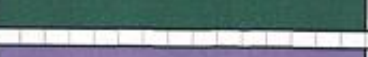
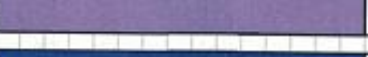





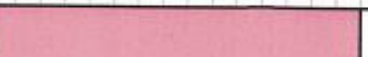

### 1. Nákup materiálu

Celý proces výroby začíná volbou a nákupem vhodného polotovaru. Správný výběr materiálu, rozměrů, tolerancí, tepelných či povrchových úprav je nezbytným předpokladem pro bezproblémovou, kvalitní a ekonomickou výrobu. Firma PRECIZ, s.r.o. má díky dlouholetým zkušenostem ověřené polotovary, jaké pro ni jsou nejlepší a ty si nechává od svých dodavatelů válcovat na míru a dovážet. Mnohé z nich nejsou ani normalizované. Vykazují specifické rozměry i tepelné zpracování. Z důvodu optimalizace výrobních nákladů jsou například tyče kupovány ve fixních délkách, které jsou násobkem délky konečné normálie, plus přídavek na prořez. Plechy jsou dodávány v šířkách, které odpovídají konečné délce vyráběné normálie (1030 mm) a dělí se pouze šířka. Vše za účelem úspornější a výkonnější výroby. Pokud by se nakupovaly standardní polotovary, došlo by ke zvýšení materiálových nákladů (vyšší váha), prodloužení výrobních časů (větší úběry materiálů), tzn. vyšší výrobní náklady.

Proto je potřeba již od začátku výroby dbát všech možných následků nevhodných rozhodnutí.

Pro potřeby firmy PRECIZ, s.r.o. jsou vstupními polotovary nejčastěji ploché tyče a plechy válcované za tepla.

Polotovary jsou dodávány v různých jakostech materiálu. Pro každou jakost firma používá barevné interní značení, aby v průběhu výrobního procesu byla vyloučena záměna jakosti materiálu. Jakost materiálu je označována pomocí Werkstoffnummer, zkráceně W. Nr.

 Preciz, s.r.o.		<b>Farbliste</b> <b>Barevné značení</b>		Revize : 5 ( Vychází z Prázi - Farbliste Rev. : 2 ) 28.05.2015
Farbe / Barva	RAL	Farbe / Barva	W.-Nr. / Jakost	
minttürkys tyrkysová mátová	6033		1.0570	
reinweiß bílá	9010		1.1730	
reinorange oranžová pravá	2004		1.2085	
gold zlatá	ohne bez		1.2162	
rapsgelb žlutá hořčičná	1021		1.2311	
silbergrau sříbrošedá	7001		1.2312	
feuerrot ohnivě červená	3000		1.2343	
beigebraun hnědoběžová	8024		1.2363	
verkehrs-schwarz dopravní černá	9017		1.2379	
laubgrün listová zelená	6002		1.2436	
blaulila modrofialová	4005		1.2767	
saphirblau safírová modrá	5003		1.2842	
Fluo Grün reflexní zelená	201516		1.0037	
Fluo Pink reflexní růžová	201479		1.7131 1.7147	
Fluo Orange reflexní oranžová	201493		1.4541 1.4301	
Rot Metallic reflexní červená	ohne bez		1.2343 ESU	
Hellrosa světlá růžová	3015		1.4112	
Pastellblau pastelová modrá	5024		1.7225 unvergütet	
Weissgrün Pastelová zelená	6019		1.2083	
Keine Žádná			1.3343	

Obr. 32 - Označení používaných materiálů [15]

## 2. Dělení

Podstatou operace je dělení polotovaru na výchozí rozměr pro další výrobu. K dělení je možné využít více metod, ale ve firmě PRECIZ, s.r.o. s. zůstávají převážně u konvenčních metod.

- Pásová pil
- Stříhání nůžkami
- Kotoučová fréza Schelling
- Kotoučová pila Trennjäger



Obr. 33 - Vertikální pásová pila Behringer



Obr. 34 - Vertikální pásová pila Kasto

## 3. Rovnání surového materiálu po dělení

Ať už při samotné výrobě v hutích, při transportu, nebo při řezání, může být do materiálu vneseno nežádoucí vnitřní pnutí, které způsobí průhyb nebo kroucení dílu. Proto je do výrobního procesu zařazeno rovnání surového materiálu, často označováno jako „rovnání na surovo“. V této fázi procesu je materiál očištěn. Ometen smetáčkem od špon, oťřen hadrou od emulze. Následně je díl ojhlen na jehlicím stroji, nebo úhlovou bruskou, tak aby došlo ke sražení otřepů a ostrých hran po řezání. V dalším kroku už se může postup lišit podle rozměrů dílce a velikosti deformace. Mezi používané rovnací metody patří:

- Manuální rovnání kladivem (pnutí se eliminuje pouze ve vrchních vrstvách materiálu, po jejich obroušení je riziko navrácení do původního tvaru)
- Rovnání pod lisem
- Rovnání ve válcové rovnačce (nejvhodnější způsob rovnání, pnutí materiálu se eliminuje v celém průřezu)
- Ve vidlici (zkroucené díly „vrtule“)



Předpokladem správného vyrovnání je natahovat vlákna materiálu z obou stran rovnoměrně. Správně vyrovnaný materiál je klíčovým předpokladem pro dosažení kvalitního výsledku broušení.



Obr. 35 - Válce rovnacího stroje

#### 4. Broušení tloušťky polotovaru

K broušení tloušťky se ve firmě PRECIZ, s.r.o. využívají vertikální brusky. Mezi jejich hlavní součásti patří lože, hlavní motor s brousící hlavou, pohon přísuvu, support, vodící lišty, pohon suportu, upínací magnet, nosič kabelů.

Osa vřetene je umístěna vertikálně. Přísuv zajišťuje elektromotor, šroub s jemným závitem a matice.

O posuv v ose x se stará elektromotor. Pohyb se přenáší přes pastorek a hřebenovou tyč.

Významnou roli mají při broušení ložiska upevněná k suportu brusky okolo vodících lišt. Montují se vždy ve trojicích tak aby jedno ložisko neslo váhu stroje, druhé boční bránilo pohybu v ose y a třetí zespod aby bránilo zvedání suportu, když vřeteno tlačí na obrobek.

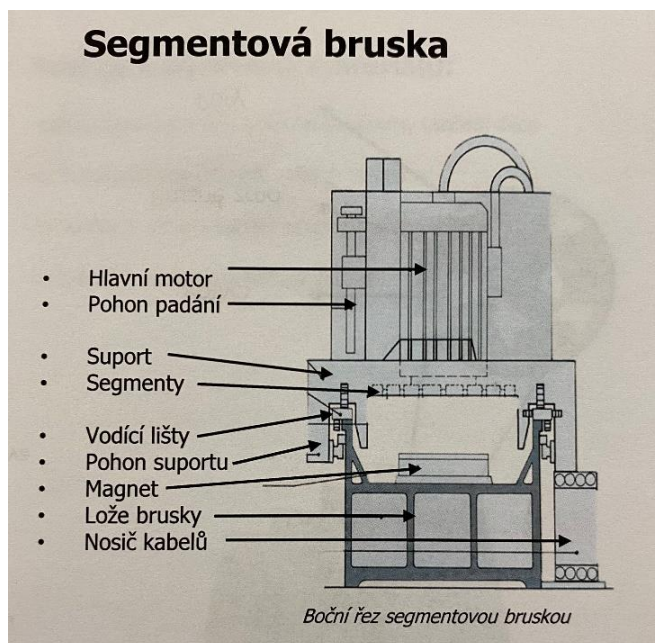
Vodící lišty jsou kalené a velmi přesné. V případě špatné rovinnosti by se nerovnosti přenášely do obrobku a docházelo by k výrobě zmetků.

Magnet je fixně umístěn do lože brusky a má nastavitelnou sílu upínání. Veškerá kabeláž, elektronika i přívod emulze je veden k motoru pomocí nosiče kabelů. Za provozu je obrobek oplachován řeznou a chladicí emulzí. Ta následně odtéká z vany

brusky a je čerpadlem hnána do centrální filtrace, kde je emulze od nečistot zbavena, ochlazená a vrací se zpět. [15]

#### Nastavitelné parametry:

- Otáčky motoru
- Rychlost posuvu
- Rychlost přísuvu (Velikost a frekvence přísuvu hlavy. Tím lze volit hrubování nebo jemné broušení)
- Síla upnutí magnetem



Obr. 36 - Boční řez vertikální segmentovou bruskou [15]



Obr. 37 - Bruska Göckel G100

#### Technologie:

Jak již bylo zmíněno u rovnání surového materiálu, vlákna materiálu musí být natahována rovnoměrně z obou stran. To platí v trochu jiné podobě i u broušení. Vrstvy materiálu odebraného z obou stran musejí být souměrné. Při broušení je potřeba zvolit správný postup. Díl musí být změřen a zjištěna hodnota přídávku. Zárukou správného výsledku, je rovnoměrný úběr z obou broušených stran. Proto se brousí následujícím způsobem.

1. První strana, úběr 25 % přídávku na jednu stranu
2. Díl se otočí na druhou stranu
3. Druhá strana, úběr 50 % přídávku, včetně opracování povrchu na konečnou hodnotu  $Ra$  v  $\mu\text{m}$ . Díl se otočí zpět na první stranu

4. První strana, úběr cca. 25 % tak aby bylo dosaženo požadovaného rozměru, včetně tolerance a opracování povrchu na konečnou hodnotu  $Ra$  v  $\mu\text{m}$

Díl je potřeba dostatečně chladit v celém procesu broušení. Teplota by neměla přesáhnout 40°C. Vyšší teploty vnášejí do materiálu další pnutí, mění vlastnosti materiálu z pohledu broušení a způsobují změnu rozměru vlivem tepelné roztažnosti. Pokud ke zvýšení teploty dojde, musí se snížit nebo zastavit přítlak, než se díly zchladí [15]

## 5. Broušení šířky

Broušení šířky se ve firmě PRECIZ, s.r.o. provádí v upínacích rámech. Operace se provádí pro díly do šířky 30 mm. Svazek dílů se upne do rámu. Díly jsou upnuty rámem, tvořeným dvěma plochými tyčemi (délka rámu 1200 mm), které jsou na každém konci spojeny šroubovicí. Rám se dotahuje prodlouženou šestihrannou maticí. Celkový počet dílů v rámu se rozdělí na polovinu a díly se proti sobě přesadí. Rám s díly se mírně dotáhne a vyrovnává se na vlasový úhelník, aby byla dosažena požadovaná kolmost. Po vyrovnání se rám dotáhne. Rám se k úhelníku vyrovná poklepem hliníkového kladiva.

Všechny rozměry nad šířku 30 mm ve firmě PRECIZ, s.r.o. frézují na dvou vřetenové frézce, oboustranně na jedno upnutí. Tato technologie je výrazně produktivnější a používá se od roku 2018. Před tímto rokem se všechny díly také brousily v rámech.

Čtyřhrany se brousí ve svěrácích do rozměrů 30\*30 mm, v rámech je obtížné čtyřhrany správně vyrovnat, upnutí do svěráků garantuje kolmost stran.

## 6. Broušení čel

Pro účely úpravy povrchu a dosažení kolmosti čel k ostatním obrobeným plochám, se využívá broušení čel obrobků. Díly jsou upnuty hydraulickým svěrákem v horizontální rovině. Svěrák je kolmý na osu broušící hlavy. Segmentová hlava zarovná čela všech upnutých obrobků.

## 7. Rovnání obrobeného materiálu

Závěrem výrobního procesu je rovnání obroušeného materiálu, označováno jako „rovnání na hotovo“. Díly lze rovnat manuálně nebo strojově ve válcové rovnačce nebo pod rovnacím lisem. V žádném případě se však nesmí poškodit povrch opracovaných dílů. Je vyloučené používání kladiva. Díly se natahují, ohýbají či kroutí ve vidlích. Práce se provádí na kalibrovaných rovnacích stolech s kalenou ocelovou deskou.

## 8. Balení

Jedná se o manuální práci. Pro skladování a dopravu k zákazníkovi se díly balí do ochranného, antikorozičního papíru označovaného jako VCI (volatile corrosion inhibitor). Každý zabalený díl je označen štítkem s čárovým kódem a údaji o čísle firemní zakázky, jakosti materiálu a rozměrech. [16]

## 9. Kontrola

Provádí se namátková kontrola (cca. 10 % dílů zakázky) u všech zakázek. Na kontrolním pracovišti se využívá granitová deska a konvenční měřidla nebo portálové souřadnicové měřící zařízení.



Obr. 39 - Měřící granitový stůl s měřidly



Obr. 38 - Souřadnicový měřící stroj Wenzel

## 11.2. Proces měření

### Úvod

Výrobní postup ve firmě PRECIZ, s.r.o. naznačuje poměrně široké spektrum využívaných technologií. Stěžejní součástí celého procesu je ovšem broušení rovinných ploch na vertikálních bruskách se segmentovými hlavami. Firma používá poměrně široký strojový park těchto brusek od německých výrobců Göckel a Reform, standardně obsluhovaný svými zaměstnanci. V současné době firma doplnila stávající stroje dvojicí nových brusek od firmy Schmittwerke MSB. Ty budou v kooperaci s robotickým ramenem KUKA a dalšími prvky automatizace tvořit plně autonomní broušící pracoviště. To by mělo v co největší míře (cca. 75 % rozměrů, vyráběného sortimentu) pokrýt výrobu dílů katalogových rozměrů v nejprodávanějších jakostech W.Nr. 1.2842 a W.Nr. 1.2379. Další materiály budou zařazeny s postupem času a s rostoucí důvěrou v autonomní pracoviště.

## Volba materiálů

Volba těchto materiálů je založena zejména na odbytu. Jejich volba je ale v konečném důsledku zajímavá i z hlediska obrobitelnosti. Ocel W.Nr. 1.2842, dle normy ČSN 42 0002 označovaná jako 19 313, je jednou z nejpoužívanějších univerzálních nástrojových ocelí pro práci za studena a je dobře obrobitelná. Naopak vysoce legovaná ocel (Cr-Mo-V) W.Nr. 1.2379, dle normy ČSN 42 0002 označovaná jako 19 573, s vysokou otěruvzdorností a houževnatostí je obrobitelná velmi obtížně. Tyto rozdílné vlastnosti mohou napomoci i k řádnému prověření schopností nových brousicích strojů.

### Jakosti dle norem

W.Nr	Barevné označení	DIN	ČSN	Böhler	Uddelholm	AISI	poldi	Afnor	PLN
1.2842		90MnCrV8	19 313	K 720		02	STABIL SP	90 MCV8	NMW
1.2379		X153CrMoV12	19 573	K 110	Swerler 21	D2	2002K	Z160CDV12	NC11LV

Obr. 40 - Označení zvolených materiálů dle různých norem [26]

## Cíle a postup měření

Cílem praktické části a celého procesu měření je určit nejvhodnější parametry broušení, které budou následně použity jako výchozí, při autonomním provozu brusek MSB. Ty mají oproti stávajícím brusům výhodu ve větší variabilitě nastavení a odlišují se svou konstrukcí.

Z naměřených hodnot a hodnot poskytnutých firmou z obdobného měření v roce 2015, bude analyzován i ekonomický přínos volby segmentů a nových brusek v tomto časovém úseku.

Brusky MSB disponují výkonnějšími motory. Pro plynulé změny otáček brousicího kotouče jsou vybaveny frekvenčním měničem. To u starších brusek není možné. Mají robustně konstruované vřeteno, které by mělo kladně ovlivňovat tuhost stroje. Dalším rozdílem je vedení suportu v ose x. Brusky MSB využívají lineární vedení. Stávající stroje používají odvalování ložiska po kalené vodící liště.

Nastavitelnými parametry při měření jsou hodnoty posuvu, přísuvu a velikosti otáček. Přířisuv je ve firmě používán stupňovitý. To v praxi znamená, že za zvolenou jednotku času se brousicí hlava přisune o zvolenou hodnotu v milimetrech. Tímto přísuvem se zvyšuje tlak, kterým segmentová hlava tlačí na obrobek, ale současně také

kompenzuje úbytek segmentu. Při pokusech bylo snahou měnit vždy pouze jednu veličinu, aby bylo možno vyhodnotit její vliv.

Výsledky broušení by se daly ovlivnit i složením segmentové hlavy, která se skládá ze 14 segmentových kamenů a výsledným průměrem 800 mm. Pro broušení se používá složení segmentové hlavy, které se osvědčilo na starších modelech brusek a vychází z výsledků dřívějšího testování.

Vždy se používá kombinace 4 měkčích segmentů a 10 tvrdších, ve firmě označovaných jako výkonnostních segmentů. Význam použití měkčích segmentů je ve hlazení a celkovém zlepšování drsnosti povrchu obrobku. Zbylých 10 je voleno výhradně z důvodu dobrého broušicího účinku.

Uložení segmentů v broušicí segmentové hlavě je střídavé v následujícím rozložení:

1-2-1-3-1-2-1-3. Snahou je rovněž zajistit vyváženost segmentové hlavy.

## Použité segmentové kameny

Materiál W.Nr. 1.2379

Test 1, Test 2, Test 3

4x	Swaty 2A 30/2 G7+BX00	hnědý
10x	Dorfner 50A46-K11-8VG13EX	bílý

Materiál W.Nr. 1.2842

Test 1

4x	Swaty 2A 30/2 G7+BX00	hnědý
10x	Dorfner 5013A/3G-V8-BA3	hnědý

Test 2, Test 3

4x	Swaty 2A 30/2 G7+BX00	hnědý
10x	Swaty 24/9J8/3V58	modrý

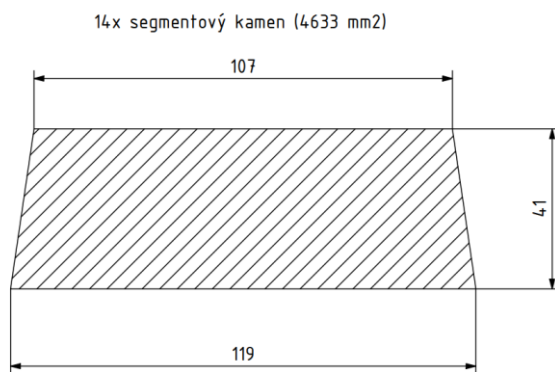
Segmenty na Obr. 41 jsou zleva Swaty 2A 30/2 G7+BX00, Dorfner 50A46-K11-8VG13EX, Swaty 24/9J8/3V58 a Dorfner 5013A/3G-V8-BA3.



Obr. 41 - Použité brousící segmenty

Měření spočívalo v 10minutových broušicích testech, které se ve firmě PRECIZ, s.r.o. používají. K upínacímu magnetu v loži brusky bylo upevněno 5 stejných desek dostatečné tloušťky o plošných rozměr 400x1000 mm. Byly nastaveny testované hodnoty a test se nechal proběhnout. V průběhu měření se zaznamenávalo zatížení motoru zobrazované na ovládacím panelu brusky a povrchovým teploměrem se kontrolovala teplota obráběného materiálu.

Po skončení testu se zaznamenávala hodnota tloušťky broušeného kusu a hodnota délky broušicího kamene. Tyto hodnoty následně sloužili k výpočtu úbytku materiálu a k výpočtu úbytku broušicího segmentu v milimetrech. Ze znalosti plošných rozměrů desek i segmentových kamenů bylo možné dopočítat objemové úbytky broušeného materiálu a segmentů.



Obr. 42 - Rozměr segmentu brusky MSB



Obr. 43 - Broušící hlava brusky MSB

Po zpracování naměřených hodnot formou tabulek v programu Excel bylo potřeba měření vyhodnotit. V praxi existuje několik možností, jak hodnotit efektivitu procesu broušení. Patří mezi ně:

Úběr určený objemem odebraného materiálu	$Q_m \text{ (mm}^3 \cdot \text{min}^{-1}\text{)}$
Opotřebení nástroje (brusiva), určené jeho spotřebou	$Q_a \text{ (mm}^3 \cdot \text{min}^{-1}\text{)}$
Brusný poměr G-faktor	$g = \frac{Q_m}{Q_a}$
Trvanlivost nástroje	$T \text{ (min)}$
Drsnost obrobeneé plochy	$Ra \text{ (}\mu\text{m)}$
Energetická účinnost broušení	$B_M$



Požadovaným výstupem tohoto měření bylo zhodnocení efektivity na základě brusného poměru G faktoru. Tento způsob vyhodnocení se ve firmě PRECIZ, s.r.o. běžně používá a poskytuje údaj o tom, jak co nejmenším objemovým množstvím segmentu odbrousit co největší objemové množství materiálu. Toto kritérium je voleno i z toho důvodu, že ceny brousicích segmentů tvoří nezanedbatelnou část výrobních nákladů. Cena jednoho segmentu je přibližně 30 euro za kus. Osazení jedné brousicí hlavy je 14 segmentů. To je celkem 420 euro, v přepočtu 10 120 korun. českých.

Při vyhodnocování bylo přihlédnuto i k dosahovaným teplotám materiálu v průběhu broušení. Přípustná je teplota do přibližně 40 °C. Od této teploty výše už dochází ke značným tvarovým změnám vlivem materiálové roztažnosti, tím pádem k nepřesnému broušení. Dále se do materiálu vnáší nežádoucí napětí a dochází i ke zhoršení povrchu po broušení. Proto hodnoty, ačkoliv s dobrým výsledkem brusného faktoru, přesahující teplotu 40 °C nebudou navrhnuty jako doporučené.

Ukázka strojů ve firmě PRECIZ, s.r.o.



Obr. 44 - Bruska Göckel G100 v prostorách firmy



Obr. 45 - Autonomní brusky MSB a robotické rameno KUKA

## 11.3. Výsledky

### Výstupy u materiálu W.Nr. 1.2379

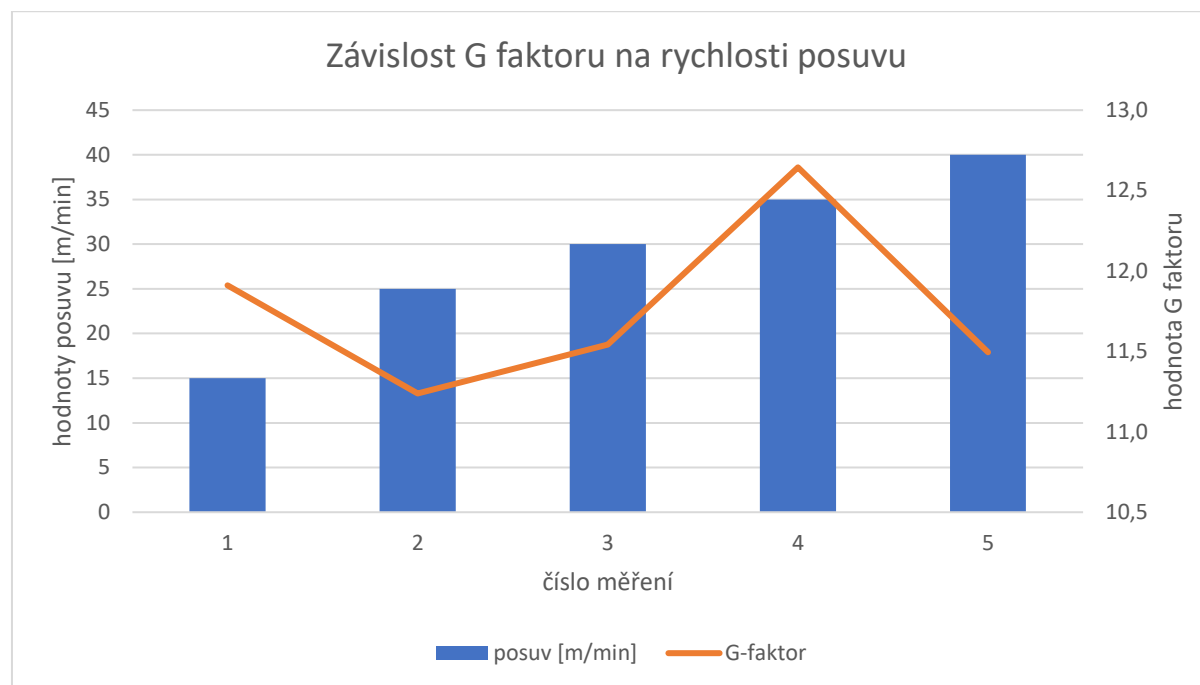
Tab. 1 - Hodnoty získané měřením W.Nr. 1.2379

Test 1															
Materiál - 1.2379	Segmenty - 10 Dorfner 50A46-K11-8VG13EX + 4 Swaty 2A 30/2 G7+BX00								rozměry obrobku - 5x(400x1000) [mm]			Trvání testu - 10 min			
pusob broušení- křížový brus x/dutý brus u	posuv [m/min]	otáčky [ot/min]	řezná rychlost [m/s]	přisuv [mm/s]	rozměr materiálu [mm]		rozměr segmentu [mm]		zatížení motoru [%]	teplota [°C]	ubytek materiálu [mm]	úbytek segmentu [mm]	výkon brusiva [cm <sup>3</sup> /min]	úbytek segmentů [cm <sup>3</sup> /min]	G-faktor
					před	po	před	po							
x	15	450	18,85	0,005/1	18,982	18,418	176,42	174,96	55	38	0,564	1,46	112,8	9,470	11,911
x	25	450	18,85	0,005/1	19,536	18,982	177,94	176,42	55	38	0,554	1,52	110,8	9,859	11,238
x	30	450	18,85	0,005/1	27,3	26,63	202,12	200,33	60	43	0,67	1,79	134	11,610	11,541
x	35	450	18,85	0,005/1	20,741	20,089	180,2	178,61	50	40	0,652	1,59	130,4	10,313	12,644
x	40	450	18,85	0,005/1	27,93	27,3	203,81	202,12	60	43	0,63	1,69	126	10,962	11,495
Test 2															
Materiál - 1.2379	Segmenty - 10 Dorfner 50A46-K11-8VG13EX + 4 Swaty 2A 30/2 G7+BX00								rozměry obrobku - 5x(400x1000) [mm]			Trvání testu - 10 min			
pusob broušení- křížový brus x/dutý brus u	posuv [m/min]	otáčky [ot/min]	řezná rychlost [m/s]	přisuv [mm/s]	rozměr materiálu [mm]		rozměr segmentu [mm]		zatížení motoru [%]	teplota [°C]	ubytek materiálu [mm]	úbytek segmentu [mm]	výkon brusiva [cm <sup>3</sup> /min]	úbytek segmentů [cm <sup>3</sup> /min]	G-faktor
					před	po	před	po							
x	30	500	20,94	0,005/1	29,42	28,675	207,14	205,44	70	47	0,745	1,7	149	11,027	13,513
x	35	500	20,94	0,005/1	21,376	20,741	181,61	180,2	70	36	0,635	1,41	127	9,146	13,887
x	40	500	20,94	0,005/1	30,109	29,42	208,93	207,14	70	45	0,689	1,79	137,8	11,610	11,869
x (test přerušen)	40	550	23,04	0,005/1	26,36	26,011	200,11	199,22	80	48	0,349	0,89	139,6	5,773	12,091
Test 3															
Materiál - 1.2379	Segmenty - 10 Dorfner 50A46-K11-8VG13EX + 4 Swaty 2A 30/2 G7+BX00								rozměry obrobku - 5x(400x1000) [mm]			Trvání testu - 10 min			
pusob broušení- křížový brus x/dutý brus u	posuv [m/min]	otáčky [ot/min]	řezná rychlost [m/s]	přisuv [mm/s]	rozměr materiálu [mm]		rozměr segmentu [mm]		zatížení motoru [%]	teplota [°C]	ubytek materiálu [mm]	úbytek segmentu [mm]	výkon brusiva [cm <sup>3</sup> /min]	úbytek segmentů [cm <sup>3</sup> /min]	G-faktor
					před	po	před	po							
u	40	500	20,94	0,005/1	25,569	25,065	197,33	195,58	45	34	0,504	1,75	100,8	11,351	8,880
u	40	500	20,94	0,005/0,8	24,56	24,062	192,61	190,11	45	36	0,498	2,5	99,6	16,216	6,142
u	40	500	20,94	0,005/0,75	25,065	24,56	195,58	192,61	40	35	0,505	2,97	101	19,264	5,243

Pro materiál W.Nr. 1.2379 byl provedeny tři testy. U prvních dvou se zkoumal vliv posuvu při konstantních otáčkách a konstantním přísuvu. Ve třetím testu se testovala technologická varianta s vykloněnou hlavou (vychýlená osa vřetene) se snahou snížit teplotu broušeného obrobku a snahou ověřit vliv přísuvu.

## Test 1

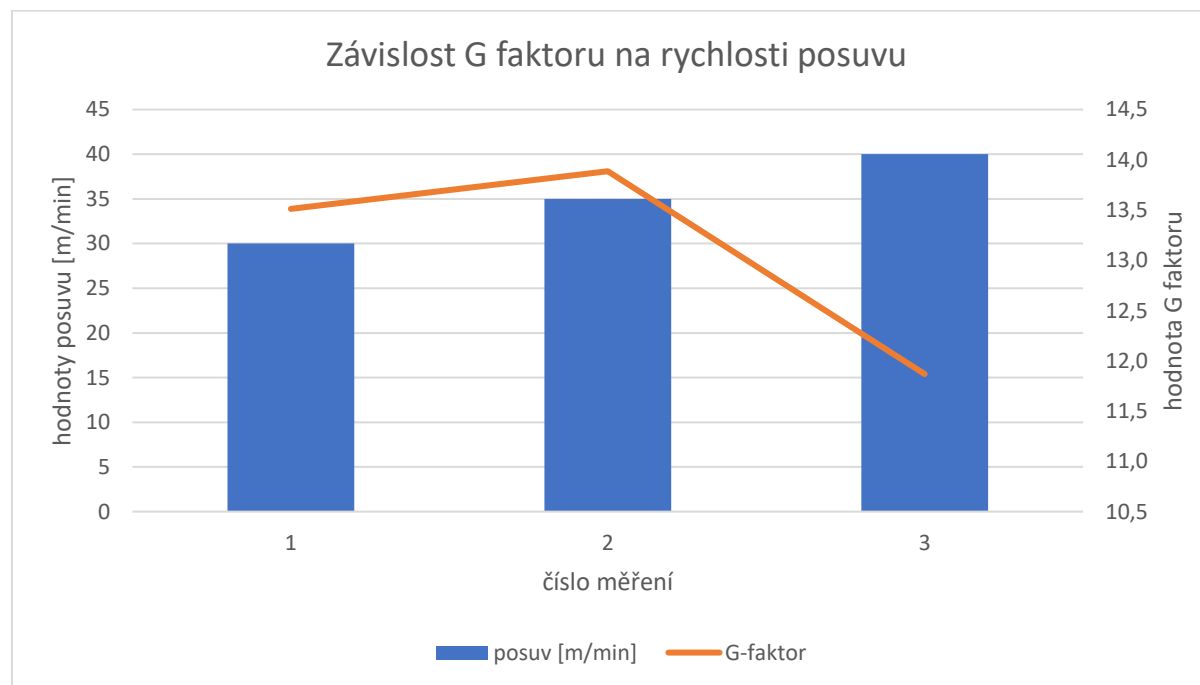
Při měření byly nastaveny otáčky 450 ot/min. Tato hodnota odpovídá řezné rychlosti 18,85 m/s. Přířuv hlavy vřetene byl 0,005/1 mm/s. Volba těchto hodnot odpovídala přibližně hodnotám, co se ve firmě běžně používají. Posuv se měnil od 15 do 40 m/min. Zvyšování rychlosti posuvu bylo prováděno vždy o 5 m/min. Při sledování hodnoty G faktoru si můžeme všimnout nejdříve poklesnutí následně rostoucího trendu až do posuvu 35 m/min. V tomto okamžiku se trend mění a G faktor začíná klesat.



Obr. 46 - Grafický výstup z testu 1 (W.Nr. 1.2379)

## Test 2

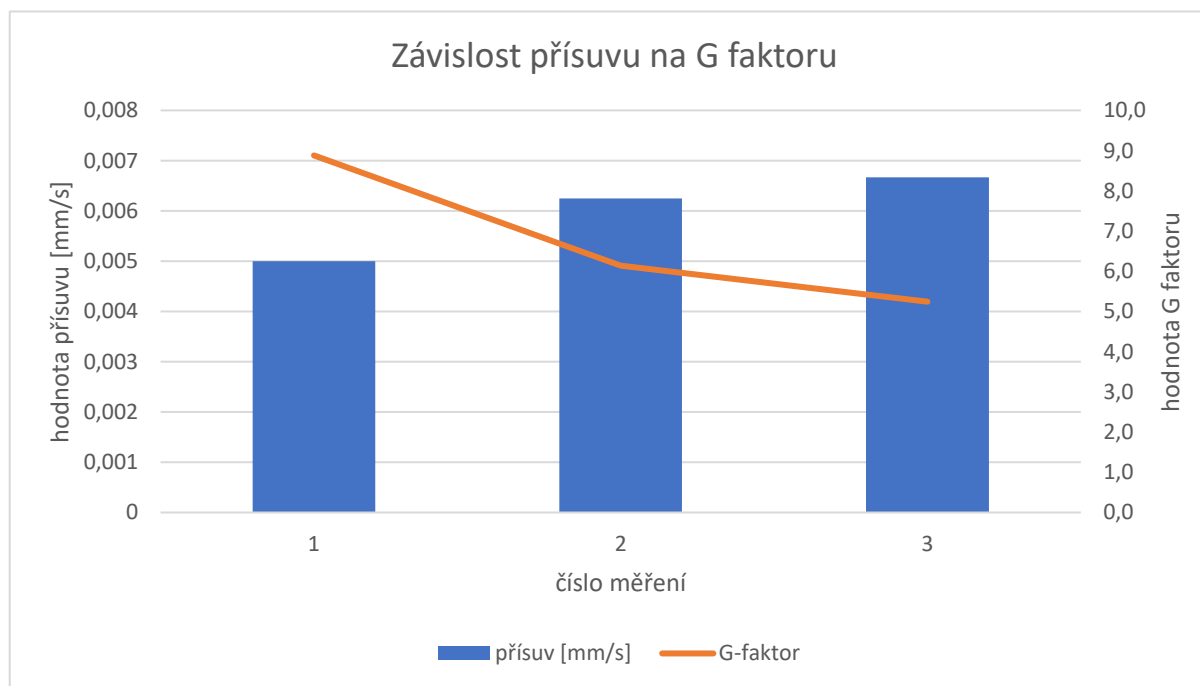
Obdobný pokus jako první. Otáčky byly zvýšeny na 500 ot/min, kterým odpovídá řezná rychlost 20,94 m/s. Posuv se při tomto měření měnil od 30 do 40 m/min s krokem 5 m/min. Přísun byl ponechán na hodnotě 0,005/1 mm/s. Při měření pozorujeme podobný trend jako u testu 1. S rostoucím posuvem roste i G faktor až do hodnoty 35 m/min. S dalším zrychlením jeho hodnota klesá. Do tohoto pokusu byla zařazena i hodnota s otáčkami 550 ot/min a posuvem 40 m/min (není zobrazena v Obr. 47). Teplota však při testování výrazně vzrostla a bylo potřeba test předčasně ukončit.



Obr. 47 - Grafický výstup z testu 2 (W.Nr. 1.2379)

### Test 3

Z důvodu rostoucí teploty vznikla potřeba tuto hodnotu snížit. V úvahu přicházela odlišná technologická varianta broušení v podobě vyklonění osy broušícího vřetena. Dojde ke zmenšení stykové plochy mezi obrobkem a nástrojem. Pro tuto metodu je charakteristický dutý brus zanechávající na obrobku stopu v podobě písmene u. Byla nastavena hodnota otáček na 500 ot/min odpovídající řezné rychlosti 20,94 m/s. Tato volba vycházela z dobře vyhlížející hodnoty G faktoru v testu 2. Posuv byl zvolen 40 m/min. V měření se zkoumal vliv rychlosti přísluvu počínaje hodnotou 0,005/1, přes 0,005/0,8 po 0,005/0,75 mm/s. V tomto případě, se vyklonění vřetene výrazně podepsalo na snížení hodnoty G faktoru. S rychlejším padáním se navíc hodnota dále snižovala. Pozitivním zjištěním shodujícím se s poznatky s teorie je fakt, že vykloněním vřetene opravdu došlo ke snížení teploty obrobku.



Obr. 48 - Grafický výstup z testu 3 (W.Nr. 1.2379)

## Výstupy u materiálu W.Nr. 1.2842

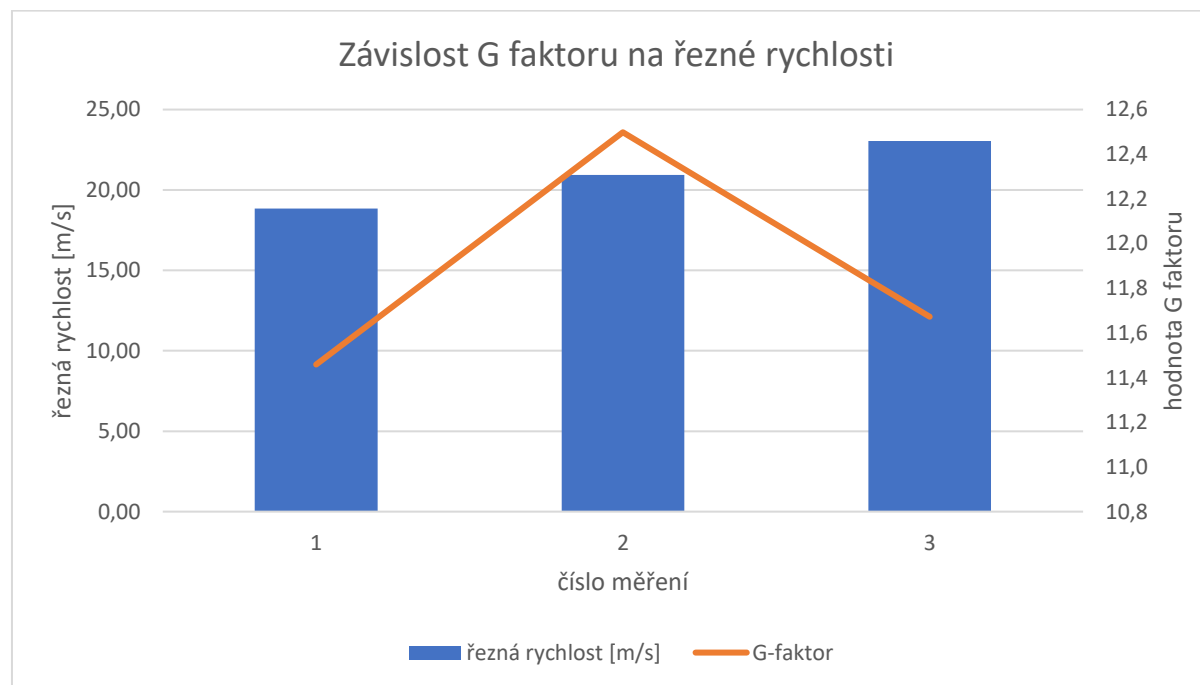
Tab. 2 - Hodnoty získané měřením W.Nr. 1.2379

Test 1															
Materiál - 1.2842	Segmenty - 10 Dorfner 5013A/3G-V8-BA3 + 4 Swaty 2A 30/2 G7+BXOO								rozměry obrobku - 5x(400x1000) [mm]			Trvání testu - 10 min			
pusob broušení- křížový brus x/dutý brus u	posuv [m/min]	otáčky [ot/min]	řezná rychlost [m/s]	přísuv [mm/s]	rozměr materiálu [mm]		rozměr segmentu [mm]		zatižení motoru [%]	teplota[m°C ]	ubytek materiálu [mm]	úbytek segmentu [mm]	výkon brusiva [cm <sup>3</sup> /min]	úbytek segmentů [cm <sup>3</sup> /min]	G-faktor
					před	po	před	po							
x	35	450	18,85	0,003/0,8	19,823	19,247	205,62	204,07	45	34	0,576	1,55	115,2	10,054	11,459
x	35	500	20,94	0,003/0,8	19,247	18,639	204,07	202,57	50	35	0,608	1,5	121,6	9,729	12,498
x	35	550	23,04	0,003/0,8	18,639	18,022	202,57	200,94	50	37	0,617	1,63	123,4	10,573	11,672
Test 2															
Materiál - 1.2842	Segmenty - 10 Swaty 24/9J8/3V58 + 4 Swaty 2A 30/2 G7+BXOO								rozměry obrobku - 5x(400x1000) [mm]			Trvání testu - 10 min			
pusob broušení- křížový brus x/dutý brus u	posuv [m/min]	otáčky [ot/min]	řezná rychlost [m/s]	přísuv [mm/s]	rozměr materiálu [mm]		rozměr segmentu [mm]		zatižení motoru [%]	teplota [°C ]	ubytek materiálu [mm]	úbytek segmentu [mm]	výkon brusiva [cm <sup>3</sup> /min]	úbytek segmentů [cm <sup>3</sup> /min]	G-faktor
					před	po	před	po							
x	35	650	27,23	0,003/0,45	15,659	15,033	211,49	208,39	60	40	0,626	3,1	125,2	20,107	6,227
x	35	650	27,23	0,003/0,8	16,729	16,237	214,91	212,98	40	39	0,492	1,93	98,4	12,518	7,860
x	35	650	27,23	0,003/0,9	16,128	15,659	212,9	211,49	40	34	0,469	1,41	93,8	9,146	10,256
Test 3															
Materiál - 1.2842	Segmenty - 10 Swaty 24/9J8/3V58 + 4 Swaty 2A 30/2 G7+BXOO								rozměry obrobku - 5x(400x1000) [mm]			Trvání testu - 10 min			
pusob broušení- křížový brus x/dutý brus u	posuv [m/min]	otáčky [ot/min]	řezná rychlost [m/s]	přísuv [mm/s]	rozměr materiálu [mm]		rozměr segmentu [mm]		zatižení motoru [%]	teplota[m°C ]	ubytek materiálu [mm]	úbytek segmentu [mm]	výkon brusiva [cm <sup>3</sup> /min]	úbytek segmentů [cm <sup>3</sup> /min]	G-faktor
					před	po	před	po							
x	35	500	20,94	0,003/0,45	15,033	14,473	208,37	205,23	45	38	0,56	3,14	112	20,367	5,499
x	35	500	20,94	0,003/0,72	17,192	16,729	217,52	214,91	35	39	0,463	2,61	92,6	16,929	5,470
x	35	500	20,94	0,003/0,8	17,65	17,192	218,91	217,52	35	34	0,458	1,39	91,6	9,016	10,160

Pro materiál W.Nr. 1.2842 byly provedeny 3 testy. Posuv byl vždy konstantní 35 m/min. V prvním měření se zkoumal vliv otáček (řezné rychlosti). Ve druhém a třetím se testoval vliv přísuvu, za rozdílných otáček.

## Test 1

Při měření byl posuv brusky nastaven na 35 m/min. Přířuv brusné hlavy byl konstantní 0,003/0,8 mm/s. Proměnným parametrem byly otáčky, které se měnily od 450 ot/min do 550 ot/min s krokem 50. Odpovídající řezné rychlosti byly 18,85 dále 20,94 a 23,04 m/s. G faktor nejprve roste a poté klesá. Z tohoto průběhu lze vyvodit, že příliš nízké stejně tak jako příliš vysoké otáčky nejsou dobré pro efektivitu broušení na základě hodnocení dle G faktoru. Nejefektivnější se tedy jeví nastavení s 500 ot/min, odpovídající řezné rychlosti 20,94 m/s.

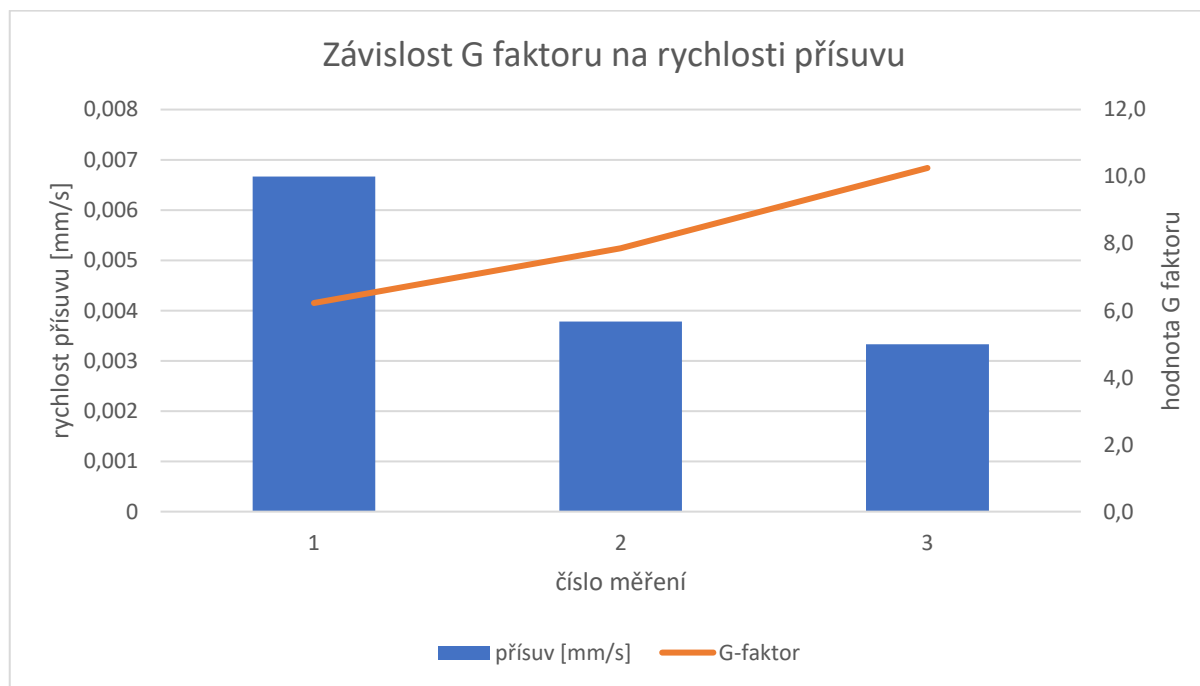


Obr. 49 - Grafický výstup z testu 1 (W.Nr. 1.2842)



## Test 2

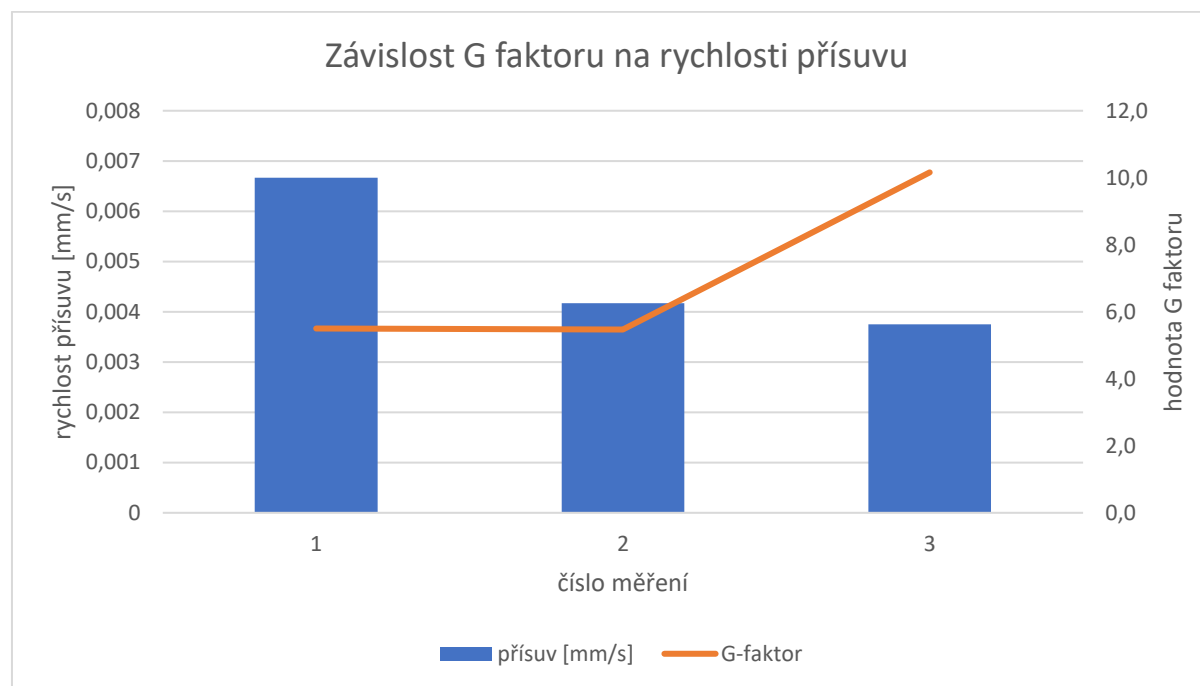
Druhý test patřil spíše k experimentálním než systematickým. Snahou bylo prověřit chování stroje ve vysokých otáčkách, které byly stanoveny na 650 ot/min. Těmto otáčkám odpovídá řezná rychlost 27,23 m/s. Posuv byl 35 m/min. Proměnným parametrem byla hodnota přísuvu. S klesající rychlostí přísuvu rostla hodnota G faktoru. Při rychlém přísuvu byly segmenty hodně namáhány a rychle ubývaly. Při pomalejším přísuvu se jejich úbytek snižoval. Snižoval se i úběr materiálu, ale ne tak výrazně jako úbytek segmentů, což v důsledku vedlo k růstu G faktoru.



Obr. 50 - Grafický výstup z testu 2 (W.Nr. 1.2842)

### Test 3

V posledním testu byl zkoumán opět vliv přísuvu. Posuv 35 m/min a otáčky 500 ot/min, tedy řezná rychlost 20,94 m/s, byly převzaty z testu 1, kde nabývaly dobrých výsledků. Měření přineslo podobné zjištění jako předešlý test 2. Při rychlém přísuvu byly segmenty hodně namáhány. Byla vyvíjena velká přitlačná síla a segmenty rychle ubývaly. Při pomalejším přísuvu se jejich úbytek zpomaloval. Vzhledem k nevelkému snížení množství odbroušeného materiálu následně rostla hodnota G faktoru.



Obr. 51 - Grafický výstup z testu 3 (W.Nr. 1.2842)

## Závěr z testování materiálu W.Nr 1.2379

Nejlepšího výsledku G faktoru bylo dosaženo v testu 2. G faktor byl stanoven na hodnotu 13,887 a byla dodržena i podmínka teploty do 40°C.

Navrhované parametry pro broušení materiálu W.Nr. 1.2379 jsou následující:

Posuv	35 [m/min]
Otáčky	500 [ot/min]
Přísuv	0,005/1 [mm/s]

## Závěr z testování materiálu W.Nr 1.2842

Nejlepšího výsledku G faktoru bylo dosaženo v testu 1. G faktor byl stanoven na hodnotu 12,498 a byla dodržena i podmínka teploty do 40°C. Zároveň bylo zjištěno, že složení segmentového kotouče s 10 kameny Dornier 5013A/3G-V8-BA3 dosahuje lepších výsledků než se segmenty Swaty 24/9J8/3V58

Navrhované parametry pro broušení materiálu W.Nr. 1.2842 jsou následující:

Posuv	35 [m/min]
Otáčky	500 [ot/min]
Přísuv	0,003/0,8 [mm/s]

## 11.4. Progres v broušení

Měřením v této bakalářské práci byla získána řada hodnot. Jejich využití směrem k zvýšení výkonu výroby je velmi účelné, ale lze díky nim analyzovat i ekonomické hledisko broušení, které rozebere následující část.

K analýze ekonomického hlediska broušení v průběhu existence firmy napomohou hodnoty získané z velmi podobného měření v roce 2015, které firma poskytla.

Měřením v roce 2015 se testoval rozdíl mezi výkony obyčejných levných brousicích segmentů a dražších výkonnostních segmentů. Cílem tehdy bylo rozhodnout, zdali se vyplatí vynaložit vyšší náklady na nákup výkonnostních segmentů a ušetřit v oblasti variabilních nákladů a nákladů spojených s výměnou segmentů v průběhu broušení. Levnější segmenty je potřeba častěji měnit vlivem jejich rychlejšího úbytku. To v důsledku také zpomaluje práci, snižuje výkon a zvyšuje náklady. Tehdejší měření prokázala výhodnost dražších segmentů, které jsou od té doby využívány a jsou použity i v měření této bakalářské práce.

Výstupem měření z roku 2015 byly také hodnoty úbytku segmentu v jednotkách  $\text{cm}^3/\text{min}$  a objem ubroušeného materiálu rovněž v jednotkách  $\text{cm}^3/\text{min}$ . Ty jsou jedním z výstupů i měření této práce a slouží jako výchozí k dalším výpočtům.

Předpokladem k ekonomickému ohodnocení broušení je stanovení množství odbroušeného materiálu v  $\text{cm}^3$  za rok. Tato informace byla pro materiál W.Nr. 1.2379 a W.Nr. 1.2842 poskytnuta oddělením technologie ve firmě. Díky znalosti objemu segmentů, cenám segmentů a sazbám variabilních nákladů mohly být dopočítány některé roční variabilní náklady. Přesněji výrobní a mzdové náklady, náklady na nákup segmentů a náklady na výměnu segmentů.

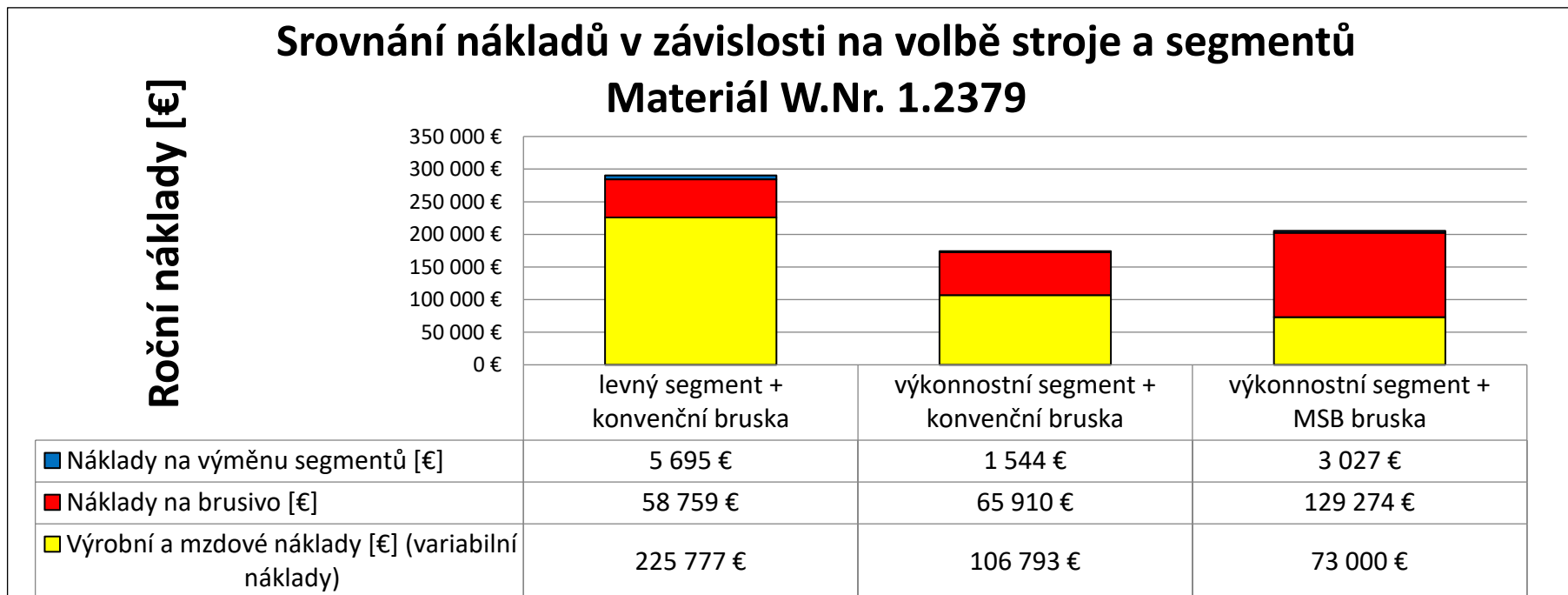
V roce 2015 se porovnávaly náklady s ohledem na druh použitých segmentů. Nyní můžeme k těmto hodnotám přidat i vliv nové technologie v podobě brusek MSB.

Grafy o třech sloupcích ukazují, jakých nákladů je zapotřebí při použití levných segmentů a konvenčních brusek, výkonnostních segmentů a konvenčních brusek a výkonnostních segmentů a nových automatických brusek.

## Analýza nákladů u materiálu W.Nr. 1.2379

Tab. 3 - Rozbor nákladů u materiálu W.Nr. 1.2379

<b>W.Nr. 1.2379</b>	<b>levný segment + konvenční bruska</b>	<b>výkonnostní segment + konvenční bruska</b>	<b>výkonnostní segment + MSB bruska</b>
Označení	2A24/9 EF13 + 5V12T5/45 Standard	50A46-K11-8VG13EX + 2A 30/2 G7+BX00	50A46-K11-8VG13EX + 2A 30/2 G7+BX00
Segment Mix	10+4	10+4	10+4
Datum	16.01.2015	16.01.2015	17.04.2023
Roční odbroušený objem [cm3]	46 354 845	46 354 845	46 354 845
Výkon brusiva [cm3/min]	41,06	86,81	127,00
Úbytek brusiva [cm3/min]	5,56	3,19	9,15
Objem jednoho segmentu [cm3]	787,61	787,61	787,61
Cena segmentu [€/ks]	7,37	30,50	30,50
Hodinová sazba [€/min]	0,20	0,20	0,20
Výměna segmentů [min]	3,57	3,57	3,57
Spotřeba času [min]	1 128 885	533 965	364 999
Spotřeba segmentů [ks]	7 973	2 161	4 238
Výrobní a mzdové náklady [€] (variabilní náklady)	225 777 €	106 793 €	73 000 €
Náklady na brusivo [€]	58 759 €	65 910 €	129 274 €
Náklady na výměnu segmentů [€]	5 695 €	1 544 €	3 027 €
<b>Celkové náklady [€]</b>	<b>290 231 €</b>	<b>174 247 €</b>	<b>205 301 €</b>



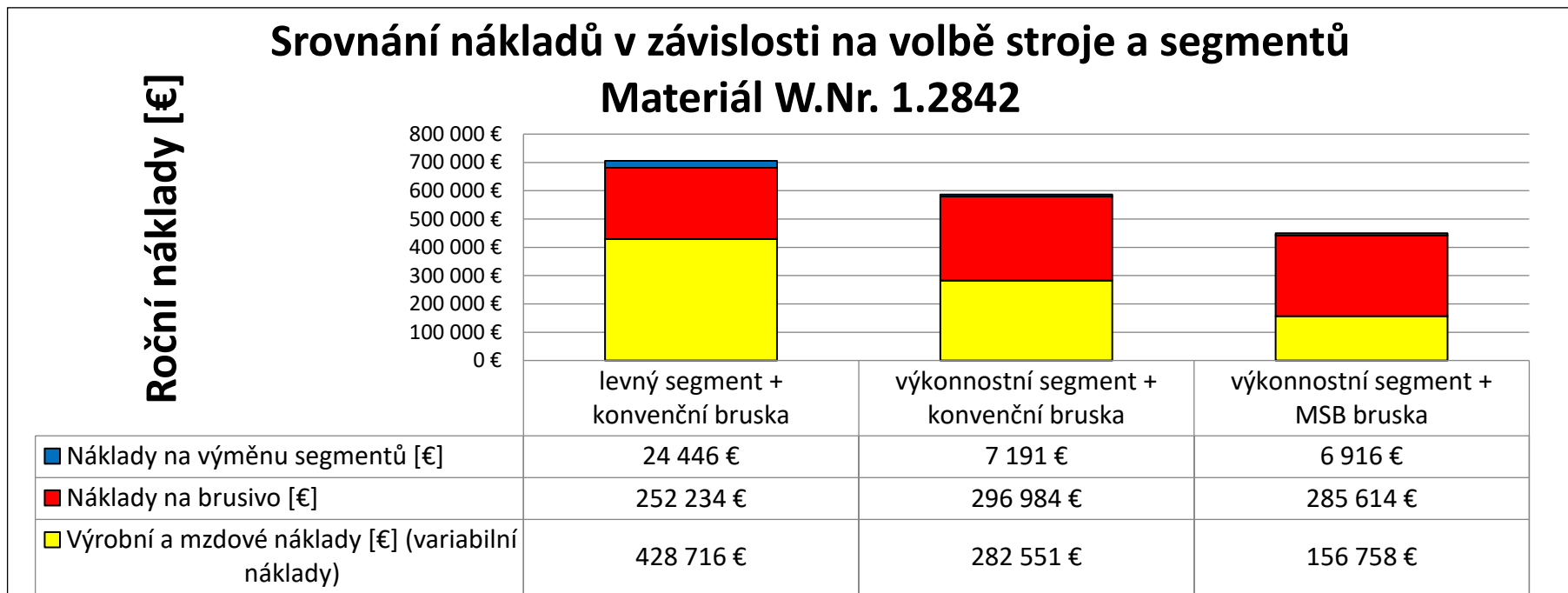
Obr. 52 - Grafické znázornění nákladů pro W.Nr. 1.2379

Graf názorně ukazuje vývoj tří nákladových skupin. Zaměříme-li se na variabilní náklady, můžeme sledovat jejich pokles s každým technologickým vylepšením. Vylepšení znamenala zkrácení času broušení a tím i snížení nákladů vázaných na čas. Náklady na brusivo naopak rostou. S tímto vývojem se počítalo z důvodu vyšší ceny výkonostního brusiva. Překvapivý je výrazný nárůst ceny brusiva u brusek MSB. Ten je způsoben velkým úbytkem segmentů při broušení. Roli hraje i fakt, že W. Nr. 1.2379 je špatně obrobitelný materiál. Nadruhou stranu je broušeno se dobrým úběrem materiálu, který se podepsal v již zmíněných variabilních nákladech. Náklady na výměnu segmentů se odvíjejí od množství spotřebovaných kusů segmentů. Pozitivním zjištěním z grafu je, že díky novým technologiím lze neustále zvyšovat produktivitu, bez rozšíření výrobních prostor, náročných na výši investic do nemovitostí. Z důvodu vysokých nákladů na brusivo by bylo vhodné se opět zabývat jeho optimalizací.

## Analýza nákladů u materiálu W.Nr. 1.2842

Tab. 4 - Rozbor nákladů u materiálu W.Nr. 1.2842

<b>W.Nr. 1.2842</b>	<b>levný segment + konvenční bruska</b>	<b>výkonnostní segment + konvenční bruska</b>	<b>výkonnostní segment + MSB bruska</b>
Označení	2A24/9 EF13 + 5V12T5/45 Standard	5013A/36-V8-BA3 + 2A 30/2 G7+BX00	5013A/36-V8-BA3 + 2A 30/2 G7+BX00
Segment Mix	10+4	10+4	10+4
Datum	16.01.2015	16.01.2015	17.04.2023
Roční odbroušený objem [cm <sup>3</sup> ]	95 308 980	95 308 980	95 308 980
Výkon brusiva [cm <sup>3</sup> /min]	44,46	67,46	121,60
Úbytek brusiva [cm <sup>3</sup> /min]	12,58	5,61	9,73
Objem jednoho segmentu [cm <sup>3</sup> ]	787,61	787,61	787,61
Cena segmentu [€/ks]	7,37	29,50	29,50
Hodinová sazba [€/min]	0,20	0,20	0,20
Výměna segmentu [min]	3,57	3,57	3,57
Spotřeba času [min]	2 143 581	1 412 754	783 791
Spotřeba segmentů [ks]	34 224	10 067	9 682
Výrobní a mzdové náklady [€] (variabilní náklady)	428 716 €	282 551 €	156 758 €
Náklady na brusivo [€]	252 234 €	296 984 €	285 614 €
Náklady na výměnu segmentů [€]	24 446 €	7 191 €	6 916 €
<b>Celkové náklady [€]</b>	<b>705 397 €</b>	<b>586 726 €</b>	<b>449 288 €</b>



*Obr. 53 - Grafické znázornění nákladů pro W.Nr. 1.2842*

Graf pro snadněji obrobitelný materiál W. Nr. 1.2842 je velmi příznivý ve všech směrech. S novou technologickou změnou opět klesla spotřeba času a tím i variabilní náklady. Přesto, že pro konvenční brusku s výkonnostními segmenty náklady na brusivo vzrostly, na bruskách MSB se tyto náklady podařilo opět snížit. Také počet použitých segmentů při broušení na bruskách MSB je nejnižší, čímž klesly náklady na jejich výměnu. Graf opět ukazuje, že je možné zvýšit produktivitu i bez rozšíření výrobních prostorů, a to i za snížení nákladů. Vzhledem k tomu, že náklady na brusivo jsou u nových strojů největší položkou, bylo by opět vhodné zabývat se její optimalizací.



## 12. Závěr

Práce se zabývala problematikou abrazivní metody obrábění a to broušením. V teoretické části bylo přiblíženo, co to broušení je, jaké jsou jeho počátky a jak se vyvíjelo. Jsou shrnuty jednotlivé druhy strojů používaných k broušení. Jsou rozebrány jednotlivé způsoby broušení osvětlující jejich princip. Značná část práce je věnována problematice složení brousícího nástroje. Na tu navazuje problematika týkající se jeho vyvažování a orovnávaní. Protože existuje celá řada druhů broušení, jsou v práci zobrazeny hlavní tvary kotoučů. Jelikož se broušení v současnosti používá jako dokončovací stejně tak jako hrubovací metoda, práce ukazuje, jakých kvalitativních parametrů se při těchto činnostech dosahuje. Další kapitola tvoří základní vzorce a veličiny popisující kinematiku a dynamiku procesu broušení.

Teoretická část se zabývá nastavením pracovních parametrů u nově implementovaných brusek ve firmě PRECIZ, s.r.o. Měření probíhalo na dvou druzích materiálu zvoleného dle největšího odbytu, neboť autonomní brousící pracoviště by mělo dosahovat vysoké produktivity práce a kapacitně tak ulevit výrobě s lidskou obsluhou. Snahou bylo navrhnout nejefektivnější parametry posuvu, přísuvu a otáček v závislosti na hodnotě G faktoru. Tohoto cíle bylo dosaženo, ale pro více vypovídající hodnoty by bylo lepší výsledky doplnit dalšími experimentálními měřeními. Rovněž by bylo vhodnější parametry měnit více systematicky. Tyto nedostatky však byly zapříčiněny i časovým tlakem na termín zprovoznění celého pracoviště. Dalším omezením pro množství provedených testů byla finanční a časová náročnost testování.

S přihlédnutím ke všem těmto vlivům však bylo dosaženo dobrých výsledků efektivity broušení. Byly prozkoumány ve firmě dosud nedosažované hodnoty jak už posuvu nebo otáček a povedlo se prokázat i kvalitní složení segmentové hlavy.

Práce na nastavování brousících parametrů tohoto autonomního brousícího pracoviště budou ve firmě bezesporu pokračovat i na dále a s lepším zvládnutím technologie toto autonomní brousící pracoviště bezesporu dosáhne svého plného potenciálu.

Zajímavým výsledkem byla i nákladová analýza broušení, která ukázala, že zlepšení technologie vede ke zvýšení výkonu, ale ne vždy ke snížení nákladů.

## 13. Seznam tabulek

Tab. 1 - Hodnoty získané měřením W.Nr. 1.2379.....	51
Tab. 2 - Hodnoty získané měřením W.Nr. 1.2379.....	55
Tab. 3 - Rozbor nákladů u materiálu W.Nr. 1.2379.....	61
Tab. 4 - Rozbor nákladů u materiálu W.Nr. 1.2842.....	63

## 14. Seznam obrázků

Obr. 1 - Dosahované parametry obrobených ploch pro abrazivní metody obrábění [2]..	11
Obr. 2 - Hrotové brusky [3].....	13
Obr. 3 - Brusky na díry [3].....	14
Obr. 4 - Příklad rovinné brusky [3].....	15
Obr. 5 - Podélné broušení válcových ploch [3] .....	17
Obr. 6 - Hloubkové a zapichovací broušení [3] .....	18
Obr. 7 - Zapichovací broušení sadou kotoučů [3] .....	18
Obr. 8 - Bezhraté broušení [3] .....	19
Obr. 9 - Vnitřní broušení [3].....	20
Obr. 10 - Broušení rovinných ploch obvodem kotouče [3] .....	21
Obr. 11 - Broušení rovinných ploch čelem kotouče [3].....	21
Obr. 12 - Křížový a obloukový brus [18].....	21
Obr. 13 - Brousící kotouč při záběru [27].....	22
Obr. 14 - Struktura brousícího kotouče [3].....	22
Obr. 15 - Hnědý korund A96 [17] .....	24
Obr. 16 - Růžový korund A98 [19].....	24
Obr. 17 - Bílý korund A99 [20] .....	24
Obr. 18 - Karbid boru [21] .....	25
Obr. 19 - Černý karbid křemíku [22].....	25
Obr. 20 - Zelený karbid křemíku [23].....	25
Obr. 21 - Syntetický diamant [7].....	26
Obr. 22 - Přehled tvarů brousících kotoučů [3] .....	28
Obr. 23 - Příklad označení brousícího kotouče dle normy ČSN 22 4503 [2] .....	29
Obr. 24 - Varianty označování brousících kotoučů [2] .....	29
Obr. 25 - Diamantový orovnávač kotoučů [24] .....	30
Obr. 26 - Problematika statického vyvažování [1].....	31
Obr. 27 - Problematika dynamického vyvažování [1].....	31
Obr. 28 - Doporučení k volbě brousícího kotouče [4].....	32
Obr. 29 - Ukázka tabulky pro volbu řezných podmínek pro rovinné broušení [3] .....	34
Obr. 30 - Řezné síly a jejich složky při broušení [1].....	35
Obr. 31 - Výrobní hala firmy PRECIZ, s.r.o. [25].....	37
Obr. 32 - Označení používaných materiálů [15] .....	39
Obr. 33 - Vertikální pásová pila Behringer .....	40
Obr. 34 - Vertikální pásová pila Kasto .....	40
Obr. 35 - Válce rovnacího stroje.....	41
Obr. 36 - Boční řez vertikální segmentovou brusku [15].....	42
Obr. 37 - Bruska Göckel G100 .....	42

Obr. 38 - Souřadnicový měřicí stroj Wenzel.....	44
Obr. 39 - Měřicí granitový stůl s měřidly.....	44
Obr. 40 - Označení zvolených materiálů dle různých norem [26] .....	45
Obr. 41 - Použité broušící segmenty.....	47
Obr. 42 - Rozměr segmentu brusky MSB .....	48
Obr. 43 - Broušící hlava brusky MSB.....	48
Obr. 44 - Bruska Göckel G100 v prostorách firmy.....	50
Obr. 45 - Autonomní brusky MSB a robotické rameno KUKA.....	50
Obr. 46 - Grafický výstup z testu 1 (W.Nr. 1.2379) .....	52
Obr. 47 - Grafický výstup z testu 2 (W.Nr. 1.2379) .....	53
Obr. 48 - Grafický výstup z testu 3 (W.Nr. 1.2379) .....	54
Obr. 49 - Grafický výstup z testu 1 (W.Nr. 1.2842) .....	56
Obr. 50 - Grafický výstup z testu 2 (W.Nr. 1.2842) .....	57
Obr. 51 - Grafický výstup z testu 3 (W.Nr. 1.2842) .....	58
Obr. 52 - Grafické znázornění nákladů pro W.Nr. 1.2379 .....	62
Obr. 53 - Grafické znázornění nákladů pro W.Nr. 1.2842 .....	64

## 15. Použitá literatura

- [1] MASLOV, J. N. *Teorie broušení kovů*. 1. Spálená 51, 113 02 Praha 1: SNTL - Nakladatelství technické literatury, n. p., 1979.
- [2] HUMÁR, Anton. *Technologie I: Technologie obrábění - 3. část* [online]. Brno, 2005 [cit. 2023-05-10]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/13479-Technologie-i-technologie-obrabeni-3-cast.html>. Interaktivní multimediální text pro bakalářský a magisterský studijní program. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství.
- [3] NĚMEC, Dobroslav. *Strojírenská technologie 3*. 2. Praha: SNTL, 1982.
- [4] *Technologie II - 2. díl* [online]. Ostrava: VSB, 2010 [cit. 2023-07-02]. Dostupné z: [http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/skripta\\_Technologie\\_II\\_2dil.pdf](http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/skripta_Technologie_II_2dil.pdf)
- [5] *Pásové brusky a příslušenství* [online]. Pardubice: NAKO Pardubice s.r.o., 2023 [cit. 2023-06-26]. Dostupné z: <https://www.nako.cz/2312-elektricke-naradi/2335-elektricke-brusky/2340-pasove-brusky.html>
- [6] DOBROVOLNÝ, Bohumil. *Broušení kovů*. 1. Spálená 51, Praha 2: SNTL, 1959, 104 s.
- [7] BARTOŇOVÁ, Renáta. *Technologie broušení* [online]. Kopřivnice, 2012 [cit. 2023-03-09]. Dostupné z: [https://www.sousvodnany.cz/zet/File/drop/ste\\_s2a\\_c5\\_brouseni-1609852366.pdf](https://www.sousvodnany.cz/zet/File/drop/ste_s2a_c5_brouseni-1609852366.pdf). Elektronická učebnice. VOŠ, SOŠ a SOU Kopřivnice.
- [8] *Korund* [online]. Žďár nad Sázavou: malachit-obchod.cz, 2023 [cit. 2023-05-03]. Dostupné z: <https://www.malachit-obchod.cz/atlas-kamenu/korund/>
- [9] *Křemen* [online]. Žďár nad Sázavou: malachit-obchod.cz, 2023 [cit. 2023-05-03]. Dostupné z: <https://www.malachit-obchod.cz/atlas-kamenu/kremen/>

- [10] *Druhy brusiva* [online]. Olomouc: ELUC, 2023 [cit. 2023-05-03]. Dostupné z: <https://eluc.ikap.cz/verejne/lekce/1252>
- [11] HUMÁR, Anton. *Technologie I: Technologie obrábění – 1. část* [online]. Brno, 2003 [cit. 2023-05-10]. Dostupné z: [http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/studijni-opory/TI\\_TO-1cast.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/studijni-opory/TI_TO-1cast.pdf). Interaktivní multimediální text pro bakalářský a magisterský studijní program. VUT v Brně, fakulta Strojního inženýrství.
- [12] *Řezná síla* [online]. Olomouc: ELUC, 2023 [cit. 2023-06-30]. Dostupné z: <https://eluc.ikap.cz/verejne/lekce/1279>
- [13] *PRECIZ, s.r.o.* [online]. 2016 [cit. 2023-03-15]. Dostupné z: <https://www.preciz.cz/>
- [14] KYNCL, Jiří. *Projektování výrobních procesů* [online]. Praha, 2023 [cit. 2023-03-15]. Dostupné z: [https://moodle-vyuka.cvut.cz/pluginfile.php/627812/mod\\_resource/content/1/PVP\\_P2\\_2023.pdf](https://moodle-vyuka.cvut.cz/pluginfile.php/627812/mod_resource/content/1/PVP_P2_2023.pdf). Vysokoškolská přednáška. ČVUT FS.
- [15] *Adaptační plán brusiče*. PRECIZ, s.r.o., Napajedla, 2016.
- [16] *Princip VCI* [online]. Chrášťany: Bropack solutions, 2020 [cit. 2023-03-16]. Dostupné z: <https://www.bropack.cz/clanek/princip-vci-co-to-vlastne-je-a-jak-to-funguje/>
- [17] *Umělý hnědý korund F-80* [online]. Postoloprty: Abranova s.r.o., 2023 [cit. 2023-07-06]. Dostupné z: <https://abranova-eshop.cz/umely-hnedy-korund-f-80-25kg>
- [18] *Rovinné plochy* [online]. Olomouc: ELUC, 2023 [cit. 2023-06-27]. Dostupné z: <https://eluc.ikap.cz/verejne/lekce/1267>
- [19] *Růžový korund F-60* [online]. Postoloprty: Abranova s.r.o., 2023 [cit. 2023-07-06]. Dostupné z: <https://abranova-eshop.cz/ruzovy-korund-f-60-25kg>
- [20] *Umělý bílý korund A99* [online]. Postoloprty: ABRANOVA, s.r.o., 2023 [cit. 2023-07-06]. Dostupné z: <https://abranova.cz/umely-bily-korund-a99>
- [21] *Karbid boru* [online]. Postoloprty: Abranova s.r.o., 2023 [cit. 2023-07-06]. Dostupné z: <https://abranova.cz/karbid-boru>
- [22] *Karbid křemíku černý F-600* [online]. Postoloprty: Abranova s.r.o., 2023 [cit. 2023-07-06]. Dostupné z: <https://abranova-eshop.cz/karbid-kremiku-cerny-f-600-25kg>
- [23] *Zelený karbid křemíku* [online]. Postoloprty: Abranova s.r.o., 2023 [cit. 2023-07-06]. Dostupné z: <https://abranova.cz/karbid-kremiku--zeleny>
- [24] *Diamantový orovnávač kotoučů*. In: *Primadilna* [online]. Praha: TrueTech s.r.o. 2021, 2021 [cit. 2023-05-04]. Dostupné z: [https://www.primadilna.cz/Diamantovy-orovnavac-kotoucu-pro-univerzalni-nastrojovou-brusku-5C-a-R8-Warco-d4293.htm?gclid=Cj0KCQjwr82iBhCuARIsAO0EAZwbAT\\_vEzaCG8ZQhhLKXylj8i-tNOgHUtmleJ5u-zB1wvjv7J3fQMUAoAozrEALw\\_wcB](https://www.primadilna.cz/Diamantovy-orovnavac-kotoucu-pro-univerzalni-nastrojovou-brusku-5C-a-R8-Warco-d4293.htm?gclid=Cj0KCQjwr82iBhCuARIsAO0EAZwbAT_vEzaCG8ZQhhLKXylj8i-tNOgHUtmleJ5u-zB1wvjv7J3fQMUAoAozrEALw_wcB)

- [25] Příklad výrobního a logistického centra PRECIZ. In: *PSG* [online]. Napajedla: PSG a.s., 2014 [cit. 2023-03-15]. Dostupné z: <https://www.psg.cz/reference/pristavba-vyrobniho-a-logistickeho-centra-preciz>
- [26] *Jakosti dle chemické analýzy* [online]. Napajedla: PRECIZ, s.r.o., 2016 [cit. 2023-07-30]. Dostupné z: <https://www.preciz.cz/sluzby/prevodnik-materialu>
- [27] *Broušení: Brousící nástroje* [online]. Olomouc: ELUC, 2023 [cit. 2023-06-27]. Dostupné z: <https://eluc.ikap.cz/verejne/lekce/1825>