



**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

---

**Fakulta strojní**

**Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**

**Broušení kuželové plochy na ozubeném kole převodovky**

**Grinding of the conical surface on the gearbox wheel**

bakalářská práce

Studijní program: Výroba a ekonomika ve strojírenství

Studijní obor: Technologie, materiály a ekonomika ve strojírenství

Vedoucí práce: prof. Dr. Ing. František Holešovský

**Martin Lelek**

Praha 2016

Vysoká škola: ČVUT v Praze  
Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie

Fakulta: strojní  
Akademický rok: 2015/2016

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

pro **Martin Lelek**

obor Technologie, materiály a ekonomika strojírenství

Název: Broušení kuželové plochy na ozubeném kole převodovky

Název anglicky: Grinding of the conical surface on the gearbox wheel

### Zásady pro vypracování:

1. Studium literatury.
2. Seznámení s problematikou ve výrobě.
3. Vytvoření teoretické části práce a návrh experimentů.
4. Návrh postupu, varianty a experimentální ověření.
5. Konzultace návrhů ve výrobě.
6. Úprava a ověření navrhovaných závěrů ve výrobě.

Vedoucí bakalářské práce: prof. Dr. Ing. František Holešovský


Datum zadání bakalářské práce: 25. 4. 2016

Termín odevzdání bakalářské práce: 1. 7. 2016

Neodevzdá-li student bakalářskou nebo diplomovou práci v určeném termínu, tuto skutečnost předem písemně zdůvodnil a omluva byla děkanem uznána, stanoví děkan studentovi náhradní termín odevzdání bakalářské nebo diplomové práce. Pokud se však student řádně neomluvil nebo omluva nebyla děkanem uznána, může si student zapsat bakalářskou nebo diplomovou práci podruhé.

*Diplomant 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.*

Zadání bakalářské práce převzal dne: 25. 4. 2016

  
.....  
Diplomant

  
.....  
Vedoucí ústavu



.....  
Děkan

V Praze

dne 25. 4. 2016

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma **Broušení kuželové plochy na ozubeném kole převodovky** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum

Martin Lelek

## Poděkování

Děkuji tímto prof. Dr. Ing. Františku Holešovskému za cenné rady a připomínky při vypracování bakalářské práce.

Dále děkuji Dipl.-Ing. Achimu Günterovi za pomoc při realizaci navržených řešení v závodě Škoda Auto a.s.

# Obsah

Prohlášení.....	- 1 -
Poděkování.....	- 2 -
Obsah.....	- 3 -
ABSTRAKT.....	- 5 -
ÚVOD.....	- 6 -
Analytická část.....	- 8 -
1. IDENTIFIKACE PROCESU BROUŠENÍ.....	- 8 -
1.1. TECHNOLOGICKÉ VLIVY NA INTEGRITU POVRCHU.....	- 10 -
1.1.1. Stroj.....	- 10 -
1.1.2. Nástroj.....	- 13 -
1.1.3. Obrobek.....	- 19 -
1.1.4. Řezné podmínky a strategie broušení.....	- 20 -
1.1.5. Řezné prostředí.....	- 22 -
1.2. INTEGRITA POVRCHU.....	- 24 -
1.2.1. Drsnost povrchu.....	- 24 -
1.2.2. Geometrické přesnost.....	- 28 -
1.2.3. Zbytková napětí.....	- 29 -
1.2.4. Tvrdost povrchu (zpevnění).....	- 29 -
1.2.5. Změny struktury.....	- 29 -
1.2.6. Tepelné změny.....	- 30 -
Praktická část.....	- 31 -
ÚVOD.....	- 31 -
Princip plánování experimentů.....	- 31 -
2. EXPERIMENT č. 1.....	- 32 -
2.1. Postup měření.....	- 33 -
2.2. Analýza parametrů Rz a Pt.....	- 36 -

2.3.	Analýza parametru Rmr .....	- 37 -
2.4.	Závěr k experimentu č. 1 .....	- 39 -
3.	EXPERIMENT č. 2 .....	- 40 -
3.1.	Postup měření experimentu .....	- 40 -
3.2.	Analýza parametrů Rz a Pt .....	- 42 -
3.3.	Analýza parametru Rmr .....	- 42 -
3.4.	Závěr k experimentu č. 2 .....	- 45 -
4.	EXPERIMENT č. 3 .....	- 45 -
4.1.	Postup měření .....	- 46 -
4.2.	Závěr k experimentu č. 3 .....	- 47 -
5.	ZÁVĚR .....	- 47 -
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ .....	- 50 -
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK .....	- 52 -
	SEZNAM PŘÍLOH .....	- 54 -

## ABSTRAKT

Tato bakalářská práce shrnuje základní teoretické poznatky o broušení. V úvodu práce je identifikována technologie broušení. V další části je pak popsána integrita povrchu broušené vrstvy a metody jejího hodnocení. Na toto dále navazuje praktická část s využitím moderní CNC brusky. Praktická část je zaměřena na správné nastavení řezných podmínek brusky, tak aby bylo dosaženo požadovaných kvalitativních parametrů.

## ABSTRACT

This bachelor thesis summarizes the basic theoretical knowledge about grinding. The introduction is identified grinding technology. The next section then describes the integrity of the surface ground layer and methods of evaluation. This also follows the practical part using advanced CNC grinding machines. The practical part is focused on the correct setting of cutting conditions grinder, so to achieve the required quality parameters.

## KLÍČOVÁ SLOVA

Broušení, Orovnávání, Drsnost povrchu, Rychlostní poměr, CBN kotouč.

## KEY WORDS

Grinding, Dressing, Surface roughness, Speer ratio, CBN wheel.



# ÚVOD

Tato bakalářská práce se zabývá problematikou technologie broušení, konkrétně problematikou broušení kuželů na ozubených kolech sedmi stupňové automatické převodovky s označením DQ 200. Cílem práce je stanovení takových řezných podmínek, aby bylo dosaženo požadovaných kvalitativních parametrů a zároveň bylo dosaženo maximální produktivity procesu.

Praktická část práce byla realizována v závodě Škoda Auto ve Vrchlabí na CNC brusce, od německé firmy Buderus. Závod se od roku 2012, kdy byla zastavena výroba automobilů, zabývá výrobou automatických převodovek pro celý koncern Volkswagen. Téma závěrečné práce mi bylo přiděleno vedoucím praxe.



**Obrázek 1 - Sestava ozubeného a nezbytných protikusů.**

Problémy se správným nastavením stroje trvají již od uvedení stroje do provozu. V roce 2013 bylo provedeno několik optimalizací, které se týkaly zejména sjednocení technologie pro všechny typy ozubených kol a úspory nákladů na nářadí. Tyto optimalizace probíhaly pod dohledem firmy Buderus. I když tyto optimalizace měly svůj přínos, tak problémy s řeznými podmínkami stále přetrvávají a při současné výrobní kapacitě 2000 převodovek za den jsou stále vážnějším problémem. Špatné řezné podmínky vedou často k tomu, že je dosahováno lepších parametrů drsnosti, než je předepsáno.

To se zprvu nemusí zdát jako problém. Problém nastane, až po namontování do převodovky. Na kuželu ozubeného kola je totiž nasazen synchronní kroužek, a pokud je drsnost kuželu malá, stane se, že na kuželu nedrží a v převodovce dělá hluk.

K podobnému scénáři dochází i v případě, že je drsnost dodržena, ale povrch má malý materiálový nosný podíl a protože se měření materiálového nosného podílu neprovádí, tak se na tuto vadu nepřijde a dílec je namontován do převodovky. Proto jsem se rozhodl, že v rámci praktické části této práce bude měřen i materiálový nosný podíl a snaha bude především o to dosáhnout velkého materiálového nosného podílu a zároveň udržet drsnost v mezích tolerančního pole.

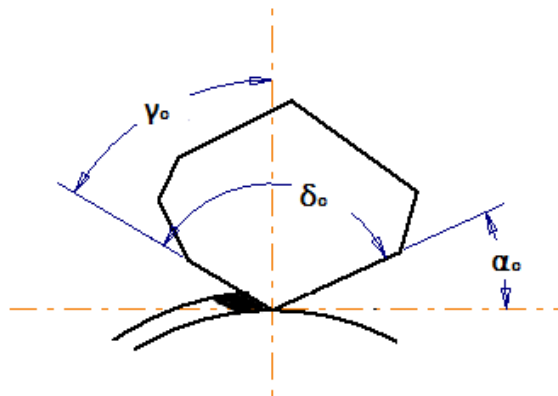
V rámci mého praktikantského pobytu ve firmě byl proveden nespočet zkoušek a to ne jenom s řeznými podmínkami. Byly zkoušeny různé druhy brousicích kotoučů i orovnačů a některé zkoušky trvaly i několik měsíců. A přestože výsledky těchto zkoušek se v řadě případů daly označit za dobré, tak se stále nepodařilo docílit „ideálního stavu“.

# Analytická část

## 1. IDENTIFIKACE PROCESU BROUŠENÍ

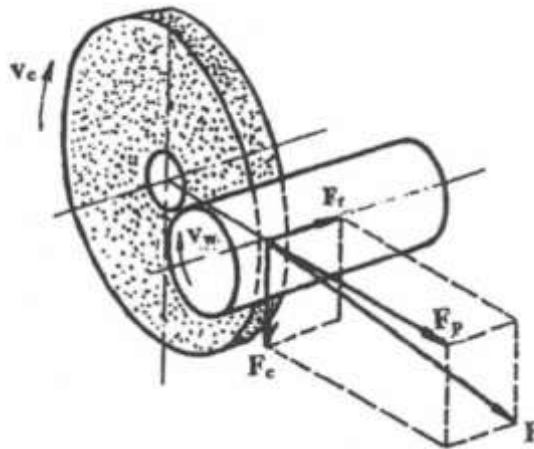
Broušení je dokončovací technologie obrábění, která se používá zejména k obrábění těžko obrábitelných materiálů, jako jsou například kalené oceli, nebo nástrojové materiály. Při této technologii se dosahuje velkých přesností a to jak v oblasti geometrických tolerancí, tak i v jakosti povrchu obráběného materiálu. Velkou výhodou broušení je to, že broušená plocha dosahuje velkého materiálového nosného podílu. Hlavní pohyb koná brousicí nástroj, posuv pak obrobek. V průběhu obrábění dochází k elastické a plastické deformaci, elastická deformace je způsobena působením kotouče na obrobek, zatímco plastická deformace souvisí s odběrem třísek. K odběru povrchové vrstvy dochází rotačním pohybem brousícího nástroje, jehož abrazivní zrna odebírají mikroskopické částičky materiálu. V porovnání se soustružením nebo frézováním je počet odebíraných třísek neobyčejně velký, může za to především velký počet abrazivních zrn kotouče. Tloušťkou třísky se rozumí část povrchové vrstvy obrobku, která je odřezávána jedním zrnem. Tloušťky třísek jsou různé, protože zrna jsou na brousícím kotouči rozmístěna nepravidelně a mají různou výšku [1], [2].

Další odlišnost broušení od soustružení nebo frézování je v řezné geometrii. Při broušení je nemožné přesně definovat úhel řezu, hřbetu nebo čela, protože zrna nemají stejný tvar a jsou v kotouči rozmístěna nahodile. Nicméně orientačně lze určit rozsahy některých řezných úhlů. Úhel  $\delta_0$  je vždy větší než  $90^\circ$ , úhel  $\alpha_0 = 5$  až  $20^\circ$ , úhel  $\gamma_0 = -30$  až  $-60^\circ$ , je záporný [2].



Obrázek 2 - geometrie brusného zrna [2].

Základní složky řezné síly jsou  $F_c$  (tečná složka),  $F_p$  (pasivní složka),  $F_f$  (posuvová složka). Stanovení řezné síly je obtížné, protože do broušení vstupuje mnoho proměnných, proto se pro orientační výpočty používají experimentální vztahy [2].



Obrázek 3 - základní řezné síly při broušení [14].

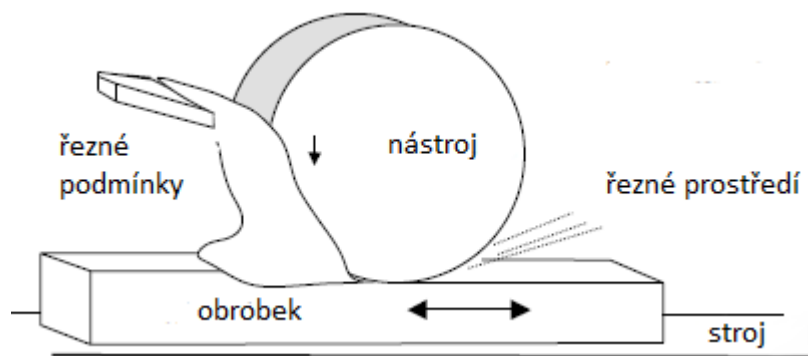
Celý proces probíhá za specifických podmínek. Řezná rychlost může při broušení dosáhnout až 150m/s a je závislá především na možnostech kotouče a na možnostech stroje. V místě styku kotouče s obrobkem vznikají extrémní teploty a to díky tření, tyto nepříznivé vlivy lze částečně snížit použitím procesních kapalin. Zhruba 80% celkové mechanické práce se mění na teplo, zbytek přechází v potenciální energii deformace krystalické mřížky. Ze vzniklého tepla přechází značná část do obrobku (80-90%), část do chladicí kapaliny (10-20%), zbytek do třísky a nástroje. Důsledkem vysokých teplot v místě řezu je změna struktury povrchové vrstvy, která má negativní vliv na finální výrobek. [1], [2].

## 1.1. TECHNOLOGICKÉ VLIVY NA INTEGRITU POVRCHU

Integrita povrchu je soubor vlastností, které ovlivňují povrch finálního výrobku. Povrch není charakterizován pouze geometrickými charakteristikami, ale i povrchovou vrstvou. Po každém obrábění nebo metalurgických procesech nastávají v materiálu změny, Tyto změny se projeví v geometrickém tvaru a povrchové vrstvě a mají zásadní vliv na konečné vlastnosti součásti [3].

Hlavní faktory, které ovlivňují výslednou integritu povrchu jsou:

- Stroj
- Nástroj
- Obrobek
- Řezné podmínky a strategie broušení
- Řezné prostředí

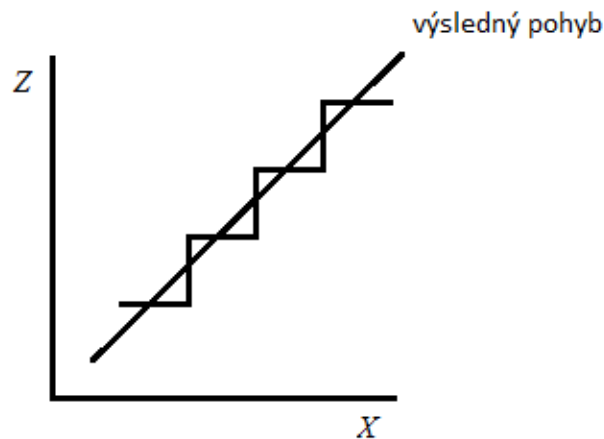


Obrázek 4 - Faktory ovlivňující výslednou integritu povrchu [4].

Pozn.: obrázek byl pro potřeby práce přeložen do češtiny.

### 1.1.1. Stroj

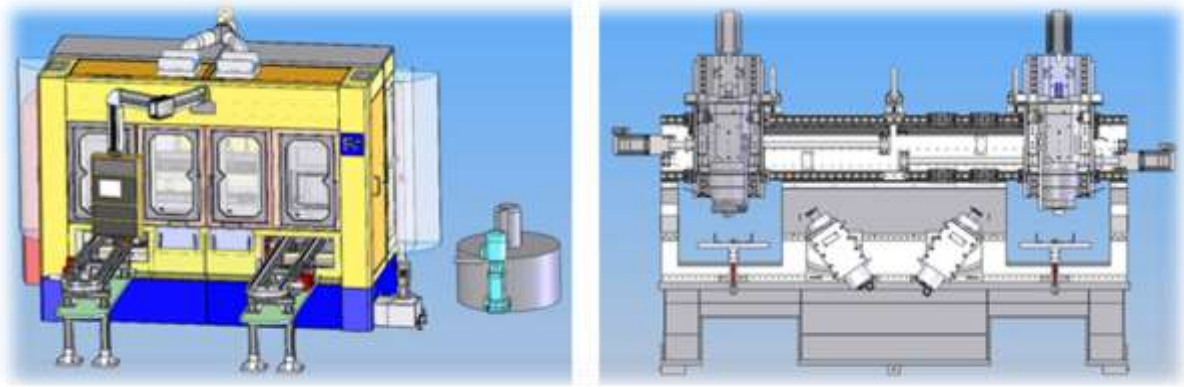
Co se týče stroje a způsobu, jakým ovlivňuje integritu povrchu, tak mezi nejdůležitější prvky patří **tuhost stroje** (kinematická a dynamická), dále pak přesnost, s jakou je stroj vyroben tzn. přesnost, s jakou jsou vyrobeny jednotlivé komponenty stroje, přesnost s jakou je stroj schopen interpolovat pohyby, například při výrobě kuželových ploch je tento faktor rozhodující. Problém, který vzniká při broušení kuželových ploch, kde se vřetenem s broušícím kotoučem pohybuje po šikmé dráze, je v tom, že stroj vytváří šikmý pohyb pomocí os X a Z a pokud je tato interpolace pohybu nepřesná projeví se negativně na vlastnostech povrchové vrstvy. To platí i v případě orovnávaní broušícího kotouče, kdy se na kotouči vytvoří „schodovitý povrch“, který se následně promítne na obráběný dílec [3].



**Obrázek 5 - Princip interpolace pohybu.**

V neposlední řadě je stroj ovlivňován také tepelně, především od pohonů, od ohřívající se kapaliny, která se musí chladit, důsledkem čehož se zahřívají provozní kapaliny a od žhavých třísek, které vznikají při obrábění. Broušící stroje by se daly rozdělit na dvě základní skupiny, brusky základní a brusky speciální. Typ a velikost brusky se volí podle toho, co chceme brousit (velikost obrobku a kotouče), jakých kvalitativních parametrů má být dosaženo a v neposlední řadě je třeba myslet i na výkon, který je potřebný k broušení. Základní brusky jsou: bruska hrotová, bruska bezhrotá, bruska na díry, svislá a vodorovná bruska. Na dokončování rotačních ploch se používají brusky hrotové nebo bezhroté. Pro broušení rovinných ploch se používají brusky horizontální a vertikální. Pro broušení děr pak brusky na díry. Speciální brusky jsou: brusky na ozubení, na závity, na klikové hřídele, na ložiska atd. [2], [3].

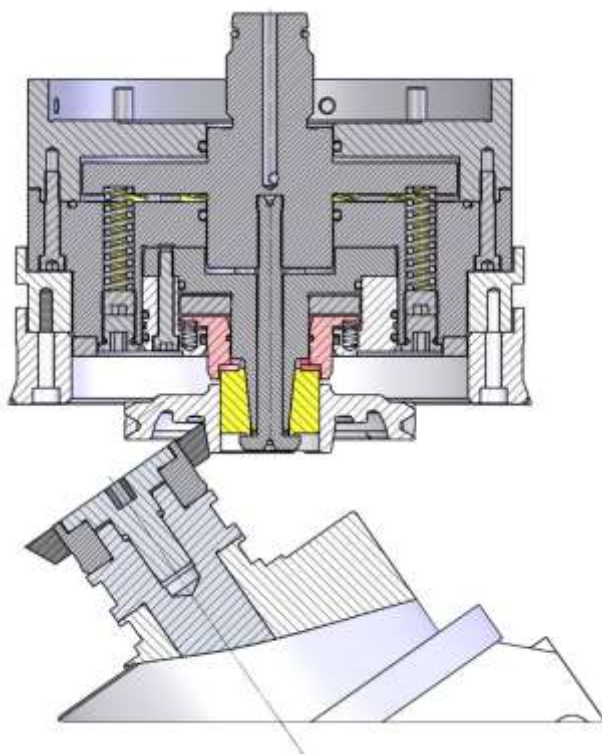
Zkoušky, které budou prováděny v rámci této práce, budou probíhat na moderním CNC vertikálním broušícím centru od německé firmy Buderus. Jedná se o dvou-vřetenový stroj s pórobetonovou konstrukcí, která zajišťuje vysokou tuhost stroje. Vřetena jsou na sobě nezávislá z hlediska nastavovaných rezných podmínek [15].



Obrázek 6 - CNC vertikální obráběcí centrum Buderus [15].

#### Technické parametry stroje [12]

- největší průměr obrobku:		150 mm
- největší délka obrobku:		150 mm
- otáčky vřetena obrobku:		0 – 3000 U/min
- rychlost posuvu:		0,01 – 15 mm/min
- maximální průměr obrobku:		220 mm
- polohování obrobku:		osa C
- zdvih stolu	osa X:	885 mm
	Osa Z:	300 mm
- rychlost posuvu stolu	osa X:	0 – 90 m/min
	Osa Z:	0 – 30 m/min
- příkon motoru:		45 kW
- váha stroje:		10 500 kg



Obrázek 7 - Pozice kotouče a obrobku při broušení [15].

### 1.1.2. Nástroj

Brousicí nástroj je tvořen brousicími zrny, pojivem, pórovitostí a v neposlední řadě také designem kotouče. Při navrhování nového kotouče se kombinují tyto prvky tak, aby měl kotouč co nejlepší vlastnosti pro danou aplikaci [8].

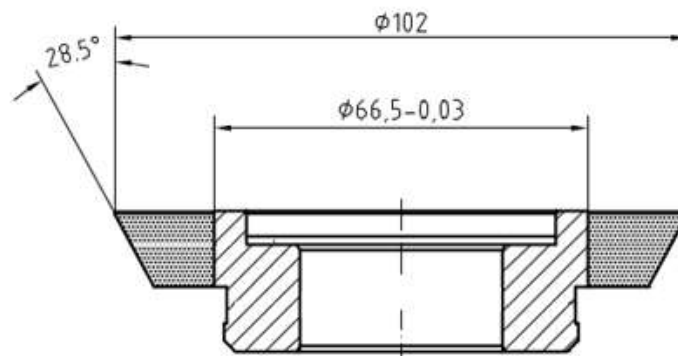
Brousicí nástroj nemusí mít nutně tvar kotouče, ale například pásu, tělíška nebo segmentu. Kotouče jsou vyráběny jako monolitní, to platí pro keramická brusiva, v případě materiálů typu CBN a diamant se vytváří tenká abrazivní vrstva na obvodu kotouče. Dále jsou při výrobě kotouče přidávány pórotvorné látky (vosk), které snižují těsnost vazby. Nakonec se do směsi přidávají impregnační látky (síra, vosk), které ovlivňují chování kotouče. Metody nanášení brousicí směsi na kotouč jsou lisování a sušení (pro tlusté vrstvy), galvanické nanášení (vhodné pro tvarové kotouče, protože je nanášena tenká vrstva) a metoda překrytí. [1], [2], [8].

Vlastnosti brousicího kotouče jsou zrnitost, tvrdost a struktura. Zrnitost ovlivňuje výkon broušení, čím větší zrnitost, tím větší výkon.



“**Zrnitost** je dána počtem ok třídícího síta na 1 palec, kterými zrna propadnou (ČSN ISO 525)“.

Velikost zrn se pohybuje v rozmezí “10 - 4000 $\mu\text{m}$ “ a označuje se čísly “4-1200“, přičemž s rostoucím číslem se zjemňuje zrnitost (2). “**Tvrlost** je dána odporem pojiva proti vylomení zrna (ČSN ISO 525)“. Pokud je pojivo měkké, bude docházet k častému vylamování zrn a příchodu zrn nových = princip samoostření. Pokud bude pojivo tvrdé, zrna se tak snadno nevylomí a kotouč bude tvarově stabilní = použití u tvarových kotoučů. “**Struktura** je poměr tuhé složky kotouče k objemu póru v 1  $\text{cm}^3$  (2)“. Struktura může být hutná až pórovitá. Značí se čísly od 1 do 15, přičemž 1 = velmi hutná struktura a 15 = zvlášť pórovitá struktura. Výhoda pórovitého kotouče je nižší řezná teplota, póry lze také použít jako kanálky pro rozvod chladicí kapaliny [2], [18].



Obrázek 8 - CBN kotouč od firmy NAXOS-DISKUS [15].

Brousicí kotouč používaný v této práci, je kotouč od německé firmy NAXOS-DISKUS viz obr. 6. Jedná se o kotouč ze supertvrdeho materiálu CBN. Tento typ kotouče je nejvhodnější k broušení rychlořezných ocelí, kalených ocelí s tvrdostí nad 55 HRC, cementovaných a nitridovaných ocelí a litiny [11] v sériové a velkosériové výrobě [11].

Pojivo kotouče je keramické, koncentrace CBN je 31,25%. Vrstva CBN je tlustá 5 mm, velikost abrazivních zrn je 75 $\mu\text{m}$  a 90  $\mu\text{m}$  (s rozložením v kotouči v poměru 50:50). Tělo kotouče je z oceli třídy 17 225 (42CrMo4) [9].

**Upínání** se provádí nasazením kotouče na trn, na kterém je po celou dobu životnosti. Po upnutí kotouče se měří házení, které by nemělo být větší než 0,02 mm v radiálním a axiálním směru [11].

**Oživování CBN** kotouče se realizuje po tom, co kotouč ztratí brousící schopnost (většinou důsledkem broušení nevhodných materiálů). Oživování se provádí přímo na stroji tzv. oživovacím kamenem SiC, který odstraní usazený materiál a přebytečné pojivo, které zakrývá zrna. Oživování mimo stroj se provádí kroužením po desce, na které jsou volně nasypána abrazivní zrna Sic [11].

### 1.1.2.1. Brousící materiály

#### Klasické abrazivní materiály

- Umělý korund  $Al_2O_3$  je krystalický oxid hlinitý. Použití: *“ocel (kalená, legovaná, feritická, austenitická, ocel na odlitky, nízkouhlíková ocel), litina a tvrdý bronz”*(2).
- Karbid křemíku  $SiC$  je sloučenina křemíku s uhlíkem. Použití: *“bronz, hliník, slinuté karbidy, vytvrzovaná litina, nástrojové oceli, mosaz, měď”*(2).

#### Supertvrdé materiály

Jsou materiály typu diamant a kubický nitrid boru.

- Syntetický diamant se používá na tvrdé materiály, jako jsou karbidy a oxidy, slinuté karbidy a k dokončování tvrdých a křehkých materiálů jako jsou sklo a keramika [2].
- Kubický nitrid boru se používá především na *“vysoce legované nástrojové oceli, tvrdé povrchy > 50 HRC, superslitiny > 35 HRC, šedou a bílou litinu”*(2). Tvrdost zrn CBN se pohybuje okolo 48 GPa a modul pružnosti je 400 GPa. *“Obsahuje 43,6% boru a 56,4% dusíku”*(1). Mřížka CBN se podobá mřížce diamantu, ale její rozměry jsou poněkud větší. Tepelná stálost do 1200°C. Vyrábí se syntézou šesterečného nitridu boru za přítomnosti katalyzátoru v kontejnerech na hydraulických lisech při tlacích 300 – 980 MPa a teplotách až 2000°C. Je chemicky neutrální vůči železu. [1], [2], [8].

- **Inovované abrazivní materiály**

- *“Mikrokryсталický korund se vyrábí technologií sol-gel a používá se na ložiskovou ocel, nástrojovou ocel, tvrdé a kalené povrchy“*(2). Výhoda materiálu je, že při velkých úběrech se málo opotřebovává v porovnání s původním korundem[2].

### 1.1.2.2. Pojiva

Pojivo má v kotouči hned několik důležitých funkcí. Drží brusná zrna ve vazbě kotouče a po otupení zrn jsou zrna z vazby vlivem sil vylomena a nastupují zrna nová. Pojiva se dělí na organická a anorganická [2], [8].

Druhy pojiv z [ČSN 22 4010: 1983 a ČSN 22 4028]

- Anorganická pojiva: **keramické**: pojivo použitelné pro všechny typy zrn. Skládá se z keramických surovin (mastek, živec, kaolin, a další).
  - magnezitové pojivo**: směs uhličitanu hořečnatého a chloridu hořečnatého. Používá se, pokud při broušení nebude docházet k vysokým teplotám, především k broušení nástrojů z nelegované oceli.
  - silikátové pojivo**: směs hlíny, křemičitého prachu a vodního skla. Tento typ pojiva se používá zřídka a výhradě pro práci za sucha.
  - kovové pojivo**: používá se pro zrna typu KNB a DIA z důvodu velkých obvodových rychlostí a odolnosti proti opotřebení. Kovem bývá nejčastěji bronz nebo nikl. Pojivo poskytuje nejvyšší tuhost a zároveň nejmenší řezný odpor. Nevýhodou pojiva je různá teplotní roztažnost kovového tělesa a zrn brusiva. Pojivo se nanáší galvanicky [2], [4].
- Organická pojiva
  - umělá pryskyřice**: pojivo disponující vysokou pevností a vyztužené sklotextilní vložkou, které se používá pro řezací kotouče.
  - pryžová pojiva**: jako výchozí materiál se používá umělý kaučuk, síra a urychlovače k vytvrzování. Pojivo je velice pružné a používá se na řezací, drážkovací a leštící kotouče [2].

### 1.1.2.3. Konstrukce kotouče

Kotouče ze supertvrdeho materiálu se skládají z těla, které slouží jako upínací část a na jeho obvodu je vrstva pojiva se zrny abrazivního materiálu. Rozhodující faktor pro výběr materiálu z jakého bude tělo, je především maximální rychlost, které může kotouč dosahovat. Dalšími faktory jsou, průměr, teplotní roztažnost, modul pružnosti, hmotnost a v neposlední řadě i cena. Běžně používané materiály jsou, ocel a slitiny hliníku [9].

V dnešní době je trendem snižovat množství procesní kapaliny, hlavním důvodem je složitá likvidace kapalin, která zatěžuje životní prostředí. Aby se omezilo množství procesních kapalin, jsou v posledních letech vyvíjeny segmentové kotouče. Tyto kotouče zajišťují, že kapalina bude přiváděna pouze do místa řezu a zvětší se tedy její využití. [8].

### 1.1.2.4. Orovnávání broušícího kotouče

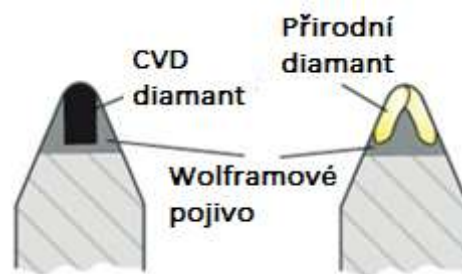
Během broušení dochází k opotřebovávání kotouče, které se projevuje tím, že dochází k vylamování a otupování zrn, ucpávají se mezery mezi zrny a kotouč ztrácí původní tvar a řezné vlastnosti. Tato situace se řeší orovnáváním broušícího kotouče. Při orovnání odebíráme z kotouče opotřebovanou vrstvu a vracíme kotouči původní vlastnosti. Kvalita orovnání kotouče má značný vliv na kvalitu obrobeného povrchu. Pravidlem je, že by se mělo orovnávat při stejných rychlostech, jako se brousí [2].

Orovnávací nástroje jsou orovnače, vyrábí se v mnoha provedeních a jejich pracovní část je nejčastěji z diamantu.

Konstrukce diamantových orovnačů:

- **Jednokamenné**, které jsou tvořeny jedním krystalem diamantu. Dělí se na broušené a nebroušené.
- **Vícezrné**, skládají se z malých krystalků diamantu. Mají tvar kolečka, destičky, nebo agregátu.
- **MKD, PKD CVD destičky**, využívají výhradně syntetického diamantu.

- **Rotační orovnávací kladky**, tento typ orovnače bude použit i v praktické části této práce. V současné době je jedním z nejproduktivnějších způsobů orovnávaní. Je zajištěna opakovatelnost a vysoká přesnost orovnávaní kotouče. Po obvodu kladky je rozmístěno velké množství diamantových krystalků. Používá se jak pro rovinné, tak pro tvarové orovnávaní. Tento typ orovnače lze použít na bruskách vybavených rotačním orovnávacím zařízením. Vhodné pro orovnávaní CBN kotoučů, protože při malém úběru kotouče dojde k oživení kotouče. Důsledkem toho, že je orovnávaná vrstva u CBN kotoučů tak malá, může docházet k tomu, že po orovnávaní bude kotouč sice orovnávan, ale zůstane na něm ještě část broušením ovlivněné vrstvy. Pro orovnávaní CBN kotoučů s keramickým pojivem se používají hloubky orovnávaní v rozsahu 0,5 – 3  $\mu\text{m}$ .



Obrázek 9 - příklad použití syntetického a přírodního diamantu [4].

Používá se buď syntetický, nebo přírodní diamant. Přednosti syntetického diamantu jsou konstantní vlastnosti a delší životnost, než v případě přírodního diamantu. Nevýhodou použití syntetického diamantu je poněkud vyšší pořizovací cena. [11], [4].

Rotační orovnač se skládá z kovového těla, pojiva a krystalků diamantu. Tělo orovnače bývá kovové. Používaná pojiva jsou niklová, kovová a karmická. Orovnávací kladka je ve vřetení upnuta hydrostaticky. Aby bylo orovnávaní efektivní, musí být celý systém dokonale vyvážen a je také třeba vyhnout se celým násobkům otáček broušícího kotouče a orovnače. [11].

Důležitou veličinou při orovnávaní pomocí rotačního orovnače je tzv. rychlostní poměr. Tato veličina udává vztah mezi rychlostí orovnače a broušícího kotouče.

$$\text{rychlostní poměr} = \frac{\text{rychlost orovnače}}{\text{rychlost kotouče}} \quad (1)$$

Rychlostní poměr je závislý na zrnitosti kotouče a jeho materiálu. “ *Například poměr +0,8 je výhodný pro keramický kotouč se zrnitostí 60 a slinutou vazbou, ale je nevhodný pro CBN kotouč se zrnitostí 120 a slinutou vazbou*“ (7).

Ideální rychlostní poměr pro CBN kotouč s keramickým pojivem je +0,4 až +0,6. Se vzrůstající rychlostí orovnače a kotouče se zmenšuje drsnost brousicího kotouče, takže je dosahováno lepší drsnosti obrodku. Dochází také ke zmenšení radiálních sil při orovnávaní. Pokud orovnáваме s vyšším poměrem než +0,6, může docházet k otupování abrazivních zrn a vzhledem k vysoké tepelné vodivosti CBN zrn může docházet k opotřebení břitů. Naopak poměry okolo +0,4 vedou ke zvýšení životnosti orovnače, protože při orovnávaní působí menší radiální síly. Při nastavování podmínek orovnávaní je také třeba se vyvarovat celočíselným poměrům, jako je například 1:2, 1:3 atd., protože při těchto poměrech může vznikat chvění [7].

Orovnač, který bude využíván v této práci je od firmy Dr. Kaiser. Jedná se o rotační orovnač s ručně sázeným přírodním diamantem. Rádus činné části orovnače je 0,5 mm. Upínání orovnače do stroje se provádí pomocí 12 šroubů [dodací list od orovnače].

### 1.1.3. Obrobek

Broušeným dílcem je kužel ozubeného kola převodovky DQ200. Před samotným broušením prošel obrobek soustružením, frézováním, tepelným zpracováním (cementace) a popouštěním, honováním vnitřního průměru, broušením ozubení, pevnostním tryskáním a konečně broušením kužele. Materiál obrodku je TL4227 (ČSN 14 220) 16MnCr<sub>5</sub> [5]. Obrobky jsou do firmy Škoda auto dodávány ve formě výkovků. Broušená plocha je zvýrazněna viz obr. 8.

Tabulka 1 - materiálové vlastnosti [5].

$R_m$ [MPa]	$R_{s\ min}$ [MPa]	Tvrđost HB	Třída odpadu
min. 785	590	min. 239	021



Obrázek 10 - Broušený dílec [15].

“Chrom-manganová ocel vhodná k cementování, kyanování a objemovému tváření. Dobře tvárná za tepla a po žíhání i za studena. Dobrá obrobitelnost a svařitelnost. Strojní součásti s velmi tvrdou cementovanou vrstvou a velkou pevností v jádře po kalení. Použití na menší hřídele, ozubená kola, šneky, vačkové hřídele, vřetena obráběcích strojů, pístitní čepy, pera, zubové spojky, trny, upínací nářadí apod. (5)“.

**Tabulka 2 - Chemické složení oceli [5].**

	C	Mn	Si	Cr	Ni	Cu	Al	P	S
Dle	0,14	1,10	0,17	0,80	-	-	-	max.	max.
ČSN	0,19	1,40	0,37	1,10				0,035	0,035

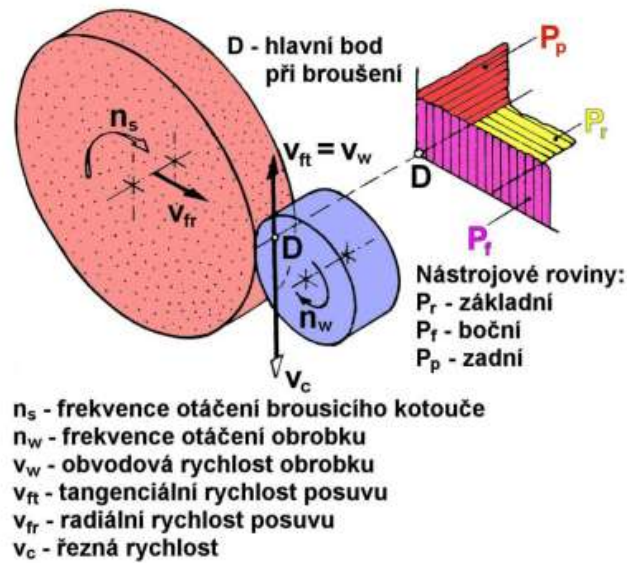
Doporučené tepelné zpracování [5]:

- Normalizační žíhání – 860°C
- Žíhání na měkko – 700°C
- Cementování – 840°C až 870°C
- Kalení – 780°C až 880°C v oleji nebo vodě
- Popouštění – 160°C po dobu 1 hodiny

#### **1.1.4. Řezné podmínky a strategie broušení**

Nejvíce ovlivňujícím faktorem je řezná rychlost po ní posuv a nakonec hloubka řezu. Správné nastavení řezných podmínek, ale není pouze nastavení parametrů broušení. Stejně důležitým faktorem je také nastavení parametrů orovnávacího broušícího kotouče. Broušení se dělí na obvodové a čelní a v každé z těchto kategorií je několik možných broušících strategií [3].

Pro potřeby této práce budu blíže charakterizovat pouze radiální broušení do kulata, kde hlavní pohyb koná kotouč, vedlejší pohyb pak koná stůl s obrobkem. Charakteristika všech strategií by přesahovala téma této práce. Dále uváděné vztahy budou pouze pro danou strategii.



Obrázek 11 – Radiální broušení do kulata [10].

“**Řezná rychlost** je rychlost hlavního řezného pohybu a definujeme ji jako obvodovou rychlost měřenou na obráběné ploše [10].“

$$v_c = \frac{\pi \cdot d_s \cdot n_s}{1000 \cdot 60} \quad [m \cdot s^{-1}], \quad (2)$$

kde:  $d_s$  = průměr broušícího kotouče [mm]

$n_s$  = frekvence otáčení kotouče [ $min^{-1}$ ]

“**Posuv** je dráha, kterou vykoná nástroj za jednu otáčku obrobku (10).“

Posuvy používané pro hrubování jsou v rozpětí 0,4mm – 3,5mm. Pro dokončovací broušení pak 0,06mm – 0,3mm [10].

### Hloubka řezu

Při broušení je takřka nemožné vypočítat tloušťku třísky ubírané jedním zrnem, proto se zavedla takzvaná “ekvivalentní tloušťka broušení (10).“



Nastavení řezných podmínek má vliv trvanlivost a opotřebením broušícího nástroje. V průběhu broušení dochází k opotřebením broušícího kotouče, míra opotřebením je závislá na zvolených řezných podmínkách, vlastnostech obráběného materiálu, atd. Základní druhy opotřebením jsou: otěr vrcholů zrn, štěpením zrn, porušování celých zrn, úplné vylamování zrn z pojiva a porušení působením chemických vlivů. Pokud jsou brusná zrna chemicky příbuzná s obráběným materiálem, dochází k výraznému růstu opotřebením, toto je typické například při broušení ocelí diamantem [1].

Trvanlivost kotouče je tím větší, čím pomaleji se kotouč opotřebává. Na trvanlivost kotouče mají značný vliv řezné podmínky, při zvyšování obvodové rychlosti kotouče významně roste jeho trvanlivost a to hlavně nad 30m/s. Totéž ale neplatí, pokud budeme zvyšovat obvodovou rychlost obrobku. Nepříznivý vliv na trvanlivost má zvyšování podélného posuvu obrobku. Tyto skutečnosti jsou nejvíce patrné při broušení kalených ocelí. [1].

### **1.1.5. Řezné prostředí**

Řezné prostředí nám pomáhá redukovat teplotu v místě řezu pomocí procesních kapalin. Kromě snižování teploty v místě řezu nám procesní kapaliny snižují tření, pomáhají při odvodu třísky a tím zamezují ucpávání pórů kotouče a v neposlední řadě zamezují korozi. Procesní kapaliny se podílejí na výsledném profilu a drsnosti povrchu. Snahou ale je množství kapalin minimalizovat, nebo nejlépe úplně vytěsnit a to z důvodu jejich komplikované likvidace. V případě nekalených povrchů dochází při snižování množství procesní kapaliny dokonce k zlepšování kvality povrchu. To je dáno plasticitou a zahlazením ostrých hran důsledkem vysoké teploty. U kalených povrchů působí snižování kapaliny negativně (sekundární tvrdost) [3].

Rozdělení procesních kapalin:

**Vodné roztoky** (alkalické roztoky) mají především chladicí účinek.

**Emulzní roztoky** – procesní kapalina, která má chladicí i mazací účinek. Jsou rozpouštěny ve vodě pomocí emulgátoru. “pH = 8-9.“ (3).

**Oleje** – jde především o minerální oleje. Mají velký mazací účinek, čímž snižují tření v místě řezu. Jsou vhodné, pokud jsou nároky na vysokou kvalitu povrchu.

**Syntetické a polysyntetické kapaliny** – jsou bez obsahu minerálního oleje a obsahují glykoly rozpuštěné ve vodě. V polysyntetických kapalinách se mohou vyskytovat malé částičky oleje [3].

Procesní kapalina používaná na stroji Buderus je Dascolene 617. “Jedná se o čistý olej na obrábění založený na hydrogenovaném minerálním oleji s nízkým obsahem aromatických sloučenin. Je kombinací polárních aditiv, aditiv pro extrémní tlaky a aditiv proti opotřebení. To vytváří olej dovolující vysoké zatížení. Olej poskytuje dobrý konečný povrch. Obsahuje aktivní síru a může odbarvovat žluté kovy. Neobsahuje chlor. Použití speciálně pro broušení, ale lze ho použít i na kombinované procesy a hlubinné vrtání. Olej se doporučuje používat čistý v dodané formě. Skladování v suchém a čistém prostředí, chránit před mrazem. Doporučená teplota skladování je 5°C – 40°C“ (16).

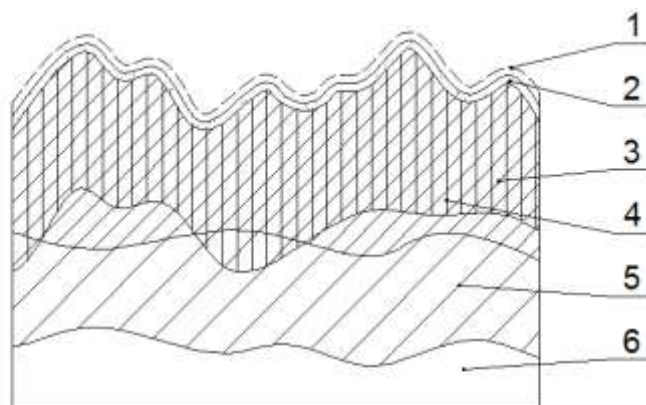
**Tabulka 3 - Fyzikální vlastnosti procesní kapaliny [16].**

Barva	Jantarová barva
Specifická hmotnost při 20°C	870 kg/m <sup>3</sup>
Kinematická viskozita při 40°C	18 mm <sup>2</sup> /s
Bod vzplanutí	170°C
Bod tání	není definováno
Měděná koroze	4c

## 1.2. INTEGRITA POVRCHU

Jak už bylo řečeno na začátku kapitoly 1.2, integrita povrchu je soubor vlastností, které ovlivňují povrch finálního výrobku. V této kapitole se zaměřím speciálně na integritu broušených ploch.

“Výsledná integrita povrchu je dána drsností a profilem povrchu, geometrickou přesností, zbytkovým napětím, tvrdostí, změnami struktury, tepelnými změnami a trhlinami (3)“.



- 1 – adsorbovaná vrstva (až do 0.1  $\mu\text{m}$ ),
- 2 – oduhličená vrstva kovu, oxidy a nitridy (až do 0.1  $\mu\text{m}$ ),
- 3 – oblast plastické deformace (až do 500  $\mu\text{m}$ ),
- 4 – oblast elastické deformace (do 500  $\mu\text{m}$ ),
- 5 – tepelně ovlivněná oblast (do 200  $\mu\text{m}$ ),
- 6 – neovlivněný materiál

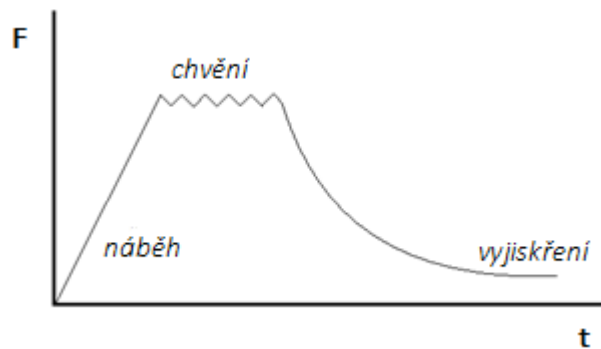
Obrázek 12 - Integrita povrchu obrobené plochy [19].

### 1.2.1. Drsnost povrchu

Drsnost povrchu patří s geometrickou přesností mezi hlavní ukazatele jakosti povrchu. Je předepisována na výkresy, protože na jejím základě je do jisté míry volena strategie broušení, volba stroje, nástroje a nástrojového materiálu. S drsností jsou spojeny třídy přesnosti IT, které se zvyšují se zvyšujícími se nároky na kvalitu povrchu. Hodnota drsnosti povrchu by se měla předepisovat s ohledem na funkci výrobku, protože se zvyšujícími se nároky na drsnosti povrchu se zvyšují výrobní náklady. Cílem drsnosti je zmatovat obrobený profil a vyhodnotit zdali je profil v souladu s požadovanou drsností. Drsnost povrchu a jeho profil je přesně definován v normě ČSN EN ISO 4287.

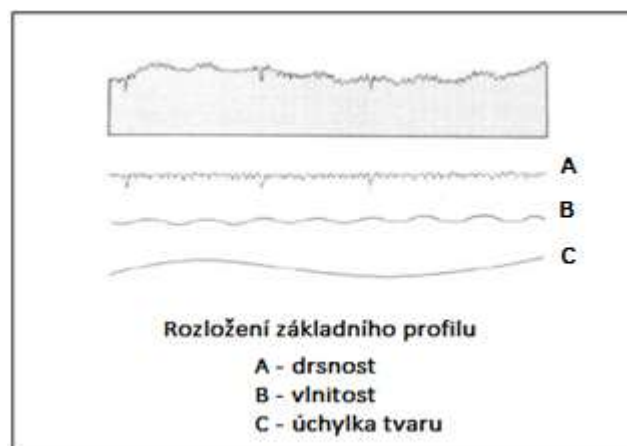
Drsnost povrchu je závislá na řezných podmínkách a příznivě ji ovlivňuje například vysoká obvodová rychlost kotouče a snížení přísuvu, to má za následek více kontaktů kotouče s obrobkem. Pokud ale chceme větší drsnost povrchu, je třeba snížit obvodovou rychlost obrobku a zvýšit posuv. Drsnost povrchu je také závislá na zrnitosti kotouče [1], [3].

Drsnost povrchu se dá řídit dále tzv. **vyjiskřováním**. Vyjiskřování znamená, že se dokončí přísuv kotouče k obrobku, ale kotouč a obrobek stále rotují. Smyslem je, že po zastavení přísuvu dojde k uvolnění celé soustavy.



Obrázek 13 - Vyjiskřovací křivka [19].

Drsnost povrchu se zjišťuje pomocí drsnoměru, který změří základní profil a z něho pak pomocí příslušných filtrů získáme drsnost, vlnitost a úchylku tvaru. Parametry struktury povrchu jsou  $R$ ,  $W$ ,  $P$ . Parametr  $R$  je určen z profilu drsnosti, parametr  $W$  je určen z profilu vlnitosti a parametr  $P$  je určen ze základního profilu [17].



Obrázek 14 - Prvky základního profilu.

Drsnost povrchu je měřena na délce ( $l_n$ ), což je 5 základních délek ( $l_r$ ). Dále se ještě počítá s náběhem a přeběhem [17].

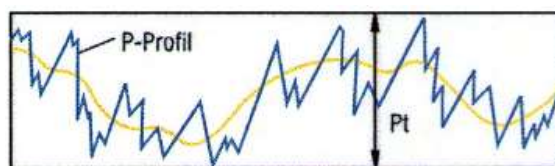
Dalším pojmem, kterým se budu v praktické části zabývat, je **přenosové pásmo**. „Přenosové pásmo je vymezeno krátkovlnným filtrem  $L_s$  a dlouhovlnným filtrem  $L_c$ , který označuje základní délku ( $l_r$ )“ (17). V praxi je předepisována pouze základní délka jako  $L_c$ , například  $L_c = 0,8$  mm.

Tabulka 4 - Parametry hodnotící strukturu povrchu [17].

Parametry struktury povrchu			Filtrování podle ČSN EN ISO 11562		
			Profil		
			R	W	P
Výškové parametry	výstupků a prohlubní	největší výška výstupků	$R_p$	$W_p$	$P_p$
		největší hloubka prohlubně	$R_v$	$W_v$	$P_v$
		největší výška profilu	$R_z$	$W_z$	$P_z$
		průměrná výška profilu	$R_c$	$W_c$	$P_c$
		celková výška profilu	$R_t$	$W_t$	$P_t$
	průměrné hodnoty	průměrná aritmetická úchylka profilu	$R_a$	$W_a$	$P_a$
		průměrná kvadratická úchylka profilu	$R_q$	$W_q$	$P_q$
		šikmost profilu	$R_{sk}$	$W_{sk}$	$P_{sk}$
špičatost profilu		$R_{ku}$	$W_{ku}$	$P_{ku}$	
Délkové parametry	průměrná šířka profilu	$R_{sm}$	$W_{sm}$	$P_{sm}$	
Hybridní parametry	průměrný kvadratický sklon profilu	$R_{dq}$	$W_{dq}$	$P_{dq}$	
Křivky a příbuzné parametry	materiálový nosný poměr profilu		$R_{mr}(c)$	$W_{mr}(c)$	$P_{mr}(c)$
	rozdíl výšky úseku profilu		$R_{dc}$	$W_{dc}$	$P_{dc}$
	vzájemný materiálový poměr		$R_{mt}$	$W_{mt}$	$P_{mt}$

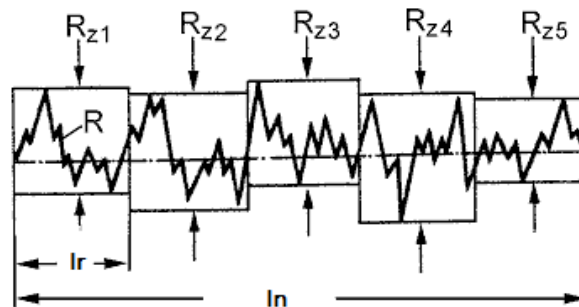
Pro potřeby této práce budou blíže charakterizovány parametry  $R_z$ ,  $P_t$  a  $R_{mr}(c)$ .

“ **$P_t$**  = HLOUBKA PROFILU je nejmenší vzdálenost mezi dvěma rovnoběžnými mezními přímkami z nefiltrovaného profilu povrchu uvnitř měřené délky. Slouží k vyhodnocení jednotlivých chyb povrchu (dle DIN EN ISO 4287)“.



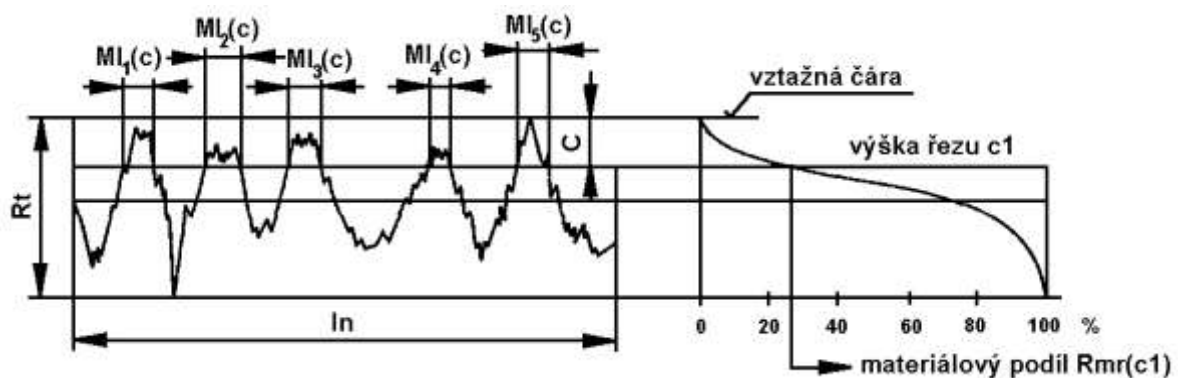
Obrázek 15 - Příklad parametru  $P_t$  [8].

**Rz** = MAXIMÁLNÍ VÝŠKA PROFILU je definována dle DIN EN ISO 4287 jako „*součet nejvyššího výstupku a hloubky nejnižší rýhy uvnitř základní délky (8)*“. Při zjišťování parametru se profil rozdělí do pěti stejných částí, délka těchto částí je definována mezní vlnovou délkou. V každé části je pak změřena maximální hodnota a z průměru hodnot se určí parametr Rz. [8].



Obrázek 16 - Parametr Rz [[http://www.keramverband.de/brevier\\_engl/10/5/4/10\\_5\\_4.htm](http://www.keramverband.de/brevier_engl/10/5/4/10_5_4.htm)].

**Rmr(c)** neboli materiálový nosný podíl profilu je definován dle DIN EN ISO 4287 jako „*procentuální podíl součtu délek materiálových přímek  $ML(c)$  v dané výšce profilu k měřené délce  $ln$ . Křivka podílu materiálu udává podíl materiálu jako funkci hladiny (výšky) řezu“ (8).*



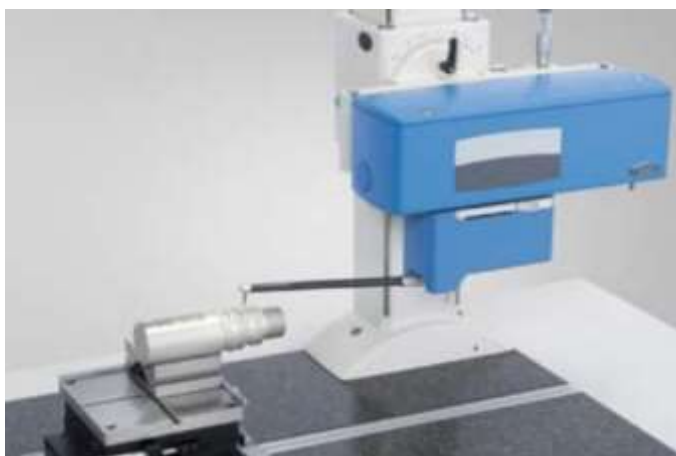
Obrázek 17 - Křivka materiálového nosného podílu [8].

Jak už bylo řečeno v první kapitole, broušením se dosahuje vysokého materiálového nosného podílu. To je také jedním z důvodů, proč je broušení využíváno i v případech, ve kterých bychom si vystačili například se soustružením. Na obrázku jsou příklady tzv. Abbottových křivek, ze kterých je vidět jednoznačný rozdíl mezi technologiemi broušení a soustružení.

Drsnoměr používaný v této práci je HOMMEL-ETAMIC C8000. Jedná se o přístroj, který je schopen měřit všechny typy profilů.

Dodává se s třemi typy měřicích ramínek ( TA-60 standart, TA-60 s rubínovou kuličkou a TA-60 do díry).

Drsnoměr je vybaven profilovým snímacím zařízením wavecountur digital.



Obrázek 18 - HOMMEL-ETAMIC C8000 [13].

Tabulka 5 - snímací zařízení wavecountour digital [13].

Snímací systém	Lineární pravítko
Maximální zdvih v ose Z	60 mm
Rozlišení v ose Z	max. 0,05 v rozsahu 60 mm
Rozlišení v ose X	až 0,01 $\mu\text{m}$
Přítlačná síla	0 – 20 mN
Maximální úhel stoupání/klesání	77°/88°

### 1.2.2. Geometrické přesnost

Dalším důležitým ukazatelem je geometrická přesnost, která se zabývá měřením tvaru součásti a ukazuje odchylku od ideálního tvaru součásti. Geometrická nepřesnost je způsobena brousicím nástrojem, tuhostí stroje, nástroje a obrobku a je do jisté míry závislá na řezných podmínkách.

U rotačních součástí se hodnotí: kruhovitost, válcovitost, sousost, soustřednost, čelní, obvodové nebo celkové házení.

U rovinných součástí je to: rovinnost, kolmost, rovnoběžnost. Jednotlivé odchylky jsou normovány [3].

### **1.2.3. Zbytková napětí**

Od návrhu až po finální výrobek se projde materiál řadou technologických operací, ať už jde o tváření nebo obrábění. Při těchto operacích je do materiálu vnášeno napětí, které je způsobováno silovým působením na materiál při obrábění nebo tváření. Odstranění těchto napětí je možné opatřeními, jako je například žíhání. Napětí jsou dvojího druhu, tlaková (-) a tahová (+). Velikosti těchto napětí se sčítají v absolutních hodnotách po působení jednotlivých technologií na povrch obrobku.

Na vznik napětí na při broušení má největší vliv druh brousícího zrna a řezné prostředí, které snižuje teplotu v místě řezu. V praxi ale měření velikosti zbytkových napětí moc neprovádí, kvůli jeho složitosti [3].

“Metody měření jsou odleptávání povrchu, vrtání povrchové vrstvy, rozpouštění povrchové vrstvy a rentgenová tenzometrie(3)“.

### **1.2.4. Tvrdost povrchu (zpevnění)**

Tvrdost je definována jako odolnost materiálu proti vnikání cizích těles. Princip zkoušení drsnosti spočívá ve vnikání tělíška do materiálu, přičemž tělíško způsobí v materiálu plastickou deformaci. Poté se vtisk pomocí vhodných metod vyhodnocuje. Základní zkoušky tvrdosti jsou podle Brinela, Vickerse, a Rockwella [3].

### **1.2.5. Změny struktury**

Struktura lze měnit podle potřeby například žíhacími procesy. Důvodem proč se mění struktura, je to, že po obrábění vznikají v materiálu strukturní změny, které lze pomocí žíhání odstranit a tím dosáhnout v materiálu rovnovážného stavu. Mělo by platit, že“ struktura materiálu před a po procesu obrábění by měla být zachována (3)“. Na změnu struktury má vliv materiál obrobku, vlastnosti nástroje, řezné podmínky a řezné prostředí [3].



### **1.2.6. Tepelné změny**

Jinak řečeno “opaly“ jsou změny struktury, které vznikají v důsledku vysokých teplot při obrábění (3). Přítomnost opalů se zjišťuje chemicky a to metodou odleptávání povrchu. Druhy opalů jsou vysokoteplotní a nízkoteplotní. Vznik opalů není přímo úměrný snižování procesní kapaliny [3].

# Praktická část

## ÚVOD

V této části práce budou aplikovány poznatky uvedeny v teoretické části. Praktická část této práce se zabývá stanovením řezných podmínek při broušení a to tak, aby byly dosaženy požadované kvalitativní požadavky. Všechny zkoušky jsem realizoval na CNC brusce Buderus a použitím Cubitron kotouče a rotačního diamantového orovnače viz analytická část.

Hodnoty tolerančních polí, ve kterých by se měla pohybovat drsnost broušeného kužele:

- Tolerance **Rz = 2,5  $\mu\text{m}$  – 5  $\mu\text{m}$**
- Tolerance **Pt = 2  $\mu\text{m}$  – 6  $\mu\text{m}$** . Důvodem měření parametru Pt je fakt, že potřebujeme znát celý profil činné části, v tomto případě kuželu na který přiléhá protikus v podobě synchronizačního kroužku. Z toho důvodu se parametr Pt měří na dráze 9 mm.
- Tolerance Rmr = tento parametr není vyžadován a v sériové výrobě se neměří. Bude měřen pouze pro potřeby této práce. Důvodem měření tohoto parametru je především výstup, kterým je Abbottova křivka, pomocí které bude hodnocen podíl materiálu v určitých hloubkách.
- 

Pro zjištění požadovaných parametrů bude použit drsnoměr HOMMEL-ETAMIC C8000.

## Princip plánování experimentů

Budou provedeny tři varianty experimentů. Klíčovým parametrem ve všech experimentech bude rychlostní poměr.

První experiment bude spočívat v nastavení řezných podmínek tak, aby ležely uvnitř mezí, které jsou vytyčeny rychlostním poměrem tj. 0,4 – 0,6.

Druhý experiment bude analyzovat následky nedodržení rychlostního poměru. V tomto případě budou nastaveny řezné podmínky tak, aby byl pokryt dolní interval tj. CR  $\in$  (0; 0,4)

Třetí experiment bude stejně jako předchozí analyzovat následky nedodržení rychlostního poměru. V tomto případě budou nastaveny řezné podmínky tak, aby byl pokryt horní interval tj.  $CR \in (0,6; 1)$ .

**Tabulka 6 - Podmínky měření.**

Parametr Rz		Parametry Pt a Rmr	
Snímací ramínko	TA-60 standart	Snímací ramínko	TA-60 standart
Snímač	TKU 300	Snímač	TKU 300
Měřicí rozsah	80 $\mu\text{m}$	Měřicí rozsah	80 $\mu\text{m}$
Lineární posuvový přístroj	waveline 120	Lineární posuvový přístroj	waveline 120
Měřicí dráha (Lt)	4,8 mm	Měřicí dráha (Lt)	9 mm
Posuvová rychlost (Vt)	0,40 mm/s	Posuvová rychlost (Vt)	0,50 mm/s
Měřicí hodnoty	9600	Měřicí hodnoty	7826
Filtr P-W-R-Profil	ISO 11562	Filtr P-W-R-Profil	ISO 11562
Základní délka Lc (cut off)	0,8 mm	Základní délka Lc (cut off)	1,83 mm

Snímač TKU 300 je univerzální snímač s výměnnými doteky. Zdvih snímače je 300  $\mu\text{m}$ , rádius hrou 0,5  $\mu\text{m}$ . Snímací hrot je vyroben z diamantu a upínání snímače je magnetické [13].

Podmínky měření budou stejné pro všechny provedené experimenty.

## 2. EXPERIMENT č. 1

Hodnoty řezných podmínek  $vb$  a  $vd$  toho experimentu byly voleny tak, aby platilo, že  $CR \in (0,4; 0,6)$ . Hodnoty řezných podmínek  $sd$ ,  $v$  a  $t$ , které byly nastavovány v tomto experimentu, vycházely převážně ze znalostí o broušení, které byly nabyty zpracováním analytické části, a jednak se budu opírat o výsledky zkoušek, které byly provedeny v minulosti.

Zároveň bylo zajištěno, aby nedošlo k celočíselným poměrům mezi rychlostí kotouče a rychlostí orovnače. Přesné hodnoty poměrů jsou shrnuty v tabulce číslo 9.

## 2.1. Postup měření

Před začátkem experimentu byl stroj osazen novým broušicím kotoučem a orovnačem. Po upnutí obou nástrojů byla provedena korekce házení jak kotouče, tak orovnače. Tato korekce byla provedena seřizovačem. Na seřizovaném stroji bylo pak broušeno 5 kusů zkušebních ozubených kol, aby bylo ověřeno, jestli je vše správně nastaveno.

Následoval samotný začátek experimentu, kdy jsem ve spolupráci se seřizovačem stroje nastavil řezné podmínky postupně pro všechny varianty experimentu. Na začátku každé varianty experimentu byl broušicím kotouč orvnán zvolenou hodnotou orovnávací rychlosti. Po orovnání bylo broušeno 5 kusů ozubených kol. Broušená kola byla roztříděna do paletek a následně vyprána, aby byla zbavena řezného oleje. Po vyprání kola putovala na měrové středisko, kde byly měřeny parametry  $R_t$ ,  $P_t$  a  $R_{mr}$ .

Tabulka 7 - Plán experimentu.

Faktor	označení	dolní úroveň	horní úroveň
rychlost broušení	vb	65 m/s	70 m/s
rychlost orvnání	vd	28 m/s	40 m/s
posuv orovnače	sd	250 mm/min	350 mm/min
tloušťka orvnané vrstvy	t	0,004 mm	0,006 mm
Vyjiskření	v	0 sek	1,5 sek

Tabulka 8 - Plán experimentu v kódovaných proměnných.

varianta	faktor [vb]	faktor [vd]	faktor [sd]	faktor [t]	faktor [v]
1	-1	+1	-1	+1	-1
2	-1	-1	+1	-1	+1
3	+1	+1	-1	+1	-1
4	+1	-1	+1	-1	+1

Tabulka 9 - Kontrola rychlostních poměrů kotouče a orovnače.

rychlost broušení [vb]	rychlost orvnání [vd]	rychlostní poměr [-]
65 m/s	40 m/s	0,62
	28 m/s	0,43
70 m/s	40 m/s	0,57
	28 m/s	0,4

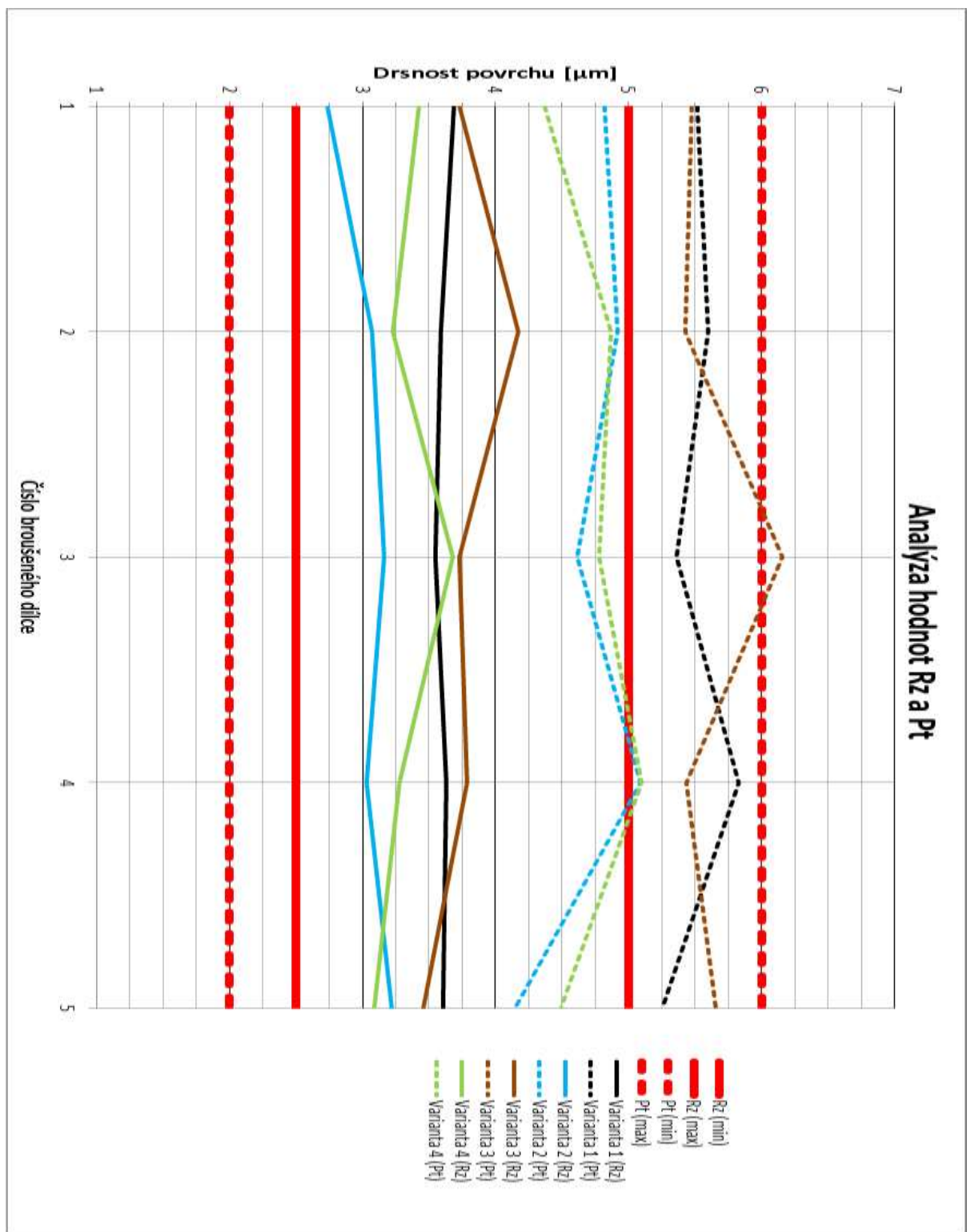
V tabulce č. 9 jsou shrnuty brousící a orovnávací rychlosti, ze kterých je vypočítán rychlostní poměr CR.

Rovnice 1 - Vztah pro výpočet rychlostního poměru.

$$CR = \frac{vd}{vb}$$

Tabulka 10 - Tabulka naměřených hodnot pro jednotlivé varianty experimentu.

Řezné podmínky										
vb: 70m/s	vd: 40m/s	sd: 250mm/min	t: 0,006mm	v: 0 s						
Tabulka naměřených hodnot										
Var. 1	Rz [µm]	3,69	3,59	3,55	3,63	3,61	3,61	3,55	3,69	rozptyl
	Pt [µm]	5,52	5,6	5,36	5,83	5,26	5,51	5,26	5,83	0,57
Řezné podmínky										
vb: 70m/s	vd: 28m/s	sd: 350mm/min	t: 0,004mm	v: 1,5 s						
Tabulka naměřených hodnot										
Var. 2	Rz [µm]	2,74	3,07	3,16	3,03	3,22	3,04	2,74	3,22	rozptyl
	Pt [µm]	4,82	4,92	4,62	5,09	4,15	4,72	4,15	5,09	0,94
Řezné podmínky										
vb: 65m/s	vd: 40m/s	sd: 250mm/min	t: 0,006mm	v: 0						
Tabulka naměřených hodnot										
Var. 3	Rz [µm]	3,73	4,17	3,73	3,79	3,46	3,78	3,46	4,17	rozptyl
	Pt [µm]	5,48	5,43	6,16	5,44	5,66	5,63	5,43	6,16	0,73
Řezné podmínky										
vb: 65m/s	vd: 28m/s	sd: 350mm/min	t: 0,004mm	v: 1,5 s						
Tabulka naměřených hodnot										
Var. 4	Rz [µm]	3,43	3,23	3,68	3,28	3,09	3,34	3,09	3,68	rozptyl
	Pt [µm]	4,37	4,87	4,78	5,1	4,49	4,72	4,37	5,1	0,73



Obrázek 19 - Porovnání naměřených hodnot.

*Pozn. Rz (min.) a Rz (max.) značí dolní a horní toleranční meze parametru drsnosti Rz.*

*Pt (min.) a Pt (max.) značí dolní a horní toleranční meze parametru drsnosti Pt.*

Z tabulky je patrné, že kromě jedné hodnoty (Pt u varianty č. 3) vyšly všechny další hodnoty v mezích tolerančního pole. Toto tvrzení, se ale nedá považovat za jednoznačný závěr, proto zde budou dále analyzovány jednotlivé parametry.

## **2.2. Analýza parametrů Rz a Pt**

Z grafu je patrné, že hodnoty Pt u variant experimentů číslo 1 a 3 jsou na hraně horního tolerančního pole, oproti tomu hodnoty Rz vyšly s minimálním rozptylem, rozptyl u varianty experimentu číslo 1 byl pouze 0,14  $\mu\text{m}$ . Důsledkem vysokých hodnot Pt u těchto variant je pravděpodobně absence vyjiskření.

Vliv vyjiskření na polohu Pt je možno sledovat na experimentech číslo 2 a 4. Při těchto experimentech byly nastaveny identické řezné podmínky, jako u experimentů číslo 1 a 3. Rozdíl mezi těmito experimenty bylo pouze vyjiskření trvající 1,5 sekundy. Z grafu je patrné, že poloha Pt je u těchto experimentů příznivější, než u experimentů 1 a 3, ale s poklesem Pt došlo i k poklesu Rz.

Snížením rychlosti broušení o 5m/s není téměř patrné, protože bylo dosaženo horší drsnosti v průměru o 0,3  $\mu\text{m}$ , přičemž parametr Pt se nezměnil. Broušící rychlost byla snížena z důvodu dosažení horší drsnosti a to proto, aby se parametr Rz posunul více na střed tolerančního pole.

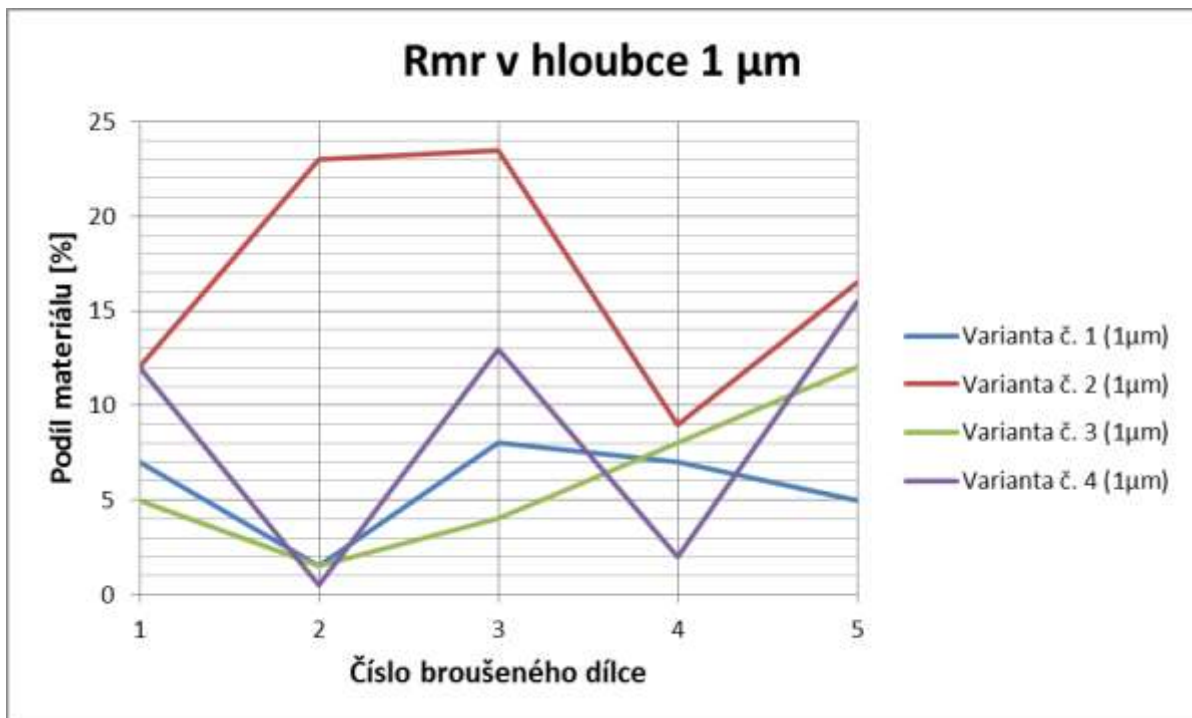
Snahou v této práci není pouze dosáhnout hodnot, které budou ležet uvnitř tolerančního pole, jde především o to vybrat takové řezné podmínky, aby bylo zajištěno, že parametry Rz a Pt budou ležet co možná nejvíce u středu tolerančního pole a zároveň budou stabilní. Stabilními parametry se rozumí to, že jejich hodnoty budou mít co nejmenší rozptyl a dosažené parametry budou opakovatelné ve výrobě.

Závěrem z analýzy parametrů Rz a Pt je to, že nejlepších výsledků drsnosti povrchu bylo dosaženo u experimentů číslo 2 a 3.

### 2.3. Analýza parametru Rmr

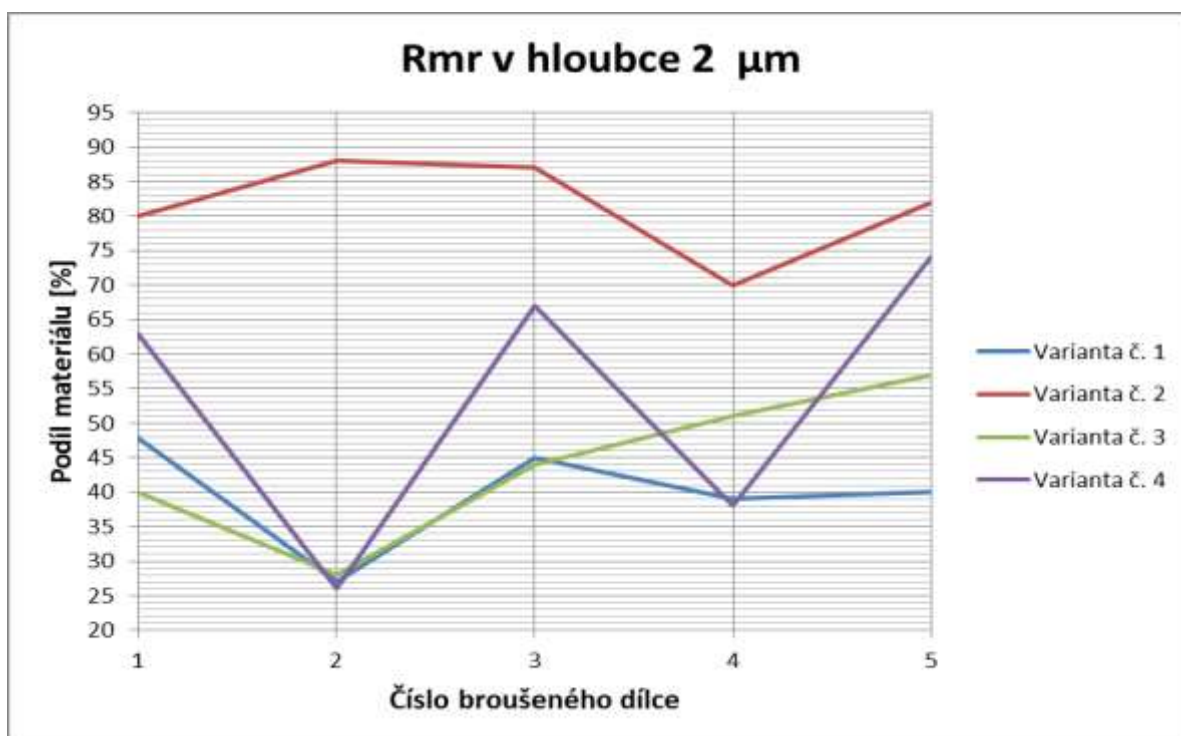
Výstupními daty po změření parametru Rmr jsou Abbottovy křivky. Pomocí křivky lze zjistit kolik procent materiálu je v určité vrstvě pod povrchem. Z průběhu Abbottovy křivky jsme schopni určit, jak moc se bude součást opotřebovávat při provozu v převodovce. Pokud bude průběh křivky příliš strmý, bude docházet k tomu, že při provozu v převodovce dojde k rychlému opotřebení plošek s malým nosným podílem a důsledkem toho dojde ke zvýšení vůle mezi kuželem ozubeného kola a synchronním kroužkem, čímž se zvýší hlučnost převodovky.

V následujících grafech je porovnání materiálových nosných podílů u variant 1 až 4. Hodnoty Rmr byly zjišťovány v hloubce 1  $\mu\text{m}$ , 2  $\mu\text{m}$ , 3  $\mu\text{m}$  a 4  $\mu\text{m}$ . Tabulky s naměřenými hodnotami viz příloha 1.

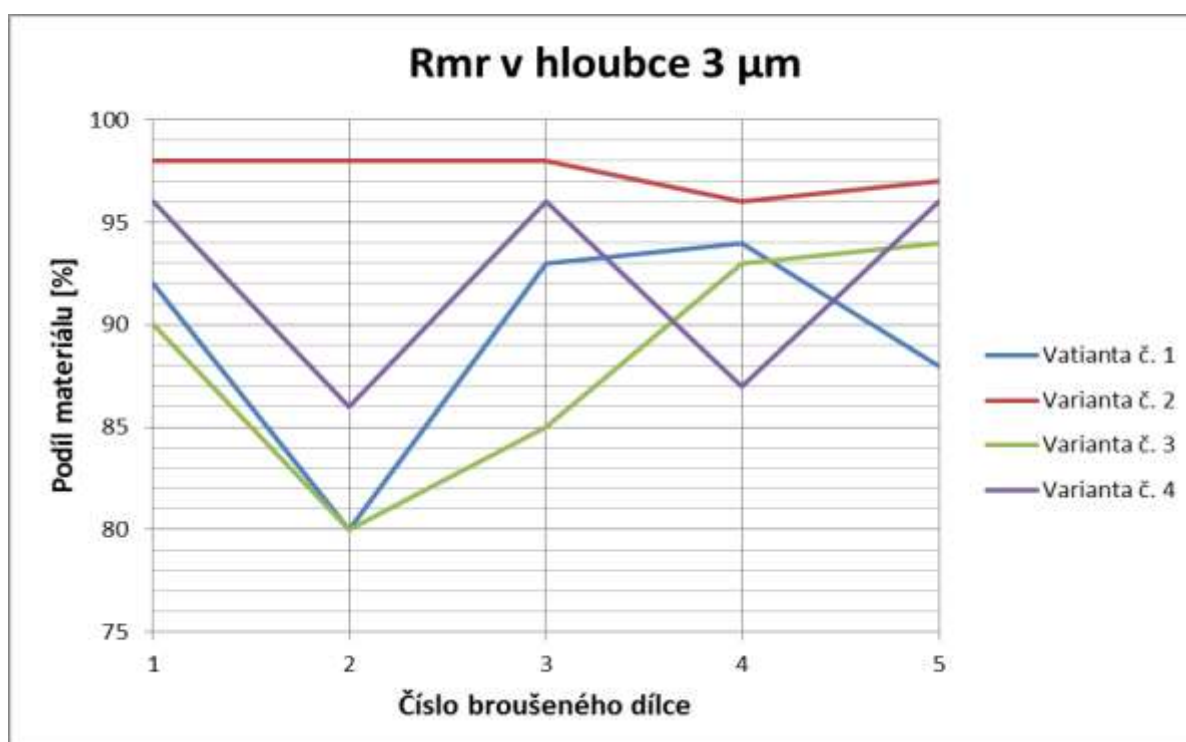


Obrázek 20 - Grafické porovnání variant experimentu č. 1 z hlediska parametru Rmr.

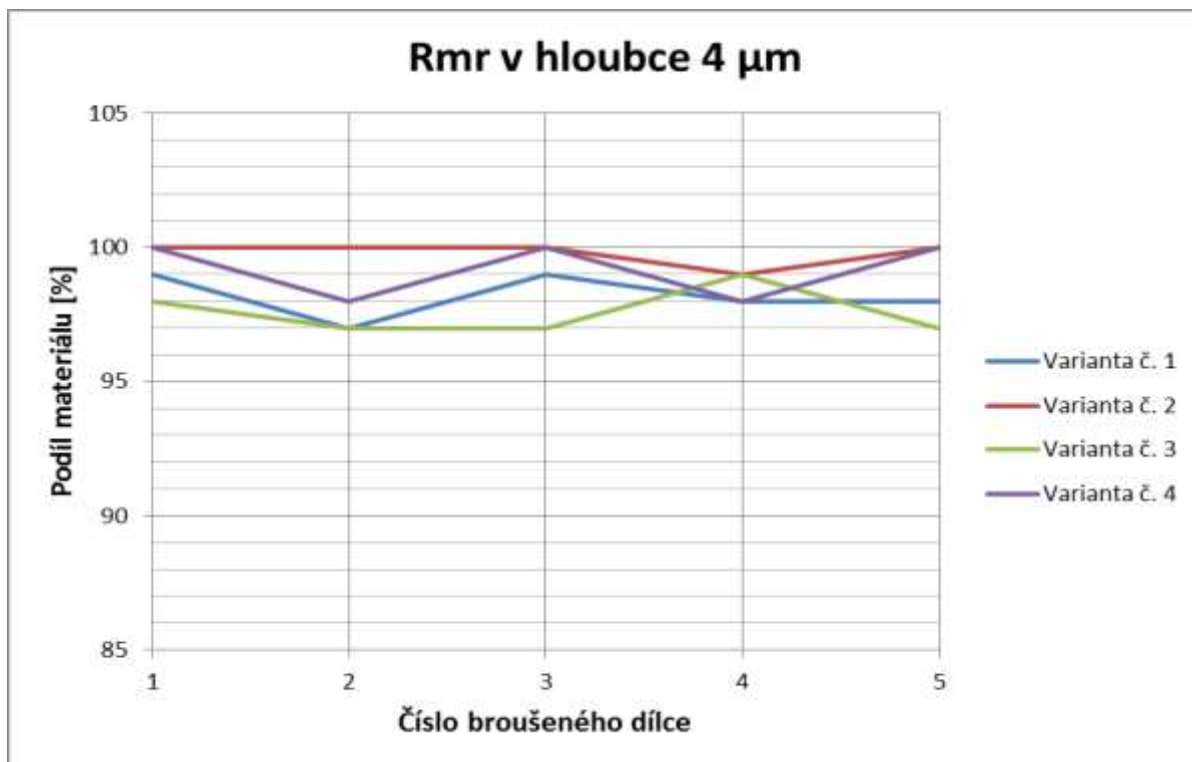




Obrázek 21 - Grafické porovnání variant experimentu č. 1 z hlediska parametru Rmr.



Obrázek 22 - Grafické porovnání variant experimentu č. 1 z hlediska parametru Rmr.



Obrázek 23 - Grafické porovnání variant experimentů č. 1 z hlediska parametru Rmr.

## 2.4. Závěr k experimentu č. 1

Jak bylo zmíněno výše, pro správnou funkci převodovky je nezbytné, aby se kužel ozubeného kola opotřebovával co možná nejméně. To znamená, že musí mít vysoký podíl materiálu již od malých hloubek. Z grafů č. 2, 3, 4 a 5 vyplývá, že nejlepšího materiálového nosného podílu bylo dosaženo v případě varianty číslo 2.

Závěrem bych poukázal na to, jak může být zavádějící měření pouze parametrů Rz a Pt. Při pohledu zpět na tabulku s naměřenými hodnotami je patrné, že krom jednoho ozubeného kola jsou všechna v mezích tolerance. Po změření dalšího parametru Rmr je zřejmé, že 3 ze 4 variant řezných podmínek jsou nevhodné. Nevhodné jak z hlediska nízkého parametru Rmr v malých hloubkách, tak z hlediska velkých rozptylů mezi hodnotami. Zároveň bylo ověřeno, že rychlostní poměr v mezích 0,4 – 0,6 je vhodný pro tento výrobní proces.

### 3. EXPERIMENT č. 2

Tento experiment se zabývá analýzou následků při nedodržení rychlostního poměru. V tomto případě budou nastaveny řezné podmínky  $vb$  a  $vd$  tak, aby byl pokryt dolní interval tj.  $CR \in (0; 0,4)$ . Hodnoty řezných podmínek  $sd$ ,  $v$  a  $t$  budou nastaveny s ohledem na zkoušky, které byly provedeny v minulosti.

#### 3.1. Postup měření experimentu

Experiment byl proveden na stejném stroji jako při předchozím experimentu. Byl použit stejný broušící kotouč i orovnač. Rozdílem oproti prvnímu experimentu je to, že se již nejedná o nové nástroje.

Z palety hotových obrobků bylo náhodným výběrem vybráno 5 kusů obrobků z cca 200 kusů. Obrobky byly vybírány tak, aby byla pokryta zhruba celá dávka. Po výběru byly obrobky vyprány, aby byly odstraněny zbytky řezného oleje.

Stejně jako v prvním případě byly měřeny parametry  $Rz$ ,  $Pt$  a  $Rmr$ . Podmínky měření byly stejné jako při prvním experimentu.

Tabulka 11 - Parametry nastavení stroje u experimentu č. 2.

Řezné podmínky				
$vb$ [m/s]	$vd$ [m/s]	$sd$ [mm/min]	$t$ [mm]	vyjiskření [s]
72	11	420	0,004	1,5

Tabulka 12 - Parametry nastavení stroje u experimentu č. 1 a varianty č. 2.

Řezné podmínky				
$vb$ [m/s]	$vd$ [m/s]	$sd$ [mm/min]	$t$ [mm]	vyjiskření [s]
70	28	350	0,004	1,5

Z tabulky č. 11 je patrné, že došlo k výraznému poklesu rychlosti orovnávacího  $vd$  a naopak výraznému nárůstu přísuvu  $sd$ . Nebezpečí, které může vzniknout při velkých hodnotách přísuvu je vznik „schodovitého povrchu“ viz obr. 24.



**Obrázek 24 - Schodovitý povrch vytvořen vlivem vysokého přísuvu.**

Tento průběh drsnosti povrchu byl naměřen při zkoušce 2. 12. 2015. Rychlost ořvávání byla 45 m/s a hodnota přísuvu byla 400 mm/min. Problém související s takovýmto povrchem je především rychlé opotřebení horních plošek a vznik vůle mezi ozubeným kolem a synchronním kroužkem. Tento případ ale při tomto experimentu nenastal.

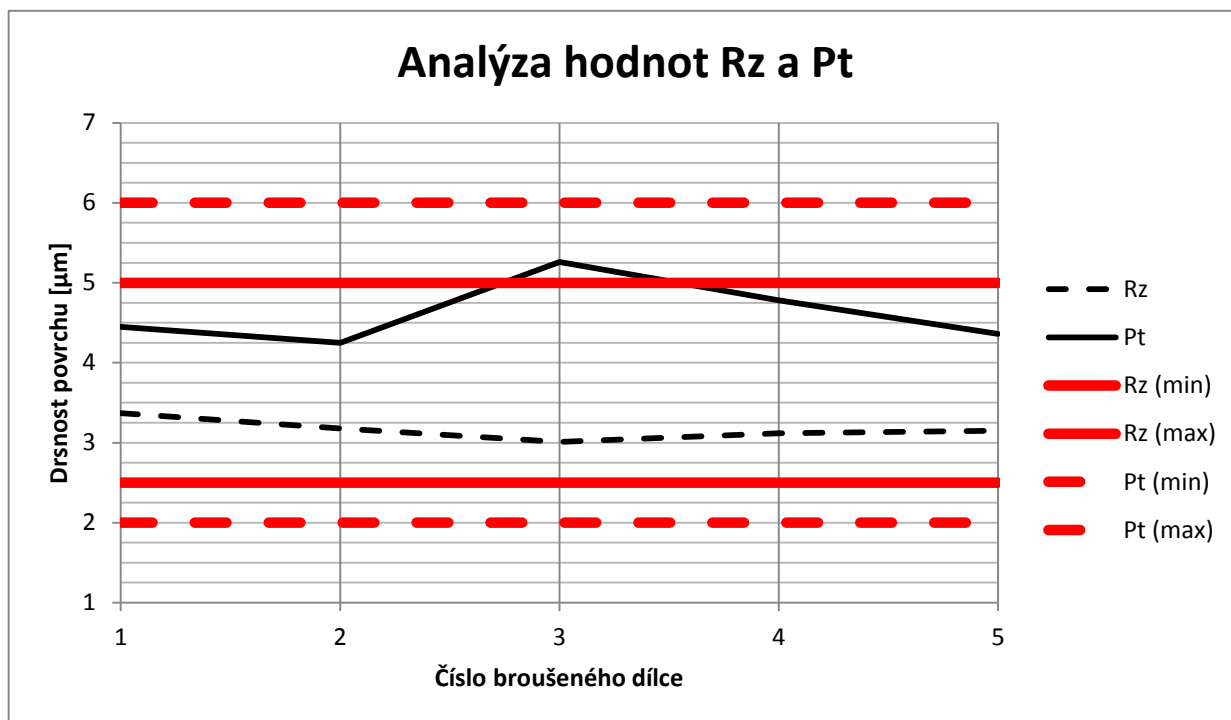
Dále je zřejmé, že nebyl dodržen doporučený rychlostní poměr **CR**. Rychlostní poměr při nastavených parametrech je 0,15.

**Rovnice 2 - Výpočet rychlostního poměru.**

$$CR = \frac{Vd}{Vb} = \frac{11}{72} = 0,15$$

Tabulka 13

Tabulka naměřených hodnot						průměr	MIN	MAX	rozptyl
Rz	3,37	3,18	3,01	3,12	3,15	3,166	3,01	3,37	0,36
Pt	4,45	4,25	5,26	4,78	4,36	4,62	4,25	5,26	1,01



Obrázek 25 - Porovnání naměřených hodnot v grafu.

### 3.2. Analýza parametrů Rz a Pt

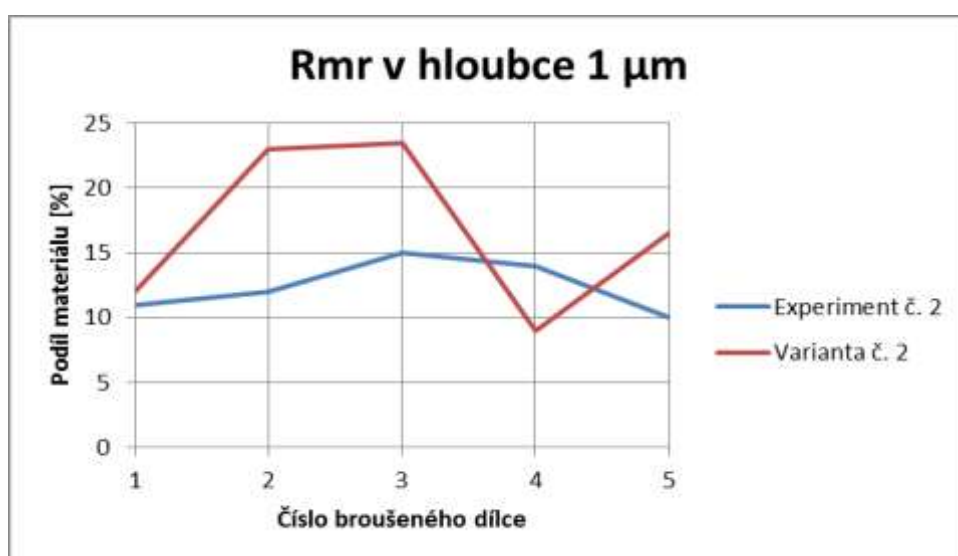
Z tabulky 13 vyplývá, že všechna ozubená kola jsou v mezích tolerančního pole. Poloha parametrů Rz a Pt v grafu je vhodná z hlediska umístění v mezích tolerančního pole. V porovnání s variantou experimentu číslo 2 z prvního experimentu bylo zde dosaženo menšího rozptylu hodnot. V případě parametru Rz byl rozptyl menší o 25% a v případě parametru Pt o 7%.

### 3.3. Analýza parametru Rmr

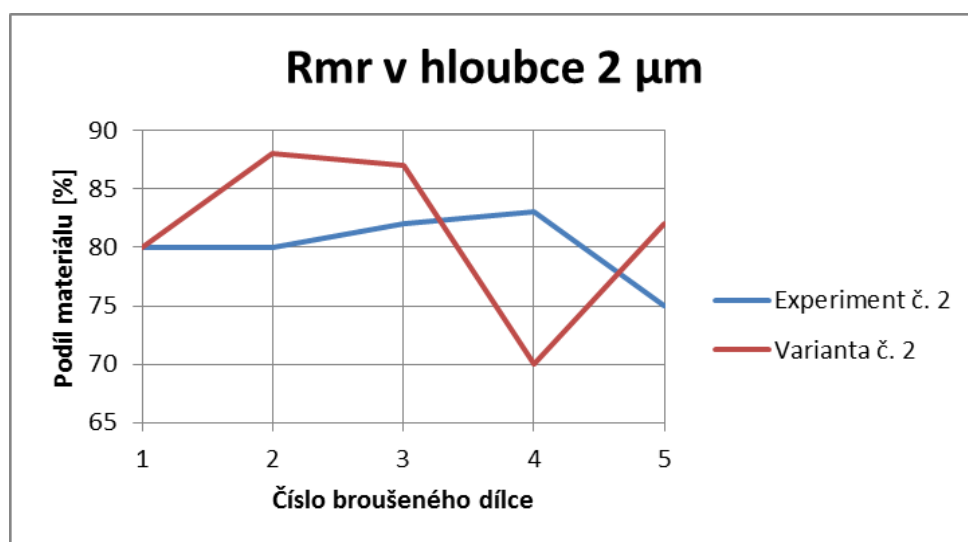
Parametr Rmr byl měřen v hloubkách 1 μm, 2 μm, 3 μm a 4 μm. Naměřené hodnoty byly zaneseny do tabulky a následně byly sestrojeny grafy charakterizující podíl materiálu v jednotlivých hloubkách. V grafech je porovnávána varianta č. 2 z předchozího experimentu s hodnotami, které byly naměřeny v tomto experimentu.

Tabulka 14 - Naměřené hodnoty parametru Rmr v jednotlivých vrstvách povrchu.

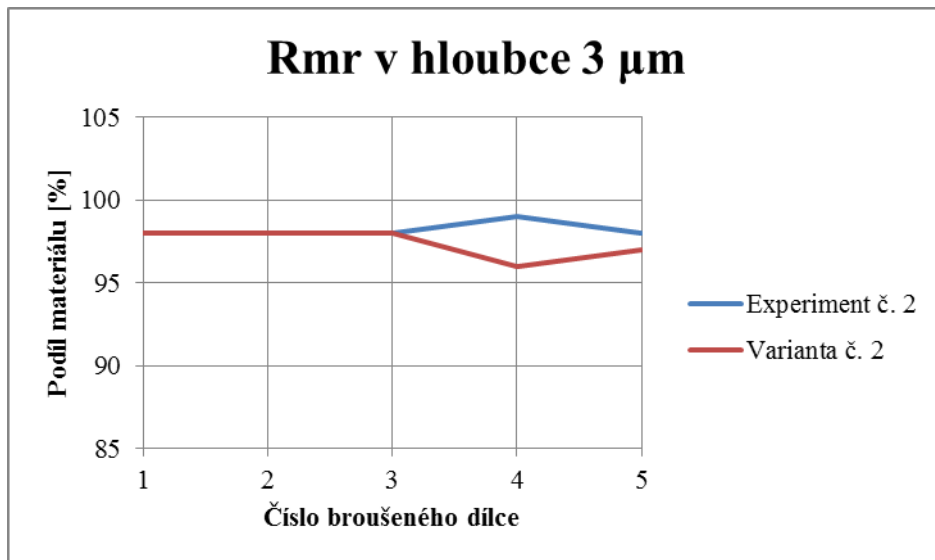
	1 $\mu\text{m}$	2 $\mu\text{m}$	3 $\mu\text{m}$	4 $\mu\text{m}$
Rmr [%]	11	80	98	100
	12	80	98	100
	15	82	98	99
	14	83	99	100
	10	75	98	100
MIN	10	75	98	99
MAX	15	83	99	100
průměr	12,4	80	98,2	99,8
rozptyl	5	8	1	1



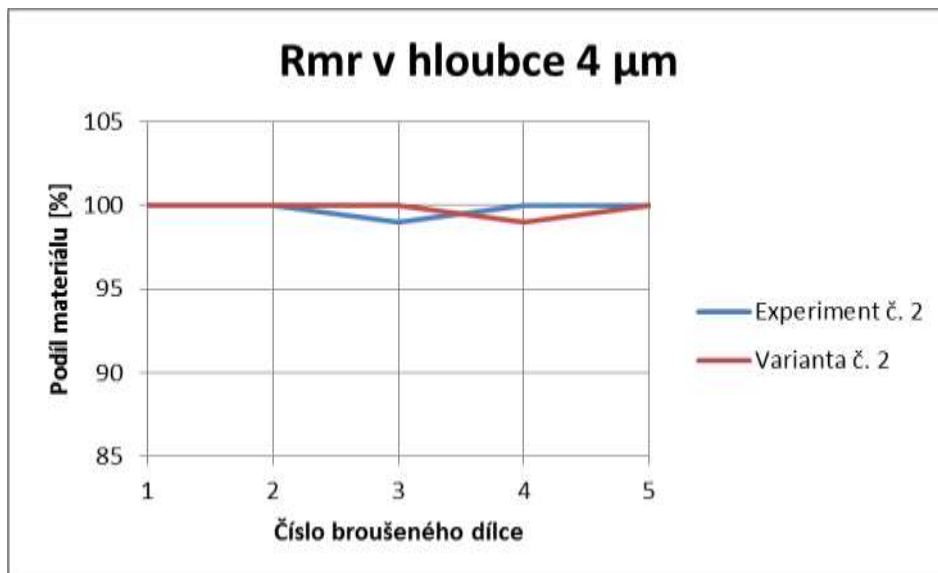
Obrázek 26 - Grafické porovnání Rmr varianty č. 2 z experimentu č. 1 a experimentu č. 2.



Obrázek 27 - Grafické porovnání Rmr varianty č. 2 z experimentu č. 1 a experimentu č. 2.



Obrázek 28 - Grafické porovnání Rmr varianty č. 2 z experimentu č. 1 a experimentu č. 2.



Obrázek 29 - Grafické porovnání Rmr varianty č. 2 z experimentu č. 1 a experimentu č. 2.

### 3.4. Závěr k experimentu č. 2

Z grafů je patrné, že hodnoty naměřené ve 2. variantě experimentu vykazují větší hodnoty rozptylu naměřených hodnot a to především v hloubkách 1  $\mu\text{m}$  a 2  $\mu\text{m}$ . Navzdory velkému výkyvu hodnot v těchto hloubkách bylo dosaženo lepšího průměrného materiálového nosného podílu ve 2. variantě předchozího experimentu. Toto tvrzení je zdokumentováno v následující tabulce.

Tabulka 15 - Porovnání průměrných hodnot Rmr.

$\bar{\sigma}$ Rmr [%]	1 $\mu\text{m}$	2 $\mu\text{m}$	3 $\mu\text{m}$	4 $\mu\text{m}$
Experiment č. 1, varianta č. 2	16,8	81,4	97,4	99,8
Experiment č. 2	12,4	80	98,2	99,8

Velké rozptyly naměřených hodnot, které byly zjištěny v předchozím experimentu, mohli být způsobeny zcela novým brousicím kotoučem a orovnačem.

Dále je patrné, že i když nebyl splněn předepsaný rychlostní poměr kotouče a orovnače, tak nedošlo ke znatelnému zhoršení procesu.

## 4. EXPERIMENT č. 3

Tento experiment se podobě jako předešlý zabývá analýzou následků při nedodržení rychlostního poměru. V tomto případě budou nastaveny řezné podmínky  $v_b$  a  $v_d$  tak, aby byl pokryt horní interval tj.  $CR \in (0,6; 1)$ . Hodnoty řezných podmínek  $s_d$ ,  $v$  a  $t$  budou nastaveny s ohledem na zkoušky, které byly provedeny v minulosti.

Důvod realizace tohoto experimentu je požadavek firmy BUDERUS, která stanovila, že při řezných podmínkách viz tab. 11 bude brousicí proces stabilní a parametry  $R_z$  a  $P_t$  budou v mezích tolerančního pole.

Rychlostní poměr v tomto experimentu je **0,71**.

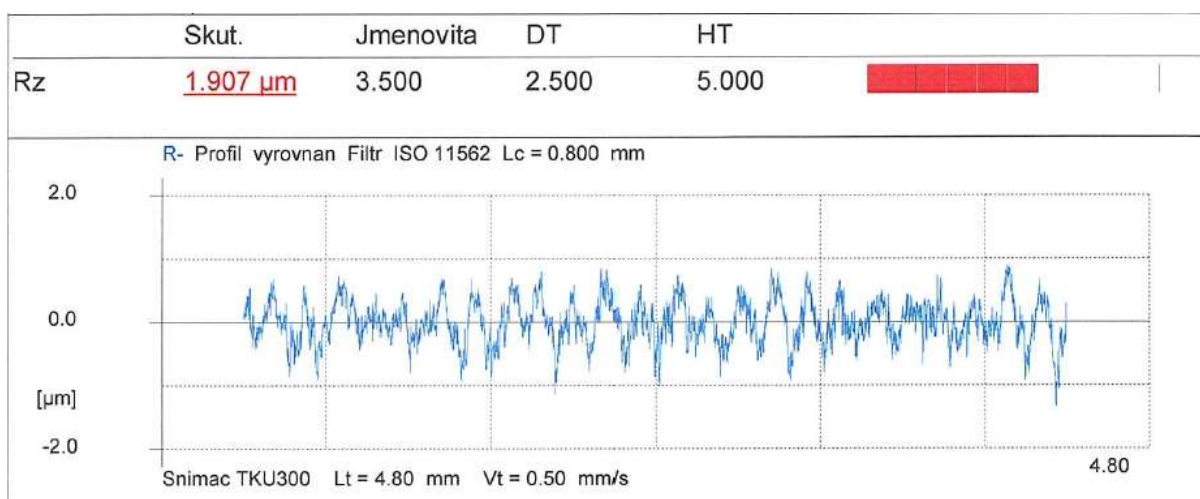


Tabulka 16 - Řezné podmínky doporučené firmou Buderus.

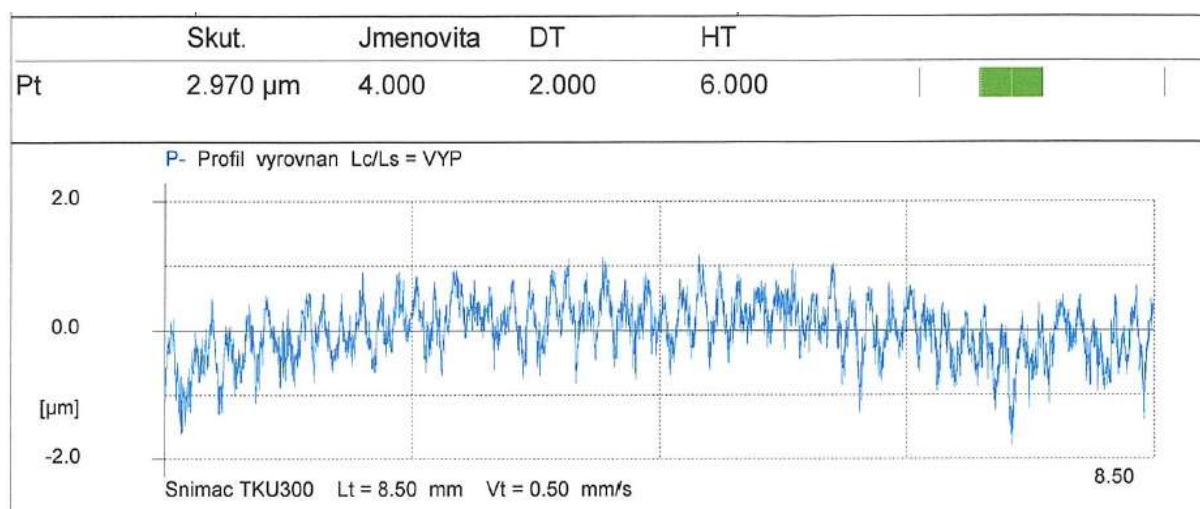
vb [m/sec]	vd [m/sec]	sd [mm/min]	t [mm]	v [s]
70	50	250	4	1,5

#### 4.1. Postup měření

Před začátkem experimentu byl stroj seřízen seřizovačem, následně bylo broušeno 5 kusů ozubených kol, z nichž bylo měřeno pouze jedno. Po zjištění naměřených výsledků byl stroj okamžitě přenastaven do původních hodnot, protože se jednalo o zkoušku, která probíhala při výrobě.



Obrázek 30 - Hodnota parametru Rz.



Obrázek 31 - Hodnota parametru Pt.

## 4.2. Závěr k experimentu č. 3

Nastavené řezné podmínky jsou nevyhovující z důvodu dosažení lepších parametrů drsnosti, než je požadováno. Tento případ, kdy je drsnost lepší než se vyžaduje je nevhodný z hlediska toho, že broušená plocha (kužel) je příliš „hladká“. Při vzniku tohoto případu dochází k tomu, že protikus, kterým je synchronizační kroužek nedrží na kuželu ozubeného kola a působí hluk při provozu převodovky.

## 5. ZÁVĚR

Experimenty, které byly provedeny v praktické části této práce, byly postaveny především na tzv. rychlostním poměru. Při sestavování intervalů pro jednotlivé experimenty jsem se opíral o výzkum, který byl proveden ing. Johnem R. Bessem [7]. Výsledkem výzkumu ing. J. R. Besseho. byla tabulka doporučených rychlostních poměrů pro broušení různými abrazivními materiály.

<b>Abrazivní materiál</b> ↓	<b>Rychlostní poměr</b>		
<b>Vazba</b> →	<b>Keramická</b>	<b>Syntetická Pryskyřice</b>	<b>Kovová</b>
<b>Úmělý korund</b>	+0.5 to +0.8	+0.3 to +0.5	n/a
<b>Karbid křemíku</b>	-0.3 to -0.5	-0.3 to -0.5	n/a
<b>CBN</b>	+0.4 to +0.6	+0.4 to +0.6	-0.4 to -0.6
<b>Diamant</b>	-0.5 to -0.8	-0.5 to -0.8	-0.5 to -0.8

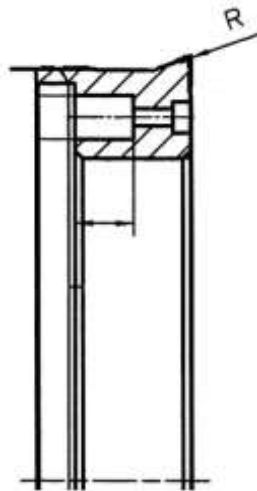
Obrázek 32 - Tabulka doporučených rychlostních poměrů [7].

Hodnoty řezných podmínek  $sd$ ,  $v$  a  $t$  byly nastavovány jednak po konzultaci s technologem a jednak se opíraly o zkoušky, které již byly provedeny v minulosti.

Celkem byly provedeny tři experimenty. Všechny experimenty byly uskutečněny na jednom stroji a byly použity stejné nástroje. Výsledky experimentů číslo 1 a 2 vyšly v mezích tolerančního pole krom jednoho obrobku (varianta č. 3, experiment č. 1). Výsledek experimentu č. 3 ležel mimo toleranční pole.

Experimentem č. 1 byl potvrzen výzkum prováděný ing. J R. Bessem. V experimentu č. 2 bylo dokázáno, že rychlostní poměr v intervalu  $CR \in (0; 0,4)$  neměl za následek zhoršení procesu, jak jsem očekával.

Cílem této práce bylo navrhnout optimální řezné podmínky pro daný proces. Optimálními řeznými podmínkami se mají na mysli podmínky splňující vysoký materiálový nosný podíl (už od malých hloubek) a dodržení parametrů Rz a Pt. Během mého pobytu ve firmě jsem došel k názoru, že je obtížné stanovit pouze jednu správnou variantu řezných podmínek, protože podmínky broušení se neustále mění. Změny jsou dány především obrušováním broušícího kotouče, který zmenšuje svůj průměr. Další významná změna souvisí s opotřebením orovnače. Přestože je činná část orovnače zhotovena z diamantu, tak bylo zjištěno, že dochází k mírnému opotřebení v oblasti rádiusu orovnače za vzniku plošky.



Obrázek 33 - činná část orovnače, kde R označuje rádius.

Řezné podmínky, které byly doporučeny vedoucímu úseku broušení, byly z intervalu  $CR \in (0,4; 0,6)$ , konkrétně se jedná o řezné podmínky podobné podmínkám z varianty č. 2.

**Tabulka 17 - Doporučené řezné podmínky.**

vb [m/s]	70
vd [m/s]	28
s [mm/min]	350
t [mm]	0,004
v [s]	1,5

## SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] J.N.Maslov. (1979). *Teorie broušení kovů*. Praha: Nakladatelství technické literatury.
- [2] HOLEŠOVSKÝ, František a Martin NOVÁK. *Obrábění a montáže*. 1. vyd. Ústí nad Labem: Univerzita J.E. Purkyně v Ústí nad Labem, 2012. ISBN 978-80-7414-530-8.
- [3] Jan Mádl, F. H. (2008). *Integrita obrobených povrchů z hlediska funkčních vlastností*. Ústí nad Labem: Univerzita J.E. Purkyně, FVTM, Ústí nad Labem. ISBN 978-80-7414-095-2.
- [4] MARINESCU, Ioan D. *Handbook of machining with grinding wheels*. Boca Raton, Fla.: CRC / Taylor & Francis Group, 2007. ISBN 9781574446715.
- [5] LEINVEBER, Jan a Pavel VÁVRA. *Strojnické tabulky: pomocná učebnice pro školy technického zaměření*. 5., upr. vyd. Úvaly: Albra, 2011. ISBN 978-80-7361-081-4.
- [6] JUSKO, Ondřej a František HOLEŠOVSKÝ. *Vývoj a inovace brousicích nástrojů*. Ústí nad Labem. UJEP v Ústí nad Labem, Fakulta výrobních technologií a managementu.
- [7] BESSE, John. Under Control. *Ctemag* [online]. 2012, 6(64), 4 [cit. 2016-04-12].  
Dostupné z:  
[http://www.nortonindustrial.com/uploadedFiles/SGindnortonabrasives/Documents/Articles/Article-UnderControl-CTE-June2012\(1\).pdf](http://www.nortonindustrial.com/uploadedFiles/SGindnortonabrasives/Documents/Articles/Article-UnderControl-CTE-June2012(1).pdf).
- [8] Systém měření drsnosti: parametry drsnosti. In: *Hommel-etamic* [online]. Karoliny Světlé 2546, 415 01 Teplice [cit. 2016-03-30]. Dostupné z: [http://www.hommel-etamic.cz/files/094\\_14-hommel-plakat-drsnost-1000x700mm.pdf](http://www.hommel-etamic.cz/files/094_14-hommel-plakat-drsnost-1000x700mm.pdf).
- [9] CBN and Diamond grinding wheels. In: *Naxos-diskus* [online]. Werner-von-Siemens-Straße 1 D-35510 Butzbach: NAXOS-DISKUS Schleifmittelwerke GmbH [cit. 2016-03-30].  
Dostupné z: [http://naxos-diskus.dvs-gruppe.com/uploads/tx\\_xpctypedownloadssimple/NAXOS\\_DISKUS\\_CBN\\_EN\\_210x297\\_15\\_1015\\_WEB\\_ES\\_03.pdf](http://naxos-diskus.dvs-gruppe.com/uploads/tx_xpctypedownloadssimple/NAXOS_DISKUS_CBN_EN_210x297_15_1015_WEB_ES_03.pdf).
- [10] Skripta\_Technologie\_II\_2dil. In: *Homel* [online]. [cit. 2016-03-30]. Dostupné z: [http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/skripta\\_Technologie\\_II\\_2dil.pdf](http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/skripta_Technologie_II_2dil.pdf)

- [11] *DIA Praha: Diamond Tools & Abrasives* [online]. 104 00 Praha 10 - Křeslice, 2014 [cit. 2016-03-31]. Dostupné z: <http://www.diapraha.cz/>
- [12] Buderus "CNC- Vertikal- Hartbearbeitungszentrum. In: *Buderus-schleiftechnik* [online]. Industriestraße 3 D-35614 Aßlar, 2015 [cit. 2016-03-31]. Dostupné z: [www.buderus-schleiftechnik.de](http://www.buderus-schleiftechnik.de)
- [13] *HOMMEL-ETAMIC C8000 Profiloměr: Měřicí pracoviště pro měření profilu povrchu* [online]. In: . s. 1 [cit. 2016-04-30]. Dostupné z: [http://www.hommel-etamic.cz/files/products/mereni-drsnosti-a-profilu-povrchu/produkt\\_hommel-etamic-c8000-profilomer.pdf](http://www.hommel-etamic.cz/files/products/mereni-drsnosti-a-profilu-povrchu/produkt_hommel-etamic-c8000-profilomer.pdf)
- [14] BROZINA, J. *Analýza a kvantifikace přesnosti broušicího procesu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 66 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jaroslav Prokop, CSc.
- [15] Nekola, Z. (20. 8 2013). *Broušení ozubených kol*. Mladá Boleslav, Česká Republika.
- [16] *Dascolene 617: čistý olej na obrábění a broušení*. Údolní 37, 602 00 Brno, Česká Republika, 2015.
- [17] BERÁNEK, Libor. *Strojírenská metrologie*. [přednáška]. Praha: ČVUT, prosinec 2015.
- [18] Štajnochr, Lubomír. *Obráběcí nástroje*. [přednáška]. Praha: ČVUT, prosinec 2015.
- [19] Holešovský František. *Speciální technologie obrábění*. [přednáška]. Praha: ČVUT, duben 2016.

## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

<b>Zkratka</b>	<b>Popis</b>
DQ200	typové označení převodovky
CNC	číslicové řízení počítačem
CBN	kubický nitrid boru
HRC	tvrdost dle Rockwella
HB	tvrdost dle Brinella
CR	rychlostní poměr
MKD, PKD, CVD	typy orovnávacích destiček
IT	zkratka označující třídy přesnosti
R, W, P	parametry struktury povrchu

<b>Symbol</b>	<b>Jednotka</b>	<b>Popis</b>
$\delta_0$	[°]	úhel řezu
$\alpha_0$	[°]	úhel hřbetu
$\gamma_0$	[°]	úhel čela
$F_c$	[N]	tečná složka
$F_p$	[N]	pasivní složka
$F_f$	[N]	posuvová složka
$R_m$	[MPa]	mez pevnosti
$R_e$	[MPa]	mez kluzu

$v_c$	[m/s]	řezná rychlost
vb	[m/s]	rychlost broušení
vd	[m/s]	rychlost orovnávání
sd	[mm/min]	posuv při orovnávání
t	[mm]	tloušťka orovnané vrstvy
v	[s]	vyjiskření
Rz	[ $\mu$ m]	maximální výška profilu
Pt	[ $\mu$ m]	maximální hloubka profilu
Rmr	[ $\mu$ m]	materiálový nosný podíl
Lt	[mm]	měřicí dráha
Ls	[mm]	krátkovlnný filtr
Lc	[mm]	základní délka
Vt	[mm/s]	posuvová rychlost



## SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha 1 Tabulky shrnující materiálové nosné poměry experimentu číslo 1 v různých hloubkách.
- Příloha 2 Protokoly měření z experimentu číslo 1 [E1], protokoly parametrů Pt a Rmr. Varianta číslo 1 až 4 [V1-V4].
- Příloha 3 Protokoly měření z experimentu číslo 1 [E1], protokoly parametru Rz. Varianta číslo 1 až 4 [V1-V4].
- Příloha 4 Protokoly měření z experimentu číslo 2 [E2], protokoly parametrů Rz. Pt, Rmr.