

**VŠB – Technická univerzita Ostrava**  
**Fakulta strojní**  
**Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie**

**Racionalizace procesu odvalovacího broušení ozubení Reishauer**  
**Process Rationalization of Reishauer Rolling Gear Grinding**

**Student: Martin Horváth**

**Vedoucí bakalářské práce: doc.Ing. Robert Čep, Ph.D.**

**Ostrava 2016**

## Zadání bakalářské práce

Student: **Martin Horváth**  
Studijní program: B2341 Strojírenství  
Studijní obor: 2303R002 Strojírenská technologie  
Téma: **Racionalizace procesu odvalovacího broušení ozubení Reishauer  
Process Rationalization of Reishauer Rolling Gear Grinding**  
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Úvod do problematiky.
2. Teoretický rozbor broušení ozubení.
3. Rozbor stávajícího stavu řešené problematiky.
4. Návrh nové technologie.
5. Technicko-ekonomické zhodnocení.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] BRYCHTA, J.; ČEP, R.; NOVÁKOVÁ, J.; PETŘKOVSKÁ, L. *Technologie II 1. díl*. Ostrava : Ediční středisko VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2007, s. 126. ISBN 978-80-248-1641-8.  
[2] BRYCHTA, J.; ČEP, R.; NOVÁKOVÁ, J.; PETŘKOVSKÁ, L. *Technologie II 2. díl*. Ostrava : Ediční středisko VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2008, s. 150. ISBN 978-80-248-1822-1.  
[3] NESLUŠAN, M.; TUREK, S.; BRYCHTA, J.; ČEP, R.; TABAČEK, M. *Experimentálne metody v trieskovom obrábání*. 1. vyd. Žilina : Žilinská univerzita v Žiline, EDIS, 2007. 343 s. ISBN 978-80-8070-711-8.  
[4] SHAW, Milton C. *Metal Cutting Principles*. 2nd edition. New York : Oxford University Press, 2005. 651. p. ISBN 0-19-514206-3.


Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Robert Čep, Ph.D.**

Datum zadání: 11.12.2015

Datum odevzdání: 16.05.2016



  
\_\_\_\_\_  
doc. Ing. et Ing. Mgr. Jana Petrů, Ph.D.  
vedoucí katedry

  
\_\_\_\_\_  
doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.  
děkan fakulty

### **Místopřísežné prohlášení studenta**

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě dne: 3. května 2016



.....  
podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě :.....*3.5.2016*.....



podpis


Jméno a příjmení autora práce: Martin Horváth

Adresa trvalého pobytu autora práce: Cihelní 576, Frýdek-Místek 738 01

## **Prohlášení zástupce spolupracující právnické nebo fyzické osoby**

„Souhlasím se zveřejněním této bakalářské práce dle požadavků čl. 26, odst. 9 Studijního a zkušebního řádu pro studium v bakalářských programech VŠB-TU Ostrava.“

Dne: *3. května 2016*

  
.....  
podpis zástupce

## **ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

HORVÁTH, M. *Racionalizace procesu odvalovacího broušení ozubení Reishauer : bakalářská práce*. Ostrava : VŠB-Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie, 2016, 44s. Vedoucí práce: doc.Ing. Robert Čep, Ph.D.

Bakalářská práce se zabývá problematikou procesu odvalovacího broušení ozubení Reishauer a možností zvýšení efektivity stávajícího výrobního zařízení. V úvodu je popsána teorie odvalovacího broušení, nástroje pro broušení ozubení a strojní vybavení. Poté následuje popis stávající technologie a problematiky na výrobní lince. Hlavní část práce se zabývá praktickou zkouškou nového progresivního brousícího nástroje, zvoleného pro racionalizaci procesu broušení ozubení. Závěrem je technicko-ekonomické zhodnocení výrobního procesu po zavedení nového nástroje do výroby.

## **ANNOTATION OF BACHELOR THESIS**

HORVÁTH, M. *Process Rationalization of Reishauer Rolling Gear Grinding : Bachelor Thesis*. Ostrava : VŠB-Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Machining and Assembly, 2016, 44 p. Thesis head: doc.Ing. Robert Čep, Ph.D.

Bachelor thesis deals with questions of generating gear grinding process Reishauer and possibilities of increasing efficiency of current manufacturing equipment. The introduction describes theory of generating gear grinding process, grinding tools and machines. The following part describes current technology and problematics of gear production line. Main part of thesis deals with practical try-out of new progressive grinding tool, which was selected to improve gear grinding process. Finally thesis describes evaluation of manufacturing process improvement by economical and performance point of view.

## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

CBN	Cubic Nitrid Boron (kubický nitrid boru)
CNC	Computer Numeric Control (číslicové řízení počítačem)
CVT	Continuous Variable Transmission (variátorová převodovka)
DIN	Detsche Industrie-Norm
$F_{\alpha}$	odchylka profilu
HMMC	Hyundai Motor Manufacturing Czech
HV	zkouška tvrdosti podle Vickerse
$L_{AE}$	činná délka profilu
$L_{\alpha}$	rozsah vyhodnocovaného profilu
NC	Numerical Control (číslicové řízení)
PSG	Precision Shaped Grain (přesně tvarované zrno)
$R_a$	střední aritmetická úchylka profilu [ $\mu\text{m}$ ]
$b$	šířka ozubeného kola [mm]
$d_a$	průměr hlavové kružnice [mm]
$d_o$	střední průměr nástroje [mm]
$f$	posuv za otáčku obrobku [mm/ot.obr]
$f_{fa}$	odchylka tvaru profilu
$f_{H\alpha}$	odchylka úhlu profilu
$k_s$	kus
$l_y$	zdvih, axiální dráha [mm]
$m$	modul ozubeného kola [mm]
max.	maximálně
min.	minimálně
$n_s$	otáčky nástroje [ot/min]
$n_w$	otáčky obrobku [ $\text{min}^{-1}$ ]
$n_{wdif}$	dodatečné otáčky (diferenciální) [ $\text{min}^{-1}$ ]
$n_{wsh}$	dodatečné otáčky (krokování) [ $\text{min}^{-1}$ ]

$S_{Hsp}$	délka kroku [mm]
$S_{Htot}$	délka kroku pro obrobek [mm]
$V_c$	obvodová nebo řezná rychlost [ $m.s^{-1}$ ]
$V_f$	posuvová rychlost [ $m.min^{-1}$ ]
$V_{fsh}$	rychlost krokování podél osy nástroje [ $m.min^{-1}$ ]
$V_{sh}$	rychlost krokování [ $mm.min^{-1}$ ]
$x$	posunutí profilu [mm]
$x_v$	radiální příisuv [mm]
$x_s$	radiální příisuv na zdvih [mm/zdvih]
$Z_w$	počet zubů obrobku
$Z_o$	počet chodů nástroje
$\alpha$	úhel záběru [ $^\circ$ ]
$\beta$	úhel sklonu boku zubu [ $^\circ$ ]
$\beta_o$	úhel vyklonění nástroje [ $^\circ$ ]
$\gamma_o$	úhel stoupání nástroje [ $^\circ$ ]
$\Delta s$	přídavek na obrábění [mm/bok]
€	měnová jednotka Euro



# Obsah

1 Úvod.....	10
2 Broušení .....	11
2.1 Parametry broušení.....	13
3 Broušení ozubení.....	14
3.1 Odvalovací broušení – kontinuální odvalovací broušení .....	15
3.2 Metoda a proces broušení.....	16
3.2.1 Výkyvné (axiální) broušení.....	18
3.2.2 Krokovací (diagonální) broušení.....	18
3.2.3 Krokovací broušení s vysokou výkonností .....	19
3.3 Orovnávatelné broušící šneky .....	20
3.4 Orovnávací nástroje .....	24
3.5 Odvalovací brusky Reishauer .....	27
4 Rozbor stávajícího stavu řešené problematiky.....	31
4.1 Popis stávající technologie .....	32
5 Návrh nové technologie .....	34
5.1 Zkoušky nového nástroje .....	36
5.2 Kontrola profilu ozubení .....	38
6 Technicko-ekonomické zhodnocení.....	40
7 Závěr .....	42
8 Použitá literatura .....	43

## 1 Úvod

Ozubená kola a převody ozubenými koly mají od počátku industrializace a automobilizace až dodnes velký hospodářský význam. Světovou produkci ozubených kol a převodů s ozubenými koly lze jen odhadovat, neboť neexistují, nebo nejsou zveřejňovány, skutečné počty. Je však znám počet vyrobených vozidel, i když ne počet jednotlivých variant převodů. Jsou to čtyř-, pěti-, nebo šestistupňové převodovky. Jedná se o ruční, automatické nebo převodovky bez ozubených kol CVT.

Počet vyrobených motorových vozidel nám však umožňuje udělat si představu o počtu vyrobených ozubených kol. Každé vozidlo může představovat v pohonném řetězci (motor – převodovka – osový diferenciál) deset až dvacet ozubených kol. Podle statistik bylo v roce 2015 vyrobeno 68,56 miliónů osobních automobilů a 22,15 miliónů nákladních aut. To představuje ročně od 0,9 – 1,8 miliardy ozubených kol.

Analýzy ukazují, že ani v budoucích dvou desetiletích se hospodářský význam ozubených kol v automobilovém průmyslu nebude příliš měnit. Podle nich se patrně sníží podíl převodovek s manuálním řazením. Existuje předpoklad, že potenciál automatických převodovek v Evropě stoupne na významných padesát procent. Zesílí trend směrem k automatické změně rychlosti pomocí elektronicky řízeného mechanismu, k novým převodům s dvojitou spojkou.

S nárůstem produkce ozubených kol se klade ve výrobě čím dál větší důraz na zvyšování produktivity výroby při současném snižování výrobních nákladů. Snahou je při stávajících výrobních kapacitách dosáhnout vyšší produktivity výrobního zařízení. Tato snaha vede k vývoji stále nových progresivních metod a technologií.

Bakalářská práce je zpracována pro společnost Hyundai Motor Manufacturing Czech, s.r.o., která je předním světovým výrobcem automobilů. Výrobní závod má roční kapacitu 350 000 osobních automobilů a 580 000 manuálních převodovek.

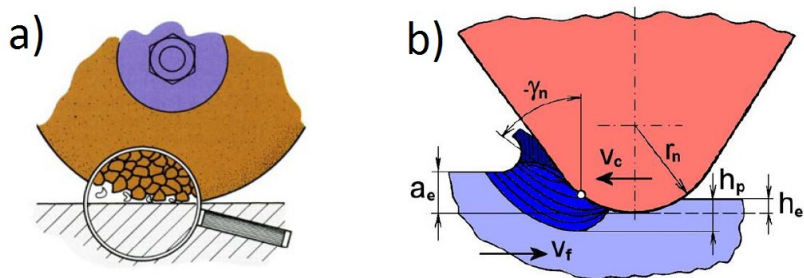
Ve své práci se budu zabývat technologií odvalovacího broušení ozubení. V úvodu budu popisovat teoretický rozbor broušení ozubení. Další část se bude zabývat rozбором stávajícího stavu řešené problematiky na provozu broušení ozubení převodovkárny v HMMC. Cílem práce je vyhodnotit stávající stav technologie broušení ozubení a návrhnout novou technologii pro zefektivnění procesu.

## 2 Broušení

Je to metoda obrábění mnohobřítými nástroji s geometricky nedefinovatelnými řeznými hranami (zrna brusiva), které jsou spojeny pojivem. Broušení jako hlavní dokončovací metoda umožňuje získat vysokou přesnost obrobené plochy. Broušení patří mezi nejstarší metody obrábění vůbec. V současné době se díky možnostem rozšiřuje z původního pouze dokončovacího obrábění a svou produktivitou se dá srovnat s ostatními metodami obrábění.

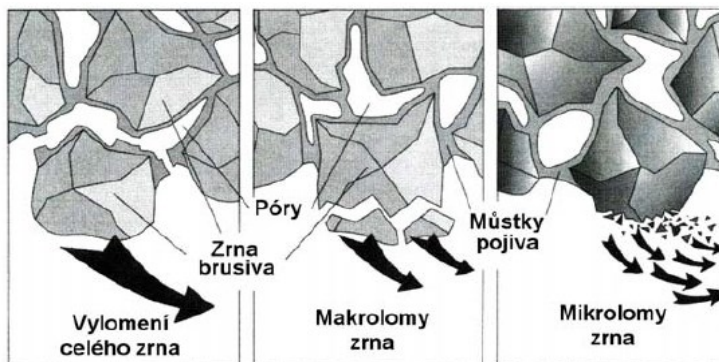
Charakteristické znaky procesu broušení jsou v [1] popsány takto:

- z důvodu různé geometrické formy zrn a jejich nepravidelného rozmístění v brousícím nástroji dochází k nepravidelnému úběru třísky,



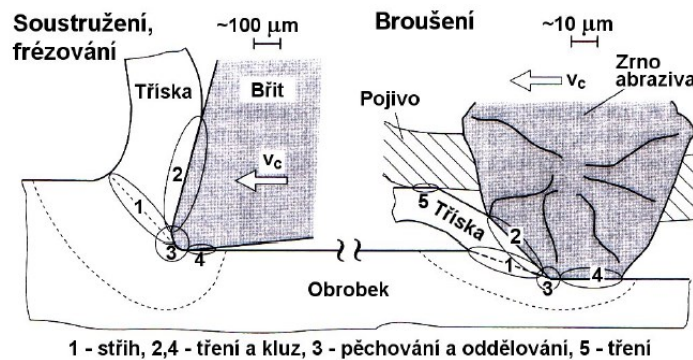
Obr. č. 2.1 – a) Nepravidelný úběr třísky, b) Úhly jednotlivých zrn brusiva [1]

- záporné úhly čela jednotlivých zrn jsou různé a obvykle velké (ovlivňují oblast primární plastické deformace),
- brusná zrna jsou schopna přenášet pouze malé řezné síly (slabé upevnění zrn pojivem), při obrábění se samovolně uvolňují jednotlivá zrna nebo jejich části („samoostření“ brousícího kotouče),



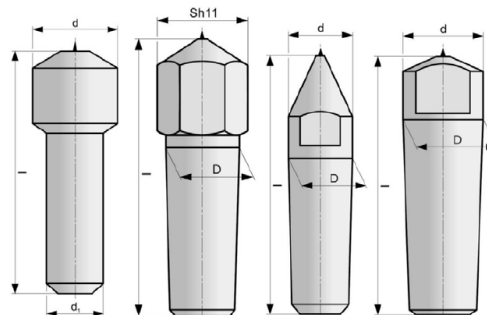
Obr. č. 2.2 – Ukázky vylamování zrn [1]

- třísky jsou malého průřezu (asi  $10^{-3} \text{ mm}^2$ ), řez je přerušovaný a třísky mají proměnlivý průřez (obdobu s frézováním), při broušení dochází v důsledku velkých plastických deformací a tření třísky k takovým vysokým teplotám (až  $1500 \text{ }^\circ\text{C}$ ), které vedou k roztavení a shoření některých třísek (jiskření),
- působení velkých měrných řezných sil (odporu) až do výše několika desítek tisíc MPa, vysoká řezná rychlost ( $30\div 100 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) a z toho vyplývající krátká doba záběru jednotlivých zrn,
- z důvodu vzniku velkého tepla při broušení je potřeba chladit obrobek i řezný kotouč. Teplo vznikající při broušení způsobuje oduhlíčení povrchu obrobku, tak dochází ke vzniku trhlin a ke změnám struktury a také má za následek vznik nepříznivých tahových zbytkových napětí v povrchové vrstvě obrobku,



Obr. č. 2.3 – Tvorba třísky při broušení ve srovnání se soustružením a frézováním [1]

- otupování ostří jednotlivých zrn brusiva a zanášení pórů třískami způsobuje ztrátu řezivosti. Řezivost se obnovuje pomocí orovnávačů (jednokamenové, vícekamenové, ploché, tvarové).



Obr. č 2.4 – Jednokamenové orovnávače [1]

Broušení jako dokončovací operace má podle [1] tyto hlavní přednosti:

- velkou přesnost ( $1\div 3\ \mu\text{m}$ ), správnost geometrických tvarů (kruhovitost i pod  $0,2\ \mu\text{m}$ ) a malou drsnost obrobené plochy ( $R_a = 0,8\ \mu\text{m} \div 0,2\ \mu\text{m}$ ),
- broušením lze obrábět i velmi tvrdý materiál (kalenou ocel, slinuté karbidy, tvrzenou litinu, atd.),
- broušení je velmi produktivní, jak ukazuje velikost plochy součásti obrobené za jednotku času.

Brousit se dají různé povrchy v různých polohách, proto existuje velké množství druhů broušení. Podle tvaru obrobené plochy se rozlišuje:

- rovinné broušení (pro rovinné plochy),
- broušení dokulata (pro rotační plochy),
- broušení na otáčivém stole (broušení s rotačním posuvem),
- broušení tvarovými brousícími kotouči (pro tvarové plochy),
- kopírovací broušení (na NC a CNC strojích),
- tvarové broušení (výroba závitů, ozubených kol,...).

## 2.1 Parametry broušení

Aby bylo možné optimalizovat a tím zvýšit výkonnost procesu broušení, musíme znát souvislosti mezi vstupními a výstupními parametry procesu. Vstupní veličiny jak uvádí [3] se mohou skládat z proměnných veličin systému obrábění. K tomuto systému patří stroj, obrobek a nástroj, ale také orovnávací nástroj a chladicí, filtrovací a mazací zařízení. I posledně jmenované prvky mohou proces broušení výrazně ovlivnit. Podobně jako u broušení je vhodné si rozdělit řešení problémů do jednotlivých oblastí:

- Stroj velikost, konstrukce, pohony a posuvy, výkon, řízení, regulace, stupeň automatizace, statická a dynamická tuhost, atd.
- Obrobek materiál, stav, předhrubování, způsob upnutí, hmotnost, poloha a tvar boků zubů (vnitřní, vnější přímé, šikmé ozubení), tvrdost, obrobiteľnosť, atd.
- Brousící nástroj typ zrna, velikost zrna, tvrdost, struktura, pojivo, materiál (korund, slinovaný korund, kubický nitrid boru), pórovitost, atd.
- Orovnávací nástroj statický nebo rotující, tvar a uspořádání, relativní pohyby při orovnávacím procesu (charakteristiky orovnávaní).

Systémové veličiny jsou dány a během procesu broušení zůstávají konstantní. Naopak u akčních veličin dochází k plynulým nebo přerušovaným změnám. Přitom platí: přísuv, posuv, odval (rotace a translace), řezný pohyb nebo jeho rychlost, ty všechny se skládají často z více složek.



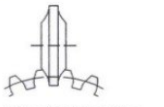

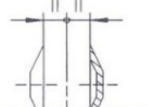

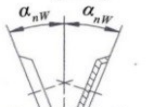
Vstupní charakteristiky se vztahují k procesu broušení a orovnávací. Orovnávací proces je přitom považován za samostatný proces, jehož výsledek charakterizuje stav brousicího kotouče.

Kontrolu procesu broušení je možné provádět pomocí naměřených a vypočtených veličin jako jsou množství odebrané třísky, síly při broušení, opotřebení, teplota broušení a elektrický výkon brousicího vřetene.

Vedle technologických hledisek je třeba dbát při celkovém hodnocení brousicího procesu nebo pro porovnání metod také na rozměrovou a funkční kontrolu a na produktivitu, flexibilitu a výrobní náklady.

### 3 Broušení ozubení

Metody broušení ozubených kol je možné rozdělit podle vytváření evolventní plochy do dvou hlavních skupin, a to na odvalovací a profilové broušení. Toto hrubé rozdělení je možné dále specifikovat podle časového průběhu broušení na diskontinuální a kontinuální.

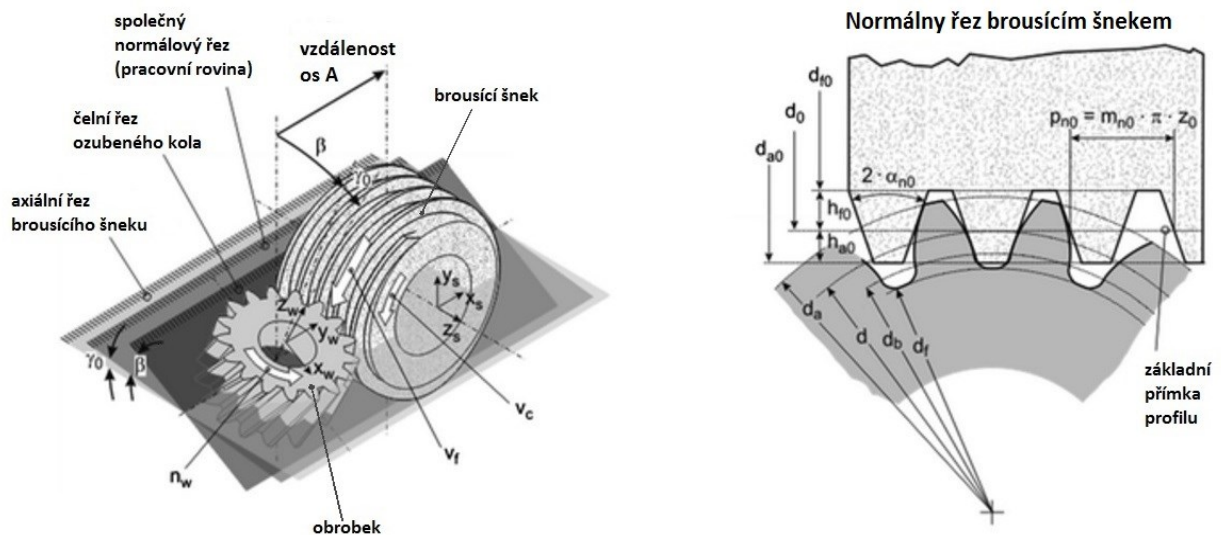
Broušení čelních ozubených kol			
Odvalovací broušení		Profilové broušení	
Diskontinuální	Kontinuální	Diskontinuální	Kontinuální
 <p>Broušení kotoučem lichoběžníkového osového profilu (Niles)</p>	 <p>Broušení válcovým šnekem (Reishauer)</p>	 <p>Broušení jedním oboustranně tvarovaným kotoučem</p>	 <p>Broušení globoidním šnekem</p>
 <p>Broušení dvojicí kolmo postavených kotoučů (Maag)</p>		 <p>Broušení dvojicí jednostranně tvarovaných kotoučů</p>	
 <p>Broušení dvojicí kotoučů skloněných pod normálním úhlem záběru (Maag)</p>			

Obr. č. 3.1 – Přehled metod broušení čelních ozubených kol [3]

Tato bakalářská práce se zabývá kontinuálním odvalovacím broušením ozubených kol, proto v následujících částech bude zaměřena právě na tuto metodu.

### 3.1 Odvalovací broušení – kontinuální odvalovací broušení

Broušení boků zubů ozubených kol šnekem, podle systému rozdělení DIN označované jako kontinuální odvalovací broušení, se shoduje s odvalovacím frézováním a s modelem šnekového převodu. Základem pro odvalovací broušení popisvaným v [5], je nástroj ve tvaru šneku, jehož osový řez vykazuje profil ozubeného hřebene. Součinností brousícího šneku a ozubeného kola je vytvořen plynulým způsobem evolventní tvar boku zubu jako soubor obálkových řezů. Protože při použití šneku se brousí více než dva boky zubů současně, je výkon oddělování třísky při plynulém způsobu broušení vyšší než při přerušovaném.

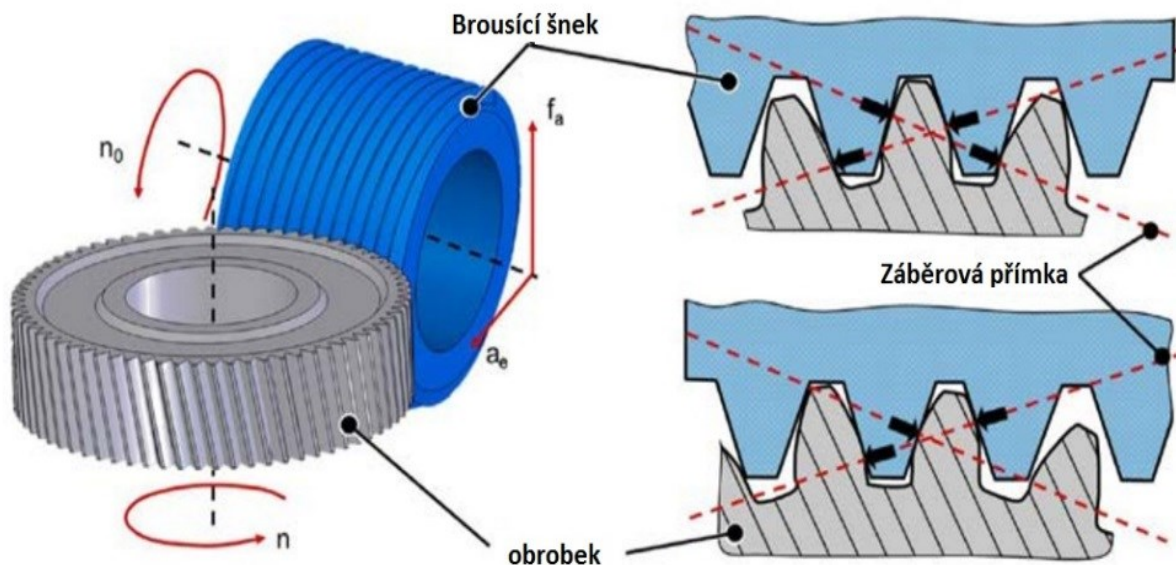


Obr. č. 3.2 – Kontinuální odvalovací broušení, princip metody a parametry [5]

Při odvalovacím broušení válcovým šnekem dochází k bodovému kontaktu ve více zubových mezerách v závislosti na překrytí. U rotujícího nástroje bude z bodového kontaktu díky spojení rotace nástroje a obrobku kontakt čárový, který je odvozen od pohybu dotykového bodu podél dotykové dráhy. Při odvalovacím broušení válcovým šnekem se vytváří na bocích zubů stopy po posuvu, které podobně jako u odvalovacího frézování vznikají axiálním posuvem nástroje na otáčku obrobku.

Za vynikající charakteristický znak odvalovacího broušení válcovým šnekem lze považovat vytváření minimálních odchylek v roztečích zubů a radiálním házení ozubení.

Výkonnost řezání je při kontinuálním broušení omezená v první řadě opotřebením korundového brousícího šneku, v druhé řadě tepelně podmíněnými poruchami při broušení. Při broušení šneky s galvanicky spojeným CBN dochází k opačnému pořadí těchto omezení.



Obr. č. 3.3 – Příklady bodového kontaktu při odvalovacím broušení [5]

Oblast použití moderních odvalovacích brusek zahrnuje ozubená kola s přímými a šikmými zuby, moduly od 0,5 mm do 10 mm a vnější průměry obrobku do 1000 mm.

Odvalovací broušení je úzce spojeno se jménem Reishauer. Jako první a dodnes vedoucí na trhu dodává firma Reishauer od roku 1945 stroje do celého světa, proto je broušení boků zubů pomocí šneků označováno také jako „metoda Reishauer“.

### 3.2 Metoda a proces broušení

Charakteristické veličiny při odvalovacím broušení a jejich pojmenování není normalizováno a liší se podle výrobců strojů. Přehled důležitých veličin v tab. č.1 má přispět ke sjednocení používaných pojmů.

Hlavní parametry brusného procesu jak uvádí [3] jsou axiální posuv na otáčku obrobku a radiální přísuv. U starších strojů se brousící šneky postupně přisouvaly radiálně na čelní ploše ozubeného kola (na horním nebo dolním úvratovém bodu pracovního zdvihu) ve více krátkých krocích. Na rozdíl od toho se u moderních strojů přisouvají pouze jednou pro hrubovací a jednou pro dokončovací řez. Jednotlivé varianty můžeme rozdělit na výkyvné (axiální) a krokovací (diagonální).

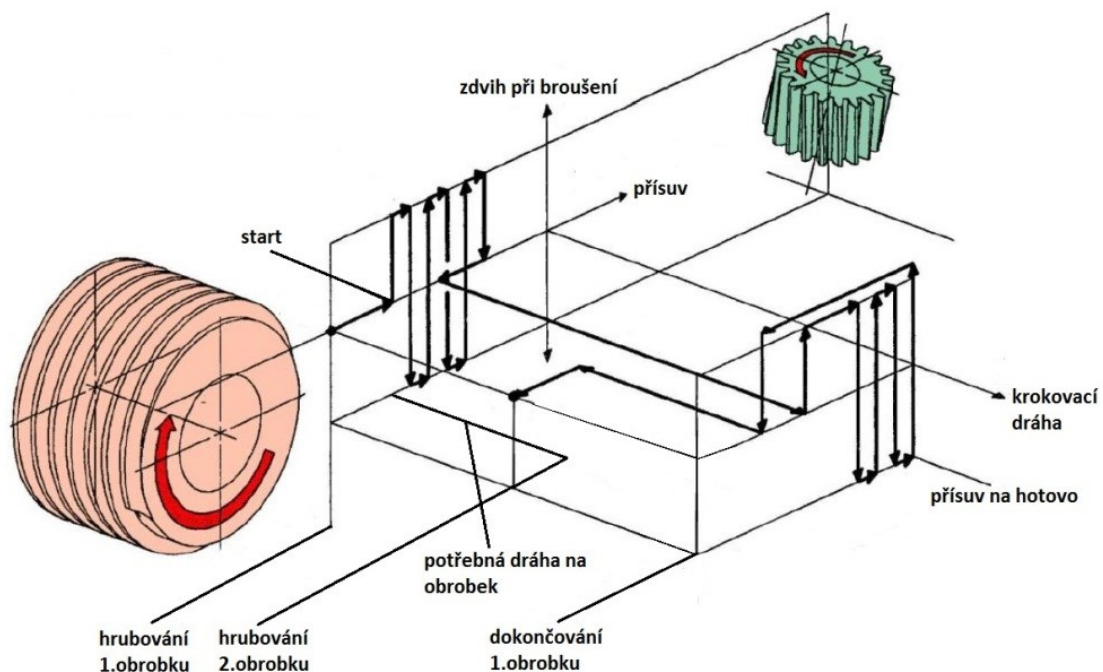


Tabulka. č. 1 – Pojmenování veličin pro kontinuální odvalovací metody [3]

<b>Parametr</b>	<b>Rozměr</b>	<b>Značka, zkratka</b>
<b>Nástroj</b>		Index 0 (s)
Střední průměr	mm	$d_0 (d_s)$
Počet otáček	ot/min	$n_s$
Obvodová nebo řezná rychlost		$v_c (m.s^{-1})$
(Střední) úhel stoupání	°	$\gamma_0$
Úhel sklonu ( $90^\circ - \gamma_0$ ), vyklonění	°	$\beta_0$
Počet chodů		$z_0$
<b>Obrobek</b>		Index w
Počet zubů		$z_w$
Otáčky	$min^{-1}$	$n_w$
Dodatečné otáčky (diferenciální)	$min^{-1}$	$n_{wdif}$
Dodatečné otáčky (krokování)	$min^{-1}$	$n_{wsh}$
Úhel sklonu zubu	°	$\beta$
Přídavek na obrábění	mm/bok	$\Delta s$
<b>Proces broušení</b>		
(Axiální) posuv za otáčku obrobku	mm/ot.obr	$f (f_a)$
Posuvová rychlost, axiální	$m.min^{-1}$	$v_f (v_a)$
Rychlost krokování podél osy nástroje	$m.min^{-1}$	$v_{fsh}$
Radiální přísuv (hloubka ponoření)	mm	$x_v (x_{tot})$
Radiální přísuv na zdvih	mm/zdvih	$x_s$
Zdvih, axiální dráha	mm	$l_y$
Krokovací dráha (možná délka kroku.)	mm	$s$
Délka kroku	mm	$s_{Hsp}$
Dráha kroku pro obrobek	mm	$s_{Htot}$
Rychlost krokování	$mm.min^{-1}$	$v_{sh}$
Podmínky synchronizace		$z_w / z_0 = n_s / n_w$

### 3.2.1 Výkyvné (axiální) broušení

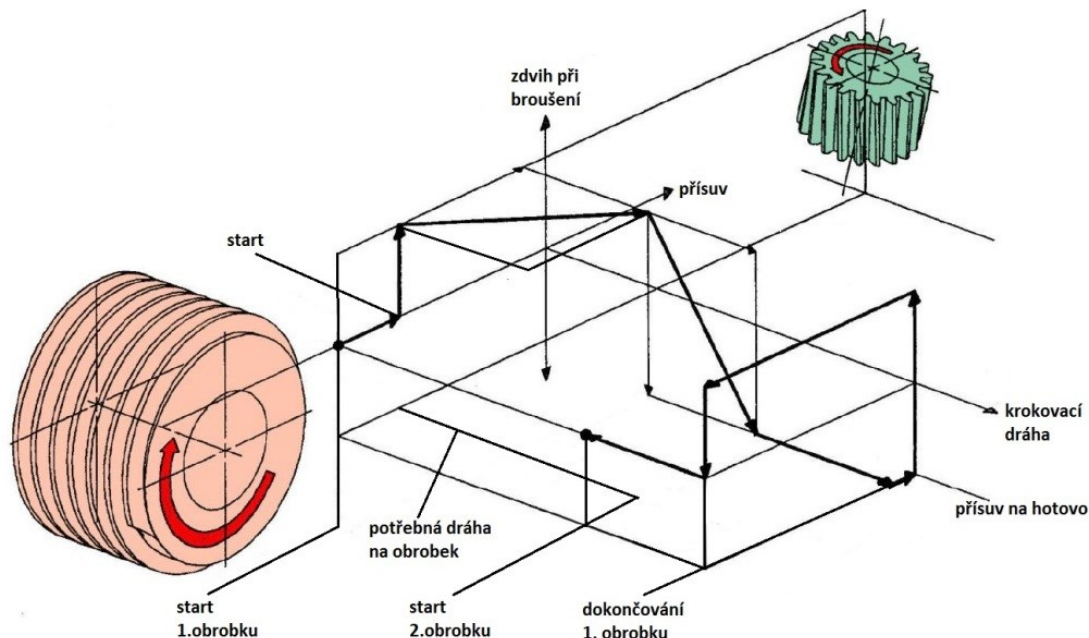
Brousící šnek se po každém zdvihu podél ozubeného kola přisouvá radiálně v horní nebo dolní úvrti o malý přídavek, obr. č. 3.4. Tento průběh se opakuje tak dlouho, až dojde ke snížení řezivosti brusných zrn, nebo tvarové stálosti brousícího šneku. Krokováním (shifting) brousícího šneku ve směru osy y přicházejí do záběru nevyužité závity nástroje (při přerušení aktivního procesu broušení). Poté průběh broušení pokračuje. Podle velikosti odebírané třísky se musí hrubovací průběh několikrát přerušit a nástroj posunout. Bezprostředně před procesem dokončení se provede poslední přesun brousícího šneku. Výkyvné broušení se nyní používá jen zřídka, např. na starších modelech strojů s označením AZA, RZ 301 a 800 firmy Reishauer [3].



Obr. č. 3.4 – Odvalovací broušení se šnekem, varianta „výkyvné“ broušení [3]

### 3.2.2 Krokovací (diagonální) broušení

Na rozdíl od výkyvného broušení je provedeno pouze 2,5 zdvihu. Přisuvné a krokovací pohyby opět trojrozměrně znázorňuje obr. č. 3.5: přisuv rychloposuvem na start, poloviční zdvih rychloposuvem do horní reverzní polohy, přisuv a současně krokování, při sestupném zdvihu hrubování s krokováním, krokování, následně přisuv na čisto, zpětný zdvih nahoru s dokončováním, zpětný pohyb brusného šneku, sjetí do střední polohy zdvihu, zpětné krokování ke startu pro druhý obrobek.



Obr. č. 3.5 - Odvalovací broušení se šnekem, „krokovací“ metodou [3]

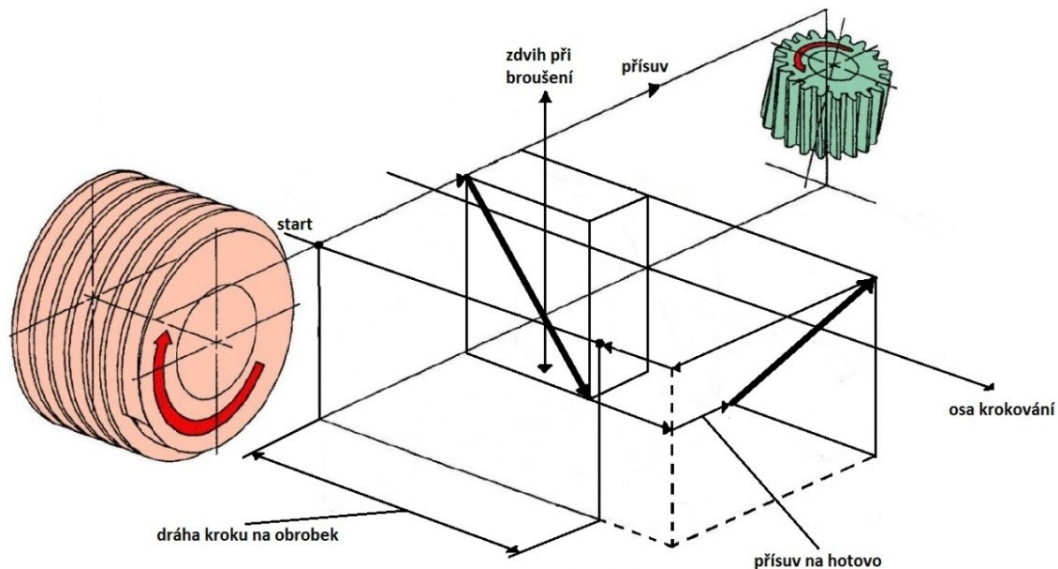
Broušení na dva zdvihy je možné pouze tehdy, pokud během hrubování dochází k plynulému krokování brousícího šneku. Dochází přitom v průběhu brusného procesu k zapojování stále nových oblastí na závitech nástroje.

Dodatečný krok mezi hrubováním a dokončováním garantuje zapojení stále nových a nepoškozených oblastí brousícího nástroje a tím také konstantní výsledek broušení a vysokou kvalitu ozubení.

Ve srovnání s výkyvným broušením dochází k nárustu výkonu broušení 2,5-3-krát. Krokovací broušení je možné realizovat na strojích RZ 301 S, RZ 361 S a RZ 362 firmy Reishauer [3].

### 3.2.3 Krokovací broušení s vysokou výkonností

Hlavní rozdíl mezi předešlými variantami podle [3] spočívá v tom, že se start broušení uskutečňuje v horní poloze a krokování probíhá během hrubovací i dokončovací fáze obrábění, obr. č. 3.6. Tato varianta ve výsledku realizuje nejkratší výrobní čas pro jen jeden hrubovací a jeden dokončovací zdvih. Nárůst produktivity spočívá ve stabilní synchronizaci pohonů nástroje a obrobku při vzájemném odvalu a také v nové specifikaci brousících kotoučů.



Obr. č. 3.6 - Odvalovací broušení se šnekem, varianta krokovací broušení s „vysokým výkonem“ [3]

Vysoce výkonné broušení umožňují všechny nové stroje, např. typu Reishauer RZ 303C, RZ 400, RZ 150, RZ 260 a RZ820. V porovnání s krokovacím broušením na strojích předchozí generace je možné dosáhnout až dvojnásobného výkonu, v určitých případech dokonce až čtyřnásobného.

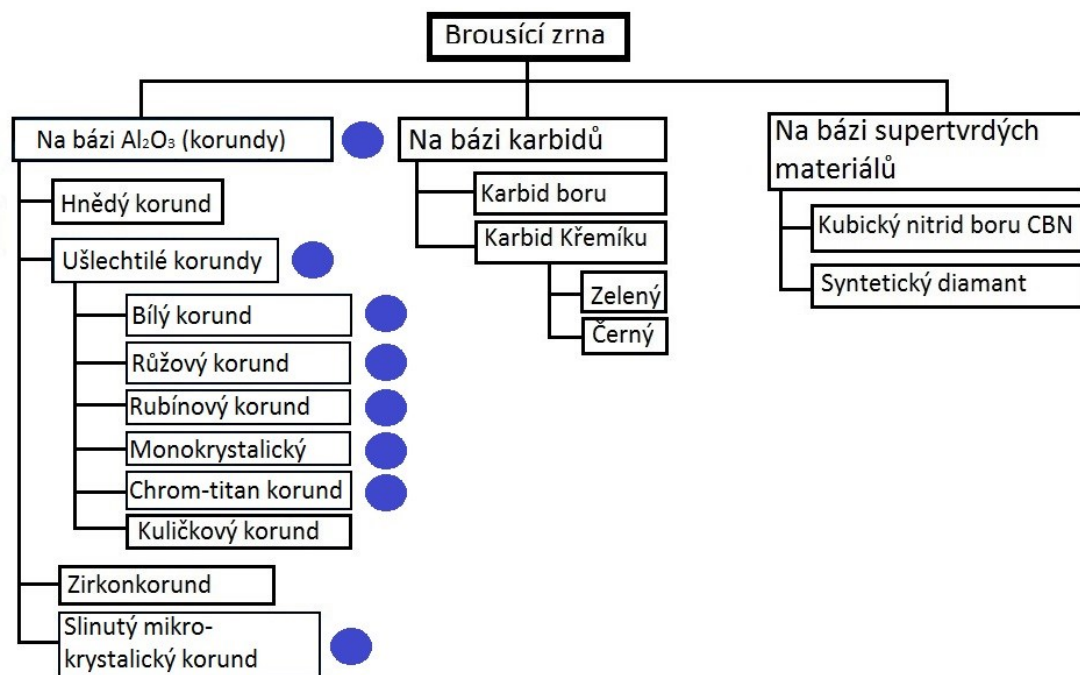
### 3.3 Orovnávatelné broušící šneky

Kontinuální odvalovací broušení ozubení se podle [6] řadí do způsobů obrábění s nedefinovanou geometrií břitu nástroje. Broušící proces je realizován úběrem třísek velmi malých rozměrů vlivem abrazivního účinku broušících zrn, při interakci boku závitů broušícího šneku s povrchem obrobku.

Výsledných technologických vlastností broušícího šneku se dosáhne vhodnou kombinací tří základních strukturních složek, tj. broušících zrn, pojiva a pórů.

Mezi nejdůležitější vlastnosti broušícího zrna se řadí jeho tvrdost, houževnatost, tepelná vodivost a geometrický tvar, který lze charakterizovat pomocí úhlu špičky.

Enormní nárůst výkonů při broušení ozubených kol nesouvisí pouze s pokrokem v konstrukci strojů a nasazené NC technice. Velký podíl připadá i na vývoj brusiva ze slinutého a monokrystalického korundu a na nové syntetické pojivové systémy.



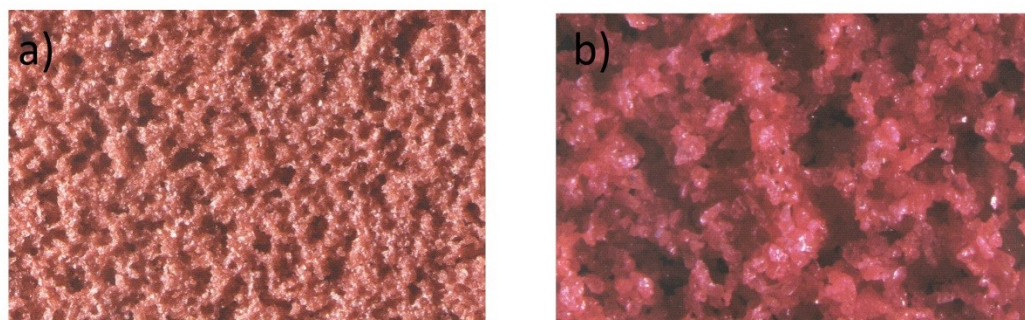
Obr. č. 3.7 – Druhy brousících zrn (modře vyznačeny zrna pro orovnávatelné brousící šneky) [6]

Korund jako brusivo lze podle metody jeho výroby rozdělit do dvou skupin. Zatímco výroba korundu se uskutečňuje tavením oxidu hlinitého (bauxitu) v elektrické obloukové peci při asi 2000°C, je slinutý mikrokrystalický korund získáván slinováním při teplotě 1250°C.

Výroba slinováním vede u mikrokrystalického korundu k velikosti krystalu menší než 1µm ve srovnání s 10µm u umělého korundu. Navíc vykazuje slinutý mikrokrystalický korund vyšší hodnoty tvrdosti a lomové houževnatosti, které ale leží výrazně pod hodnotami pro CBN. Díky jemnozrnosti struktury je dosaženo vyšší houževnatosti brusiva, což se projeví menším opotřebením při nárazovém zatížení při záběru kotouče.

Při dvoustupňovém procesu broušení je podle [3] třeba sladit specifické vlastnosti. Slinutý korund potřebuje například vysoký tlak při broušení na jednotlivé zrna, aby bylo dosaženo samoostření. Je třeba dosáhnout opotřebení ve formě mikrokrystalických úlomků zrna, nazvaného mikrolom. Odlupováním malých částí zrna se vytvářejí na brousících zrnech nová ostří, která se účastní dalšího obrábění. Při dokončovacím procesu je tlak při broušení často tak malý, že slinovaný korund nevykazuje žádné mikrotrhliny, je tupý a může být příčinou opalů. Z tohoto důvodu představuje podíl slinovaného korundu dosud mezi 30 až 50% a poskytuje tak vedle konvenčních, s ohledem na způsob odstraňování zrna rozdílných korundových brusiv

brusivo s požadovaným způsobem samoostření. Porozita se vytváří uměle tvorbou pórů při spojení zrna s pojivem, aby bylo dosaženo přívodu procesní kapaliny a lepšího odvodu třísky.



Obr. č. 3.8 – a) nízká porozita (uzavřená struktura), b) vysoká porozita (otevřená struktura) [7]

Pojivo je „lepidlo“, které drží kotouč pohromadě. Cílem musí být, vyjít s co nejmenším množstvím pojiva, přičemž nesmíme ztratit ze zřetele soudržnost zrn, pevnost a spolehlivost proti nebezpečí lomu.

Keramická pojiva se skládají v podstatě z jílu, kaolínu, živce a taveného skla. Jíl zvyšuje tlumící schopnosti, přísady skla podporují odlupování zrna. V oblasti pojiva se podle [7] jako slibný jeví vývoj s rekrystalizovanými skly, která se tvoří při nižších teplotách ochlazovací fáze a která vykazují ve srovnání s konvenčními pojivy vyšší pevnost. Čistě syntetické složení vede ke stejné tvrdosti a struktuře. Tímto novým systémem pojení je možné snížit podíl pojiva o 10% a podíl pórů o 10% zvýšit, aniž by se snížila pevnost kotouče. To vede ke studenému řezu, k menšímu nebezpečí vzniku spálenin a k vyššímu výkonu při broušení.

Specifikace broušícího šneku sestává dle ČSN ISO 525 ze symbolů:

- *Druh broušícího zrna* se označuje písmenem a číslem. Písmeno udává základní informaci o druhu použitého broušícího zrna, resp. směsi broušících zrn. Číslo charakterizuje chemické složení broušícího zrna, případně spolu s písmenem dále specifikuje použitou směs broušících zrn.
- *Zrnitost* broušícího šneku se označuje číslem, které roste úměrně střednímu rozměru zrna. Jednotkou zrnitosti je *mesh*, definovaný jako počet ok příslušného kontrolního síta vztažený na délkový palec.
- *Tvrдость* broušícího šneku se nejčastěji charakterizuje jako pevnost pojivových vazeb mezi broušícími zrny. Výslednou tvrdost broušícího šneku lze ovlivnit řadou faktorů, mezi které patří poměrný objem pojiva, druh broušícího zrna, druh pojiva a parametry lisovacího procesu při výrobě broušícího šneku.
- *Struktura* broušícího šneku koresponduje s poměrným objemem broušících zrn. Značí se číslem v rozmezí 1÷20.

- *Druh pojiva* brousicího šneku se podle ČSN ISO 525 označuje písmenem, případně dvojicí písmen a doplňujícím číslem. Brousicí šneky s keramicky vázanými brousicími zrny jsou označeny jednotným symbolem „V“ pro keramické pojivo.
- *Typ pojiva* se nejčastěji charakterizuje číslem odděleným pomlčkou za označením druhu pojiva. Význam čísla je v závislosti na zvyklostech konkrétního výrobce odlišný.

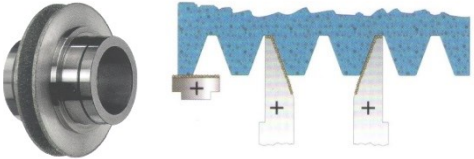
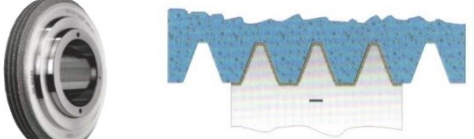
<b>64A</b>	<b>60</b>	<b>H</b>	<b>15</b>	<b>V</b>	<b>P</b>
<b>Brousicí prostředky</b>	<b>Zrnitost</b>	<b>Tvrđost</b>	<b>Struktura</b>	<b>Druh pojiva</b>	<b>Zvláštní označení</b>
Keramické pojivo	Velmi hrubá	Extrémně měkká	Normální struktura	<b>V</b> = keramické pojivo	<b>P</b> = porézní struktura
<b>C</b>	<b>12</b>	<b>C</b>	<b>1</b>		
<b>11C</b>	<b>14</b>	<b>D</b>	<b>2</b>	<b>BW</b> = pojivo z umělé pryskyřice	<b>L</b> = lehká porezita
<b>27A</b>	Hrubá	Velmi měkká	<b>3</b>		
<b>28A</b>	<b>16</b>	<b>E</b>	<b>4</b>		
<b>29A</b>	<b>24</b>	<b>F</b>	<b>5</b>	<b>BFW</b> = pojivo z umělé pryskyřice zesíleno text. výztuhou	<b>M</b> = střední porezita
<b>31A</b>	<b>36</b>	<b>F</b>	<b>6</b>		
<b>42A</b>	Střední	Měkká	<b>7</b>		
<b>49A</b>	<b>46</b>	<b>G</b>	<b>8</b>		<b>H</b> = vysoká porezita
<b>53A</b>	<b>54</b>	<b>H</b>	<b>9</b>		
<b>54A</b>	<b>60</b>	<b>J</b>	<b>10</b> - (odlévací postup)		
<b>57A</b>	<b>70</b>	Středně tvrdá	Porézní struktura		<b>HH</b> = velmi vysoká porezita
<b>61A</b>	<b>80</b>	<b>K</b>	<b>11</b>		
<b>62A</b>	Jemná	<b>L</b>	<b>12</b>		
<b>63A</b>	<b>90</b>	<b>M</b>	<b>13</b>		<b>GG</b> = velmi velké póry
<b>64A</b>	<b>100</b>	<b>M</b>	<b>13</b>		
<b>65A</b>	<b>120</b>	Tvrdá	<b>14</b>		<b>G</b> = velké póry
<b>67A</b>	<b>150</b>	<b>N</b>	<b>15</b>		
<b>68A</b>	<b>180</b>	<b>O</b>	<b>16</b>		<b>F</b> = malé póry
<b>69A</b>	<b>220</b>	<b>P</b>	<b>17</b>		
<b>77A</b>	Velmi jemná	<b>Q</b>	<b>18</b>		
<b>92A</b>	<b>240</b>	Velmi tvrdá	<b>19</b>		<b>FF</b> = velmi malé póry
<b>93A</b>	<b>240</b>	<b>R</b>	<b>20</b> - (odlévací postup)		
<b>95A</b>	<b>280</b>	<b>R</b>			
Pojivo z umělé pryskyřice	<b>320</b>	<b>S</b>			<b>SR</b> = speciální recept
<b>C</b>	<b>500</b>	<b>T</b>			
<b>11C</b>	<b>600</b>				
<b>A</b>	<b>800</b>				
<b>31A</b>					
<b>42A</b>					
<b>AC</b>					
<b>ZA</b>					
Pojivo z umělé pryskyřice zesíleno text. výztuhou					
<b>C</b>					
<b>A</b>					

Obr. č. 3.9 – Příklad značení brusiva výrobcem 3M [8]

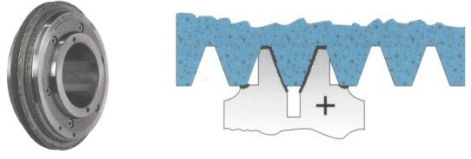
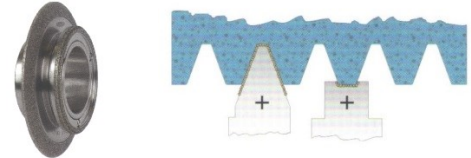
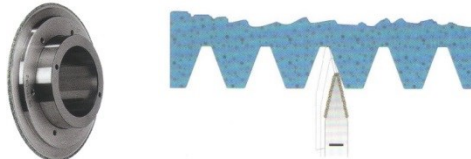
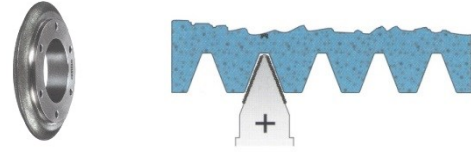
### 3.4 Orovnávací nástroje

Brousicí šneky s keramicky pojeným korundem mají tu výhodu, že se mohou rychle přizpůsobit základnímu profilu. Tento základní profil je stanoven modulem, počtem chodů a úhlem záběru. Obvykle jsou brousicí šneky dodávány výrobcí s předběžně provedeným profilem. Po nasazení šneku na přírubu a vyvážení je potom vložen do brousicího stroje. Na stroji je pak orovnáán jak uvádí [6] jedním z diamantových nástrojů uvedených níže:

- *Diamantové orovnávací kotouče s kontrolní kladkou*, jednostranné diamantové kotouče pro boky a patu, kontrolní kladka pro vnější průměr. Jsou možné korekce úhlu záběru. Aplikace pro malosériovou výrobu.
- *Diamantová plně profilovaná kladka*, pro moduly do 1,3. Jedno nebo více žebrová kladka s negativně vsazenými diamanty zpravidla se zesílením na hlavě. Současně jsou orovnáány boky, pata a hlava brousicího šneku. Aplikace pro automatizovanou velkosériovou výrobu.
- *Složená diamantová profilová kladka*, určena pro moduly 1,3 až 5, s pozitivně vsazenými diamanty. Složené kladky jsou jednochodé. Současně jsou orovnáány boky, pata a hlava brousicího šneku. Aplikace pro velkosériovou výrobu.
- *Sada diamantových profilových kladek*, diamantový kotouč pro profil (s modifikací), zvláštní zarovnávací kladka pro radius paty zubu. Aplikace pro automatizovanou výrobu.
- *Diamantová rádiusová profilová kladka*, profil složený z rádiů. Všechny modifikace mohou být přenášeny nezávisle na pravý a levý bok brousicího kotouče. Aplikace pro výrobu prototypů a malých sérií. Vysoká flexibilita.
- *Dvoukuželový disk*, pokrývá celý rozsah modulu. Levý a pravý bok je orovnáán nezávisle. Rádus hlavy pro orovnáání paty šneku není integrován. Aplikace pro automatizovanou výrobu (vyšší stupeň flexibility).

Název	Obrázek / Schéma
Diamantové orovnávací kotouče s kontrolní kladkou	
Diamantová plně profilovaná kladka	

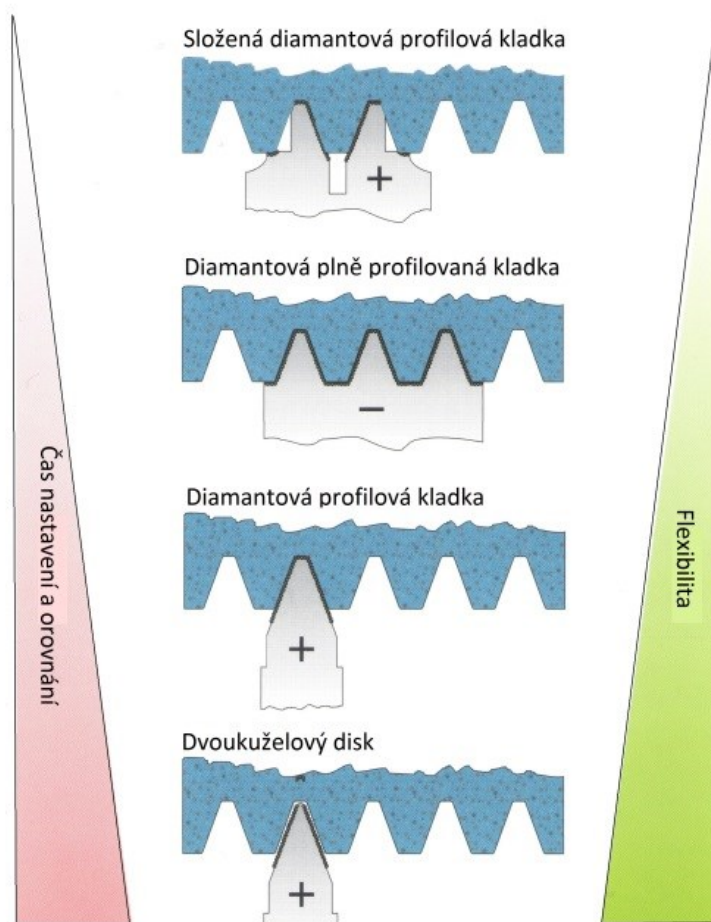


Složená diamantová profilová kladka	
Sada diamantových profilových kladek	
Diamantová rádiusová profilová kladka	
Dvoukuželový disk	

Obr. č. 3.10 – Diamantové nástroje pro orovnávaní a profilování brousících šneků [6]

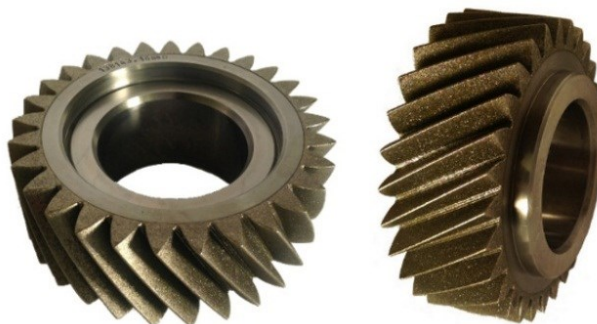
Protože musí být každý chod orvnán postupně, narůstá při vyšším počtu chodů podstatně čas potřebný pro orovnávaní, především u jedno nebo dvoubokých orovnávacích nástrojů. Časová úspora, které lze docílit při broušení s vícechodým šnekem, by se neměla ztratit vyšším podílem orovnávacího času. Je třeba dbát také na to, aby soustavné dělicí procesy mezi jednotlivými chody nevedly k odchylkám rozteče na obrobku.

Při výběru orovnávacího nástroje ze širokého spektra typu, jsou podle [6] hlavními rozhodovacími kritérii flexibilita a efektivita. Složená diamantová profilová kladka nebo plně profilová diamantová kladka jsou nejefektivnější při orovnávaní a vyžadují minimum nastavovacího času, protože je v nich zakomponována téměř celá geometrie ozubeného kola. Na druhou stranu je výrazně omezena možnost korigovat geometrii ozubeného kola. Např. dvoukuželový orovnávací disk umožňuje větší množství korekcí ozubeného kola (úhel záběru, soudkovitost, tvar hlavy zubu, rádius paty, atd.), ale s tím souvisí výrazné zvýšení nastavovacího a orovnávacího času. Následující obr. č. 3.11 ukazuje porovnání mezi flexibilitou a nastavovacím časem mezi jednotlivými typy orovnávacích nářadí.



Obr. č. 3.11 – Závislost mezi flexibilitou a nastavovacím časem orovňávacích nástrojů [6]

Kromě orovňávacích kladek se používá také systém s orovňávacím ozubeným kolem. Základní myšlenka při orovňávání ozubeným kolem vychází z toho, že se otočí výrobní princip „šnek vyrábí ozubené kolo“.



Obr. č. 3.12 – Orovňávací ozubené kolo [6]

Orovnávací kolo nemusí nutně odpovídat geometrii obráběné součásti, musí mít pouze stejný základní profil. Je tak možno provést tento nástroj s přímými zuby, což je jednak jednodušší z hlediska výroby a nanášení diamantů, jednak taková kola vykazují maximálně možnou pevnost hlavy zubu a tím i stabilitu. Modifikace profilu obráběné součásti např. soudkovitost, hlavová nebo patní korekce, vzniká podobně jako u konvečního orovnávacího nástroje profilově. Podélná modifikace vyráběné součásti je při plynulém odvalovacím broušení vyrobitelná výhradně kinematikou stroje. Orovnávací kolo přitom nemá žádnou podélnou modifikaci a lze ho využít pro orovnávání v plné délce [3].

### 3.5 Odvalovací brusky Reishauer

Poslední generace strojů Reishauer se vyznačuje velkým nárůstem produktivity a snížením nákladů na nástroje při odvalovacím broušení. V dalším popisu se budu věnovat strojům RZ 150, RZ 303C a RZ 260, které představují nejvyšší stupeň v dlouholetém vývoji firmy, a jsou nejčastěji používané v automobilovém průmyslu. Oblast použití jednotlivých strojů představuje tabulka č. 2.

Tabulka. č. 2 – Přehled a pracovní oblasti některých brusek Reishauer [9, 10, 11]

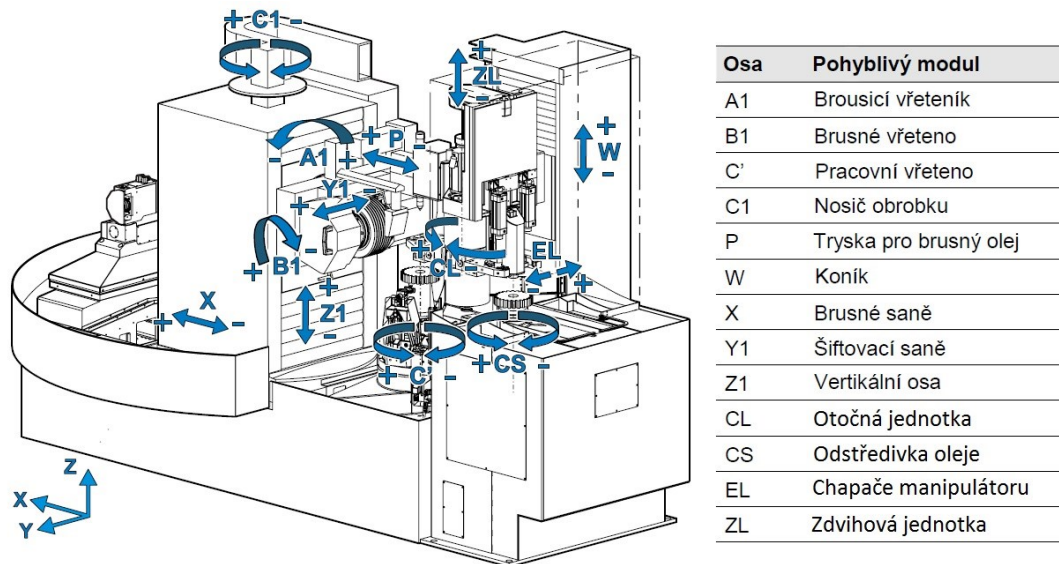
Typ stroje		RZ 150	RZ 260	RZ 303C
<b>Obrobek:</b>				
max. průměr	mm	145	260	300
modul	mm	1 až 3	0,5 až 5	0,8 až 6
počet zubů		5 až 150	5 až 520	6 až 600
min. Ø patní kružnice	mm	10	teor. 0	teor. 0
max.délka obrobku	mm	350	490	400
max. zdvih osy z	mm	100	180	300
max. hmotnost	kg	2	50	12
úhel sklonu zubu	°	±40	±48	±45
<b>Brousící šnek:</b>				
využitelný Ø	mm	275 ... 206	275 ... 206	300 ... 202
šířka	mm	125	160	145
max. otáčky	min <sup>-1</sup>	5200	5555	4770
obvodová rychlost	m.s <sup>-1</sup>	75	80	75

Nové brusky ozubení se stejně jako předchozí typy vyznačují tím, že jsou koncipovány jako stroje s orovnávatelnými brousicími šneky a jsou tak stejně vhodné jak pro kusovou tak i pro velkosériovou výrobu. Zvláštností RZ 303C je nosič nástrojů, který je otočně uložen na valivém vedení a realizuje přísuv ke stolu s obrobkem ve směru osy X (obr. 3.14). Na nosiči nástrojů se nalézají čtyři konstrukční skupiny: saně s brousicím vřeteníkem (Z1), otočný přípravek pro úhel sklonu zubu (A1), krokovací saně (Y1) a brousicí vřeteník s pohonem (B1). Otočení přípravku je měřeno otáčivým generátorem impulsů s vysokou rozlišovací schopností.



Obr. č. 3.13 – Odvalovací bruska RZ 303C [10]

Pro orovnění brousicího šneku se nosič nástrojů otočí o  $180^\circ$  k pevnému orovnávacímu přístroji. Pro orovnění nezbytné pohyby vykonávají osy X a Y1. Brousicí vřeteno s upnutím za krátké kužele je uloženo ve valivých ložiscích a má díky optimální konfiguraci uložení nejvyšší tuhost a přesnost. Díky integrovanému vyvažovacímu zařízení se udržuje brousicí šnek ve vyváženém stavu po celou dobu jeho nasazení a odpadá také statické vyvažování nástroje s přírubou před montáží do stroje. Nosič nástrojů se dá otočit okolo osy vřetene čelem k posuvným dveřím a ulehčí se tak přístupnost obsluhy stroje k brousicímu šneku při výměně.



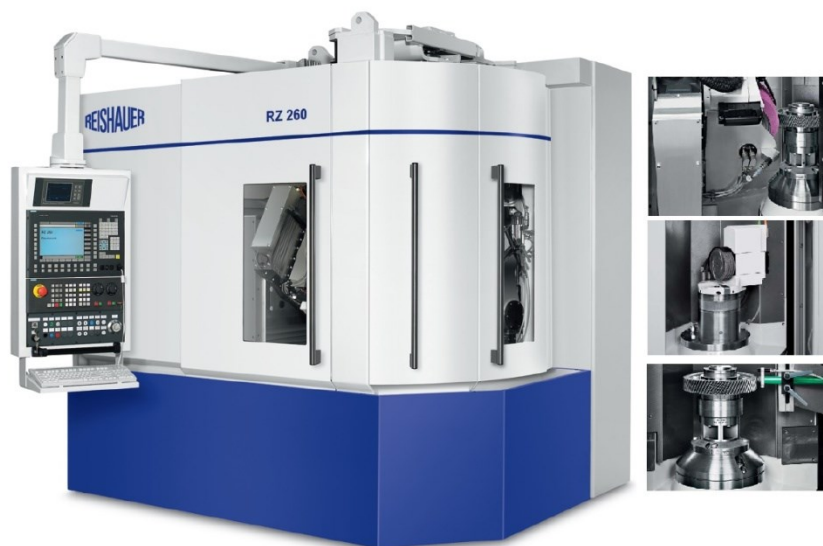
Obr. č. 3.14 – Odvalovací bruska RZ 303C, koncepce stroje a NC osy [10]

Osa P udržuje chladicí trysky ve stejné vzdálenosti od obvodu brousícího šneku. Při konstrukci chladicí trysky byly použity nejnovější poznatky z laminárního proudění pro optimalizaci chladicího efektu na nástroj i obrobek. Velmi rychlé a vysoce přesné valivé spojení a řízení flexibilně přizpůsobivé brusnému procesu je při odvalovacím broušení předpokladem pro kvalitativní a ekonomicky optimální výsledky. Řídicí systém SIEMENS 840D nabízí díky otevřené a mnohostranně konfigurovatelné koncepci komfortní základ pro integraci valivých modulů Reishauer.

Hlavními charakteristikami uvedenými v [10] jsou:

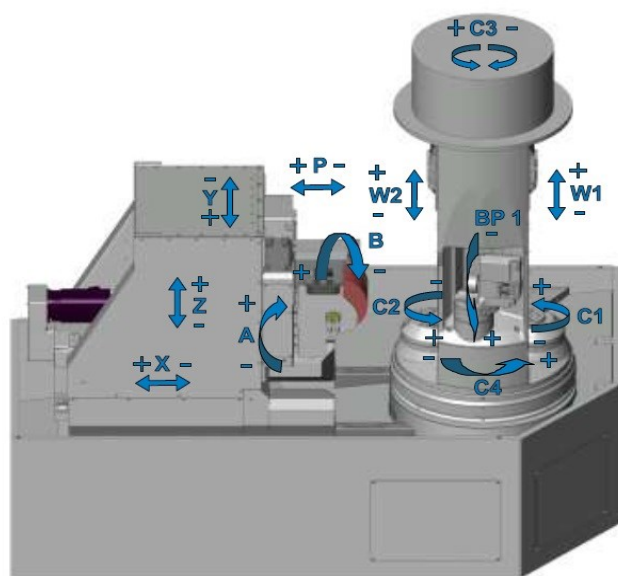
- otevřenost pro uživatele k využití pro téměř libovolné geometrické a technologické funkce při broušení a orovnávaní, také k řešení speciálních úloh,
- diagnostický systém pro všechny důležité strojní funkce, analýza procesu včetně spojení s datovou sítí,
- valivý modul, hardwarově i softwarově vyvinutý firmou Reishauer, extrémní tuhost pohonu pro všechny simultánně běžící osy,
- rozsáhlé bezpečnostní funkce pro kontrolu os a pro ochranu obsluhy stroje.

Nejnovější a zároveň nejvyšší vývojový stupeň strojů Reishauer představuje dvouvřetenová odvalovací bruska RZ 260. Nápadná je na rozdíl od RZ 303C kompaktnějšími rozměry, především však svou otočnou „věž“, nazývanou jako vícevřetenový modul. Ten díky možnému otočení o 180° umožňuje otáčení jednotlivých vřeten C1 a C2 do pracovních poloh. Před broušením nového obrobku centruje sonda pozici zubů vůči pozici brousícího šneku.



Obr. č. 3.15 – Dvouvřetenová odvalovací bruska RZ 260 [11]

Jestliže musí být brousící šnek orovnávan, posune vícevřetenový modul do pracovní polohy orovnávací přípravek (u stroje RZ 303C se otáčí nástrojový nosič o 180°k orovnávací jednotce). Pomocí orovnávače C4 a osy stroje Y může být orovnávan profil šneku. Osa Z šneku řídí výškovou polohu ozubení a zdvih při broušení. Pojizdný nosič nástrojů nese výkyvný suport s brousící hlavou, krokovací saně a brousící vřeteno provádí přísuvný pohyb v ose X. Osa Y dovoluje stroji provádět vysoce výkonné krokovací broušení.



Osa	Pohyblivý modul
A	Brousící vřeteník (vykývnout)
B	Brusné vřeteno
C1	Pracovní vřeteno 1
C2	Pracovní vřeteno 2
C3	Nosič obrobku vykývnout
C4	Orovnávací přípravek vykývnout
BP1	Orovnávací vřeteno
P	Tryska pro brusný olej (pojízďet)
W1	Koník 1 (pojízďet)
W2	Koník 2 (pojízďet)
X	Brusné saně
Y	Šiftovací saně
Z	Vertikální osa

Obr. č. 3.16 - Dvouvřetenová odvalovací bruska RZ 260, koncepce stroje a osy [11]

## 4 Rozbor stávajícího stavu řešené problematiky

Jak již bylo uvedeno v úvodu, cílem práce je vyhodnotit stávající stav technologie broušení ozubení a návrh nové technologie pro zefektivnění a racionalizaci procesu.

Proces výroby ozubených kol v podniku HMMC probíhá na třech stupních technologických linek: linka obrábění před tepelným zpracováním (frézování ozubení, odjehlování), linka tepelného zpracování (nauhličení, kalení, otryskávání) a linka obrábění po tepelném zpracování (čelní a vnitřní broušení, broušení ozubení, mytí a testování).

Bližší se zaměřím na linku obrábění po tepelném zpracování, jejíž součástí je i operace broušení ozubení. Jako referenční byla vybrána linka ZD52/53 pro výrobu ozubeného kola 4. rychlostního stupně. Měření časů jednotlivých operací na lince ukázalo, že právě operace broušení ozubení vytváří úzké místo v toku materiálu. Cílem tedy je odstranění úzkého místa v procesu a tím zefektivnění výroby celé linky.

Tabulka. č. 3 – Časy cyklů jednotlivých operací v lince

Linka ZD52/53 po tepelném zpracování		
Číslo operace	Název operace	Čas cyklu [s]
ZD 52/53 - 40/50	Čelní a vnitřní broušení	36
ZD 52/53 - 60	Broušení ozubení	43
ZD 52/53 - 70	Mytí a testování	34

Ozubené kolo 4. rychlostního stupně je vyráběno z materiálu SCM 420 HB, cementováno a kaleno na tvrdost 680 HV. Chemické složení materiálu je: C 0,18÷0,25 %; Si 0,15÷0,35 %; Mn 0,7÷1,1 %; P max. 0,02 %; S max. 0,03 %; Ni max. 0,25 %; Cr 0,95÷1,35 %; Mo 0,07÷0,15%.

Tabulka. č. 4 – Parametry ozubeného kola [13]

Kolo 4. Rychlostního stupně (43283-26020/32120)	
Počet zubů	$z_w = 29$
Modul	$m = 1,905 \text{ mm}$
Úhel záběru	$\alpha = 16^\circ$
Úhel sklonu zubů	$\beta = 34,5^\circ \text{ L}$
Šířka zubu	$b = 13,2 \text{ mm}$
Jednotkové posunutí	$x = 0,0414 \text{ mm}$
Hlavový průměr	$d_a = 73,25 \text{ mm}$

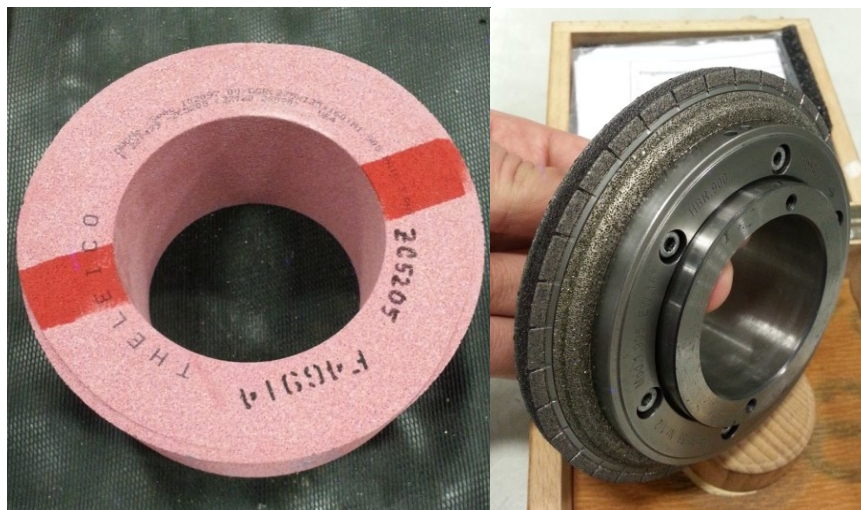
## 4.1 Popis stávající technologie

Broušení ozubení je prováděno na stroji Reishauer RZ 150. Jedná se o brusku ozubení pro kontinuální odvalovací broušení orovnávatelným válcovým šnekem. Max. vnější průměr obrobku je 145 mm. Stroj je vhodný jak na broušení válcových ozubených kol, tak na obrobky ve tvaru hřídel s max. délkou 350 mm. Varianta s dvěma pracovními vřeteny umožňuje výrobu vysoce přesných dílů při velmi nízkých vedlejších časech. Bruska pracuje na principu krokovacího broušení s „vysokým výkonem“ jak je popsáno dříve (kap. 3.2.3). Výměna obrobku je prováděna automaticky pomocí 6-ti osého robota.



Obr. č. 4.1 - Odvalovací bruska RZ 150

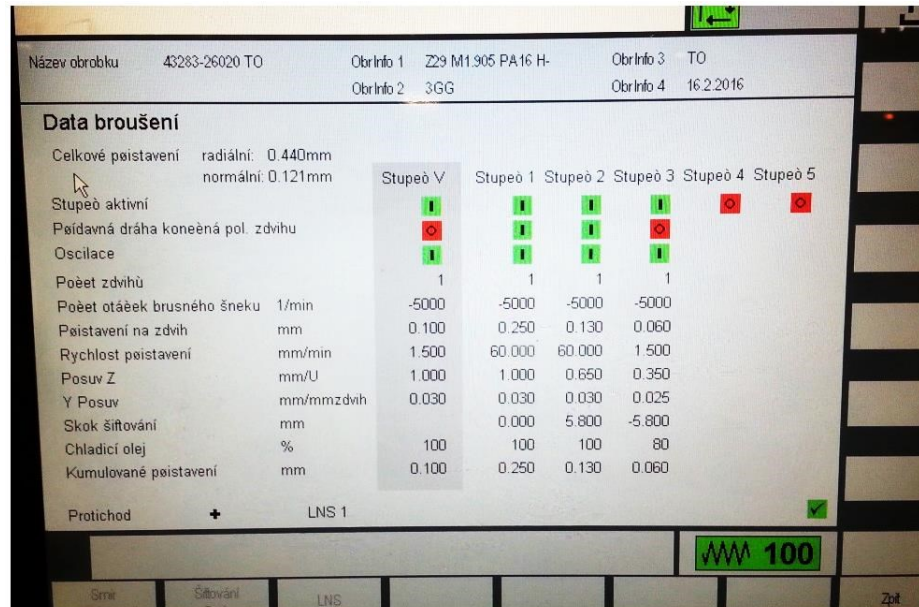
Brousícím nástrojem je 3-chodý válcový šnek s rozměry 275x125x160mm. Jedná se o kotouč z umělého korundu s keramickým pojivem, od výrobce Theleico. Označení je 44A 100-9J11VM350. Pro orovnávaní šneku je používána složená diamantová profilová kladka, která je nejvhodnější pro velkosériovou výrobu.



Obr. č. 4.2 – Brusný šnek Theleico 44A 100-9J11VM350 a orovnávací kladka

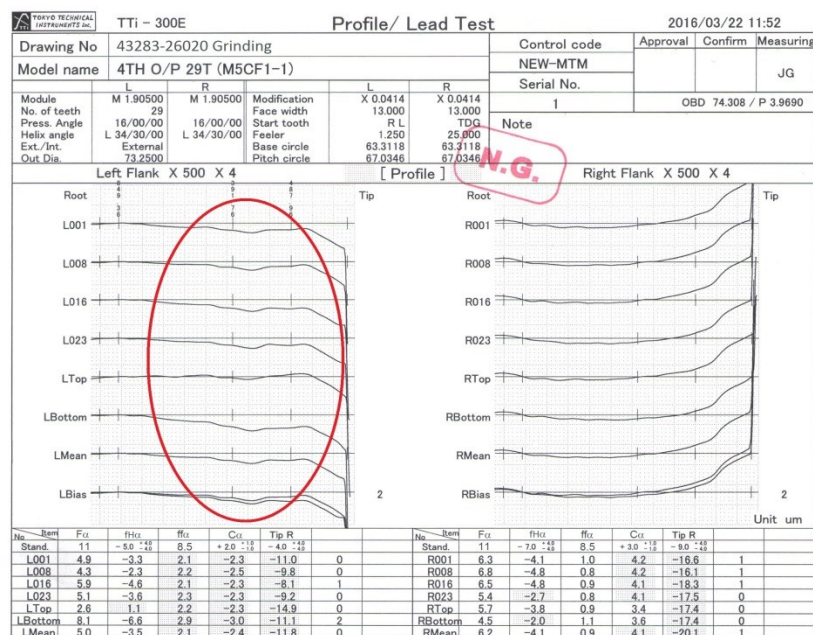


Proces krokovacího broušení je nastaven na 3 stupně. Stupeň 1 a 2 jsou hrubovací, stupeň 3 je dokončovací. Při takto nastavených parametrech je čas broušení jednoho obrobku 29 sekund, rovnávací interval je po 46 obrobcích a celková životnost brousícího šneku je 4370 ks.



Obr. č. 4.3 – Parametry broušení stroje RZ 150

Při snahách o redukci brusných stupňů na dva (1 hrubovací a 1 dokončovací) a tím i snížení času broušení a zvýšení životnosti nástroje, docházelo se současným brusným šnekem k neakceptovatelným poruchám tvaru profilu zubu.



Obr. č. 4.4 – Porucha tvaru profilu zubu [14]

## 5 Návrh nové technologie

Výchozí strojní zařízení pro výrobu ozubeného kola 4. rychlostního stupně je pevně dáno, proto jsem se jako na prostředek k racionalizaci procesu broušení ozubení zaměřil na možnost využití nových progresivních brousících materiálů.

Jedním ze způsobů jak dosáhnout časové úspory při broušení na brusce Reishauer RZ150 je redukce ze 3 brusných stupňů na 2. To však znamená zdvojnásobení úběru materiálu v jednom hrubovacím kroku, naproti původním dvěma hrubovacím krokům a tím také vyšší tlak vznikající při broušení.

Podle [3] spékaný korund potřebuje vysoký tlak při broušení na jednotlivé zrno, aby bylo dosaženo samoostření. Je třeba dosáhnout opotřebení ve formě mikrokrytalických úlomků zrna, nazvaného mikrolom. Odlupováním malých částí zrna se vytvářejí na brousících zrnech nová ostří, která se účastní dalšího obrábění. Díky jemnozrnosti struktury je dosaženo vyšší houževnatosti brusiva, což se projeví menším opotřebením při nárazovém zatížení při záběru kotouče.

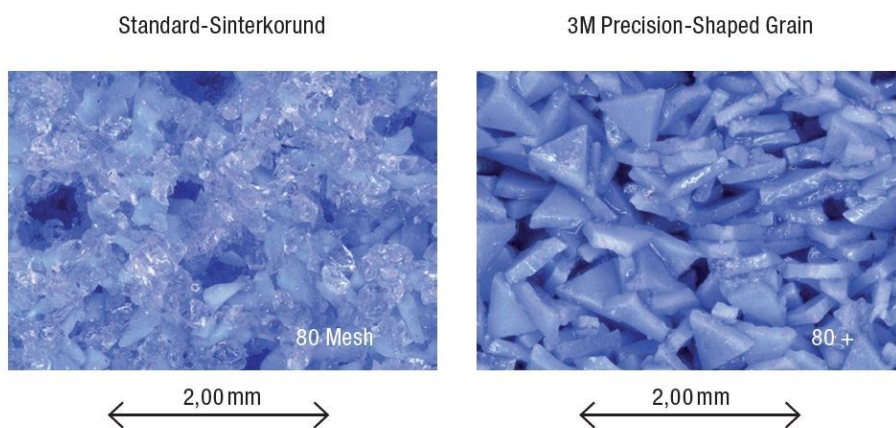


Obr. č. 5.1 – Vhodnost výběru brusného materiálu podle velikosti přítlaku [8]

V [8] jsou shrnuty výkonové přednosti spékaného korundu:

- vyšší úběry materiálu
- kratší taktovací časy
- vyšší životnost kotouče – méně časté výměny kotoučů
- konstantní brousící výkon i brousící síly
- malé úchylky tvaru
- vysoká kvalita broušeného povrchu
- delší intervaly orovnávaní na základě vysoké životnosti

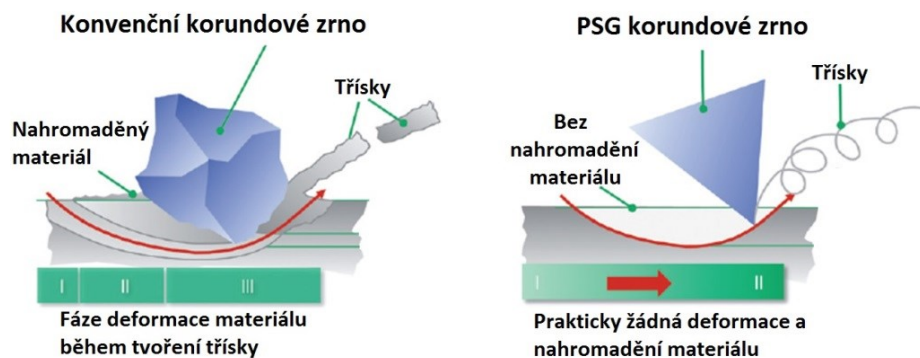
Na základě výše uvedených skutečností, jsem se rozhodl pro volbu kotouče ze spékaného korundu. Po konzultaci s dodavatelem brousících nástrojů byl vybrán nástroj ze spékaného mikrokrystalického korundu s obchodním označením 3M Cubitron II. Zvláštností tohoto nástroje je přesně definovaný tvar brusných zrn ve tvaru trojúhelníku, označovaný jako PSG „precision-shaped grain“.



Obr. č. 5.2 – Konvenční zrna a PSG zrna [12]

Struktura brusného kotouče představuje přechod od broušení k tzv. mikrofrézování, jak je to znázorněno na obrázku č.5.3. Konvenční brusné zrno v počátku kontaktu s povrchem obrobku neřeže, ale vytváří tlak na povrch obrobku. Během fáze č.1 dochází k pružné deformaci. Potom zrno skrze plastickou deformaci tlačí nahromaděný kov před sebou ve fázi č.2. Nakonec se ve fázi č.3 vytváří tříška.

Naproti tomu PSG brusné zrno naráží na povrch obrobku a od prvního kontaktu dochází k řezání a vytváření třísky. Díky řadě malých, geometricky perfektně tvarovaných hran zrn, zde dochází k jasnému formování třísky podobného tvaru jako při frézování nebo soustružení. [12]



Obr. č. 5.3 – Fáze tvoření třísky u konvenčního a PSG zrna [12]

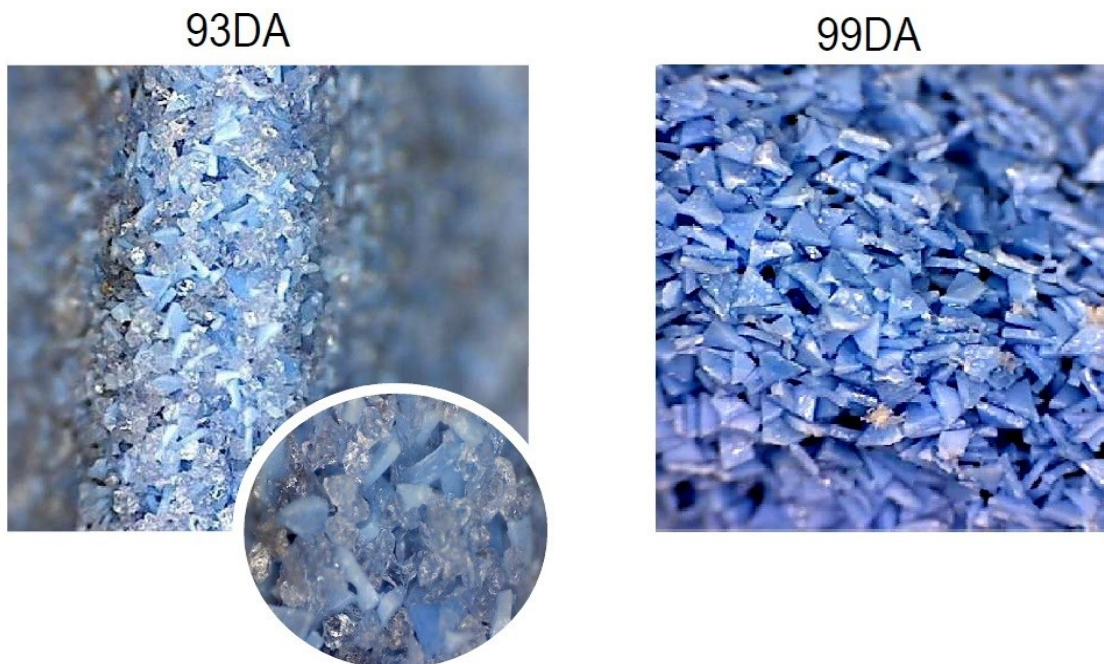
## 5.1 Zkoušky nového nástroje

Ke zkouškám byly zakoupeny dva kusy brusného šneku 3M Cubitron II s PSG zrnem. Označení brusného šneku je 93DA80/80 J18VPLF29/601W:

- 93DA - PSG zrno objemový poměr 30%
- 80/80 - zrnitost střední
- J – tvrdost měkká
- 18 – struktura otevřená
- V – keramické pojivo
- PLF29 – porézní struktura, lehká porezita, malé póry
- 601W – pojivo tvrdé, modré

Jedná se tedy o spěkaný mikrokrystalický korund s tvarově definovanými zrny, pojenými keramickým pojivem.

Z důvodu vysoké ceny a optimálního využití brousicího zrna PSG se v současné době používá také jeho kombinace s netvarovanými brousicími zrny v hmotnostním poměru 30 % PSG brousicích zrn.



Obr. č. 5.4 – Vlevo 30% poměru zrn PSG, vpravo 100% poměr zrn PSG [12]



Obr. č. 5.5 – Testovací brusný šnek 3M Cubitron II 93DA80/80 J18VPLF9/601W

Před nasazením kotouče do stroje byly upraveny brousící parametry pro nový typ nástroje. V porovnání s původním nástrojem byly zredukovány stupně broušení ze tří na dva (1 hrubovací a 1 dokončovací). Byly sníženy také posuvy ve směru osy Y o 30% a zvýšena rychlost axiálního posuvu Z v dokončovací stupni o 20% (viz. obr.č.5.4). Z důvodu předpokládaného lepšího samoostření byl snížen i celkový přísuv při orovnávaní z 0,28 mm na 0,22 mm.

Název obrobku		43263-26020 CUBITI		ObrInfo 1	Z29 M1.905 PA16 H-	ObrInfo 3	TO
				ObrInfo 2	3GG	ObrInfo 4	01.03.2016
<b>Data broušení</b>							
Celkové poistavení		radiální:	0.420mm				
		normální:	0.116mm				
Stupeň aktivní				Stupeň 1	Stupeň 2	Stupeň 3	Stupeň 4
Přidavná dráha konečná pol. zdvihu				■	■	■	■
Oscilace				■	■	■	■
Počet zdvihů				1	1	1	
Počet otáček brusného šneku		1/min		-4500	-4500	-4500	
Poistavení na zdvih		mm		0.100	0.360	0.060	
Rychlost poistavení		mm/min		1.500	60.000	1.500	
Posuv Z		mm/U		1.000	1.000	0.400	
Y Posuv		mm/mmzdvih		0.015	0.020	0.015	
Skok šiftování		mm			5.800	-5.800	
Chladicí olej		%		100	100	80	
Kumulované poistavení		mm		0.100	0.360	0.060	
Protichod		+	LNS 1				✓
							100

Obr. č. 5.6 – Parametry broušení zkoušeného nástroje

Změna brousících a orovnávacích parametrů znamenala zvýšení životnosti nástroje z původních 4370 ks na 15 870 ks u nového nástroje. Dále snížení času broušení z 29 sekund na 19 sekund. Zkoušky nástroje probíhaly během běžné produkce na výrobní lince.

## 5.2 Kontrola profilu ozubení

Nepřesnosti ozubení podle [13] vznikají jako projevy:

- nepřesnosti použitého nástroje a jeho ustavení,
- nepřesnosti výrobního stroje,
- upnutí obrobku na stroji,
- způsobu výroby ozubení a jeho parametrů.

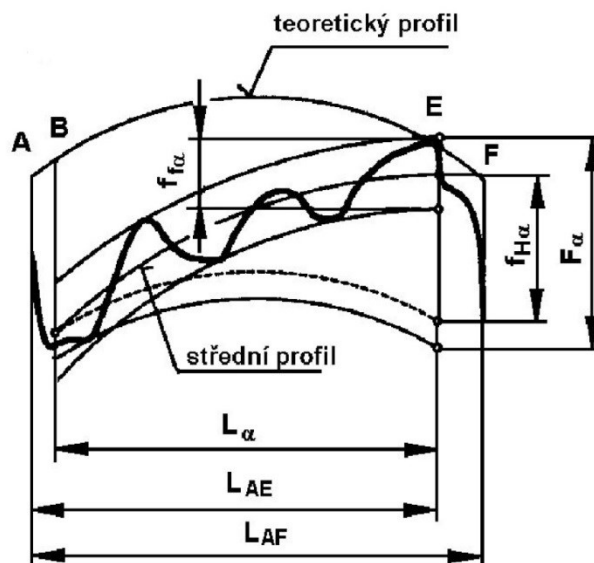
Základním parametrem pro vyhodnocení zkoušek nového nástroje byl tvar profilu zubu, který nesměl vykazovat během celé životnosti nástroje žádné poruchy.

Definice a mezní hodnoty odchylek vztažených pro profil boku zubů jsou obsahem normy ISO 1328-1.

*Odchylka profilu  $F_\alpha$*  je definována jako vzdálenost mezi dvěma ekvidistantami teoretického profilu, mezi kterými je skutečný profil, a to v rozsahu délky hodnocení  $L_\alpha$ , její délka je stanovena na 92% činné délky profilu  $L_{AE}$ . Délka  $L_{AE}$  začíná na hlavě zubu (resp. na počátku sražení nebo zaoblení hlavy), koncový bod E představuje bod dotyku se spoluzabírajícím kolem.

*Odchylka tvaru profilu  $f_{f\alpha}$*  je vzdálenost mezi dvěma ekvidistantami středního profilu, které jsou umístěny v konstantní vzdálenosti od tohoto středního profilu tak, aby zahrnuly skutečný profil v rozsahu délky hodnocení  $L_\alpha$ .

*Odchylka úhlu profilu  $f_{H\alpha}$*  představuje vzdálenost mezi dvěma ekvidistantami teoretického profilu, které protínají střední profil v koncových bodech rozsahu vyhodnocení  $L_\alpha$ .



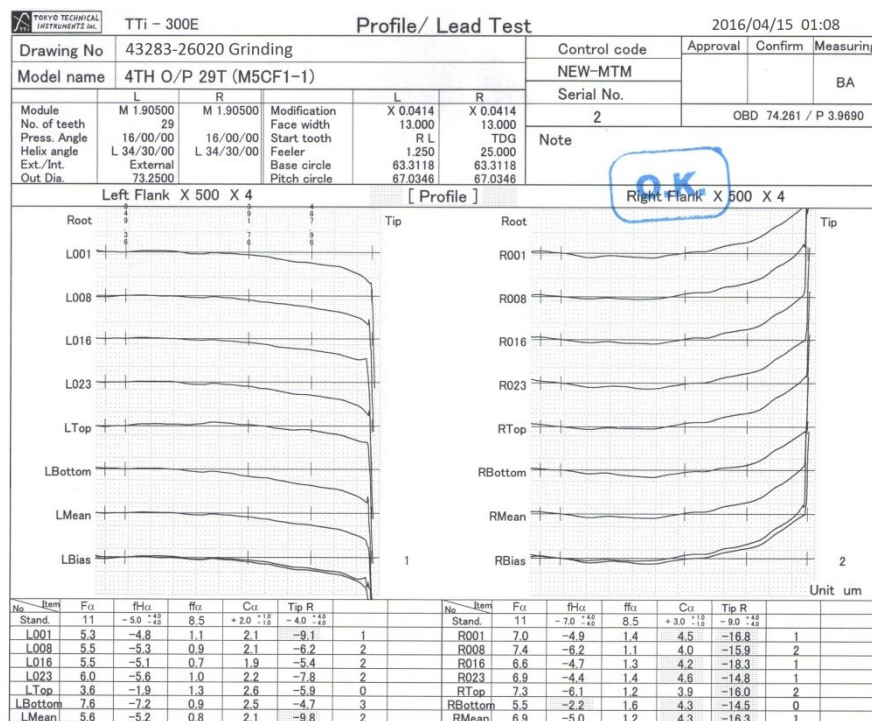
Obr. č. 5.7 – Odchylka profilu  $F_\alpha$ , odchylka tvaru profilu  $f_{f\alpha}$ , odchylka úhlu profilu  $f_{H\alpha}$  [13]

Odchyšky profilu byly po celou dobu životnosti nástroje kontrolovány v 60-ti minutových intervalech a také na posledním obrobníku před orovňáváním nástroje. Měření probíhalo na CNC měřícím zařízení Tti-300 E.



Obr. č. 5.8 – Měření úchylek tvaru profilu na CNC měřícím stroji Tti-300E

Během celé životnosti nástroje byly úchylky tvaru profilu v předepsaných tolerancích a nedošlo ani k žádným neočekávaným poruchám tvaru profilu.



Obr. č. 5.9 – Výsledek z měření úchylek tvaru profilu během zkoušek nástroje [14]

## 6 Technicko-ekonomické zhodnocení

Na základě výsledků praktických zkoušek je možné provést technicko-ekonomické zhodnocení návrhu použití nového brusného nástroje. Tabulka č.5 nám dává přehled porovnání předchozího a nového nástroje.

Tabulka č. 5 – Porovnání parametrů starého a nového kotouče

<b>Nástroj</b>		
Výrobce	<b>Theleico</b>	<b>3M</b>
Označení	44A 100-9J11VM3250	93DA80/80 J18VPLF9/601W
Materiál brusiva	Umělý korund	Mikrokrytalický spékaný korund PSG (Cubitron II)
Počet chodů šneku $z_0$	3	3
<b>Parametry broušení a orovnávaní</b>		
Počet brusných stupňů	3	2
Celkový radiální přísuv $x_v$	0,42 mm	0,42 mm
Počet dílů mezi orovnávaním	46	127
Celkový přísuv při orovnávaní	0,28 mm	0,22 mm
Počet orovnávacích cyklů	95	125
Celková životnost nástroje	4 370 ks	15 875 ks
Čas broušení	29 s	19 s
Čas cyklu výrobní linky	43 s	36 s

Z předchozí tabulky lze vidět, jaké možnosti nám přináší nový nástroj z mikrokrytalického spékaného korundu PSG. Použití tohoto materiálu umožnilo snížit počet brusných stupňů, což vedlo k nárstu počtu dílů mezi orovnávaním ze 46 na 127. Výborné samoostřicí vlastnosti mikrokrytalického korundu a tvaru zrna umožnily snížit přísuv při orovnávaní z 0,28 mm na 0,22 mm, což vedlo ke zvýšení celkového počtu orovnávacích cyklů z 95-krát na 125-krát.

Všechny uvedené změny vedly k nárstu celkové životnosti brousícího nástroje o více než trojnásobek z původních 4370 ks na 15875 ks. Čas broušení byl zkrácen z původních 29 sekund na 19 sekund a celkový čas cyklu výrobní linky se zkrátil ze 43 sekund na 36 sekund, čímž se podařilo odstranit úzké místo v toku materiálu výrobní linkou. Praktické zkoušky



prokázaly schopnost nového nástroje dosahovat požadované kvality tvaru profilu zubu během celé své životnosti.

V tabulce č.6 jsou porovnány ceny původního a nového nástroje. Můžeme také vidět náklady nástroje na 1 obrobek.

*Tabulka č. 6 – Ceny původního a nového nástroje a náklady na 1 obrobek*

	<b>Theleico</b>	<b>3M</b>
Cena brusného nástroje	300,- €	805,- €
Celková životnost nástroje	4 370 ks	15 875 ks
Náklady nástroje na 1 obrobek	0,068,- €	0,05,- €

V roce 2015 bylo na sledované lince vyrobeno 250 000 kusů ozubených kol 4.rychlostního stupně. Plán výroby, pro tento a následující rok, počítá se stejným nebo vyšším objemem výroby.

V tabulce č.7 jsou uvedeny celkové náklady na výrobu 250 000 kusů obrobků. V celkových nákladech je kalkulováno s časem výměny nástroje, která trvá v průměru 80min (zastavení linky, výměna nástroje, seřízení, změření obrobku, start linky). Náklady na 1 min zastavení výrobní linky jsou 3,- €. Po porovnání nákladů docházíme k celkové úspoře 14 340,- €.

*Tabulka č. 7 – Celkové roční náklady a úspora*

<b>Náklady při roční výrobě 250 000 ks</b>		
	<b>Theleico</b>	<b>3M</b>
Náklady na brusný nástroj	17 000,- €	12 500,- €
Počet výměn nástroje	57	16
Náklady na výměny nástroje	13 680,- €	3 840,- €
<b>Celkové náklady</b>	<b>30 680,- €</b>	<b>16 340,- €</b>
<b>Úspora nákladů</b>	<b>-</b>	<b>- 14 340,- €</b>

## 7 Závěr

V úvodu jsem se zmínil, že ozubená kola a převody mají do dnešních dnů velký hospodářský význam, a při jejich výrobě je kladen čím dál větší důraz na zvyšování produktivity při současném snižování výrobních nákladů.

Cílem této bakalářské práce bylo zefektivnění procesu odvalovacího broušení ozubení na stroji Reishauer RZ150 v podniku Hyundai Motor Manufacturing Czech s.r.o. Jako referenční byla vybrána linka ZD52/53 pro výrobu ozubeného kola 4. rychlostního stupně. Měření časů jednotlivých operací na lince ukázalo, že právě operace broušení ozubení vytváří úzké místo v toku materiálu. Cílem tedy bylo odstranění úzkého místa v procesu a tím zefektivnění výroby celé linky.

Výchozí strojní zařízení pro výrobu ozubeného kola 4. rychlostního stupně bylo pevně dáno. Rozhodl jsem se tedy o zefektivnění procesu broušení na stroji Reishauer RZ150 úpravou parametrů broušení ze tří brusných stupňů na dva. To však znamenalo zdvojnásobení úběru materiálu v jednom hrubovacím stupni, naproti původním dvěma a tím také vyšší tlak vznikající při broušení. Tato skutečnost si vyžadovala použití výkonnějšího brusného kotouče.

Na základě výše uvedených skutečností, jsem se rozhodl pro volbu kotouče ze spékaného mikrokrystalického korundu. Po konzultaci s dodavatelem brousících nástrojů byl vybrán nástroj s označením 93DA80/80 J18VPLF29/601W. Jednalo se tedy o nástroj z mikrokrystalického spékaného korundu s 30% obsahem objemu zrn PSG „precision-shaped grain“. Zvláštností tohoto nástroje je přesně definovaný tvar brusných zrn ve tvaru trojúhelníku.

V průběhu zkoušek nového brusného kotouče, vlastnosti zvoleného brusného materiálu umožnily nastavení brousících parametrů stroje, které znamenalo více než trojnásobné zvýšení životnosti v porovnání s předchozím nástrojem z umělého korundu. Hlavním kontrolovaným parametrem během zkoušek byl tvar profilu ozubení. Nový nástroj během celé své životnosti splňoval kvalitativní požadavky na úchylky tvaru profilu.

Nasazením nového nástroje se díky zvýšení životnosti podařilo snížit cenu na obrobek z 0,068,- € na 0,05,- €. Výrazných úspor se dále dosahuje rapidním snížením počtu výměn nástroje, kdy počet výměn pro roční výrobu 250 000 ks obrobků se sníží z počtu 57 na pouhých 16 výměn ročně. Bylo také odstraněno úzké místo výrobní linky, když se podařilo snížit čas cyklu z původních 43 sekund na 36 sekund.

I navzdory téměř 3-násobné pořizovací ceně nástroje v porovnání s předchozím kotoučem, jeho nasazení do výroby přináší pro podnik roční úsporu 14 340,- €.

Výše uvedené skutečnosti dokazují, že pokud se vedle technologických hledisek dbá také na produktivitu, flexibilitu a výrobní náklady, lze dosáhnout výrazných ekonomických úspor. V současné době probíhají zkoušky nového kotouče na dalších dvou výrobních linkách, kde se očekává podobný efekt jako na lince ZD52/53.

## 8 Použitá literatura

- [1] BRYCHTA, J.; ČEP, R.; NOVÁKOVÁ, J.; PETŘKOVSKÁ, L. *Technologie II – 2. díl*. Ostrava : VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2008. ISBN 978-80-248-1822-1.
- [2] MRKVICA, I. *Speciální technologie, Výroba ozubených kol I*. Ostrava : VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2009. ISBN 978-80-248-1931-0.
- [3] MRKVICA, I. *Speciální technologie, Výroba ozubených kol II*. Ostrava : VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2009. ISBN 978-80-248-2134-4.
- [4] BRYCHTA, J. *Obrábění I, Návodů pro cvičení 2.část*. Ostrava : VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2004. ISBN 80-248-0577-4.
- [5] TONSHOF, H.K.; DENKENA, B. *Basics of Cutting and Abrasive processes*. Berlin : Springer Berlin Heidelberg, 2013. ISBN 978-3-642-33256-2.
- [6] GRAF, W. *Handbook Gear Grinding*. Winterthur : Winterthur Schleiftechnik AG, 2009. 08/2009 Item No.303747.
- [7] WINTERTHUR TECHNOLOGIE AG. *Precision Grinding Wheels*. Winterthur : Winterthur Schleiftechnik AG, 2007. 03/2007 Item No.231510.00.
- [8] 3M ČESKO, s.r.o. *Brusivo pro přesné broušení*. Praha : 2012
- [9] REISHAUER AG. *RZ 150 - CNC Gear Grinder Operating Instructions*. Wallisellen : 2007
- [10] REISHAUER AG. *RZ 303C - CNC Gear Grinder Operating Instructions*. Wallisellen : 2007
- [11] REISHAUER AG. *RZ 260 - CNC Gear Grinder Operating Instructions*. Wallisellen : 2011
- [12] 3M ABRASIVE SYSTEMS DIVISION. *Handbook Cylindrical Grinding*. 11/2014 Art.No.:W004 E
- [13] TICHÁ, Š. *Strojírenská metrologie část 1*. Ostrava : VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2006. ISBN 80-248-0671-1.
- [14] Interní dokumentace společnosti Hyundai Motor Manufacturing Czech s.r.o.

## **Poděkování**

Rád bych poděkoval doc.Ing. Robertu Čepovi, Ph.D. za odbornou pomoc a konzultaci při vytváření této bakalářské práce.