

Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie

Racionalizace hrubování zubové mezery

The Rationalization of Roughing Tooth Gap

Student:

Ondřej Kohut

Vedoucí bakalářské práce:

ing. Antonín Trefil

Ostrava 2015

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra obrábění a montáže

Zadání bakalářské práce

Student: **Ondřej Kohut**
Studijní program: B2341 Strojírenství
Studijní obor: 2303R002 Strojírenská technologie
Téma: **Racionalizace hrubování zubové mezery**
The Rationalization of Roughing Tooth Gap

Zásady pro vypracování:

1. Úvod.
2. Popis stávajícího stavu výroby.
3. Návrh racionalizace výroby.
4. Technicko-ekonomické zhodnocení.
5. Závěr.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] BRYCHTA, J.; ČEP, R.; SADÍLEK, M.; PETŘKOVSKÁ, L.; NOVÁKOVÁ, J. *Nové směry v progresivním obrábění*. Ostrava : Ediční středisko VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2007. Dostupné na <http://www.elearn.vsb.cz/archivcd/FS/NSPO>. ISBN 978-80-248-1505-3.
- [2] HUMÁR, A. *Materiály pro řezné nástroje*. Brno : MM Publishing Praha, 2008, 235 s. ISBN 978-80-254-2250-2.
- [3] NESLUŠAN, M.; TUREK, S.; BRYCHTA, J.; ČEP, R.; TABAČEK, M. *Experimentální metody v trieskovom obrábění*. 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.
- [5] STEPHENSON, D. A.; AGAPIOU, J. S. *Metal cutting theory and practice*. New York : Marcel Dekker, Inc., 1997. ISBN 0-8247-9579-2.

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


Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Antonín Trefil**

Datum zadání: 12.12.2014

Datum odevzdání: 18.05.2015


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 10. 2. 2015



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 nevydělečně ke své vnitřní potřebě užít (§ 35 odst. 3).
- Souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické 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 10. 2. 2015



podpis

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Raškovice 470, 73904

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

KOHUT, O. *Racionalizace hrubování zubové mezery : bakalářská práce*. Ostrava : VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie, 2015, 46 s. Vedoucí práce: Trefil, A.

Bakalářská práce se zabývá problematikou hrubování zubové mezer u ozubených kol s velkými moduly na horizontální vyvrtávačce WT200H-CNC a možnostmi pro zvýšení produktivity výroby. V úvodu se seznámíme se stávající technologií výroby, dále se zaměříme na progresivní metody frézování. Hlavní část Bakalářské práce se zabývá praktickými zkouškami jednotlivých nástrojů zvolených pro racionalizaci procesu na zkušebním materiálu. Vyhodnocení zkoušek se provádí z hlediska ekonomického a výkonnostního. Po zhodnocení všech poznatků z praktických zkoušek se pro racionalizaci vybere a doporučí optimální varianta nástroje.

ANNOTATION OF BACHELOR THESIS

KOHUT, O. *The rationalization of roughing tooth gap : Bachelor Thesis*. Ostrava : VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering , Department of Machining and Assembly, 2015, 46 s. Thesis head: Trefil, A.

Bachelor thesis deals with questions of roughing tooth gap at gearwheels with high modules on a horizontal boring machine WT200H-CNC and the possibilities for increasing of manufacturing productivity. The introduction acquaints with current production technology, further we will concentrate on progressive methods of milling. Main part of the bachelor thesis deals with practical tests of tools chosen for rationalization of process on a test material. Evaluation of a test is carried out from economical and performance point of view. After evaluation of knowledge from practical tests the best variant of tool will be chosen and recommended.

Obsah

1	Úvod.....	10
1.1	Teorie obrábění.....	11
1.1.1	Frézování.....	12
1.2	Problematika výroby ozubených kol.....	12
1.2.1	Obrázení hřebenovým nožem.....	13
1.2.2	Frézování dělicím způsobem.....	13
1.2.3	Odvalovací frézování.....	14
1.3	Opotřebenění řezných nástrojů.....	15
2	Popis stávajícího stavu výroby.....	17
2.1	Stroj.....	17
2.2	Současný postup výroby.....	18
3	Návrh racionalizace výroby.....	19
3.1	Progresivní metody obrábění.....	20
3.1.1	Vysokorychlostní obrábění.....	21
3.1.2	Frézování vysokými posuvy.....	23
3.2	Zkoušky vybraných nástrojů.....	24
3.2.1	Zkušební materiál.....	24
3.2.2	Průběh zkoušek.....	25
3.3	Nástroje.....	26
3.3.1	Skupina č. I – nástroje $\varnothing 50 - \varnothing 52$ mm.....	27
3.3.2	Skupina č. II - nástroje $\varnothing 32 - \varnothing 35$ mm.....	30
3.4	Výsledky zkoušek.....	33
4	Technicko-ekonomické zhodnocení.....	35
4.1	Vyhodnocení výkonu nástrojů.....	35
4.2	Vyhodnocení ekonomických nároků na jednotlivé nástroje.....	36
4.3	Návrh nástroje a jeho srovnání.....	41
5	Závěr.....	42

6	Použitá literatura	44
---	--------------------------	----

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

C	Uhlík
Cr	Chrom
D_a	průměr hlavové kružnice [mm]
D_n	průměr frézy [mm]
HFM	High Feed Milling (vysokoposuvové frézování)
HPM	High Performance Cutting (vysoce výkonné frézování)
HSC	High Speed Cutting (vysokorychlostní obrábění)
HSM	High Speed Milling (vysokorychlostní frézování)
HVC	High Volume Cutting (vysokoobjemové obrábění)
Kč	Koruna česká
Mn	Mangan
Mo	Molybden
Obr.	obrázek
P	Fosfor
PVD	Physical Vapour Deposition (fyzikální nanášení odpařováním)
Q	úběr materiálu [$\text{cm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$]
R_m	mez pevnosti v tahu [$\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$]
S	Síra
Si	Křemík
SK	slinutý karbid
S_{VBD}	spotřeba vyměnitelných břitových destiček
$T_{\text{břit}}$	životnost jednoho břitu [zubů \cdot břit $^{-1}$]
TiCN	karbo-nitrid titanu
TiN	nitrid titanu
VBD	vyměnitelná břitová destička
a_e	šířka frézování [mm]
a_p	hloubka řezu [mm]
apod.	a podobně
a.s.	akciová společnost
atd.	a tak dále
b	šířka ozubeného kola [mm]
č.	číslo
f_z	posuv na zub [mm]

h	hloubka frézování [mm]
l	délka průchodu jedné drážky [mm]
m	modul ozubeného kola
mat.	materiál
m_n	modul normální [mm]
m_t	modul čelní [mm]
n	otáčky [min^{-1}]
např.	například
$n_{\text{břit}}$	počet břitů na jedné břitové destičce
n_l	počet průchodu nástroje
n_{VBD}	počet břitových destiček upnutých v nástroji
t_s	strojní čas [hod]
tzv.	takzvaný
v_c	řezná rychlost [$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$]
v_f	posuvový rychlost [$\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$]
x	posunutí profilu
z	počet zubů ozubeného kola
β_r	úhel sklonu zubu [$^\circ$]
β_z	úhel stoupání šroubovice [$^\circ$]
μ	úhel vyklonění [$^\circ$]

1 Úvod

V poslední době se klade čím dál větší důraz na zvyšování produktivity výroby při současném snižování výrobních nákladů. Tato snaha vede k vývoji stále nových progresivních metod a technologií v celém průmyslovém spektru. Podniky mají snahu přizpůsobit se, rychle se měnícímu trhu. Výjimkou pak není ani oblast strojírenství.

V oblasti třískového obrábění jsou pak stále častější metody, využívající vysoké řezné a posuvové rychlosti. To vede ke snižování strojních časů a tím zároveň ke zvyšování produktivity celého procesu. Jsou to metody jako například: frézování vysokými posuvy (HFM), nebo vysokorychlostní obrábění (HSM).

Tato bakalářská práce je zpracována pro společnost Vítkovice Heavy Machinery a.s., která je členem skupiny Vítkovice Machinery Group. Skupina Vítkovice Machinery Group je jednou z nejvýznamnějších strojírenských společností v České Republice a zahrnuje více než třicet firem. Společnost Vítkovice Heavy Machinery se zaměřuje převážně na výrobu těžkých ocelových odlitků, tvarových opracovaných výkovků a montážních celků jako např. lisů.

Nejprve se budu zabývat teoretickými poznatky z oboru frézování, výroby ozubení a progresivními metodami v oblasti třískového obrábění. Hlavní část práce poté tvoří praktické zkoušky jednotlivých nástrojů. Cílem práce je vyhodnotit stávající stav technologie výroby zubových mezer a navrhnout kroky, vhodné pro zefektivnění celého procesu.

1.1 Teorie obrábění

Obrábění je technologický proces, při kterém odebíráním třísky vlivem mechanických, elektrických a dalších procesů, vytváříme povrchy obrobku požadovaného tvaru, rozměru a jakosti. Proces obrábění se uskutečňuje v soustavě obrábění. Ta je tvořena z následujících částí:

- obráběcí stroj,
- řezný nástroj,
- obrobek,
- přípravek.

Proces obrábění můžeme rozdělit, podle charakteru konané práce na:

- ruční,
- strojní.

Ruční obrábění je realizování člověkem, jednak pomocí práce s ručními nástroji jako je pilování, sekání atd., nebo také prostřednictvím práce s ručně ovládanými stroji jako jsou vrtačky, brusky aj. Při tomto procesu se využívá fyzická síla a výsledek pak do značné míry záleží na zručnosti daného pracovníka. S rozvojem techniky se ruční obrábění stává stále méně produktivní metodou a je čím dál více nahrazováno metodou strojního obrábění.

Strojní obrábění je metoda, při které je potřebná energie (většinou elektrická) přiváděna k obráběcímu stroji a poté transformována na energii mechanickou, která se dále využívá pro realizaci celého procesu. Strojní metody lze rozdělit podle charakteristických znaků na:

- obrábění nástroji s definovanou geometrií (soustružení, frézování, vrtání, atd.),
- obrábění nástroji s nedefinovanou geometrií (broušení, lapování atd.),
- nekonvenční metody obrábění (elektroerozivní obrábění, elektrochemické obrábění, obrábění laserovým paprskem, atd.),
- úpravy obrobených ploch (leštění, hlazení, brokování, atd.). [1]

1.1.1 Frézování

Frézování je dnes velmi rozšířenou metodou obrábění. Používá se především pro výrobu rovinných a tvarových ploch, drážek, závitů, ozubení apod. Velkou předností frézování je poměrně vysoká výkonnost spolu s dobrou kvalitou obrobené plochy. Hlavní řezný pohyb koná nástroj (rotační), vedlejší pohyb přímočarý koná obrobek. Řezný proces je přerušovaný, realizovaný pomocí vícebřitého nástroje (frézy) kdy každý břit odřezává krátké třísky proměnlivého průřezu. Výsledný tvar obrobené plochy je dán buď tvarem frézy, nebo vzájemným pohybem frézy a nástroje. U moderních obráběcích strojů jako jsou vícesá obráběcí centra, je možno posuvy plynule měnit, kombinovat a vytvářet tak i velmi složité tvarové plochy. [2]

1.2 Problematika výroby ozubených kol

Ozubená kola jsou strojní součástí sloužící pro přenos krouticího momentu. Jejich výroba je technologicky velice složitá, neboť je nutné splnit všechny požadavky kladené na správné odvalování a záběr jednotlivých zubů. Výroba je založena na obrábění tvarových, evolventních nebo cykloidních ploch. Ozubená kola mohou být různého charakteru a lze je rozdělit na:

- čelní kola s přímými, šikmými nebo šípovými zuby,
- šneky a šneková kola,
- kuželová kola s přímými, šikmými nebo zakřivenými zuby.

Nejčastěji používaná jsou potom čelní ozubená kola a využívají se především u převodových mechanismů.

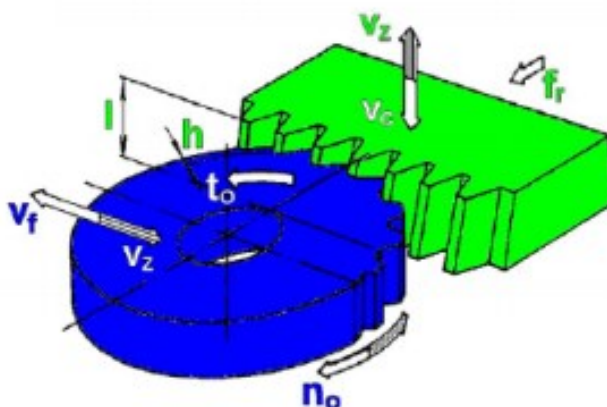
Pro samotnou výrobu ozubení lze použít celou řadu technologií. Ty nejčastěji používané jsou:

- obrázení odvalovacím způsobem hřebenovým nožem,
- frézování dělicím způsobem,
- odvalovací frézování,
- protahování a protlačování. [4]

1.2.1 Obrážení hřebenovým nožem

Metoda obrážení hřebenovým nožem se ve strojírenství nejčastěji využívá pro kusovou výrobu ozubených kol s velkými moduly a průměry. Principem je záběr ozubeného hřebene s obrobkem. Hřeben, jako nástroj koná přímočarý vratný pohyb. Odvalování je dosaženo složením otáčivého a posuvného pohybu obrobku. Nástroj má zpravidla méně zubů než obráběné kolo, proto po obrobení skupiny zubů obrobek vyjede ze záběru a vrátí se do výchozí polohy. Celý proces se opakuje, až je ozubení vytvořeno na celém obvodu. Díky jednoduché geometrii nástroje a kinematice stroje se metoda používá v hojné míře dodnes.

Jedním obrážecím hřebenem lze obrábět ozubená kola stejného modulu s přímými i šikmými zuby, korigovaná i nekorigovaná bez ohledu na počet zubů kola a úhel sklonu zubů. Hlavní výhodou oproti jiným nástrojům na výrobu ozubení je jednoduchost výroby a možnost snadného přeostření hřebene. Při přeostření nedochází k žádným změnám v geometrii nástroje, neboť je přebušován jen na čele. Díky své jednoduchosti lze nástroje zhotovit s velkou přesností a tak patří obrážení hřebenovým nožem mezi nejpřesnější metody výroby ozubených kol, jak z hlediska jakosti povrchu tak i profilu kola. Nevýhodou je nízká produktivita práce stroje, což způsobuje, že se s touto metodou setkáváme převážně v kusové výrobě. [5]



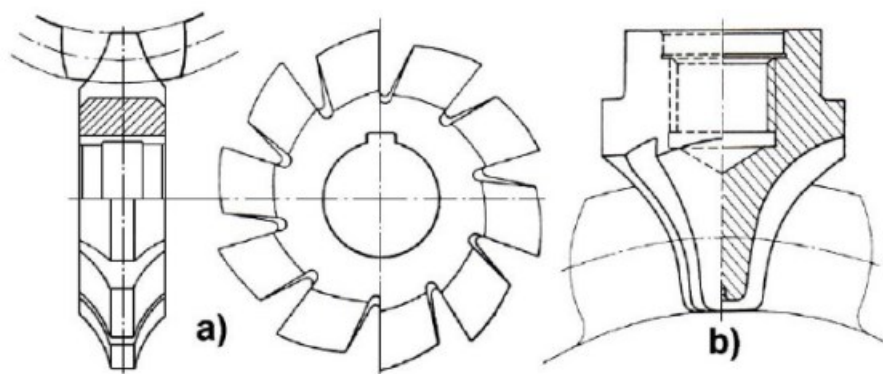
Obr. č. 1.1 – Obrážení hřebenovým nožem [4]

1.2.2 Frézování dělicím způsobem

Pro frézování ozubených kol dělicím způsobem je charakteristické, že se vždy obrábí jen jedna zubová mezera. Po dokončení této mezery se obrobek pootočí o zubovou rozteč

a frézuje se následující zubová mezera. Metoda se využívá především v kusové výrobě pro ozubená kola s velkými moduly ($m > 20$ mm). Pro frézování dělicím způsobem lze využít buď kotoučovou modulovou, nebo tvarovou stopkovou frézu, kdy nástroj má profil zubové mezery a přesnost výroby závisí na přesnosti daného nástroje. Pro hrubování se pak používají frézy s lichoběžníkovým profilem.

Touto metodou je možno zhotovit ozubená kola s přímými a šikmými zuby, při použití stopkové frézy také kola s šípovým ozubením, která se používají pro přenos velkých točivých momentu. Stopkové frézy jsou méně produktivní, než kotoučové a tak se používají převážně pro šípové ozubení v kusové výrobě. Nevýhodou této metody je nízká přesnost a již zmíněná nízká produktivita práce. Výhodou je pak poměrně nízká cena nástrojů a také možnost využití běžně používaných obráběcích strojů. [4]

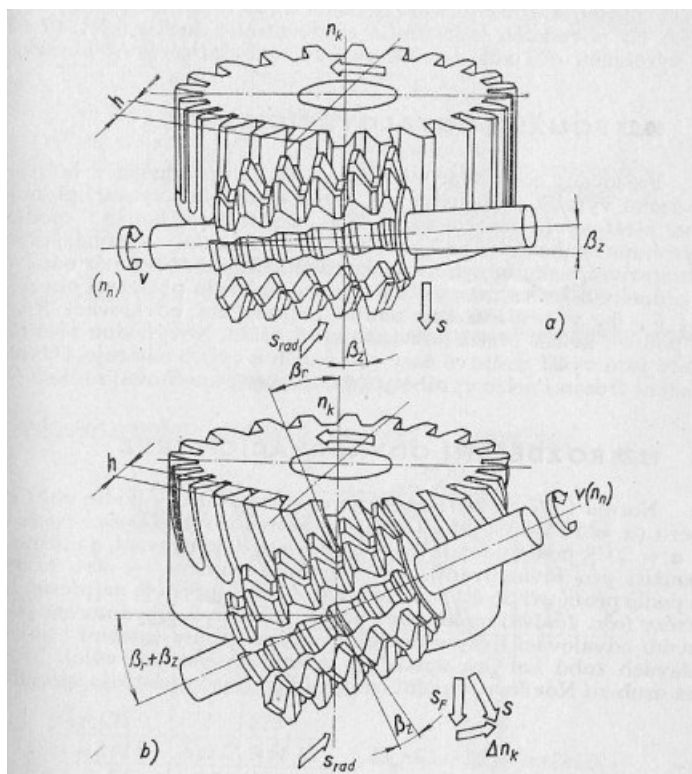


Obr. č. 1.2 – Modulové frézy a) kotoučová, b) stopková [4]

1.2.3 Odvalovací frézování

Nejproduktivnější a nejčastější metodou výroby ozubených kol je odvalovací frézování. Jako nástroj se využívá tzv. odvalovací fréza. V podstatě se jedná o válcovou tvarovou frézu, tvořící šnek, spoluzabírající s obráběným kolem. Šnek je po obvodu přerušen drážkami, které vytvářejí řezné klíny. Fréza má lichoběžníkový profil zubu. Evolventní tvar zubu ozubeného kola pak vzniká odvalováním boku zubů frézy. Otáčky frézy a vyráběného kola jsou v takovém poměru, aby se za jednu otáčku frézy obrobek pootočil o jednu zubovou rozteč. Fréza koná současně řezný (rotační) pohyb a pohybuje se ve směru obráběných zubů, aby došlo k obrobení celé šířky ozubeného kola. Výhodou je, že pomocí jedné odvalovací frézy, lze vyrábět kola příslušného modulu s různým počtem a sklonem zubu. Vzhledem k plynulé výrobě celého ozubení, pak odpadají také ztrátové časy potřebné k reverzaci, jako např. u dělicího způsobu výroby. [5]

Nejpoužívanější způsob je axiální frézování, při kterém je fréza vykloněna o úhel stoupání šroubovice β_z . Při frézování šikmých zubů se pak musí brát v potaz i úhel sklonu zubu β_r . Jestliže bude smysl stoupání frézy a ozubeného kola stejný, pak se musí fréza vyklonit o uhel $\mu = \beta_z + \beta_r$. V případě že mají opačný smysl stoupání, bude výsledný úhel natočení frézy $\mu = \beta_z - \beta_r$. [6]



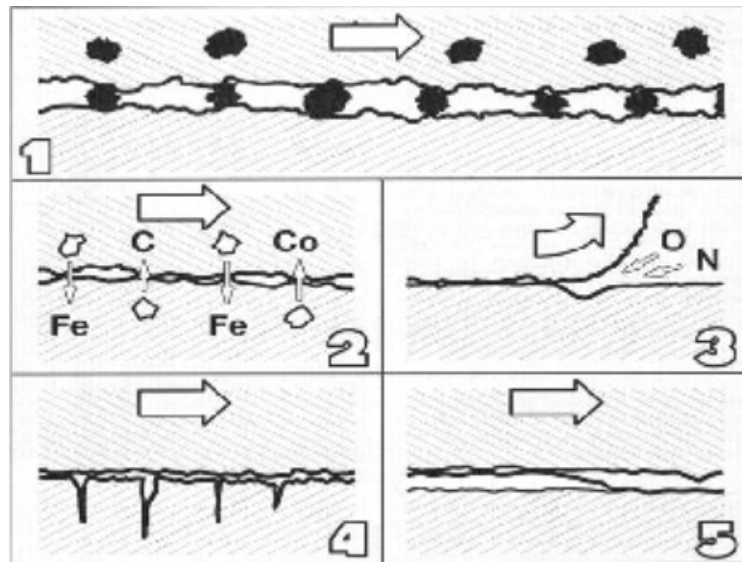
Obr. č. 1.3 – Princip odvalovacího frézování a) přímé ozubení, b) šikmé ozubení [6]

1.3 Opotřebení řezných nástrojů

Při procesu obrábění vzniká množství faktorů, které zatěžují břit nástroje a způsobují tak jeho opotřebení. Jedním z hlavních činitelů ovlivňující opotřebení je množství tepla vyvinutého na čele a hřbetu nástroje. Značně tepelně namáhány jsou pak zejména břity u frézování, kde má tepelné zatížení dynamický charakter v okamžiku, kdy jeden břit do materiálu vniká a jiný naopak vystupuje. Vlivem vysokých tlaků a teplot se materiál stává náchylný k chemickým reakcím a difuzním procesům. Velká část obráběných materiálů obsahuje částice, které se tvrdostí vyrovnají řeznému materiálu a způsobují tak abrazivní opotřebení. Všechny tyto vlivy způsobují opotřebení, jak řezné části nástroje, tak také nástroje samotného a mají tedy velký dopad na hospodárnost celého procesu.

Mezi hlavní mechanismy opotřebení nástroje náleží:

- abraze (rozrušování povrchu vlivem působení tvrdých částic),
- adheze (vytrhávání částic břitu v důsledku mikrosvarů, vznikajících na styčných plochách nástroje a obrobku),
- difuze (přechod atomu z obráběného do řezného materiálu a obráceně, což způsobuje nepříznivé změny struktury nástrojového mat.),
- oxidace (chemická reakce povrchu nástroje s prostředím),
- plastická deformace (vzniká následkem příliš velkého mechanického zatížení a vysokých teplot),
- křehký lom (následek vysokých hodnot mechanického zatížení, zejména rázového charakteru, např. přerušované řezy nebo vměstky). [3]



Obr. č. 1.4 – Hlavní mechanismy opotřebení 1)abraze, 2)difuze, 3)oxidace, 4)lom, 5)adheze [3]

2 Popis stávajícího stavu výroby

V současné době je proces hrubování zubových mezer zajišťován frézováním na horizontální vyvrtávače za pomoci otočného stolu a zrychlovací hlavy. Jako nástroje jsou použity frézovací hlavy Pramet 50 A04R-SMO2D12 a Hitachi AHRM-4035R-3-M16, obě frézy jsou osazené VBD.

2.1 Stroj

Pro výrobu zubových mezer se využívá horizontální vyvrtávačka WT200H-CNC. Rotační pohyb kola kolem své osy pak zajišťuje otočný stůl SEA 60. Jejich základní parametry jsou uvedeny v tabulce č. 1.

Horizontální vyvrtávačka WT200H-CNC		
Výsuv vřetene	2000	mm
Výsuv pinoly	1600	mm
Max. otáčky vřeteníku	630	min ⁻¹
Posuv vřetene a pinoly	0,75 - 3000	mm · min ⁻¹
Posuv vřeteníku	0,75 - 6000	mm · min ⁻¹
Posuv stojanu	0,75 - 6000	mm · min ⁻¹
Průměr vřetene	200	mm
Kužel vřetene	ISO 60	
Výkon hlavního pohonu	77	kW
Otočný stůl SEA 60		
Rozměry upínací desky	3550 x 4000	mm
Max. centrické zatížení stolu	80	t
Pracovní posuv podélný	0 - 4300	mm · min ⁻¹
Pracovní posuv otáčivý	0 - 3300	mm · min ⁻¹

Tabulka č. 1 – Hlavní technická data stroje [12]

Nevýhodou tohoto typu stroje je poměrně pomalý posuv vřetene a pinoly, což je při návrhu racionalizace omezující faktor a musíme s ním počítat. Další nevýhodou jsou nízké otáčky vřeteníku. Tento problém se řeší využitím zrychlovací hlavy. Ta je spojena s vřetenem stroje pomocí klasického rozhraní, zafixovaná proti rotaci a je jím poháněna. Zvýšení výstupních otáček je dosaženo pomocí převodovky s určitým převodovým

oměrem. Námí používaná zrychlovací hlava FX-300-04 má převodový poměr 1:4 a její základní parametry jsou zobrazeny v tabulce č. 2. [7]

Zrychlovací hlava FX-300-04		
Převodový poměr	1:4	
Max. výstupní otáčky	8000	min ⁻¹
Max. přenášený výkon	20	kW
Max. točivý moment	400	Nm
Výstupní vřeten	ISO 50 – DIN 69871-A	

Tabulka č. 2 – Zrychlovací hlava [12]

Součástí vyvrtávačky je otočný stůl s dostatečnou nosností, aby bylo možno přesně polohovat i tak těžké výrobky jako je náš zkušební materiál.

2.2 Současný postup výroby

V první části výrobního procesu se odléváním zhotoví polotovary požadovaných rozměrů, s patřičnými přídávky na opracování. Prvotní opracování odlitku se provádí metodou třískového obrábění tak, aby po obrobení na materiálu nezůstaly žádné stopy nerovností, nebo okují. Po této operaci musí mít polotovar tvar a rozměry ozubeného kola.



Obr. č. 2.1 – Odlitek

Jakmile má polotovary požadované rozměry, můžeme začít s výrobou ozubení. Ozubení se vyrábí technologií frézování dělicím způsobem na horizontální vyvrtávačce. Materiál upneme přesně do středu otočného stolu, neboli tak, aby osa otáčení stolu byla shodná s osou obrobku. Do stroje se přes zrychlovací hlavu upne nástroj, což v současné době představuje kopírovací frézu Pramet 50 A04R-SMO2D12 a obrábí se postupně jedna zubová mezerka za druhou s přídatkem na dokončování do hloubky 42 mm. Jakmile nástroj vyhrubuje zubovou mezeru, vymění se za kopírovací frézu Hitachi AHRM-4035R-3-M16 která mezeru frézuje do hloubky 25 mm. Aby se dosáhlo co nejvyšší životnosti břitu rezného nástroje, je celý proces doprovázen intenzivním přívodem procesní kapaliny do místa řezu.

Po vyhrubování se pro dosažení lepších mechanických vlastností povrchu ozubené kolo tepelně zpracuje (zakalí). Tím dojde ke zpevnění povrchové vrstvy, zvýšení její pevnosti, ozubené kolo je odolnější vůči otěru a prodlužuje se tak jeho životnost. Jakmile je materiál tepelně zpracován, provedeme ještě dokončovací operaci obrábění na požadované rozměry a stupeň přesnosti.

3 Návrh racionalizace výroby

Stále se zvyšující konkurence v tržním prostředí, klade vysoké nároky na všechny firmy. A na trhu se uplatní jen výrobci, kteří jsou schopni včas poskytnout výrobky požadované kvality a ceny.

K typickým prvkům současnosti patří velice rychlý rozvoj vědy a techniky. Chce-li firma na trhu uspět, musí neustále zlepšovat všechny prvky výrobního procesu. To znamená inovace jak z hlediska organizace, tak z hlediska výrobních prostředků a technologií.

V našem případě se bude inovace týkat technologie výrobního procesu. V první řadě nás budou zajímat progresivní metody obrábění, které jsou v současné době ve velkém rozmachu, protože jsou schopny v některých případech výrazně zvýšit produktivitu a současně také snížit celkové výrobní náklady. Seznámíme se s teoretickými poznatky z oblasti progresivních metod obrábění a po zvážení všech aspektů zvolíme technologii, která má v našem případě největší potenciál. Poté aplikujeme novou technologii na náš případ a při praktických zkouškách zjistíme, do jaké míry se technologie osvědčí v praxi.

3.1 Progresivní metody obrábění

Jsou to metody, které se snaží dosahovat co možná nejvyšší produktivity práce. Jednou z předních progresivních metod obrábění je tzv. vysokoobjemové (HVC) obrábění. Podstatou je zejména docílení kratších strojních časů za současného nárůstu přesnosti a jakosti obrobených ploch. Tomuto požadavku pak odpovídá několik technologií obrábění, jejichž podstatou je buďto výrazné zvýšení řezné rychlosti, nebo rychlosti posuvu.

Produktivitu frézování, ale i obrábění obecně, lze definovat jako objem odebraného materiálu za jednotku času $Q [cm^3 \cdot min^{-1}]$. Příklady produktivity jednotlivých metod frézování můžeme vidět v tabulce č.3.

Řezné parametry	Konvenční frézování	HSM	HFM	HPM
$v_c [m \cdot min^{-1}]$	120	310	230	140
$f_z [mm]$	$0,004 \cdot D_c$	$0,008 \cdot D_c$	$0,03 \cdot D_c$	$0,01 \cdot D_c$
$a_p [mm]$	$0,25 \cdot D_c$	$0,1 \cdot D_c$	$0,1 \cdot D_c$	$1 \cdot D_c$
Q [jednotka]	4	9	20	50

Tabulka č. 3 – Srovnání metod frézování (D_c =průměr frézy). [11]

Z tabulky je možno vidět že progresivní metody jako HSM, nebo HFM jsou z hlediska objemu odebraného materiálu podstatně produktivnější než konvenční metody. Mají ale také své nevýhody a to především v pořizovacích nákladech, neboť cena strojů a nástrojů schopných pracovat v takovém režimu je stále velmi vysoká.



Obr. č. 3.1 – Monolitní frézy pro různé metody frézování [11]

3.1.1 Vysokorychlostní obrábění

Je to metoda označovaná jako HSC, jejíchž hlavním úkolem je snížit výrobní náklady a současně zvýšit kvalitu výrobku. Principem je především zvýšení úběru třísek, životnosti nástroje a zlepšení kvality obrobené plochy. Toho je dosahováno zejména zvětšením řezné rychlosti, která u vysokorychlostního obrábění dosahuje někdy až 10x vyšších hodnot než při konvenčním obrábění. Vysoká řezná rychlost následně způsobuje zmenšení průřezu třísky a snížení řezné síly. Díky velice rychlému odchodu třísek z místa řezu se zvyšuje podíl tepla odcházejícího třískou (až 95%) a podstatně se tak snižuje tepelné zatížení nástroje. Redukce řezných sil a tepelného zatížení vede k prodloužení životnosti nástroje a ke zlepšení jakosti a přesnosti opracovaného povrchu. Příklady řezných rychlosti pro různé metody obrábění jsou uvedeny v tabulce č. 4.

	Soustružení	Frézování	Vrtání	Protahování	Broušení	Fr. závitů
	$v_c [m \cdot \text{min}^{-1}]$					
Maximální	8000	6000	1100	70	9500	400
Minimální	800	500	100	12	6000	120

Tabulka č. 4 – Řezná rychlost vybraných metod HSC obrábění

Hranice tzv. vysoké řezné rychlosti je pro jednotlivé materiály různá a má na ní vliv celá řada faktorů jako např.: geometrie břitu, konstrukce nástroje nebo druh řezného materiálu.

Technologie vysokorychlostního obrábění je spojena se zvláštním principem utváření třísky. Obrábění probíhá při teplotě třísky blízké teplotě tavení obráběného materiálu, což například u ocelí představuje teplotu okolo 1500°C. Při těchto teplotách materiály mění své vlastnosti a to nám celý proces pozitivně ovlivňuje. Snižuje se přítlačná síla třísky na čelo nástroje, tím klesají třecí síly a snižuje se řezný odpor. Vysoká odchozí rychlost třísky pak zaručí minimální přenos tepla nejen do nástroje, ale také do obráběného materiálu. Tím se zvyšuje tvarová a rozměrová přesnost obrobku a v důsledku to může znamenat výraznou minimalizaci, nebo úplné odstranění dokončovacích operací.

Na rozdíl od konvenčního obrábění, kdy je třeba intenzivní přívod procesní kapaliny do místa řezu, tak v případě HSC je chlazení buď zbytečné, nebo přímo nežádoucí. Vysoká teplota celého procesu je jedním z hlavních činitelů HSC a přívod chladicího média by mohl bránit dosažení potřebných teplot.

Vzhledem k náročnosti celého HSC procesu, jsou kladeny zvláštní požadavky jednak na obráběcí stroj, ale i na nástroj. Stroje pro HSC vyžadují:

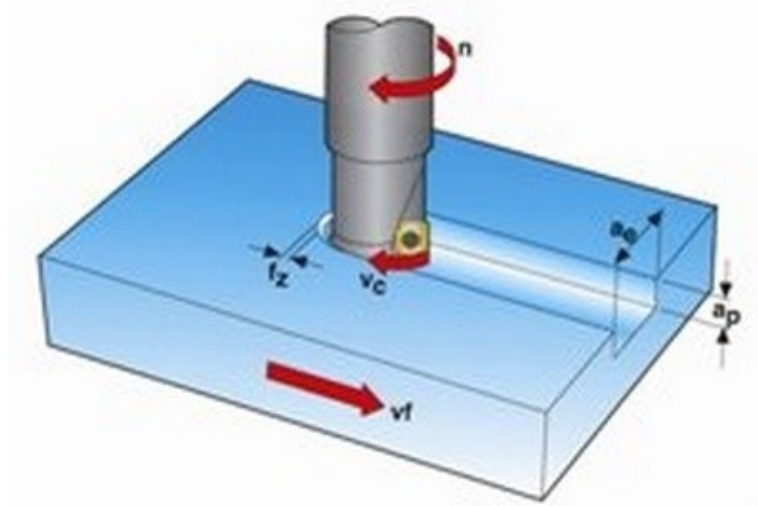
- vřetenem, schopné vyvinout vysoké otáčky,
- ložiska, které snášejí vysoké oběžné rychlosti, např. elektromagnetická,
- velmi přesné upnutí nástroje,
- pohony os zajišťující vysoké posuvové rychlosti a maximální hodnoty zrychlení a zpomalení,
- výkonné řídicí jednotky s rychlým zpracováním dat,
- celkovou kapotáž, schopnou v případě kolize zachytit uvolněné části.

Zvláštní přístup při HSC obrábění vyžadují také nástroje. Řezný materiál by měl vykazovat vysokou odolnost proti opotřebení, dostatečnou houževnatost a teplotní stabilitu. S ohledem na velmi vysoké otáčky je zapotřebí zajistit co možná nejvyšší geometrickou přesnost a homogenitu celého nástroje, aby nemohlo dojít k rozkmitání následkem nerovnoměrného rozložení hmoty. Nezbytná je také správná geometrie břítu. Po letech výzkumu a experimentů můžeme říct, že funkční úhly by měly sledovat předpokládány směr odchodu třísek. Vhodné, při HSC v podstatě nezbytné, je odlehčení řezné hrany příhodným povlakem, naneseným např. metodou PVD, vhodný je pak třeba Titan Karbo-Nitridovým povlak, který je vysoce teplotně stabilní a tedy ideální pro vysokorychlostní obrábění.

Při HSC je nutno redukovat mechanické zatížení břitu snížením hodnoty posuvu na zub. Zřetel musíme brát také na šířku řezu, neboť s rostoucím radiálním přísuvem se zvyšuje doba záběru břitu a tím také jeho tepelné namáhání. Dá se říct, že čím vyšší je řezná rychlost, tím nižší bychom měli volit radiální přísuv. U frézování vysokými rychlostmi obecně platí, že šířka záběru by neměla překročit 10% průměru nástroje. [8]

3.1.2 Frézování vysokými posuvy

HFM technologie je založena na principu obrábění při použití vysokých posuvových rychlostí, na číslicově řízených obráběcích strojích a centrech. Jde v podstatě o to, odebrat co nejvyšší množství materiálu za co nejkratší čas, při současně hospodárné trvanlivosti nástroje. Toho se dosahuje výrazným zvýšením posuvové rychlosti, abychom však zachovali určitou přípustnou trvanlivost nástroje, je třeba snížit hloubku řezu. Na rozdíl od konvenčních metod frézování kdy provádíme hluboké řezy, u HFM se hloubka řezu pohybuje do $a_p = 3 [mm]$. Posuv na zub pak může být až $f_z = 3 [mm]$, což je asi 7-8x vyšší hodnota než u konvenčního frézování. Tímto způsobem lze dosáhnout velmi vysokého úběru materiálu a tím výrazného zkrácení času potřebného k obrábění (až o 60%). Touto metodu lze frézovat rovinné plochy, osazení, kapsy, tvarově složité plochy výkovku a odlitků, formy atd. [9]



Obr. č. 3.2 – Frézování vysokými posuvy [11]

Díky menšímu radiálnímu úběru dochází ke snížení zatížení nástroje a tím ke zmenšení příkonu stroje. Snižují se také složky řezných sil a mění se směr jejich působení, takže nedochází k tak velkému vzniku vibrací, jak je tomu u konvenčního obrábění. To má

pozitivní vliv především na trvanlivost nástroje. Díky nízkým řezným silám můžeme efektivně opracovat také těžko obrobitelné materiály s vysokou pevností a tvrdostí. Další výhodou je, že můžeme využívat frézy s velkým vyložením, nutno ale použít speciální držáky tlumící vibrace, aby nedocházelo k deformaci nástroje. [10, 15]

Nástroje pro HFM se volí především s ohledem na obráběný materiál. Nicméně základní požadavky jsou většinou shodné, a to vysoká tvrdost, ořeruvzdornost břitu, teplotní stálost a odolnost vůči chemickým vlivům. Nástroj by měl být poměrně houževnatý, aby dokázal odolat případným rázům. Také při této metodě se vyžaduje, aby byly nástroje chráněny vhodným povlakem, který zvýší tvrdost povrchové vrstvy a sníží tření na čele břitu. Jsou to většinou TiN nebo TiCN povlaky, nanášené PVD technologií.

Pro hrubování se obvykle používají frézovací hlavy s vyměnitelnými břitovými destičkami ze slinutého karbidu, buď čtvercového, nebo trojúhelníkového průřezu mechanicky upnuté v upínacím lůžku. U dokončovacích operací pak volíme spíše monolitní frézy z SK, které mají vyšší rozměrovou přesnost a zajišťují tak vyšší jakost obrobené plochy. [10, 11]

3.2 Zkoušky vybraných nástrojů

Vzhledem k získaným teoretickým poznatkům z pokrokových technologií obrábění a po přihlédnutí k současnému stavu výroby se jako nejlepší možné řešení jak zvýšit produktivitu výrobního procesu jeví využití HFM technologie a její aplikace na používaný strojní park.

V současné době se na trhu vyskytuje řada firem, které nabízejí nástroje běžně používané při vysokoposuvovém frézování. Po vypsání výběrového řízení se přihlásilo pět firem, které se následně účastní zkoušek, kdy každý nástroj provede tutéž operaci na jednom konkrétním zkušebním materiálu. Nástroje se poté vyhodnotí jak z hlediska výkonnostního tak z ekonomického.

3.2.1 Zkušební materiál

Zkušební materiál je odlitek z oceli GS-34CrMo4 (tabulka č. 6). Je to slitina oceli, která se dá poměrně dobře tepelně zpracovat. Typická pevnost v tahu je $R_m = 800 - 1100 [N \cdot mm^{-2}]$. Převážně se využívá pro výrobu vysoce houževnatých

komponentů v automobilovém a leteckém průmyslu, také na výrobu klikových hřídeli nebo náprav.

Chemické složení materiálu GS-34CrMo4 [%]						
C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
0,3 – 0,37	max. 0,6	0,5 – 0,8	max. 0,025	max. 0,02	0,8 – 1,2	0,15 – 0,3

Tabulka č. 5 – Chemické složení zkušebního materiálu [13]

Před samotnými zkouškami je odlitek obroben na požadované rozměry (šířka a průměr kola).

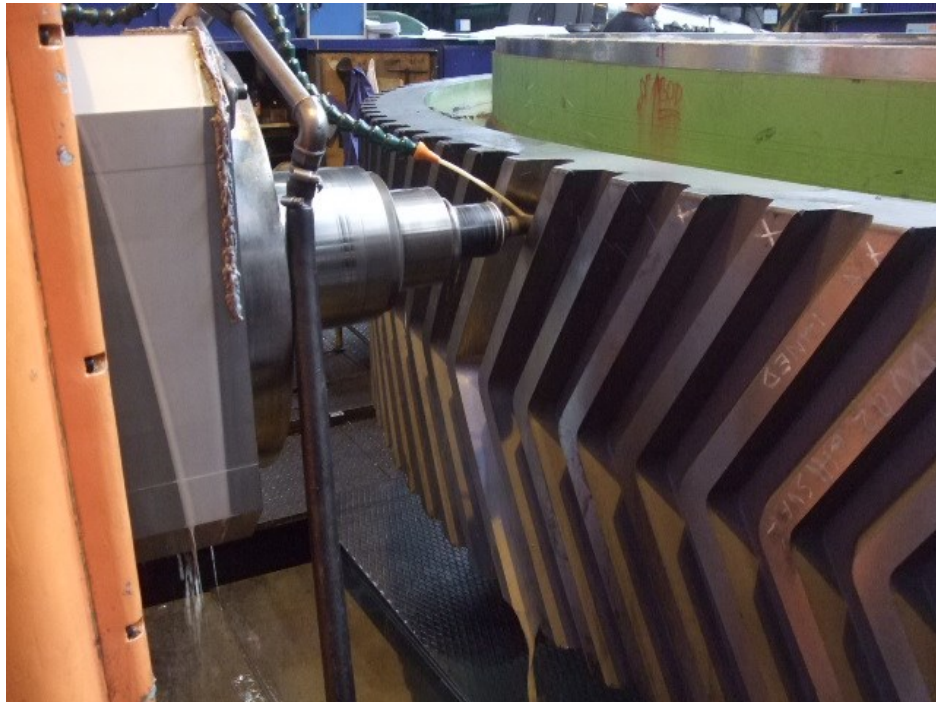
Ozubené kolo	
Počet zubů	$z = 144$
Hlavová kružnice	$D_a = 6196,8$ mm
Šířka kola	$b = 840$ mm
Modul normální	$m_n = 36,37$ mm
Modul čelní	$m_t = 42$ mm
Úhel sklonu	$\beta_r = 30^\circ$
Posunutí profilu	$x = 1,1249$
Materiál	GS-34CrMo4

Tabulka č. 6 – Rozměry zkušebního materiálu [12]

3.2.2 Průběh zkoušek

Obrobek je upnut do středu otočného stolu stroje a vystředěn tak, aby jeho osa byla shodná s osou otáčení stolu. Nástroj se upne do zrychlovací hlavy a postupně se hrubují jednotlivé zubové mezery. Vzhledem k tvaru hrubované zubové mezery je zapotřebí použít na obrábění dva nástroje. První, který má $\varnothing 50 - \varnothing 52$ mm a druhý s menším $\varnothing 32 - \varnothing 35$ mm. Celé kolo by sice šlo obrobit jedním nástrojem (menšího průměru), ale celý proces by se tím podstatně protáhnul a z ekonomického hlediska by tato varianta nebyla rentabilní. Nejprve se bude obrábět nástroji skupiny č. I, tzn. frézy $\varnothing 50 - \varnothing 52$ mm. Tyto nástroje hrubují zubové mezery s přídávkem 5 mm na plochu, do hloubky 42 mm. Po obrobení všech zubových mezer do hloubky 42 mm, vyměníme nástroje za $\varnothing 32 - \varnothing 35$ mm a hrubuje se stejným přídávkem do hloubky 22 mm. Zakřivení patní kružnice na obou koncích drážek (horní, spodní) a v místě spojnice šípů se provádí ve tvaru odstupňovaných ploch. Celý proces probíhá za intenzivního přívodu řezné kapaliny

do místa řezu. Při obrábění se pečlivě sledují a zapisují všech potřebné parametry, podle kterých se bude následně provádět vyhodnocení.



Obr. č. 3.3 – Frézování zubové mezery

3.3 Nástroje

Aby bylo možné objektivně vyhodnotit hodnoty získané z obrábění zkušebního materiálu, musíme nástroje rozdělit do dvou skupin podle velikosti a následně je posuzovat samostatně:

- skupina č. I $\varnothing 50 - \varnothing 52$ mm,
- skupina č. II $\varnothing 32 - \varnothing 35$ mm.

Každá skupina obsahuje dva typy nástrojů, jsou to kopírovací frézy, které se používaly doposud a potom navržené nástroje, čili frézy určené pro obrábění vysokými posuvy.

Jako kopírovací frézy jsou označovány nástroje, které jsou osazeny VBD s kruhovými břity. Mohou to být zcela kruhové destičky, nebo mají jen část kruhového ostří.


3.3.1 Skupina č. I – nástroje $\varnothing 50$ – $\varnothing 52$ mm

Tuto skupinu tvoří pět nástrojů s průměrem od 50 do 52 mm. Jsou to frézovací hlavy osazené vyměnitelnými břitovými destičkami.

Typ frézy	Výrobce	Označení	VBD
kopírovací	Ingersoll	5W7K052 R00	RHKW 1065 MONT
kopírovací	Ingersoll	5W7G052 R00	RAKW 1003 MONT
kopírovací	Pramet	50 A04R-SMO2D12	RCMT 1204MOSN-M
rychloposuvová	Pramet	50 A04R-SMO2D12-C	ZDEW 120408
rychloposuvová	Walter	F2330.B. 052.Z05.01,5	P26335 R14

Tabulka č. 7 – Přehled fréz, skupina č. I [12]

Kopírovací fréza Ingersoll 5W7K052 R00		
VBD	RHKW 1065 MONT	
Jakost VBD	IN 2040	
Počet břitů VBD	4	
Průměr frézy D_n	52	mm
Počet zubů z	4	
Otáčky n	1000	min^{-1}
Posuvová rychlost v_f	1200	$\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$
Řezná rychlost v_c	163	$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$
Posuv f_z	0,3	mm
Hloubka třísky a_p	2	mm
Šířka frézování a_e	52	mm



Tabulka č. 8 – Základní parametry, Ingersoll 5W7K052 R00 [12]

Kopírovací fréza Ingersoll 5W7G052 R00		
VBD	RHKW 1003 MONT	
Jakost VBD	IN 2040	
Počet břitů VBD	4	
Průměr frézy D_n	52	mm
Počet zubů z	6	
Otáčky n	1000	min^{-1}
Posuvová rychlost v_f	1500	$\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$
Řezná rychlost v_c	163	$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$
Posuv f_z	0,25	mm
Hloubka třísky a_p	2	mm
Šířka frézování a_e	52	mm



Tabulka č. 9 – Základní parametry, Ingersoll 5W7G052 R00 [12]

Kopírovací fréza Pramet 50 A04R-SMO2D12		
VBD	RCMT 1204MOSN-M	
Jakost VBD	M9325	
Počet břitů VBD	4	
Průměr frézy D_n	50	mm
Počet zubů z	4	
Otáčky n	1600	min^{-1}
Posuvová rychlost v_f	1700	$\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$
Řezná rychlost v_c	251	$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$
Posuv f_z	0,266	mm
Hloubka třísky a_p	2	mm
Šířka frézování a_e	50	mm



Tabulka č. 10 – Základní parametry, Pramet 50 A04R-SMO2D12 [12]

Rychloposuvová fréza Pramet 50 A04R-SMO2D12-C		
VBD	ZDEW 120408	
Jakost VBD	M8345	
Počet břitů VBD	4	
Průměr frézy D_n	50	mm
Počet zubů z	4	
Otáčky n	1720	min^{-1}
Posuvová rychlost v_f	3000	$\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$
Řezná rychlost v_c	270	$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$
Posuv f_z	0,436	mm
Hloubka třísky a_p	1,5	mm
Šířka frézování a_e	50	mm



Tabulka č. 11 – Základní parametry, Pramet 50 A04R-SMO2D12-C [12]

Rychloposuvová fréza Walter F2330.B. 052.Z05.01,5		
VBD	P26335 R14	
Jakost VBD	WSP 45S	
Počet břitů VBD	3	
Průměr frézy D_n	52	mm
Počet zubů z	5	
Otáčky n	900	min^{-1}
Posuvová rychlost v_f	3000	$\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$
Řezná rychlost v_c	147	$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$
Posuv f_z	0,667	mm
Hloubka třísky a_p	1,5	mm
Šířka frézování a_e	52	mm



Tabulka č. 12 – Základní parametry, Walter F2330.B. 052.Z05.01,5 [12]


3.3.2 Skupina č. II - nástroje Ø32 – Ø35 mm

Tuto skupinu tvoří taktéž frézovací hlavy s vyměnitelnými břitovými destičkami, ale s menším průměrem. Menší průměr nástroje je vzhledem k tvaru zubové mezery potřebný, abychom mohli frézovat zubovou mezeru až k patní kružnici (s přidavkem na dokončování).

Typ frézy	Výrobce	Označení	VBD
kopírovací	Hitachi	AHRM-4035R-3-M16	ZDMT 1204080TR
kopírovací	Widia	M100	RDMT 1204 MOT-X
rychloposuvová	Hitachi	ASRFM 4035R-3-M16	SDMT 1205ZDTN-R15
rychloposuvová	Pramet	32E3 R04M16-SZD12-3	ZDEW 120408
rychloposuvová	Walter	F2330.T.28.032.Z03.01,5	P26335 R15

Tabulka č. 13 – Přehled fréz, skupina č. II [12]

Kopírovací fréza Hitachi AHRM-4035R-3-M16		
VBD	ZDMT 1204080TR	
Jakost VBD	JS4060	
Počet břitů VBD	2	
Průměr frézy D_n	35	mm
Počet zubů z	2	
Otáčky n	1400	min^{-1}
Posuvová rychlost v_f	700	$\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$
Řezná rychlost v_c	154	$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$
Posuv f_z	0,25	mm
Hloubka třísky a_p	2	mm
Šířka frézování a_e	35	mm



Tabulka č. 14 – Základní parametry, Hitachi AHRM-4035R-3-M16 [12]

Kopírovací fréza Widia M100		
VBD	ZDMT 1204080TR	
Jakost VBD	JS4060	
Počet břitů VBD	4	
Průměr frézy D_n	35	mm
Počet zubů z	3	
Otáčky n	1360	min^{-1}
Posuvová rychlost v_f	1200	$\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$
Řezná rychlost v_c	154	$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$
Posuv f_z	0,294	mm
Hloubka třísky a_p	2 mm	
Šířka frézování a_e	35 mm	



Tabulka č. 15 – Základní parametry, Widia M100 [12]

Rychloposuvová fréza Hitachi ASRFM 4035R-3-M16		
VBD	SDMT 1205ZDTN-R15	
Jakost VBD	JX 100445	
Počet břitů VBD	4	
Průměr frézy D_n	35	mm
Počet zubů z	3	
Otáčky n	1800	min^{-1}
Posuvová rychlost v_f	3000	$\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$
Řezná rychlost v_c	198	$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$
Posuv f_z	0,556	mm
Hloubka třísky a_p	1,2 mm	
Šířka frézování a_e	35 mm	



Tabulka č. 16 – Základní parametry, Hitachi ASRFM 4035R-3-M16 [12]

Rychloposuvová fréza Pramet 32E3 R04M16-SZD12-3		
VBD	ZDEW 120408	
Jakost VBD	M8325	
Počet břitů VBD	4	
Průměr frézy D_n	35	mm
Počet zubů z	3	
Otáčky n	1720	min^{-1}
Posuvová rychlost v_f	3000	$\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$
Řezná rychlost v_c	189	$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$
Posuv f_z	0,581	mm
Hloubka třísky a_p	1,2	mm
Šířka frézování a_e	35	mm



Tabulka č. 17 – Základní parametry, Pramet 32E3 R04M16-SZD12-3 [12]

Rychloposuvová fréza Walter F2330.T.28.032.Z03.01,5		
VBD	P26335 R15	
Jakost VBD	WSP 45S	
Počet břitů VBD	3	
Průměr frézy D_n	32	mm
Počet zubů z	3	
Otáčky n	1400	min^{-1}
Posuvová rychlost v_f	3000	$\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$
Řezná rychlost v_c	141	$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$
Posuv f_z	0,714	mm
Hloubka třísky a_p	1,2	mm
Šířka frézování a_e	32	mm



Tabulka č. 18 – Základní parametry, Walter F2330.T.28.032.Z03.01,5 [12]

3.4 Výsledky zkoušek

Hlavním parametrem, který nám pomůže určit, zda je nástroj více či méně produktivní, než ostatní nástroje, je strojní čas potřebný k obrobení všech zubových mezer zkušebního materiálu. Strojní čas se spočítá jako:

$$t_s = \frac{l \cdot n_1 \cdot z}{v_f \cdot 60} \quad [\text{hod}] \quad [14]$$

- kde:
- t_s ... strojní čas [hod]
 - l ... délka průchodu jedné drážky zubu kola [mm]
 - n_1 ... počet průchodů nástroje [-]
 - z ... počet zubů obráběného kola [-]
 - v_f ... posuvová rychlost [mm/min]

Délka průchodu jedné drážky a počet zubů obráběného kola jsou konstantní hodnoty kdy obráběné ozubené kolo má 144 zubů a délka jedné drážky $l = 1066$ mm. Posuvová rychlost je pro každý nástroj jiná a závisí na typu, konstrukci nástroje a VBD. Počet průchodů, které musí nástroj provést, aby obrobil jednu zubovou mezeru, závisí na maximální hloubce třísky kterou je nástroj schopen odebrat. A vzhledem k šířce zubové mezery a průměru nástroje musí každá fréza na jedné hloubce obrábět dvakrát, aby se zajistilo obrobení celé šířky zubové mezery. Pro názornost uvádím výpočet strojního času potřebného pro obrobení celého ozubeného kola nástrojem Ingersoll 5W7K052 R00.

$$t_s = \frac{l \cdot n_1 \cdot z}{v_f \cdot 60} = \frac{1066 \cdot 42 \cdot 144}{1200 \cdot 60} = 89,554 \text{ hod}$$

Počet průchodů nástroje lze jednoduše stanovit ze vzorce:

$$n_1 = \frac{h}{a_p} \cdot 2 = \frac{42}{2} \cdot 2 = 42 \quad [-]$$

kde: h ... hloubka frézování [mm]

Strojní časy dosahované jednotlivými nástroji uvádím v tabulce č. 20.

Skupina č. I – nástroje Ø50 – Ø52 mm	
Nástroj	Strojní čas [hod]
Ingersoll 5W7K052 R00	89,554
Ingersoll 5W7G052 R00	67,158
Pramet 50 A04R-SMO2D12	67,158
Pramet 50 A04R-SMO2D12-C	47,57
Walter F2330.B. 052.Z05.01,5	47,757
Skupina č. II - nástroje Ø32 – Ø35 mm	
Nástroj	Strojní čas [hod]
Hitachi AHRM-4035R-3-M16	53,3
Widia M100	91,371
Hitachi ASRFM 4035R-3-M16	35,533
Pramet 32E3 R04M16-SZD12-3	35,533
Walter F2330.T.28.032.Z03.01,5	35,533

Tabulka č. 19 – Strojní časy pro jednotlivé nástroje

Další parametry, které bychom mohli sledovat a srovnávat, jsou stupeň přesnosti, nebo jakost obrobené plochy. Vzhledem k tomu, že se jedná o hrubovací operace celkem nepodstatné a tak se jimi nebudeme blíže zabývat.

Dalším faktorem, který může ovlivnit rozhodování je opotřebení břitu. Ale již v průběhu zkoušek bylo jasné, že rychlost opotřebení břitu je na všech nástrojích prakticky shodná a že každý břit vydrží obrábět zhruba 5 zubových mezer. Poté je břit opotřebován natolik, že je zapotřebí vyměnitelnou břitovou destičku buď otočit v upínacím lůžku, pokud ještě má neopotřebované břity, nebo jí vyměnit za novou.

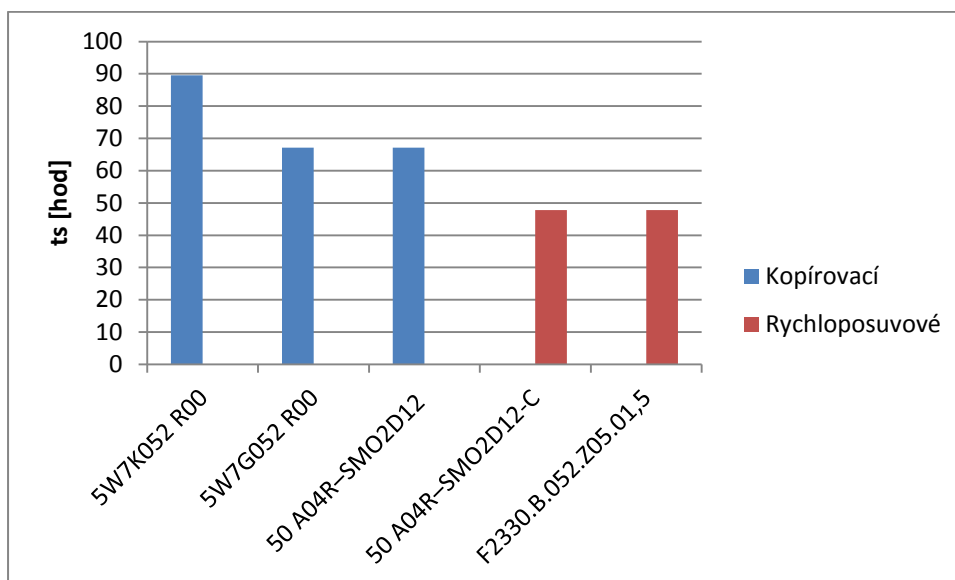
4 Technicko-ekonomické zhodnocení

Na základě parametrů získaných při praktických zkouškách můžeme provést vyhodnocení. Provedeme ho jak z hlediska výkonnostního, tak z pohledu ekonomického a určíme zda, případně do jaké míry jsou rychloposuvové frézy výhodnější než konvenční nástroje.

4.1 Vyhodnocení výkonu nástrojů

Hodnocení výkonu je provedeno porovnáním strojního času potřebného pro obrobení celého ozubeného kola u jednotlivých nástrojů.

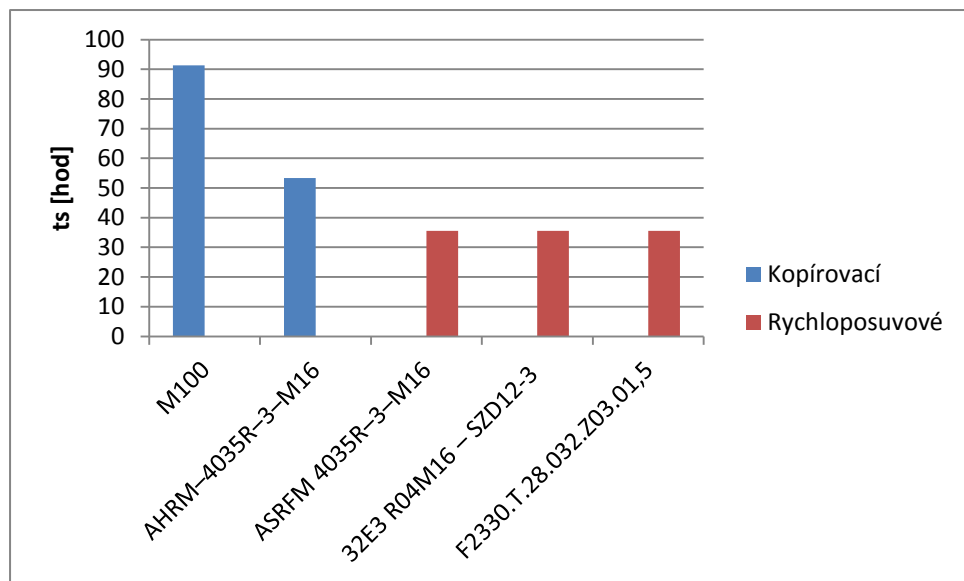
Skupina č. I – rychloposuvové nástroje $\varnothing 50$ – $\varnothing 52$



Graf č. 1 – srovnání strojního času, Skupina č. I

Ze srovnání strojního času opracování jednotlivými nástroji lze vidět, že rychloposuvové frézy jsou z hlediska časových nároků podstatně výhodnější. Obě rychloposuvové frézy mají ve výsledku stejný strojní čas. Je to způsobeno tím, že oba nástroje využívají maximální možný posuv stroje a shodná je také hloubka třísky. Můžeme tedy říci, že o nevhodnější fréze v první skupině nástrojů, rozhodne až následné ekonomické vyhodnocení.

Skupina č. II – rychloposuvové nástroje Ø32 – Ø35



Graf č. 2 – srovnání strojního času, Skupina č. II

Ve druhé skupině nástrojů můžeme taktéž pozorovat, že rychloposuvové nástroje mají strojní časy výrazně kratší než konvenční frézy. Nicméně kvůli omezujícím parametrům stroje nelze stanovit, který z rychloposuvových nástrojů je z hlediska strojního času výhodnější.

4.2 Vyhodnocení ekonomických nároků na jednotlivé nástroje

Vyšší výkon rychloposuvových fréz se promítne také do finančních požadavků. Pro vyčíslení nákladů je, za hodinu práce stoje (strojního času) stanovena sazba 1000 Kč. Je tedy zřejmé, že čím kratší čas budeme celé kolo obrábět, tím nižší budou konečné náklady. Pro první nástroj se cena práce za obrobení celého kola spočítá jako:

$$\text{Cena práce} = t_s \cdot 1000 = 89,554 \cdot 1000 = 89554 \text{ Kč}$$

V následující tabulce je uvedeno srovnání ceny práce u jednotlivých nástrojů:

Skupina č. I – nástroje Ø50 – Ø52 mm	
Nástroj	Cena práce [Kč]
Ingersoll 5W7K052 R00	89 554
Ingersoll 5W7G052 R00	67 158
Pramet 50 A04R-SMO2D12	67 158
Pramet 50 A04R-SMO2D12-C	47 757
Walter F2330.B. 052.Z05.01,5	47 757
Skupina č. II - nástroje Ø32 – Ø35 mm	
Nástroj	Cena práce [Kč]
Hitachi AHRM-4035R-3-M16	53 300
Widia M100	91 371
Hitachi ASRFM 4035R-3-M16	35 533
Pramet 32E3 R04M16-SZD12-3	35 533
Walter F2330.T.28.032.Z03.01,5	35 533

Tabulka č. 20 – Ceny práce

Jednotlivé nástroje se neliší pouze z hlediska výkonu obrábění, ale také jejich cena je různá. Porovnání cen jednotlivých nástrojů a VBD uvádím v tabulce č. 21.

Nástroj	Fréza [Kč]	VBD [Kč]	Počet břitů VBD	Cena za břit [Kč]
5W7K052 R00	3 913,00	161,70	4	40,43
5W7G052 R00	4 789,30	113,50	4	28,38
50 A04R-SMO2D12	6 716,00	101,80	4	25,45
50 A04R-SMO2D12-C	4 474,40	146,30	4	36,58
F2330.B.052.Z05.01,5	7 308,63	254,80	3	84,93
M100	2 752,00	321,00	4	80,25
AHRM-4035R-3-M16	6 396,30	294,30	2	147,15
ASRFM 4035R-3-M16	5 134,00	336,60	4	84,15
32E3 R04M16 – SZD12-3	4 825,60	146,30	4	36,58
F2330.T.28.032.Z03.01,5	5 523,37	254,80	3	84,93

Tabulka č. 21 – Ceny nástrojů a VBD

Z tabulky lze vyčíst, že ceny jednotlivých fréz se poměrně dost liší, ale vzhledem k tomu že jejich trvanlivost je dosti vysoká, nebude cena fréz tak důležitým rozhodovacím faktorem. Z hlediska dlouhodobé výroby je důležitější cena spotřebního materiálu, což je

v našem případě cena VBD. Některé z použitých VBD jsou až dvojnásobě dražší. Opotřebením všech použitých typů VBD je zhruba stejné a tak bude jejich spotřeba záviset na počtu, v jakém jsou upnuty v nástroji a na tom, kolik řezných hran jednotlivé břitové destičky obsahují. Spotřeba VBD na obrobení jednoho kola pro jednotlivé nástroje pak bude:

$$S_{VBD} = \left(\frac{z}{T_{břit}} \right) \cdot n_{VBD} [-]$$

- kde: S_{VBD} ... počet VBD potřebných k obrobení jednoho ozubeného kola [-]
 z ... počet zubů obráběného kola [-]
 $T_{břit}$... životnost jednoho břitu [zubů/břit]
 n_{VBD} ... počev VBD upnutých v nástroji [-]
 $n_{břit}$... počet břitů na jedné VBD [-]

Při výpočtu musíme vždy zaokrouhlovat čísla nahoru. Pro názornost si uvedeme výpočet spotřeby břitových destiček na nástroji Ingersoll 5W7K052 R00:

$$S_{VBD} = \left(\frac{z}{T_{břit}} \right) \cdot n_{VBD} = \left(\frac{144}{5} \right) \cdot 4 = 32$$

Vypočítanou spotřebu 32 břitových destiček vynásobíme cenou za jednu břitovou destičku a získáme tak ekonomický ukazatel, který stanoví, jaké nástroje jsou nejvýhodnější z hlediska finančních nároků na VBD.

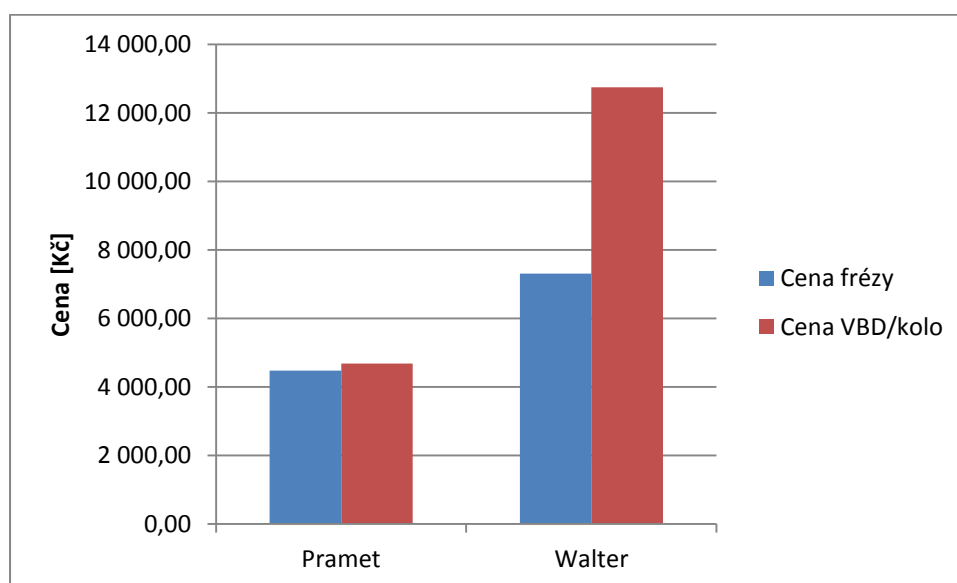
Nástroj	S_{VBD}	Cena VBD/kolo [Kč]
5W7K052 R00	32	5174,40
5W7G052 R00	48	5448,00
50 A04R-SMO2D12	32	3257,60
50 A04R-SMO2D12-C	32	4681,60
F2330.B.052.Z05.01,5	50	12740,00
M100	24	7704,00
AHRM-4035R-3-M16	45	13243,50
ASRFM 4035R-3-M16	24	8078,40
32E3 R04M16 – SZD12-3	24	3511,20
F2330.T.28.032.Z03.01,5	30	7644,00

Tabulka č. 22 – Náklady na VBD

Vzhledem k tomu, že strojní časy u rychloposuvových fréz byly podstatně kratší a jak můžeme vidět, jejich cena a náklady na břitové destičky jsou srovnatelné s dosud používanými kopírovacími nástroji, zaměříme se při rozhodování již pouze na varianty rychloposuvových fréz.

Skupina č. I – rychloposuvové nástroje Ø50 – Ø52 mm

Ve skupině č. I máme dvě rychloposuvové frézy. Srovnání jejich cen je uvedeno v grafu č. 1.



Graf č. 3 – Ceny fréz a VBD rychloposuvových nástrojů, Skupina č. I

Z grafu vyplývá, že u rychloposuvových fréz v první skupině nástrojů vychází z ekonomického hlediska lépe nástroj firmy Pramet, konkrétně 50 A04R-SMO2D12-C. Jeho cena je v porovnání s nástrojem firmy Walter nižší a hlavně pak náklady na břitové destičky jsou značně menší.

Náklady na obrobení celého ozubeného kola můžeme nakonec vyjádřit jako součet ceny práce a ceny VBD. Pořizovací cenu nástrojů při tomto výpočtu zanedbáme, neboť nástroje mají vysokou trvanlivost a jejich cena tak nehraje velkou roli. Např. pro nástroj Pramet 50 A04R-SMO2D12-C to tedy bude:

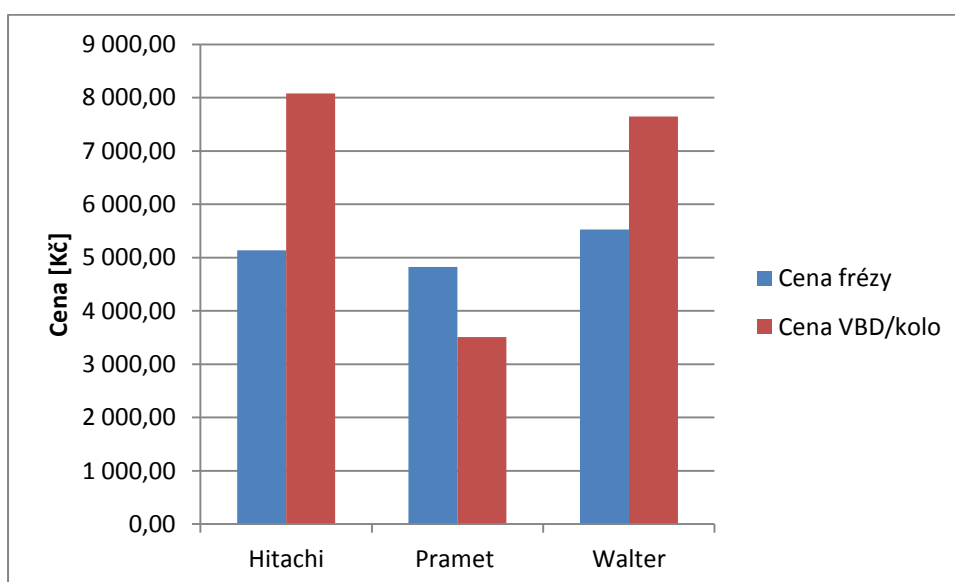
$$\text{Celkové náklady} = \text{cena práce} + \text{cena VBD/kolo} = 47757 + 4681,6 = 52438 \text{ Kč}$$

Nástroj	Celkové náklady [Kč]
Pramet 50 A04R-SMO2D12-C	52 438
Walter F2330.B. 052.Z05.01,5	60 497

Tabulka č. 24 – Celkové náklady, Skupina č. I

Skupina č. II – rychloposuvové nástroje Ø32 – Ø35 mm

Ve skupině č. II máme tři rychloposuvové frézy, srovnání jejich ekonomických ukazatelů je znázorněno v grafu č. 2.



Graf č. 4 – Ceny fréz a VBD rychloposuvových nástrojů, Skupina č. II

Z grafu č. 2 je patrné, že i ve druhé skupině nástrojů vychází z ekonomického hlediska nejlépe nástroj firmy Pramet, tedy rychloposuvová fréza 32E3 R04M16 – SZD12-3, jejíž náklady na břitové destičky jsou proti ostatním nástrojům zhruba poloviční.

Srovnání celkových nákladů na obrobení všech zubových mezer je uvedeno v tabulce č. 24.

Nástroj	Celkové náklady [Kč]
Hitachi ASRFM 4035R-3-M16	43 611
Pramet 32E3 R04M16-SZD12-3	39 044
Walter F2330.T.28.032.Z03.01,5	43 177

Tabulka č. 23 – Celkové náklady, Skupina č. II

4.3 Návrh nástroje a jeho srovnání

Jelikož stanovený stroj disponuje nízkými hodnotami otáček vřetene a posuvů, nebylo možné naplno využít možnosti zkoušených rychloposuvových nástrojů. Konečný výběr optimální varianty nástroje se proto odvíjí od finančních požadavků na tyto nástroje.

Ve skupině č. I se ukázal jako finančně výhodnější nástroj Pramet 50 A04R-SMO2D12-C, který vykazuje jednak nižší spotřebu, ale také cenu břitových destiček. U skupiny č. II je potom nejvhodnější variantou nástroj Pramet 32E3 R04M16-SZD12-3, který se taktéž vyznačuje nízkou spotřebou i cenou VBD.

Při srovnání vybraných nástrojů a nástrojů dosud používaných jsem zjistil, že v případě použití rychloposuvových nástrojů získáme podstatnou finanční úsporu, jak je uvedeno v tabulce č. 25:

	Náklady [Kč]	
	Původní nástroje	Vybrané rychloposuvové nástroje
Strojní čas	120 458	83 290
Nástroje	9 468	9 300
VBD	10 961	8 193
Celkové náklady	140 887	100 783

Tabulka č. 24 – Srovnání vybraných nástrojů

5 Závěr

Záměrem práce bylo zefektivnění výrovy velkých ozubených kol na horizontální vyvrtávače WT200H-CNC ve firmě Vítkovice Heavy Machinery. Vycházelo se ze současného strojního parku, v úvahu proto přicházela především změna technologie obrábění.

Zaměřil jsem se na pokrokové metody frézování, které mají potenciál ke zvýšení produktivity práce. Vzhledem k parametrům používaného strojního parku jsme museli většinu metod vyloučit. Nejvhodnější progresivní technologií frézování se pak jevila metoda využívající vysoké posuvy (HFM). Při praktických zkouškách se ukázalo, že nástroje využívající vysoké posuvy mohou celý proces opravdu výrazně urychlit a tím docílit požadovaného snížení výrobních nákladů.

Pro vyhrubování zubové mezery jsme potřebovali dva nástroje, proto jsme frézy rozdělili do dvou skupin podle jejich velikosti a cílem bylo vybrat dva nástroje, které nejlépe vyhoví naším požadavkům. Jelikož kvůli omezujícím parametrům stroje nebylo možno naplno využít možnosti těchto nástrojů, tak v konečném výsledku rozhodovaly ekonomické požadavky těchto nástrojů.

V první skupině nástrojů nakonec nejlépe obstál nástroj firmy Pramet, rychloposuvová fréza 50 A04R-SMO2D12-C. Nástroj hruboval zubovou mezeru do hloubky 42 mm. Rychloposuvovou technologií frézování se podařilo snížit strojní čas potřebný k obrobení celého ozubeného kola o bezmála 20 hodin což je zhruba 30% snížení strojního času oproti stávající technologii. Finanční úspora je tedy v tomto případě 20 000 Kč.

Ve druhé skupině jsme nakonec také vybrali nástroj firmy Pramet, konkrétně rychloposuvovou frézu 32E3 R04M16-SZD12-3, která obráběla zubovou mezeru do hloubky 25 mm a při tom nejlépe splnila všechny ekonomické požadavky. U tohoto nástroje byl strojní čas zkrácen o takřka 18 hodin, to znamená přibližně 34% pokles a finanční úsporu 18 000 Kč.

Při použití doporučených nástrojů se sníží celkové režijní náklady a náklady na pořízení nástrojů pro hrubování jednoho ozubeného kola o přibližně 40 000 Kč a výroba se zproduktivní o 38 hodin.

Další zkrácení výrobního času není v současné době možné, bez zvýšení limitních posuvů a otáček stroje. Zvýšení otáček by bylo možno dosáhnout použitím zrychlovací

hlavy s větším převodovým poměrem, avšak zvýšení maximálního posuvu stroje by vyžadovalo poměrně velkou investici.

6 Použitá literatura

- [1] BRYCHTA, J.; ČEP, R.; SADÍLEK, M.; PETŘKOVSKÁ, L.; NOVÁKOVÁ, J. *Nové směry v progresivním obrábění*. Ostrava : Ediční středisko VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2007. Dostupné z: <http://www.elearn.vsb.cz/archivcd/FS/NSPO>. ISBN 978-80-248-1505-3.
- [2] MÁDL, J.; KAFKA, J.; VRABEC, M.; DVOŘÁK, R. *Technologie obrábění 3. díl*. Praha : Vydavatelství ČVUT 2000. 3. sv. 79 s. ISBN 80-01-02091-6.
- [3] BRYCHTA, J.; ČEP, R.; NOVÁKOVÁ, J.; PETŘKOVSKÁ, L. *Technologie II – 1. díl*. Ostrava : VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2008. ISBN 978-80-248-1822-1.
- [4] BRYCHTA, J.; ČEP, R.; NOVÁKOVÁ, J.; PETŘKOVSKÁ, L. *Technologie II – 2. díl*. Ostrava : VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2008. ISBN 978-80-248-1822-1.
- [5] MRKVICA, I. *Současné trendy v obrábění ozubených kol*. Ostrava : VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2011. ISBN 978-80-248-2724-7.
- [6] Tumlikovo: *Výroba ozubení odvalováním* [online]. Listopad 2010 [vid. 10. dubna 2015]: Dostupné z: <http://www.tumlikovo.cz/vyroba-ozubeni-odvalovaci-frezou/#more-2101>
- [7] Technickýportál.cz: *Snižování výrobních nákladů bez velkých investic* [online]. Zář 2014 [vid. 10. dubna 2015]: Dostupné z: http://www.technickytydenik.cz/rubriky/serialy/snizovani-vyrobnich-nakladu/snizovani-vyrobnich-nakladu-bez-velkych-investic-10_27174.html
- [8] BRYCHTA, Josef, Marek SADÍLEK, Robert ČEP a Jana PETRŮ. *Progresivní metody v obrábění: studijní opora*. Vyd. 1. Ostrava: VŠB-TUO, Fakulta strojní, katedra obrábění a montáže, 2011, 146 s. ISBN 978-80-248-2513-7.
- [9] MM Průmyslové spektrum: *Frézování vysokými posuvy* [online]. Praha: MM publishing, s.r.o., květen 2012 [vid. 3. dubna 2015]: dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/frezovani-vysokymi-posuvy-5035.html>
- [10] SECO TOOLS s.r.o.; *High Feed Milling* [online]. 2012. [vid. 3. května 2015]: Dostupné z:

https://www.secotools.com/CorpWeb/Products/Milling/Highfeedmilling/gb_hfm_brochure_lr.pdf

[11] MM Průmyslové spektrum: *Příručka pro technology: Jak dosáhnout vysoké produktivity při frézování?* [online]. Praha: MM publishing, s.r.o., září 2013 [vid. 3. dubna 2015]: dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/prirucka-pro-technology-jak-dosahnout-vysoke-produktivity-pri-frezovani.html>

[12] Interní dokumentace společnosti Vítkovice Heavy Machinery a.s.

[13] European Steel and Alloy Grades/Numbers: *G34CrMo4* [online]. [vid. 10. dubna 2015]: dostupné z: http://www.steelnumber.com/en/steel_composition_eu.php?name_id=409

[14] HUMÁR , A. *Technologie I výpočtová cvičení*. Brno: VÚT, 2003. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI_vypoctova_cv.pdf

[15] KOČMAN, K. *Speciální technologie obrábění*. Brno: VÚT, 2004. 127 s. ISBN 80-214-2562-8.

Poděkování

Rád bych tímto poděkoval své rodině a přítelkyni za projevenou podporu při zpracovávání bakalářské práce. A také vedoucímu mé bakalářské práce panu Ing. Antonínu Trefilovi za cenné připomínky, rady a odborné vedení.