



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV VÝROBNÍCH STROJŮ, SYSTÉMŮ A ROBOTIKY

INSTITUTE OF PRODUCTION MACHINES, SYSTEMS AND ROBOTICS

KONSTRUKCE ZRYCHLOVACÍ FRÉZOVACÍ HLAVY

DESIGN OF SPINDLESPEEDER

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Otakar Závada

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jiří Tůma, Ph.D.

BRNO 2020

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky
Student:	Otakar Závada
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Stavba strojů a zařízení
Vedoucí práce:	Ing. Jiří Tůma, Ph.D.
Akademický rok:	2019/20

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Konstrukce zrychlovací frézovací hlavy

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Se stále se zlepšujícími s vlastnostmi řezných nástrojů nastává situace, kdy konvenční stroje již nevyhovují z hlediska otáček vřetene. Dále z hlediska opotřebení ložisek vřetene se jeví neekonomické při použití nástroje s malým průměrem využívat maximálních otáček stroje. Z toho důvodu se využívají zrychlovací hlavy, které vkládají převod mezi vřeteno a nástroj. Cílem této práce je návrh zrychlovací hlavy na základě rešerše a konstrukčních výpočtů.

Cíle bakalářské práce:

Rešerše v oblasti zrychlovacích frézovacích hlav.
Nutné konstrukční výpočty pro vlastní návrh.
Konstrukční návrh zrychlovací frézovací hlavy dle zadaných parametrů.
Výkresová dokumentace vybraných dílů a sestavy.
Závěr a doporučení pro praxi.

Seznam doporučené literatury:

MAREK, Jiří. Konstrukce CNC obráběcích strojů. Vyd. 2., přeprac. a rozš. Praha: MM Publishing, 2010. MM speciál. ISBN 978-80-254-7980-3.

Narex MTE: ...Expert in boring [online], 2018 [cit. 2018-09-27]. Dostupné z: <http://www.narexmte.cz>

RBH Tools [online], 2018 [cit. 2018-09-27]. Dostupné z: <https://www.rbh-tools.com/>

Rigibore [online], 2018 [cit. 2018-09-27]. Dostupné z: <https://www.rigibore.com/>

Ingersoll: Cutting tools [online], 2018 [cit. 2018-09-27]. Dostupné z: www.ingersoll-imc.com

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2019/20

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Bakalářská práce se zabývá koncepčním návrhem zrychlovací frézovací hlavy na základě zvolených řezných podmínek. Rešeršní část práce popisuje jednotlivé typy zrychlovacích frézovacích hlav podle jejich pohonů. V další části jsou zdokumentovány řezné podmínky, které byly zvoleny na základě zkušeností. Jedná se o úkony, které zrychlovací frézovací hlavy čelí v praxi nejčastěji. Hodnoty řezných podmínek, udály výstupní parametry pro planetovou převodovku, na kterou je zaměřeno v následující části. Veškeré znalosti, jsou využity v samotném koncepčním návrhu. Výkresová dokumentace obsahuje výkres sestavy a výkresy vybraných dílců. Veškerá výkresová dokumentace je založena na modelu vytvořeném v 3D CAD programu.

KLÍČOVÁ SLOVA

Zrychlovací frézovací hlava, řezné podmínky, planetová převodovka, ložisko, vřeteno

ABSTRACT

This bachelor thesis deals with conceptual design of high speed spindle based on cutting conditions. Research part of thesis describe each types of high speed spindle based of their drive. Next chapter are documented cutting conditions which are corresponded with experience. High speed spindle faced these act most of the time. Cutting conditions show output conditions of planetary gearbox which is described in next part of thesis. All the experience are used in conceptual design. The drawings contains of assambly drawing and drawing of selected components. The drawings are based on model made in 3D CAD system.

KEYWORDS

High speed spindle, cutting conditions, planetary gearbox, bearing, spindle

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ZÁVADA, Otakar. *Konstrukce zrychlovací frézovací hlavy*. Brno, 2020. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/125047>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky. Vedoucí práce Jiří Tůma.

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval svému vedoucímu bakalářské práce, za odbornou pomoc, cenné rady a připomínky. Dále bych chtěl poděkovat své rodině za podporu během celého studia.

ČESTNÉ PROHLÁŠ ENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, vypracoval jsem si samostatně pod vedením Ing. Jiří Tůma, Ph.D. a s využitím literatury a informačních zdrojů uvedených v seznamu citací.

V Brně dne

.....

Závada Otakar

OBSAH

1	ÚVOD	12
2	ZRYCHLOVACÍ FRÉZOVACÍ HLAVA	13
2.1	Zrychlovací frézovací hlava s mechanickým převodem.....	13
2.2	Zrychlovací frézovací hlava s tekutinovým pohonem	14
2.3	Zrychlovací frézovací hlavy s elektromotorem	16
3	ŘEZNÉ PODMÍNKY.....	17
3.1	Čelní frézování.....	17
3.1.1	Výpočet řezných sil pro čelní frézu f_1	18
3.1.2	Výpočet řezných sil pro čelní frézu f_2	21
3.2	Vrtání	24
3.2.1	Výpočet řezných sil pro vrták v_3	25
3.2.2	Výpočet řezných sil pro vrták v_4	28
4	PLANETOVÁ PŘEVODOVKA	31
4.1	Výpočet planetové převodovky	31
5	REAKCE NA HŘÍDELI.....	35
5.1	Podmínky statické rovnováhy	36
5.2	Výsledné hodnoty reakčních sil v podporách	36
5.3	Životnost ložisek na výstupní hřídeli.....	37
6	VÝSLEDNÉ VNITŘNÍ ÚČINKY.....	39
6.2	Bezpečnost v místě I. vůči meznímu stavu pružnosti	41
7	KONSTRUKČNÍ NÁVRH	44
8	ZÁVĚR.....	48
9	CITOVANÁ LITERATURA	49
	SEZNAM ZKRATEK.....	51
	SEZNAM TABULEK.....	55
	SEZNAM OBRÁZKŮ.....	56
	SEZNAM PŘÍLOH	57

1 ÚVOD

S nástupem vysokorychlostního obrábění, kde zásadní změnu přinesly používané materiály rezných nástrojů, došlo ke stavu, kdy velká obráběcí centra nedosahují dostatečných otáček vřetene při použití nástrojů malých průměrů. Vysoké otáčky, které jsou běžné pro konvenční obrábění malými průměry, nejsou hospodárné a vysoce zatěžují drahá a špatně vyměnitelná ložiska hlavního uložení vřetene. Z toho důvodu se využívají zrychlovací frézovací hlavy, které jsou mezičlenem obráběcího centra a použitého nástroje malých průměrů. Zrychlovací frézovací hlavy se používají v mnoha oborech či aplikacích, a to v závislosti na použitém převodním mechanismu.

Cílem této bakalářské práce je sestavit koncepční návrh zrychlovací frézovací hlavy na základě mnoha faktorů. Jedním z úvodních kroků k započetí této bakalářské práce bude provedení rešerše nabídky frézovacích hlav. Díky této rešerši bude možné vytvořit přehled možných typů zrychlovacích frézovacích hlav, které jsou v současné době na trhu a často se ve strojírenství používají. Na základě provedené rešerše dojde také k poskytnutí možných východisek principů vytvoření zrychlovací frézovací hlavy, jež je předmětem této bakalářské práce. V následujících krocích bude provedeno několik výpočtů směřujících k vlastnímu návrhu. Bude proveden výpočet rezných sil poskytující představu o silovém působení na zvolené nástroje v aplikaci konvenčního třískového obrábění. Výběr nástrojů pro výpočet rezných podmínek, je výsledkem dlouholetých zkušeností vedoucího práce a tyto nástroje zastupují širokou škálu používaných nástrojů při aplikaci zrychlovacích frézovacích hlav. Výpočet rezných sil stanovuje nejefektivnější pracovní podmínky třískového obrábění, a proto bude navrhnout mechanismus schopný bezpečně, spolehlivě a dlouhodobě převádět kroutící moment ze stroje přímo k břitům nástroje. V neposlední řadě budou uvedeny výpočty bezpečnosti výstupní hřídele a životnosti jejích ložisek sloužící k ověření vhodnosti použití dané zrychlovací frézovací hlavy pro stanovené počáteční podmínky předmětu bakalářské práce.

2 ZRYCHLOVACÍ FRÉZOVACÍ HLAVA

Zrychlovací frérovací hlavy jsou především využívány pro konvenční obrábění u strojů, které nejsou schopny dosáhnout ideálních pracovních otáček k maximálnímu využití potenciálu nástroje. Například u horizontálních vyvrtávaček, kde se maximální otáčky pohybují do 5000 min⁻¹ je zapotřebí při použití nástrojů malých průměrů připojit zrychlovací frérovací hlavu s dostatečným převodovým poměrem k dosažení maximálních řezných podmínek. Omezení tvoří samotná konstrukce vřetene, kde se využívají velká ložiska. Při vysokých otáčkách dochází k nadměrnému zahřívání vlivem vyššího odstředivého zatížení daného jednotlivými valivými elementy ložiska. Mohlo by se nabízet zmenšení elementů ložisek, ale tím by se ovlivnila celková tuhost, která je prioritní pro uložení vřetene, jelikož má přímý vliv na celkovou přesnost konvenčního obrábění. Připojením vhodné zrychlovací frérovací hlavy dosáhneme větší variability stroje, lze využít větší spektrum nástrojů a více pracovních operací na jednom stroji. To nám zásadně může zvýšit využitelnost stroje a zároveň snížit konečnou cenu výrobku.

2.1 Zrychlovací frérovací hlava s mechanickým převodem

Jedná se v podstatě o planetovou převodovku s převodem do rychla s využitím statického korunového kola (Obr. 1). Zákazníci využívají různé způsoby připojení nástrojů k vřetenu a samotnému přenosu kroutícího momentu na nástroj. K tomu slouží různé typy upínacích stopek (12) jako např. ISO 40 DIN 2080, ISO 50 DIN 2080, ISO 40 DIN 69871, ISO 50 DIN 69871, CAT 40, CAT 50, BT 40, BT 50, ISO 40 ČSN 220432, MK4, MK5, MK6. K možnosti využití statického korunového kola slouží především aretační čep (5), který aretuje vnější pouzdro (1), ve kterém je upevněno samotné korunové kolo planetové převodovky. Nástroje jsou upevněny do kleštiny (7), která zajišťuje dostatečně velké upínací síly ke konvenčnímu obrábění daných materiálů. Chlazení břitových destiček nebo nástrojů jako takových je možné dvěma způsoby, a to pomocí chlazení středem vřetene nebo vnějším oplachem. Někteří výrobci díky své konstrukci využívají chlazení středem vřetene až na samotný břit, kdy je potřeba využít speciálních nástrojů s touto funkcí.

Tab 1) Narex ZP/10X

Převodový poměr	1:6
Maximální otáčky	20 000 ot/min
Typ kleštiny	ER



Obr. 1) Narex-ZP/10X [1]

Tab 2) BENZ

Převodový poměr	1:5
Maximální otáčky	40 000 ot/min
Typ kleštiny	ER



Obr. 2) BENZ [2]

Tab 3) BIG KAISER-BVD40/50

Převodový poměr	1:6
Maximální otáčky	6 000 ot/min
Typ kleštiny	ER



Obr. 3) BIG KAISER-BDV40/50 [3]

2.2 Zrychlovací frézovací hlava s tekutinovým pohonem

Samotný pohon tvoří stlačený vzduch nebo vysokotlaká kapalina, která proudí turbínou. Pracovních otáček ve výši až 150 000 ot/min je docíleno díky uložení turbíny v aerostatických ložiscích, u kterých nedochází k nadměrnému zahřívání ani při vysokých otáčkách. U zrychlovacích frézovacích hlav s tekutinovým pohonem, které pracují kolem rychlosti 90 000 ot/min, je využito keramických ložisek chlazených protékajícím médiem. Pokud využíváme zrychlovací frézovací hlavu poháněnou stlačeným vzduchem, je potřeba externího zdroje stlačeného vzduchu na pohon nástroje. Zrychlovací frézovací hlava poháněná stlačeným vzduchem tvoří problém při automatické výměně nástrojů, jelikož stlačený vzduch nelze soustředit do kanálu středového chlazení a je potřeba externích připojovacích kanálů. Vždy se jedná minimálně o dva kanály. Prvním kanálem vzduch přivádíme a druhým kanálem je stlačený vzduch odebrán z nástroje. V situaci, kdy je využito vysokotlaké kapaliny, lze využít tlakového aparátu sloužícího v jiných případech k chlazení středem vřetene a následnému přivedení chladicí emulze na břit nástroje. V obou případech je hlavní uložení vřetene stroje v klidovém stavu a nedochází k jeho opotřebení.

Tab 4) ATS -602 series Spindles

Přívodní medium	Stlačený vzduch
Maximální otáčky	90 000 ot/min
Typ kleštiny	ER



Obr. 4) ATS-602 serie Spindles [4]

Tab 5) BIG KAISER – RBX12

Přívodní medium	Stlačený vzduch
Maximální otáčky	120 000 ot/min
Typ kleštiny	ER



Obr. 5) BIG KAISER-RBX12 [5]

Tab 6) NSK NAKANISHI – Xspeed1600

Přívodní medium	Stlačený vzduch
Maximální otáčky	160 000 ot/min
Typ kleštiny	ER



Obr. 6) NSK NAKANISHI-Xspeed1600 [6]

2.3 Zrychlovací frézovací hlavy s elektromotorem

V tomto případě se jedná o zrychlovací frézovací hlavy, které ve své konstrukci mají zabudovaný elektromotor. Aparát je osazen přímo do hlavy s vlastní řídicí jednotkou. Napájení je zajištěno z externího zdroje napětí. Jednotlivé varianty zrychlovacích frézovacích hlav s elektromotorem jsou připojeny ke stroji do statického vřetene nebo speciálními přípravky. Připojení ke stroji výrobci přizpůsobují přáním zákazníků a lze se setkat s připojením pomocí BT, HSK, DIN 69781. Lze zde najít jistou analogii se zrychlovací frézovací hlavou s tekutinovým pohonem. Při automatické výměně nástrojů je potřeba zajistit správné připojení konektoru a samotnou bezpečnost přívodního kabelu proti poškození způsobeného manipulací a odletujícím materiálem z obrábění.

Tab 7) RICO CNC-VFD

Pohon	Elektromotor
Maximální otáčky	20 000 ot/min
Typ kleštiny	ER



Obr. 7) RICO CNC-VFD [7]

Tab 8) NSK-NAKANISHI-HES810

Pohon	Elektromotor
Maximální otáčky	80 000 ot/min
Typ kleštiny	ER



Obr. 8) NSK-NAKANISHI-HES810 [8]

Tab 9) Parafiate-MZ01

Pohon	Elektromotor
Maximální otáčky	60 000 ot/min
Typ kleštiny	ER



Obr. 9) Parafiate-MZ01 [9]

3 ŘEZNÉ PODMÍNKY

Pro návrh zrychlovací frézovací hlavy je potřeba v první řadě určit podmínky, pro které chceme dimenzovat danou hlavu. Jedná se nám o otáčky, kterými musí hlava disponovat pro maximální využití nástroje při zvolených podmínkách. Je třeba určit reakční síly vyvozené obráběním na správnou volbu ložisek. Tyto parametry jsou určující pro další postup.

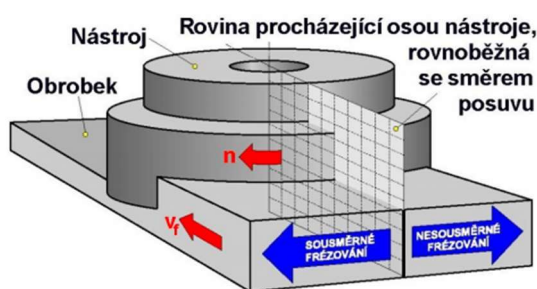
Zrychlovací frézovací hlavy se využívají pro obrábění velké škály druhů materiálů. V tomto případě budeme volit nástroje pro obrábění kovových materiálů. Jednotlivé typy nástrojů jsou zvoleny na základě konzultace s vedoucím práce a jsou voleny tak, aby pokryly největší spektrum požadavků zákazníků.

Tab 10) Zvolené nástroje pro třískové obrábění

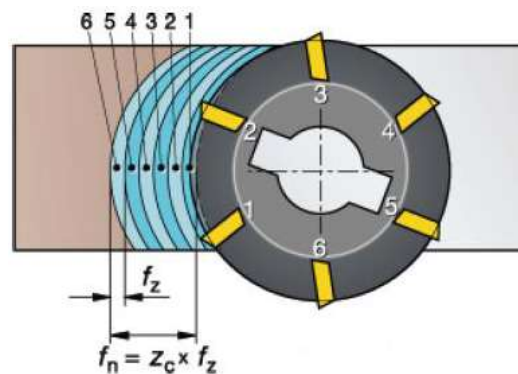
Typ nástroje	Nástroj	Katalogové označení	Výrobce
Čelní fréza	f_1	ECCS100E11-3W10-72	ISCAR
Čelní fréza	f_2	ECS030E04-3W06-57	ISCAR
Vrták	v_3	SCD 100-035-100 AP3N	ISCAR
Vrták	v_4	SCD 030-014-060 AP3N	ISCAR

3.1 Čelní frézování

Čelní frézování se řadí mezi nejčastější pracovní operace konvenčního obrábění. Odběr třísek zajišťuje rotující nástroj. Nastávají tři stavy způsobu obrábění. Při prvním stavu je obrobek statický a v pohybu je pouze nástroj. Při druhém stavu rotuje pouze nástroj a posuv je zajištěn pohybem obrobku. V rámci třetího stavu u víceosých center může docházet ke vzájemnému pohybu nástroje a obrobku k dosažení potřebného záběru nástroje.



Obr. 10) Čelní frézování [10]



Obr. 11) Proces frézování [11]

3.1.1 Výpočet řezných sil pro čelní frézu f₁

Tab 11) Parametry čelní frézy f₁

Parametry	Symbol	Jednotka	Hodnota
Průměr nástroje	D ₁	[m]	0,01
Počet zubů nástroje	z ₁	[-]	3
Řezná rychlost	v _{c1}	[m/min]	180
Posuv na zub	f _{z1}	[mm/ot.]	0,09
Hloubka záběru	a _{p1}	[mm]	1
Šířka záběru	a _{e1}	[mm]	5
Úhel nastavení hlavního ostří	k _{f1}	[°]	90
Úhel posuvového pohybu	φ ₁	[°]	90
Obráběný materiál	P1.4.Z.AN	Automatová ocel	
Měrná řezná síla [12]	k _c	[N/mm ²]	1180
Korekční exponent [12]	m _c	[-]	0,25

Otáčky nástroje [10]

$$n_{-1} = \frac{v_{-c1}}{D_{-1} \cdot \pi} \quad [\text{min}^{-1}] \quad (1)$$

$$n_{-1} = \frac{180}{0,01 \times \pi}$$

$$n_{-1} = 5729,6 \text{ min}^{-1}$$

Posuvová rychlost [10]

$$v_{-f1} = n_{-1} \cdot z_{-1} \cdot f_{-z1} \quad [\text{mm/min}] \quad (2)$$

$$v_{-f1} = 5729,6 \cdot 3 \cdot 0,09$$

$$v_{-f1} = 1547 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$$

Jmenovitý průměr třísky [10]

$$A_{-d1} = f_{-z1} \cdot a_{-p1} \cdot \sin \varphi \quad [\text{mm}^2] \quad (3)$$

$$A_{-d1} = 0,09 \cdot 1 \cdot \sin(90)$$

$$A_{-d1} = 0,09 \text{ mm}^2$$

Úhlová rozteč zubů [10]

$$\varphi_{z1} = \frac{360}{z_1} \quad [^\circ] \quad (4)$$

$$\varphi_{z1} = \frac{360}{3}$$

$$\varphi_{z1} = 120^\circ$$

Úhel záběru [10]

$$\Psi_1 = 2 \cdot \sin^{-1} \left(\frac{a_{e1}}{D_1} \right) \quad [^\circ] \quad (5)$$

$$\Psi_1 = 2 \cdot \sin^{-1} \left(\frac{5}{10} \right)$$

$$\Psi_1 = 60^\circ$$

Počet zubů v záběru [10]

$$n_{z1} = \frac{\Psi_1}{\varphi_{z1}} \quad [-] \quad (6)$$

$$n_{z1} = \frac{60}{120}$$

$$n_{z1} = 0,5 \rightarrow 1$$

Průměr tloušťky třísky [10]

$$h_{m1} = \frac{360 \cdot f_{z1} \cdot a_{e1}}{\pi \cdot D_1 \cdot \Psi_1} \cdot \sin(k_{f1}) \quad [\text{mm}] \quad (7)$$

$$h_{m1} = \frac{360 \cdot 0,09 \cdot 5}{\pi \cdot 10 \cdot 60} \cdot \sin(90)$$

$$h_{m1} = 0,086 \text{ mm}$$

Měrná řezná síla [10]

$$k_{cf1} = k_c \cdot h_m^{1-m-c} \quad [\text{MPa}] \quad (8)$$

$$k_{cf1} = 1180 \cdot 0,086^{-0,25}$$

$$k_{cf1} = 2179 \text{ MPa}$$

Celková řezná síla [10]

$$F_{c1} = \sum_{i=1}^n F_{ci} = k_{cf1} \cdot A_{d1} \cdot \sin^{1-m-c}(\varphi) \quad [\text{N}] \quad (9)$$

$$F_{c1} = 2179 \cdot 0,09 \cdot \sin^{1-0,25}(\varphi) \quad (60)$$

$$F_{c1} = 176,1 \text{ N}$$

Řezný krouticí moment

$$M_{cf1} = F_{c1} \cdot \frac{D-1}{2} \quad [\text{Nm}] \quad (10)$$

$$M_{cf1} = 176,1 \cdot \frac{0,01}{2}$$

$$M_{cf1} = 0,88 \text{ Nm}$$

3.1.2 Výpočet řezných sil pro čelní frézu f₂

Tab 12) Parametry čelní frézy f₂

Parametry	Symbol	Jednotka	Hodnota
Průměr nástroje	D ₂	[m]	0,003
Počet zubů nástroje	z ₂	[-]	3
Řezná rychlost	v _{c2}	[m/min]	180
Posuv na zub	f _{z2}	[mm/ot.]	0,04
Hloubka záběru	a _{p2}	[mm]	1
Šířka záběru	a _{e2}	[mm]	1,5
Úhel nastavení hlavního ostří	k _{f2}	[°]	90
Úhel posuvového pohybu	φ ₂	[°]	90
Obráběný materiál	P1.4.Z.AN	Automatová ocel	
Měrná řezná síla [12]	k _c	[N/mm ²]	1180
Korekční exponent [12]	m _c	[-]	0,25

Otáčky nástroje [10]

$$n_{2} = \frac{v_{c2}}{D_{2} \cdot \pi} \quad [\text{min}^{-1}] \quad (11)$$

$$n_{2} = \frac{180}{0,003 \times \pi}$$

$$n_{2} = 19098 \text{ min}^{-1}$$

Posuvová rychlost [10]

$$v_{f2} = n_{2} \cdot z_{2} \cdot f_{z2} \quad [\text{mm/min}] \quad (12)$$

$$v_{f2} = 19098 \cdot 3 \cdot 0.04$$

$$v_{f2} = 2291,8 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$$

Jmenovitý průměr třísky [10]

$$A_{d2} = f_{z2} \cdot a_{p2} \cdot \sin \varphi \quad [\text{mm}^2] \quad (13)$$

$$A_{d2} = 0,04 \cdot 1 \cdot \sin(90)$$

$$A_{d2} = 0,04 \text{ mm}^2$$

Úhlová rozteč zubů [10]

$$\varphi_{z2} = \frac{360}{z_2} \quad [^\circ] \quad (14)$$

$$\varphi_{z2} = \frac{360}{3}$$

$$\varphi_{z2} = 120^\circ$$

Úhel záběru [10]

$$\Psi_2 = 2 \cdot \sin^{-1}\left(\frac{a_{e2}}{D_2}\right) \quad [^\circ] \quad (15)$$

$$\Psi_2 = 2 \cdot \sin^{-1}\left(\frac{1,5}{3}\right)$$

$$\Psi_2 = 60^\circ$$

Počet zubů v záběru [10]

$$n_{z2} = \frac{\Psi}{\varphi_{z2}} \quad [-] \quad (16)$$

$$n_{z2} = \frac{60}{120}$$

$$n_{z2} = 0,5 \rightarrow 1$$

Průměr tloušťky třísky [10]

$$h_{m2} = \frac{360 \cdot f_{z2} \cdot a_{e2}}{\pi \cdot D_2 \cdot \Psi_2} \cdot \sin(k_{f2}) \quad [\text{mm}] \quad (17)$$

$$h_{m1} = \frac{360 \cdot 0,04 \cdot 1,5}{\pi \cdot 3 \cdot 60} \cdot \sin(90)$$

$$h_{m1} = 0,038 \text{ mm}$$

Měrná řezná síla [10]

$$k_{cf2} = k_c \cdot h_{m2}^{-m-c} \quad [\text{MPa}] \quad (18)$$

$$k_{cf2} = 1180 \cdot 0,038^{-0,25}$$

$$k_{cf2} = 2669 \text{ MPa}$$

Celková řezná síla [10]

$$F_{c2} = \sum_{i=1}^n F_{ci} = k_{cf2} \cdot A_{d2} \cdot \sin^{1-m-c}(\varphi) \quad [\text{N}] \quad (19)$$

$$F_{c2} = 2669 \cdot 0,04 \cdot \sin^{1-0,25}(\varphi) \quad (60)$$

$$F_{c2} = 95,8 \text{ N}$$

Řezný kroutící moment [10]

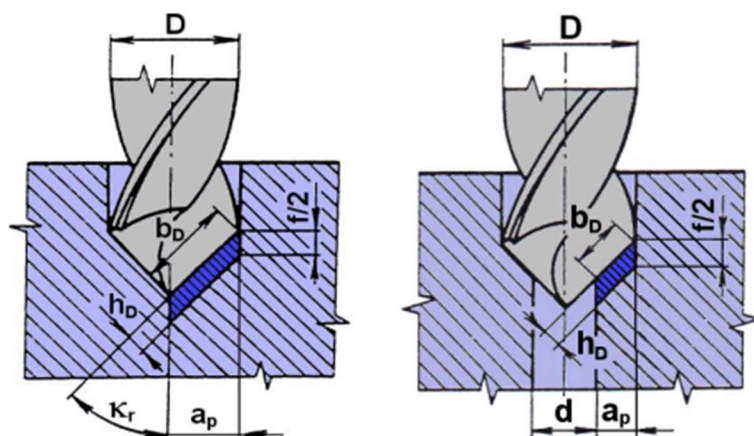
$$M_{cf2} = F_{c2} \cdot \frac{D-2}{2} \quad [\text{Nm}] \quad (20)$$

$$M_{cf2} = 95,8 \cdot \frac{0,003}{2}$$

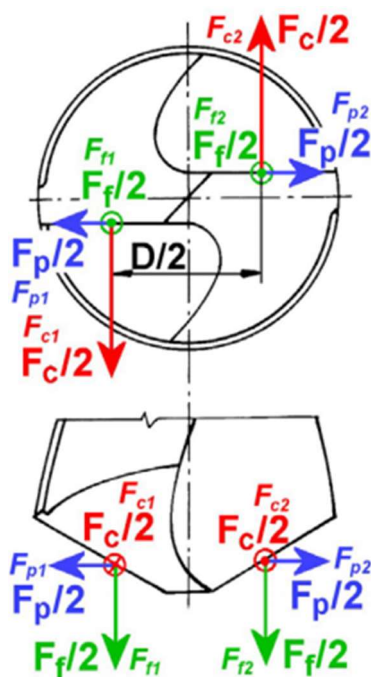
$$M_{cf2} = 0,14 \text{ Nm}$$

3.2 Vrtání

Vrtání je výrobním postupem, který vyhotoví díru do plného materiálu, nebo rozšíří již předělanou díru vytvořenou jinou pracovní operací (předvrtanou, předlitou, předkovanou atd.). Samotné odebírání jednotlivých třísek materiálu je docíleno zpravidla rotujícím nástrojem, ale může nastat i opačná situace (např. vrtání na soustruhu). Vstup do materiálu rotujícím vrtákem by měl být kolmý k obráběné ploše, na které dochází k vrtání. Ve směru osy vrtáku dochází k posuvovému pohybu, který je tvořen pohybem nástroje.



Obr. 12) Velikost třísky do nepředvrtané a předvrtané díry [13]



Obr. 13) Schéma řezných sil při vrtání [13]

3.2.1 Výpočet řezných sil pro vrták v₃

Tab 13) Parametry vrtáku v₃

Parametry	Symbol	Jednotka	Hodnota
Průměr nástroje	D ₃	[m]	0,01
Počet zubů nástroje	z ₃	[-]	3
Řezná rychlost	v _{c3}	[m/min]	120
Posuv na otočku	f ₃	[mm/ot.]	0,1
Úhel nastavení hlavního ostří	k _{v3}	[°]	59
Obráběný materiál	P1.4.Z.AN	Automatová ocel	
Měrná řezná síla [12]	k _c	[N/mm ²]	1180
Korekční exponent [12]	m _c	[-]	0,25

Otáčky nástroje [13]

$$n_{-3} = \frac{v_{-c3}}{D_{-3} \cdot \pi} \quad [\text{min}^{-1}] \quad (21)$$

$$n_{-3} = \frac{120}{0,01 \cdot \pi}$$

$$n_{-3} = 3819 \text{ min}^{-1}$$

Posuv na zub [13]

$$f_{-z3} = \frac{f_{-3}}{z_{-3}} \quad [\text{mm/zub}] \quad (22)$$

$$f_{-z3} = \frac{0,1}{3}$$

$$f_{-z3} = 0,03 \text{ mm / zub}$$

Jmenovitá tloušťka třísky [13]

$$h_{-d3} = f_{-z3} \cdot \sin(k_{-v3}) \quad [\text{mm}] \quad (23)$$

$$h_{-d3} = 0,03 \cdot \sin(59)$$

$$h_{-d3} = 0,028 \text{ mm}$$

Jmenovitá šířka zubu [13]

$$b_{d3} = \frac{D_3}{2 \cdot \sin(k_3)} \quad [\text{m}] \quad (24)$$

$$b_{d3} = \frac{0,01}{2 \cdot \sin(59)}$$

$$b_{d3} = 0,0058 \text{ m} = 5,8 \text{ mm}$$

Jmenovitý průřez třísky [13]

$$A_{d3} = h_{d3} \cdot b_{d3} \quad [\text{mm}^2] \quad (25)$$

$$A_{d3} = 0,028 \cdot 5,8$$

$$A_{d3} = 0,166 \text{ mm}^2$$

Měrná řezná síla [13]

$$k_{c3} = k_c \cdot h_{d3}^{-m_c} \quad [\text{MPa}] \quad (26)$$

$$k_{c3} = 1180 \cdot 0,028^{-0,25}$$

$$k_{c3} = 2884 \text{ MPa}$$

Řezná síla na jeden břit [13]

$$F_{1c3} = \frac{k_{c3} \cdot A_{d3}}{3} \quad [\text{N}] \quad (27)$$

$$F_{1c3} = \frac{2884 \cdot 0,166}{3}$$

$$F_{1c3} = 159 \text{ N}$$

Celková řezná síla [13]

$$F_{c3} = 3 \cdot F_{1c3} \quad [\text{N}] \quad (28)$$

$$F_{c3} = 3 \cdot 159$$

$$F_{c3} = 477 \text{ N}$$

Řezný kroutící moment [13]

$$M_{c3} = 3 \cdot \frac{F_{c3}}{3} \cdot \frac{D}{4} \quad [\text{Nm}] \quad (29)$$

$$M_{c3} = 3 \cdot \frac{477}{3} \cdot \frac{0,01}{4}$$

$$M_{c3} = 0,39 \text{ Nm}$$

Posuvová síla na vrták [13]

$$F_{fv3} \approx 0,63 \cdot \frac{D}{2} \cdot f_{3} \cdot k_{c3} \cdot \sin(k_{3}) \quad [\text{N}] \quad (30)$$

$$F_{fv3} \approx 0,63 \cdot \frac{10}{2} \cdot 0,1 \cdot 2884 \cdot \sin(59)$$

$$F_{fv3} \approx 778 \text{ N}$$

3.2.2 Výpočet řezných sil pro vrták v_4

Tab 14) Parametry vrtáku v_4

Parametry	Symbol	Jednotka	Hodnota
Průměr nástroje	D_4	[m]	0,003
Počet zubů nástroje	z_4	[-]	3
Řezná rychlost	v_c4	[m/min]	100
Posuv na otočku	f_4	[mm/ot.]	0,17
Úhel nastavení hlavního ostří	k_v4	[°]	59
Obráběný materiál	P1.4.Z.AN	Automatová ocel	
Měrná řezná síla [12]	k_c	[N/mm ²]	1180
Korekční exponent [12]	m_c	[-]	0,25

Otáčky nástroje [13]

$$n_{-4} = \frac{v_{-c4}}{D_{-4} \cdot \pi} \quad [\text{min}^{-1}] \quad (31)$$

$$n_{-4} = \frac{100}{0,003 \cdot \pi}$$

$$n_{-4} = 10610 \text{ min}^{-1}$$

Posuv na zub [13]

$$f_{-z4} = \frac{f_{-4}}{z_{-4}} \quad [\text{mm/zub}] \quad (32)$$

$$f_{-z4} = \frac{0,17}{3}$$

$$f_{-z4} = 0,057 \text{ mm / zub}$$

Jmenovitá tloušťka třísky [13]

$$h_{-d4} = f_{-z4} \cdot \sin(k_{-v4}) \quad [\text{mm}] \quad (33)$$

$$h_{-d4} = 0,057 \cdot \sin(59)$$

$$h_{-d4} = 0,049 \text{ mm}$$

Jmenovitá šířka zubu [13]

$$b_{d4} = \frac{D_4}{2 \cdot \sin(k_4)} \quad [\text{m}] \quad (34)$$

$$b_{d4} = \frac{0,003}{2 \cdot \sin(59)}$$

$$b_{d4} = 0,0017 \text{ m} = 1,75 \text{ mm}$$

Jmenovitý průřez třísky [13]

$$A_{d4} = h_{d4} \cdot b_{d4} \quad [\text{mm}^2] \quad (35)$$

$$A_{d4} = 0,049 \cdot 1,75$$

$$A_{d4} = 0,085 \text{ mm}^2$$

Měrná řezná síla [13]

$$k_{c4} = k_c \cdot h_{d4}^{-m-c} \quad [\text{MPa}] \quad (36)$$

$$k_{c4} = 1180 \cdot 0,049^{-0,25}$$

$$k_{c4} = 2508 \text{ MPa}$$

Řezná síla na jeden břit [13]

$$F_{1c4} = \frac{k_{c4} \cdot A_{d4}}{3} \quad [\text{N}] \quad (37)$$

$$F_{1c4} = \frac{2508 \cdot 0,085}{3}$$

$$F_{1c4} = 71,06 \text{ N}$$

Celková řezná síla [13]

$$F_{c4} = 3 \cdot F_{1c4} \quad [\text{N}] \quad (38)$$

$$F_{c4} = 3 \cdot 71,06$$

$$F_{c4} = 213,18 \text{ N}$$

Řezný krouticí moment [13]

$$M_{c4} = 3 \cdot \frac{F_{c4}}{3} \cdot \frac{D}{4} \quad [\text{Nm}] \quad (39)$$

$$M_{c4} = 3 \cdot \frac{213,18}{3} \cdot \frac{0,003}{4}$$

$$M_{c4} = 0,16 \text{ Nm}$$

Posuvová síla na vrták [13]

$$F_{fv4} \approx 0,63 \cdot \frac{D}{2} \cdot f_{v4} \cdot k_{c4} \cdot \sin(k_{v4}) \quad [\text{N}] \quad (40)$$

$$F_{fv4} \approx 0,63 \cdot \frac{3}{2} \cdot 0,17 \cdot 2508 \cdot \sin(59)$$

$$F_{fv4} \approx 345,4 \text{ N}$$

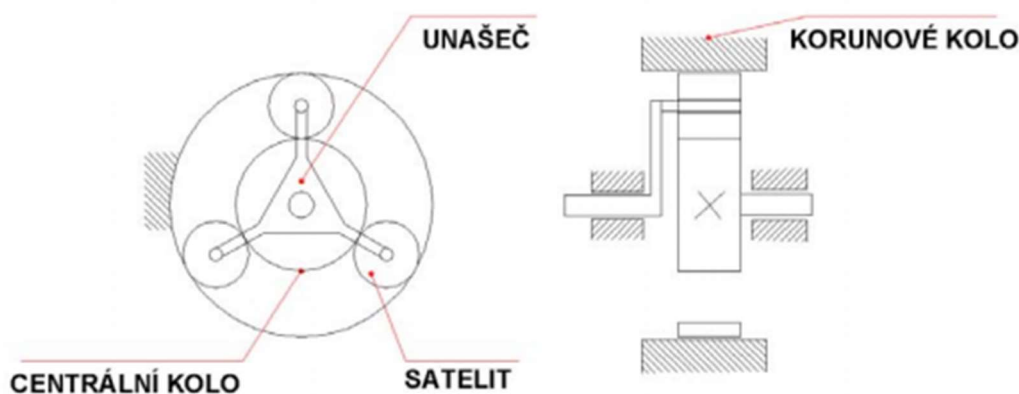
Jak bylo zmíněno dříve, jedná se o teoretický výběr nástrojů, které splňují nejčastější požadavky. Pro jiné nástroje, materiály nebo pracovní operace, se výsledky budou lišit. Z tab. 1) byly vybrány maximální hodnoty, které poslouží k realizaci koncepčního návrhu a výpočtu dalších potřebných částí.

Tab 15) Shrnutí řezných sil a momentů

Typ nástroj	Označení	Otáčky [min ⁻¹]	Řezná síla [N]	Řezný krouticí moment [Nm]
Čelní fréza	f_1	5729,6	176,1	0,88
Čelní fréza	f_2	19098	95,8	0,14
Vrták	v_3	3819	477	0,39
Vrták	v_4	10610	213,18	0,16

4 PLANETOVÁ PŘEVODOVKA

Na základě rešeršní části a výpočtu řezných sil bylo stanoveno jako nejvhodnější řešení využít principu planetové převodovky. V praxi se takové zrychlovací frézovací hlavy skrývají pod názvem zrychlovací frézovací hlavy s mechanickým převodem. Pro tuto aplikaci se jedná o velmi využívanou převodovku, jelikož dokáže přenášet velké kroučící momenty s velkým převodovým poměrem, a to od 3:1 až po 100:1. Jedná se o jednoduchou planetovou převodovku se statickým korunovým kolem. Otáčky jsou ve stálém neměnném převodu, tudíž lze jednoduše řídit výstupní otáčky vřetenem stoje. Jedná se o převodovku s malou zástavbu, vhodnou pro automatickou výměnu.



Obr. 14) Schéma planetové převodovky [14]

4.1 Výpočet planetové převodovky

Tab 16) Vstupní parametry planetové převodovky

Název	Označení	Hodnota	Jednotky
Jmenovité výstupní otáčky	n_{p1}	20 000	min^{-1}
Jmenovité vstupní otáčky	n_{p4}	3 000	min^{-1}
Převodový poměr	i_{14}	6,667	-
Součinitel výšky zubu [15]	h_{a0}	1	-
Úhel profilu	α	20	$^{\circ}$
Modul ozubení	m_n	1,5	mm
Počet satelitů [15]	a_k	3	-

Minimální počet zubů bez podřezání [15]

$$z_{min} = \frac{2 \cdot h_{a0}}{(\sin(\alpha))^2} \quad [-] \quad (62)$$

$$z_{min} = \frac{2 \cdot 1}{(\sin(20))^2}$$

$$z_{min} = 17,097$$

$$z_{p1} \approx 18$$

Návrhový převodový poměr [15]

$$[-] \quad (63)$$

$$i_{14n} = \frac{n_{p1}}{n_{p4}}$$

$$i_{14n} = \frac{20000}{3000}$$

$$i_{14n} = 6,667$$

Počet zubů satelitu [15]

$$z_{p2} = z_{p1} \cdot \left(\frac{i_{14n}}{2} - 1 \right) \quad [-] \quad (64)$$

$$z_{p2} = 18 \cdot \left(\frac{6,667}{2} - 1 \right)$$

$$z_{p2} = 42$$

Počet zubů korunového kola [15]

$$z_{p3} = z_{p1} \cdot (i_{14n} - 1) \quad [-] \quad (65)$$

$$z_{p3} = 18 \cdot (6,667 - 1)$$

$$z_{p3} \doteq 102$$

Otáčky satelitů [15]

$$n_{p2} = \frac{z_{p1} \cdot \frac{z_{p3}}{z_{p2}} \cdot n_{p1}}{z_{p1} + z_{p3}} \quad [\text{min}^{-1}] \quad (66)$$

$$n_{p2} = \frac{18 \cdot \frac{102}{42} \cdot 20000}{18 + 102}$$

$$n_{p2} = 7286 \text{ min}^{-1}$$

Průměr roztečné kružnice centrálního kola [15]

$$d_{p1} = z_{p1} \cdot m_n \quad [\text{mm}] \quad (67)$$

$$d_{p1} = 18 \cdot 1,5$$

$$d_{p1} = 27 \text{ mm}$$

Průměr roztečné kružnice satelitů [15]

$$d_{p2} = z_{p2} \cdot m_n \quad [\text{mm}] \quad (68)$$

$$d_{p2} = 42 \cdot 1,5$$

$$d_{p2} = 63 \text{ mm}$$

Průměr roztečná kružnice korunového kola [15]

$$d_{p3} = z_{p3} \cdot m_n \quad [\text{mm}] \quad (69)$$

$$d_{p3} = 102 \cdot 1,5$$

$$d_{p3} = 153 \text{ mm}$$

Rozteč [15]

$$p = \pi \cdot m_n \quad [\text{mm}] \quad (70)$$

$$p = \pi \cdot 1,5$$

$$p = 4,712 \text{ mm}$$

Výška hlavy zubu [15]

$$h_a = m_n \quad [\text{mm}] \quad (71)$$

$$h_a = 1,5 \text{ mm}$$

Výška paty zubu [15]

$$h_f = 1,25 \cdot m_n \quad [\text{mm}] \quad (72)$$

$$h_f = 1,25 \cdot 1,5$$

$$h_f = 1,875 \text{ mm}$$

Tloušťka zubu [15]

$$s_1 = \frac{p}{2} \quad [\text{mm}] \quad (73)$$

$$s_1 = \frac{4,712}{2}$$

$$s_1 = 2,356 \text{ mm}$$

Hlavová vůle [15]

$$c = h_f - h_a \quad [\text{mm}] \quad (74)$$

$$c = 1,875 - 1,5$$

$$c = 0,375 \text{ mm}$$

Osová vzdálenost centrálního kola a satelitu [15]

$$a_{12} = \frac{d_{p1} + d_{p2}}{2} \quad [\text{mm}] \quad (75)$$

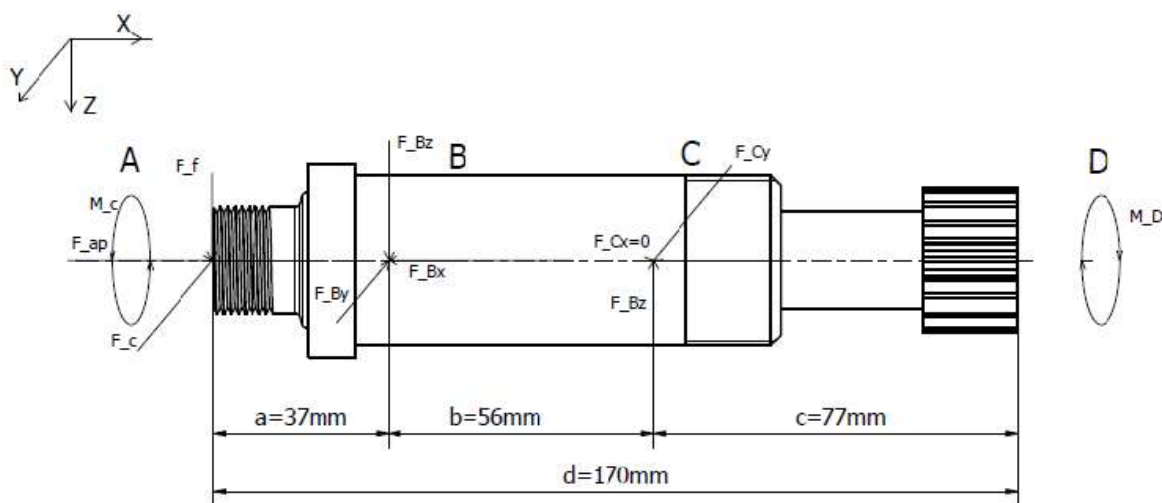
$$a_{12} = \frac{27 + 63}{2}$$

$$a_{12} = 45 \text{ mm}$$

5 REAKCE NA HŘÍDELI

Výstupní hřídel zrychlovací frézovací hlavy bude zároveň samotným obráběcím vřetenem. Je tedy záhodno překontrolovat správnou funkčnost ložisek. Ke kontrole ložisek je prvně zapotřebí správně stavit jednotlivá silová působení ve vzájemném styku ložisek a hřídele. Pro zjednodušení je počítáno s hřídelí jako s nosníkem stejného průměru na dvou podporách v místech styku s ložisky. Není započítána délka nástroje a síly tedy působí na koncový bod hřídele, přičemž všechny síly působí v ose. Veškeré zatížení je konstantní i za předpokladu konvenčního obrábění vícebřitými nástroji, kde dochází k cyklickému namáhání. Počítáme s maximální řeznou silou a řezným kroutícím momentem, které nám vyšly z předchozího shrnutí řezných sil a momentů Tab.13.

Na uložení hřídele koncepčního návrhu bylo využito dvou kuželíkových ložisek. Ke správnému předepnutí ložisek slouží KM matice, která nevyžaduje pojistnou MB podložku, jelikož obsahuje integrovaný aretační šroub.



Obr. 15) Silové působení na výstupní hřídel

Rovnice statické rovnováhy jsou určeny na základě působení sil při obrábění viz. kap. 3 a působením reakčních sil od uložení.

Pro úplné vyjádření reakčních sil je zapotřebí šesti rovnic statické rovnováhy.

Směry reakcí od ložisek jsou pouze orientační pro stanovení rovnic. Pokud předpoklad byl správný, reakce vyjde v kladné hodnotě. Pokud předpoklad byl chybný, hodnota silové reakce vyjde v záporných hodnotách a skutečný směr bude obrácený směru, který je značen na obr.14.

5.1 Podmínky statické rovnováhy

$$\sum F_{_x} = 0: F_{_ap} - F_{_Bx} = 0 \quad (41)$$

$$\sum F_{_y} = 0: -F_{_c} - F_{_By} + F_{_Cy} = 0 \quad (42)$$

$$\sum F_{_z} = 0: F_{_f} - F_{_Bz} - F_{_Cz} = 0 \quad (43)$$

$$\sum M_{_Ax} = 0: M_{_c} - M_{_k} = 0 \quad (44)$$

$$\sum M_{_Ay} = 0: -F_{_Bz} \cdot a + F_{_Cz}(a+b) = 0 \quad (45)$$

$$\sum M_{_Az} = 0: -F_{_By} \cdot a + F_{_Cy}(a+b) = 0 \quad (46)$$

5.2 Výsledné hodnoty reakčních sil v podporách

$$F_{_Bx} = 239N \quad (47)$$

$$F_{_By} = -601N \quad (48)$$

$$F_{_Bz} = -666N \quad (49)$$

$$F_{_Cx} = 0N \quad (50)$$

$$F_{_Cy} = -315N \quad (51)$$

$$F_{_Cz} = -189N \quad (52)$$

$$F_{_f} = 286N \quad (53)$$

$$F_{_ap} = 239N \quad (54)$$

$$F_{_c} = 477N \quad (55)$$

5.3 Životnost ložisek na výstupní hřídeli

Na základě výpočtu reakcí v podporách, lze zhodnotit vhodnost použití daných ložisek pro uložení hřídele. Pro správný chod celé zrychlovací frézovací hlavy, je zásadní přesnost uložení výstupní hřídele vůči vstupní hřídeli, na kterou je celá hlava centrovaná, respektive na kužel vstupní hřídele.

V koncepčním návrhu pro uložení výstupní hřídele jsou použita vysoce přesná ložiska s kosoúhlým stykem 7207 CD/HCP4A. Vstupní podmínky pro výpočet životnosti jsou brány z předchozí kapitoly 4.2. Axiální předepnutí je zajištěno KM maticí. Díky celkové konstrukci postačí jedná matice k předepnutí obou ložisek. Jedná se o výhodu z hlediska stejného předepnutí obou ložisek naprosto stejnou silou. V tomto případě jsou ložiska namazána tukem, který doporučuje výrobce ložisek.

Tab 17) Vysoce přesné ložisko 7207 CD/HCP4A [16]

	Označení	Hodnota
Výrobce		SKF
Vnější průměr	D	72 mm
Vnitřní průměr	d	35 mm
Šířka	B	17 mm
Maximální otáčky při mazání tukem		26 000 min ⁻¹
Maximální otáčky při mazání olejem		38 000 min ⁻¹
Základní dynamická únosnost	C	31 900 N
Axiální předepnutí	G _a	120 N
Pracovní otáčky	n	19098
Početní faktor	X ₁	0,57
Početní faktor	Y ₁	0,52

Radiální síla v bodě B

$$F_{Br} = \sqrt{F_{By}^2 + F_{Bz}^2} \quad [\text{N}] \quad (56)$$

$$F_{Br} = \sqrt{601^2 + 666^2}$$

$$F_{Br} = 897,39 \text{ N}$$

Ekvivalentní dynamické zatížení [16]

$$P_1 = X_1 \cdot F_{Br} + Y_1 \cdot F_{Bx} \quad [\text{N}] \quad (57)$$

$$P_1 = 0,57 \cdot 897 + 0,52 \cdot 239$$

$$P_1 = 602,59 \text{ N}$$

Životnosti ložiska v bodě B [16]

$$L_{10B} = \frac{10^6}{60 \cdot n} \cdot \left(\frac{C}{P_1} \right)^3 \quad [\text{hod}] \quad (58)$$

$$L_{10B} = \frac{10^6}{60 \cdot 19098} \cdot \left(\frac{31900}{602,59} \right)^3$$

$$L_{10B} = 129530 \text{ hod}$$

Radiální síla v bodě C

$$F_{Cr} = \sqrt{F_{Cy}^2 + F_{Cz}^2} \quad [\text{N}] \quad (59)$$

$$F_{Cr} = \sqrt{315^2 + 189^2}$$

$$F_{Cr} = 367,53 \text{ N}$$

Ekvivalentní dynamické zatížení [16]

$$P_2 = X_1 \cdot F_{Cr} \quad [\text{N}] \quad (60)$$

$$P_2 = 0,57 \cdot 367,53$$

$$P_2 = 209,49 \text{ N}$$

Životnost ložiska v bodě C [16]

$$L_{10C} = \frac{10^6}{60 \cdot n} \cdot \left(\frac{C}{P_2} \right)^3 \quad [\text{hod}] \quad (61)$$

$$L_{10C} = \frac{10^6}{60 \cdot 19098} \cdot \left(\frac{31900}{209,49} \right)^3$$

$$L_{10C} = 3081364 \text{ hod}$$

Vypočítaná životnost jednotlivých ložisek na výstupní hřídeli zrychlovací frézovací hlavy je dostatečná, jelikož podmínky pro výpočet životnosti jsou extrémní, a proto by reálně ani neměly nastat. V ideálním případě by bylo záhodno osadit teplotní čidlo k ložisku v místě B, které je z podmínek statické rovnováhy nejvíce namáháné. Šlo by takhle předejít dlouhodobému nadměrnému namáhání ložiska.

6 VÝSLEDNÉ VNITŘNÍ ÚČINKY

Pro kontrolu bezpečnosti je vybrána jedna z hřídelí. Jedná se o výstupní hřídel, která je přímo spojená s obráběcími nástroji, a tudíž by podle předpokladu měla být tou nejvíce namáhanou v celé sestavě. Je uložena v sadě ložisek a je napřímo spojená s planetovým ústrojím.

Jednotlivé výpočty jsou uvedeny za určitých zjednodušujících předpokladů, a to z důvodu jejich složitosti. Je uvažován nerotující hřídel. Některé tvarové prvky nejsou zahrnuty. Pro výpočet složitých tvarových prvků slouží externí programy, které disponují svým algoritmem a dokážou s vysokou přesností vypočítat i takto složité tvary. V tomto případě postačí zjednodušené teoretické výpočty, které vypočítají hodnotu vnitřních účinků a na základě těchto výpočtů je možné i určit bezpečnost vůči meznímu stavu pružnosti. Bezpečnostní výpočet vřetene postačí pouze v nebezpečných místech, která znázorňují jednotlivé řezy a k těmto místům je následně určena i bezpečnost.

Volba materiálu k vyhotovení hřídele, by měla splňovat několik kritérií. Materiál musí být použitelný ke kalení, ale zároveň si musí zachovat houževnatost jádra. Dalším kritériem, na který bylo pohlíženo, byla snadná dostupnost na trhu s polotovary. V tomto případě se jeví jako nejlepší volba materiál 14 220.

Tab 18) Parametry materiálu 14 220

Materiál	Ocel 14220
Mez kluzu [17]	$R_e = 550 \text{ MPa}$
Mez pevnosti [17]	$R_m = 780 \text{ MPa}$
Tepelné zpracování	Kaleno na $58 \pm 2 \text{ HRC}$
Koef. bezpečnosti v tahu/tlak [18]	$k_t = 0,5$
Koef. bezpečnosti v ohybu [18]	$k_o = 0,6$
Koef. bezpečnosti ve smyku [18]	$k_s = 0,4$

Dovolené napětí v tahu/tlaku [19]

$$\sigma_{td} = k_t \cdot R_e \quad [\text{MPa}] \quad (77)$$

$$\sigma_{td} = 0,5 \cdot 550$$

$$\sigma_{td} = 275 \text{ MPa}$$

Dovolené napětí v ohybu [19]

$$\sigma_{od} = k_o \cdot R_e \quad [\text{MPa}] \quad (78)$$

$$\sigma_{od} = 0,6 \cdot 550$$

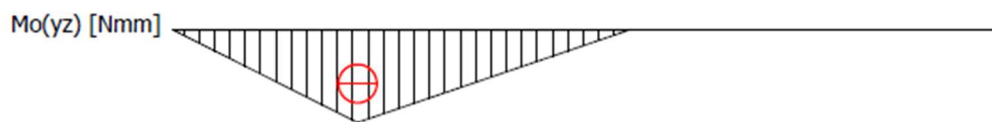
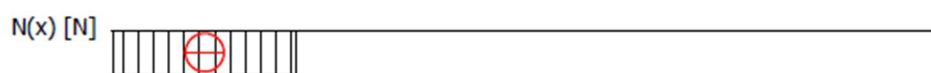
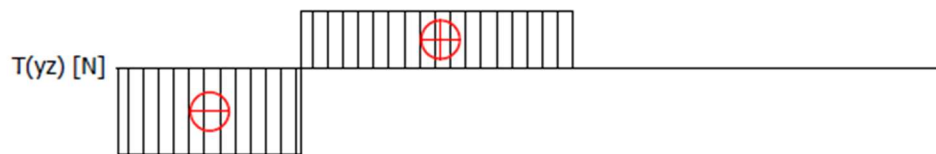
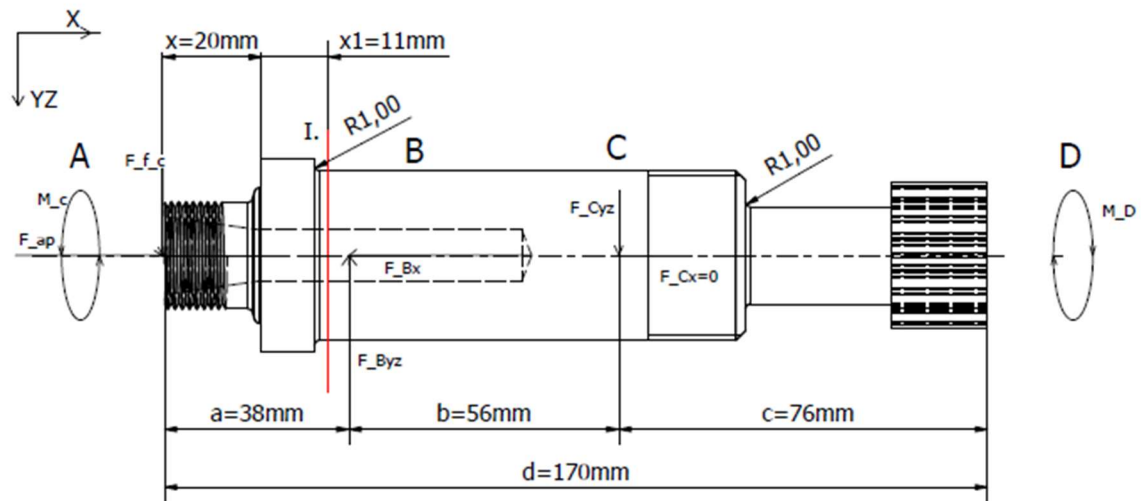
$$\sigma_{od} = 330 \text{ MPa}$$

Dovolené napětí ve smyku [19]

$$\tau_{sd} = k_s \cdot R_e \quad [\text{MPa}] \quad (79)$$

$$\tau_{sd} = 0,4 \cdot 550$$

$$\tau_{sd} = 220 \text{ MPa}$$



6.2 Bezpečnost v místě I. vůči meznímu stavu pružnosti

Tab 19) Parametry v místě I.

Vnější průměr v průřezu I.	$D_{v1} = 40 \text{ mm}$
Vnitřní průměr v průřezu I.	$d_{v1} = 35 \text{ mm}$
Přechodový poloměr v průřezu I.	$R_1 = 1 \text{ mm}$
Součinitel koncentrace namáhané krutem [19]	$\alpha_{k1} = 1,65$
Součinitel koncentrace namáhané ohybem [19]	$\alpha_{o1} = 2,4$

Průřezový modul v krutu [19]

$$W_{k1} = \frac{\pi}{16} \cdot \frac{D_{v1}^4 - d_{v1}^4}{D_{v1}} \quad [\text{mm}^3] \quad (79)$$

$$W_{k1} = \frac{\pi}{16} \cdot \frac{40^4 - 35^4}{40}$$

$$W_{k1} = 5200 \text{ mm}^3$$

Nominální napětí v krutu [19]

$$\tau_{k1} = \frac{M_{c1}}{W_{k1}} \quad [\text{MPa}] \quad (80)$$

$$\tau_{k1} = \frac{880}{5200}$$

$$\tau_{k1} = 0,17 \text{ MPa}$$

Maximální smykové napětí [19]

$$\tau_{m1} = \alpha_{k1} \cdot \tau_{k1} \quad [\text{MPa}] \quad (81)$$

$$\tau_{m1} = 1,65 \cdot 0,17$$

$$\tau_{m1} = 0,28 \text{ MPa}$$

Průřezový modul v ohybu [19]

$$W_{o1} = \frac{\pi \cdot (D_{v1}^4 - d_{v1}^4)}{32 \cdot D_{v1}} \quad [\text{mm}^3] \quad (82)$$

$$W_{o1} = \frac{\pi \cdot (40^4 - 35^4)}{32 \cdot 40}$$

$$W_{o1} = 2600 \text{ mm}^3$$

Ohybový moment působící v řezu I. [19]

$$M_{oI} = F_{fc} \cdot a \quad [\text{Nmm}] \quad (83)$$

$$M_{oI} = 286,2 \cdot 38$$

$$M_{oI} = 10875,6 \text{ Nmm}$$

Napětí v ohybu [19]

$$\sigma_{oI} = \frac{M_{oI}}{W_{oI}} \quad [\text{MPa}] \quad (84)$$

$$\sigma_{oI} = \frac{10875,6}{2600}$$

$$\sigma_{oI} = 4,18 \text{ MPa}$$

Tlakové napětí [19]

$$\sigma_{tI} = \frac{4 \cdot F_{ap}}{\pi \cdot (D_{vl}^2 - d_{vl}^2)} \quad [\text{MPa}] \quad (85)$$

$$\sigma_{tI} = \frac{4 \cdot 238,5}{\pi \cdot (40^2 - 35^2)}$$

$$\sigma_{tI} = 0,81 \text{ MPa}$$

Maximální normálové napětí [19]

$$\sigma_{mI} = \alpha_{oI} \cdot (\sigma_{oI} + \sigma_{tI}) \quad [\text{MPa}] \quad (86)$$

$$\sigma_{mI} = 2,4 \cdot (4,18 + 0,81)$$

$$\sigma_{mI} = 11,98 \text{ MPa}$$

Redukované napětí na základě Trescovi podmínky [19]

$$\sigma_{trI} = \sqrt{\sigma_{mI}^2 + 4 \cdot \tau_{mI}^2} \quad [\text{MPa}] \quad (87)$$

$$\sigma_{trI} = \sqrt{11,98^2 + 4 \cdot 0,28^2}$$

$$\sigma_{trI} = 11,99 \text{ MPa}$$

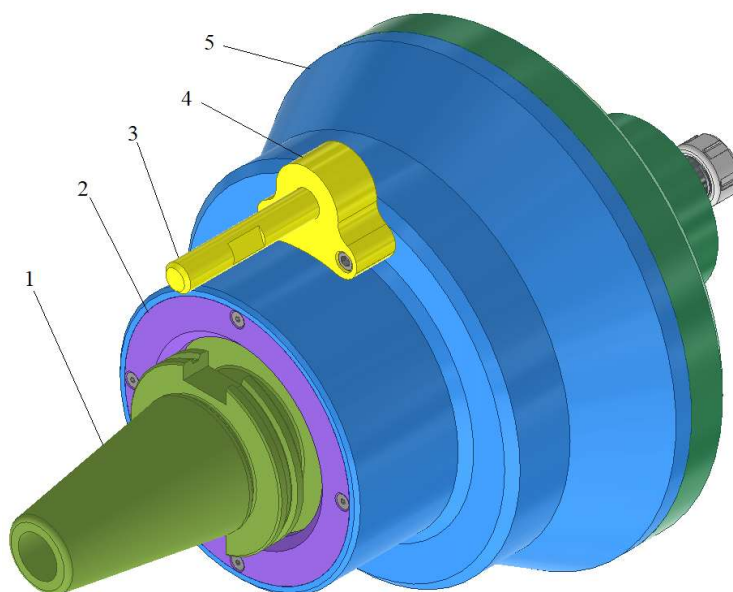
Bezpečnost vůči meznímu stavu pružnosti [19]

$$k_{-1} = \frac{R_e}{\sigma_{-tr1}} \quad [-] \quad (88)$$

$$k_{-1} = \frac{550}{11,99}$$

$$k_{-1} = 45,87$$

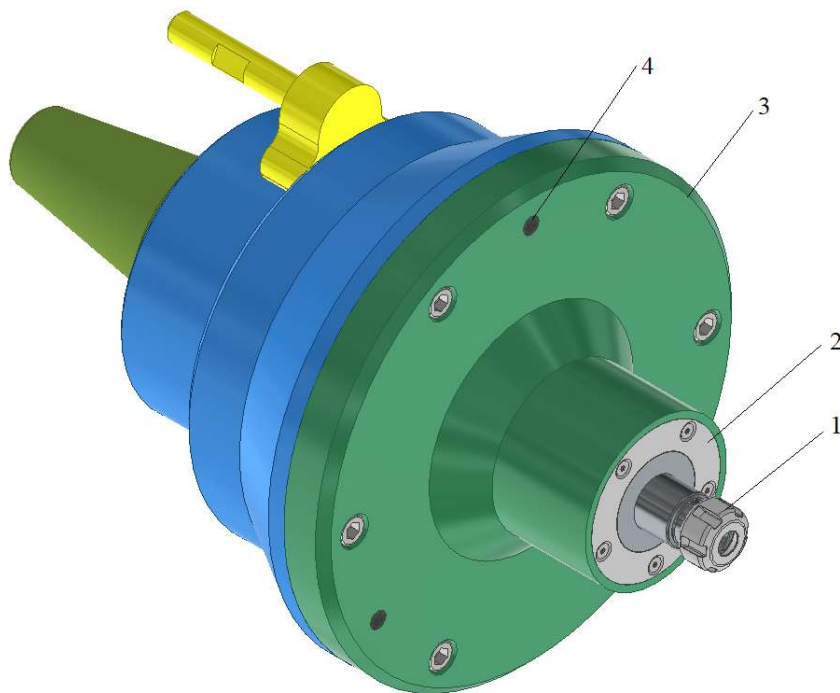
7 KONSTRUKČNÍ NÁVRH



Obr. 16) Zrychlovací frézovací hlava

(1- Kužel DIN69871, 2- Kryt těsnění, 3- Aretační kolík, 4- Aretační člen, 5- Vnější pouzdro)

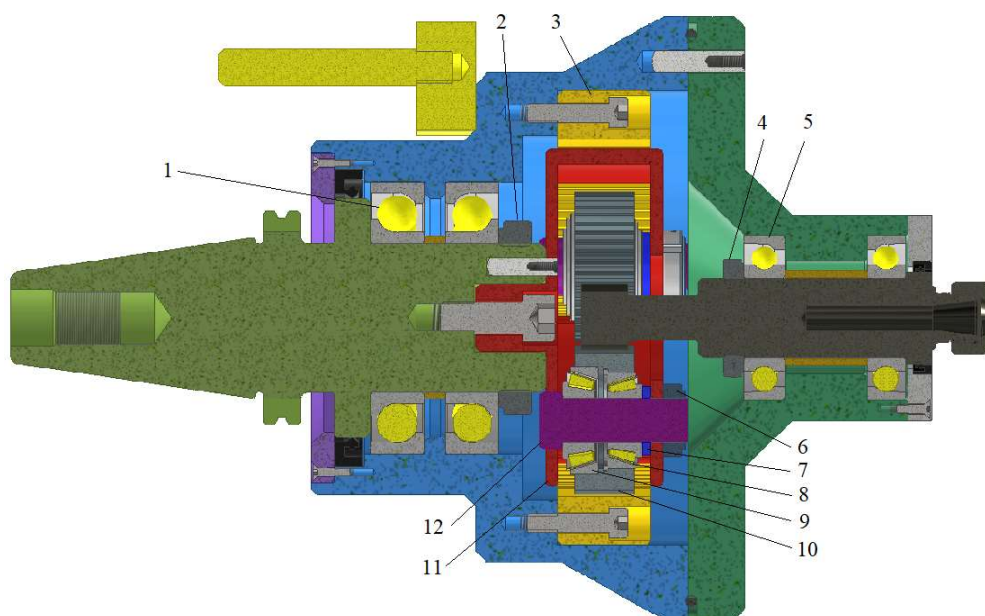
Zrychlovací frézovací hlava je připojena přes kužel DIN69871, který má na svém konci závit pro upínací čep, za který je celá hlava přitahována ke stroji a jeho pohonnému ústrojí. Kuželovitý tvar připojovacího vřetene poslouží zároveň i jako centrovací prvek, jenž zajistí snadnou opakovatelnost středění. Celý převod krouticího momentu a otáček je dán tvarovým stykem samotného připojovacího vřetene. Ke správnému fungování zrychlovací frézovací hlavy je potřeba aretační zařízení, které se skládá z aretačního členu a aretačního kolíku. Při správném polohování v rámci automatické výměny hlavy zapadne aretační kolík do aretačního zařízení obráběcího stroje. Aretační zařízení stroje slouží k jištění aretačního čepu ke stroji tak, aby vnější pouzdro bylo statické vůči rotujícímu kuželi. V některých případech, kdy se jedná spíše o hrubování materiálu, je možné vybavit aretační zařízení vnějším oplachem, který je mířen k břitům nástroje. Při vysokorychlostním obrábění je vnější oplach nežádoucí, jelikož jednotlivé třísky obráběného materiálu odebírají teplo, jak z nástroje, tak i z obráběného materiálu.



Obr. 17) Zrychlovací frézovací hlava

(1-ER kleština, 2- Příruba, 3- Přední kryt, 4- Aretační kolík)

Použité nástroje pro obrábění se upevní do ER kleštiny, která je vysoce variabilním zařízením pro upínání obráběcích nástrojů. V tomto případě poslouží kleština ER16, která svým rozsahem pokryje vybrané spektrum nástrojů, pro kterou je daná zrychlovací frézovací hlava uzpůsobena. Příruba společně s předním krytem slouží k ochraně vnitřních komponent proti vniknutí nečistot a mechanickému poškození. Tuhost a přesnost celého nástroje je dána vzájemnou polohou jednotlivých komponent. Jednotlivé dílce mají vysokou míru přesnosti, ale i přesto je potřeba zajistit vzájemné polohování. Z tohoto důvodu je využito kolíků ke zvýšení tuhosti a zlepšení vzájemné polohy prvků, které mají přímý vliv na přesnost a tuhost. K maximalizaci zvýšení tuhosti a přesnosti je využito pracovní operace při samotné montáži. Ke zvýšení této vzájemné přesnosti se díry pro kolíky budou vrtat na požadované rozměry až po ustavení upínacích šroubů. Tato pracovní operace zajistí naprostou souosost děr na předním krytu společně s vnějším pouzdrem (obr. 16).



Obr. 18) Řez zrychlovací frézovací hlavou

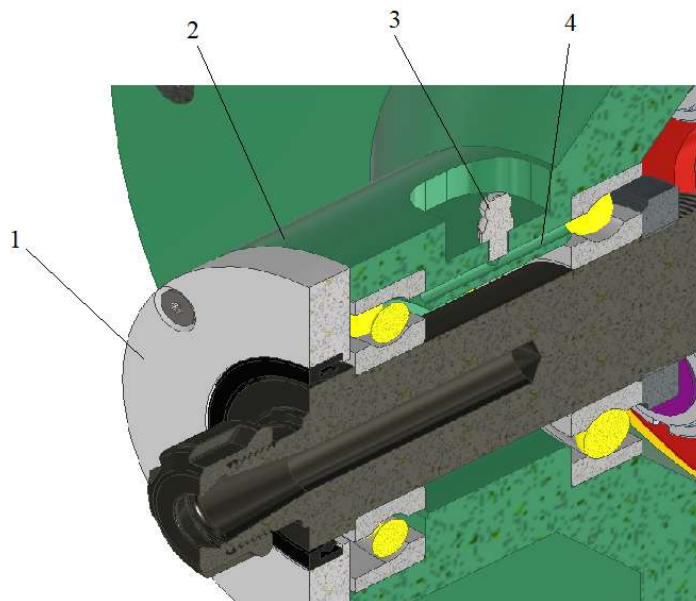
(1- Ložisko 7213, 2- KM matice 1365, 3- Korunové kolo, 4- KM matice 735, 5- Ložisko 7207CD/HCP4A, 6- KM matice 420, 7- Vymezovací podložka, 8- Ložisko 32 004, 9- Ložisko 30 204, 10- Satelit, 11- Unašeč, 12- Čep satelitu)

Na řezu zrychlovací frézovací hlavy lze vidět systém předpínání ložisek. Vždy se jedná o předpínání jednou maticí pro soustavu dvou ložisek. Tato uzpůsobení lze využít díky celkové konstrukci. Je zajištěno dostatečné axiální předepnutí, a to vždy stejnou silou pro obě ložiska která spolu tvoří celek. Jedná se o KM matice se zabudovaným aretačním šroubem, které vyvodí dostatečné axiální síly a dokážou pracovat i při vysokých otáčkách. Správné předepnutí ložisek je zásadní pro správný chod a dlouhou životnost.

Korunové kolo je osazené ve vnějším krytu zrychlovací frézovací hlavy. Díky svému silovému styku tvořenému sérií šroubů lze využít statického korunového kola za předpokladu správné aretace vnějšího pouzdra. Silový styk je v tomto případě dostatečný, jelikož korunové kolo je statickým prvkem a odvalují se pouze jednotlivé satelity po jeho vnitřním obvodu. Centrování centrálního kola bude na vnitřní průměr vnějšího pouzdra.

Unašeč satelitů je připojen ke vstupní hřídeli pomocí jednoho přitahovacího šroubu a tří kolíků. Toto spojení slouží k přenosu potřebných momentů i při maximálních otáčkách. Souosost průchozích děr pro čep satelitu je zásadní pro celkové odvalování satelitu, jak po centrálním kole, tak pro rotaci centrálního ozubeného kola.

V unašči jsou osazeny tři satelity. Čep satelitu přenáší točivý moment od rotujícího unašeče, proto je důležité jeho usazení do samotné konstrukce unašeče. Ke správné poloze satelitu vůči korunovému kolu slouží sada dvou ložisek zajištěná pojistným kroužkem a samotným tvarem satelitu za pomoci vymezovací podložky. Jako v celé zrychlovací frézovací hlavě, tak i zde jsou ložiska předepnuta KM maticí a tvarovým stykem s pomocí pojistného kroužku, který je zabudovaný ve vnitřním průměru jednotlivých satelitů.



Obr. 19) Řez přívodu maziva pro ložiska

(1- Příruba, 2- Přední kryt, 3- Maznice, 4- Kanál pro maziva)

Přívodní kanál maziva pro ložiska výstupního vřetene slouží ke snadnému doplňování mazacího tuku doporučeného výrobcem ložisek. Jedná se o nepostradatelnou operaci k dosažení maximální životnosti. Na vstupu celého systému je maznice, která je umístěna v těle předního krytu, ve které je vytvořena kapsa, která chrání samotnou maznici před mechanickým poškozením. Na doplnění potřebného maziva postačí mazací ruční lis. Maznice je propojena přímými kanály, které jsou soustředěny k oběma ložiskům na výstupní hřídeli. Jedná se o rychlou a snadno opakovatelnou možnost doplnění potřebného maziva přímo k nejvíce namáhaným ložiskům v celém systému zrychlovací frézovací hlavy

8 ZÁVĚR

Cílem práce bylo zhotovit koncepční návrh zrychlovací frézovací hlavy na základě rešerše trhu a základních vstupních parametrů. Zrychlovací frézovací hlavy se v konvenčním třískovém obrábění používají často, a to kvůli zlepšujícím se materiálům obráběcích nástrojů. Hlavní vřeteno v mnoha případech nevytvoří efektivní podmínky pro obrábění, popřípadě by docházelo k nadměrnému opotřebení ložisek a pohonu vřetene stroje.

Vliv na volbu typu zvoleného mechanismu pro zrychlovací frézovací hlavu ovlivnily řezné parametry, pro které byl celý mechanismus počítán. Na základě těchto skutečností byl nejlepší volbou mechanismus s planetovým převodem. Jeho nezanedbatelné přednosti vůči dalším typům převodů v této aplikaci byly jasné. Jedná se o tichý chod s dlouhou životností a stálým převodovým poměrem. Výpočet řezných podmínek nastavil výstupní parametry, jichž bylo potřeba dosáhnout na výstupním vřeteni zrychlovací frézovací hlavy. Zvolené typy obráběcích nástrojů byly určeny na základě dlouholetých zkušeností vedoucího práce a představují spektrum nejčastějších typů nástrojů a operací, které jsou s nimi prováděny v rámci konvenčního třískového obrábění. Výpočet planetové převodovky vytvořil základní stavební kámen k samotnému konstrukčnímu návrhu a jeho koncepci v rámci zrychlovací frézovací hlavy. Jedná se o planetový mechanismus se statickým korunovým kolem. Princip statického korunového kola zaručí dostatečný převodový poměr potřebný k dosažení otáček pro efektivní třískové obrábění. Ke správnému fungování statického korunového kola slouží aretační kolík s aretačním členem, přičemž se jedná se o aretační zařízení, které zvyšuje tuhost celého spojení zrychlovací frézovací hlavy a konvenčního obráběcího stroje v jeden pevný celek. Připojovacím členem zrychlovací frézovací hlavy ke stroji je kužel DIN 69871, který je jedním z nejpoužívanějších typů tvarového převodu kroutícího momentu ve strojírenském světě. Výstupní hřídel, která je obstarána upínacem nástrojů ER 16, splňuje dnešní požadavky na rychlou výměnu nástrojů, a tím i snížení nepracovního času stroje na minimum. Výstupní hřídel je uložena v sadě ložisek 7207CD/HCP4A, která dosahují i při maximální zatížení zrychlovací frézovací hlavy dostatečné životnosti. Zásadním faktorem pro životnost ložisek je jejich pravidelné mazání. Mazivo doporučené výrobcem lze jednoduše přivádět přes maznici přímo k ložiskům. Ke zpětné kontrole správnosti provedení práce proběhl výpočet výsledných vnitřních účinků a bezpečnosti vůči meznímu stavu pružnosti, kde výstupní hřídel splňuje očekávání, a tudíž lze říct, že prvotní úvaha, vedoucí k použití planetového mechanismu v rámci zrychlovací frézovací hlavy, byla správná.

Koncepční návrh zrychlovací frézovací hlavy, kde jsou použity prvky jako upínací kužel DIN 69871 a upínací kleština ER 16, lze využít díky jeho univerzálnosti v mnoha aplikacích v rámci vícero operací. Použití kuželu DIN 69871 zajistí plně automatickou výměnu hlavy s možností jejího uložení do zásobníku obráběcích hlav, který bývá součástí velkých obráběcích center. Mám proto za to, že využití mého návrhu zrychlovací frézovací hlavy v praxi může být přínosné a může najít mnohá využití.

9 CITOVANÁ LITERATURA

- [1] *ZP-10/X - zrychlovací přístroj* [online]. Praha: NAREX MTE, 2016 [cit. 2020-03-24]. Dostupné z: https://www.narexmte.cz/system/czMTE_vcc2C3_01BB.htm
- [2] Nová generace úhlových a zrychlovacích hlav: Frézování se zrychlovací hlavou Benz. *MM spektrum* [online]. 2017, (10) [cit. 2020-04-07]. DOI: 171019. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/nova-generace-uhlovych-a-zrychlovacich-hlav.html>
- [3] *High Spindle Speed Increaseers* [online]. Švýcarsko: BIG KAISER, 2020 [cit. 2020-03-26]. Dostupné z: <https://www.bigkaiser.com/en/products/angle-heads-speed-increaseers/high-spindle-speed-increaseers?filter%5B0%5D=interface%3A672>
- [4] *Air turbine spindle 602 series* [online]. Air turbine spindle, 2019 [cit. 2020-03-26]. Dostupné z: http://www.airturbinetools.com/spindles/602_series.html
- [5] *Air power spindle RBX12* [online]. Švýcarsko: BIG KAISER, 2020 [cit. 2020-03-26]. Dostupné z: <https://www.bigkaiser.com/en/products/angle-heads-speed-increaseers/40000-rpm/air-power-spindle-rbx12-rbx12c>
- [6] *Air Bearing Turbine Spindle* [online]. NSK NAKANISHI, b.r. [cit. 2020-03-26]. Dostupné z: <https://www.nsk-nakanishi.co.jp/industrial-eng/hpms/xpeed/>
- [7] *High Speed VFD Electric Spindle Motor* [online]. SUZHOU RICO MACHINERY, b.r. [cit. 2020-03-27]. Dostupné z: <https://www.ricocnc.com/products/97-High-Speed-VFD-Electric-Spindle-Motor-for-CNC-Router.html>
- [8] *Electric System : BRUSHLESS MOTOR SPINDLE* [online]. NSK NAKASHI, b.r. [cit. 2020-03-27]. Dostupné z: <https://www.nsk-nakanishi.co.jp/industrial-eng/hpms/hes/>
- [9] *Spindle speeders - MZ01* [online]. Parfaite, b.r. [cit. 2020-03-27]. Dostupné z: <http://www.parfaite.com.tw/electrical-speed-boster.html>
- [10] HUMÁR, Anton. *Technologie I: Technologie obrábění-1.část* [online]. VUT FSI, 2003 [cit. 2020-03-30]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI_TO-1cast.pdf
- [11] *Proces frézování* [online]. Sandvik, b.r. [cit. 2020-03-30]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/machining-formulas-definitions/pages/milling.aspx>
- [12] *Obráběné materiály* [online]. Sandvik, b.r. [cit. 2020-03-30]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/materials/pages/workpiece-materials.aspx>

- [13] HUMÁR, Anton. *Technologie I: Technologie obrábění - 2.část* [online]. VUT FSI, 2004 [cit. 2020-03-30]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI_TO-2cast.pdf
- [14] ŽÍLA, S. *Planetová převodovka pohonu desky karuselu poháněná direct-drive motorem*. Brno, 2010.. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Ing. Lubomír Novotný, Ph.D.
- [15] SHIGLEY, Joseph, Charles R MISCHKE a Richard G BUDYNAS, Martin HARTL, Miloš VLK. *Konstruování strojních součástí*. 1. vydání. Brno: VUTUM, 2010. ISBN 978-80-214-2629-0.
- [16] *Super-precision bearings* [online]. SKF, b.r. [cit. 2020-04-16]. Dostupné z: <https://www.skf.com/id/products/super-precision-bearings>
- [17] *Přehled vlastností ocelí* [online]. Bolzano, 2020 [cit. 2020-05-21]. Dostupné z: http://www.bolzano.cz/assets/files/TP/MOP_%20Tycova_ocel/EN_10084/MOP_16MnCr5.pdf
- [18] LEINVEBER, Jan. *Strojírenské tabulky: pomocná učebnice pro školy technického zaměření*. 2. dopl. vyd. Úvaly: Albra, 2005. ISBN 80-736-1011-6.
- [19] JANÍČEK, Přemysl, Emanuel ONDRÁČEK, Jan VRBA a Jiří BURŠA. *MECHANIKA TĚLES PRUŽNOST A PEVNOST I*. Třetí propracované vydání. Brno: AKADEMICKÉ NAKLADATELSTVÍ CERN, s.r.o., 2004. ISBN 80-214-2592-X.
- [20] MAREK, Jiří. *Konstrukce CNC obráběcích strojů*. 2010. Praha: MM Publishing, 2010. ISBN 978-80-254-7980-3.
- [21] *Katalog DIN 69 871* [online]. Hulín: PILANA MCT, 2010 [cit. 2020-03-19]. Dostupné z: <http://www.upinacinaradi.eu/Category/cs-CZ/35/din-69-871>
- [22] TOCHÁČEK, Jakub. *Návrh zrychlovací hlavy pro vřeteník horizontální vyvrtávačky*. Brnp, 2016, 92 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Ing., Dipl.-Ing Michal Holub, Ph.D.
- [23] *Výklad frézování* [online]. Sandvik, b.r. [cit. 2020-03-27]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/machining-formulas-definitions/pages/milling.aspx>
- [24] *Cutting tools* [online]. ISCAR, b.r. [cit. 2020-03-27]. Dostupné z: <https://www.iscar.com/eCatalog/Index.aspx>

SEZNAM ZKRATEK

D_1	[m]	Průměr nástroje (fréza)
z_1	[-]	Počet zubů nástroje
v_c1	[m/min]	Řezná rychlost
f_z1	[mm/ot.]	Posuv na zub
a_p1	[mm]	Hloubka záběru
a_e1	[mm]	Šířka záběru
k_f1	[°]	Úhel nastavení hlavního ostří
φ_1	[°]	Úhel posuvového pohybu
k_c	[N/mm ²]	Měrná řezná síla
m_c	[-]	Korekční exponent
n_1	[min ⁻¹]	Otáčky nástroje
v_f1	[mm/min]	Posuvová rychlost
A_d1	[mm ²]	Jmenovitý průměr třísky
φ_z1	[°]	Úhlová rozteč zubů
ψ_1	[°]	Úhel záběru
n_z1	[-]	Počet zubů v záběru
h_m1	[mm]	Průměr tloušťky třísky
k_cf1	[MPa]	Měrná řezná síla
F_c1	[N]	Celková řezná síla
M_cf1	[Nm]	Řezný kroutící moment
D_2	[m]	Průměr nástroje (fréza)
z_2	[-]	Počet zubů nástroje
v_c2	[m/min]	Řezná rychlost
f_z2	[mm/ot.]	Posuv na zub
a_p2	[mm]	Hloubka záběru
a_e2	[mm]	Šířka záběru
k_f2	[°]	Úhel nastavení hlavního ostří
φ_2	[°]	Úhel posuvového pohybu
n_2	[min ⁻¹]	Otáčky nástroje
v_f2	[mm/min]	Posuvová rychlost
A_d2	[mm ²]	Jmenovitý průměr třísky
φ_z2	[°]	Úhlová rozteč zubů
ψ_2	[°]	Úhel záběru
n_z2	[-]	Počet zubů v záběru

h_{m2}	[mm]	Průměr tloušťky třísky
k_{cf2}	[MPa]	Měrná řezná síla
F_{c2}	[N]	Celková řezná síla
M_{cf2}	[Nm]	Řezný krouticí moment
D_3	[m]	Průměr nástroje (vrták)
z_3	[-]	Počet zubů nástroje
v_{c3}	[m/min]	Řezná rychlost
f_3	[mm/ot.]	Posuv na otočku
k_{v3}	[°]	Úhel nastavení hlavního ostří
n_3	[min ⁻¹]	Otáčky nástroje
f_{z3}	[mm/zub]	Posuv na zub
h_{d3}	[mm]	Jmenovitá tloušťka třísky
b_{d3}	[m]	Jmenovitá šířka zubu
A_{d3}	[mm ²]	Jmenovitý průřez třísky
k_{c3}	[MPa]	Měrná řezná síla
F_{1c3}	[N]	Řezná síla na jeden břit
F_{c3}	[N]	Celková řezná síla
M_{c3}	[Nm]	Řezný krouticí moment
F_{fv3}	[N]	Posuvová síla na vrták
D_4	[m]	Průměr nástroje (vrták)
z_4	[-]	Počet zubů nástroje
v_{c4}	[m/min]	Řezná rychlost
f_4	[mm/ot.]	Posuv na otočku
k_{v4}	[°]	Úhel nastavení hlavního ostří
n_4	[min ⁻¹]	Otáčky nástroje
f_{z4}	[mm/zub]	Posuv na zub
h_{d4}	[mm]	Jmenovitá tloušťka třísky
b_{d4}	[m]	Jmenovitá šířka zubu
A_{d4}	[mm ²]	Jmenovitý průřez třísky
k_{c4}	[MPa]	Měrná řezná síla
F_{1c4}	[N]	Řezná síla na jeden břit
F_{c4}	[N]	Celková řezná síla
M_{c4}	[Nm]	Řezný krouticí moment
F_{fv4}	[N]	Posuvová síla na vrták
n_{p1}	[min ⁻¹]	Jmenovité výstupní otáčky
n_{p4}	[min ⁻¹]	Jmenovité výstupní otáčky
i_{14}	[-]	Převodový poměr

h_{a0}	[-]	Součinitel výšky zubu
α	[°]	Úhel profilu
m_n	[mm]	Modul ozubení
a_k	[-]	Počet satelitů
z_{min}	[-]	Minimální počet zubů bez podřezání
i_{14n}	[-]	Návrhový převodový poměr
z_{p2}	[-]	Počet zubů satelitu
z_{p3}	[-]	Počet zubů korunového kola
n_{p2}	[min ⁻¹]	Otáčky satelitu
d_{p1}	[mm]	Průměr roztečné kružnice central. kola
d_{p2}	[mm]	Průměr roztečné kružnice satelitů
d_{p3}	[mm]	Průměr roztečné kružnice korun. kola
p	[mm]	Rozteč
h_a	[mm]	Výška hlavy zubu
h_f	[mm]	Výška paty zubu
s_1	[mm]	Tloušťka zubu
c	[mm]	Hlavová vůle
a_{12}	[mm]	Osová vzdálenost centrálního kola a satel.
F_{ap}	[N]	Sílové působení v ose od obrábění
F_f	[N]	Tangenciální sílové působení od obrábění
P_1	[N]	Ekvivalentní dynamické zatížení
F_{Br}	[N]	Radiální síla v bodě B
L_{10B}	[hod]	Životnost ložiska v bodě B
Re	[MPa]	Mez kluzu
R_m	[MPa]	Mez pevnosti
k_t	[-]	Koeficient bezpečnosti v tahu/tlaku
k_o	[-]	Koeficient bezpečnosti v ohybu
k_s	[-]	Koeficient bezpečnosti ve smyku
σ_{td}	[MPa]	Dovolené napětí v tahu/tlaku
σ_{od}	[MPa]	Dovolené napětí v ohybu
τ_{sd}	[MPa]	Dovolené napětí ve smyku
D_{v1}	[mm]	Vnější průměr v průřezu I.
d_{v1}	[mm]	Vnější průměr v průřezu I.
R_1	[mm]	Přechodový poloměr v průřezu I.
α_{k1}	[-]	Součinitel koncentrace namáhané krutem
α_{o1}	[-]	Součinitel koncentrace namáhané ohybem
W_{k1}	[mm ³]	Průřezový modul v krutu

τ_{k1}	[MPa]	Nominální napětí v krutu
τ_{m1}	[MPa]	Maximální smykové napětí
W_{o1}	[mm ³]	Průřezový modul v ohybu
M_{oI}	[Nmm]	Ohybový moment působící v řezu I.
σ_{o1}	[MPa]	Napětí v ohybu
σ_{ot1}	[MPa]	Tlakové napětí
σ_{m1}	[MPa]	Maximální normálové napětí
σ_{tr1}	[MPa]	Redukované napětí na základě Tresca
k_1	[-]	Bezpečnost vůči meznímu stavu pružnosti

SEZNAM TABULEK

TAB 1)	NAREX ZP/10X.....	13
TAB 2)	BENZ	14
TAB 3)	BIG KAISER-BVD40/50.....	14
TAB 4)	ATS -602 SERIES SPINDLES	15
TAB 5)	BIG KAISER – RBX12	15
TAB 6)	NSK NAKANISHI – XPEED1600	15
TAB 7)	RICOCNC-VFD.....	16
TAB 8)	NSK-NAKANISHI-HES810	16
TAB 9)	PARAFATE-MZ01	16
TAB 10)	ZVOLENÉ NÁSTROJE PRO TŘÍSKOVÉ OBRÁBĚNÍ	17
TAB 11)	PARAMETRY ČELNÍ FRÉZY F_1.....	18
TAB 12)	PARAMETRY ČELNÍ FRÉZY F_2.....	21
TAB 13)	PARAMETRY VRTÁKU V_3.....	25
TAB 14)	PARAMETRY VRTÁKU V_4	28
TAB 15)	SHRNUTÍ ŘEZNÝCH SIL A MOMENTŮ	30
TAB 16)	VSTUPNÍ PARAMETRY PLANETOVÉ PŘEVODOVKY.....	31
TAB 17)	VYSOCE PŘESNÉ LOŽISKO 7207 CD/HCP4A [16]	37
TAB 18)	PARAMETRY MATERIÁLU 14 220	39
TAB 19)	PARAMETRY V MÍSTĚ I.....	41

SEZNAM OBRÁZKŮ

OBR. 1) NAREX-ZP/10X [1].....	13
OBR. 2) BENZ [2]	14
OBR. 3) BIG KAISER-BDV40/50 [3].....	14
OBR. 4) ATS-602 SERIE SPINDLES [4].....	15
OBR. 5) BIG KAISER-RBX12 [5].....	15
OBR. 6) NSK NAKANISHI-XPEED1600 [6]	15
OBR. 7) RICO CNC-VFD [7].....	16
OBR. 8) NSK-NAKANISHI-HES810 [8]	16
OBR. 9) PARAFIATE-MZ01 [9]	16
OBR. 10) ČELNÍ FRÉZOVÁNÍ [10]	17
OBR. 11) PROCES FRÉZOVÁNÍ [11]	17
OBR. 12) VELIKOST TRÍSKY DO NEPŘEDVRTANÉ A PŘEDVRTANÉ DÍRY [13] 24	
OBR. 13) SCHÉMA ŘEZNÝ SIL PŘI VRTÁNÍ [13]	24
OBR. 14) SCHÉMA PLANETOVÉ PŘEVODOVKY [14]	31
OBR. 15) SILOVÉ PŮSOBENÍ NA VÝSTUPNÍ HŘÍDEL	35
OBR. 16) ZRYCHLOVACÍ FRÉZOVACÍ HLAVA	44
OBR. 17) ZRYCHLOVACÍ FRÉZOVACÍ HLAVA	45
OBR. 18) ŘEZ ZRYCHLOVACÍ FRÉZOVACÍ HLAVOU	46
OBR. 19) ŘEZ PŘÍVODU MAZIVA PRO LOŽISKA	47

SEZNAM PŘÍLOH

Výkresová dokumentace

1. Výkres sestavy zrychlovací frézovací hlavy s kusovníkem
2. Výkres pouzdra ložisek
3. Výkres výstupního hřídele