

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: N2301 Strojní inženýrství  
Studijní obor: Strojírenská technologie – technologie obrábění

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Využití CNC soustružnického centra pro výrobu odvalovací frézy

Autor: **Bc. Jan KODÝDEK**

Vedoucí práce: **Ing. Jiří VYŠATA, Ph.D**

Akademický rok 2016/2017

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
Fakulta strojní  
Akademický rok: 2016/2017

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Jan KODÝDEK**  
Osobní číslo: **S14N0076P**  
Studijní program: **N2301 Strojní inženýrství**  
Studijní obor: **Strojírenská technologie - technologie obrábění**  
Název tématu: **Využití CNC soustružnického centra pro výrobu odvalovací frézy**  
Zadávající katedra: **Katedra technologie obrábění**

### Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Úvod do problematiky a cíle řešení
2. Analýza současného stavu výroby
3. Analýza obecných způsobů výroby
4. Matematický model kinematiky obrábění
5. Tvorba programu
6. Technicko-ekonomické zhodnocení
7. Závěr

Rozsah grafických prací: **dle potřeby**  
Rozsah kvalifikační práce: **50 - 70 stran**  
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná**

Seznam odborné literatury:

- **JANDEČKA, K., ČESÁNEK, J., KOŽMÍN, P.:** Programování NC strojů. Plzeň : ZČU, 2000
- **PŘIKRYL, Z., MUSÍLKOVÁ, R.:** Technologie obrábění. Praha : SNTL 1982
- **STANĚK, J., NĚMEJC, J.:** Metodika zpracování a úprava diplomových prací. Plzeň : ZČU, 2005
- **VRABEC, M., MÁDL, J.:** NC programování v obrábění. Praha : ČVUT, 2004
- **VLACH, B.:** Technologie obrábění a montáže. Praha: SNTL, 1990
- **SIMENS :** Programovací příručka SINUMERIK 840D sl / 828D Základy. 2010
- **SIMENS :** Programovací příručka SINUMERIK 840D sl / 828D Pro pokročilé. 2010

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Jiří Vyšata, Ph.D.**  
Katedra technologie obrábění  
Konzultant diplomové práce: **Ing. Luboš Kroft**  
Katedra technologie obrábění

Datum zadání diplomové práce: **17. října 2016**  
Termín odevzdání diplomové práce: **2. června 2017**



Doc. Ing. Milan Edl, Ph.D.  
děkan



Doc. Ing. Jan Řehoř, Ph.D.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 19. října 2016

## **Prohlášení o autorství**

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

V Plzni dne: .....

.....  
podpis autora

## **Poděkování**

Chtěl bych touto cestou poděkovat především vedoucímu mé diplomové práce panu Ing. Jiřímu Vyšatovi, Ph.D za ochotu, trpělivost a cenné rady při tvorbě této práce. Déle děkuji mému konzultantovi panu Ing. Luboši Kroftovi za věcné rady při tvorbě programu v praktické části. Poděkování patří také mé rodině a přítelkyni za psychickou, ale také finanční podporu během celé doby mého studia.

## ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

<b>AUTOR</b>	Příjmení Bc. Kodýdek	Jméno Jan	
<b>STUDIJNÍ OBOR</b>	N2301 „Strojírenská technologie – technologie obrábění“		
<b>VEDOUCÍ PRÁCE</b>	Příjmení Ing. Vyšata, Ph.D	Jméno Jiří	
<b>PRACOVISŤE</b>	ZČU - FST - KTO		
<b>DRUH PRÁCE</b>	<b>DIPLOMOVÁ</b>	<del><b>BAKALÁŘSKÁ</b></del>	<b>Nehodící se škrtněte</b>
<b>NÁZEV PRÁCE</b>	Využití CNC soustružnického centra pro výrobu odvalovací frézy		

<b>FAKULTA</b>	Strojní	<b>KATEDRA</b>	KTO	<b>ROK ODEVZD.</b>	2017
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

### POČET STRAN

<b>CELKEM</b>	76	<b>TEXTOVÁ ČÁST</b>	66	<b>GRAFICKÁ ČÁST</b>	10
---------------	----	---------------------	----	----------------------	----

<b>STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK)</b>	Práce se zabývá zkouškou nové technologie výroby odvalovací frézy s využitím CNC soustružnického centra. Důvodem je nahrazení konvenčních stojů, konkrétně frézky na výrobu šroubovitě drážky, frézky na výrobu podélné drážky a podtáčecího soustruhu.
<b>KLÍČOVÁ SLOVA</b>	odvalovací fréza, CNC soustružnické centrum, technologická inovace, trochoidní frézování

## SUMMARY OF DIPLOMA SHEET

<b>AUTHOR</b>	Surname Bc. Kodýdek	Name Jan	
<b>FIELD OF STUDY</b>	N2301“ Manufacturing Processes – Technology of Metal Cutting“		
<b>SUPERVISOR</b>	Surname Ing. Vyšata, Ph.D.	Name Jíří	
<b>INSTITUTION</b>	ZČU - FST - KTO		
<b>TYPE OF WORK</b>	<b>DIPLOMA</b>	<b>BACHELOR</b>	<b>Delete when not applicable</b>
<b>TITLE OF THE WORK</b>	The use of a CNC turning center for a hob cutter manufacturing		

<b>FACULTY</b>	Mechanical Engineering	<b>DEPARTMENT</b>	Machining Technology	<b>SUBMITTED IN</b>	2017
----------------	------------------------	-------------------	----------------------	---------------------	------

### NUMBER OF PAGES

<b>TOTALLY</b>	76	<b>TEXT PART</b>	66	<b>GRAPHICAL PART</b>	10
----------------	----	------------------	----	-----------------------	----

<b>BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS</b>	This thesis is focused on test of a new manufacturing technology of a hob cutter with using the CNC turning center. The reason is a replacement of a conventional machines, especially a milling machine for manufacturing of the helical groove, a milling machine for manufacturing of the longitudinal groove and the backing off lathe.
<b>KEY WORDS</b>	hob cutter, CNC turning center, technological innovation, trochoid milling

## Obsah

1	Úvod do problematiky a cíle řešení .....	9
1.1	Smysl práce a cíle řešení .....	9
2	Analýza současného stavu výroby .....	10
2.1	Popis současné výroby.....	10
2.2	Problémy výroby .....	17
3	Analýza obecných způsobů výroby .....	18
3.1	Posouzení technologičnost konstrukce .....	19
3.2	Popis možných způsobů výroby .....	20
3.2.1	První způsob .....	20
3.2.2	Druhý způsob .....	21
3.2.3	Třetí způsob .....	23
3.3	Popis výrobních prostředků .....	25
3.4	Ověření možností stroje .....	27
3.5	Výběr nejvýhodnějších způsobů pro realizaci zkoušky .....	30
3.5.1	Náklady na první způsob výroby .....	33
3.5.2	Náklady na druhý způsob výroby.....	35
3.5.3	Náklady na třetí způsob výroby .....	37
3.5.4	Vyhodnocení výrobních nákladů a časů $t_{AS}$ .....	38
4	Zkoušky vybraných způsobů výroby .....	39
4.1	Matematický model kinematiky obrábění pro druhý způsob .....	40
4.2	Program pro druhý způsob .....	50
4.3	Matematický model kinematiky obrábění pro třetí způsob .....	54
4.4	Program pro třetí způsob .....	57
4.5	Zkouška výroby .....	57
5	Technicko – ekonomické hodnocení .....	60
5.1	Technická část .....	60
5.2	Ekonomická část.....	61
6	Závěr .....	62
	Seznam použité literatury .....	63
	Seznam obrázků .....	64
	Seznam tabulek .....	66
	PŘÍLOHA č. 1 .....	67
	PŘÍLOHA č. 2 .....	69
	PŘÍLOHA č. 3 .....	71
	PŘÍLOHA č. 4 .....	73
	PŘÍLOHA č. 5 .....	75

## Seznam použitých zkratk a symbolů

CNC	číslicové řízení počítačem – z anglického „computer numerical control“
NC	číslicové řízení – z anglického „numerical control“
CAM	počítačová podpora obrábění – z anglického „computer aided manufacturing“
RTI	Regionální technologický institut Fakulty strojní Západočeské univerzity
KTO	Katedra technologie obrábění Fakulty strojní Západočeské univerzity
R	poloměr
D	průměr
mm	milimetr
°	stupeň
∅	průměr
SK	slinutý karbid
HSS	rychlořezná ocel
"	palec
MPa	megapascal
min	minuta
hod	hodina
HB	tvrdost podle Brinella



# 1 Úvod do problematiky a cíle řešení

V průmyslu je velmi často potřeba vyrábět speciální výrobky a jejich výroba bývá podmíněna existencí speciálních strojů. Moderní stroje s NC řízením a vybavením by se mohly v některých (možná ale v mnohých) případech uplatnit i při výrobě speciálních nástrojů a nahradit tak speciální konvenční stroje.

Z toho důvodu je výzkum v oblasti využití moderních obráběcích center pro výrobu speciálních výrobků a nacházení nových možností využití těchto center rozhodně zajímavou činností. Zmíněný výzkum může přispět k novému nasazení těchto strojů, ale i k případnému dalšímu posunu pro možnosti dalšího rozšiřování jejich výrobních možností, jakožto inspirace pro konstruktéry obráběcích strojů. Taková činnost také jistě přispěje k rozšíření pohledu a uvažování technologa v rámci podmínek, kdy se stále více v praxi vyskytují obráběcí centra s širokými možnostmi použití, s často značným počtem řízených os a vybavená případně i různými doplňkovými agregáty, které možnosti výroby ještě rozšiřují.

Právě touto problematikou se v současnosti zabývá také společnost PILSEN TOOLS s.r.o (dále v práci označována jen jako *společnost*), vyrábějící obráběcí nástroje. Ta stojí před rozhodnutím, zda renovovat stávající více než padesát let staré stroje, přestat vyrábět některé položky sortimentu, jejichž výroba je podmíněna zmíněnými speciálními stroji, anebo se pokusit zavést výrobu s využitím jiných strojů, jimiž disponuje nebo může disponovat. Tyto stroje mohou díky moderním koncepcím a CNC řízení zvládnout i práce, jež by jinak musely provádět stroje speciální. Proto stojí za zvážení prověřit, zda je poslední z uvedených možností proveditelná s přiměřeným ekonomickým efektem. Proto je potřeba vytvořit novou technologii výroby.

## 1.1 Smysl práce a cíle řešení

Jak již bylo v úvodu zmíněno, společnost se potýká s potížemi souvisejícími s dosluhujícím strojním vybavením. Konkrétně se jedná o podtáčecí soustruh a takzvanou šnekovou frézku. Nástrojem, kterého se tento problém citelně dotýká, je odvalovací fréza. Největší problém nastává při výrobě její řezné části. Z tohoto důvodu nebude práce řešit problematiku výroby odvalovací frézy jako celku, nýbrž pouze výrobu řezné části, konkrétně její hrubování a předdokončování (tedy bez veškerých dokončovacích operací jako je broušení a ostření). Problémy, které jsou s tím v současné době spojené, budou podrobněji popsány níže. Jedním z cílů je tedy prozkoumat možnost výroby řezné části jedné konkrétní frézy na CNC stroji ověřením jeho kinematických možností. Volba stroje bude popsána níže v kapitole 3 Analýza obecných způsobů výroby. Dalším cílem je prozkoumat a také ověřit některé možné strategie použitelné pro výrobu na tomto stroji.

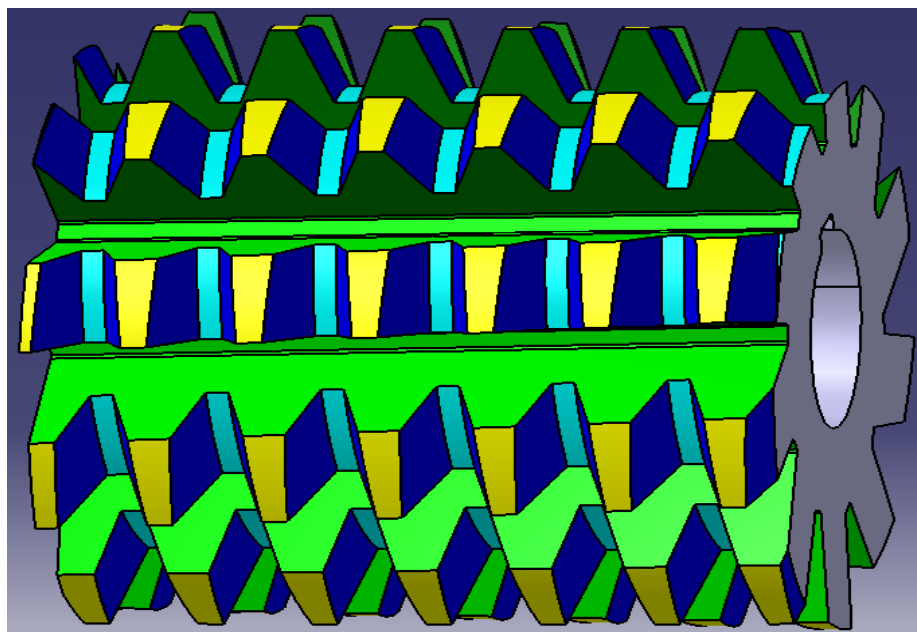
## 2 Analýza současného stavu výroby

V úvodu bylo zmíněno, že je potřeba vytvořit novou technologii výroby odvalovací frézy. V následující kapitole bude popsána současná technologie tak, jak je ve firmě realizována, a to hned ze dvou důvodů. Prvním důvodem je uvedení problémů, které výrobu doprovázejí, a tedy i zdůvodnění nutnosti nalezení nové technologie. Dalším důvodem je touto cestou také prozkoumat možnosti současného strojového a nástrojového vybavení pro případné využití v nové technologii. Největší pozornost bude věnována výrobě řezné části frézy, jelikož ta je pro budoucí funkci stěžejní a její výroba je také na celém nástroji nejsložitější. Navíc její výrobu provázejí největší komplikace, což bude podrobněji popsáno níže. Ostatní části výroby nejsou nijak výrobně složité a s jejich realizací nejsou ve firmě problémy. Podrobněji také nebudou popsány dokončovací operace (broušení, ostření), jelikož ty nejsou podstatou problému, a ani nová technologie se jimi nebude zabývat. Její hlavní podstatou je hrubování a předdokončování řezné části odvalovací frézy.

V práci je níže použito několik dokumentů, (výkresy a technologický postup) vypůjčených z konstrukčního oddělení společnosti. Z důvodů ochrany duševního vlastnictví, byly části dokumentů, jež nejsou pro účely práce vyloženě potřebné, odstraněny. Jedním z těchto údajů je číslo výkresu. Pro přehlednost a jednoznačnost bylo vytvořeno vlastní číslování výkresů. To má následující formát: „zkratka názvu nástroje-charakteristický rozměr-počet zubů-řezný materiál nástroje“. Zde je uveden jednoduchý obecný příklad. Kdybychom chtěli označit 20 zubou závitovou frézou ze slinutého karbidu o průměru 50 mm, označení by bylo: ZF-Ø50-10z-SK.

### 2.1 Popis současné výroby

Tato podkapitola se bude věnovat stávajícímu výrobnímu procesu odvalovací frézy. Před samotným popisem je dobré pro lepší orientaci zavést několik pojmů. Ty budou používány dále v celé práci a slouží pro jednoznačný popis řezné části frézy. Označení lze provést dvěma pohledy. Pro obecné označení tvaru jsou zavedeny 3 základní pojmy. „Šroubovitá drážka“ je označena modrou barvou (*Obr. 1*). Tato drážka je dále tvořena boky zubů (tmavě modrá barva) a dnem drážky (světle modrá barva). „Podélné drážky“ značí zelená barva, hlavy zubů jsou žluté. Druhé označení je z pohledu geometrie břitu. Čelo je označeno tmavě zelenou barvou. Hřbet břitu tvoří hlava a boky zubu. Je tedy znázorněn žlutou a tmavě zelenou barvou. Hřbetem ovšem již není dno šroubovité drážky (světle modrá barva), jelikož to se při obrábění (odvalování) nedostává do záběru.



Obr. 1: Model odvalovací frézy vytvořený v softwaru Catia V5R21 s barevným rozlišením jednotlivých prvků tvořících řeznou část

Po zavedení pojmů popisující frézu, je již možné přejít k samotnému popisu současné výrobní technologie. Zdrojů, od kterých byly informace získány, bylo více. První informace byly zjištěny od konstruktéra a technologa, pracujících ve společnosti a zabývajících se problematikou odvalovacích fréz. Pro lepší názornost a pochopení výroby fréz, byl navštíven výrobní závod společnosti. Pozornost byla věnována strojům pro hrubování a předdokončování řezné části. Při té příležitosti byly pořízeny fotografie strojů a některých nástrojů, použitých v práci níže. Další praktické informace o výrobním procesu byly zjištěny od obsluhy některých strojů. Hlavním zdrojem informací byl ovšem technologický postup (Obr. 2).

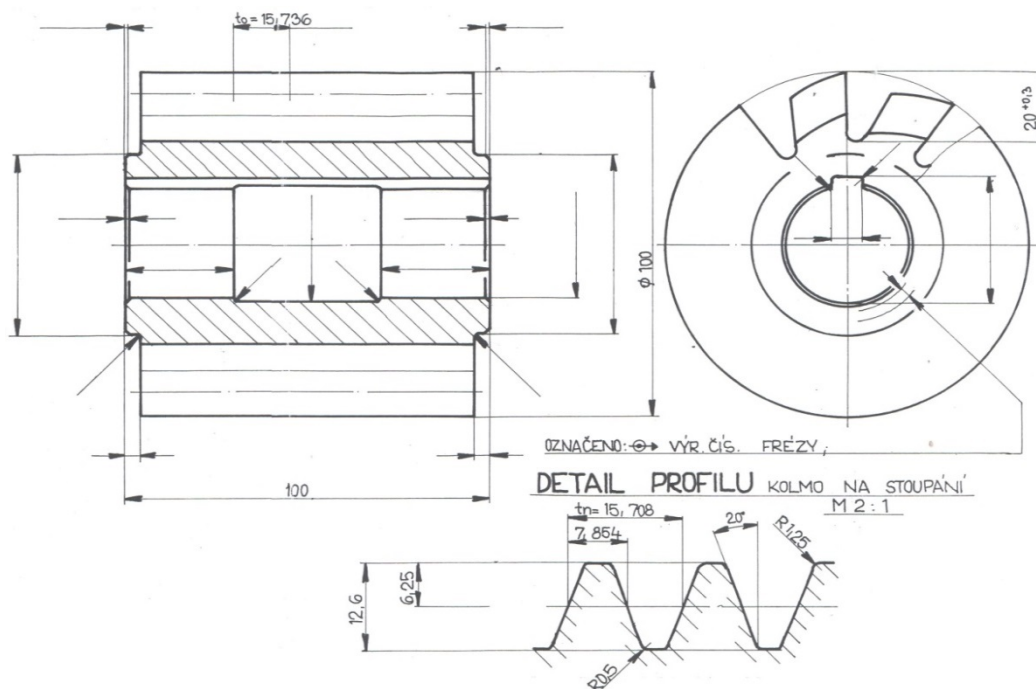
Dílec:		<b>TECHNOLOGICKÝ POSTUP</b>		List: 1/3		
				Datum:		
				Autor:		
Název: fréza odvalovací m5x20° OF-m5x20°-10z-HSS		DUŠEVNÍ VLASTNICTVÍ INTELLECTUAL PROPERTY GEISTIGE EIGENTUM ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СОБСТВЕННОСТЬ PILSEN TOOLS s.r.o.				
Středisko:						
Pozn.:						
Pozice	Název	Výkres/ČSN/Jakost	Množství	MJ		
000001	TYČ KR 110			kg		
Délka 1 kus	102	Referenční množství Prořez	1 6			
Typ	Operace	Tarif	Středisko / Koop Pracoviště	TBC	TAC	Název
J	10	6	141 094440 Zámečnick	1,00min.	1,00min.	Odstranit otřep
Odstranit otřep						

Obr. 2: Část technologického postupu

Ten obsahuje mnoho užitečných informací. Z hlavičky lze vyčíst autora, datum zhotovení, počet listů, název součástky, číslo výkresu a označení dílce. V další části se nachází informace

o polotovaru. Lze vyčíst typ a rozměry polotovaru, hmotnost, normu a množství. Další část již informuje o samotné operaci. Z té lze zjistit typ operace, její číslo (jsou číslovány po 10), název a tarif. Dále označení střediska a pracoviště i s jeho názvem. Jako poslední jsou zde uvedeny časy  $t_{AC}$  a  $t_{BC}$  značící jednotkový a dávkový čas s podílem směnového času.

Při analýze současného stavu bude popisována konkrétní odvalovací fréza s číslem výkresu OF-m5x20°-10z-HSS. Na obrázku je vidět pouze detail výkresu (Obr. 3), zatímco celý výkres se nachází v příloze (viz PŘÍLOHA č. 1).

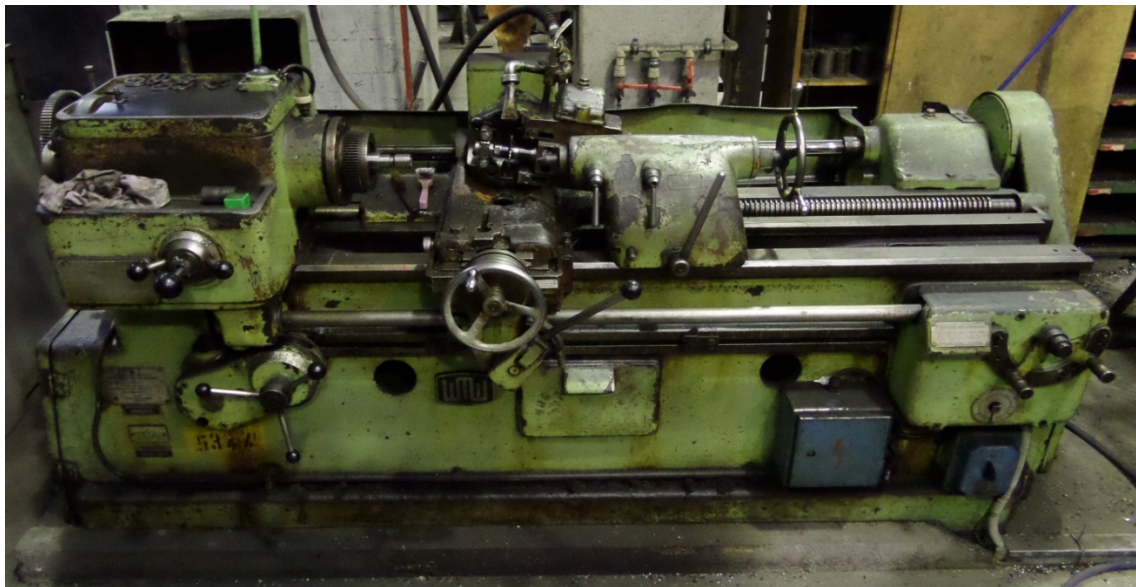


Obr. 3: Detail výkresu odvalovací frézy OF-m5x20°-10z-HSS

Pro názornost bude pro stejnou frézu v následující kapitole navrhována nová technologie výroby řezné části. Na tomto místě je vhodné popsat ji o něco detailněji. Z označení je vidět, že fréza má modul 5, úhel záběru 20°, 10 zubů a je vyrobena z rychlořezné oceli. Konkrétně se jedná o ocel ČSN 19 802 která je před obráběním ve stavu .3, tedy žíhaná na měkko. Konečný stav je .4, tedy kalená. Na této fréze se nacházejí 2 šroubovice. Jedna je pravá a má v normálové rovině stoupání 15,708 mm. Je zde označena jako „šroubovitá drážka“. Druhá šroubovice je levá a má stoupání 175", tedy 4445 mm. Pro toto velké stoupání se na první pohled jeví jako „přímá“. Je tedy označena jen jako podélná. Průměr hlavové kružnice po obrobení je 100/16 a délka taktéž 100 mm.

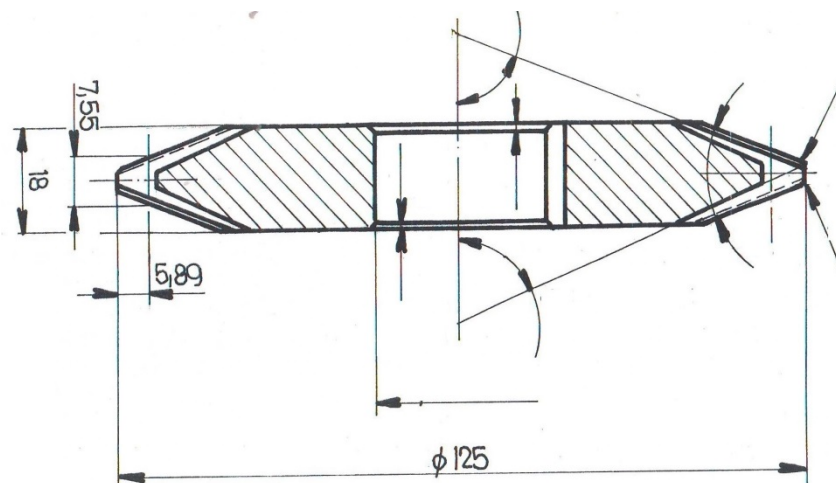
Po popisu vyráběné frézy je již možné zmínit současný výrobní proces. Polotovarem je přířez z kruhové tyče  $\varnothing 110$  mm o délce 102 mm. Prvním pracovištěm je zámečnický, který odstraní ořep vzniklý po uříznutí tyče na potřebnou délku. Prvním strojem je univerzální hrotový soustruh. Zde je vyrobena díra o průměru 31,5 H8, vnější průměr s přídávkem 1 mm, čela s přídávkem 0,5 mm a nákržky s přídávkem 2 mm na průměr. Dále se vyrobí na vodorovné protahovačce hotově drážka pro pero. Alternativním strojem je obrážečka. Dále se na vodorovné hrotové brusce lehce obrousí čela.

V dalším kroku se již hrubuje řezná část frézy, konkrétně šroubovitá drážka, která je zde vyfrézována. Odvalovací frézy se vyrábějí dvěma způsoby dle velikosti jejich modulu. Do modulu 8 probíhá výroba na frézce, která je ve společnosti nazývána šnekovou (Obr. 4).



Obr. 4: Šneková frézka

Tento speciální konvenční stroj má při výrobě na trnu naražený polotovar, který je z jedné strany upnut ve sklíčidle hlavního horizontálního vřetena a z druhé strany podepřen koníkem. Obrobek koná rotační pohyb. Na příčném suportu je umístěno jedno menší vřeteno. Jeho osa vřetena je oproti hlavnímu vřetenu vykloněna o úhel stoupání šroubovitě drážky budoucí odvalovací frézy. V tomto menším vřetenu je umístěn nástroj. Jedná se o nástrčnou kotoučovou závitovou frézu s číslem výkresu ZF-Ø125-33z-HSS. Fréza má tedy průměr 125 mm, 33 zubů a je z rychlořezné oceli, dokonce stejné jako samotná odvalovací fréza. Tato fréza je speciálně zkonstruována pro tento konkrétní modul. Její detail je vidět na obrázku (Obr. 5) a celý výkres je k dispozici v příloze (viz PŘÍLOHA č. 2).



Obr. 5: Detail výkresu závitové frézy ZF-Ø125-33z-HSS

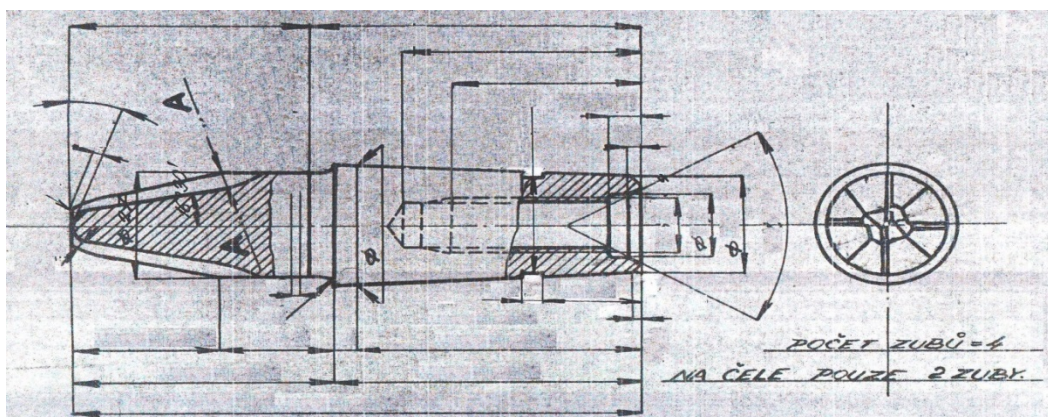
Fréza koná rotační pohyb, přísuv a zároveň posuv podél hlavního vřetena. Podélný posuv (realizovaný suportem) je kinematickou vazbou spojen s otáčkami obrobku tak, aby vznikla požadovaná šroubovice.

V popisu současné výroby je sice popisována odvalovací fréza o modulu 5, jistě je ale vhodné zmínit, jak probíhá výroba u fréz větších modulů. U fréz s modulem 8 a větším se používá pro hrubování šroubovitě drážky frézka, které je ve společnosti označována jako závitová (Obr. 6).



Obr. 6: Závitová frézka

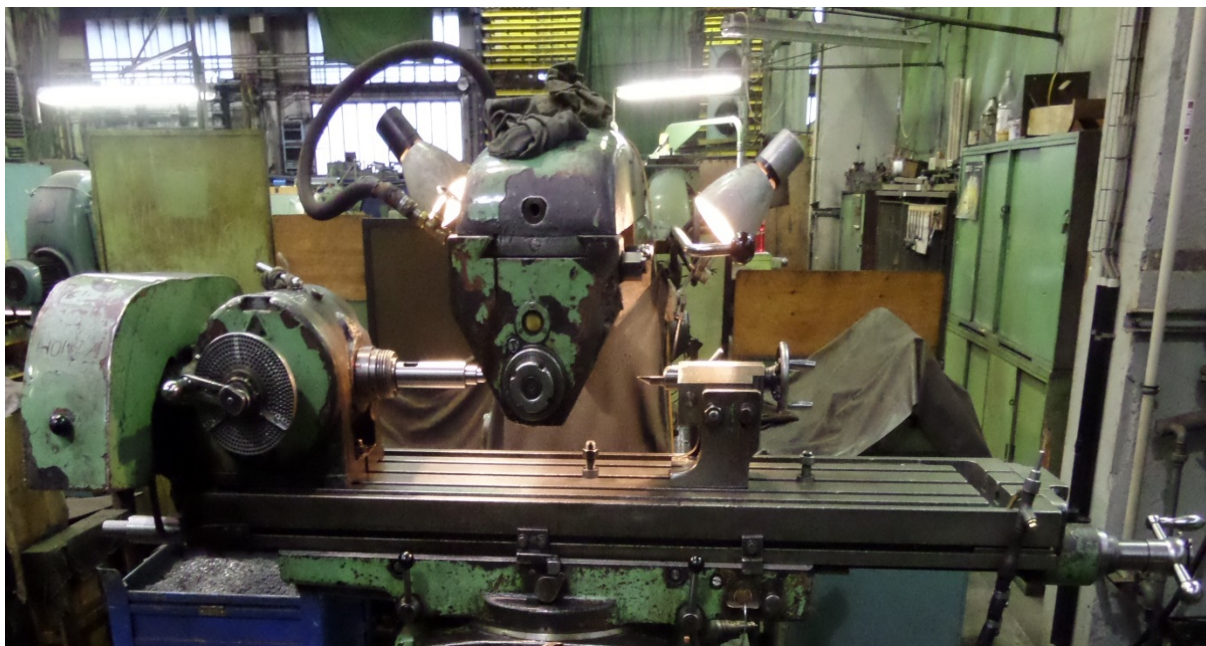
Jedná se o konvenční stoj, který má při výrobě na trnu naražený polotovár, jenž je z jedné strany upnut ve sklíčidle hlavního horizontálního vřetena a z druhé strany podepřen koníkem. Obrobek koná rotační pohyb. Na příčném suportu je umístěno vedlejší horizontální vřeteno, které má oproti hlavnímu vřetenu pootočenou osu rotace o  $90^\circ$ . V tomto vedlejší vřetenu je upnut nástroj, který koná také rotační pohyb. Nástrojem je čepová fréza ČF- $40^\circ$ -4z-HSS. Tato fréza je specifická kuželovým profilem řezné části. Kužel má vrcholový úhel  $40^\circ$ . Tato konkrétní fréza svým profilem odpovídá šroubovitě drážce odvalovací frézy OF-m $9 \times 20^\circ$ -10z-HSS (opět ČSN 19 802.4). Tato fréza je tedy speciální pro tento konkrétní modul. Detail je možné vidět na obrázku (Obr. 7) a celý výkres v příloze (PŘÍLOHA č. 3).



Obr. 7: Detail výkresu čepové frézy ČF- $40^\circ$ -4z-HSS

Tato fréza je do vřetena upnuta pomocí kuželové stopky (kuželovitost 1:10) a závitu W 5/8". Fréza koná rotační pohyb, přísuv a podélný posuv podél osy rotace hlavního vřetena. Tento podélný posuv je kinematickou vazbou spřažen s otáčkami obrobku pro vyfrézování požadované šroubovice.

Dalším krokem je výroba podélných drážek. Jejich výroba probíhá na univerzální konzolové frézce s vodorovným stolem (*Obr. 8*).



**Obr. 8: Detail univerzální konzolové frézky s dělicím přístrojem**

Tento stroj sice není přímo jednoúčelový, ale pro potřebu výroby odvalovací frézy je speciálně seřízen a vybaven dělicím přístrojem. Výroba probíhá tak, že dělicí přístroj je kinematickou vazbou spojen s posuvem stolu, tudíž při jeho posuvu se obrobek otáčí a vzniká tak podélná drážka. Samozřejmě za současné rotace frézy. Jedná se o nástrčnou kotoučovou závitovou frézu, jejíž profil je shodný s profilem podélné drážky. Číslo výkresu je ZF-Ø120-14z-HSS. Samotný výkres ale bohužel není k dispozici. Z označení je patrné že má průměr 120 mm a 14 zubů. Materiálem je ocel ČSN 19 802.4. Fréza je opět speciálně zkonstruována pro obrábění odvalovací frézy s modulem 5 a úhlem záběru 20°. Dále se frézují hlavy zubů. K tomu slouží nástrčná rádiusová fréza o poloměru R50 (její výkres také bohužel není k dispozici). Hlava zubu odvalovací frézy je teoreticky tvořena Archimédovou spirálou. To je rovinná křivka, jejíž poloměr lineárně roste s velikostí úhlu. V tomto případě je přistoupeno k mírnému zjednodušení, kdy je hlava zubu tvořena pouze kruhovým obloukem, jenž má stejný rádius jako hlavová kružnice odvalovací frézy (v tomto případě R50). Rozdíl je ale v tom, že střed oblouku tvořícího hlavu zubu je oproti středu hlavové kružnice vyosený. Rádiusová fréza tedy vytvoří na hlavách pouze oblouk s přídatkem pro ostření, při němž bude vytvořena samotná Archimédova spirála. Toto je poslední z hrubovacích operací.

Dále obrobek přechází na vodorovnou brusku na díry, přičemž je díra přebroušena na 31,8 H7. Takto vybroušená díra poté poslouží při upnutí na trn při soustružení.

Jak již bylo předesláno, přesune se následně výroba na soustruh. Jedná se o podtáčecí soustruh (*Obr. 9*), což je jednoúčelový konvenční stroj pro výrobu odvalovacích fréz a ozubených kol.



Obr. 9: Podtáčecí soustruh

Zde již dochází k předdokončování tvaru. To je charakteristické poměrně malým úběrem materiálu. Odstraní se materiál, který zanechaly hrubovací nástroje, ale zároveň je ponechán ještě přírůstek pro ostření. Nejprve jsou přímým tvarovým soustružnickým nožem (Obr. 10) obrobena boky zubů a to tak, že se na jednu hloubku třísky soustruží nejprve první a poté druhý bok šroubovitě drážky.



Obr. 10: Přímý tvarový soustružnický nůž

Právě zde je realizováno samotné „podtáčení“. Polotovár je naražen na trnu, jenž je z jedné strany upnutý ve sklícidlu a z druhé strany podepřené koníkem. Trn s obrobkem rotuje pomalými otáčkami. Nůž se pohybuje podél osy rotace (podélný posuv je pro vytvoření šroubovice kinematickou vazbou spojen s otáčkami vřetena), ale zároveň vniká do materiálu (kolmo na osu rotace obrobku), čímž vytváří Archimedovu spirálu. Po dosažení podélné drážky rychle odskočí, aby nedošlo ke kolizi se zubem, který bude obrábět jako další. Poté nástroj zajede opět do materiálu a celá akce se opakuje. Toto je princip podtáčení. Jeho realizace je uskutečněna pomocí vačkového mechanismu. Při soustružení boků zubů se zároveň obrobí rádiusy na dně šroubovitě drážky.

Jelikož přímý tvarový nůž obrobil boky šroubovitě drážky a rádiusy u jejího dna, zbývá obrobřit samotné dno této drážky. K tomu slouží upravený zapichovací nůž. Zde je také využito podtáčení. Poslední částí, která je soustružena pomocí podtáčení, jsou rádiusy mezi boky a hlavami zubů. K tomu slouží speciální tvarový nůž (Obr. 11), jenž obrábí najednou rádiusy po obou stranách šroubovitě drážky. Tímto je hotové předdokončení šroubovitě drážky.





Obr. 11: Tvarový nůž na rádiusy

Jako poslední jsou přesoustruženy nákrůžky, kde je ponechán přídavek pro broušení 0,5 mm na průměr a sraženy jeho hrany. K tomu slouží ale pouze „klasické“ soustružení, nikoli podtáčení.

Toto byla poslední předdokončovací operace. Po ní následuje tepelné zpracování, konkrétně žihání, kalení (do oleje) a popouštění.

Po tepelném zpracování následuje broušení. Nejprve se na vodorovné brusce na díry vybrousí načisto díra 32 H6. Poté jsou na vodorovné hrotové brusce načisto obrobena nákrůžky a čela frézy. Následuje vyostření podélných drážek na speciální brusce KAPP. Poslední operací je vyostření boků zubů, hlav zubů a dna šroubovité drážky. To vše probíhá na speciální brusce Klingelberg. Toto je poslední dokončovací operace a také poslední výrobní operace vůbec. Výše popsaná výroba je dále v práci označována jako „současná“ technologie, popřípadě výroba.

## 2.2 Problémy výroby

V předchozí podkapitole byl podrobněji popsán současný výrobní proces odvalovací frézy. Tato podkapitola se bude věnovat problémům výroby a tedy i zdůvodnění, proč je současná výroba již dále nerealizovatelná.

Prvním a také největším problémem je strojní vybavení. Ze strojů výše popsaných výrobu komplikují především stroje na hrubování a předdokončování šroubovité drážky, popřípadě hlav zubů. Pro výrobu odvalovací frézy jde tedy o problém zcela zásadní. Pro připomenutí se jedná o šnekovou frézku a podtáčeací soustruh. Problémy těchto strojů jsou vesměs obdobné. Jedná se o velmi letité stroje (některé jsou z doby Druhé světové války, jiné jsou dokonce předválečné), tudíž jejich opotřebením je již značné. S tím souvisí velké vůle v mechanické části stroje způsobující odchylky, které jsou již mimo výrobní tolerance. Největší problémy jsou s opotřebením ozubených kol v převodovém ústrojí. Jelikož se jedná o stroje speciální, není možné je nahradit jinými stroji ze strojového parku. Nabízí se tedy možnost renovace těchto strojů. Otázkou ovšem je, na kolik by taková renovace vyšla a zda by se vůbec vyplatila s ohledem na dlouhodobý výhled společnosti.

Druhým, a jistě ne méně podstatným, problémem je obsluha strojů. Zkušení pracovníci, z nichž někteří strávili u těchto speciálních strojů většinu svého profesního života, odcházejí do důchodu. Tito lidé znali stroj do posledního detailu a uměli do jisté míry jeho nepřesnosti a vady šikovně kompenzovat, čímž mohla výroba probíhat i nadále. Zaškolení nových pracovníků je nyní velice obtížné, jelikož po odchodu zkušených pracovníků chybí pro zaškolení nových lidí potřebné znalosti, které jsou u každého stroje značně specifické.

### 3 Analýza obecných způsobů výroby

Ve druhé kapitole byl popsán současný neuspokojivý stav strojního vybavení, potřebného pro hrubování a předdokončování řezné části frézy. To bez dalších investic do renovace již nebude možné dále dlouhodobě využívat. Nabízí se tedy otázka, jaký stroj (popřípadě stroje) pro výrobu řezné části použít.

Cílem společnosti není vymyslet novou technologii pouze pro jednu konkrétní odvalovací frézu. Tím je nalézt takovou technologii, která zohledňuje typovou variabilitu, jelikož frézy jsou vyráběny v různých modulech (největší firmou vyráběná fréza má modul 25). Toto ovšem není cíl této práce. Cílem je u vybraného stroje prozkoumat jeho kinematické možnosti a ověřit na něm vyrobitelnost řezné části odvalovací frézy. V případě že by se toto podařilo, mohla by se technologie dále rozvíjet, upravovat a případně aplikovat i na frézy jiných modulů. Pro účely ověření kinematiky bude navržena technologie opět pro odvalovací frézu o modulu 5 s číslem výkresu OF-m5x20°-10z-HSS (viz *Obr. 3*). Řešena bude pouze výroba (hrubování a předdokončování) řezné části frézy, jelikož výroba zbytku frézy nepředstavuje pro společnost v současnosti problém. Předpokladem je využití číslicového řízení, nejlépe CNC. Není ovšem rozhodující pouze způsob řízení stroje, ale také počet řízených os. Například v případě soustruhu je pro účely podtáčení potřeba současného řízení ve více osách (nikoli pouze ve standardních osách X a Z). Zvolení vhodného stroje může přinést také řadu výhod. Speciální stroje ve společnosti dnes používané (jak už označení napovídá) byly zkonstruovány pro konkrétní účel, který je neměnný (nebo jen velmi obtížně). Vhodný CNC stroj naproti tomu umožňuje větší variabilitu a tedy i možné využití jiných a progresivnějších strategií obrábění. Hledání těchto strategií je také jedním z cílů práce.

Samotná společnost disponuje několika CNC stroji včetně soustružnického a frézovacího centra. Ideální možností by tedy bylo pokusit se o výrobu na těchto strojích. Problémem ovšem je nemožnost odzkoušení za plného provozu. Z toho důvodu bylo potřeba hledat jiné relativně dostupné stroje. V úvahu tedy připadaly ty, nacházející se v halové laboratoři KTO, popřípadě v RTI. Po zjištění specifikací a prozkoumání jejich kinematických a výrobních možností bylo rozhodnuto vyzkoušet výrobu na CNC soustružnickém centru CTX BETA 1250 TC 4A od společnosti DMG MORI. Důvodů pro výběr tohoto stroje je hned několik. Jedná se o multiprofesní stroj s 12 řízenými osami, z nichž může vždy 10 pracovat současně. Dále disponuje hlavním vřetenem, protivřetenem, soustružnicko-frézovacím vřetenem a revolverovou hlavou.

Stěžení částí výroby je „podtáčení“. Jak již bylo výše zmíněno, v současnosti probíhá na speciálním podtáčecím soustruhu. Proto bylo právě soustružnické centrum prvním logickým návrhem a vzhledem ke kinematice a počtu řízených os je podtáčení pravděpodobně schopný. Jak plyne z výše popsaných možností, stroj je schopný vykonávat také frézovací operace, které jsou k výrobě řezné části nezbytné. Pokud tedy stroj zvládá soustružení i frézování (při maximálním využití 10 os), mohla by být celá řezná část vyhrubována a předdokončena na jedno upnutí. To by zkrátilo celý výrobní řetězec a zefektivnilo výrobu. Stroj bude podrobněji popsán níže v podkapitole 3.3.

### 3.1 Posouzení technologičnost konstrukce

Před samotnou výrobou je vhodné posoudit a zhodnotit případné obtíže dané konstrukcí výrobku, které by mohly nastat při výrobě, a které by ji mohly komplikovat. Lze ji pak tímto posouzením připravit na takové obtíže tak, aby byl jejich negativní dopad na náročnost a cenu výroby co nejmenší. Při posouzení technologičnosti se také může ukázat, že nároky některých rysů výrobku neodpovídají jeho budoucí funkci a tehdy je možné po dohodě s konstruktérem takové rysy vhodně změnit nebo upravit [1]. Důležité je zmínit, že z hlediska objemu výroby se jedná o kusovou výrobu. Posouzení bude probíhat opět pouze pro hrubování a předdokončování řezné části.

Odvalovací fréza je nástroj a je zde tedy nutné dbát na kvalitu materiálu, ze kterého se má vyrábět. Proto lze očekávat, že materiál výrobu ovlivní svou horší obrobiteľností, ale i vyšší pořizovací cenou. Fréza musí být tvrdá, odolná proti opotřebení a musí mít vysokou pevnost. Materiálem je ocel ČSN 19 802.3. Třída obrobiteľnosti (zjištěná z materiálového listu dané oceli) je 11b. S ohledem na tuto skutečnost je potřeba vhodně zvolit řezné podmínky. Jejich poměr vzhledem k etalonové oceli ČSN 12 050.1 lze přesně určit výpočtem. Řezná rychlost je přibližně o 60% nižší.

Při současné výrobě je polotovarem přířez z kruhové tyče o průměru 110 mm a délce 102 mm. S ohledem na tvar, rotační charakter a objem výroby odvalovací frézy, je kruhový polotovar z hlediska hospodárnosti vhodný. Otázkou je také jeho velikost. Pro velikost přídávku na průměr  $p$  tyčového polotovaru je možné použít například empirický vztah:

$$p = 0,05 \cdot D_{max} + 2 [mm] \quad (1)$$

Kde:  $D_{max}$  [mm] je největší průměr odvalovací frézy

Po dosazení do vzorce je výsledná velikost přídávku 7 mm, tudíž teoretický průměr polotovaru je 107 mm. Tyč o tomto průměru ovšem není normalizována. Nejbližší větší normalizovaný průměr je právě 110 mm. Zvolený polotovar lze tedy označit jako vhodný. Použit jako polotovar kruhovou tyč o průměru 107 speciálně vyrobenou pro tento účel by se vyplatilo pouze při extrémně velkých objemech výroby. Při kusové výrobě je to však bezpředmětné. Pro účely této práce bude ovšem předpřipravený polotovar ve tvaru odstupňované hřídele. Na obou koncích má průměr 50 mm, za který se upíná. Nejdůležitější je prostřední část o průměru 100 mm a délce 100 mm. Na té se vyrobí vlastní řezná část odvalovací frézy. Polotovar je podrobněji popsán v kapitole 4.

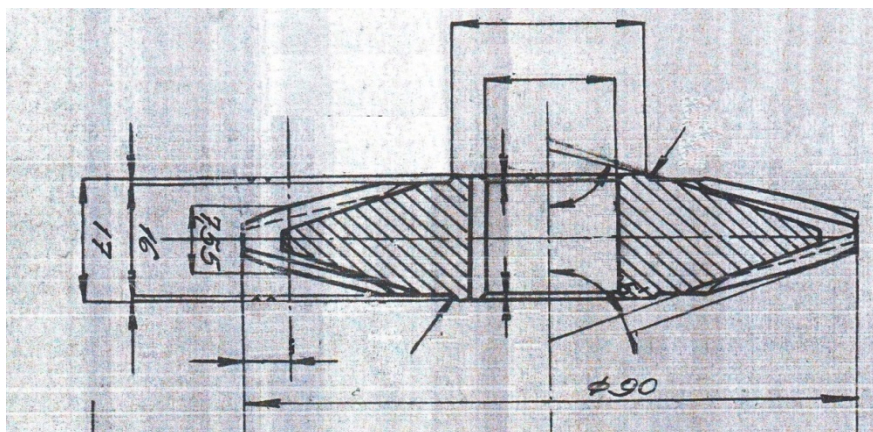
Při posuzování technologičnosti je dobré posoudit, zda jsou tvary jednotlivých ploch vyrobiteľné pomocí běžně dostupných prostředků. Ani jednu z drážek, které tvoří řeznou část frézy, nelze vyrobiť zcela jednoduchým technologickým způsobem. Už fakt, že jsou obě ve šroubovici, celou výrobu znesnadňuje. Také jsou zde plochy, které se musejí podtáčet. Ty jsou pro funkčnost frézy stěžejní a nelze je jakkoliv nahradit. Právě ověření jejich vyrobiteľnosti je jedním z cílů práce. Z hlediska velikosti této konkrétní frézy ( $m5 \times 20^\circ$ ) nejsou na velikost pracovního prostoru kladeny žádné speciální nároky.

## 3.2 Popis možných způsobů výroby

„Při výrobě jakékoliv součástky je vhodné navrhnout více způsobů výroby a poté z nich vybrat ten nejvhodnější. Není možné navrhnout pouze jednu technologii výroby a o ní pak s naprostou jistotou tvrdit že je nejvhodnější a jako jediná připadá v úvahu. Při výběru nejvhodnějšího způsobu se pohlíží na řadu aspektů, jako například: ekonomická náročnost, strojní čas, náročnost výroby z hlediska kvalifikace dělníka, množství použitých strojů a nástrojů atd. V případě odvalovací frézy je tedy také zapotřebí nalézt a posoudit různé způsoby výroby. Ne vždy se ale výběr nejvhodnějšího způsobu provádí takto. U zkušeného technologa, který má již za sebou několik let praxe, probíhá výběr vhodné varianty pouze v jeho mysli. Zde také samozřejmě vstupuje do návrhu více variant, ty jsou ale pouze myšlené“ [1]. Níže jsou popsány 3 navržené způsoby výroby.

### 3.2.1 První způsob

První myšlenkou bylo využití stávajících technologických principů a nástrojů. Ty ovšem již nelze (z výše zmíněných důvodů) použít na současných strojích. Tento způsob výroby v zásadě kopíruje původní technologii. Hlavní rozdíl je v použitém stroji. Tím je zde multiprofesní obráběcí centrum CTX BETA 1250 TC 4A. Ten při tomto způsobu vlastně simuluje kinematiku současných speciálních strojů. V původní technologii hrubuje nejprve šroubovitou drážku závitová fréza ZF-Ø125-33z-HSS (Obr. 5). Ta je ale z kinematických důvodů nepoužitelná, jelikož rozjezd v ose Y1 je pouze  $\pm 100$  mm. K této fríze existuje ovšem fréza ekvivalentní, která je již pro svůj menší průměr použitelná. Jedná se o závitovou frizu s označením výkresu ZF-Ø90-27z-HSS, také navrženou přímo pro obrábění odvalovací frézy  $m5 \times 20^\circ$ . Materiálem je opět ocel ČSN 19 802.4. Detail výkresu je na obrázku (Obr. 12) a celý je k dispozici v příloze (PŘÍLOHA č. 4).



Obr. 12: Detail výkresu ZF-Ø90-27z-HSS

Touto frézou se tedy nejprve vyhrubuje šroubovitá drážka. Dále jsou kotoučovou frézou (číslo výkresu ZF-Ø120-14z-HSS) obrobena podélné drážky. Poté radiusová fréza obrobí hlavy zubů. Na hlavách je také pouze kruhový oblouk. Tímto jsou dokončeny frézovací operace. Následuje soustružení za pomoci revolverové hlavy. Nejprve jsou vysoustruženy přímým tvarovým nožem (Obr. 10) boky po obou stranách šroubovitě drážky. Dále zapichovací nůž vysoustruží dno šroubovitě drážky. Posledním úsekem operace je, za použití tvarového nože (Obr. 11) výroba radiusů na vrcholu šroubovitě drážky.

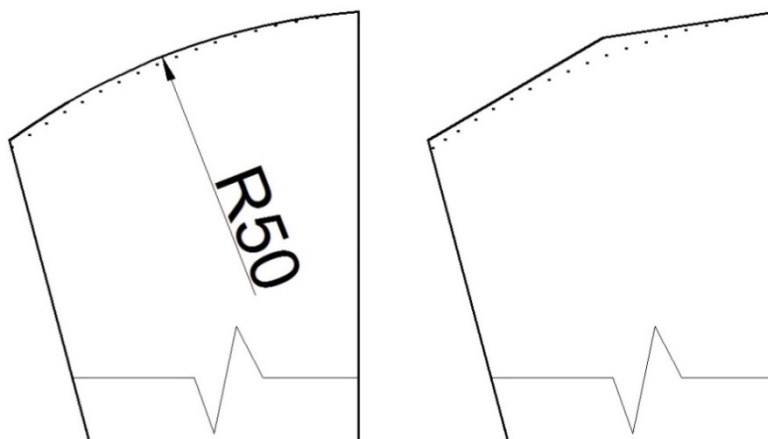
Výhodou toho způsobu jsou použité nástroje. Ty jsou speciálně navrženy a vyrobené pro výrobu odvalovacích fréz všech modulů, které společnost nabízí. Ta je také sama vyrábí, tudíž jsou snadno dostupné a levnější, než kdyby se musely nakupovat.

U tohoto způsobu ale nastává paradoxní situace, jelikož řezné nástroje jsou také jeho největší slabinou. Jsou vyrobené z rychlořezné oceli. V případě soustružnických nožů se tento materiál jeví jako vhodný. Důvod je ten, že centrum sice umožňuje vyvinout vyšší řeznou rychlost, ale z dynamických důvodů ji není možné použít. Jiná situace je ale u fréz. Jejich rychlost není nějak limitována otáčkami obrobku. Frézy se díky materiálu vyznačují nižší řezivostí, což zpřičňuje nižší produktivitu obrábění a prodlužuje strojní čas. Toto v konečném důsledku prodražuje výrobu. Důvodem je vyšší strojní hodinová sazba soustružnického centra. Ta je u centra přibližně 3,5 krát vyšší než u strojů ve společnosti. Teoreticky možným řešením je vyrobít frézy se stejnou geometrií například ze slinutého karbidu, který má vyšší řezivost. O tomto řešení se ovšem v současnosti neuvažuje a to zejména pro jeho finanční náročnost.

### 3.2.2 Druhý způsob

Další možnost také zahrnuje použití obráběcího centra BETA 1250 TC 4A. Rozdíl je ale v použitých nástrojích. U prvního způsobu byl problém s nízkou řezivostí nástrojů z rychlořezné oceli. Řešením je změna řezného materiálu. Jako možnost se nabízí slinutý karbid. Ten má oproti rychlořezné oceli vyšší řezivost. Tento způsob tedy počítá s užitím nástrojů ze slinutého karbidu. Pro co nejnižší ekonomickou náročnost je cílem eliminovat, nebo alespoň snížit počet speciálních tvarových nástrojů, které by se musely vyrábět zakázkově. V úvahu připadají například karbidové čelní válcové frézy, které jsou běžně dostupné a oproti tvarovým nástrojům relativně levné. Pro účely upnutí musí mít válcovou stopku. Tyto frézy, jak už název napovídá, nemohou být použity pro předdokončení šroubovitě ani podélné drážky. Jsou ale použitelné pro jejich hrubování. Při hrubování pomocí karbidové frézy je možné použít vyšší řeznou rychlost a tudíž zvýšit produktivitu obrábění. Vzhledem k velikosti šroubovitě drážky bude pro účely hrubování nejprve použita čelní válcová fréza o průměru 8 mm ze slinutého karbidu. Ta odebere většinu materiálu. Pro vyhrubování zbytku drážky se použije menší čelní válcová fréza o průměru 4 mm taktéž ze slinutého karbidu. Stejně nástroje se použijí také pro vyhrubování podélných drážek.

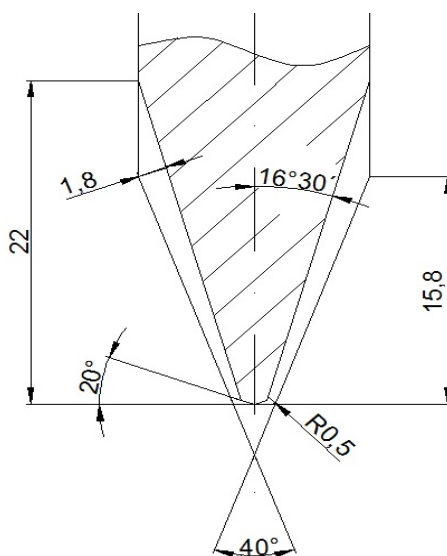
Po hrubování obou drážek následuje obrobení hlav zubů. Jejich hrubování má dvě možnosti. Obě je, pro vyšší produktivitu, možné realizovat čelní válcovou frézou ze slinutého karbidu (Ø8 mm). Při první je využito obrábění ve šroubovici v kombinaci s pohybem po kružnici. Fréza se pohybuje po kružnici (o poloměru R50) a obrábí hlavu zubu, přičemž se ale zároveň pohybuje podél osy rotace obrobku, čímž je zajištěna šroubovitost. Nástroj tak koná současný pohyb ve 3 osách. Obrobek nekoná žádný pohyb. Poté nástroj „odskočí“, obrobek se otočí o 36° a stejným způsobem frézuje další zub. Při druhém způsobu se nástroj pohybuje podél osy rotace obrobku, který se zároveň pomalu otáčí. Vzniká tím vlastně také šroubovice. Při tomto pohybu nástroj obrobí hlavy zubů v celé délce budoucí frézy. Přesnější je toto udělat na dvě šířky záběru. Obě možnosti jsou zobrazeny na obrázku (*Obr. 13*).



Obr. 13: Možnosti hrubování hlav zubů při druhém způsobu

V žádném z těchto dvou případů nevznikne na hlavě zubu Archimedova spirála. Rozdíl mezi kruhovým obloukem a Archimedovou spirálou ale není veliký. Pro názornost malého rozdílu je na obrázku zobrazena tečkovaná čára. Toto ovšem není problém, jelikož se výsledná geometrie hřbetu může vytvořit až při ostření, stejně jako tomu je v současné technologii.

Dále je potřeba vyřešit předdokončení obou drážek. Možností je použití tvarové frézy, jejíž profil bude shodný s profilem šroubovitě drážky. Jejím profilem tedy musí být rovnoramenný lichoběžník s vrcholovým úhlem  $40^\circ$ . Ten má čepová fréza ČF-40°-4z-HSS (Obr. 7). Frézy, které jsou ve společnosti k dispozici, ale není možné použít pro jejich velikost. Nejmenší čepová fréza je určena pro výrobu odvalovací frézy s modulem 9. Pro menší moduly nejsou frézy zkonstruovány. Navíc zůstává problém s nižší řezivostí. Bylo tedy rozhodnuto o upravení geometrie a vyrobení frézy vhodné i pro obrábění odvalovací frézy o modulu 5. Pro vyšší produktivitu je opět materiálem slinutý karbid. Další úpravou je změna stopky z kuželové na válcovou pro možnost upnutí do kleštinového upínače s kuželem HSK-A63, kterým je osazena soustružnicko-frézovací hlava centra. Takto upravená fréza má označení výkresu ČF-40°-4z-SK. Detail řezné části je vidět na obrázku (Obr. 14) a celé schéma v příloze (PŘÍLOHA č. 5). Frézu lze také označit jako kuželovou, ale nadále zde bude respektováno označení „čepová“ používané ve společnosti.



Obr. 14: Detail schématu čepové frézy zobrazující její řeznou část

Pro velikost řezných sil je dobré nevyrábět oba boky drážky současně, ale každý zvlášť tzv. rozjížděním. Proto je vhodné, aby tato fréza byla o něco menší, než je samotný profil šroubovitě drážky. Zde se nabízí otázka ekonomičnosti výroby speciálního nástroje. Při předdokončování šroubovitě drážky (boků a dna) se čepová fréza pohybuje opět po kruhovém oblouku. Ve skutečnosti je také dno drážky tvořeno Archimedeovou spirálou (vzniklou při podtáčení na soustruhu). Tato nepřesnost by se opět ve skutečné výrobě odstranila následným ostřením.

Jak je možné vidět na výkresu odvalovací frézy (*Obr. 3*), u dna podélné drážky je rádius  $R_{2,5}$ . Tento rádius vznikl při původní technologii použitím speciální závitové kotoučové frézy ZF- $\emptyset 120-14z-HSS$ , na jejímž obvodu se daný rádius nachází. Díky geometrii této frézy je znám úhel, který svírají boky podélné drážky. Ten je  $30^\circ$ . Na hotové odvalovací fréze, která obrábí budoucí ozubené kolo, slouží podélné drážky pro odvod třísek z místa řezu tak, aby nedocházelo k jejich hromadění a pěchování. Rádius na dně tedy není žádnou funkční plochou a po dohodě s technologem ze společnosti bylo rozhodnuto, že není nutné jeho zachování. Nutné ovšem je, aby přechod mezi boky a dnem drážky netvořily ostré hrany ale rádiusy. V případě výroby upravené čepové frézy pro potřeby předdokončení šroubovitě drážky, by bylo možné stejnou frézu použít i pro obrobení podélných drážek. Tím by ale boky drážky nesvíraly úhel  $30^\circ$  ale  $40^\circ$ . To způsobí zúžení zubu, což v praxi vede ke snížení životnosti frézy, jelikož se tím sníží počet přeastření. Zde je ale hlavním cílem vyzkoušet kinematickou proveditelnost této možnosti na stroji, tudíž je přípustné toto zjednodušení. Ve skutečné výrobě by samozřejmě musely boky tvarové frézy svírat úhel  $30^\circ$ , aby byla dodržena požadovaná geometrie odvalovací frézy.

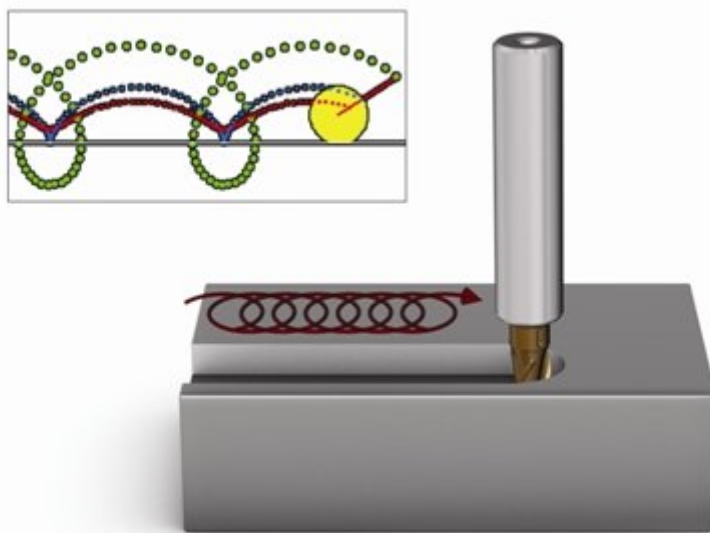
Posledním úsekem operace je, za použití tvarového nože (*Obr. 11*), výroba rádiusů  $R_{1,25}$  na vrcholu šroubovitě drážky.

### 3.2.3 Třetí způsob

Druhý způsob, který je charakteristický použitím karbidových nástrojů, má oproti prvnímu vyšší produktivitu obrábění. Nabízí se tedy otázka, jestli lze efektivitu obrábění ještě více zvýšit. Za předpokladu, že slinutý karbid je již vhodný řezný materiál, je potřeba zaměřit pozornost na jinou část procesu obrábění. V obou předchozích případech byl přídavek prostupně obráběn na několik hloubek řezu. To vedlo také k tomu, že pohyb nástroje byl poměrně jednoduchý a vlastně odpovídal možnostem klasických strojů. Pohyb všech nástrojů byl pouze lineární, respektive po kružnici v případě hlav zubů. V případě CNC stroje se jednalo o kombinaci několika interpolací. V několika případech sice vznikla šroubovice, jednalo se ale o kombinaci lineárního pohybu nástroje a rotačního pohybu obrobku. Není tedy možné zvolit pro pohyb nástroje jinou dráhu než přímku nebo dokonce obrobit celý přídavek pouze na jednu hloubku řezu dosáhnout tím lepších výsledků? Za zvážení stojí možnost přezkoumat samotnou strategii obrábění. Možným řešením je tzv. trochoidní obrábění (*Obr. 15*). Dané problematice se například věnuje článek zveřejněný v časopisu MM Průmyslové spektrum.

„Při klasickém drážkování či frézování kapes je radiální hloubka  $a_e$  řezu u těchto typů obrábění fixní. Použije-li se však trochoidní dráhu nástroje (trochoida je geometrická křivka,

kteřá je vytvořena bodem na kruhu, jenž rotuje a jehož střed se zároveň pohybuje), dosáhneme stavu, kdy lze radiální hloubku řezu řídit a upravovat. Tím je pod kontrolou i úhel záběru nástroje a lze tedy využít strategii malého úhlu záběru. I když byl tento způsob vyvinut pro obrábění tvrdých materiálů, v současnosti se s úspěchem hojně využívá v aplikacích, kdy mechanické zatížení frézy omezuje její optimální využití. Trochoidní frézování v sobě tím nejlepším možným způsobem kombinuje parametry řezných podmínek a dráhy nástroje, které zaručí nejvyšší efektivitu procesu obrábění“ [2].



Obr. 15: Trochoidní frézování [2]

V současné době je v různých CAM systémech již trochoidní frézování běžně implementováno. Například v softwaru SolidCAM se tento modul (rozšířený o další specifické dráhy) nazývá iMachining. Použití CAM systému, kdy software automaticky počítá dráhy nástroje, se tedy jeví jako elegantní a jednoduché řešení, při kterém odpadá pracné ruční počítání drah nástroje. Zde ale nastává zásadní problém. Současné CAM systémy umožňují při trochoidním frézování řízení většinou jen ve třech osách. Při obrábění hlav zubů, boků a dna šroubovitě drážky je ale nutné pro dosažení požadovaného tvaru řízení ve 4 osách současně. Teoreticky připadá v úvahu i ruční programování. Prakticky, především pro obrábění složitých tvarových ploch, se však jeví jako téměř nemožné. V tomto případě, kdy profil šroubovitě drážky tvoří „pouze“ rovnoramenný lichoběžník, by to však nemusel být zase takový problém. Nejednalo by se ale o klasické trochoidní frézování, ale o takzvané „kvazitrochoidní“ frézování. Při něm se nástroj nepohybuje po trochoidách nýbrž po kružnicích. Pokud by se toto povedlo realizovat, mohla by být šroubovitá drážka hrubována pouze jediným nástrojem. Tím by byla již výše zmíněná čepová fréza ČF-40°-4z-HSS. Odpadla by nutnost drážku hrubovat dvěma čelními válcovými frézami na několik hloubek řezu  $a_p$ . To by ve výsledku zřejmě celý proces obrábění zefektivnilo a zrychlilo. Podrobněji bude kvazitrochoidní frézování popsáno v kapitole 4.

Obdobně lze situace řešit také u podélných drážek. Jejich profil také není nikterak složitý a mohl by být pomocí kvazitrochoidního frézování obroben frézou vhodného profilu. Stejně jako u šroubovitě drážky by odpadla nutnost drážku hrubovat dvěma čelními válcovými



frézami na několik hloubek řezu  $a_p$ . Pro větší hloubku podélné drážky by toto muselo být, vzhledem k délce řezné části frézy realizováno nikoli pouze na jednu, ale na dvě hloubky řezu  $a_p$ . Z hlediska úhlu, který svírají boky drážky, by zde došlo ke stejnému zjednodušení jako u druhého způsobu. Jelikož jde především o vyzkoušení kinematiky, opět by se pouze použila upravená čepová fréza ČF-40°-4z-HSS. Ve skutečné výrobě by samozřejmě musely boky tvarové frézy svírat úhel 30° tak, aby byla dodržena požadovaná geometrie odvalovací frézy.

Hlavy zubů by se při tomto způsobu obráběly jednou z možností popsaných u druhého způsobu. Buď se tedy na hlavách vytvoří oblouk, nebo dvě, případně více plošek.

Dále se ještě musí předdokončit šroubovitá drážka, jelikož po předchozím hrubování stále zůstal na jejím dně přírůstek. Způsob provedení je stejný jako u druhého způsobu.

Způsob výroby rádiusů R1,25 na vrcholu šroubovitě drážky je identický jako u obou předchozích způsobů, tedy pomocí tvarového nože na rádiusy (Obr. 11).

### 3.3 Popis výrobních prostředků

V této podkapitole je blíže popsán stroj a nástroje použitelné pro realizaci možných způsobů výroby. Nejsou zde popisovány nástroje pro realizaci prvního způsobu výroby. Ty jsou totožné jako u současné technologie výroby a jsou podrobněji popsány v analýze současného stavu.

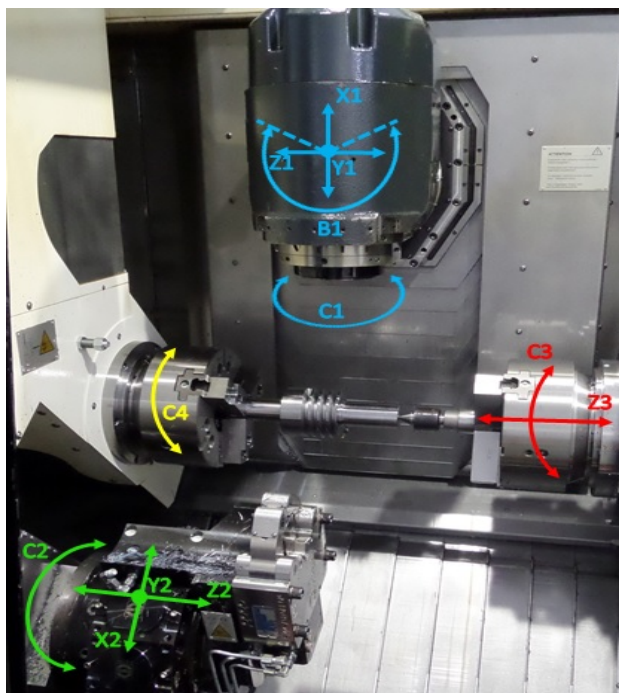
#### CTX BETA 1250 TC 4A

Výše byly popsány požadavky, které musí stroj splňovat, aby byla výroba úspěšná. Jako vhodný stroj pro jejich splnění bylo vybráno soustružnické centrum CTX BETA 1250 TC 4A (Obr. 16).



Obr. 16: Soustružnické centrum CTX BETA 1250 TC 4A [3]

Řídicím systémem stroje je SINUMERIK 280D sl. Jelikož se jedná o multiprofesní stroj, je rozsah použití značný. S tím souvisí jeho vlastnosti a parametry, které je možné podrobněji popsat. Zde ale budou popsány pouze ty, které souvisejí s výrobou nebo jsou pro ni důležité. Z pohledu kinematiky jsou nejdůležitější osy stroje. Pracovní prostor stroje spolu s popisem jednotlivých os lze vidět na obrázku (Obr. 17).



Obr. 17: Pracovní prostor stroje a popis jednotlivých os

Stroj má celkem 12 řízených os, z nichž vždy 10 může pracovat současně. Jelikož se jedná o soustružnické centrum, základním prvkem je hlavní vřeteno. To koná pouze rotační pohyb v ose C4. Je vybavené tříčelistovým sklíčidlem, ve kterém lze na obrázku vidět upnutý obrobek. Ten je zároveň podepřen otočným hrotem upnutým ve tříčelistovém sklíčidlu protivřetena. To může konat posuv v ose Z3 a rotaci v ose C3. Dále je součástí stroje takzvané soustružnicko - frézovací vřeteno. Z názvu je patrné, že je schopné vykonávat jak soustružnické, tak i frézovací operace. Pro účely upnutí rotačních nástrojů je vybavené upínacím kuželem HSK 63 – A. Rotaci zajišťuje osa C1. Do vřetena je možné také upínat soustružnické nože a to pomocí speciálních vícepolohových držáků. Vřeteno je dále schopno naklonění v ose B1 od svislé polohy o  $\pm 120^\circ$  a posuvu v osách X1, Y1 a Z1. Čtvrtým a posledním prvkem je revolverová hlava. Základní vlastností každé revolverové hlavy je schopnost otáčení. To zde zajišťuje osa C2. Hlava se může pohybovat v osách X2, Y2 a Z2. Pro upínání nástrojů má 12 pozic. Kromě nerotačních nástrojů je do hlavy možné upnout také poháněné nástroje. Hlava je navíc vybavená CNC lunetou. Tímto jsou popsány osy stroje. Dále je vhodné zjistit a popsat parametry stroje. Ty nejdůležitější jsou uvedené v následující tabulce (Tab. 1).

Vlastnosti a parametry stroje			
Veličina	Prvek	Hodnota	Jednotky
Velikost pracovního prostoru	Maximální délka obrobku	1250	mm
	Maximální průměr obrobku	Ø 340	
Posuv v X,Y,Z	Soustružnicko – frézovací vřeteno	450/± 100/1200	mm
	Revolverová hlava	195/± 40/1200	
Počet pozic nástrojů	Soustružnicko – frézovací vřeteno	24	-
	Revolverová hlava	12	

Výkon (maximální)	Hlavní vřeteno	32	kW
	Protivřeteno	32	
	Soustružnicko – frézovací vřeteno	29	
	Revolverová hlava	10	
Krouticí moment (maximální)	Hlavní vřeteno	360	Nm
	Protivřeteno	360	
	Soustružnicko – frézovací vřeteno	76	
	Revolverová hlava	28	
Otáčky	Hlavní vřeteno	5000	min <sup>-1</sup>
	Protivřeteno	5000	
	Soustružnicko – frézovací vřeteno	12000	
	Revolverová hlava	10000	

Tab. 1: Parametry a vlastnosti soustružnického centra CTX BETA 1250 TC 4A

### Čelní válcová fréza Ø8 mm

Jedná se o monolitní čelní válcovou frézu ze slinutého karbidu s označením SEH 422825. Fréza má 4 zuby, válcovou stopku, povlak z TiAlN a  $r_e = 0,1$  mm. Délka řezné části frézy je 20 mm a celková délka je 60 mm.

### Čelní válcová fréza Ø4 mm

Menší monolitní čelní válcová fréza o průměru 4 mm typově odpovídá větší fréze a má tedy i stejné označení. Od ní se liší v průměru, délce řezné části (10 mm), celkové délce (30 mm) a velikosti  $r_e$  (0,05 mm).

### Čepová fréza

Posledním použitým nástrojem je již výše zmíněná čepová fréza ČF-40°-4z-HSS. Fréza má válcovou stopku a je k vidění na obrázku (Obr. 18).



Obr. 18: Čepová fréza ČF-40°-4z-HSS

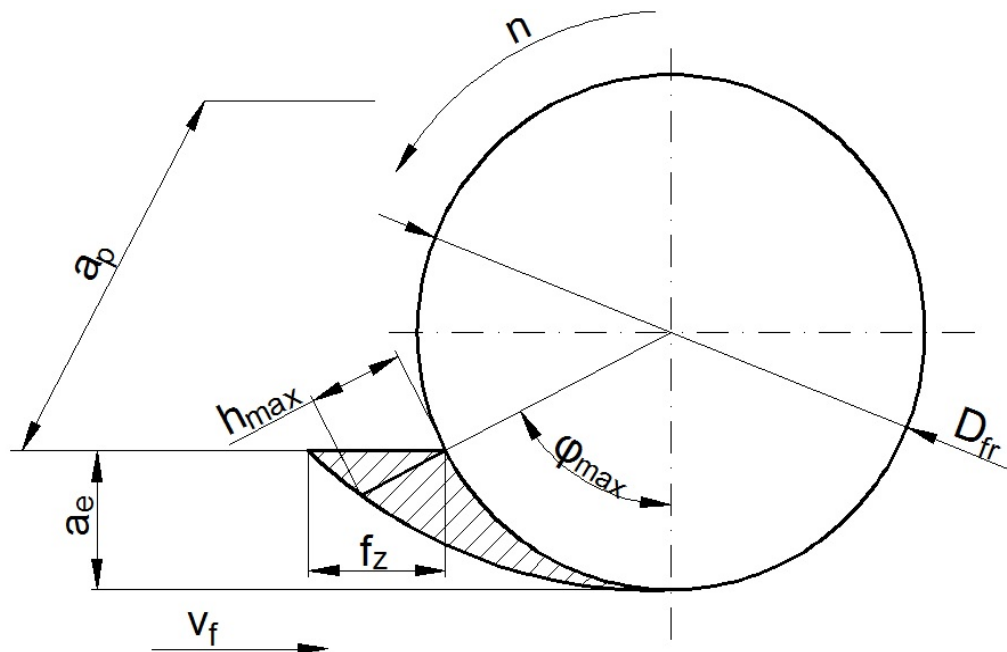
## 3.4 Ověření možností stroje

Po popsání možných způsobů výroby je potřeba ověřit, zda jsou parametry stroje dostatečné pro jejich výrobu. To se ověří na hrubování šroubovitě drážky u prvního způsobu. To probíhá za následujících podmínek:

$a_e$ [mm]	$f_z$ [mm]	$v_c$ [m/min]	$D_{fr}$ [mm]	$z$ [-]	$n$ [min <sup>-1</sup> ]
12,4	0,02	20	90	27	70,74

Tab. 2: Řezné podmínky pro hrubování šroubovitě drážky u prvního způsobu

Celý přídavek pro hrubování je odebrán na jedinou radiální hloubku řezu  $a_e$  o velikosti 12,4 mm. Při tomto záběru je nutné nejprve spočítat, zda má stroj dostatečný krouticí moment  $M_k$  výkon  $P$ . Pro jejich výpočet slouží následující vztahy (včetně vztahů dílčích). Pro lepší orientaci je frézování zobrazeno na obrázku (Obr. 19).



Obr. 19: Schéma hrubování šroubovitě drážky kotoučovou závitovou frézou

$$P = \frac{F_c \cdot v_c}{60 \cdot 10^3} [kW] \quad (2)$$

$$M_k = F_c \cdot \frac{D_{fr}}{2} [Nm] \quad (3)$$

$$F_c = A \cdot k_c [N] \quad (4)$$

$$A = \varphi_{max} \cdot f_z \cdot a_p [mm^2] \quad (5)$$

$$h_{max} = f_z \cdot \sin \varphi_{max} [mm] \quad (6)$$

$$\cos \varphi_{max} = \frac{\frac{D_{fr}}{2} - a_e}{\frac{D_{fr}}{2}} [-] \quad (7)$$

kde:  $F_c$  [N] je řezná síla, přesněji složka celkové řezné síly ve směru hlavního řezného pohybu,  $v_c$  [m/min] je řezná rychlost,  $D_{fr}$  [mm] průměr frézy,  $\varphi_{max}$  [°] maximální úhel opásání frézy,  $f_z$  [mm] posuv na zub,  $a_p$  [mm] axiální hloubka řezu,  $a_e$  [mm] radiální hloubka řezu,  $h_{max}$  [mm] maximální tloušťka odřezávané vrstvy

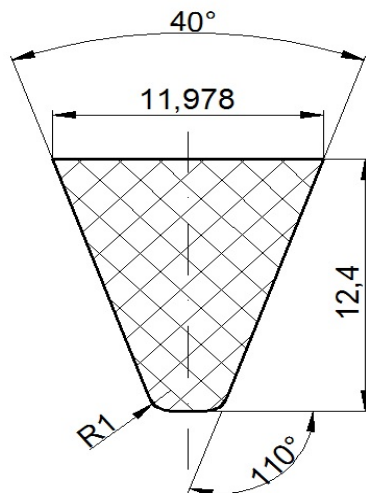
$k_c$  [MPa] je měrný řezný odpor. Je definován jako složka řezné síly  $F_c$  potřebná pro odříznutí vrstvy o průřezu  $A = 1 \text{ mm}^2$ .

Při obvodovém frézování se většinou pro výpočet průřezu odřezávané vrstvy používá vztah (5). Zde ale není použitelný. Důvodem je proměnlivost  $a_p$  a tedy i  $A$  v průběhu tohoto frézování. Je tak nezbytné použít jiný způsob. Při tom se nejprve spočítá tzv. střední průřez odřezávané vrstvy  $A_S$  pomocí vztahu (9). Při této metodě výpočtu se nejprve spočte objem

materiálu odebraný jedním zubem frézy  $V_{mat/zub}$ . Z toho se následně vypočítá vlastní střední průřez odřezávané vrstvy.

$$V_{mat/zub} = \frac{A_{\text{šD}} \cdot v_f}{z \cdot n} = \frac{A_{\text{šD}} \cdot f_z \cdot z \cdot n}{z \cdot n} = A_{\text{šD}} \cdot f_z \quad [\text{mm}^3] \quad (8)$$

Kde:  $A_{\text{šD}}$  [ $\text{mm}^2$ ] je průřez šroubovitě drážky, který se hrubuje (Obr. 20).



Obr. 20: Hrubovaný průřez šroubovitě drážky

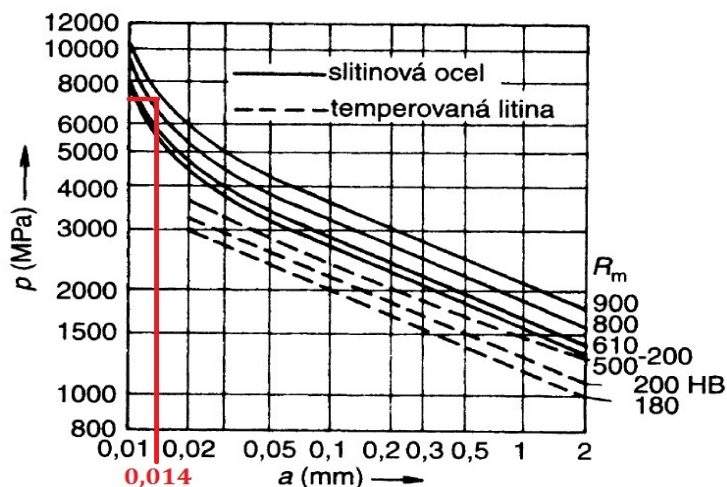
Následně je možné spočítat střední průřez odřezávané vrstvy  $A_s$ :

$$A_s = \frac{V_{mat/zub}}{\varphi_{max} \cdot R_{fr}} \quad [\text{mm}^2] \quad (9)$$

Kde:  $\varphi_{max}$  [rad] je maximální úhel opásání frézy,  $R_{fr}$  [mm] poloměr frézy.

K určení průřezu šroubovitě drážky byl použit software Catia V5R21,  $A_{\text{šD}} = 92,39 \text{ mm}^2$ .

Dále je potřeba určit velikost měrného řezného odporu  $k_c$ . Jeho velikost závisí na mnoha faktorech, například obráběném materiálu, posuvu, řezné rychlosti nebo odřezávané vrstvě. Jeho velikost lze určit několika způsoby, například vyčtením z tabulek nebo diagramů. Zde byl použit diagram (Obr. 21) ze strojnických tabulek.



Obr. 21: Diagram závislosti měrného řezného odporu na mezi pevnosti a tloušťce odřezávané vrstvy [4]

Ten má na vodorovné ose tloušťku odřezávané vrstvy  $h$  (na diagramu označená jako  $a$ ) a na svislé měrný řezný odpor  $k_c$  (podle starého značení na diagramu označený jako  $p$ ). Diagramem je proložena nelineární křivka značící mez pevnosti materiálu v tahu  $\sigma_{Pt}$  (zde podle starého značení  $R_m$ ). Pro tento případ platí plná čára značící slitinovou ocel. Z ní je patrné, že měrný odpor se zvětšující se tloušťkou odřezávané vrstvy klesá. Ze společnosti byla poskytnuta informace, že mez pevnosti pro obráběnou rychlořeznou ocel ve stavu .3 je přibližně  $\sigma_{Pt} = 850$  MPa. Maximální tloušťku odřezávané vrstvy je možné spočítat ze vztahu (6) v kombinaci se vztahem (7). Její velikost je  $h_{\max} = 0,014$  mm. Poté již může být z diagramu odečten měrný odpor, což je znázorněno červenými čarami. Na diagramu je křivka pouze pro mez pevnosti 800 a 900 MPa. Křivka pro mez pevnosti 850 MPa tedy teoreticky leží mezi nimi. Odečtení hodnoty měrného pevného odporu z diagramu tedy není úplně přesné. Jeho velikost je přibližně  $k_c = 7200$  MPa. Aby byla kompenzována nepřesnost odečtení, bude pro jistotu počítáno s vyšší hodnotou  $k_c = 8000$  MPa.

Po užití uvedených vztahů a vstupních údajů (viz Tab. 2) již mohly být vypočteny požadované veličiny, tedy řezný výkon a krouticí moment (Tab. 3). Mimo to jsou v tabulce vidět i další vypočtené veličiny.

P [kW]	M <sub>k</sub> [Nm]	F <sub>c</sub> [N]	h <sub>max</sub> [mm]	φ <sub>max</sub> [°]	A <sub>s</sub> [mm <sup>2</sup> ]	V <sub>mat/zub</sub> [mm <sup>3</sup> ]
0,144	19,440	432	0,014	43,578	0,054	1,848

Tab. 3: Hodnoty výkonu, krouticího momentu a dalších veličin pro hrubování šroubovitě drážky

Z výsledků je patrné, že hodnoty krouticího momentu a řezného výkonu jsou v porovnání s parametry stroje dostatečně nízké. Hrubování je tedy možné provést za daných podmínek.

Stejným způsobem lze vypočítat výkon a krouticí moment i u zbývajících úseků operace. Zde ale bude přistoupeno ke zjednodušení a hodnoty nebudou počítány pro každý úsek zvlášť. Výkon při hrubování se ani zdaleka nepřibližuje limitnímu výkonu. Ani u dalších úseků se nepředpokládá jeho překročení. Krouticí moment vyšel přibližně 3x menší než limitní. Rozdíl je tedy menší než v případě výkonu, ale ani zde se nepředpokládá jeho překročení u dalších úseků.

### 3.5 Výběr nejvhodnějších způsobů pro realizaci zkoušky

Výše byly popsány 3 možné způsoby výroby. Vzhledem k velké vytíženosti a vyšší strojní hodinové sazbě obráběcího centra CTX BETA 1250 TC 4A není možné odzkoušet vyrobiteľnost frézy všemi třemi způsoby. Bylo tedy rozhodnuto, že proběhne praktické odzkoušení pouze dvou způsobů. Existuje více možností jak vybrat nejvhodnější způsob. Za zmínku stojí například použití metody párového srovnávání, u které se ale jen obtížně zohledňuje počet vyráběných kusů. Další metodou je rozbor hospodárnosti jednotlivých variant, u které je zohlednění počtu vyráběných kusů samozřejmostí. Zde je výběr proveden na základě velikosti výrobních nákladů. Tím je zároveň provedené ekonomické hodnocení. To bývá standardně v podobných pracích provedeno v technicko – ekonomickém hodnocení, které se umísťuje na závěr práce. V případě této práce musí být uvedené již v této části, právě z důvodu nutnosti výběru dvou způsobů pro praktickou zkoušku výroby. Náklady se spočítají pro každý úsek a následně se sečtou. Tím se získají výrobní náklady celé operace (a tím také

příslušného způsobu výroby). Do vztahu pro výpočet vstupuje čas obrábění, strojní hodinová sazba a nástrojová hodinová sazba. Vztah pro výpočet nákladů na úsek operace je:

$$N_{\dot{u}} = \frac{t_{AS}}{60} \cdot (SHS + NHS) [K\check{c}] \quad (10)$$

Kde:  $t_{AS}$  [min] je čas automatického chodu stroje (jednotkový strojní čas) daného úseku, SHS [Kč/hod] strojní hodinová sazba, NHS [Kč/hod] nástrojová hodinová sazba.

Při jejím výpočtu se vychází z nákladů na nástroj  $N_N$  pro celou dobu jeho životnosti. Pokud se tyto náklady vydělí jeho celkovou životností, určí se tím nástrojová hodinová sazba. Vztah pro její výpočet je následující:

$$NHS = \frac{N_N}{\check{Z}} = \frac{N_{NN} + (z_o \cdot N_o)}{\frac{T}{60} (z_o + 1)} [K\check{c}/hod] \quad (11)$$

Kde:  $N_{NN}$  [Kč] jsou náklady na nový nástroj (cena),  $N_o$  [Kč] náklady na ostření nástroje,  $z_o$  [-] počet přeastření nástroje,  $T$  [min] trvanlivost nástroje, vynásobením počtem možných přeastření + 1 (naostření nového nástroje z výroby) se získá životnost nástroje  $\check{Z}$ .

Ve vztahu (10) je důležitou veličinou čas automatického chodu stroje  $t_{AS}$ . Základní vztah pro jeho výpočet je:

$$t_{AS} = \frac{L \cdot i}{v_f} [min] \quad (12)$$

Kde:  $L$  [mm] je celková délka dráhy nástroje,  $i$  [-] počet úběřů,  $v_f$  [m/min] posuvová rychlost.

Celková dráha nástroje se vypočítá jako:

$$L = l_n + l + l_p [mm] \quad (13)$$

Kde:  $l_n$  [mm] je délka nájezdu,  $l$  [mm] délka obráběné plochy,  $l_p$  [mm] délka přejezdu.

Výpočet délky nájezdu, popřípadě přejezdu, se liší u každého způsobu obrábění. Proto nebude níže u každého úseku popisován jeho výpočet, bude uvedena pouze celková dráha nástroje  $L$ .

Vztah pro počtu úběřů je:

$$i = \frac{p}{h_r} [-] \quad (14)$$

Kde:  $p$  [mm] je přídavek pro obrábění,  $h_r$  [mm] je hloubka řezu (v případě soustružení a čelního frézování je to  $a_p$ , u obvodového frézování  $a_e$ ).

Počet úběřů se zaokrouhluje vždy nahoru na celé číslo.

Základní vztah pro výpočet času (12) se dá vyjádřit několika různými odvozenými vztahy:

$$t_{AS} = \frac{L \cdot i}{f_{ot} \cdot n} \quad (15)$$

Kde:  $f_{ot}$  [mm] je posuv na otáčku,  $n$  [ $\text{min}^{-1}$ ] otáčky frézy.

$$t_{AS} = \frac{L \cdot i}{f_z \cdot z \cdot n} \quad (16)$$

Kde:  $z$  [-] je počet zubů frézy.

$$t_{AS} = \frac{L \cdot i \cdot D_{fr} \cdot \pi}{1000 \cdot v_c \cdot f_{ot}} \quad (17)$$

Po obecném popsání způsobu výpočtu strojních časů lze přistoupit k počítání nákladů jednotlivých úseků a způsobů výroby. Z RTI byla poskytnuta informace, že strojní hodinová

sazba soustružnického centra je 1700 Kč/hod. Dále se uvádějí náklady na nový nástroj (cena), počet přestřehů a náklady na něj. Tyto informace byly získány ke každému nástroji od odborníků z praxe. V případě speciálních tvarových nástrojů navržených pro první způsob to byli zaměstnanci společnosti. U čelních válcových fréz informace poskytli pracovníci RTI. U speciální čepové frézy poskytli tyto informace výrobce. V tabulce jsou vždy uvedené vstupní hodnoty a výsledný strojní čas, nástrojová hodinová sazba a náklady. Časy trvanlivosti  $T$  a automatického chodu stroje  $t_{AS}$ , jsou udávány v minutách. Jelikož se pomocí těchto veličin počítá nástrojová hodinová sazba v Kč/hod, jsou pro převod na hodiny ve vztazích (10) a (11) vydělené šedesáti.

V tabulce jsou zároveň ke každému úseku operace uvedené výchozí řezné podmínky navržené pro obrábění oceli ČSN 19 802.3.

Ve vztahu pro výpočet nástrojové hodinové sazby figuruje trvanlivost nástroje, přesněji jeho bříty. Zde je potřeba zmínit, jak se zde trvanlivost určovala. Trvanlivost nástroje je ovlivňována řeznými podmínkami, především ale řeznou rychlostí  $v_c$ . Zde se při určení trvanlivosti vychází z Taylorova vztahu a to porovnáním dvou trvanlivostí a řezných rychlostí. Tento vztah se zapíše následovně:

$$\left(\frac{v_{c2}}{v_{c1}}\right)^m = \frac{T_1}{T_2} \quad (18)$$

Kde:  $m$  [-] je exponent představující směrnici Taylorovy přímky a závisí na řezné rychlosti a druhu řezného materiálu.

Ze vztahu (18) je na základě známé trvanlivosti  $T_1$  a řezné rychlosti  $v_{c1}$  při požadované řezné rychlosti  $v_{c2}$  možné získat trvanlivost  $T_2$ . Jinou úpravou lze také získat řeznou rychlost  $v_{c2}$  při požadované trvanlivosti  $T_2$ . Před obráběním nastává otázka, zda je lepší použít vyšší řeznou rychlost a rychleji tím otupit nástroj, který se musí následně přestřít. Nebo naopak použít nižší řeznou rychlost, čímž sice vydrží nástroj v řezu delší dobu, prodlouží se tím ale čas  $t_{AS}$ .

V případě speciálních tvarových nástrojů (použitých při frézování u prvního způsobu) je vhodné, aby nástroj obráběl po celou dobu bez nutnosti přestřování. Vyjmutím nástroje a vyjetím z místa řezu by totiž došlo ke ztrátě kinematické vazby, což je samozřejmě nežádoucí. Proto musí být nalezena taková řezná rychlost, aby trvanlivost nástroje byla stejná, spíše ale o něco větší než čas obrábění (automatického chodu stroje  $t_{AS}$ ).

K tomu je použita iterační metoda. Ta bude vysvětleno na příkladu hrubování podélných drážek u prvního způsobu. V tabulce (Tab. 4) je v prvním sloupci uvedena obvyklá řezná rychlost  $v_{c1}$  (zjištěná z normativů) pro obrábění oceli s obrobiteľností 11b, kterou má rychlořezná ocel ČSN 19 802.3. Ve druhém sloupci je uvedena standardní trvanlivost  $T_1$ . Ve třetím je rozsah velikosti exponentu  $m$  pro obrábění nástrojem z rychlořezné oceli. Do čtvrtého sloupce se dosazuje požadovaná odhadnutá trvanlivost (ve vztahu k času  $t_{AS}$ ). V pátém je dopočítávaná řezná rychlost  $v_{c2}$ . Takto vypočtená rychlost se dosadí do vztahu (17), čímž se určí čas  $t_{AS}$ . Pokud čas  $t_{AS}$  není o něco málo menší než trvanlivost  $T_2$ , zvolí se jiná velikost trvanlivosti  $T_2$  a celý proces se opakuje. Toto je podstata iterační metody. V tabulce (Tab. 4) je pro názornost vlivu exponentu  $m$  na výslednou řeznou rychlost  $v_{c2}$



uveden celý rozsah jeho velikostí (pro nástroj z rychlořezné oceli). Je patrné, že se zvětšujícím se koeficientem roste také řezná rychlost. Konkrétně ale bude dále počítáno s hodnotou  $m = 6$ .

Obecné podmínky		HSS	Konkrétní podmínky	
$v_{c1}$ [m/min]	$T_1$ [min]	$m$ [-]	$T_2$ [min]	$v_{c2}$ [m/min]
20	20	5	280	11,80
20	20	6	280	12,88
20	20	7	280	13,72
20	20	8	280	14,38

Tab. 4: Tabulka k určení řezné rychlosti  $v_{c2}$  dle vztahu (18)

V tomto konkrétním případě při trvanlivosti  $T_2 = 280$  min je řezná rychlost  $v_{c2} = 12,88$  m/min. Po jejím dosazení do vztahu (17) (spolu s dalšími potřebnými hodnotami uvedenými níže v tabulce Tab. 6) je čas  $t_{AS} = 278,41$  min. Je tedy o něco kratší než trvanlivost  $T_2$ , což je požadovaný stav.

### 3.5.1 Náklady na první způsob výroby

Nejprve se náklady na výrobu spočtou u způsobu, který využívá nástroje z rychlořezné oceli. Ty mají oproti karbidovým (které jsou použité u zbývajících způsobů) menší řezivost. To neumožňuje použití vyšší řezné rychlosti, čímž delší strojní čas. Dá se tedy předpokládat, že tento způsob bude méně výhodný než ostatní.

#### Hrubování šroubovitě drážky

Nástroj: Závitová fréza ZF-Ø90-27z-HSS

L [mm]	i [-]	$v_c$ [m/min]	$f_z$ [mm]	z [-]	$D_{fr}$ [mm]	$t_{AS}$ [min]
131	1	20	0,02	27	90	3,43
$N_{nn}$ [Kč]	$N_o$ [Kč]	$z_o$ [-]	T [min]	NHS [Kč]	SHS [Kč]	N [Kč]
8900	1500	8	20	6966,67	1700	495,38

Tab. 5: Čas  $t_{AS}$  a náklady na hrubování šroubovitě drážky

#### Hrubování podélných drážek

Nástroj: Závitová fréza ZF-Ø120-14z-HSS

L [mm]	i [-]	$v_c$ [m/min]	$f_z$ [mm]	z [-]	$D_{fr}$ [mm]	$t_{AS}$ [min]
133,17	20	12,88	0,02	14	120	278,41
$N_{nn}$ [Kč]	$N_o$ [Kč]	$z_o$ [-]	T [min]	NHS [Kč]	SHS [Kč]	N [Kč]
8200	1500	14	280	417,14	1700	9823,80

Tab. 6: Čas  $t_{AS}$  a náklady na hrubování podélných drážek

**Hrubování hlav zubů**

Nástroj: Rádiusová fréza s poloměrem R50

L [mm]	i [-]	$v_c$ [m/min]	$f_z$ [mm]	z [-]	$D_{fr}$ [mm]	$t_{AS}$ [min]
117,44	10	16,5	0,02	14	80	63,89
$N_{nn}$ [Kč]	$N_o$ [Kč]	$z_o$ [-]	T [min]	NHS [Kč]	SHS [Kč]	N [Kč]
8400	1500	10	65	1963,64	1700	3900,86

Tab. 7: Čas  $t_{AS}$  a náklady na hrubování hlav zubů**Předdokončení boků zubů ve šroubovitě drážce**

Nástroj: Přímý tvarový soustružnický nůž

Při předdokončování boků je využíváno podtáčení. Při něm se obrobek velice pomalu natáčí. Řezná rychlost je přibližně  $v_c = 2$  m/min. Při užití upraveného Taylorova vztahu (18) vyšla trvanlivost v řádech milionů minut, tedy mimo oblast jeho platnosti. Jelikož obrábění probíhá za stejných podmínek jako v současné technologii, byla od obsluhy zjištěna skutečná doba, po které byl nůž skutečně přeastřován. K přeastření došlo většinou po obrobení dvou odvalovacích fréz. Trvanlivost je tedy přibližně dvakrát větší než čas  $t_{AS}$  (viz Tab. 8). Stejná situace je také u obrábění dalšími dvěma soustružnickými noži (viz Tab. 9 a Tab. 10).

L [mm]	i [-]	$v_c$ [m/min]	$f_{ot}$ [mm]	$D_{obr}$ [mm]	$t_{AS}$ [min]	
110	2	2	0,15	75	172,79	
$N_{nn}$ [Kč]	$N_o$ [Kč]	$z_o$ [-]	T [min]	NHS [Kč]	SHS [Kč]	N [Kč]
1560	90	30	346	23,83	1700	4964,27

Tab. 8: Čas  $t_{AS}$  a náklady na předdokončení boků zubů šroubovitě drážky $D_{obr}$  značí obráběný průměr**Předdokončení dna šroubovitě drážky**

Nástroj: Zapichovací nůž

L [mm]	i [-]	$v_c$ [m/min]	$f_{ot}$ [mm]	$D_{obr}$ [mm]	$t_{AS}$ [min]	
110	1	2	0,15	75,2	86,62	
$N_{nn}$ [Kč]	$N_o$ [Kč]	$z_o$ [-]	T [min]	NHS [Kč]	SHS [Kč]	N [Kč]
1670	90	30	174	48,61	1700	2524,53

Tab. 9: Čas  $t_{AS}$  a náklady na předdokončení dna šroubovitě drážky**Předdokončení rádiusů na vrcholu šroubovitě drážky**

Nástroj: Tvarový nůž na rádiusy

L [mm]	i [-]	$v_c$ [m/min]	$f_{ot}$ [mm]	$D_{obr}$ [mm]	$t_{AS}$ [min]	
110	1	2	0,15	100	115,19	
$N_{nn}$ [Kč]	$N_o$ [Kč]	$z_o$ [-]	T [min]	NHS [Kč]	SHS [Kč]	N [Kč]
1670	90	30	232	36,46	1700	3333,76

Tab. 10: Čas  $t_{AS}$  a náklady na předdokončení rádiusů na vrcholu šroubovitě drážky

### Výrobní náklady a čas $t_{AS}$ u prvního způsobu

První číslo u indexu značí způsob obrábění, druhé označuje jednotlivé úseky.

$$N_1 = N_{1.1} + N_{1.2} + N_{1.3} + N_{1.4} + N_{1.5} + N_{1.6} =$$

$$= 495,38 + 9823,8 + 3900,86 + 4964,27 + 2524,53 + 3333,76 = \underline{25\,042,6 \text{ Kč}}$$

$$t_{AS}^1 = t_{AS}^{1.1} + t_{AS}^{1.2} + t_{AS}^{1.3} + t_{AS}^{1.4} + t_{AS}^{1.5} + t_{AS}^{1.6} =$$

$$= 3,43 + 278,41 + 63,89 + 172,79 + 86,62 + 115,19 = 720,19 \text{ min} \approx 12 \text{ hod}$$

### 3.5.2 Náklady na druhý způsob výroby

Druhý způsob používá pro hrubovací i dokončovací operace karbidové nástroje. S nimi je spojena vyšší řezivost a tedy i produktivita. Lze tedy očekávat, že tento způsob bude výhodnější než první.

#### První hrubování šroubovitě drážky

Nástroj: Čelní válcová fréza  $\varnothing 8 \text{ mm}$

U nástrojů ze slinutého karbidu se mění velikost exponentu  $m$ . Zde je počítáno s hodnotou  $m = 3$ . Pro potřeby srovnávání na základě obvyklé řezné rychlosti  $v_{c1}$  a trvanlivosti  $T_l$  se změnila hodnota řezné rychlosti na  $v_{c1} = 100 \text{ m/min}$ .

L [mm]	i [-]	$v_c$ [m/min]	$f_z$ [mm]	z [-]	$D_{fr}$ [mm]	$t_{AS}$ [min]
120	11	100	0,004	4	8	20,73
$N_{nn}$ [Kč]	$N_o$ [Kč]	$z_o$ [-]	T [min]	NHS [Kč]	SHS [Kč]	N [Kč]
800	350	5	20	1275	1700	1028,09

Tab. 11: Čas  $t_{AS}$  a náklady na první hrubování šroubovitě drážky

Z tabulky lze vyčíst nezvykle nízký posuv na zub 0,004 mm. Při obrábění dochází k rotaci obrobku a zároveň k pohybu nástroje podél osy rotace, čímž vzniká šroubovice. Posuv uvedený v tabulce je pouze posuv nástroje. Jedná se vlastně o průmět skutečného (většího) posuvu  $f_{z,skut}$  do směru osy rotace obrobku. Skutečný posuv působí ve směru šroubovice. Zde je počítáno jen s jeho průmětem z důvodu snazšího spočtení času  $t_{AS}$ . Pokud by se totiž počítalo se skutečným posuvem, dráhou  $L$  by byla délka šroubovice. Poměr mezi posuvy je jako poměr rozteče šroubovice  $t$  k přeponě jejího trojúhelníka. Vztah pro výpočet posuvu ve směru osy rotace ze skutečného posuvu je následující:

$$f_z = f_{z,skut} \cdot \frac{t}{l_s} \text{ [mm]} \quad (19)$$

Kde:  $l_s$  [mm] je přepona trojúhelníka, představující délku rozvinuté šroubovice.

Při posuvu  $f_z = 0,004 \text{ mm}$  je velikost skutečného posuvu 0,08 mm. Obdobná situace je také u následujícího hrubování šroubovitě drážky čelní válcovou frézou o průměru 4 mm.

#### Druhé hrubování šroubovitě drážky

Nástroj: Čelní válcová fréza  $\varnothing 4 \text{ mm}$

V praxi se čelní válčové frézy od průměru 6 mm (včetně) nepřeostřují. Důvodem je cena přeostření vzhledem k ceně nového nástroje. Trvanlivost se v tomto případě tedy rovná životnosti.

L [mm]	i [-]	$v_c$ [m/min]	$f_z$ [mm]	z [-]	$D_{fr}$ [mm]	$t_{AS}$ [min]
120	11	100	0,0015	4	4	27,65
$N_{nn}$ [Kč]	$N_o$ [Kč]	$z_o$ [-]	T [min]	NHS [Kč]	SHS [Kč]	N [Kč]
400	350	0	20	1200	1700	1336,22

Tab. 12: Čas  $t_{AS}$  a náklady na druhé hrubování šroubovitě drážky

### První hrubování podélných drážek

Nástroj: Čelní válčová fréza Ø8 mm

Také podélné drážky jsou ve šroubovici a je tedy opět potřeba přepočítat skutečný posuv do směru posuvu nástroje. Zde je ale rozteč tak velká (4445 mm), že hodnoty obou posuvů se od sebe jen nepatrně liší a přepočítání tedy není nutné. Obdobná situace je také u druhého hrubování podélných drážek čelní válčovou frézou o průměru 4 mm.

L [mm]	i [-]	$v_c$ [m/min]	$f_z$ [mm]	z [-]	$D_{fr}$ [mm]	$t_{AS}$ [min]
120	190	100	0,08	4	8	17,91
$N_{nn}$ [Kč]	$N_o$ [Kč]	$z_o$ [-]	T [min]	NHS [Kč]	SHS [Kč]	N [Kč]
800	350	5	20	1275	1700	887,89

Tab. 13: Čas  $t_{AS}$  a náklady na první hrubování podélných drážek

### Druhé hrubování podélných drážek

Nástroj: Čelní válčová fréza Ø4 mm

L [mm]	i [-]	$v_c$ [m/min]	$f_z$ [mm]	z [-]	$D_{fr}$ [mm]	$t_{AS}$ [min]
120	50	100	0,025	4	4	7,54
$N_{nn}$ [Kč]	$N_o$ [Kč]	$z_o$ [-]	T [min]	NHS [Kč]	SHS [Kč]	N [Kč]
400	350	0	20	1200	1700	364,42

Tab. 14: Čas  $t_{AS}$  a náklady na druhé hrubování podélných drážek

### Hrubování hlav zubů

Nástroj: Čelní válčová fréza Ø8 mm

L [mm]	i [-]	$v_c$ [m/min]	$f_z$ [mm]	z [-]	$D_{fr}$ [mm]	$t_{AS}$ [min]
31,4	68	100	0,08	4	8	1,68
$N_{nn}$ [Kč]	$N_o$ [Kč]	$z_o$ [-]	T [min]	NHS [Kč]	SHS [Kč]	N [Kč]
800	350	5	20	1275	1700	83,15

Tab. 15: Čas  $t_{AS}$  a náklady na hrubování hlav zubů

Zde se nástroj pohybuje kruhovou interpolací s poloměrem 50 mm vždy o 36°. Délka jednoho takového oblouku je 31,4 mm. Fréza má 68 zubů, u kterých se hrubují hlavy – odtud počet přejezdů.

**Předdokončení podélných drážek**

Nástroj: Čepová fréza ČF-40°-4z-SK

U čepové frézy je počítáno s jejím největším průměrem 14 mm.

L [mm]	i [-]	$v_c$ [m/min]	$f_z$ [mm]	z [-]	$D_{fr}$ [mm]	$t_{AS}$ [min]
120	60	90	0,04	4	14	21,99
$N_{nn}$ [Kč]	$N_o$ [Kč]	$z_o$ [-]	T [min]	NHS [Kč]	SHS [Kč]	N [Kč]
5000	1000	7	27,43	3281,08	1700	1825,66

Tab. 16: Čas  $t_{AS}$  a náklady na předdokončení podélných drážek**Předdokončení šroubovitě drážky**

Nástroj: Čepová fréza ČF-40°-4z-SK

L [mm]	i [-]	$v_c$ [m/min]	$f_z$ [mm]	z [-]	$D_{fr}$ [mm]	$t_{AS}$ [min]
34,1	260	90	0,025	4	14	43,33
$N_{nn}$ [Kč]	$N_o$ [Kč]	$z_o$ [-]	T [min]	NHS [Kč]	SHS [Kč]	N [Kč]
5000	1000	7	27,43	3281,08	1700	3596,96

Tab. 17: Čas  $t_{AS}$  a náklady na první hrubování podélných drážek

Nástroj se zde pohybuje po stejné dráze jako u hlav zubů. Obrábí vždy jeden bok a část dna šroubovitě drážky. Poté druhý bok a zbytek dna. Na nástroji je celkem 65 zubových mezer, které se takto obrábějí. Na dně drážky po předchozím obrábění zbylo více materiálu, tudíž je frézování každého boku (a dna) provedeno na dvě hloubky řezu. Jedna mezerka se tedy frézuje na 4 záběry. Vynásobením počtem zubových mezer se získá počet přejezdů.

**Předdokončení rádiusů na vrcholu šroubovitě drážky**

Tento úsek je totožný jako u druhého způsobu a stejné jsou také výrobní náklady.

**Výrobní náklady a čas  $t_{AS}$  u druhého způsobu**

$$\begin{aligned}
 N_2 &= N_{2.1} + N_{2.2} + N_{2.3} + N_{2.4} + N_{2.5} + N_{2.6} + N_{2.7} + N_{2.8} = \\
 &= 1028,09 + 1336,22 + 887,89 + 364,42 + 83,15 + 1825,66 + 3596,96 + 3333,76 = \\
 &= \underline{12\,456,15 \text{ Kč}}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 t_{AS}^2 &= t_{AS}^{2.1} + t_{AS}^{2.2} + t_{AS}^{2.3} + t_{AS}^{2.4} + t_{AS}^{2.5} + t_{AS}^{2.6} + t_{AS}^{2.7} + t_{AS}^{2.8} = \\
 &= 20,73 + 27,65 + 17,91 + 7,54 + 1,68 + 21,99 + 43,33 + 115,19 = 256,02 \text{ min} = 4,27 \text{ hod}
 \end{aligned}$$

**3.5.3 Náklady na třetí způsob výroby**

Při třetím způsobu jsou obě drážky hrubovány trochoidním, tedy přesněji kvazitrochoidním frézováním. Zde je předpoklad největší úspory času.

**Hrubování šroubovitě drážky**

Nástroj: Čepová fréza ČF-40°-4z-SK

L [mm]	i [-]	v <sub>c</sub> [m/min]	f <sub>z</sub> [mm]	z [-]	D <sub>fr</sub> [mm]	t <sub>AS</sub> [min]
12 264	1	90	0,065	4	14	23,05
N <sub>nn</sub> [Kč]	N <sub>o</sub> [Kč]	z <sub>o</sub> [-]	T [min]	NHS [Kč]	SHS [Kč]	N [Kč]
5000	1000	7	27,43	3281,08	1700	1913,67

Tab. 18: Čas t<sub>AS</sub> a náklady na hrubování šroubovitě drážky

Drážka je hrubována kvazitrochoidním frézováním. Zde se dráha nástroje určuje jinak než v předchozích případech. Tu, jak bude dále podrobněji popsáno, tvoří tečně se napojující půlkružnice o poloměrech R1 a R2. Způsob jejího určení vychází z matematického modelu tohoto způsobu obrábění, který je níže popsán v podkapitole. To samé platí pro hrubování podélných drážek.

### Hrubování podélných drážek

Nástroj: Čepová fréza ČF-40°-4Z-SK

L [mm]	i [-]	v <sub>c</sub> [m/min]	f <sub>z</sub> [mm]	z [-]	D <sub>fr</sub> [mm]	t <sub>AS</sub> [min]
2 868	10	90	0,065	4	14	53,91
N <sub>nn</sub> [Kč]	N <sub>o</sub> [Kč]	z <sub>o</sub> [-]	T [min]	NHS [Kč]	SHS [Kč]	N [Kč]
5000	1000	7	27,43	3281,08	1700	4475,44

Tab. 19: Čas t<sub>AS</sub> a náklady na hrubování podélných drážek

Zbývající tři úseky (hrubování hlav zubů, předdokončení šroubovitě drážky a předdokončení rádiusů na vrcholu šroubovitě drážky) jsou totožné jako u druhého způsobu, stejné jsou tedy také výrobní náklady a časy t<sub>AS</sub>.

### Výrobní náklady a čas t<sub>AS</sub> u třetího způsobu

$$N_3 = N_{3.1} + N_{3.2} + N_{3.3} + N_{3.4} + N_{3.5} = 1913,67 + 4475,44 + 83,15 + 3596,96 + 3333,76 = \\ = 13\,402,98 \text{ Kč}$$

$$t_{AS}^3 = t_{AS}^{3.1} + t_{AS}^{3.2} + t_{AS}^{3.3} + t_{AS}^{3.4} + t_{AS}^{3.5} = \\ = 23,05 + 53,91 + 1,68 + 43,33 + 115,19 = 237,19 \text{ min} = 3,95 \text{ hod}$$

### 3.5.4 Vyhodnocení výrobních nákladů a časů t<sub>AS</sub>

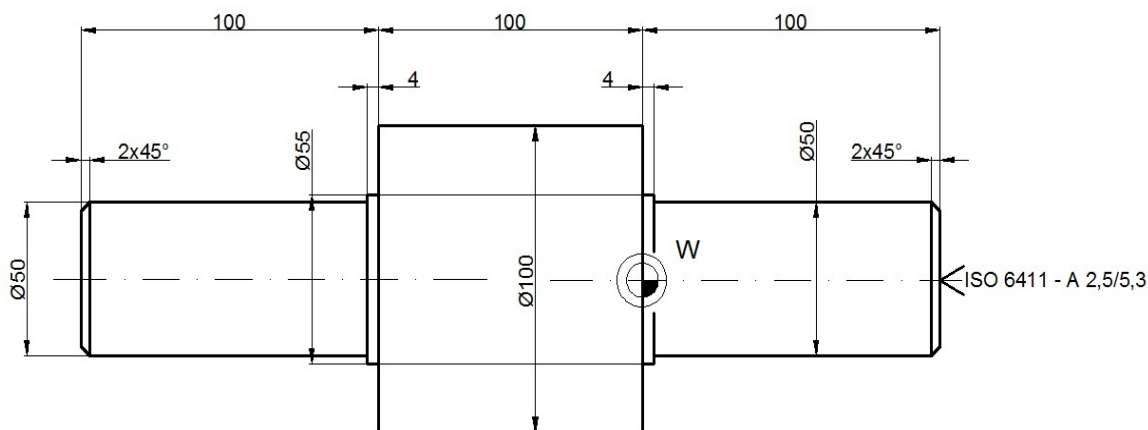
V úvodu této kapitoly bylo řečeno, že dojde k praktickému odzkoušení pouze dvou nejvýhodnějších způsobů výroby z hlediska výrobních nákladů. Dle nich se tedy jedná o druhý a třetí způsob. Rozdíl mezi nimi je přibližně 950 Kč. Nejnižší náklady má druhý způsob. Podstatně vyšší výrobní náklady má ale první způsob (přibližně o 12 000 Kč). Dále je již tedy pracováno pouze se druhým a třetím způsobem.

Mimo to je zajímavé porovnání času automatického chodu stroje. Ten má nejkratší třetí způsob. Oproti druhému způsobu je kratší asi o půl hodiny. Z hlediska času t<sub>AS</sub> je tedy výhodnější jiný způsob, než z hlediska výrobních nákladů. Je tedy jasně patrné, že pro posouzení výrobních nákladů není, a ani nemůže být, rozhodující pouze čas t<sub>AS</sub>. Zde se jasně projevil vliv nákladů na nástroje. Kdyby byly jednotlivé způsoby vyráběny na jiných strojích, vliv na náklady by měla také hodinová sazba stroje. Zde je ale u všech způsobů stejná.

## 4 Zkoušky vybraných způsobů výroby

V předchozí kapitole byly způsoby výroby zhodnoceny z ekonomického hlediska. Z něj vzešel nejlépe druhý a třetí způsob výroby, jejichž výroba tedy byla prakticky vyzkoušena. Před zkouškou těchto způsobů výroby bylo potřeba popsat matematický model kinematiky obrábění a vytvořit NC program. Poté již byla provedena na stroji vlastní zkouška. Ta je důležitou částí celé práce a ověří se jí navržená technologie a především kinematické možnosti stroje.

Pro zkoušku byl již předpřipravený polotovár. Ten má tvar odstupňované hřídele (Obr. 22).



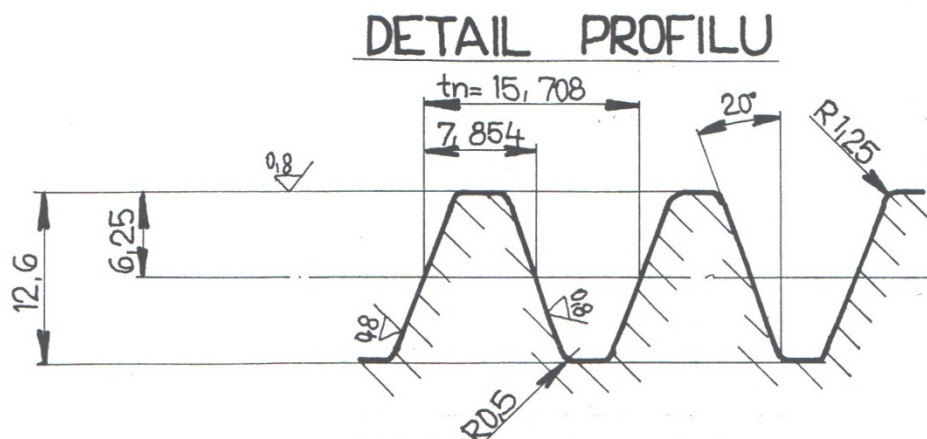
Obr. 22: Schéma polotovaru

Nejdůležitější je jeho prostřední část. Ta má průměr 100 mm a délku 100 mm. Na této části se nachází vlastní řezná část odvalovací frézy. Oba konce polotovaru o průměru 50 mm slouží pro jeho upnutí. Na jednom konci je středící důlek pro podepření otočným hrotem. Druhý konec je určen pro upnutí do sklíčidla. Původně bylo uvažováno o výrobě speciálního trnu, na který by se polotovár nasadil. Stejným způsobem se obrobek upíná i v současné technologii. Trn by ale musel být broušený a pro zkoušku výroby dvou fréz se nevyplatí ho speciálně vyrábět. Bylo tedy rozhodnuto o této jednodušší variantě. Na schématu je také vyznačen nulový bod obrobku.

Z výkresu frézy odvalovací frézy OF-m5x20°-10z-HSS (Obr. 3) lze vyčíst, že materiálem je rychlořezná ocel ČSN 19 802.3. Ta má obrobiteľnosť 11b a zkouškou u ní byla zjištěna tvrdost 265 HB. Pro pouhé vyzkoušení kinematiky stroje nebyla použita rychlořezná ocel ale zušlechťená ocel ČSN 12 050.6 (především z důvodu snazší dostupnosti). U té bylo potřeba před zkouškou výroby odhadnout chování při obrábění ve vztahu k výchozím řezným podmínkám navrženým pro rychlořeznou ocel a uvedeným v podkapitole 3.2. Ocel mohla mít (z hlediska obrábění) horší vlastnosti než rychlořezná ocel. Důsledkem toho by pak musely být upraveny (snížení) řezné podmínky, proto bylo nezbytné zjistit tvrdost a obrobiteľnosť. Zkouškou byla určena tvrdost 230 HB, čemuž podle materiálového listu odpovídá obrobiteľnosť 12b. Tvrdost i obrobiteľnosť je tedy u této oceli příznivější než u rychlořezné oceli. Proto pro zkoušku mohly být použity navržené výchozí řezné podmínky. Samozřejmě pokud je obrobiteľnosť o třídu nižší, bylo by možné navrhnout progresivnější řezné podmínky. Ty by byly ovšem použitelné pouze pro zkoušenou ocel. Jejich hledání ale není cílem práce. Pro vyzkoušení kinematiky postačí použít řezné podmínky navržené pro rychlořeznou ocel.

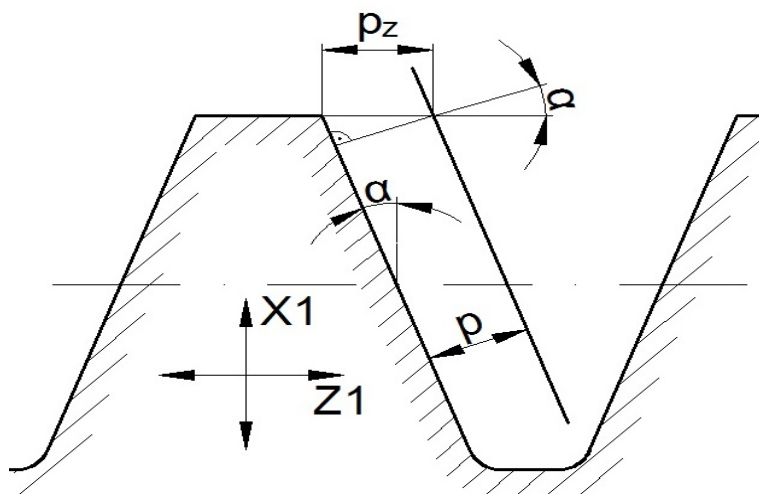
#### 4.1 Matematický model kinematiky obrábění pro druhý způsob

Šroubovitá drážka má profil rovnoramenného lichoběžníku s rádiusy u dna a na vrcholu (Obr. 23).



Obr. 23: Detail profilu šroubovitě drážky odvalovací frézy

Bylo zmíněno, že pro její hrubování jsou použity čelní válcové frézy o průměrech 8 mm a 4 mm. Po něm následuje předdokončení drážky, po kterém zůstává pro finální ostření ještě přírůstek na plochu  $p$ , což je kolmá vzdálenost od povrchu boku drážky (Obr. 24).



Obr. 24: Přírůstek na plochu a přírůstek v ose Z1 u šroubovitě drážky

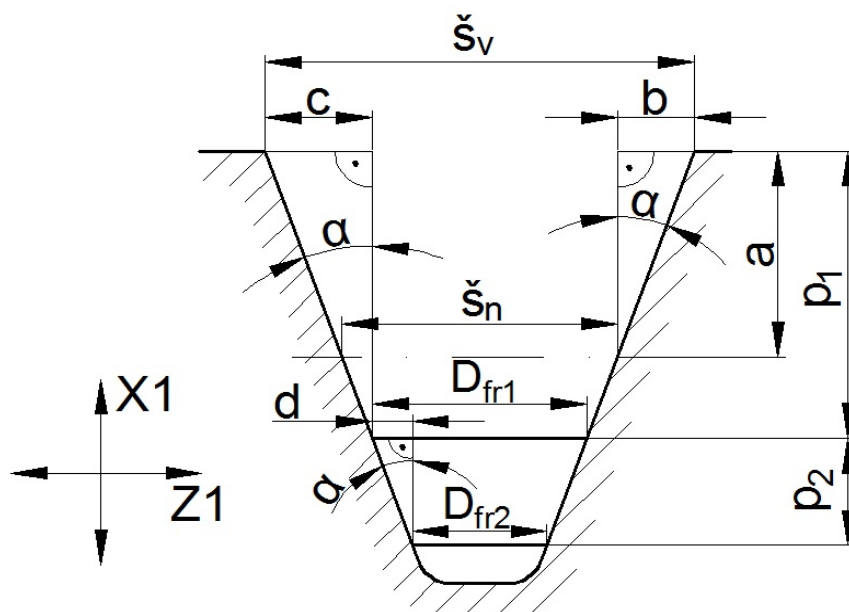
Pro potřeby programování je ale potřeba znát hodnotu přírůstku ve směru šířky drážky, tedy v ose Z1. Přírůstek  $p_z$  připadající na jeden bok zubu lze vypočítat z přírůstku na plochu a podobnosti trojúhelníků.

$$p_z = \frac{p}{\cos \alpha} [mm] \quad (20)$$

Kde:  $p$  [mm] je přírůstek na plochu,  $\alpha$  [°] úhel boku zubu, jeho velikost je 20°.

Dále je potřeba vypočítat hloubku, do které je schopna obrábět první fréza o průměru 8 mm. Jedná se vlastně o celkový přírůstek  $p_1$  pro tuto frézu v ose X1. Pro to je potřeba vypočítat šířku drážky na jejím vrcholu  $\check{s}_v$  (Obr. 25).





Obr. 25: Šířka šroubovité drážky u vrcholu, velikost obou přídavek a pomocných rozměrů

K tomu poslouží šířka drážky ve vzdálenosti  $a$  (známá z výkresu) od jejího vrcholu. Její velikost je  $\check{s}_n$  a jedná se o poloninu rozteče v normálové rovině  $t_n$ . Po odečtení dvojnásobku přídávku  $p_z$  (pro oba boky drážky) se získá potřebná šířka  $\check{s}_n$ . Vztah pro šířku drážky na vrcholu je:

$$\check{S}_v = 2 \cdot b + \check{S}_n \text{ [mm]} \quad (21)$$

Kde:  $b$  [mm] je rozměr sloužící pro výpočet šířky. Jedná se o odvěsnu pomocného trojúhelníku (viz Obr. 25). Ze známých veličin ho lze spočítat pomocí goniometrické funkce tangens. Vztah pro jeho výpočet je:

$$b = \operatorname{tg} \alpha \cdot a \text{ [mm]} \quad (22)$$

Tuto proměnnou lze již dosadit do vztahu (21) pro získání šířky šroubovité drážky na vrcholu  $\check{S}_v$ . Dále je možné opět pomocí funkce tangens spočítat přídavek  $p_1$ .

$$p_1 = \frac{c}{\operatorname{tg} \alpha} \text{ [mm]} \quad (23)$$

Kde:  $c$  [mm] je rozměr sloužící pro výpočet přídávku  $p_1$ . Je to odvěsna pomocného trojúhelníku (viz Obr. 25) a spočítá se pomocí šířky šroubovité drážky na vrcholu a průměru frézy.

$$c = \frac{\check{S}_v - D_{fr1}}{2} \text{ [mm]} \quad (24)$$

Kde:  $D_{fr1}$  [mm] je průměr frézy, v tomto případě 8 mm.

Obdobným způsobem lze vypočítat hloubku, kterou je schopna frézovat menší fréza o průměru 4 mm. Jedná se o přídavek  $p_2$  v ose X1. Vztah pro výpočet je:

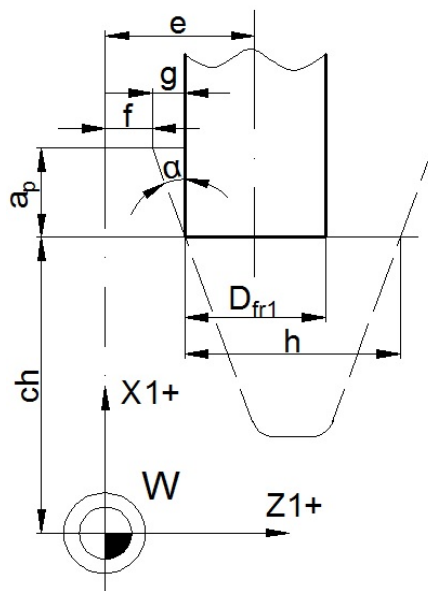
$$p_2 = \frac{d}{\operatorname{tg} \alpha} \text{ [mm]} \quad (25)$$

Kde:  $d$  [mm] je rozměr reprezentující odvěsnu pomocného trojúhelníku (viz Obr. 25). Vztah pro jeho výpočet je následující:

$$d = \frac{D_{fr1} - D_{fr2}}{2} \text{ [mm]} \quad (26)$$

Kde:  $D_{fr2}$  [mm] je průměr frézy, v tomto případě 4 mm.

Po spočtení celkového přírůstku pro oba nástroje je možné jej rozdělit na jednotlivé hloubky řezu  $a_p$ . V závislosti na této hodnotě bude programován výchozí bod pro střed nástroje jak v ose X1, tak v ose Z1. Nejprve se určí výchozí bod v ose Z1. Pro názornost toto bude vysvětleno na prvním hrubování obou boků drážky větší frézou. Při hrubování levého boku je na obrázku (Obr. 26) tato vzdálenost označena písmenem  $e$ .



Obr. 26: Výchozí bod nástroje v ose X1 a Z1 při hrubování šroubovitě drážky

$$e = f + g + \frac{D_{fr1}}{2} \text{ [mm]} \quad (27)$$

Kde:  $f$  [mm] je vzdálenost od nulového bodu k levému boku drážky (měřeno na jejím vrcholu) v ose Z1 a v rámci této práce je zvolena (v této vzdálenosti je již zahrnut přírůstek  $p_z$ ),  $g$  [mm] vzdálenost mezi levým bokem drážky (měřeno na vrcholu) a bokem frézy, odvíjející se od velikosti  $a_p$ .

$$g = \operatorname{tg} \alpha \cdot a_p \text{ [mm]} \quad (28)$$

Dále je nutné určit vzdálenost středu frézy  $e'$  od počátku souřadného systému při hrubování pravého boku v ose Z1 (tato vzdálenost není na obrázku nijak zakótována).

$$e' = f + g + h - \frac{D_{fr1}}{2} \text{ [mm]} \quad (29)$$

Kde:  $h$  [mm] je šířka drážky v místě řezu, odvíjející se od velikosti  $a_p$ . Vztah pro výpočet je:

$$h = \check{S}_v - (2 \cdot g) \text{ [mm]} \quad (30)$$

Obdobně se situace řeší také u frézy o průměru 4 mm a dalších hloubek řezu. Tímto je vyřešen výchozí bod nástrojů v ose Z1 při hrubování šroubovitě drážky. Zbývá určit vzdálenost  $ch$  středu nástroje od počátku souřadného systému (nulového bodu) v ose X1 (viz Obr. 26).

$$ch = \frac{D_p}{2} - a_p \text{ [mm]} \quad (31)$$

Kde:  $D_p$  [mm] je největší průměr polotovaru.

Tímto je určen výchozí bod nástroje pro hrubování šroubovitě drážky. Nástroj se při něm bude pohybovat pouze lineární interpolací v ose Z1, tedy rovnoběžně s osou rotace obrobku. Nástroj začíná svůj pohyb v kladné části osy Z1 a pohybuje se do její záporné části. Pro vytvoření šroubovice je ale nutný současný pohyb obrobku, konkrétně pohyb rotační. To je v tomto případě zajištěno řízením rotační osy C4. Je potřeba zjistit úhel, o který se má obrobek otočit. K tomu poslouží rozteč známá z výkresu. Výše byla zmíněna rozteč v normálové rovině  $t_n$ . Pro tento účel je ale nezbytné použít rozteč v ortogonální rovině  $t_o$ . Rozteč je vzdálenost dvou sousedních stejnohlých boků jednoho závitu ve směru osy. U jednochodého závitu (jako v tomto případě) je rozteč totožná se stoupáním. Pokud je tedy známá vzdálenost posunutí při jedné otáčce (rozteč), je možné dopočítat úhel natočení pro libovolnou délku posunutí. Velikost úhlu bude v závislosti rozteče připadající na jednu otáčku přímo úměrně vzrůstat. Pro výpočet lze tedy použít trojčlenku.

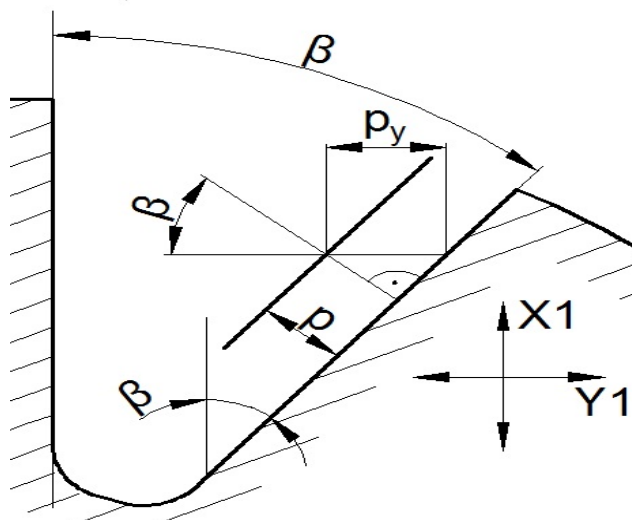


$$\acute{u}š_D = \frac{l_{Z1} \cdot 360^\circ}{t_o} [^\circ] \quad (32)$$

Kde:  $l_{Z1}$  [mm] je dráha, kterou nástroj urazí v ose Z1 (podél osy rotace) při obrábění šroubovitě drážky, je zvolena a jedná se o součet délky obráběné plochy, odjezdu a nájezdu,  $\acute{u}š_D$  [°] úhel, o který se při obrábění otočí obrobek (v závislosti na zvolené  $l_{Z1}$ ).

Z výkresu je známo, že drážka má pravou šroubovici. Proto se musí obrobek otáčet v záporném směru osy C4, tedy proti směru hodinových ručiček (při pohledu z čela, na němž se nachází nulový bod obrobku). Tímto je vyřešeno hrubování šroubovitě drážky.

Dále je nezbytné vyřešit hrubování podélných drážek. Použitými nástroji jsou čelní válcové frézy s průměry 8 a 4 mm. Zde lze postupovat obdobně jako u drážky šroubovitě. Podélné drážky mají také profil rovnoramenného lichoběžníku s vrcholovým úhlem  $40^\circ$  a stejnou geometrií jako šroubovitá drážka. V podkapitole 3.2 popisující možné způsoby výroby byl podrobněji popsán důvod tohoto zjednodušení. Zde je ale rozdíl v její orientaci. Geometrií břitu budoucí odvalovací frézy je dán úhel čela  $0^\circ$ . Tudíž drážka musí být situována tak, že osa symetrie drážky svírá s osou X1 úhel  $20^\circ$  a bok drážky je s ní rovnoběžný. Na plochách je zde také počítáno s přídávkem na plochu  $p$ . Ten na plochách zůstane také po předdokončení. Odstraní se až závěrečným ostřením. Opět se jedná o kolmou vzdálenost k plochám (*Obr. 27*).



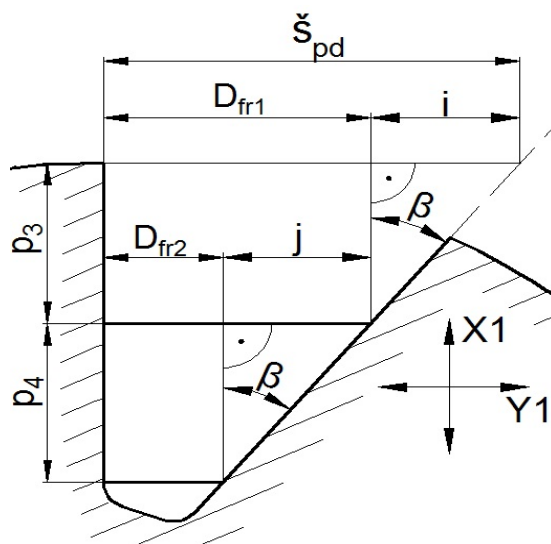
Obr. 27: Přídavek na plochu a přídavek v ose Y1 u podélné drážky

Proto je potřeba ho přepočítat do směru šířky drážky, v tomto případě do osy Y1. Vztah pro výpočet přídavku  $p_y$  je následující:

$$p_y = \frac{p}{\cos \beta} \text{ [mm]} \quad (33)$$

Kde:  $p_y$  [mm] je přídavek na pravý bok v ose Y1,  $\beta$  [°] je úhel sklonu boku zubu. Jelikož je úhel čela nulový, je tento úhel totožný s vrcholovým úhlem lichoběžníku a jeho velikost je 40°.

Dále je potřeba určit hloubku, do které je schopna obrábět fréza průměru 8 mm. Jedná se o přídavek  $p_3$  (Obr. 28) pro větší frézu v ose X1.



Obr. 28: Přídavky pro podélnou drážku a pomocné rozměry

Vztah pro jeho výpočet je:

$$p_3 = \frac{i}{\tan \beta} \text{ [mm]} \quad (34)$$

Kde:  $i$  [mm] je odvěsna pomocného trojúhelníku (viz Obr. 28) a vypočte se následovně:

$$i = \check{s}_{pd} - D_{fr1} \text{ [mm]} \quad (35)$$

Kde:  $\check{S}_{pd}$  [mm] je šířka podélné drážky ve směru osy Y1 (kolmo na osu X1) měřena v jejím nevyšším bodě.

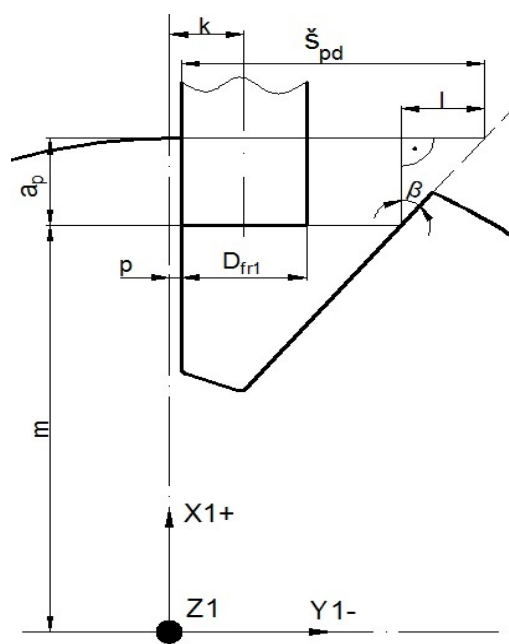
Dále se spočte přídavek  $p_4$  (viz Obr. 28) pro hrubování menší frézou o průměru 4 mm.

$$p_4 = \frac{j}{\operatorname{tg} \beta} \text{ [mm]} \quad (36)$$

Kde:  $j$  [mm] je odvěsna pomocného trojúhelníku (viz Obr. 28) a vztah pro výpočet je:

$$j = D_{fr1} - D_{fr2} \text{ [mm]} \quad (37)$$

Tímto jsou určeny oba přídavky. Ty lze následně rozdělit na jednotlivé hloubky řezu  $a_p$ . To ovlivní výchozí polohu středu nástrojů v ose X1 a Y1. Tu je nezbytné znát pro potřebu tvorby NC programu. Pro názornost toto bude vysvětleno na hrubování první hloubky řezu větší frézou. Vzdálenost středu frézy od osy X1 je označena jako  $k$  (Obr. 29). Jedná se tedy o výchozí bod v ose Y1. Na obrázku je již zobrazen přídavek na plochu  $p$ .



Obr. 29: Výchozí bod nástroje v ose X1 a Y1 při hrubování podélné drážky

Vztah pro výpočet je:

$$k = p + \frac{D_{fr1}}{2} \text{ [mm]} \quad (38)$$

Pro výpočet lze jednoduše k poloměru frézy připočítat přídavek na plochu. Je to dáno tím, že levý bok drážky je rovnoběžný s osou X1, tudíž přídavek je ve směru osy Y1. Dále se vypočte vzdálenost  $k'$  v ose Y1 pro hrubování pravého boku (tato vzdálenost není zakótována na obrázku).

$$k' = p + \check{S}_{pd} - l - \frac{D_{fr1}}{2} \text{ [mm]} \quad (39)$$

Kde:  $l$  [mm] je přepona pomocného trojúhelníku, vztah pro výpočet je:

$$l = \operatorname{tg} \beta \cdot a_p \text{ [mm]} \quad (40)$$

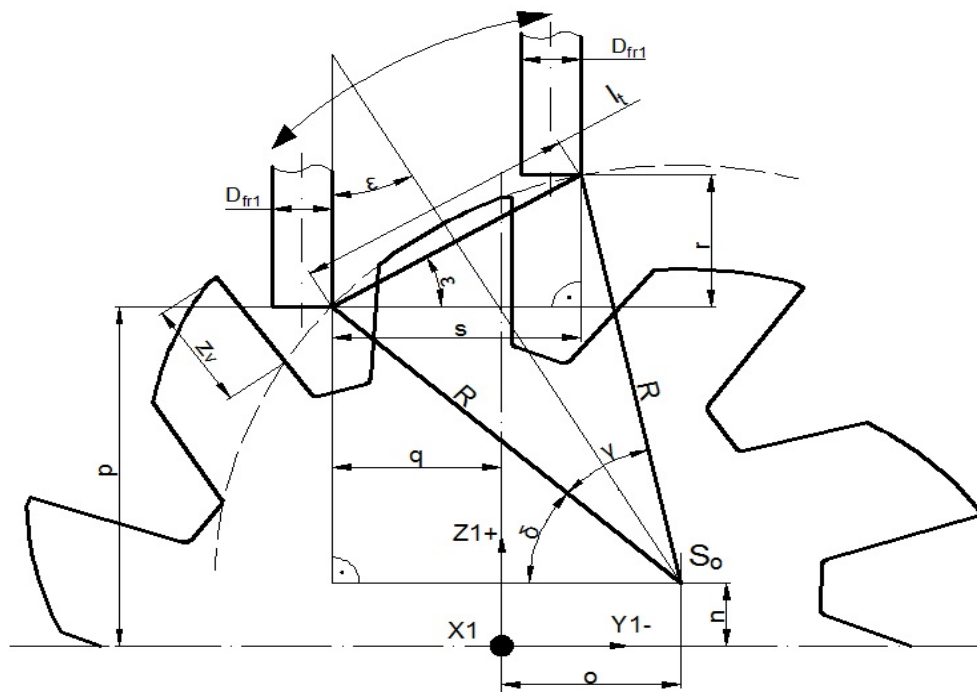
Zbývá určit vzdálenost nástroje od nulového bodu v ose X1, označenou jako  $m$  (viz Obr. 29). K tomu poslouží jednoduchý vztah:

$$m = \frac{D_p}{2} - a_p \text{ [mm]} \quad (41)$$

Bylo řečeno, že podélné drážky jsou také ve šroubovici. Pro její vytvoření musí dojít ke kombinaci lineárního pohybu nástroje a rotace obrobku. Nástroj se pohybuje podél osy rotace obrobku, tedy v ose Z1. Otáčení obrobku zajišťuje rotační osa C4. Zde se úhel, o který se obrobek v této ose natočí, nemusí dopočítávat, ale je dán výkresem. Podélné drážky mají levou šroubovici. Pro její vytvoření se musí obrobek otáčet v kladném směru osy C4, tedy ve směru hodinových ručiček (při pohledu z čela, na němž se nachází nulový bod obrobku).

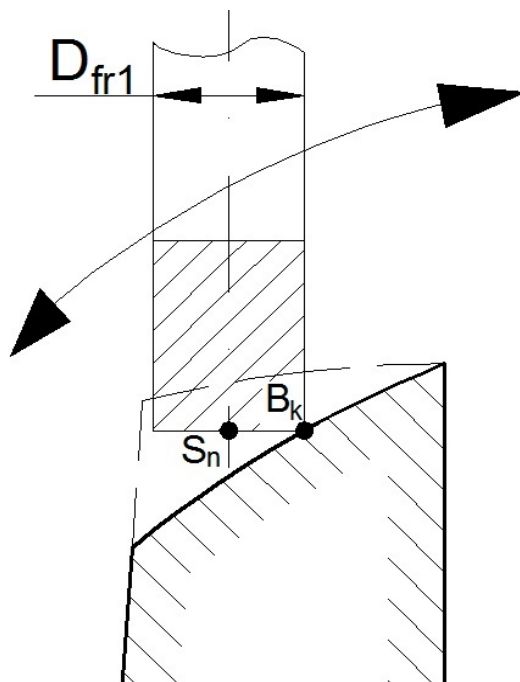
Podélných drážek je po obvodu 10. Stejnolehlé boky sousedních drážek tedy svírají úhel  $36^\circ$ . Po obrobení drážky se obrobek vždy otočí o  $36^\circ$  v ose C4 (na směru otáčení zde nezáleží). Tímto je vyřešeno hrubování podélných drážek.

Dále se hrubují hlavy zubů. K tomu je také použita čelní válcová fréza o průměru 8 mm. Hrubování probíhá tak, že se fréza pohybuje kruhovou interpolací po oblouku, který tvoří hlavy zubů. Osa rotace frézy je přitom rovnoběžná s budoucím čelem zubu odvalovací frézy a zároveň s osou Z1. Obrobek během toho nekoná žádný pohyb. Po obrobení zubu se budoucí fréza otočí o  $36^\circ$  tak, aby mohl být hrubován další zub. Zde se fréza pohybuje také kruhovou interpolací po oblouku ale v opačném směru oproti předchozímu zubu. Takto se celý proces opakuje, dokud nejsou obrobeny všechny hlavy zubů. Pro tento účel je přetočený souřadný systém a to tak, že osa Z1 je rovnoběžná s osou čelní válcové frézy a osa X1 je osou rotace obrobku. Nejprve bude popsán pohyb nástroje v ose Z1 a Y1. Nezbytné je definovat oblouk, po kterém se bude fréza pohybovat. Ten má sice stejný poloměr jako hlavová kružnice, ale jeho střed  $S_o$  je oproti jejímu vyosený. Oblouk je definován dvěma body a poloměrem R50. Prvním bodem je průsečík osy Z1 a hlavové kružnice odvalovací frézy. Druhý bod je dán výkresem, kde je zadána vzdálenost označená jako „zdvih vačky“. Jedná se o vzdálenost  $z_v$  na čele, měřenou od hlavy zubu na největším průměru frézy směrem do jejího středu. Tímto je oblouk kompletně definován. Vzdálenost jeho středu od středu hlavové kružnice (a nulového boku) v ose Y1 je označena jako  $o$ . V ose Z1 se jedná o vzdálenost  $n$  (Obr. 30).



Obr. 30: Výchozí a koncový bod pro kruhovou interpolaci při hrubování hlav zubů

Pro účely této práce je zvolen výchozí bod pro kruhovou interpolaci. Ten se nalézá v již vyhrubované podélné drážce, proto je nutné volit jej s ohledem na její rozměry. Takto je zvolena vzdálenost čela frézy  $p$  v ose Z1. Dále se zvolí vzdálenost  $q$  (viz Obr. 30) v ose Y1. To je vzdálenost od nulového bodu k místu dotyku „krajního bodu  $B_k$ “ s kruhovým obloukem. Pokud se protne čelo frézy s pomyslným válcem s kruhovou podstavou o průměru  $D_{fr1}$  se středem v ose rotace, vznikne kružnice. „Krajní bod“ náleží právě této kružnici. Pro zadávání do programu je ale potřeba k této hodnotě přičíst poloměr frézy  $\left(\frac{D_{fr1}}{2}\right)$  tak, aby byla zadána poloha středu nástroje  $S_n$ . Podrobněji je toto znázorněno na obrázku (Obr. 31). Tlustá čára představuje hlavu zuby po hrubování, čárkovaná před ním.



Obr. 31: Detail hrubování zuby pomocí kruhové interpolace

Dále je potřeba určit koncový bod kruhové interpolace a to zjištěním vzdálenosti od výchozího bodu v ose Z1 a Y1. K tomu je nezbytná délka části oblouku, po které se nástroj pohybuje. Ta je vymezena kruhovou výsečí o středovém úhlu  $\gamma = 36^\circ$ . Spočte se úhel  $\delta$  (viz Obr. 30) v pomocném pravoúhlém trojúhelníku.

$$\sin \delta = \frac{p-n}{R} [^\circ] \quad (42)$$

Dále se spočte úhel  $\varepsilon$  v dalším pomocném pravoúhlém trojúhelníku. K tomu poslouží znalost úhlů  $\gamma$  a  $\delta$ . Dále znalost součtu velikostí vnitřních úhlů v trojúhelníku.

$$\varepsilon = 180^\circ - 90^\circ - \delta - \frac{\gamma}{2} [^\circ] \quad (43)$$

Následně se již spočte vzdálenost koncového bodu od bodu počátečního. V ose Y1 je tato vzdálenost označena jako  $s$  a v ose Z1 jako  $r$  (viz Obr. 30). Pro výpočet poslouží pomocný pravoúhlý trojúhelník a znalost podobnosti trojúhelníků.

$$s = \cos \varepsilon \cdot l_t [mm] \quad (44)$$

$$r = \sin \varepsilon \cdot l_t [mm] \quad (45)$$

Kde:  $l_t$  [mm] je délka tětiny, tedy úsečky spojující počáteční a koncový bod. Vztah pro výpočet je:

$$l_t = 2 \cdot R \cdot \sin\left(\frac{\gamma}{2}\right) \quad (46)$$

Tímto je známa vzdálenost koncového bodu od počátečního v obou osách. Pro potřeby NC programu je opět potřeba v ose Y1 zahrnout poloměr frézy, aby byla programována poloha středu nástroje.

Nástroj se pohybuje kruhovou interpolací a je potřeba, aby se jeho střed pohyboval po středu zubu budoucí frézy. Aby toto bylo zajištěno, je potřeba určit polohu nástroje v ose X1. Proto je nezbytné zjistit šířku zubu  $\check{S}_z$  na jeho vrcholu. Ta se zjistí jednoduše odečtením šířky drážky na jejím vrcholu od rozteče v ortogonální rovině  $t_o$ .

$$\check{S}_z = t_o - \check{S}_v [mm] \quad (47)$$

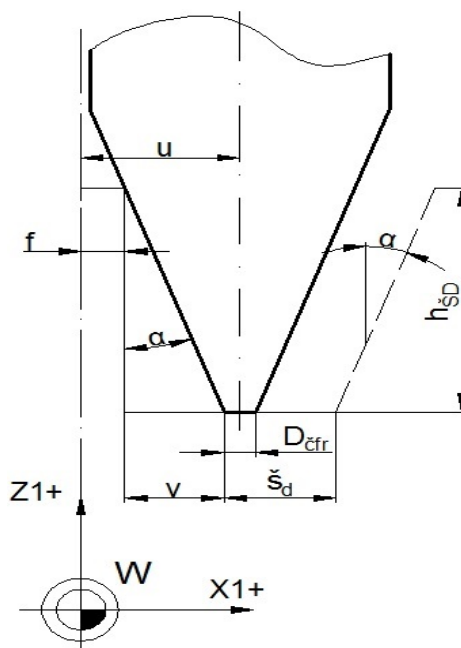
Výchozí poloha pro pohyb nástroje v ose X1 bude tedy ve středu šířky zubu  $\check{S}_z$ . Nelze ji ovšem libovolně zvolit. Ve chvíli kdy budou frézovány hlavy zubů, bude již vyhrubována šroubovitá drážka a právě na její rozměry a polohu musí být brán zřetel. Výše bylo zmíněno, že je zvolena vzdálenost  $f$  od nulového bodu k okraji drážky (na jejím vrcholu) v ose Z1 (viz Obr. 26). Po přetočení souřadného systému se jedná o osu X1. Výpočet výchozí polohy se tedy provede odečtením poloviny šířky zubu od zvolené vzdálenosti  $f$ . Dále se určí koncová poloha nástroje při kruhové interpolaci v ose X1. Ta se oproti výchozí změni o hodnotu získanou vydělením rozteče  $t_o$  počtem zubů frézy. V závislosti na tom, jestli se nástroj pohybuje interpolací ve směru hodinových ručiček nebo proti, se tato hodnota buď přičte, nebo odečte. Zároveň přitom ale musí být brán ohled na orientaci šroubovice.

Tímto je popsáno hrubování ploch a následuje jejich předdokončování. Po něm již na plochách zůstane pouze přídavek na plochu  $p$  pro ostření. Nejprve se obrábí podélné drážky. Při tom je nutné vycházet z předchozího hrubování. Jak bylo výše zmíněno, bude k tomu použita speciální čepová fréza ČF-40°-4z-SK. Úhel  $\beta$ , který svírají boky drážek je shodný s vrcholovým úhlem frézy. Aby byla vytvořena požadovaná geometrie, musí být obrobek oproti hrubování pootočený v ose C4 o polovinu úhlu  $\beta$ , tedy o 20°. Je použit původní souřadný systém jako u hrubování obou drážek. Hloubka drážek je větší než délka rezné části čepové frézy (měřeno v ose nástroje). Obrábění tedy musí proběhnout minimálně na dvě hloubky řezu  $a_p$ . Celkově vzhledem k rozměrům frézy a drážky proběhne obrobení každé na 6 záběrů. Důvodem je kromě již výše zmíněné délky rezné části frézy také přídavek po hrubování na jednom z boků. Tento přídavek je vzhledem ke geometrii frézy příliš velký na to, aby se mohl obrobít na jednu radiální hloubku řezu  $a_e$ . Poloha středu nástroje při první hloubce řezu  $a_p$  v ose X1 je zvolena. Při druhé hloubce řezu  $a_p$  se obrábí nejen boky ale i samotné dno drážek. Proto je poloha nástroje v ose X1 dána hloubkou drážky. Nejvhodnější je zvolit obě hloubky řezu  $a_p$  stejné (vzhledem k hloubce drážky). K přesnému určení polohy středu čepové frézy v ose Y1 pro jednotlivé záběry poslouží software Catia V5R21. Při obrábění musí opět docházet ke kombinaci lineárního pohybu nástroje a rotaci obrobku, aby vznikla šroubovice, jak je to popsáno u hrubování této drážky. Po obrobení jedné drážky se obrobek otočí o 36° a obrobí se další drážka. Takto se celý proces opakuje u zbylých drážek.



Posledním úsekem je předdokončení boků a dna šroubovitě drážky. K tomu je použita čepová fréza ČF-40°-4z-SK a přetočený souřadný systém, stejný jako u hrubování hlav zubů (osa Z1 je rovnoběžná s osou nástroje). Nástroj se zde také pohybuje kruhovou interpolací v obou směrech jako u hrubování hlav zubů. Při hrubování se vytvářela šroubovice se středem v ose rotace obrobku. Dno hotové drážky je ale tvořeno obloukem, jehož střed není v ose rotace obrobku. Střed je stejný jako u oblouku tvořícího hlavy zubů, zatímco rádius je dán vzdáleností od něj. Touto vzdáleností je hloubka profilu šroubovitě drážky daná výkresem. To způsobilo ponechání většího množství materiálu na dně šroubovitě drážky, který nelze odebrat pouze na jednu hloubku řezu  $a_p$ . Zde byly zvoleny dvě hloubky řezu. První se vhodně zvolí a druhá je dána dnem drážky. Vhodná je opět rovnost obou hloubek řezu  $a_p$ . Po zvolení počátku obou kruhových interpolací v osách Z1 a Y1 lze koncový bod v těchto osách určit stejně jako u hrubování hlav zubů.

Při určení výchozí polohy nástroje v ose X1 musí být také bráno v potaz předchozí hrubování. U něho byla pro určení výchozí polohy nástroje zvolena vzdálenost  $f$  od nulového bodu k okraji drážky na jejím vrcholu. Pomocí ní lze určit výchozí bod pro pohyb nástroje při předdokončování. Pro jednodušší výpočet si lze představit nulový rádius zaoblení frézy  $r_e$  a také nulový rádius u dna šroubovitě drážky. Toto zjednodušení je možné z důvodu stejné velikosti obou rádiusů. Situace je vidět na obrázku (Obr. 32).



Obr. 32: Výchozí bod kruhové interpolace v ose X1 u předdokončení šroubovitě drážky

Vzdálenost osy frézy  $u$  od nulového bodu v ose X při obrábění prvního (levého) boku lze spočítat následovně:

$$u = f + v + \frac{D_{cfr}}{2} \quad [mm] \quad (48)$$

Kde:  $D_{cfr}$  [mm] je malý průměr čepové frézy (při zjednodušení),  $v$  [mm] je odvěsna v pomocném trojúhelníku. Vztah pro její výpočet je:

$$v = \operatorname{tg} \alpha \cdot h_{SD} \quad [mm] \quad (49)$$

Kde:  $h_{SD}$  [mm] je hloubka šroubovitě drážky s přídatkem na plochu  $p$ , tedy 12,5 mm.

Výchozí poloha  $u'$  v ose X1 pro obrábění druhého boku se spočte následovně:

$$u' = f + v + \check{S}_d - \frac{D_{\check{c}fr}}{2} [mm] \quad (50)$$

Kde:  $\check{S}_d$  [mm] je šířka dna šroubovitě drážky (při zjednodušení se zanedbáním rádiusu).

Dále se určí koncová poloha nástroje při kruhové interpolaci v ose X1. Ta se oproti výchozí změně o hodnotu získanou vydělením rozteče  $t_o$  počtem zubů frézy. V závislosti na tom, jestli se nástroj pohybuje interpolací ve směru hodinových ručiček nebo proti, se tato hodnota buď přičte, nebo odečte. Zároveň přitom musí být brán ohled na orientaci šroubovice. Takto se obrobí dno a boky jedné zubové mezery. Poté se obrobek otočí o  $36^\circ$  a celý proces se opakuje.

V popisu tohoto způsobu výroby bylo řečeno, že jako poslední se obrobí pomocí tvarového nože rádiusy na vrcholu drážky. Z hlediska kinematiky je tento proces principiálně stejný jako hrubování hlav zubů. Nůž se zde také pohybuje kruhovou interpolací a lze jej upnout do revolverové hlavy nebo do soustružnicko - frézovacího vřetena.

## 4.2 Program pro druhý způsob

K tomu aby bylo možné na stroji vyzkoušet teoreticky navrženou kinematiku, je potřeba ji převést do formy NC programu. K tomu posloužil program SinuTrain 4.5. Jedná se o softwarový simulátor pro řídicí systémy SINUMERIK, konkrétně pro verze 828D a 840D sl. Druhou jmenovanou verzí je vybavené soustružnické centrum. Program lze vytvářet ručně pomocí G kódu. Jednodušší způsob je zadávání parametrů do připravených cyklů, kdy programátor zadá pouze potřebné parametry a systém dopočítá zbytek. Dále lze také zadávat program parametricky. Parametry se označují písmenem  $R$ . Programátor zadá do programu například souřadnice nebo velikost posuvu pouze obecně pomocí parametru. Tomu se poté přiřadí konkrétní hodnota, jež lze libovolně měnit. Parametry lze vzájemně kombinovat nebo s nimi počítat. Způsoby zadávání lze vzájemně kombinovat a postupně jsou v programech použity všechny tři. Program není tvořen vcelku pro celou výrobu, ale je rozdělen na více částí, zejména z důvodu snazšího upravování například při zkoušce výroby. Z každého úseku celé výrobní operace je popsáno pouze to nejdůležitější, co ho charakterizuje. Celé programy jsou k dispozici na přiloženém CD - ROMu.

V prvním programu se hrubuje šroubovitá drážka čelními válcovými frézami o průměru 8 a 4 mm ze slinutého karbidu. Na něm bude také podrobněji popsán způsob tvorby programu a význam jednotlivých použitých bloků nebo funkcí. V hlavičce programu (blok N10) se navolí polotovar, jeho umístění ve stroji, nulový bod a další potřebné hodnoty. Dále následuje skupina bloků (N20 – N70) pro výměnu (navolení) nástroje a nastavení otáček vřetena (*Obr. 33*).

CHAN1		USB/Programy/Diplomka/1. Hrub_sroub_drazky	
P	N10	Hlavička programu	S4: Trubka G54
G			
G	N20	T="FR-D8 Z4"	
	N30	TC(1,0,,1,90,0) ;Tool change	
G	N40	R691=500 R690=880	
	N50	L710(1) ;Move to tool change position, axes: X=>Z	
G	N60	G0 B1=90	
T	N70	T=FR-D8 Z4 S1=0ot.	
G			
G	N80	R50 = 000 ;Posuvová rychlost frezy prumer 8 mm	
G	N90	R55 = 000 ;Posuvová rychlost frezy prumer 4 mm	
G			
→	N100	RYCHL X98 Z9.364 C4=0	
→	N110	FR50/min Z-110.636 C4=-2745.297ink	
→	N120	RYCHL X120	
→	N130	RYCHL Z5	
→	N140	RYCHL X98 Z12.826 C4=0	
→	N150	FR50/min Z-107.174 C4=-2745.297ink	

Obr. 33: Část programu pro hrubování šroubovitě drážky

V dalších dvou blocích jsou vloženy obecné parametry pro zadání posuvové rychlosti obou fréz. Blokem N100 již začíná samotné programování, vysvětlené na první dráze při hrubování šroubovitě drážky. Při něm se programují souřadnice pouze ve dvou osách jako u soustružení, osa X1 označuje průměr a Z1 délku. Nástroj najede do souřadnic počáteční polohy nástroje. Ta se v ose Z1 odvíjí od zvolené vzdálenosti  $f$ , velikosti přídavku na plochu  $p$  a axiální hloubce řezu  $a_p$  a spočte se dle vztahu (27). Pro případ na obrázku je  $f = 5$  mm,  $p = 0,1$  mm a  $a_p = 1$  mm. V ose X1 slouží k určení polohy vztah (31), kde se počítá vzdálenost  $ch$ . To je vzdálenost čela frézy od osy Z1. V ose X1 je ale zadáván průměr, proto musí být vynásobena dvěma. Souřadnice jsou zadány cyklem „přímka“. Stejně se zadávají i ve zbytku programu. Do tohoto cyklu se jednoduše zadají parametry představující požadovanou polohu nástroje a jeho posuv. Výhodou je možné nastavení polohy v šesti lineárních a čtyřech rotačních osách. Tímto je nahrazeno ruční zadávání souřadnic. V rotační ose C4 je absolutně zadán úhel  $0^\circ$ . Dále se zadá koncová poloha nástroje. K tomu slouží také cyklus „přímka“. V ose X1 se souřadnice oproti počátku nijak nemění. V ose Z1 se změní o zvolenou hodnotu, která musí být větší než délka součásti, v tomto případě 120 mm. Z té se pomocí vztahu (32) dopočítá úhel, o který se při současném posuvu nástroje natočí obrobek v ose C4 tak, aby vznikla požadovaná šroubovice. Jeho velikost je  $2745,297^\circ$  a je zadán přírůstkově s ohledem na počáteční úhel v ose C4 zadáný absolutně. Do programu musí být zadán se záporným znaménkem tak, aby se obrobek natáčel v záporném směru osy C4 a vznikla tak pravá šroubovice. Takto je shrnuta podstata obrábění drážky ve šroubovici. Bloky N120 a N130 slouží pro odjezd nástroje. V bloku N140 se nástroj nastaví do výchozí polohy a celý proces se opakuje.

Ve druhém programu se stejnými čelními válcovými frézami jako v předešlém programu hrubují podélné drážky. Zde se popíše hrubování obou boků drážky při jedné hloubce řezu  $a_p$ . Startovací pozice je určena pomocí vztahu (38) pro osu Y1 a vztahu (41), kde se vypočte vzdálenost  $m$  od osy Y1 k čelu frézy. Pro zadní průměrové souřadnice v ose X1 se musí vynásobit dvěma. V rotační ose C4 je absolutně zadán úhel  $0^\circ$  (Obr. 34).

```

→ N100 RYCHL X97.2 Z10 Y-4.1 C4=0
→ N110 FR60/min Z-110 C4=3.406ink
→ N120 RYCHL Y-14.703
→ N130 FR60/min Z10 C4=-3.406ink
    
```

Obr. 34: Část programu pro hrubování boků podélné drážky při stejné hloubce řezu  $a_p$

Podélné drážky jsou také ve šroubovici a pro zadání koncových souřadnic se tedy také použije cyklus „přímka“. V ose Z1 se zvolí koncová souřadnice tak, aby nástroj vykonal delší dráhu, než je délka součásti. Dále se přírůstkově zadá úhel natočení obrobku pro vytvoření šroubovice a velikost posuvu (opět parametricky). Úhel je dán výkresem a jeho velikost je  $3,406^\circ$ . Zadá se kladně pro vytvoření levé šroubovice. Po dosažení koncových souřadnic se změní poloha nástroje pouze v ose Y1, podle vztahu (39). Pro obrobení druhého boku se u cyklu „přímka“ zadá zvolená koncová souřadnice v ose Z1 a přírůstkově úhel  $3,406^\circ$ , tentokrát se záporným znaménkem. Obdobně se programují další hloubky řezu. Po vyhrubování první drážky se obrobek otočí o  $36^\circ$ , tedy  $C4 = 36^\circ$  (absolutně). Takto se celý proces se opakuje u všech drážek.

Třetí program popisuje hrubování hlav zubů čelní válcovou karbidovou frézou o průměru 8 mm. V něm je použit přetočený souřadný systém (osa Z1 je rovnoběžná s osou frézy). Při hrubování hlav zubů se nástroj pohybuje po kruhovém oblouku. Základem jsou tedy kruhové interpolace ve směru hodinových ručiček (G2) a proti němu (G3) s poloměrem R50. Souřadnice počátku interpolace v ose Z1 a Y1 jsou zvolené. Koncové se dopočítají na základě vztahů (42) až (46). Souřadnice v ose X1 se zadávají vzhledem k jejich charakteru parametricky. Pokud by souřadnice v ose X byly zadávány absolutně, celý program by se tím prodloužil a zneprůhlednil. Na obrázku je uvedena stěžejní část programů zahrnující kruhové interpolace a parametrické zadávání souřadnic v ose X1 (Obr. 35). V programu je pouze jeden nástroj, a proto je posuv zadán absolutně.

```

CHAN1 USB/Programy/Diplomka/3. Hrub hlav zubu
G N200 R20=0 ;nastaveni kontrolniho parametru na 0
G N210 R30=-3.227 ; nastaveni vychozi polohy X
G N220 G0 C4=0
G N230 LABEL1:; Misto skoku
G N240 IF 110>R30; rozhodovani na zaklade aktualni polohy, jestli jet dal
      nebo skoncit
G N250 G1 X=(R30) Y-7.526 Z51.113
G N260 G2 X=(R30-1.5736) Y22 Z42 CR=50.
G N270 G0 Z51
G N280 G0 C4=IC(-36)
G N290 R30=(R30+1.5736); posunuti polohy v X na dalsi zub
G
G N300 G1 X=(R30-1.5736) Y22 Z42
G N310 G3 X=(R30) Y-7.526 Z51.113 CR=50.
G N320 G0 C4=IC(-36)
G N330 R30=(R30+1.5736); posunuti polohy v X na dalsi zub
G
G N340 R20=$AA_IW[X1]; nacteni aktualni polohy X
G N350 GOTOB LABEL1; Skok na LABEL1
    
```

Obr. 35: Část programu pro hrubování hlav zubů

Ve čtvrtém programu je popsáno předdokončení podélných drážek pomocí speciální čepové frézy. To, jak bylo výše popsáno, proběhne na šest záběrů frézy u každé drážky. Souřadný systém je zde stejný jako u hrubování drážek a musí být zachována šroubovice těchto drážek. Princip programování je tedy stejný jako u hrubování a opět je použita funkce „přímka“. Rozdíl je v úhlu natočení obrobku před projetím drážky. Při jejím hrubování byla v ose C4 nastavena absolutně hodnota  $0^\circ$ . Čepová fréza má vrcholový úhel  $40^\circ$ , stejný úhel svírají také boky drážky. Z výkresu je požadován úhel čela  $0^\circ$ . Z toho důvodu musí být obrobek oproti hrubování pootočen o polovinu vrcholového úhlu, tedy o  $20^\circ$ . Proto je absolutní velikost počátečního úhlu v ose C4 =  $340^\circ$ . Po nastavení nástroje do výchozí pozice je již možné pomocí cyklu „přímka“ programovat samotné obrobení drážky. Při stejné hloubce řezu  $a_p$  bude nejprve obroben jeden bod drážky a poté na dvě radiální hloubky řezu  $a_e$  druhý bok. Část programu, která toto popisuje, je vidět na obrázku (Obr. 36).

```
→ N100 RYCHL C4=340
→ N110 RYCHL X78 Z10 Y12.839
→ N120 FR70/min Z-110 C4=3.406ink
→ N130 RYCHL X78 Y5.489
→ N140 FR70/min Z10 C4=-3.406ink
→ N150 RYCHL C4=340
→ N160 RYCHL X78 Z10 Y5.052
→ N170 FR70/min Z-110 C4=3.406ink
```

Obr. 36: Část programu pro předdokončení podélné drážky při stejné hloubce řezu  $a_p$

Obdobně se programuje obrábění dna. Poté se obrobek otočí o  $36^\circ$  a celý proces se opakuje u dalších drážek. V programu je posuv frézy zadán opět parametricky. Oproti předchozím programům je zde problém se simulací. Nástroj je speciální, a tudíž ho v ní nelze zobrazit. Musel být ovšem nějak programován střed nástroje. Byla vytvořena imaginární fréza o průměru 2,798 mm a  $r_e$  0,5. Stejný rádius má čepová fréza. Nově vytvořená fréza má také s čepovou frézou shodný průměr na čele.

Pátý a poslední program je pro předdokončení dna a boků šroubovité drážky. Je zde také použita speciální čepová fréza. Pro účely simulování drah byla použita opět fréza o průměru 2,798 mm jako u čtvrtého programu. V programu je stejným způsobem jako u hrubování hlav zubů přetočený souřadný systém (osa Z1 je rovnoběžná s osou rotace frézy). Hlavní část programu je zadána kruhovými interpolacemi G2 a G3. Počáteční a koncové souřadnice kruhových interpolací v ose Z1 a Y1 se určí obdobně jako u hrubování hlav zubů. V ose X1 se určí počáteční bod pro oba boky dle vztahů (48) a (50). Souřadnice v ose X1 jsou pro přehlednost a jednoduchost zadávány parametricky, což je možné vidět na obrázku (Obr. 37).

```
CHAN1 USB/Programy/Diplomka/5. Preddok sroub dr
G N220 R40=0 ;nastaveni kontrolniho parametru na 0
G N230 R10=-11.365; nastaveni vychozi polohy X
G N240 G0 C4=0
G N250 ;PROGRAM
G N260 LABEL1:; Misto skoku
G N270 IF 110>R40; rozhodovani (na zaklade aktualni polohy) jetli jet dal
      nebo skončit
G
G N280 G1 X=(R10-1.5736) Y18.4 Z32
G N290 G3 X=R10 Y-3.81 Z38.3 CR=37.5
G N300 G2 X=(R10-1.5736) Y16 Z28.9 CR=37.5
G
G N310 G1 X=(R10-1.0446) Y18.4 Z32
G N320 G3 X=(R10+0.529) Y-3.81 Z38.3 CR=37.5
G N330 G2 X=(R10-1.0446) Y16 Z28.9 CR=37.5
G N340 G0 Z51
G
G N350 G0 C4=IC(-36); natoceni o 36 na dalsi zub
G N360 R10=R10+1.5736; posunuti polohy X na pocatek dalsiho zubu
```

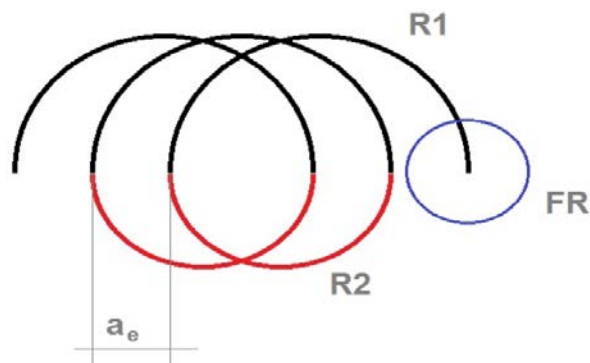
Obr. 37: Část programu pro předdokončení šroubovitě drážky

Tímto je hotovo všech pět NC programů pro obrobení řezné části frézy druhým způsobem. Ty není nutné pro potřeby stroje nijak upravovat nebo převádět jako například u CAM systémů pomocí postprocesoru. Program byl v SinuTrainu přímo vytvářen pro SINUMERIK 840D sl, kterým je také osazené soustružnické centrum CTX BETA 1250 TC 4A. Programy se jednoduše vloží do ovládacího panelu stroje pomocí USB flash disku.

### 4.3 Matematický model kinematiky obrábění pro třetí způsob

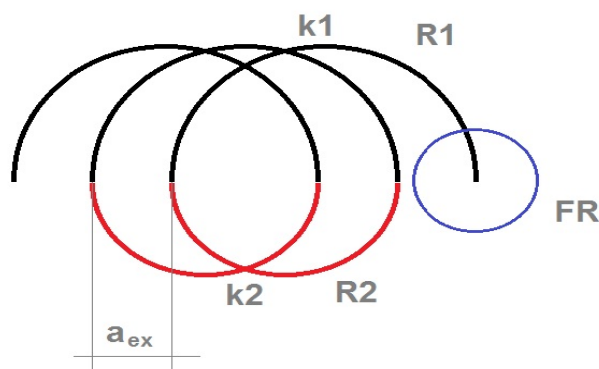
U třetího způsobu probíhá hrubování obou drážek takzvaným kvazitrochoidním frézováním. Níže tedy bude popsán jeho matematický model. Důležité je uvést, že autor práce není zároveň autorem této strategie obrábění. Tu navrhli, a její funkčnost zkouškou přímo na stroji (CTX BETA 1250 TC 4A) ověřili, pánové Ing. Jiří Vyšata, Ph.D a Ing. Luboš Kroft. Zde si autor práce se svolením obou jmenovaných tento způsob pouze vypůjčil. Zdrojem informací pro popis matematického modelu je sborník konference „Strojírenská technologie – Plzeň 2017“. Na ní byl také autory tento způsob obrábění představen v příspěvku s názvem „Využití i-machiningu při ortogonálním rotačním frézování drážek konstantního profilu“.

„Zjednodušeně lze říci že trochoida (v českém prostředí známá jako cykloida) je nahrazena kruhovými oblouky (Obr. 38). Střed frézy se má pohybovat po těchto obloucích zároveň s natáčením obrobku, čímž by vznikla šroubovice“ [5].



Obr. 38: Nahrazení trochoidy kruhovými oblouky [5]

„Základní myšlenka celé kombinované strategie je následující. Fréza pojede po půlkružnici o poloměru  $R1$ . Označujme tu půlkružnici  $k1$ . V koncovém bodě se třeba dotkne materiálu. Dále pojede po půlkružnici  $k2$  o poloměru  $R2$ . Nedojele však do výchozího bodu, protože tětiva oblouku  $k2$  je o  $a_{ex}$  kratší než tětiva oblouku  $k1$  (Obr. 39). Půlkružnice na sebe tečně navazují. V příštím cyklu se vše opakuje, ale dráhy jsou posunuty o  $a_{ex}$ . Takže fréza již odebírá materiál. Takto se cyklus stále opakuje. Po celou dobu se kontinuálně a rovnoměrně otáčí rotační osa. V technické praxi má většina šroubovic takový sklon, že  $a_{ex}$  je vlastně jen nepatrná část bočního přířuvu a pouze reprezentuje skutečnost, že fréza se podél válce při jeho otáčení průběžně pomalu posouvá“ [5].



Obr. 39: Trochoidní pohyb s předpokladem pohybu po spirále [5]

„Předpokládejme, že ve sklíčidle soustruhu je upnut válec o délce  $L_w$  a o průměru  $D_w$ . V nástrojovém vřetení je fréza o průměru menším, než je šířka požadované drážky, aby bylo možno s frézou kroužit.

Fréza má konat stejný pohyb, jak je popsáno v úvodu při vysvětlování obrázku (Obr. 38). Podstatný rozdíl je však v tom, že postup frézy do strany, jak je vidět na obrázku je jen zdánlivý v důsledku abstrakce otáčení rotační osy. Ve skutečnosti fréza postupuje po šroubovici vůči obrobku. To zásadním způsobem ovlivní dvě věci. Zaprvé se zmenší vzdálenost větví, protože do směru bočního přířuvu frézy v ose  $X$  připadne jen průmět  $a_{ex}$  skutečného bočního přířuvu  $a_e$ , který je nyní ve směru sklonu šroubovice. Zadruhé podobný jev postihne stanovení šířky šroubovice. Pro účely této práce zcela postačí poněkud přibližné stanovení šířky drážky  $Gr$ “ [5].

$$Gr = 2 \cdot R1 + D_{FR} [mm] \quad (51)$$

„Sklon šroubovice je dán jejím stoupáním  $P_t$ . Parametry, ze kterých má vycházet celá kinematika jsou tedy průměr  $D_w$  a délka  $L_w$  obrobku, stoupání šroubovice  $P_t$ , šířka drážky  $G_r$ , průměr frézy  $D_{FR}$  a boční přísuv  $a_e$ . V programu se ještě stanoví hloubka drážky, posuv, otáčky a velikost nájezdu. Na těchto parametrech ale nijak nezávisí kinematický model dráhy nástroje. Jak je již napsáno,  $a_{ex}$  je jen pouhý průmět skutečného bočního přísuvu  $a_e$ , který se jinak realizuje především jakoby mimochodem se otáčející rotační osou, zatímco fréza koná složitý cyklický pohyb. Poměr mezi nimi je jako poměr stoupání šroubovice ku přeponě jejího trojúhelníka. Označme si přeponu trojúhelníku  $H_t$ . Jednou odvěsnou je již zmíněné stoupání a druhou je obvod válce obrobku“ [5].

$$H_t = \sqrt{(\pi \cdot D_w)^2 + P_t^2} \text{ [mm]} \quad (52)$$

$$a_{ex} = a_e \cdot \frac{P_t}{H_t} \text{ [mm]} \quad (53)$$

Nyní lze spočítat poloměry oblouků drah frézy:

$$R_1 = \frac{G_r - D_{FR}}{2} \text{ [mm]} \quad (54)$$

$$R_2 = R_1 - \frac{a_{ex}}{2} \text{ [mm]} \quad (55)$$

„Pro každý z poloměrů je potřeba stanovit úhel pootočení rotační osy tak, aby otáčení bylo rovnoměrné. Úhel pootočení musí být přímo úměrný délce oblouku. Ten je přímo úměrný jeho poloměru a proto postačí vztahovat úhel pootočení rotační osy k poloměru oblouku, k němuž se má pootáčení vztahovat. Než se rotační osa jednou otočí dokola, vykoná se tolik cyklů, kolik bočních přísuvů je potřeba na celou přeponu. Ten počet lze využít ke stanovení pomocného jednotkového úhlu  $ALFA$ , který bude navíc navázán na poloměr kružnice právě pro zajištění výše uvedené přímé úměrnosti“ [5].

$$N = \frac{H_t}{a_{ex}} \text{ [mm]} \quad (56)$$

$$ALFA = \frac{360^\circ}{N \cdot (R_1 + R_2)} \text{ [mm]} \quad (57)$$

Jednotlivé úhly pootočení pro dráhy oblouků  $k_1$  a  $k_2$  pak lze snadno stanovit:

$$A_1 = ALFA \cdot R_1 \text{ [mm]} \quad (58)$$

$$A_2 = ALFA \cdot R_2 \text{ [mm]} \quad (59)$$

„Posledním důležitým výpočtem je stanovení příčného vyosení výchozího bodu  $P_{oY}$ . Kdyby výchozí bod nebyl příčně vyosen, byla by mírně vyosená drážka vinou skutečnosti, že oblouky  $k_1$  a  $k_2$  nemají stejné poloměry. V souvislosti s tím je vhodné si všimnout, že koncové body oblouků leží na jedné přímce se společnou souřadnicí  $Y$ “ [5].

$$P_{oY} = \frac{R_1 + R_2}{2} \text{ [mm]} \quad (60)$$

Výše popsaný model je použitelný pro hrubování obou drážek. Zbytek frézy (hrubování hlav zubu a předdokončení šroubovitě drážky) se obrobí stejně jako u druhého způsobu, stejný je tedy také matematický model kinematiky obrábění.



#### 4.4 Program pro třetí způsob

Jelikož autor práce nenavrhl „kvazitrochoidní“ způsob obrábění, není ani autorem NC programu pro hrubování šroubovitě a podélné drážky tímto způsobem. Je vytvořen pouze jeden program, do kterého jsou vstupní hodnoty pro obě drážky zadávány parametricky. Vstupními hodnotami jsou: průměr a délka obrobku, stoupání šroubovice, šířka drážky, průměr frézy, radiální hloubka řezu  $a_e$  (boční krok) a posuvová rychlost. Část programu pro hrubování šroubovitě drážky s parametrickým zadáním konkrétních vstupních hodnot je vidět na obrázku (Obr. 40). V programu je poté s těmito parametry počítáno dle vztahů uvedených v matematickém modelu pro tento způsob.

```
;Deklarace proměných
N40 R10=100      ;Do - průměr obrobku
N50 R11=100      ;Lo - souřadnice konce šroubovice
N60 R12=15.736   ;t - sroupání šroubovice
N70 R13=2.392    ;Š - šířka drážky
N80 R14=1.8      ;Dfr- průměr frézy
N90 R15=0.3      ;ae - požadovaný boční krok
N100 R16=500     ;F - pracovní posuv pro kvazitrochoidní obrábění
```

Obr. 40: Parametrické zadání vstupních hodnot pro hrubování šroubovitě drážky

Tento program byl pro účely práce pouze vypůjčen (od výše zmíněné dvojice autorů s jejich souhlasem) a nebude tedy popisována jeho tvorba. NC program je k dispozici na příloženém CD – ROMu.

NC Programy pro hrubování hlav zubů a předdokončení šroubovitě drážky jsou totožné jako u druhého způsobu.

#### 4.5 Zkouška výroby

Po úspěšném zhotovení programů bylo přistoupeno k samotné realizaci zkoušky. Pro výrobu byly použité řezné podmínky uvedené v podkapitole 3.4. U obou způsobů výroby je posledním úsekem operace obrobení radiusů na vrcholu šroubovitě drážky. To bohužel nemohlo být vyzkoušeno z důvodu nedostupnosti speciální tvarového nože na radiusy v den konání zkoušky. Do budoucna by ale bylo vhodné toto prakticky vyzkoušet.

Při výrobě druhého způsobu proběhlo hrubování obou drážek bez komplikací. Muselo být ale zajištěno co možná nejmenší vyložení čelních válcových fréz z důvodů zvýšení tuhosti. Nejvíce namáhaná byla menší fréza o průměru 4 mm, která obráběla do největší hloubky, čímž se zvětšilo její vyložení a snadněji se rozvibrovala. U hrubování hlav zubů se při pohybu frézy z podélné drážky po hlavě zubu směrem k čelu v místě řezu objevovaly jiskry a bylo slyšet, že se nástroj rozvibroval. Bez komplikací poté proběhlo předdokončení podélných drážek. Největší problém nastal při předdokončení šroubovitě drážky. Zde došlo k lomu čepové frézy, konkrétně její špičky na nejmenším průměru, který byl nejvíce namáhaný (Obr. 41).



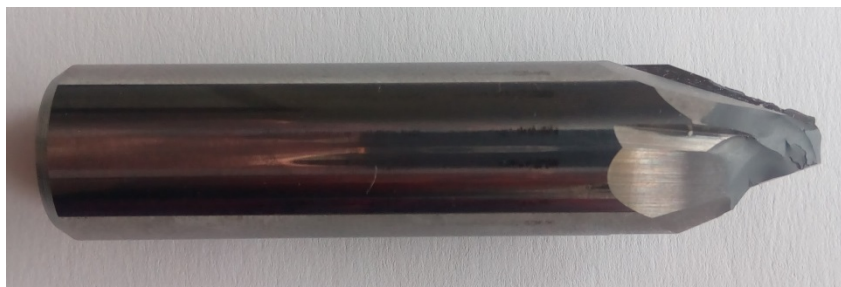
Obr. 41: Čepová fréza s ulomenou špičkou po vyjmutí ze stroje při druhém způsobu

Poté se rozhodlo o tom, že se výroba zkusí dokončit i s takto poškozenou frézou, což se také podařilo. Obrobek po vyjmutí ze stroje je vidět na obrázku (Obr. 42).



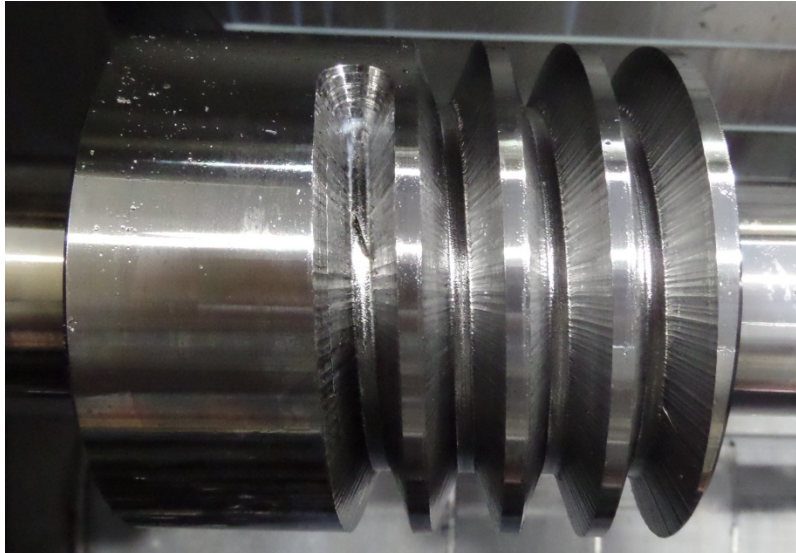
Obr. 42: Odvalovací fréza po obrobení dle druhého způsobu

U třetího způsobu bylo pro vyhrubování obou drážek naplánováno využít „kvazitrochoidního“ frézování. První se takto hrubovala šroubovitá drážka. Bohužel to bylo také to poslední, co se při tomto způsobu výroby realizovalo. Po obrobení přibližně dvou třetin drážky došlo k lomu frézy. V tomto případě tak rozsáhlému, že již nebylo možné jakkoli pokračovat v dalším obrábění. Poškozená fréza je vidět na obrázku (Obr. 43).



Obr. 43: Ulomená čepová fréza po vyjmutí ze stroje při třetím způsobu

Na dalším obrázku (Obr. 44) je k vidění upnutý obrobek s částí šroubovitě drážky obrobené před lomem frézy.



**Obr. 44:** Část šroubovitě drážky obrobená před lomem čepové frézy

V následující kapitole budou popsány možné příčiny a řešení zmíněných problémů odhalených během praktické zkoušky. Také budou zmíněny další poznatky a skutečnosti zjištěné během zkoušky.

## 5 Technicko – ekonomické hodnocení

Po provedení zkoušky je potřeba provést hodnocení jejího průběhu a také uvést řešení problémů, které během ní nastaly. To je provedeno v technické části. V druhé části kapitoly je popsáno výsledné ekonomické hodnocení.

### 5.1 Technická část

Zajímavým poznatkem bylo chování čelní válcové frézy  $\varnothing 8$  mm při hrubování šroubovitě drážky u prvního vyráběného kusu (druhého způsob výroby). Programovaný posuv na zub byl 0,004 mm. Toto je ovšem pouze posuv nástroje podél osy rotace. Reálný posuv, zapříčiněný kombinací posuvu nástroje a rotací obrobku, vypočtený dle vztahu (19) je ale větší. Jeho velikost je 0,08 mm. Fréze ale obrábění tímto poměrně vysokým posuvem nečinilo žádné obtíže. Důvodem bylo nejspíše záměrné minimální vyložení nástroje a tím pádem jeho vyšší tuhost.

U hrubování hlav zubů ve směru k čelu zubu se čelní válcová fréza  $\varnothing 8$  mm rozvibrovala, nejspíše z důvodu ztráty stability řezného procesu. Při tomto pohybu obráběla především obvodem a byla namáhána radiálně. Při opačném pohybu od čela zubu směrem dolů tento problém nenastal. Fréza obráběla především svým čelem a řezné síly působily hlavně axiálně, tedy do osy nástroje (a zároveň do vřeteny), což je mnohem příznivější stav. Řešením je tedy hrubovat všechny hlavy zubů v tomto směru. Jiskry v místě řezu byly nejspíše způsobeny otupením hřbetu po předchozím hrubování obou drážek.

Při zkoušce byla nejprve hrubována šroubovitá drážka a poté drážky podélné. U podélné drážky fréza příčně protíná budoucí hlavy zubu a obráběný profil je poměrně štíhlý. Vhodnější by bylo tyto dvě hrubování vyměnit. Rozdíl je v tom, že profil zubu v podélném směru není tak štíhlý jako v příčném směru, což je pro nástroj vhodnější.

Největším problémem byl lom čepových fréz u obou způsobů výroby. U druhého způsobu (prvního vyráběného) je nejspíše důvodem způsob zanořování do materiálu u předdkončování šroubovitě drážky. Při něm se fréza pohybuje po kružnici a její osa rotace je rovnoběžná s čelem zubu. Při pohybu dochází nejspíše k nedostatečnému odvodu třísek z místa řezu. Dalším nepříznivým jevem mohl být nedostatečný průřez nosné části zubu v důsledku potřeby vytvoření drážky pro odvod třísky. Řešením je tečný kontakt čela frézy se dnem drážky tak, aby fréza obráběla pouze svým obvodem a čelní zuby měly pouze funkci vedlejších břitů.

Dalším a nejspíše hlavním důvodem lomu, mohla být v obou případech obrábění geometrie nástroje. Během kvazitrochoidního hrubování šroubovitě drážky byl slyšet silný drncivý zvuk, který dle zkušeností nebyl způsoben rozvibrováním nástroje v důsledku ztráty stability řezného procesu. Tento specifický zvuk přestal být slyšitelný po lomu frézy. Fréza totiž krátký čas obráběla i po lomu. Z důvodu použití chladicí kapaliny nebyl ihned viditelný. Ukázalo se, že zvuk byl způsoben rázovitým zabíráním celého břitu v jeden okamžik. Je velice pravděpodobné, že to bylo způsobeno úhlem sklonu ostří  $\lambda_s$ . Ten byl u obou čepových fréz nulový. Již před samotnou výrobou se přepokládalo že tato geometrie není vhodná. Při objednání fréz ale došlo k nedorozumění a výrobce nezhotovil břity ve šroubovici, jak bylo požadováno, ale pouze přímé. Jelikož se jednalo o výrobu prototypu, nebyl vytvořen

kompletní technický výkres frézy, ale pouze její schéma. Informace o úhlu  $\lambda_s$  byla sdělena pouze ústně, což byla nejspíše hlavní chyba. Nicméně již nebylo z časových důvodů možné vyrobít nové frézy a bylo tedy rozhodnuto, že se k výrobě použijí stávající nástroje. Již zmíněným řešením je tedy nenulový, přesněji pozitivní úhel  $\lambda_s$  o velikosti  $20^\circ$  až  $30^\circ$  (dle možností NC brusky výrobce).

## 5.2 Ekonomická část

Zde obvykle v podobných pracích bývá vlastní ekonomické hodnocení. V této práci ale byla provedena hlavní část ekonomického hodnocení v podkapitole 3.5 Výběr nejvhodnějších způsobů pro realizaci zkoušky (str. 30). Důvodem tohoto postupu byla nutnost vybrat ze tří navržených způsobů pouze dva, pro realizaci vlastní zkoušky výroby. U všech tří způsobů byly spočítány náklady na jejich výrobu a také časy automatického chodu stroje  $t_{AS}$ . Zde jsou pro připomenutí uvedené. U prvního způsobu, který je charakteristický použitím stejných nástrojů jako v současné technologii, jsou výrobní náklady  $N_1 = 12\,456,15$  Kč a čas  $t_{AS}^1 = 720,33$  min. Druhý způsob, hrubovaný čelními válcovými frézami a předdokončený speciální čepovou frézou, má náklady  $N_2 = 13\,402,98$  Kč a čas automatického chodu stroje  $t_{AS}^2 = 256,02$  min. U třetího způsobu, kdy hrubování obou drážek proběhlo takzvaným kvazitrochoidním frézováním, jsou náklady  $N_3 = 13\,677,06$  Kč a  $t_{AS}^3 = 237,16$  min. Strojní hodinová sazba je u všech tří způsobů 1700 Kč/hod.

Zkouškou ale byly zjištěné některé skutečnosti, které je potřeba v budoucnu realizovat, aby byla výroba úspěšná. Hlavním je použití čepové frézy s nenulovým úhlem sklonu ostří  $\lambda_s$ . Od výrobce bylo zjištěno, že její cena by byla přibližně o 200 Kč vyšší (oproti fréze s přímými zuby) z důvodu delšího času na vybroušení šroubovice. Stála by tedy 5200 Kč. To se promítne do celkových výrobních nákladů. Rozdíl ovšem nebude nijak zvlášť výrazný. Náklady na druhý a třetí způsob se přepočtou s novou cenou frézy způsobem podrobněji popsáním v kapitole 3.5, protože ostatní hodnoty vstupující do výpočtu (hodinová sazba stroje, čas  $t_{AS}$  a náklady na nástroje) se nijak nemění. Po přepočtení se náklady změní následovně: Náklady na druhý způsob jsou 12 515,68 Kč a třetí způsob 13 437,13 Kč. Rozdíl u druhého způsobu je tedy 59,53 Kč a u druhého 70,15 Kč.

Je vhodné pro srovnání spočítat výrobní náklady technologie, která je v současnosti ve společnosti realizována. Ta využívá speciální konvenční stroje výše popsané ve druhé kapitole. Nástroje jsou ale stejné jako u prvního navrženého způsobu výroby. Pro účely snazšího srovnání byly v prvním navrženém způsobu použité naprosto stejné rezné podmínky jako při skutečné současné výrobě. Tímto je tedy identický čas  $t_{AS}$  i náklady na nástroje. Jediné, co se změní ve výpočtu nákladů, je tedy strojní hodinová sazba. Ze společnosti byla poskytnuta informace, že strojní hodinová sazba konvenčních strojů použitých při výrobě je přibližně 500 Kč/hod. Poměrně nízká sazba je dána tím, že stroje jsou sice speciální na druhou stranu ovšem již opravdu letité. Hodnoty vstupující do výpočtu nákladů pro jednotlivé úseky (kromě strojní hodinové sazby) jsou uvedené v tabulkách výše (viz Tab. 5 – Tab. 10). Po dosažení strojní hodinové sazby a ostatních vstupních hodnot z tabulek do vztahu (10) jsou výrobní náklady pro jednotlivé úseky a celý způsob (zde označený jako nultý) následující:

$$N_0 = N_{0,1} + N_{0,2} + N_{0,3} + N_{0,4} + N_{0,5} + N_{0,6} =$$

$$= 426,76 + 4255,65 + 2623,16 + 1508,52 + 792,05 + 1029,92 = \underline{10\,636,06 \text{ Kč}}$$

Původní technologie má tedy nejnižší výrobní náklady. Důvodem je zde strojní hodinová sazba, která je oproti soustružnickému centru přibližně o 1200 Kč/hod nižší. V tabulce (Tab. 20) jsou pro snadné srovnání uvedené výrobní náklady a časy  $t_{AS}$  všech způsobů.

1. způsob		2. způsob		3. způsob		Současná technologie	
$t_{AS}$ [min]	N [Kč]	$t_{AS}$ [min]	N [Kč]	$t_{AS}$ [min]	N [Kč]	$t_{AS}$ [min]	N [Kč]
720,33	25 042,6	256,02	12 515,68	237,16	13 473,13	720,33	10 636,06

Tab. 20: Výrobní náklady a časy  $t_{AS}$  jednotlivých způsobů výroby

## 6 Závěr

Při zkoušce dvou způsobů výroby nebyl zcela úspěšně dokončen ani jeden z nich. V technickém hodnocení byly zmíněny možné důvody tohoto neúspěchu. Především ale byla navržena řešení pro odstranění problémů výroby. Lze předpokládat, že po jejich realizaci by byla výroba úspěšná u obou způsobů.

Z hlediska výrobních nákladů je ovšem nejlevnější současná technologie. Tu ale již není možné nadále realizovat. Vyšší výrobní náklady dvou navržených způsobů (u kterých byla provedena zkouška výroby) tedy nejsou neúspěchem. Jako dobrý výsledek lze hodnotit skutečnost, že výrobní náklady jsou sice vyšší, nikoli však výrazně. U druhého způsobu jsou vyšší o 1879,62 Kč a u třetího o 2837,1 Kč. Cílem této práce nebyla optimalizace řezných podmínek (popřípadě celého procesu obrábění) a nalezení technologie s co možná nejmenšími výrobními náklady. Tím bylo ověřeno vyrobitelnosti odvalovací frézy na CNC soustružnickém centru. I přes problémy výroby při samotné zkoušce lze tento cíl hodnotit jako ve své podstatě splněný. Optimalizace řezných podmínek, zefektivnění a zlevnění výroby jsou úkoly do budoucna. Je naděje, že poté budou výrobní náklady druhého nebo třetího způsobu v porovnání se současnou technologií srovnatelné, ne-li dokonce nižší.

Zajímavým poznatkem je, že současná technologie má nejnižší výrobní náklady i přes nejdelší čas automatického chodu stroje  $t_{AS}$ . Ten je přibližně o 7,5 hodiny delší než u druhého způsobu a o 8 hodin delší než u třetího způsobu. Je tedy jasně patrné, že pro posouzení výrobních nákladů nemůže být rozhodující pouze čas  $t_{AS}$ . Hlavní roli v tomto případě sehrála výrazně nižší hodinová sazba speciálních konvenčních strojů ve srovnání s CNC soustružnickým centrem. Dalším aspektem je vliv nákladů na nástroje.

Lze doufat, že po realizaci optimalizace řezných podmínek by mohly být výše uvedené způsoby využity v reálné výrobě odvalovacích frézy.

## Seznam použité literatury

1. Kodýdek, J. *Rámcový návrh technologie a tvorba programu pro výrobu zadané součásti*. Plzeň : ZČU, 2014.
2. MM Průmyslové spektrum. *Příručka pro technology: Dynamické frézování - využití kompenzačního přístupu*. [Online] červenec 2013 [cit. 28. březen 2017.]
3. DMG MORI, *CTX BETA 1250 TC 4A*. [Online] 2017 [cit. 1. květen 2017.] Dostupné z: <http://en.dmgmori.com/products/lathes/turn-mill-complete-machining-centres/ctx-tc/ctx-beta-1250-tc-4a>.
4. Leinveber, J., Vávra P. *Strojnické tabulky*. Druhé vydání. Úvaly: ALBRA, 2005. ISBN 80-7361-011-6
5. Vyšata, J., Kroft, L. *Využití i-machiningu při ortogonálním rotačním frézování drážek*. 2017. stránky 340 - 348. Sv. Strojírenská technologie Plzeň 2017: sborník abstraktů. ISBN 978-80-261-0636-4
6. Staňek, J., Němejc, J. *Metodika zpracování a úprava diplomových prací*. Plzeň : ZČU, 2005.
7. Janděčka, K., Česánek, J., Kožmín, P. *Programování NC strojů*. Plzeň : ZČU, 2000.
8. Vrabec, M., Mádl, J. *NC programování v obrábění*. Praha : ČVUT, 2004.

## Seznam obrázků

Obr. 1: Model odvalovací frézy vytvořený v softwaru Catia V5R21 s barevným rozlišením jednotlivých prvků tvořících řeznou část .....	11
Obr. 2: Část technologického postupu .....	11
Obr. 3: Detail výkresu odvalovací frézy OF-m5x20°-10z-HSS .....	12
Obr. 4: Šneková frézka.....	13
Obr. 5: Detail výkresu závitové frézy ZF-Ø125-33z-HSS.....	13
Obr. 6: Závitová frézka .....	14
Obr. 7: Detail výkresu čepové frézy ČF-40°-4z-HSS .....	14
Obr. 8: Detail univerzální konzolové frézky s dělicím přístrojem.....	15
Obr. 9: Podtáčecí soustruh .....	16
Obr. 10: Přímý tvarový soustružnický nůž.....	16
Obr. 11: Tvarový nůž na rádiusy.....	17
Obr. 12: Detail výkresu ZF-Ø90-27z-HSS .....	20
Obr. 13: Možnosti hrubování hlav zubů při druhém způsobu.....	22
Obr. 14: Detail schématu čepové frézy zobrazující její řeznou část .....	22
Obr. 15: Trochoidní frézování [2] .....	24
Obr. 16: Soustružnické centrum CTX BETA 1250 TC 4A [3].....	25
Obr. 17: Pracovní prostor stroje a popis jednotlivých os .....	26
Obr. 18: Čepová fréza ČF-40°-4z-HSS .....	27
Obr. 19: Schéma hrubování šroubovitě drážky kotoučovou závitovou frézou .....	28
Obr. 20: Hrubovaný průřez šroubovitě drážky.....	29
Obr. 21: Diagram závislosti měrného řezného odporu na mezi pevnosti a tloušťce odřezávané vrstvy [4] .....	29
Obr. 22: Schéma polotovaru.....	39
Obr. 23: Detail profilu šroubovitě drážky odvalovací frézy .....	40
Obr. 24: Příklad na plochu a přídavek v ose Z1 u šroubovitě drážky .....	40
Obr. 25: Šířka šroubovitě drážky u vrcholu, velikost obou přídaveků a pomocných rozměrů .	41
Obr. 26: Výchozí bod nástroje v ose X1 a Z1 při hrubování šroubovitě drážky .....	42
Obr. 27: Příklad na plochu a přídavek v ose Y1 u podélné drážky .....	44
Obr. 28: Přídatky pro podélnou drážku a pomocné rozměry .....	44
Obr. 29: Výchozí bod nástroje v ose X1 a Y1 při hrubování podélné drážky .....	45



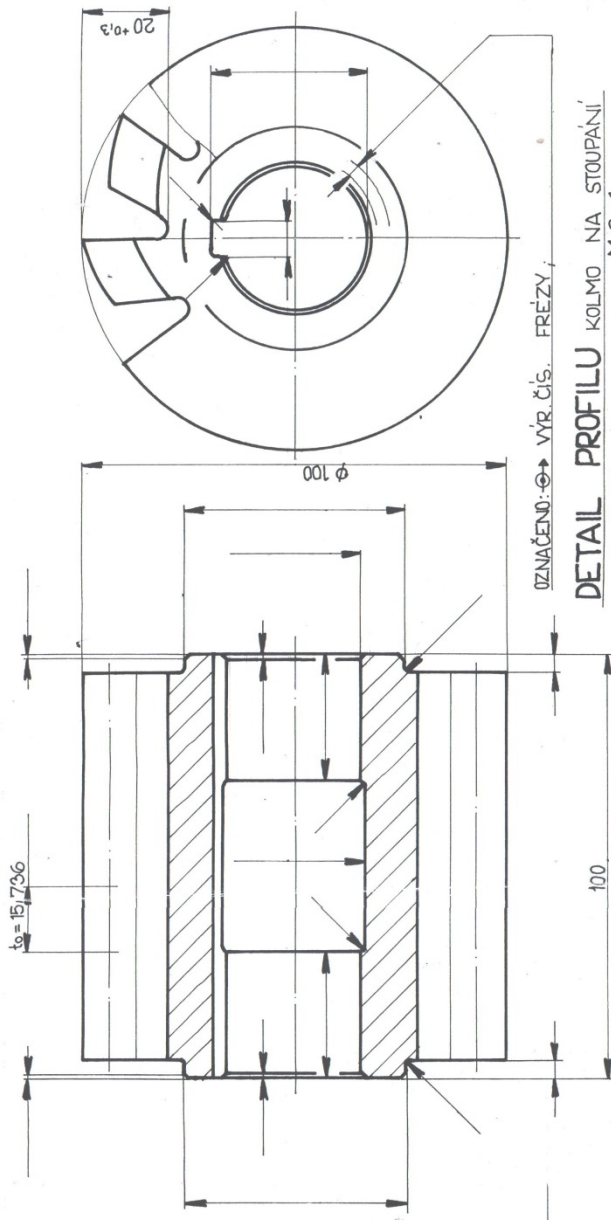
Obr. 30: Výchozí a koncový bod pro kruhovou interpolaci při hrubování hlav zubů .....	46
Obr. 31: Detail hrubování zubu pomocí kruhové interpolace .....	47
Obr. 32: Výchozí bod kruhové interpolace v ose X1 u předdokončení šroubovitě drážky .....	49
Obr. 33: Část programu pro hrubování šroubovitě drážky .....	51
Obr. 34: Část programu pro hrubování boků podélné drážky při stejné hloubce řezu $a_p$ .....	52
Obr. 35: Část programu pro hrubování hlav zubů .....	52
Obr. 36: Část programu pro předdokončení podélné drážky při stejné hloubce řezu $a_p$ .....	53
Obr. 37: Část programu pro předdokončení šroubovitě drážky .....	54
Obr. 38: Nahrazení trochoidy kruhovými oblouky [5] .....	55
Obr. 39: Trochoidní pohyb s předpokladem pohybu po spirále [5] .....	55
Obr. 40: Parametrické zadání vstupních hodnot pro hrubování šroubovitě drážky .....	57
Obr. 41: Čepová fréza s ulomenou špičkou po vyjmutí ze stroje při druhém způsobu .....	58
Obr. 42: Odvalovací fréza po obrobení dle druhého způsobu .....	58
Obr. 43: Ulomená čepová fréza po vyjmutí ze stroje při třetím způsobu .....	58
Obr. 44: Část šroubovitě drážky obrobená před lomem čepové frézy .....	59

## Seznam tabulek

Tab. 1: Parametry a vlastnosti soustružnického centra CTX BETA 1250 TC 4A.....	27
Tab. 2: Řezné podmínky pro hrubování šroubovitě drážky u prvního způsobu .....	27
Tab. 3: Hodnoty výkonu, krouticího momentu a dalších veličin pro hrubování šroubovitě drážky .....	30
Tab. 4: Tabulka k určení řezné rychlosti $v_{c2}$ dle vztahu (18) .....	33
Tab. 5: Čas $t_{AS}$ a náklady na hrubování šroubovitě drážky .....	33
Tab. 6: Čas $t_{AS}$ a náklady na hrubování podélných drážek .....	33
Tab. 7: Čas $t_{AS}$ a náklady na hrubování hlav zubů .....	34
Tab. 8: Čas $t_{AS}$ a náklady na předdokončení boků zubů šroubovitě drážky.....	34
Tab. 9: Čas $t_{AS}$ a náklady na předdokončení dna šroubovitě drážky.....	34
Tab. 10: Čas $t_{AS}$ a náklady na předdokončení rádiusů na vrcholu šroubovitě drážky.....	34
Tab. 11: Čas $t_{AS}$ a náklady na první hrubování šroubovitě drážky .....	35
Tab. 12: Čas $t_{AS}$ a náklady na druhé hrubování šroubovitě drážky.....	36
Tab. 13: Čas $t_{AS}$ a náklady na první hrubování podélných drážek.....	36
Tab. 14: Čas $t_{AS}$ a náklady na druhé hrubování podélných drážek .....	36
Tab. 15: Čas $t_{AS}$ a náklady na hrubování hlav zubů .....	36
Tab. 16: Čas $t_{AS}$ a náklady na předdokončení podélných drážek.....	37
Tab. 17: Čas $t_{AS}$ a náklady na první hrubování podélných drážek.....	37
Tab. 18: Čas $t_{AS}$ a náklady na hrubování šroubovitě drážky .....	38
Tab. 19: Čas $t_{AS}$ a náklady na hrubování podélných drážek .....	38
Tab. 20: Výrobní náklady a časy $t_{AS}$ jednotlivých způsobů výroby.....	62

## **PŘÍLOHA č. 1**

**Výkres odvalovací frézy „OF-m5x20°-10z-HSS“**



OZNAČENO:

OZNAČENÍ: → VÝR. ČÍS. FŘEZY,

DETAIL PROFILU KOLMO NA STOUPÁNÍ  
M 2 : 1

1 CHODÁ - PRAVÁ - BROUŠENÁ

POČET ZUBŮ : 10

KOMBINOVANOU VAČKA :  $7 + \phi 125 \text{ mm}$

LEVA ŠROUBOVICE O STOUPÁNÍ :  $T75^{\uparrow}$

NATOČENÍ FŘEZOVACÍHO STOLU :  $3^{\circ}24'20''$

DUŠEVNÍ VLASTNICTVÍ  
INTELLECTUAL PROPERTY  
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СОБСТВЕННОСТЬ  
PILSEN TOOLS s.r.o.

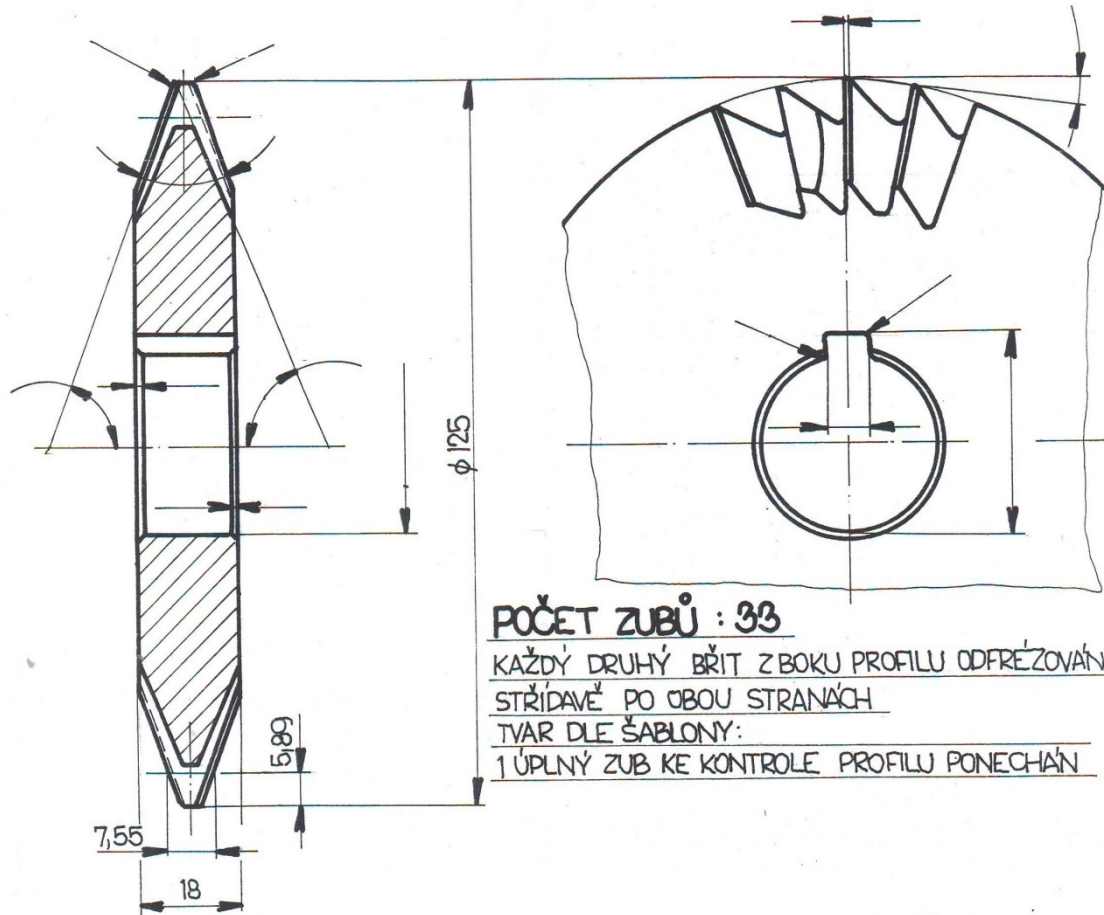
**NC**

KALENO

KR 110	19 802 . 4	040	Dané hodnoty jsou pro použití ve speciálních případech.	Cizlová čísla vynálezce
19 802 . 3	040			
Míst konání Název - Kruhov.	Název - Výtah	Číslo výrobku	Číslo výrobku	
Číslo 1 : 1 2 : 1	Číslo C. skupina	Číslo C. inv.	Číslo C. inv.	
Typ Název m 5 x 20°	Skupina Fréza	Nový výřez	Nový výřez	

## **PŘÍLOHA č. 2**

### **Výkres závitové frézy „ZF-Ø125-33z-HSS“**

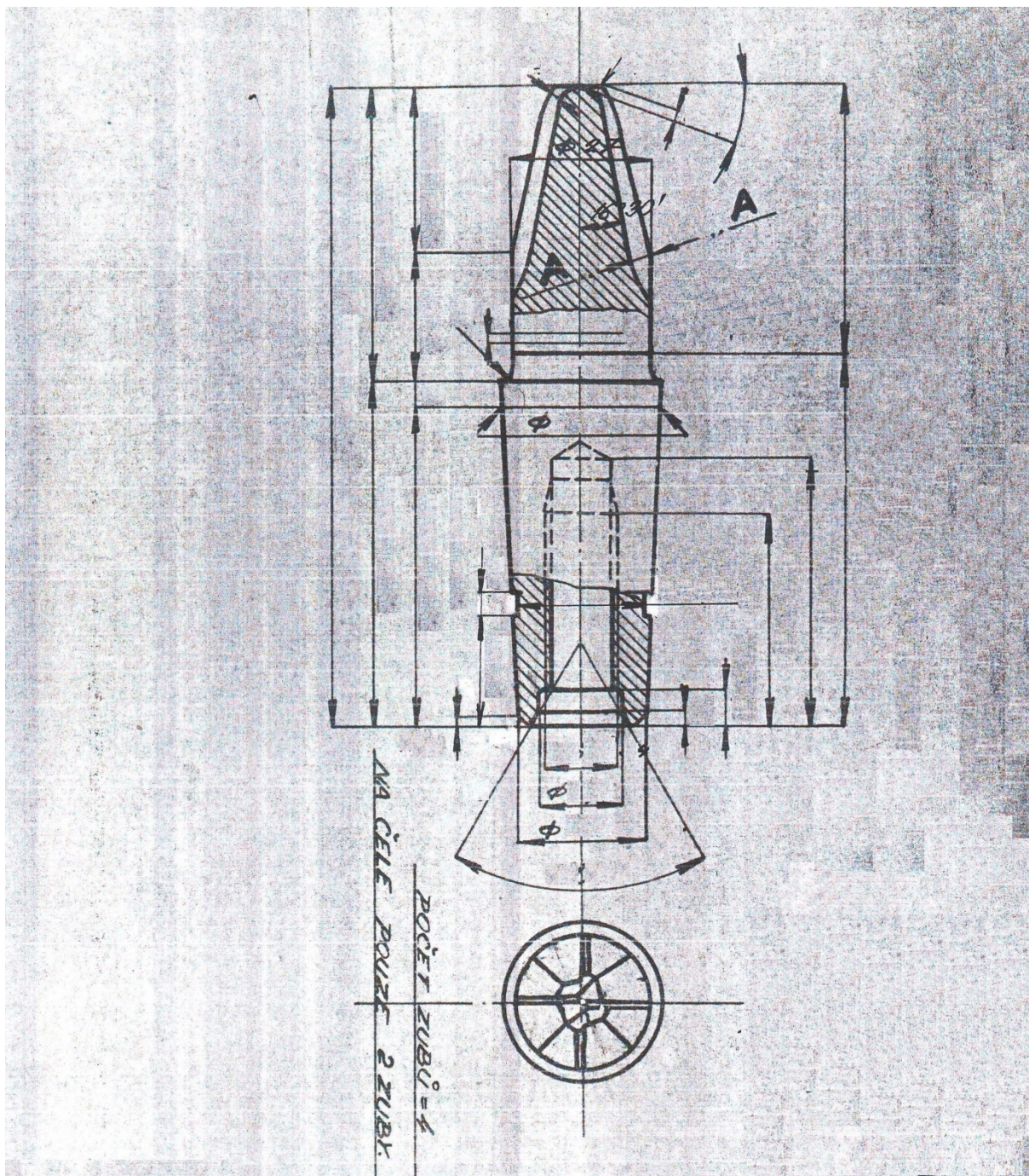


**KALENO**

		19 802. 4				040					
		19 802. 3									
IV	III	II	I	Název - Rozměr	Mat. konečný	Polotovar (číslo modelu, zápustky apod.)	Třída od- padu	Cistá hmotnost Hrubá hmotnost	Číslo výkresu	Pozice Ozn. ks	Poznámka Tech. číslo
Ks pro 1.....				Mat. výchozí							
Poznámka					Celková čistá hmotnost kg						
Měřitko	Kreslil			Č. snímku							x
1:1	Přezkoušel			Č. trans.							x
	Norm. ref.										x
	Výr. projedn.	Schválil	Dne								x
		Typ	Skupina	Starý výkres		Nový výkres					
Název				<b>ZÁVITOVÁ FREŽA</b>				<b>ZF-Ø125-33z-HSS</b>			
				Počet listů				List			

## **PŘÍLOHA č. 3**

### **Výkres čepové frézy „ČF-40°-4z-HSS“**

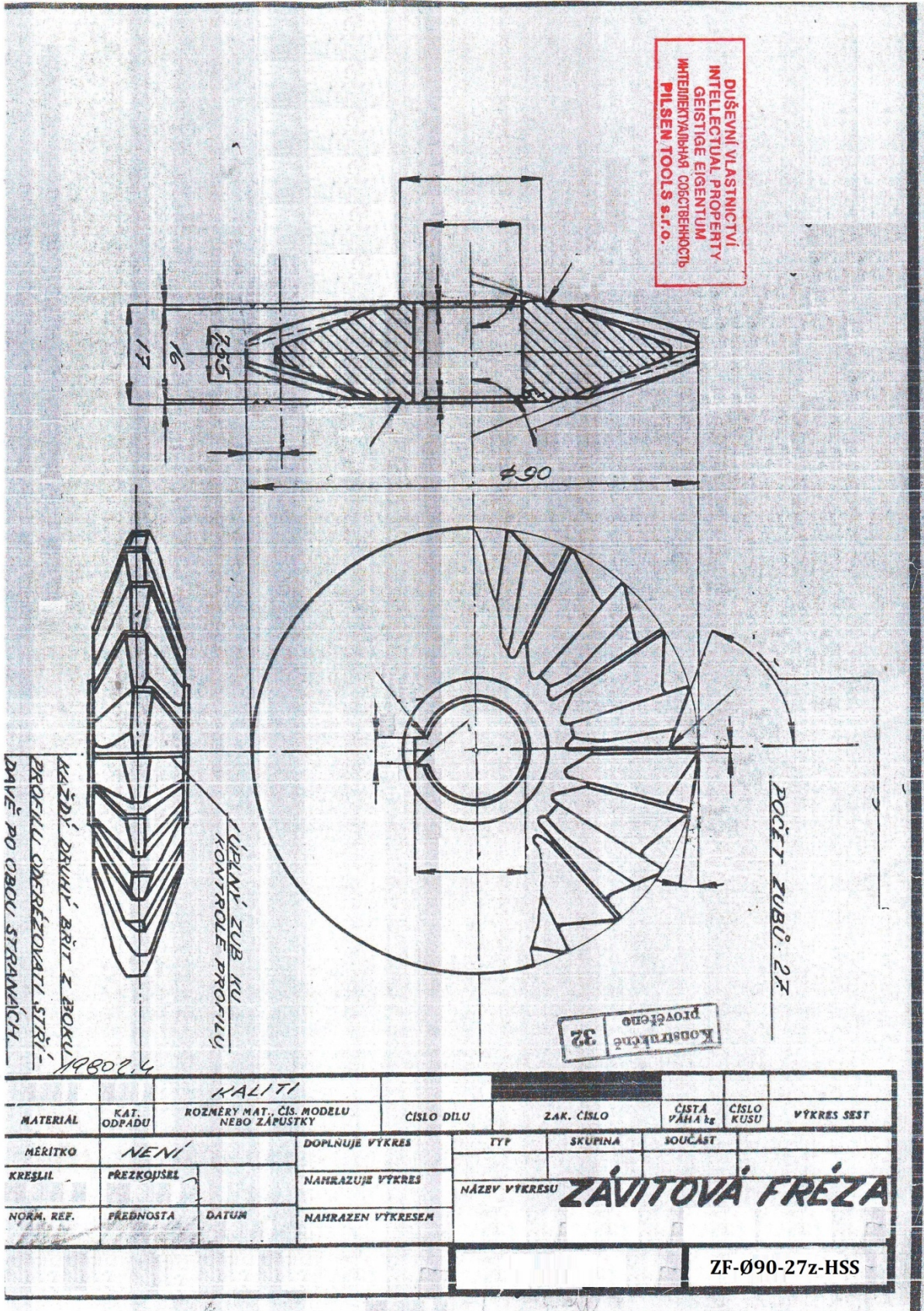


		<i>KALIT</i>					
MATERIÁL	KAT. ODPADU	ROZMĚRY MAT., ČÍS. MODELU NEBO ZÁPUSTKY	ČÍSLO DÍLU	ZAK. ČÍSLO	ČISTA VÁHA kg	ČÍSLO KUSU	VÝKRES SEST
MÉRITKO	<i>NEVÍ</i>		DOPLŇUJE VÝKRES	TYP	SKUPINA	SOUČÁST	
KRESLIL	PŘEZKOUSEL		NAHRAZUJE VÝKRES	NÁZEV VÝKRESU <b>ČEPOVÁ FRÉZA</b>			
NORM. REF.	PŘEDNOSTĚ	DATUM	NĚMBYEN VÝKRES				
							<b>ČF-40°-4z-HSS</b>



## **PŘÍLOHA č. 4**

### **Výkres závitové frézy „ZF-Ø90-27z-HSS“**



## **PŘÍLOHA č. 5**

**Schéma čepové frézy „ČF-40°-4z-SK“**

