



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

# NÁVRH NA ZEFEKTIVNĚNÍ PROCESU OBRÁBĚNÍ OZUBENÍ PASTORKU

EFFICIENCY IMPROVEMENT PROPOSAL OF MACHINING PROCESS OF PINION GEARING

### DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Pavel Pangrác

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Josef Sedlák, Ph.D.

BRNO 2016

# Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav strojírenské technologie
Student:	<b>Bc. Pavel Pangrác</b>
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Strojírenská technologie
Vedoucí práce:	<b>doc. Ing. Josef Sedlák, Ph.D.</b>
Akademický rok:	2015/16

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

## Návrh na zefektivnění procesu obrábění ozubení pastorku

### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

1. Úvod
2. Popis, rozbor a charakteristika technologií použitých pro výrobu ozubení
3. Analýza současného stavu technologie výroby
4. Návrh inovace výrobního procesu
5. Technicko-ekonomické zhodnocení
6. Závěr

### Cíle diplomové práce:

Cílem diplomové práce bude návrh na zefektivnění procesu obrábění ozubení pastorku. Součástí bude analýza stávajících technologií výroby této součásti a návrh řešení vedoucí k zefektivnění výrobního procesu. Práce bude obsahovat také popis a rozbor jednotlivých pracovišť potřebných pro výrobu daného ozubení. V závěru práce bude provedeno technicko-ekonomické zhodnocení včetně porovnání a rozboru stávajícího a nově navrženého řešení.

### Seznam literatury:

PÍŠKA, M. a kolektiv. Speciální technologie obrábění. CERM 1. vyd. 246 s. 2009. ISBN 978-80-2-4-4025-8.

CHANG, T. Ch., WYSK, R., WANG, H. P. Computer-Aided Manufacturing. 3. vyd. New Jersey: Prentice Hall, 2005, 684 s. ISBN 0-13-142919-1.

AB SANDVIK COROMANT – SANDVIK CZ, s.r.o. Příručka obrábění-kniha pro praktiky. Přel. KUDELA, M. Praha: Scientia, s.r.o., 1997. 857 s. Přel. z: Modern Metal Cutting – A Practical Handbook. ISBN 91-97 22 99-4-6.

AB SANDVIK COROMANT. Produktivní obrábění kovů. Sandvik Coromant, technické vyd. Švédsko: CMSE, 1997. 300 s. S-811 81 Sandviken, Švédsko.

KOCMAN, K., PROKOP, J. Technologie obrábění. 1. vyd. Brno: CERM, 2002. 270 s. ISBN 80-21-1996-2.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2015/16

V Brně, dne

L. S.

---

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.  
ředitel ústavu

---

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

## **ABSTRAKT**

Diplomová práce se zabývá procesem obrábění ozubení pastorku ve spolupráci se společností Šmeral Brno a.s. Úvod je zaměřen na základní popis samotného předmětu studie – pastorku. Druhá část zahrnuje obecnou problematiku výroby ozubených kol a jejich kontrolu. Třetí kapitola si klade za cíl analýzu stávajícího stavu, stanovení jeho silných a slabých stránek. Těžiště práce tvoří výběr stroje a nástrojů, návrh technologického procesu obrábění pastorku pro 5-osé obráběcí centrum a stanovení strojních časů. V závěru je provedeno technicko-ekonomické zhodnocení navrženého postupu.

### **Klíčová slova**

pastorek, dvojitě šikmé ozubení, frézování, CAD/CAM

## **ABSTRACT**

This diploma thesis deals with the machining process of pinion gearing in the company Šmeral Brno a.s. The first part aims at the basic description of the thesis subject – the pinion. General gear machining technologies and its inspection is processed in the second part. The third part is focused on the description of the current machining process, its weaknesses and strengths. The main part consists of the machinery and tool choice, of the proposal of the gearing technological process for five-axis machining center and of the production time calculations. In conclusion, technological and economic impacts of the proposal are evaluated.

### **Key words**

pinion, double helical gear, milling, CAD/CAM

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

PANGRÁC, P. Návrh na zefektivnění procesu obrábění ozubení pastorku. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 74 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Josef Sedlák, Ph.D.

### **PROHLÁŠENÍ**

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Návrh na zefektivnění procesu obrábění ozubení pastorku** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

---

Datum

---

Bc. Pavel Pangrác

## **PODĚKOVÁNÍ**

Rád bych tímto poděkoval doc. Ing. Josefu Sedlákov, Ph.D. za cenné připomínky, trpělivost a odborné vedení diplomové práce. Dále pak odborníkům společnosti Šmeral Brno a.s., zejména Petru Kubíčkov, za konzultace, poskytnutí materiálů a nezbytných informací. A v neposlední řadě děkuji své rodině a přátelům, kteří mi byli po celou dobu studia oporou.

**OBSAH**

ABSTRAKT .....	4
PROHLÁŠENÍ .....	5
PODĚKOVÁNÍ .....	6
OBSAH .....	7
ÚVOD.....	9
1 PŘEDSTAVENÍ SPOLEČNOSTI ŠMERAL BRNO a.s. ....	10
1.1 Historický vývoj .....	10
1.2 Současný stav.....	12
2 ROZBOR SOUČÁSTI .....	13
2.1 Zařazení do montážního celku .....	13
2.2 Rozbor ozubení.....	13
2.3 Popis součásti .....	14
2.4 Materiál a jeho další zpracování .....	15
2.5 Polotovar.....	15
2.6 Technologičnost výroby .....	15
3 TECHNOLOGIE POUŽITÉ PRO VÝROBU OZUBENÍ.....	17
3.1 Základní parametry ozubených kol .....	17
3.2 Obrábění ozubení tvarovou čepovou frézou .....	20
3.2.1 Výpočet strojního času .....	20
3.3 Obrázení ozubení .....	22
3.3.1 Obrázení hřebenovým nožem (metoda Maag) .....	23
3.3.2 Výpočet strojního času .....	24
3.4 Chemicko-tepelné zpracování – nitridace .....	24
3.4.1 Iontová nitridace .....	25
3.5 Kontrola ozubených kol.....	26
3.5.1 Konvenční metody kontroly ozubení.....	27
3.5.2 Moderní metody kontroly ozubení .....	27
4 ANALÝZA SOUČASNÉHO STAVU .....	29
4.1 Analýza technologického postupu.....	29
4.2 Analýza ozubárenských strojů .....	29
4.2.1 SCHIESS RF30E.....	29
4.2.2 MAAG SH-350/500.....	30
4.3 Analýza nástrojového vybavení .....	31
4.3.1 Stopková fréza.....	31
4.3.2 Ozubený hřeben .....	32

4.3.3	Upínací přípravek .....	32
5	NÁVRH INOVACE VÝROBNÍHO PROCESU .....	34
5.1	Tvorba 3D modelu, CAM software .....	34
5.2	Volba alternativního obráběcího stroje.....	34
5.3	Návrh technologického postupu.....	36
5.4	Volba nástrojového vybavení .....	37
5.4.1	Hrubovací nástroje .....	37
5.4.2	Dokončovací nástroj.....	39
5.5	Postup obrábění.....	39
5.5.1	Hrubování .....	39
5.5.2	Dokončování .....	43
6	TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ .....	48
6.1	Stávající varianta obrábění .....	48
6.1.1	Jednotkový čas.....	48
6.1.2	Ekonomické zhodnocení .....	49
6.2	Nově navržená varianta obrábění .....	50
6.2.1	Jednotkový čas.....	50
6.2.2	Ekonomické zhodnocení .....	51
6.3	Porovnání obou variant.....	52
6.3.1	Technický aspekt.....	52
6.3.2	Ekonomický aspekt.....	53
6.4	Doporučení do budoucna.....	54
6.5	Návrh variantního řešení.....	54
	ZÁVĚR .....	56
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ .....	57
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK .....	61
	SEZNAM PŘÍLOH.....	64

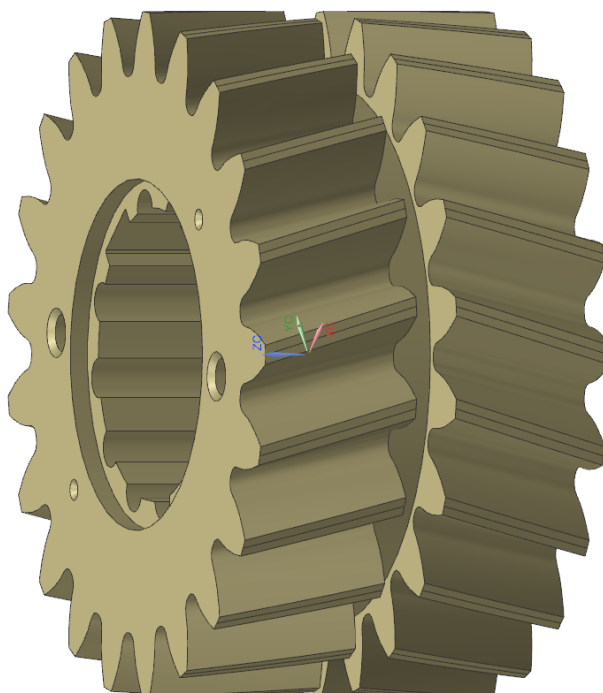
## ÚVOD

Ozubená kola jsou dle definic označována jako tvarově složité strojní součásti, pomocí nichž je převáděn rotační pohyb, resp. mechanická práce z jednoho hřídele na druhý. Jsou používána pro převody se stálým poměrem a malou axiální vzdáleností hřídelů. [1]

Historie ozubených kol sahá daleko do minulosti, jedním z nejstarších dochovaných artefaktů je mechanismus z řecké Antikythéry. Jedná se o diferenciální ozubené soukolí vyrobené okolo roku 100 př. n. l. sloužící k předpovídání pohybu nebeských těles. [2]

S ozubenými koly se setkáváme dennodenně. Přestože se jedná o součástky, které většinou nejsou přímo viditelné, neubírá to nic na jejich důležitosti. To si uvědomoval třeba také francouzský podnikatel André-Gustave Citroën a zcela po právu zakomponoval část šípového ozubení do symbolu své společnosti. Loga automobilů značky Citroën nám tak nenápadně připomínají důležitost ozubených kol a to nejen v automobilovém průmyslu.

Předmětem této studie je ozubené kolo ne nepodobné šípovému. Je však označováno jako dvojité šikmé – tento rozdíl je podrobně popsán v kapitole 2. Společnost Šmeral Brno a.s., s pomocí níž práce vznikla, využívá tyto strojní součásti do pohonů svislých kovací lisů řady LZK2500. Doposud probíhá výroba na konvenčních ozubárenských strojích. Ty však již nemohou držet krok s moderními CNC zařízeními. Díky tomu se ve firmě s více než 150letou tradicí pomalu mísí zaběhnuté zkušenosti s moderním pojetím technologie obrábění.



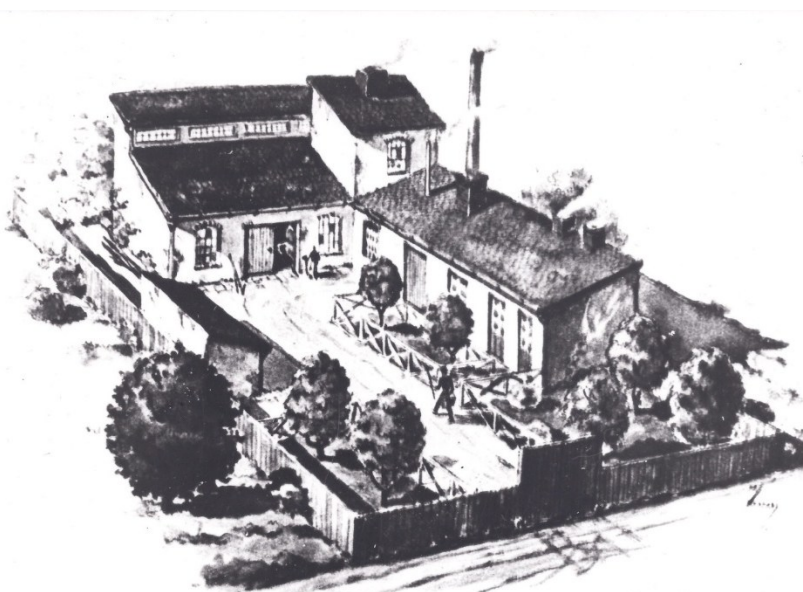
Obr. 1 CAD model pastorku.

## 1 PŘEDSTAVENÍ SPOLEČNOSTI ŠMERAL BRNO a.s.

Společnost Šmeral Brno a.s. je s centrem jižní Moravy nerozlučitelně spjata již od druhé poloviny devatenáctého století. Za více než 150 let prošla firma několika válkami, změnou svého zaměření a výrobního sortimentu až do současné podoby předního výrobce tvářecích strojů. [3]

### 1.1 Historický vývoj

Historie společnosti Šmeral se začala psát v roce 1861, kdy si nechal Ignác Štorek zaprotokolovat do živnostenského rejstříku malou firmu na výrobu odlitků. Veškeré své snažení započal rodák z vesničky Odranec na pronajatém pozemku, jenž je v dnešní době součástí společnosti. Dřevěná bouda slévárny s kuplovnou je dobře patrná na obr. 2. [3], [4]



Obr. 2 Pohled na sídlo fy. Ignác Štorek [3].

Ignác Štorek dokázal svoje snažení velice rychle přetavit v úspěch, a tak firma v prvních letech dobře prosperovala. Mezi největší odběratele Štorkových odlitků patřily státní dráhy, cukrovary, strojírenské a textilní podniky. [4]

První komplikace postihly firmu v roce 1866 po vypuknutí prusko-rakouské války. Opravdová zkouška ohněm však přišla v letech 1872 až 1873. Hospodářskou krizi však dokázal Ignác Štorek ustát, továrna pokračovala ve výrobě a v následujících letech se úspěšně rozrůstala. [3]

Ignác Štorek v roce 1887 vážně onemocněl a o dva roky později zemřel. V roce 1889 tedy společnost převzal Štorkův syn Heinrich. Původně vystudovaný magistr farmacie projevil značné nadání pro podnikání, a tak započal po roce 1902 největší rozmach firmy. Za jeho vedení byl závod jako třetí v celé monarchii osazen siemens-martinskou pecí. Heinrich si také uvědomoval potřebu znalosti metalurgických ukazatelů a vybudoval pro účely svého závodu chemicko-fyzikální laboratoř. Podařilo se mu vykoupit původně pronajímané pozemky, v roce 1905 přikoupil další prostory v okolí dnešní Šmeralovy a Stavební ulice. [4], [5]

První světová válka přinesla do firmy nutnost zapojit se do válečného výrobního programu. Štorkovy závody poté pokračovaly ve strojírenské výrobě a sortiment

byl značně široký – od hrubování odlitků, textilních a cukrovarnických strojů, přes zemědělské aplikace až po výrobu součástí pro parní lokomotivy. [4], [5]

Významným milníkem v historii Štorkových závodů byla spolupráce s Viktorem Kaplanem. Ten byl původně zaměstnán právě ve firemních laboratořích. Díky dobrým vztahům nabídl Viktor Kaplan Štorkovi přednostní právo na využití jeho vynálezů, nákresů a patentů. Heinrich Štorek vycítil skvělou příležitost pro rozšíření firemního portfolia, a tak v roce 1919 opustila závod historicky první Kaplanova turbína (obr. 3). Tento typ zde byl vyráběn asi 30 let až do roku 1952. Poté byla výroba přesunuta do ČKD Blansko. [4], [5], [6]



Obr. 3 Pamětní deska [3].

Heinrich Štorek byl za svoje zásluhy o rozvoj strojírenství v monarchii oceněn v roce 1918 titulem císařského rady. Svůj přístup k podnikání a technice mu dal vyniknout v mnoha dalších spolcích – byl předsedou Moravského živnostenského spolku, místopředsedou odborné skupiny sléváren, členem Spolku německých huťářů i Spolku rakouských chemiků. [5]

Štorkův úspěch skončil po téměř 30 letech jeho působení ve firmě. V roce 1918 podlehl epidemii španělské chřipky. Otcův podnik poté začal automaticky řídit Heinrichův prvorozený syn Edwin spolu se svými bratry Herbertem, Heinzem a Gerhardem. [5]

Konec úspěšných Štorkových závodů zapříčinila až druhá světová válka. Původně si strojírna nevedla zle – výroba byla opět podřízena válečným potřebám, tentokrát Wehrmachtu. 25. 8. 1944 však přišlo americké bombardování Brna. Letouny B-24 měly primárně za cíl strojírenské objekty v Brně a Kuřimi. Při těchto náletech zahynulo na 200 lidí. [7]

Objekt Štorkových závodů byl značně poškozen (obr. 4). Poslední ránu strojírenskému podniku zasadila německá armáda, která kolem něj ustupovala v dubnu 1945. Areál výrobních hal byl do základu vypálen a veškerý zachráněný majetek později znárodněn. [3], [8]



Obr. 4 Trosky Štorkových závodů po bombardování v r. 1944 [3].

Osud původní firmy Ignáce Štorka tak byl zcela zpečetěn. Ze Štorkových závodů se staly Spojené strojírny a slévárny B. Šmerala, n. p. pojmenované po Bohumíru Šmeralovi, zakladateli Komunistické strany Československa. Pod tímto názvem pokračovala produkce až do roku 1958, kdy byl podnik znovu přejmenován, tentokrát však na Šmeralovy závody, n. p. Po privatizaci v roce 1993 dostala firma s kořeny v roce 1861 název Šmeral Brno a.s., který přetrvává dodnes. [4], [9]

## 1.2 Současný stav

Společnost Šmeral je v dnešní době plně privatizována. Od roku 1996 ji vlastní ze 48 % investiční skupina BGM Group. Základní kapitál činí necelých 452 000 000 Kč a pracuje zde asi 500 zaměstnanců. [10], [11]

Hlavní část produkce (cca 40 %) je zaměřena na kompletní výrobu automatizovaných tvářecích linek. Důležitou položkou je také výroba samostatných tvářecích strojů – ať už se jedná o lisy, buchary nebo kovací válce. Vysokou úroveň prokázala společnost Šmeral v oblasti výroby nástrojů pro příčné klínové válcování ocelí a hliníkových slitin. Zhruba jednu čtvrtinu produkce společnosti tvoří odlitky z vlastní slévárny o roční kapacitě 10 000 tun. Poslední položkou, která se na celkovém podílu výroby podílí asi 15 %, jsou generální opravy a rekonstrukce tvářecích strojů (tzv. retrofitting) a to bez ohledu na původního výrobce. [4], [12]

Převážná část výroby (v posledních 10 letech asi 90 %) opouští hranice republiky a míří na zahraniční trhy Německa, Itálie, Francie, Španělska, Brazílie a mnohých dalších. [4]



# ŠMERAL

Obr. 5 Logo společnosti Šmeral Brno a.s. [12].

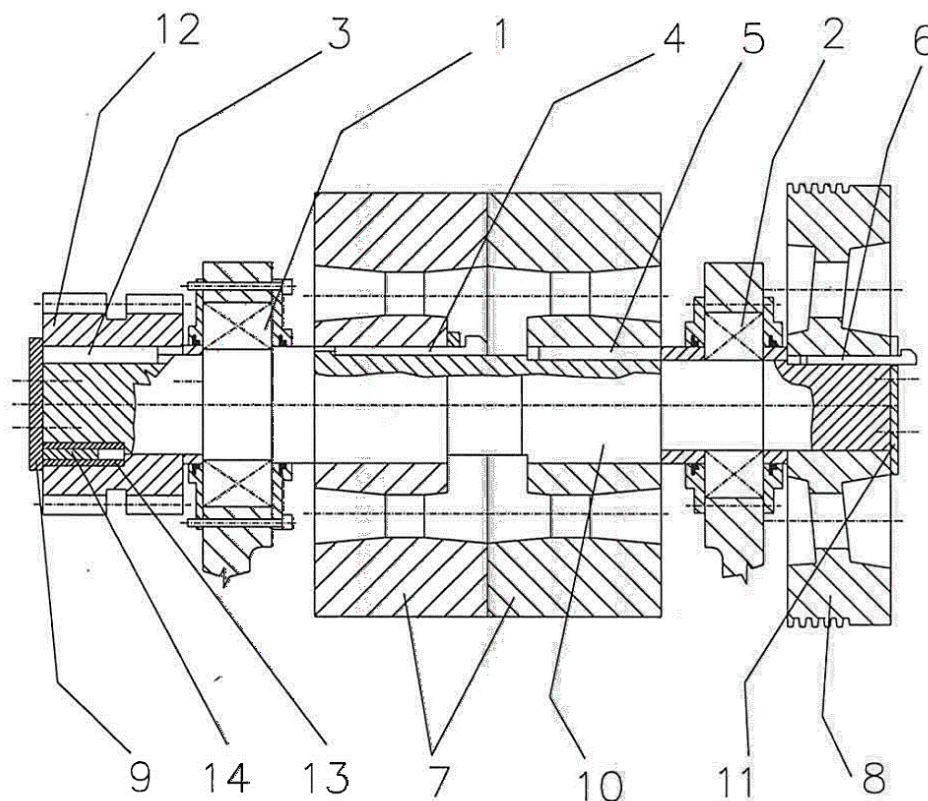
## 2 ROZBOR SOUČÁSTI

Následující kapitola si klade za cíl bližší seznámení s pastorkem jakožto předmětem diplomové práce. Jeho výrobní výkres je součástí přílohy 1. Tato varianta s drobnými úpravami vychází z původního výkresu, který je ve firmě archivován již od roku 1960.

### 2.1 Zařazení do montážního celku

Pastorek je součástí jednoduchého soukolí svislého kovacího lisu typu LZK2500. Jeho základní parametry jsou obsaženy v příloze 2, pro představu se jedná o zařízení se jmenovitou tvářecí silou 2500 t, sevřením 905 mm, příkonem hlavního elektromotoru 130 kW a hmotností přes 140 t. Výška se pohybuje okolo 7 m, délka a šířka je přibližně shodná – 4 m. [13]

Samotný pastorek je součástí podestavy nazvané jako „předloha“ (obr. 6). Tato je uložena v horní části stojanu lisu ve valivých ložiscích (1), (2). Samotný pastorek je k předlohovému hřídeli uchycen pomocí 2 ks per (3) a 10 ks kolíků (13), (14). Pastorek zabírá s ozubeným kolem spojky. Setrvačník (7), jehož funkcí je akumulování energie pro pracovní zdvih beranu a řemenice (8) jsou k předlohovému hřídeli uchyceny klíny (4), (5), (6). [13]



Obr. 6 Schéma předlohy [13].

### 2.2 Rozbor ozubení

Jak již bylo zmíněno, vyráběná součást je ozubené kolo a v soukolí zaujímá pozici pastorku. Po obvodě je rozmístěno 21 zubů o nestandardním modulu 30 mm a úhlem stoupání šroubovice 15°. Jedná se o ozubení dvojitě šikmé, korigované.

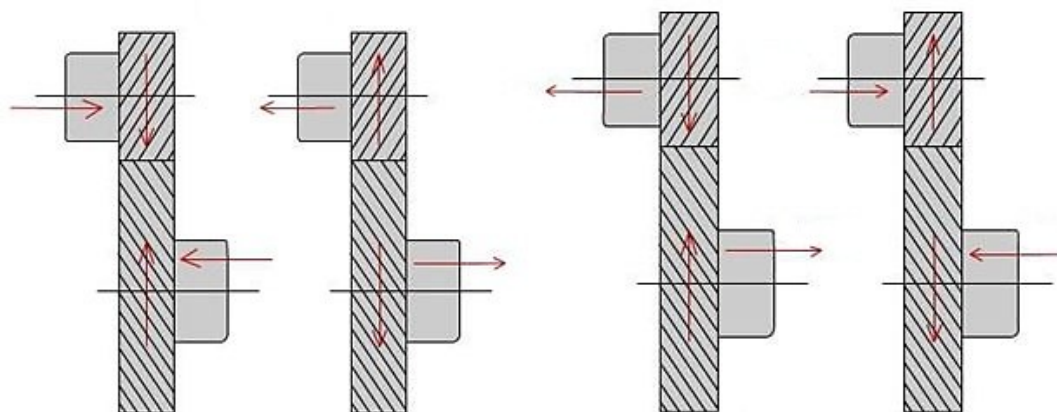
Ozubená kola dvojitě šikmá bývají často mylně označována za tzv. „kola se šípovým ozubením.“ Společnou vlastností jsou dvě sady ozubených kol s opačným smyslem šroubovice (pravá a levá). Zásadní rozdíl mezi dvojitě šikmým a šípovým ozubením je ale v drážce uprostřed kola, která je typická právě pro dvojitě šikmé ozubení (viz obr. 7). [14]



Obr. 7 Typy šikmého ozubení [15].

Tato umožňuje vybíhání nástroje (frézy, obrážecího nože) do volného prostoru a tím jednodušší výrobu. Naproti tomu kola se šípovým ozubením jsou spojena v celém profilu zubu a jejich konvenční výroba je složitější a realizovatelná prakticky pouze na speciálních strojích nebo za použití spec. nástrojů. [15]

Společnou vlastností těchto dvou typů ozubených kol je eliminace axiálních sil při záběru, které vznikají při použití jednostranného ozubení (viz obr. 8). Nejen díky tomu umožňují tyto ozubené převody přenášení relativně velkých krouticích momentů a svou geometrií dopomáhají k tiššímu chodu. [14]



Obr. 8 Znázornění radiálních a axiálních sil [14].

### 2.3 Popis součásti

Mimo výše zmíněného ozubení (dvojitě šikmé, korigované,  $m = 30$  mm,  $z = 21$ ) je pastorek ( $\varnothing 715,95h8$  mm, délka 380 mm) v otvoru pro hřídel ( $\varnothing 309H7$  mm) osazen dvojití drážek pro klíny s nosem (72P9 mm v délce 380 mm, úkos 1:100) a deseti otvory ( $\varnothing 42H7$  mm v délce  $215 \pm 2$  mm) sloužícími ke svrtání s předlohovým hřídelem.

Na čelech jsou umístěny dva manipulační otvory se závitem ( $2 \times M42 \times 3$  v délce

75 mm) a dva technologické závitové otvory (M12 v délce 25 mm). Sériovost součásti se pohybuje v jednotkách kusů za rok.

#### 2.4 Materiál a jeho další zpracování

Výchozím materiálem pro výrobu pastorku je ocel 15 260.3, tedy ve stavu žíhaném naměkko. Ekvivalentem dle DIN je potom materiál 50CrV4, systém ISO 683-1:1987 označuje ocel odlišně – 51CrV4. [16], [17]

Obecně jsou oceli třídy 15 označovány jako nízkolegované konstrukční oceli, někdy taktéž jako oceli pružinové. Díky své žárupevnosti se používají se na výrobu kotlů, součástí parních turbín, apod. Dále jsou využívány v automobilovém a leteckém průmyslu pro součásti převodovek – pastorky, pastorkové hřídele a ozubená kola. V neposlední řadě nachází tyto oceli uplatnění ve výrobě listových a vinutých pružin. [18]

Podle chemického složení jsou rozděleny do tří skupin [19]:

- ušlechtilé nelegované oceli,
- oceli legované křemíkem,
- oceli legované chromem, popř. chromem a vanadem, nebo niklem.

V tomto případě se tedy jedná o ocel legovanou chromem a vanadem určenou k zušlechtnění a následné nitridaci. Dle normy ČSN EN 10083-3 je základní chemické složení limitováno obsahem 0,47 až 0,55 % C, max. 0,4 % Si, 0,7 až 1,1 % Mn, max. 0,025 % P, max. 0,025 % S, 0,9 až 1,2 Cr a 0,1 až 0,25 % V. Z pohledu tepelného zpracování norma určuje rozmezí kalících teplot 820 až 870 °C, kalícím prostředím je olej. Popouštění probíhá za teplot 540 až 680 °C. [17]

Hotový pastorek je v oblasti ozubení iontově nitridován (viz kap. 3.4.1) do hloubky 0,3 mm na tvrdost 620 až 730 HV5. Finální označení materiálu je 15 260.9.

#### 2.5 Polotovár

Polotovarem pro výrobu pastorku je výkovek o hrubé hmotnosti 1400 kg. Toto mezikružší má průměr  $\varnothing D = 750$  mm, předkovaný otvor o průměru  $\varnothing D_a = 220$  mm a výšku  $H = 450$  mm. Z celého mezikružší zabírá 40 mm nákovek pro zkoušky materiálu. Tento nákovek je obráběn společně s pastorkem a pomocí dvou technologických závitových otvorů M12×25 (viz kap. 2.3) je přišroubován k polotovaru při tepelném zpracování. Po jeho dokončení jsou z oblasti paty zubu odebrány kontrolní vzorky, na kterých je testována tvrdost, vrubová houževnatost a další parametry mechanických vlastností.

#### 2.6 Technologičnost výroby

Z hlediska technologičnosti výroby jsou obecně ozubená kola považována za součásti relativně náročné na výrobu. [2]

Použitě dvojité šikmé ozubení (oproti ozubení šípovému) usnadňuje výrobu samotného ozubení (viz kap. 2.2).

Dle výrobního výkresu je nejvyšší požadovaná přesnost na průměru  $\varnothing 309H7$  mm a  $\varnothing 715,95h8$  mm. Ostatní rozměry mají buď toleranci větší, nebo jsou tolerovány pouze dle ISO 2768-mK. Součást nemá předepsány žádné geometrické tolerance.

Požadavky na strukturu obrobeného povrchu jsou nejvyšší na náboji –  $R_a = 0,8 \mu\text{m}$ . Předpis na jakost povrchu samotného ozubení činí  $R_a = 1,6 \mu\text{m}$ .

Při současné výrobě je uplatněno několik typů třískového obrábění – soustružení, vrtání a závitování, frézování, a obrážení.

### 3 TECHNOLOGIE POUŽITÉ PRO VÝROBU OZUBENÍ

V současnosti existuje mnoho různých způsobů výroby ozubených kol. Od těch naprosto běžných, jako je třeba frézování nebo obrázení, až po metody využitelné pouze v úzkém spektru aplikací. Do těchto by mohlo být zařazeno například protahování, přesné stříhání a mnohé další. Postup při výrobě je však z největší části podřízen aplikaci a materiálu samotného ozubeného kola. [2]

Pastorek, jakožto předmět této studie, je svým provedením, aplikací a zejména pak velikostí poměrně specifický. Použitý modul 30 mm je zcela nestandardní – dle normy ČSN 01 4608 je nejbližší doporučený modul 32 mm. Zvolený modul se nevyskytuje ani v možnostech „použití jen v krajním případě“. [20]

Tyto skutečnosti s sebou přinášejí mnohá úskalí. Z pohledu technologie je pro danou součást vhodné využít pouze frézování tvarovou čepovou frézou a obrázení. Z hlediska nástrojového vybavení je pak výroba tohoto ozubení odkázána na speciální, nestandardní nástroje (viz kap. 4.3) a to jednak kvůli nenormalizovanému provedení, ale i atypické velikosti.

#### 3.1 Základní parametry ozubených kol

V oblasti výroby ozubení slouží k jeho popisu zpravidla následující termíny [21]:

- **profil zubu** – tvořen boky a obloukem hlavové kružnice,
- **zubová mezera** – prostor mezi dvěma zuby,
- **výška zubu** – je tvořena výškou hlavy zubu a výškou paty zubu, jejich rozmezí tvoří roztečná kružnice,
- **roztečná kružnice** – kružnice, na níž je rozteč rozdělena rovnoměrně na zub a mezeru,
- **tloušťka zubu a velikost zubové mezery** – udávána obloukem na roztečné kružnici,
- **rozteč** – součet tloušťky zubu a velikosti mezery na roztečné kružnici (též vzdálenost stejnohlých boků dvou sousedních zubů),
- **rozteč normální** – měřena v kolmém řezu ozubením,
- **rozteč čelní** (obvodová) – měřena v rovině kolmé k ose kola,
- **modul** – základní veličina všech rozměrů ozubení, které jsou vyjádř. v jeho násobcích,
- **hlavová kružnice** – kruž. opsaná hlavám zubů,
- **patní kružnice** – kruž. vepsaná na dně zub. mezer,
- **základní kružnice** – kruž., z níž jsou odvozeny evolventy profilu zubů.

Pro přepočítání normálního modulu na čelní je využito vztahu (1) [22]:

$$m_t = \frac{m_n}{\cos \beta} \quad (1)$$

kde:  $m_t$  [mm] - čelní modul,  
 $m_n$  [mm] - normální modul,  
 $\beta$  [°] - úhel sklonu zubu.

Normální rozteč je poté vypočtena ze vztahu (2), rozteč čelní je určena vzorcem (3) [22]:

$$p_n = \pi \cdot m_n = p_t \cdot \cos \beta \quad (2)$$

kde:  $p_n$  [mm] - normální rozteč,  
 $m_n$  [mm] - normální modul,  
 $p_t$  [mm] - čelní rozteč,  
 $\beta$  [°] - úhel sklonu zubů.

$$p_t = \pi \cdot m_t = \frac{\pi \cdot d}{z} \quad (3)$$

kde:  $p_t$  [mm] - čelní rozteč,  
 $m_t$  [mm] - čelní modul,  
 $d$  [mm] - průměr roztečné kružnice,  
 $z$  [-] - počet zubů.

Roztečná kružnice je jednoznačně určena podle výpočtu (4), kružnice hlavové je vypočtena dle vzorce (5). Velikost průměru patní kružnice určuje vztah (6). [21]

$$d = \frac{z \cdot m_n}{\cos \beta} \quad (4)$$

kde:  $d$  [mm] - průměr roztečné kružnice,  
 $z$  [-] - počet zubů,  
 $m_n$  [mm] - normální modul,  
 $\beta$  [°] - úhel sklonu zubů.

$$d_a = d + 2h_a \quad (5)$$

kde:  $d_a$  [mm] - průměr hlavové kružnice,  
 $d$  [mm] - průměr roztečné kružnice,  
 $h_a$  [mm] - výška hlavy zubu.

$$d_f = d - 2h_f \quad (6)$$

kde:  $d_f$  [mm] - průměr patní kružnice,  
 $d$  [mm] - průměr roztečné kružnice,  
 $h_f$  [mm] - výška paty zubu.

Samotný zub má pak výšku určenou vztahem (7) a šířku dle vzorce (8) [21], [23]:

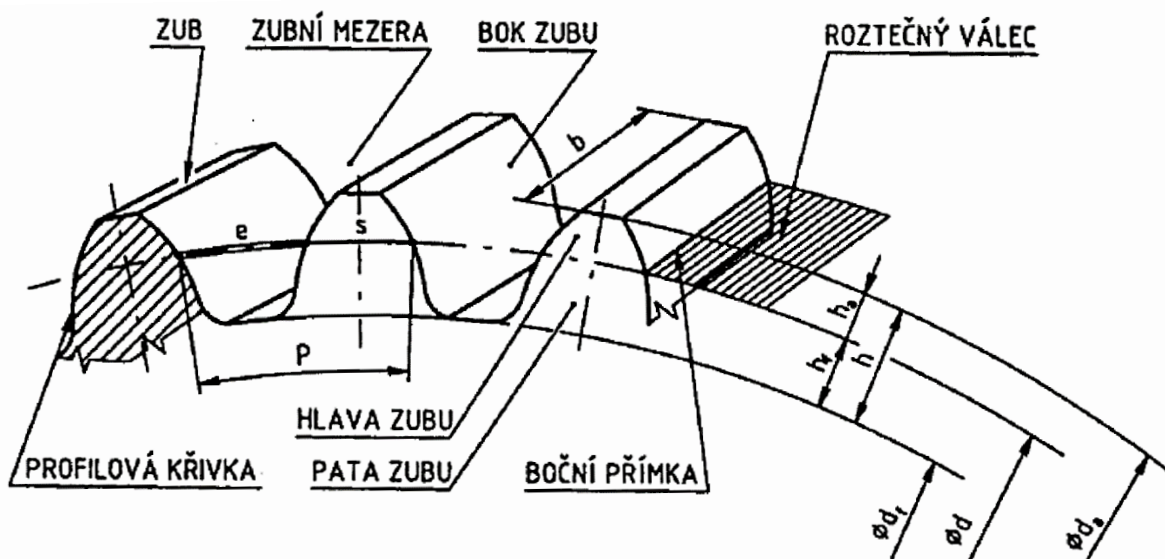
$$h = h_a + h_f = m + 1,25m = 2,25m \quad (7)$$

kde:  $h$  [mm] - výška zubu,  
 $h_a$  [mm] - výška hlavy zubu,  
 $h_f$  [mm] - výška paty zubu,  
 $m$  [mm] - modul.

$$s = \frac{p_n}{2} = \frac{\pi \cdot m_n}{2} \quad (8)$$

kde:  $s$  [mm] - tloušťka zubu v normálním řezu,  
 $p_n$  [mm] - normální rozteč,  
 $m_n$  [mm] - normální modul.

Výše zmíněné parametry jsou orientačně znázorněny na čelním soukolí s přímými zuby (viz obr. 9).



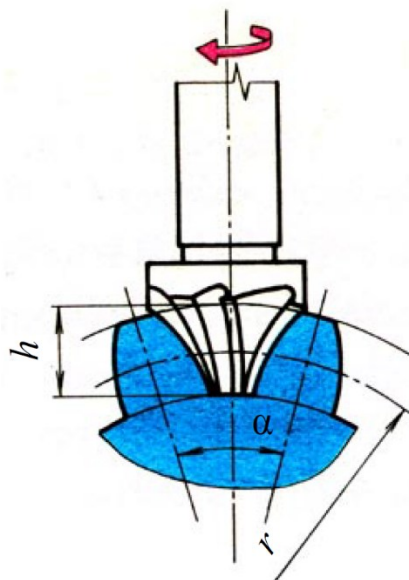
Obr. 9 Rozměry čelního soukolí s přímými zuby [23].

### 3.2 Obrábění ozubení tvarovou čepovou frézou

Frézování ozubení tvarovou čepovou („prstovou“) frézou se řadí mezi tzv. metody výroby dělicím způsobem. Tato se řadí mezi jedny z nejstarších, ale také nejméně přesných. Po obrobení jedné zubové mezery je pomocí dělicí hlavy obrobek pootočen o jeden zub a následně je obrobena další zubová mezera. Jako nástroj je využívána tzv. modulová fréza. Tato má dvě základní podoby – kotoučovou a čepovou. Tvar modulové frézy odpovídá tvaru zubové mezery v normálním průřezu. Zubová mezera se liší u ozubených kol s rozdílnými moduly, ale také s odlišnými počty zubů. Proto se modulové frézy vyrábí v sadách pro daný modul a pro blízký rozsah počtu zubů. Sady mají obvykle 8, 15 nebo 26 členů, přičemž se vícečlenné sady využívají pro přesnější ozubená kola. [2]

Pro výrobu ozubení s menším modulem je výhodnější využití kotoučových modulových fréz. Naopak, ozubená kola s většími moduly jsou nejčastěji obráběna pomocí čepových fréz. Jejich výhodou je možnost použití též pro výrobu šípového ozubení. Pro hrubování velkých modulů (přes  $m = 30$  mm) se také používají tvarové frézy čepové s lichoběžníkovým profilem se zuby ve šroubovici. Tyto mohou pracovat s mnohem většími posuvy. [2], [24]

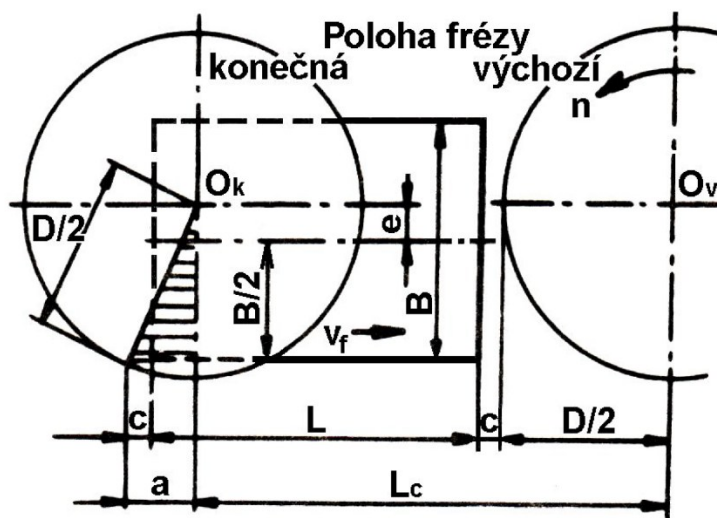
Frézování ozubení modulovými frézami má pouze omezené použití, jelikož nezajišťuje dostatečnou přesnost ani produktivitu. Nepřesnost tvarové tkví v tom, že se k frézování ozubení používá fréz, které jsou určeny k obrábění počtu zubů pouze určitého rozsahu (viz výše), zatímco ozubeným kolům s různými počty zubů téhož modulu odpovídá různý profil evolventy boku zubu. Periodické dělení a nepřesnosti samotné dělicí hlavy vnáší do výroby ozubených kol další chyby. Nízkou produktivitu lze vysvětlit tím, že obrábění není plynulé. Po proříznutí každého zubu (resp. zubové mezery) následuje chod naprázdno. [24]



Obr. 10 Schéma obrábění ozubení čepovou frézou [25].

#### 3.2.1 Výpočet strojního času

Strojní čas pro hrubé čelní asymetrické frézování rovinné plochy frézovací hlavou (obr. 11) je obecně určen dle vztahu (9) [26]:



Obr. 11 Čelní hrubovací asymetrické frézování [26].

$$t_{AS} = \frac{L_c}{v_f} = \frac{L_c}{n \cdot f} = \frac{L_c \cdot \pi \cdot D}{10^3 \cdot v_c \cdot f} \quad (9)$$

kde:	$t_{AS}$	[min]	-	čas jednotkový strojní,
	$L_c$	[mm]	-	celková dráha nástroje,
	$v_f$	[mm min <sup>-1</sup> ]	-	posuvová rychlost,
	$n$	[min <sup>-1</sup> ]	-	otáčky nástroje,
	$f$	[mm]	-	posuv na otáčku,
	$D$	[mm]	-	průměr frézy,
	$v_c$	[m min <sup>-1</sup> ]	-	řezná rychlost.

Celkovou dráhu nástroje je možné určit dle vztahu [26]:

$$L_c = \frac{D}{2} + 2 \cdot c + L - a \quad (10)$$

kde:	$L_c$	[mm]	-	celková dráha nástroje,
	$D$	[mm]	-	průměr frézy,
	$c$	[mm]	-	bezpečná vzdálenost (2 mm),
	$L$	[mm]	-	délka obrobku,
	$a$	[mm]	-	hodnota přeběhu nástroje.

Hodnota přeběhu nástroje je určena dalším výpočtem [26]:

$$a = \sqrt{\left(\frac{D}{2}\right)^2 - \left(\frac{B}{2} + e\right)^2} \quad (11)$$

kde: a [mm] - hodnota přeběhu nástroje,  
 D [mm] - průměr frézy,  
 B [mm] - šířka obrobku,  
 e [mm] - vyosení nástroje.

Rovnice popisující řeznou rychlost má podobu (12) [27]:

$$v_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} \quad (12)$$

kde:  $v_c$  [m min<sup>-1</sup>] - řezná rychlost,  
 D [mm] - průměr frézy,  
 n [min<sup>-1</sup>] - otáčky nástroje.

Obdobně je stanovena posuvová rychlost  $v_f$  (13) [27]:

$$v_f = f_z \cdot z \cdot n \quad (13)$$

kde:  $v_f$  [mm.min<sup>-1</sup>] - posuvová rychlost,  
 $f_z$  [mm.z<sup>-1</sup>] - posuv na břit,  
 z [-] - počet břitů,  
 n [min<sup>-1</sup>] - otáčky nástroje.

### 3.3 Obrázení ozubení

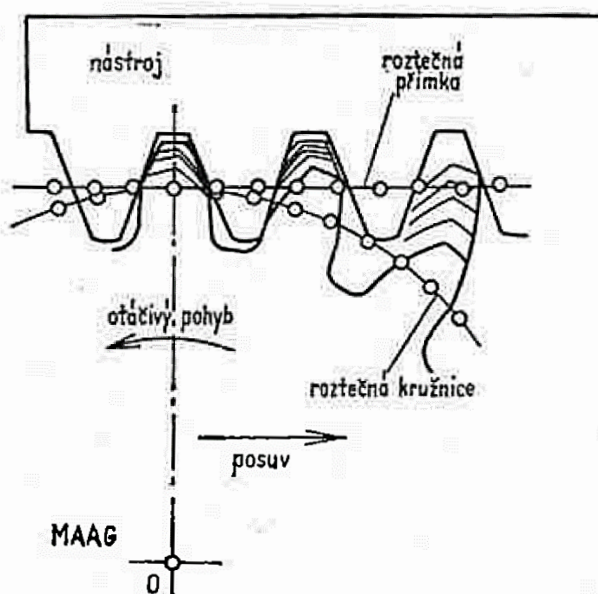
Princip odvalovacího obrázení ozubení je založen na vzájemném záběru základního hřebene s ozubeným kolem bez vůle. Nástroj a obrobek konají pohyb, který odpovídá jejich záběru – odvalují se. Mimo toho je nástroji udělen pohyb směrem do řezu. Samotný řezný pohyb je pak realizován ve směru zubní mezery, přičemž nástroj koná obálkový řez<sup>1</sup> přes celou šířku ozubení. Každý zub nástroje v procesu obrábění vytváří jednu zubovou mezeru. [20], [24]

Mezi dvě hlavní metody obrázení ozubení patří systém Maag a Fellows. Pro využití ve velkosériové a hromadné výrobě byl dále vyvinut systém „Shear Speed“, který slouží zejména k výrobě kol automobilových převodovek a využívá spec. obrážecí nástroj. [20]

<sup>1</sup> Evolventní profil ozubení vzniká jako obalová křivka řady po sobě jdoucích poloh břitů. Čím více je těchto poloh, tím více se profil zubu blíží ideálnímu tvaru evolventy. [24]

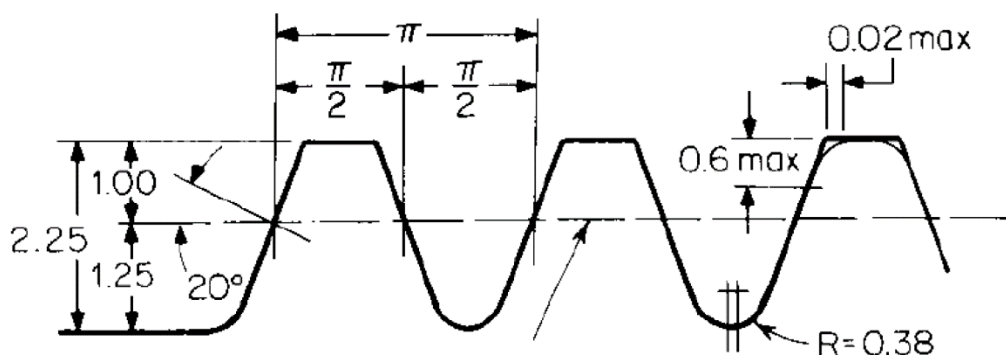
### 3.3.1 Obrázení hřebenovým nožem (metoda Maag)

Při obrázení ozubení na strojích typu Maag (viz obr. 12) je nástroj upnut na smýkadle a koná pohyb do řezu, zatímco obrobek je odvalován. Kinematika pohybu odvalování má dvě části – pohyb podélně se smýkadlem a rotaci kolem vlastní osy obrobku. Proces obrábění je cyklický a zahrnuje reverzační chod obrobku. Obrázeční stroje Maag umožňují vyrábět všechny druhů čelních ozubených kol jedním jediným nástrojem o daném modulu a libovolném počtu zubů. Dále pak kola korigovaná, nekorigovaná a díky možnosti vyklápění smýkadla i s šikmými popř. dvojitě šikmými zuby. [20], [24]



Obr. 12 Pohyby při obrázení způsobem Maag [20].

Obrázeční hřebenové nože jsou (co se výroby a ostření týče) jedním z nejjednodušších, a proto nejpřesnějších nástrojů pro obrábění ozubení. Jejich podobu (pro úhel záběru  $\alpha = 20^\circ$ ) upravuje norma ČSN 22 2504. [20]



Obr. 13 Geometrie základního ozubeného hřebene, jednotkový modul [25].

Stroje pracující s hřebenovými noži dosahují díky jednoduchému nástroji vysoké přesnosti ozubení. Nejsou vhodné pro výrobu ozubení malých a středních modulů (průměrů). Jejich vysoká produktivita je ale naplno využita při výrobě ozubených kol s velkými moduly. [20]

### 3.3.2 Výpočet strojního času

Strojní čas pro obrázení je možné určit z empirického vztahu [2]:

$$t_{AS} = (z+z_n) \cdot \left( \frac{n_t}{n_{zdv}} + t_{RE} \right) \quad (14)$$

kde:	$t_{AS}$	[min]	-	čas jednotkový strojní,
	$z$	[-]	-	počet zubů obráběného kola,
	$z_n$	[-]	-	počet zubů náběhu,
	$n_t$	[min <sup>-1</sup> ]	-	počet dvojdvihů nástroje na obrobení jedné rozteče,
	$n_{zdv}$	[min <sup>-1</sup> ]	-	počet dvojdvihů nástroje,
	$t_{RE}$	[min]	-	čas reverzního chodu.

V praxi je však problematika výpočtu komplikovanější. Do procesu vstupuje mnoho veličin, které jeden vztah nemůže obsáhnout. Proto byl k určení strojního času využit postup dle manuálu dodávanému ke konkrétní obrázečce SH350/500.

Sled jednotlivých kroků je následující [28]:

- volba počtu hrubovacích operací a šířka záběru ostří,
- volba řezné rychlosti,
- volba rychlostního stupně,
- volba posuvu pro hrubování (počet zdvihů smykadla na jednu rozteč),
- volba posuvu pro práci na čisto (počet zdvihů smykadla na jednu rozteč),
- zjištění spotřeby času pro obrázení jedné rozteče (pro hrubování a práci na čisto),
- zjištění spotřeby času pro obrázení celého ozubeného kola.

Tato metodika využívá diagramy a tabulky (příklad viz příloha 3) přímo pro konkrétní materiály, moduly a počty zubů. Zahrnuje taktéž parametry daného obráběcího stroje (počet roztečí na řídicím vačkovém kotouči, rychlostní stupně a další) a výrazně tím usnadňuje a zpřesňuje určení strojního času.

### 3.4 Chemicko-tepelné zpracování – nitridace

Nitridace se řadí do skupiny chemicko-tepelného zpracování. Základním principem je sycení povrchu oceli různými prvky, díky čemuž je dosaženo rozdílných mechanických vlastností povrchu součásti a jejího jádra. Nejčastěji se jedná o nárůst tvrdosti, zvyšuje se také odolnost povrchu proti opotřebení při současném zachování houževnatosti jádra. Tloušťka nitridované vrstvy se pohybuje řádově v desetinách milimetru. [19]

Nitridování je sycení povrchu oceli dusíkem, vysoké tvrdosti povrchu je dosaženo již při samotném sycení. Důvodem je vznik jemných a tvrdých intersticiálních sloučenin dusíku s železem a dalšími přísadovými prvky (nitridy nebo karbonitridy). Povrch nitridované součásti je obohacován dusíkem až

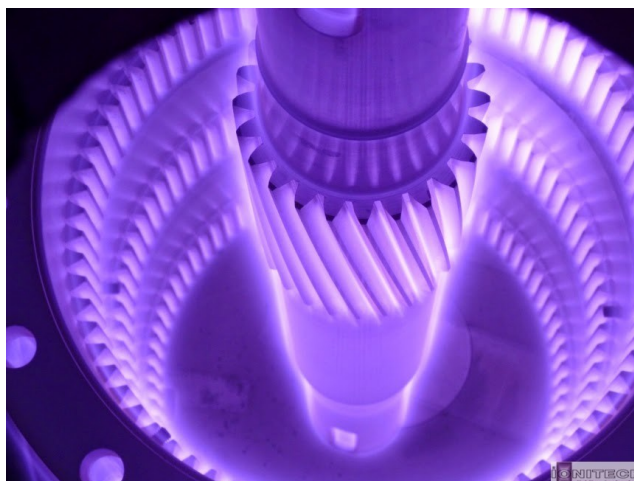
na koncentraci okolo 12 hm. % N. K tomuto dochází za teplot okolo 500 až 550 °C. [19]

V ocelích, které jsou určeny k nitridování a za tímto účelem jsou obohaceny nitridotvornými prvky (Cr, Al, V) vytváří dusík speciální nitridy (CrN, Cr<sub>2</sub>N, AlN, VN) nebo karbonitridy. Strukturní složení povrchu je tak mnohem členitější. Při porovnání s nitridy železa jsou nitridy výše zmíněných legujících prvků stabilnější za zvýšených teplot a dosahují taktéž vyšší tvrdosti. [19]

Optimálních vlastností jádra součásti se dosahuje zušlechtěním. Teplota popouštění je zpravidla vyšší, než teplota nitridace (zušlechtění probíhá před nitridací). Po procesu nitridování následují pouze dokončovací operace (broušení). Nárůst objemu součásti, který je způsoben vznikem nových dusíkatých struktur, vyvolává v povrchu tlaková napětí, která svým charakterem pomáhají uzavírat případné trhliny a snižují tak riziko cyklické únavy materiálu. [19]

### 3.4.1 Iontová nitridace

Iontová (někdy též plazmová) nitridace funguje na principu vzájemného působení nitridovaného povrchu a plazmovým plynem. Plazma (ionizovaný plyn) vzniká elektrickým výbojem v ochranné atmosféře. Při tomto způsobu chemicko-tepelného zpracování funguje stěna pece jako anoda a samotná součást se stává katodou. Proud, napětí a tlak plynu v ochranné atmosféře musí být nastaveny tak, aby vznikl mezi stěnou pece a povrchem součásti tzv. anomální výboj s doutnavým výbojem na katodě. Tento kopíruje povrch součásti bez ohledu na tvar a vzdálenost od stěny pece (obr. 14). V doutnavém výboji dochází ke štěpení a ionizaci plynu, který zároveň tvoří ochrannou atmosféru. [19], [29]



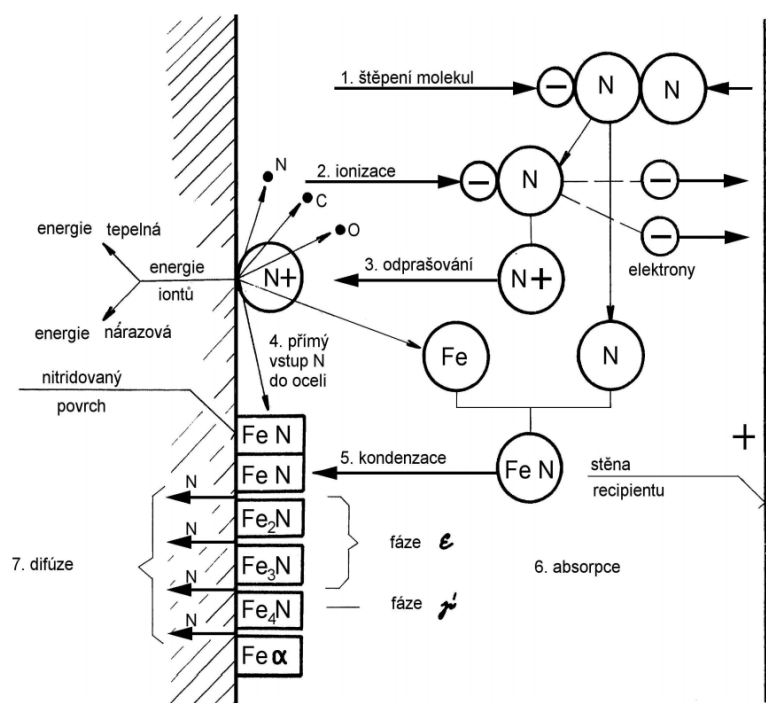
Obr. 14 Iontová nitridace [30].

Procesy, které probíhají na povrchu nitridované součásti, je možné zjednodušit do podoby obr. 15. Ionty s kladným nábojem dopadají na povrch součásti. Při tomto se část jejich kinetické energie mění na energii tepelnou a část energie je spotřebována na vyrazení atomů železa, uhlíku, kyslíku nebo jiných oxidů. Tomuto procesu se říká katodové odprašování a v jeho důsledku je povrch dokonale očištěn a depasivován. Tento proces umožňuje nitridaci také korozivzdorných ocelí a ostatních materiálů s pasivními kovovými vrstvami. Ionty dusíku se přímo na povrchu slučují s železem za vzniku nestabilních nitridů FeN. Jejich následnou kondenzací se vytváří povrchová absorpční vrstvička (4 až 6 μm)

s vysokou koncentrací dusíku. Tato vrstva se dále rozpadá na stabilnější nižší složky a část uvolněného atomárního dusíku difunduje dále do součásti. Zde již fungují principy klasické nitridace. [19], [29], [31]

Samotný praktický proces plazmové nitridace má několik fází [29]:

- ohřev – na požadovanou teplotu v ochranné atmosféře,
- čištění/aktivace povrchu – odstraňování pasivních vrstev,
- nitridace – proces řízený pomocí teploty vsázky, chemického složení atmosféry, tlaku a času,
- ochlazení – ukončení nitridace a dochlazení součásti v ochranné atmosféře.



Obr. 15 Schéma dějů na povrchu součásti při iontové nitridaci [31].

Základní výhodou iontového nitridování oproti nitridaci klasickým způsobem je v rychlosti sycení povrchu dusíkem. Iontová nitridace je využívána především v oblasti zvyšování trvanlivosti nástrojů (řádový nárůst životnosti), dále k úpravě váček, ozubených kol a dalších součástí, u nichž napomáhá zlepšení kontaktních vlastností. [19], [29]

### 3.5 Kontrola ozubených kol

Jelikož patří ozubená kola mezi tvarově nejsložitější strojní součásti, patří i jejich kontrola a měření mezi náročné disciplíny. Specifická ozubení vyžadují specifické způsoby kontroly. Obecné tendence vedou ke zkracování samotného procesu kontrolování při zajištění co nejvyšší přesnosti. [2]

Ke každému stupni přesnosti výroby ozubených kol pak existují tři základní skupiny norem, které určují vlastnosti výsledného ozubeného kola. Plnění

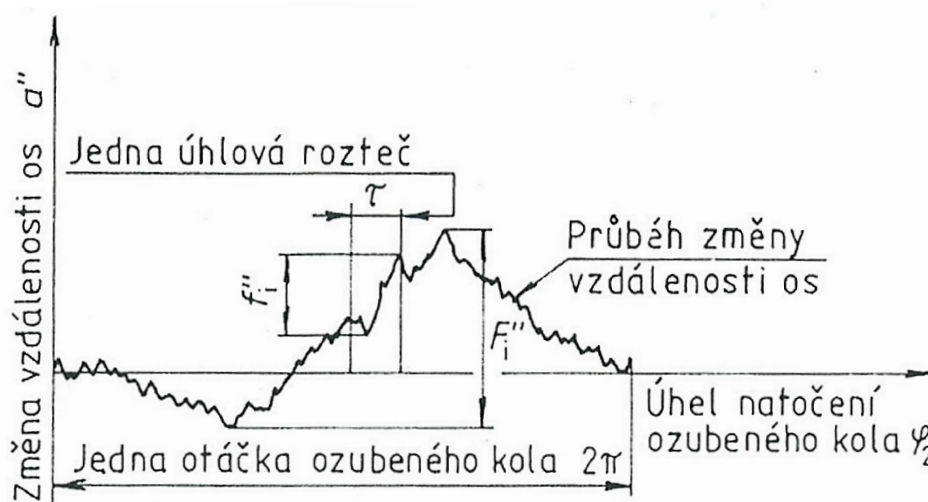
příslušných norem se kontroluje pomocí komplexních ukazatelů přesnosti. Skupiny norem se zahrnují [2], [24]:

- kinematická přesnost kola (úchylna obvodového házení, úchylna dvoubokého odvalu za otáčku, úchylna kolísání rozměru přes zuby),
- plynulost chodu (úchylna profilu zubu, úchylna dvoubokého odvalu za rozteč, úchylna základní rozteče),
- dotyk zubu (úchylna sklonu zubu, pásmo dotyku zubu).

Do dalších skupin úchyln a tolerancí by pak mohly být zařazeny např. boční vůle, úchylna vzdálenosti os ozubených kol, tolerance posunutí základního profilu, tolerance rozměru přes zuby, tolerování tloušťky zubu a další. [2]

### 3.5.1 Konvenční metody kontroly ozubení

Výše uvedené ukazatele přesnosti kol lze kontrolovat přístrojem pro komplexní jednobokou kontrolu záběru čelních ozubených kol. Toto zařízení využívá etalonových kol, vzájemného záběru s kontrolovaným kolem a následné zaznamenávání chyby v podobě křivky (viz obr. 16). Kontrola je prováděna při otáčení kola jedním směrem a po volbě boční vůle směrem druhým. Rozkmit výkyvů křivek chyb pro levé a pravé boky zubů charakterizuje celkové kinematické chyby kola za jednu otáčku. Podle těchto křivek lze také určit plynulost chodu pro levý a pravý bok zubu. [24]



Obr. 16 Vyhodnocení úchylny dvoubokého odvalu [2].

Všeobecně lze nejjednodušeji kontrolovat čelní ozubená kola s přímými zuby. Mimo kontroly běžných vnějších rozměrů (šířka, průměr) je nutné použít speciální měřidla. Nejčastěji se jedná o mikrometry se speciálními doteky určenými k měření konkrétních rozměrů (talířové dotoky pro určení míry přes zuby, kulové dotoky pro kontrolu roztečné kružnice apod.). Měřidlo určené speciálně pro ozubená kola je např. zuboměr. Tento umožňuje měření tloušťky zubu na roztečné kružnici nebo v libovolné konstantní výšce (dle ČSN 01 4678). [2], [32]

### 3.5.2 Moderní metody kontroly ozubení

S vývojem měřicích strojů a systému jsou kontroly ozubení taktéž modernizovány. V současnosti jsou na trhu komplexní měřicí centra, která na jednom pracovišti

kontrolují jak tvar evolventy, tak i úhel sklonu zubů, míru přes zuby a další parametry. [33]

Kvalita povrchu je taktéž jedním z parametrů, který v oblasti měření prošel značným vývojem. V minulosti používané metody srovnávací či optické jsou v současnosti často nahrazovány moderními drsnoměry. [2]

Přípustná drsnost vychází z požadované hlučnosti, přesnosti a obvodové rychlosti ozubeného kola. Nízkým rychlostem (do 5 m.s<sup>-1</sup>) vyhovuje drsnost ozubených kol do Ra = 6,3 μm. Tato je běžně dosahována frézováním nebo obrážením. Pro střední rychlosti (8 až 30 m.s<sup>-1</sup>) je předepisována drsnost Ra = 1,6 až 3,2 μm (viz obr. 17). Pro ozubená kola pracující při vysoké obvodové rychlosti (nad 30 m.s<sup>-1</sup>) pak drsnost Ra = 0,2 až 0,8 μm. Těchto hodnot struktury povrchu je pak dosahováno na přesných bruskách, popř. lapováním. [2]

Pro kontrolu tvrdosti je hodné použití nedestruktivních metod, popř. metod způsobujících co nejmenší poškození povrchu. Jednou z nich může být použití Shoreho skleroskopu, pro měření mikrotvrdosti (např. po chemicko-tepelném zpracování) metoda dle Vickerse. Mezi nejmodernější způsoby měření tvrdosti ozubených kol se řadí metoda UCI fungující na principu ultrazvuku. Tato zaznamenává změny frekvence kmitání axiálně uloženého tělíska s Vickersovým diamantovým hrotem. Zařízení pracuje ve velkém rozsahu (20 až 1700 HV) s vysokou přesností (±1,5 HRC). [2]

Stupeň přesnosti podle ČSN 01 4682		4	5	6	7	8	9	10	11	
Max. drsnost povrchu Ra (μm)*		01 až 0,2	0,2 až 0,4	0,4 až 0,8	0,8 až 1,6	1,6	1,6 až 3,2	3,2 až 6,3	6,3 až 12,5	
Max. obvodová rychlost (m.s-1)	zuby přímé	libovolná	60	35	15	8	5	3	3	
	zuby šikmé	libovolná	80	50	30	12	8	5	3	
Způsob výroby	kola netvrzená			frézována na speciálních odvalovacích frézách		ševingována		obrážena	obrážena, frézována dělicím způsobem	
	kola tvrzená	broušená na nejpřesnějších bruskách		broušená na odvalovacích bruskách		lapovaná				
Použití		kontrolní kola pro stupeň přesnosti 6 až 8   8 až 10		rychloběžné převodovky		průmyslové převodovky		pohony rotačních pecí		
		měřicí přístroje				lehké lodní motory	válcovací stolice, těžké lodní motory, lokomotivy a			
		reduktory turbín			osobní automobily			zdvihadla a stavební stroje		
					obráběcí stroje			zemědělské stroje		
					letecké motory	nákladní automobily				
							textilní stroje			

\*) Nižší hodnoty pro menší moduly, vyšší hodnoty pro větší moduly

Obr. 17 Orientační směrnice pro volbu stupně přesnosti [23].

## 4 ANALÝZA SOUČASNÉHO STAVU

Hlavním důvodem pro analýzu současného stavu je sumarizace současných informací o procesech, strojích a nástrojích, které jsou k výrobě ozubení používány. Z jejich znalosti bude poté vycházet další část práce, která si klade za cíl samotnou inovací výrobního procesu ozubení.

### 4.1 Analýza technologického postupu

Současný techn. postup<sup>2</sup> je součástí přílohy 4. Z pohledu techn. obrábění je z něj možné vyčíst tyto základní kroky:

- hrubovací soustružení otvoru Ø309H7; průměru Ø715,95h8; hrubování čel a zápichu; upíchnutí nákovku pro zkoušku (SUA125),
- vrtání a řezání závitů 2×M42×3 a 2×M12×25 (VR84A),
- frézování ozubení nahrubo s přídavkem 6 mm na míru přes zuby (SCHIESS RF30E)
- zušlechťování,
- hotové soustruž. Ø309H7; prům. Ø715,95h8 a čel (SUA125),
- hotové obrázení jedné drážky 72P9, druhá je hrubována s příd. 3 mm,
- obrázení ozubení hotově (MAAG SH-350/500),
- odjehlení drážky a hrany ozubení,
- hotové obrázení druhé drážky,
- prořezání závitů 2×M42×3; u ozubení odjehlení evolvent na vnitřních a vnějších čelech.

Mimo výše zmíněné operace obsahuje techn. postup také další přidružené úkony, jako jsou např. kontroly materiálu (barevná indikace, „polévací metoda“), rýsovací operace, průběžné kontroly tvaru, rozměrů a další.

### 4.2 Analýza ozubárenských strojů

Ozubení pastorku je realizováno pomocí dvou strojů – odvalovací frézky SCHIESS RF30E a obrázečky MAAG SH350/500. Obě zařízení byla vyrobena v 2. pol. 20. století. Za tuto dobu postupně klesá jejich přesnost, spolehlivost a narůstají náklady na údržbu a další opravy. Neustále však plní ve spol. Šmeral důležitou úlohu. Díky své jednoduchosti pokrývají společně s bohatým nástrojovým vybavením dílny širokou oblast výroby ozubení.

#### 4.2.1 SCHIESS RF30E

Precizní vertikální frézka na ozubená kola Schiess (na obr. 18 v odvalovacím režimu) umožňuje frézovat odvalovacím způsobem, pomocí dalšího příslušenství také stopkovými a kotoučovými frézami. Disponuje několika elektromotory, ty hlavní mají výkon 30 a 15 kW. Stroj umožňuje frézovat ozubení u obrobku do hmotn. až 20 tun a průměru až 5000 mm. Maximální vyrobiteľný počet zubů je

<sup>2</sup> V současnosti je z technologického postupu zejména pro svou nízkou přidanou hodnotu a vysokou finanční náročnost vynechán proces broušení čel a vnitřního průměru.

400, minimem jsou 4 zuby. Největší modul vyrobitelný stopkovou frézou je 70 mm. [34]



Obr. 18 Vertikální odvalovací frézka RF30E.

#### 4.2.2 MAAG SH-350/500

Stroj SH-350/500 využívá systému Maag na obrázení čelních a šroubových ozubených kol, ozubených tyčí a dalších součástí. Zařízení umožňuje zpracovávat obrobky do průměru 5000 mm s celkovou hmotností do 18 tun. K obrábění je využito buď ozubených hřebenů (do modulu 25 mm), nebo jednozubých nástrojů (modul 35 až 40 mm). Nejmenší vyrobitelný modul činí 3 mm. Obrážka umožňuje díky vyklápní smýkadla obrábět šikmá (při použití spec. nástroje i šípová) ozubení. Maximální počet zubů je 500, minimem je 12 zubů. Díky dalšímu příslušenství stroj umožňuje taktéž např. obrázení vnitřního ozubení – viz obr. 19. [28]



Obr. 19 Obrážka MAAG SH-350/500.

### 4.3 Analýza nástrojového vybavení

Pro výrobu ozubení jsou použity dva základní typy nástrojů:

- stopkové frézy,
- ozubené hřebeny.

#### 4.3.1 Stopková fréza

Stopková („prstová“) fréza je určena pro hrubovací operace. Pro frézování zubových mezer jsou využity tři typy stopkových fréz – dvě hrubovací hlavové frézy a jedna patní. Všechny tyto frézy jsou vyráběny v rámci závodu, jedná se o speciální nástroje s vlastní výkresovou dokumentací (např. příloha 5).

Hlavové frézy jsou šestibřité nástroje (viz obr. 20). Jejich celk. délka se pohybuje okolo 160 mm, největší průměr nástroje je zhruba 90 mm. Hmotnost dosahuje 2 kg. Slouží k hrubování hlavové části ozubení pro moduly 30 až 33 mm. K upínání je využito normalizovaného rozměru stopky ISO 40. Hodnota nástrojového materiálu použitého k výrobě činí zhruba 3000 Kč. Při pracnosti 25 h je tak celková hodnota jednoho nástroje 18.000 Kč.



Obr. 20 Stopková hrubovací fréza.

Patní fréza (viz obr. 21 uprostřed) oproti předchozím nástrojům pracuje pouze se 4 zuby v pravé šroubovici. Její rozměr je cca 120 mm, největší průměr dosahuje hodnoty 46 mm. Štíhlý tvar nástroje umožňuje hrubování oblasti paty zubu. Pro upínání do stroje slouží Morse kužel Mk3. Hmotnost nástroje činí 0,6 kg. Polotovár nástrojového materiálu pro výrobu patní frézy je oceněn na 700 Kč. Výroba nástroje je stanovena na 16 h, celková hodnota nástroje tedy činí 12.000 Kč.



Obr. 21 Hlavové a patní frézy uložené ve skladu nástrojů.

Oba typy fréz jsou vyrobeny ze shodného nástroj. materiálu 19855.3, prochází procesem kalení a popouštění na tvrdost 62 až 64 HRC.

#### 4.3.2 Ozubený hřeben

Systém MAAG v obecném principu využívá k obrábění ozubený hřeben (viz kap. 3.3). V tomto konkrétním případě, kdy je modul ozubení nad 25 mm, však obrážka neumožňuje použití takového nástroje (viz kap. 4.2.2). Využívá tak pouze jednozubého nože ve tvaru lichoběžníku.

K obrábění ozubení jsou využity taktéž nože hrubovací a dokončovací („hladicí“). Tyto nástroje jsou stejně jako předchozí stopkové frézy vyráběny svépomocí v rámci podniku. Materiálem pro výrobu je nástrojová ocel 19824. Rozdíl v jejich rozměrech je řádově v jednotkách milimetrů, a proto je jejich hodnota shodná – 9.795 Kč.

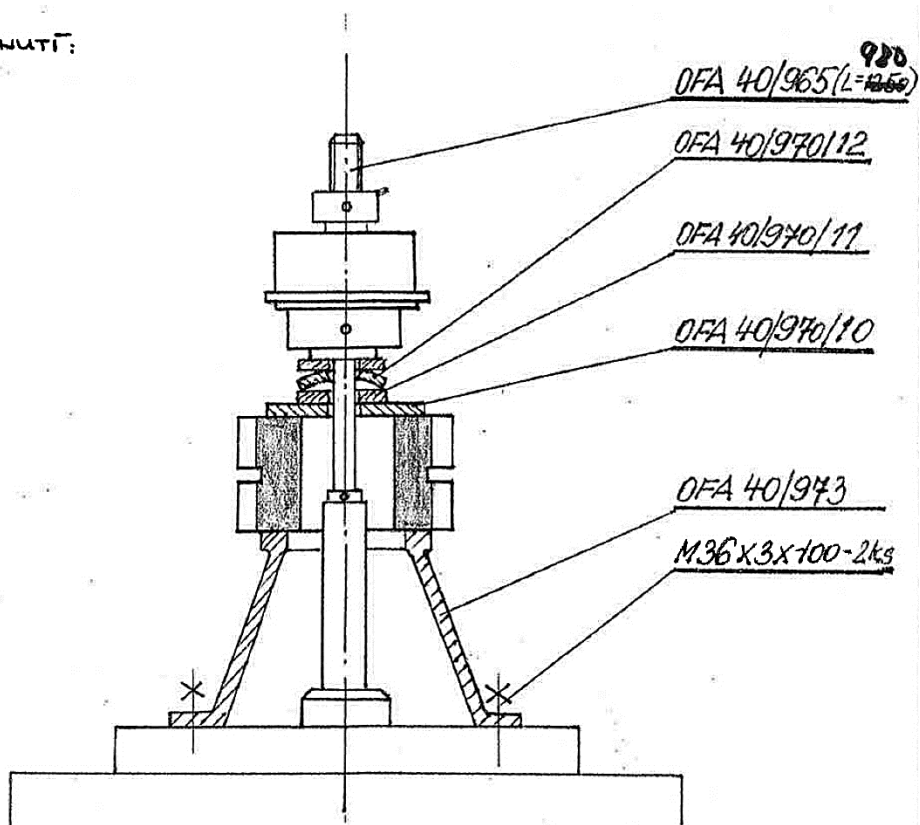
#### 4.3.3 Upínací přípravek

Během procesu obrábění je pastorek upnut dle schématu na obr. 23. Hlavní nosnou část tvoří samotný frézovací přípravek a centrální trn. Obrobek je ustaven na litinový prstenec (viz obr. 22) a poté je pomocí úchylkoměru vystředěn. Pevné ukotvení zajišťuje stahovací matice a soustava podložek.



Obr. 22 Upínací přípravek OFA 40/973.

NÁČRT UPNUTÍ:



Obr. 23 Schematické znázornění upínání pastorku. [3]

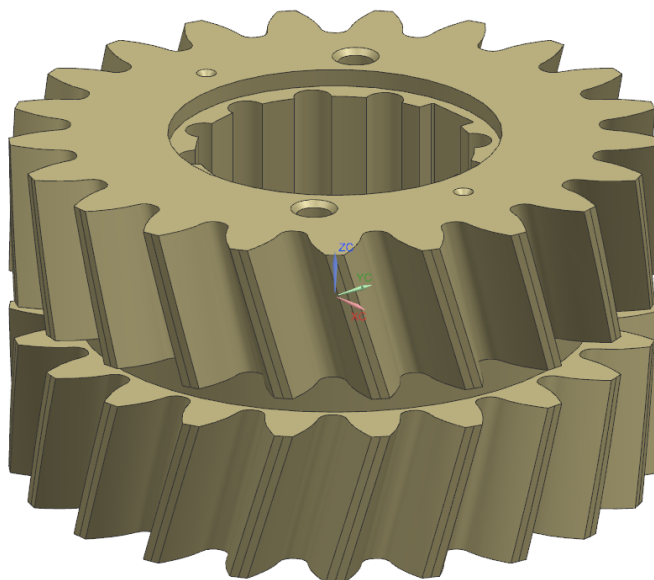
## 5 NÁVRH INOVACE VÝROBNÍHO PROCESU

Hlavním cílem této práce je návrh na inovaci stávajícího procesu obrábění ozubení pastorku. Z předchozích částí vyplývá, že samotný obráběcí proces v sobě skrývá znatelný prostor pro zefektivnění. Tento je patrný zejména ve stránce strojového a nástrojového vybavení. Hrubovací frézování ozubení zabírá z celkového strojního času asi 20 %, obrázení ozubení tvoří 49 % výsledného jednotkového strojního času. Ozubárenské obráběcí operace tvoří významnou část výrobního procesu a jejich inovace tak může vést k celkovému zefektivnění výroby pastorku.

### 5.1 Tvorba 3D modelu, CAM software

Pro účely simulace procesu obrábění byl vytvořen CAD model pastorku a podložky pro upínání. K tomuto byl využit software NX 10.0.0.24 od společnosti Siemens. Tentýž systém byl využit k vytvoření CAM vizualizace obráběcího procesu a verifikaci strojních časů. Důvodem pro volbu tohoto systému je vlastnictví licence společností Šmeral a.s.

Samotný CAD model byl vytvořen pomocí „průvodce tvorbou ozubení“, který je defaultně implementovaný v systému NX. K vytvoření dvojité šikmé ozubení pak bylo využito zrcadlení kolem vhodně zvolené roviny. Ostatní prvky (závitové otvory, drážky pro pera, apod.) využívají kruhové symetrie podle středové osy. Výsledný model (viz obr. 24) má tak počátek souřadnicového systému uprostřed náboje.



Obr. 24 CAD model pastorku.

### 5.2 Volba alternativního obráběcího stroje

Společnost Šmeral disponuje relativně rozsáhlým strojovým parkem. Pro volbu alternativního obráběcího stroje byla tedy stanovena tato kritéria:

- sloučení dvou ozubárenských pracovišť v jedno,

- CNC řízení,
- nárůst produktivity oproti současným strojům,
- využití komunálního nářadí,
- zvýšení přesnosti.

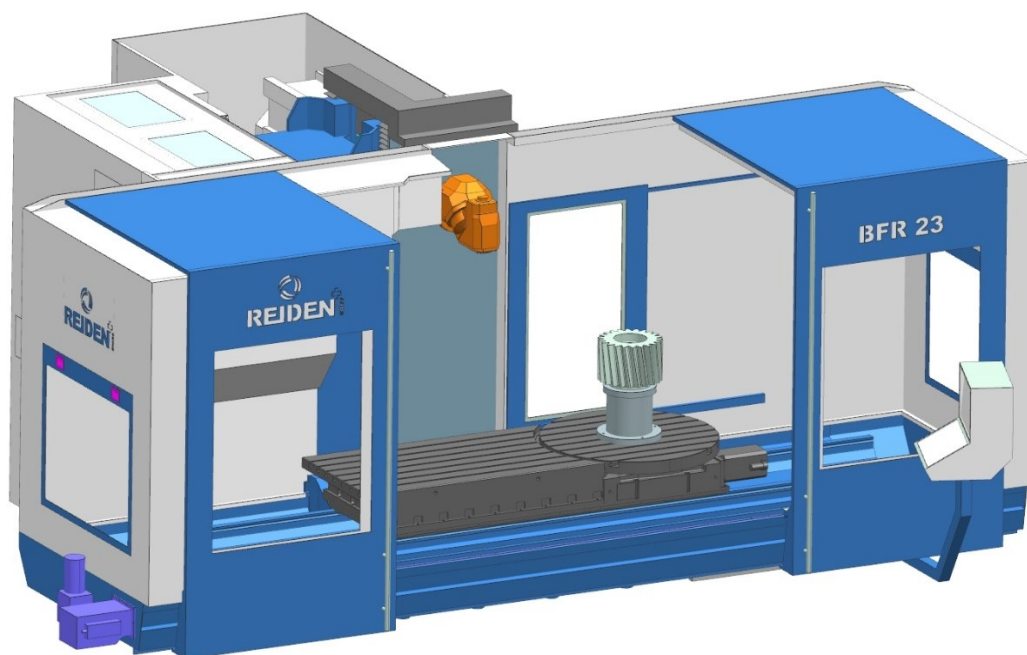
Prakticky by měl tedy nový stroj zaručovat jistou míru univerzálnosti, díky které na něm bude možné provádět hrubovací i dokončovací operace. CNC řízení dále v tomto případě poskytne prostor pro relativně snadnou opakovatelnost obráběcího procesu, umožní jeho postupné zdokonalování a v případě potřeby dovolí rychlou úpravu obráběcích podmínek. Zvýšení přesnosti úzce souvisí s CNC řízením, samotnou konstrukcí takového stroje a bude tak jen jeho logickým důsledkem. Nárůst produktivity přinese jednak samotný obráběcí stroj (vyšší řezný výkon na vřetení), ale zejména nové nástroje. Tyto by měly nahradit nástroje stávající, které jsou vyráběné na zakázku a zdaleka nedosahují produktivity moderního komunálního nářadí. Nepřímým důsledkem bude též úspora v oblasti ostření nástrojů.

Těmto požadavkům odpovídá několik zařízení ze strojového parku:

- horizontální vyvrtávačka W250 CNC (Škoda),
- vodorovná vyvrtávačka WHN13 CNC (TOS Varnsdorf),
- obráběcí centra S620, S630, S68 (C. B. Ferrari),
- obráběcí centrum BMC 25 (Hurco),
- obráběcí centrum BFR 23 (Reiden).

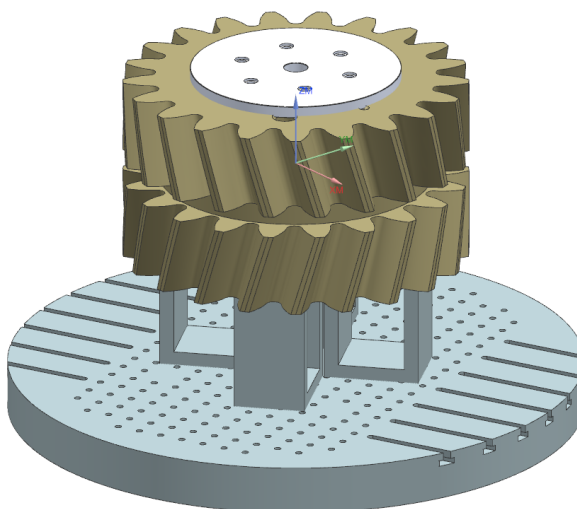
Všechny výše zmíněné stroje splňují svou konstrukcí a způsobem řízení stanovená kritéria. Avšak zařízení Ferrari a Reiden přímo (bez nutnosti instalace dalšího příslušenství) disponují rotačním stolem. Z těchto dvou pak centrum BFR23 dovoluje použití vyšších otáček hl. vřetene a umožňuje snadnější manipulaci s obrobkem. Díky tomu je pro další postup zvoleno jako výchozí obráběcí stroj.

O jeho chod se stará řídicí systém Heidenhain ve verzi TNC 640. Centrum disponuje obráběcím prostorem o velikosti 3000×1200×1500 mm (X × Y × Z). Hlavní vřeteno stroje pracuje v rozsahu otáček 20 až 6000 min<sup>-1</sup> a k upínání nástrojů je využíván kužel ISO 50. Jeho maximální výkon dosahuje 30 kW při krouticím momentu 1135 Nm. Rychloposuv v ose X má hodnotu 30 m·min<sup>-1</sup>, v osách Y a Z shodně 20 m·min<sup>-1</sup>. Další parametry stroje jsou shrnuty v příloze 6. [35]



Obr. 25 CNC obráběcí centrum REIDEN BFR23 [36].

Pro upínání obrobku na tomto centru byly použity 4 podložky 250×200×150 mm, které již reálně ve firmě fungují. Celá sestava (bez upínek) je umístěna na otočném stole dle obr. 26 a upevněna přes přírubu trnem.



Obr. 26 Sestava pastorku s podložkami na rotačním stole.

### 5.3 Návrh technologického postupu

Jak již bylo v předchozích částech práce zmíněno, samotná inovace se týká pouze procesu obrábění ozubení. Polotovar tedy dle stávajícího postupu přichází s hrubě obrobem vnějším a vnitřním průměrem, přičemž čela jsou obrobena hotově. Základní myšlenka vychází z koncepce původního technologického postupu – tj. hrubování zubů s přídavkem na dokončování a následné zušlechťení. Po tomto kroku bude obrobek znovu ustaven, zaměřen sondou a bude provedeno

dokončovací frézování ozubení a následné chemicko-tepelné zpracování pastorku. Závěrečné odhrocení bude provedeno v analogii se stávajícím postupem ručně, a to zejména kvůli špatné dostupnosti evolvent ve vybrání mezi oběma polovinami ozubení.

Nově zpracovaný návrh také přímo počítá s otočným stolem obráběcího centra Reiden. Dráha nástrojů tak bude generována pouze pro jednu zubovou mezeru (hrubovací i dokončovací frézování) a mezi jednotlivé části programu bude zahrnuto pootočení stolu o úhel přímo úměrný počtu zubů pastorku. Dojde tím ke zkrácení a značnému zjednodušení zdrojového kódu.

#### 5.4 Volba nástrojového vybavení

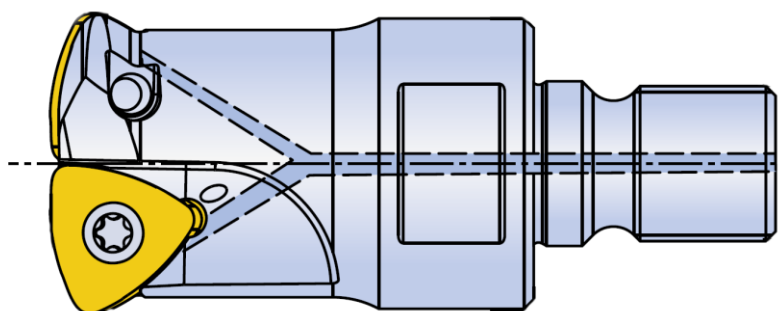
Nástrojové vybavení využitě k obrábění vychází ze současného stavu zásob společnosti Šmeral. Nářaďová základna je dostatečně široká, a proto není uvažováno o nákupu dalšího vybavení. Výjimku tvoří pouze spotřební materiál – zejména vyměnitelné břitové destičky (VBD).

##### 5.4.1 Hrubovací nástroje

Hrubování jedné zubové mezery probíhá ve třech fázích, resp. ve třech stupních pomocí tří hrubovacích nástrojů ( $\varnothing 32$  mm,  $\varnothing 20$  mm a  $\varnothing 16$  mm). Důvodem je zúžení v oblasti paty zubu, které s přídavkem 6 mm na míru přes zuby (3 mm na stěnu) dovoluje použít pouze relativně malý nástroj o průměru 16 mm.

Pro hrubování jsou využity modulové vysokoposuvové („HighFeed“) šroubovací frézy na karbidovém trnu. Následující parametry jsou z katalogů zvoleny s ohledem na obráběný materiál.

- **TEBL 232-M16-13** (TaeguTec) [37]



Obr. 27 Modulová fréza TaeguTec [37].

- |                    |                                  |
|--------------------|----------------------------------|
| - průměr           | 32 mm,                           |
| - počet břitů      | 2,                               |
| - axiální hl. řezu | 0,3 až 1,6 mm,                   |
| - řezná rychlost   | 120 až 250 m.min <sup>-1</sup> , |
| - posuv            | 0,4 až 4,0 mm.z <sup>-1</sup> ,  |
| - typ VBD          | BLMP 1306R-M.                    |

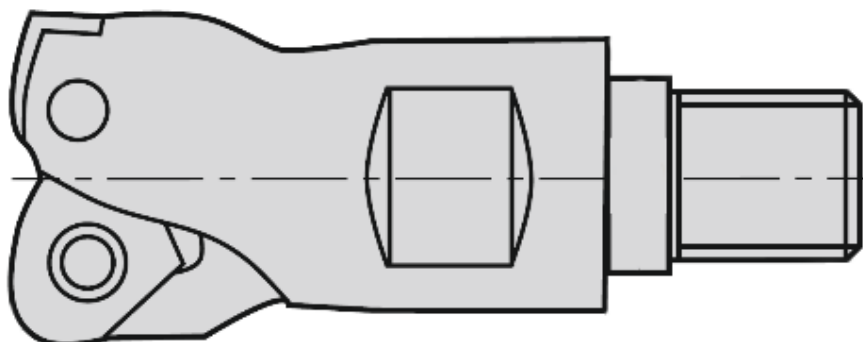
- **ECP X07.20TE030-I** (Fette) [38]



Obr. 28 Modulová fréza Fette - Ø20mm [38].

- průměr 20 mm,
- počet břitů 3,
- axiální hl. řezu max. 1 mm,
- řezná rychlost 180 až 220 m.min<sup>-1</sup>,
- posuv 1,4 mm.z<sup>-1</sup>,
- typ VBD XPHW 070308 SR.

- **ECP X07.16TR028-I** (Fette) [38]



Obr. 29 Modulová fréza Fette – Ø16 mm [38].

- průměr 16 mm,
- počet břitů 2,
- axiální hl. řezu max. 1 mm,
- řezná rychlost 180 až 220 m.min<sup>-1</sup>,
- posuv 1,4 mm.z<sup>-1</sup>,
- typ VBD XPHW 070308 SR.

### 5.4.2 Dokončovací nástroj

Materiál pastorku je po tepelném zpracování zušlechtěn na pevnost 834 až 932 MPa při tvrdosti 253 až 285 HB. Pro dokončovací frézování je použita kulová fréza o průměru 20 mm, která díky své geometrii umožňuje dokončit celou zubovou mezeru při použití jen jediného nástroje.

- **BNM-200-S** (Dijet) [39]



Obr. 30 Kulová fréza DIJET [39].

- |                    |                                  |
|--------------------|----------------------------------|
| - průměr           | 20 mm,                           |
| - počet břitů      | 2,                               |
| - axiální hl. řezu | max. 1,33 mm,                    |
| - řezná rychlost   | 250 až 350 m.min <sup>-1</sup> , |
| - posuv            | max. 0,5 mm,                     |
| - typ VBD          | JC8003.                          |

### 5.5 Postup obrábění

Pro návrh a následnou simulaci frézování zubové mezery byly využity hrubovací a dokončovací strategie programu NX 10.0.0.24 (viz níže). Pro vizualizaci a případnou kontrolu kolizních stavů byly vytvořeny zjednodušené modely řezných a upínacích částí obráběcích nástrojů.

Řezná data nástrojů vycházejí z rozmezí podmínek doporučených jejich výrobcem. Hodnoty otáček včetně a posuvové rychlosti byly automaticky dopočteny řídicím systémem na základě vlastností nástroje a řezných parametrů.

#### 5.5.1 Hrubování

Hrubovací operace korespondují s jednotlivými nástroji kap. 5.4.1. Během procesu hrubování jsou každým nástrojem obrobena všechny zubové mezery. Poté dojde k jeho výměně za nástroj s menším průměrem postupně až do konečného obrobení polotovaru. Pro chlazení je využito proudu stlačeného vzduchu. [40]

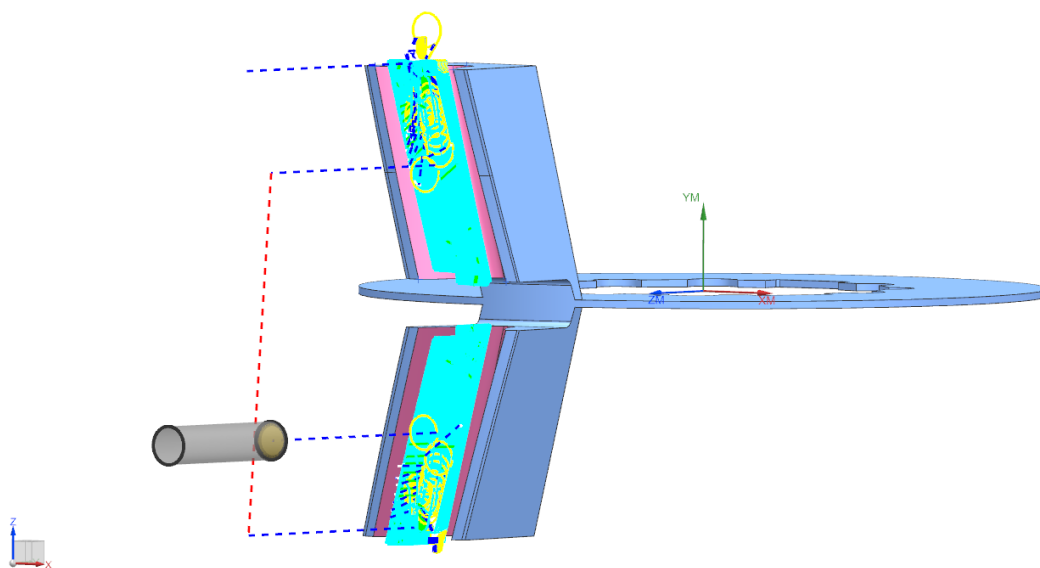
- **TEBL 232-M16-13**

Modulová fréza je řízená strategií „MILL\_ROUGH“, jako vzor řezu je využito „sledování obvodu“ frézované plochy. Ke stávající geometrii jsou vloženy přídávky 3 mm na stěnu. Nájezd do materiálu je realizován po šroubovici, úhel zanoření je 1°. Nastavené parametry obrábění:

- |                    |              |
|--------------------|--------------|
| - axiální hl. řezu | 1,3 mm,      |
| - boční krok       | 75 % Ø nás., |

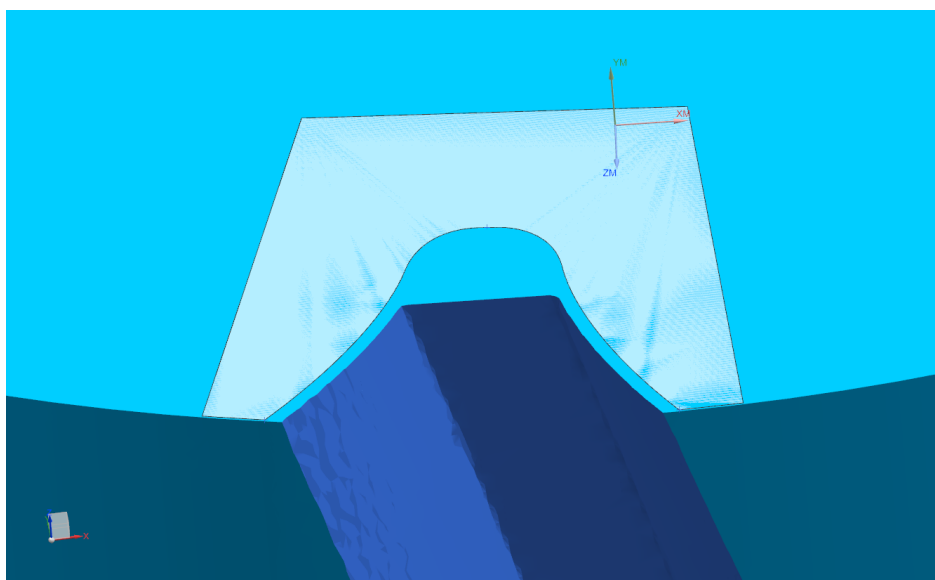
- směr frézování                   sousedný,
- řezná obvodová rychlost   180 m.min<sup>-1</sup>,
- posuv                               1,33 mm.z<sup>-1</sup>,
- otáčky vřetene                1800 min<sup>-1</sup>,
- posuvová rychlost           4800 mm.min<sup>-1</sup>.

Vygenerovaná dráha včetně nástroje je znázorněna na obr. 31.



Obr. 31 Dráha hrubování – nás. TEBL 232-M16-13.

Po obrobení obou polovin šípů tímto nástrojem zůstává v zubové mezeře zbytkový materiál (viz obr. 32). Tento je následně odebrán frézou Ø20 mm. Na obrázku je dobře patrný přídavek na obou stranách zubové mezery.



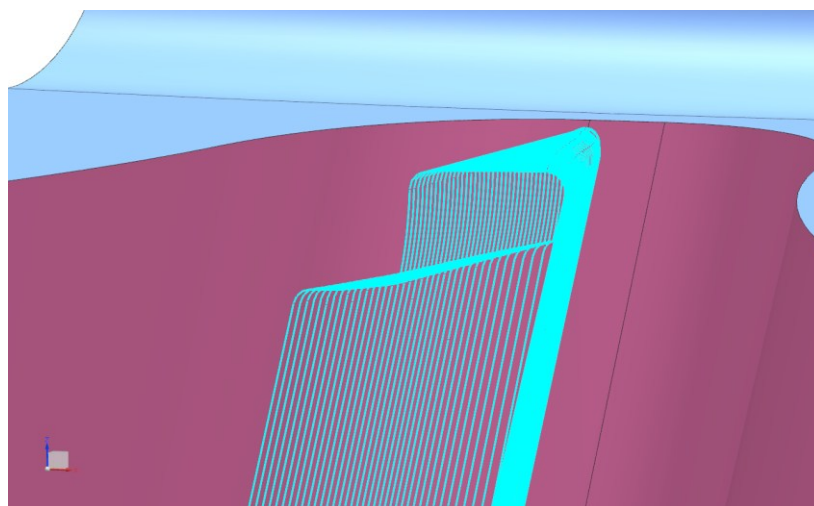
Obr. 32 Zbytkový mat. po průchodu prvního hrub. nástroje.

- **ECP X07.20TE030-I**

Modulová fréza je řízená strategií „MILL\_ROUGH“, jako vzor řezu je využito „sledování obvodu“ frézované plochy. Ke stávající geometrii jsou vloženy přídávky 3 mm na stěnu. Nájezd do materiálu je realizován po šroubovici, úhel zanoření je 1°. Nastavené parametry obrábění:

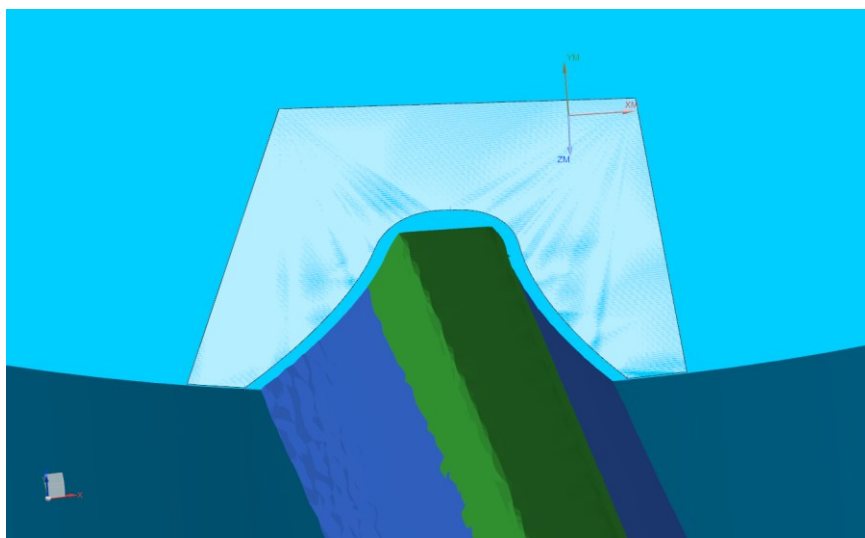
- axiální hl. řezu 0,8 mm,
- boční krok 75 % Ø nás.,
- směr frézování sousledný,
- řezná obvodová rychlost 180 m.min<sup>-1</sup>,
- posuv 0,7 mm.z<sup>-1</sup>,
- otáčky vřetene 2865 min<sup>-1</sup>,
- posuvová rychlost 4000 mm.min<sup>-1</sup>.

Dráha vygenerovaná systémem pro druhý průchod zubovou mezerou je v detailu zobrazena na obr. 33.



Obr. 33 Dráha hrubování – nás. ECP X07.20TE030-I.

Materiál, resp. obrobená stěna, která byla při průchodu druhou frézou odebrána, je na obr. 34 označena zelenou barvou. Zbývající část paty zubu bude následně odfrézována třetím hrubovacím nástrojem – modulovou frézou ECP X07.16TR028-I.



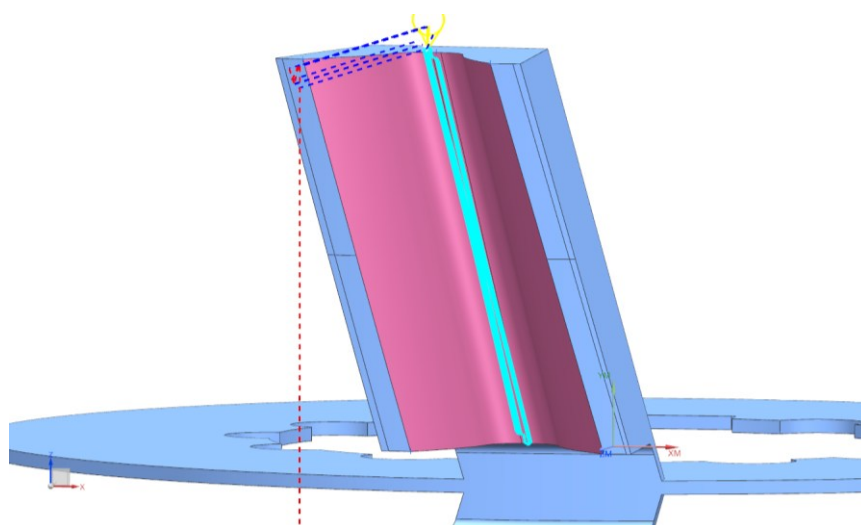
Obr. 34 Zbytkový mat. po průchodu druhého hrub. nástroje.

- **ECP X07.16TR028-I**

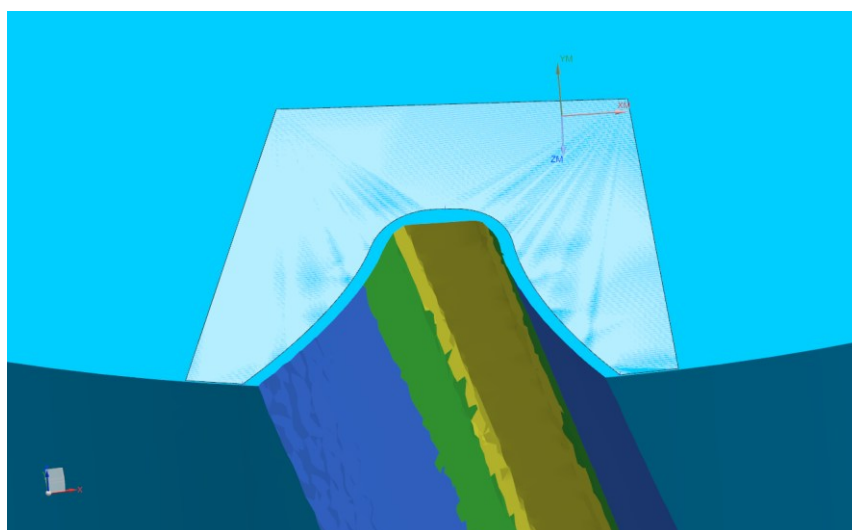
Modulová fréza je řízená strategií „MILL\_ROUGH“, jako vzor řezu je využito „sledování obvodu“ frézované plochy. Ke stávající geometrii jsou vloženy přídavky 3 mm na stěnu. Nájezd do materiálu je realizován po šroubovici, úhel zanoření jsou 2 °. Nastavené parametry obrábění:

- axiální hl. řezu 0,8 mm,
- boční krok 75 % Ø nás.,
- směr frézování sousledný,
- řezná obvodová rychlost 180 m.min<sup>-1</sup>,
- posuv 0,7 mm.z<sup>-1</sup>,
- otáčky vřetene 3185 min<sup>-1</sup>,
- posuvová rychlost 4459 mm.min<sup>-1</sup>.

Dráha pro horní polovinu pastorku poslední hrubovací operace je znázorněna na obr. 35. Poslední průchod frézy je na obr. 36 vyznačen žlutou barvou. Jsou zde též dobře patrné všechny tři úseky hrubování a přídavek na bok zubu. V této fázi bude pastorek kontrolován (míra přes 3 zuby) a následně odeslán na tepelné zpracování.



Obr. 35 Dráha hrubování – nás. X07.16TR028-I.



Obr. 36 Kompletně vyhrubovaná zubová mezera.

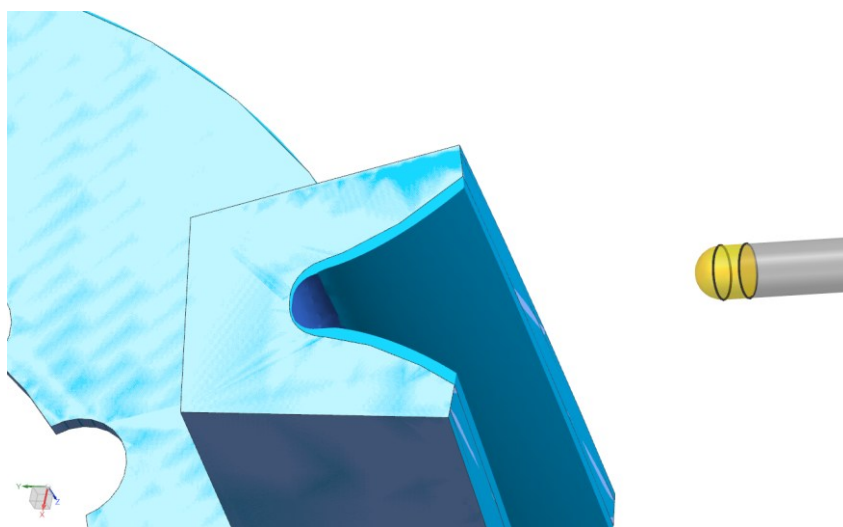
### 5.5.2 Dokončování

Dokončování je realizováno kulovou frézou  $\varnothing 20$  mm (viz kap. 5.4.2). Během dokončovacího procesu je (na rozdíl od hrubování) každá zubová mezera dokončena hotově a až poté dochází k rotaci stolu a frézování další zub. mezery. Pro chlazení je využito proudu stlačeného vzduchu. [40]

Myšlenka dokončovacího obrábění je taková, že v první fázi (zbytkové hrubování) bude kulovou frézou odlehčena oblast paty zubu (modrá barva, viz obr. 37) s přídávkem 0,7 mm na plochu. Strategie obrábění je zvolena jako „MILL\_SEMI\_FINISH“, vzor řezu ve stylu „sledovat obvod“. Nastavené parametry obrábění:

- axiální hl. řezu konst., max. 0,6 mm,
- tloušťka odebírané vrstvy 2,3 mm

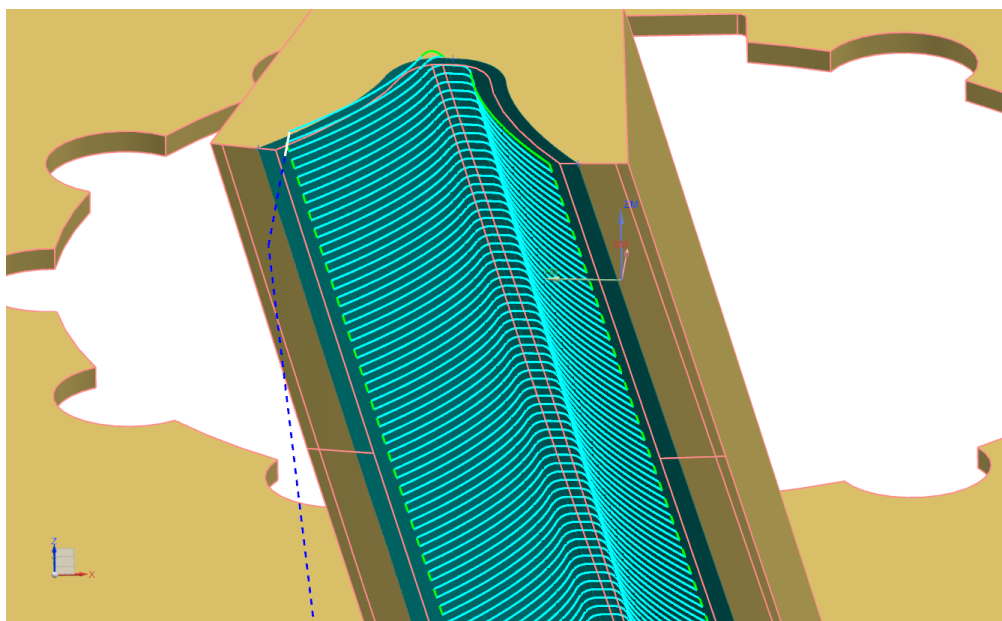
- boční krok konst., max. 3 mm,
- směr frézování nesousledný,
- řezná obvodová rychlost  $180 \text{ m.min}^{-1}$ ,
- posuv  $0,35 \text{ mm.z}^{-1}$ ,
- otáčky vřetene  $2865 \text{ min}^{-1}$ ,
- posuvová rychlost  $2005 \text{ mm.min}^{-1}$ .



Obr. 37 Odlehčení paty.

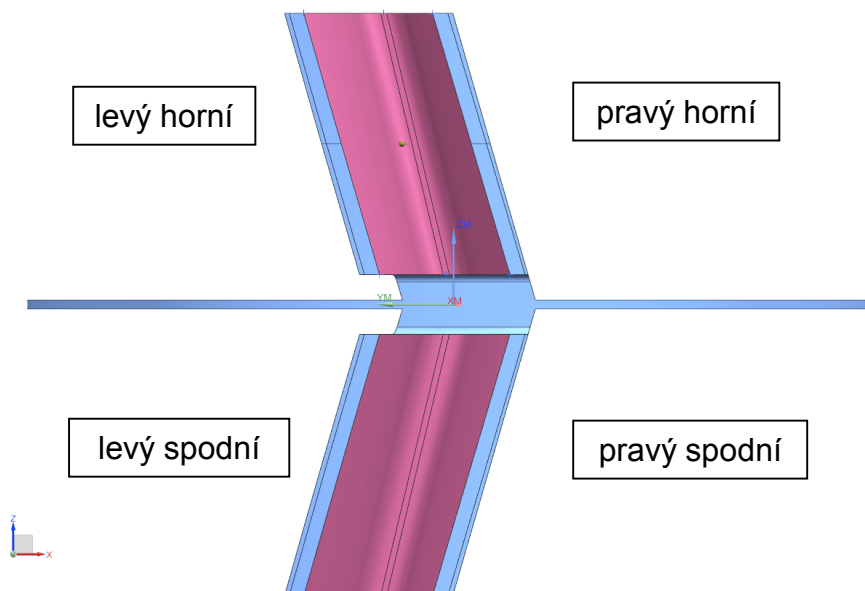
Tento úběr materiálu následně umožní ve dvou krocích zbytkově hrubovat zubovou mezeru metodou „cik-cak“, přičemž v kritické oblasti paty zubu je díky odlehčení zmenšena radiální hloubka řezu. Celkový přídavek 3 mm je odebrán na dva průchody nástroje. Tyto dva řezy se liší pouze v nastavených parametrech, obě dráhy nástrojů jsou téměř shodné (obr. 38). Výsledkem tohoto kroku je zbytkově vyhrubovaná zubová mezerá s konstantním přídávkem  $0,35 \text{ mm}$  v celé oblasti zubu. Nastavené parametry obrábění (první / druhý průchod) [41]:

- axiální hl. řezu konst., max.  $0,6 \text{ mm}$ ,
- tloušťka odebírané vrstvy  $2 / 0,65 \text{ mm}$
- boční krok konst., max.  $1,55 / 2,5 \text{ mm}$ ,
- směr frézování sousledný,
- řezná obvodová rychlost  $180 / 250 \text{ m.min}^{-1}$ ,
- posuv  $0,35 \text{ mm.z}^{-1}$ ,
- otáčky vřetene  $2865 / 3979 \text{ min}^{-1}$ ,
- posuvová rychlost  $2005 / 2785 \text{ mm.min}^{-1}$ .



Obr. 38 Zbytkové hrubování „cik-cak“.

Vedlejším efektem úvodního vyfrézování paty je rozdělení zub. mezery na 4 pomyslné segmenty viz obr.39. Tyto budou využity pro simulaci dokončování zubů.

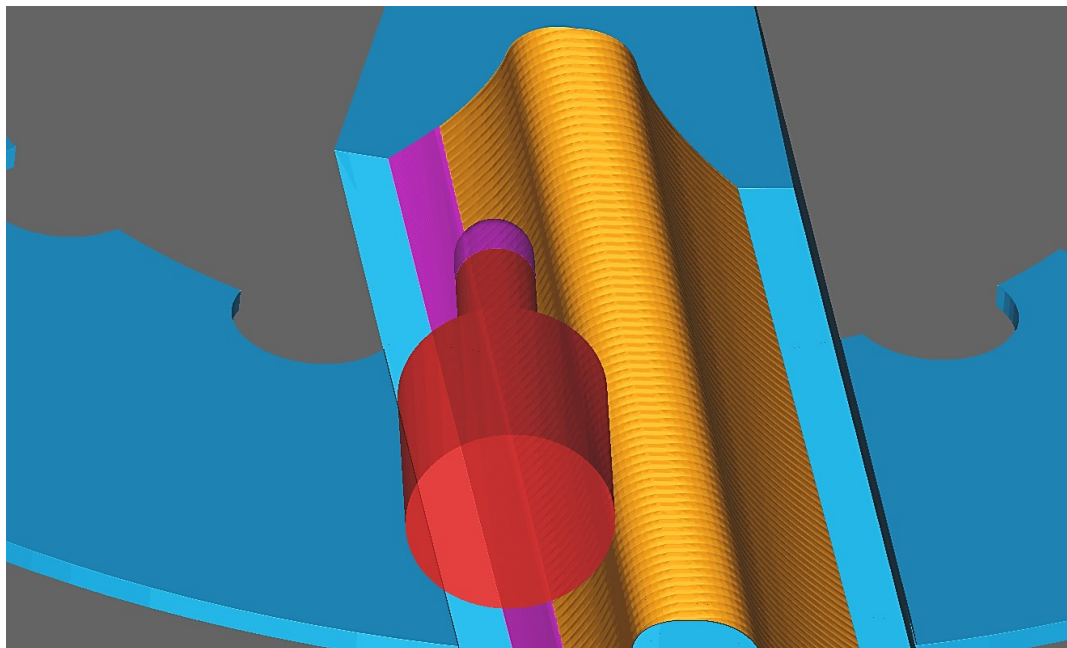


Obr. 39 Segmentace zub. mezery.

K závěrečnému obrábění jednotlivých segmentů zubové mezery je využita speciální dokončovací strategie „STREAMLINE“. Tato byla poprvé využita ve verzi softwaru NX 5 a je určena převážně pro dokončovací operace využívající vysokorychlostní obrábění. Základem pro generování dráhy nástroje je vymezení podélných a příčných hranic obráběné plochy. Systém následně pomocí tzv.

synchronizované distribuce bodů interpoluje dráhy nástroje tak, aby bylo dosaženo co nejlepší kvality povrchu. [42]

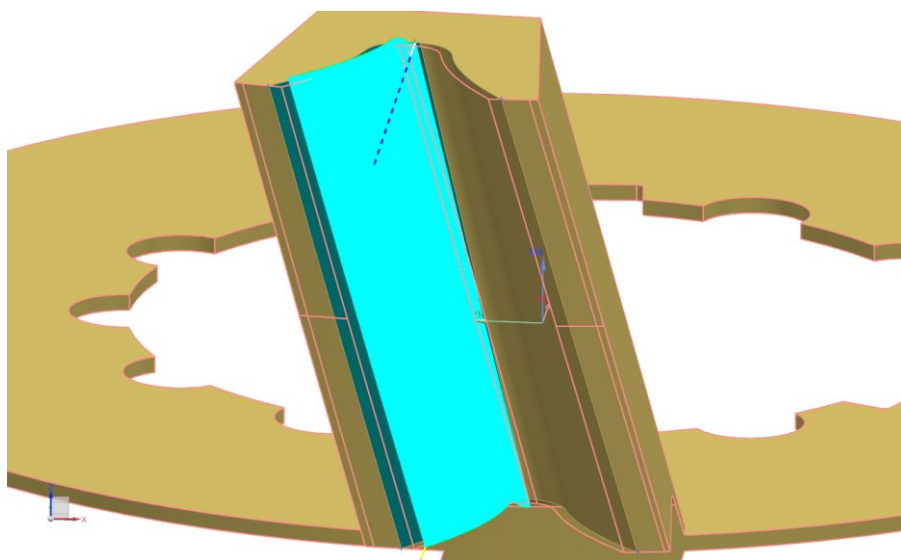
V praxi to znamená, že povrch zubu je frézou dokončován „shora dolů“. Tento rozdíl je dobře patrný na obr. 40, kde je fialovou barvou zobrazeno dokončovací obrábění, zatímco barva oranžová ukazuje horizontální stopy po zbytkovém hrubování.



Obr. 40 Simulace dokončovacího obrábění.

Řezné pohyby nástroje jsou pro dokončovací frézování opět obdobné a znázorňuje je obr. 41. Kvůli nízké hodnotě bočního kroku (viz níže) však jednotlivé dráhy na první pohled splývají. Obrábění je následně provedeno 4× ve všech segmentech za totožných podmínek:

- axiální hl. řezu konst., max. 0,4 mm,
- tloušťka odebírané vrstvy 0,35 mm
- boční krok 0,5 mm,
- směr frézování kombinovaný,
- řezná obvodová rychlost 300 m.min<sup>-1</sup>,
- posuv 0,5 mm.z<sup>-1</sup>,
- otáčky vřetene 4775 min<sup>-1</sup>,
- posuvová rychlost 4775 mm.min<sup>-1</sup>.



Obr. 41 Simulace dráhy nástroje pro levý horní segment.

## 6 TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ

Závěrečná část práce si klade za cíl porovnání stávající varianty výroby ozubení s návrhem nového způsobu obrábění. U jednotlivých variant je určen strojní čas a vypočtena finanční náročnost. Samotné porovnávání je pak provedeno zejména z ekonomického a technického aspektu.

### 6.1 Stávající varianta obrábění

První část závěrečné kapitoly je věnována stávajícímu způsobu výroby ozubení na konvenční frézce a obrážečce.

#### 6.1.1 Jednotkový čas

Stanovení jednotkových časů pro frézování a obrázení ozubení není předmětem této práce. Veškeré hodnoty již byly v minulosti zpracovány do technologického postupu (resp. operačních návodů) pracovníky Šmeralových závodů. K výpočtu strojních časů pro frézování čepovou modulovou frézou byly použity vzorce uvedené v kap. 3.2.1. Strojní čas potřebný pro obrázení ozubení byl stanoven pomocí postupu specifikovaného v kap. 3.3.2 a verifikován empiricky.

Celkový strojní čas pro obrábění ozubení je shrnut v tabulce 1.

Tab. 1 Strojní časy pro konvenční obrábění ozubení.

STROJ	NÁSTROJ	OPERACE	POPIS	PŘÍPRAVNÝ ČAS [min]	JEDNOTKOVÝ ČAS [min]
SCHIESS RF30E	stopková fréza m32	040	hrubovat ozubení s příd. 6 mm na míru přes zuby	260	1800
	stopková fréza patní				
	stopková fréza m30				
MAAG SH- 350/500	hrubovací nůž	130	hotově dokončit obě poloviny šípu	230	4278
	dokončovací nůž				
<b>Σ</b>				<b>490</b>	<b>6078</b>

Z výše uvedené tab. vyplývá, že jednotkový čas pro výrobu ozubení pomocí stávající metody je stanoven dle (15):

$$T_{A1KONV} = T_{A1} + T_B \quad (15)$$

kde:  $T_{A1KONV}$  [min] - jedn. čas pro výrobu ozubení konv. metodou,  
 $T_{A1}$  [min] - jedn. čas pro výrobu ozubení,  
 $T_B$  [min] - přípravný čas.

vzorový výpočet pro stanovení celkového jednotkového času:

$$T_{A1KONV} = 6078 + 490 = \mathbf{6568 \text{ min}}$$

### 6.1.2 Ekonomické zhodnocení

Ekonomické hodnocení vychází z hodinových sazeb a časů potřebných pro obrábění na jednotlivých strojích. Jedná se o reálné hodnoty spol. Šmeral a.s. Náklady na stroj, nástroje a pracovníka jsou součástí normohodinové sazby stroje. Veškeré ceny jsou udávány bez DPH.

Konvenční stroje Schiess i Maag pracují se shodnou hodinovou sazbou 800 Kč. Výsledná cena za obrábění jedné součásti byla vypočtena dle navržených vztahů pro dílčí a celkovou cenu:

$$C_{di} = \frac{S_{hi}}{60} \cdot T_{ASi} \quad (16)$$

kde:  $C_{di}$  [Kč] - dílčí cena,  
 $S_{hi}$  [Kč] - hodinová sazba stroje,  
 $T_{ASi}$  [min] - jednotkový čas.

vzorový výpočet pro stanovení ceny práce na frézce:

$$c_d = \frac{250}{60} \cdot (260 + 1800) = 27466,67 \cong \mathbf{27\ 467 \text{ Kč}}$$

Celkové náklady na obrábění jsou potom vypočteny dle vztahu 17 a následně shrnuty v tabulce 2:

$$C_c = C_{d1} + C_{d2} \quad (17)$$

kde:  $C_c$  [Kč] - celková cena  
 $C_{d1}$  [Kč] - dílčí cena první stroj  
 $C_{d2}$  [Kč] - dílčí cena druhý stroj

vzorový výpočet pro stanovení ceny práce na frézce a obrážče:

$$C_c = 27467 + 60107 = \mathbf{87\ 574 \text{ Kč}}$$

Tab. 2 Celkové náklady na obrábění stávajícím způsobem.

NÁZEV STROJE	HODINOVÁ SAZBA [Kč.h <sup>-1</sup> ]	JEDNOTKOVÝ ČAS [min]	VÝLEDNÁ CENA [Kč]
SCHIESS RF30E	800	2060	27 467
MAAG SH-350/500		4508	60 107
<b>Σ</b>			<b>87 574</b>

## 6.2 Nově navržená varianta obrábění

Varianta, která využívá k obrábění ozubení frézovací centrum, je stejně jako stávající výroba posuzována z hlediska času a ekonomiky provozu.

### 6.2.1 Jednotkový čas

Celkový čas potřebný k obrábění na CNC frézovacím centru není stanoven výpočtem, nýbrž odvozen řídicím systémem NX přímo dle konkrétních drah nástrojů. K jednotlivým operacím jsou dle obráběcích parametrů, vlastností nástrojů a základní nastavené kinematiky stroje dopočteny strojní časy.

Virtuální verifikace obráběcího procesu má řadu výhod. Nejenže nedochází ke spotřebě materiálu a opotřebením nástrojů, ale zejména není nutné uvolňovat z výroby samotný stroj.

Základním předpokladem pro relevantnost dat generovaných systémem je fakt, že ve všech parametrech návrhu obráběcího procesu (zejména otáčky vřetene, rychloposuvy, atd.) generuje software NX hodnoty nižší, než jaké umožňuje použití centrum BFR23. Neexistuje proto důvod, proč by měl být simulovaný obráběcí proces významně odlišný od reálného chodu stroje. [43]

Díky technologickému postupu (viz kap. 5.3) a metodice generování drah nástrojů jsou hodnoty strojních časů v tabulce 3 vztaženy pouze k jedné zubové mezeře. Navíc, tyto pohyby nezahrnují čas pro rotaci stolu a jeho nájezd do dané pozice. Pro stanovení doby obrábění celého pastorku byl tedy navržen vztah (18), který zahrnuje rezervu 10 % z celého strojního času na výše zmíněné nájezdy do pozic apod.:

$$T_{A1CNC} = 1,1 \cdot z \cdot T_{A1CNC'} + T_B \quad (18)$$

kde:  $T_{A1CNC}$  [min] - jedn. čas pro výrobu ozubení na CNC centru,  
 $z$  [-] - počet zubů,  
 $T_{A1CNC'}$  [min] - jedn. čas pro výrobu jedné zub. mezery,  
 $T_B$  [min] - přípravný čas.

vzorový výpočet pro stanovení celkového jednotkového času:

$$T_{A1CNC} = 1,1 \cdot 21 \cdot 86,73 + 210 = 2213,46 \text{ min} \cong \mathbf{2214 \text{ min}}$$

Tab. 3 Strojní časy pro CNC obrábění ozubení.

STROJ	NÁSTROJ	OP.	POPIS	PŘÍPR. ČAS [min]	JEDN. ČAS [min]
BFR 23 REIDEN	TEBL 232-M16-13	010	hrubovat dle programu, část 1	90	24,10
	ECP X07.20TE030-I		hrubovat dle programu, část 2		9,28
	ECP X07.16TR028-I		hrubovat dle programu, část 3		1,45
	BNM-200-S	020	odlehčit patu, dle programu	120	3,40
			zbytkově hrubovat dle programu (příd. 1 mm)		17,10
			zbytkově hrubovat dle programu (příd. 0,35 mm)		7,80
			frézovat levý horní segment dle programu, hotově		5,90
			frézovat pravý horní segment dle programu, hotově		5,90
			frézovat levý spodní segment dle programu, hotově		5,90
			frézovat pravý spodní segment dle programu, hotově		5,90
	<b>Σ</b>			<b>210</b>	<b>86,73</b>

### 6.2.2 Ekonomické zhodnocení

Ekonomické hodnocení vychází z hodinové sazby a času potřebného pro obrábění na frézovacím centru. Jedná se o reálnou hodnotu spol. Šmeral a.s. Náklady na stroj, nástroje a pracovníka jsou součástí normohodinové sazby stroje. Veškeré ceny jsou udávány bez DPH.

Oproti konvenčním strojům je hodina práce na moderním CNC centru asi o 75 % dražší – 1400 Kč. Výsledná cena za obrábění na stroji BFR23 Reiden je stanovena dle vztahu (16) na 51660 Kč.

Tab. 4 Celkové náklady na obrábění při použití CNC centra.

NÁZEV STROJE	HODINOVÁ SAZBA [Kč.h <sup>-1</sup> ]	JEDNOTKOVÝ ČAS [min]	VÝSLEDNÁ CENA [Kč]
BFR 23 REIDEN	1400	2214	51660
		<b>Σ</b>	<b>51660</b>

### 6.3 Porovnání obou variant

Porovnání mezi stávající konvenční výrobou a inovativním návrhem využívajícím 5-osé CNC frézovací centrum je provedeno na základě technických (strojní a přípravné časy, jakost povrchu) a ekonomických ukazatelů.

#### 6.3.1 Technický aspekt

Kvůli nízké sériovosti a celkovému charakteru výroby není možné provést měření rozměrů, odchylek apod. Jedním z dalších hledisek, které popisuje kvalitu obrábění je např. drsnost povrchu.

Stávající metoda výroby ozubení obrážením dosahuje dle etalonů jakosti povrchu evolvent zhruba  $R_a = 2 \mu\text{m}$ . Pro stanovení teoretické drsnosti povrchu po obrábění kulovou frézou na CNC centru je využit vzorec (19). K výpočtu parametru  $R_{z_t}$  jsou vzaty dokončovací obráběcí podmínky (viz kap. 5.5.2) [44]:

$$R_{z_t} = r_\varepsilon \cdot \left( 1 - \sqrt{1 - \frac{a_e^2}{4 \cdot r_\varepsilon^2}} \right) \quad (19)$$

kde:  $R_{z_t}$  [ $\mu\text{m}$ ] - teoretická výška nerovnosti profilu,

$r_\varepsilon$  [mm] - poloměr špičky nástroje,

$a_e$  [mm] - radiální hloubka řezu.

vzorový výpočet pro stanovení teoretické hodnoty  $R_{z_t}$ :

$$R_{z_t} = \left( \frac{20}{2} \right) \cdot 10^{-3} \cdot \left( 1 - \sqrt{1 - \frac{(0,5 \cdot 10^{-3})^2}{4 \cdot \left( \left( \frac{20}{2} \right) \cdot 10^{-3} \right)^2}} \right) = 3,125 \mu\text{m}$$

Výsledná teoretická hodnota  $R_{z_t}$  je asi  $3,1 \mu\text{m}$ . Mezi střední aritmetickou úchytkou profilu  $R_a$  a zmiňovanou výškou nerovnosti profilu  $R_z$  neexistuje žádný univerzální převodní vztah. Zdroje uvádějí pouze přibližné převodní tabulky a propočty, podle nichž odpovídá  $R_{z_t} = 3,1 \mu\text{m}$  zhruba hodnotě  $R_{a_t} = 0,8 \mu\text{m}$ . Po stránce jakosti povrchu tak lze prohlásit nově navrženou technologii za kvalitnější. [45], [46], [47]

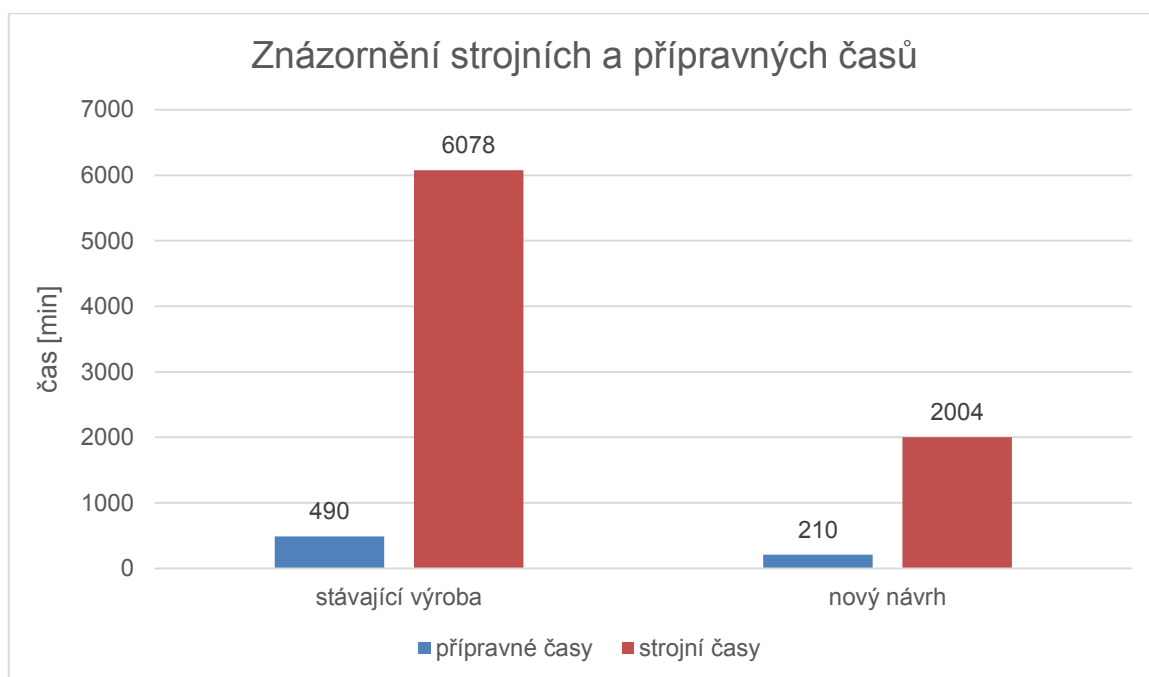
Z pohledu technického je pak též výhodou sloučení dvou pracovišť v jedno a nahrazení starších a méně přesných strojů moderním obráběcím centrem. Toto

zařízení má jednodušší údržbu a nezanedbatelný je též bezpečnostní faktor – celý proces obrábění probíhá v uzavřeném prostoru stroje.

Aspektem technicko-ekonomickým je pak absence procesních kapalin v nově navrženém postupu. Chlazení stlačeným vzduchem má totiž pozitivní dopad nejen na zdraví obsluhy a ekologii provozu, ale z velké části i na finanční náročnost procesu obrábění.

### 6.3.2 Ekonomický aspekt

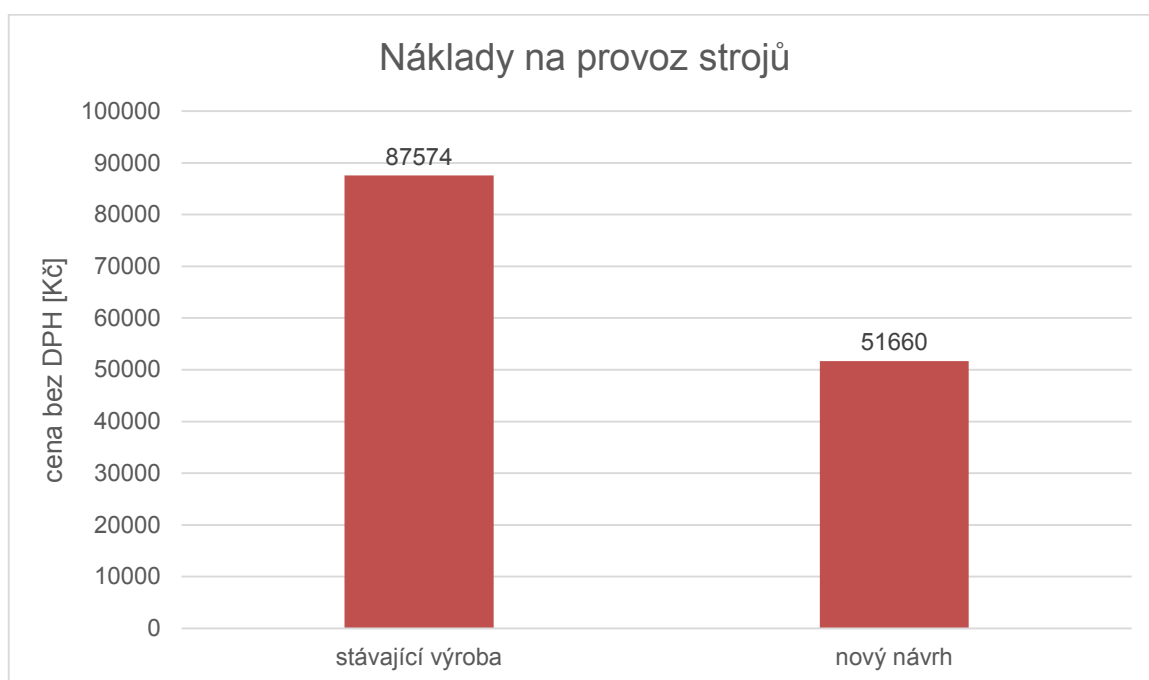
Z výpočtů je možné jednoznačně určit časovou náročnost obou metod a to jak ve fázi příprav, tak samotného obrábění. Graf na obr. 42 znázorňuje jednotkové časy pro stávající a nově navrženou výrobu ozubení. Dle propočtů v předchozích kapitolách přináší nová metoda časovou úsporu téměř  $\frac{2}{3}$  (66,3 %) oproti současné výrobě. Tato může být využita ke zvýšení objemu zakázek a tím k potenciálnímu růstu obrátu firmy.



Obr. 42 Znázornění strojních a přípravných časů.

Po ekonomické stránce není zvýšená produktivita stroje a náradí tak markantní. Příčinou je téměř dvojnásobná hodinová sazba CNC obráběcího centra BFR23 Reiden oproti konvenčním strojům Schiess a MAAG. Přesto však nově navržená technologie umožňuje oproti stávající ušetřit asi 41 % nákladů (viz obr. 43).

CNC způsob obrábění ozubení umožňuje oproti stávajícímu stavu uspořit nejen čas a finanční prostředky, ale také lidské zdroje. Soustředěním výroby na jedno moderní pracoviště dochází k uvolnění strojů a jejich obsluh, čímž je potenciálně navýšena výrobní kapacita společnosti.



Obr. 43 Znárodnění nákladů na provoz strojů.

#### 6.4 Doporučení do budoucna

Navržený obráběcí proces využívající CNC řízení v sobě skrývá prostor jistý pro optimalizaci. Byl vytvořen v souladu s požadavky na co možná největší bezpečnost obráběcího procesu. Případná úprava drah, nájezdů, přejezdů a bezpečných hladin by však mohla vést ke zkrácení strojního času. Otázkou zůstává případné zvýšené riziko kolize.

Na trhu existují také další komplexní systémy pro obrábění ozubení. Tyto však vyžadují vstupní investici a její dlouhodobé využití zůstává otázkou priorit spol. Šmeral a.s. Např. výrobce nástrojů Sandvik Coromant nabízí technologii InvoMilling™. Jedná se o soubor speciálního software a frézy (typ. řada CoroMill®) určený pro frézování vnějších ozubených kol a profilů. Systém využívá všech pěti os pro výrobu malých sérií ozubení pomocí univerzálních nástrojů. [48]

#### 6.5 Návrh variantního řešení

Návrh variantního technologického postupu byl zpracován za účelem potenciálního zvýšení přesnosti ozubení. Toho může být dosaženo např. nižším počtem upínání a ustavování obrobku.

Aby mohl být pastorek hotově obroben pouze na jedno upnutí, vyžaduje stávající technol. postup změnu zařazení zušlechťovacího procesu. Nově zpracovaný návrh pracuje s myšlenkou, že ozubení bude frézováno do plného a zušlechtěného materiálu.<sup>3</sup> V úvodní části technologického postupu tedy dojde ke změnám vedoucím k následující podobě postupu:

- hrubovací soustružení otvoru Ø309H7; průměru Ø715,95h8; hrubování čel a zápichu; upíchnutí nákovku pro zkoušku (SUA125),

<sup>3</sup> Pastorek je zušlechtěn na mez pevnosti 834 až 932 MPa (v praxi cca 850 MPa). Po konzultaci s odborníky fy. Šmeral je plné frézování do takto zušlechtěného materiálu možné.

- vrtání a řezání závitů 2×M42×3 a 2×M12×25 (VR84A),
- zušlechťování,
- hotové soustruž. Ø309H7; prům. Ø715,95h8 a čel (SUA125),
- hrubování ozubení dle programů, dokončování ozubení dle programů (BFR23),
- hotové obrázení drážek 72P9,
- odjehlení drážek a hran ozubení,
- prořezání závitů 2×M42×3; u ozubení odjehlení evolvent na vnitřních a vnějších čelech.

## ZÁVĚR

Cílem studie bylo vytvoření návrhu na zefektivnění procesu obrábění ozubení pastorku pro lis LZK2500 společnosti Šmeral Brno a.s. Při analýze stávajícího způsobu výroby byly zjištěny zejména tyto nedostatky:

- nízká produktivita strojů,
- nespolehlivost, zastaralost a jednoúčelovost ozubárenských zařízení,
- nutnost využívání speciálních nástrojů z rychlořezné oceli,
- zdouhavá příprava strojů a ustavování obrobku.

Výsledkem snahy o jejich eliminaci byl přesun výroby z konvenčních ozubárenských strojů na moderní obráběcí centrum. Společně se stroji došlo ke změně také v oblasti nástrojového vybavení. S podporou CAD/CAM systémů byl vytvořen návrh technologie pro frézování daného ozubení. Nově navržená metodika přináší tyto výsledky:

- úspora nákladů 35914 Kč, tj. 41 % na jednom kusu,
- časová úspora 4354 min., tj. 66,3 % na jednom kusu,
- nárůst kvality a přesnosti ozubení,
- absence použití procesní kapaliny,
- zvýšení bezpečnosti obráběcího procesu,
- sloučení dvou pracovišť v jedno,
- potenciální prostor pro růst obratu firmy (navýšení výrobních kapacit).

V závěru práce bylo zpracováno doporučení do budoucna a nastíněno možné variantní řešení.

Všechny cíle práce byly splněny.

**SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ**

- [1] Ozubené kolečko: Jak ho neznáte.... *STEAMZINE.CZ* [online]. 2012 [cit. 2016-05-10]. Dostupné z: <http://www.steamzine.cz/ozubene-kolecko-jak-ho-neznate/>
- [2] PÍŠKA, Miroslav. *Speciální technologie obrábění*. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2009, 247 s. ISBN 978-80-214-4025-8.
- [3] *Archiv Šmeral Brno a.s.* Brno, 2015.
- [4] Od Storka až po Šmeral. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2001 [cit. 2016-02-14]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/od-storka-az-po-smeral.html>
- [5] ZELENÁ KRÍŽOVÁ, Helena. Ignác Štorek – podnikatel z Vysočiny. *Žďárské vrchy* [online]. 2010 [cit. 2016-02-14]. Dostupné z: <http://www.zdarskevrchy.cz/zajimavosti/osobnosti/5377-ignac-storek-podnikatel-z-vysociny>
- [6] 50. výročí Kaplanovy turbíny. *Encyklopedie města Brna* [online]. 2009 [cit. 2016-02-14]. Dostupné z: [http://encyklopedie.brna.cz/home-mmb/?acc=profil\\_objektu&load=516](http://encyklopedie.brna.cz/home-mmb/?acc=profil_objektu&load=516)
- [7] 25. 8. 1944 I. americký letecký nálet na Brno. *Encyklopedie města Brna* [online]. 2014 [cit. 2016-02-14]. Dostupné z: [http://encyklopedie.brna.cz/home-mmb/?acc=profil\\_udalosti&load=118](http://encyklopedie.brna.cz/home-mmb/?acc=profil_udalosti&load=118)
- [8] 26.4. 1945 Osvobození Brna Rudou armádou. *Encyklopedie města Brna* [online]. 2013 [cit. 2016-02-14]. Dostupné z: [http://encyklopedie.brna.cz/home-mmb/?acc=profil\\_udalosti&load=3994](http://encyklopedie.brna.cz/home-mmb/?acc=profil_udalosti&load=3994)
- [9] Bohumír Šmeral. *Wikipedie* [online]. 2016 [cit. 2016-02-14]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Bohum%C3%ADr\\_%C5%A0meral](https://cs.wikipedia.org/wiki/Bohum%C3%ADr_%C5%A0meral)
- [10] Šmeral Brno, a.s., IČO 46346139 - data ze statistického úřadu. *Kurzycz* [online]. © 2000 [cit. 2016-02-16]. Dostupné z: <http://rejstrik-firem.kurzycz.cz/46346139/smeral-brno-as/statisticky-urad/>
- [11] Hlavní aktivity dceřiných a spřízněných společností. *B.G.M. Group* [online]. 2016 [cit. 2016-02-16]. Dostupné z: <http://www.bgm.cz/default.htm>
- [12] Představení společnosti Šmeral Brno a.s.. *Šmeral Brno a.s. - výrobce tvářecích strojů* [online]. © 2015 [cit. 2016-02-14]. Dostupné z: <http://www.smeral.cz/predstaveni.html>
- [13] ŠMERAL BRNO, A.S. *Manuál pro LZK 2500P*. Brno, 2015.
- [14] What Is the difference between herringbone and double helical gears?. *Quora* [online]. 2016 [cit. 2016-02-16]. Dostupné z: <https://www.quora.com/What-Is-the-difference-between-herringbone-and-double-helical-gears>
- [15] WANG, Q. Jane (ed.) a Yip-Wah CHUNG (ed.), Q. WANG, Yip-Wah CHUNG. *Encyclopedia of Tribology* [online]. New York: Springer US, © 2013, Herringbone Gears [cit. 2016-02-16]. ISBN 978-0-387-92897-5.
- [16] VÁVRA, Pavel a Jan LEINVEBER. *Strojnické tabulky pro střední odborná učiliště*. Praha: SNTL, 1984. B-745-16.

- [17] ČSN EN 10083-3. *Oceli k zušlechťování - Část 3: Technické dodací podmínky pro legované oceli*. Praha: Český normalizační institut, 2007.
- [18] Nízkolegované oceli třídy 15, složení a tepelné zpracování. *TumliKOVO* [online]. 2011 [cit. 2016-02-18]. Dostupné z: <http://www.tumlikovo.cz/nizkolegovane-konstrukcni-oceli-tridy-15-jejich-slozeni-a-tepelne-zpracovani/>
- [19] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu II*. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2002, 392 s. ISBN 80-720-4248-3.
- [20] VIGNER, Miloslav a Zdeněk PŘIKRYL. *Obrábění*. Vyd. 1. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1984, 800 s. : il.
- [21] ČERNOCH, Svatopluk. *Strojně technická příručka*. 11., zcela přeprac. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1959, 1868 s. Řada strojírenské literatury.
- [22] LEINVEBER, Jan. *Strojnické tabulky: pomocná učebnice pro školy technického zaměření*. 3. dopl. vyd. Úvaly: ALBRA, 2006, xiv, 914 s. ISBN 80-736-1033-7.
- [23] SVOBODA, Pavel. *Základy konstruování*. Vyd. 4. Brno: CERM, 2011, 234 s. ISBN 978-80-7204-750-5.
- [24] TICHONOV, A.P. a M.A. ZASLAVSKIJ *Strojírenská technologie*. Praha: SNTL, 1966. 04-251-66.
- [25] Konstruování strojů: převody. In: *Ústav konstruování, FSI VUT Brno* [online]. 2005 [cit. 2016-02-27]. Dostupné z: [http://old.uk.fme.vutbr.cz/kestazeni/6C2/prednasky/prednaska3\\_6c2.pdf](http://old.uk.fme.vutbr.cz/kestazeni/6C2/prednasky/prednaska3_6c2.pdf)
- [26] HUMÁR, Anton. TECHNOLOGIE I: Výpočtová cvičení. In: *Odbor technologie obrábění, Ústav strojírenské technologie, FSI VUT v Brně* [online]. 2004 [cit. 2016-02-28]. Dostupné z: [http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI\\_vypoctova\\_cv.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI_vypoctova_cv.pdf)
- [27] GARANT. *Garant příručka obrábění*. b.r., 843 s. ISBN 3-00-016882-6.
- [28] MAAG-ZAHNRÄDER. *Manuál SH350/500*. Zürich, 1959.
- [29] PLAZMOVÁ NITRIDACE. *Böhler Uddeholm CZ s.r.o.* [online]. © 2014 [cit. 2016-02-24]. Dostupné z: <http://www.kalirna-vyskov.cz/technologie/plazmova-nitridace>
- [30] Plasma nitriding equipment for best case-hardening. *IONITECH LTD* [online]. © 2012-2016 [cit. 2016-02-24]. Dostupné z: <http://www.ionitech.net/fr/solutions-2-fr/services-fr.html#!>
- [31] KLIMČÁKOVÁ, Kateřina. *Výzkum a vývoj povrchových úprav ložiskových ocelí metodou iontové nitridace* [online]. Brno, 2009 [cit. 17. 3. 2016]. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=17706](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=17706). Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojírenského inženýrství. Vedoucí práce Ing. Pavel Doležal, Ph.D.

- [32] Ozubená kola. *Střední škola strojírenská a elektrotechnická Brno, příspěvková organizace* [online]. © 2012 [cit. 2016-02-28]. Dostupné z: [http://www.sssebrno.cz/files/ovmt/ozubena\\_kola.pdf](http://www.sssebrno.cz/files/ovmt/ozubena_kola.pdf)
- [33] VEJREK, Tomáš. *Analýza moderních technologií výroby čelního ozubení* [online]. Brno, 2008 [cit. 2016-02-28]. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=4938](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=4938). Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství.
- [34] SCHIESS FRORIEP. *Manuál Schiess RF30E*. Minberg, 1980.
- [35] REIDEN TECHNIK AG. *Návod k obsluze a údržbě BFR 2*. Švýcarsko, 2015.
- [36] Výrobní možnosti - nástrojárna. *Šmeral Brno a.s.* [online]. © 2015 [cit. 2016-04-05]. Dostupné z: <http://www.smeral.cz/nastrojarna.html>
- [37] TAEGUTEC. *Novinky a Top produkty 2015*. Korea, 2015, 416 s. Dostupné také z: [http://www.taegutec.cz/download/katalogy/katalog\\_cz\\_top2015\\_komplet\\_150511.pdf](http://www.taegutec.cz/download/katalogy/katalog_cz_top2015_komplet_150511.pdf)
- [38] LMT TOOLS. *Katalog frézovacích nástrojů 2014*. Německo, 2014, 454 s. Dostupné také z: <http://www.lmt-tools.de/katalog-fraesen/index.html>
- [39] *Tooling by DIJET: Indexable tools*. Japonsko, 2015, 353 s. Dostupné také z: <http://www.dijet.co.jp/english/catalog/pdf/hed/p05.pdf>
- [40] Snižování výrobních nákladů bez velkých investic (2). *Technický týdeník* [online]. Praha: © Business Media CZ, 2014 [cit. 2016-04-18]. Dostupné z: [http://www.technikytydenik.cz/rubriky/serialy/snizovani-vyrobnich-nakladu/snizovani-vyrobnich-nakladu-bez-velkych-investic-2\\_24321.html](http://www.technikytydenik.cz/rubriky/serialy/snizovani-vyrobnich-nakladu/snizovani-vyrobnich-nakladu-bez-velkych-investic-2_24321.html)
- [41] DE VOS, Patrick. Příručka pro technology: Dynamické frézování - využití kompenzačního přístupu. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2013, **2013**(7), 82 [cit. 2016-04-18]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/prirucka-pro-technology-dynamicke-frezovani-vyuziti-kompenzacniho-pristupu.html>
- [42] NX (program). In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2016-04-19]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/NX\\_\(program\)](https://cs.wikipedia.org/wiki/NX_(program))
- [43] VESELÝ, Jan, Matěj SULITKA a Jan SMOLÍK. Simulace CNC obrábění. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2011, **2011**(7), 46 [cit. 2016-04-28]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/simulace-cnc-obrabeni.html>
- [44] POTÁCEL, Václav. *Technologické aspekty struktury povrchu při dokončovacím obrábění: Technological standpoints of surface texture at finish machining: zkrácená verze Ph.D. Thesis: obor strojírenská technologie*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie, 2004. ISBN 8021426918.

- [45] Surface Roughness Conversion Chart Tables. *Engineers Edge* [online]. © 2000 [cit. 2016-05-03]. Dostupné z: <http://www.engineersedge.com/manufacturing/surface-roughness-conversion.htm>
- [46] Surface Texture From Ra to Rz. *Modern Machine Shop* [online]. © Gardner Business Media, Inc., 2002 [cit. 2016-05-03]. Dostupné z: <http://www.mmsonline.com/columns/surface-texture-from-ra-to-rz>
- [47] Ostatní tabulky. *DrKQVARTZ* [online]. 2010 [cit. 2016-05-03]. Dostupné z: <http://www.drkqvartz.wz.cz/technologie/ostatni.htm>
- [48] InvoMilling™ 1.0. *Sandvik Coromant* [online]. 2016 [cit. 2016-05-03]. Dostupné z: [http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/calculators\\_and\\_software/invo-milling](http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/calculators_and_software/invo-milling)
- [49] *BFR2 5-axis machining center a system developed for high performance* [online]. Reiden, 2016 [cit. 2016-05-11]. Dostupné z: [http://www.reiden.com/fileadmin/user\\_upload/Files/Bilder/Produkte/Product\\_brochures\\_BFR2\\_en\\_V5\\_01.pdf](http://www.reiden.com/fileadmin/user_upload/Files/Bilder/Produkte/Product_brochures_BFR2_en_V5_01.pdf)

**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

ZKRATKA	JEDNOTKA	POPIS
CAD	[-]	Computer Aided Design
CAM	[-]	Computer Aided Manufacturing
CNC	[-]	Computer Numerical Control
ČSN	[-]	Česká technická norma
DIN	[-]	Deutsche Industrie-Norm
DPH	[%]	daň z přidané hodnoty
HRC	[-]	tvrdost podle Rockwella
HV	[-]	tvrdost podle Vickerse
ISO	[-]	International Organization for Standardization
Mk3	[-]	kužel Morse, vel. 3
UCI	[-]	ultrazvuková metoda měření tvrdosti
VBD	[-]	vyměnitelná břitová destička

SYMBOL	JEDNOTKA	POPIS
B	[mm]	šířka obrobku
D	[mm]	průměr frézy
R <sub>a</sub>	[μm]	střední aritmetická úchylka profilu
R <sub>at</sub>	[μm]	teoretická střední aritmetická úchylka profilu
R <sub>z</sub>	[μm]	výška nerovnosti profilu
R <sub>zt</sub>	[μm]	teoretická výška nerovnosti profilu
T <sub>A1</sub>	[min]	jedn. čas pro výrobu ozubení
T <sub>A1CNC</sub>	[min]	jedn. čas pro výrobu ozubení na CNC centru
T <sub>A1CNC'</sub>	[min]	jedn. čas pro výrobu jedné zubové mezery
T <sub>A1KONV</sub>	[min]	jedn. čas pro výrobu ozubení konv. metodou
T <sub>B</sub>	[min]	přípravný čas
a	[mm]	hodnota přeběhu nástroje
a <sub>e</sub>	[mm]	radiální hloubka řezu
a <sub>p</sub>	[mm]	šířka záběru hlavního ostří
C <sub>c</sub>	[Kč]	celková cena

$C_d$	[Kč]	dílčí cena
$d$	[mm]	průměr roztečné kružnice
$d_a$	[mm]	průměr hlavové kružnice
$d_f$	[mm]	průměr patní kružnice
$e$	[mm]	vyosení nástroje
$f$	[mm]	posuv na otáčku
$f_z$	[mm.z <sup>-1</sup> ]	posuv na břit
$h$	[mm]	výška zubu
$h_a$	[mm]	výška hlavy zubu
$h_f$	[mm]	výška paty zubu
$l$	[mm]	délka obráběné plochy
$l_n$	[mm]	délka náběhu
$l_p$	[mm]	délka přeběhu
$l_{pol}$	[mm]	délka polotovaru
$m$	[mm]	modul
$m_n$	[mm]	modul normální
$m_t$	[mm]	modul čelní
$n$	[min <sup>-1</sup> ]	počet otáček
$n_t$	[min <sup>-1</sup> ]	počet dvojjzdvihů nástroje na obrobení jedné rozteče
$n_{ZDV}$	[min <sup>-1</sup> ]	počet dvojjzdvihů nástroje
$p_n$	[mm]	normální rozteč
$p_t$	[mm]	čelní rozteč
$r_\epsilon$	[mm]	poloměr špičky nástroje
$s$	[mm]	tloušťka zubu v normálním řezu
$S_h$	[Kč]	hodinová sazba
$t_{AS}$	[min]	jednotkový strojní čas
$t_{RE}$	[min]	čas reverzního chodu
$V_c$	[m.min <sup>-1</sup> ]	řezná rychlost
$V_f$	[mm.min <sup>-1</sup> ]	posuvová rychlost
$Z$	[-]	počet zubů
$Z_n$	[-]	počet zubů náběhu


$\alpha$	[°]	úhel záběru
$\beta$	[°]	úhel sklonu zubu

**SEZNAM PŘÍLOH**

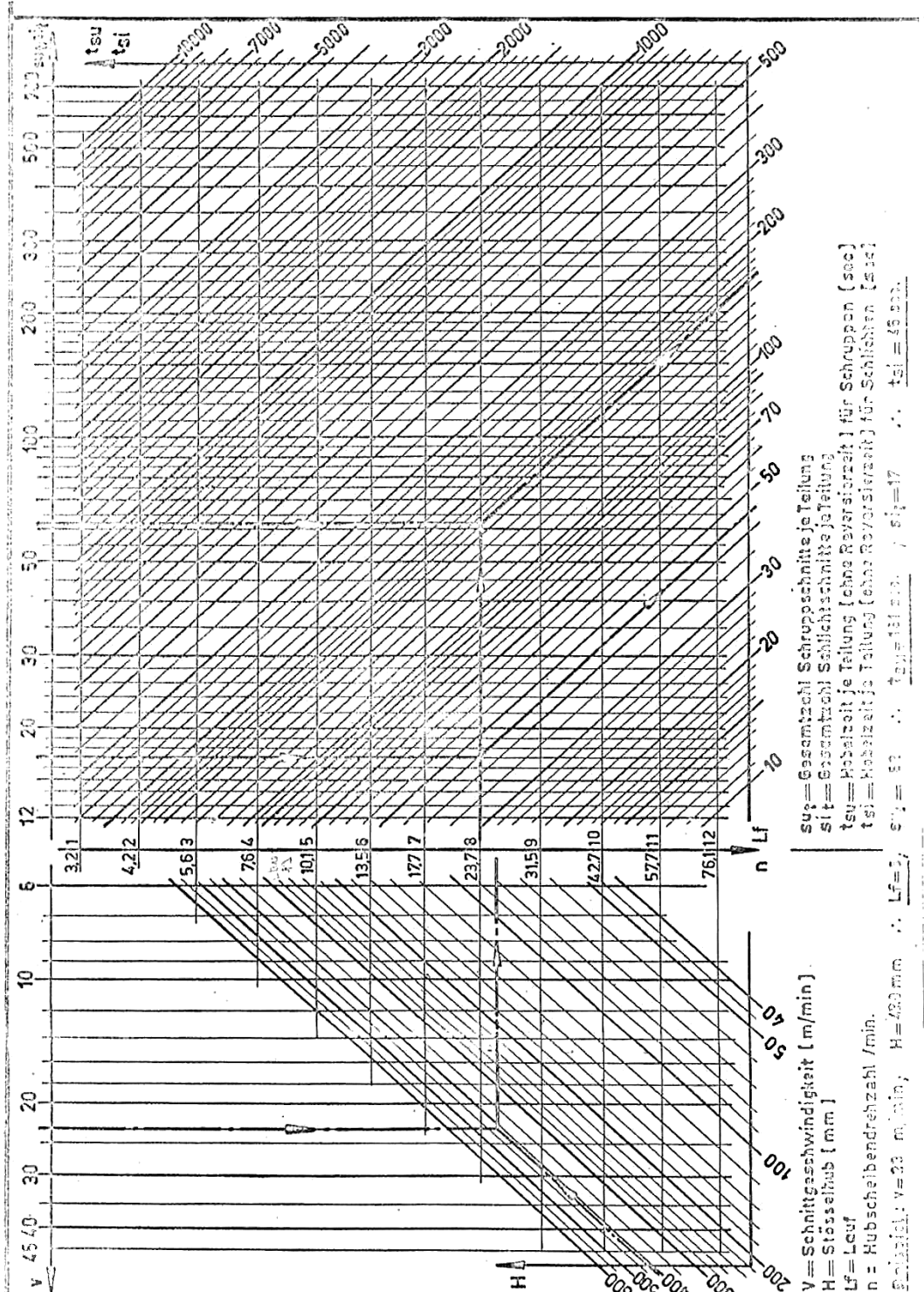
- Příloha 1 Výkres pastorku.  
Příloha 2 Parametry lisu LZK2500.  
Příloha 3 Pomocný diagram pro stanovení času obrážení ozubení.  
Příloha 4 Stávající technologický postup.  
Příloha 5 Výkres hrubovací hlavové frézy.  
Příloha 6 Parametry frézovacího centra BFR23 Reiden.  
Příloha 7 Ukázka zdroj. kódu – hrubování nástrojem TEBL 232-M16-13.  
Příloha 8 Fotografie strojů SCHIESS a MAAG.



## PŘÍLOHA 2 [13]

<b>ŠMERAL BRNO a.s.</b> Křenová 65c 658 25 BRNO Tel: 420 532 167 111 Fax: 420 543 255 143 Email: obch@smeral.cz	<h1>LZK 2500 P</h1>	 <b>ŠMERAL</b>																																																																																				
<b>EV. Č. 1188.1</b>	<b>1. ZÁKLADNÍ ÚDAJE</b>	<b>VÝR. Č. 69106</b>																																																																																				
<h3>1.5. TECHNICKÉ ÚDAJE</h3> <h4>■ ZÁKLADNÍ DATA</h4> <table><tr><td>Jmenovitá tvářecí síla</td><td>MN</td><td>25</td></tr><tr><td>Počet zdvihů trvalým chodem</td><td>min<sup>-1</sup></td><td>65</td></tr><tr><td>Počet využitelných zdvihů s ohledem na ohřev spojky-brzdy</td><td>min<sup>-1</sup></td><td>25</td></tr><tr><td>Zdvih</td><td>mm</td><td>320</td></tr><tr><td>Jmenovitá pracovní dráha</td><td>mm</td><td>1,57</td></tr><tr><td>Sevření</td><td>mm</td><td>905</td></tr><tr><td>Přestavitelnost beranu</td><td>mm</td><td>10</td></tr><tr><td>Průchod</td><td>mm</td><td>1 410</td></tr><tr><td>Rozměr stolu- zleva doprava</td><td>mm</td><td>1 340</td></tr><tr><td>zepředu dozadu</td><td>mm</td><td>1 400</td></tr><tr><td>Upínací plocha beranu zleva doprava</td><td>mm</td><td>870</td></tr><tr><td>zepředu dozadu</td><td>mm</td><td>1 100</td></tr><tr><td>Maximální zdvih kolíků horního vyhazovače</td><td>mm</td><td>50</td></tr><tr><td>Síla horního vyhazovače</td><td>kN</td><td>70</td></tr><tr><td>Počet vyhazovacích kolíků</td><td>ks</td><td>3</td></tr><tr><td>Rozteč vyhazovacích kolíků</td><td>mm</td><td>300</td></tr><tr><td>Průměr vyhazovacích kolíků</td><td>mm</td><td>80</td></tr><tr><td>Maximální zdvih kolíku spodního vyhazovače</td><td>mm</td><td>70</td></tr><tr><td>Síla spodního vyhazovače</td><td>kN</td><td>250</td></tr><tr><td>Počet vyhazovacích kolíků</td><td>ks</td><td>3</td></tr><tr><td>Rozteč vyhazovacích kolíků</td><td>mm</td><td>300</td></tr><tr><td>Průměr vyhazovacích kolíků</td><td>mm</td><td>80</td></tr><tr><td>Délka lisu - zleva doprava</td><td>mm</td><td>4 035</td></tr><tr><td>Šířka lisu - zepředu dozadu</td><td>mm</td><td>3 780</td></tr><tr><td>Výška lisu nad podlahou</td><td>mm</td><td>6 710</td></tr><tr><td>Výška lisu</td><td>mm</td><td>7 390</td></tr><tr><td>Hmotnost lisu</td><td>kg</td><td>140 000</td></tr><tr><td>Příkon hlavního elektromotoru</td><td>kW</td><td>130</td></tr></table>			Jmenovitá tvářecí síla	MN	25	Počet zdvihů trvalým chodem	min <sup>-1</sup>	65	Počet využitelných zdvihů s ohledem na ohřev spojky-brzdy	min <sup>-1</sup>	25	Zdvih	mm	320	Jmenovitá pracovní dráha	mm	1,57	Sevření	mm	905	Přestavitelnost beranu	mm	10	Průchod	mm	1 410	Rozměr stolu- zleva doprava	mm	1 340	zepředu dozadu	mm	1 400	Upínací plocha beranu zleva doprava	mm	870	zepředu dozadu	mm	1 100	Maximální zdvih kolíků horního vyhazovače	mm	50	Síla horního vyhazovače	kN	70	Počet vyhazovacích kolíků	ks	3	Rozteč vyhazovacích kolíků	mm	300	Průměr vyhazovacích kolíků	mm	80	Maximální zdvih kolíku spodního vyhazovače	mm	70	Síla spodního vyhazovače	kN	250	Počet vyhazovacích kolíků	ks	3	Rozteč vyhazovacích kolíků	mm	300	Průměr vyhazovacích kolíků	mm	80	Délka lisu - zleva doprava	mm	4 035	Šířka lisu - zepředu dozadu	mm	3 780	Výška lisu nad podlahou	mm	6 710	Výška lisu	mm	7 390	Hmotnost lisu	kg	140 000	Příkon hlavního elektromotoru	kW	130
Jmenovitá tvářecí síla	MN	25																																																																																				
Počet zdvihů trvalým chodem	min <sup>-1</sup>	65																																																																																				
Počet využitelných zdvihů s ohledem na ohřev spojky-brzdy	min <sup>-1</sup>	25																																																																																				
Zdvih	mm	320																																																																																				
Jmenovitá pracovní dráha	mm	1,57																																																																																				
Sevření	mm	905																																																																																				
Přestavitelnost beranu	mm	10																																																																																				
Průchod	mm	1 410																																																																																				
Rozměr stolu- zleva doprava	mm	1 340																																																																																				
zepředu dozadu	mm	1 400																																																																																				
Upínací plocha beranu zleva doprava	mm	870																																																																																				
zepředu dozadu	mm	1 100																																																																																				
Maximální zdvih kolíků horního vyhazovače	mm	50																																																																																				
Síla horního vyhazovače	kN	70																																																																																				
Počet vyhazovacích kolíků	ks	3																																																																																				
Rozteč vyhazovacích kolíků	mm	300																																																																																				
Průměr vyhazovacích kolíků	mm	80																																																																																				
Maximální zdvih kolíku spodního vyhazovače	mm	70																																																																																				
Síla spodního vyhazovače	kN	250																																																																																				
Počet vyhazovacích kolíků	ks	3																																																																																				
Rozteč vyhazovacích kolíků	mm	300																																																																																				
Průměr vyhazovacích kolíků	mm	80																																																																																				
Délka lisu - zleva doprava	mm	4 035																																																																																				
Šířka lisu - zepředu dozadu	mm	3 780																																																																																				
Výška lisu nad podlahou	mm	6 710																																																																																				
Výška lisu	mm	7 390																																																																																				
Hmotnost lisu	kg	140 000																																																																																				
Příkon hlavního elektromotoru	kW	130																																																																																				
-15-																																																																																						

# PŘÍLOHA 3 [28]



U rēem chodn (Lf) a hobl. časn na olēn!  
 Ermittlung von Lauf und Hobelzeit je Teilung.  
 (ohne Reversierzeit)

SH350/500

HT350/1

102-2



# PŘÍLOHA 4 [3] 2/3

```

L:25 02/10/15
3 20 0107 91388004 PASTOREK 307
15260.3 KS 1 0 0 0 0
3 20 0107 740 1 0 0
STRANSKY V

070 207 61510 0 34.00 5 7 2 1.00 1
010 OTRYSKAT OZUBENI
***!-----!-----,---!-!-!-!-!-!-!-----!*****
080 307 52280 19 157.00 6 7 1 1.00 1
010 ROZFREZOVAT A FREZOVAT MAT. PRO ZKOUSKY
020 1KS 22X22X130 A 1KS. 15X45X57. SHODNE
030 OZNACIT. ZBYVAJICI MAT. OZNACIT PRISL.
040 C. T.K. A PONECHAT AZ DO UVOLNENI DTK
***!-----!-----,---!-!-!-!-!-!-!-----!*****
085 370 98630 0 .00 0 7 4 1.00 1
010 KONTROLA DLE ATESTU - UVOLNIT PRO
020 DPRACOVANI
***!-----!-----,---!-!-!-!-!-!-!-----!*****
090 308 41460 29 201.00 7 7 1 1.00 1
010 NA JEDNO UPNUTI SOUSTR.OTV. PR. 310H7 NA
020 PR. 309.5H8 HOTOVE PR.. 715. 95H8
030 PR. 565 PRECISTIT V DELCE 10MM NA OPRAC.
040 1.6. SIRKU ZAPICHU PONECHAT S PRID. CELA
050 PASTORKU S PRID. 2.5MM NA PLOCHU -
060 OZNACIT CELO SOUSTR. NA JEDNO UPNUTI S
070 OTV.. POVRCHEM A ZAPICHEM
***!-----!-----,---!-!-!-!-!-!-!-----!*****
100 307 56460 10 22.00 6 7 1 1.00 1
010 UPNOUT NA OZNAC. CELO A PREBROUSIT DRUHE
020 CELO NA CISTO
***!-----!-----,---!-!-!-!-!-!-!-----!*****
110 307 94100 5 .00 5 7 2 1.00 1
010 RYSOVAT PRO OPERACI 120
***!-----!-----,---!-!-!-!-!-!-!-----!*****
120 307 49480 33 158.00 6 7 1 1.00 1
010 HOTOVE 1X DRAZKU 70P9 S OHL. NA PRID..
020 DRUHOU HRUBOVAT S PRID.3MM NA PLOCHU,ODJ
***!-----!-----,---!-!-!-!-!-!-!-----!*****
125 370 98630 0 .00 0 7 4 1.00 1
010 PO PROJETI PRVNI TRISKY KONTR. NA TRECH
020 MISTECH. NENI-LI DRUHY PRAMEN POSUNUT
***!-----!-----,---!-!-!-!-!-!-!-----!*****
130 307 58150 230 4278.00 9 7 1 1.00 1
010 HOTOVE OZUB. OBE POL. SIPU STREDIT DLE
020 PASKU NA PR. 565. DFA 40/561
030 POZOR PO PROJETI PRVNI TRISKY VOLAT

```





## PŘÍLOHA 6 [49] 1/2

The REIDEN BFR2 series is equipped even in the basic model with innovative technology for commercial complete machining.

	Basic features	Additional features
<b>Control and operation:</b>		
Control	Heidenhain TNC 640	Siemens 840 D SL
Additional control at rear		●
Portable electronic hand wheel	front	rear
2 sets of operating and programming instructions (including wiring diagram)	●	
Automatic opening and closing of front angle doors	BFR23 / BFR24	BFR22
<b>Drive and spindle</b>		
Spindle speed range	20-6'000 min <sup>-1</sup>	20-7'000 min <sup>-1</sup>
Dual gear ZF transmission	●	
Transmission cooling system	●	
Spindle taper	ISO 50 (BIG PLUS) DIN 69871 / 72	HSK100 Form A DIN 69893
Automatic pivoting head horizontal / vertical	●	
Milling head cooling system	●	
Airshield system in milling head	●	
B axis +/- 180° (continuous)		●
A axis 0-90° (indexable every 1° or 15°)		●
Minimal quantity lubrication system		●
<b>Work space and travelling distances</b>		
Full space protection casing	●	
Machine interior lighting	●	
2 angled doors for loading by crane	●	
Access door, rear	●	
Rigid table	●	
Combination table		●
Rotary table		●
Increased rotary table accuracy		●
Lateral extension from 1'000 to 1'200 mm		●
Intermediate unit between bed and column of 150 mm		●
<b>Peripherals</b>		
Tool changer, places, chain magazine	64	80 / 120
Tool changer, places, shelf magazine		151 / 321
2 chip conveyors front and rear, along machine bed	●	
Rinsing jet with separate coolant pump	●	
Internal coolant supply, form A	30 bar	50 / 80 bar
Pressure regulation of internal coolant supply		●
Coolant recooling		●
Paper band filter	●	
Endless band filter		●
Rotating inspection glass		●
Smoke and coolant mist extractor		●
Oil skimmer		●
Touch probe (radio)		●
Laser tool setting and monitoring		●
Pallet exchange system		●
Colouring	Light grey RAL7035 / Violet blue RAL5000	upon request

# PŘÍLOHA 6 [49] 2/2

## Features / Specifications

Specifications		BFR22	BFR23	BFR24
<b>Cutting area</b>				
X axis (longitudinal axis)	mm	2'000	3'000	4'000
Y axis (transverse axis)	mm	1'000 / (1'200)*		
Z axis (vertical axis)	mm	1'500		
Rotary table versions*	∅	1'000 / 1'250 / 1'700	-	-
Combination table versions*	∅	1'000 / 1'250 / 1'700		
Max. rotary diameter	mm	1'800 (2'700)*		
Max. table load	kg	4'000 / (6'000)**	6'000 / (9'000)**	7'500 / (11'000)**
<b>Main drive</b>				
Spindle power 6'000 / 7'000 rpm	kW	30 kW at 100% duty ratio / 45 kW at 40% duty ratio		
Max. spindle torque 6'000 / 7'000 rpm	Nm	1'135		
<b>Feed motor</b>				
Rapid feed X axis	m / min	20	30	30
Rapid feed Y and Z axis	m / min	20		
<b>Tool changer</b>				
Max. tool length	mm	600		
Max. tool diameter	mm	125 / 250		
<b>Machine specifications</b>				
Machine weight (400 mm base required)	kg	26'000	30'000	34'000
Dimensions length x width x height	mm	6'638 x 5'035 x 3'503	8'738 x 5'035 x 3'503	10'778 x 5'035 x 3'503

\* Optional, \*\* At adjusted speed

Subject to technical alterations. Base in accordance with manufacturer information

### Guaranteed accuracies DIN VDI / DGQ 3441

Accuracy depends heavily on external thermal influences. The values given are reached in the temperature region of 20° +/- 2° during factory approval.

#### Linear axes X, Y, Z

Position error P	8 µm
Position deviation Pa	4 µm
Repeatability PS <sub>mit</sub>	4 µm
Repeatability PS <sub>max</sub>	5 µm
Reversal error PS <sub>mit</sub>	2 µm
Reversal error U <sub>max</sub>	3 µm

#### Rotary table C axis

Positioning error P	5 ws
Position deviation Pa	2 ws
Repeatability PS <sub>mit</sub>	2 ws
Repeatability PS <sub>max</sub>	3 ws
Reversal error U <sub>mit</sub>	2 ws
Reversal error U <sub>max</sub>	2 ws
Axial runout, rotary table	0.01 mm
Concentric run-out, alignment	0.005 mm

## PŘÍLOHA 7

N10 O22	N57 X-25.181 Y-108.84 Z361.584
N11 G17	N58 X-24.906 Y-110.323 Z361.558
N12 M10	N59 X-24.479 Y-111.769 Z361.532
N13 M11XYZ	N60 X-23.902 Y-113.162 Z361.505
N14 G733	N61 X-23.183 Y-114.488 Z361.479
N15 [SOUCAST: 3-20-0107-DF1_X_T.PRT	N62 X-22.33 Y-115.731 Z361.453
N16 [OPERACE: 01-HRUBPR32	N63 X-21.351 Y-116.878 Z361.426
N17 [	N64 X-20.258 Y-117.917 Z361.4
N18 [NASTROJ: FEEDPR32R2.5	N65 X-19.062 Y-118.836 Z361.374
N19 [PRUMER NASTROJE: 32.00 R: 2.50	N66 X-17.777 Y-119.624 Z361.347
N20 T32	N67 X-16.416 Y-120.274 Z361.321
N21 [G48 KX IO	N68 X-14.995 Y-120.779 Z361.295
N22 S1800 M3	N69 X-13.529 Y-121.132 Z361.268
N23 M50	N70 X-12.034 Y-121.33 Z361.242
N24 M51	N71 X-10.526 Y-121.37 Z361.216
N25 G0 X3.502 Y-106.583 Z583.726 C0.0 A0.0	N72 X-9.023 Y-121.253 Z361.189
N26 G0 Z362.4	N73 X-7.54 Y-120.979 Z361.163
N27 G1 X3.393 Y-105.08 Z362.374 F4800.	N74 X-6.094 Y-120.552 Z361.137
N28 X3.118 Y-103.597 Z362.347	N75 X-4.7 Y-119.976 Z361.111
N29 X2.689 Y-102.151 Z362.321	N76 X-3.374 Y-119.258 Z361.084
N30 X2.112 Y-100.758 Z362.295	N77 X-2.131 Y-118.405 Z361.058
N31 X1.392 Y-99.433 Z362.268	N78 X-.983 Y-117.426 Z361.032
N32 X.538 Y-98.191 Z362.242	N79 X.056 Y-116.333 Z361.005
N33 X-.442 Y-97.044 Z362.216	N80 X.975 Y-115.138 Z360.979
N34 X-1.536 Y-96.006 Z362.189	N81 X1.764 Y-113.853 Z360.953
N35 X-2.732 Y-95.088 Z362.163	N82 X2.415 Y-112.492 Z360.926
N36 X-4.018 Y-94.301 Z362.137	N83 X2.91 Y-111.069 Z360.9
N37 X-5.379 Y-93.651 Z362.111	N84 X3.905 Y-107.723
N38 X-6.801 Y-93.148 Z362.084	N85 X4.241 Y-106.594
N39 X-8.267 Y-92.796 Z362.058	N86 X5.008 Y-104.013
N40 X-9.762 Y-92.599 Z362.032	N87 G3 X4.851 Y-103.138 Z360.9 I4.048 J-103.733
N41 X-11.27 Y-92.56 Z362.005	N88 G2 X1.054 Y-96.747 Z360.9 I32.57 J-82.345
N42 X-12.773 Y-92.678 Z361.979	N89 G3 X-.81 Y-96.876 Z360.9 I.147 J-97.167
N43 X-14.256 Y-92.953 Z361.953	N90 G1 X-1.09 Y-97.816
N44 X-15.702 Y-93.381 Z361.926	N91 X-2.097 Y-101.198
N45 X-17.095 Y-93.958 Z361.9	N92 X-3.44 Y-105.712
N46 X-18.42 Y-94.677 Z361.874	N93 X-4.785 Y-110.236
N47 X-19.663 Y-95.531 Z361.847	N94 X-5.008 Y-110.985
N48 X-20.81 Y-96.51 Z361.821	N95 G3 X-4.852 Y-111.862 Z360.9 I-4.049 J-111.266
N49 X-21.848 Y-97.604 Z361.795	N96 G2 X-1.054 Y-118.254 Z360.9 I-32.57 J-132.655
N50 X-22.767 Y-98.8 Z361.768	N97 G3 X.3 Y-118.728 Z360.9 I-.147 J-117.833
N51 X-23.555 Y-100.086 Z361.742	N98 G2 X.694 Y-118.624 Z360.9 I.746 J-119.623
N52 X-24.205 Y-101.447 Z361.716	N99 G1 X21.413 Y-117.553
N53 X-24.708 Y-102.868 Z361.689	N100 G3 X22.32 Y-116.84 Z360.9 I21.362 J-116.555
N54 X-25.061 Y-104.334 Z361.663	N101 G1 X23.312 Y-113.502
N55 X-25.258 Y-105.829 Z361.637	N102 X23.649 Y-112.373
N56 X-25.298 Y-107.337 Z361.611	(...)

## PŘÍLOHA 8

