

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta Strojní

Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie

**Optimalizace postupu hrubování při
frézování tělesa převodovky**

Bakalářská práce

Autor práce: Ondřej Horných

Vedoucí práce: Ing. Jan Tomíček Ph.D.

Praha 2019

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady uvedené na konci této práce.

V Praze dne

.....

Ondřej Horných

Anotace

Předmětem této bakalářské práce je návrh nové metody hrubování vývrtů tělesa převodovky vedoucí ke snížení nákladů na výrobu. V práci je popsána podstata hrubování a jeho metody, samotný prvek vývrtu, popis stroje a nástrojů, původní i nově navržené metody, a nakonec je provedeno technicko-ekonomické zhodnocení. Práce byla prováděna v CAD/CAM softwaru TopSolid, odkud se následně braly strojní časy na porovnání a NC kód pro práci na stroji. Práce byla prováděna ve spolupráci s firmou Wikov MGI a.s.

Klíčová slova: obrábění, hrubování, frézování, optimalizace, CAM, TopSolid

Annotation

The subject of this bachelor thesis is a proposal of a new method of roughing of the bore of the gearbox body leading to reduction of production costs. The thesis describes the nature of roughing and its methods, the borehole element itself, the choice of machine and tools, the original and the newly designed methods, and finally the technical-economic evaluation is done. The work was carried out in the TopSolid CAM software, where the subsequent machine times were compared. The work was carried out in cooperation with Wikov MGI a.s.

Keywords: machining, roughing, milling, optimization, CAM, TopSolid

Poděkování

Děkuji panu Ing. Janu Tomíčkoví Ph.D. za odborné vedení mé bakalářské práce a za jeho rady a připomínky. Také děkuji pracovníkům oddělení technologie firmy Wikov MGI a.s. za rady k praktické části práce, za poskytnutí informací k práci, CAM softwaru TopSolid a za ochotný přístup.

Obsah

Seznam zkratk a symbolů	7
1 Úvod.....	8
2 Optimalizace obráběcího procesu.....	9
2.1 Optimalizace řezných podmínek.....	9
2.1.1 Kritéria optimálnosti	10
2.1.2 Omezení.....	10
2.1.3 Optimální trvanlivost nástroje	10
2.2 Optimalizace výrobního postupu.....	10
2.2.1 Optimální technologická příprava výroby.....	11
3 Hrubování	11
3.1 Frézovací strategie.....	11
3.1.1 Hrubovací strategie v CAM software	13
3.2 Řezné podmínky	16
4 Optimalizace hrubování vývrtů v tělese převodovky	17
4.1 Společnost Wikov Industry a.s.	17
4.2 Obráběná součást a vybraný prvek	18
4.2.1 Materiál součásti.....	19
4.3 Výrobní zařízení.....	19
4.4 Vybrané nástroje.....	21
4.4.1 Kopírovací fréza	21
4.4.2 Ponorná fréza	22
4.5 Současná obráběcí metoda	23
4.6 Navržené metody obrábění.....	25
4.6.1 Zapichování	25
4.6.2 Řádkování s vykloněnou hlavou	27
4.6.3 4D kopírování kontury	29
4.6.4 4D řádkování	31
4.7 Vyhodnocení.....	32
5 Závěr.....	35
Seznam použité literatury.....	36
Seznam obrázků	38
Seznam tabulek	39
Seznam příloh.....	40

Seznam zkratek a symbolů

CAD	-	Computer aided design (počítačová podpora konstruování)
CAM	-	Computer aided manufacturing (počítačová podpora obrábění)
D	-	průměr
f_n	-	posuv na otáčku
f_z	-	posuv na zub
n	-	otáčky
v_c	-	řezná rychlost
v_f	-	posuvová rychlost
Z	-	počet zubů frézy

1 Úvod

Tato práce se zabývá optimalizací hrubování vývrtů v tělese převodovky ve firmě Wikov MGI a.s. v Hronově. Současný proces obrábění je zdlouhavý a neekonomický, proto je tedy nutné tento proces optimalizovat. Navíc je nutné dosáhnout lepší vyrovnanosti výšky zbytkového materiálu. V této práci proběhla optimalizace návrhem nových frézovacích strategií a následně se vybrala ekonomicky nejvýhodnější varianta, která se zavede do praxe.

Nejdříve byla teoreticky popsána problematika optimalizace obráběcího procesu, hrubování a jeho metody v CAM softwarech a volba řezných podmínek. Následně bylo zhodnoceno současné řešení obráběcího procesu a navrženo několik nových možných řešení, u kterých byla následně pomocí CAM softwaru provedena simulace a výpočet jejich nákladů. Nakonec bylo zhodnoceno, která varianta je z hlediska nákladů nejvýhodnější.

Tato práce se zabývá pouze hrubováním vývrtů. Zbytek operací v tělese převodovky není vůbec uvažováno. Samotné těleso převodovky bylo popsáno jen stručně, jelikož to nemá vliv na samotnou práci a také z důvodu know-how firmy.

Výsledkem této práce je návrh změn nebo změna celé operace hrubování vývrtů, což by mělo vést k zavedení do výroby v dané firmě.

2 Optimalizace obráběcího procesu

V dnešní době ovlivňuje strojírenskou výrobu hlavně vývoj technologií a materiálů, ekonomika a ekologie. Technologie obrábění, patřící do strojírenské výroby, kde zaujímá více než 30 % objemu práce, je důležitou složkou celkových výrobních nákladů, které tvoří asi 40 % ceny výrobku. Konkurence a zákazníci ale tlačí ceny výrobků stále níže, proto je nutné i snižovat výrobní náklady. To vede k využívání optimálních pracovních podmínek a dokonalejších pracovních prostředků. Jedná se o materiál, geometrii a trvanlivost nástroje, kvalitu ostření, stav břitů, řezné podmínky a prostředí. Ke snížení výrobních nákladů je nutné využívat tyto faktory v optimální míře bez technicko-ekonomických rezerv. Při dlouhodobém nevyužívání těchto podmínek klesá perspektivnost podniku. Proto je v zájmu každého podniku tomuto předejít a využívat ekonomické rezervy obráběcího procesu i na stávajících zařízeních bez nutnosti nových velkých investic.

Dříve a někdy bohužel i dnes se vyslovuje názor, že optimalizace není významná a že se dá v podniku ušetřit jinými metodami. To je, hlavně u nových nákladnějších CNC obráběcích strojů, nesmysl, jelikož na takovýchto strojích jsou náklady na strojní hodinu ve stovkách až tisících korun.

Pro optimalizaci je nutné znát řadu vstupních údajů, které se liší v každém podniku. Proto pro každý výrobní závod a každé výrobní zařízení budou různé optimalizační podmínky. [1]

2.1 Optimalizace řezných podmínek

Pro jednotlivé úseky obrábění a k nim přiřazené nástroje se optimalizují řezné podmínky podle určitého kritéria, nejčastěji to jsou výrobní náklady. U této fáze vzniká několik omezení, např. technické parametry stroje, nástroje, obráběného materiálu, či požadavky na kvalitu povrchu.

Tato fáze je často hodně podceňována, ale právě optimalizace řezných je velmi významná z hlediska výrobních nákladů. Základem výpočtu řezných podmínek jsou údaje od výrobců nástrojů nebo normativy řezných podmínek. [1]

2.1.1 Kritéria optimálnosti

Kritérium optimálnosti je způsob řešení optimalizace daného procesu. Hlavním kritériem jsou minimální výrobní náklady, které zahrnují náklady na strojní práci, nástroje a jeho výměnu. Druhým nejpoužívanějším kritériem je maximální produktivita. To v podstatě znamená vyrábět co nejvíce kusů za co nejmenší čas bez ohledu na náklady. Z matematického hlediska jsou obě tato kritéria analogická a řeší se stejným způsobem. Dále ještě existují kritéria optimálnosti z hlediska zisku, úběru materiálu nebo vícekritériální optimalizace. Tam se využívá více kritérií, kde každému zvolíme určitou váhu. [1]

2.1.2 Omezení

Při optimalizaci řezných podmínek je nutné brát v potaz omezení nebo omezující podmínky dané výrobním procesem. Každý obráběcí proces je vždy omezen nějakými určitými omezujícími podmínkami. Ty jsou matematicky vyjádřeny jako rovnice. Jedinou rovnicí je komplexní Taylorův vztah.

Omezující podmínky jsou dány strojem (výkon, otáčky, kroutící moment, upínání, velikosti sil atp.), nástrojem (materiál, geometrie), materiálem obrobku, řezným prostředím, požadovanou kvalitou atd. [1]

2.1.3 Optimální trvanlivost nástroje

Optimální trvanlivost břítu nástroje souvisí s řeznými podmínkami. Proto při volbě optimálních řezných podmínek je nutné směřovat k optimální trvanlivosti nástroje. Pro zjednodušení volby řezných podmínek se nejdříve určí optimální trvanlivost a poté se v závislosti na ní stanoví optimální řezné podmínky dle zásady pro stanovení řezných podmínek postupným způsobem. Nejdříve se určí maximální hloubka řezu, poté maximální posuv, a nakonec řezná rychlost podle komplexního Taylorova vztahu nebo podle normativů. [1]

2.2 Optimalizace výrobního postupu

Optimalizací se nerozumí pouze změna řezných podmínek, ale i změna procesu samotného. Tím se myslí tvorba výrobního postupu, řazení operací, volba nástrojů a strategie jejich pohybu. Zejména, pokud pro práci používáme CAM software, může takováto optimalizace přinést mnohem lepší výsledky než nákladová optimalizace neboli výpočet optimální trvanlivosti, která je velmi nejistá. Díky CAM software je totiž možné lehce zjistit úspory v podobě ušetřeného strojního času. Snížení strojního času znamená nižší opotřebení nástrojů, a tím jejich větší trvanlivost.

2.2.1 Optimální technologická příprava výroby

Každý technologický postup má řadu metod, pomocí kterých lze dosáhnout požadovaných vlastností výrobku. Technolog na základě analýzy všech dostupných informací volí takovou metodu, která je v daném systému a podmínkách optimální. Na základě zvoleného optimálního zařízení vypracuje technolog konkrétní výrobní postup. Při sestavování postupu musí technolog dbát na návaznost jednotlivých technologických metod tak, aby výsledný výrobní proces byl produktivní a efektivní. Jedno ze základních míst v procesech inovace a optimalizace zaujímá systém pro stanovení konkrétní technologie výroby polotovaru, součástí a montáž.

Na technologickém projektu se podílí oddělení technické přípravy výroby, které se skládá z konstrukční, technologické a projektové přípravy. Pro správný výstup je nutná spolupráce všech tří částí. [2]

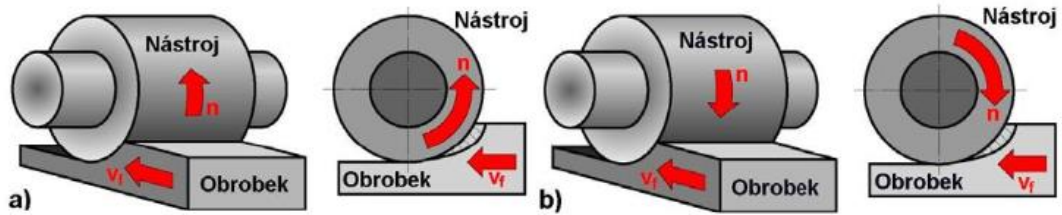
3 Hrubování

Hrubování zaujímá prvotní operaci v obráběcím procesu, ve kterém hraje důležitou roli. Základním požadavkem, který je na hrubování kladen, je odebrání co možná největšího objemu přebytečného materiálu v co možná nejkratším čase a tím připravit konturu pro následné dokončování. Pro splnění tohoto požadavku je nutné zaměřit se na správnou volbu obráběcího stroje, nástroje a řezných podmínek, což je zásadní pro naplnění požadavků z hlediska produktivity a ekonomičnosti hrubovacího procesu. [3]

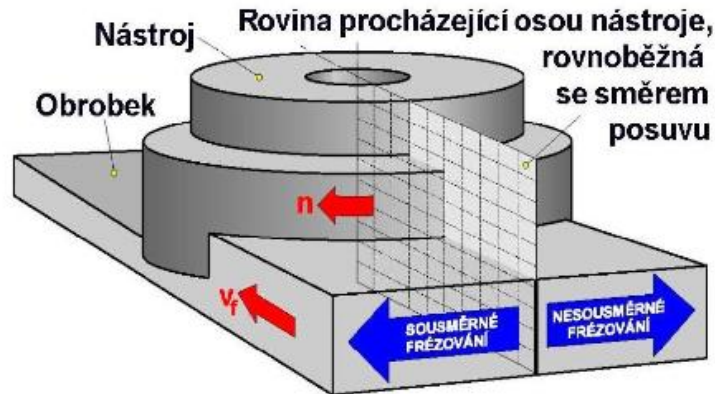
3.1 Frézovací strategie

Frézovací strategie zahrnují předdefinované dráhy nástroje, optimalizované pro obrábění různých tvarových ploch tak, aby obrobek byl obroben co nejefektivněji. Podle směru, kterým bude odebírán materiál se určí, zda frézovat sousledně, či nesousledně. Výhradně se prosazuje použití sousledného frézování, které je výhodnější ze silového hlediska. Správný výběr strategie může významně snížit obráběcí časy, opotřebením nástroje, ale i náklady na výrobu. [3]

Při sousledném frézování má smysl rotace stejný směr jako posuv obrobku a tříška se tvoří od maximální tloušťky při vniknutí nástroje do materiálu. Při nesousledném frézování nástroj rotuje proti směru posuvu obrobku a tříška vzniká z nulových hodnot do maximální tloušťky. To má za důsledek vyšší opotřebením bříty nástroje. Při čelním frézování nastává sousledné i nesousledné frézování současně při obrábění celé plochy na jedno přejetí. [4]



Obrázek 1: Frézování a) sousledné, b) nesousledné [5]



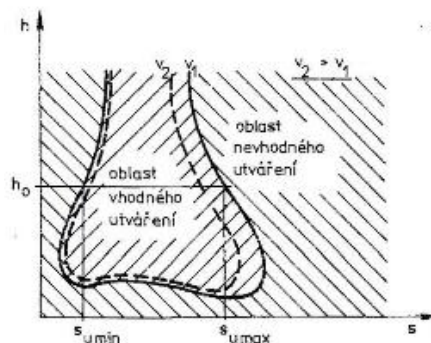
Obrázek 2: Čelní frézování [5]

Pokud obrábíme materiál, u kterého se sami nedělí třísky nebo pokud to není zajištěno obráběcím procesem, je nutné zajistit řezné podmínky a geometrii nástroje, aby se vhodně utvářeli třísky. Dlouhé nedělené třísky mohou způsobit mnoho škody.

Z toho plynou tyto požadavky:

- třísky se nesmí dostat pod břit, což by vedlo k destrukci nebo poškození břitu,
- třísky se nesmí nahromadit v pracovním prostoru v takové míře, aby to komplikovalo obráběcí proces.

Proto jsou zjišťovány a vypracovány diagramy, kde jsou vyznačeny oblasti vhodného utváření třísek. Příklad lze vidět na obrázku 3. Ty jsou různé pro dané obráběcí nástroje, druhy materiálů a rozsah řezné rychlosti. Se zvyšující se řeznou rychlostí se tato oblast zužuje. [1]



Obrázek 3: Oblast vhodného utváření třísek [1]

3.1.1 Hrubovací strategie v CAM software

CAM z anglického výrazu Computer Aided Manufacturing (počítačová podpora výroby). Je to počítačový program k řízení NC strojů, robotů, mezioperační dopravy výrobků, polotovarů, náradí atd. Výstupní data z CAM systému jsou ve formátu ATP nebo CL. Důležitou součástí CAM systému je postprocesor, který převádí data z formátu ATP nebo CL do G a M kódu.

V dnešní době se používají komplexní CAD/CAM software, ve kterých lze spravovat díl od návrhu přes konstrukci až po samotné obrábění, což poskytuje mnoho výhod. Jednou z těchto hlavních je naprogramování obrábění tvarově složitých obrobků. Pro obrábění tvarových ploch nebo složitějších součástí je nutné použití CAM softwaru, kde se dá naprogramovat obrábění současně ve třech i více osách.

Druhou hlavní výhodou je lepší produktivita obrábění. Nové verze CAD/CAM softwarů obsahují čím dál více nových funkcí optimalizujících obráběcí proces, umožňují rychlé přegenerování drah nástroje a potlačují lidský faktor jako zdroj chyb.

Hrubování v CAM software dostává v posledních letech čím dál více pozornosti a rozšiřuje se paleta hrubovacích strategií. Tradiční hrubovací strategie fungují na principu kapsování. Software vezme v potaz geometrii, kterou chceme obrábět a zvolí radiální hloubku řezu. Tento postup ale dává do pozadí technologické podmínky a potřeby obráběcího stroje. V poslední době se proto vymýšlí nové strategie, u kterých se liší princip tvorby obráběcí drah. Tyto strategie berou v potaz změnu zatížení nástroje a s tím spojené změny rezných sil, teplot a vibrací nástroje, popř. stroje. Tím se snižuje kvalita obrobenej plochy a trvanlivost nástroje. Tyto strategie se nazývají v různých programech jinak, ale většinou jde o inteligentní, progresivní či dynamické hrubování. Ty pracují na dvou principech.

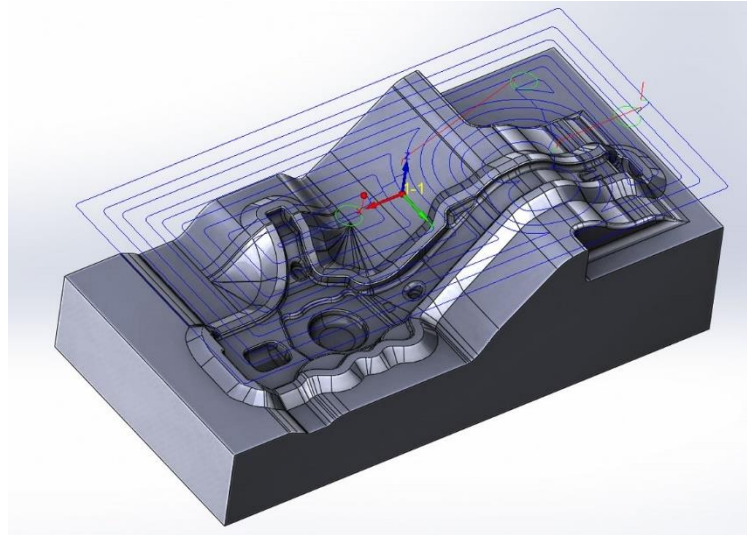
První z nich sleduje úhel opásání nástroje. To je úhel, ve kterém je fréza v kontaktu s materiálem obrobku. CAM software pro zadanou radiální hloubku řezu generuje dráhu tak, aby nebyla překročena ideální hodnota úhlu opásání.

Druhý princip dosahuje konstantního zatěžování nástroje dynamickou změnou posuvu. To ale znamená, že nejsou dodrženy optimální rezné podmínky.

Hrubovací strategie v CAM software využívají ve velké míře přejezdy nástroje mezi obráběním. Přejezdy software volí po nejkratší možné dráze a s nízkou vzdáleností od ploch, ale stále hlídá, aby nedošlo ke kolizi. Posuv se volí mezi pracovním posuvem a rychloposuvem z důvodu pohybu blízko ploch obrobku. [6]

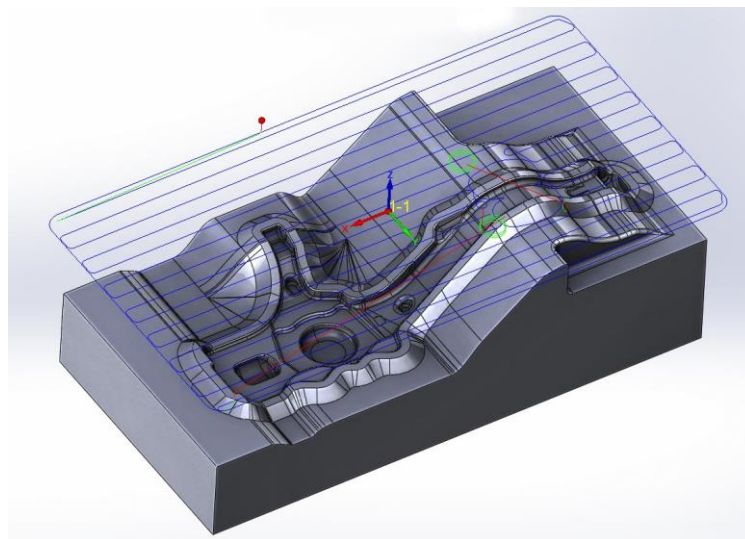
Mezi tradiční hrubovací strategie patří:

- Konturové hrubování – hlavní hrubovací strategie určená pro efektivní odstranění velkého objemu materiálu. Série drah v Z rovinách zadaných hloubkou jsou zadány tak, aby se odstranilo co nejvíce materiálu bez přerušení řezu. Hloubka řezu se automaticky upravuje podle geometrie obrobku. Tento způsob umožňuje použití vyšších posuvů a prodlužuje životnost nástroje.



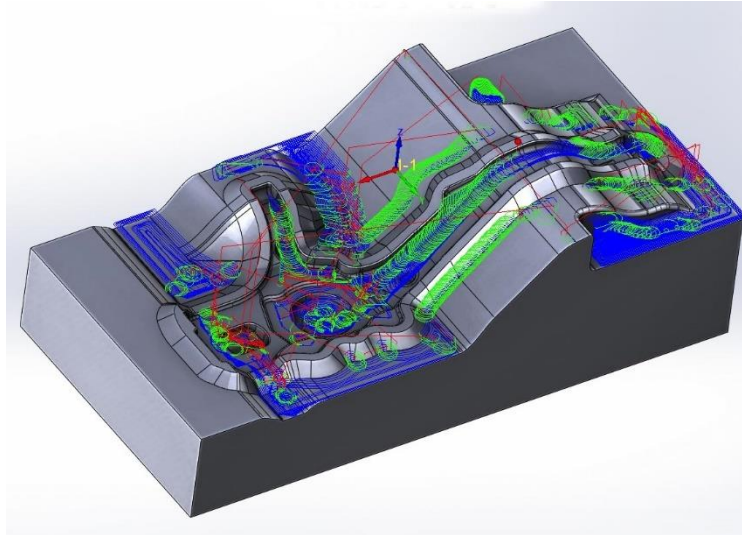
Obrázek 4: Konturové hrubování [7]

- Lineární hrubování – hrubovací strategie určená k odstranění velkého množství materiálu malým nástrojem bez překrytí stop nástroje. Nástroj se pohybuje po přímkách a jsou použity maximální dosažitelné řezné podmínky v dané operaci.



Obrázek 5: Lineární hrubování [7]

- Zbytkové hrubování – strategie k odběru zbytkového materiálu po přechodném hrubování tam, kam se nevešel větší nástroj. Program porovnává aktuální stav obrobení s konečným požadovaným tvarem. Tato strategie také může zahrnovat předchozí strategie. [7]



Obrázek 6: Zbytkové hrubování [7]

Z pokročilých hrubovacích strategií se začaly využívat tři základní postupy:

- Vysoce výkonné frézování – strategie používající nástroj, pro který lze nastavit velké hloubky řezu a následné optimalizaci posuvů a řezných rychlostí. Tato strategie dosahuje vysoké produktivity a nízkých nákladů.
- Frézování vysokým posuvem – strategie založená na vysokém posuvu na zub, malé hloubce řezu a střední řezné rychlosti, čímž se dosáhne velkého úběru materiálu za nízký čas. U této strategie je nutné použít nástroj s destičkami dobře odvádějícími teplo z břitu nástroje.
- Vysokorychlostní frézování – strategie, kdy je velký úběr materiálu dosažen zvýšením řezné rychlosti. Principem je nárůst teploty v místě řezu způsobený vysokou řeznou rychlostí, což vede k změknutí materiálu a snížení řezné síly.

V dnešních CAM softwarech jsou dodávány jak moderní hrubovací strategie, tak i tradiční strategie, i když nejsou tak výhodné. Důvodem může být omezení stroje v oblasti výkonu nebo řídicího systému neschopného zpracovat data nových technologií. Důvodem jsou také uživatelé, kteří nejsou do nových technologií zaučeni, popř. se ani zaučit nechtějí, odmítají je a pracují podle svých zažitých zvyků. [8]

3.2 Řezné podmínky

Podle obráběného materiálu, vybraného frézovacího nástroje a požadované jakosti obrobených ploch se volí určité řezné podmínky. Řeznými podmínkami se rozumí řezná rychlost v_c [m/min], posuv na zub f_z [mm] a často se udává i posuvová rychlost v_f [mm/min]. Například při hrubování se snažíme volit co největší posuv s ohledem na hloubku odebírané vrstvy, materiálu obrobku, vybraného nástroje a výkonu na vřetenu frézky.

- Řezná rychlost v_c je okamžitá rychlost hlavního řezného pohybu ostří vzhledem k obrobku:

$$v_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000}, \quad (3.1)$$

kde n jsou otáčky za minutu,
 D je průměr frézy v mm.

- Posuv na zub f_z je dráha obrobku, kterou urazí za dobu záběru jednoho zubu frézy:

$$f_z = \frac{f_n}{z}, \quad (3.2)$$

kde f_n je posuv na otáčku v mm,
 z je počet zubů frézy.

- Posuvová rychlost v_f je okamžitá rychlost posuvového pohybu ostří vzhledem k obrobku:

$$v_f = 10^{-3} \cdot f_n \cdot n. [4] \quad (3.3)$$

4 Optimalizace hrubování vývrtů v tělese převodovky

4.1 Společnost Wikov Industry a.s.

Společnost Wikov je na trhu už více jak 130 let. Přes 100 let se zabývá výrobou ozubených kol a mechanických převodovek. Převodovky jsou přímo ve firmě testovány a kontrolovány na většinu parametrů.



Obrázek 7: Logo firmy Wikov Industry a.s. [9]

Vyrábí převodovky pro:

- vodní, tepelnou, větrnou a přílivovou energetiku
- povrchové a hlubinné doly, těžbu ropy a plynu
- vodní, gumárenský, chemický a metalurgický průmysl
- cementárny a zpracování surovin
- kolejová vozidla
- rychloběžné aplikace.

Sídlo společnosti je v Praze a výrobní závody se nachází v Hronově (Wikov MGI a.s.), Plzni (Wikov Gear s.r.o.) a Zruči nad Sázavou (Wikov Sázavan s.r.o.).

Tato práce je dělána pro závod Wikov MGI a.s. v Hronově. Počátky strojírenského podniku v Hronově jsou od roku 1884. Po znárodnění v roce 1945 se z podniku stává ČKD Hronov, které v roce roce 2004 kupuje firma Wikov.

Tento podnik disponuje mnoha obráběcími CNC stroji jako jsou 4 soustruhy, 1 karusel, obrážka, 2 odvalovací frézky, 3 profilové brusky, 9 obráběcích center a 2 hrotové brusky. K tomu se zde nachází mnoho konvenčních strojů. Podnik také provádí tepelné zpracování všeho druhu. Všechny operace jsou kontrolovány měřicími přístroji na ozubení a 3D měřicími zařízeními. [9] [10]

4.2 Obráběná součást a vybraný prvek

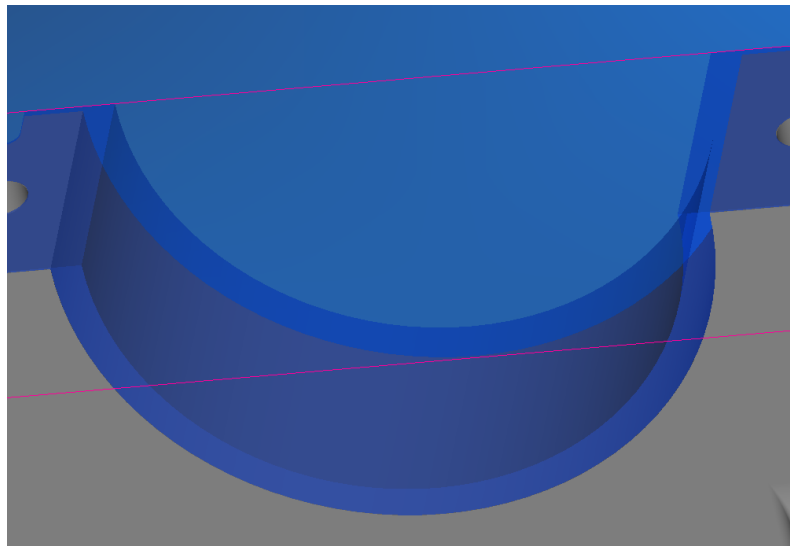
Pro tuto práci byla vybrána operace s jedním z nejdelších výrobních časů v celé výrobě firmy Wikov MGI a.s. Tou je hrubování vývrtů ve skříni převodovky o rozměrech přibližně 2000x2000 mm. V této skříni se nachází několik tvarově a rozměrově různých vývrtů. Vývrty jsou navíc různě natočeny, proto je nutné použít stroj s otočnou nástrojovou hlavou. Pro tuto práci byl vybrán základní tvar vývrtu o průměru 250 mm a délce 120 mm, ale snahou je vytvořit postup, od kterého půjde odvodit obrábění ostatních vývrtů.

Polotovarem je odlitek z materiálu tvárné litiny EN-GJS-400-15. Vývrty jsou předlity s přídávkem 10 mm na plochu. Počet vyrobených kusů je 40 za rok.

Protože je popis součásti skříně převodovky pro tuto práci nepodstatný, a také z důvodu know-how firmy, budu se dále zabývat pouze vybraným vývrtem a těleso skříně nebudu uvažovat.

Jelikož se jedná o operaci hrubování, nejsou na tuto obráběcí operaci kladeny výrazné požadavky, co se týče přesnosti výroby. Pouze je nutné zajistit co nejvíc konstantní výšku zbytkového materiálu pro dokončování. Dokončovací operace probíhá vyvrtávací tyčí v sestavě na horizontální frézce.

K návrhu nových obráběcích strategií budu používat komplexní CAD/CAM program TopSolid od společnosti Missler Software. Z tohoto programu budu následně brát strojní čas pro další výpočty.



Obrázek 8: Vybraný prvek vývrtu se zvýrazněným přídávkem na obrábění

4.2.1 Materiál součásti

Součást je vyrobená z litiny s označením EN-GJS-400-15. Jedná se o litinu s kuličkovým grafitem, nazývanou též tvárná litina, s feritickou strukturou.

Tato litina vyniká dobrou obrobiteľnosť a dobrými mechanickými vlastnosťmi viz. tabulka 1. [11]

Z hlediska obrábění spadá tento materiál do skupiny materiálů obrobků K2. [12]

Tabulka 1: Mechanické vlastnosti tvárné litiny EN-GJS-400-15 [11]

Mez kluzu $R_{p0,2}$ [Mpa]	Mez pevnosti R_m [Mpa]	Tažnost A [%]	Tvrđost HB
250	400	15	130-180

4.3 Výrobní zařízení

Součást je obráběna na stroji FRFQ 250-VE/A8 od výrobce TOS Kuřim. To je CNC portálová frézka s portálem horního typu, kde se pohybuje pouze portál a stůl je pevný. Na portálu je umístěna frézovací hlava schopná obrábět v 5 osách, což je vidět na obr. 10.



Obrázek 9: TOS FRFQ 250-VE/A8 ve firmě Wikov MGI a.s.

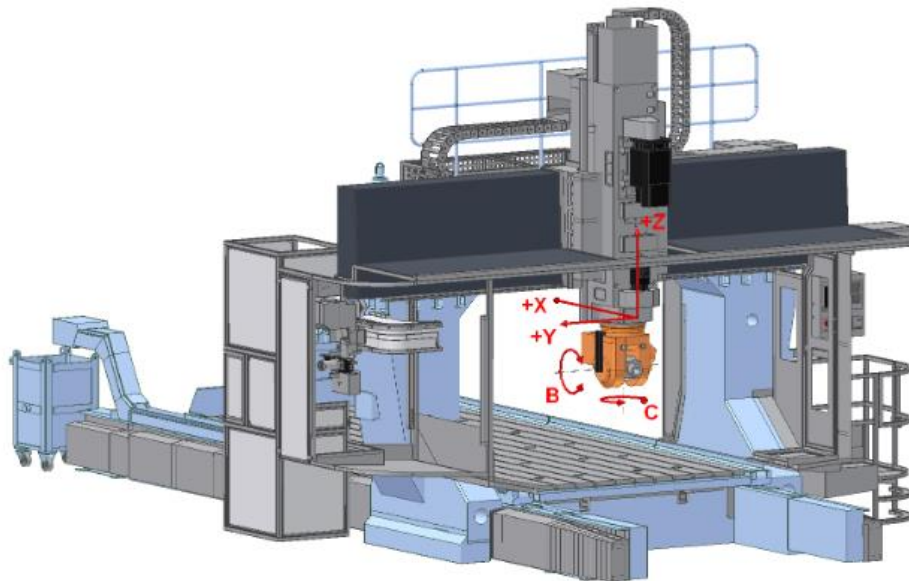
Portálové frézky jsou určeny k frézování rovinných ploch a složitých rozměrných dílů. Stroj se skládá z pevného stolu, na který se upíná obrobek, a pohyblivého portálu, na kterém je frézovací hlava. Konstrukce portálu musí být pevná, aby nedocházelo k nepřesnostem při obrábění v důsledku vibrací portálu.

Použití portálových frézek se rozmohlo s příchodem NC a CNC technologií, kdy je možné používat pohyb ve více osách a tím obrábět tvarově složitější obrobky. Další výhody jsou v automatizované výměně nástrojů a snížení nároků na obsluhu díky ovládacím programům. [13]

Řídicím systémem stroje je Sinumerik 840D od společnosti Siemens. Jedná se o systém vhodný prakticky pro všechny aplikace dle požadavků zákazníka. Vyznačuje se vysokým výkonem a flexibilitou a integrovanou bezpečnostní funkcí pro člověka. Dokáže ovládat 2 až 31 os. [14]

Parametry stroje:

- Rozměry pracovní plochy stolu: 8000x2500 mm
- Podélný zdvih X: 7000 mm
- Příčný zdvih Y: 3300 mm
- Svislý zdvih Z: 1200 mm
- Průchodnost mezi stojany: 2950 mm
- Maximální kroutící moment na vřetenu: 1000 Nm
- Maximální síla posuvu: 30000 N
- Maximální otáčky vřetene: 4000 ot/min
- Rychloposuv: 10 m/min
- Upínací kužel vřetena: ISO 50
- Výkon: 30 kW
- Rozměry stroje dxšv: 11122x6534x5450 mm
- Hmotnost stroje: 59000 kg [15]

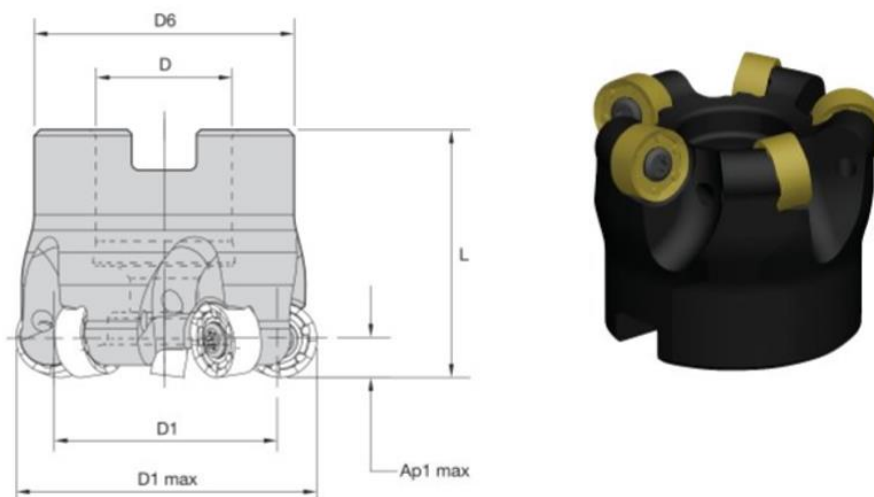


Obrázek 10: Schéma portálové frézky TOS FRFQ 250 [15]

4.4 Vybrané nástroje

4.4.1 Kopírovací fréza

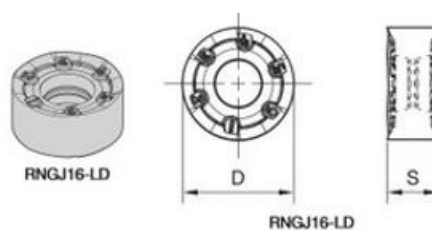
Jako první nástroj pro hrubování vývrtů je použita kopírovací nástrčná fréza Rodeka™ 16 od výrobce Kennametal se čtyřmi oboustrannými kruhovými břitovými destičkami s 12 pozicemi pootočení. Fréza je vhodná ke kapsování a kopírování.



Objednací číslo	Katalogové číslo	D1 max	D1	D	D6	L	Ap1 max	Z	max. zavrtávací úhel	kg	max. otáčky	břítová destička 1
5153838	KDR52Z04S22RN16	52	36	22	42	50	4,0	4	.4°	0,39	26000	RNGJ1605M0

Obrázek 11: Tvar a rozměry frézy Kennametal Rodeka 16 [12]

Na tělese frézy jsou oboustranné kruhové břitové destičky RNGJ16-LD taktéž od společnosti Kennametal. [12]



Katalogové číslo	D	S	hm	počet řezných hran
RNGJ1605M0ELDJ	16,00	5,52	0,04	12

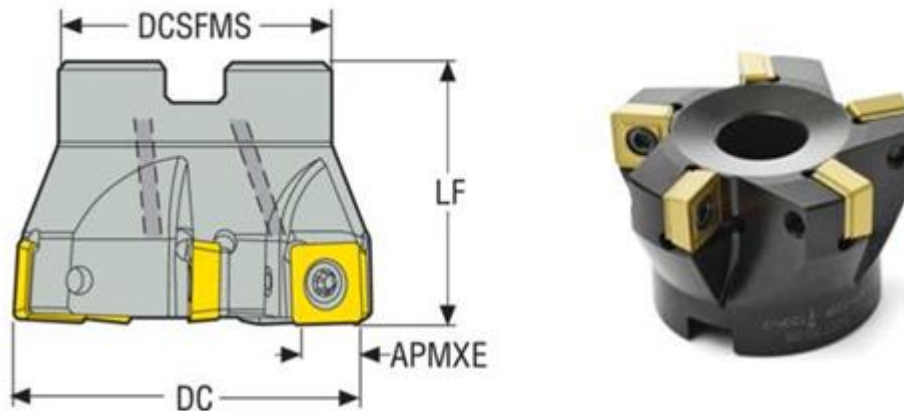
Obrázek 12: Tvar a rozměry břitových destiček Kennametal RNGJ16-LD [12]

Cena frézy se pohybuje okolo 13000,- Kč a jedné destičky 650,- Kč. Trvanlivost destiček byla pro používané řezné podmínky naměřena 161 minut.

Tato fréza bude nadále označována jako „nástroj 1“.

4.4.2 Ponorná fréza

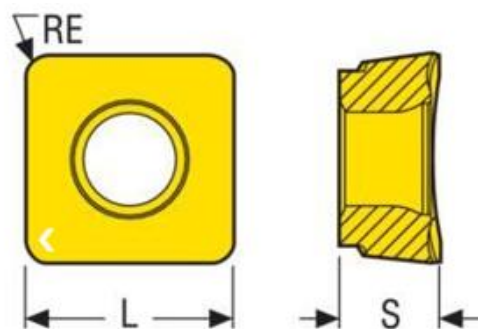
Druhý vybraný nástroj je ponorná nástrčná fréza Seco R220.79-0125-12 s osmi břitovými destičkami. Ponorné frézy jsou stavěné pro velký úběr materiálu co nejrychlejším způsobem, tudíž ideální pro 3D hrubovací operace.



Objednací kód	Typ upnutí	Rozměry v mm								Destička
		APMXE	DC	DCSFMS	DCB	LF				
R220.79-0125-12	Třm	11,0	125,0	90,0	40,0	63,0	8	2,9	6300	SC.1206

Obrázek 13: Tvar a rozměry frézy Seco R220.79-0.125-12 [16]

Na fréze jsou břitové destičky Seco SCET120612T-M14 MK1500. Destičky jsou jednostranné se čtyřmi břity. Jsou vhodné k obrábění litin. [16]



Objednací kód	RE	Úhel čela	Rozměry v mm	
			L	S
SCET120612T-M14	1,2	15,0 °	12,7	6,35

Obrázek 14: Tvar a rozměry břitových destiček Seco SCET120612T-M14 MK1500 [16]

Cena frézy se pohybuje okolo 25000,- Kč a jedné destičky 600,- Kč. Trvanlivost destiček byla pro používané řezné podmínky naměřena 320 minut.

Tato fréza bude nadále označována jako „nástroj 2“.

4.5 Současná obráběcí metoda

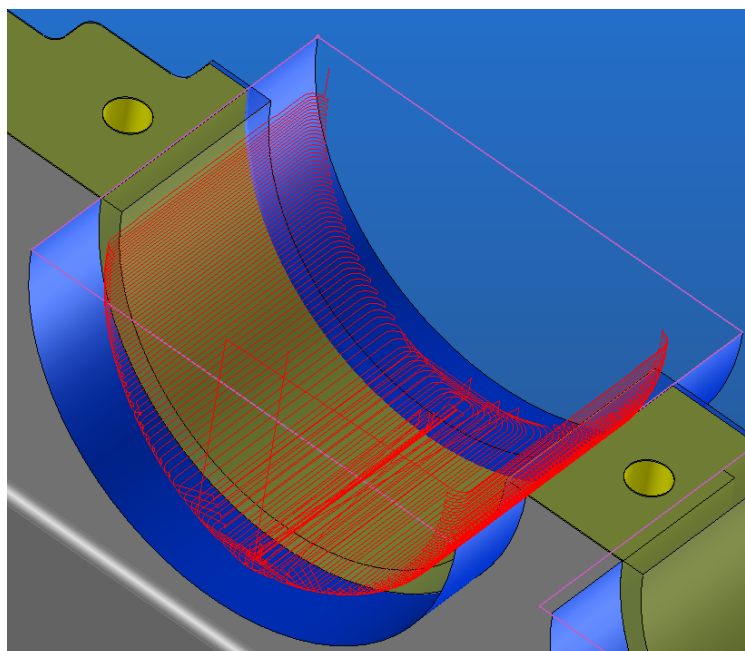
Vybraná operace už byla jednou ve firmě Wikov MGI a.s. optimalizována změnou frézovací strategie a řezných podmínek s velice efektivním účinkem. Ale i tak je stále strojní čas při obrábění vývrtů příliš dlouhý. Navíc při použití současné metody zůstává na obrobku nestejná výška zbytkového materiálu ve formě řádků, jak je jasně vidět na obr. 17. Tento stav není příliš vhodný pro následné dokončování.

Nyní je na tuto metodu použita hrubovací strategie frézování s vysokým posuvem a s konstantní tloušťkou třísky. Jedná se o 3D řádkování kopírující válcovou plochu vývrtu. Nástroj obrábí v obou směrech. Dráha nástroje je vidět na obr. 15.

Obrábění probíhá nástrojem 1, který snese použité řezné podmínky a je vhodný k tomuto druhu obrábění. U této metody je možné použít 8 pootočení destičky díky malé tloušťce třísky, a tudíž nízkému záběru břitu. Použité řezné podmínky jsou uvedeny v tabulce 2. Řezná rychlost i posuv jsou zvoleny vyšší a tloušťka třísky nižší než při klasickém obrábění.

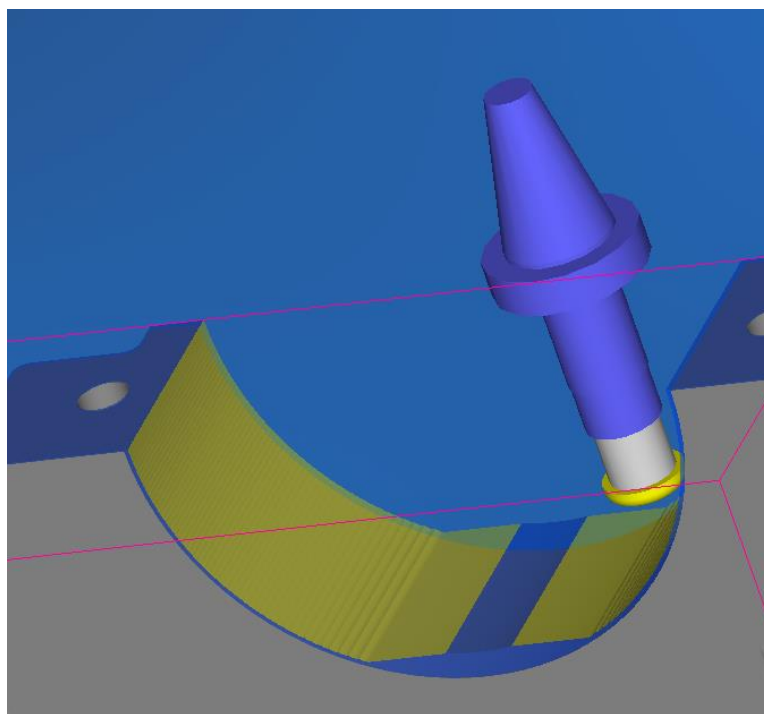
Tabulka 2: Řezné podmínky současného stavu obrábění

Řezná rychlost [m/min]	Otáčky [min^{-1}]	Posuv na zub [mm]	Tloušťka třísky (Z krok) [mm]	Strojní čas [min]
300	1836,4	0,4	3	13,45

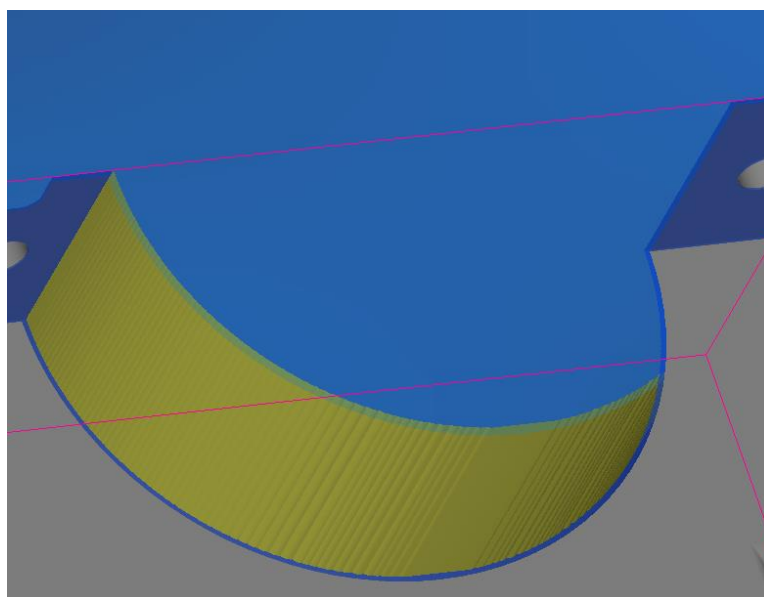


Obrázek 15: Dráhy nástroje při obrábění současnou metodou

Obrábění lze rozdělit do tří fází. V prvních dvou fázích se obrobí boční strany vývrtu, jak je vidět na obr. 16 a nakonec se obrobí dno vývrtu, viz. obr. 17.



Obrázek 16: Stav po dvou fázích obrábění současnou metodou



Obrázek 17: Výsledný stav po obrábění současnou metodou

4.6 Navržené metody obrábění

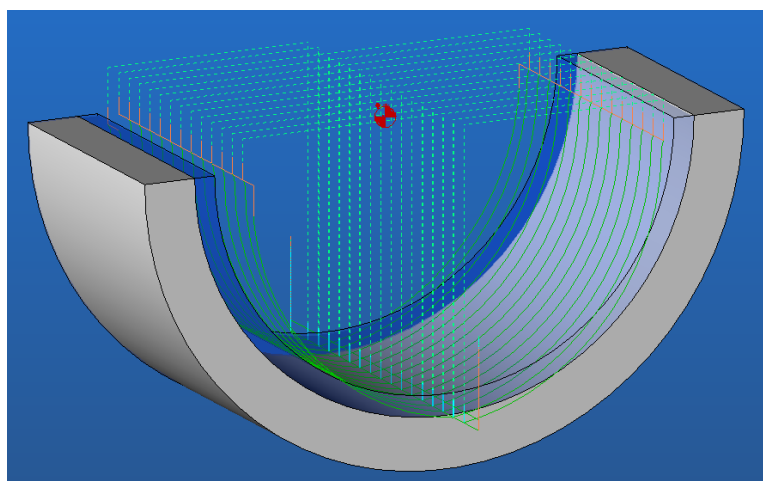
4.6.1 Zapichování

V tomto návrhu byla použita metoda zapichovacího hrubování. Ta spočívá v axiálním zavrtávání nástroje do materiálu a nástroj kopíruje požadovanou plochu vývrtu. Dráhy nástroje lze vidět na obr. 18. Rozteč mezi drahami je 10 mm, což zanechává zbytkovou výšku neobrobeného hřebínku 4,26 mm.

Pro tuto metodu byl zvolen nástroj 1 vzhledem k jeho geometrii schopné zavrtávat se a současně kopírovat danou plochu. Vzhledem k záběru nástroje je u této metody možné destičku pootočit 6x. Řezné podmínky byly určeny dle tabulek výrobce a jsou uvedeny v tabulce 3. Tyto řezné podmínky budou využívány stejné i pro další použití tohoto nástroje.

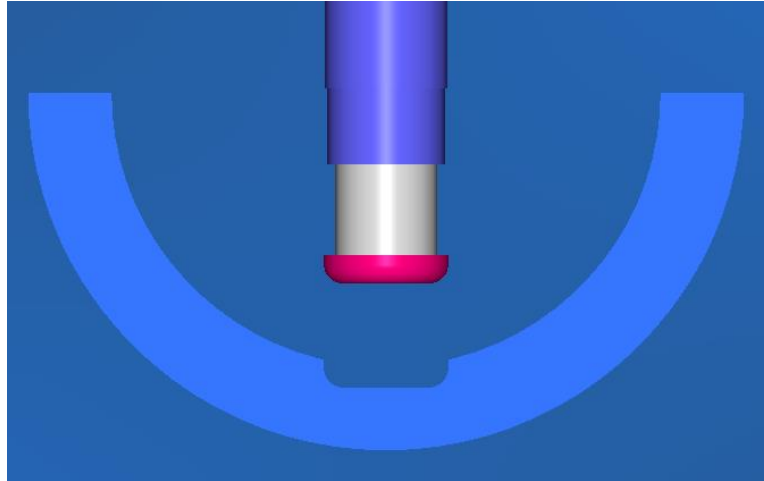
Tabulka 3: Řezné podmínky u metody planžování

Řezná rychlost [m/min]	Otáčky [min^{-1}]	Posuv na zub [mm]	Strojní čas [min]
285	1745	0,15	8

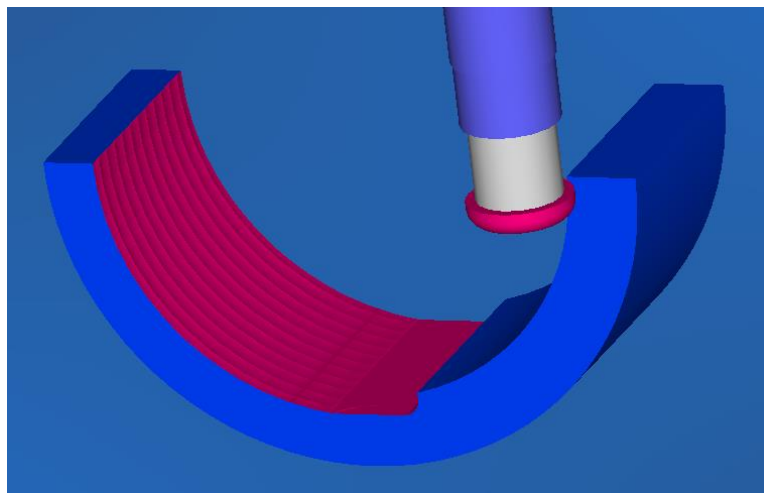


Obrázek 18: Dráhy nástroje při obrábění metodou planžování

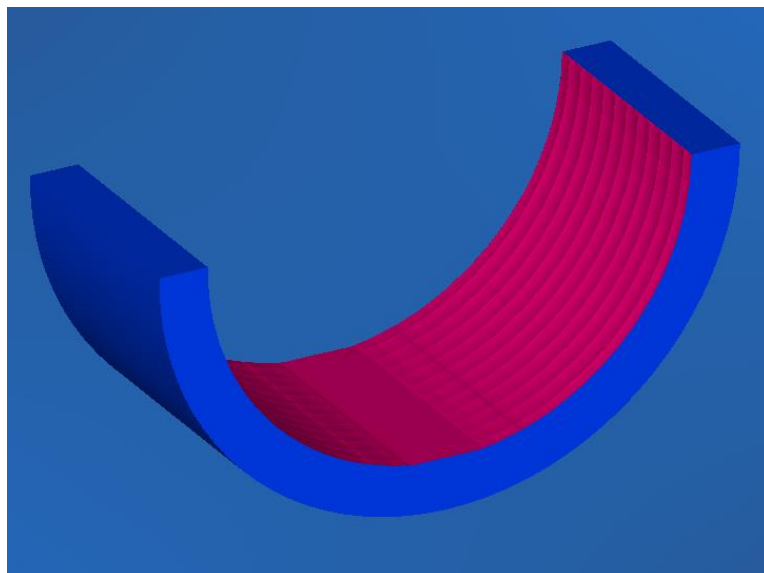
V první fázi se vyfrézuje drážka na dně vývrtu, aby nástroj při zapichování na dně vývrtu neobráběl ve dvou směrech, což by vedlo k zvýšení jeho zatížení a nutné úpravě řezných podmínek v tomto místě. To lze vidět na obr. 19. Jelikož nástroj není uzpůsoben k axiálnímu obrábění ve zpětném směru, tak se v další fázi nejprve obrobí jeden bok vývrtu (obr. 20) a až následně druhý (obr. 21).



Obrázek 19: Stav po první fázi obrábění metodou planžování



Obrázek 20: Stav po druhé fázi obrábění metodou planžování



Obrázek 21: Výsledný stav po obrábění metodou planžování

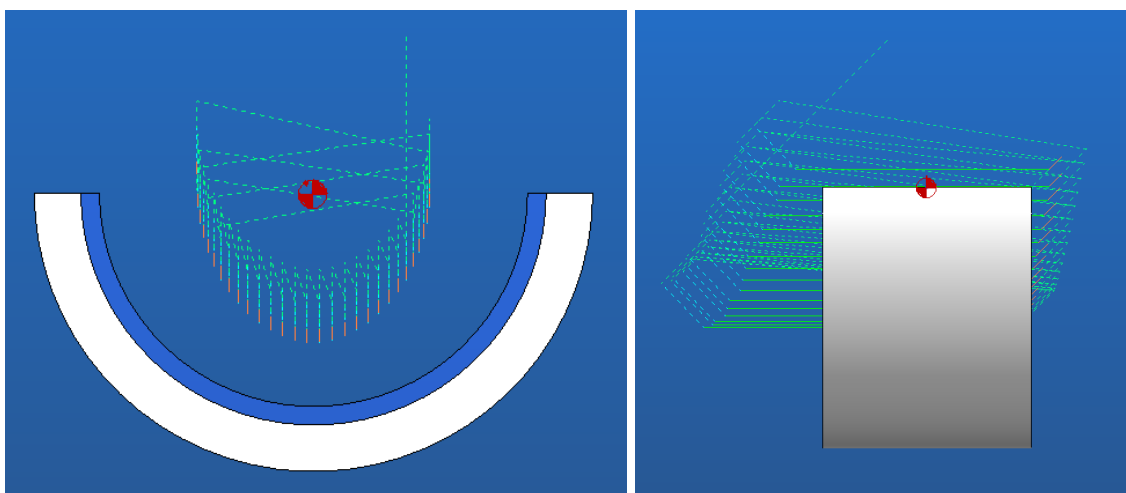
4.6.2 Řádkování s vykloněnou hlavou

Další navrženou metodou je řádkování s vykloněnou nástrojovou hlavou v ose B o 45° . Nástroj se zavrtává pod úhlem a jednotlivými řezy kopíruje plochu vývrtu. Vzhledem k naklonění nástroje není možné obrábět v obou směrech a nástroj proto vždy přejíždí zpět a obrábí jen z jedné strany. Dráhy nástroje jsou zobrazeny na obr. 22

Vzhledem ke způsobu obrábění v této metodě byl vybrán nástroj 2, který je schopný se zavrtávat pod úhlem a díky velkému průměru nezanechává velkou zbytkovou výšku materiálu, což lze vidět na obr. 25. To sebou ale nese snížení otáček nástroje viz. tabulka 4 s řeznými podmínkami. Jelikož je v záběru pouze 1 břit destiček, využívá se všech 8 pootočení destiček.

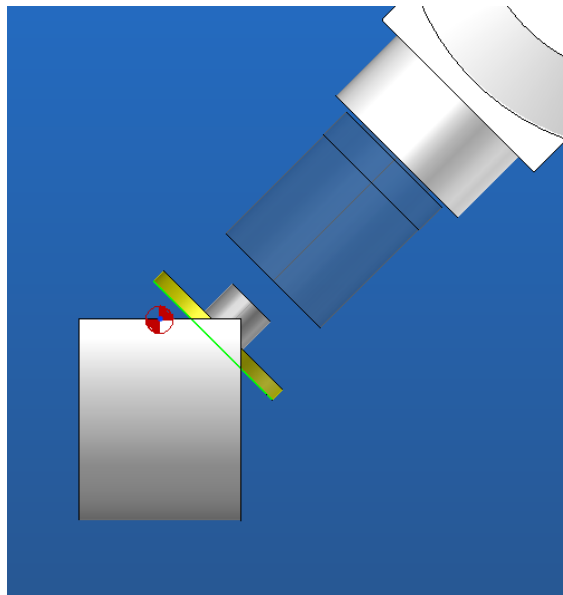
Tabulka 4: Řezné podmínky metody s vykloněnou hlavou

Řezná rychlost [m/min]	Otáčky [min^{-1}]	Posuv na zub [mm]	Strojní čas [min]
240	611,15	0,18	7,45

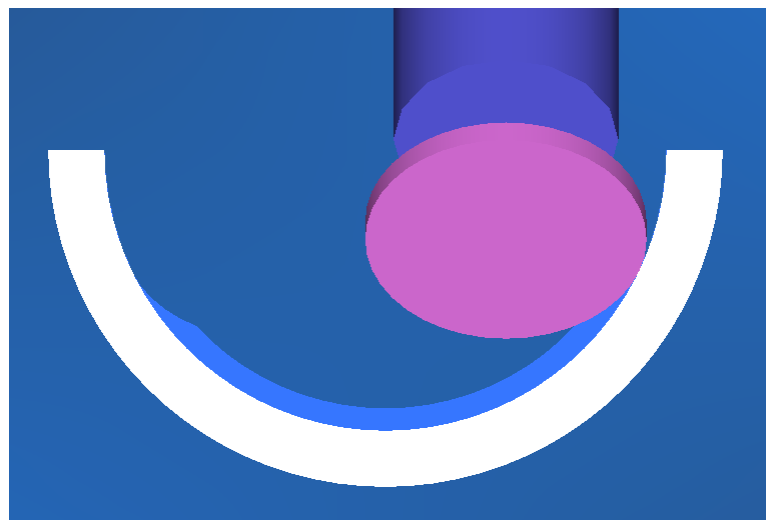


Obrázek 22: Dráhy nástroje při frézování metodou s vykloněnou hlavou

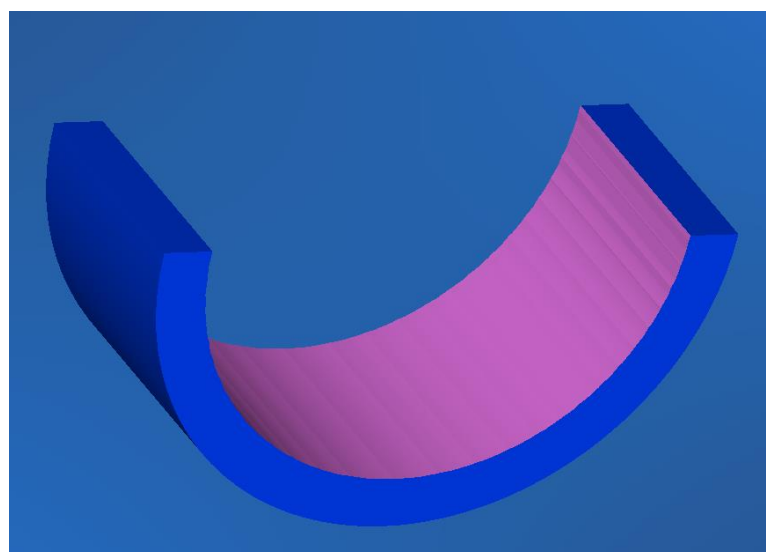
Jako nejjednodušší řešení se zdá postupně obrábět od jednoho kraje k druhému, ale při obrábění v druhé polovině vývrtu, kdy fréza postupuje od dna vzhůru, by došlo díky naklonění ke kolizi nástroje v horní části. Proto se nejdříve postupně obrobí boky vývrtu až do úrovně, kde už kolize nemůže nastat. To je zobrazeno na obr. 24. Vzhledem k tomu, že nástroj po každém řezu přejíždí zpět, tak probíhá obrábění boků současně, vždy se střídá bok po řezu. To je vidět i na první části obrázku 22. Poté se už zbylý přídavek obrobí posupně od jednoho kraje k druhému. Výsledný stav je na obr. 25.



Obrázek 23: Detail na vykloněnou hlavu nástroje



Obrázek 24: Stav po první fázi obrábění metodou s vykloněnou hlavou



Obrázek 25: Výsledný stav po obrábění metodou s vykloněnou hlavou

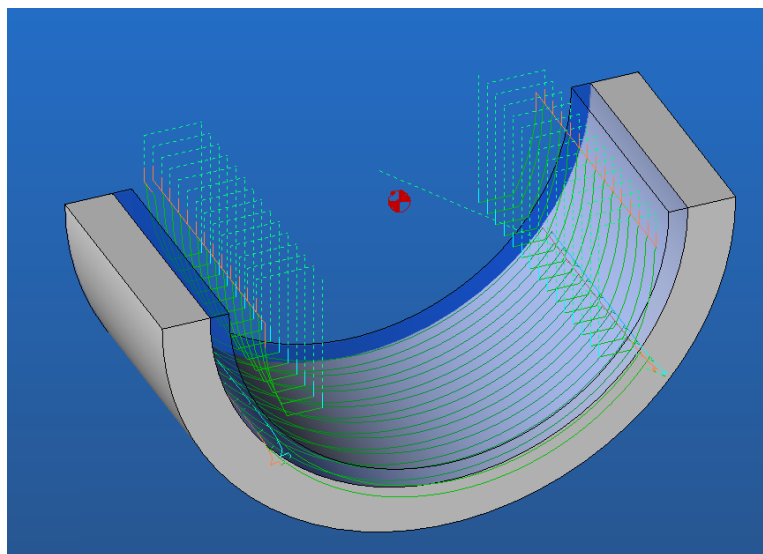
4.6.3 4D kopírování kontury

Třetí navržená metoda je 4D kopírování kontury. Nástroj je díky otočné ose B stále ve směru normály plochy vývrtnu a pohybem osy B obrábí plochu vývrtnu z jedné strany na druhou tam a zpět. Kvůli velikosti nástrojové hlavy je nutné nejdříve použít na část boku vývrtnu zapichovací hrubování, to bude popsáno níže i s obrázkem. Dráhy nástroje jsou zobrazeny na obr. 26. Zbytkový materiál je ve formě hřebínků stejné velikosti jako u metody zapichování.

Pro tuto metodu byl vybrán nástroj 1, jelikož se jedná o obrábění kontury a jeho menší rozměry a kruhové destičky zajistí lepší obrobení plochy. Díky dvěma různým pohybům, a tudíž různým záběrům nástroje, je možné využít 6 pootočení destiček. Základ řezných podmínek byl zvolen pro tento nástroj už v předminulé operaci, ale zde je nutné omezit posuvovou rychlost, tudíž i otáčky při vyklopení hlavy v ose B při více jak 30°. Řezné podmínky jsou níže v tabulce 5.

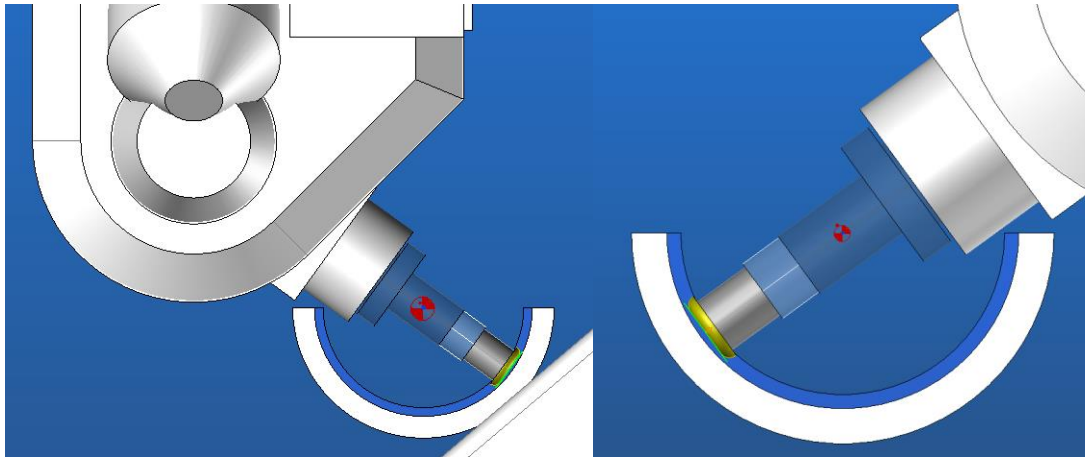
Tabulka 5: Řezné podmínky metody 4D kopírování kontury

Řezná rychlost [m/min]	Otáčky [min ⁻¹]	Otáčky při B>30° [min ⁻¹]	Posuv na zub [mm]	Strojní čas [min]
285	1745	783	0,15	9

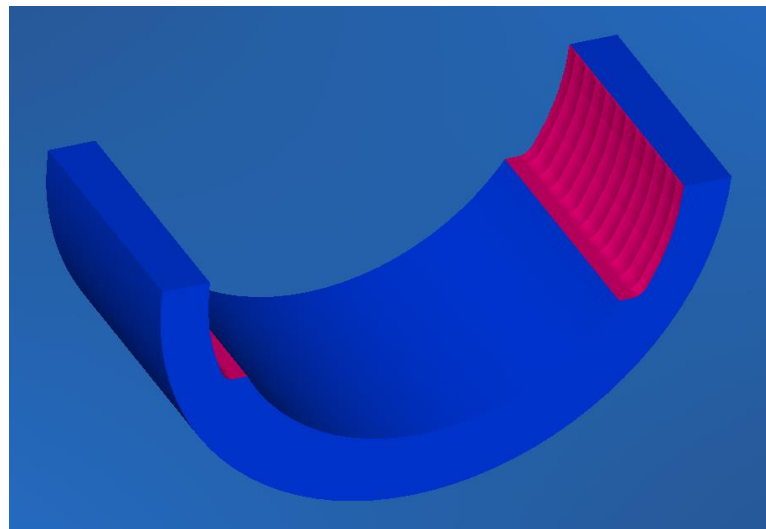


Obrázek 26: Dráhy nástroje při obrábění metodou 4D kopírování kontury

Jak už bylo zmíněno výše, v první fázi této metody je nutné zapichovat boky vývrtnu, protože otočná nástrojová hlava frézky je moc velká a při obrábění jednoho boku vývrtnu by bourala do druhého boku. To lze vidět na obr. 27. Proto se postupně oba boky obrobí na míru 54° od dna vývrtnu viz. obr. 28. Následně už se obrábí zbylý materiál ve vývrtnu kruhovým pohybem. Stav po obrábění nebylo možné zobrazit z důvodu chybějícího pluginu softwaru pro zobrazení stavu obrábění při použití více jak 3 os současně.



Obrázek 27: Detail na vykloněnou hlavu nástroje a její rozmezí

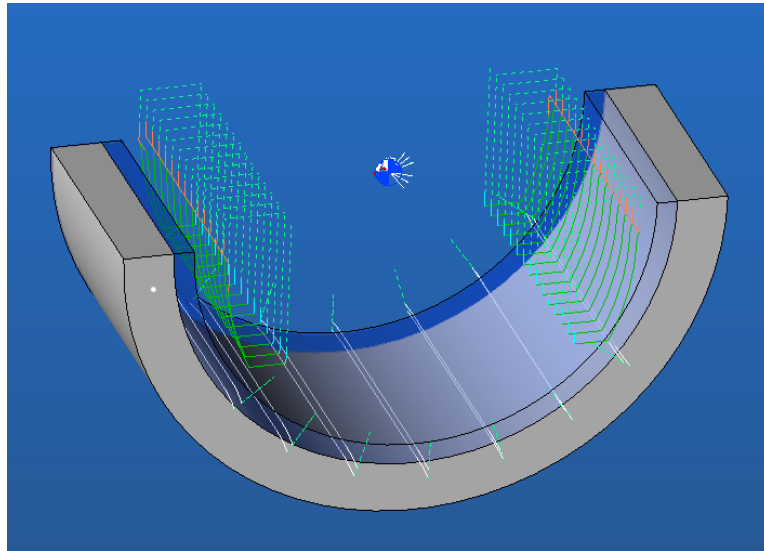


Obrázek 28: Stav po první fázi obrábění metodou 4D kopírování kontury

4.6.4 4D řádkování

Poslední navržená metoda vychází z principu minulé metody 4D kopírování kontury. Nástroj je zde také ve směru normály plochy vývrtu a stejně tak se zde musí část boků vývrtů zapichovat. Hlavní obráběcí pohyb je ale jiný. Ten spočívá v řádkování po délce vývrtu ve obou směrech. Rozteč mezi drahami je $17,5^\circ$ a nezanechává žádný hřebínek, ale materiál mezi spodkem frézy a plochou vývrtu. Dráhy nástroje lze vidět níže na obr. 29.

Tato metoda taktéž využívá nástroj 1 z důvodu menšího průměru a kruhových destiček lépe kopírujících obráběnou plochu. Stejně jako v minulém případě je díky dvou různým pohybům možné využít pouze 6 pootočení destiček. Řezné podmínky jsou stejné jako u minulé metody v tabulce 5. Pouze se liší strojním časem, který je 8,5 min.

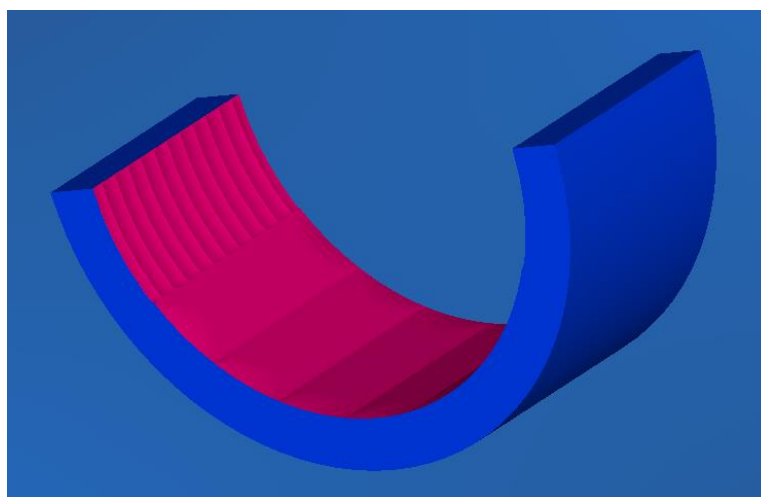


Obrázek 29: Dráhy nástroje při obrábění metodou 4D řádkování

Stejně jako u minulé metody se nejdříve zapichují boky vývrtů na míru 54° od dna vývrtu kvůli velikosti nástrojové hlavy, viz minulé metoda a obrázky 27 a 28. V další fázi už probíhá samotné řádkování po obvodu plochy vývrtů od jedné zapíchnuté strany ke druhé. To je znázorněno na obrázku 30. Na obrázku 31 je pak konečný stav po obrábění touto metodou.



Obrázek 30: Obrábění druhé fáze metodou 4D řádkování



Obrázek 31: Výsledný stav po obrábění metodou 4D řádkování

4.7 Vyhodnocení

Hlavním požadavkem na optimalizaci postupu hrubování bylo snížení strojního času. To koresponduje i s hlavním cílem hrubování, a to odebrání co nejvíce materiálu za co nejkratší čas. Srovnávací strojní čas v této práci se bere z CAM software, ale ten neuvažuje zrychlení a zpomalení posuvů, roztáčení vřetena apod., tudíž skutečný čas bude vyšší přibližně o 10%.

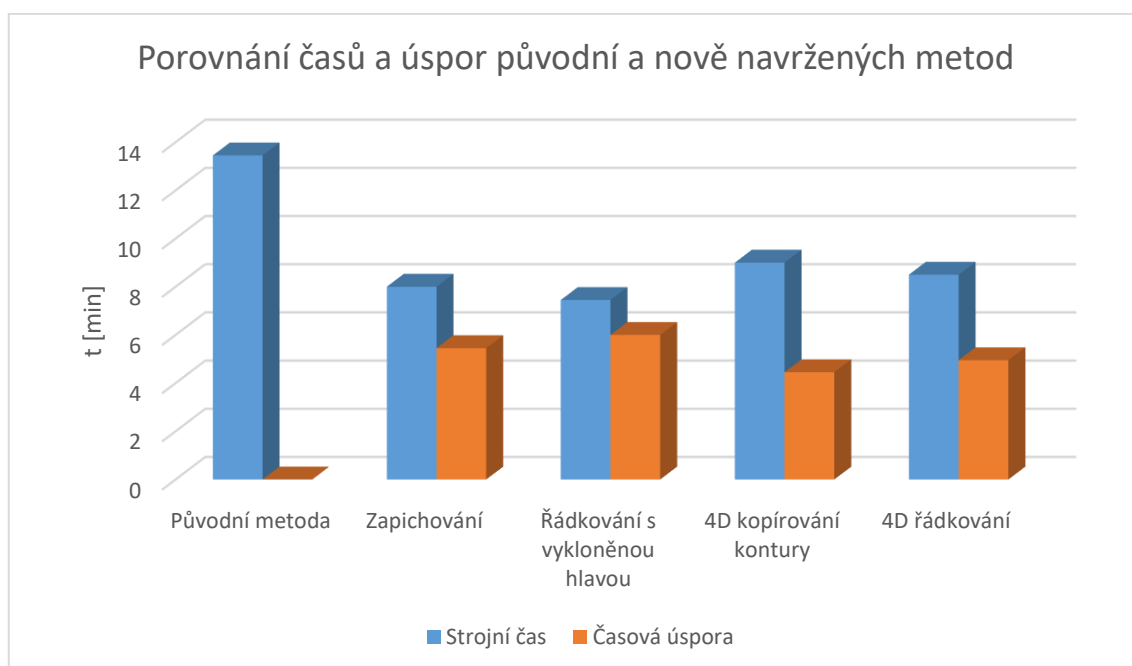
V tabulce 6 jsou uvedeny strojní časy jednotlivých metod, cena této operace z hlediska strojního času a náklady na destičky na operaci. Cena je vypočtena z hodinové sazby stroje 2000,- Kč, která byla vypočtena ve firmě Wikov MGI a.s. Tato sazba byla dána, její výpočet vzhledem k citlivým údajům firmy není v této práci uveden. Náklady na destičky jsou vypočteny z cen z kapitoly 4.4, počtu destiček na fréze, možností pootočení destiček v dané metodě a času použití vzhledem k jejich trvanlivosti.

Tabulka 6: Strojní čas a náklady původní a nově navržených metod

Metoda	Strojní čas [min]	Cena operace [Kč]	Náklady na břitové destičky na operaci [Kč]
Původní	13,45	448,3	27,2
Zapichování	8	266,6	21,5
Řádkování s vykloněnou hlavou	7,45	248,3	27,9
4D kopírování kontury	9	300	24,2
4D řádkování	8,5	283,3	22,9

Tabulka 7: Úspory nově navržených metod

Metoda	Časová úspora [min]	Cenová úspora za čas [Kč]	Cenová úspora za destičky [Kč]	Celková cenová úspora [Kč]
Zapichování	5,45	181,7	5,7	187,4
Řádkování s vykloněnou hlavou	6	200	-0,7	199,3
4D kopírování kontury	4,45	148,3	3	151,3
4D řádkování	4,95	165	4,3	169,3



Z výše uvedené tabulky a grafu je vidět, že nejkratšího strojního času a největší úspora je dosaženo metodou řádkování s vykloněnou hlavou. Provedená úspora činí 199,3 Kč na vývrt, což při počtu 13 vývrtů v obou polovinách tělesa převodovky a počtu 40 vyrobených kusů za rok činí roční úsporu 207272,- Kč. Snížení strojního času navíc pomůže při přetížení stroje naplánovanými pracemi. U nákladů na břitové destičky u metody řádkování s vykloněnou hlavou nedochází k úspoře, ale ke ztrátě 0,7 Kč na vývrt. Tato ztráta je ale zanedbatelná.

Vzhledem k výskytu různých tvarů vývrtů v tělese převodovky, kdy některé mají vnitřní osazení nebo vybrání na kraji, není metoda řádkování s vykloněnou hlavou vhodná, jelikož s ní nejde tyto tvary obrobit. Pro tyto tvary je tedy vhodná metoda zapichování, se kterou lze obrábět i různé tvarové odchylky. Tato metoda má druhou největší úsporu v hodnotě 187,4 Kč, to činí roční úsporu 194896,- Kč. U této metody dochází k největší úspoře na destičkách nástroje.

Co se týče těles nástroje, tak to u nástroje 2 je skoro dvojnásobně dražší než u nástroje 1. Cena těles není do výpočtu zahrnuta, jelikož tělesa vydrží mnoho obrábění bez výměny. Navíc jsou ve firmě používána i pro jiné operace, tudíž by byly i tak koupeny. Tato cena by se uvažovala pouze, pokud by šlo o jednorázovou nebo malosériovou zakázku a tělesa nebyly v majetku firmy.

Vedlejší časový požadavek na čas a náročnost práce programátora stroje je nejlépe splněn u metody zapichování, ale ani u zbylých metod není náročnost, a s tím spojené časové zatížení, nijak velké, pokud je programátor dostatečně znalý.

Druhý požadavek na snížení rozdílů výšek zbytkového materiálu je nejlépe splněn u metod řádkování s vykloněnou hlavou a 4D řádkování. U zbylých metod zbývá vysoký neobrobený hřebínek. Všechny metody ale byly programovány tak, aby vyhovovaly závěrečnému dokončování.

5 Závěr

Hlavním cílem této práce bylo optimalizovat proces hrubování vývrtů v tělese převodovky. Optimalizace spočívala v návrhu hrubovací metody, která by snížila strojní čas a tím i náklady na výrobu.

V první teoretické části práce jsem shrnul, čím se zabývá a jak probíhá optimalizace obráběcího procesu v praxi.

V další části jsem popsal proces frézování a hrubování včetně základních hrubovacích strategií. Součástí toho je i problematika sousledného a nesousledného frézování, tvorby třísek a volby řezných podmínek.

Následoval popis součásti a vybraného prvku včetně specifikace materiálu obrobku. V dalším kroku je popis vybraného stroje, který bude použit pro následné hrubování v praxi, a dvou nástrojů vhodných pro navržené metody.

Hlavní část práce obsahuje rozbor současného stavu obrábění a následný návrh čtyř nových metod hrubování včetně jejich popisu, zvolených řezných podmínek a obrazové dokumentace. V úplně poslední části práce je technicko-ekonomické zhodnocení metod. Z toho vychází, že největší úspory je dosaženo použitím metody řádkování s vykloněnou hlavou, popř. pro tvarově složitější vývrty metody zapichování. Obě tyto metody navíc nejsou složité pro naprogramování, tudíž zbytečně více časově nezatěžují programátora stroje. Při použití metody řádkování s vykloněnou hlavou vychází úspora 6 minut, což je úspora 199,3 Kč na jedno hrubování vývrtu o průměru 250 mm a délce 120 mm oproti současnému stavu hrubování. To ročně ušetří přibližně 207272,- Kč. U metody zapichování vychází úspora 5,45 min, což ušetří ročně až 194896 Kč, a navíc dochází i k úspoře destiček nástroje.

Samotná výroba v praxi bohužel nestihla proběhnout, protože mezi naprogramováním a doladěním metod v CAM softwaru a odevzdáním práce nebyla tato součást ve výrobním plánu podniku.

Seznam použité literatury

- [1] MÁDL, Jan a Ivo KVASNIČKA. *Optimalizace obráběcího procesu*. Praha: České vysoké učení technické, 1998. ISBN 80-010-1864-6.
- [2] ZEMČÍK, Oskar. *Technologická příprava výroby*. 1. vyd. Brno: CERM, s.r.o., 2002. ISBN 80-214-2219-X.
- [3] SKOPEČEK, Tomáš. Frézovací strategie při výrobě forem a zápusťek. *MM Průmyslové spektrum*. Praha: MM publishing, 2005, 2005(5), 22.
- [4] MÁDL, Jan. *Technologie obrábění*. Vyd. 2., přeprac. V Praze: Nakladatelství ČVUT, 1999. ISBN 978-80-01-03752-2.
- [5] KAVKOVÁ, D. Frézování: Základní charakteristika frézování. In: <http://www.docplayer.cz> [online]. 2016 [cit. 2019-06-25]. Dostupné z: <http://docplayer.cz/45994764-Zakladni-charakteristika-frezovani-frezovani-triskove-obrabeni-rovinnych-i-vnitrnich-a-vnejsich-tvarovych-ploch-stroje-frezky-nastroje-frezy.html>
- [6] STANĚK, Vlastimil. CAD/CAM historie a současnost (2) [online]. [cit. 2019-06-26]. Dostupné z: <https://www.t-support.cz/kat/cad-cam-historie-a-soucasnost-2>
- [7] 3D HSM vysokorychlostní frézování. In: Solidcam.com [online] [cit. 2019-06-26]. Dostupné z: <https://www.solidcam.com/cs/produkty/0/3d-hsm-vysokorychlostni-frezovani/>
- [8] DE VOS, Patrick. Jak dosáhnout vysoké produktivity při frézování? *MM Průmyslové spektrum*. Praha: MM publishing, 2013, 2013(9), 102.
- [9] Profil společnosti. In: *Wikov.com* [online]. Praha: Wikov Industry, 2018 [cit. 2019-04-27]. Dostupné z: <https://www.wikov.com/cs/ke-stazeni>
- [10] Výrobní možnosti a strojní vybavení Wikov MGI. In: *Wikov.com* [online]. Hronov: Wikov Industry, 2016 [cit. 2019-04-27]. Dostupné z: <https://www.wikov.com/cs/ke-stazeni>
- [11] MACEK, Karel a Petr ZUNA. *Nauka o materiálu*. Praha: České vysoké učení technické, 1996. ISBN 80-010-1507-6.
- [12] KENNAMETAL INC. *Master Katalog: Část druhá | Rotační nástroje*. Kennametal, 2017.
- [13] ČEJKA, Martin. Portálové frézky Frézka jako jeden z nejzákladnějších strojů. *MM Průmyslové spektrum*. Praha: MM publishing, 2017, 2017(3), 62.

[14] Řídící systémy Sinumerik 840D. In: *Siemens.cz* [online]. [cit. 2019-04-27].
Dostupné z:
<http://www1.siemens.cz/ad/current/index.php?vw=0&ctxnh=8af9163077&ctxp>

[15] ŠVESTKA, Martin. TOS KUŘIM - OS, a.s. *Obráběcí centrum s posuvovým portálem FRFQ 250 - VE/A8*. Kuřim, 2010

[16] SECO TOOLS AB. *Katalog a technický průvodce 2019.1 Frézování*. Seco, 2019.

Seznam obrázků

Obrázek 1: Frézování a) sousledné, b) nesousledné [5].....	12
Obrázek 2: Čelní frézování [5].....	12
Obrázek 3: Oblast vhodného utváření třísek [1]	12
Obrázek 4: Konturové hrubování [7]	14
Obrázek 5: Lineární hrubování [7].....	14
Obrázek 6: Zbytkové hrubování [7]	15
Obrázek 7: Logo firmy Wikov Industry a.s. [9].....	17
Obrázek 8: Vybraný prvek vývrtu se zvýrazněným přídavkem na obrábění.....	18
Obrázek 9: TOS FRFQ 250-VE/A8 ve firmě Wikov MGI a.s.	19
Obrázek 10: Schéma portálové frézky TOS FRFQ 250 [15]	20
Obrázek 11: Tvar a rozměry frézy Kennametal Rodeka 16 [12].....	21
Obrázek 12: Tvar a rozměry břitových destiček Kennametal RNGJ16-LD [12]	21
Obrázek 13: Tvar a rozměry frézy Seco R220.79-0.125-12 [16].....	22
Obrázek 14: Tvar a rozměry břitových destiček Seco SCET120612T-M14 MK1500 [16].....	22
Obrázek 15: Dráhy nástroje při obrábění současnou metodou	23
Obrázek 16: Stav po dvou fázích obrábění současnou metodou	24
Obrázek 17: Výsledný stav po obrábění současnou metodou	24
Obrázek 18: Dráhy nástroje při obrábění metodou planžování	25
Obrázek 19: Stav po první fázi obrábění metodou planžování.....	26
Obrázek 20: Stav po druhé fázi obrábění metodou planžování	26
Obrázek 21: Výsledný stav po obrábění metodou planžování	26
Obrázek 22: Dráhy nástroje při frézování metodou s vykloněnou hlavou	27
Obrázek 23: Detail na vykloněnou hlavu nástroje	28
Obrázek 24: Stav po první fázi obrábění metodou s vykloněnou hlavou.....	28
Obrázek 25: Výsledný stav po obrábění metodou s vykloněnou hlavou	28
Obrázek 26: Dráhy nástroje při obrábění metodou 4D kopírování kontury	29
Obrázek 27: Detail na vykloněnou hlavu nástroje a její rozmezí	30
Obrázek 28: Stav po první fázi obrábění metodou 4D kopírování kontury	30
Obrázek 29: Dráhy nástroje při obrábění metodou 4D řádkování	31
Obrázek 30: Obrábění druhé fáze metodou 4D řádkování.....	32
Obrázek 31: Výsledný stav po obrábění metodou 4D řádkování	32

Seznam tabulek

Tabulka 1: Mechanické vlastnosti tvárné litiny EN-GJS-400-15 [11].....	19
Tabulka 2: Řezné podmínky současného stavu obrábění.....	23
Tabulka 3: Řezné podmínky u metody planžování.....	25
Tabulka 4: Řezné podmínky metody s vykloněnou hlavou	27
Tabulka 5: Řezné podmínky metody 4D kopírování kontury	29
Tabulka 6: Strojní čas a náklady původní a nově navržených metod.....	33
Tabulka 7: Úspory nově navržených metod	33

Seznam příloh

Příloha 1: Partprogram z CAM software TopSolid obsahující všechny navržené metody (elektronická na přiloženém CD)