

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ
ÚSTAV TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ, PROJEKTOVÁNÍ A METROLOGIE



DIPLOMOVÁ PRÁCE

Obrábění tvarově složitých výrobků (Freeform)

Autor: Bc. Vítězslav Vomáčka

Studijní program: Výrobní inženýrství

Vedoucí práce: Ing. Jan Tomíček Ph.D.

PRAHA 2022

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Vomáčka** Jméno: **Vítězslav** Osobní číslo: **475024**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**
Studijní program: **Výrobní inženýrství**
Specializace: **Bez specializace**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Obrábění tvarově složitých výrobků (Freeform)

Název diplomové práce anglicky:

Machining of by shape difficult parts (Freeform)

Pokyny pro vypracování:

Problém obrábění tvarově složitých výrobků je kombinace technologických znalostí a zároveň správného naprogramování. Proveďte následující:

1. Režerši na téma obrábění tvarově složitých ploch
2. Porovnání technologií frézování ve 3+2D, a 5D a další doporučení pro výrobní postupy pro tvarové plochy
3. Diskuze nejlepších postupu pro obrábění tvarových ploch
4. Návrh ověřovacího tělesa pro obrábění tvarových ploch
5. Příprava NC programů s využitím CAM
6. Ověření výroby a analýza výsledků
7. Závěrečné vyhodnocení

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Jan Tomíček, Ph.D. ústav technologie obrábění, projektování a metrologie FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **15.03.2022**

Termín odevzdání diplomové práce: **29.07.2022**

Platnost zadání diplomové práce: _____

Ing. Jan Tomíček, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

Ing. Libor Beránek, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Obrábění volných ploch vypracoval samostatně pod vedením pana Ing. Jana Tomíčka Ph.D. s využitím použité literatury uvedené ve zdrojích.

V Praze dne:

Podpis:

Poděkování

Rád bych poděkoval svému vedoucímu diplomové práce panu Ing. Janu Tomíčkoví Ph.D. za pomoc, cenné rady, trpělivost a odborné vedení.

Anotace

Tato diplomová práce se zaměřuje na analýzu obráběcích strategií a jejich vhodnou kombinaci pro obrábění tvarově složitých ploch v CAM softwaru. Zabývá se i novější technologií PPC obrábění pomocí soudečkového nástroje s vyššími řeznými podmínkami.

Klíčová slova

CAM software, strategie frézování, volné plochy, PPC obrábění

Abstrakt

This thesis focuses on the analysis of machining strategies and their appropriate combination for machining of complex shaped surfaces in CAM software. It also deals with the newer technology of PPC machining with the use of a spindle tool with higher cutting conditions.

Keywords

CAM software, milling strategies, free surfaces, PPC machining

Úvod	8
Teoretická část	9
1. Frézování	9
1.1. Čelní frézování	9
1.2. Obvodové (rohové/čelní) frézování	10
1.3. Tvarové kopírovací frézování	10
1.4. Profilové frézování.....	10
1.5. Sousedné frézování	11
1.6. Nesousedné frézování	11
2. Teorie obrábění freeform surfaces	11
2.1. Hrubovací a polodokončovací fáze.....	12
2.2. Topologie dráhy nástroje, bod a strategie obrábění.....	18
2.3. Druhy nástrojů pro freeform surfaces.....	23
2.3.1. Obrábění PPC.....	23
2.3.2. Rozdělení nástrojů podle použití	24
3. Vyhodnocování a kontrola povrchu a tvaru	26
3.1. Souřadnicové měřicí stroje.....	27
3.2. Měření tvarových chyb freeform surfaces na CMM	29
4. Shrnutí a obecná doporučení pro aplikaci Freeform obrábění.....	30
5. CAD/CAM software	31
5.1. Rozdíl mezi CAM programováním	32
Experimentální část	34
1. Vytvoření modelu a určení materiálu	34

2. Analýza modelu	36
3. Volba nástrojů pro obrábění	38
3.1. Programování	39
3.1.1. Projekt 1	42
3.1.2. Projekt 2	45
3.1.3. Projekt 3	48
3.1.4. Projekt 4	50
3.1.5. Projekt 5	53
Závěr	57
Seznam použité literatury	59
Seznam obrázků.....	63

Úvod

Tato diplomová práce se zaměřuje na analýzu chování různých obráběcí strategií k výrobě tvarově složitých výrobků Freeform. Se vznikem složitějších tvarů na výrobu a vzrůstajících požadavků na kvalitu povrchu dochází v současné době k rozvoji metod obrábění. Jednou z těchto metod je i Freeform obrábění, které se zabývá obráběním tvarově složitých výrobků, které se využívají převážně v letectví, energetickém nebo automobilovém průmyslu v podobě vstřikovacích forem, nebo formou zápuštěk.

Důležitou částí zaměřující se na dokonalý povrch obrobku jsou dokončovací operace, ale i předúprava povrchu v podobě hrubování a polodokončování. To vše vnáší do procesu kladné i záporné vlivy, jelikož správnou předúpravou povrchu s dosažením správného přídavku před dokončovací operací můžeme povrch ovlivnit.

Freeform obrábění probíhá standardními obráběcími nástroji převážně kulovými frézami, nebo válcovými nástroji s omezenou využitelností. Tyto operace probíhají ve 3D prostoru, tudíž nejsou kladeny tak velké požadavky na obráběcí stroj jako u novější metody obrábění PPC pomocí soudečkových nástrojů, u kterých je již zapotřebí využití 5D obrábění s vyššími řeznými rychlostmi.

Díky vyšším požadavkům na kvalitu obrobené plochy se také zvyšují požadavky na obráběcí CNC stroje s ohledem na tuhost upnutí, výkonnost, počet řízených os. Další rozvoj přišel i v rozvoji CAM softwarů, které jsou v dnešní době neodmyslitelnou součástí. Díky tomu se mohou chyby, nedokonalosti, nebo kolize odhalit již v počátku programování a nedojde k poškození stroje, nástroje, či výrobku. Pomocí simulací je umožněno provést optimalizaci celého procesu obrábění. Dají se kombinovat různé strategie obrábění a volit různé přechody z jedné do druhé.

Teoretická část

1. Frézování

Frézování je proces třískového obrábění, kde dochází k úběru materiálu pomocí rotujícího nástroje (frézy). Frézování pokrývá širokou škálu různých operací a strojů, od malých jednotlivých dílů až po velké náročné skupinové frézovací operace. Je to jeden z nejpoužívanějších procesů obrábění zakázkových dílů s přesnými tolerancemi.

Frézování lze provádět v různých směrech na jedné nebo více osách, různou rychlostí řezné hlavy a tlaku. To lze provést pomocí různých obráběcích strojů. Proces frézování vyžaduje frézku, obrobek, přípravek a frézu. Obrobek je kus předem vytvarovaného materiálu, který je připevněn k přípravku na podélný stůl frézky.

1.1. Čelní frézování

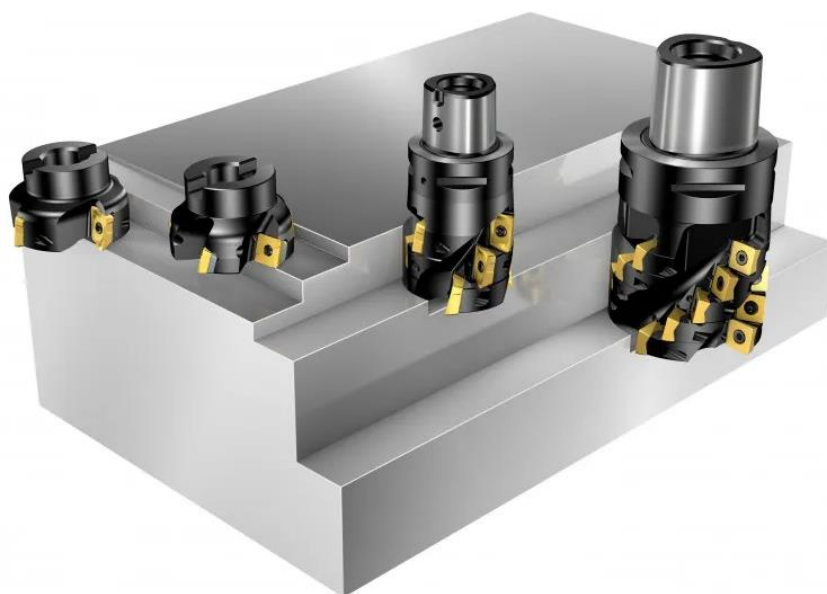
Čelní (rovinné) frézování je nejběžnější frézovací operací a lze ji provádět pomocí široké škály různých nástrojů. Nejčastěji se používají frézy se vstupním úhlem 45°, ale pro určité podmínky se používají také frézy s kulatými břitovými destičkami, čtyřhranné frézy s osazením a boční a čelní frézy.[1][2]



Obrázek 1 - Čelní frézování [1]

1.2. Obvodové (rohové/čelní) frézování

U obvodového frézování probíhá řezný úkon převážně podél obvodu frézy, takže průřez frézované plochy nakonec získá tvar frézy. V současnosti se vyskytuje spíše kombinace v podobě rohového/čelního frézování, u kterého se využívají rohové frézy, které jsou pomocí konvenčních konstrukcí často schopné frézovat „skutečné“ 90° mělké osazení. Mnoho čelních fréz jsou univerzální a lze je s výhodou použít pro vytváření otvorů. Nabízejí dobrou alternativu k čelním frézám při frézování axiálně zakřivených ploch nebo pro frézování ploch blízko svislých hranám.[2][3]



Obrázek 2 - Rohové/čelní frézování [3]

1.3. Tvarové kopírovací frézování

Pro tvarové kopírovací frézování se využívají zvláštní nástroje uzpůsobené do potřebného tvaru nebo nástroje složitějšího kulového tvaru v kombinaci s náklonem nástroje, což vyžaduje výkonnější softwaru a novější typy strojů s možností víceosého obrábění. [2][3]

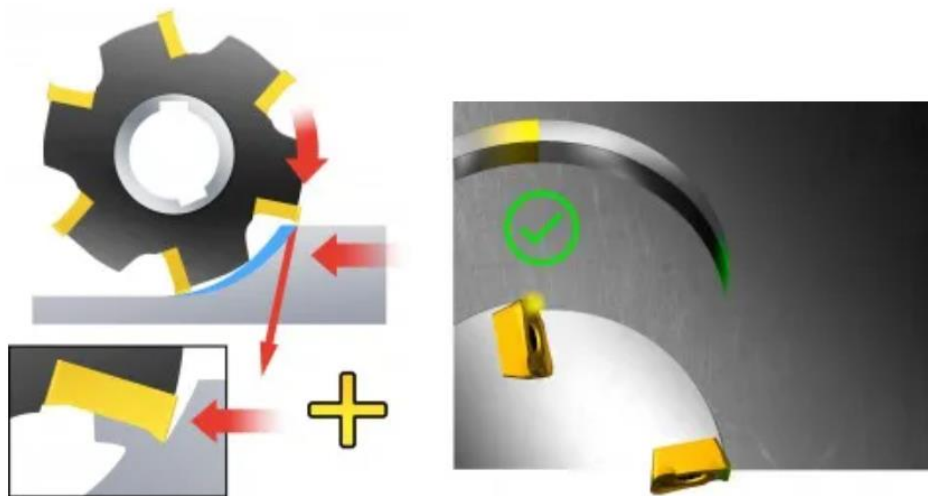
1.4. Profilové frézování

Frézování profilů zahrnuje víceosé frézování konvexních a konkávních tvarů ve 2D a 3D rozměrech. Čím větší je součást a čím složitější je konfigurace stroje, tím důležitější je plánování frézování.[2][3]

1.5. Sousedné frézování

Při sousledném frézování je řezný nástroj přiváděn do materiálu ve směru otáčení. Sousedné frézování je vždy preferovanou metodou všude tam, kde to obráběcí stroj, přípravek a obrobek dovolí.[12]

Při obvodovém frézování bude tloušťka třísky od začátku řezu klesat a na konci řezu postupně dosáhne nuly. Tím se zabrání tření a leštění hrany povrchu před zapojením do řezu. [12]



Obrázek 3 - Ukázka záběru frézy při sousledném frézování [12]

1.6. Nesousledné frézování

Při nesousledném (konvenčním) frézování je směr posuvu řezného nástroje opačný než jeho rotace.

Tloušťka třísky začíná na nule a roste ke konci řezu. Řezná hrana musí být zatlačena do řezu, čímž vzniká efekt tření nebo leštění v důsledku tření, vysokých teplot a dochází i ke kontaktu s mechanicky zpevněným povrchem způsobeným předchozím úběrem. To vše snižuje životnost nástroje. [12]

2. Teorie obrábění freeform surfaces

Freeform surfaces nebo také volné tvarované povrchy, vytvarované povrchy, jsou široce používány v leteckém, automobilovém, spotřebním a lisovacím

průmyslu. Freeform surfaces jsou obvykle navrženy tak, aby splnily nebo zlepšily estetický nebo funkční požadavek. Definice freeform surfaces jsou spíše intuitivní než formální. Často jsou definovány jako povrchy obsahující jeden nebo více nerovinných nekvadratických povrchů obecně reprezentovaných parametrickými, nebo mozaikovými modely. [13]

Při obrábění volných ploch se nejčastěji používají 3osé a 5osé CNC stroje. V 5osém stroji lze plynule současně ovládat až pět pohybů. Translační pohyby v osách X, Y, Z a dva rotační pohyby jsou buď aplikovány na nástrojovou hlavu, stůl stroje, nebo obojí. Ve srovnání s 3osými stroji mohou 5osé stroje vyrábět složité povrchy s lepší kvalitou a účinností. 3osé stroje byly také použity kvůli nižším počátečním a provozním nákladům. Mají lepší tuhost ve srovnání s 5osými stroji, protože rotační osy jsou zablokovány během řezného pohybu nástroje. Nicméně na rozdíl od 5osých strojů, orientaci strojů nelze plynule upravovat během obrábění, což vyžaduje delší dobu obrábění. Freeform surfaces obrábění se obvykle dělí na hrubování, polodokončování, dokončování, čištění a konečné leštění. [14][15][16]

2.1. Hrubovací a polodokončovací fáze

Při hrubování dochází k odebrání většiny přebytečného materiálu ve větších třískách a rychlostech, aby se vytvořil přibližný tvar povrchu. V procesu hrubování je efektivita obrábění vždy na prvním místě. Hrubování a polodokončování není hlavním tématem práce, ale je důležité jej zmínit, jelikož slouží k optimalizaci obrábění a úspoře obráběcího času. Konečné vlastnosti povrchu určuje Freeform obrábění, špatné hrubovací operace mohou negativně ovlivnit samotný výsledek například vzhledem k velikosti zbytkového pnutí a jiné.

Vysoce účinné frézování je jedním z hlavních cílů CNC obrábění. Přestože hrubovací operace má nízké požadavky na přesnost obrábění, produktivita je bohužel omezena konzervativními řeznými podmínkami, což vede k dlouhým a časově náročným operacím a k plýtvání energií. Výběr parametrů frézování obvykle musí vzít v úvahu řeznou sílu, stabilitu frézování, krouticí moment vřetena a výkon. Kromě toho je opotřebení nástroje při obrábění obtížně obrobitelných materiálů dalším velmi

významným problémem. Proto bylo v oblasti CNC obrábění velkou výzvou to, jak dosáhnout vysoce účinných parametrů frézování za podmínek s více omezeními. Neexistuje objektivně-kvantitativní kritérium, podle kterého by bylo možné vybrat jeden před druhým. Mechanisté, a dokonce i procesní inženýři mají tendenci řídit se pravidly založenými na svých odborných znalostech, doporučeních výrobců nástrojů atd. [35][36]

Aby se snížily řezné síly a příkon, přicházejí výrobci nástrojů neustále s inovativními nápady. Například pro dosažení jiného záběru mezi nástrojem a obrobkem lze nové přístupy rozdělit do dvou důležitých skupin:

- 1) konstrukce složitých nástrojů (geometrie)
- 2) použití alternativní kinematiky frézování.

Tato řešení se kombinují s plánovanou strategií CAM softwaru pro efektivní využití řezných parametrů a lineárních os obráběcího stroje.

U první skupiny byly navrženy a vymodelovány inovativní řezné nástroje pro efektivní odvod třísek. Nástrojaři vytvořili nové geometrie pro frézy na plná tělesa (nástroje s proměnným stoupáním/šroubovicí, ozubené stopkové frézy atd.) stejně jako pro vyměnitelné frézovací nástroje (břitové destičky s vysokým posuvem atd.) Bylo prokázáno, že frézy s proměnnou šroubovicí a stoupáním snižují sklon k chvění a řezným vibracím. Řezné síly pozitivně ovlivňují také ozubené stopkové frézy založené na zvlněných sinusových nebo lichoběžníkových profilech břitu. [35][36]

Na straně kinematiky procesu lze použít alternativní strategie ke konvenčnímu frézování pro účinnější rychlost odstraňování obráběného materiálu (High Mass Removal Rate - MRR). Za prvé, proces ponorného frézování může být slibnou alternativou. V tomto případě je nástroj posouván podél osy nástroje Z (nebo osy vřetena), která je mnohem tužší než směry XY. Je tedy vhodný pro operace, kde je požadována vysoká rychlost úběru obráběného materiálu (MRR) a nástroj se pohybuje ve velkých hloubkách, jako jsou dutiny. [35][36]

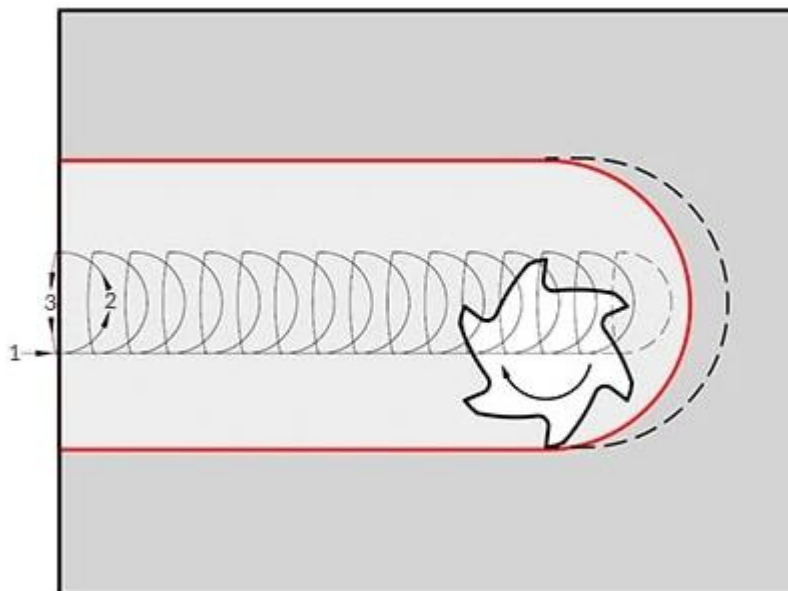
Za druhé, trochoidní frézování se ukazuje jako rychlejší a produktivnější technika odvádění třísek než konvenční frézování. Používá se při frézování drážek a kapes. Otkur

a Lazoglu poskytli průkopnickou analýzu trochoidálního frézování a vyvinula numerický model zapojení, a dokonce navrhla druhou strategii: dvojité trochoidální frézování.

Trochoidální frézování je metoda obrábění používaná k vytvoření drážky širší, než je řezný průměr řezného nástroje. Toho je dosaženo pomocí série kruhových řezů známých jako trochoidální dráha nástroje. Forma vysoce účinného frézování (HEM), trochoidní frézování využívá vysoké rychlosti při zachování nízké radiální hloubky řezu (RDOC) a vysoké axiální hloubky řezu (ADOC). [34]

Trochoidální frézování je z velké části založeno na teorii týkající se ztenčování třísky při obrábění. Konvenční myšlení naznačuje, že řezné nástroje mají optimální zatížení třísky, které určuje ideální šířku a velikost produkovaných třísek. Koncepce boje proti ztenčování třísky zahrnuje obrábění se zatížením třísky, které je větší než „optimální“, aby se udržela konstantní maximální tloušťka třísky. [34]

Na rozdíl od zcela lineární radiální dráhy nástroje při konvenčním obrábění využívá trochoidní frézování výhodu spirálové dráhy nástroje s nízkou radiální hloubkou řezu ke snížení zatížení a opotřebení nástroje na Obr. 4.



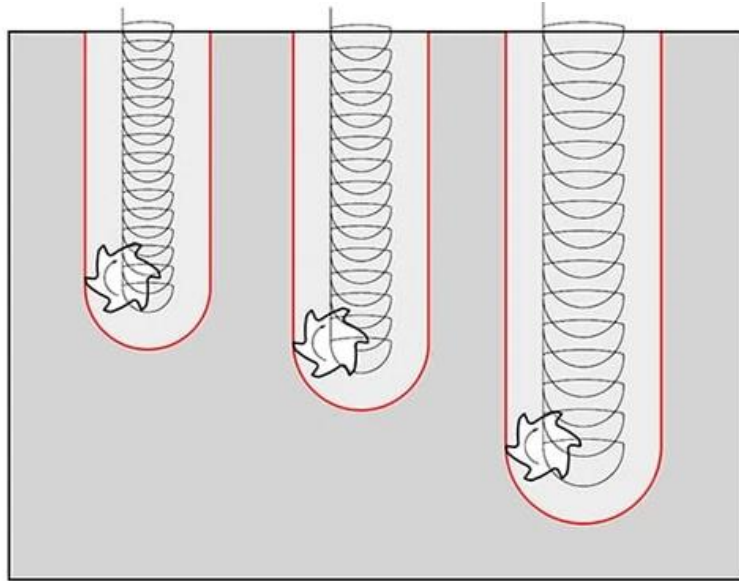
Obrázek 4 - Pohyb nástroje při trochoidálním frézování [34]

Výhody trochoidálního frézování jsou snížené řezné síly, snížené teplo, vyšší přesnost obrábění, zlepšená životnost nástroje, rychlejší časy cyklu, jeden nástroj pro více velikostí slotů.

Trochoidální frézování může být v určitých aplikacích velmi výhodné. Snížený radiální záběr řezné hrany snižuje množství tepla produkovaného v řezu a zároveň snižuje řezné síly a zatížení vřetena. Snížené radiální síly umožňují větší přesnost při výrobě a umožňují obrábět jemnější a přesnější prvky na součásti. Kromě toho nižší radiální hloubka řezu umožňuje vyšší axiální hloubku řezu, což znamená, že lze využít celou délku řezné hrany. Tím je zajištěno, že teplo a řezné síly jsou rozloženy přes řeznou hranu nástroje. Snížené teplo a opotřebení v kombinaci s jejich rovnoměrným rozložením na břitu vede k výraznému prodloužení životnosti nástroje oproti konvenčním metodám drážkování. [34]

Vzhledem ke sníženým destruktivním silám lze zvýšit rychlost řezného nástroje. Protože se využívá celá délka řezu, trochoidní frézování může eliminovat potřebu více axiálních hloubek řezu. Zvýšené provozní parametry a snížený počet průchodů výrazně zkracují dobu cyklu. [34]

Díky tomu, že trochoidní frézování používá nástroj k obrábění drážky širší, než je její řezný průměr, lze stejný nástroj použít k vytvoření drážek různých velikostí, nikoli pouze jedné. To může uvolnit místo v karuselu nástrojů a ušetřit čas při výměně nástroje v závislosti na požadavcích dílu. Je to zřetelně vidět na Obr. 5. [34]



Obrázek 5 - Využití jednoho nástroje pro různé drážky při trochoidálním frézování [34]

Přídavky, které zbyly po hrubovací fázi, jsou následně odstraněny při polodokončování, aby se získal souvislý ofsetový povrch pro dokončování.

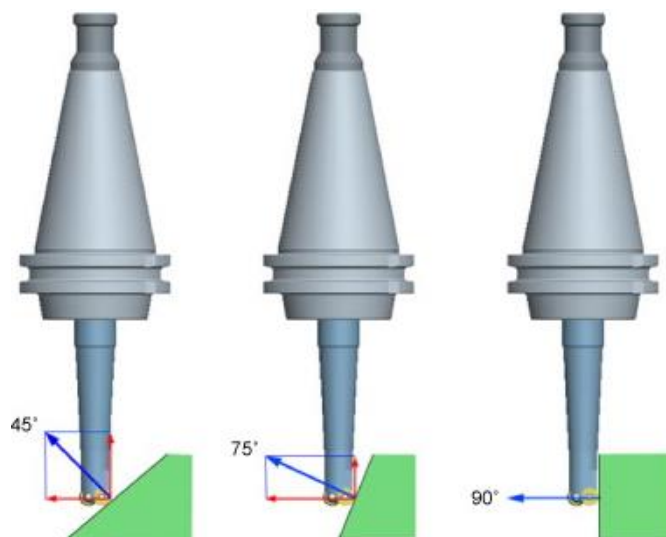
Hrubé frézování, zejména u středních a velkých forem, se provádí před tepelným zpracováním, zatímco polodokončovací a dokončovací operace probíhají po tepelném zpracování obrobku. Tyto finální operace obvykle používají nástroje s malými průměry, malým posuvem na zub, radiální a axiální hloubkou řezu a vyšší rotací nástroje a rychlostí posuvu než u konvenčních procesů. Tento typ procesu je známý jako vysokorychlostní obrábění (High Speed Milling). HSM zahrnuje výhody, jako jsou nízké řezné síly, minimální deformace obrobených povrchů a tím možnost obrábění tenkých stěn s vynikající povrchovou úpravou, nízké tepelné poškození obrobku a zkrácení celkové doby výstavby formy (ve srovnání s obráběním elektrickým výbojem). Na druhou stranu bylo při používání HSM identifikováno několik problémů. [37]

Nástroje pro polodokončovací a dokončovací operace musí vytvářet složité tvary, a proto mají zakřivené hrany, jako toroidní a kulové stopkové frézy. Tyto nástroje mohou být buď monolitní (hlavně pro malé průměry) nebo s břitovými destičkami jako je například od výrobce Sandvik Coromant. Existuje několik možností nástrojových

materiálů pro frézování zápustek a forem pomocí HSM, včetně slinutého karbidu, cermetu, keramiky a kubického nitridu boru. Tyto materiály jsou obvykle potaženy, aby se zvýšila jejich povrchová tvrdost, minimalizoval se koeficient tření mezi třískou a nástrojem a zlepšila se jejich chemická stabilita. Nejpoužívanějším nástrojovým materiálem je povlakovaný mikrozrnný slinutý karbid. [37]

Při malých radiálních a axiálních hloubkách řezu je úhel záběru nástroje při každé otáčce velmi malý. Díky tomuto malému záběru může být řezná rychlost vyšší než rychlosti používané při vysokých úhlech záběru. Stále však přitom poskytuje dlouhou životnost nástroje. To, že průměr nástroje pro tyto operace je malý, vyžaduje velmi vysoké otáčky nástroje. Posuv na zub je také vyšší než u běžného frézování, aby se trochu kompenzoval nízký úhel záběru a aby se získala ne příliš malá průměrná tloušťka třísky. Proto při vysokých otáčkách nástroje a vysokém posuvu na zub je rychlost posuvu velmi vysoká. S touto sadou řezných podmínek (malá radiální a axiální hloubka řezu, malá tloušťka třísky. [37]

Pokud je povrch kolmý k ose nástroje obráběn kulovou frézou, je řezná rychlost ve středu nástroje nulová a tloušťka třísky je velmi malá. To může způsobit vylamování na řezné hraně a tím zhoršení kvality obrobeného povrchu. Ve většině řezných operací s tímto typem nástroje však generované povrchy nejsou kolmé k ose nástroje. U nakloněných ploch odpadá problém řezné rychlosti, protože se zvětší efektivní průměr nástroje. Úhel mezi osou nástroje a povrchem (α) má silný vliv na složky řezné síly. Když je osa nástroje rovnoběžná s povrchem ($\alpha = 90^\circ$), jsou přítomny pouze tangenciální a radiální složky síly (axiální složka je blízká nule). Jak se tento úhel zmenšuje, hodnota radiální složky klesá a hodnota axiální složky roste, jak je znázorněno na Obr. 6. U stopkové frézy není radiální směr nástroje příliš tuhý, protože pouze tělo nástroje odolává vychýlení nástroje. Na druhé straně je axiální směr velmi tuhý, protože v tomto směru fixace nástroje a hlava stroje odolávají stlačení způsobenému silovou složkou. Jedním z cílů této práce je zhodnotit význam této proměnné (úhel sklonu povrchu) na životnost nástroje a mechanismy opotřebení nástroje. [37]



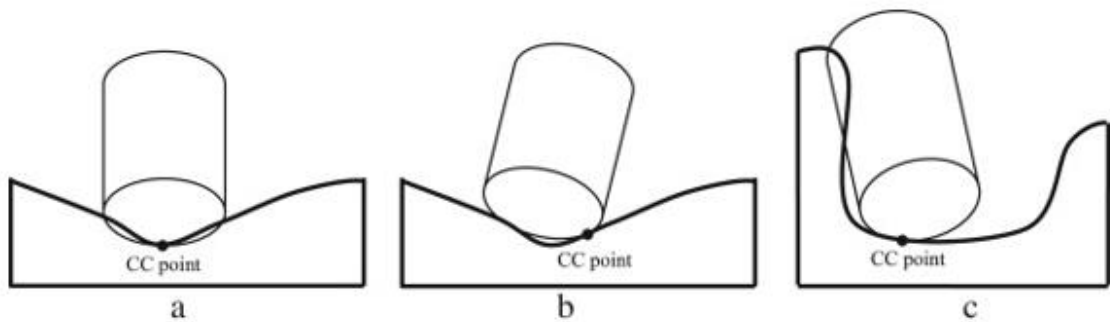
Obrázek 6 - Vliv mezi úhlem nástroje a obráběným povrchem [37]

Kvůli těmto faktorům v podmínkách HSM je nástroj vystaven vysokému namáhání, vysokým teplotám a tepelné a mechanické únavě. Navíc v závislosti na velikosti formy může dojít ke konci životnosti nástroje při obrábění jednoho dílu.

Právě z důvodů problematiky nulové řezné rychlosti a malým úběrům v kolmém směru osy nástroje se rozhodla firma Garant upravit geometrii dokončovacích nástrojů pro metodu PPC tak, aby nulové řezné rychlosti zabránila. V dokončovací fázi je povrch obroben na konečný potřebný tvar. Dokončovací proces vyžaduje vysokou efektivitu obrábění a přesnost. Jinak se obrábění bude dělit pouze na hrubování, dokončování a čištění. [37]

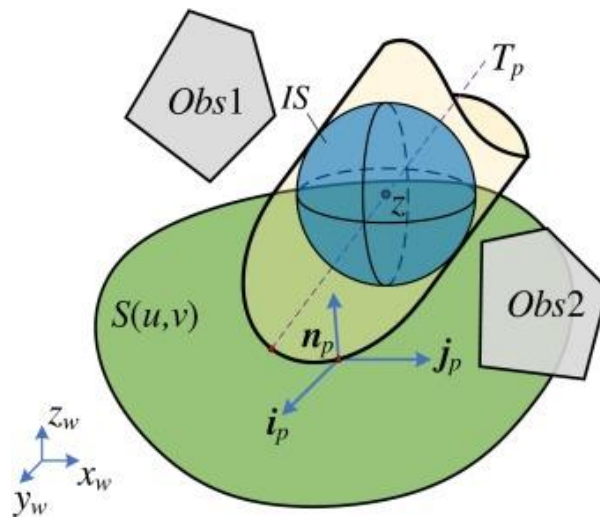
2.2. Topologie dráhy nástroje, bod a strategie obrábění

Bod obrábění nástroje je klasifikován do 3 kategorií: lokální, zadní a globální, jak je znázorněno na Obr. 7. Lokální bod obrábění nastane, když je efektivní poloměr zakřivení nástroje v bodě kontaktu s frézou (CC) větší než poloměr povrchu. Zadní bod obrábění nástroje nastane, když spodní část nástroje zasahuje do povrchu v jiných bodech, než je bod kontaktu s frézou CC.



Obrázek 7 - Tři typy drážkování při 5osém obrábění - (a) Lokální drážkování (b) Zadní drážkování (c) Globální drážkování (kolize) [17]

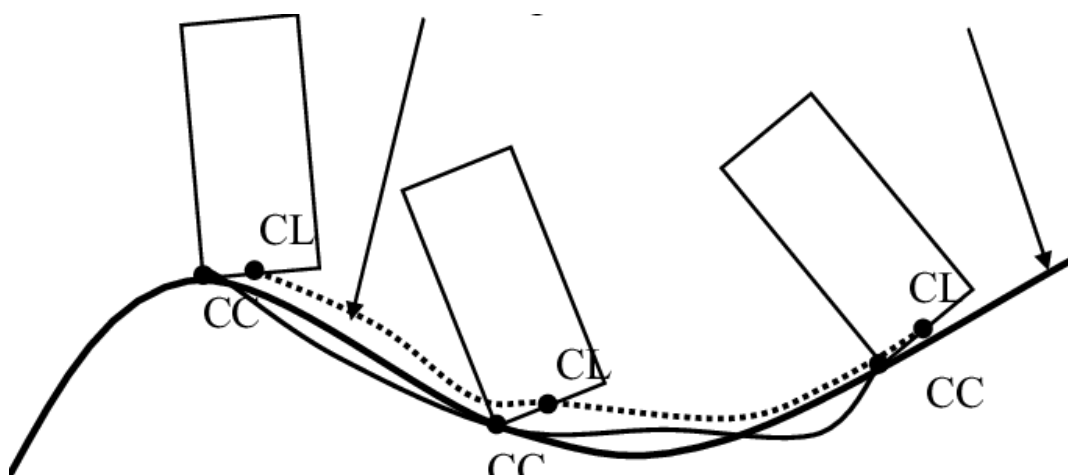
Lokální a zadní bod obrábění nástroje se objevují v sedlových a konkávních plochách. Globální bod obrábění nástroje může vést ke kolizi, která je důsledkem interference mezi povrchem součásti a neřeznými oblastmi nástroje, jako je tělo nebo upínací část nástroje. Když dojde ke kolizi, nejsou splněny specifikace přesnosti povrchu a textury anebo může dojít k vážnému poškození povrchu součásti, obráběcího nástroje či obráběcího stroje. [16]



Obrázek 8 - Povrch nástroje vepsaný koule [4]

Abychom se vypořádali s problémem globálních kolizí, využijeme princip sférické kongruence, jak ji navrhli Zhu a kolektiv. Pojednává o metodě vepsaných koulí ke kontrole kolize nástroje a součásti. Použijeme-li libovolný bod na ose nástroje jako střed koule, mohla by se vepsaná koule (IS) roztahovat uvnitř objemu nástroje, dokud

se nedotkne povrchu nástroje, jak je znázorněno na Obr. 8. Pro libovolné Z na ose nástroje existuje odpovídající vepsaná koule $IS(Z)$ jejíž střed je Z . $Obs1$ a $Obs2(Z)$ označují nejkratší vzdálenost od bodu osy nástroje Z k nejbližší překážce, kterou může být samotný obrobek, přípravek nebo jakýkoli jiný předmět, který může bránit pohybu nástroje. Proto, pokud je nástroj bez kolizí, pro jakýkoli bod Z na ose nástroje by $Obs1$ a $Obs2(Z)$ měla být větší než vepsaný poloměr koule $r_{IS}(Z)$. [4]

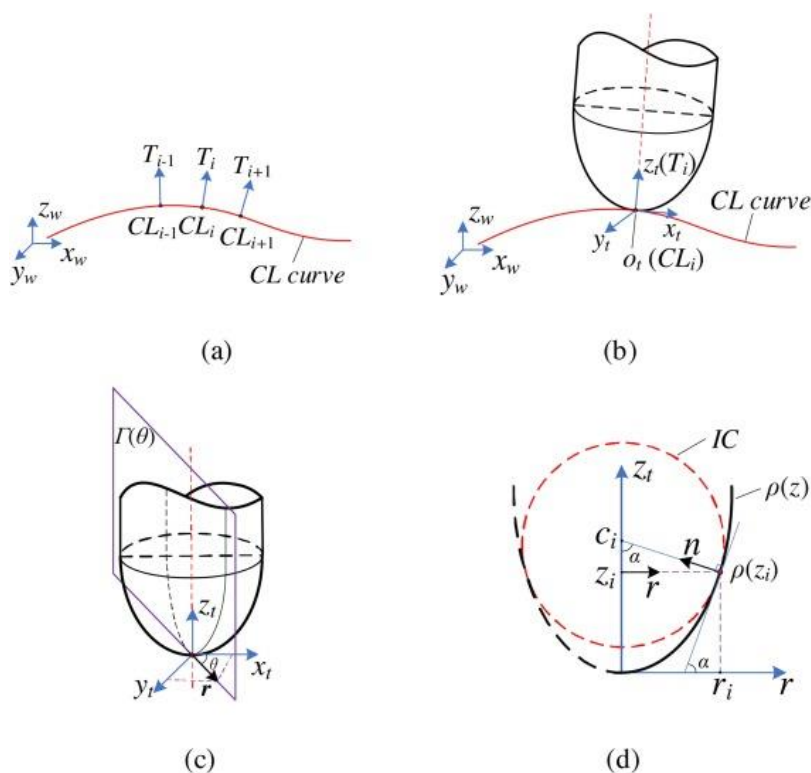


Obrázek 9 - Pohyb nástroje a CL křivky závislosti na obráběné ploše [11]

5osá dráha nástroje se skládá ze seznamu bodů Cutter Location (CL), které tvoří křivku CL. Jestliže se snažíme obrábět freeform surfaces (povrch volného tvaru), musíme pečlivě zvažovat umístění CL bodů pohybu frézy, generování plánování celkové dráhy nástroje, orientaci nástroje v každém bodě, tvar a velikost nástroje, otáčky vřetene a rychlost pohybu jednotlivých bodů CL Obr. 9, tak aby došlo k potřebné kvalitě obrábění předešlo se kolizím a poškozením stroje nástroje či výrobku.

Při 5osém obrábění je kvůli složité povaze problému obtížné vyřešit celý problém s ohledem na optimalizaci všech relevantních aspektů, jako je vzor dráhy, délka dráhy, parametry dráhy, orientace nástroje, plynulé změny orientace, velikost nástroje, plánování rychlostí posuvu. V důsledku toho se mnoho výzkumníků snaží tyto problémy řešit samostatně. [17]

Pro kulový nástroj platí, že každý CL bod (CLi je přidružený vektor) orientace nástroje, znázorněný jako T_i na Obr. 10 (a) je hrotem nástroje a spolu s orientací nástroje T zcela určují polohu nástroje v prostoru. Pro lepší popis prostorového geometrického vztahu mezi nástrojem a obrobkem je dráha nástroje obvykle definována v souřadnicovém systému obrobku (WCS), který je pevně spojen s obrobkem. Je to znázorněno na Obr. 10 jako $\{x_w y_w z_w\}$ (a), (b). Souřadnicový systém nástroje (TCS) je upevněn na nástroji s počátkem umístěným v hrotu nástroje a osa Z je zarovnána s osou nástroje, osa x je zarovnána s tečnou křivky CL a osa y je křížovým součinem prvních dvou os, jak je znázorněno $\{x_t y_t z_t\}$ na Obr. 10 (b), (c). [4]

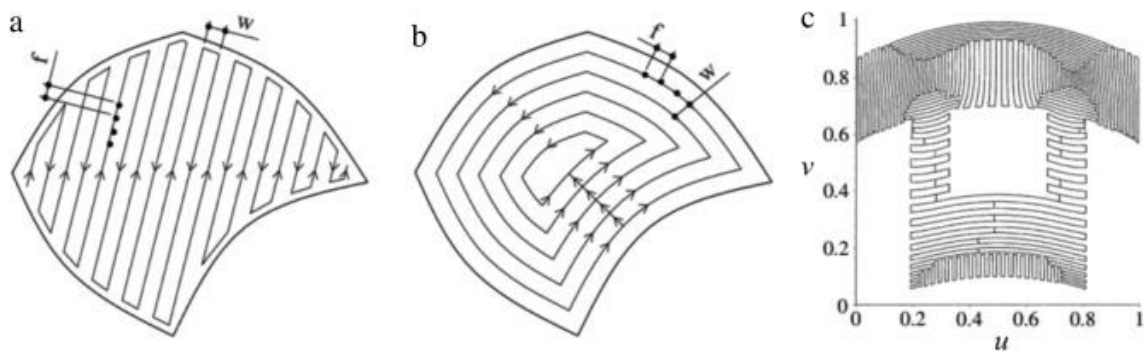


Obrázek 10 - Pohyb nástroje v souřadném systému obrobku (WCS); c) osově symetrická rovina T nástroje v souřadném systému nástroje (TCS); d) profil frézy v osově symetrické rovině T [4]

Optimální poloha nástroje (spojená s optimálním směrem posuvu) se mění na celém povrchu součásti, proto rozvrhujeme povrchy na různé podoblasti, aby bylo možné každou podoblast nezávisle a lépe obrábět podle místních vlastností. Cílem

rozdělení povrchu je rozdělit na několik polí, z nichž každé má odlišný vzor rozložení optimálního směru posuvu a odpovídající orientaci nástroje.

Pro dokončování povrchů volných tvarů existují tři hlavní typy topologií dráhy nástroje: směrově paralelní, obrysově paralelní a křivka vyplňující prostor (SFC) jak je znázorněno na Obr. 11. Mezi těmito třemi typy jsou nejrozšířenější topologie dráhy nástroje směrově paralelní a konturově paralelní. Tyto dvě topologie se obvykle vypočítávají rekurzivním způsobem na základě předchozích prvků cesty. [18][19]



Obrázek 11 - Tři typy topologií drah: a) směrově-paralelní; b) konturově-paralelní; c) adaptivní křivka vyplnění prostoru [18]

Ve směrově paralelní dráze nástroje jsou prvky dráhy rovnoběžné s předem definovanou linií. Tato čára může být rovnoběžná nebo kolmá k hranici povrchu, nebo rovnoběžná s osou zadaného souřadnicového systému. Vhodný výběr referenční čáry má přímý vliv na délku generované trajektorie. Pokud je tato přímka definována v 2D parametrické rovině, výsledná dráha se nazývá izoparametrická. Specifický případ těchto drah se využívá v komerčních CAM systémech pro hrubování. Pokud je tato přímka definována v 3D euklidovském prostoru, výsledná dráha se nazývá izoplanární. Pro freeform surfaces lze mnohem snadněji vypočítat izoparametrickou dráhu než dráhu izoplanární. Je třeba se vypořádat se složitým problémem průsečíku plochy a roviny. Pro obě dráhy lze prvky paralelní cesty propojit dvěma způsoby: jednosměrně a cik-cak.

Volba jednosměrného nebo cik-cak frézování je kompromisem mezi kvalitou a produktivitou. V obecné průmyslové praxi se používá pro obrábění tvrzené oceli

jednosměrné frézování, zatímco při obrábění litiny se široce používá frézování cik-cak. [19][20][21]

V konturově paralelní dráze nástroje lze proces generování dráhy považovat za postupné zmenšování referenční křivky na povrchu. Obvykle je referenční křivka vytvořena propojením hranic povrchu. Topologii konturově-paralelních drah lze dále rozdělit na dva typy podle různých použitých metod smršťování: obrysově-paralelní offset a spirála. [21][22]

V praxi je dráha obrysově-paralelní široce používána při 2D hrubování vrstvy po vrstvě a je obecně považována za lepší, než dráha směrově-paralelní v kontextu se zatížením a množstvím pohybu nástroje obrábějící vzduch. Pro 2D případ lze pro generování konturově-paralelní dráhy použít mnoho účinných metod, jako je například metoda Voronoiova diagramu, nebo metoda detekce párových průniků a jiné. [20][21][22][23][24]

2.3. Druhy nástrojů pro freeform surfaces

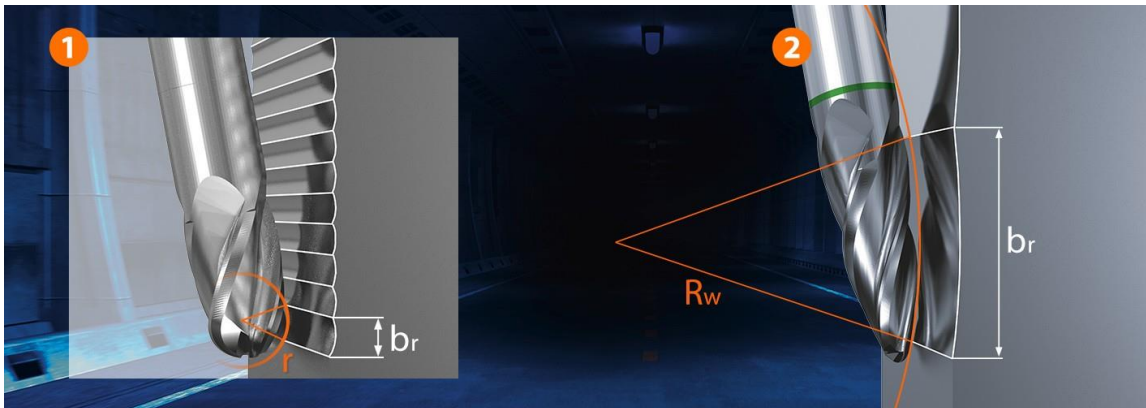
Pro tuto metodu se dá využívat několik druhů nástrojů. V souvislosti s předchozí teorií jsou základní nástroje kulové. Omezenou využitelnost mají nástroje válcové. A novinkou jsou nástroje PPC. Nástroje se od sebe liší nejen geometrií, nýbrž i dosahovanými přesnostmi, kvalitou povrchu, rychlostí obrábění a velikostí odebírané vrstvy.

2.3.1. Obrábění PPC

Metoda PPC (Parabolic Performance Cutting) je frézování pomocí soudečkových fréz a představuje další vývoj frézování pomocí plného radiusu. Hlavní oblastí užití jsou dokončovací operace složitých volně tvarovaných povrchů a komplikovaných součástí obecně při výrobě obráběcích strojů, nástrojů a forem. PPC nástroje se také používají tam, kde je požadována velmi vysoká kvalita povrchu – například u lisovacích nástrojů, aby se minimalizovaly následné operace leštění.

Jednou z hlavních výhod je změna velikosti řádkování, díky kterému dochází ke zvyšování kvality povrchu, jak je vidět na Obr. 12. Dalšími výhodami jsou například

kratší doba obrábění součástí, nižší náklady na přípravu, univerzálně použitelné nosné nástroje a specifické vyměnitelné destičky, vyšší kvalita výsledného povrchu po obrábění při kratší době obrábění, vysoká spolehlivost, díky rozložení silového namáhání nástroje extrémně vysoká odolnost proti opotřebení, vysoká produktivita a skvělá variabilita použití nástroje. [25]



Obrázek 12 - Porovnání velikosti řádkování kulového a soudečkového nástroje [25]

2.3.2. Rozdělení nástrojů podle použití

Jak je vidět na Obr. 13 tak se jednotlivé použití nástrojů liší v závislosti na obráběné ploše.

Nástroj č. 1 - Přesná kopírovací fréza, tyrkysová: rovný tvar, hnědá: tvar komolého kužele.

Nástroj č. 2 - TK soudečková fréza PPC, tvar komolého kužele. Vhodná pro základní obrábění s existujícími rušivými konturami.

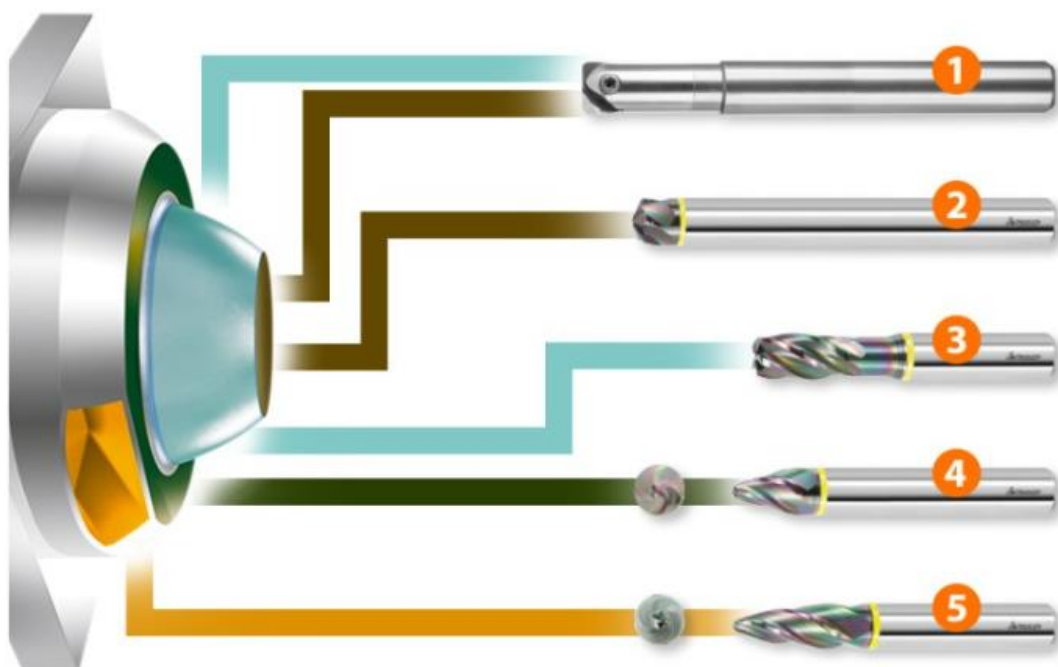
Nástroj č. 3 - TK soudečková fréza PPC, rovný tvar. Na volně přístupné plochy, bez rušivých kontur.

Nástroj č. 4 - TK soudečková fréza PPC, kónický tvar. Na plochy s rušivými konturami a na velké plochy.

Díky speciální geometrii čela velmi vhodná i pro základní obrábění. Umožňuje také největší řádkování.

Nástroj č. 5 - TK soudečková fréza PPC, tangenciální tvar. Na hluboké, špatně přístupné kavity.

Díky speciální geometrii čela velmi vhodná i pro základní obrábění. [25]



Obrázek 13 - Rozdělení nástrojů dle použití [25]

3. Vyhodnocování a kontrola povrchu a tvaru

Měření volných tvarových ploch není jednoduchý úkol, už jen z hlediska, že nemají přesně definovaný tvar dle výkresové dokumentace. Plochy můžeme měřit kontaktně i bezkontaktně. Na celkovou kvalitu povrchu má vliv mnoho proměnných, jako jsou například:

a) Tvar řezného nástroje

Kde nejdůležitějším parametrem je při vytváření třísky samotná geometrie nástroje. Geometrii nástroje ovlivňuje obráběný materiál i materiál nástroje. Platí že, čím je vyšší opotřebení nástroje tím se zhoršuje obráběcí přesnost a je zapotřebí vyššího výkonu. Při vysokém opotřebení může dojít až k porušení stability obráběcího nástroje vedoucí k lomu.

b) Stabilita nástroje

Dnes existuje řada různých upínacích systémů pro udržení, vystředění obráběcího nástroje. Je ale důležité z možných řešení volit upínací část nástroje tak, aby vyhovovala našim podmínkám (vydržely vyšší zatížení, přenos vyšších otáček vřeten a jiné požadavky).

c) Volba vhodného chlazení

Vhodné řešení a přívod chladicí kapaliny je velmi důležitý bod, jelikož při nevhodném přívodu kapaliny může docházet k teplotním šokům, které zvyšují opotřebení obráběcího nástroje. V dnešní době je široce rozvedený způsob přívodu chladicí kapaliny vnitřkem nástroje a nejen kapaliny. Chladit můžeme i jiným médiem, a to například stlačeným vzduchem, přiváděným vnitřkem vřetena.

d) Tuhost obráběcího stroje

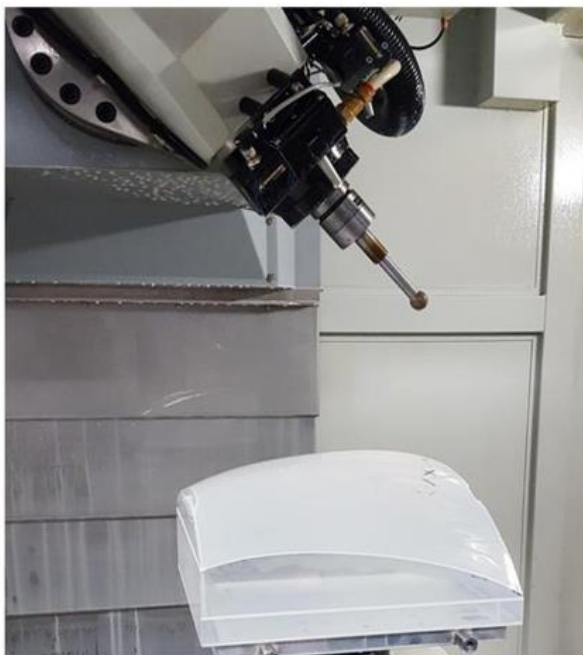
Jedním z vysoce podstatných ukazatelů je také samotná stabilita a tuhost stroje, na němž se obrábí. Jedná se o pohlcování rázů a vibrací především rámem stroje.

3.1. Souřadnicové měřicí stroje

Nejdůležitější univerzální nástroje pro kontrolu freeform surfaces v průmyslu jsou Coordinate Measuring Machines (CMM) také známé jako souřadnicové měřicí stroje, které mohou být vybaveny s kontaktními i bezkontaktními snímacími systémy. CMM jsou v průmyslu vysoce využívány nejen z hlediska flexibility, ale i proto, že umožňují měření bodů v prostoru s vysokou přesností. Dnes jsou typicky vybaveny numerickým řízením a skenovacími sondami, obojí kontaktní i bezkontaktní.

Automatická měření tisíce bodů lze snadno aplikovat dokonce i na složité povrchy. Geometrické přesnosti freeform surfaces jsou pro funkčnost rozhodujícím ukazatelem, ale i vzhledová stránka produktu nesmí být opomíjena, a proto probíhá proces kontroly obvykle na CMM. [8][9][10]

Obr. 14 ukazuje klasický příklad CMM vybavený kontaktní měřicí sondou při skenování volného tvaru profil na výrobku. Ve volné metrologii je zásadní měřit velké počty bodů na povrchu, které mají být zkontrolovány. Skenovací snímací systémy jsou dnes preferovány před dotykovými sondami. Dotykové měřicí sondy CMM systému mohou měřit až 200 bodů/s při rychlostech až 150 mm/s. Rychlejší měření jsou možná s bezkontaktními měřicími systémy založenými na optických principech, jako je mimo jiné autofokus, triangulace a konoskopická holografie. Konoskopická holografie je nekoherentní holografická technika založená na vlastnostech krystalové optiky. [8][9][10]



Obrázek 14 - Kontaktní měření povrchu CMM [6]

Velikou předností těchto bezkontaktních metod je obecně bezkontaktní charakter principu měření, rychlé získání velkého počtu bodů a vysoká míra flexibility v nastavení měření. Vysoce reflexní povrchy mohou být měřeny na CMM pomocí např. speciální triangulační optické sondy, která využívá tři dopadající paprsky procházející polarizačními deskami. Proto je zrcadlové světlo do značné míry eliminováno a do CCD kamery se dostane pouze rozptýlené světlo. Optické snímací systémy jsou snímače vzdálenosti, které lze rozdělit do tří základních typů v závislosti na počtu a poloze bodů, které se měří současně: bodové snímače, čárové snímače a plošné snímače. Ukázka na Obr. 15. Riziko nastává u měření dílů s velmi malou drsností povrchu nebo u transparentních dílů, u kterých může docházet k průchodu nebo odražení paprsků vysílaných zdrojem. Povrch se dá upravit například posypáním prášku pro zlepšení měření, ale může dojít také k poškození či úplnému znehodnocení dílu. [8][9][10]

Pro zobrazovací prostředí, v metodách vizuální kontroly drsnosti, existují přísné požadavky na světelný zdroj pro návrhové indexy nebo extrakci rysů. Používá se například směs červených a zelených barev pro učení migrace a jsou omezeny

na barvu a jas světelného zdroje. Proto by bylo velkým průlomem, kdybychom mohli přímo použít zdroj bílého světla pro natáčení, bez omezení barvy a jasu zdroje světla. [8][9][10]



Obrázek 15 - Měřící hlava LC15Dx Nikon [5]

3.2. Měření tvarových chyb freeform surfaces na CMM

S rozvojem měřicích přístrojů jsou metody kontroly založené na CMM vybavených skenovacími sondami stále více zkoumány a používány z toho důvodu, že zlepšují účinnost kontroly a zachovávají vysokou přesnost kontaktních metod měření. Chyba tvaru popisuje přesnost tvaru kontrolovaného povrchu, která odpovídá definici chyby profilu nesouvisející s nulovým bodem v ISO 1101. Jeho vyhodnocení na základě získaných dat je časově náročný proces. Ačkoli skenovací sondy dramaticky zlepšily účinnost kontroly, měření a vyhodnocení, přesto mají omezení na stupnici získaných dat. Vždy bylo horkým výzkumným problémem v oblasti metrologie to, jak používat omezená měření k popisu geometrických vlastností obrobených povrchů. Při kontrolách zaměřených na vyhodnocení chyb tvaru lze řešení tohoto problému hodnotit ze dvou hledisek: přesnost kontroly a účinnost kontroly. Na jedné straně může být přesnost kontroly kvantifikována odchylkou mezi výsledkem měření a skutečnou hodnotou (nebo přibližnou skutečnou hodnotou) chyby tvaru. Na druhou stranu lze

účinnost kontroly kvantifikovat spotřebou zdroje měření a zdroje hodnocení včetně doby kontroly a měřítka dat, kdy kontrola dosáhne dané přesnosti. [26]

Existují různé studie navrhuující několik druhů strategií například ElKott a Veldhuis, kteří navrhli dvě distribuční strategie pro skenovací měření. Při dalších zkoumáních byla navržena síťová strategie pro rozložení skenovacích čar. Optimální místo odběru bylo odvozeno adaptivně tak, aby se přiblížilo kontrolovanému povrchu podle požadované přesnosti a snížila se časová náročnost měření. Jenže z mnoha typů strategií se nedá určit ta nejlepší a pro zvýšení efektivity se využívají kombinace různých strategií s ohledem na kontrolovaný díl. [26]

4. Shrnutí a obecná doporučení pro aplikaci Freeform obrábění

Metoda freeform obrábění se řadí do kategorie přesného obrábění a lze jí využít v mnoha ohledech ať už v automobilovém, leteckém, energetickém průmyslu či v optice, lékařské technice, nebo elektrotechnickém průmyslu.

Zásada problému Freeform ploch je to, že neobsahují obvyklé plochy, jako jsou roviny a svislé plochy, proto jsou 2,5D obráběcí strategie nevhodné a je potřeba tyto plochy řešit přes obecné 3D obráběcí strategie, jako je například řádkování nebo obrábění v Z hladině. Ani jedna z výše uvedených strategií neumožňuje pojmout široké spektrum sklonů. Obráběcí strategie řádkování má problém s vysokými sklony a obráběcí strategie v Z hladině má problém s nízkými sklony. Obrábění se tudíž musí rozdělit nebo použít hybridní dráhy. V současné době se pro některé aplikace jeví vhodné soudečkové nástroje. Rizikové faktory Freeform obrábění jsou: volba vhodné strategie, vhodná volba obráběcích nástrojů, dostatečné vyložení nástrojů, použití dostatečně tuhá upnutí, velikost nástrojů a upínačů. Nástroje s malým detailem jsou většinou krátké, tudíž je třeba použít delší upínač a je nutno hlídat výše zmíněné vyložení nástroje, aby nedocházelo ke kolizím polotovaru jak s upínačem, tak samotným nástrojem. [13][14][15][16]

Zvláštní kategorií jsou soudečkové nástroje, které se používají se sklopenou osou obrábění, kde doporučení hovoří v hodnotách mezi 80-90°. Klasické soudečkové nástroje jsou hodné především k obrábění strmých ploch bokem nástroje pro lepší konečnou kvalitu povrchu. Nehodí se k obrábění ploch pozvolného sklonu. Na tyto plochy lze využít například soudečkovou frézu, tvaru komolého kužele vhodnou právě pro základní obrábění s existujícími rušivými konturami. Díky naklonění osy zde vzniká velké riziko kolizí mezi obrobkem a nástrojem či upínačem. [13][14][15][16][25]

5. CAD/CAM software

CAD software neboli počítačově podporované navrhování a navrhování (CADD), je technologie pro návrh a technickou dokumentaci, která nahrazuje ruční navrhování automatizovaným procesem. Využíváno je především designéry, konstruktéry, architekty nebo inženýry. Existuje mnoho ať už 2D nebo 3D CAD programů jako například software AutoCAD, Inventor, Solid Edge, AutoCAD LT, CATIA a mnoho jiných. Tyto široce používané softwarové programy pomáhají navrhnout konstrukční dokumentaci, prozkoumat nápady na design, vizualizovat koncepty prostřednictvím fotorealistických vykreslování a simulovat, jak se návrh chová v reálném světě. [27]

Software počítačem podporované výroby (CAM) převádí modely počítačově podporovaného navrhování (CAD) na informace, které mohou používat stroje v dílně. Tento typ softwaru pomáhá výrobním společnostem optimalizovat nejen proces obrábění, ale celkově proces přeměny surovin a komponent na hotové výrobky. Software CAM poskytuje informace o tom, jak by různé typy zařízení měly provádět výrobní operace, jako je řezání, frézování a hrubování. Tento typ softwaru využívají technologové výroby k přípravě a plánování výrobních operací, stejně jako zaměstnanci dílen, aby zařízení používali efektivně a bezpečně. [28]

CAD/CAM softwary jsou většinou kombinací obou softwarů dohromady pro ulehčení pracování v softwaru, a hlavně kvůli licencím a kompatibilitě se stroji. Používají se k převodu počítačově podporovaného navrhování (CAD) na výrobu obrobků pomocí počítačem podporované výroby (CAM) na CNC stroji. Softwary bývají doplňovány

různými knihovnamí normalizovaných součástí pro usnadnění a zvýšení rychlosti u vytváření sestav. [29]

5.1. Rozdíl mezi CAM programováním

Práce ve dvou rozměrech (2D) znamená, že se vyřezává součást s prvky, které jsou všechny ve stejné hloubce. To je běžné u řezání laserem, horkým drátem, vodním paprskem a plazmou spolu s gravírováním. Po vytvoření 2D dráhy nástroje nám stačí vytvoření souboru DXF, který následně nahrajeme na určitý stroj v dílně.

Práce ve dvou a půl rozměrech (2,5D) znamená, že obrábíme součást, která má více plochých prvků v různých hloubkách. Během procesu řezání 2,5D se osa Z umístí do hloubky, kde se osy X a Y interpolují a vyříznou prvek. Osa Z se poté stáhne, aby se osy X a Y mohly přesunout do počátečního bodu dalšího prvku, který může být řezán v jiné hloubce Z než u posledního prvku. Většina jednoduchých CAM programů se zabývá 2,5D díly.

Práce ve třech rozměrech (3D) znamená, že máte možnost ovládat alespoň tři osy současně. 3D konturování pak lze provést vytvořením křivek, které využívají všechny tři osy najednou, jako u spirálového řezu. K vytvoření souborů s G-kódem schopných provádět 3D konturování budeme nejčastěji potřebovat úplný CAM program.

Zákazníci mají také možnost použít při vytváření 3D dílů více než tři osy. Frézování podle 4. osy obvykle popisuje situace, kdy je kromě os X, Y a Z zapojen do procesu obrábění také otočný stůl. Čtvrtou osu lze použít pro úplné konturování s jinými osami, indexování nebo převrácení součásti. Nejčastěji budeme potřebovat CAM program vybavený funkcemi 4. osy k vytvoření dráhy nástroje pro jakoukoli součást, kterou plánujeme obrábět pomocí otočného stolu. Pátá osa přidává o jeden rozměr více než 4. osa. Obvykle se jedná o otočný stůl na otočném stole 4. osy, jinak známý jako čep. Může to být i vřeteno, které se otáčí. Páté osy se používají pro složitější díly, kde by docházelo k podříznutí. [30]

3+2D obrábění neboli také indexování, kde je nástroj pevně pootočen podle jedné nebo dvou os vůči obrobku a obrábění probíhá jako klasické 3D. Tato metoda

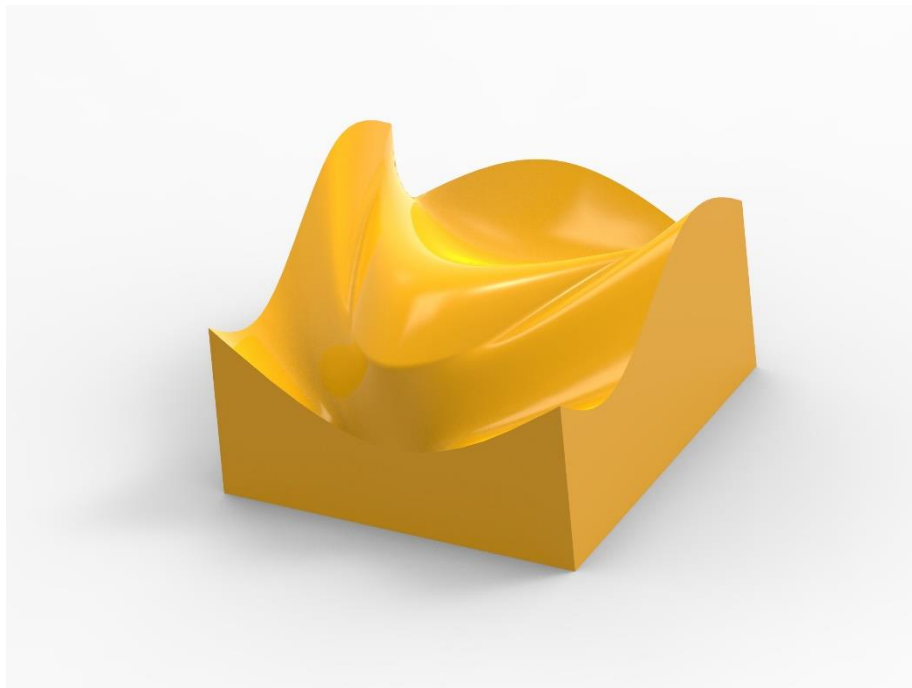
se dá využít pro obrobení rovinné plochy nakloněné vůči souřadnému systému pomocí válcové frézy, jelikož má větší kontaktní plochu než nástroje kulové. Dalším využitím je u metody freeform obrábění, kde se díky pootočení kulové frézy eliminují místa, v nichž by docházelo k obrábění nulovou řeznou rychlostí. Obvykle se nástroj vychýlí o 15°. [30][31]

5D obrábění se využívá především při obrábění tvarově složitých součástí jako jsou formy na lisování, kde je požadována vysoká přesnost, lopatky turbín, zápustky a další. Funguje na principu, kde je umožněn pohyb ve třech osách obrobku a zároveň v dalších dvou osách obráběcího nástroje. Díky naklonění nástroje dochází ke zlepšení řezných podmínek, ale na rozdíl od 2+3D obrábění se úhel naklonění nástroje může měnit. [30][31]

Experimentální část

1. Vytvoření modelu a určení materiálu

Pro experiment jsem vytvořil model součásti vyobrazenou na Obr. 16. Model byl vytvořen v CAD softwaru Solid Edge 2022. Samotné vymodelování součásti vycházelo z několika kroků. Nejprve jsem vytvořil skici, následně jsem skici propojil mezi sebou funkcí spojením profilů a správnou kombinací vznikla geometrie součásti používané v experimentu. Následně bylo potřeba odstranit rohy pomocí zaoblení a ke konci modelování jsem vytvořil plný blok materiálu tak, aby nedošlo k narušení povrchu a zároveň aby byla možnost součást upnout při následném obrábění. Podstava polotovaru má rozměr 200x200mm. Celková výška polotovaru je 130mm.



Obrázek 16 - Model součásti pro experimentální část

Pro součást byl zvolen materiál z nástrojové oceli s označením dle starší normy 19 641 a dle nové normy 1.2767 / X45NiCrMo4. Jedná se o materiál určený ke kalení v proudu vzduchu s velkou prokalitelností. Ocel vykazuje poměrně vysokou tvrdost po kalení, zvláště dobrou houževnatost proti namáhání tlakem rázy a údery, velmi dobrou odolnost proti opotřebení a poměrně dobrou stálost rozměrů při tepelném zpracování. Ocel je obtížněji tvárná za tepla a vykazuje mírně sníženou obrobitelnost ve stavu

žíhaném naměkko. Využívá se na nástroje pro tváření za tepla jako jsou malé zápustky vyžadující při vysoké tvrdosti také vysokou houževnatost, například při tváření materiálu o vysoké pevnosti. Dále je ocel vhodná pro nože u stříhání za studena materiálů velkých tloušťek, nože na šrot a pro nejvýše namáhané nástroje pro ražení za studena. Pro lisování plastických hmot je z této oceli možné vyrábět velké tvárníky a tvárnice a ty kalit na vzduchu. [32]

Chemické složení: C 0,40-0,50

Si 0,10-0,40

Mn 0,15-0,45

P max 0,030

S max 0,030

Cr 1,20-1,50

Mo 0,15-0,35

Ni 3,80-4,30

Teplota tváření: 1050-850°C. Žihání naměkko: 610-630°C

Tvrlost v žíhaném stavu: 260 HB

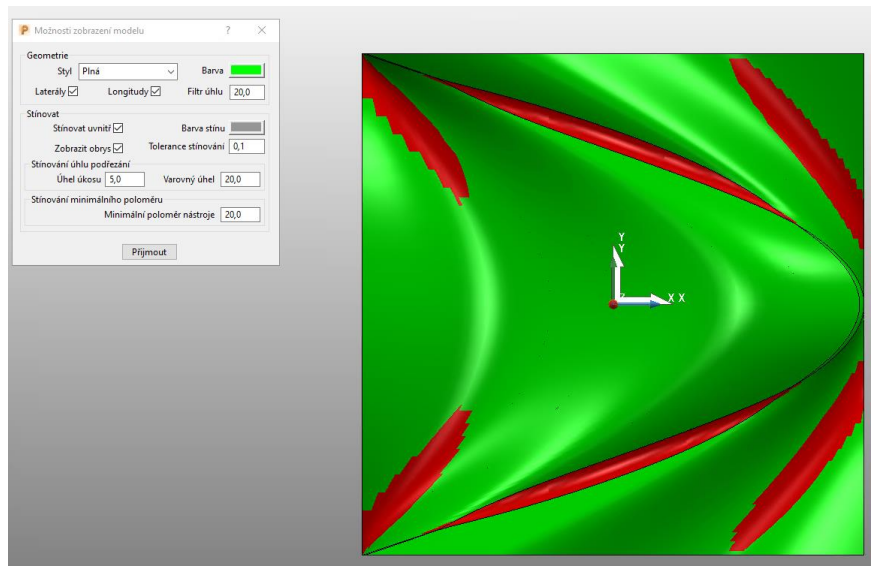
Kalení: 840-870°C

Optimální popouštěcí teplota: 160-250°C za studena + 350-650°C za tepla

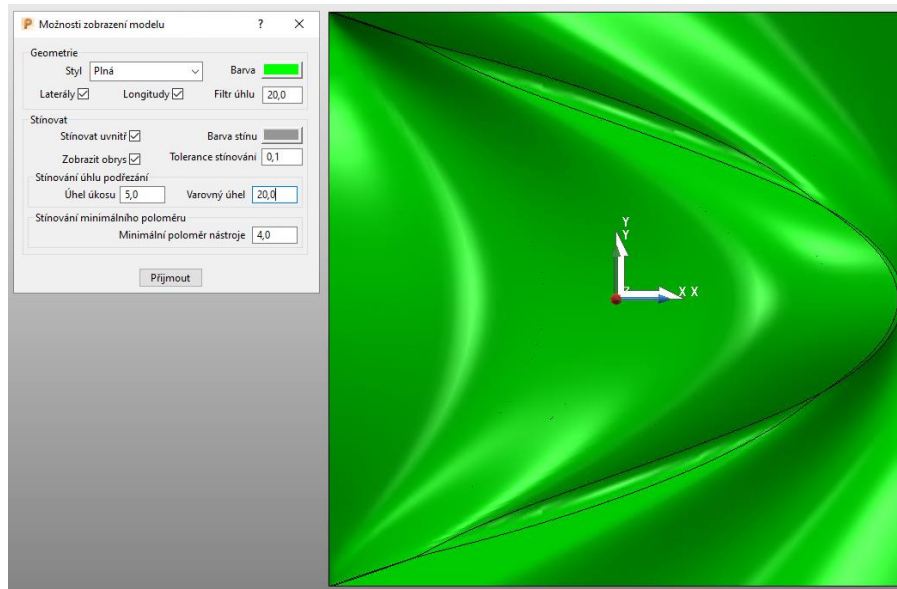
Dosažitelná tvrdost: 42-56 HRC [32]

2. Analýza modelu

Prvotní analýzou v softwaru Autodesk PowerMill Ultimate 2022 jsem zjišťoval minimální rádiusy modelu a vyhodnocoval strmost ploch pro správnou volbu dokončovacích nástrojů. Zjistil jsem, že minimální poloměr nástroje musí být 4mm, abych byl schopen obrobit všechny kritické zaoblené plochy. Nejmenší rádius byl stanoven na vytvořeném zaoblení ve středním pásu na Obr. 17 a Obr. 18.

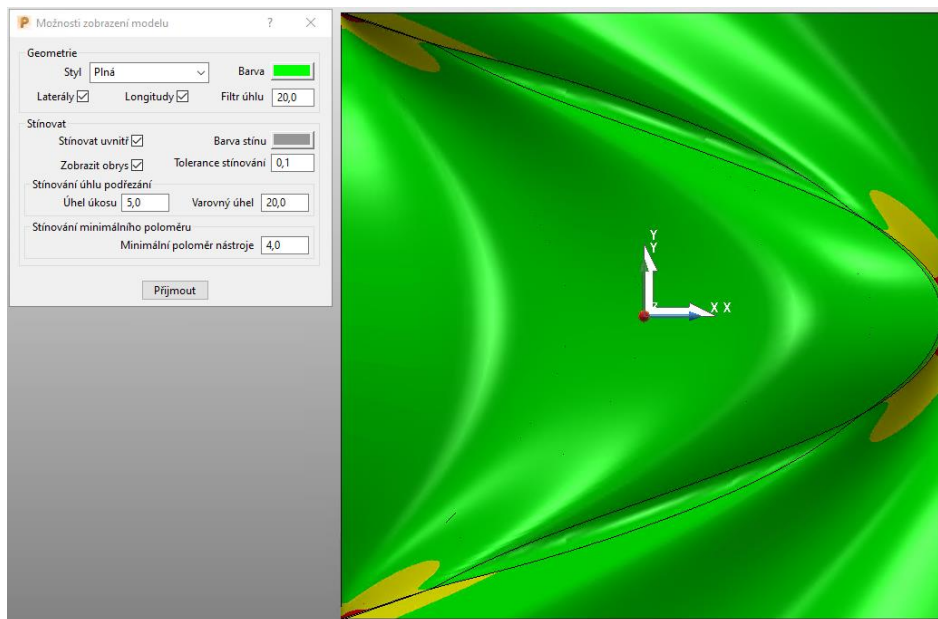


Obrázek 17 - Analýza rádiusů

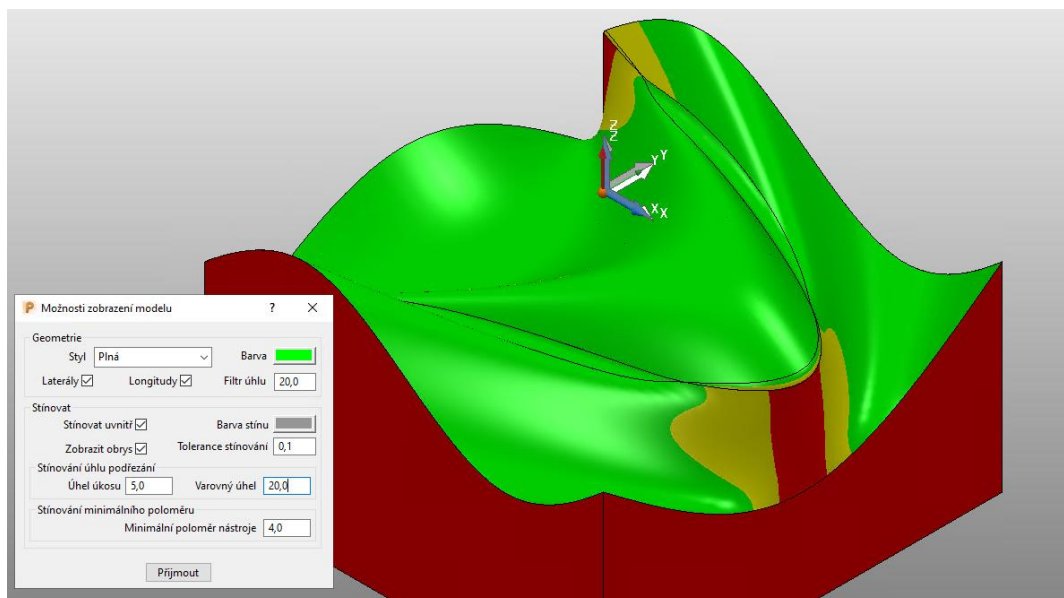


Obrázek 18 - Minimální rádius

Následně jsem provedl analýzu strmosti ploch a analýzu kritických ploch, kde by buď nedošlo k obrobení, mohlo dojít k podřezání nebo by mohla být strmost příliš velká a mohlo docházet ke kolizím mezi obrobkem a nástrojem, ať už s dříkem či s obráběcími břity. Úhel úkosu je 5° a varovný úhel byl nastaven na 20° viz Obr. 19 a Obr. 20.



Obrázek 19 - Analýza a určení kritických a strmých ploch



Obrázek 20 - Strmosti a kritické plochy

3. Volba nástrojů pro obrábění

Dle informací o materiálu volíme vhodné obráběcí nástroje na každou část obrábění.

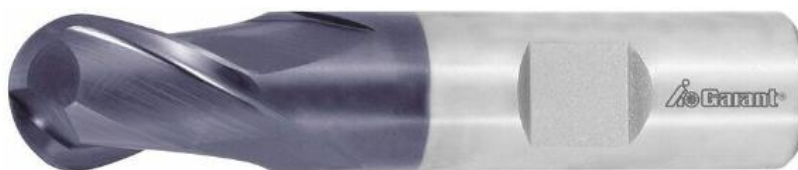
Pro hrubovací část volím TK hrubovací fréza GARANT Master Steel HPC 25 mm od firmy GARANT s katalogovým číslem 203035-25 viz Obr. 21. [40]



Obrázek 21 - TK hrubovací fréza GARANT Master Steel HPC 25 mm [40]

Fréza o průměru 25 mm je určena pro hrubování a dokončování, je tvořena z tvrdokovu s povlakem AlTiN. Je tvořena čtyřmi zuby a je určena pro metodu HPC (High Performance Cutting) kde nám tato metoda dovoluje používat vyšší řezné podmínky než při klasickém frézování.

Pro polodokončovací část volím nástroj Rádiusová fréza HSS-PM 25 mm od firmy GARANT s katalogovým číslem 194302-25 viz Obr. 22. [39]



Obrázek 22 - Rádiusová fréza HSS-PM 25 mm [39]

Fréza je vhodná pro frézování půlkruhových drážek nebo pro frézování zaoblených přechodů. Dá se využít jako kopírovací fréza a při konstrukci forem.

Jedná se o frézu z rychlořezného materiálu s dvěma zuby, která je vhodná i pro polodokončovací operaci v mém experimentu.

Pro dokončovací část volím nástroj TK soudečková fréza, přímý tvar PPC 10/60 mm od firmy GARANT s katalogovým číslem 207520-10/60 viz Obr. 23. [38]



Obrázek 23 - TK soudečková fréza, přímý tvar PPC 10/60 mm [38]

Tato fréza umožňuje dokončovací operaci provést s nejkratší možnou dobou obrábění povrchů libovolného tvaru s vysokou kvalitou obrobené plochy díky zredukování a částečnou eliminací obráběcího kroku. Využívá se na moderních 5osých frézách s podporou CAD / CAM. Vlivem specifické geometrie nástroje je možné obrábět jak rovinné, tak zaoblené plochy součástí, forem a dalších výrobků. Díky vlastnímu naklonění obráběcího nástroje a je tudíž zajištěno, že řezná rychlost bude vždy vyšší než 0 m/min. Fréza je tvořena z tvrdokovu s povlakem TiAlN, pěti zuby a úhlem sklonu šroubovice 30° a je přímo určena pro metodu PPC. Je schopna obrobit zbytkový materiál od tlouštěk 0,05 až 0,2mm u materiálů s tvrdostí do 60 HRC. Nevýhoda je, že se efektivní poloměr nástroje 60mm nedá přebušovat. [33]

Pro další dokončovací části volím nástroj Rádiusová fréza HSS-PM 20mm od firmy GARANT s katalogovým číslem 194302-20 a další Rádiusovou frézou HSS-PM 8mm s katalogovým číslem 194302-8. [39]

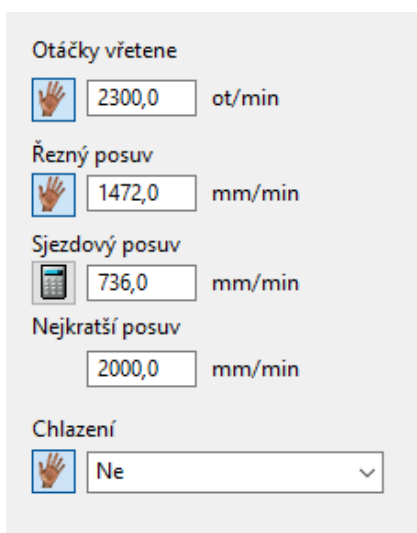
3.1. Programování

Pro experimentální část bylo vytvořeno několik projektů s různou topologií a kombinací obráběcích nástrojů, aby se mohla porovnat teoretická simulovaná kvalita povrchu, rozdílnost v časech obrábění, vhodnost obráběcích topologií a celková náročnost programování.

Prvotní obráběcí operace (hrubování a polodokončování) z plného bloku materiálu jsou u všech projektů stejné a dále jsou zaměřeny na variaci dokončovacích

operací. Pro hodnocení kvality povrchu jsem se rozhodl zvolit kritérium zbytkové výšky o velikosti 0,2mm, která nesmí být překročena.

Pro všechny projekty bylo nutno na začátku vytvořit jednotlivé obráběcí nástroje a limitující hranice jak pro hrubování válcovou frézou D25 mm, tak pro polodokončovací kulovou frézu D25 mm. Nástroje jsem vytvořil pomocí funkce tvorby nástrojů, kde uživatel může volit mezi mnohými tvary, ať už klasické válcové frézy přes kulové, soudečkové, kuželové a jiné. Jednotlivé parametry nástrojů jsem použil z katalogů jednotlivých nástrojů. Hranice bylo nejprve potřebné definovat vybranými plochami a tím se určil hlavní směr/podoba hranice a dalšími parametry došlo k upřesnění. [40]

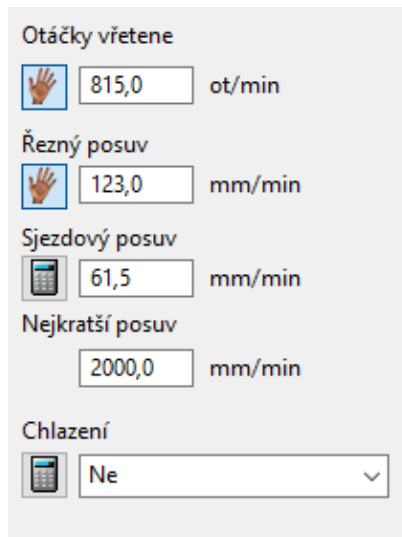


Otáčky vřetene	<input type="text" value="2300,0"/>	ot/min
Řezný posuv	<input type="text" value="1472,0"/>	mm/min
Sjezdový posuv	<input type="text" value="736,0"/>	mm/min
Nejkratší posuv	<input type="text" value="2000,0"/>	mm/min
Chlazení	<input type="text" value="Ne"/>	

Obrázek 24 - Řezná data hrubování D25 mm

Pro hrubování byla hranice nastavena jako horní s tolerancí 0,1 a přídávkem 0,7mm. Určil jsem, že se střed nástroje může pohybovat mimo hranici, změny potvrdil a vygeneroval hranici. Následně jsem vytvořil dráhu pomocí příkazu Hrubování modelu, kde jsem vybral v kategorii Nástroj válcovou frézu D25 mm, dále jsem nastavil v kategorii Omezení výše uvedenou hranici a v kategorii Hrubování modelu bylo doplněno, že se má jednat o sousledné obrábění pomocí kontury, s tolerancí 0,1 a přídávkem 7mm. Krok operace jsem zvolil 5mm, aby netrvala polodokončovací operace zbytečně dlouho. Řezné podmínky jsem čerpal z katalogu a pomocí přepočtu zjistil mnou potřebná data, jako jsou otáčky řezný posuv, sjezdový posuv a způsob chlazení viz Obr. 24.

Pro polodokončovací operaci byla vytvořena hranice stejným způsobem s rozdílem horní plochy i s překlopením s kulovou frézou D25 mm a změnou přídávku na 0,15mm z důvodu potřeb pro dokončovací operace soudečkovým nástrojem. Následně jsem pomocí funkce Zbytkové hrubování nastavil nástroj, omezení, toleranci, přídavek 0,15mm, krok 4mm a řezné podmínky viz Obr. 25. [39]

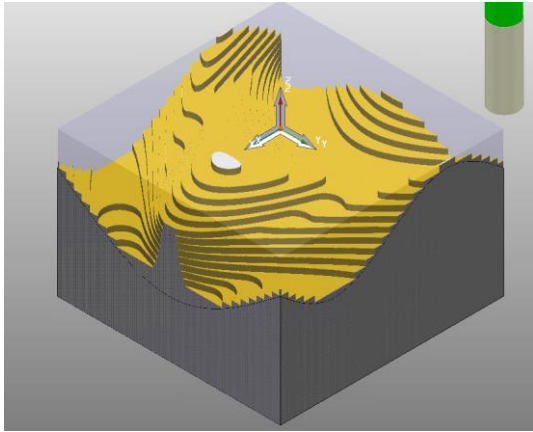


The image shows a screenshot of a CNC control interface with the following parameters:

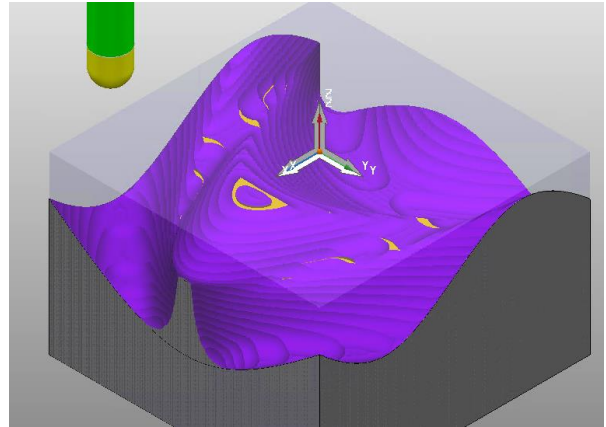
- Otáčky vřetene** (Spindle Speed): 815,0 ot/min
- Řezný posuv** (Cutting Feed): 123,0 mm/min
- Sjezdový posuv** (Retract Feed): 61,5 mm/min
- Nejkratší posuv** (Minimum Feed): 2000,0 mm/min
- Chlazení** (Cooling): Ne (Off)

Obrázek 25 - Řezná data polodokončování kulová fréza D25 mm

Provedl jsem kontrolu obrobení a kolizí pomocí simulace, viz Obr. 26 a Obr. 27. Nástroj v žádném místě obrábění nekolidoval s obrobkem tudíž jsem přešel k jednotlivým projektům. Barevnost jednotlivých operací je čistě náhodná a software si jí generuje sám. Dle statistiky obrábění bude trvat Hrubování 50 minut a 43 vteřin a polodokončování 6 hodin, 47 minut 36 vteřin což je u výrobku daných rozměrů reálné. Řezné podmínky jako řezná rychlost je stanovena výrobcem v katalogu a ostatní řezné podmínky jsem dopočítával. Pro nástroj válcová fréza D25 mm výrobce doporučuje řeznou rychlost 180m/min s posuvem na zub 0,16mm/zub. U kulové frézy D25 je doporučena řezná rychlost 64m/min s posuvem na zub 0,076mm/zub.



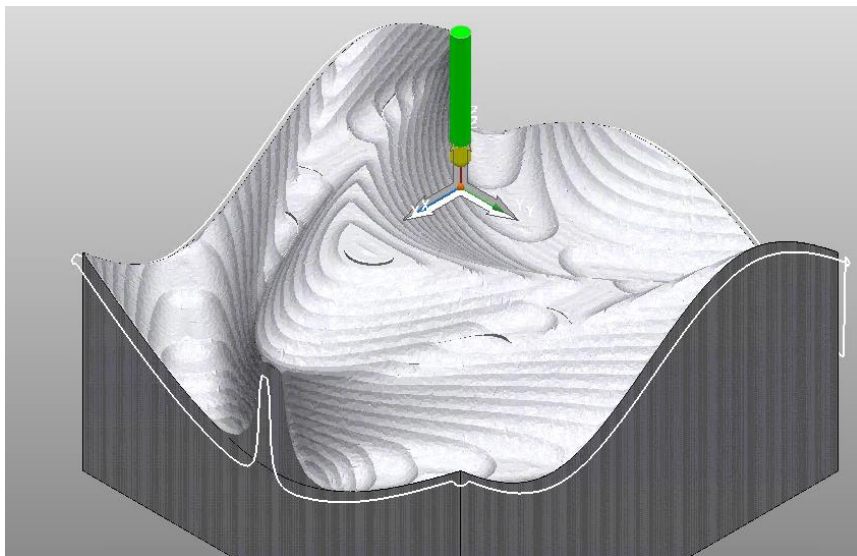
*Obrázek 27 - Simulace obrábění
hrubování*



*Obrázek 26 - Simulace obrábění
polodokončení*

3.1.1. Projekt 1





Projekt 1 je koncipován na základě obrábění malým nástrojem kulovou frézou D8 mm po celé ploše obrobku pomocí strategie řádkování, pro něž musela být nejprve vytvořena omezující hranice s parametry horní hranice s překlopením s přídávkem 0mm pro nástroj kulová fréza D8 mm, viz Obr. 28.



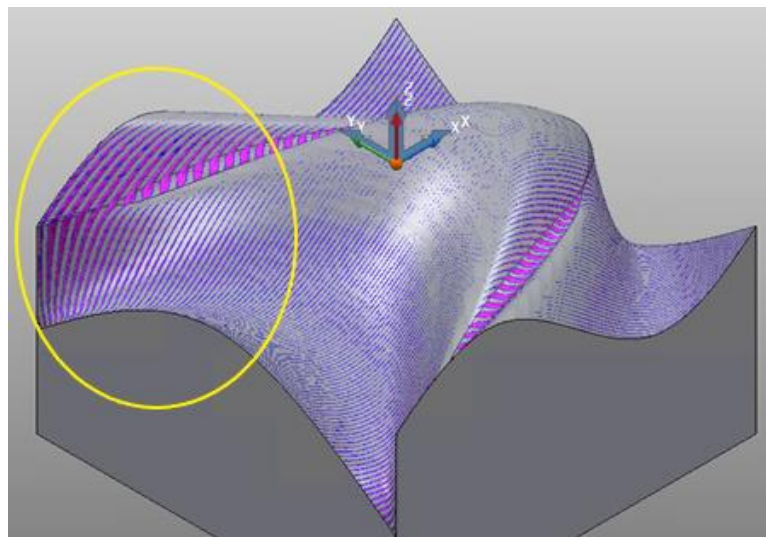
Obrázek 28 - Zobrazení vytvořené hranice pro kulovou frézu D8 mm

Pomocí funkce Dokončení řádkováním jsem definoval nástroj, omezující hranici, toleranci, přídavek a následně krok. Pro lepší znázornění vhodných a nevhodných oblastí jsem použil krok 2mm. Řezné podmínky jsem dopočítal dle doporučení výrobce

z katalogu pro nástroj kulová fréza D8 mm, který udává řeznou rychlost 64m/min s posuvem na zub 0,024mm/zub, viz Obr. 29. [39]

Otáčky vřetene	
	<input type="text" value="2547,0"/> ot/min
Řezný posuv	
	<input type="text" value="122,0"/> mm/min
Sjezdový posuv	
	<input type="text" value="61,0"/> mm/min
Nejkratší posuv	
	<input type="text" value="2000,0"/> mm/min
Chlazení	
	<input type="text" value="Ne"/>

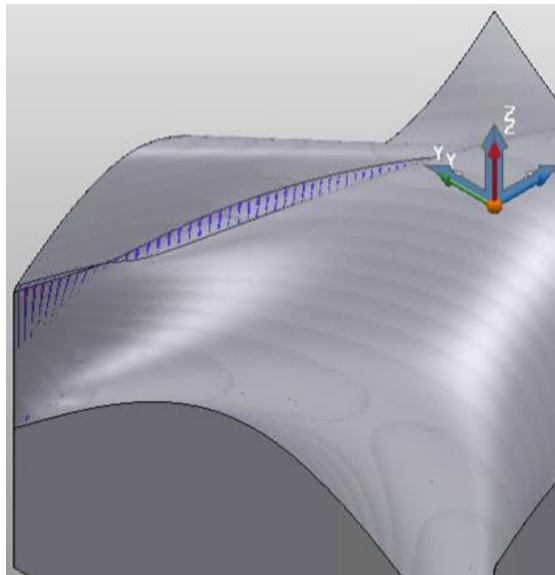
Obrázek 29 - Řezné podmínky pro kulovou frézu D8 mm



Obrázek 30 - Zbytkový materiál při obrábění řádkováním

Jak je vyobrazeno na Obr. 30, který ukazuje zbytkový materiál. Modře je označen zbytkový materiál s tolerancí do 0,2mm a růžově jsou vyobrazena místa, kde je hodně zbytkového materiálu, a tudíž klesá výsledná kvalita povrchu. Tímto krokem jsem si ověřil, že na strmé plochy není Dokončování pomocí řádkování vhodnou variantou. Dále během simulace nastal problém s hlášením kolize, která se týkala sjezdu nástroje do materiálu vlivem nevhodného nájezdu chvilku po začátku obrábění. Tento problém

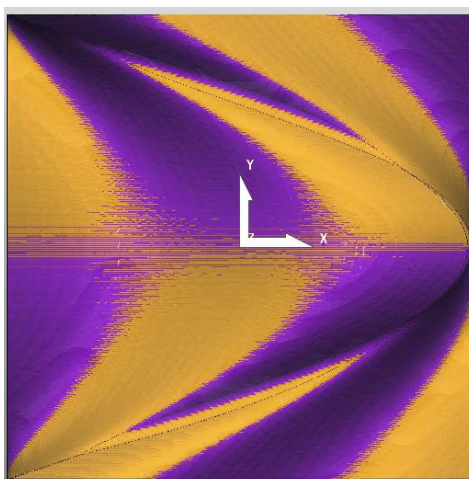
se dá lehce odstranit pomocí úpravy v samotné funkci řádkování, a to v kategorii Nájezdy, kde jsem nastavil vhodnější variantu nájezdu pomocí vertikálního oblouku pod úhlem 90° s poloměrem nájezdu 10mm a opět se nechal dráhu vypočítat. Abych dosáhl podmínky přijatelné tolerance zbytkového materiálu uvedené v kapitole programování, musel jsem snížit krok na 0,9mm. Splnění podmínky jsem si ověřil následnou simulací a kontrolou zbytkového materiálu viz Obr. 31, ve kterém je jasně zřetelný problém s ostrými plochami. Zároveň je vidět, že obrobek je celý obrobený v zadané toleranci. Obrábění touto funkcí celkově trvalo 9 hodin, 39 minut a 46 vteřin.



Obrázek 31 - Obrobením řádkováním na požadovanou toleranci zbytkového materiálu

Jelikož je součást symetrická, tak je na Obr. 31 znázorněný detail část pro lepší přehlednost v oblasti, která je vyznačená na Obr. 30.





Když jsem následně přepnul na analýzu směru obrábění tak je zřetelné, že přesně polovina je obráběna nesousledně, což má nežádoucí efekt na výsledný povrch i na opotřebení nástroje vlivem vysokých tahových pnutí a může dojít k ulpívání nebo navařování třísek na samotný břit nástroje, viz Obr. 32, kde je nesousledné obrábění vyobrazeno fialovou barvou.



Obrázek 32 - Poměr sousledného a nesousledného obrábění řádkováním

3.1.2. Projekt 2

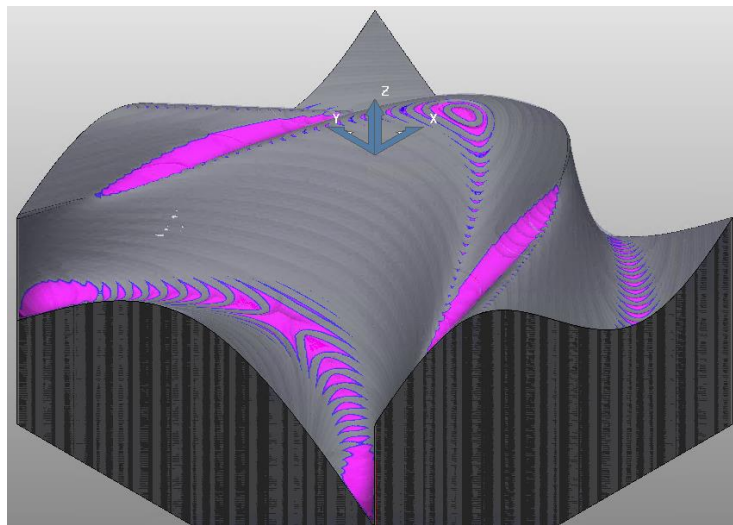
Projekt 2 byl sestaven na základě kombinaci dvou nástrojů, a to obrábění kulovou frézou D20 mm a kulovou frézou D8 mm. Naprogramování probíhalo pouze pomocí funkcí obrábění v Z hladině. Nejprve byla vytvořena omezující hranice horní s překlopením s přídkem 0 mm pro nástroj kulovou frézu D20 mm. Následně jsem vytvořil dráhu obrábění v Z hladině s minimálním krokem 1 mm. Řezné podmínky byly opět dopočítány z katalogu a zadány do kategorie Posuvy a rychlosti v dráze, viz Obr. 33.

Otáčky vřetene	
	1019,0 ot/min
Řezný posuv	
	155,0 mm/min
Sjezdový posuv	
	77,5 mm/min
Nejkratší posuv	
	2000,0 mm/min
Chlazení	
	Ne

Obrázek 33 - Řezné podmínky pro kulovou frézu D20 mm.

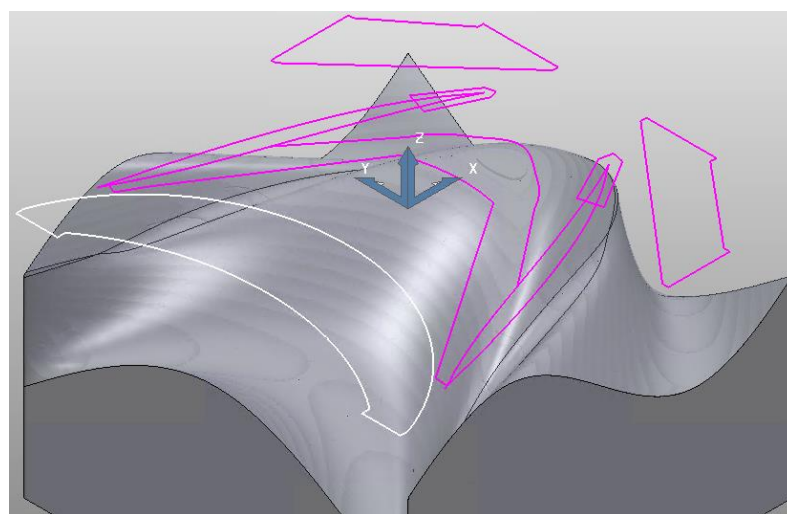
Následně došlo ke spuštění simulace kontroly kolizí a zbytkového materiálu z přehledu a kontroly zbytkového materiálu je jasně patrné, že obrábění v Z hladině není

vhodné pro pozvolné přechody tvarových ploch, ale je vidět, že velmi dobře fungují na strmější plochy obrobku, viz Obr. 34.



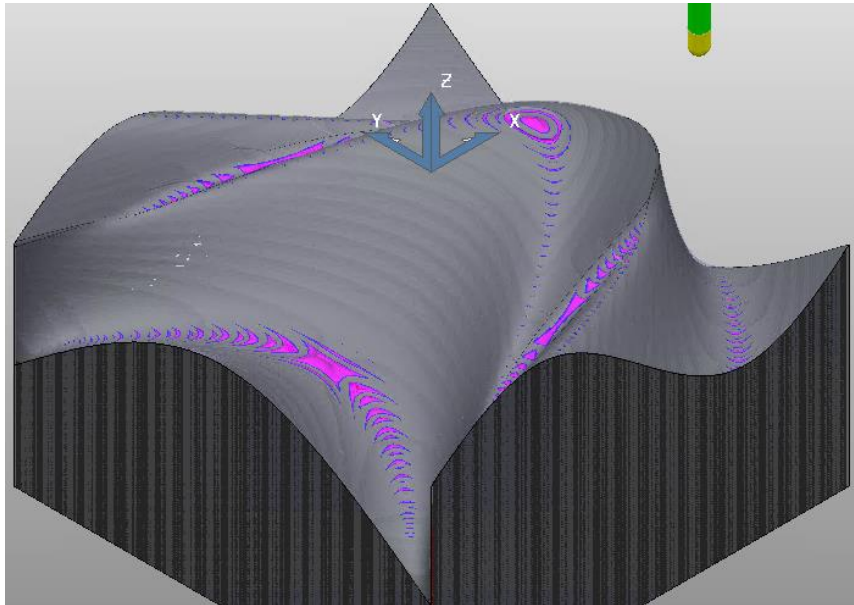
Obrázek 34 - Zbytkový materiál obrábění v Z hladině

Jak je vidět z Obr. 34, po obrobení zůstalo víc míst se zbytkovým materiálem, což znamená, že budu muset využít další nástroj na obrábění, a to kulovou frézu D8 mm, abych dosáhl požadované tolerance. Řezné podmínky pro nástroje jsou shodné pro všechny projekty. Díky použití většího nástroje však došlo k úspoře času v první dokončovací operaci, ale naprogramování zbytkového obrábění a tvorba jednotlivých hranic je naopak složitější. Čas po první obráběcí operaci je vypočítána na 7 hodin, 32 minut a 44 vteřin.



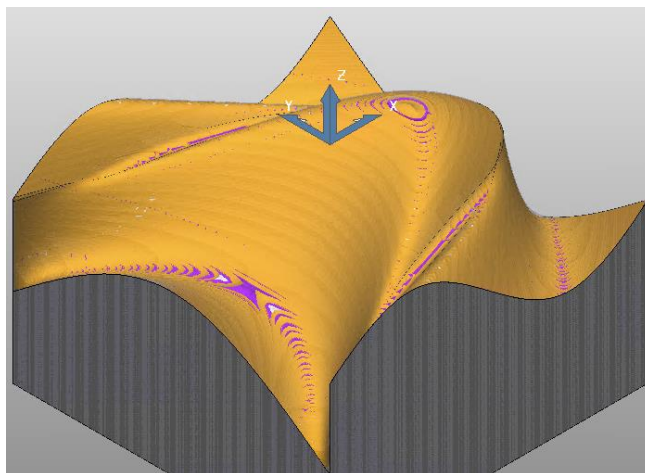
Obrázek 35 - Omezující hranice pro obrobení zbytkového materiálu

Na Obr. 35 jsem vytvořil jednotlivé hranice všech míst, která nešla definovat plochou, nýbrž je bylo nutné vytvořit ručně uživatelem pomocí přímek oblouků a dalších prvků. Následně byly hranice přeneseny na povrch a srovnány. Naprogramoval jsem doplňkové dráhy obrábění v Z hladině, jako krok jsem u kulové frézy D8 mm jsem zvolil 0,5mm a spustil simulaci s kontrolou.



Obrázek 36 - Zbytkový materiál při sníženém kroku a změnou nástroje

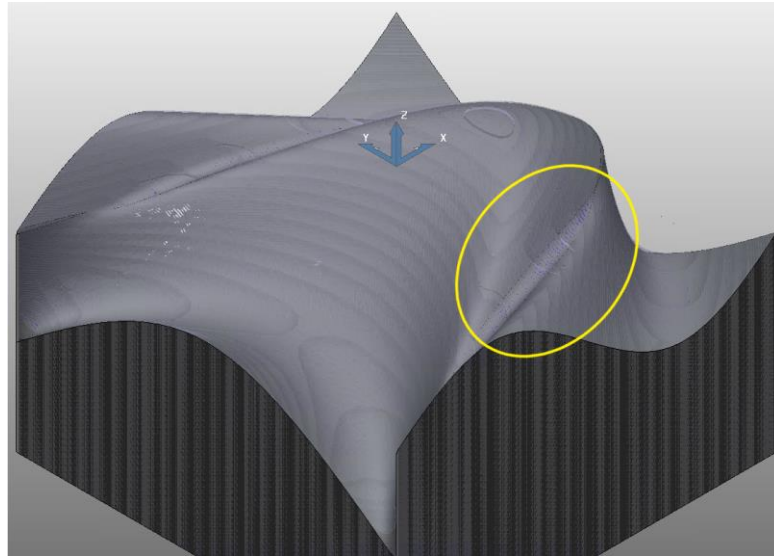
Na Obr. 36 je vidět jisté zmenšení zbytkového materiálu, ale ani s krokem 0,5mm jsem požadované tolerance nedosáhl a je vidět že obráběním v Z hladině nelze obrobit zbytková místa ani za pomoci menšího nástrojem v rozumném čase a je nutné hledat vhodnější řešení. Zbytkové obrábění s krokem 0,5mm trvalo 10 hodin, 15 minut a 47 vteřin. Ani s upravením kroku na 0,1mm pro oblasti se zbytkovým materiálem nedošlo ke splnění mé tolerance, tudíž jsem v projektu přestal pokračovat a byla potvrzena nevhodnost obráběcí dráhy pro tato konkrétní místa. Naopak z analýzy sousledného a nesousledného obrábění je tato varianta velmi výhodná, jelikož obrábění probíhá převážně sousledně až na pár detailních oblastí se zbytkovým materiálem, viz. Obr. 37, kde sousledné obrábění je zbarvené oranžovou barvou.



Obrázek 37 - Poměr sousledného a nesousledného obrábění v Z hladině

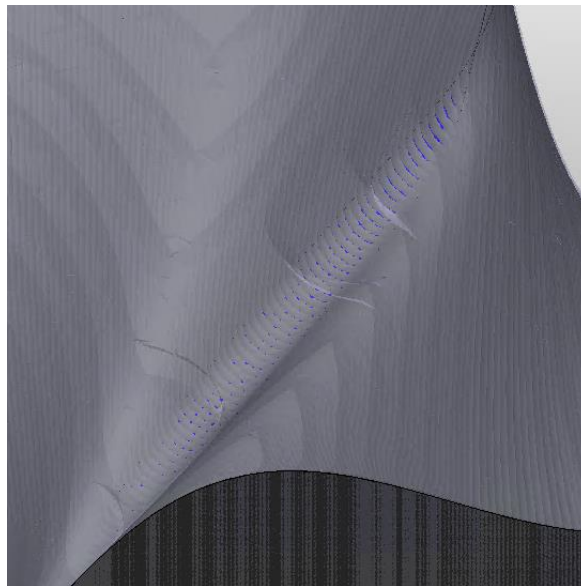
3.1.3. Projekt 3

V projektu 3 jsem se zaměřil na vytvoření kombinace dvou topologií ve výše zmíněných projektech. Jedná se o obrobení jedním malým nástrojem kulovou frézou D8 mm tak, abych dosáhl potřebné tolerance zbytkového materiálu a zamezilo se vzniku míst, která by se musela složitě obrábět dodatečně. Jako první byla opět vytvořena omezující horní hranice s tolerancí 0,1 a přídávkem 0mm pro nástroj kulová fréza D8 mm s možností vyjetím osy při obrábění mimo obrobek. Pokračoval jsem vytvořením samotné dráhy obrábění, pro kterou jsem tentokrát použil funkci obrábění Dokončení optimalizovanou hladinou Z a nastavil omezení krok 1mm. Je důležité hlídat, zdali není zaškrtnuté políčko s Použitím odděleného horizontálního kroku, kde se může nastavit hodnota vyšší než krok, což je v mém případě nežádoucí a vede k obrobení nesplňující výslednou toleranci zadanou v úvodu programování.



Obrázek 38 - Zbytkový materiál Dokončení optimalizovanou hladinou Z

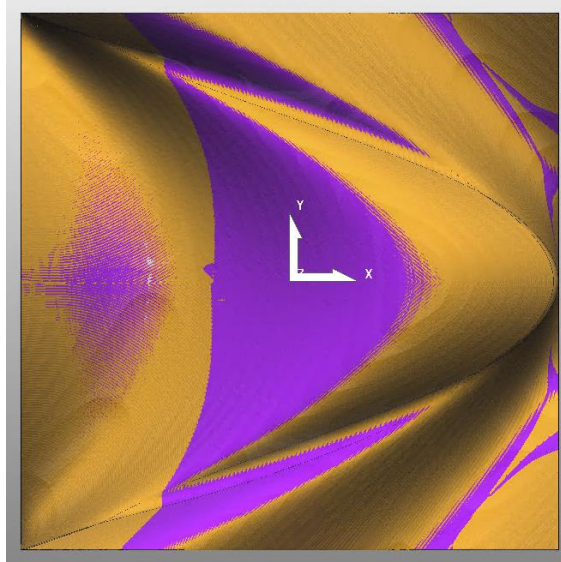
Následovala simulace a kontrola kolizí, kde se ukázalo, že dochází ke kolizi, kterou jsem odstranil změnou nájezdu dráhy. Jak je vyobrazeno na Obr. 38 a na Obr. 39 zachycující detailní přiblížení označené lokace, jediná problémovější oblast je samotný rádius obráběné součásti s minimálním zbytkovým materiálem. Zvolenou podmínku tolerance splňuje.



Obrázek 39 - Detail oblasti zbytkového materiálu

Z analýzy sousledného a nesousledného obrábění je však část nesousledně obráběná větší než u Projektu 2, ve kterém toto obrábění bylo minimální. V porovnání

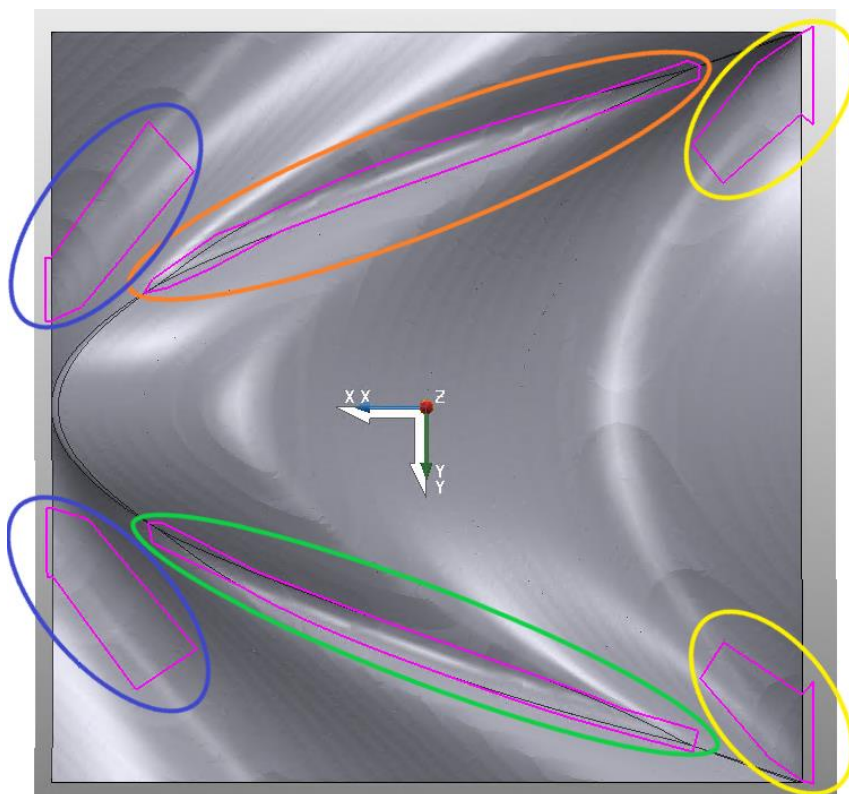
s Projektem 1 je podíl nesousledného frézování menší, z čehož vyplývá, že se jedná o střední variantu, ale vždy záleží na konečných požadavcích na plochu a také na čase obrábění, který u této dokončovací varianty je podle statistiky 10 hodin, 16 minut a 25 vteřin, viz Obr. 40.



Obrázek 40 - Poměr mezi nesousledným a sousledným obrábění v Optimalizované hladině Z

3.1.4. Projekt 4

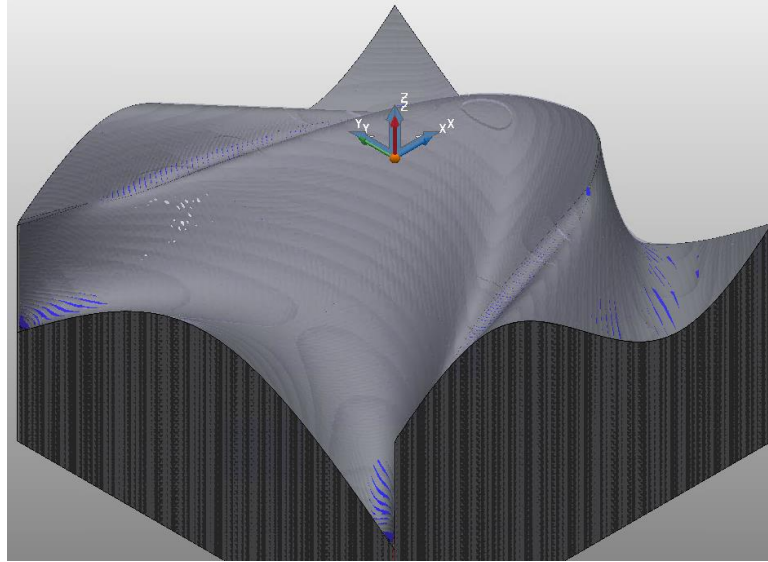
V projektu 4 jsem se zaměřil na časovou optimalizaci předchozího projektu s pomocí dvou nástrojů – kulové frézy D20 mm a kulové frézy D8 mm na dokončení neobrobených míst. Zároveň zde došlo ke kombinaci několika typů drah a příkazů. Nejprve jsem začal definicí omezující hranice pro nástroj kulová fréza D20 mm, následně jsem vytvořil základní dráhu obrobení pomocí funkce Dokončení optimalizovanou rovinou Z s řeznými rychlostmi od výrobce, který doporučuje řeznou rychlost 64m/min a posuv na zub 0,076mm/zub. Díky této funkci jsem byl schopen obrobit velkou část modelu větším krokem, o velikosti 2mm, než u předchozích projektů, tudíž se i napříč složitosti dráhy podařilo snížit základní čas obrábění, ale za vzniku zbytkového materiálu, pro který jsem následně vytvořil limitující hranice vyobrazené fialovou barvou na Obr. 41.



Obrázek 41 - Limitující hranice Projektu 4

Hranice na Obr. 41 jsou rozdělené do barevných segmentů, kde pro jednotlivé barvy je použita jedna dráha obrábění. Všechny hranice jsou vytvořeny ručně, jelikož software mi neumožňoval využít předdefinované funkce, kterých je v softwaru poskromnu, proto je zde vidět nepravidelnost jednotlivých hranic. Hranice byly vytvářeny pomocí přímek, oblouků, dělení segmentů a spojování. Hranice jsou vytvořeny pro nástroj kulová fréza D8 mm. Hranice v modrém oválu jsou obrobeny funkcí Dokončení optimalizovanou hladinou Z, kde jsem nastavil krok 1,5mm pro úsporu obráběcího času. Hranice ve žlutém označení má vysokou strmost a úzký prostor, proto se do těchto míst větší nástroj nevešel a při obrobení jsem použil též dráhu Dokončení optimalizovanou hladinou Z s krokem 1,5mm se stejným horizontálním krokem a zvolil jsem ještě vyhlazení. Pro hranici v zeleně vyznačené oblasti jsem použil napříč větší problematice obrábění pomocí Řádkování, jelikož se mi díky této dráze podařilo obrobit rádius kvalitněji než pomocí jiných funkcí. Pomohl jsem si v nastavení dráhy volbou pevného směru s úhlem 11° , díky kterému se mi převýšení povedlo snížit. Právě proto se pro mě stala funkce Řádkování nejlepším možným řešením a mohl jsem si dovolit

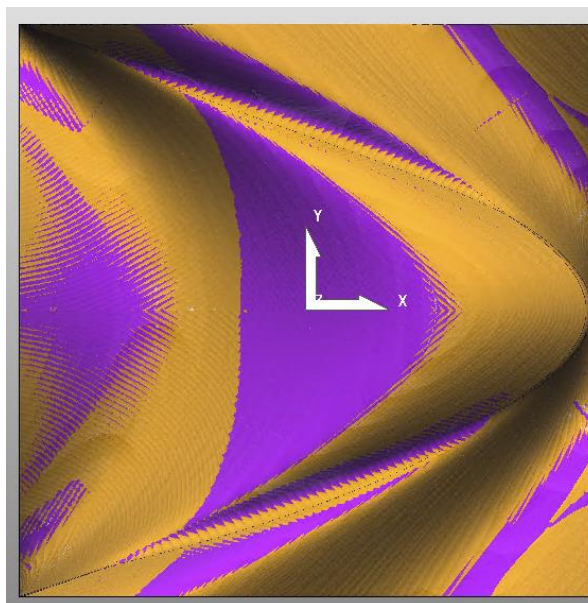
zvýšení kroku na 1,5mm s dostatečným účinkem. Hranice v oranžovém označení byla naprogramována stejným způsobem, jen s rozdílem úhlu, který je -11° a stejným krokem 1,5mm.



Obrázek 42 - Zbytkový materiál Projektu 4

Největší soustředění materiálu je v oblasti strmých ploch u hranice se žlutým označením, viz Obr. 42.

Následně provedenou analýzou sousledného a nesousledného frézování jsem potvrdil, že nelze vytvořit zcela dokonalý povrch tak, aby měl jen výhody. Každá operace má své rizika a následky. Díky náročnějšímu programování a optimalizaci se podařilo součást obrobít dokončovacími operacemi v kratším čase a to za 9 hodin, 29 minut a 4 vteřiny, což je o přibližně 46 minut méně než Projekt 3. Úspora času se ale promítla do oblasti nesousledného obrábění, která se zvětšila, ale ne o velkou část, viz Obr. 43, kde je podíl nesousledného obrábění vyobrazen fialovou barvou.



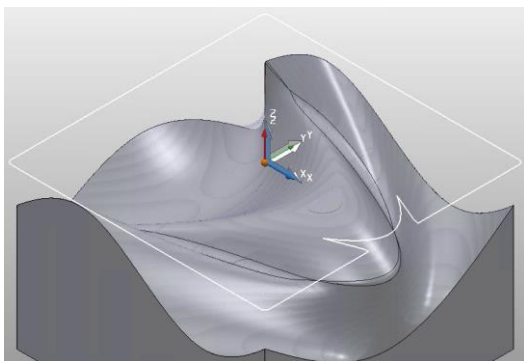
Obrázek 43 - Poměr sousledného a nesousledného obrábění v Projektu 4

3.1.5. Projekt 5

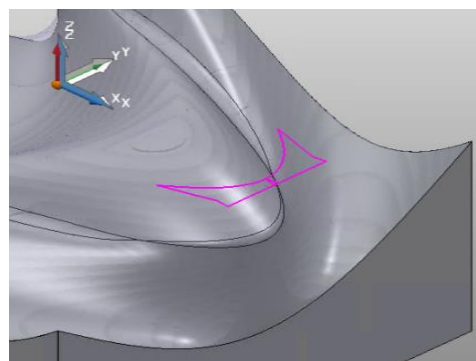
Projekt 5 byl vytvořen jako ukázka nejnovější technologie v obrábění Freeform surfaces, a to obrábění strmých ploch pomocí soudečkové frézy s přímým tvarem a s tepelným upínačem HSK-F 63 s katalogovým číslem 308193 z katalogu od firmy Garant. [41]

Projekt 5 slouží jako ukázka, ale i přesto jsem s touto technologií pracoval tak, abych měl porovnatelná data, co se týče času nebo zbytkového materiálu, proto jsem Projekt 5 založil na principu Projektu 1.

Na začátku jsem si musel vytvořit nový nástroj, a to soudečkovou frézu dle parametrů z katalogu od výrobce. Při tvorbě nástroje se objevilo několik karet blíže určujících jak samotnou řeznou část nástroje, tak dřík, vlastní upínač nástroje, či řezná data. Po vytvoření nástroje jsem začal definovat omezující hranice pro jednotlivé obráběcí dráhy. V hranici pro obrábění většiny součásti řádkováním jsem ručně vytvořil výřez u strmého nosu součásti tak, abych byl následně schopen vytvořit další dvě hranice pro obrobení nosu viz Obr. 44 a Obr. 45.







Obrázek 45 - Omezující hranice pro kulovou frézu D8 mm



Obrázek 44 - Dvě omezující hranice pro soudečkový nástroj

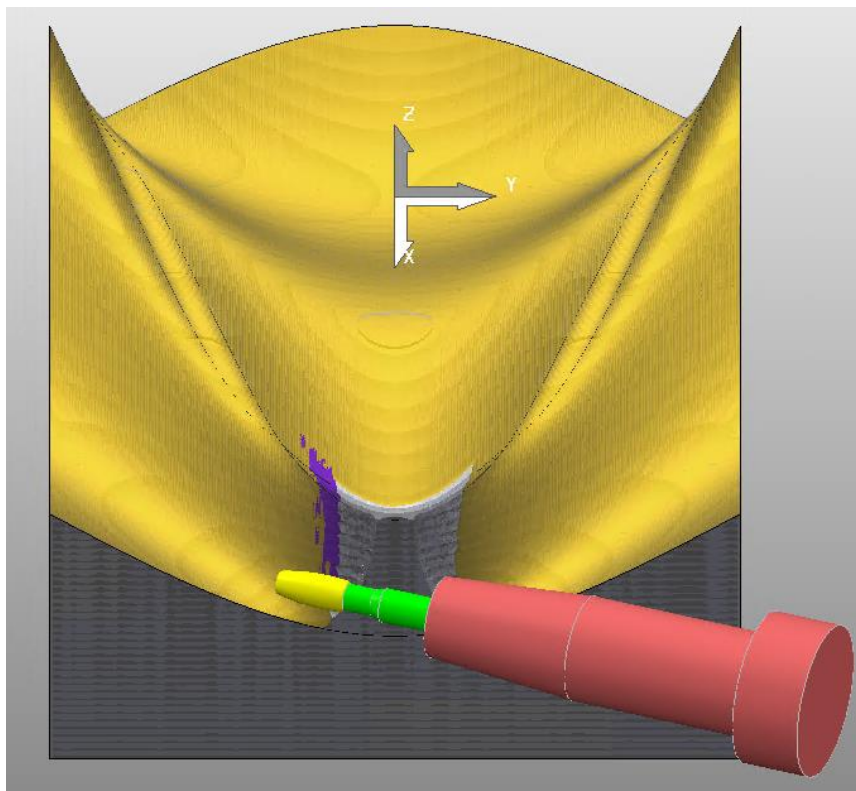
Postupně jsem vytvořil dráhy. Pro omezující hranici pro kulovou frézu D8 mm jsem použil funkci Řádkování s krokem 0,9mm, abych dodržel podstatu Projektu 1 a zároveň splnil mnou zadanou toleranci zbytkového materiálu. Řezné podmínky jsem určil z řezné rychlosti udávané výrobcem a díky průměru nástroje jsem spočítal otáčky. Rychlost řezného posuvu jsem spočítal pomocí posuvu na zub udávaný výrobcem v katalogu, počtem zubů frézy a otáčkami vypočítaných v kroku před.

Pro obrábění soudečkovým nástrojem jsem zvolil funkci obrábění pomocí Řádkování, kde byl nastaven nástroj, omezení v podobě hranice v levé části Obr. 45 ponechal jsem nastavený pevný směr a díky soudečkovému nástroji jsem zvolil krok 2mm. V záložce osa nástroje však došlo ke změnám oproti ostatním projektům, kde docházelo k obrábění s vertikální osou nástroje. V tomto případě jsem osu nástroje změnil na Náklon/Odklon s odklonem na hodnotu 85°. Doplnil jsem v další záložce řezné podmínky určené a dopočtené stejným způsobem jako u kulové frézy D8 mm, kde výrobce doporučuje řeznou rychlost 150m/min s posuvem na zub 0,06mm/zub, viz Obr. 46. Díky nové výkonnější technologii jsem schopen obrábět vyšší řeznou rychlostí, vyššími otáčkami, proto je důležitá i vhodná volba obráběcího stroje, aby byl schopen dosáhnout požadovaných otáček a měl dostatečný výkon.

Otáčky vřetene		
	<input type="text" value="4777,0"/>	ot/min
Řezný posuv		
	<input type="text" value="1910,0"/>	mm/min
Sjezdový posuv		
	<input type="text" value="955,0"/>	mm/min
Nejkratší posuv		
	<input type="text" value="2000,0"/>	mm/min
Chlazení		
	<input type="text" value="Ne"/>	

Obrázek 46 - Řezné podmínky pro soudečkovou frézu

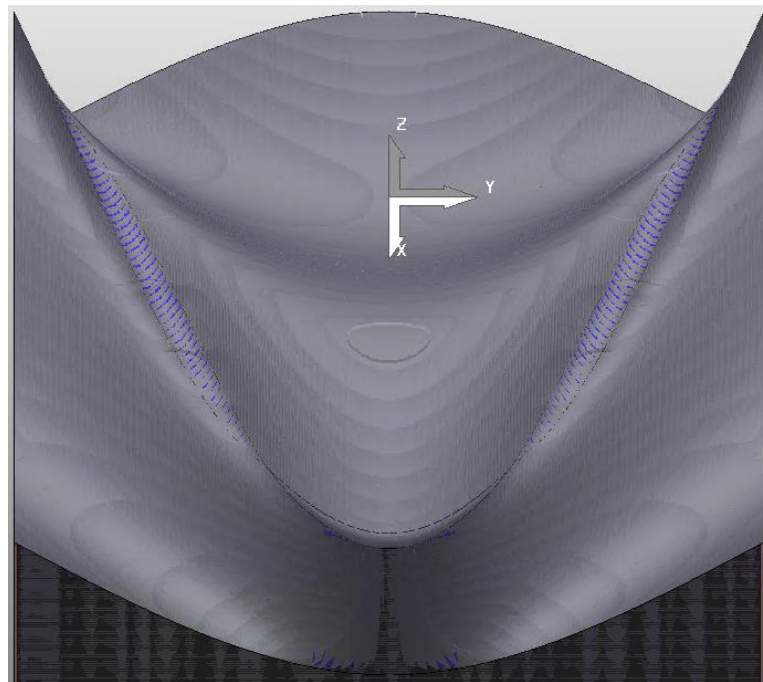
Dráha podle omezující hranice na pravé straně Obr. 45 byla vytvořena stejným způsobem s rozdílem v tom, že odklon osy nástroje byl nastaven na -85° .



Obrázek 47 - Ukázka obrábění bokem soudečkového nástroje

Jak je znázorněno na Obr. 47, jedná se o prostorově náročnější obrábění a je zde i vysoké riziko kolizí nástroje nebo upínače s obrobkem. Ne všechny strmé plochy se dají

touto metodou obrábět a je důležité si provést rozbor použitelnosti této technologie před samotným programováním, jelikož je časově náročnější. Důležité je též zvolit vhodné podlouhlé upínače. V mém případě metoda šla využít z důvodu lokalizace strmé plochy na kraji obrobku, a navíc ve správném natočení a dostatečném prostoru pro nástroj, tudíž jsem se zaměřil na to, aby upínač byl umístěný směrem ven z obroku.



Obrázek 48 - Zbytkový materiál po obrábění Projektu 5

Z Obr. 48 je vidět, že obrobení proběhlo v nastavené toleranci a jediná rizikovější místa se nacházejí u kořene nosového výběžku, jelikož zde dochází k přechodu ze strmé plochy. Analýza poměru sousledného a nesousledného frézování zůstala stejná jako u Projektu 1, tudíž se zde v Projektu 5 dá hodnotit rozdíl časů, který je díky obrábění tak malé plochy nižší o 7 minut a 11 vteřin, což netvoří velký rozdíl.

Závěr

Z jednotlivých projektů vyplývá, že neexistuje pouze jedna správná topologie s dokonalým povrchem, časem obráběním, nebo využitím CNC stroje, nýbrž je tu mnoho aspektů, se kterými je třeba počítat, jak při programování, tak při výsledném hledání ekonomicky výhodného řešení, ať už s ohledem na množství nástrojů, druhy strojů, potřebných pomůcek, softwaru, času obrábění a jiných ukazatelů. Jednotlivé kladné aspekty se většinou nesčítají, ale fungují na kompromisu dle zadaných podmínek na obrábění, kvalitu povrchu a výsledné využití výrobku v praxi, určené na začátku zadání zakázky. Vždy je snaha volby dokonalé kombinace kladných a záporných aspektů výroby.

Z hlediska kvality výsledného povrchu opotřebení nástrojů vlivem vysokých tahových pnutí, hraje poměr sousledného a nesousledné frézování velikou roly, tudíž by měla být snaha obrábět převážně sousledně. Nejhůře vychází obrábění pomocí řádkování v Projektu 1 a v Projektu 5, kde byla nesousledně obráběna polovina povrchu. V Projektu 4 je též větší podíl nesousledného frézování oproti Projektu 3, ale také došlo ke značnému zkrácení obráběcího času o přibližně 46 minut. Nejlépe z pohledu poměru sousledného a nesousledného obrábění vychází Projekt 2, který je tvořen pomocí funkce obrábění v Z hladině, ale nepodařilo se dosáhnout podmínky na velikost zbytkového materiálu. Proto by byla nutná následná optimalizace pomocí jiných obráběcích funkcí, která by vedla ke vzrůstu podílu nesousledného obrábění.

Z hlediska časového vytížení dokončovacího obrábění vychází nejlépe varianta Projekt 5, která je o 7 minut a 11 vteřin kratší než Projekt 1, který spotřeboval na obrobení 9 hodin, 39 minut a 46 vteřin. Na obou projektech jsou zřejmé obtíže s obráběním rádiusu mezi přechody ploch. Další v pořadí se umístil Projekt 4, který je optimalizovanou variantou Projektu 3 a to s rozdílem přibližně 46 minut, kdy Projekt 4 byl obráběn 9 hodin, 29 minut a 4 vteřiny. Nejhůře z časového hlediska vyšel Projekt 2, jelikož nebylo dosaženo podmínky zbytkového materiálu ani s krokem 0,1 mm, při kterém dokončovací obrábění trvalo přibližně 57,5 hodiny a s nastavením

kroku obrábění zbytkových míst na 0,5 mm dokončovací proces trval přibližně 17 hodin a 45 minut bez dosažení tolerance.

Na rozdíl od Projektu 1 je v Projektu 5 použita i nová technologie obrábění soudečkovým nástrojem, díky které se podařilo optimalizovat čas obrábění nejen zvětšením kroku při dodržení tolerance, ale též díky vyšší řezné rychlosti a vyššímu počtu zubů samotného nástroje. Zároveň jsou kladeny větší požadavky na samotný obráběcí CNC stroj, což může vést k vysokým vstupním i provozním nákladům. Z ekonomického hlediska by vzhledem k mému obrobku, tato metoda nebyla prospěšná, jelikož nedošlo k výrazné úspoře času, nýbrž pouze vzrostly náklady na stroj a vybavení.

Seznam použité literatury

- [1] *Face milling* [online]. Sandvik, 2010 [cit. 2022-03-05]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/en-gb/knowledge/milling/pages/face-milling.aspx>
- [2] *What Is Milling?- Definition, Process, And Operations: What Is Milling?* [online]. Engineering Choice, 2010 [cit. 2022-03-05]. Dostupné z: <https://www.engineeringchoice.com/milling/>
- [3] *Shoulder milling: Shoulder / face milling* [online]. Sandvik, 2010 [cit. 2022-03-05]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/en-gb/knowledge/milling/pages/shoulder-milling.aspx>
- [4] ZHU, LiMin, XiaoMing ZHANG, Gang ZHENG a Han DING. *Analytical Expression of the Swept Surface of a Rotary Cutter Using the Envelope Theory of Sphere Congruence* [online]. ASME Digital collection. J. Manuf. Sci. Eng., 2009 [cit. 2022-03-07]. Dostupné z: https://asmedigitalcollection.asme.org/manufacturingscience/article/131/4/041017/419371/Analytical-Expression-of-the-Swept-Surface-of-a?casa_token=AQaBETFENTIAAAAA:MZqhwvSh0NLFNiNsljqg57yiXzVD8gRobXh1qKPDiP4Qgs3Za9RuzNjcabN-Lfог4_BsG3124
- [5] *LC15Dx - Closing the gap with tactile probe accuracy: The LC15Dx CMM laser scanner provides non-contact measurements at the highest accuracy level* [online]. Europe: Nikon Metrology NV, 2021 [cit. 2022-03-07]. Dostupné z: <https://nikonmetrology.com/en-gb/3d-metrology/automated-3d-scanning-lc15dx>
- [6] *Larger format freeform fabrication and metrology* [online]. SPIE Digital Library, 2021 [cit. 2022-03-07]. Dostupné z: https://www.spiedigitallibrary.org/ContentImages/Proceedings/10692/106920L/FigureImages/00016_PSiSDG10692_106920L_page_3_1.jpg
- [7] CHEN, Fang, Gordon a Mumin SONG. *Overview of 3-D shape measurement using optical methods*. 2000, **39**(1), 10-22. Dostupné z: doi:10.1117/1.602438
- [8] HOCKEN, R. J.; CHAKRABORTY, N.; BROWN, C. Optical metrology of surfaces. *CIRP annals*, 2005, 54.2: 705-719.
- [9] ZHU, Liang, et al. Efficient registration for precision inspection of free-form surfaces. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2007, 32.5: 505-515.

- [10] WECKENMANN, A., et al. Probing systems in dimensional metrology. *CIRP annals*, 2004, 53.2: 657-684
- [11] Chu A My. *Integration of CAM Systems into Multi-axes Computerized Numerical Control Machines* [online]. Le Quy Don Technical University, 2010 [cit. 2022-03-07]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/CL-Tool-path-The-CL-points-data-represents-in-ISO-format-as_fig1_261356428
- [12] *Down milling vs. up milling* [online]. SANDVIK [cit. 2022-03-08]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/en-gb/knowledge/milling/pages/up-milling-vs-down-milling.aspx>
- [13] CAMPBELL, Richard J.; FLYNN, Patrick J. A survey of free-form object representation and recognition techniques. *Computer Vision and Image Understanding*, 2001, 81.2: 166-210.
- [14] CHEN, Zezhong C.; DONG, Zuomin; VICKERS, Geoffrey W. Automated surface subdivision and tool path generation for 31212-axis CNC machining of sculptured parts. *Computers in Industry*, 2003, 50.3: 319-331.
- [15] LEE, Yuan-Shin; CHOI, Byoung Kyu; CHANG, T. C. Cut distribution and cutter selection for sculptured surface cavity machining. *International Journal of Production Research*, 1992, 30.6: 1447-1470.
- [16] HAN, Zhonglin; YANG, D. C. H.; CHUANG, Jui-Jen. Isophote-based ruled surface approximation of free-form surfaces and its application in NC machining. *International Journal of Production Research*, 2001, 39.9: 1911-1930.
- [17] Recent development in CNC machining of freeform surfaces. *Computer-Aided Design*. 2010, (7), 641-654. ISSN 0010-4485. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.cad.2010.04.002>.
- [18] LASEMI, Ali; XUE, Deyi; GU, Peihua. Recent development in CNC machining of freeform surfaces: A state-of-the-art review. *Computer-Aided Design*, 2010, 42.7: 641-654.
- [19] KIM, Bo H.; CHOI, Byoung K. Machining efficiency comparison direction-parallel tool path with contour-parallel tool path. *Computer-Aided Design*, 2002, 34.2: 89-95.
- [20] PARK, Sang C. Sculptured surface machining using triangular mesh slicing. *Computer-Aided Design*, 2004, 36.3: 279-288.
- [21] DING, Songlin, et al. Adaptive iso-planar tool path generation for machining of free-form surfaces. *Computer-Aided Design*, 2003, 35.2: 141-153.

- [22] FENG, Hsi-Yung; TENG, Zhengji. Iso-planar piecewise linear NC tool path generation from discrete measured data points. *Computer-Aided Design*, 2005, 37.1: 55-64.
- [23] SARMA, Sanjay E. The crossing function and its application to zig-zag tool paths. *Computer-Aided Design*, 1999, 31.14: 881-890.
- [24] HINDUJA, S.; MANSOR, M. S. A.; OWODUNNI, O. O. Voronoi-diagram-based linking of contour-parallel tool paths for two-and-a-half-dimensional closed-pocket machining. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2010, 224.9: 1329-1350.
- [25] *Dynamic 5-axis milling with GARANT PPC mills and PPC indexable inserts* [online]. Německo: Hoffmann group [cit. 2022-04-12]. Dostupné z: <https://www.hoffmann-group.com/GB/en/houk/areas-of-application/machining/solid-carbide-barrel-milling-cutter-garant-ppc/e/68093/>
- [26] *A new scanning lines distribution strategy for the form error evaluation of freeform surface on CMM* [online]. 2021 [cit. 2022-04-12]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263224121005534>
- [27] *What is CAD software* [online]. AUTODESK [cit. 2022-04-19]. Dostupné z: <https://www.autodesk.com/solutions/cad-software>
- [28] *Best Computer-Aided Manufacturing Software* [online]. G2 [cit. 2022-04-19]. Dostupné z: <https://www.g2.com/categories/computer-aided-manufacturing>
- [29] *CAD/CAM Software Solutions* [online]. MASTERCAM [cit. 2022-04-19]. Dostupné z: <https://www.mastercam.com/solutions/>
- [30] *What is the difference between 2D, 2.5D and 3D contouring?* [online]. FLASHCUT CNC [cit. 2022-04-19]. Dostupné z: <https://www.flashcutcnc.com/resources/knowledgebase/what-is-the-difference-between-2d-2-5d-and-3d-contouring/>
- [31] ŠTUPLA, Miloslav. *CNC Programování obráběcích strojů*. Praha, 2016. ISBN 978-80-247-5269-3.
- [32] *1.2767 / X45NICRMO4 / 19641 / 19655* [online]. TOOLSTEEL, 2016 [cit. 2022-07-13]. Dostupné z: <http://toolsteel.cz/1-2767-x45nicrmo4-19641-19655/>
- [33] *Art. č.: 207541 16/300: TK soudečková fréza, kónický tvar $\alpha/2 = 18^\circ$ PPC 16/300 mm* [online]. Německo: Hoffmann group, 2021 [cit. 2022-07-13]. Dostupné z: <https://www.hoffmann-group.com/CZ/cs/hot/Mono-obr%C3%A1b%C4%9Bn%C3%AD/TK-fr%C3%A9zy/TK->

soude%C4%8Dkov%C3%A1-fr%C3%A9za%2C-k%C3%B3nick%C3%BD-tvar-%CE%B1-2-%3D-18%C2%B0-PPC-TiAlN/p/207541-16%402F300?addToCart=1&utm_medium=FlipCatalog&utm_source=FCWeb

- [34] *Intro to Trochoidal Milling: What Is Trochoidal Milling?* [online]. harveytool [cit. 2022-07-13]. Dostupné z: <https://www.harveyperformance.com/in-the-loupe/introduction-trochoidal-milling/>
- [35] *A model-base productivity d sustainable concept for the best decision-making in rough milling operations* [online]. 2021, 186 [cit. 2022-07-13]. ISSN 0263-2241. Dostupné z: doi: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.110120>
- [36] *Mechanical Systems and Signal Processing: High efficiency orientated milling parameter optimization with tool wear monitoring in roughing operation* [online]. 2022 [cit. 2022-07-13]. ISSN 0888-3270. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0888327021007469>
- [37] *Tool life and tool wear in the semi-finish milling of inclined surfaces* [online]. 2009 [cit. 2022-07-13]. ISSN 5448-5455. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092401360900168X>
- [38] [online]. Hoffmann group [cit. 2022-07-25]. Dostupné z: https://ecatalog.hoffmann-group.com/index.html?country=ces_CZ_CZE/catalogs/&catalog=90000001#page_510
- [39] *ECatalogue* [online]. Hoffmann group [cit. 2022-07-25]. Dostupné z: https://ecatalog.hoffmann-group.com/index.html?country=ces_CZ_CZE/catalogs/&catalog=90000001#page_510
- [40] *ECatalogue* [online]. Hoffmann group [cit. 2022-07-25]. Dostupné z: https://ecatalog.hoffmann-group.com/index.html?country=ces_CZ_CZE/catalogs/&catalog=90000001#page_380
- [41] *Catalogue* [online]. [cit. 2022-07-27]. Dostupné z: <https://www.hoffmann-group.com/CZ/cs/hot/Up%C3%ADnac%C3%AD-technika/Up%C3%ADna%C4%8De-n%C3%A1stroj%C5%AF/Tepeln%C3%A9-up%C3%ADna%C4%8De-HSK-F-63-A-%3D-120/p/308193?tid=503&comingFromCategory=30>

Seznam obrázků

Obrázek 1 - Čelní frézování	9
Obrázek 2 - Rohové/čelní frézování.....	10
Obrázek 3 - Ukázka záběru frézy při sousledném frézováním	11
Obrázek 4 - Pohyb nástroje při trochoidálním frézování.....	14
Obrázek 5 - Využití jednoho nástroje pro různé drážky při trochoidálním frézování	16
Obrázek 6 - Vliv mezi úhlem nástroje a obráběným povrchem	18
Obrázek 7 - Tři typy drážkování při 5osém obrábění - (a) Lokální drážkování (b) Zadní drážkování (c) Globální drážkování (kolize)	19
Obrázek 8 - Povrch nástroje vepsaný koule.....	19
Obrázek 9 - Pohyb nástroje a CL křivky závislosti na obráběné ploše	20
Obrázek 10 - Pohyb nástroje v souřadném systému obrobku (WCS); c) osově symetrická rovina T nástroje v souřadném systému nástroje (TCS); (d) profil frézy v osově symetrické rovině T	21
Obrázek 11 - Tři typy topologií drah: a) směrově-paralelní; b) konturově-paralelní; c) adaptivní křivka vyplnění prostoru	22
Obrázek 12 - Porovnání velikosti řádkování kulového a soudečkového nástroje	24
Obrázek 13 - Rozdělení nástrojů dle použití.....	25
Obrázek 14 - Kontaktní měření povrchu CMM.....	28
Obrázek 15 - Měřicí hlava LC15Dx Nikon.....	29
Obrázek 16 - Model součásti pro experimentální část	34
Obrázek 17 - Analýza rádiusů	36
Obrázek 18 - Minimální rádius.....	36
Obrázek 19 - Analýza a určení kritických a strmých ploch	37
Obrázek 20 - Strmosti a kritické plochy	37
Obrázek 21 - TK hrubovací fréza GARANT Master Steel HPC 25 mm.....	38
Obrázek 22 - Rádiusová fréza HSS-PM 25 mm	38
Obrázek 23 - TK soudečková fréza, přímý tvar PPC 10/60 mm	39
Obrázek 24 - Řezná data hrubování D25 mm.....	40

Obrázek 25 - Řezná data polodokončování kulová fréza D25 mm.....	41
Obrázek 26 - Simulace obrobení polodokončení.....	42
Obrázek 27 - Simulace obrobení hrubování	42
Obrázek 28 - Zobrazení vytvořené hranice pro kulovou frézu D8 mm	42
Obrázek 29 - Řezné podmínky pro kulovou frézu D8 mm.....	43
Obrázek 30 - Zbytkový materiál při obrábění řádkováním.....	43
Obrázek 31 - Obrobením řádkováním na požadovanou toleranci zbytkového materiálu	44
Obrázek 32 - Poměr sousledného a nesousledného obrábění řádkováním	45
Obrázek 33 - Řezné podmínky pro kulovou frézu D20 mm.....	45
Obrázek 34 - Zbytkový materiál obrábění v Z hladině.....	46
Obrázek 35 - Omezující hranice pro obrobení zbytkového materiálu	46
Obrázek 36 - Zbytkový materiál při sníženém kroku a změnou nástroje.....	47
Obrázek 37 - Poměr sousledného a nesousledného obrábění v Z hladině	48
Obrázek 38 - Zbytkový materiál Dokončení optimalizovanou hladinou Z.....	49
Obrázek 39 - Detail oblasti zbytkového materiálu	49
Obrázek 40 - Poměr mezi nesousledným a sousledným obrábění v Optimalizované hladině Z.....	50
Obrázek 41 - Limitující hranice Projektu 4.....	51
Obrázek 42 - Zbytkový materiál Projektu 4	52
Obrázek 43 - Poměr sousledného a nesousledného obrábění v Projektu 4	53
Obrázek 44 - Dvě omezující hranice pro soudečkový nástroj	54
Obrázek 45 - Omezující hranice pro kulovou frézu D8 mm.....	54
Obrázek 46 - Řezné podmínky pro soudečkovou frézu	55
Obrázek 47 - Ukázka obrábění bokem soudečkového nástroje	55
Obrázek 48 - Zbytkový materiál po obrábění Projektu 5.....	56