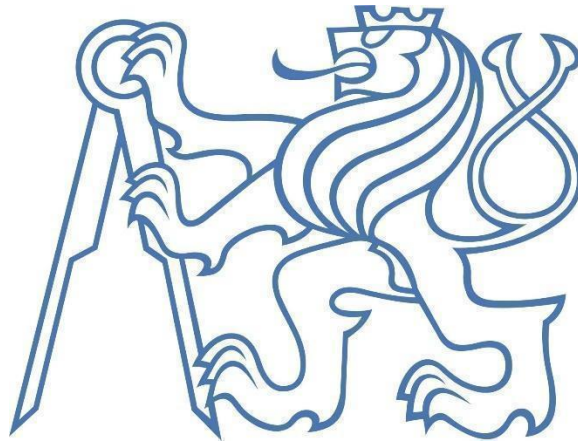


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ



Bakalářská práce

Srovnání technologických možností

frézování v 5D a 4+1D

2023

Dávid Belák

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Belák** Jméno: **Dávid** Osobní číslo: **493611**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**
Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Srovnání technologických možností frézování v 5D a 4+1D

Název bakalářské práce anglicky:

Comparison of technological possibilities of milling in 5D and 4+1D

Pokyny pro vypracování:

Cílem práce je porovnání vlastností kontinuálního a indexovaného víceosého obrábění, vliv počtu pohybujících se os na přesnost, na časovou náročnost přípravy partprogramu ad.

Body zadání:

- 1) rešerše na téma kontinuálního a indexovaného víceosého obrábění
- 2) analýza základních rozdílů v programování a zároveň očekávaných vlastností
- 3) příprava ukázkové součásti ve vybraném CAMu
- 4) srovnání postupů obrábění ukázkové součásti
- 5) závěry a vyhodnocení praktické části

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

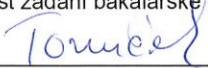
Ing. Jan Tomíček, Ph.D. ústav technologie obrábění, projektování a metrologie FS

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

Datum zadání bakalářské práce: **31.03.2023**

Termín odevzdání bakalářské práce: **31.07.2023**

Platnost zadání bakalářské práce: _____


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



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


doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

27.04.2023
Datum převzetí zadání


Podpis studenta

Prohlášení

Tímto prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a že jsem všechny zdroje uvedl v příloženém seznamu použité literatury.

Dále prohlašuji, že nemám žádný závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu §60 Zákona č.121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne

Podpis

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu bakalářské práce panu, Ing. Jan Tomíček, Ph.D. za pomoc a odborné rady, které mi při vypracování poskytoval. Dále patří mé velké díky všem, kteří mi pomohli s úpravou a jazykovou korekturou bakalářská práce.

ANOTAČNÍ LIST

Jméno autora:	Dávid Belák
Název BP:	Srovnání technologických možností frézování v 5D a 4+1D
Anglický název:	Comparison of technological possibilities of milling in 5D and 4+1D
Rok:	2023
Studijní program:	Teoretický základ strojního inženýrství
Obor studia:	Bez oboru
Ústav:	Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie
Vedoucí:	Ing. Jan Tomíček, Ph.D.
Klíčová slova:	programování CNC, víceosé obráběcí stroje, 5D obrábění, 3+2D obrábění, 4D obrábění
Keywords:	CNC programming, multi-axis machine tools, 5D machining, 3+2D machining, 4D machining
Anotace:	Cílem práce je porovnání různých metod obrábění na víceosých počítačem řízených obráběcích strojích
Abstract:	The aim of the thesis is to compare different machining methods on multi-axis computer-controlled machine tools

Bibliografická citace: D. Belák, "Srovnání technologických možností frézování v 5D a 4+1D", Bakalářská práce, Praha, 2023.

Obsah

Úvod.....	9
1. Teorie víceosého obrábění.....	10
1.1. Víceosé CNC obráběcí stroje	10
1.1.1. 3D CNC obráběcí stroje	11
1.1.2. 5D CNC obráběcí stroje	11
1.1.3. 3+2D obrábění	13
1.1.4. 4+1D obrábění	14
1.2. Rešerše v tématu porovnání kontinuálního a indexového obrábění ...	14
1.3. Speciální G kódy pro víceosé obrábění	19
1.3.1. G143 = 5-axis tool length compensation +	20
1.3.2. G234 = Tool center Point Control (TCPC)	20
1.3.3. G268 Feature coordination system	22
2. Programování v CAD-CAM softwaru	23
2.1. Programování ve Fusion 360.....	23
2.1.1. Návrh výrobku	24
2.1.2. Setup.....	25
2.1.3. Návrh postupu obrábění	25
2.1.4. Simulace	25
2.1.5. Post-Processing	26
2.1.6. Příprava CNC stroje.....	26
2.2. Porovnání programování 3+2D a 5D ve Fusion 360.....	26
2.2.1. Programování 3+2D.....	29
2.2.2. Programování 5D.....	33
2.2.3. Programování 4D a 4+1D.....	37
2.2.4. Porovnání programování různých metod víceosého obrábění.....	40
3. Praktická část	41
3.1. Návrh a postupy modelování	41
3.1.1. Návrh obrobků pro modelování	41
3.1.2. Vlastní modely a analýza modelu.....	42

3.2.	Návrh tvaru obrobku pro modelování	48
3.3.	Programování a hodnocení dráhy nástroje	49
3.3.1.	Sražení válce	50
3.3.2.	Spirálová drážka.....	52
3.3.3.	Spirálová drážka na obvodu válce se srážkou hran a se zaoblením vnitřních roh drážky	54
3.3.4.	Vyhodnocení.....	55
Závěr		56
Seznam obrázků.....		57
Seznam tabulek.....		59
Seznam příloh a diagramů		59
Bibliography		60
Přílohy		62

Úvod

Cílem bakalářské práce je seznámit čtenáře se základními rozdíly mezi 5D, 4+1D a 3+2D CNC obráběcími stroji, jako např. jejich mechanickými vlastnostmi, limity v obrábění složitých tvarů a náročnosti jejich programování. Uvedu definice CNC obráběcích strojů, CAD/CAM software a základy programování CNC obráběcích strojů. V této bakalářské práci jsem se zabýval porovnáním víceosých technologií na teoretické úrovni, praktické výsledky nebyly měřeny, výsledky jsou hodnoceny pomocí použitého softwaru.

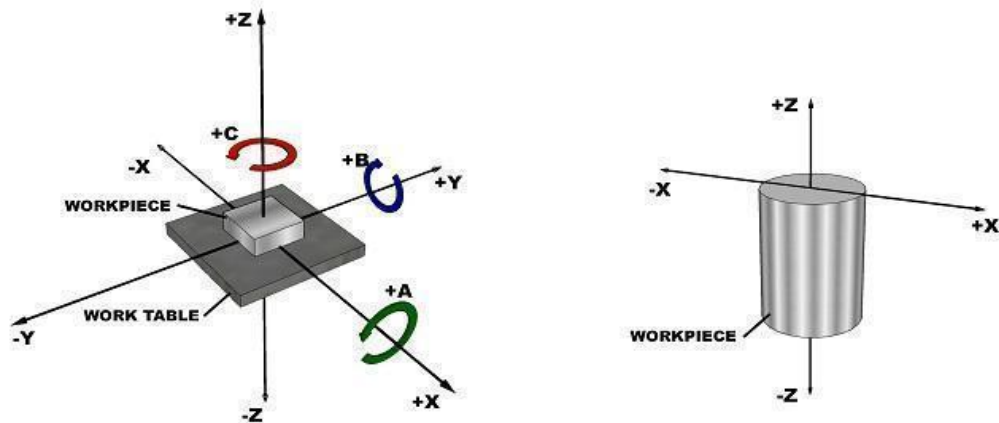
1. Teorie víceosého obrábění

1.1. Víceosé CNC obráběcí stroje

CNC obráběcí stroje jsou základem dnešní moderní technologie obrábění ve strojírenství. CNC je zkratkou anglického výrazu „Computer Numerical Control“, a vyjadřuje autonomní řízení obráběcího stroje počítačem.

Výrobky obráběné na CNC obráběcích strojích mohou být jednoduchého i složitého tvaru, můžeme na nich obrábět kovy, kompozity, plasty i dřevo. Výrobky CNC obráběcích strojů jsou použitelné v široké škále průmyslové výroby s požadavkem vysoké kvality. [1] CNC obráběcí stroje můžeme dělit podle technologie obrábění na soustruhy a frézky resp. tzv. obráběcí centra, nebo podle počtu současně řízených os na 2D (D = Dimensions), $2_{1/2}D$, 3D, 3+2D, 4+1D nebo 5D CNC obráběcí stroje. Řízené osy umožňují relativní posuv obráběcí hlavy (jsou to osy X, Y, Z) resp. její relativní rotaci (A, B, C) vůči upínacímu stolu viz obr. 1. Počet řízených os ovlivňuje tvarovou složitost obrobku: čím více řízených os má CNC obráběcí stroj, tím složitějšího tvaru obrobku můžeme docílit.

Je nutné připomenout, že technologii víceosého obrábění v teoretické rovině lze modelovat k obrábění jakékoliv součástky, software vygeneruje dráhu nástroje dle našeho zadání, avšak v praxi ne každý pětistý stroj je schopný k provedení zadaných příkazů. Omezující faktory jsou např. rozměr obrobku, možné úhly obrábění, nebo váha součástky.



Obr. 1 Na levém obrázku: možné osy volnosti CNC stroje, na pravém obrázku je znázorněné základní nastavení osy Z na obrobku

1.1.1. 3D CNC obráběcí stroje

3 osé CNC obráběcí stroje jsou základní frézovací stroje s řízenými osami X, Y, Z. Základna osy Z se nastaví optimálně na horní povrch neobrobeného dílu. Osy X a Y jsou potom nastaveny podle potřeby programování.

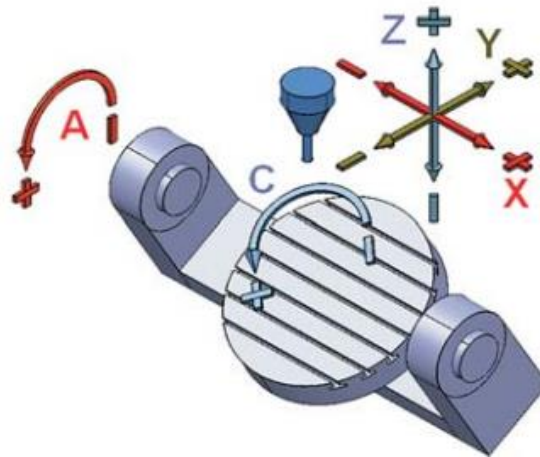
1.1.2. 5D CNC obráběcí stroje

5 osé CNC obráběcí stroje se stávají čím dál tím více rozšířeným typem. 5 řízených os znamená, že stroj má 3 posouvací (X Y Z), a dva rotující řízené osy (dvě osy ze tří A B C). Zde rozdělujeme stroje podle toho, které dvě rotační osy jsou dostupné a kde jsou ty rotační osy použity na stroji. [2]

Typ stůl-stůl: Oba rotační osy rotují upínací stůl

- Rotace kolem osy C je zajištěna vždy
- Druhou rotující osou může být A nebo B.
- Obráběcí hlava se nerotuje.

[2]

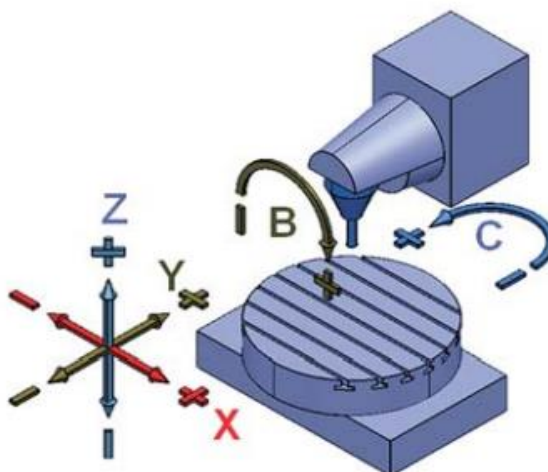


Obr. 2 Model typ stůl-stůl [3]

Typ stůl-hlava: Jedna rotační osa je přiřazena obráběcí hlavici, druhá upínacímu stolu.

- Stůl rotuje kolem osy C
- Obráběcí hlava může rotovat kolem osy A nebo B
- Možnost nastavování úhlů obrábění máme jak u upínacího stolu, tak i u obráběcí hlavy.

[2]

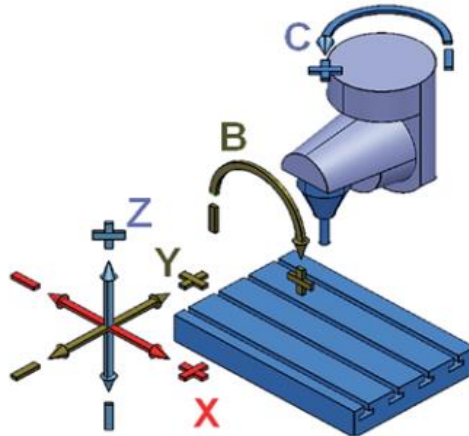


Obr. 3 Model typ stůl-hlava [3]

Typ hlava-hlava: Oba rotační osy jsou přiřazeny obráběcí hlavici

- Stůl je pouze posuvný, nerotuje
- Hlava se otáčí kolem osy C
- Hlava se může otáčet i kolem osy A nebo B

[2]



Obr. 4 Model typ hlava-hlava [3]

Na 5D CNC obráběcích strojích můžeme docílit komplexnějších tvarů výrobků než na 3D, výrobky budou i kvalitnější a výroba efektivnější. Musíme však zvolit správný typ stroje pro konkrétní typ výrobku. Například s typem CNC “hlava-hlava”, kde obě rotační osy jsou přiřazeny obráběcí hlavě můžeme obrábět rozměrné výrobky, avšak tento typ stroje je méně tuhý než ostatní konfigurace. Oproti tomu stroje, které mají obě osy rotace přiřazeny upínacímu stolu, jsou tužší než ostatní konfigurace, avšak mají omezený pracovní prostor, nemůžeme na ní obrábět rozměrné výrobky.

Samostatnou kapitolou programování 5D CNC obráběcích strojů je problematika možného vzniku kolize obráběcí hlavičky s upnutým výrobkem. Příčinou vzniku možné kolize je programování řízení středu obráběcí hlavy vůči obráběné plochy výrobku, přičemž výrobek i obráběcí hlava má své rozměry a při rotacích hlavy či výrobku se musí zohlednit i tyto rozměry. [2] [3] [4]

1.1.3. 3+2D obrábění

3+2D CNC je spíše programovací přístup CNC stroje, než aby byl klasifikován jako specifický typ CNC stroje. Primárně se používá v pětiosém obrábění, kde pohyb řízených rotačních os není spojitá, rotační osy upravují úhel obrábění mezi obráběcími sekvencemi, při samotném obrábění jsou však nepohyblivé. I když je možné začlenit 3+2D obrábění do skupiny 5D strojů, je také možné vylepšit 3D stroj integrací otočného

stolu, který poskytuje další osy. Nastavení 3+2D stroje je tedy ekonomičtější alternativou ve srovnání s pořízením 5D CNC stroje. Hlavní výzvou je transformace souřadnicového systému, která může být velmi náročná, pokud není k dispozici vhodný systém pro realizaci takových transformací.

1.1.4. 4+1D obrábění

4+1D obrábění je odvozením z 5D obrábění: jedna rotační osa při samotném obrábění je mezi obráběcími sekvencemi zafixovaná. Nejčastěji je pohybující se rotační osa přiřazena k upínacímu stolu a umožňuje otáčet výrobek kolem této osy o 360 stupňů. Tato technologie obrábění se nazývá jako „rotary“, tj. rotační obrábění. Avšak ne každé rotační frézování je 4 osé. Nastavením polohy rotační osy do roviny osy nástroje se de facto používají pouze 3 osy k obrábění (dva posuvné a jedna rotační). Toto nastavení není nejvýhodnější, protože u osy nástroje je řezná rychlost nulová. Je výhodnější mimoběžné polohování os nástroje a rotační osy obrobku – v tomto případě již mluvíme o 4D obrábění.

1.2. Rešerše v tématu porovnání kontinuálního a indexového obrábění

V této části před porovnáním různých metod obrábění shrnu, jaké články, zdroje byly publikovány v tomto tématu. Uvedu, zda již někdo vypracoval podobné porovnání metod, pokud ano, k jakým výsledům dospěl, jakým způsobem porovnání použil? Základní stránky, na kterých jsem články hledal, byli ScienceDirect a ResearchGate.



Obr. 5 Výrobek ve videu 5-Axis
"VERSUS 3-Axis - Which Would You
Choose?"

Téma víceosého obrábění je široce diskutované. Již při základním vyhledávání objevíme mnohé články o 5 osém frézování, především se zaměřením na pokroky v kontinuálním obrábění. Tyto články se často ponoří do numerických technik pro obrábění volných ploch a modelování kinematiky víceosých strojů. Ve srovnání s tím existuje pouze omezený počet článků, které se zabývají s přesností obrábění a porovnávají různé metody obrábění.

V sérii videí od HaasCNC porovnávají 3D obrábění s "5D" obráběním. Ve videu vidíme obě metody v akci.

Výsledky testů prokázaly pozitivní výsledky pro "5D"

obrábění bez nutnosti přepínání obrobku na jiný přípravek, čímž odpadá vícepráce s přepínáním a polohováním dílu. Problémem tohoto srovnání je, že nepoužívají 5 osé obrábění, ale ve skutečnosti 3+2. Stroj vždy mezi obráběcími sekvencemi změni polohu obrobku otočením kolem jedné řízené rotační osy a po zafixování této osy začne obrábění. Je zřejmé, že toto srovnání slouží spíše k marketingovým účelům, aby se jejich 3+2 stroj prodával pod značkou "5D". Za zmínku stojí i to, že obráběný díl má spíše rovné plochy, které byly navrženy tak, aby díl mohl být obráběn klasickým válcovým nástrojem.[5]

Článek zabývající se porovnáním 3 osého a 5 osého obrábění byl publikován P. Grayem a S. Bedi v 2001 [6]. V článku se porovnává dráha nástroje při výrobě hydraulické lisovací formy na 3D resp. na 5D CNC obráběcími stroji. Zabývali se metodami generování dráhy nástroje jako např.: "naklonění nástroj", "multipoint" pro 3 osé "paralelní" a "surface slow" metoda. Test času a kvality 3 osého obrábění převzali od nezávislé firmy, která vyráběla stejnou lisovací formu stejnými metodami. Dráhu nástroje pro test 5 osého obrábění vygenerovali se softwarem od Univerzity Waterloo a vyrobili s tím dvě výrobky. Porovnávacím parametrem byla délka dráhy při daných metodách. Výsledky testů jsou uvedeny v tabulce (Tab 1.). Je patrné že délka dráhy nástroje bude nejmenší u 5 osého obrábění. [6]

Tab 1 Výsledky měření podle P. Gray a S. Bedi v 2001 [6]

Path type	Tool and diameter (mm)	Total path length (m)	% Longer than 5-axis path
3-Axis parallel*	38.1 Ball-nose	32.02	249
3-Axis surface flow*	38.1 Ball-nose	31.80	247
3-Axis surface flow*	38.1 Rad1	46.45	406
5-Axis principal axis	Mating surfaces 38.1 Rad1 Forming channel 25.4 Rad2	9.16	—

Rad1 = 38 mm endmill with 6.35 mm radius corners
 Rad2 = 25.4 mm endmill with 6.5 mm radius corners
 *Forming channel finished with a 12.7 mm ball-nose endmill using surface flow path generation.

V článku z roku 2014 Wojciech Zębal a Malgorzata Plaza [7] uvádějí sofistikovanější porovnání 3 a 5 osého obrábění. Cílem bylo zjistit kterou metodou je levnější výroba turbo lopatky. 3D model turbo lopatky vytvořili pomocí reverse engineering-u, následně s CAM systémem vygenerovali dráhu nástroje pro obrábění se třemi způsoby: “standardní” 3 a 5 osé frézování, resp. 3 osé frézování pomocí EV (Experimental Verification – metoda 3 osého obrábění pro komplexní tvary). Pomocí CAM software lze optimalizovat přesnost, rychlost obrábění a řeznou sílu nástroje. Hodnotili kvalitu obrobeného povrchu, podíl vyrobených zmetků a průměrné náklady výroby jednoho výrobku. Mezi náklady výroby zařadili osobní náklady operátora stroje, náklady na stroj a náklady softwaru. Výsledkem testů je zjištění, že při dostatečně dlouhé době “učení” (cca 11h) metoda EV snižuje podíl zmetků odpovídající 5 osému obrábění. Z ekonomického hlediska nevýhoda vysokých fixních nákladů na software u 3D s EV je vyrovnán při vyšších počtech vyrobených turbo lopatek (od 8 vyrobených kusů). [7]

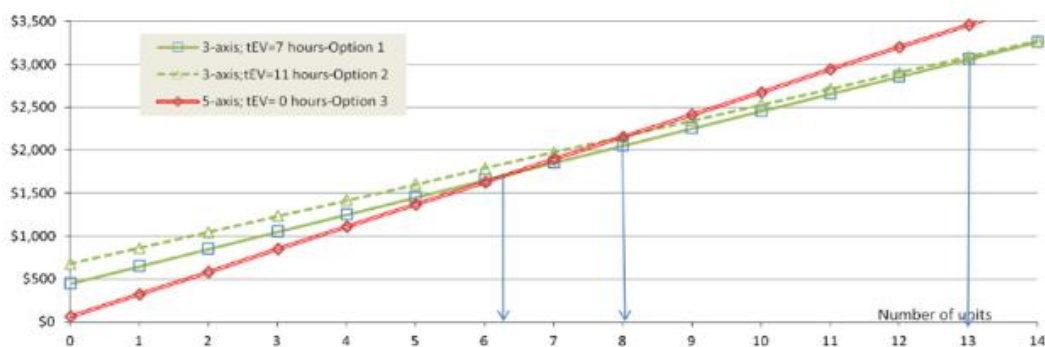
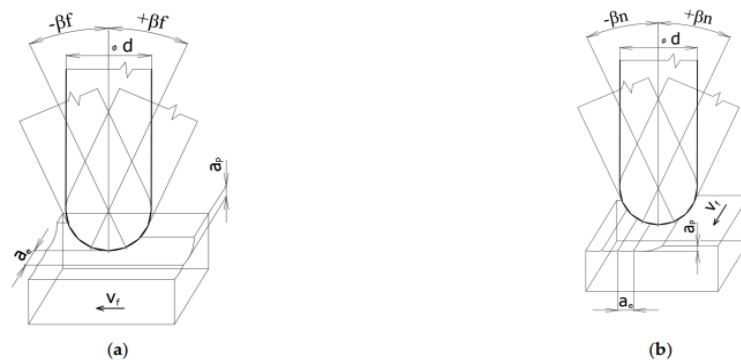


Fig. 10. Costs of producing a batch assuming average machine costs.

Diagram 1 Náklady na výrobu dávky za předpokladu průměrných nákladů na stroj [7]

V 2020 Marek Sadílek, Zdeněk Poruba, Lenka Čepová a Michal Šajgalík [8] uvedli rozšířený experiment v tématu zvyšování přesnosti frézování Free-form surface. Cílem bylo porovnat přesnost 3+2 a 5 osého obrábění při daných úhlech klopení nástroje. Pro obrábění konkrétní součástky byly zadány parametry pro 3 různé způsoby:

- 3 osé obrábění – úhel mezi nástrojem a obrobkem se nemění, $\beta_f = 0^\circ$, $\beta_n = 0^\circ$
- 3+2 osé obrábění – udržování konstantního sklonu vzhledem k orientaci povrchu při jednotlivých obráběcích sekvencích
- 5 osé – současný pohyb všech os (X, Y, Z, B, C), úhly sklonu osy nástroje sledují orientaci povrchu



Obr. 6 Možnosti strategie frézování s úhlem sklonu osy nástroje

Úhly sklonu nástroje $\beta_f=[0:20]$, $\beta_n=[0:20]$ v obou případech byly zvyšovány po pěti stupních. Řezná hloubka a rychlost byly nastaveny na stejnou velikost ve všech případech. Výsledky byly naskenované pomocí 3D mikroskopu. Sken výrobku byl porovnán se základním 3D modelem. K největším odchylkám došlo při použití metody 3+2D (úhel nástroje $\beta_f = 10^\circ$, $\beta_n = 20^\circ$), kde došlo i k překročení limitu zvolené maximální odchylky 0,05 mm. Nejlepší výsledky vykazovala metoda 5D (úhel nástroje $\beta_f=0^\circ$, $\beta_n=10^\circ$), kde odchylky byly v rozmezí 0-17 mikrometrů. Vyhodnotili i drsnost obráběného povrchu.

Výsledky shrnuli do tabulky:

- Sa— Aritmetická střední výška plochy
- Sp— Maximální výška píku povrchu
- Sz— Maximální výška povrchu
- Vmp— Maximální objem materiálu na povrchu

Tab 2 Výsledky měření tolerance v 2020, červená=mimo tolerance, bílá=na hranici tolerance, zelená = v tolerančním poli [8]

Inclination Angle β_f, β_n	Max. Deviation				Surface Roughness					
	3 + 2 -axis	5-axis	3 + 2 -axis Sa	5- axis Sa	3 + 2 -axis Sp	5- axis Sp	3 + 2 -axis Sz	5- axis Sz	3 + 2 -axis Vmp	5-axis Vmp
	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]	[$\text{mL}\cdot\text{m}^{-2}$]	[$\text{mL}\cdot\text{m}^{-2}$]
0°, 5°	38	14	2.31	2.84	22.64	18.56	38.24	46.95	0.159	0.193
0°, 10°	42	18	2.13	2.08	19.81	21.39	35.74	37.93	0.160	0.139
0°, 15°	47	12	1.91	2.65	11.06	34.50	25.40	59.81	0.122	0.190
0°, 20°	45	12	1.98	2.58	18.45	22.79	37.16	44.43	0.125	0.175
5°, 0°	38	19	2.31	2.24	22.64	15.65	40.96	28.22	0.192	0.139
5°, 5°	50	5	2.24	1.99	17.96	18.82	41.57	38.13	0.154	0.158
5°, 10°	49	10	2.15	2.27	15.07	15.64	33.83	29.71	0.145	0.165
5°, 15°	52	15	1.94	2.61	12.58	22.52	35.57	46.85	0.122	0.180
5°, 20°	51	10	1.91	2.38	17.34	14.08	40.41	29.26	0.126	0.147
10°, 0°	43	15	2.00	2.36	18.37	15.37	40.41	31.87	0.160	0.155
10°, 5°	52	20	1.93	2.38	13.87	26.77	31.64	44.77	0.140	0.167
10°, 10°	53	10	2.04	1.82	15.04	16.71	39.57	30.27	0.150	0.130
10°, 15°	55	21	1.91	2.47	16.62	19.73	35.67	39.22	0.127	0.160
10°, 20°	56	25	1.87	2.40	17.36	15.55	32.81	35.32	0.113	0.174
15°, 0°	42	19	2.06	2.32	14.61	26.24	29.05	38.80	0.150	0.149
15°, 5°	48	24	2.00	2.23	12.88	16.18	28.00	36.16	0.125	0.158
15°, 10°	46	29	1.95	2.18	15.24	15.02	33.26	28.75	0.129	0.151
15°, 15°	56	9	1.64	1.94	9.88	14.41	21.65	27.14	0.093	0.118
15°, 20°	43	24	1.76	2.23	12.31	13.85	23.54	31.17	0.100	0.145
20°, 0°	20	31	2.03	2.31	15.41	15.91	30.67	31.57	0.127	0.151
20°, 5°	46	28	2.01	2.16	21.68	19.94	42.57	34.83	0.157	0.140
20°, 10°	53	27	1.97	2.52	16.07	34.46	33.81	54.73	0.151	0.193
20°, 15°	51	32	1.93	2.41	13.83	17.39	28.24	32.13	0.139	0.158
20°, 20°	52	10	1.90	1.86	12.05	11.64	30.85	23.94	0.109	0.112
Range of values	0 to 56	0 to 32	0.67	1.02	12.77	22.86	20.92	35.87	0.099	0.081
Arithmetic mean	47	18	1.99	2.30	15.95	19.30	33.78	36.75	0.136	0.156
Extended uncertainty	15.68	15.69	0.32	0.51	7.01	12.10	11.75	17.97	0.083	0.082

V hodnocení autoři uvádějí, pod jakým úhlem byl výsledek experimentu nejlepší, nezabývali se však vysvětlením důvodů.

Výsledkem experimentu je, že největší přesnost je dosažitelná 5D obráběním s úhlem nástroje $\beta_f=10-15^\circ$, $\beta_n=10-15^\circ$, kde odchylky byly do 17 mikrometrů. Horších výsledků bylo dosaženo 3D a 3+2D metodou, s nepřesností do 56 mikrometrů. V závěru doporučují se vyhnout nastavení úhlu nástroje $\beta_f=0$, resp. U 3+2D dodržovat $\beta_f=15-20^\circ$, $\beta_n=5-20^\circ$ při kterých hodnotách lze dosáhnout lepší hodnoty drsnosti povrchu než u 5D.[8]

V odborné literatuře obdobné porovnání 4+1D frézování s 5D frézováním se vyskytuje zřídka. Při přípravě této bakalářské práce prohledáním různých zpřístupněných zdrojů

informací se nenašel ani jeden článek či srovnávací studii. Důvodem může být, že tato metoda je méně rozšířená jako 3+2D nebo 5D.

Porovnání různých metod CNC obrábění není běžné, byly publikovány průměrně 1-2 články za desetiletí. Je přitom patrný určitý vývoj: výsledky se časem mění s vývojem řídicích počítačových systémů. Před deseti lety 3D metoda byla nejpřesnější. Dnes již můžeme tvrdit, že precizním dodržováním úhlu nástroje proti obráběnému povrchu při 5D metodě má tato metoda již svoje výhody, kvalita může překročit kvalitu 3D.

1.3. Speciální G kódy pro víceosé obrábění

G kód je základním programovacím jazykem CNC strojů, většina CNC strojů je schopna provést příkazy programu psaným s G kódy. Normalizované G kódy jsou od G00 do G99, popis všech kódu je uvedený v tabulce č. 3: [9]

Tab 3 Normalizované G kody [9]

G-Code Reference List

G Code	Function	G Code	Function
G00	Positioning at rapid travel;	G58	Set Datum;
G01	Linear interpolation using a feed rate;	G59	Set Datum;
G02	Circular interpolation clockwise;	G70	Finish cycle (Lathe);
G03	Circular interpolation, counterclockwise;	G71	Rough turning cycle (Lathe);
G04	Dwell	G72	Rough facing cycle (Lathe);
G17	Select X-Y plane;	G73	Chip break drilling cycle;
G18	Select Z-X plane;	G74	Left hand tapping (Mill);
G19	Select Z-Y plane;	G74	Face grooving cycle;
G20	Imperial units;	G75	OD groove pecking cycle (Lathe);
G21	Metric units;	G76	Boring cycle (Mill);
G27	Reference return check;	G76	Screw cutting cycle (Lathe);
G28	Automatic return through reference point;	G80	Cancel cycles;
G29	Move to a location through reference point;	G81	Drill cycle;
G31	Skip function;	G82	Drill cycle with dwell;
G32	Thread cutting operation on a Lathe;	G83	Peck drilling cycle;
G33	Thread cutting operation on a Mill;	G84	Tapping cycle;
G40	Cancel cutter compensation;	G85	Bore in, bore out;
G41	Cutter compensation left;	G86	Bore in, rapid out;
G42	Cutter compensation right;	G87	Back boring cycle;
G43	Tool length compensation;	G90	Absolute programming;
G44	Tool length compensation;	G91	Incremental programming;
G50	Set coordinate system (Mill);	G92	Reposition origin point (Mill);
G50	Maximum RPM (Lathe);	G92	Screw thread cutting cycle (Lathe);
G52	Local coordinate system setting;	G94	Per minute feed;
G53	Machine coordinate system setting;	G95	Per revolution feed;
G54	Set Datum;	G96	Constant surface speed (Lathe);
G55	Set Datum;	G97	Constant surface speed cancel;
G56	Set Datum;	G98	Feed per minute (Lathe);
G57	Set Datum;	G99	Feed per revolution (Lathe);

Programování víceosého CNC obráběcího stroje se základní kódy se musí doplnit dalšími funkcemi, kódy specifickými pro tyto stroje. Kódy od G100 a výše jsou již k dispozici výrobcům CNC strojů pro nenormalizované příkazy, které slouží k polohování obrobku, ke speciálním nastavením stroje nebo ke kompenzaci změny délky nástroje z důvodu rotace. Bez těchto nenormalizovaných příkazů v praxi by bylo nastavení stroje náročná, a neefektivní. V této kapitole ukážu G kódy víceosé CNC stroje firmy Haas. [9]

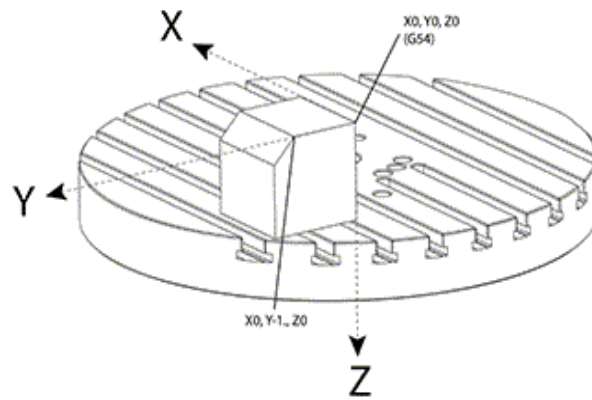
1.3.1. G143 = 5-axis tool length compensation +

G146 kód slouží ke kompenzování změny délky nástroje u pětiosé CNC stroje. Umožňuje obsluhu korekci bez použití CAD/CAM softwaru. Udává se parametr podle délky nástroje kódem H dle kompenzační tabulky. Kód G49 nebo H00 pak vypne tuto kompenzaci. Aby G143 fungovalo bez problému, musí být dva rotační osy A a B. Absolutní model (kód G90) musí být aktivní. Funkce G143 nefunguje s aditivní metodou (kód G91). Pozice rotačních os má být 0,0 pro A a B, nástroj musí být paralelní s osou Z. Výhodou funkce speciálního G143 kódu je, že řídicí program se provede bez nutnosti přepisování kódů při změně délky nástroje. [10]

1.3.2. G234 = Tool center Point Control (TCPC)

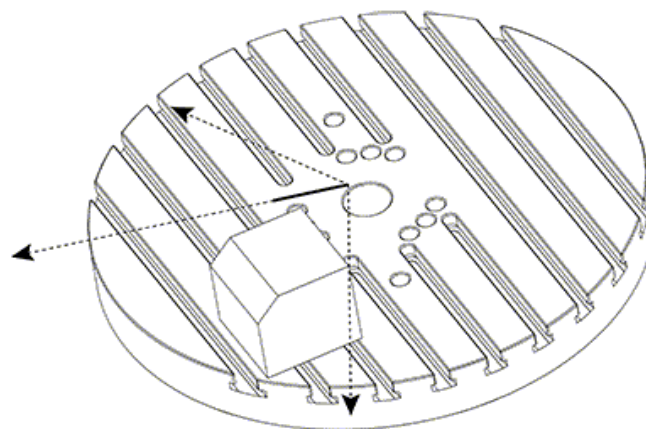
Kódem G234 se koriguje odchylka uchycení obrobku od pozice předpokládaného při generování příkazů v CAM-u pro 4-5 osou metodu obrábění.

Haas CNC control zkombinuje známý střed rotace pro rotační osy se skutečným umístěním obrobku. TCPC zajistí fixaci lineárního souřadnicového systému vůči upínacímu stolu: dojde-li k rotaci stolu, souřadnicový systém rotuje s ním. Stejně, jako u každého pracovního setupu na obrobku musí být aplikován pracovní offset (nutná aktivace pracovního offsetu G54). Tento offset zajišťuje lokaci obrobku na upínacím stole.



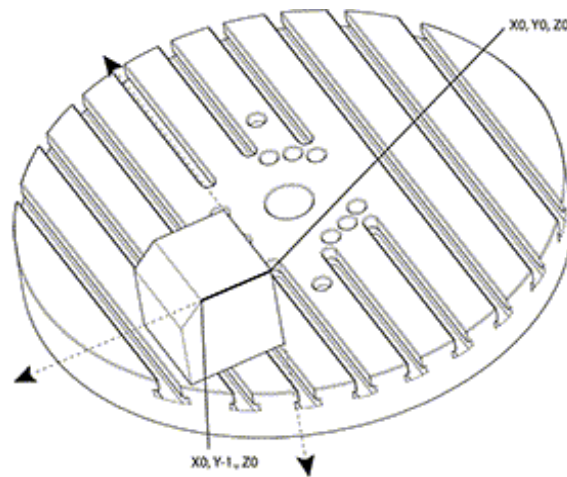
Obr. 7 Základní umístění součástí ve souřadnicovém systému [11]

Mějme soustavu xyz dle obr.7. Definujme body $X_0 Y_0 Z_0$ a $X_0 Y-1 Z_0$. Posun v rovině Y je jediný pohyb nutný k obrábění hrany. Lokace obrobku je definován s offsetem G54.



Obr. 8 Natočení součásti bez korigování souřadnicového systému [11]

Osu B a C jsme natočili o 15 stupňů. Abychom mohli vyrobit stejnou hranu, náš stroj potřebuje interpolační posun ve směru X Y a Z. Bez TCPC by vznikla potřeba upravit program v CAM-u abychom dostali stejnou hranu.



Obr. 9 Korigované souřadnicové systém [11]

Stroj “zná” střed rotačního upínacího stolu a lokalizuje obráběný díl (offset G54). Tyto údaje jsou použity k výpočtu požadované dráhy nástroje na základě CAM-em generovaného programu. Výsledný pohyb nástroje bude interpolací ve směrech X-Y-Z pro výrobu hrany, i když v programu je pouze posun ve směru Y. [11]

1.3.3. G268 Feature coordination system

G268 je 5osý G-kód používaný k definování souřadnicového systému nakloněného obrobku vzhledem k pracovnímu souřadnicovému systému. Pevné cykly a G-kódy fungují normálně v rámci souřadnicového systému obrobku. Před aktivací G268 musí být aktivována G43 Kompenzace délky nástroje. Transformace z pracovního souřadnicového systému na souřadnicový systém obrobku se však provádí nezávisle na offsetu délky nástroje. Volání G268 pouze vytvoří souřadnicový systém obrobku. Nevyvolá pohyb po žádné ose. Po volání G268 je nutné vyvolat aktuální polohu vřetena. G269 se používá ke zrušení G268 a návratu zpět do pracovního souřadnicového systému.

Existují dva způsoby, jak definovat souřadnicový systém obrobku pomocí G268. Prvním je zadat příkaz osám B a C na požadovaný úhel a určit pouze počátek souřadnicového systému prvku pomocí G268. Rovina souřadnicového systému obrobku bude rovinou kolmou k ose vřetena v okamžiku volání G268.

Druhým způsobem, jak definovat souřadnicový systém obrobku pomocí G268, je použití volitelných kódů adres I, J, K a Q k určení úhlů natočení vzhledem k pracovnímu souřadnicovému systému a pořadí otočení. Pomocí této metody lze definovat souřadnicový systém obrobku, který není kolmý k ose vřetena. [12]

2. Programování v CAD-CAM softwaru

Pod pojmem CAD software se rozumí software pro projektování počítačem (Computer-aided Design) resp. pod pojmem CAM se rozumí software pro plánování výrobních procesů počítačem (Computer-aided manufacturing). CAD/CAM je integrovaný software počítačem podpořeného návrhu i výroby součástek/dílů, např. včetně generování kódů k řízení dráhy obráběcích hlavic CNC obráběcích strojů. Postupným zvyšováním složitosti výrobků a požadavků na jejich kvalitu, i když CNC stroje jsou pořád řízeny G kódy, samotný řídicí kód se již generuje v rámci jednoho integrovaného systému CAD/CAM. Ušetří se tím čas na programování, resp. CAD/CAM umožňuje optimalizaci obráběcích postupů při zachování požadované kvality výrobku. [13]

Před porovnáním různých metod víceosého obrábění nejprve uvedu základní postup programování.

2.1. Programování ve Fusion 360

Z CAD/CAM softwaru jsem použil Fusion 360 od Autodesk. Hlavní funkce aplikace Fusion 360 jsou:

- Flexibilní 3D CAM - umožňuje rychlé prozkoumání mnoha verzí pomocí snadno použitelného softwaru CAD.
- Integrovaný CAD/CAM – Pomocí FFF nebo PBF pro 3D tisk kovových dílů vytvoří CNC obráběné součásti a sestavy ve vysoké kvalitě.
- Jednotný návrh desky s plošnými spoji – Aplikace Fusion 360 nabízí všechny výhody plnohodnotného zachycení schémat, elektronického návrhu a strojírenského navrhování CAD.

- Plynulá 3D simulace - Pomocí testů návrhů se ověří, zda budou návrhy plně vyhovovat skutečným podmínkám. Digitální simulací snižuje náklady na prototypování.
- Nástroje pro průzkumný generativní návrh – Prostřednictvím generativního návrhu je možné prozkoumat mnoho výsledků připravených k výrobě, které splňují stanovené specifikace projektů.
- Okamžitá správa dat – Pomocí integrovaných nástrojů pro spolupráci je možné spojovat týmy a spravovat data produktů.

[14]

Postup práce s CAD/CAM:

1. Návrh výrobku
2. Setup
3. Návrh postupu obrábění
4. Simulace
5. Post-Processing
6. Příprava CNC stroje

[15]

2.1.1. Návrh výrobku

Při návrhu výrobku si musíme uvědomit na jakém CNC stroji budeme obrábět. Při použití 5 osé CNC stroje s rotačními osami na upínacím stole je omezena velikost obrobku: rozměry materiálu nesmí být větší, než rotační upínací stůl, aby se nedošlo ke kolizi se strojem. Použití CNC stroje s rotačními osami pouze na nástrojové hlavici sice dovoluje obrábět větší rozměry, ale ze stran se nedostaneme do větší hloubky než je řezná délka stroje.

Podle naše rozhodnutí pak vymodelujeme náš výrobek. [15]

2.1.2. Setup

Vybereme metodu obrábění (soustružení, frézování, řezání apod.) nebo přímo model CNC stroje, určíme orientaci a počátek pracovního souřadnicového systému (WCS) a oblast modelu, offset nástroje, navrhne přidavek materiálu, pojmenujeme řídicí program. [15]

2.1.3. Návrh postupu obrábění

Po setupu se volí metoda CNC obrábění (2D, 3D, vrtání nebo multiosovou metodu). Po volbě metody lze nastavit další parametry jako zvolený nástroj, rychlost řezu, rychlost posuvu, otáčky nástroje, maximální hloubku řezu nebo počet vrstev na odebrání.

Po nastavení zvolených parametrů software vygeneruje dráhu nástroje.

Samozřejmě dráhu můžeme upravit, změnit nástroj, odebrat další vrstvu materiálu nebo měnit řezné podmínky, aby kvalita obrobeneho povrchu byla dle zadání.

Operace se na sebe navazují, proto po změně parametru jedné operace se navazující operace musí vygenerovat znovu (CTRL+G). [15]

2.1.4. Simulace

Simulace je vizualizace a kontrola všech zvolených obráběcích operací. Můžeme kontrolovat, kolik materiálu zůstane na výrobku po jednotlivých operacích, jestli nedochází ke kolizi držáku, nástroje a obrobeneho materiálu. Můžeme simulovat celý obráběcí proces nebo si vybrat pouze některé na sebe navazující operace k simulaci, přičemž lze zjistit i délku dráhy nástroje a čas obrábění při jednotlivých obráběcích sekvencích. [15]

2.1.5. Post-Processing

Post-processing je postup generování řídicích G kódů. Předtím je nezbytný i několikanásobný test simulací, abychom se ujistili, že výsledek bude dle zadání. Při post-processu zvolíme konkrétní řídicí jazyk CNC stroje, např. Haas, GRBL apod., protože jak již bylo uvedeno výše, normalizované G kódy jsou jenom z rozsahu G00-G99 a mimo tento rozsah každý výrobce může přidat, měnit další kódy. Například TCPC funkce u Haas je pod kódem G234, u Mazak se stejná funkce pod kódem G43.4 jmenuje Tooltip point control. Je možné i manuální editace G kódu, pokud neznáme/nezvolíme konkrétní řídicí jazyk konkrétního stroje. [15] [16]

2.1.6. Příprava CNC stroje

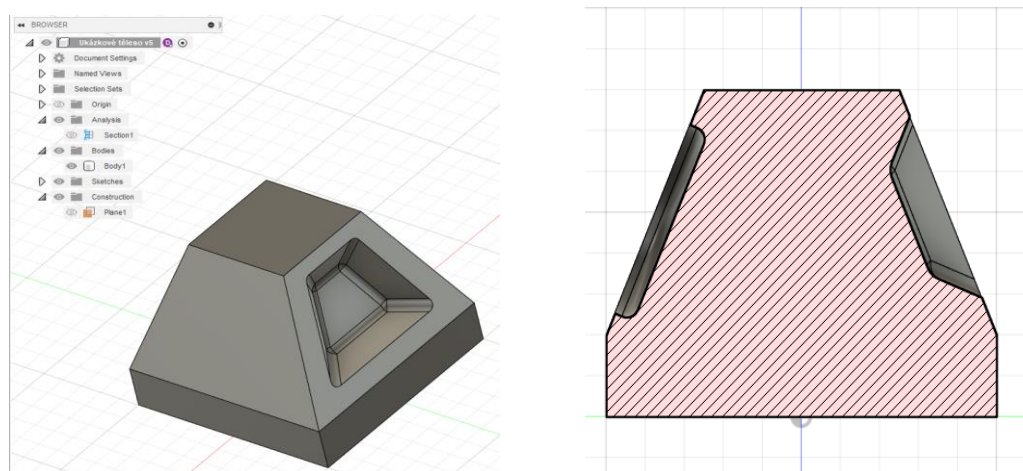
Před spuštěním obrábění na CNC stroji se v rámci přípravy stroje vyloučíme eventuální chyby. Doporučují se následující kroky:

1. Zajistit obráběný materiál na upínacím stole stroje, aby při procesu obrábění se nepohyboval
2. Nastavit pracovní souřadnice dle zadaných souřadnic ve Fusionu
3. Spustit proces bez nástroje, abychom zjistili, že všechny operace proběhnou bez závad
4. Nastavit offset parametry použitých nástrojů které budeme používat
5. Nastavit počátek souřadnice Z tentokrát již s ohledem na offset nástroje.

[15]

2.2. Porovnání programování 3+2D a 5D ve Fusion 360

V této kapitole porovnáme programování stejné, jednoduché součástky metodou 3+2D a 5D. Mým modelem bude komolý jehlan se dvěma výřezy. Jeden výřez je kruhový a druhý 'čtyřúhelný' se zaoblenými hranami.

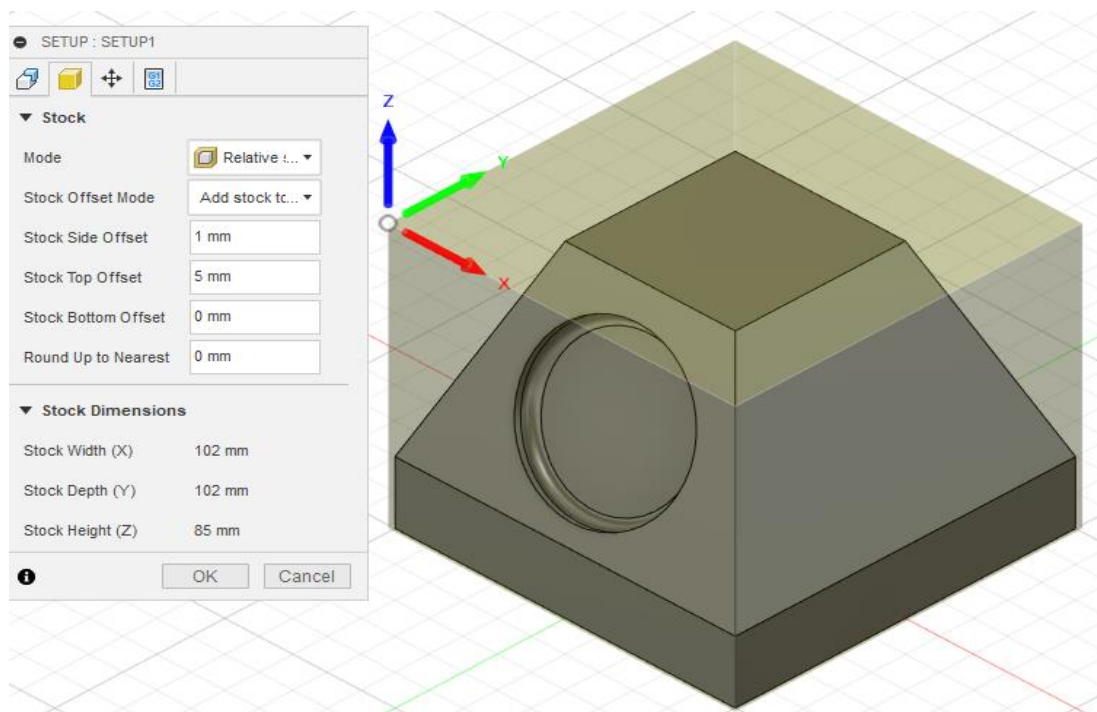


Obr. 10 Model na obrábění v CAM softwaru

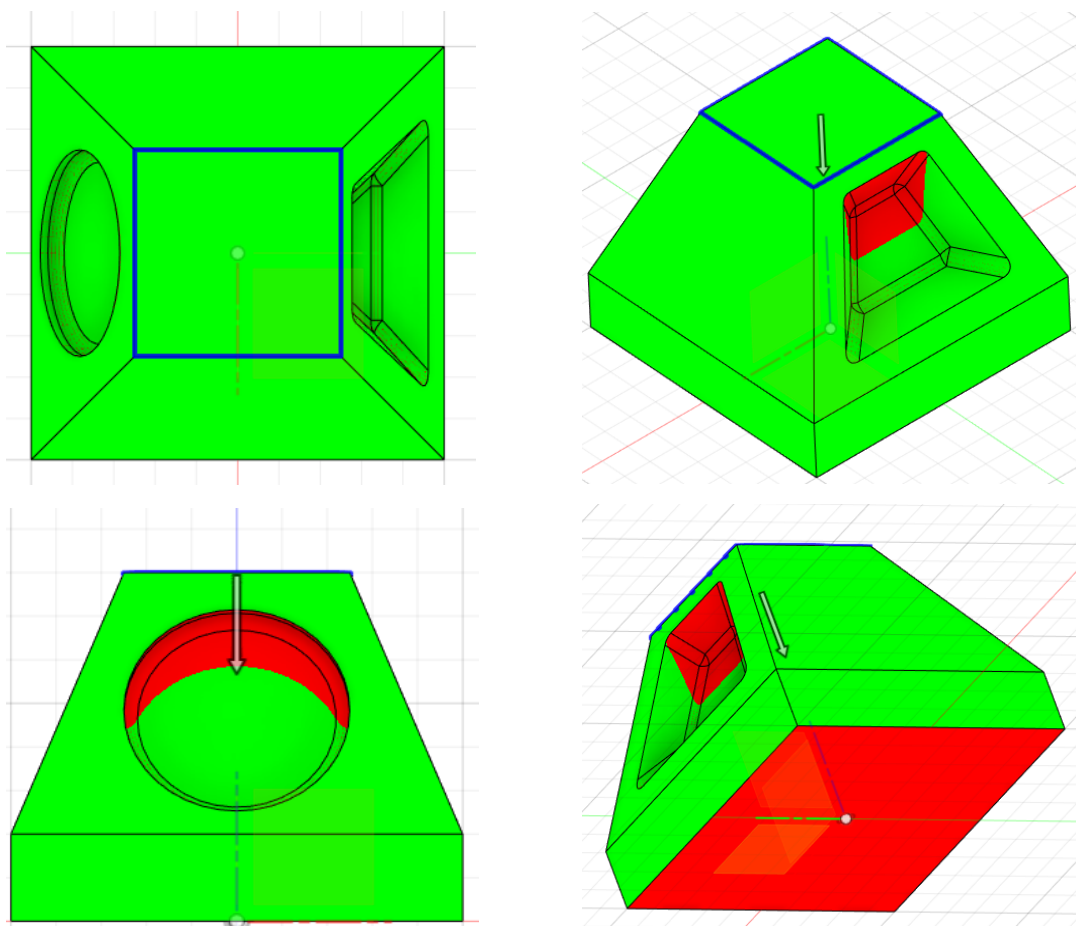
Víceosé obrábění je nutné, když obrábění není možné pouze z jedné strany. V mém případě nelze obrábět součástku bez rotace nebo bez přepínání na stole. Přepínáním do nové pozice však mohou vzniknout nepřesnosti, resp. se musí stroj znovu připravit. Použitím víceosého obráběcího stroje umožníme rotací upínacího stolu nebo rotací nástrojové hlavy obrábění součástky z jiného úhlu bez nutnosti přepínání.

Ve Fusion 360 existuje speciální nástroj, kterým lze zjistit, zda je obráběná plocha modelu dosažitelná daným nástrojem při obrábění. Vyznačíme část modelu, kterou chceme zkontrolovat a software zelenou barvou označí plochy dosažitelné a červenou barvou plochy nedosažitelné.

K obrábění jsem zvolil válcový nástroj o průměru 20 mm. Stanovil jsem dráhu nástroje pro každou stranu modelu. Touto analýzou jsem zjistil, že na 3D CNC stroji můj model nelze zcela obrábět bez přepínání. Zároveň je tento "setup" vhodný pouze pro hrubé obrábění.



Obr. 11 Nastavení Souřadnicového systému na obrobku



Obr. 12 Dosažitelnost nástroje seshora

Pro výsledné porovnání uvedu hodnocené parametre vygenerovaných drah. Zvolil jsem tři parametry dostupné ve Fusion 360 po simulace dráhy nástroje:

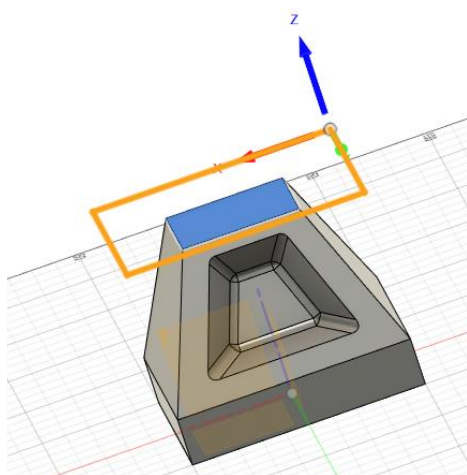
- Čas obrábění
- Délka dráhy nástroje
- Přesnost operace

První dva parametre jsou základní, najdeme je jako „Machining time“. Přesnost operace můžeme nastavit pomocí změny hodnot „Tolerance“, u které program vyhodnocuje přesnost pomocí tří barev: zbytkový materiál označí modrou barvou (jde o opravitelnou chybu), splnění zadané požadované tolerance zelenou barvou a místa, kde nástroj podřízl materiál, červenou barvou (jde o neopravitelnou chybu). Pro analýzu výskytů neopravitelných chyb jsem zvětšoval/zmenšoval toleranční pole o 0,005 mm.

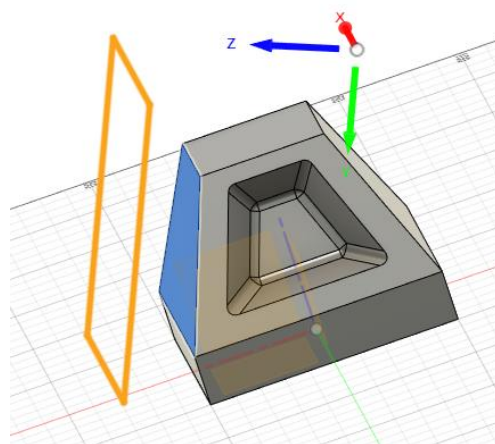
2.2.1. Programování 3+2D

Přidáme-li k metodě 3D dvě rotační osy, které mezi obráběcími sekvencemi rotací součástky změní úhel, pod kterým nástroj provádí obrábění, tj metodu 3+2D, dokážeme obrábět skloněné plochy jehlanu metodou „Face“.

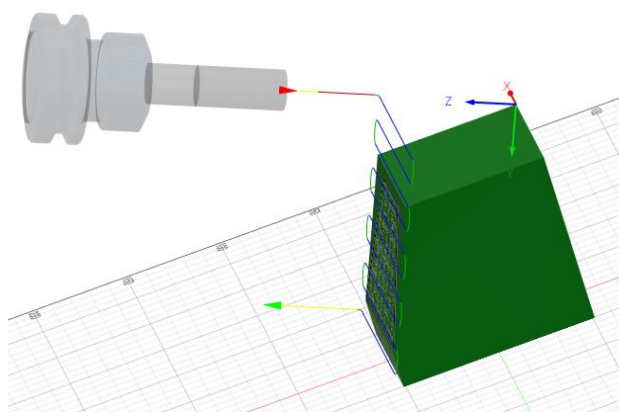
Použil jsem stejný válcovitý nástroj o průměru 20 mm jako výše u 3D metody. V sekci “Geometry” pod funkce “Machining Boundry Seleccion” (modré plochy na obrázcích) jsem vyznačil zvolenou plochu, a volbou funkce ‘Tool orientation’ a ‘Select Z axis/plan & X axis’ nastavil osu Z kolmo na obráběnou plochu. Na tuto polohu jsem vygeneroval dráhu nástroje a postup opakoval na všechny strany jehlanu. [18]



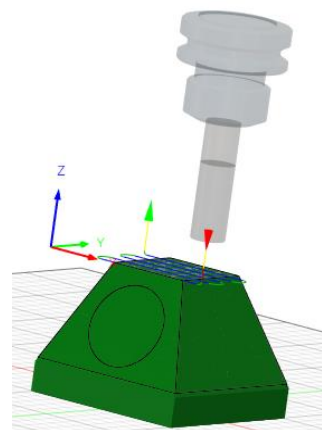
Obr. 13 Natočení souřadnicové systém na obrobku



Obr. 14 Základní souřadnicové systém na obrobku



Obr. 15 operace na hrubování ze stran výrobku

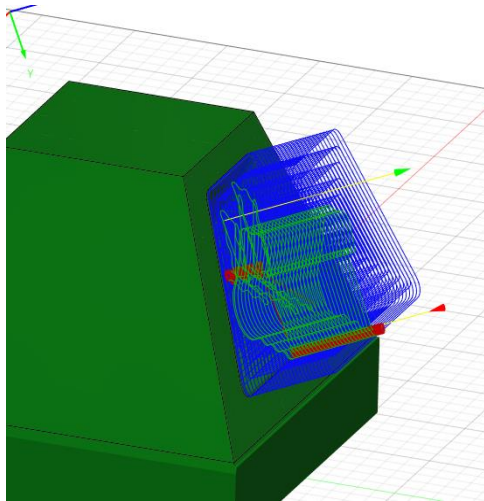


Obr. 16 operace na hrubování ze shora výrobku

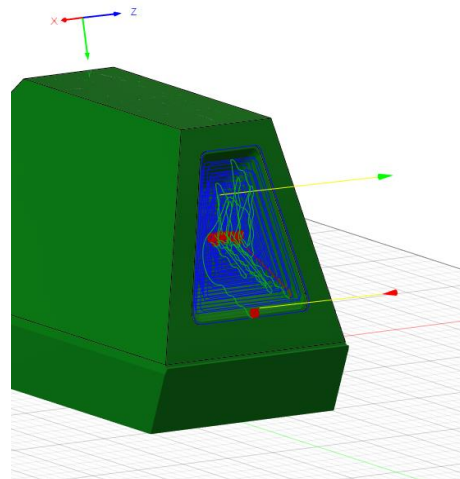
Pro obrábění čtyřúhelné “kapsy” jehlanu jsem použil 3D operaci “Pocet clearing”, která slouží na hrubování i dokončování různých drážek či “kapes”. [18]

Vnitřní hrany kapsy jsou zaobleny, proto jsem nemohl použít stejný válcovitý nástroj, jako pro předchozí operaci, ale nástroj s kuličkovým zakončením. Obdobně předchozímu kroku jsem nastavil osu Z tak, aby byla kolmá na plochu jehlanu a vyznačil jsem, kterou

část chci obrobít. Nesměl jsem přitom zapomenout na nastavení výšky offsetu, protože většina materiálu již byla odstraněna při obrábění "Face". Nenastavil jsem-li správný offset, značná část vygenerované dráhy obrábění by byl v "luftu" nad obrobkem, kde již materiál není. V mém případě by to bylo až 25 mm nad již obrobeným povrchem.



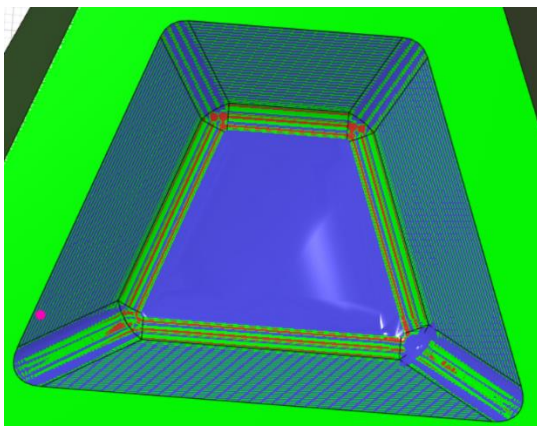
Obr. 17 Špatné nastavení plochu „Ofset“ u operace na čisto



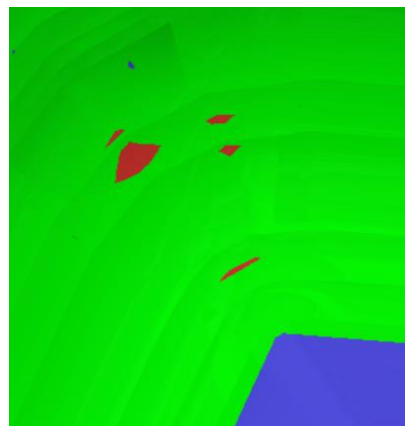
Obr. 18 Opravená dráha nástroje

Když výsledky první simulace nevyhovují, můžeme jednotlivé operace editovat, změnit jakýkoli parametr: otáčky nástroje, rychlost posuvu nástroje, počet odebíraných vrstev atd. Opakovaným vygenerováním dráhy a simulací zkontrolujeme, zda problém jsme vyřešili. [19]

Programování 2+2D a 3+2D ve Fusion 360 nevyžaduje mnohem větší programátorské znalosti, jako programování základních 2D a 3D metod. Před každou obráběcí sekvencí nejprve nastavíme orientaci nástroje, tj. "novinkou" je pouze určení správné orientace souřadnicového systému nástroje. Pro obdobné jednoduché kapsy je určení správné orientace nástroje jednoznačné. I v případě, že na modelu neexistuje rovná plocha, která by mohla sloužit k polohování systému, můžeme v CAD vytvořit konstrukční plochu pro tento účel. [18]



Obr. 19 Výsledek simulace hrubování s tolerancí 0,01mm



Obr. 20 Místo vzniku první neopravitelné vady

Pro dokončení jsem zvolil operaci „Steep and Shallow“ která je kombinací operací „Scallop“ a „Contur“. Tato strategie dráhy nástroje vyhodnocuje povrchy modelu a rozděluje je na oblasti, které jsou téměř ploché pro mělké průchody, a oblasti, které jsou téměř svislé pro strmé průchody.

Výsledky simulace hrubovacího a dokončovacího obrábění:

Tab. 4 Čas a délka dráhy u 3+2D operace

Operace	Čas obrábění [min]	Délka dráhy [m]
Operace pocket clearing	3:15	5,513
Operace steep and shallow	2:54	8,724
Σ	6:25	14,238

Neopravitelné chyby se objevují od 0,05 mm

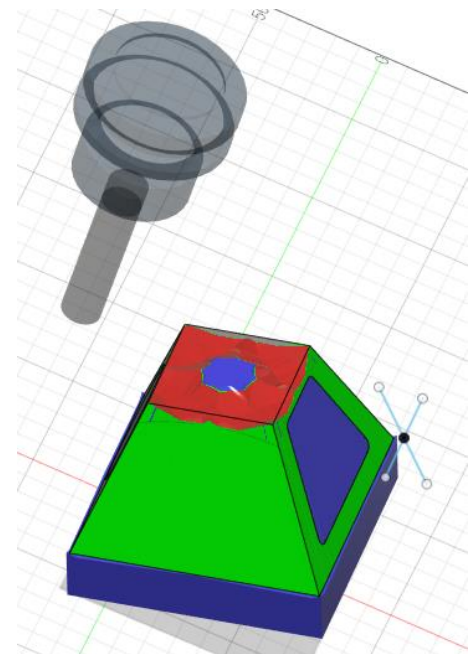
2.2.2. Programování 5D

Fusion 360 poskytuje tři základní metody programování multiosého 5D obrábění:

1. Shaft – multiosá operace, ve kterém součástku obrábíme stranou/obvodovým pláštěm nástroje
2. Multi-axis Contour – na konturování součástky pod daným úhlem
3. Rotary – obrábění se spojitým využitím jedné rotační osy, tj. 4+1D obrábění

Pro náš model lze použít metodu Shaft na hrubování kontury. Odpovídající menu softwaru je velmi podobný 3D operacím: zvolíme nástroj, určíme obráběnou plochu, nastavíme offset a k tomu úhel nástroje vůči obrobku.

[20]



Obr. 21 Příklad na kolizi s držákem

Výsledky mé simulace byly nevyhovující: zvolený nástroj nebyl dostatečně dlouhý, došlo na konci obráběcí sekvence ke kolizi obrobku s držákem nástroje. V reálu by taková kolize zničila obrobek i držák nástroje.

V následujícím jsem již hruboval součástku metodou 2+2D Face.

Fusion 60 podporuje multiosé obrábění u většiny 3D operací.

Podporované metody jsou:

- Steep and shallow
- Flat
- Parallel
- Scallop
- Contur
- Pencile
- Spiral
- Radial

- Morped spiral
- Project
- Morph
- Corner
- Flow
- Debur

Aktivací multisého obrábění se nám otevřou možnosti nastavení parametrů vedení dráhy nástroje:

- Vertical – umožňuje nastavit speciální orientaci nástroje
- From point – špička nástroje směřuje od určeného bodu
- To point – špička nástroje směřuje k určenému bodu
- From curve – špička nástroje směřuje od určené křivky
- To curve – špička nástroje směřuje k určené křivce

[21]

Další důležitou funkcionalitou software je “Collision Avoidance”, kterou zjistíme, resp. odstraníme možnou kolizi nástroje s obrobky. Musíme zvolit, jakým způsobem bude ev. kolize řešena. Možnosti jsou následující:

- Automatický – funguje jen při primárním modu Vertical
- From point – nakloní špičku nástroje do směru, který směřuje od bodu
- To point – nakloní špičku nástroje do směru, který směřuje k bodu
- From curve – nakloní špičku nástroje do směru, který směřuje od křivky
- To curve – nakloní špičku nástroje do směru, který směřuje k křivce

[22]

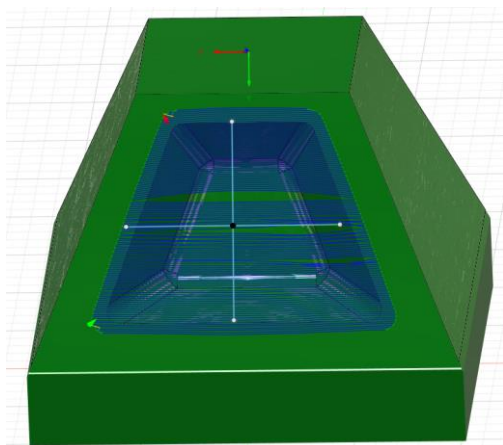
Z kombinací uvedených možností plyne, že programátor se musí rozhodovat mezi 19 různými nastaveními pro vedení dráhy nástroje, a obdobně pro předcházení kolize. Určitá zkušenost programátora a nejspíše několik pokusů je nutné.

3 příklady volby:

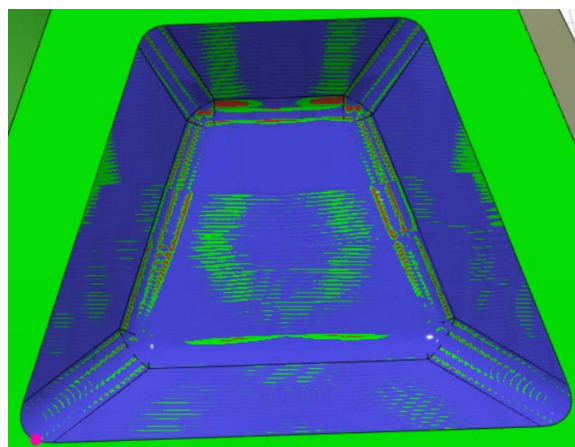
Obráběl jsem stejný model jako u 3+2D obrábění výše, s nástrojem s kuličkovou hlavou o průměru 10 mm, zaoblení R5. K porovnání obráběcích metod kapsy na modelu jsem použil “From point” a dva různé “From curve”. Ve všech případech jsem zvolil stejnou

metodu "Collision avoidance" se stejným bodem, resp. křivkou.

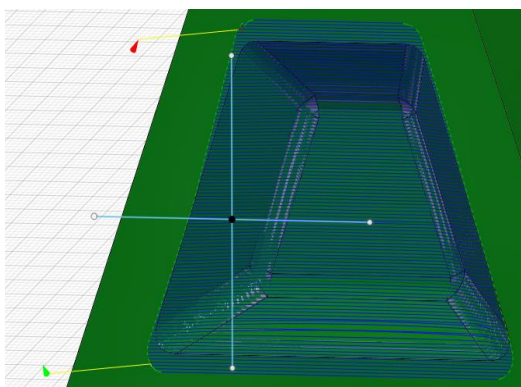
Postup programování je stejný jako při 3+2D. Začneme výběrem nástroje, nastavením obráběné plochy, a i když se jedná o 5D metodu, je nutné zvolit si optimální směrování nástroje (v mém případě kolmo na stranu jehlanu). Referenční bod resp. 2 referenční přímky jsou uvedeny na "offset plan" ve vzdálenosti 35 mm od plochy jehlanu. Při simulaci obrábění je zapnutá komparace s přesností 0,05 mm. Jednotlivé barvy značí: modrá = mimo tolerance s přebytkem materiálu, zelená = rozměry jsou v toleranci, červená = mimo tolerance s chybějícím materiálem po obrábění.



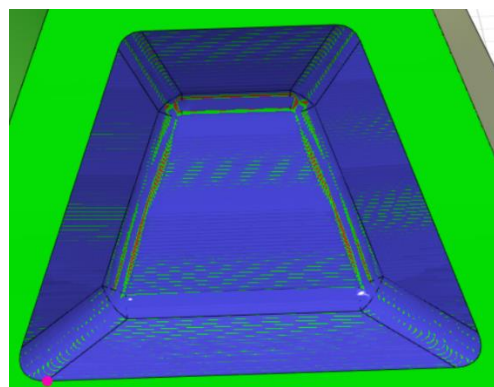
Obr. 22 Operace „from point“ (od středu kříže), vygenerovaná dráha



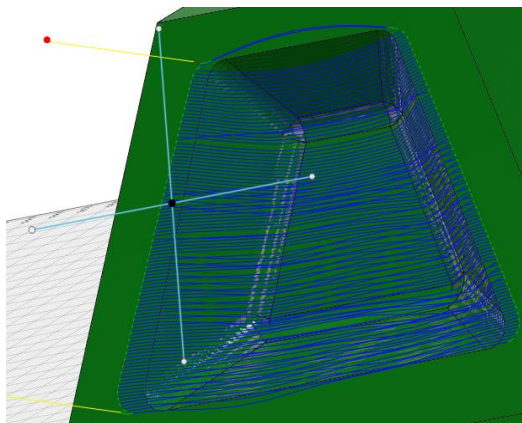
Obr. 23 Operace „from point“, výsledek simulace obrábění s tolerancí 0,01 mm



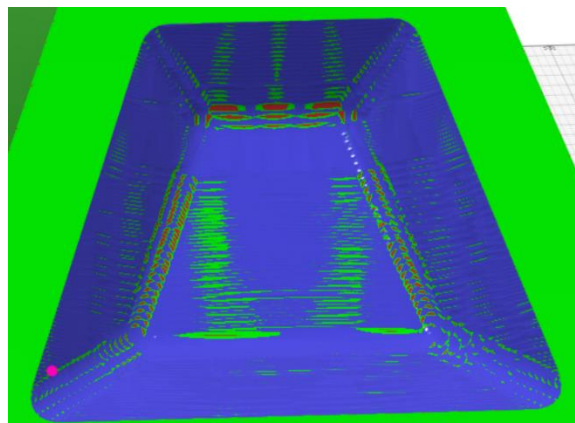
Obr. 24 Operace „from curve“ (podle vodorovné křivky), vygenerovaná dráha



Obr. 25 Operace „from curve“, výsledek simulace obrábění s tolerancí 0,01 mm



Obr. 26 Operace „from curve“ (podle svislé křivky), vygenerovaná dráha



Obr. 27 Operace from curve, výsledek simulace obrábění s tolerancí 0,01 mm

Simulované časy obrábění a délky drah nástroje při testovaných 3 metodách:

Tab 5 Srovnání času a délky drah u 3 různých metod

Operace	Čas obrábění [min]	Délka dráhy [m]	Tolerance [mm]
Operace from pointem (od středu kříže)	3:39	6,586	0,045
Operace from curve (podle vodorovné přímky)	3:20	6,005	0,045
Operace from curve (podle svislé přímky)	3:56	6,704	0,04

Simulací srovnávaných metod vedení dráhy nástroje zjistíme, že nejmenší čas obrábění je s metodou “From curve” podle vodorovné přímky, i když u této metody je i nejvíce přebytku materiálu mimo toleranci.

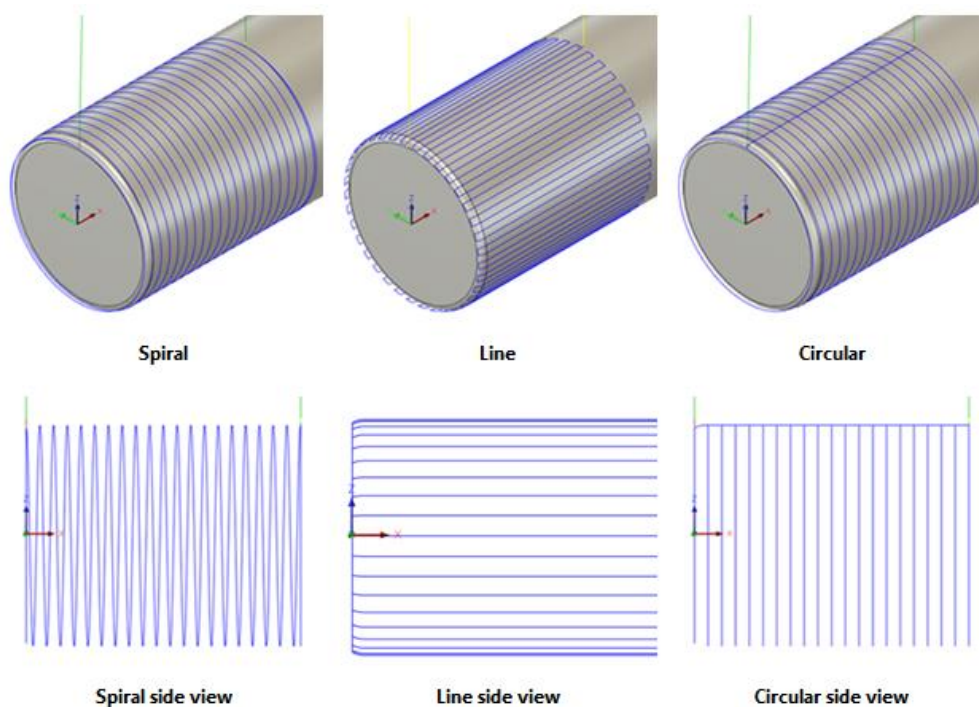
2.2.3. Programování 4D a 4+1D

Ve Fusion 360 se nachází možnost 4 osého programování pod 2D operace nebo pod některou z “Multi axis” operací, např. “Rotary”.

Při 4D metodě obrábění je důležité správné nastavení souřadnicového systému: osu Z nastavíme kolmo na rotační osu obrobku. Menu software je obdobný 3D operacím: výběr a parametre nástroje, nastavení geometrie, parametre na generování dráhy nástroje. V podmenu “Rotary Passes” máme 3 možnosti generování dráhy:

- Spiral – kontinuální obrábění po celém obvodu obrobku spirálovitě po dané délce obrobku.
- Line – Směr řezu nástroje je ve směru osy X po přímce a rotační osa “krokuje” pouze po dosažení konce obráběné délky.
- Circular – Směr řezu nástroje je po obvodové kružnici obrobku a posuv je po dokončení obrábění po celém obvodovém kruhu, “krokuje” ve směru osy X.

Při požadavku obrábění pouze části obrobku lze nastavit v menu “Geometry” počátek a konec obrábění plochy nastavením hodnot “offset front” a “offset back”.

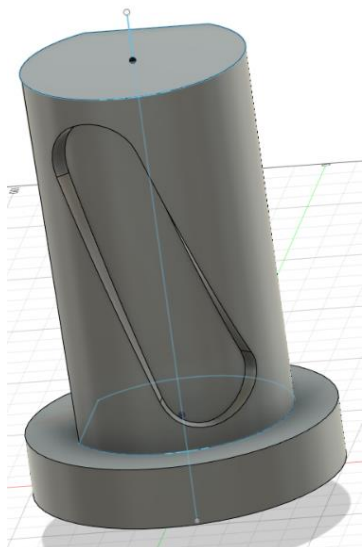


Obr. 28 Možnosti na generování dráhy pomocí „rotary passes“ [23]

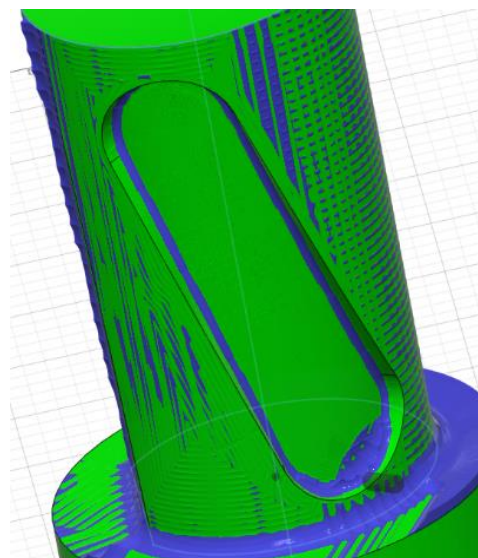
Wrap Toolpath je možnost u 2D Adaptiv, 2D Pocket, 2D Conture operací. „Wrap toolpath“ může analyzovat vybraný řetězec a vytvořit dráhu nástroje pro rotační konturování 4. osy. Tato možnost je dostupná pouze u drah nástroje „2D adaptive“, „2D Pocket“ a „2D Contoure toolpaths“. I když máte možnost používat 2D skicu nebo 3D model pro svou geometrii, doporučuje se vždy vybírat geometrii z 3D modelu, aby dráhy nástroje zachovaly asociativitu. Koncept je poměrně jednoduchý, je zapotřebí si vybrat hrany k obrábění a plochu, která představuje poloměr válcové součásti. Fusion 360 vypočítá nezalomenou geometrii, vytvoří dráhu nástroje a poté dráhu nástroje znovu obalí kolem zadaném poloměru.

Funkce “Wrap toolpath” lze nalézt na kartě Geometrie v „2D adaptive“, „2D Pocket“ a „2D Contoure toolpaths“ drahách nástrojů. Doporučuje se vybrat tuto možnost předtím, než se pokusíte vybrat geometrii. Fusion 360 změní vaše možnosti výběru geometrie, pokud ví, že plánujete vytvořit dráhu nástroje obalenou 4. osou. [24]

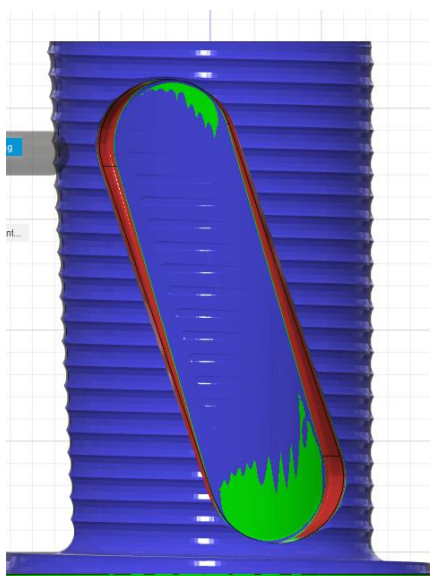
Na modelování 4+1D obrábění ve Fusion 360 nemáme žádnou speciálně určenou funkci nebo operaci. Máme možnost u 5D obrábění zablokovat jednu osu, aby jsme se dostali ke 4D. K přibližným výsledkům se dostaneme i s použitím funkce ‘to curve’ u multiosého obrábění, kterým jsem se již zabýval v kapitole o 5D. Nástroj bude směřován k zadané přímce umístěné v rotační ose Z, tím pádem nástroj bude rotovat kolem osy Z a správným nastavením můžeme minimalizovat použití druhé rotační osy. V rámci Fusion 360 neexistuje exaktní řešení modelování 4D, výsledky můžeme ověřovat jen experimentálně se simulováním jednotlivých drah.



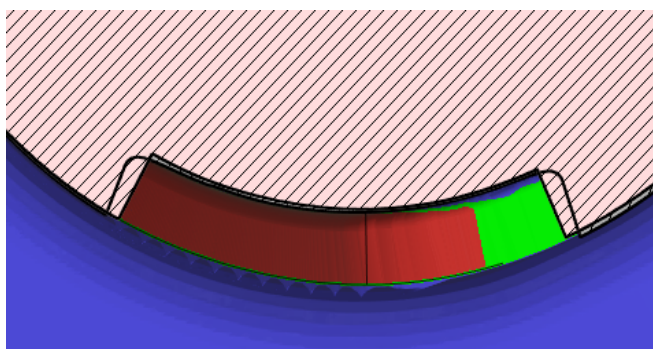
Obr. 29 Model na porovnání 4+1D a 5D



Obr. 30 Výsledky simulace dokončování u 5D obrábění



Obr. 31 Výsledky simulace dokončování u 4D obrábění



Obr. 32 Výsledky simulace, vyšrafovaná část = základní model, tlustá čára je skutečný řez nástroje

Tab 6 Porovnání čas a délku dráhy u 5D a 4D operace

Operace	Čas obrábění [min]	Délka dráhy [m]	Tolerance [mm]
4D operace	10:26	9.96	0,035
5D operace	9:36	9.52	1,25

2.2.4. Porovnání programování různých metod víceosého obrábění

U 3+2D obrábění je úkolem programátora určit správnou polohu obrobku a k tomu úhly nástroje pro danou operaci. Výsledkem bude kvalita obrábění, jako u 3D.

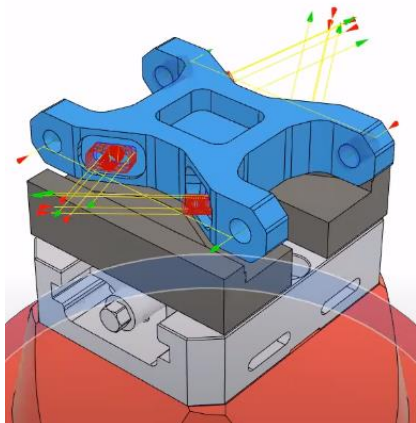
Z programátorského hlediska 5D programování je výrazně náročnější než 3D. K programování jsou potřebné hlubší znalosti, je více možností, mezi kterými se musí zvolit ta optimální, např. jakou primární metodu použít (“To point”, “From point”, “To Curve” “From Curve”, “Vertical”), k tomu se musí určit řídicí bod, resp. řídicí křivka posuvu nástroje. I pravděpodobnost kolize je větší než u jednodušších metod, i k vyřešení případné kolize se musí zvolit optimální metoda podle které se pak korekce dráhy nástroje provádí.

4D ve Fusion 360 je mírně jednodušší než 5D, operace k tomu určené se neliší od základních operací, dovednosti získané při programování CNC soustruhu jsou dostatečným základem dosažení kvalitního obrábění metodou 4D. Jde o vhodnou metodu na obrábění rotačních těles a “Wrap toolpath” poskytuje jednoduše použitelnou funkci na výrobu různých kapes na rotačním tělese.

Naopak 4+1D ve Fusion 360 je z programátorského hlediska nejsložitější metodou, protože v softwaru nelze dočasně vypnout použití jedné osy. Programátor se musí vyznat v 5D a k tomu a zvládnout negování použití 1 osy.

3. Praktická část

3.1. Návrh a postupy modelování



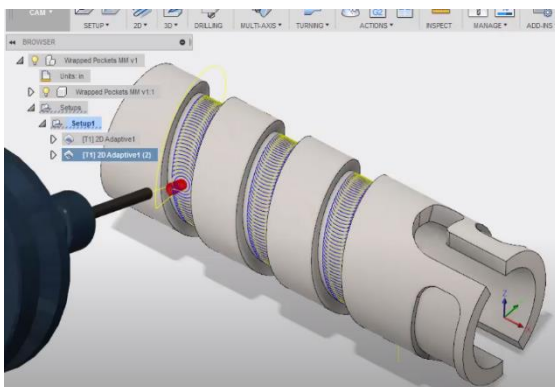
3.1.1. Návrh obrobků pro modelování

V rešerši i při studiu programování víceosého obrábění na CNC stroji jsem použil jako zdroj YouTube kanál softwaru Fusion 360, kde autoři zveřejňují tzv. tutoriály a tipy pro programování víceosých obráběcích center. Při psaní této bakalářské práce jsem se seznámil se základy programování, přitom i s možnými tvary obráběných těles.

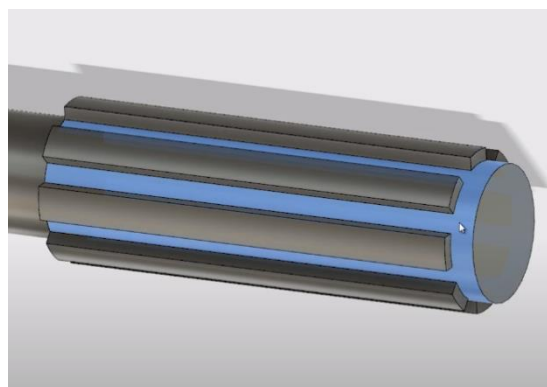
Obr. 33 Ukázkový model na 3+2D obrábění

U víceosého obrábění je základní problematikou dosažitelnost obráběné plochy nástrojem a udržování optimálního úhlu obrábění. Například obrobek na obrázku (obr. 32) při metodě 3D obrábění se musí přepnout 6 krát, aby kapsy a díry mohly být obráběny se základní 3D frézou, oproti tomu metodou 3+2D se přepínání nevyžaduje.

Na obrázcích (obr 33-34.) jsou uvedeny tvary pro 4D rotační frézování. Vlevo je příklad výrobu s drážkami paralelně s osou rotace, vpravo je spirálovitá drážka.



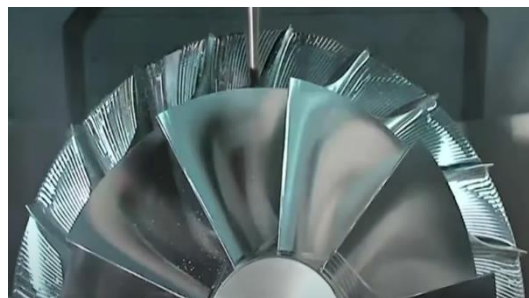
Obr. 34 Ukázkový model na 4D „Pocet clearing“ obrábění



Obr. 35 Ukázkový model na 4D „Linear“ obrábění



Obr. 36 Ukázkový model na 5D obrábění



Obr. 37 Ukázkový model na 5D obrábění

Tvary pro 5D obrábění jsou buď “Free form surfaces” (obr 35.) Nejfrekventovanějším tvarem pro 5D obrábění jsou turbo lopatky (obr. 36). V prvním případě je problematické dodržování obráběcího úhlu, ve druhém je obtížná dosažitelnost obrobku s nástrojem.

3.1.2. Vlastní modely a analýza modelu

V bakalářské práci jsem navrhl několik modelů, na kterých demonstruji obráběcí metody. Na každém modelu jsem provedl dvě analýzy:

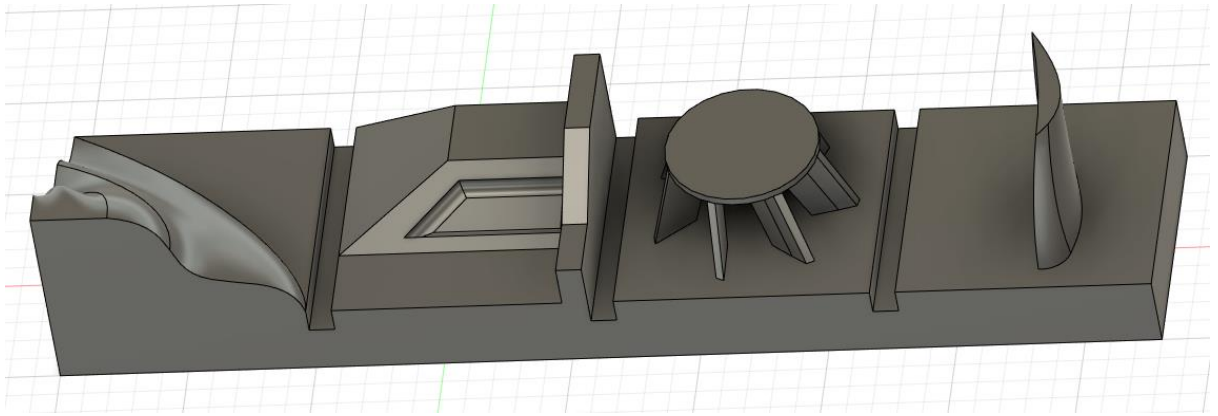
- analýzu dosažitelnosti, tj. kam dosáhne nástroj, když ho přibližujeme k obrobku ze shora a
- změny úhlu dotyku nástroje při obrábění, který je rozhodující faktor kvality finálního produktu.

Na modelech jsem provedl analýzy metod 3D, 3+2D, 4D a 5D.

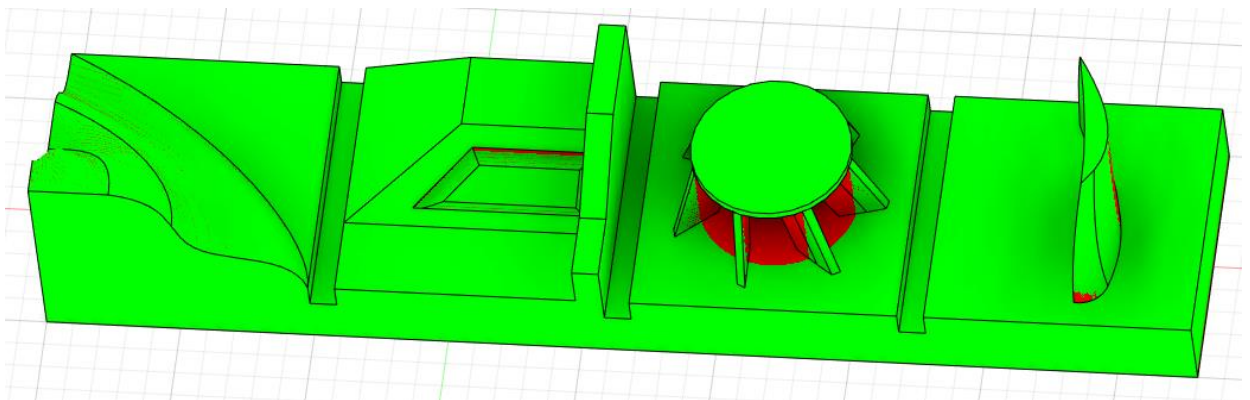
Značky v tabulkách:

- -- = Metodu nedoporučuji
- X = Metodu nelze použít na danou součástku
- + = metoda je doporučena na výrobu součástky

První ukázkový model demonstruje klasické možnosti víceosého obrábění. Cílem bylo zjistit, ve kterých případech se musí použít víceosé obrábění.



Obr. 38 Ukázkové model s různými tvary



Obr. 39 Analýza dosažitelnosti nástroje ze shora

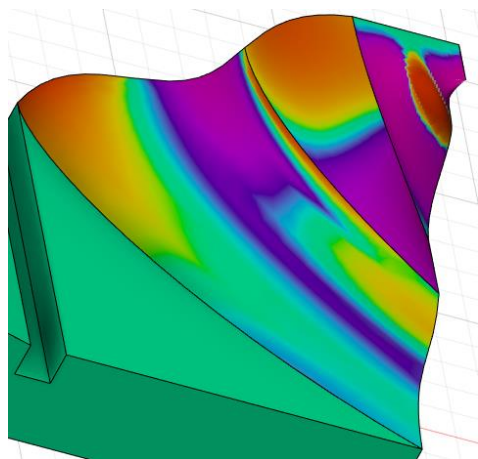
Popis tvarů zleva doprava:

- “free form surface” vytvořený spojením dvou b-spline pomocí funkce “Flow”
- jednoduchý obdélníkový tvar se zaoblením, kvůli kterému není část dosažitelná ze shora
- lopatkový systém, se složitou dosažitelností nástrojem
- křídlový tvar, se složitou dosažitelností nástrojem

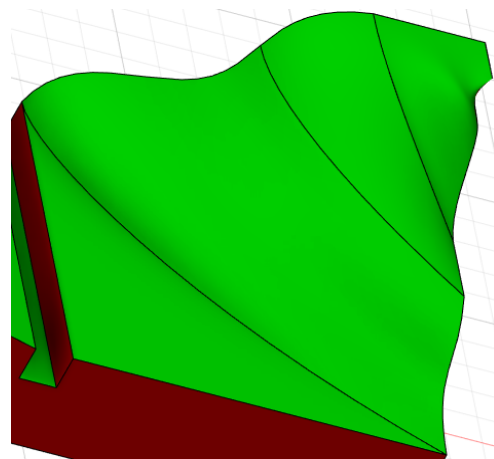
Na “Free form surface” a na “křídle” byla provedena analýza dosažitelnosti i zakřivení obráběné plochy a hodnocení jednotlivých metod obrábění.

Parametry dosažitelnosti:

- úhel gradientu stoupání: +/-5 stupeň
- úhel tolerance gradientu: +/-5 stupeň



Obr. 40 Analýza křivosti (free form surface)

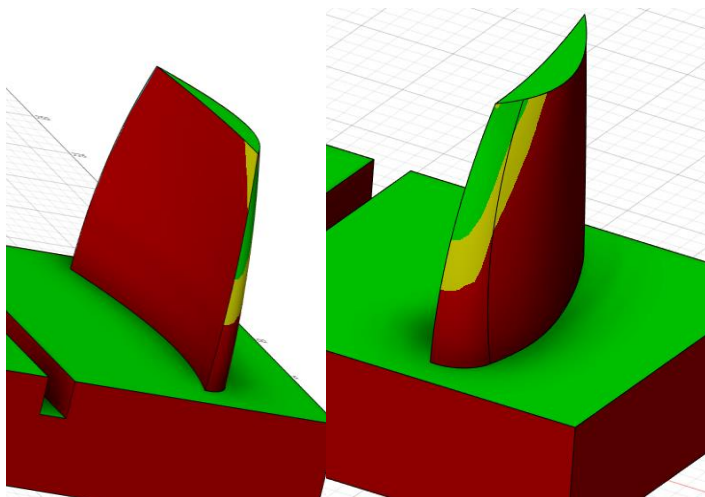


Obr. 41 Analýza dosažitelnosti (free form surface)

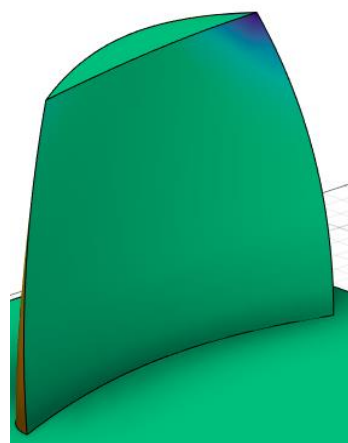
Na základě analýzy lze říct, že při obrábění “Free form surface” nevzniká problém s dosažitelností: nástroj bez problému dosáhne všude, zakřivení plochy však může vést k nepravidelnosti nástrojem odebrané vrstvy materiálu i k nedodržování optimálního pracovního úhlu mezi nástrojem a obráběnou plochou.

Tab 7 Doporučení použitelnosti

Metoda obrábění	Použitelnost	Komentář
3D	-- --	
3+2D	--	metoda je náročná na programování kvůli přenastavování úhlů obrábění
4D	X	
5D	+ +	Metodou je možné dodržovat obráběcí úhel nástroje



Obr. 42 Analýza dosažitelnosti (lopatka)

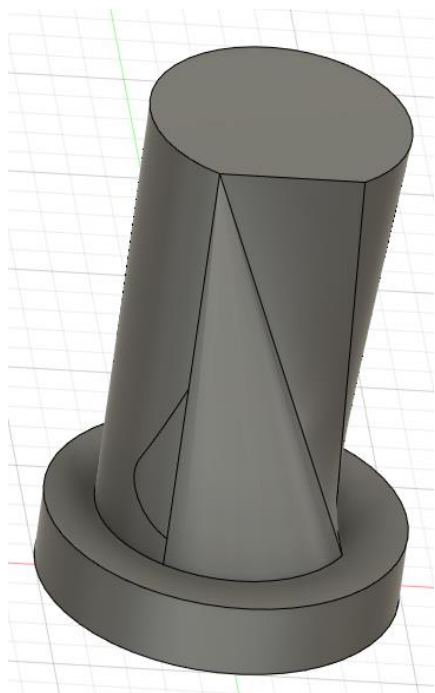


Obr. 43 Analýza křivosti (lopatka)

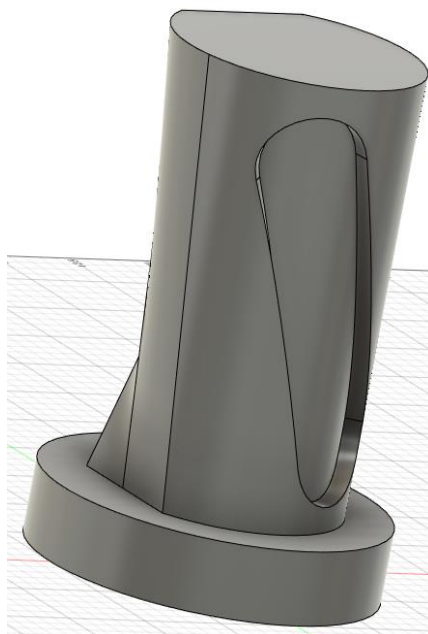
U “křídla” je zakřivení menší, nemění se rapidně, avšak je problém s dosažitelností, obrábění se musí provádět minimálně ze dvou stran.

Tab 8 Doporučení použitelnosti

Metoda obrábění	Použitelnost	Komentář
3D	X	
3+2D	+	Je možné obrobit, potřebuje cca. 3-4 polohy
4D	+	
5D	+	

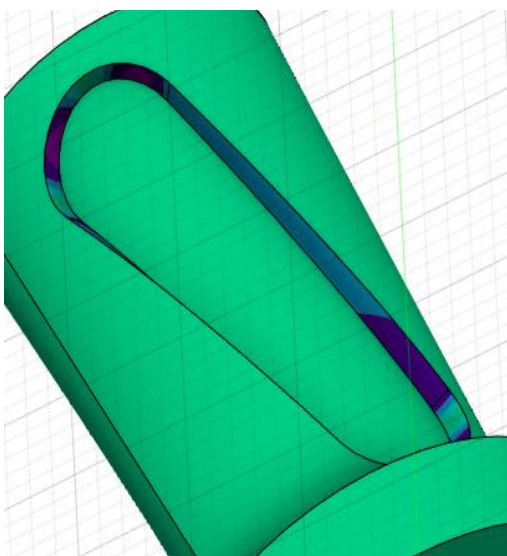


Obr. 44 Model na analýzu (z jedné strany s „free form surface“-em)

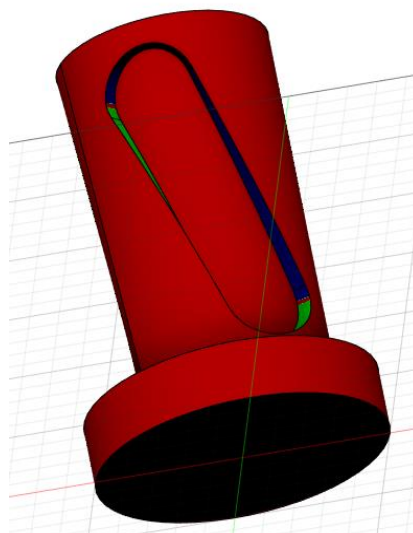


Obr. 45 Model na analýzu (z druhé strany s kapsou nerovnoběžnou s rotační osou)

Následující model je válcového tvaru se spirálovým řezem (vytvořeným “Flow” funkcí) a se spirálovou drážkou nerovnoběžně s osou válce.



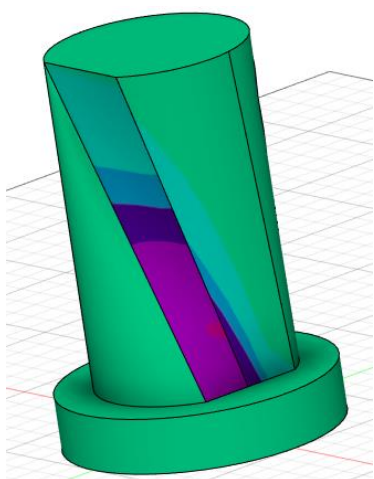
Obr. 46 Analýza zakřivení drážky



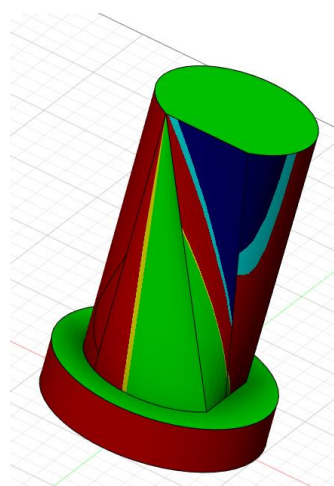
Obr. 47 Analýza dosažitelnosti drážky

Tab 9 Doporučení použitelnosti

Metoda obrábění	Použitelnost	Komentář
3D	X	
3+2D	--	Je obtížné nalezení správné orientace nástroje
4D	+	Podřezané boční stranu drážky
5D	+	



Obr. 48 Analýza zakřivení „free form surface“ části



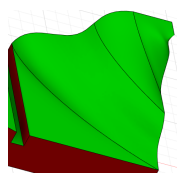
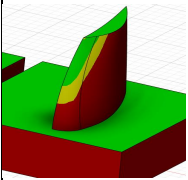
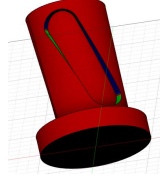
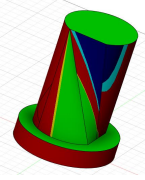
Obr. 49 Analýza dosažitelnosti „free form surface“ části

Daný model lze “vyrobit”, vznikají však problémy na nejsložitějších částech se zakřivením i s dosažitelností.

Tab 10 Doporučení použitelnosti

Metoda obrábění	Použitelnost	Komentář
3D	X	
3+2D	-- --	je nutné vícenásobné polohování k dosažení požadované kvality povrchu
4D	+	
5D	++	

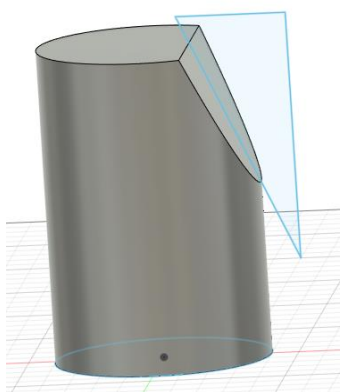
Tab 11 Shrnutí doporučení použitelnosti

Metoda obrábění				
3D	-- --	X	X	X
3+2D	--	+	--	--
4D	X	+	++	+
5D	++	+	+	+

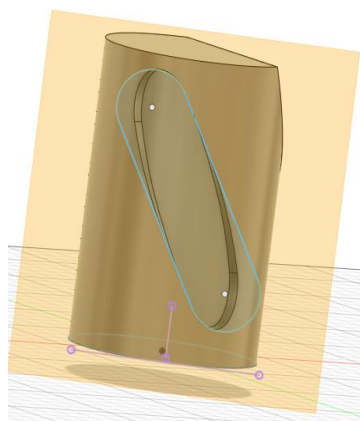
3.2. Návrh tvaru obrobku pro modelování

Při návrhu tvaru obrobku pro modelování jsem vycházel z výsledků analýzy dle tabulky č. 11. s cílem kombinace různých obráběných ploch na jednom obrobku za účelem porovnání různých metod víceosého obrábění.

- Základní tvar obrobku: válec (vhodný pro 4D)
- Sražení válce z jedné strany (jednoduchý tvar, u kterého je lepší naklonit obrobek, aby dráha byla co nejjednodušší, vhodný na 3+2D) viz obr. č. 49
- Spirálová drážka na obvodu válce (využití rotační osy, vhodný tvar pro 4D) viz obr. č. 50



Obr. 50 Sražení válce z jedné strany



Obr. 51 Spirálová drážka na 4D



Obr. 52 Spirálová drážka na 5D

- Spirálová drážka na obvodu válce se srážkou hran a se zaoblením vnitřních roh drážky (tvar jako výše pro 4D, s větší složitostí, vhodný pro 5D) viz obr. č. 51

3.3. Programování a hodnocení dráhy nástroje

K porovnání různých metod víceosého obrábění jsem hodnotil tyto ukazatelé:

- Náročnost přípravy – časová (čas potřebný k nastavení), odborná (znalostní předpoklady na programátora), množství volitelných parametrů k programování (pomocné roviny, křivky, osy, body počátku)
- Chybovost – počet kroků nutný k tomu, aby dráha fungovala bez chyb
- Složitost – počet nastavených parametrů
- Využitelnost – jaká omezení se vztahují na danou metodu a jak je lze ovlivnit
- Délka dráhy nástroje
- Čas obrábění
- Dosažitelná tolerance – dosažitelná tolerance neopravitelných chyb nedostatku materiálu dle simulace

U prvních dvou hodnocených ukazatelů si musíme uvědomit, že jsou subjektivní, výsledek je závislý na vědomostech, dovednostech a zkušenostech programátora s daným CAM softwarem. Každý ukazatel u každou metodu jsem hodnotil samostatně, výsledky jsem shrnul do tabulek a porovnával.

3.3.1. Sražení válce

Tab 12 Porovnávací tabulka na sražení válce

Metoda obrábění	3+2D		4D		5D	
Časová náročnost přípravy [min]	1-2		10-15		5-6	
Požadavky na programátora	Znalost, jak nastavit „Tool orientation“		-		Znalost, jak nastavit „Tool orientation“	
Množství pomocných prvků	0		0		0	
Chybovost	Generování dráhy, hrubování proběhl bezchybně, již první výsledky byly použitelné		4D „rotary pocket“ nelze nastavit tak, aby obrobil celou plochu		Držák nástroje se dostal do kolize s obrobkem, musí se zohlednit délka nástroje	
Počet pokusů generování dráhy	3-4		7-8		7-8	
Složitost	Nastavuje se jediný parametr: „Tool orientation“		Nastavují se základní parametre „Rotary Pocket“		Nastavuje se dodržování úhlu nástroje k obrobku (10°)	
Využitelnost	Dráha je použitelná bez omezení		Nepoužitelná! Je část obrobku, kterou jsem nedovedl nastavit k obrobení		S menším nástrojem dochází ke kolizi při hrubování; Dráha je použitelná	
	3+2D		4D		5D	
	Hrubování	Načisto	Hrubování	Načisto	Hrubování	Načisto

Čas obrábění [min]	4:46	4:29	8:14	8:23	5:54	7:43
Délka dráhy [m]	2,36	2,79	6,79	6,95	5,90	7,71
Dosažitelná tolerance [mm]	< 0,0006		Nevznikly neopravitelné vady, zůstává hodně zbytkového materiálu < 0,4		Nevznikly neopravitelné vady, zůstává hodně zbytkového materiálu < 0,02	

Pro obrábění dané plochy součástky je vhodná metoda 3+2D, další metody jsou méně přesné, a mají delší čas obrábění.

3.3.2. Spirálová drážka

Tab 13 Porovnávací tabulka na spirálovou drážku

Metoda obrábění	3+2D	4D	5D
Časová náročnost přípravy [min]	15-20	5-6	3-5
Požadavky na programátora	Složitě nastavení více pracovních úhlů nástroje („construction plain“)	Jednoduché nastavení („Wrap toolpath“)	Jednoduché nastavení jednoho pracovního úhlu nástroje („construction plain“)
Množství pomocných prvků	2 konstrukční plochy	0	1 konstrukční plocha
Chybovost	Dráhy jsou použitelné, zbytečně se však překrývají. Opravuje se vynecháním zbytečných částí drah	Nesprávné nastavení průměru válce k použití funkce „Wrap toolpath“ způsobuje chybu	-
Počet pokusů generování dráhy	10-15	8-10	3-5
Složitost	Nelze obrábět jen s jednou polohou rotačních os, použití minimálně 2 obráběcích sekvencí	Jednoduché nastavení funkce „Wrap toolpath“	Použití jednoduché 5D metody „Vertical“

Využitelnost	Dráhy jsou použitelné. Pozor na možnost kolize držáku nástroje s upínáním obrobku					
	3+2D		4D		5D	
	Hrubování	Načisto	Hrubování	Načisto	Hrubování	Načisto
Čas obrábění [min]	5:48	25:01	3:16	4:02	9:43	15:19
Délka dráhy [m]	5,36	14,99	1,62	2,55	9,51	14,72
Dosažitelná tolerance [mm]	< 0,08		< 0,2		< 0,08	

Pro obrábění dané plochy součástky je vhodná metoda 5D.

3+2D metoda vyžaduje výrazně delší čas obrábění.

Při nižší kvalitě je optimální metoda 4D.

3.3.3. Spirálová drážka na obvodu válce se srážkou hran a se zaoblením vnitřních roh drážky

Tab 14 Porovnávací tabulka na spirálová drážka na obvodu válce se srážkou hran

Metoda obrábění	3+2D	4D	5D
Časová náročnost přípravy [min]	5-7	4-6	4-5
Požadavky na programátora	Složité nastavení více pracovních úhlů nástroje („construction plain“)	Jednoduché nastavení „Pocket clearing“	Nastavení metody „to curve“ a funkce „collision avoidance“ vyžaduje hlubší znalosti
Množství pomocných prvků	1 konstrukční plocha	0	1 konstrukční plocha 1 vedoucí křivka
Chybovost	-	-	-
Počet pokusů generování dráhy	6-8	5-7	5-7
Složitost	Nastavení není náročnější než u první obráběné plochy, musíme nastavit jen orientaci nástroje	Pomocí metody „rotary pocket“ vygenerování dráhy není složité	Nastavení funkce „collision avoidance“, která se používá k metodě „to curve“, je složitá
Využitelnost	Dráhy jsou použitelné. Pozor na možnost kolize držáku nástroje s upínáním obrobku		
	Dráha je použitelná bez omezení	Dráha není vhodná z důvodu vrstvy zbytkového materiálu na dně drážky	Dráha je použitelná bez omezení

	3+2D		4D		5D	
	Hrubování	Načisto	Hrubování	Načisto	Hrubování	Načisto
Čas obrábění [min]	7:41	12:07	2:48	12:12	2:35	11:36
Délka dráhy [m]	7,53	11,67	2,28	11,08	1,28	7,02
Dosažitelná tolerance [mm]	< 0,025		< 0,08		< 0,01	

Pro obrábění dané plochy součástky je vhodná metoda 5D.

3+2D metoda vyžaduje výrazně delší čas obrábění.

Metoda 4D není vhodná z důvodu vrstvy zbytkového materiálu na dně drážky.

3.3.4. Vyhodnocení

Analýzou zakřivení obráběné plochy a dosažitelnosti plochy nástrojem jsem určil metody vhodné pro tři různé obráběné prvky na součástce. Následně podle zvolených kritérií jsem porovnal tyto metody víceosého obrábění (3+2D, 4D a 5D) pro prvky. Metoda 4D trvale dosahovala nejhorších výsledků z hlediska přesnosti, zatímco metody 3+2D i 5D přinesly pro daný prvek uspokojivé výsledky. Zjistil jsem, že výběr vhodné obráběcí metody pro konkrétní prvek je zásadní nejen z hlediska času a délky dráhy nástroje, ale také z hlediska náročnosti programování. Ve většině případů, kdy byla optimální metoda zvolená dle Tab 11, byla metoda optimální i z hlediska objektivních kritérií (čas, délka dráhy, tolerance) i z hlediska náročnosti programování.

Tab 11 je správně nastavena a doporučení týkající se metody považuji za vyhovující.

Závěr

V této bakalářské práci jsem se zabýval porovnáním víceosých metod CNC obrábění. Cílem práce bylo hledání dostupných odborných článků na toto téma, hodnocení použitelnosti různých metod, porovnání složitosti programování a provedení teoretické ukázky hodnocení vygenerovaných drah nástroje.

Rešerší jsem zjistil, že na téma různých metod víceosého obrábění se publikují odborné články, nicméně s porovnáním různých metod obrábění se zabývají tyto články jen zřídka, hrubě jeden článek za desetiletí. Úroveň porovnání se ale zlepšuje a dostáváme tím k lepším, komplexnějším výsledkům.

Z hlediska programování je 3+2D a 4D zvládnutelný, vycházejíc ze základních znalostí 3D, při těchto metodách lze poměrně jednoduše generovat použitelnou dráhu. Pro 5D programování jsou nutné hlubší znalosti. Možných i potřebných parametrů je mnohokrát více, tím ale i časová náročnost programování metody 5D je výrazně vyšší. V této bakalářské práci byly analyzovány výsledky víceosého obrábění různými metodami při obrábění různých modelových tvarů obrobku. Výsledky analýzy jsou uvedeny v tabulce (tab 11).

V závěrečné části byl navržen obrobek, na kterém byly testovány všechny tři porovnané metody podle objektivních i subjektivních kritérií.

Práce poskytuje přehled problematiky a poskytuje základ k dalším analýzám s cílem nalezení optimální metody obrábění s využitím víceosých CNC obráběcích strojů.

Seznam obrázků

OBR. 1 NA LEVÉM OBRÁZKU: MOŽNÉ OSY VOLNOSTI CNC STROJE, NA PRAVÉM OBRÁZKU JE ZNÁZORNĚNÉ ZÁKLADNÍ NASTAVENÍ OSY Z NA OBROBKU.....	11
OBR. 2 MODEL TYP STŮL-STŮL [3].....	12
OBR. 3 MODEL TYP STŮL-HLAVA [3]	12
OBR. 4 MODEL TYP HLAVA-HLAVA [3]	13
OBR. 5 VÝROBEK VE VIDEU 5-AXIS "VERSUS 3-AXIS - WHICH WOULD YOU CHOOSE?"	15
OBR. 6 MOŽNOSTI STRATEGIE FRÉZOVÁNÍ S ÚHLEM SKLONU OSY NÁSTROJE	17
OBR. 7 ZÁKLADNÍ UMÍSTĚNÍ SOUČÁSTÍ VE SOUŘADNICOVÉM SYSTÉMU [11]	21
OBR. 8 NATOČENÍ SOUČÁSTI BEZ KORIGOVÁNÍ SOUŘADNICOVÉHO SYSTÉMU [11]	21
OBR. 9 KORIGOVANÉ SOUŘADNICOVÉ SYSTÉM [11]	22
OBR. 10 MODEL NA OBRÁBĚNÍ V CAM SOFTWARE	27
OBR. 11 NASTAVENÍ SOUŘADNICOVÉHO SYSTÉMU NA OBROBKU	28
OBR. 12 DOSAŽITELNOST NÁSTROJE SESHORA	28
OBR. 13 NATOČENÍ SOUŘADNICOVÉ SYSTÉM NA OBROBKU	30
OBR. 14 ZÁKLADNÍ SOUŘADNICOVÉ SYSTÉM NA OBROBKU	30
OBR. 15 OPERACE NA HRUBOVÁNÍ ZE STRAN VÝROBKU	30
OBR. 16 OPERACE NA HRUBOVÁNÍ ZE SHORA VÝROBKU	30
OBR. 17 ŠPATNÉ NASTAVENÍ PLOCHU „OFSET“ U OPERACE NA ČISTO	31
OBR. 18 OPRAVENÁ DRÁHA NÁSTROJE	31
OBR. 19 VÝSLEDEK SIMULACE HRUBOVÁNÍ S TOLERANCÍ 0,01MM.....	32
OBR. 20 MÍSTO VZNIKU PRVNÍ NEOPRAVITELNÉ VADY	32
OBR. 21 PŘÍPAD NA KOLIZI S DRŽÁKEM	33
OBR. 22 OPERACE „FROM POINT“ (OD STŘEDU KŘÍŽE), VYGENEROVANÁ DRÁHA	35
OBR. 23 OPERACE „FROM POINT“, VÝSLEDEK SIMULACE OBRÁBĚNÍ S TOLERANCÍ 0,01 MM.....	35
OBR. 24 OPERACE „FROM CURVE“ (PODLE VODOROVNÉ KŘIVKY), VYGENEROVANÁ DRÁHA	35
OBR. 25 OPERACE „FROM CURVE“, VÝSLEDEK SIMULACE OBRÁBĚNÍ S TOLERANCÍ 0,01 MM	35
OBR. 26 OPERACE „FROM CURVE“ (PODLE SVISLÉ KŘIVKY), VYGENEROVANÁ DRÁHA.....	36
OBR. 27 OPERACE FROM CURVE, VÝSLEDEK SIMULACE OBRÁBĚNÍ S TOLERANCÍ 0,01 MM	36
OBR. 28 MOŽNOSTI NA GENEROVÁNÍ DRÁHY POMOCÍ „ROTARY PASSES“ [23]	37
OBR. 29 MODEL NA POROVNÁNÍ 4+1D A 5D	39
OBR. 30 VÝSLEDKY SIMULACE DOKONČOVÁNÍ U 5D OBRÁBĚNÍ.....	39
OBR. 31 VÝSLEDKY SIMULACE DOKONČOVÁNÍ U 4D OBRÁBĚNÍ.....	39
OBR. 32 VÝSLEDKY SIMULACE, VYŠRAFOVANÁ ČÁST = ZÁKLADNÍ MODEL, TLUSTÁ ČÁRA JE SKUTEČNÝ ŘEZ NÁSTROJE.....	39
OBR. 33 UKÁZKOVÝ MODEL NA 3+2D OBRÁBĚNÍ.....	41
OBR. 34 UKÁZKOVÝ MODEL NA 4D „POCET CLEARING“ OBRÁBĚNÍ.....	41
OBR. 35 UKÁZKOVÝ MODEL NA 4D „LINEAR“ OBRÁBĚNÍ	41
OBR. 36 UKÁZKOVÝ MODEL NA 5D OBRÁBĚNÍ.....	42
OBR. 37 UKÁZKOVÝ MODEL NA 5D OBRÁBĚNÍ.....	42
OBR. 38 UKÁZKOVÉ MODEL S RŮZNÝMI TVARY	43
OBR. 39 ANALÝZA DOSAŽITELNOSTI NÁSTROJE ZE SHORA	43
OBR. 40 ANALÝZA KŘIVOSTI (FREE FORM SURFACE)	44
OBR. 41 ANALÝZA DOSAŽITELNOSTI (FREE FORM SURFACE).....	44
OBR. 42 ANALÝZA DOSAŽITELNOSTI (LOPATKA).....	45
OBR. 43 ANALÝZA KŘIVOSTI (LOPATKA)	45
OBR. 44 MODEL NA ANALÝZU (Z JEDNÉ STRANY S „FREE FORM SURFACE“-EM	46
OBR. 45 MODEL NA ANALÝZU (Z DRUHÉ STRANY S KAPSOU NEROVNOBĚŽNOU S ROTAČNÍ OSOU).....	46

OBR. 46 ANALÝZA ZAKŘIVENÍ DRÁŽKY.....	46
OBR. 47 ANALÝZA DOSAŽITELNOSTI DRÁŽKY.....	46
OBR. 48 ANALÝZA ZAKŘIVENÍ „FREE FORM SURFACE” ČÁSTI.....	47
OBR. 49 ANALÝZA DOSAŽITELNOSTI „FREE FORM SURFACE” ČÁSTI.....	47
OBR. 50 SRAŽENÍ VÁLCE Z JEDNÉ STRANY	48
OBR. 51 SPIRÁLOVÁ DRÁŽKA NA 4D.....	48
OBR. 52 SPIRÁLOVÁ DRÁŽKA NA 5D.....	48
OBR. 53 ZÁKLADNÍ TVAR	62
OBR. 54 URÁŽENÍ STRANY VÁLCE.....	62
OBR. 55 MODELOVÁNÍ DRÁŽKY POMOCÍ TEČNÉ PLOCHY.....	62
OBR. 56 TVAR DRÁŽKY V ŘEZU PRO 4D	62
OBR. 57 MODELOVÁNÍ DRÁŽKY POMOCÍ TEČNÉ PLOCHY.....	62
OBR. 58 VRAŽENÍ A ZAOBLENÍ DRÁŽKY.....	62
OBR. 59 TVAR DRÁŽKY V ŘEZU PRO 5D.....	63
OBR. 60 ANALÝZA DOSAŽITELNOSTI PRO SPIRÁLOVOU DRÁŽKU.....	63
OBR. 61 ANALÝZA DOSAŽITELNOSTI PRO SPIRÁLOVOU DRÁŽKU S ZAOBLENÍM	63
OBR. 62 ANALÝZA KŘIVOSTI PRO SPIRÁLOVOU DRÁŽKU	63
OBR. 63 ANALÝZA KŘIVOSTI PRO SPIRÁLOVOU DRÁŽKU S ZAOBLENÍM	63
OBR. 64 DRÁHA NÁSTROJE U DOKONČOVÁNÍ S METODOU 3+2D (2D FACE + TOOL ORIENTATION)	64
OBR. 65 DRÁHA NÁSTROJE U DOKONČOVÁNÍ S METODOU 4D (ROTARY POCKET).....	64
OBR. 66 DRÁHA NÁSTROJE U DOKONČOVÁNÍ S METODOU 5D (STEEP AND SHALLOW).....	64
OBR. 67 DRÁHA NÁSTROJE U DOKONČOVÁNÍ S METODOU 3+2D (STEEP AND SHALLOW + TOOL ORIENTATION)	65
OBR. 68 DRÁHA NÁSTROJE U DOKONČOVÁNÍ S METODOU 3+2D (STEEP AND SHALLOW + TOOL ORIENTATION)	65
OBR. 69 DRÁHA NÁSTROJE U DOKONČOVÁNÍ S METODOU 4D (2D ADAPTIV +WRAP TOOLPATH)	65
OBR. 70 DRÁHA NÁSTROJE U DOKONČOVÁNÍ S METODOU 5D (STEEP AND SHALLOW).....	65
OBR. 71 DRÁHA NÁSTROJE U DOKONČOVÁNÍ S METODOU 3+2D (STEEP AND SHALLOW + TOOL ORIENTATION)	66
OBR. 72 DRÁHA NÁSTROJE U DOKONČOVÁNÍ S METODOU 4D (ROTARY POCKET).....	66
OBR. 73 DRÁHA NÁSTROJE U DOKONČOVÁNÍ S METODOU 5D (SCALLOP)	66
OBR. 74 VÝSLEDKY SIMULACE 3+2D OBRÁBĚNÍ, NASTAVENÁ TOLERANCE 0,0005 MM.....	67
OBR. 75 VÝSLEDKY SIMULACE 5D OBRÁBĚNÍ, NASTAVENÁ TOLERANCE 0,02 MM.....	67
OBR. 76 VÝSLEDKY SIMULACE 4D OBRÁBĚNÍ, NASTAVENÁ TOLERANCE 0,04 MM.....	67
OBR. 77 VÝSLEDKY SIMULACE 3+2D OBRÁBĚNÍ, NASTAVENÁ TOLERANCE 0,08 MM.....	68
OBR. 78 MÍSTO VZNIKU NEOPRAVITELNÉ VADY U 3+2D OPERACI, NASTAVENÁ TOLERANCE 0,08 MM	68
OBR. 79 VÝSLEDKY SIMULACE 4D OBRÁBĚNÍ, NASTAVENÁ TOLERANCE 0,2 MM.....	68
OBR. 80 MÍSTO VZNIKU NEOPRAVITELNÉ VADY U 4D OPERACI, NASTAVENÁ TOLERANCE 0,2 MM	68
OBR. 81 VÝSLEDKY SIMULACE 5D OBRÁBĚNÍ, NASTAVENÁ TOLERANCE 0,08 MM.....	69
OBR. 82 MÍSTO VZNIKU NEOPRAVITELNÉ VADY U 5D OPERACI, NASTAVENÁ TOLERANCE 0,08 MM	69
OBR. 83 VÝSLEDKY SIMULACE 3+2D OBRÁBĚNÍ, NASTAVENÁ TOLERANCE 0,025 MM.....	69
OBR. 84 MÍSTO VZNIKU NEOPRAVITELNÉ VADY U 3+2D OPERACI, NASTAVENÁ TOLERANCE 0,025 MM	69
OBR. 85 VÝSLEDKY SIMULACE 4D OBRÁBĚNÍ, NASTAVENÁ TOLERANCE 0,08 MM.....	70
OBR. 86 MÍSTO VZNIKU NEOPRAVITELNÉ VADY U 4D OPERACI, NASTAVENÁ TOLERANCE 0,08 MM	70
OBR. 87 VÝSLEDKY SIMULACE 5D OBRÁBĚNÍ, NASTAVENÁ TOLERANCE 0,01 MM.....	70
OBR. 88 MÍSTO VZNIKU NEOPRAVITELNÉ VADY U 5D OPERACI, NASTAVENÁ TOLERANCE 0,01 MM	70

Seznam tabulek

TAB 1 VÝSLEDKY MĚŘENÍ PODLE P. GRAY A S. BEDI V 2001 [6].....	16
TAB 2 VÝSLEDKY MĚŘENÍ TOLERANCE V 2020, ČERVENÁ=MIMO TOLERANCE, BÍLÁ=NA HRANICI TOLERANCE, ZELENÁ = V TOLERANČNÍM POLI [8]	18
TAB 3 NORMALIZOVANÉ G KODY [9].....	19
TAB. 4 ČAS A DÉKA DRÁHY U 3+2D OPERACE	32
TAB 5 SROVNÁNÍ ČASU A DÉLKY DRAH U 3 RŮZNÝCH METOD	36
TAB 6 POROVNÁNÍ ČAS A DÉLKY DRÁHY U 5D A 4D OPERACE.....	39
TAB 7 DOPORUČENÍ POUŽITELNOSTI.....	44
TAB 8 DOPORUČENÍ POUŽITELNOSTI.....	45
TAB 9 DOPORUČENÍ POUŽITELNOSTI.....	47
TAB 10 DOPORUČENÍ POUŽITELNOSTI.....	47
TAB 11 SHRUTÍ DOPORUČENÍ POUŽITELNOSTI	48
TAB 12 POROVNÁVACÍ TABULKA NA SRAŽENÍ VÁLCE	50
TAB 13 POROVNÁVACÍ TABULKA NA SPIRÁLOVOU DRÁŽKU	52
TAB 14 POROVNÁVACÍ TABULKA NA SPIRÁLOVÁ DRÁŽKA NA OBVODU VÁLCE SE SRÁŽKOU HRAN	54

Seznam příloh a diagramů

PŘÍLOHA Č. 1 MODELOVÁNÍ	62
PŘÍLOHA Č. 2 ANALÝZA FINÁLNÍ SOUČÁSTKY	63
PŘÍLOHA Č. 3 VYGENEROVANÉ DRÁHY.....	64
PŘÍLOHA Č. 4 ANALÝZA POVRHU	67
DIAGRAM 1 NÁKLADY NA VÝROBU DÁVKY ZA PŘEDPOKLADU PRŮMĚRNÝCH NÁKLADŮ NA STROJ [7]	16

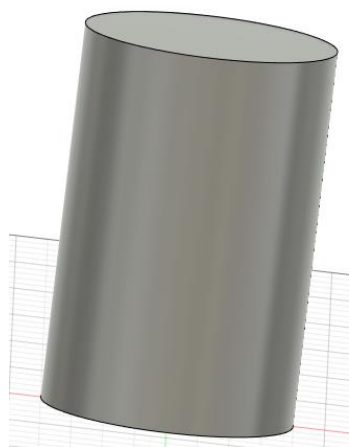
Bibliography

- [1] S. M. Y. S. S. Alisher Mamadjanovich Mamadjanov, „ADVANTAGES AND THE FUTURE OF CNC MACHINES,“ *SCIENTIFIC PROGRESS*, pp. 1638-1647, 2021.
- [2] S. Ferenc, „CNC Media,“ [Online]. Available: <https://www.cnc.hu/2013/09/ottengelyes-megmunkalasok-i-alapfogalmak/>. [Přístup získán 17 7 2023].
- [3] J. P. Š. V. Peter Pokorný, „THE TASK OF 5-AXIS MILLING,“ *Technical Gazette*, pp. 147-150, 2012.
- [4] D. X. P. G. Ali Lasemi, „Recent development in CNC machining of freeform surfaces: A state-of-the-art review,“ *Computer-Aided Design*, sv. 42, č. 7, pp. 641-654, 2010.
- [5] I. Haas Automation, „Youtube,“ Haas Automation, Inc., 8 6 2022. [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=oFvBe7cqxE&t=124s>. [Přístup získán 17 7 2023].
- [6] S. B. F. I. N. R. G. M. P. Gray, „Comparison of 5-Axis and 3-Axis Finish Machining of Hydroforming Die Inserts,“ *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, sv. 17, pp. 562-569, 2001.
- [7] M. P. Wojciech Zębala, „Comparative study of 3- and 5-axis CNC centers for free-form,“ *Int. J. Production Economics*, pp. 345-358, 2 9 2014.
- [8] M. S. P. Č. Č. S. Sajgalik, „Increasing the Accuracy of Free-Form Surface Multiaxis Milling,“ *Materials*, sv. 14, č. 25, pp. 1-15, 2020.
- [9] „G-Code tutorial,“ A look at the most common G Codes, [Online]. Available: <https://gcodetutor.com/cnc-machine-training/cnc-g-codes.html>. [Přístup získán 17 7 2023].
- [10] H. F. Team, „G143 5-Axis Tool Length Compensation + (Group 08),“ [Online]. Available: <https://www.haascnc.com/service/codes-settings.type=gcode.machine=mill.value=G143.html>. [Přístup získán 17 7 2023].
- [11] Haas F1 Team, „G234 Tool Center Point Control (TCPC) (Group 08),“ [Online]. Available: <https://www.haascnc.com/service/codes-settings.type=gcode.machine=mill.value=G234.html>. [Přístup získán 17 7 2023].
- [12] Haas F1 Team, „G268 / G269 Feature Coordinate System (Group 14),“ [Online]. Available: <https://www.haascnc.com/service/codes-settings.type=gcode.machine=mill.value=G268.html>. [Přístup získán 17 7 2023].

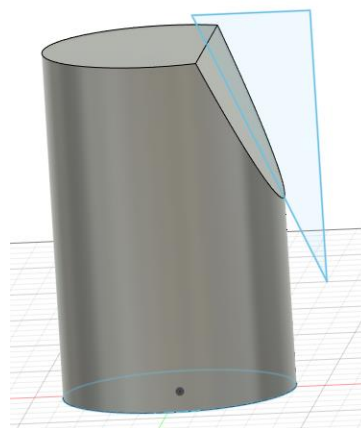
- [13] Autodesk, „CAD/CAM Software,“ [Online]. Available: <https://www.autodesk.com/solutions/cad-cam>. [Přístup získán 17 7 2023].
- [14] Autodesk, „Co je aplikace Fusion 360?,“ [Online]. Available: <https://www.autodesk.cz/products/fusion-360/overview?term=1-YEAR&tab=subscription&plc=F360>. [Přístup získán 17 7 2023].
- [15] L. F. Renato Calvinisti, „Fusion 360 CAM: A Starter Guide to Fusion 360 for CNC,“ 7 10 2022.
- [16] HelmanCNC, „Mazak G Code List (M Series),“ [Online]. Available: <https://www.helmancnc.com/mazak-g-code-list-m-series/>. [Přístup získán 17 7 2023].
- [17] Autodesk, „Setup,“ Autodesk, [Online]. Available: <https://help.autodesk.com/view/fusion360/ENU/courses/AP-TOOLPATH-SETUP>. [Přístup získán 18 7 2023].
- [18] Autodesk, „Tool orientation overview,“ [Online]. Available: <https://help.autodesk.com/view/fusion360/ENU/?guid=MFG-TOOL-ORIENTATION-OVERVIEW>. [Přístup získán 18 7 2023].
- [19] Autodesk, „Milling basics,“ [Online]. Available: <https://help.autodesk.com/view/fusion360/ENU/courses/AP-MILLING-BASICS>. [Přístup získán 18 7 2023].
- [20] Autodesk, „Product Documentation,“ [Online]. Available: <https://help.autodesk.com/view/fusion360/ENU/?guid=X-MFG-MULTI-AXIS>. [Přístup získán 18 7 2023].
- [21] Autodesk, „Primary Tool Axis Mode,“ [Online]. Available: https://help.autodesk.com/view/fusion360/ENU/?guid=Fusion_CAM_how_to_generate_multi_axis_machining_5_axis_settings_tool_axis_mode_html. [Přístup získán 18 7 2023].
- [22] Autodesk, „Collision Avoidance,“ [Online]. Available: https://help.autodesk.com/view/fusion360/ENU/?guid=Fusion_CAM_how_to_generate_multi_axis_machining_5_axis_settings_collision_avoidance_html. [Přístup získán 18 7 2023].
- [23] Autodesk, „How to create a 4th axis rotary toolpath in Fusion 360,“ [Online]. Available: <https://www.autodesk.com/support/technical/article/caas/sfdcarticles/sfdcarticles/How-to-create-a-4-axis-rotary-toolpath-in-Fusion.html>. [Přístup získán 18 7 2023].
- [24] Autodesk, „4th Axis Wrap Toolpath,“ [Online]. Available: <https://help.autodesk.com/view/fusion360/ENU/?guid=GUID-7FF25192-AED7-4230-92DC-E22ADF15D498>. [Přístup získán 18 7 2023].

Přílohy

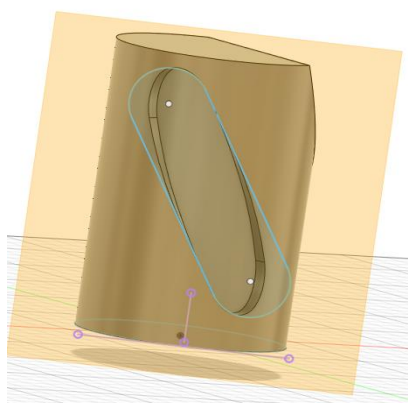
Příloha č. 1 Modelování



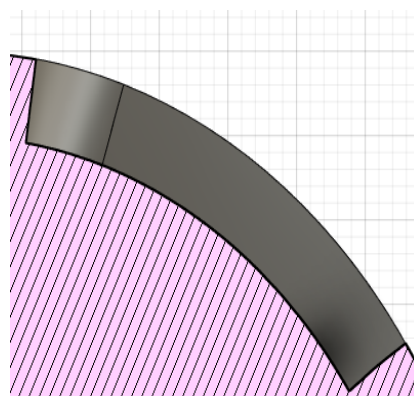
Obr. 53 Základní tvar



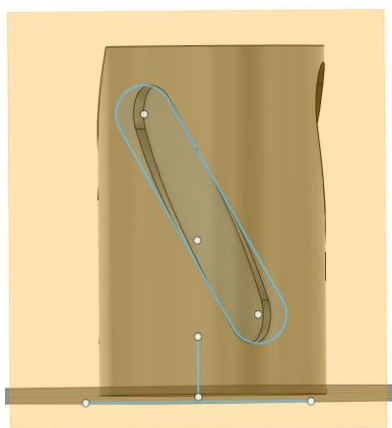
Obr. 54 Urážení strany válce



Obr. 55 Modelování drážky pomocí tečné plochy



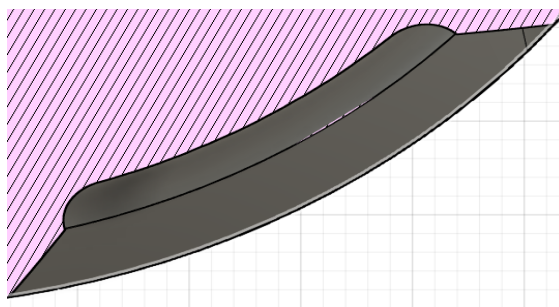
Obr. 56 Tvar drážky v řezu pro 4D



Obr. 57 Modelování drážky pomocí tečné plochy

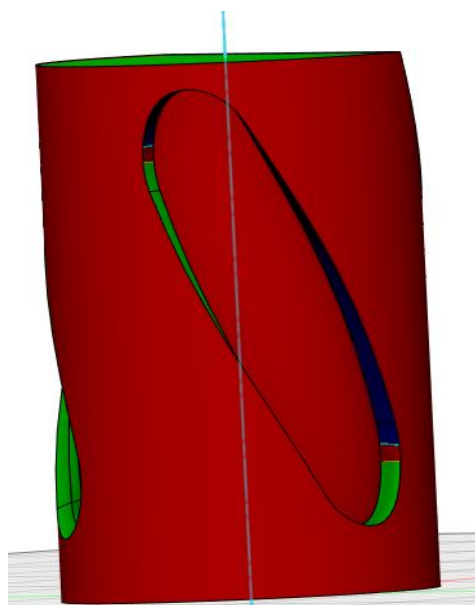


Obr. 58 Vražení a zaoblení drážky

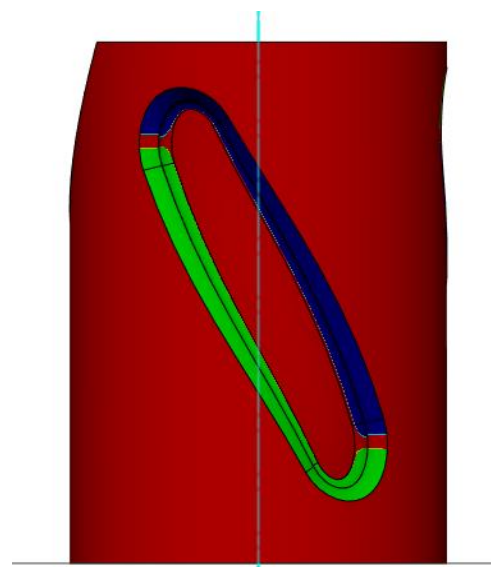


Obr. 59 tvar drážky v řezu pro 5D

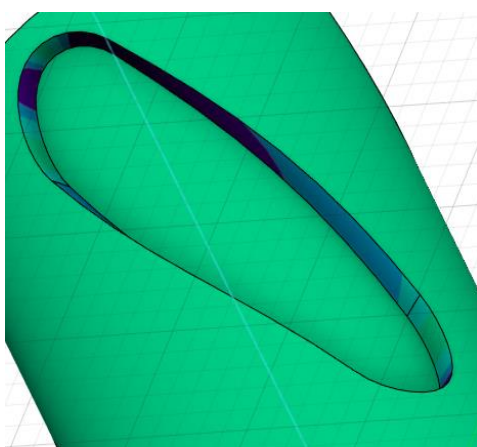
Příloha č. 2 Analýza finální součástky



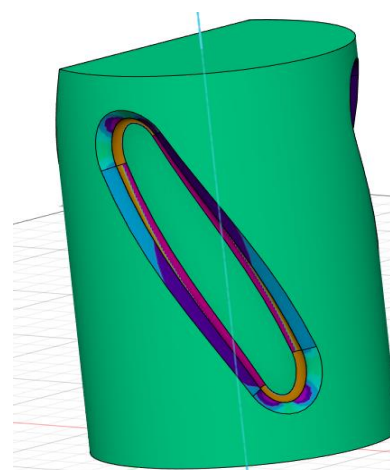
Obr. 60 analýza dosažitelnosti pro spirálovou drážku



Obr. 61 Analýza dosažitelnosti pro spirálovou drážku s zaoblením



Obr. 62 Analýza křivosti pro spirálovou drážku



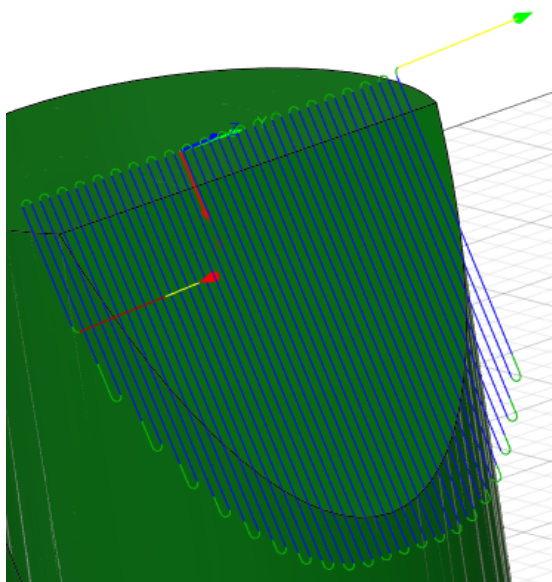
Obr. 63 Analýza křivosti pro spirálovou drážku s zaoblením

Na základě obrázků lze konstatovat:

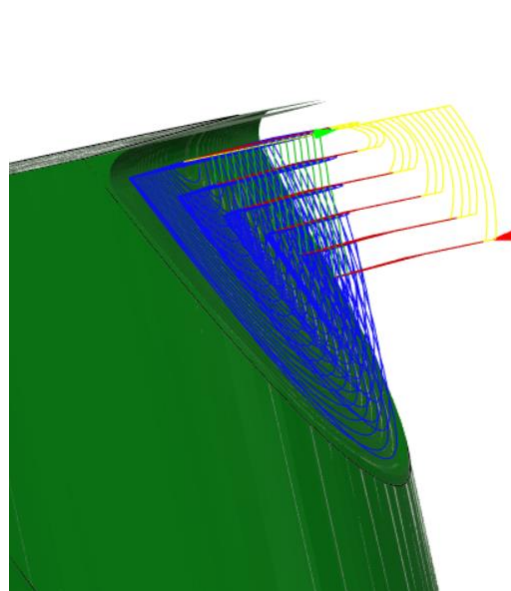
Při 4D obrábění nemůžeme jednoduše dosáhnout do kapsy a křivost stran je složitější.

Při 5D obrábění se zlepší podmínky dosažitelnosti, složitější tvar podle křivosti součásti

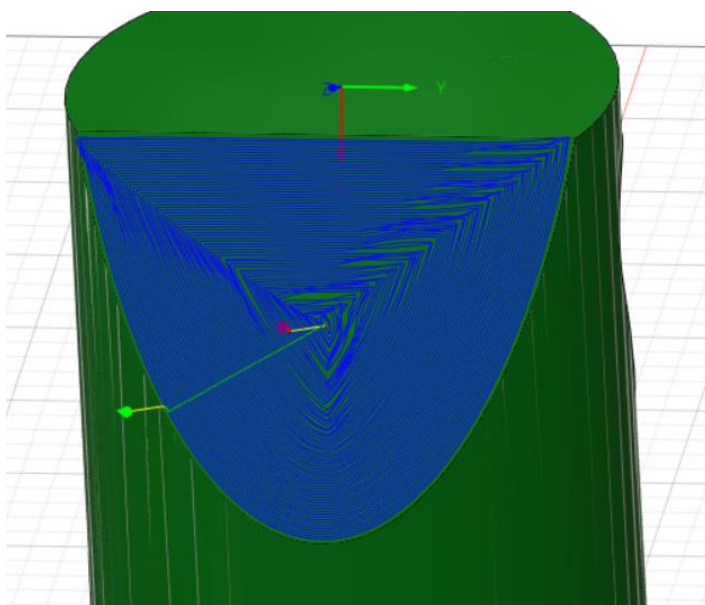
Příloha č. 3 Vygenerované dráhy



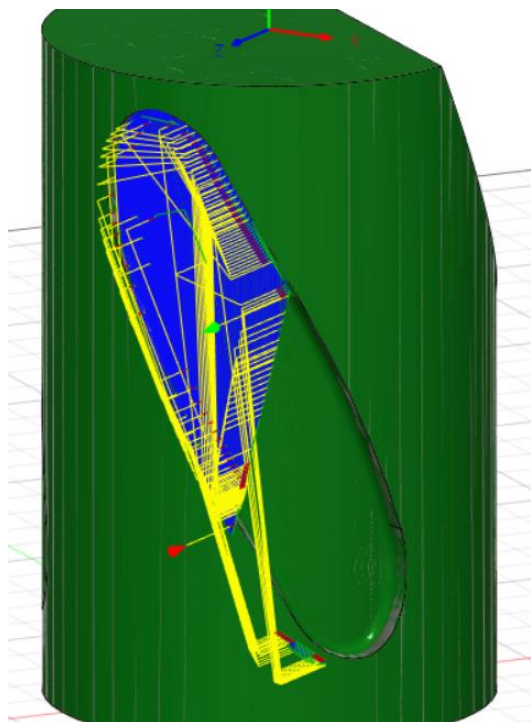
Obr. 64 Dráha nástroje u dokončování s metodou 3+2D (2D Face + Tool orientation)



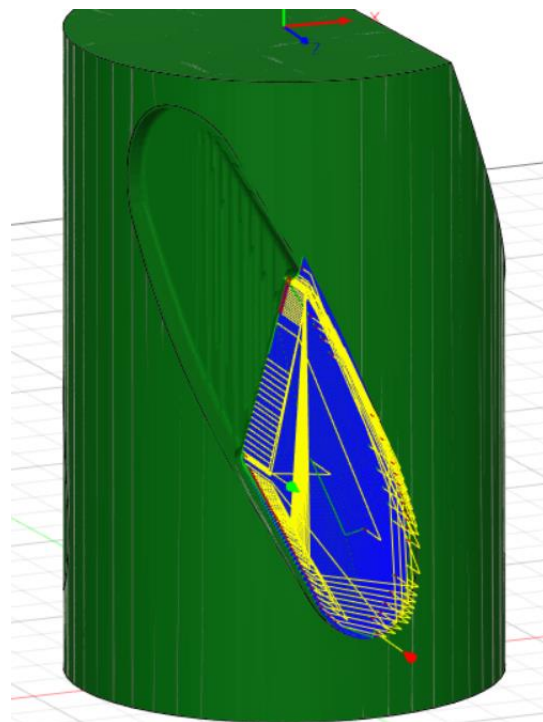
Obr. 65 Dráha nástroje u dokončování s metodou 4D (Rotary pocket)



Obr. 66 Dráha nástroje u dokončování s metodou 5D (steep and shallow)



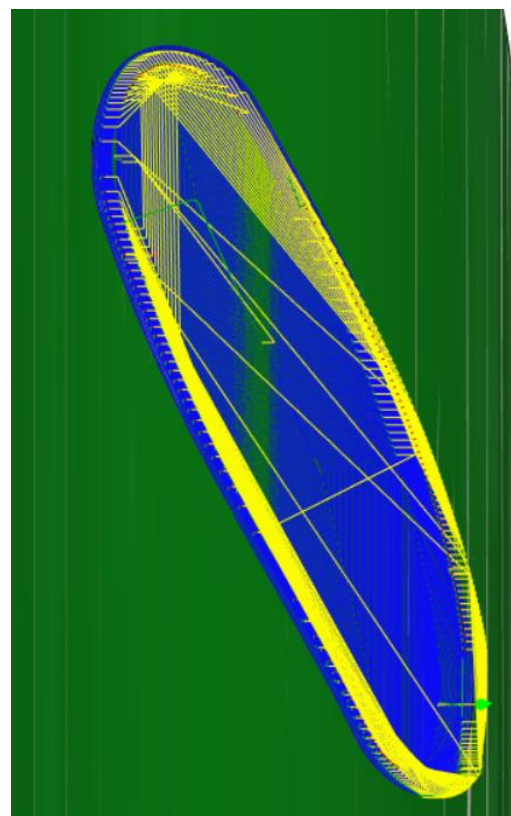
Obr. 67 Dráha nástroje u dokončování s metodou 3+2D (Steep and Shallow + Tool orientation)



Obr. 68 Dráha nástroje u dokončování s metodou 3+2D (Steep and Shallow + Tool orientation)



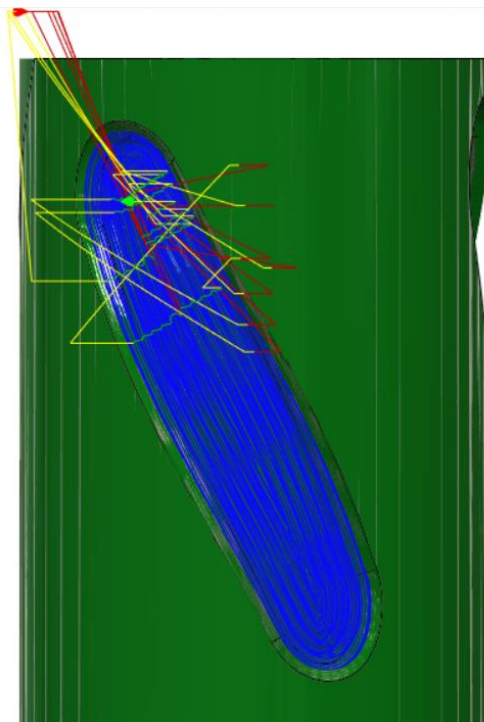
Obr. 69 Dráha nástroje u dokončování s metodou 4D (2D adaptiv +Wrap toolpath)



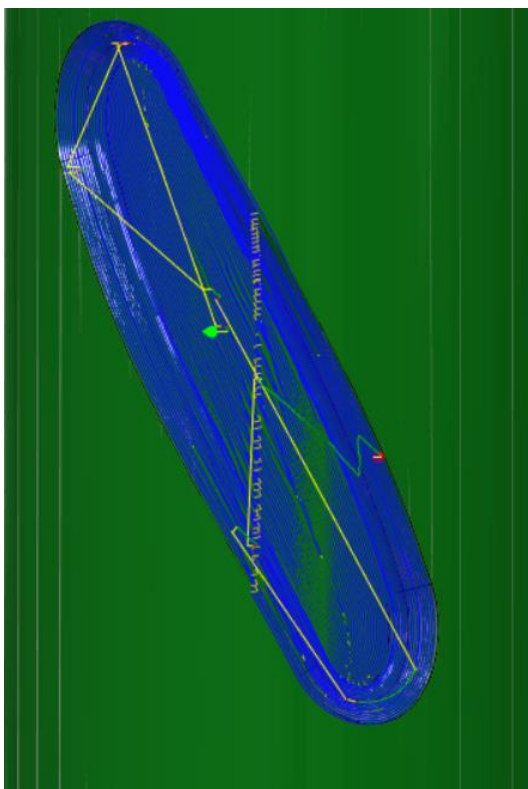
Obr. 70 Dráha nástroje u dokončování s metodou 5D (steep and shallow)



Obr. 71 Dráha nástroje u dokončování s metodou 3+2D (Steep and Shallow + Tool orientation)

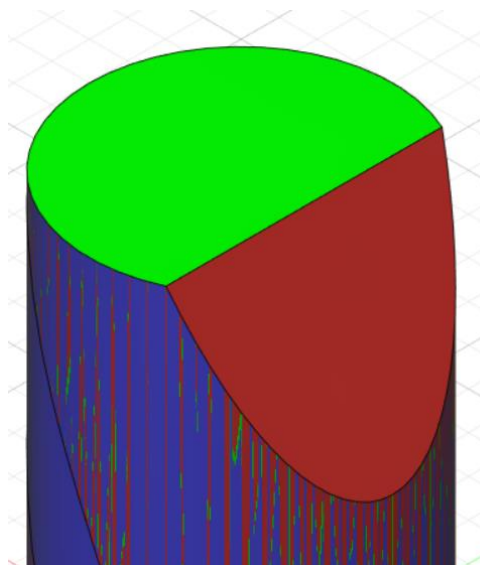


Obr. 72 Dráha nástroje u dokončování s metodou 4D (Rotary pocket)

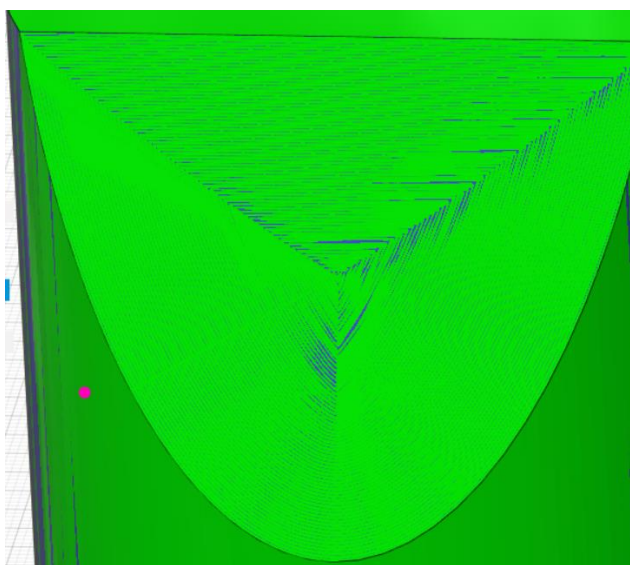


Obr. 73 Dráha nástroje u dokončování s metodou 5D (Scallop)

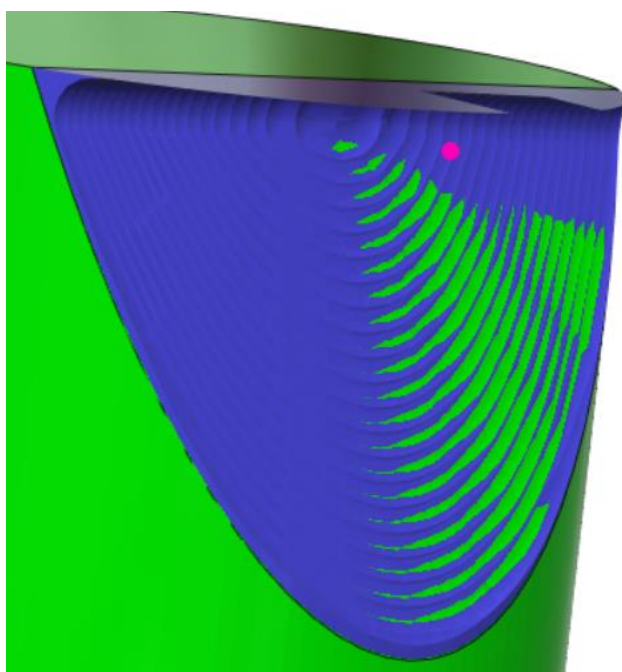
Příloha č. 4 Analýza povrchu



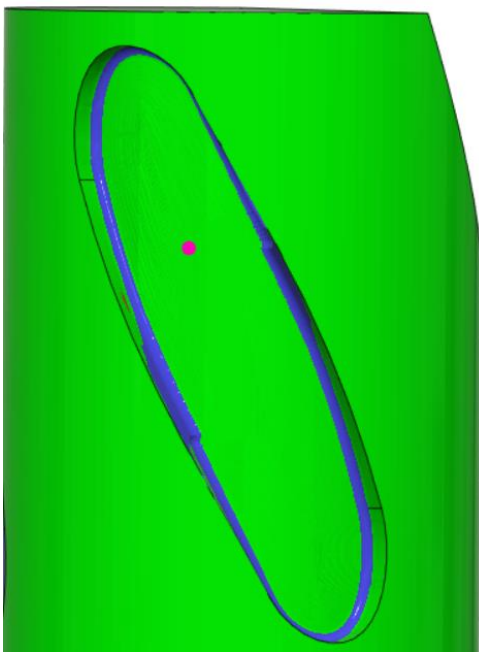
Obr. 74 Výsledky simulace 3+2D obrábění, nastavená tolerance 0,0005 mm



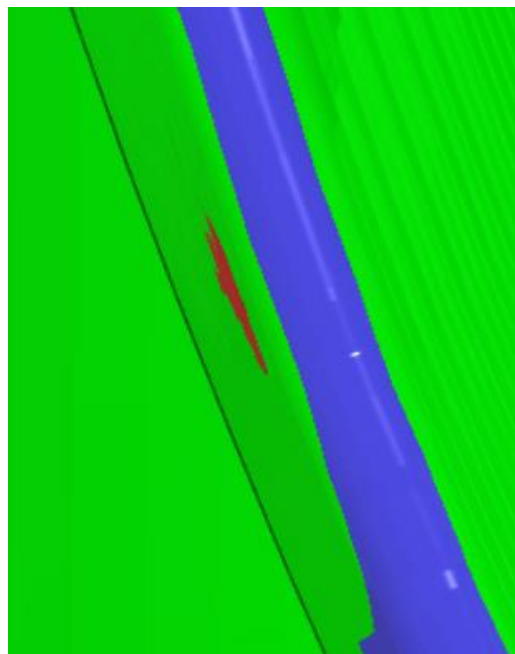
Obr. 75 Výsledky simulace 5D obrábění, nastavená tolerance 0,02 mm



Obr. 76 Výsledky simulace 4D obrábění, nastavená tolerance 0,04 mm



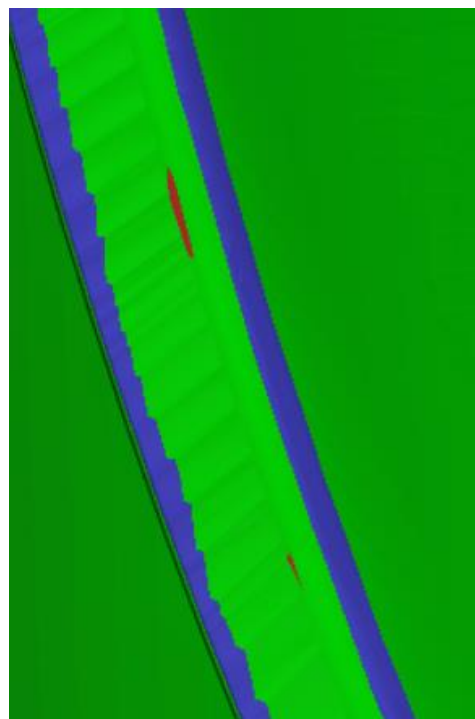
Obr. 77 Výsledky simulace 3+2D obrábění,
nastavená tolerance 0,08 mm



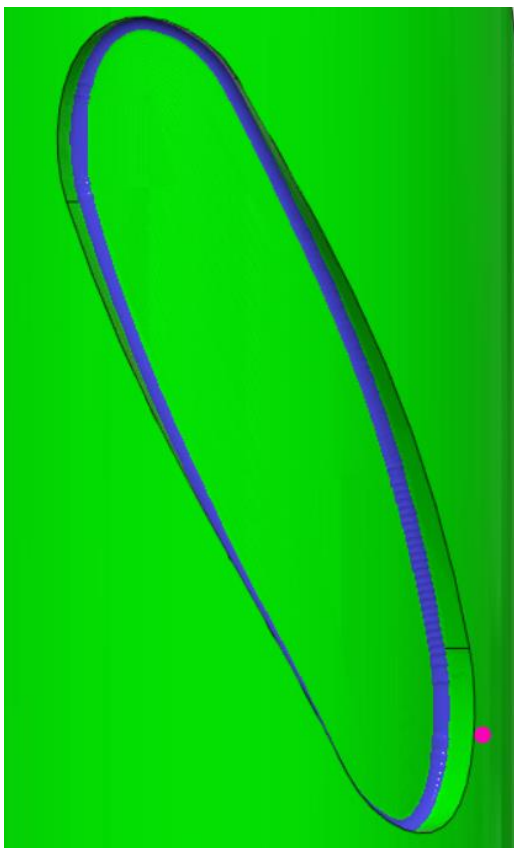
Obr. 78 Místo vzniku neopravitelné vady u 3+2D
operaci, nastavená tolerance 0,08 mm



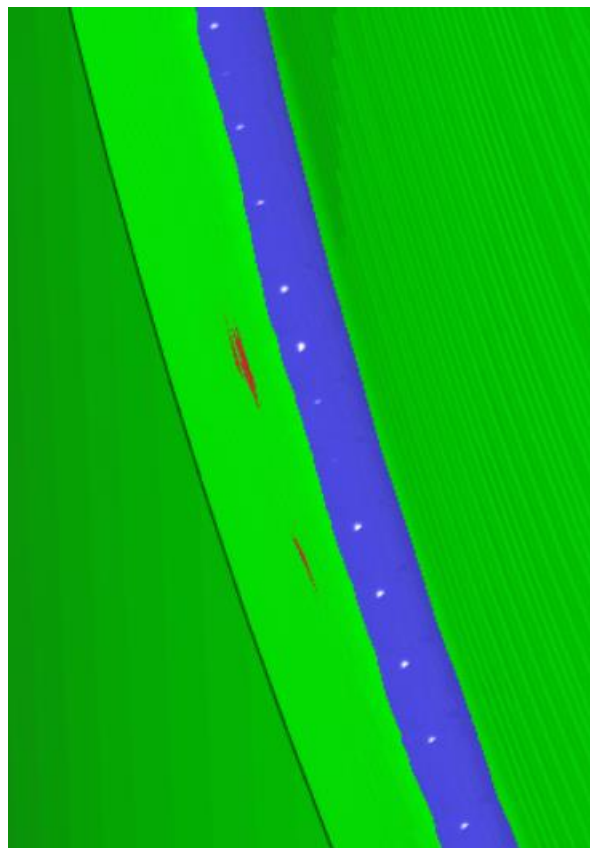
Obr. 79 Výsledky simulace 4D obrábění,
nastavená tolerance 0,2 mm



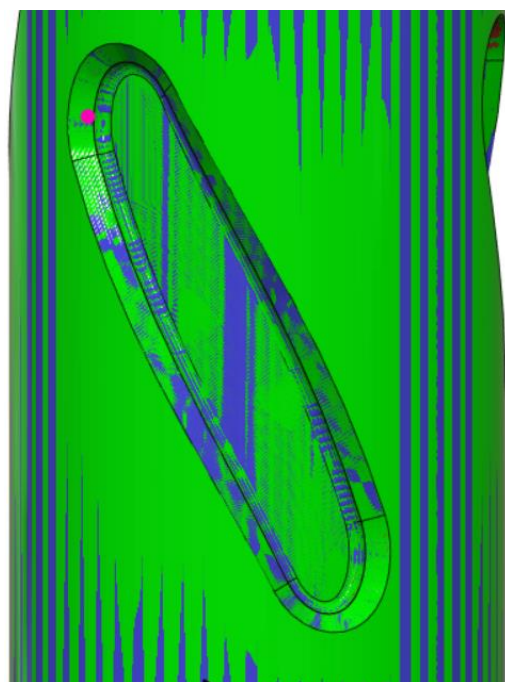
Obr. 80 Místo vzniku neopravitelné vady u 4D operaci,
nastavená tolerance 0,2 mm



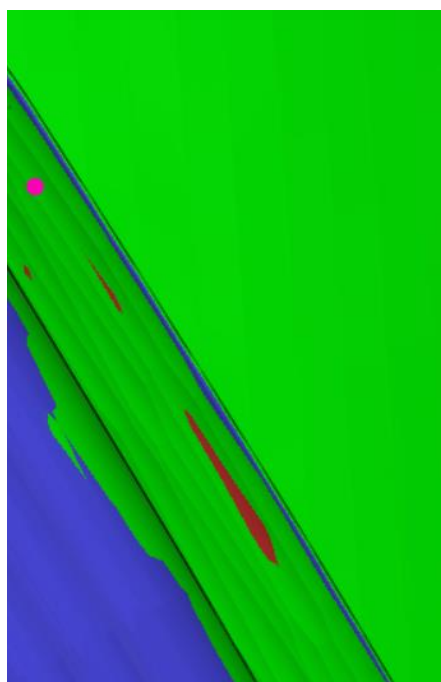
Obr. 81 Výsledky simulace 5D obrábění,
nastavená tolerance 0,08 mm



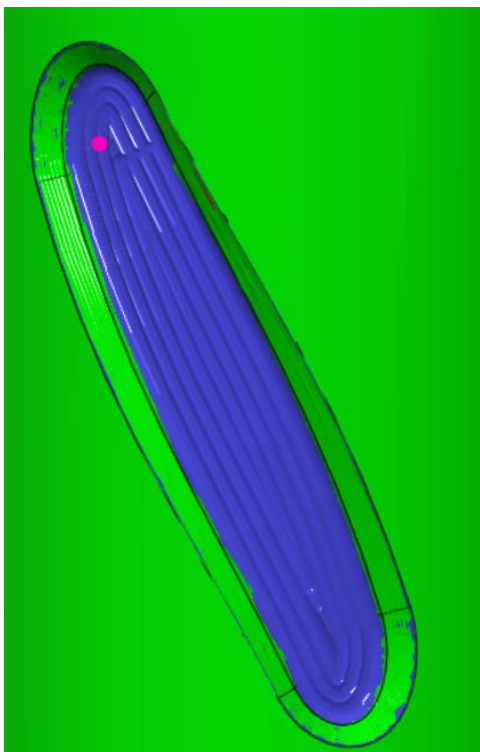
Obr. 82 Místo vzniku neopravitelné vady u 5D
operaci, nastavená tolerance 0,08 mm



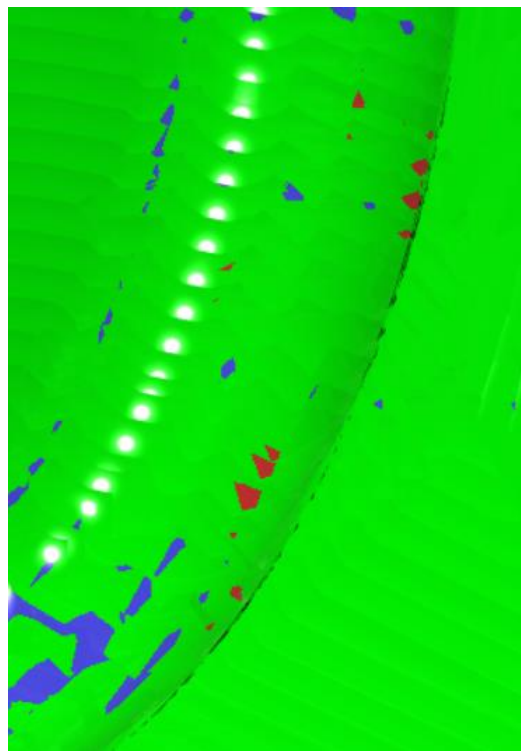
Obr. 83 Výsledky simulace 3+2D obrábění,
nastavená tolerance 0,025 mm



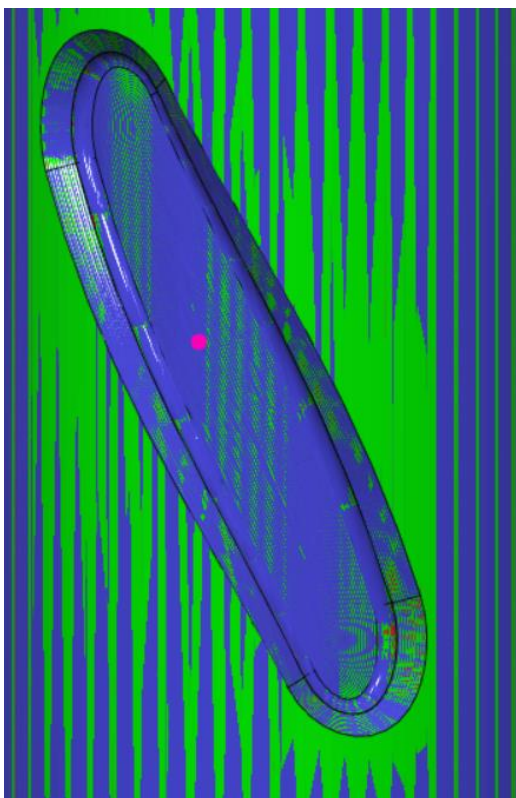
Obr. 84 Místo vzniku neopravitelné vady u 3+2D
operaci, nastavená tolerance 0,025 mm



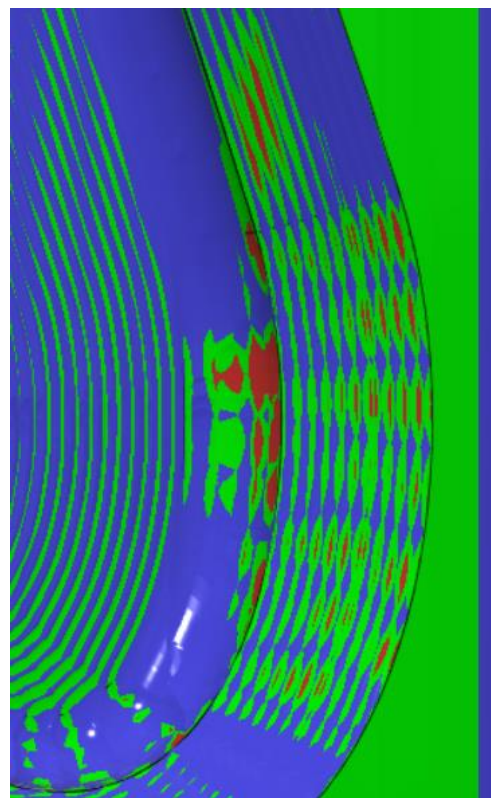
Obr. 85 Výsledky simulace 4D obrábění,
nastavená tolerance 0,08 mm



Obr. 86 Místo vzniku neopravitelné vady u 4D
operaci, nastavená tolerance 0,08 mm



Obr. 87 Výsledky simulace 5D obrábění,
nastavená tolerance 0,01 mm



Obr. 88 Místo vzniku neopravitelné vady u 5D
operaci, nastavená tolerance 0,01 mm