

# ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE



**Fakulta strojní**

**Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**

**Diplomová práce**

**Výroba zkušebního tělesa CMM stroje víceosým  
frézováním**

**Autor práce:** Bc. Martin Příbyl

**Vedoucí práce:** Ing. Jan Tomíček, Ph.D

**Praha 2019**

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, projekty, software atd.) uvedené v příloženém seznamu.

V Praze dne .....

Martin Příbyl .....

## **Anotační list**

**Jméno autora:** Bc. Martin Příbyl

**Název práce:** Výroba testovacího tělesa CMM stroje víceosým frézováním

**Anglický název:** Multiaxis machining of a CMM machine testing object

**Ústav:** Ústav technologie obrábění projektování a metrologie

**Vedoucí práce:** Ing. Jan Tomíček, Ph.D.

**Bibliografické údaje:** počet stran: 83

Počet obrázků: 41

Počet tabulek: 9

Počet příloh: 3

### **Klíčová slova:**

Víceosé obrábění, CAD/CAM, výrobní informace o produktu

### **Keywords:**

Multiaxis Machining, CAD/CAM, Product Manufacturing Information

### **Anotace:**

Tato práce pojednává o tvorbě výrobního postupu zkušebního tělesa pro souřadnicové měřicí stroje s využitím technologie víceosého obrábění. Dále je tu popis metodiky tvorby partprogramů v několika CAM softwarech určených k realizaci této výroby. Kromě toho je zde uvedena i charakteristika víceosého obrábění a použitých CAM softwarů.

### **Abstract:**

This diploma thesis discusses the creation of the production process of the specimen for coordinated measuring machines using the technology of multi-axis machining. Furthermore, there is a description of the methodology for creating partprograms in several CAM software created to realisation this production. In addition, the characteristics of multi-axis machining and used CAM software are also mentioned.

### **Bibliografická citace:**

PŘIBYL, M. *Výroba testovacího tělesa CMM stroje víceosým frézováním*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní, 2019. 83 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jan Tomíček, Ph.D.

## **Poděkování**

Na tomto místě bych chtěl poděkovat ing. Janu Tomíčkoví za odborné vedení mé práce, za čas a cenné poznámky během konzultací. Dále bych chtěl také poděkovat pracovníkům z Ústavu obrábění za mnoho užitečných rad.

## Obsah:

Obsah: .....	6
Úvod .....	9
1. Víceosé frézování .....	10
1.1. Typy obrábění dle počtu ovládaných os .....	11
1.1.1. 2D obrábění .....	11
1.1.2. 2,5D obrábění .....	11
1.1.3. 3D obrábění .....	11
1.1.4. 3+2D obrábění .....	12
1.1.5. 4D obrábění .....	12
1.1.6. 5D obrábění .....	13
1.2. Rozdělení CNC strojů .....	13
1.2.1. Obráběcí centra .....	14
1.2.2. CNC stroje na bázi soustruhu .....	14
1.2.3. CNC stroje na bázi frézky .....	16
1.3. CAD & CAM Software .....	17
1.4. Charakteristika použitých CAM softwarů .....	18
1.4.1. NX .....	18
1.4.2. PowerMill .....	19
1.4.3. Fusion 360 .....	20
1.5. Trendy a vývoj v třískovém obrábění .....	20
1.5.1. Pinch milling .....	20
1.5.2. Rádusové nástroje .....	21
1.5.3. Zvyšování produktivity v CAM .....	22
2. PMI data .....	25
2.1. Definice .....	25
2.2. Normy .....	25
2.3. Vývoj .....	26
3. Příprava zkušebního tělesa .....	27
3.1. Zadané těleso .....	27
3.1.1. Rozbor ploch .....	27

3.1.2.	Geometrické tolerance (PMI) .....	28
3.2.	Návrh úprav .....	29
3.2.1.	Uživatelské úpravy .....	29
3.2.2.	Technologické úpravy .....	31
3.2.3.	Konečná podoba tělesa .....	32
4.	Výroba zkušební tělesa .....	33
4.1.	Volba polotvaru .....	33
4.2.	Způsob obrábění .....	33
4.3.	Upnutí .....	36
4.3.1.	První varianta upnutí .....	37
4.3.2.	Druhá varianta upnutí .....	38
4.4.	Volba nástrojů .....	40
4.5.	Řezné podmínky .....	44
4.6.	1. varianta výrobního postupu .....	46
4.7.	2. varianta výrobního postupu .....	50
4.7.1.	3. varianta výrobního postupu .....	52
5.	Tvorba partprogramu pro výrobní postup .....	54
5.1.	Použitý CAM a CAD software .....	54
5.2.	Tvorby partprogramu v NX .....	55
5.2.1.	Souřadnicové systémy .....	55
5.2.2.	Tvorba nástrojů .....	56
5.2.3.	Obráběcí strategie .....	56
5.2.3.1.	Válcová část: .....	56
5.2.3.2.	Funkční část: .....	57
5.2.4.	Využití PMI dat pro obrábění .....	60
5.2.5.	Kontrola partprogramu .....	61
5.3.	Tvorba partprogramu v PowerMillu .....	62
5.3.1.	Pracovní roviny .....	62
5.3.2.	Hranice .....	62
5.3.3.	2D prvky .....	63
5.3.4.	Díry .....	64
5.3.5.	Obráběcí strategie .....	64

5.3.5.1.	Válcová část: .....	64
5.3.5.2.	Funkční část: .....	64
5.3.6.	Kontrola partprogramu .....	68
5.4.	Tvorba partprogramu Fusion 360 .....	68
5.4.1.	Úprava modelu .....	68
5.4.2.	Nastavení polotvaru .....	69
5.4.3.	Obráběcí strategie .....	69
5.4.3.1.	Válcová část: .....	69
5.4.4.	Kontrola partprogramu .....	70
6.	Dosažené výsledky a jejich diskuze .....	71
6.1.	Zhodnocení projektu .....	71
6.2.	Doporučení pro další úpravy a optimalizaci.....	71
6.2.1.	Úpravy modelu .....	71
6.2.2.	Úpravy nástrojů .....	73
6.2.3.	Úpravy partprogramu.....	74
7.	Závěr.....	75
	Seznam použité literatury:.....	76
8.	Seznam obrázků .....	78
9.	Seznam tabulek.....	79
	Seznam zkratk a symbolů.....	80
	Seznam příloh .....	80
	Přílohy:.....	81

## Úvod

Tato práce pojednává o tvorbě postupu výroby zkušebního tělesa pro souřadnicové měřicí stroje pomocí víceosého obrábění. Tvorba výrobního postupu byla zadána Ústavem technologie obrábění, projektování a metrologie při ČVUT v Praze, kde mělo být zkušební těleso využito.

V rámci této práce jsem nejprve na zadaném 3D modelu tělesa provedl úpravy požadované zadavatelem a úpravy podporující úspěšnou výrobu. Po té jsem vytvořil několik variant výrobních postupů, které odpovídaly reálným technologickým možnostem výroby na Ústavu obrábění a umožňovaly kompletní výrobu tělesa.

Tvorba výrobního postupu zahrnovala i tvorbu partprogramů pro realizaci výroby na CNC strojích. Vytvořil jsem několik partprogramů ve třech CAM softwarech pro 3 varianty výrobních postupů. I tyto partprogramy jsou plně způsobilé k výrobě zkušebního tělesa a také odpovídají technologickým možnostem výroby na Ústavu obrábění.

K výrobě tělesa nakonec nedošlo, ale v závěrečné diskuzi jsou kromě celkového zhodnocení uvedené i důvody odkladu výroby a možné způsoby, jak jí zlepšit a uspíšit její realizaci.

Při plánování výroby bylo stěžejní využití víceosého obrábění a práce s CAM softwary, takže jsem v této práci nejprve věnoval několik následujících kapitol těmto dvěma zásadním oblastem dnešní průmyslové výroby.



## 1. Víceosé frézování

Problematika víceosého frézování má počátek už ve vývoji konvenčního obrábění, kdy bylo třeba realizovat obrábění v několika rovinách nebo obrobit složitou tvarovou plochu. Tehdejší výrobní metody samozřejmě odpovídaly možnostem výrobních zařízení – výroba složité součásti se řešila speciálními upínacími přípravky, přesným polohováním a použitím tvarových nástrojů nebo kopírovacích prvků.

Přelom znamenalo zavedení číslicového řízení obráběcích strojů, které umožnilo polohovat nástroje ve dvou, posléze i třech osách, a později souvislé řízení lineárních a rotačních os těchto strojů. Díky vývoji řídicích systémů a softwarů pro tvorbu NC kódů pro řízení CNC strojů je dnes možné vytvořit rezné dráhy interpolací složitých tvarových ploch.

Dalším mezníkem ve vývoji obráběcího procesu, zvláště u technologie frézování, pak bylo rozšíření původního konceptu řízení pohybu podél tří lineárních os i o rotační pohyby kolem těchto os. Společně se zavedením automatické výměny nástrojů, která umožnila využít hned několika nástrojů na jednom stroji současně, pak bylo možné obrobit výrazně tvarově složitější součásti.

V posledním desetiletí se začaly projevovat i rozdíly mezi tříosým a víceosým obráběním při výrobě tvarově jednodušších dílů. Například strojně řízené natočení obráběného dílce vůči nástroji umožňuje snížit počet upnutí a obdobně lze dosáhnout mimo jiné i menší drsnosti povrchu, větší rozměrové přesnosti a snížení času obrábění, což má samozřejmě dopad i na ekonomickou stránku celé věci.

Vzhledem k tomu, že celá tato oblast třískového obrábění podléhá neustálému vývoji (jak z hlediska řízení - CAM softwaru a postprocessingu, tak z hlediska konstrukce strojů a nástrojů), je obtížné udržet si přehled o všech možnostech této technologie. To je další důvod, proč jsou následující kapitoly věnované víceosému obrábění. [6]

## 1.1. Typy obrábění dle počtu ovládaných os

### 1.1.1. 1D obrábění

Tento způsob řízení je nejstarší a využíval se ještě před zavedením NC techniky a občas je nazýván jako stavění souřadnic. Jde o to, že souřadnice na dvou osách (X a Y) se nastaví ručně a pak obvykle následuje vrtání v ose Z.

### 1.1.2. 2D obrábění

Nástroj s tímto typem řízení se pohybuje rovnoběžně se souřadnými osami podle instrukcí a s definovaným posuvem (u frézky se jedná o osy X, Y a u soustruhu o osy X a Z). Nástroj je tak schopný obrábět pouze 2D – nájezd nástrojem do hloubky třísky na ose Z není automatizovaný.

Tento způsob řízení lze ještě rozdělit na řízení pravouhlé, kdy se nástroj pohybuje pouze lineárně (rovnoběžně s osami), a na řízení souvislé, kde už stroj ovládá lineární a kruhovou interpolaci, a je tedy možné vytvořit korigováním pohybů po osách konkrétní tvar.

### 1.1.3. 2,5D obrábění

Jak už název napovídá, tvoří tento způsob obrábění přechod mezi 2D a 3D obráběním. V tomto případě může stroj také provádět lineární interpolace, ale pouze v rovinách XY, YZ nebo XZ. Nástroj tak může například provést nájezd do materiálu v rovině XZ a pak obrábět v rovině XY.

### 1.1.4. 3D obrábění

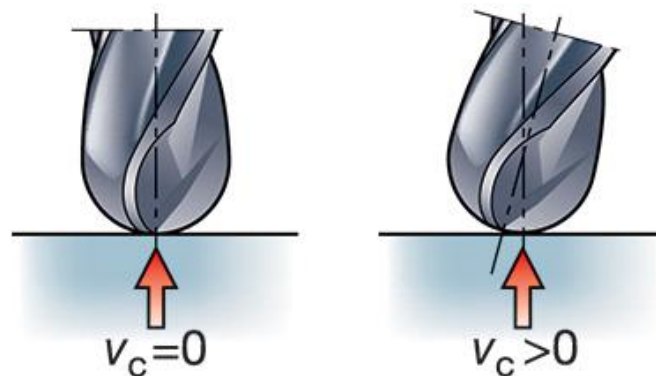
Tento způsob obrábění je dnes základ pro všechny používané frézky. Nástroj se může pohybovat až po třech osách najednou a je tedy možné obrábět obecné plochy, na kterých se mění všechny tři souřadnice. Kromě toho do této kategorie spadá i šroubová interpolace – nájezd nástroje po spirále používaný při frézování kulatých zahloubení a kapes.

### 1.1.5. 3+2D obrábění

Při tomto způsobu obrábění, který se také nazývá indexování, je nástroj vůči obrobku pevně natočen kolem jedné nebo dvou os (proto +2D), ale jinak celé obrábění probíhá úplně stejně jako 3D (natočení obrobku vůči nástroji a 3D obrábění probíhá odděleně). Tím se dá jednak zmenšit počet upnutí potřebných k obrobení součásti a také tím lze dosáhnout kvalitnějšího povrchu.

Když je například na součásti rovinná plocha, která je vůči souřadnicovému systému stroje nakloněná, tak lze tímto způsobem tuto rovinu srovnat kolmo na osu Z a pak ji lze obrobit jednoduše válcovou frézou místo frézy kulové nebo tvarové, které mívají mnohem menší kontaktní plochu s obrobkem.

Další možnost, jak lze tímto způsobem obrábění dosáhnout kvalitnějšího povrchu, se týká obrábění obecných tvarových ploch kulovou frézou. Pokud se totiž kulová fréza dostane na místo, kde je obráběná plocha kolmá na osu nástroje, tak v ten moment fréza na špičce obrábí téměř nulovou řeznou rychlostí, což je se pak negativně odrazí na kvalitě povrchu. Řeší se to tak, že se osa kulové frézy vychýlí o pevně stanovený úhel (obvykle  $15^\circ$ ), který zůstává celou dobu frézování stejný a který tak zajistí, že obrábění probíhá na dostatečném průměru a tedy i s dostatečnou řeznou rychlostí.



Obrázek 1: Řezná rychlost v závislosti na naklopení frézy [14]

### 1.1.6. 4D obrábění

Toto je speciální způsob obrábění používaný pro frézování rotačně symetrických součástí, který se týká spíše tvorby obráběcích strategií v partprogramu, protože většina frézovacích center umožňuje obrábění 5D.

### 1.1.7. 5D obrábění

5D obrábění nastává, když je možné, kromě běžného pohybu po třech osách, zároveň natočit nástroj vůči obrobku i ve dvou rotačních osách. Tento způsob obrábění je typický pro výrobu složitých tvarových součástí – například lopatek turbín, nebo k vytvoření součástí s požadavkem na kvalitní povrch tvarové plochy – formy pro lisování plastů, zápustky, kokily apod.

Jak už jsem uvedl u obrábění 3+2D, tak i pětiosé obrábění zlepšuje řezné podmínky při výrobě tvarových ploch naklopením osy nástroje. V tomto případě se ale naklopení osy nástroje může měnit, takže například zahloubení s šikmými stěnami je možné takto celé obrobit pouze bokem válcové frézy. [1]

## 1.2. Rozdělení CNC strojů

Výše jmenované druhy obrábění jsou zcela dány možnostmi (konstrukcí, řízením nebo funkcemi) obráběcích strojů. CNC obráběcí stroje lze rozdělit podle následujících kritérií:

- Počet technologických operací
  - Jednoprofesionní stroje, obráběcí centra, víceúčelová obráběcí centra
- Druh operace
  - Vrtací, vyvrtávací, soustružnické, frézovací, brousící, tvorba ozubení
- Hlavní pohyb obrobku
  - Rotační, pravoúhlý
- Hlavní pohyb nástroje
  - Rotační, pravoúhlý, kombinovaný
- Kinematika
  - Sériová, paralelní, smíšená
- Technologie odebrání třísek
  - Vysokorychlostní – HSC, vysokovýkonné – HPC, suché, obvyklé

Kromě tohoto rozdělení se lze samozřejmě setkat i s kombinacemi výše uvedených parametrů, například jednoprofesionní frézka se sériovou kinematikou upravená pro vysokorychlostní frézování. Dnes už jsou také velmi dostupná jednoduchá obráběcí centra, která vznikla z jednoprofesionních CNC strojů přidáním automatického výměníku nástrojů a obrobků. Tyto stroje jsou pak schopné několika druhů operací, i když původní obráběcí operace obvykle převažuje (frézování, soustružení), a díky tomu postupně vytlačují jednoprofesionní CNC stroje z výroby. [2]

### 1.2.1. Obráběcí centra

Rozdíly mezi běžnými obráběcími CNC stroji a CNC obráběcími centry se vlivem vývoje snižují. Jak už bylo řečeno, tak dnes už téměř bývá pravidlem, že i malé CNC stroje umožňují výměnu nástrojů a dostupná bývá i výměna obrobků, i když ta je obvykle podmíněna instalací podávacího zařízení, které nemusí být součástí základního modelu stroje (CNC stroj tak může pracovat zcela samostatně nebo může být začleněn do výrobní linky – podle přání uživatele). Každopádně než se CNC obráběcí stroj dá nazývat obráběcím centrem, měl by splňovat následující podmínky:

- Použití více druhů třískového obrábění a sloučení těchto operací do jednoho celku
- Práce v automatickém cyklu včetně výměny nástrojů a obrobků
- Vybavení měřicími prvky a diagnostikou
- Možnost práce v bezobslužném provozu

Z výše uvedených podmínek vyplývá, že dnes se dá za obráběcí centra považovat většina moderních CNC strojů.

Na obráběcí centra pak vývojově navazují multiprofesní CNC stroje, které kromě třískového obrábění umožňují buď další způsob obrábění, nebo jinou technologii určenou ke zpracování obrobku – například aditivní technologie, laserové řezání, kalení apod. Konstrukce a funkce multiprofesních strojů značně závisí na potřebách uživatelů, každopádně stroj označený jako multiprofesní obráběcí centrum by měl mít stejné výše uvedené vlastnosti jako obráběcí centrum. Také by měl umožňovat naprosto plnohodnotné třískové obrábění jako původní jednoprofesní CNC stroje. [1][2]

### 1.2.2. CNC stroje na bázi soustruhu

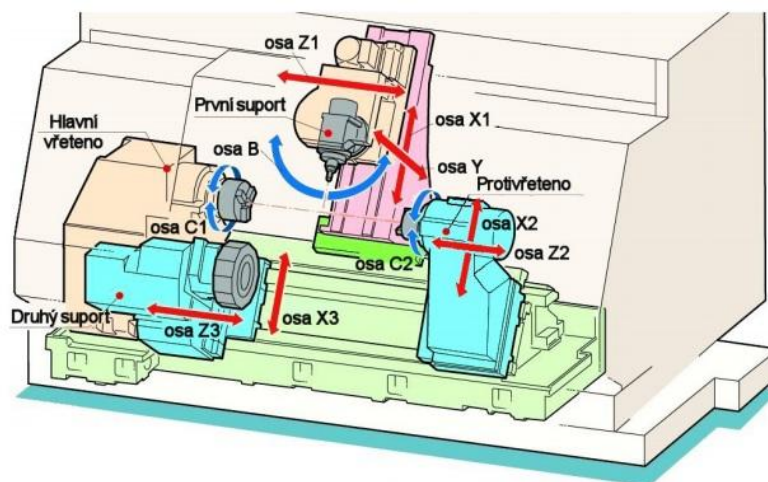
Stroje na bázi soustruhu, respektive soustruhy a soustružnická centra, jsou primárně určené k obrábění rotačních dílů. Pro způsob obrábění na tomto stroji je typický polotvar upnutý ve sklíčidle, rotující kolem osy Z (horizontální nebo vertikální), roztočený vřetenem stroje, a nástroj (soustružnický nůž) se pohybuje obvykle pouze v rovině XZ.

Postupně byl pohyb nástroje rozšířen přidáním osy Y a rotační osy B a C. Osa Y může být umístěna šikmo vůči základně stroje (u CNC strojů s šikmým ložem)

kvůli lepšímu odvodu třísky a větší přístupnosti pracovního prostoru pro obsluhu (osy X a Y ale obvykle zůstávají kolmé). Přidáním revolverové hlavy s poháněnými nástroji je pak možné na stroji také vrtat, vyvrtávat a frézovat a to i mimo hlavní osu obrobku. Osa rotace poháněného nástroje může být stále kolmá nebo vodorovná k ose Z, nebo se může natáčet kolem osy B – záleží na konstrukci poháněného nástroje. Pokud je nástroj na daném stroji schopen souvisle obrábět na osách X, Y, Z, B a C, tak je v tom případě stroj schopný 5D obrábění.

Na víceosém obrábění se kromě pohybu nástroje podílí i rotace obrobku kolem osy Z. Kromě rychlého otáčení potřebného pro soustružení je dneska běžné zasatvavení rotace zablokováním vřetena soustruhu v konkrétním úhlu natočení pro frézování a vrtání (obrábění 3D nebo 3+2D), nebo pomalé otáčení obrobku v součinnosti s pohybem poháněného nástroje (obrábění 4D, 5D).

Vylepšování konstrukce soustružnických center posléze vedlo k přidání další nástrojové hlavy a druhého vřetena, které bývá na stroji umístěné místo koníku. Druhá revolverová hlava umožňuje obrábět dvěma nástroji najednou – to umožňuje například překrytí dvou obráběcích operací, které by jinak musely být provedené postupně (např. soustružení kontury a vrtání v ose Z), nebo umožňuje součinnost dvou nástrojů – jeden nástroj hrubuje a druhý těsně za ním dokončuje konturu.



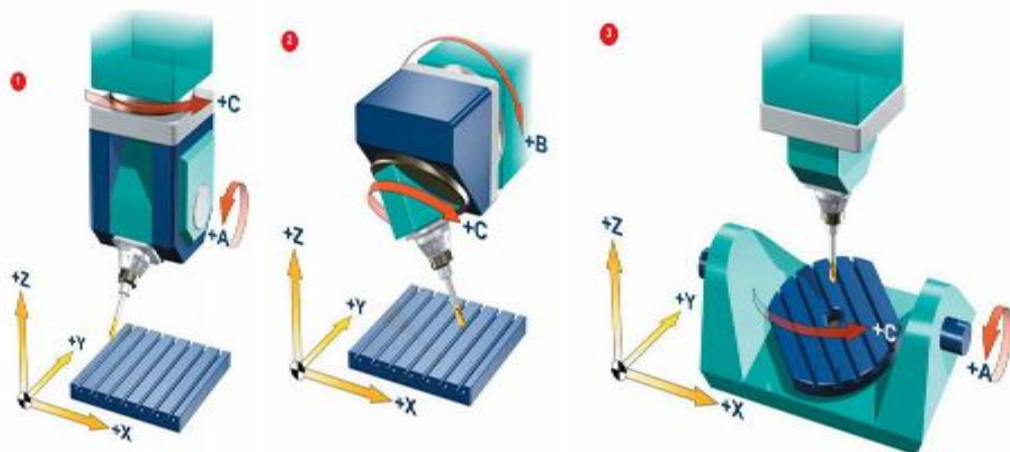
Obrázek 2: Schéma CNC soustružnického centra se dvěma vřeteny a dvěma nástrojovými hlavami [23]

Dvě vřetena, která si mezi sebou umí obrobek předat, zase umožňují kompletní obrobení součásti na jediném upnutí. Tyto možnosti pak celkově vedou ke snížení strojního času, ale zase jsou mnohem složitější na naprogramování, protože i když se jedná o 5D obrábění, tak řízených os může být víc. [1][2][5]

### 1.2.3. CNC stroje na bázi frézky

Stroje na bázi frézky, respektive frézky a frézovací centra, jsou obráběcí stroje určené k obrobení obecných, obvykle nerotačních dílů (používá se i výraz skříňové obrobky).

Původní frézování podél 3 základních os X, Y, Z, s osou Z umístěnou v rotační ose nástroje, bylo kvůli stále složitějším tvarům obrobků postupně rozšířeno o řízenou rotaci kolem os A, B a C (ale obvyklé jsou u CNC frézovacích center pouze dvě rotační osy, protože k natočení obrobku nebo nástroje do všech stran to obvykle stačí). Toto natáčení nástroje vůči obrobku se pak realizuje pomocí jednoho ze dvou způsobů – naklopením nástroje nebo naklopením obrobku, ale možná je i jejich kombinace.



**Obrázek 3: Možné způsoby konstrukce pětiosých CNC frézek - naklápění vřetena (vlevo) a naklápění stolu - tzv. kolébka (vpravo) [25]**

Naklápění obrobku je obvyklé u středně velkých frézovacích center s kolébkovou konstrukcí a otočným stolem. Pohyb nástroje, respektive řízené natáčení nástrojové hlavy, se zase objevuje u velkých stolových nebo portálových frézovacích center, kde by bylo otáčení velkých obrobků příliš obtížné. Kromě automatické výměny nástrojů mohou mít některé CNC frézky možnost i automatické výměny frézovacích hlav, které zase mohou mít různé způsoby natočení. Tímto způsobem může počet řízených os ještě stoupnout. [1][2][5]

### 1.3. CAD & CAM Software

CAD neboli computer aided design – počítačová podpora konstruování a CAM neboli computer aided manufacturing – počítačová podpora výroby patří do skupiny softwarů CAx – počítačem podporovaných technologií.

Dříve tyto dva druhy softwarů pracovaly samostatně – nejprve se v CAD vytvořil 3D model, který se následně importoval do CAM, kde byly následně vygenerovány dráhy pro jeho obrobení. Tato metoda měla hlavní nevýhodu v tom, že při každé změně 3D modelu, bylo třeba znovu importovat model mezi softwary, což je zdlouhavé a navíc hrozí určité riziko, že při přenosu dojde k poškození nebo špatnému načtení modelu.

Je to dáno tím, že výrobci konstrukčních CAD systémů nepracují na unifikovaném společném jádru, takže k přenosu dat, respektive 3D modelů, je využíváno značné množství formátů. Pro přenos dat mezi CAD systémy existují v podstatě 3 způsoby. Jsou to přímý export/import, přenos pomocí formátů výměny dat a využití externích překladačů a to samé platí pro přenosy dat z CAD do CAM systému.

Některé CAD a CAM systémy mohou využívat přímý export a import pouhým otvíráním a ukládáním souborů, ale to je možné jen u systémů vytvořených na stejném konstrukčním jádru (například přenos mezi softwary od společnosti Autodesk).

Problémy se sdílením a výměnou dat CAD a CAM systémů v různých formátech byly postupně řešené pomocí základních (používá se i označení neutrálních) formátů výměny dat. Do těchto formátů patří:

- DXF (Drawing Exchange Format)
- IGES (Initial Graphics Exchange Specification)
- STEP AP203 and AP214 (Standard for the Exchange of Product Model Data)
- SAT (ACIS/SAT)
- Parasolid XT
- VDA-FS (Verband der Automobilindustrie - Flächenschnittstelle)

Vývojem CAD a CAM systémů došlo později k jejich sloučení do takzvaných CAD/CAM softwarů. Tyto systémy umožňují konstrukci 3D modelu a následné vytvoření partprogramu v témž rozhraní bez nutnosti importování dat, což umožňuje plynulejší programování výroby.



Z hlediska tvorby partprogramů však CAD/CAM systémy zůstávají rovnocennou alternativou vůči samostatným CAM softwarům. Je to dáno tím, že jednoduchý CAM může být uživatelsky výhodnější než komplikovaný CAD/CAM s velkým množstvím modulů pro soustružení, víceosé obrábění, aditivní technologie apod. z hlediska ceny licencí i obtížnosti programování. [1][33]

## 1.4. Charakteristika použitých CAM softwarů

### 1.4.1. NX

NX je CAD/CAM/CAE software od společnosti Siemens PLM. Jde o modulární systém pracující pod jednou databází, která umožňuje jejich souběžné využití. Uživatel tohoto softwaru tak může na rozpracovaném 3D modelu provádět pevnostní analýzu nebo generovat řezné dráhy. Díky množství modulů tak NX poskytuje celou řadu funkcí:

- ▼ Manufacturing (CAM)
  - > Obecné informace Manufacturing
  - > Frézování
  - > Soustružení
  - > Hole Machining
  - > Drátořez (EDM)
  - > Obrábění na bázi prvků (FBM)
  - > Integrovaná simulace a ověření (ISV)
  - > Uživatelské operace a CLSF
  - > Správce synchronizace
  - > Post Processing Tool Paths
  - > Post Builder
  - > Post Configurator
  - > Robotic Machining
  - > Fixed Plane Additive Manufacturing

**Obrázek 5: Ukázka funkcí NX v oblasti CAM [12]**

- ▼ Design (CAD)
  - > Skicování
  - > Modelování
  - > NX Realize Shape
  - > Sestavy
  - > Digital Mockup (DMU)
  - > Animation Designer
  - > Tvorba vizuálních výpisů
  - > Tvorba výkresů
  - > Rozvržení
  - > Product and Manufacturing Information (PMI)
  - ▶ Opakované použití dat
  - > Piping and Instrumentation Diagramming (P&ID)
  - ▶ Routing Systems
  - > Ship Structure
  - > Plechové díly
  - > NX Analýza

**Obrázek 4: Ukázka funkcí NX v oblasti CAD [12]**

Software NX 12 v sobě zahrnuje tyto hlavní moduly:

- Modelování – tvorba a editace 3D modelů
- Sestavy – tvorba sestav
- PMI (Product and Manufacturing Information) – zápis PMI dat do 3D modelu
- Tvorba výkresů
- Manufacturing – tvorba partprogramů pro obrábění
- Design Simulation – analýza deformace a napětí v 3D modech [12][10]

### **1.4.2. PowerMill**

PowerMill je CAM software od společnosti Autodesk pro CNC programování obrábění tvarově složitých 3D modelů a také pro programování pětiosých frézovacích center, průmyslových robotů a frézovacích center se soustružnickými cykly.

PowerMill je dodáván ve třech různých edicích – standard, premium a ultimate, které se liší především počtem funkcí. Edice standard obsahuje spíše základní funkce (maximálně 3 + 2D obrábění) a edice ultimate už zahrnuje prakticky všechny dostupné.

PowerMill umožňuje importování jak neutrálních (dwg, dxf, iges, step, vda, stl), tak nativních formátů (Catia, Creo, NX, SLDPRT a další). Edice ultimate umožňuje i 3D plošné modelování.

Jinak je v PowerMillu možné programovat: 2.5D, 3D (včetně HSM), 4D, 3 + 2D frézování a soustružení na frézovacích centrech. Edice premium pak zahrnuje ještě 5D frézování, robotické frézování na CNC průmyslových robotech a edice ultimate měření sondou, frézování žeber, lopatek, radiálních a axiálních lopatkových kol, kanálků a dutin a aditivní výrobu.

Při verifikaci partprogramů je možné spustit kinematickou simulaci s virtuálním 3D modelem stroje, kontrolu kolizí nástroje, simulaci odebírání materiálu, vizualizaci kvality obrobeného povrchu a je možná i kontrola kolizí při simulaci s 3D modelem stroje. [31][32]

### 1.4.3. Fusion 360

Fusion 360 je cloudová 3D CAD, CAM a CAE platforma od společnosti Autodesk. V jedné aplikaci v sobě kombinuje prostředí pro vytváření průmyslových výrobků, strojírenské návrhy, simulace, obrábění a 3D tisk.

V CAD prostředí umožňuje tvorbu 3D modelů – parametrické i volnoplošné modelování a tvorbu modelů plechových dílů. Z pokročilejších funkcí umožňuje vytváření sestav jednotlivých dílů, výkresové dokumentace, tvorbu animací a fotorealistickou vizualizaci modelů. Obsahuje také knihovnu součástí.

V CAM prostředí je možné vytvářet řezné dráhy pro 2D, 3D, 3 + 2D a 5D frézování, pro soustružení a lze zde programovat i partprogramy pro 3D tisk nebo řezání laserem a vodním paprskem.

Pro tento software je také typické „verzování“ souborů - každé uložení souboru vytvoří jeho novou verzi, aby bylo možné vrátit se k původním záznamům.

Kromě standardní placené licence a bezplatné tříleté studentské licence je k dispozici i roční bezplatná licence pro kutily. Tato licence je poskytována s podmínkou, že Fusion 360 bude použit jen k nevýdělečné práci. [30]

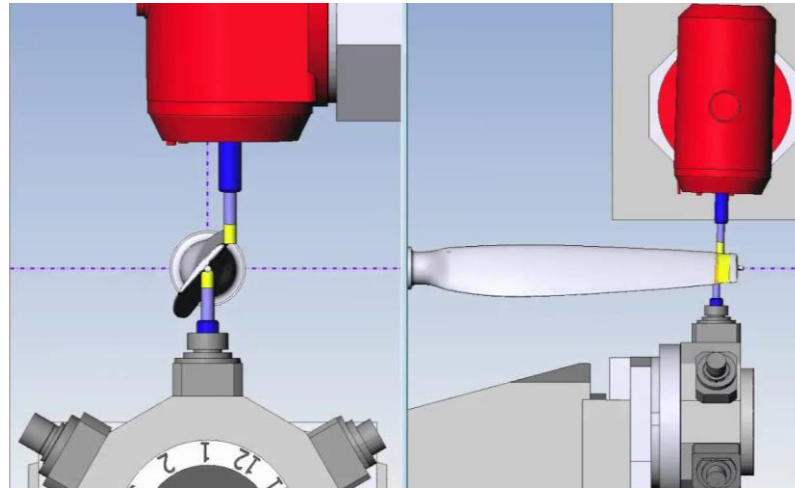
## 1.5. Trendy a vývoj v třískovém obrábění

### 1.5.1. Pinch milling

Při obrábění na soustružnickém centru se dvěma nástrojovými hlavami lze sdružit více soustružnických operací s různými dílčími časy, aby probíhaly současně – v překrytém čase. Při tomto sdružení je nutné implementovat do NC programu takzvaný čekací bod, který zajistí, že jedna nástrojová hlava počká na druhou, než dokončí probíhající operaci.

Neobvyklou možnost takového sdružení dvou technologických operací představuje technologie pinch milling, která spočívá ve sdružení dvou frézovacích operací – víceosé dokončování a víceosé polodokončování. Tato technologie je vhodná pro obrábění turbínových lopatek nebo podobných součástí (součásti s malou tuhostí a s velkými požadavky na přesnost s rotačním nebo spíše se zaobleným průřezem). Lopatku, která je upnuta v rotační ose horizontálního CNC stroje, tak lze frézovat horní i dolní hlavou najednou.

Klíčem k provedení pinch millingu je pak dokonalá synchronizace dvou nástrojů – jejich drah, pohybů a současného natáčení lopatky. Synchronizaci nástrojů pak lze provést buď na úrovni CAM systému, nebo na úrovni postprocesoru.



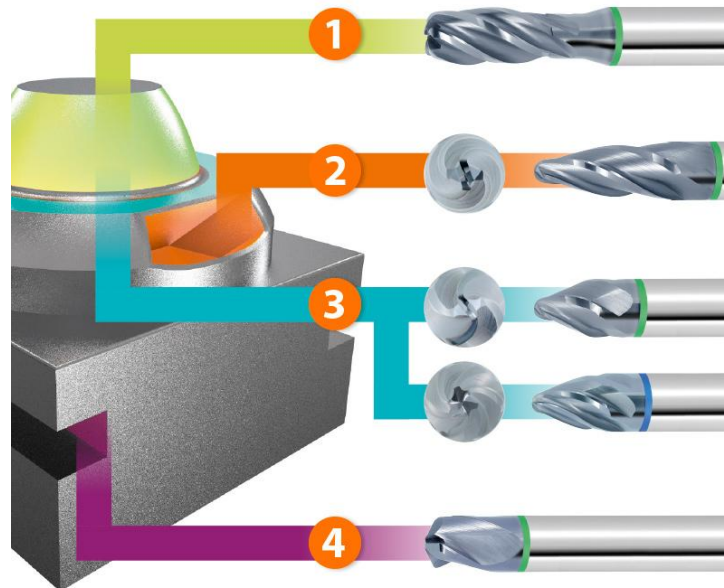
Obrázek 6: Pinch milling - ukázka technologie od společnosti ESPRIT [20]

Když jsou nástroje synchronizovány tak, aby se zároveň pohybovaly proti sobě, projevuje se to zvýšením stability celého obráběcího procesu. Vzájemné působení nástrojů vede ke zvýšení tuhosti lopatky a k potlačení vibrací, což se zase projevuje lepší jakostí povrchu, a díky časovému překrytí práce dvou operací (polodokončování a dokončování) také dochází k úspoře času. [7]

### 1.5.2. Rádiusové nástroje

Zvyšování produktivity třískového obrábění má mimo jiné i vliv na vývoj geometrie řezných nástrojů. Tento vývoj je patrný například u soudkových fréz. Soudkové frézy se od běžných válcových liší tím, že v jejich profilu je úsek rovné boční části nahrazen kruhovým segmentem. Tyto frézy tak nejsou určeny k obrábění čelem, ale bokem.

Při obrábění bokem soudkové frézy je možné, díky velkému poloměru jejího podélného zaoblení, zvýšit rozestupy mezi jednotlivými přejezdy bez vlivu na snížení kvality obrobenej plochy. Určitou nevýhodou těchto fréz představuje fakt, že se při obrábění musí naklonit k obráběné ploše. V některých případech může být konstrukce obrobku vhodná k tomu, aby jej bylo možné obrábět pouze 3D frézováním, ale častěji je třeba nástroj ještě natočit, takže je třeba použít stroj umožňující víceosé obrábění. [7]



**Obrázek 7: Druhy soudečkových fréz včetně vhodných aplikací – GARANT [34]**

1. Soudečková fréza PPC (PPC znamená Parabolic Performance Cutting), vhodná pro volně přístupné plochy, bez náhlých přechodů.
2. Soudečková fréza PPC kónického tvaru, vhodná pro plochy s nepravidelnými útvary a velké plochy.
3. Soudečková fréza PPC tangenciálního tvaru, vhodná na hluboké, špatně přístupné dutiny. Je také vhodná i pro základní obrábění.
4. Soudečková fréza GARANT PPC komolého kónického tvaru, vhodná pro dokončování spodních ploch. [34]

### 1.5.3. Zvyšování produktivity v CAM

Vývojových směrů v oblasti CAM systému je mnoho, ale obecně se dá říci, že se CAM snaží reagovat na nové možnosti CNC strojů a nástrojů tvorbou ovládacích prvků a také je zde kladen velký důraz na zvyšování produktivity, což se vyznačuje hlavně redukcí a optimalizací drah řezných a mimořezných pohybů.

Tak například rozvoj multifunkčních CNC strojů se v prostředí CAM projevuje přidáváním nových funkcí pro aditivní výrobu nebo pro realizaci sdružených operací.

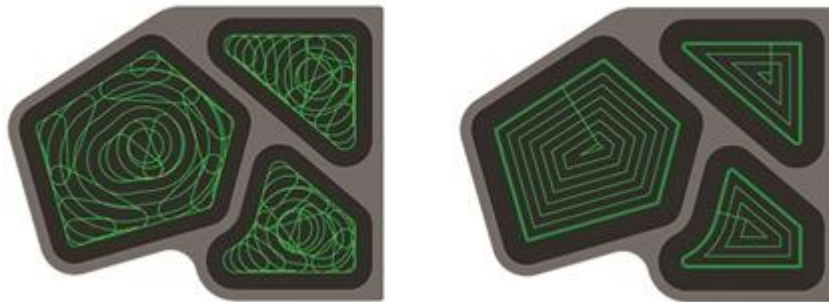
Zvyšování produktivity pomocí nastavení v CAM je patrné hlavně u hrubovacích operací. Při hrubování ocelí a těžkoobrobitelných materiálů je vhodné nastavit co největší hloubku řezu, aby se snížil počet odebíraných vrstev a nástroj se neopotřeboval tak rychle. Toto nastavení lze dobře aplikovat při obrábění

otevřených útvarů, ale problém nastává při obrábění kapes, kde je nástroj přetížen při náhlém lokálním vzrůstu úhlu opásání, ke kterému dochází při obrábění rohů.

Proto stále víc CAM systémů poskytuje hrubovací strategie, ve kterých jsou dráhy pro nástroj vygenerovány tak, aby byl úhel opásání konstantní. Díky tomu je možné zvýšit hloubku řezu na maximum, protože nástroj je díky stabilnímu úhlu opásání zatěžovaný stejnou měrou během celé obráběcí operace. Větší hloubka řezu tak zvyšuje produktivitu a nástroj vykazuje menší opotřebení.

Tyto technologické operace jsou v různých CAM systémech označovány obvykle jako adaptivní nebo dynamické dráhy nástroje – například TrueMill nebo iMachining. Je ale třeba rozlišovat mezi těmito strategiemi pro konstantní úhel opásání a trochoidním obráběním.

I při trochoidním řízení dochází k potlačení nadměrného přetížení nástroje v kritických místech, ale dráhy nejsou vypočítávány za účelem dodržení konstantního opásání nástroje, i když na první pohled mohou mít vygenerované dráhy podobný charakter. [7]

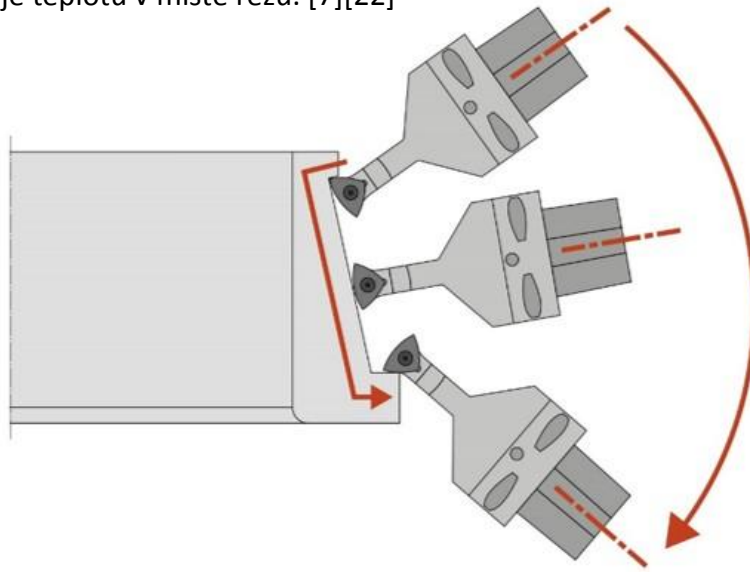


**Obrázek 8: Funkce pro udržení konstantního úhlu opásání (vlevo) a standardní hrubování (vpravo) – SurfCAM [7]**

Dalším příkladem nové produktivní funkce v CAM je rollfeed soustružení. Tento typ soustružení odvalováním umožňuje obrábět celým břitem speciálně tvarovaného nástroje. Pohyb odvalování je generován otáčením nástroje při současné kompenzaci posunutím na osách X a Z.

Tímto způsobem lze zredukovat počet nástrojů, čímž se sníží čas nutný k jejich výměně. Odvalování se také pozitivně projevuje na kvalitě povrchu obrobku a pohybem bodu dotyku po břitu nástroje dochází k určitému rozproštění

opotřebení po celém břitu, což vede ke zvýšení trvanlivosti. Pohyb bodu dotyku také snižuje teplotu v místě řezu. [7][22]



**Obrázek 9: Rollfeed - ukázka naklápění nástroje během soustružení – Vanadurit [22]**

Další důležitý článek na poli NC řízení jsou postprocesory, které transformují výstupy z CAM systému na NC programy určené pro konkrétní stroj a s daným řídicím systémem. Zvýšené nároky na funkčnost postprocesorů pak představují zejména u výše zmíněné multifunkční stroje, popřípadě velká obráběcí centra s mnoha řízenými osami, protože disponují velkým počtem funkcí, které je takto třeba transformovat do NC kódu. Pouze specializovaný postprocessor tak může pomoci k maximálnímu využití všech vlastností daného stroje, což se samozřejmě promítá do kvality výrobního procesu. Příkladem užitečnosti výkonného postprocesoru je výše uvedené sdružování technologických operací.

V postprocesorech také mohou být řešeny nadstandardní funkce vedoucí ke zvýšení produktivity, například funkce pro dodržení technologických, respektive řezných podmínek, při frézování s kulovými nástroji. Při obrábění nástroji s kruhovou řeznou hranou totiž dochází k tomu, že nástroj obrábí na různém průměru, jak se bod dotyku pohybuje po kruhové části řezné hrany, a tím se mění i řezná rychlost. Pomocí této funkce lze řídit otáčky nástroje tak, aby byla dodržena konstantní řezná rychlost, samozřejmě podle možností stroje. [7][9]

## 2. PMI data

PMI data se jako charakteristika objevují v následujících kapitolách o přípravě výroby a tvorbě partprogramu a proto budou nejprve charakterizovány zde.

### 2.1. Definice

PMI (product manufacturing information) neboli výrobní informace o produktu zahrnují geometrické kótování a tolerování (známé také pod zkratkou GD&T), 3D anotace, specifikace struktury povrchu, požadavky na povrchovou úpravu, procesní poznámky, specifikace materiálu, svařovací symboly a další informace umístěné přímo na 3D modelech.

V tomto použití má pak PMI dvojitý význam – prezentační a reprezentační. Při prezentaci jde o nahrazení klasické 2D výkresové dokumentace pomocí značek a symbolů umístěných na 3D modelu určených pro to, aby si je mohl prohlédnout člověk, který pracuje s modelem.

Reprezentační význam PMI spočívá v tom, aby došlo k přenosu výrobních informací z CAD softwaru do CAM a CMM prostředí. Cílem tohoto použití PMI dat je pak rozpoznání informací o výrobě výrobními a kontrolními softwary – informace o tolerancích apod. by se například projevíly při generování řezných drah v CAM, což by zjednodušilo programování výroby a kontroly. [17][19]

### 2.2. Normy

Podobně jako u výkresové dokumentace je i zobrazení PMI dat normované. Momentálně patří mezi nejcitovanější normy, které souvisejí s PMI daty, průmyslové standardy ASME Y14.5 a Y14.41, které zahrnují správný zápis písma a symbolů a správné zobrazení ve 2D a 3D. Dále bych zmínil ještě normy ISO-14739 a ISO-32000, které definují zobrazení PMI v PDF (včetně 3D PDF).

Hodnocení těchto zobrazení je oproti klasické výkresové dokumentaci komplikovanější tím, že v metodice tvorby PMI dat jsou v rámci rozdílných CAD softwarů určité rozdíly. Navíc 3D model poskytuje mnohem více možností k umístění značek a kót než 2D průmět. Množství a variabilita umístěných kót a značek tak často vedou k redukci jejich zobrazení, aby se okótovaný 3D model nestal nepřehledný. Zobrazení konkrétní kóty tak může být například vázané ke konkrétnímu pohledu (takzvaný dynamický pohled – PMI se zobrazují podle natočení modelu) nebo se PMI data zobrazují pomocí odkazů a záložek v knihovně



modelu. Dnes už je obvyklé, že většina CAD softwarů obsahuje několik nástrojů a různá nastavení pro zobrazení PMI dat.

Kromě normování symboliky PMI dat se tedy velká pozornost věnuje i výpovědní hodnotě jejich zobrazení. Srovnávají se například totožně 3D modely se stejnými PMI daty vytvořené v různých CAD softwarech (NX, Solid Works, Creo, atd.) exportované do jednotného formátu 3D PDF. [17][18][19]

### **2.3. Vývoj**

Jak již bylo řečeno v úvodu, tak použití PMI dat míří k přímému přenosu výrobních informací mezi konstrukcí a výrobou. V nejnovějších verzích CAD softwarů se tedy objevují nástroje k jejich tvorbě (např. Autodesk Inventor 2018) nebo ke zlepšení jejich zobrazení (Solid Works MBD).

S přenosem PMI dat mezi konstrukcí a výrobou pak souvisí i jejich import mezi jednotlivými softwary, což může být v některých případech stále ještě problematické. Mnoho CAD softwarů už tento přenos podporuje, ale při načítání se mohou projevit špatně nadefinované prvky, podobně jako u běžných 3D modelů. Problematické je také načtení těchto dat výrobními a kontrolními softwary, protože zatím nejde o všeobecně zavedený proces. Nejnovější verze CAM se sice podobně jako CAD snaží o zahrnutí nástrojů na zpracování PMI do svých funkcí a modulů (například zpracování PMI dat v NX 6). Stále dost CAM systémů však ještě neumí PMI rozpoznat, nebo je rozpoznají, ale zatím stále ještě neexistuje mnoho způsobů, jak je při programování využít. Zatím se k přenosu těchto dat používají převážně soubory s formátem STEP nebo JT.

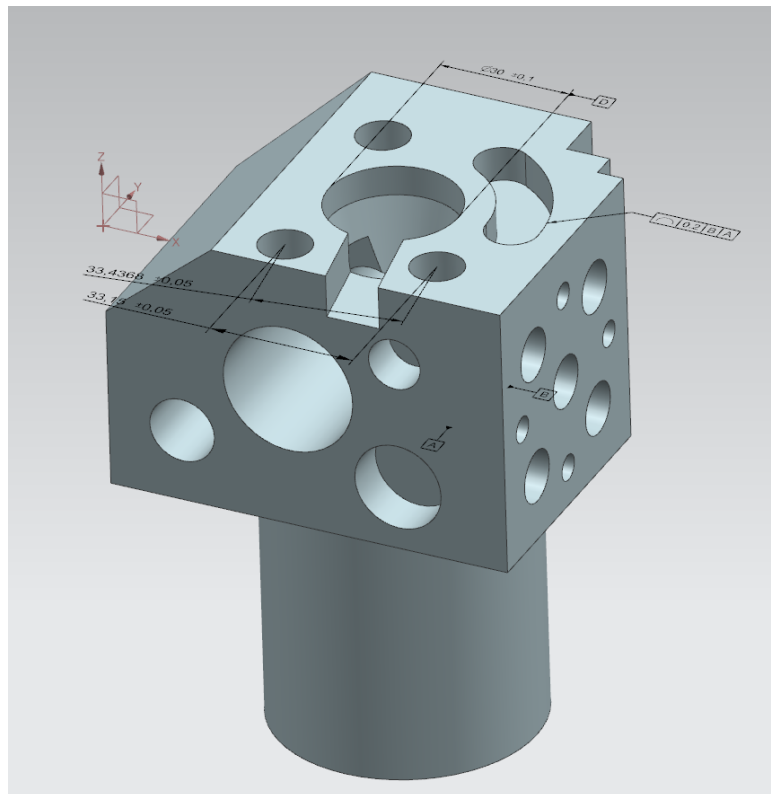
PMI zatím přejímají hlavně funkci klasické 2D výkresové dokumentace. Kromě toho se také využívají pro automatické vytvoření plánu měření v CMM systémech. Pokud jde ale o aktivní využití PMI v CAM, tak to bude patrně ještě několik let trvat. [12][13][19]

### 3. Příprava zkušebního tělesa

Jak už bylo řečeno, v této práci šlo o tvorbu výrobního postupu zkušebního tělesa, používaného společností Zeiss, pro souřadnicové měřicí stroje určené pro použití na Ústavu obrábění, projektování a metrologie na ČVUT v Praze.

#### 3.1. Zadané těleso

Jako předlohu pro tvorbu zkušebního tělesa jsem dostal k dispozici jeho aktuální model v několika obvyklých formátech modelovacích softwarů (NX a Solidworks). Tyto počítačové modely, včetně kompletní historie tvorby prvků, jsem následně použil místo výkresové dokumentace pro programování a tvorbu NC kódu.



Obrázek 10: CAD model zkušebního tělesa ZEISS

##### 3.1.1. Rozbor ploch

Z hlediska výroby, respektive volby obráběcích strategií, je podstatná tvarová složitost zadaného tělesa. Těleso lze rozdělit na dvě základní části – válec tvořící spodní část, a vrchní část.

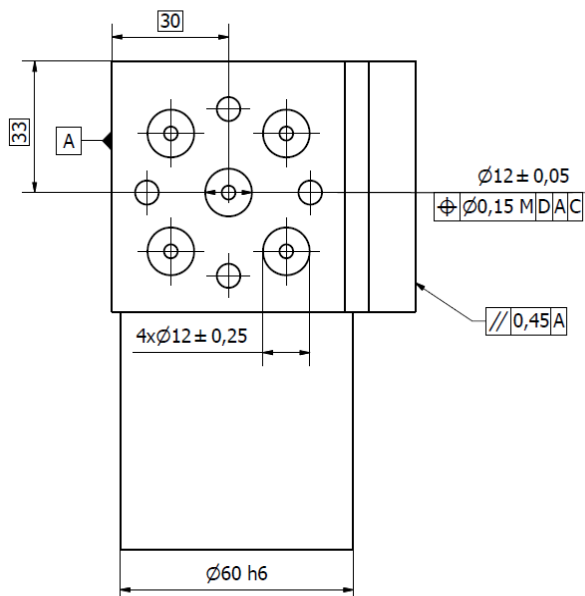
Vrchní část (nebo také funkční část, protože je na ní umístěna většina měřitelných prvků – PMI dat) se skládá z rovinných ploch, které obsahují zahloubení kruhového průřezu.

Při bližším pohledu se zde nevyskytují žádné tvarově složité plochy, pouze jedna kuželová plocha a přibližně dvě desítky válcových ploch, které tvoří již zmíněná zahloubení. Navíc většina těchto geometrických prvků je na sebe navzájem kolmá, což usnadňuje jejich lokalizaci a dosažitelnost.

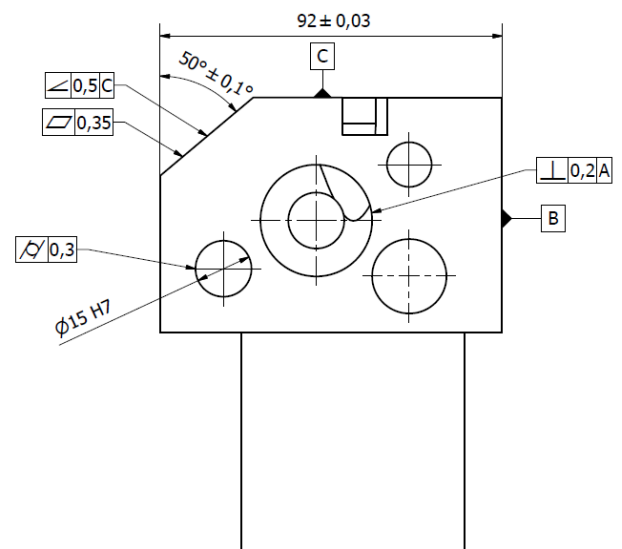
### 3.1.2. Geometrické tolerance (PMI)

Zadaný model obsahuje také PMI data. To znamená, že jsou u vybraných rozměrů a tvarů uvedené i jejich tolerance. Tyto tolerance tak označují rozměry a prvky určené ke změření. Pro ostatní rozměry nebyly stanoveny žádné další tolerance, takže k jejich hodnocení po změření hotového tělesa by se daly použít například tolerance dle normy ISO 2768 – mH. [4]

Následuje zobrazení a výčet PMI dat:



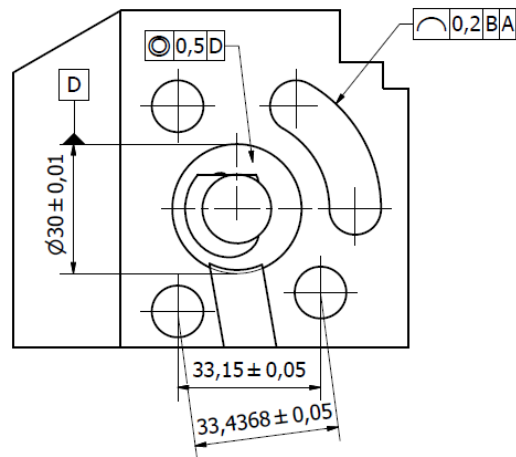
Obrázek 11: PMI data - pohled zprava



Obrázek 12: PMI data – pohled zepředu

- Základny – A, B, C, D
- Tolerance válcovitosti – rozsah 0,3mm
- Tolerance rovinnosti – rozsah 0,35mm
- Tolerance kolmosti – rozsah 0,2mm; vztaženo k A

- Tolerance sklonu – rozsah 0,5mm; vztaženo k C
- Tolerance rovnoběžnosti – rozsah 0,45mm; vztaženo k A
- Tolerance polohy – rozsah 0,15mm, vztaženo k D, A, C
- Tolerance úhlu
- Tolerance rozměrů
- Tolerance souososti – rozsah 0,5mm; kužel – vztaženo k D
- Tolerance křivky – rozsah 0,2mm; vztaženo k B, A



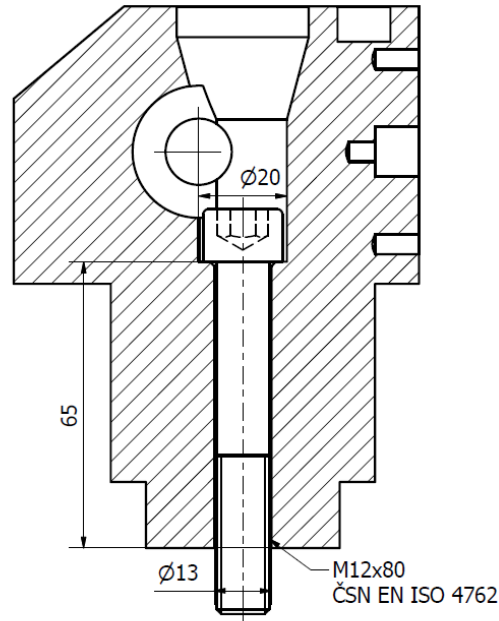
Obrázek 13: PMI data - pohled shora

## 3.2. Návrh úprav

Před zahájením výroby zkušebního tělesa, bylo nutné provést na modelu určité úpravy. Šlo o úpravy uživatelské – to byly úpravy požadované pracovníky z Ústavu obrábění a metrologie, a také úpravy technologické, které vedly ke zjednodušení výrobního postupu.

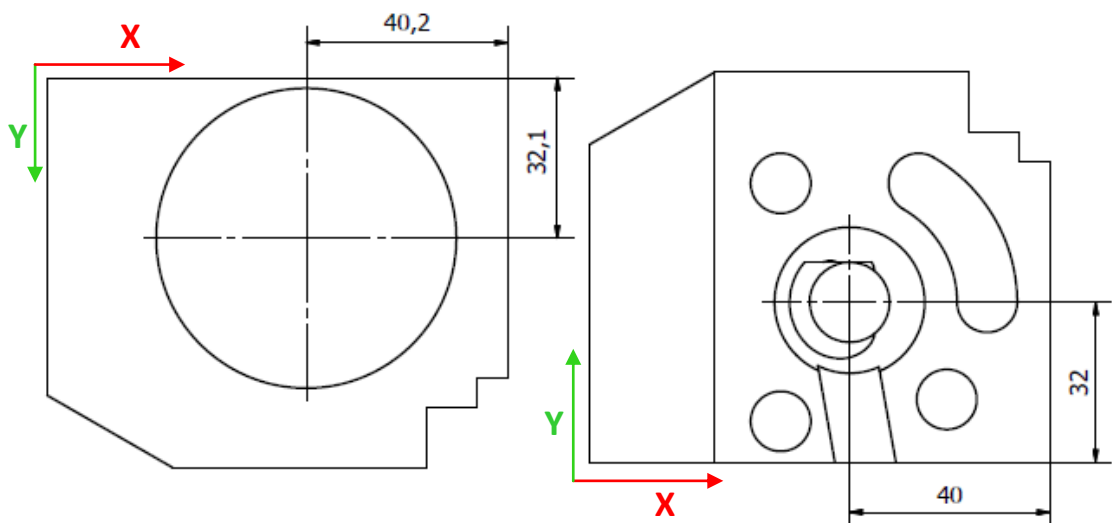
### 3.2.1. Uživatelské úpravy

Nejprve zde uvedu úpravy uživatelské, protože ty byly jasně stanovené od počátku. Šlo o návrh díry pro šroub s válcovou hlavou M12 (dle ČSN EN ISO 4762) pro připevnění tělesa na pracovní plochu souřadnicového měřicího stroje. Tato díra včetně zahloubení by měla procházet osou válce  $\varnothing 60\text{mm}$  skrz celé těleso a příliš nezasahovat do tolerovaných prvků. Zahloubení bylo navrženo dle normy ČSN EN ISO 1207. [4]



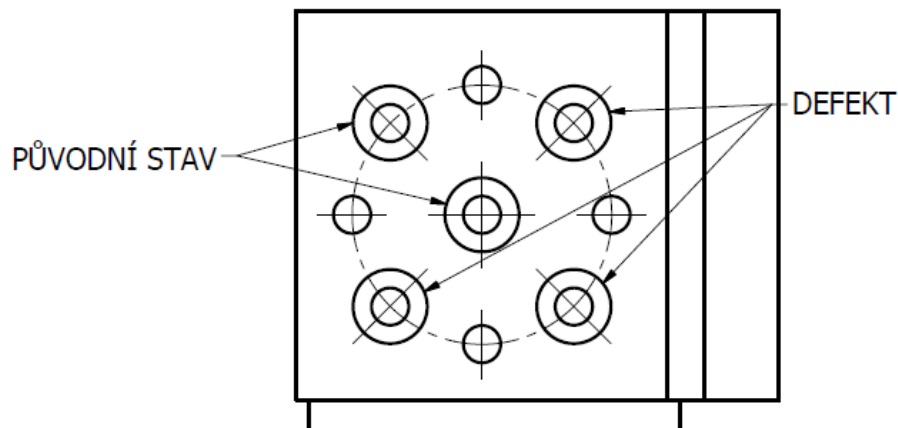
Obrázek 14: Zhloubení pro šroub

V původním modelu byly osa válce ( $\varnothing 60\text{mm}$ ) a osa horní svislé dutiny s kuželovou plochou vůči sobě mírně vychýlené. Byly sice rovnoběžné, ale osa válcové plochy byla posunutá o 0,2mm proti směru osy X a o 0,1mm ve směru osy Y. Proto jsem posunul válec o výše zmíněné rozměry tak, aby obě osy byly totožné. Tím se zajistilo to, aby šroub držel zkušební kostku přesně v ose válce. Posunutím válce vůči funkční části se také „zaokrouhlily“ vzdálenosti osy válce od hran přilehlých ploch na jednotky milimetrů, což usnadnilo výpočty rozměrů polotvarů.



Obrázek 15: Umístění osy válce (vlevo) a osy zhloubení (vpravo) vůči funkční části

Dále jsem dostal doporučení, aby některé z tolerovaných rozměrů byly vyrobené mimo rozsah zadaných tolerancí a sloužily na tělese jako ukázkový chybný rozměr. Pro tento účel mi přišlo vhodných 5 zahloubení, respektive tolerance jejich průměrů, umístěných na boku funkční části. Dvě bych ponechal v původním stavu a u ostatních tří by byl při výrobě vytvořen určitý defekt. Tato úprava však nevyžadovala přímou úpravu modelu tělesa a spočívala spíše v technologických podmínkách výroby, takže bude zmíněná až v dalších kapitolách.



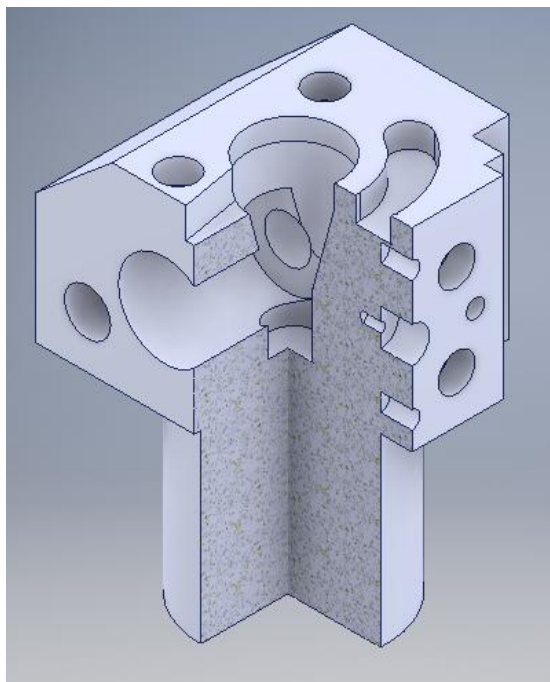
Obrázek 16: Výběr prvků určených k demonstraci chybně vyrobených tolerancí

### 3.2.2. Technologické úpravy

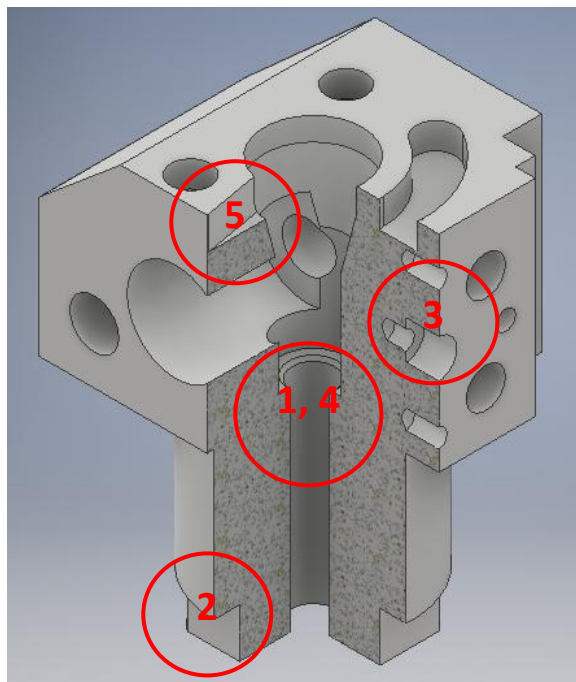
Jak již bylo řečeno, tak technologické úpravy usnadňují výrobu a řeší problémy s ní spojené. Těchto úprav jsem provedl hned několik, ale podrobněji jsou popsány až v následujících kapitolách – v patřičném kontextu. Jinak množství a charakter všech provedených technologických úprav je uvedeno v následujícím odstavci.

### 3.2.3. Konečná podoba tělesa

Takto vypadal model zkušebního tělesa po zhotovení finální verze výrobního postupu, včetně všech provedených úprav. Pro srovnání zde uvádím i původní model tělesa.



Obrázek 18: Původní model tělesa



Obrázek 17: Těleso po provedení všech úprav

Provedené úpravy:

- 1) Otvor pro připevnění - zahloubení pro šroub s válcovou hlavou M12 dle ČSN EN ISO 4762
- 2) Osazení pro upnutí
- 3) Změna průměru děr
- 4) Posunutí válce – zajištěná souosost válce a zahloubení pro šroub
- 5) Úprava geometrie drážky – větší návaznost na ostatní prvky modelu

## 4. Výroba zkušebního tělesa

Při tvorbě výrobního postupu zkušebního tělesa Zeiss jsem vždy nejprve zvažoval využití technologie pětiosého frézování, protože to byl hlavní záměr této práce. Teprve po té jsem navržený postup měnil tak, aby odpovídal dostupným zdrojům – to znamená strojům, nástrojům, řídicímu systému CNC strojů a CAM softwaru.

### 4.1. Volba polotvaru

Jako polotvar jsem zvolil kvádr z hliníkové slitiny s rozměry 100x85x130mm. Rozměry polotvaru vycházejí z tvaru hotové součásti rozšířené přídávky na obrábění 3 až 4mm a dalšími případnými technologickými přídávky.

Pro realizaci byl dostupný výběr z hliníkových polotvarů z ústavních zásob. Pokud by však bylo třeba hliníkový polotvar objednat (pokud by v dostupných zásobách nebyl nalezen polotvar s potřebnými rozměry), zvolil bych polotvar z automatové slitiny hliníku EN-AW 2011. [8]

### 4.2. Způsob obrábění

Jak jsem se dříve již několikrát zmínil v předchozích statích, tak pro výrobu tělesa bylo primárně zvažované pouze víceosé obrábění, navíc realizované na nově instalovaném frézovacím centru Okuma MU 400V II v hale na Ústavu obrábění. Pro úplnost zde ale uvedu i některé další dostupné stroje, včetně technických dat, protože pak budou ještě zmíněné v jednotlivých variantách výrobních postupů.

- CNC frézovací centrum Okuma MU 400V II

Toto frézovací centrum umožňuje kromě standardního 3D frézování také řízený rotační pohyb nástrojové palety kolem os A a C v rozsahu +20/-110° a 360° (rotace kolem osy C je prakticky neomezená, rychlost otáčení je max. 50 ot/min). Softwarová podpora stroje také umožňuje indexování.

**Tabulka 1: Okuma MU 400V II - technické údaje [26]**

Pracovní stůl	
Průměr upínací plochy:	400mm
Max. rozměry obrobku:	Ø600 x 400mm
Max. otáčky:	50 ot/min



Rozsah pojezdů os	
Osa X:	762 mm
Osa Y:	460 mm
Osa Z:	460 mm
Osa A:	+20 až -110°
Osa C:	360°(neomezen
Posuvy	
Rychloposuv:	40 m/min
Max. pracovní posuv:	32 m/min
Pracovní vřeteno	
Rozsah otáček:	15 tis. ot/min
Výkon motoru:	18, kW
Vzdálenost vřeteno-stůl:	100 až 560 mm
Počet nástrojových míst:	32

Jak je zřejmé z technických údajů, tak na tomto stroji by se zkušební těleso dalo bez problému obrobit. Zvolený polotvar je menší, než maximální možný, a rozsah úhlů os A a C je dostatečný pro dosažení všech tvarových prvků, takže funkční část tělesa by bylo možné obrobit s dostatečnou přesností na jedno upnutí. Problém by mohl nastat při frézování hlavní válcové plochy, která je zatížená poměrně malou tolerancí. Další problém bylo snížení počtu nástrojových míst z 32 na 6, ale tento problém je podrobněji rozepsán až kapitole o volbě nástrojů. [26]

- CNC Soustruh Okuma Genos L200E-M

Soustruh Okuma Genos L200E-M je soustruh s poháněnými nástroji, takže kromě soustružení dokáže provádět i jednoduché frézovací (vrtací apod.) operace.

**Tabulka 2: Okuma Genos L200E-M - technické údaje [27][28]**

Pracovní prostor	
Velikost sklíčidla:	8 "
Maximální obráběný $\varnothing$ :	200 mm
Max. obráběná délka	380 mm

Vřeteno	
Otáčky:	4500 ot/min
Zakončení vřetene:	JIS A2-6
Vrtání vřetene $\varnothing$ :	66 mm
Výkon:	11kW
Revolverová hlava	
Počet nástrojových míst:	12
Otáčky hnaného nástroje:	6000 ot/min
Pojezdy	
Osa X:	160 mm
Osa Z:	400 mm

Technologické možnosti soustruhu jsou při výrobě tělesa podobné jako u frézovacího centra a liší se hlavně v kvalitě povrchu určitých ploch. Při soustružení válcové části tělesa by se dalo mnohem lépe dosáhnout požadované přesnosti válcové plochy než při frézování. Znamenalo by to ale buď polotvar upravit tak, aby osa polotvaru a osa válce byly totožné, nebo by se válcová plocha s osou vychýlenou vůči ose rotace obrobku musela soustružit spohybem nástroje po ose X.

Při výrobě funkční části jsou rovněž všechny tvarové prvky dostupné použitím radiálních a axiálních poháněných nástrojů, respektive fréz a vrtáků. Navíc řízená rotace polotvaru kolem osy hlavního vřetena umožňuje indexování. Problém by ale představovaly plochy, které nejsou kolmé ani rovnoběžné s osou rotace hlavního vřetena. Řeč je o jedné ze šikmých ploch, která tvoří „sražení hrany“ dvou velkých rovin funkční části. Takto by se pravděpodobně musela frézovat kulovou frézou jako obecná rovina, což by vedlo k nedostatečně kvalitnímu povrchu.

Soustruh také disponuje určitou kapacitou nástrojů, která se může zdát dostačující, ale je třeba brát v úvahu, že téměř polovina z 12 nástrojových míst by musela obsahovat poháněné nástroje. Navíc, vzhledem k tomu, že několik prvků, hlavně na funkční části, se vyskytuje jak radiálně, tak axiálně (soustruh neumožňuje natáčení nástrojové hlavy mezi radiální a axiální polohou), tak by se tato kapacita mohla nakonec ukázat jako nedostačující. [27][28]

- CNC frézka VNC 500

Frézka VNC 500 patří mezi klasické 3D frézky pro běžné frézovací operace.

**Tabulka 3: Frézka VNC 500 - technické údaje [28]**

Rozsah pojezdů os	
Osa X:	500 mm
Osa Y:	500 mm
Osa Z:	500 mm
Pracovní vřeteno	
Rozsah otáček:	6 000 ot/min
Výkon motoru:	3,7 kW
Počet nástrojových míst:	21

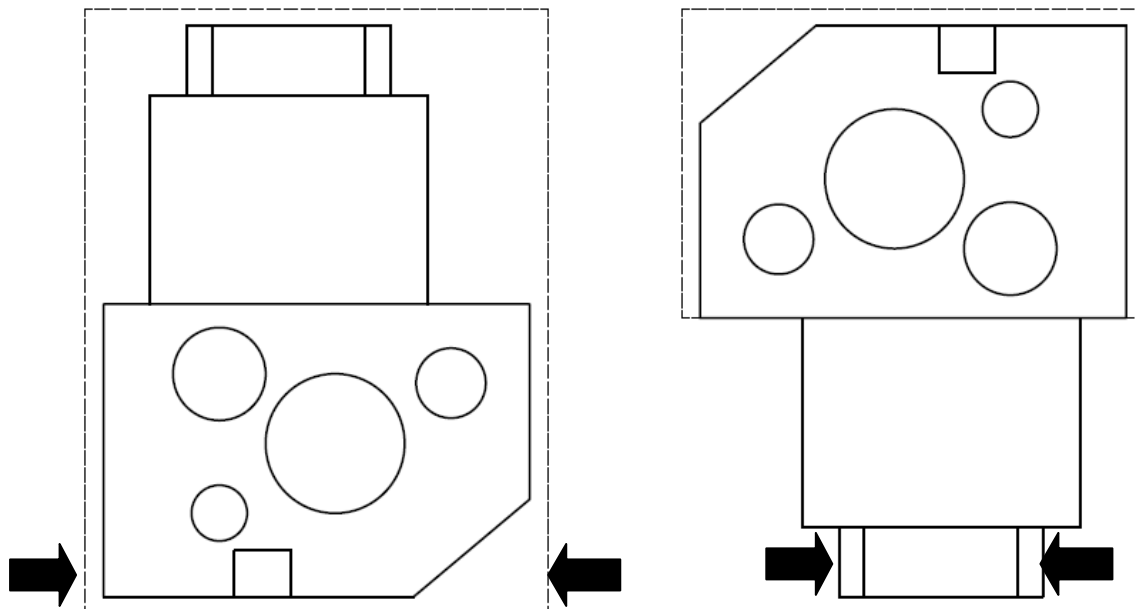
Z hlediska kapacity (rozsahu jednotlivých os, otáček a nástrojových míst) je tato frézka pro výrobu tělesa dostačující, jenže pro ni představuje problém dosažitelnost jednotlivých geometrických prvků a s tím související celková přesnost. Jde o to, že by při výrobě muselo dojít k minimálně pěti upnutím, aby se polotvar mohl obrobit ze všech stran. Tím by došlo nejen k rozměrovým a geometrickým nepřesnostem, ale v konečných fázích výroby by se pravděpodobně poškodily obrobene plochy. Navíc, při výrobě šikmých ploch na hranách funkční části by se buď muselo přikročit k více upnutím s obtížným polohováním, nebo by se musela použít strategie k obrábění obecných tvarových ploch (stejně jako u výroby na CNC soustruhu), což by zase vedlo k nedostatečně kvalitnímu povrchu. [28]

### 4.3. Upnutí

Způsob upnutí závisí na tvaru zvoleného polotvaru a způsobu obrábění. Vzhledem k tomu, že by pro obrobene funkční část bylo patrně nejlepší řešení použít 3+2D frézování (indexování), jak z hlediska tvarové a rozměrové přesnosti, tak z hlediska kvality povrchu. Proto jsem navrhl všechny varianty způsobu upnutí tak, aby bylo možné vytvořit funkční část na jediné upnutí tímto způsobem.

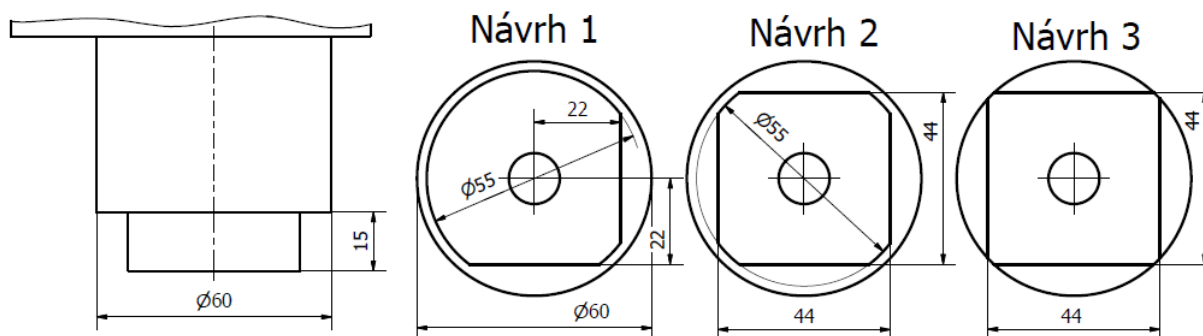
### 4.3.1. První varianta upnutí

Při uvažování výroby tělesa pouze pětiosým frézováním se nabízelo vyrobít celé těleso pouze na dvě upnutí. Nejprve by se obrobila – ofrézovala válcová část (včetně díry pro připevnění tělesa), za kterou by se polotvar následně upnul, a potom by se obrobila celá funkční část.



Obrázek 19: Upnutí polotvaru a následné upnutí za osazení

Kvůli tomuto způsobu upnutí jsem na součásti navrhl technologickou úpravu – osazení na konci válcové části (v několika variantách) za kterou by se polotvar připevnil do sklíčidel (aby zůstal zbytek válcové plochy celistvý a nepoškozený) a který by také, díky čtvercovému průřezu, pomohl součást ve sklíčidlech vyrovnat. Z následujících variant jsem nakonec vybral variantu číslo 2, protože byla uživatelsky nejpriznivější při vytváření partprogramu.



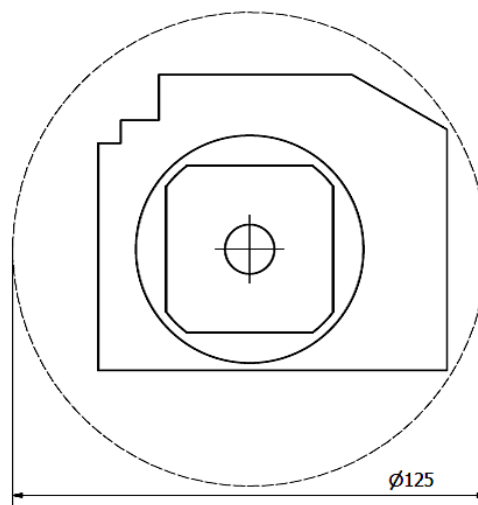
Obrázek 20: Návrhy průřezu osazení

### 4.3.2. Druhá varianta upnutí

Druhá varianta upnutí se lišila od té předchozí pouze v první části – v obrobení válcové plochy, vyvrtání díry pro připevnění a frézování osazení. Válcová část by se obrobila na soustruhu s poháněnými nástroji kvůli větší dosažitelné kvalitě válcové plochy. Osazení by se následně ofrézovalo poháněnou frézou v revolverové hlavě a nakonec by se vyvrtala díra.

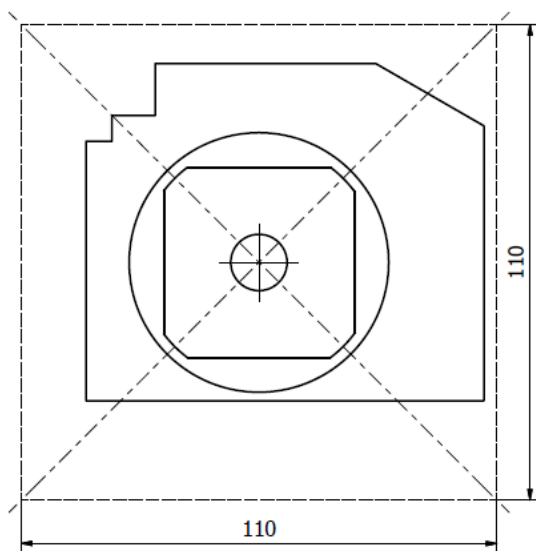
Hlavním úskalím této metody bylo upnutí kvádrového polotvaru do sklíčidel soustruhu a zajištění jeho stability kvůli střídavému řezu, který by při soustružení hranatého polotvaru nastal. Pokud by se tedy válcová část soustružila, tak by bylo třeba upravit polotvar pro upnutí jednou z následujících možností:

- Použít místo kvádrového polotvaru válcový polotvar s rozměry  $\varnothing 125\text{mm}$  – 130mm. Tento způsob by byl z hlediska upnutí do soustruhu pravděpodobně nejjednodušší, ale došlo by k několikanásobnému zvětšení přídavek na obrobení. A objem polotvaru by se téměř zdvojnásobil, což by se projevilo při výrobě více kusů.



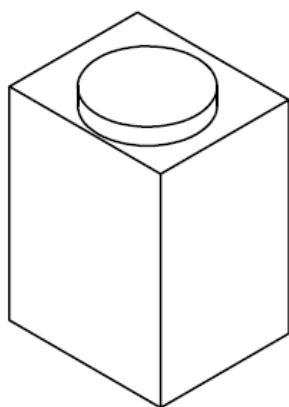
Obrázek 21: Umístění obrobku ve válcovitém polotvaru

- Použít jako polotvar kvádr se čtvercovým průřezem s minimálními rozměry: 110x110x130mm, aby osa polotvaru a osa válcové části byly totožné. Nedošlo by k tak velkému navýšení přídavek jako v předchozím případě, ale zase by šlo o soustružení s přerušovaným řezem.

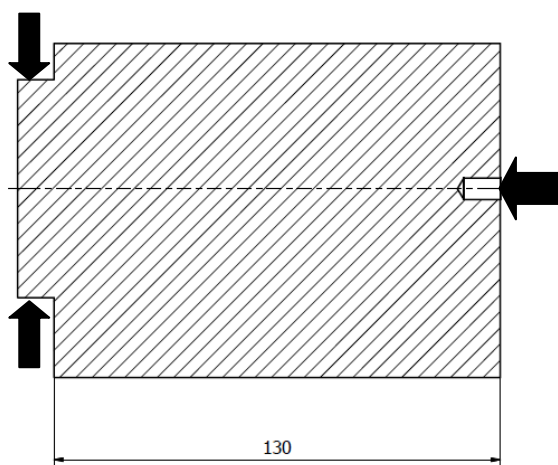


**Obrázek 22: Umístění obrobku v polotvaru se čtvercovým průřezem**

- Další možnost byla vyfrézovat na opačném konci polotvaru válec s osou totožnou s osou válcové plochy, na konci válcové plochy vytvořit středící důlek a polotvar následně upnout do sklíčidla za vyfrézovaný válec a z druhé strany podepřít koníkem za středící důlek. Po obrobení hlavní válcové plochy by pak koník odjel pryč, aby se mohlo soustružit čelo, vyfrézovat osazení a vyvrtat díra. Tento postup by byl sice z hlediska přípravy nejpracnější, ale zase by byl nejméně náročný z hlediska celkově odebraného materiálu. Rozměry polotvaru by zůstaly takřka totožné, pouze by se k jeho výšce připočetla výška upínacího válce (10-15mm).



**Obrázek 23: Polotvar s prvkem pro upnutí**



**Obrázek 24: Upnutí polotvaru do soustruhu**

#### 4.4. Volba nástrojů

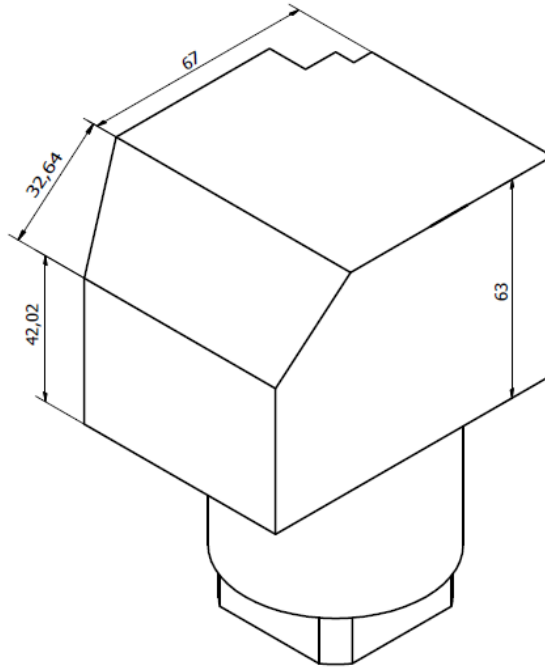
Při volbě nástrojů jsem nejprve přibližně určil jednotlivé typy nástrojů na základě předchozího rozboru geometrických prvků zadaného tělesa a technologických požadavků a pak jsem hledal dostupné nástroje podobných vlastností. Většina těchto nástrojů, respektive fréz a vrtáků, byla monolitní a vyrobená ze slinutých karbidů.

Tento fakt jsem zohlednil už při prvním návrhu nástrojů. Navíc se ve většině případů jednalo o nástroje příliš malých průměrů, než aby byly běžně dostupné s vyměnitelnými břitovými destičkami. Proto v následující tabulce u fréz a vrtáků uvádím kromě jmenovitých průměrů i minimální délky ostří. Délka ostří byla důležitá proto, že jsem se chtěl vyhnout tomu, aby se při dokončování dutin dřík frézy otíral o stěny. Tak by mohly vznikat vibrace nástroje a tím by mohla být způsobena i nepřesnost rozměrů. Proto jsem volil nástroje tak, aby měly ostří stejně dlouhé nebo delší než byla maximální hloubka zahloubení.

**Tabulka 4: Zvolené typy nástrojů**

Nástroj:	Průměr:	Minimální délka ostří:	Délka vyložení:	Použití:
Válcová fréza	80mm	15mm	70mm	Obrobení rovinných ploch
Válcová fréza	15mm	40mm	60mm	Frézování zahloubení pro šroub
Válcová fréza	10mm	40mm	60mm	Frézování větších zahloubení
Válcová fréza	5mm	15mm	25mm	Frézování menších zahloubení
Kulová fréza	10mm	20mm	60mm	Obrobení kuželové plochy, stražení hrany u díry pro šroub (obrobení válcové plochy 4D)
Vrták	13mm	66mm	80mm	Vrtání díry pro připevnění
Vrták	6mm	15mm	25mm	Vrtání děr na bocích tělesa
Vrták	3,5mm	18mm	25mm	Vrtání děr na bocích tělesa
Soustružnický nůž uběrací	-	-	35mm	Hrubování válcové části
Soustružnický nůž uběrací	-	-	35mm	Zarovnání čela válcové části
Soustružnický nůž kopírovací	-	-	35mm	Konturování válcové části

Válcová fréza  $\varnothing 80\text{mm}$  – čelní nebo rohová by sloužila k obrobení hlavních rovinných ploch. Pokud by byla rohová, mohla by se použít i k frézování drážek na hraně funkční části. Průměr 80mm byl spíše orientační – fréza by měla mít dostatečný přesah, aby při dokončování mohla obrobít všechny roviny funkční části jedním řezem s tím, že šířka největší roviny měla 67mm. Při vyložení větším než 60mm by se také dala tato fréza (za předpokladu, že by šlo o rohovou frézu) využít jako alternativa k obrobení válcové části tělesa.

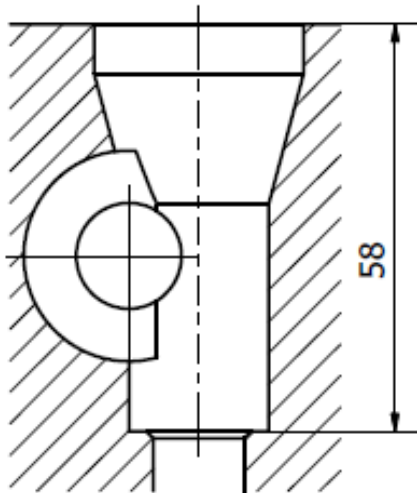


Obrázek 25: Mezní rozměry rovinných ploch

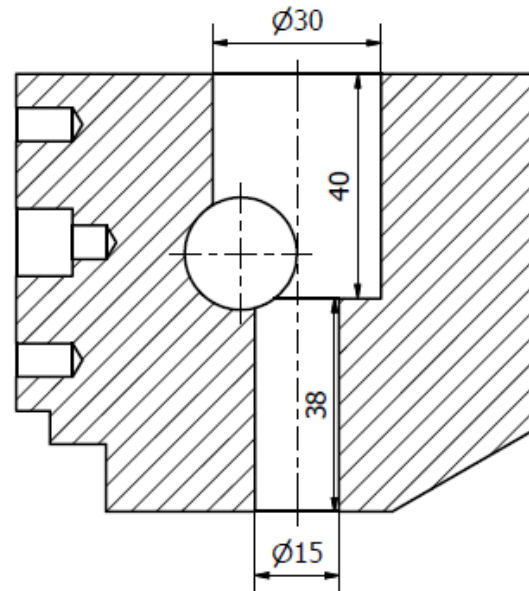
Válcová fréza  $\varnothing 15\text{mm}$  by byla použita k vyhloubení největších zahloubení na funkční části a dala by se také použít k obrobení všech osazení, pokud by fréza  $\varnothing 80\text{mm}$  byla pouze čelní a ne rohová. Minimální délka ostří byla daná hloubkou nejhlubšího válcového zahloubení 40mm. Bylo by možné použít i frézu s kratším ostřím, ale v tom případě by dřík této frézy musel mít menší průměr než její jmenovitý průměr. Minimální délka vyložení této frézy byla zase určena nejhlouběji frézovanou plochou, v tomto případě dnem zahloubení pro šroub, vzdáleným od povrchu tělesa 58mm.

Válcová fréza  $\varnothing 10\text{mm}$  by sloužila k frézování zahloubení na funkční části, pro které by předchozí fréza byla příliš velká. Hlavní limitující rozměr je u této frézy hloubka díry 38mm, která horizontálně vede skrz těleso.





Obrázek 26: Mezní délka vyložení frézy  $\varnothing 15\text{mm}$  (svislý řez tělesem)



Obrázek 27: Mezní délky ostří fréz  $\varnothing 15$  a  $10\text{mm}$  (vodorovný řez tělesem)

Válcová fréza  $\varnothing 5\text{mm}$  by pak sloužila k obrobení všech zbývajících zahloubení.

Kulová fréza  $\varnothing 10\text{mm}$  by byla použita na obrobení kuželové plochy nad zahloubením pro šroub a také k ofrézování sražení hrany na tomto zahloubení. Kvůli tomuto sražení by tato fréza musela mít vyložení minimálně  $60\text{mm}$  a víc. Alternativně by se tato fréza pak dala ještě využít k obrobení hlavní válcové plochy při použití 4D frézování.

Vrták  $\varnothing 13\text{mm}$  by se kromě vyvrtání díry pro připevnění tělesa mohl dále využít i k předvrtání velkých zahloubení, vedoucích skrze těleso, aby se usnadnily následující frézovací operace. Totéž by platilo i pro ostatní vrtáky při obrábění zahloubení.

Při volbě soustružnických nožů, respektive nožů s vyměnitelnými břitovými destičkami, šlo hlavně o to, aby náležely do třídy na obrábění neželezných kovů a byly dostatečně odolné pro přerušovaný řez.

Při následném výběru dostupných nástrojů jsem se řídil hlavně výše zmíněnými limitními rozměry a umístěním obráběných prvků. Zde se pak projevil patrně největší problém související s dostupnými zdroji – i když se mi podařilo zajistit pro výrobu všechny požadované typy nástrojů, tak se ukázalo, že ne všechny se dají upnout do frézovacího centra. Vzhledem k tomu, že instalace tohoto stroje proběhla jen několik měsíců před plánováním této výroby, tak v důsledku toho nebylo frézovací centrum ještě vybaveno dostatečným počtem držáků nástrojů, a tak bylo možné využít pouze 6 nástrojových míst z 32.

Ostatní stroje byly díky dlouhodobému provozu schopné pojmout mnohem více nástrojů, ale žádný z nich neumožňoval dostatečně kvalitní obrobení funkční části. Proto jsem se snažil zajistit takovou skladbu nástrojů pro frézovací centrum, abych, i přes tato omezení, na něm mohl obrobít funkční část na jediné upnutí.

**Tabulka 5: Vybrané nástroje pro frézovací centrum Okuma MU 400V II [15][16][29]**

Nástroj:	Jmenovitý rozměr:	Označení : (komponenta)/jméno výrobce/typ/katalogové číslo
Válcová fréza	80	VBD/KENNAMETAL/EDCT/140404PDERGD Hlava/KENNAMETAL/80A07RS90ED14D Držák/KENNAMETAL/HSK/63-27-100
Válcová fréza	16	Bez označení
Válcová fréza	12	GUHRING/3023/9030230120000
Kulová fréza	12	DORMER/S501/8RR1676489
Válcová fréza	6	DORMER/S933/8R64322675
Vrták	6	DORMER/R458/8R69402217

**Tabulka 6: Vybrané nástroje pro soustruh Okuma Genos L200E-M [14][16][29]**

Nástroj:	Jmenovitý rozměr:	Označení : (komponenta)/jméno výrobce/typ/katalogové číslo
Válcová fréza	12	GUHRING/3023/9030230120000
Soustružnický nůž uběrací	-	VBD/SANDVIK/CCGX/09T308-AL H10 Nástroj/SANDVIK/C4-SDUCR-13080-11
Soustružnický nůž kopírovací	-	VBD/SANDVIK/CCGX/09T308-AL H10 Nástroj/SANDVIK/C4-SDUCR-13080-11
Vrták	13	DORMER/A14713
Vrták	6	DORMER/R458/8R69402217

Soustružnické nože a vrták  $\varnothing 13\text{mm}$  byly jediné nástroje, které nebyly přímo určeny v zásobě dostupných nástrojů. Tyto nástroje, definované ve výrobním postupu a následně v partprogramu, byly vybrané z katalogů jako běžné nástroje vhodné pro dané operace s tím, že se mezi dostupnými nástroji zcela jistě nalézají jejich ekvivalenty. Kdyby nedošlo k odložení výroby zkušebního tělesa, byly by tyto nástroje určeny stejným způsobem jako ostatní.

**Tabulka 7: Vybrané nástroje pro frézku VNC 500 [15][16]**

Nástroj:	Jmenovitý rozměr:	Označení : (komponenta)/jméno výrobce/typ/katalogové číslo
Válcová fréza	80	VBD /KENNAMETAL/EDCT/140404PDERGD Hlava/KENNAMETAL/80A07RS90ED14D Držák/KENNAMETAL/HSK/63-27-100
Vrták	13	DORMER/A147 13
Vrták	6	DORMER/R458/8R69402217

S touto skladbou nástrojů souvisí další provedená technologická úprava – změna všech vrtaných děr na funkční části z průměru 3,5mm na 6mm. Další omezení skladby nástrojů představoval vrták s průměrem 13mm, který nemohl být upnutými ani do jednoho z šesti dostupných držáků. Tím pádem bylo nezbytné přeměřovat obrobení válcové části (včetně díry pro upnutí) na jiný stroj. Vzhledem k tomu, že byl tento vrták vyroben z rychlořezné oceli, bylo nutné všechny jím vrtané díry předvrtat, proto je v tabulkách nástrojů zapsán i druhý vrták s průměrem 6mm.

#### 4.5. Řezné podmínky

Při stanovení řezných podmínek jsem nejprve zjistil z katalogu výrobců doporučené hodnoty posuvů a řezných rychlostí daných nástrojů pro obrábění hliníkových slitin jako výchozí hodnoty.

**Tabulka 8: Řezné podmínky doporučené výrobcem [14][15][16][29]**

Nástroj:	Jmenovitý rozměr:	$f_z$ [mm/z]	$v_c$ [m/min]	Obrábění:
Válcová fréza	80	-	-	-
Válcová fréza	16	-	-	-
Válcová fréza	12	0,09	350	Hrubování
		0,086	600	Na čisto
Kulová fréza	12	0,064	680	Na čisto
Válcová fréza	6	0,046	390	Hrubování
		0,035	390	Na čisto
Vrták	13	0,31	30	-
Vrták	6	0,15	200	-
Soustružnický nůž uběrací		0,12-0,6	250-2000	-
Soustružnický nůž kopírovací		0,05-0,15	250-2000	-

Vyměnitelné břitové destičky EDCT 140404PDERGD (na fréze  $\varnothing 80\text{mm}$ ) nejsou určené pro obrábění hliníkových slitin, takže jsem v tabulce nemohl uvést žádné výchozí hodnoty, protože je v katalogu neuvádí ani výrobce. Při určení řezných podmínek pro tento nástroj jsem tak vycházel z doporučení pracovníků, kteří už měli zkušenosti s jeho používáním. Totéž platí i pro frézu  $\varnothing 16\text{mm}$ , u které už se výrobce nedal určit (nezachoval se ani originální obal ani číselné označení na dřívku).

Jinak z tabulky doporučených řezných podmínek vyplývá, že uvedené hodnoty, zejména u řezných rychlostí, jsou s velkou pravděpodobností limitní, respektive maximální možné. Vzhledem k tomu že v tomto případě nešlo o typickou

průmyslovou výrobu, stanovil jsem řezné podmínky hlavně s ohledem na bezpečnost a maximální trvanlivost nástrojů. To znamenalo zmenšení řezné rychlosti dvakrát až třikrát. Tím pádem se hodnota řezné rychlosti většiny nástrojů pohybovala kolem  $200\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ . Šlo zkrátka hlavně o to, aby se nástroje při výrobě zkušebního tělesa příliš neopotřebily.

Při obrábění hliníkových slitin bývá problém tvorba nárůstku, který může dosáhnout takové velikosti, že zcela vyplní mezery mezi břity monolitních nástrojů. Zákonitost tvorby těchto nárůstků není ještě zcela objasněna, ale obecně se dá říci, že se nárůstek na břitu přestává tvořit po překročení teploty  $450^{\circ}\text{C}$  v místě řezu, čehož lze dosáhnout vysokou řeznou rychlostí. Vyšší řezná rychlost tedy může být z hlediska tvorby nárůstku vhodnější. V tomto případě však bylo riziko tvorby nárůstku omezeno požitím chladicí kapaliny, která adhezi (ulpívání obrobeného materiálu na břitu nástroje) dostatečně potlačuje. [3]

**Tabulka 9: Definitivně určené řezné podmínky**

Nástroj:	Jmenovitý rozměr:	$f_z$ [mm/z] [mm/ot]	$v_c$ [m/min]	z	n [ot/min]	f [m/min]	$a_p$ [mm]
Válcová fréza (hrubování)	80	0,1	200	7	796	1,0	3
Válcová fréza (na čisto)	80	0,09	220	7	875	0,9	0,5
Válcová fréza (hrubování)	16	0,1	200	6	3979	2,4	5
Válcová fréza (na čisto)	16	0,09	220	6	4377	2,4	1
Válcová fréza (hrubování)	12	0,09	170	4	4509	1,6	5
Válcová fréza (na čisto)	12	0,08	220	4	5836	1,9	5
Kulová fréza (na čisto)	12	0,064	220	2	5836	0,7	5
Válcová fréza (hrubování)	6	0,06	190	3	10080	1,4	5
Válcová fréza (na čisto)	6	0,03	190	3	10080	1,1	1
Vrták	13	0,08	30	2	735	0,12	0
Vrták	6	0,08	100	2	5305	0,8	0
Soustružnický nůž uběrací (hrubování)		0,25	300	-	764	0,2	1,5

Soustružnický nůž uběrací (na čisto)	0,15	350	-	1857	0,3	0,5
Soustružnický nůž kopírovací (na čisto)	0,12	350	-	1857	0,2	0,5

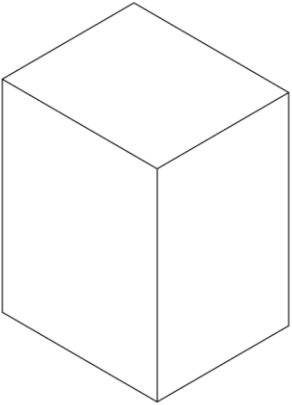
Vypočtené hodnoty otáček  $n$  a posuvů  $f$  byly získány z použitých CAM softwarů při nastavování řezných podmínek.

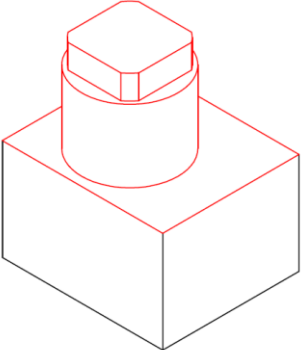
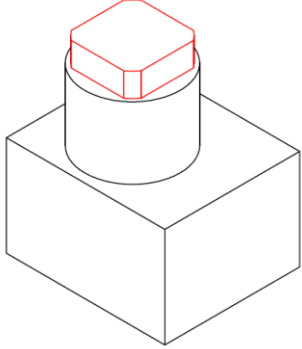
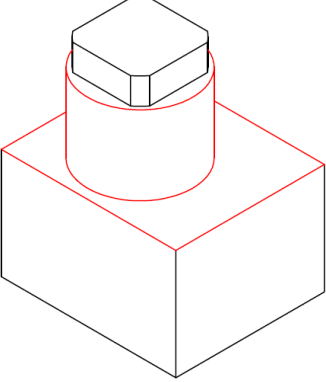
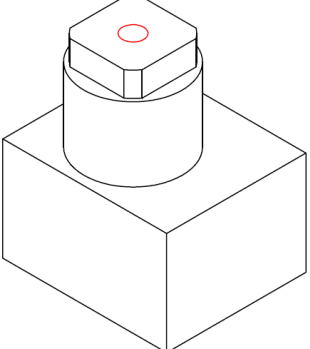
#### 4.6. 1. varianta výrobního postupu

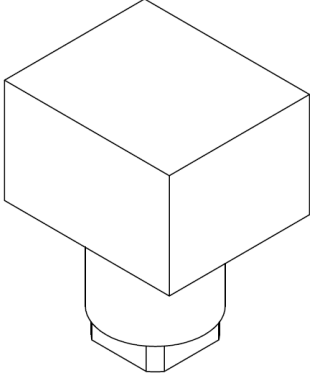
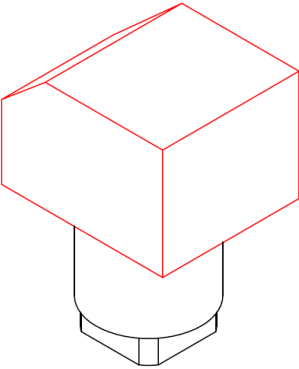
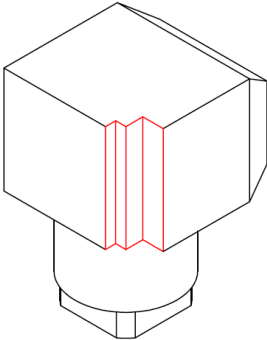
Výrobní postup jsem připravil pouze pro obráběcí operace. Znázornění jednotlivých úkonů jsem vytvořil pomocí CAD softwaru Autodesk Inventor.

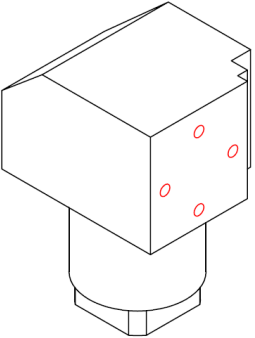
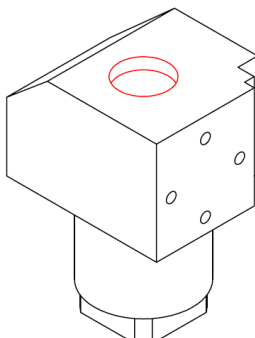
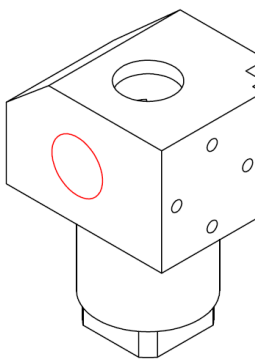
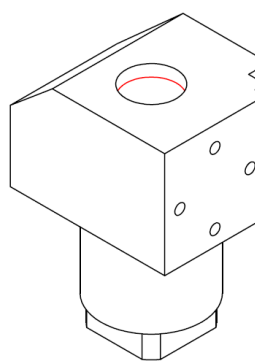
Tato varianta výrobního postupu předpokládala pouze využití frézovacího centra Okuma MU 400V II. Tento výrobní postup byl ze všech variant nejjednodušší na realizaci, umožňoval výrobu tělesa na dvě upnutí a hodil se jako ukázka možností frézovacího centra – jak k hodnocení jeho přesnosti a rychlosti výroby, tak k předváděcím a propagačním účelům.

Nevýhody tohoto výrobního postupu hlavně spočívaly v nedostatku nástrojových míst, takže reálná výroba by mohla nastat až po jejich patřičném rozšíření. Další nevýhoda tohoto postupu byla v tom, že válcová část by pravděpodobně nebyla obrobena dostatečně kvalitně, aby splnila předepsanou rozměrovou toleranci.

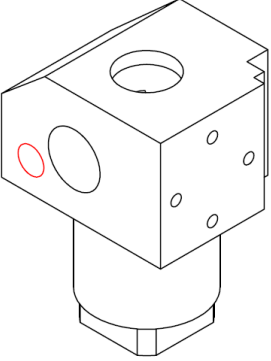
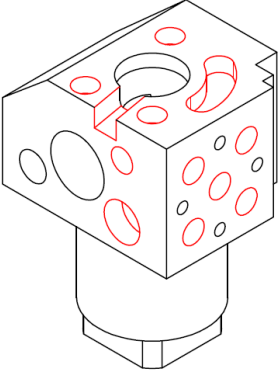
1. Výrobní postup		
Operace:	Pracoviště (stroj):	
1	CNC frézovací centrum Okuma MU 400V II	
Úsek:	Popis:	Nástroj:
1.1	Upnutí a vyrovnání polotvaru  	EN-AW 2011 100x85x130mm

1.2	<p>Hrubování polotvaru</p> 	Válcová fréza $\varnothing 80$
1.3	<p>Dokončení osazení</p> 	Válcová fréza $\varnothing 80$
1.4	<p>Dokončení válcové plochy</p> 	Válcová fréza $\varnothing 80$
1.5	<p>Předvrtání díry v ose válce</p>	Vrták $\varnothing 6$
1.6	<p>Vrtání díry v ose válce</p> 	Vrták $\varnothing 13$
1.7	<p>Vyjmutí polotvaru</p>	-

Operace:	Pracoviště (stroj):	
2	CNC soustruh Okuma Genos L200E-M	
Úsek:	Popis:	Nástroj:
2.1	Upnutí a vyrovnání polotvaru 	-
2.1	Frézování (hrubování + dokončení) hlavních rovin funkční části 	Válcová fréza $\varnothing 80$
2.2	Frézování (hrubování + dokončení) zahloubení na svislé hraně funkční části 	Válcová fréza $\varnothing 80$

2.4	Vrtání děr a předvrtávání zahloubení. 	Vrták $\varnothing 6$
2.5	Frézování (hrubování + dokončení) hlavního svislého zahloubení 	Válcová fréza $\varnothing 16$
2.7	Frézování (hrubování + dokončení) hlavního vodorovného zahloubení 	Válcová fréza $\varnothing 16$
2.8	Dokončení kuželové plochy 	Kulová fréza $\varnothing 12$



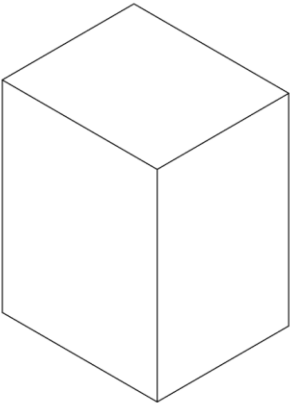
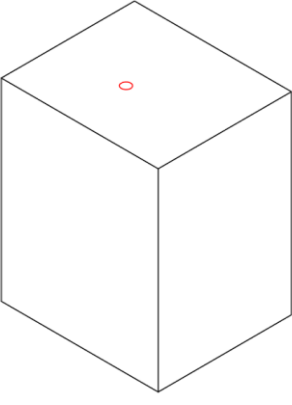
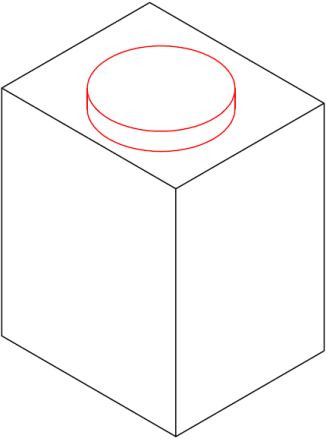
2.9	Frézování (hrubování + dokončení) ostatních hlubokých zahloubení 	Válcová fréza ø12
2.10	Frézování malých zahloubení 	Válcová fréza ø6
2.11	Vyjmutí polotvaru	-

#### 4.7. 2. varianta výrobního postupu

Tato varianta výrobního postupu byla navržena kvůli zajištění okamžité a proveditelné výroby, kterou předchází výrobní postup neumožňoval. Jde o pracnější způsob výroby než v předchozím případě – zkušební těleso by bylo vyrobeno během 4 operací na dvou CNC strojích (soustruhu a frézovacím centru). Pracnost tohoto postupu by šla zmenšit použitím kulového polotvaru, čímž by zase ale stoupla spotřeba materiálu a strojní čas.

V tomto výrobním postupu jsou graficky znázorněné pouze dvě první operace. Další operace jsou podobné jako v předchozím výrobním postupu.

Tento výrobní postup byl kromě zaručené proveditelnosti výhodný také v tom, že umožňoval dosažení lepšího povrchu na válcové části, která by se soustružila. Při přípravě výroby podle tohoto postupu by ale bylo nutné aktualizovat soustružnické nástroje podle dostupnosti a pak patřičně upravit i partprogram.

<b>2. Výrobní postup</b>		
Operace:		Pracoviště (stroj):
1		CNC frézovací centrum Okuma MU 400V II
Úsek:	Popis:	Nástroj:
1.1	Upnutí a vyrovnání polotvaru  	EN-AW 2011 100x85x140mm
1.2	Vrtání středícího důlku pro stabilizaci upnutí  	Vrták $\varnothing 6$
1.3	Vyjmutí polotvaru	-
Operace:		Pracoviště (stroj):
2		CNC frézovací centrum Okuma MU 400V II
Úsek:	Popis:	Nástroj:
2.1	Upnutí a vyrovnání polotvaru	-
2.2	Frézování (hrubování + dokončení) útvaru pro upnutí  	Válcová fréza $\varnothing 80$

2.3	Vyjmutí polotvaru	-
Operace:		Pracoviště (stroj):
3	CNC Soustruh Okuma Genos L200E-M	
Úsek:	Popis:	Nástroj:
3.1	Upnutí a vyrovnání polotvaru	-
3.2	Soustružení – hrubování polotvaru	Soustružnický nůž uběrací
3.3	Soustružení – dokončení válcové plochy	Soustružnický nůž kopírovací
3.4	Frézování – dokončení osazení	Válcová fréza $\emptyset$
3.5	Odjezd koníka od obrobku	-
3.6	Soustružení – zarovnání čela	Soustružnický nůž uběrací
3.7	Vrtání díry v ose válce	Vrták $\emptyset$
3.8	Vyjmutí polotvaru	-
Operace:		Pracoviště (stroj):
4	CNC frézovací centrum Okuma MU 400V II	
Úsek:	Popis:	Nástroj:
4.1	Upnutí a vyrovnání polotvaru	-
4.2	Frézování (hrubování + dokončení) hlavních rovin funkční části	Válcová fréza $\emptyset 80$
4.3	Frézování (hrubování + dokončení) zahloubení na svislé hraně funkční části	Válcová fréza $\emptyset 80$
4.4	Vrtání děr a předvrtávání zahloubení.	Vrták $\emptyset 6$
4.5	Frézování hlavního svislého zahloubení	Válcová fréza $\emptyset 16$
4.6	Dokončení hlavního svislého zahloubení	Válcová fréza $\emptyset 16$
4.7	Frézování (hrubování + dokončení hlavního vodorovného zahloubení	Válcová fréza $\emptyset 16$
4.8	Dokončení kuželové plochy	Kulová fréza $\emptyset 12$
4.9	Frézování (hrubování + dokončení) ostatních hlubokých zahloubení	Válcová fréza $\emptyset 12$
4.10	Frézování malých zahloubení	Válcová fréza $\emptyset 6$
4.11	Vyjmutí polotvaru	-

#### 4.7.1. 3. varianta výrobního postupu

Tato varianta výrobního postupu je hodně podobná té první. Liší se v tom, že by se první operace přesunula z frézovacího centra do frézky VNC 500, čímž by se vyřešil problém s kapacitou nástrojových míst.

3. výrobní postup je vlastně kompromis mezi předchozími variantami. Byl navržený pro okamžitou realizaci výroby a zůstal relativně jednoduchý na přípravu, i když ani zde by válcová část pravděpodobně nebyla obrobena dostatečně kvalitně.

Jde zkrátka o postup pro nenáročnou výrobu s možnou sníženou kvalitou povrchu válcové části, vhodnou hlavně v případě, že by problém s nástroji u frézovacího centra nebyl vyřešen.

<b>3. Výrobní postup</b>		
Operace:	Pracoviště (stroj):	
1	CNC frézka VNC 500	
Úsek:	Popis:	Nástroj:
	Upnutí a vyrovnání polotvaru	EN-AW 2011 100x85x130mm
	Hrubování polotvaru	Válcová fréza $\varnothing 80$
	Dokončení válcové plochy	Válcová fréza $\varnothing 80$
	Dokončení osazení	Válcová fréza $\varnothing 80$
	Předvrtání díry v ose válce	Vrták $\varnothing 6$
	Vrtání díry v ose válce	Vrták $\varnothing 13$
	Vyjmutí polotvaru	-
Operace:	Pracoviště (stroj):	
2	CNC soustruh Okuma Genos L200E-M	
Úsek:	Popis:	Nástroj:
	Upnutí a vyrovnání polotvaru	-
	Frézování (hrubování + dokončení) hlavních rovin funkční části	Válcová fréza $\varnothing 80$
	Frézování (hrubování + dokončení) zahloubení na svislé hraně funkční části	Válcová fréza $\varnothing 80$
	Vrtání děr a předvrtávání zahloubení.	Vrták $\varnothing 6$
	Frézování hlavního svislého zahloubení	Válcová fréza $\varnothing 16$
	Dokončení hlavního svislého zahloubení	Válcová fréza $\varnothing 16$
	Frézování (hrubování + dokončení hlavního vodorovného zahloubení	Válcová fréza $\varnothing 16$
	Dokončení kuželové plochy	Kulová fréza $\varnothing 12$
	Frézování (hrubování + dokončení) ostatních hlubokých zahloubení	Válcová fréza $\varnothing 12$
	Frézování malých zahloubení	Válcová fréza $\varnothing 6$
	Vyjmutí polotvaru	-

Vzhledem k tomu, že výroba zkušebního tělesa byla odložena, mimo jiné i kvůli vytížené kapacitě střediska CNC strojů na Ústavu obrábění, tak jsem připravil tyto

tři výrobní postupy (respektive tři varianty) k následnému využití. První výrobní postup je určený spíše pro předvedení schopností frézovacího centra Okuma MU 400V II jako takového a další dva postupy jsou určené k okamžité výrobě. Druhý postup představuje pracnější variantu s lepší dosažitelnou kvalitou válcové plochy a třetí postup představuje jednoduchou variantu s možnou horší kvalitou stejné plochy.

Pro všechny tři varianty jsem vytvořil jeden funkční univerzální partprogram, který se dá použít k vytvoření NC kódu pro realizaci výroby.

## 5. Tvorba partprogramu pro výrobní postup

Kvůli k relativně velké složitosti tvaru zadaného tělesa jsem tvorbu NC kódu realizoval počítačovým programováním. Pro válcovou část tělesa by pravděpodobně šlo použít i dílenské programování, ale tento způsob nakonec nebylo možné použít kvůli celkově asymetrickému tvaru tělesa, které vyžadovalo pro dílenské programování příliš komplikované nastavení.

### 5.1. Použitý CAM a CAD software

Pro tvorbu partprogramu jsem použil několik CAM a CAD softwarů dostupných se studentskou licenci. Variabilita těchto softwarů byla dána jednak jejich možnostmi (například přepínání mezi CAD/CAM při navrhování technologických úprav) a také omezenými možnostmi postprocessingu a také formátem zadaných modelů. Konkrétně jsem použil tyto softwary:

- NX 12.0 (CAD/CAM software – zadaný model, toho času bez postprocesoru pro dostupné CNC stroje)
- Autodesk PowerMill Ultimate 2018 (CAM software s funkčním postprocesorem pro všechny dostupné CNC stroje)
- Autodesk Inventor 2017 (CAD software – tvorba modelu pro PowerMill)
- Solidworks 2018 (CAD software – zadaný model)
- Fusion 360 (CAD/CAM software s funkčním postprocesorem pro soustruh Okuma Genos L200E-M)

Nejprve jsem použil softwary NX a Solidworks k rozboru tvarových částí zadaného tělesa a také k analýze PMI dat. Poté jsem v softwaru NX vytvářel jednotlivé varianty partprogramu. Jak jsem již naznačil ve výše uvedeném seznamu, tak tento software sice neměl funkční postprocesor pro uvažované CNC stroje, ale zase se

dalo využívat přepínání mezi jeho CAM a CAD částí. To bylo uživatelsky velmi výhodné při navrhování uživatelských a hlavně technologických úprav.

Po vyřešení technologických problémů a realizaci všech úprav pak hotový partprogram v softwaru NX posloužil jako vzor pro další tvůrčí činnost. Po té, na základě tohoto partprogramu, jsem vytvořil nový model zkušebního tělesa v Inventoru a ten pak importoval do PowerMillu. Poté jsem v něm vytvořil partprogram podle hotové předlohy. Část tohoto partprogramu pak byla použita jako vstup pro tvorbu NC kódu na obrobení funkční části na frézovacím centru Okuma. Druhá část tohoto partprogramu sloužila jako záložní varianta pro tvorbu NC kódu pro obrobení válcové části pomocí 3D frézování.

Software Fusion 360 jsem pak použil pro tvorbu partprogramu určené pro obrobení válcové části pomocí soustružení. Možnosti tohoto softwaru pak umožnily vytvořit partprogram i pro tak komplikovaný obrobek, jako byl polotvar s tvarem kvádrů, s asymetrickým tělesem uvnitř, a to celé soustruženo přerušovaným řezem a frézováno poháněnou nástrojovou hlavou.

Takto vypadala tvorba partprogramů a NC kódů obecně a v následujících kapitolách jsou tyto dílčí kroky podrobněji popsány.

## **5.2. Tvorby partprogramu v NX**

### **5.2.1. Souřadnicové systémy**

Již několikrát jsem v předchozích statích zmínil indexování a 3+2D frézování. Tato technologie se při tvorbě partprogramu realizuje pomocí několika souřadnicových systémů. Každý jednotlivý souřadnicový systém pak reprezentuje konkrétní natočení polotvaru, respektive obrobku vůči CNC stroji.

Vzhledem k dostatečnému úhlovému rozsahu možného naklápění palety frézovacího centra jsem pak mohl umístit souřadnicový systém na 7 základních rovin funkční části (5 navzájem kolmých či rovnoběžných rovin tvořících základní reliéf tělesa a 2 roviny šikmé, tvořící sražení hran) a 1 souřadný systém na konec osy válcové části. Kromě toho jsem pak vytvořil ještě dva souřadnicové systémy, určující vrchní a spodní nulový bod polotvaru (pro první a druhé upnutí). Tyto systémy by pak sloužily k prvnímu polohování polotvaru vůči stroji a také jako nadřazený prvek ostatních souřadnicových systémů.

### 5.2.2. Tvorba nástrojů

Všechny nástroje jsem vytvořil podle údajů (průměr, délka ostří, počet zubů, atd.) předem vybraných nástrojů. Nastavené délky vyložení však byly odhadnuté jen podle délky dříků jednotlivých nástrojů, protože k sestavení nástrojů do držáků nedošlo. Vzhledem k tomu, že nástroje byly vybrané na základě mezních obráběných rozměrů, nepokládal jsem riziko kolize držáku nebo dříku s obrobkem za příliš opodstatněné.

### 5.2.3. Obráběcí strategie

Celkové schéma obráběcích strategií kopíruje schéma výrobního postupu. Dělí se nejprve na dvě části pro obrobení funkční a válcové části tělesa a dále do úseků podle jednotlivých tvarových prvků. Jednotlivé strategie jsem řadil za sebou podle nástrojů (samozřejmě s ohledem na výrobní postup), aby nedocházelo k časovým prodlevám při zbytečných výměnách nástroje. U všech frézovacích strategií jsem také ponechal nastaveno sousledné frézování kvůli snížení opotřebení nástrojů.

#### 5.2.3.1. Válcová část:

- Hrubování

Pro hrubování válcové části byla použita klasická hrubovací strategie cavity mill s nastavenou velkou šířkou záběru a hloubkou řezu. Vzhledem k tomu, že v tomto úseku obrábění dochází k největšímu úběru materiálu, tak tomu odpovídají i řezné podmínky. Aby nedošlo k hrubování celého polotvaru, tak byla maximální hloubka hrubování označena mezní plochou v záložce cut level.

- Dokončení válcové plochy

Dokončení válcové plochy bylo realizováno strategií Zlevel profile sloužící k postupnému obrábění strmých ploch. Jako alternativa by zde šlo použít i 4D frézování kulovou frézou, ale v tomto případě by to bylo příliš složité řešení pro obrobení jednoduché plochy a navíc by vytvořilo horší povrch.

- Dokončení osazení

Také dráhy pro frézování osazení byly vytvořeny pomocí Zlevel profile.

- Zarovnání čela

Na zarovnání čela byla použita strategie floor wall upravená tak, aby byla celá plocha obrobena na jeden přejezd ve dvou oddělených krocích – hrubování a dokončení.

- Předvrtání a vrtání díry

Pro vrtání a předvrtání byla použita strategie drilling. Předvrtání bylo nezbytné kvůli následnému použití vrtáku z rychlořezné oceli. Pokud by došlo v rámci optimalizací výroby k vrtání díry vrtákem ze slinutého karbidu, tak by předvrtání bylo nepotřebné a mělo by dojít k jeho odstranění.

### **5.2.3.2. Funkční část:**

- Hrubování rovinných ploch

Hrubování rovinných ploch bylo realizováno strategií floor wall. Jedná se o dokončovací strategii, takže bylo třeba nastavit zbývající materiál v záložce stock a to 0,5mm. Většina obráběných rovin měla přídavek 3-4mm, takže je šlo ohrubovat na jeden záběr nástroje, ale u nakloněných rovin na hranách polotvaru bylo třeba nastavit buď několikanásobné řezy s pevně daným krokem podle výšky přebytečného materiálu nebo aktivovat IPW – zbytkový materiál.

Jednotlivé plochy jsem řadil tak, aby všude byl dosažitelný přesah válcové frézy, aby bylo možné obrábět většinu ploch jediným přejezdem nástroje.

- Dokončení rovinných ploch

Dokončení rovinných ploch bylo realizováno stejnou strategií jako hrubování, ale s odlišným nastavením – bez násobných řezů a s nulovou tloušťkou zbývajícího materiálu a také s jinými řeznými podmínkami.

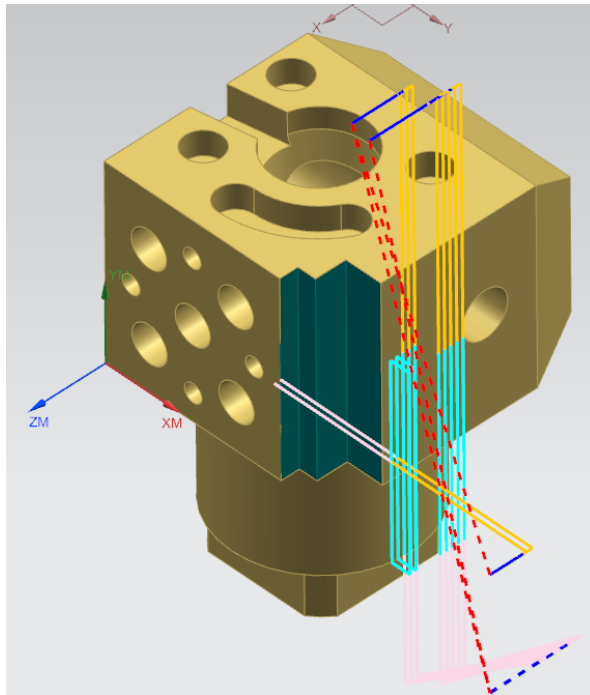
Dokončení jednotlivých ploch bylo řazeno hned za hrubování, aby se jednotlivé plochy obráběly kompletně, bez zbytečného natáčení obrobku.

- Frézování zubu

Také frézování zubů neboli dvou zářezů na hraně funkční části bylo provedené pomocí dvou strategií cavity mill – jedné upravené pro hrubování a druhé pro dokončení s rozdílnými řeznými podmínkami. Patrně by šlo použít i strategii floor wall, ale vzhledem k relativně velkému rozdílu mezi malou plochou, kterou



zabíraly strany zářezů, a průměrem frézovací hlavy, bylo nastavení této strategie obtížné.



Obrázek 28: Dráhy pro obrobení drážky na čisto (NX)

- Vrtání děr

Při vrtání děr byly označeny jednak všechny vrtané díry, které tak byly definované v zadaném modelu a také bylo označeno několik malých zahloubení, kde by vyvrtaná díra ubrala dost materiálu před hrubováním. Vzhledem k tomu, že vrták měl ostří dlouhé jen 24mm, tak jsem ho použil jen pro zahloubení s menší hloubkou než délkou ostří. To samé platilo pro díry a zahloubení velkých průměrů, které tak byly vytvořené pouze frézováním.

- Hrubování zahloubení (ø30mm)

U hrubování větších zahloubení byl problém, že v nich nástroje měly málo prostoru, takže jsem se snažil spíše o bezpečný než o progresivní způsob obrábění. Použil jsem strategii cavity mill s malou hodnotou kroku na ose Z s minimálním zbytkovým materiálem (řádově desetiny milimetru) a nájezdy po spirále. Výkonnějšího úběru materiálu by se dalo pravděpodobně dosáhnout použitím upichovací frézy.

- Dokončení zahloubení ( $\varnothing 30\text{mm}$ )

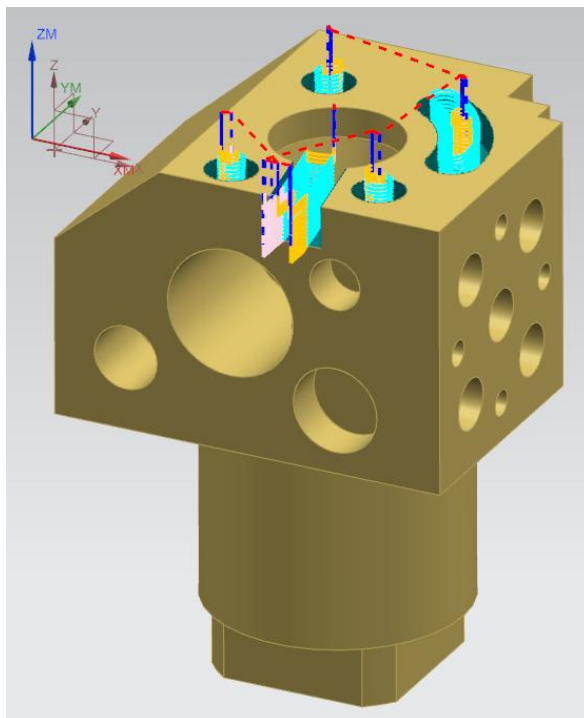
Dokončení válcových ploch bylo opět provedeno strategií Zlevel profile s tím, že pro pohyb mezi různými hladinami osy Z byly také nastaveny nájezdy po spirále.

- Dokončení kuželové plochy

K obrobení kuželové plochy na čisto jsem použil strategii Zlevel profile s nastaveným scallopem na hodnotu 0,01mm. Také zde bylo třeba vymezit výšku obrábění vůči souřadnému systému, protože software měl tendence generovat dráhy také pro přilehlou drážku, což bylo vzhledem ke kulovému nástroji nežádoucí.

- Hrubování malých zahloubení

Hrubování malých zahloubení proběhlo také pomocí strategie cavity mill s nastavenými nájezdy po spirále jako u všech ostatních hrubování.



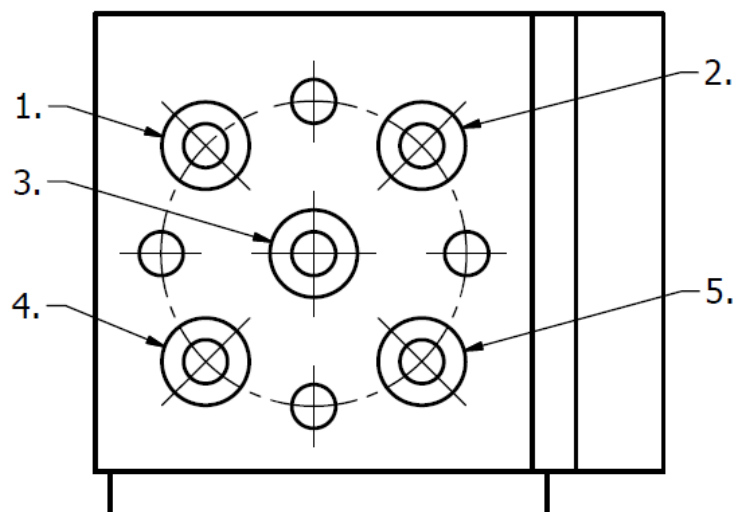
**Obrázek 29: Hrubování malých zahloubení na vrchní ploše tělesa (rovina ZP - NX)**

- Dokončení malých zahloubení

Všechny malá zahloubení byly dohotoveny strategií floor wall se spirálovými nájezdy. V těchto strategiích bylo nutné nastavit IPW, aby nebyly generované dráhy pro celou kapsu, ale aby odebraly pouze materiál zbylý po hrubování.

- Úprava tolerancí

V kapitole o uživatelských úpravách jsem se zmínil o úmyslném vytvoření chybných rozměrů. To bylo realizováno právě při tvorbě drah pro dokončení malých zahloubení. Jednalo se o již zmíněné zahloubení na boku funkční části. Řezné dráhy pro obrobení dvou z těchto dutin (1 a 3) byly naprogramovány běžným způsobem, bez snahy o chybný výsledek, aby během měření mohly sloužit jako srovnávací prvek. Další zahloubení (2) bylo naprogramované se zbytkovým materiálem v řádu tisícín milimetru, čtvrtá dutina předpokládala mírný nájezd do polotvaru nebo pokřivení tvaru a pátá měla být obrobena poškozeným nástrojem. Vzhledem k tomu, že tato možnost byla vyloučena omezeným počtem nástrojových míst, tak jsem nechal tuto dutinu také v původním stavu s možností změnit nastavení, pokud to bude možné. Kvůli možným změnám nastavení byly dráhy pro dokončení zahloubení vytvořeny samostatně.



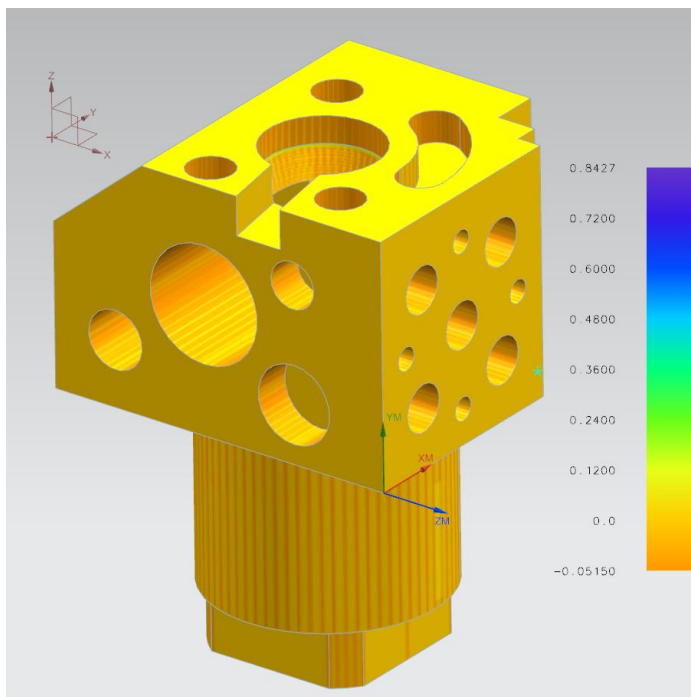
Obrázek 30: Umístění defektů na zahloubeních

#### 5.2.4. Využití PMI dat pro obrábění

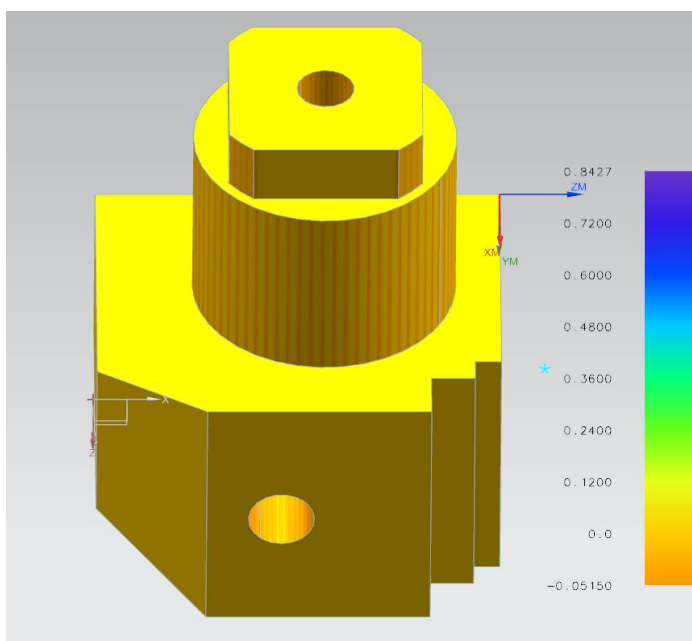
Jak jsem uvedl dříve, tak by tato verze softwaru NX měla být schopná rozpoznat a zpracovat PMI data zanesená v 3D modelu, což se potvrdilo jejich zanesením do knihovny obráběných prvků. Při tvorbě řezných drah však využita nebyla, protože se nepodařilo prokázat jejich přínos. Navíc při tvorbě úseků pro obrobení rovinných částí by tolerance nebyly potřeba vůbec, protože program vygeneroval dráhy pro teoreticky přesnou rovinu. [12]

### 5.2.5. Kontrola partprogramu

Kontrola partprogramu byla provedena pomocí funkce toolpath – verify, kde byla provedena simulace pohybu nástroje během obrábění včetně kontroly sjezdu nástroje do polotvaru a zobrazení povrchu obrobených ploch. Po verifikaci byla spuštěna analýza povrchu obrobku.



Obrázek 31: Analýza povrchu obrobku po ukončení obrábění



Obrázek 32 Analýza povrchu obrobku po ukončení obrábění – pohled zdola

Bez možnosti postprocessingu jsem se rozhodl vytvořit podobný partprogram v jiném softwaru.

### **5.3. Tvorba partprogramu v PowerMillu**

Partprogram vytvořený v PowerMillu je již zmíněný univerzální partprogram pro realizaci výrobního postupu. Partprogram se skládá ze dvou adresářů – jedna část byla určena pro obrobení válcové části a druhá byla určena pro obrobení funkční části zkušebního tělesa. Adresář obsahující řezné dráhy určené pro obrobení funkční části byl určený pouze pro frézovací centrum, ale druhý adresář lze použít jak pro frézovací centrum, tak pro frézku VNC – v souladu s daným výrobním postupem.

Stejně jako v softwaru NX jsem i zde řadil jednotlivé strategie za sebou podle nástrojů (samozřejmě s ohledem na výrobní postup), aby nedocházelo k časovým prodlevám při zbytečných výměnách nástroje. U všech frézovacích strategií jsem i zde také ponechal nastaveno sousledné frézování kvůli snížení opotřebení nástrojů.

#### **5.3.1. Pracovní roviny**

Pracovní roviny (ekvivalent souřadných systémů v NX) jsem v PowerMillu vytvořil podle stejné metodiky jako u programu v NX. Aby tvorba partprogramu zůstala co nejpřehlednější, tak byly pracovní roviny umístěné a orientované úplně stejně jako souřadné systémy.

Pracovní roviny v PowerMillu jinak slouží nejen k určení natočení součásti vůči stroji, ale slouží i jako jeden z klíčových parametrů při tvorbě hranic, křivek, 2D prvků a děr. Při programování tak bylo třeba mít neustále přehled o aktivní pracovní rovině, aby tak bylo zajištěno správné nastavení všech výše zmíněných složek partprogramu.

#### **5.3.2. Hranice**

Tvorba hranic v softwaru PowerMill je jeden ze způsobů označení ploch na modelu součásti určených k obrobení. Pokud není hranice vytvořena, tak se vygenerují dráhy pro celou součást. Na rozdíl od softwaru NX, kde stačí po zvolení strategie dané plochy označit, tak v PowerMillu je třeba nejprve vytvořit hranici, ve které se bude určitý nástroj v určité pracovní rovině pohybovat (v okolí vybraných ploch). Vytvořená hranice se pak zvolí po určení strategie.

Bylo také třeba, aby nástroj a aktivní pracovní rovina obráběcí strategie byly stejné jako nástroj a pracovní rovina hranice.

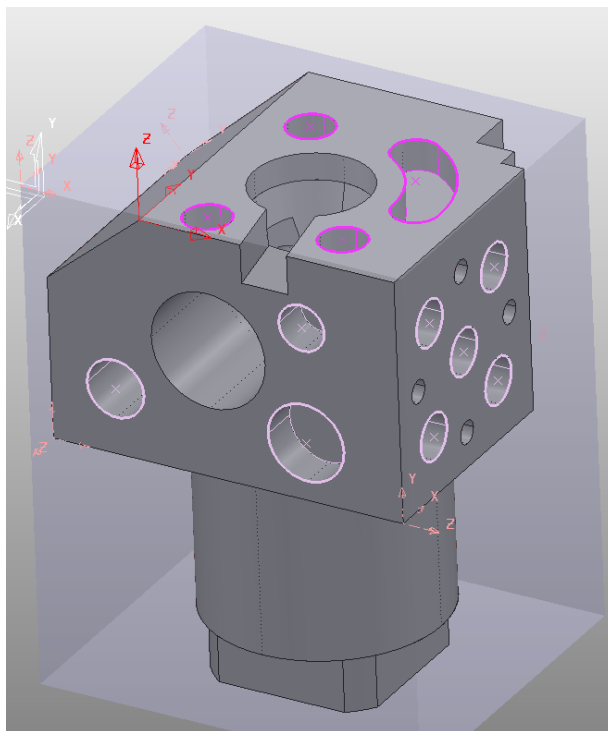
Plochy definující hranici mohou být označeny několika způsoby – v tomto případě jsem vytvářel hranice označením ploch, označením křivek, které tvořily hranici plochy, nebo vytvořením offsetu kolem označené plochy.

Uživatelsky byl tento způsob označování obráběných ploch více pracný než v NX. Kromě samotné tvorby hranic, kdy je třeba mít vždy správně určené aktivní pracovní rovinu a nástroj, jsou tyto hranice také málo přizpůsobivé vůči opravám – obvykle po opětovném otevření a odemčení je třeba vytvořit celou hranici znovu. [31]

### 5.3.3. 2D prvky

Hranice jsem použil převážně na generování drah u velkých ploch a rovin. Na tvorbu drah pro obrobení kruhových zhloubení na funkční části jsem použil k označení ploch 2D prvky.

2D prvky jsou vlastně útvary, které lze promítnout na rovinu a jejichž objem je vlastně vytvořen protažením 2D průmětu do třetího směru. [31]



Obrázek 33: 2D prvky (zvýrazněné bíle a růžově)

### 5.3.4. Díry

Díry a jejich označení se řídí podobnými pravidly jako označení a použití 2D prvků. Díry určené k vrtání lze vytvořit buď ručně - označením části modelu, nebo je lze všechny nechat označit softwarem pomocí analýzy modelu součásti a jejího nastavení. Lze například nastavit, aby se díra zobrazila i do středu kruhové geometrie, která dosahuje alespoň minimálního zadaného úhlového rozsahu.

### 5.3.5. Obráběcí strategie

Rozdělení obráběcích strategií, včetně jejich druhů a umístění na modelu tělesa, se co nejvíce blíží partprogramu vytvořenému v NX.

#### 5.3.5.1. Válcová část:

- Hrubování

Pro hrubování válcové části jsem použil strategii pro hrubování modelu. Podobně jako v softwaru NX jsem nastavil co největší úběr materiálu a omezil hrubování do hloubky 64mm pod aktuální pracovní rovinou.

- Dokončení válcové plochy

Pro dokončení válcové plochy jsem použil strategii dokončení v hladině Z – ekvivalent Zlevel profile, také určenou pro obrábění strmých nebo svislých ploch. Do tohoto úseku bylo zahrnuto i dokončení osazení.

- Zarovnání čela

Zarovnání čela bylo vytvořeno pomocí strategie dokončení řádkováním upravené na jeden přejezd nástroje.

- Předvrtání a vrtání díry

Předvrtání a následné vrtání díry bylo naprogramované se strategiemi vrtání a hluboké vrtání.

#### 5.3.5.2. Funkční část:

- Hrubování rovinných ploch

Pro hrubování většiny rovin jsem použil strategii dokončení řádkováním s podobným nastavením jako v NX. Jen u dvou nakloněných rovin jsem nechal

klasické hrubování modelu s tím, že bylo omezené hranicí a bylo zredukované na co nejkratší řez

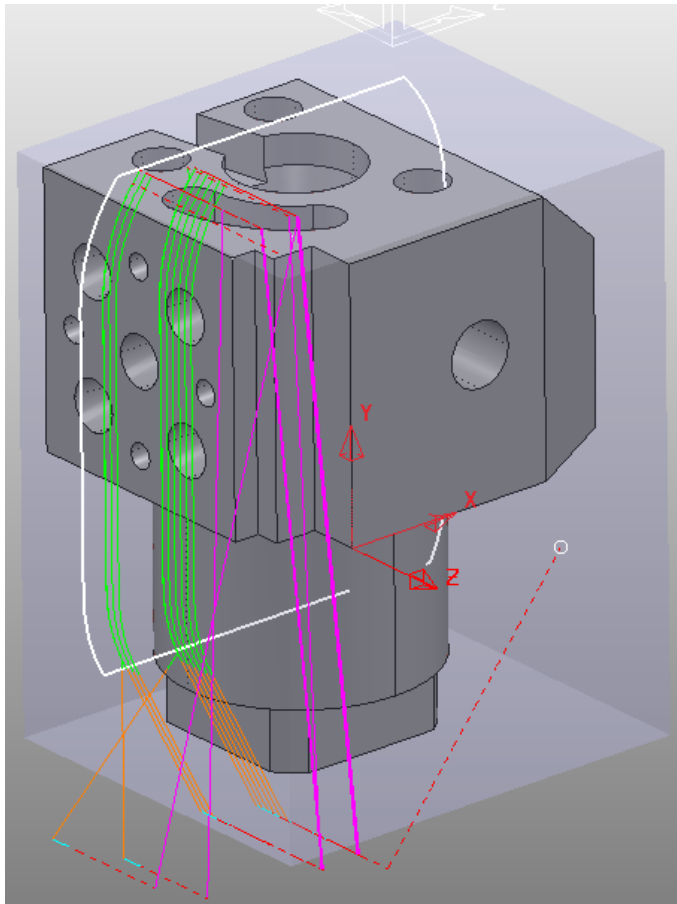
- Dokončení rovinných ploch

Dokončení ploch bylo vytvořeno pomocí strategie dokončení řádkováním. Tuto strategii už bylo možné upravit na jediný přejezd nástroje, podobně jako v softwaru NX.

- Frézování zubu

Pro obrobení osazení na hraně polotvaru bylo nejprve nutné upravit jeho hranice ofsetem se vzdáleností rovnou poloměru aktivního nástroje – tedy 40mm, aby došlo ke generování řezných drah podle hrubovací strategie.

Následovalo obrobení na čisto podle strategie dokončení v hladině Z. Tato část partprogramu se od verze v NX liší také tím, že byla provedena v jiném souřadnicovém systému, respektive pracovní rovině. K této změně došlo v důsledku komplikací s vytvářením vhodné hranice.



Obrázek 34: Dráhy pro obrobení drážky na čisto (PowerMill)



- Vrtání děr

Vrtání děr bylo naprogramováno pomocí strategie vrtání ve třech krocích – předvrtání děr v malých zahloubeních a vrtání děr s hloubkou 10 a 16mm. Na rozdíl od partprogramu NX jsem vynechal předvrtávání zahloubení na vrchu polotvaru, protože po každém uložení souboru docházelo k chybě při definici děr.

- Hrubování zahloubení (Ø30mm)

Pro hrubování zahloubení jsem použil klasickou strategii hrubování modelu, s malým krokem po ose Z. Ve všech strategiích byl nastaven nájezd pod úhlem.

- Dokončení zahloubení (Ø30mm)

Pro dokončení zahloubení jsem také použil strategii dokončení v hladině Z. Podobně jako při hrubování byl ve všech strategiích nastaven nájezd pod úhlem.

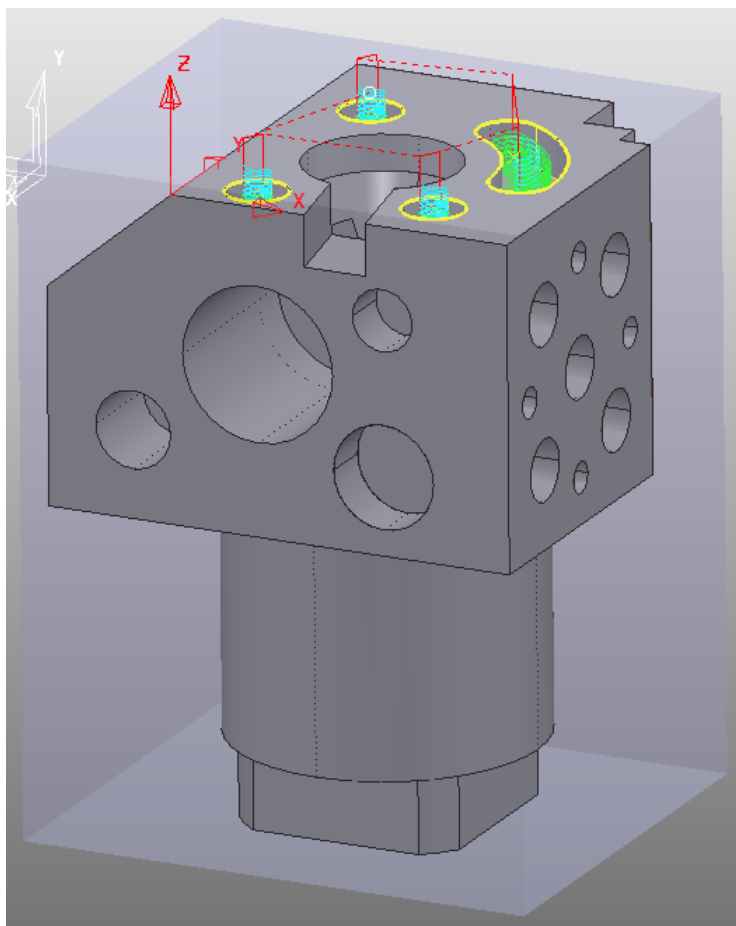
Podobně jako tato zahloubení bylo naprogramováno i obrobení drážky široké 12mm na vrchu součásti, protože se nedala definovat jako 2D prvek jako ostatní malá zahloubení.

- Dokončení kuželové plochy

Dokončení kuželové plochy bylo naprogramováno pomocí strategie dokončení v optimalizované hladině Z. Tento obráběcí úsek byl rozdělen na dvě části – jedna byla určená pro obrobení kuželové plochy a druhá pro obrobení stražení hrany díry pro šroub. Oddělené byly proto, aby bylo možné reagovat na případné nedostatečné vyložení kulové frézy Ø12mm, které by mělo být alespoň 60mm. Pokud by vyložení bylo kratší, tak by šlo obrobení hrany vypnout.

- Hrubování zahloubení (Ø15 a 12mm)

Pro hrubování zahloubení jsem použil strategii hrubování kapsy, která je určená pro obrábění těchto prvků. Ve všech strategiích byl nastaven nájezd pod úhlem.



**Obrázek 35: Hrubování zahloubení na vrchní ploše tělesa (rovina ZP - PowerMill)**

- Dokončení zahloubení ( $\varnothing 15$  a  $12\text{mm}$ )

Pro dokončení zahloubení jsem také použil strategii určenou k obrábění dutin s názvem profil kapsy. Podobně jako při hrubování byl ve všech strategiích nastaven nájezd pod úhlem.

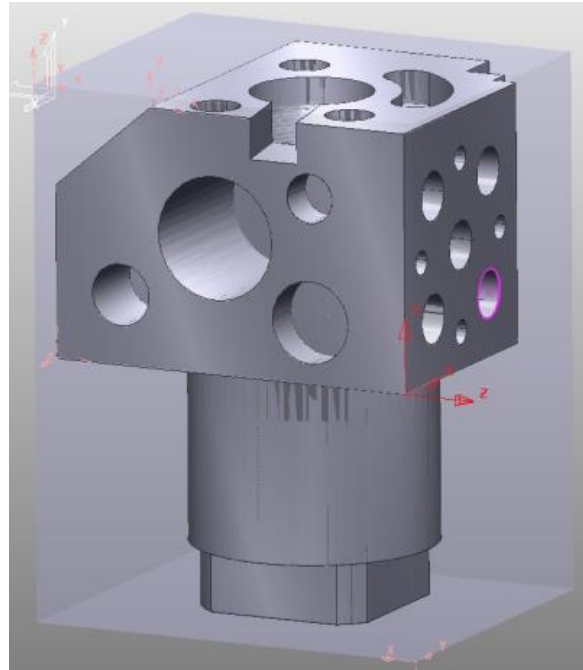
Kvůli možné úpravě strategie pro nesplnění tolerancí byly dokončovací operace pro 5 vybraných zahloubení naprogramovány samostatně.

- Úprava tolerancí

Úprava tolerancí v PowerMillu byla provedena stejným způsobem jako v softwaru NX.

### 5.3.6. Kontrola partprogramu

Pro kontrolu partprogramu jsem provedl simulaci pohybu nástroje po obrobku včetně úběru materiálu pomocí funkce ViewMill



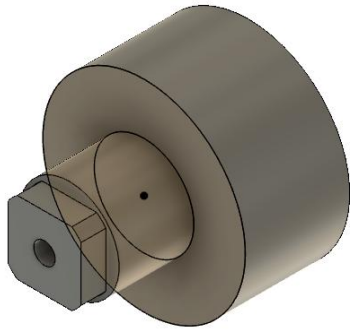
Obrázek 36: Obrobek po skončení všech operací

## 5.4. Tvorba partprogramu Fusion 360

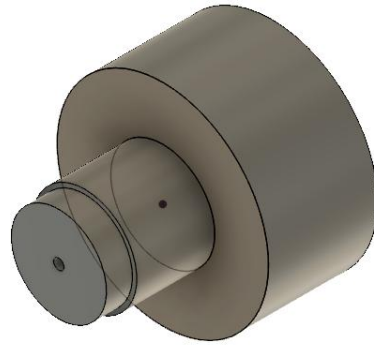
### 5.4.1. Úprava modelu

V softwaru Fusion 360 jsem vytvářel program pouze pro obrobení válcové části tělesa a to soustružením. Konkrétně šlo o vytvoření partprogramu ke třetí operaci druhého výrobního postupu – soustružení hranatého polotvaru a frézování osazení. Většina softwarů však bere jako vstupní data pro tvorbu partprogramu do soustruhu pouze 2D průmět nebo řez obrobku, což vyžaduje import osově symetrického modelu.

Pro vytvoření partprogramu jsem tak použil dvě tělesa. Nejprve jsem upravil model tělesa tak, aby byl osově symetrický – vlastně šlo o vymazání hran u osazení a celá funkční část byla nahrazena válcem dost velkým na to, aby ji celou zakryl. Pak jsem vytvořil kopii na stejném místě – kopie nebyla vůči původnímu modelu ani posunutá ani natočená. Na této kopii jsem pak obnovil čtvercový průřez osazení. Při tvorbě řezných drah jsem pak přepínal mezi těmito tělesy – kopie byla určená pro tvorbu frézovacích drah a upravený model pro soustružení. [21]



**Obrázek 38:** Kopie tělesa určená pro programování frézovacích operací



**Obrázek 37:** Model tělesa určený pro programování soustružnických operací

### 5.4.2. Nastavení polotvaru

Stojí za povšimnutí, že jako vstup je třeba při tvorbě partprogramu použít osově symetrický model, ale polotvar už je možné definovat jinak. Vytvořit hranatý polotvar, který s obrobkem nesdílí osu symetrie a má celkově odlišný charakter, byla jedna z velkých výhod programování v softwaru Fusion 360. Po spuštění nastavení polotvaru se v nabídce samozřejmě jako první objevil tyčový polotvar, ale ten se dal posléze přenastavit na asymetrický blok definovaný jako ofset hranic obrobku ve směru hlavních os (X, Y, Z).

### 5.4.3. Obráběcí strategie

#### 5.4.3.1. Válcová část:

- Hrubování

Hrubování jsem vytvořil podélným řádkováním s příslušným nastavením řezných podmínek.

- Dokončení válcové plochy

Soustružení kontury válcové části bylo provedeno stejnou strategií jako hrubování, ale s odlišným nastavením.

- Zarovnání čela

Pro zarovnání čela jsem použil k tomu určenou strategii ve dvou krocích s odlišným nastavením pro hrubování a obrábění na čisto.

- Vrtání díry

V tomto případě bylo možné rovnou vrtat díru  $\varnothing 13\text{mm}$ , protože k předvrtání už došlo dříve při tvorbě středícího důlku. Jako strategii jsem opět použil standardní vrtání s nastavenými průběžnými výjezdy.

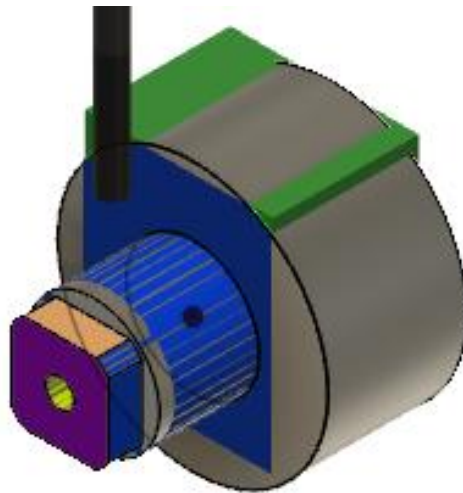
- Dokončení osazení

Dokončení osazení tvoří 4 totožné dráhy s odlišným naklopením po  $90^\circ$ . V tomto softwaru nebylo nastavení souřadných systémů tak transparentní jako v předchozích případech, takže natočení nástroje vůči obrobku bylo třeba programovat až po spuštění strategie.

Jako strategii pro vytvoření řezných drah jsem použil jednoduché 2D frézování s postupným krokem v ose Z a se spirálovým nájezdem.

#### 5.4.4. Kontrola partprogramu

Kontrolu partprogramu jsem provedl pomocí funkce simulate – simulace pohybu nástroje po obrobku včetně úběru materiálu.



Obrázek 39: Zobrazení obrobené části polotvaru

## 6. Dosažené výsledky a jejich diskuze

### 6.1. Zhodnocení projektu

Z celé řady úkolů této práce se podařilo splnit úpravu modelu tělesa, tvorbu výrobního postupu a tvorbu partprogramů v softwarech NX, PowerMill a Fusion 360, potřebných k jeho realizaci, i když k té nakonec nedošlo. Vzhledem k okolnostem připravování výroby mi nezbývá než doporučit, aby se s výrobou počkalo, dokud nenabude dostatečnou prioritu vůči ostatním realizovaným projektům a dokud se frézovací centrum OKUMA MU 400V II dostatečně nezařadí do běžného provozu včetně příslušenství (nástrojů a nástrojových držáků) a softwarové podpory (funkční postprocesor pro NX).

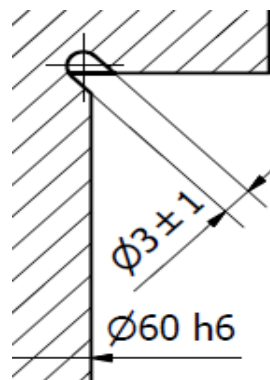
### 6.2. Doporučení pro další úpravy a optimalizaci

Při opětovném plánování výroby zkušební tělesa by mohlo dojít k následujícím úpravám nebo změnám jak 3D modelu, tak výrobního postupu. V některých případech jde o změny jasně určené, ale jinak jde spíše o naznačení dalšího vývoje.

#### 6.2.1. Úpravy modelu

Jednou z možných úprav modelu je vytvoření zápichu mezi válcovou plochou a funkční částí. Buď by se dal vytvořit soustružením pomocí zapichovacího nože, nebo kulovou frézou malého průměru (maximálně 4mm) 5D frézováním. Došlo by tak k oddělení válcové a rovinné plochy, které by se pak daly obrábět (na čisto) samostatně bez vzájemného ovlivnění.

Tato možnost by pak kromě úpravy modelu vyžadovala ještě určení a nadefinování dalšího rezného nástroje do partprogramů – již zmíněný zapichovací nůž nebo monolitní kulová fréza do  $\varnothing 4\text{mm}$ . Použití kulové frézy by však vyžadovalo rozšíření kapacity nástrojů frézovacího centra. Také by musela mít dostatečně dlouhé vyložení, aby nedošlo ke kolizi držáku s obrobkem.



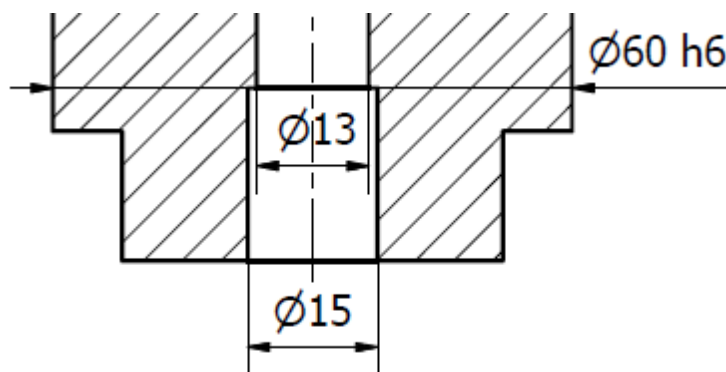
Obrázek 40: Zápich na válcové ploše

Další možnost úpravy 3D modelu spočívá ve způsobu připevnění tělesa v pracovním prostoru souřadnicového měřicího stroje. Pokud by v dohledné době nebylo možné přidat více držáků do frézovacího centra, tak by se díra pro šroub mohla vytvořit, podobně jako ostatní zahloubení, frézováním.

V tom případě by se buď musel použít větší šroub (pokud by to bylo možné) nebo by se musela upravit poloha zhloubení pro hlavu šroubu, aby se zkrátila délka díry. Větší šroub by znamenal větší průměr, což by umožnilo použít frézu  $\varnothing 12\text{mm}$ . Současná nadefinovaná dostupná fréza má ale jen 45mm dlouhé ostří, takže by bylo vhodné při této úpravě zkrátit také délku díry.

Délka díry by se mohla zkrátit následujícími způsoby:

- Zkrácením celé válcové plochy včetně osazení (které by však i po zkrácení mělo na tělese zůstat). Tato změna by byla patrně největší, protože by znamenala značnou změnu v partprogramech – změnily by se rozměry polotvaru a většina řezných drah na válcové části. Míra zkrácení válce také záleží na požadavcích Ústavu obrábění na hotový produkt – aby na tělese zůstala dostatečně velká měřitelná válcová plocha.
- Vytvořením zhloubení na konci díry na spodní ploše tělesa. Toto zhloubení by mohlo být jen o několik milimetrů širší než samotná díra a pouze by zajistilo, aby se dřík nástroje neotíral o stěny při dokončování. Limitem pro rozměry zhloubení by pak byla délka vyložení frézy, která by obráběla díru.



Obrázek 41: Zhloubení na konci díry pro připevnění

- Snížením zahloubení pro hlavu šroubu. I tato úprava by byla omezena maximálním možným vyložením frézy, která by obráběla toto zahloubení shora. Tato varianta, ale není pro současné složení nástrojů moc vhodná, protože fréza  $\varnothing 16\text{mm}$ , která by byla použita pro frézování tohoto zahloubení, nedisponuje dostatečnou rezervou délky vyložení. Navíc by pak vznikl problém s obráběním sražení hrany v ústí díry, opět kvůli těmto nedostatečným dispozicím nástroje.

Pokud by se těmito způsoby podařilo zkrátit díru pro upevnění (aniž by přitom těleso nepřestalo odpovídat požadavkům konečných uživatelů) až na 19mm a méně, tak by bylo možné vytvořit díru frézou  $\varnothing 6\text{mm}$ , aniž by se musel měnit její průměr. Tak by složení nástrojů mohlo zůstat stejné a jejich počet by pak souhlasil i s počtem nástrojových míst na frézovacím centru.

Nedostatečný počet nástrojových míst by se dal také vyřešit kompletním přesunem výroby na soustruh Okuma Genos L200E-M. Při tomto přesunu by se mohla z modelu odstranit jedna z šikmých ploch na funkční části. Bylo by opět na uživatelích, jestli by se mělo vyrobít zkušební těleso s horším povrchem na jedné rovinné ploše nebo zcela bez této plochy.

### 6.2.2. Úpravy nástrojů

Před začátkem výroby bude nutné nejprve určit dostupný vrták  $\varnothing 13\text{mm}$ , který jsem nadefinoval podle katalogu výrobce ostatních nástrojů na základě konzultací s pracovníky střediska obráběcích CNC strojů na Ústavu obrábění.

Jinak úpravy nástrojů ve výrobním postupu souvisí převážně s již několikrát zmíněným nedostatkem nástrojových míst, respektive s nedostatečným počtem držáků, na frézovacím centru. Pokud by se při pořizování dalších držáků mělo přihlídnout i k této výrobě zkušební tělesa, tak by priority pro upínání dalších nástrojů mohly vypadat přibližně takto:

- Vrták  $\varnothing 13\text{mm}$
- Frézovací hlava  $\varnothing 120\text{mm}$  s břitovými destičkami určenými na obrábění hliníkových slitin (místo současné  $\varnothing 80\text{mm}$ )
- Vrták  $\varnothing 3,5\text{mm}$  (při použití tohoto vrtáku by bylo třeba upravit poloměr daných děr do původního stavu)
- Pokud by volných nástrojových míst bylo více než 8, tak by se mohla použít lehce poškozená nebo opotřebovaná fréza  $\varnothing 6\text{-}8\text{mm}$  na obrobení



jednoho z pěti zahloubení určených k měření správných a chybných rozměrů.

- Použití dalších nástrojů už není nezbytně nutné – mohla by se například použít větší fréza ( $\varnothing 8-10\text{mm}$ ) pro výkonnější obrábění malých a středně velkých zahloubení ( $\varnothing 12-20\text{mm}$ , hloubka do  $20\text{mm}$ )

Další možná úprava nástrojů by mohla spočívat ve výměně destiček na fréze  $\varnothing 80\text{mm}$  za destičky určené pro obrábění neželezných kovů.

Při použití frézovací hlavy  $\varnothing 120\text{mm}$  by bylo nutné (jelikož se jedná o čelní frézu) změnit nástroj v partprogramu, kdy před tím bylo použita fréza  $\varnothing 80\text{mm}$  k obrábění rohů.

Další úprava nástrojů by byla nutná při výrobě tělesa na CNC soustruhu, protože i zde nejsou dva nástroje určené podle dostupnosti (v důsledku odložení výroby). Jde o dva soustružnické nože – jeden k hrubování a druhý k obrobení kontury. Se změnou nástroje by se pravděpodobně mohly změnit i řezné podmínky.

### 6.2.3. Úpravy partprogramu

Úpravy partprogramu jsou podmíněné hlavně všem ostatním úpravám, protože je vyžaduje většina výše uvedených změn. Pokud bude úspěšně zprovozněn postprocesor pro NX, tak by bylo vhodné všechny úpravy provádět v tomto CAM systému, především úpravy modelu.

I když byly všechny hotové partprogramy podrobené ověření, tak by také bylo vhodné odsimulovat všechny vygenerované NC kódy.

Při výrobě tělesa soustružením bude třeba nadefinovat ve Fusionu 360 nové nástroje a problematický může být i naprogramovaný příjezd a odjezd koníka, nutného k podpoření stability obrobku. Tento pokyn by však mohl jít vyřešit i pomocí dílenského programování nebo vepsáním příkazů přímo do hotového NC kódu.

Další úpravy partprogramu by mohly nastat po první realizované výrobě zkušebního tělesa. V tom případě by bylo možné optimalizovat řezné podmínky a zvolené strategie na základě vyhodnocení kvality povrchu a rozměrové přesnosti tělesa.

## 7. Závěr

Cílem této práce bylo provést na zadaném tělese úpravy dané konečným uživatelem, naplánovat jeho výrobu a tu následně realizovat a zhodnotit.

Na modelu tělesa jsem podle zadaného požadavku vytvořil díru pro připevnění tak, aby procházela osou válcové části tělesa a přitom příliš nezasahovala do ostatních měřitelných prvků a ploch. Dále jsem na tělese vytvořil osazení, jako místo pro uchycení tělesa během obrábění, a několik dalších technologických úprav se zřetelem na to, aby celkový vzhled a všechny měřitelné prvky (prvky a rozměry tolerované PMI daty) tělesa zůstaly zachovány.

Po té jsem vytvořil tři varianty výrobních postupů pro výrobu tělesa pomocí dostupných zdrojů (strojů, nástrojů a CAM softwaru) na Ústavu obrábění. První výrobní postup, respektive první varianta, byl určený k demonstraci možností frézovacího centra Okuma MU 400V II (ukázka 3+2D obrábění). Druhý výrobní postup byl vytvořen pro okamžitě proveditelnou výrobu a zaměřený na kvalitu obrobku, počítal s využitím frézovacího centra Okuma MU 400V II a CNC soustruhu OKUMA Genos L200E-M. Třetí výrobní postup byl také vytvořený pro proveditelnou výrobu, jako jednodušší alternativa druhého postupu s menším důrazem na výslednou kvalitu povrchu, a počítal s využitím frézovacího centra Okuma MU 400V II a CNC frézky VNC 500.

Pro realizaci výroby na CNC strojích jsem vytvořil partprogramy v softwarech NX, PowerMill a Fusion 360. Software NX současně umožňoval tvorbu partprogramu a úpravy 3D modelu, což jsem využil při realizaci technologických úprav. PowerMill měl na rozdíl od NX funkční postprocesor, takže jsem ho použil k napodobení partprogramu z NX, a Fusion 360 umožnil vytvoření partprogramu pro soustružení válcové plochy na nerotační součásti z hranatého asymetrického polotvaru, což je pro technologii soustružení (a i pro její programování) dost atypická aplikace.

Součástí zadaného modelu byly PMI data, která sice software NX dokázal rozpoznat a zanást do knihovny obrobekových prvků, ale jinak se nepodařilo prokázat jejich přínos pro obrábění. Přínos PMI dat by tak mohl spočívat až při automatické tvorbě plánu měření pro hotové těleso.

Po odkladu výroby tělesa jsem do práce zařadil i doporučení pro budoucí výrobu, která spočívala hlavně ve vyřešení problémů s nástroji, které měly podíl na výše zmíněném odkladu. Konkrétně šlo o rozšíření nástrojových míst u frézovacího centra Okuma MU 400V II, aktualizaci nástrojů u CNC soustruhu Okuma Genos L200E-M a úpravu tělesa tak, aby bylo možné použít aktuální paletu nástrojů.

## Seznam použité literatury:

- [1] ŠTULPA, Miloslav. *CNC: programování obráběcích strojů*. Praha: Grada, 2015. ISBN 978-80-247-5269-3.
- [2] MAREK, Jiří. *Konstrukce CNC obráběcích strojů III*. Praha: MM publishing, 2014. MM speciál. ISBN 978-80-260-6780-1.
- [3] MÁDL, Jan a Ivo KVASNIČKA. *Optimalizace obráběcího procesu*. Praha: České vysoké učení technické, 1998.
- [4] LEINVEBER, Jiří a Pavel VÁVRA. *Strojnické tabulky: pomocná učebnice pro školy technického zaměření*. 5., upr. vyd. Úvaly: Albra, 2011. ISBN 9788073610814.
- [5] KOLÁŘ, Jan. Konstrukční řešení současných obráběcích strojů. *MM Průmyslové spektrum*. 2007, (3), 64. ISSN 1212-2572.
- [6] SVOBODA, Ondřej. Víceosé obrábění - optimální směr pro růst průmyslu?. *MM Průmyslové spektrum*. 2011, (12), 50. ISSN 1212-2572.
- [7] VAVARUŠKA, Petr. Aktuální přístupy pro zvyšování produktivity třískového obrábění *MM Průmyslové spektrum*. 2018, (6), 40. ISSN 1212-2572.
- [8] Nové obrobitelné slitiny hliníku bez olova. *MM Průmyslové Spektrum*. 2001,(7), 46. ISSN 1212-2572.
- [9] SADÍLEK, Miroslav. Postprocessor - slabé místo CAM systémů?. *MM Průmyslové spektrum*. 2005, (4), 46. ISSN 1212-2572.
- [10] *TPV Group* [online]. 2015 [cit. 2019-07-1]. Dostupné z: <https://www.tpvgroup.cz/nx-cam>
- [11] MBE PMI Validation and Conformance Testing Project. *NIST* [online]. HEADQUARTERS 100 Bureau Drive Gaithersburg, 4. 10. 2018 [cit. 2019-07-1]. Dostupné z: <https://www.nist.gov/el/systems-integration-division-73400/mbe-pmi-validation-and-conformance-testing-project>
- [12] Produktová oblast: Náповěda k NX 12. *SIEMENS PLM* [online]. 5800 Granite Parkway, Suite 600, Plano, TX 75024 USA, 2019, 2018 [cit. 2019-07-1]. Dostupné z: [https://docs.plm.automation.siemens.com/tdoc/nx/12/nx\\_help#uid:index](https://docs.plm.automation.siemens.com/tdoc/nx/12/nx_help#uid:index)
- [13] Náповěda pro SOLIDWORKS: SOLIDWORKS MBD. *SolidWorks Web Help* [online]. 1995, 2019 [cit. 2019-07-1]. Dostupné z: [http://help.solidworks.com/2019/czech/SolidWorks/sldworks/c\\_solidworks\\_mbd.htm?verRedirect=1](http://help.solidworks.com/2019/czech/SolidWorks/sldworks/c_solidworks_mbd.htm?verRedirect=1)
- [14] Nástroje. *Sandvik Coromant* [online]. 2019 [cit. 2019-07-1]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/products/pages/tools.aspx>

- [15] Milling. *Kennametal* [online]. 1600 Technology Way, Latrobe PA, 15650, 2019, 2019 [cit. 2019-07-1]. Dostupné z: <https://www.kennametal.com/en/products/20478624/57493250.html>
- [16] Pramet katalog 2018. *Dormer Pramet* [online]. 2018 [cit. 2019-07-1]. Dostupné z: [https://www.dormerpramet.com/downloads/dormer%20catalogue%202018\\_updated\\_set%204\\_cz-ru-pl-sk.pdf](https://www.dormerpramet.com/downloads/dormer%20catalogue%202018_updated_set%204_cz-ru-pl-sk.pdf)
- [17] Product and Manufacturing Information (PMI). *SIEMENS PML* [online]. 5800 Granite Parkway, Suite 600, Plano, TX 75024 USA, 2019 [cit. 2019-07-1]. Dostupné z: [https://www.plm.automation.siemens.com/en\\_us/Images/9645\\_tcm1023-4581.pdf](https://www.plm.automation.siemens.com/en_us/Images/9645_tcm1023-4581.pdf)
- [18] PMI Normy a 3D PDF Reporting. *PDF3D* [online]. The Bowler Barn, Bartletts Court, Bath Road Littlewick Green, Maidenhead Berkshire SL6 3RX, U.K., 2003, 1.7.2015 [cit. 2019-07-1]. Dostupné z: <https://www.pdf3d.com/pmi-standards-and-3d-pdf-reporting/>
- [19] MBE PMI Validation and Conformance Testing Project. *NIST* [online]. HEADQUARTERS 100 Bureau Drive Gaithersburg, 4. 10. 2018 [cit. 2019-07-1]. Dostupné z: <https://www.nist.gov/el/systems-integration-division-73400/mbe-pmi-validation-and-conformance-testing-project>
- [20] ESPRIT | Mori Pinch Milling. In: *Youtube* [online]. 30. 6. 2016 [cit. 2019-07-1]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=qsKGD8W4ng>
- [21] CHRISTENSEN, Lars. Setup of Lathe Turning & Mill/Turn — Fusion 360 — And Your Comments & Questions— #LarsLive 63. In: *Youtube* [online]. 22. 9. 2017 [cit. 2019-07-1]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=xGy2FL2ft2w>
- [22] Rollfeed. *WESTCAM* [online]. [cit. 2019-07-1]. Dostupné z: <https://www.westcam.cz/produkty/cam/rollfeed/>
- [23] Soustružení. *ELUC* [online]. 2015 [cit. 2019-07-1]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1218>
- [24] *ELUC* [online]. 2015 [cit. 2019-07-1]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/>
- [25] 3 Aspects of 5-Axis CNC Machining. *Wayken* [online]. Penglongpan Hi-tech Park, Dafu Rd, ShenZhen, China., Sep 03, 2018 [cit. 2019-07-1]. Dostupné z: <https://www.waykenrm.com/5-axis-cnc-machining.html>
- [26] Okuma Genos M460V-5AX. *Misan s.r.o.* [online]. [cit. 2019-07-1]. Dostupné z: <http://www.misan.cz/okuma/katalog-detail/genos-m460v-5ax-okuma-genos-m460v-5ax/?viewpart=2>
- [27] Okuma Genos Series. *Bulmak Metal* [online]. 2015 [cit. 2019-07-1]. Dostupné z: <http://bulmakmetal.com/wp-content/uploads/2016/10/GENOS-L-E-7a-300Mar2015.pdf>
- [28] Technologie obrábění: Používané CNC stroje. *ČVUT Fakulta strojní* [online]. 2014 [cit. 2019-07-1]. Dostupné z: <https://www.fs.cvut.cz/ustavy/sekce-ustav-technologie->

[obrabeni-projektovani-a-metrologie/ustav-technologie-obrabeni-projektovani-a-metrologie-12134/ustav-12134/](http://obrabeni-projektovani-a-metrologie/ustav-technologie-obrabeni-projektovani-a-metrologie-12134/ustav-12134/)

[29] 12 MM CARBIDE END MILL Solid Carbide FIREX. Guhring [online]. 1445 Commerce Avenue Brookfield, WI 53045, 2019 [cit. 2019-07-1]. Dostupné z: <http://www.guhring.com/ProductsServices/SizeDetails?EDP=9030230120000>

[30] *Autodesk Fusion 360* [online]. 2017 [cit. 2019-07-1]. Dostupné z: <https://www.fusion360.cz/>

[31] *PowerMill* [online]. [cit. 2019-07-1]. Dostupné z: <https://www.powermill.cz/>

[32] *Autodesk* [online]. 2019 [cit. 2019-07-1]. Dostupné z: <https://www.autodesk.com/>

[33] STANĚK, Vlastimil. CAD, standardy, rozdělení, možnosti, formáty sdílení dat, překladače (3). *T-support*[online]. 2011 [cit. 2019-07-1]. Dostupné z: <https://www.t-support.cz/kat/cad-standardy-rozdeleni-moznosti-formaty-sdileni-dat-prekladace-3>

[34] TK SOUDEČKOVÁ FRÉZA GARANT PPC. *Hoffmann Group* [online]. [cit. 2019-07-1]. Dostupné z: <https://www.hoffmann-group.com/CZ/cs/hot/company/garant/garant-innovationen/tonnenfraeser-ppc>

## 8. Seznam obrázků

Obrázek 1: Řezná rychlost v závislosti na naklopení frézy [14] .....	12
Obrázek 2: Schéma CNC soustružnického centra se dvěma vřeteny a dvěma nástrojovými hlavami [23] .....	15
Obrázek 3: Možné způsoby konstrukce pětiosých CNC frézek - naklápění vřetena (vlevo) a naklápění stolu - tkzv. kolébka (vpravo) [25] .....	16
Obrázek 4: Ukázka funkcí NX v oblasti CAD [12] .....	18
Obrázek 5: Ukázka funkcí NX v oblasti CAM [12] .....	18
Obrázek 6: Pinch milling - ukázka technologie od společnosti ESPRIT [20] .....	21
Obrázek 7: Druhy soudečkových fréz včetně vhodných aplikací – GARANT [34] .....	22
Obrázek 8: Funkce pro udržení konstantního úhlu opásání (vlevo) a standartní hrubování (vpravo) – SurfCAM [7].....	23
Obrázek 9: Rollfeed - ukázka naklápění nástroje během soustružení – Vanadurit [22] .....	24
Obrázek 10: CAD model zkušební tělesa ZEISS .....	27
Obrázek 11: PMI data – pohled zprava .....	28
Obrázek 12: PMI data – pohled zepředu .....	28
Obrázek 13: PMI data – pohled shora.....	29
Obrázek 14: Zahloubení pro šroub.....	30
Obrázek 15: Umístění osy válce (vlevo) a osy zahloubení (vpravo) vůči funkční části .....	30
Obrázek 16: Výběr prvků určených k demonstraci chybně vyrobených tolerancí .....	31
Obrázek 17: Těleso po provedení všech úprav .....	32
Obrázek 18: Původní model tělesa .....	32
Obrázek 19: Upnutí polotvaru a následné upnutí za osazení .....	37
Obrázek 20: Návrhy průřezu osazení .....	37
Obrázek 21: Umístění obrobku ve válcovitém polotvaru .....	38

Obrázek 22: Umístění obrobku v polotvaru se čtvercovým průřezem .....	39
Obrázek 23: Polotvar s prvkem pro upnutí .....	39
Obrázek 24: Upnutí polotvaru do soustruhu .....	39
Obrázek 25: Mezní rozměry rovinných ploch .....	41
Obrázek 26: Mezní délka vyložení frézy $\varnothing 15\text{mm}$ (svislý řez tělesem).....	42
Obrázek 27: Mezní délky ostří fréz $\varnothing 15$ a $10\text{mm}$ (vodorovný řez tělesem) .....	42
Obrázek 28: Dráhy pro obrobení drážky na čisto (NX).....	58
Obrázek 29: Hrubování malých zahloubení na vrchní ploše tělesa (rovina ZP - NX) .....	59
Obrázek 30: Umístění defektů na zahloubeních .....	60
Obrázek 32 Analýza povrchu obrobku po ukončení obrábění – pohled zdola .....	61
Obrázek 31: Analýza povrchu obrobku po ukončení obrábění.....	61
Obrázek 33: 2D prvky (zvýrazněné bíle a růžově) .....	63
Obrázek 34: Dráhy pro obrobení drážky na čisto (PowerMill).....	65
Obrázek 35: Hrubování zahloubení na vrchní ploše tělesa (rovina ZP - PowerMill) .....	67
Obrázek 36: Obrobenek po skončení všech operací .....	68
Obrázek 37: Model tělesa určený pro programování soustružnických operací .....	69
Obrázek 38: Kopie tělesa určená pro programování frézovacích operací .....	69
Obrázek 39: Zobrazení obrobené části polotvaru.....	70
Obrázek 40: Zápich na válcové ploše .....	71
Obrázek 41: Zahloubení na konci díry pro připevnění .....	72

## 9. Seznam tabulek

Tabulka 1: Okuma MU 400V II - technické údaje .....	33
Tabulka 2: Okuma Genos L200E-M - technické údaje .....	34
Tabulka 3: Frézka VNC 500 - technické údaje.....	36
Tabulka 4: Zvolené typy nástrojů.....	40
Tabulka 5: Vybrané nástroje pro frézovací centrum Okuma MU 400V II.....	43
Tabulka 6: Vybrané nástroje pro soustruh Okuma Genos L200E-M .....	43
Tabulka 7: Vybrané nástroje pro frézku VNC 500.....	43
Tabulka 8: Řezné podmínky doporučené výrobcem .....	44
Tabulka 9: Definitivně určené řezné podmínky .....	45

## Seznam zkratk a symbolů

CAD – Computer aided design (počítačem podporované programování)

CAM – Computer aided manufacturing (počítačem podporované obrábění)

CAE – Computer aided engineering (počítačová podpora inženýrské práce)

CNC – Computer numerical control (počítačem řízený stroj)

$f_z$  – Posuv na zub

$f$  – Posuv

$n$  – Otáčky

$v_c$  – Řezná rychlost

$a_p$  – Axiální hloubka řezu

HSM – High speed machining

HPM – High power machining

$\varnothing$  – průměr

Zkratky formátů CAD a CAM souborů jsou označeny v příslušných státech.

## Seznam příloh

[A] Struktura partprogramu NX a PowerMill	tištěná
[B] Partprogramy z NX, PowerMillu a Fusion 360	elektronická
[C] Model zkušebního tělesa z Inventoru a NX	elektronická

## Přílohy:

Struktura partprogramu v NX						
Část	Prvek	Název	Typ strategie	Nástroj	Čas H:MM:SS	
Válcová část	Polotvar	HRUBOVANI_OSZ	Cavity Mill	Válcová fréza ø80	18:46	
	Tvarová plocha	DOK_OSZ	Zlevel Profile		0:57	
	Rovinná plocha	ZAR_CEL_HRB	Floor Wall		0:15	
	Rovinná plocha	ZAR_CEL_DOK	Floor Wall		0:15	
	Tvarová plocha	DOK_VAL	Zlevel Profile		9:50	
	Díra ø6mm	VRT_DIR_D6	Drilling	Vrták ø6	0:02	
	Díra ø13mm	VRT_DIR_D13	Drilling	Vrták ø13	0:38	
Funkční část	Rovinná plocha	HRUBOVANI_1	Floor Wall	Válcová fréza ø80	1:16	
	Rovinná plocha	DOKONCENI_1	Floor Wall		0:18	
	Rovinná plocha	HRUBOVANI_2	Floor Wall		1:05	
	Rovinná plocha	DOKONCENI_2	Floor Wall		0:13	
	Rovinná plocha	HRUBOVANI_3	Floor Wall		0:18	
	Rovinná plocha	DOKONCENI_3	Floor Wall		0:19	
	Rovinná plocha	HRUBOVANI_4	Floor Wall		0:20	
	Rovinná plocha	DOKONCENI_4	Floor Wall		0:20	
	Rovinná plocha	HRUBOVANI_5	Floor Wall		0:16	
	Rovinná plocha	DOKONCENI_5	Floor Wall		0:17	
	Rovinná plocha	HRUBOVANI_6	Floor Wall		0:16	
	Rovinná plocha	DOKONCENI_6	Floor Wall		0:16	
	Rovinná plocha	HRUBOVANI_7	Floor Wall		0:17	
	Rovinná plocha	DOKONCENI_7	Floor Wall		0:17	
	Rovinná plocha	HRUBOVANI_ZUBU	Cavity Mill		2:41	
	Rovinná plocha	DOKONCENI_ZUBU	Cavity Mill		4:50	
	Díra ø6mm	VRT_DER_ZP	Drilling		Vrták ø6	0:05
	Díra ø6mm	VRT_DER_D6	Drilling			0:14
	Díra ø6mm	VRT_DER_YM	Drilling			0:04
	Tvarová plocha	HRB_DIR_D30	Cavity Mill	Válcová fréza ø16	0:28	
	Tvarová plocha	HRB_KUZ	Zlevel Profile		0:49	
	Tvarová plocha	DOK_ZAHL_D20	Zlevel Profile		0:18	
	Tvarová plocha	HRB_DIR_D30_YM	Cavity Mill		1:14	
	Tvarová plocha	DOK_DIR_D30_YM	Zlevel Profile		0:27	
	Tvarová plocha	DOK_KUZ	Zlevel Profile	Kulová fréza ø12	3:24	
	Zahloubení	HRB_DIR_D15_YM	Zlevel Profile	Válcová fréza ø12	0:04	
	Zahloubení	DOK_DIR_D15_YM	Floor Wall		0:02	
Zahloubení	HRB_DIR_D15_YP	Zlevel Profile	0:08			
Zahloubení	DOK_DIR_D15_YP	Floor Wall	0:03			



	Zahloubení	HRB_DER_ZP	Cavity Mill	Válcová fréza ø6	3:19
	Zahloubení	DOK_DER_ZP	Floor Wall		0:57
	Zahloubení	HRB_DER_YM	Cavity Mill		1:44
	Zahloubení	DOK_DER_YM	Floor Wall		0:11
	Zahloubení	HRB_DER_XP	Cavity Mill		2:35
	Zahloubení	DOK_DER_XP_1	Floor Wall		0:14
	Zahloubení	DOK_DER_XP_2	Floor Wall		0:06
	Zahloubení	DOK_DER_XP_3	Floor Wall		0:06
	Zahloubení	DOK_DER_XP_4	Floor Wall		0:07
Celkový čas					1:02:29

Struktura partprogramu v PowerMillu				
Část	Prvek	Název	Typ strategie	Nástroj
Válcová část	Polotvar	HRB_VAL_ZM	Hrubování modelu	Válcová fréza ø80
	Tvarová plocha	DOK_VAL_ZM	Dokončení v hladině Z	
	Rovinná plocha	DOK_CEL_ZM	Dokončení řádkováním	
	Díra ø6mm	P_VRT_ZM	Vrtání	Vrták ø6
	Díra ø13mm	VRT_ZM	Hluboké vrtání	Vrták ø13
Funkční část	Rovinná plocha	HRB_S	Hrubování modelu	Válcová fréza ø80
	Rovinná plocha	DOK_S	Dokončení řádkováním	
	Rovinná plocha	HRB_S_YP	Hrubování modelu	
	Rovinná plocha	DOK_S_YP	Dokončení řádkováním	
	Rovinná plocha	HRB_ZP	Dokončení řádkováním	
	Rovinná plocha	DOK_ZP	Dokončení řádkováním	
	Rovinná plocha	HRB_YM	Dokončení řádkováním	
	Rovinná plocha	DOK_YM	Dokončení řádkováním	
	Rovinná plocha	HRB_XP	Dokončení řádkováním	
	Rovinná plocha	DOK_XP	Dokončení řádkováním	
	Rovinná plocha	HRB_YP	Dokončení řádkováním	
	Rovinná plocha	DOK_YP	Dokončení řádkováním	
	Rovinná plocha	HRB_XM	Dokončení řádkováním	
	Rovinná plocha	DOK_XM	Dokončení řádkováním	
	Rovinná plocha	HRB_ZUB	Hrubování modelu	
	Rovinná plocha	DOK_ZUB_YP	Dokončení v hladině Z	
	Díra ø6mm	VRT_YM	Vrtání	Vrták ø6
	Díra ø6mm	VRT_XP_H16	Vrtání	
	Díra ø6mm	VRT_XP_H10	Vrtání	
	Tvarová plocha	HRB_DIR_YM	Hrubování modelu	Válcová fréza ø16
	Tvarová plocha	DOK_DIR_YM	Dokončení v hladině Z	
	Tvarová plocha	HRB_DIR_ZP	Hrubování modelu	
	Tvarová plocha	DOK_DIR_ZP_1	Dokončení v hladině Z	

	Tvarová plocha	DOK_DIR_ZP_2	Dokončení v optimalizované hladině Z	Kulová fréza $\varnothing 12$
	Tvarová plocha	DOK_UKOS_ZP	Dokončení v optimalizované hladině Z	
	Zahloubení	HRB_ZAHL_YM	Hrubování kapsy	Válcová fréza $\varnothing 12$
	Zahloubení	DOK_ZAHL_YM	Profil kapsy	
	Zahloubení	HRB_ZAHL_YP	Hrubování kapsy	
	Zahloubení	DOK_ZAHL_YP	Profil kapsy	
	Zahloubení	HRB_ZAHL_ZP	Hrubování kapsy	Válcová fréza $\varnothing 6$
	Zahloubení	DOK_ZAHL_ZP	Profil kapsy	
	Rovinná plocha	HRB_DRAZ_ZP	Hrubování modelu	
	Rovinná plocha	DOK_DRAZ_ZP	Dokončení v hladině Z	
	Zahloubení	HRB_ZAHL_2_YM	Hrubování kapsy	
	Zahloubení	DOK_ZAHL_2_YM	Profil kapsy	
	Zahloubení	HRB_DIR_XP	Hrubování kapsy	
	Zahloubení	DOK_XP_D1	Profil kapsy	
	Zahloubení	DOK_XP_D2	Profil kapsy	
	Zahloubení	DOK_XP_D3	Profil kapsy	
	Zahloubení	DOK_XP_D4	Profil kapsy	