

Využití CAM při výrobě součásti

Slavomír Migota

Bakalářská práce
2017



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2016/2017

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Slavomír Migota**
Osobní číslo: **T14603**
Studijní program: **B3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Technologická zařízení**
Forma studia: **kombinovaná**

Téma práce: **Využití CAM při výrobě součásti**

Zásady pro vypracování:

1. Teoretická část:
2. Frézování
3. Číslicově řízené výrobní stroje
4. CAM systémy
5. Experimentální část:
6. Návrh a tvorba modelu vyráběného dílu
7. CNC programování a volba řezných podmínek
8. Výroba navrhnutého modelu
9. Vyhodnocení a zpracování výsledků

Rozsah bakalářské práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

Dle doporučení vedoucího práce.

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Lukáš Mañas

Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání bakalářské práce:

2. ledna 2017

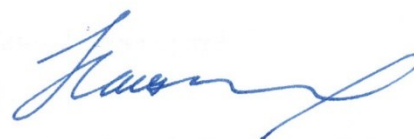
Termín odevzdání bakalářské práce:

19. května 2017

Ve Zlíně dne 31. ledna 2017



doc. Ing. František Buňka, Ph.D.
děkan



prof. Ing. Berenika Hausnerová, Ph.D.
ředitel ústavu

Příjmení a jméno: Migota Slavomír

Obor: Technologická zařízení

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby ¹⁾;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3 ²⁾;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně 16.5.2017

Migota

¹⁾ Zákon č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, § 47 Zveřejňování závěrečných prací:

(1) Vysoká škola nevydělečně zveřejňuje disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce, u kterých proběhla obhajoba, včetně posudků oponentů a výsledku obhajoby prostřednictvím databáze kvalifikačních prací, kterou spravuje. Způsob zveřejnění stanoví vnitřní předpis vysoké školy.

(3) Do práva autorského také nezasahuje škola nebo školské či vzdělávací zařízení, užije-li nikoli za účelem přímého nebo nepřímého hospodářského nebo obchodního prospěchu k výuce nebo k vlastní potřebě dílo vytvořené žákem nebo studentem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či vzdělávacímu zařízení (školní dílo).

³⁾ zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 60 Školní dílo:

(1) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení mají za obvyklých podmínek právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla (§ 35 odst. 3). Odpirá-li autor takového díla udělit svolení bez vážného důvodu, mohou se tyto osoby domáhat nahrazení chybějícího projevu jeho vůle u soudu. Ustanovení § 35 odst. 3 zůstává nedotčeno.

(2) Není-li sjednáno jinak, může autor školního díla své dílo užít či poskytnout jinému licenci, není-li to v rozporu s oprávněnými zájmy školy nebo školského či vzdělávacího zařízení.

(3) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení jsou oprávněny požadovat, aby jim autor školního díla z výdělku jím dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence podle odstavce 2 přiměřeně přispěl na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložily, a to podle okolností až do jejich skutečné výše; přitom se přihlédne k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

ABSTRAKT

Bakalářská práce je zaměřena na programování a výrobu dutiny, která je negativem hrací figurky na stolní fotbal.

V teoretické části se zabývá popisem technologie frézování, obecně číslicově řízenými stroji a CAM systémy.

Praktická část obsahuje tvorbu CAD modelu výrobku, jeho programování v CAM programu PowerMill Pro 2016 a nakonec i samotnou výrobu dvou částí dutiny s různým nastavením a porovnáním celkových časů na pětiosém stroji Hermle C20U.

Klíčová slova: frézování, výrobní stroje, CAM, CAD, fréza, frézka, programování, výroba, nástroje

ABSTRACT

This bachelor manual work wants to show programming and production of a hollow, which is a negative of a playing figure for a desk football.

The theoretical part describes technology of milling, generally numerically controlled machines and CAM systems.

The partical part includes making CAD model of a product, it is programming in CAM programme PowerMill Pro 2016 and then the real production of two parts of the hollow with a different position and the possibility to compare total time on a five axis machine Hermle C20U.

Keywords: milling, production machines, CAM, CAD, milling cutter, milling machine, programming, production, tools

Chtěl bych poděkovat vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Lukáši Maňasovi za jeho připomínky a rady. Dále panu Františku Chmelařovi, majiteli firmy C.S.O. spol. s r. o. ve Starém Městě, který mi poskytl vybavení a prostor pro zhotovení praktické části bakalářské práce, a také panu Bc. Jiřímu Hanáčkovi za jeho cenné rady při programování.

Prohlašuji, že odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická, nahraná do IS/STAG, jsou totožné.

OBSAH

ÚVOD	10
I TEORETICKÁ ČÁST	11
1 FRÉZOVÁNÍ	12
1.1 NÁSTROJE	14
1.1.1 Typy nástrojů	14
1.1.2 Geometrie nástroje	16
1.1.3 Řezné podmínky.....	17
1.1.4 Materiály nástrojů	19
1.2 ŘEZNÉ KAPALINY	22
1.2.1 Rozdělení řezných kapalin	23
1.2.2 Vlastnosti řezných kapalin	24
1.3 HSC OBRÁBĚNÍ	25
2 ČÍSLICOVĚ ŘÍZENÉ VÝROBNÍ STROJE	26
2.1 SOUŘADNICOVÝ SYSTÉM STROJE.....	26
2.1.1 Příklady souřadnicových systémů.....	27
2.2 PRACOVNÍ PROSTOR CNC STROJE	28
2.3 RAPID PROTOTYPING	29
2.3.1 FDM	30
2.3.2 SLS	31
3 CAM SYSTÉMY	32
3.1 NEJROZŠÍŘENĚJŠÍ CAM SYSTÉMY	33
3.1.1 Mastercam	33
3.1.2 HSMWorks	34
3.1.3 Autodesk PowerMill	34
3.1.4 SolidCAM	35
3.1.5 NX CAM.....	35
II PRAKTICKÁ ČÁST	36
4 NÁVRH A TVORBA MODELU	37
4.1 PROGRAM AUTODESK INVENTOR PROFESSIONAL 2017.....	37
4.2 TVORBA MODELU	37
4.2.1 Dutina 1	41
4.2.2 Dutina 2	42
4.2.3 Dutina 3	43
4.2.4 Výsledná sestava	44
5 CNC PROGRAMOVÁNÍ A VOLBA ŘEZNÝCH PODMÍNEK	45
5.1 VOLBA NULOVÉHO BODU	45
5.2 DEFINICE POLOTOVARU.....	46
5.3 VOLBA OBRÁBĚCÍ STRATEGIE.....	47
5.4 VOLBA NÁSTROJŮ	48
6 VÝROBA NAVRHNUTÉHO MODELU	53

6.1	SIMULACE OBRÁBĚNÍ V PROGRAMU POWERMILL PRO 2016	53
6.2	MATERIÁL VÝROBKU	54
6.3	VÝROBA MODELU.....	55
6.3.1	První část dutiny.....	56
6.3.2	Druhá část dutiny	58
6.3.3	Dodatečné úpravy.....	59
7	VYHODNOCENÍ A ZPRACOVÁNÍ VÝSLEDKŮ	61
	ZÁVĚR	62
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	63
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	66
	SEZNAM OBRÁZKŮ	68
	SEZNAM TABULEK.....	70
	SEZNAM PŘÍLOH.....	71

ÚVOD

Dnešní směr vývoje z hlediska výroby součástí ve strojírenském průmyslu je založen na pokročilém využívání moderních technologií a také automatizace celého výrobního procesu. Předpokladem dodržení tohoto trendu je zejména sledování moderních technologií a jejich následná aplikace do samotného procesu výroby jednotlivých součástí. Z důvodu zvyšujících se nároků na vyráběné součásti, požadavků na hospodárnost a efektivnost výroby jsou využívány moderní systémy, označované jako CAM – Computer Aided Manufacturing, jenž dokáží zkrátit a zejména zefektivnit jak samotné programování součástí, tak jejich následnou výrobu na stroji.

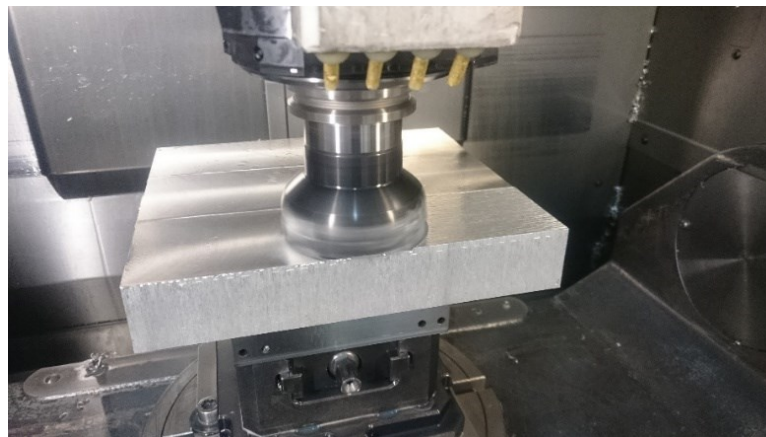
Jednou ze skupin strojů využívajících právě tyto operace jsou stroje – frézky, určené pro pětiosé obrábění. Tyto frézovací stroje usnadňují obrábění tvarově velmi náročných součástí. Pomocí menšího počtu operací lze rapidně snížit celkové výrobní časy a navýšit tak možné množství vyrobených kusů. V některých případech je lze rovněž využít jako náhradu soustruhu, zejména pak při výrobě rotačních součástí. Začíná se také rozšiřovat systém automatické výměny obrobků (AVO), kdy jsou polotovary umístěny v zakladači na více paletách, které manipulátor nebo robot automaticky mění. Jednotlivé stroje využívající CAM aplikace jsou nedílnou součástí průmyslu a s jejich pomocí a následnou optimalizací výstupních hodnot lze vytvořit vysoce produktivní proces, či posunout tolerance výroby o další stupeň výš a tím si zaručit kvalitu a odbyt vyráběných součástí.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 FRÉZOVÁNÍ

Frézování je obráběcí metoda, při které fréza, otáčející se vícebřitý nástroj, odebírá materiál obrobku. Posuv nejčastěji koná obrobek, který je kolmý k ose nástroje. U dnešních strojů (obráběcí centra, víceosé CNC frézky) je možné realizovat pohyb ve více směrech najednou. Řezný proces je přerušovaný, každý zub frézy odřezává krátké třísky měnící se tloušťky. [1]

Čelní frézování – obráběná plocha je kolmá na osu frézy. Uplatňuje se při práci s čelními frézami. V záběru je vždy více zubů frézovacího nástroje. Řezná plocha břitů je umístěná na obvodu i čele nástroje. [1,2]



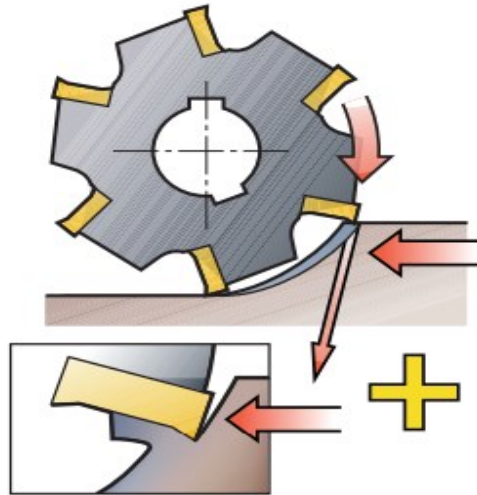
Obr. 1 Čelní frézování

Obvodové frézování – obrábějí hlavní břity umístěné na obvodu frézy. V záběru je pouze jeden, nebo několik málo břitů. [2]



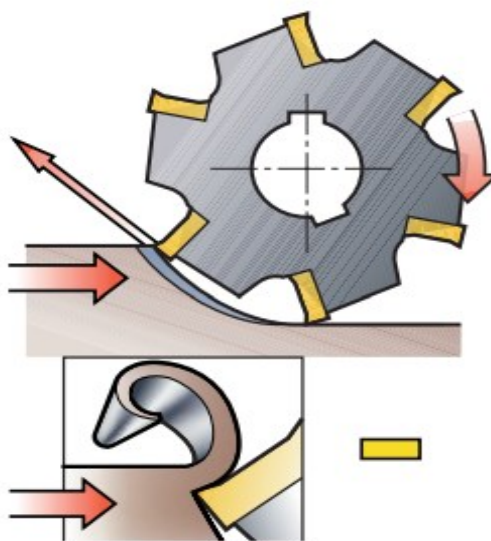
Obr. 2 Obvodové frézování

Sousledné frézování – směr řezu a směr posuvu obrobku má stejnou orientaci. Vnikání břitů frézy je zde nárazové. Maximální tloušťka třísky vzniká ihned při vniknutí zubu frézy do obrobku. Umožňuje větší hloubku řezu a lepší jakost povrchu. Sousledné frézování je výhodnější volit před nesousledným. [3, 2]



Obr. 3 Sousledné frézování [3]

Nesousledné frézování – směr řezu a směr posuvu obrobku má opačnou orientaci. Tloušťka třísky se od začátku vniknutí zubu frézy do materiálu postupně zvětšuje až na maximální hodnotu. Velká tloušťka třísky na výstupu z řezu snižuje životnost nástroje. Radiální síly mají tendenci zvedat obrobky ze stolu, proto musí být velmi dobře upnuty. [3, 2]



Obr. 4 Nesousledné frézování [3]

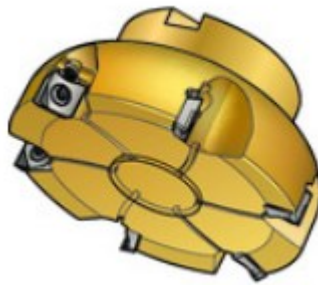
1.1 Nástroje

Volba typu nástroje se liší v závislosti na vykonávané operaci, na obráběném materiálu a na režných podmínkách.

Nástroje mají významný vliv na kvalitu obrobené plochy, přesnost výrobku a ekonomické využití obráběcího stroje. U číslicově řízených strojů jsou kladeny vyšší požadavky na nástroje. Mezi nejdůležitější požadavky můžeme zařadit vysokou tuhost nástroje z důvodu maximálního využití stroje, nebo možnost předseřízení nástroje mimo stroj, čímž se výrazně sníží jeho prostoj a zvýší produktivita. [7]

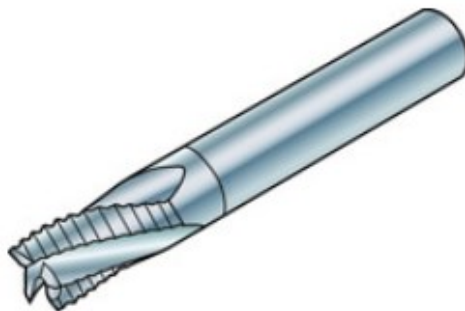
1.1.1 Typy nástrojů

Čelní fréza – zuby jsou umístěny na čelní ploše nástroje. Používáme na frézování rovinných ploch. Nástroje mají vyměnitelné destičky.



Obr. 5 Čelní fréza [26]

Hrubovací stopková fréza – vhodná na tvarové frézování. Zuby jsou na čele i obvodu nástroje. Z důvodu vyšší produktivity volíme vysoké posuvy, proto je drsnost povrchu $R_a > 6,3$. Po hrubování získáváme tvar dokončovací frézou.



Obr. 6 Hrubovací stopková fréza [26]

Dokončovací stopková fréza – dokončujeme tvar výrobku po hrubování. Posuvy nejsou tak vysoké. Drsnost obrobeneho povrchu je Ra 0,8 – 3,2.



Obr. 7 Dokončovací stopková fréza [26]

Stopková fréza na sražení hran – odstraňujeme ostré hrany na výrobcích. Velikost sražení hrany může obsluha upravovat přímo na stroji pomocí změny délkové, nebo průměrové korekce nástroje.



Obr. 8 Stopková fréza na sražení hran [26]

Stopková fréza na zaoblení hran – velikost zaoblení nelze jednoduše měnit jako u sražení hran. Každá fréza má definovaný poloměr.



Obr. 9 Stopková fréza na zaoblení hran [26]

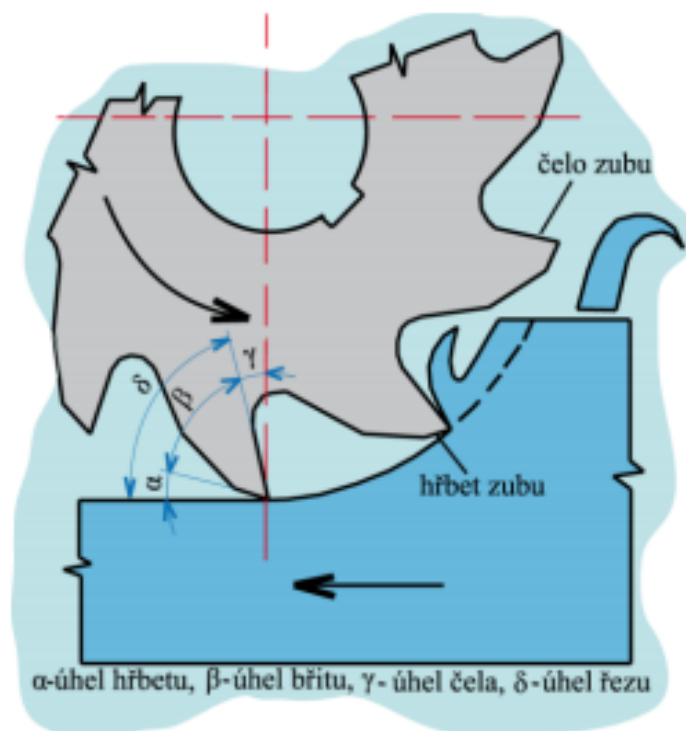
Závitová fréza – závitovou frézu můžeme použít na frézování vnitřních a vnějších závitů, nebo tam, kde není vhodné použít tvářecí nebo řezací závitník např. závitování v blízkosti dna slepých děr.



Obr. 10 Závitová fréza [26]

1.1.2 Geometrie nástroje

Zub frézy má klínovité provedení zakončené břitem, který je tvořen dvěma plochami (čelem a hřbetem), v jejichž průsečíku vznikne ostří, které má schopnost odřezávat třísky. Čím je břit ostřejší, tím snadněji vniká do materiálu. [9]



Obr. 11 Geometrie břitu frézy [9]

Úhel hřbetu α - značně ovlivňuje velikost tření, které vzniká pohybem hřbetu nástroje po řezné ploše. Čím je úhel menší, tím větší je styková plocha hřbetu s plochou řezu a tím větší je tření mezi oběma plochami. Optimální hodnota pro běžné obrábění je 8-12° (Obr. 11). [10]

Úhel břitu β – úhel části břitu, kterou nástroj vniká do materiálu. Čím je úhel větší, tím větší je odpor při oddělování třísky. Úhel by měl být co nejmenší, avšak malý úhel břitu by zmenšil jeho tuhost a pevnost. Velikost je dána velikostí úhlu hřbetu a úhlu čela (Obr. 11) [10]

Úhel čela γ a úhel řezu δ – tyto dva úhly mají největší vliv na průběh řezání, neboť určují polohu čela vůči pracovní rovině řezu. Při obrábění materiálů menší pevnosti je vhodné volit úhel řezu δ co nejmenší, pokud se pevnost břitu nezmenší pod únosnou hodnotu. Volí se podle pevnosti obráběného materiálu a to v rozmezí 50-105° (Obr. 11). [10]

1.1.3 Řezné podmínky

Řezné podmínky se stanovují podle způsobu frézování, materiálu obrobku, požadované jakosti povrchu a podle použité frézy. Vzhledem k velkému množství řezných materiálů a povlaků je třeba respektovat doporučení podmínek podle výrobce nástroje. [2]

Posuv na zub f_z – délka dráhy obrobku nebo stroje za dobu jedné otáčky, vztažená na jeden zub. Základní neznámá pro výpočet rychlosti posuvu. Doporučené hodnoty udává výrobce nástroje.

Obvykle se pohybuje v rozsahu 0,05 – 0,4 mm [28]

$$f_z = \frac{V_f}{n \cdot z} [mm] \quad (1)$$

z – počet zubů [-]

V_f – rychlost posuvu [mm.min⁻¹]

n – otáčky vřetena [min⁻¹]

Řezná rychlost V_c – určí se jako obvodová rychlost na daném průměru. Doporučené hodnoty udává výrobce nástroje.

Je závislá na obráběném materiálu, materiálu nástroje a způsobu frézování. Pohybuje se v rozsahu 20 – 570 m.min⁻¹. [28]

$$V_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} \left[\frac{m}{min} \right] \quad (2)$$

D – průměr nástroje [mm]

n – otáčky vřetena [min^{-1}]

Otáčky vřetena n – počet otáček nástroje vykonaných vřetenem za jednu minutu. Hodnota se vypočítá na základě řezné rychlosti od výrobce.

$$n = \frac{V_c \cdot 1000}{\pi \cdot D} \left[\frac{1}{min} \right] \quad (3)$$

V_c – řezná rychlost [$m \cdot min^{-1}$]

D – průměr nástroje [mm]

Rychlost posuvu V_f - strojní posuv stolu nebo vřetena. Hodnotu vypočítáme na základě zjištění otáček a hodnot od výrobce. Vysoká rychlost posuvu může mít za následek špatnou kvalitu obrobeneho povrchu.

$$V_f = n \cdot z \cdot f_z \left[\frac{mm}{min} \right] \quad (4)$$

n – otáčky vřetena [min^{-1}]

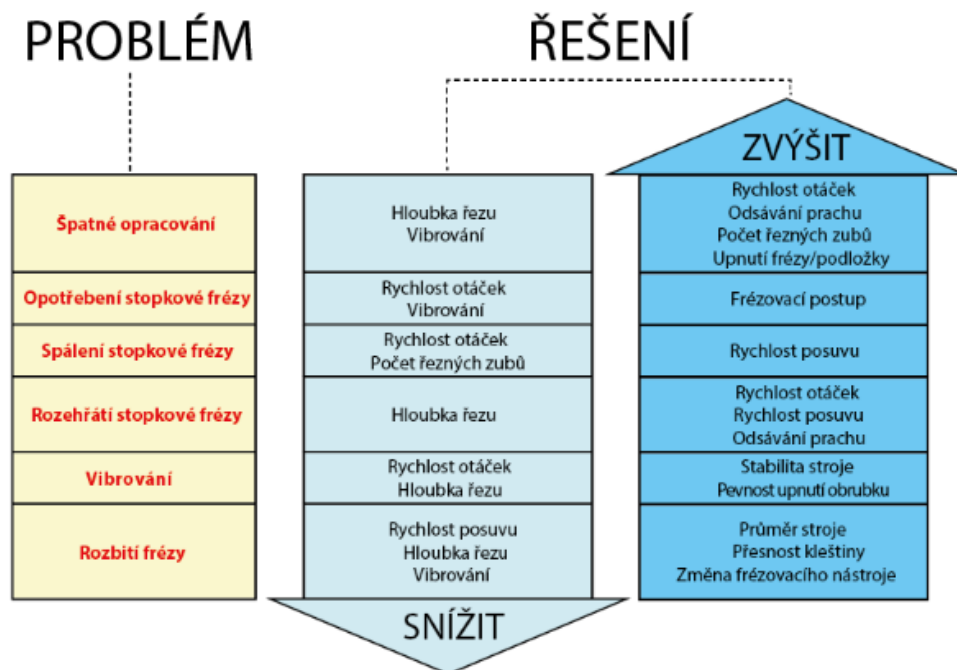
z – počet zubů [-]

f_z – posuv na zub [mm]

Tab. 1 Doporučené řezné rychlosti pro čelní frézování s frézami ze slinutého karbidu [10]

Obráběný materiál	Řezná rychlost [$\frac{m}{min}$]	
	Hrubování	Dokončování
Plast	50-250	150-400
Měď	150-250	250-350
Slitiny hliníku	300-500	500-1000

Problémy vzniklé při frézování jdou z velké části vyřešit změnou řezných podmínek nástroje, nebo jeho upnutím (Obr. 12).



Obr. 12 Způsoby řešení problémů vzniklých při frézování [27]

1.1.4 Materiály nástrojů

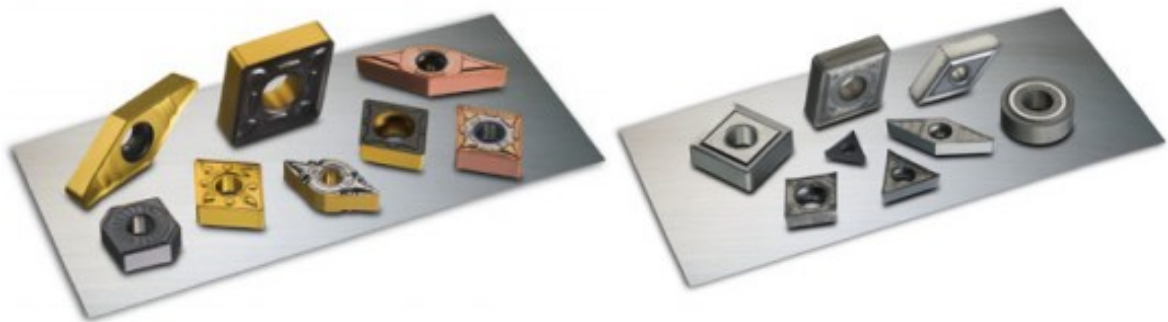
Základní požadavky na řezné materiály jsou tvrdost při vysokých teplotách, pevnost v ohybu, vysoká odolnost proti opotřebení. Tvrdost materiálu by měla být převyšující o 5 až 6 HRC tvrdosti obrobku. [4, 2]

Rychlořezná ocel (HSS) – Vysoce legovaná nástrojová ocel, která obsahuje legující prvky jako je Cr, W, Mo a V, které se slučují s uhlíkem obsaženým v oceli. Snáší zahřátí až na 600°C. Používá se pro nástroje k opracování termoplastů a lehkých kovů. Vyráběné nástroje bývají vrtáky, frézy, výstružníky a další. [1,2]

Slinuté karbidy (SK) – Slinuté materiály, které se skládají z metalických tvrdých látek a pojiva. Jako tvrdé látky se používají karbidy wolframu, titanu, tantalů a kobalt je pojivo.

Tvrдость je dána samotným materiálem, proto se už dále neprovádí tepelné zpracování. Slinuté karbidy snášejí zahřátí břitu až na 900 °C. Nástroji ze slinutého karbidu lze obrábět i tvrdé materiály.[1, 2]

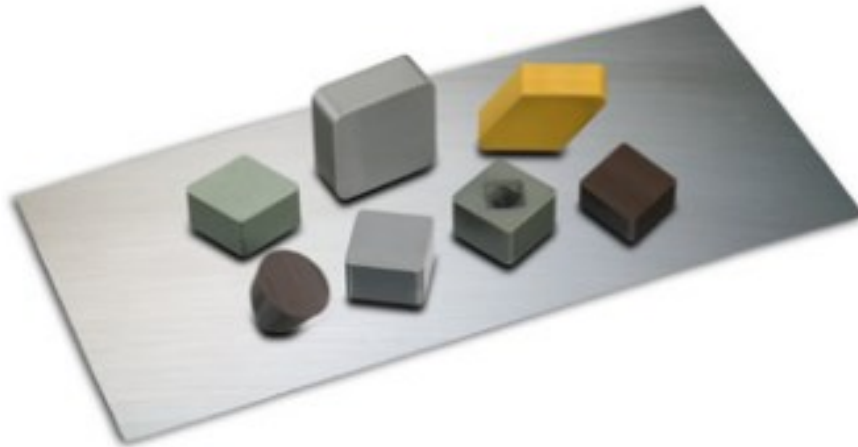
- **Slinuté karbidy s tvrdými povlaky** – tvrdost a odolnost zvyšujeme povlakem titanu TiC, nitridu titanu TiN nebo oxidu hlinitého Al_2O_3 . Jsou buď jednovrstvé nebo vícevrstvé. [1]



Obr. 13 Břitové destičky ze slinutého karbidu: povlakované (vlevo), nepovlakované (vpravo) [23]

Řezná keramika – Řezná keramika je ještě tvrdší než slinuté karbidy. Zachovává si vysokou tvrdost až do teplot kolem 1200 °C. [2]

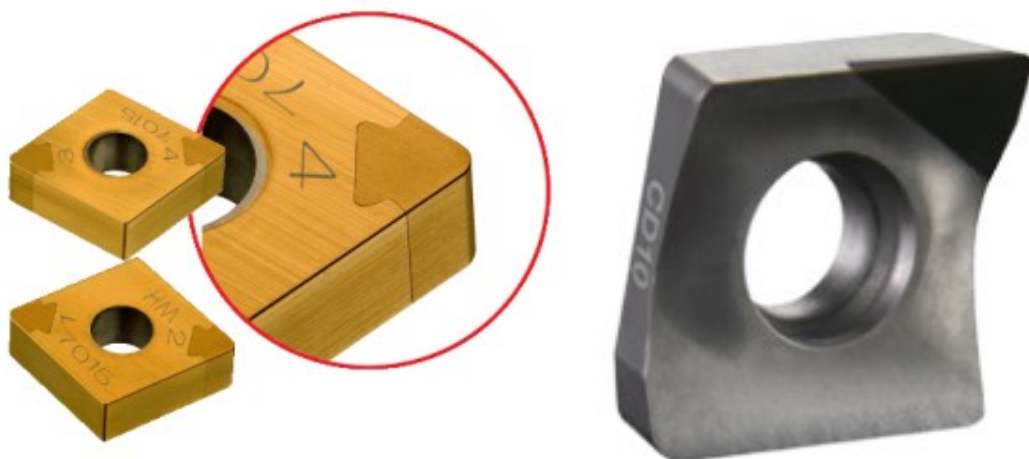
- **Čistá keramika** – obsahuje až 99,9% oxidu hlinitého (Al_2O_3). Má vysokou odolnost proti opotřebení. Používá se např. při obrábění šedé litiny (brzdové kotouče) [1]
- **Směsná keramika** – vyrábí se z Al_2O_3 a metalických tvrdých látek, jako je karbid titanu nebo karbonitrid titanu. Má vyšší odolnost proti změnám teploty než čistá keramika [2]
- **Cermety** – řezné materiály vytvořené směsí keramiky a kovu (např. kobalt, molybden). Slučují výhody keramiky (vysoká tvrdost) a kovových materiálů (vyšší pevnost v ohybu) [2]



Obr. 14 Břítové destičky z řezné keramiky [23]

Supertvrdé řezné materiály

- **Polykrystalický kubický nitrid boru** – materiál s mimořádně vysokou tvrdostí za tepla. Lze jej používat při velmi vysokých řezných rychlostech. Má dobrou houževnatost a odolnost proti tepelným nárazům. Umožňuje vysokorychlostní hrubování šedé litiny. [23]
- **Polykrystalický diamant** – nejtvrdší a nejodolnější proti otěru ze všech materiálů, ale postrádá chemickou stabilitu za zvýšených teplot. Používá se na neželezné materiály, jako je např. slitina hliníku s vysokým obsahem křemíku, kompozity s kovovou maticí a plasty vyztužené uhlíkovými vlákny [23]



Obr. 15 Břítové destičky ze supertvrdeho materiálu : polykrystalický kubický nitrid boru(vlevo), polykrystalický diamant (vpravo). [23]

Nástroje na obrábění kompozitních materiálů – Pro obrábění kompozitních materiálů je možné použít řezné nástroje z rychlořezné oceli, slinutých karbidů, polykrystalického diamantu atd. Nejmenší životnost mají nástroje z rychlořezné oceli kvůli rychlému abrazivnímu opotřebení z důvodu tření přerušovaných vláken výztuže kompozitu o hřbet nástroje. Nejčastěji pro obrábění používají nástroje z polykrystalického diamantu, které mají ve srovnání s rychlořeznou ocelí až 1000x vyšší trvanlivost, odolnost proti abrazivnímu opotřebení a vyšší tepelnou vodivost.[22]



Obr. 16 Speciální frézy na obrábění kompozitních materiálů [24]

1.2 Řezné kapaliny

Hlavní funkcí kapalin je účinně odvádět vznikající teplo a třísky z místa řezu, zvyšovat životnost nástrojů a zlepšovat jakost povrchu vyráběné součásti. Přívodem kapaliny dochází ke zmenšení vnitřního a vnějšího tření. Většinou jsou v kapalné formě, ale existují i v pevné (prášková maziva), které se ale používají ojedinele např. při řezání závitů. [1]



Obr. 17 Emulzní kapalina

1.2.1 Rozdělení řezných kapalin

Řezná kapalina se volí podle druhu vykonávané práce (soustružení, broušení, atd.), nebo obráběného materiálu. Při malých řezných rychlostech je výhodné použít řezný olej. Při vyšších je výhodnější použití emulze v koncentraci 3 až 5 % [1]

Vodní roztoky – Nejjednodušší řezné kapaliny, které nejsou příliš vhodné. Voda, která tvoří základ, se musí změkčovat, ošetřovat proti pění, a musíme do ní přidávat přísady proti korozi. Vodní roztok musí mít vždy alkalický charakter. U těchto kapalin vzniká nebezpečí rozmnožování anaerobních bakterií, které způsobují nepříjemný zápach. [1]

Emulzní kapaliny – Disperzní soustava dvou vzájemně nerozpustných kapalin. Jedna tvoří mikroskopické kapky rozptýlené v té druhé. Obvykle se jedná o olej ve vodě. Je třeba využít emulgátory, které snižují mezipovrchové napětí emulgovaných kapalin a stabilizují emulzi. Účinek chlazení závisí na koncentraci, která se pohybuje v rozmezí od 2% do 10% (Obr. 17). [1]

Mastné oleje a tuky – Mají podobné vlastnosti jako minerální oleje, ale kvůli menšímu povrchovému napětí lépe odvádí teplo. Nevýhodou je velký sklon ke stárnutí. Zvyšuje se kyselost. Používá se lněný olej, řepkový olej a další.[1]

Syntetické kapaliny – Jsou rozpustné ve vodě. Vyznačují se velkou provozní stálostí. Mají dobré mazací vlastnosti a chladicí účinek, ale ne takový jako minerální oleje.[1]

Minerální oleje – Mají velmi dobré provozní vlastnosti, proto se používají jako základ pro řezné oleje. Mají dobré mazací vlastnosti, ochranný účinek a dobrou odolnost proti stárnutí, ale horší chladicí účinek. Vyrábí se z ropy.[1]

Řezné oleje – Základ tvoří minerální olej, obsahující přísady, které nám zvyšují mazací schopnosti. Přísady jsou mastné látky, organické sloučeniny a pevná maziva.[1]

1.2.2 Vlastnosti řezných kapalin

Mezi nejdůležitější vlastnosti patří chladicí a mazací účinek. Nejmenší nebezpečí ze zdravotních závad je při používání minerálních olejů, naopak při práci s emulzí může vzniknout kožní onemocnění. Nejlepší ochranou je zabránění přímému kontaktu s pokožkou.[1]

Chladicí – Snižuje teplotu, a snižuje tak i opotřebení nástroje u rychlořezné oceli až na pětinu proti obrábění za sucha. [5]

Mazací – Mazací účinek se projevuje snížením tření na činných plochách nástroje a usnadňuje plastické deformace třísky. Řezný odpor se tak snižuje až o 25%, u malých průřezů třísek i více. [5]

Tab. 2 Volba řezné kapaliny podle obráběného materiálu [1]

Obráběný materiál	Doporučená řezná kapalina
Hliník a jeho slitiny	Emulze 3%
Hořčík a jeho slitiny	Mastné oleje
Nikl a jeho slitiny	Lehké minerální oleje s přísadami
Nízkouhlíková ocel	Emulze 5%
Nerezová ocel	Emulze 10%

1.3 HSC obrábění

HSC metoda kombinuje vysoké otáčky vřetena spolu s velkými posuvy nástroje. Umožňuje obrábět tepelně zpracované oceli a další velmi tvrdé materiály, které by bylo možné obrábět pouze broušením, a to i bez chlazení. Minimalizuje se tím přenos tepla do nástroje. Většina odchází třískou. Nástroje mají vysokou kvalitu řezné hrany. [1, 6]

Výhody:

- Dosažení vysoké kvality obráběného povrchu,
- výhodná aplikace obrábění bez chlazení (ekonomické výhody),
- vyššími otáčkami vřetena a použitím vyšší posuvové rychlosti zkrátíme strojní čas. [1]

Nevýhody:

- Nákladné strojní vybavení,
- speciální a drahé nástroje. [1]

Tab. 3 Požadavky na stroj [1]

	Frézka	Soustruh
Otáčky vřetena [min^{-1}]	10 000 – 80 000	5 000 – 15 000
Výkon vřetena [kW]	15 - 100	15 - 100
Pracovní posuv [$\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$]	10 – 60	10 - 60

Materiály nástrojů - Nástroje pro HSC obrábění musí mít vysokou tvrdost povrchu, vysokou odolnost proti chemickému opotřebení, houževnatost. [1]

Tab. 4 Volba materiálu nástroje podle obráběného materiálu [1]

Obráběný materiál	Materiál nástroje
Kalená ocel a litina	Polykrystalický kubický nitrid boru
Ocel	Povlakované slinuté karbidy
Litina	Keramika
Neželezné kovy a nekovové materiály	Polykrystalický diamant

2 ČÍSLICOVĚ ŘÍZENÉ VÝROBNÍ STROJE

Číslicově řízené výrobní stroje jsou charakteristické tím, že ovládání funkcí stroje je prováděno řídicím systémem stroje pomocí vytvořeného programu. Informace o požadovaných činnostech jsou zapsány v programu pomocí alfanumerických znaků. Program je určen pro řízení silových prvků stroje a zaručuje, že požadovaný sled činností proběhne v námi zadané posloupnosti. [7]

Základní číslicově řízené stroje můžeme rozdělit podle vykonávané práce:

1. CNC stroje pro obrábění – soustruhy, frézky, brusky, stroje pro dělení materiálu, stroje pro nekonvenční obrábění (drátové řezačky, laserové vrtačky atd.)
2. Ostatní CNC stroje – lisy, ohýbačky, svařovací roboty atd. [7]

Výhody:

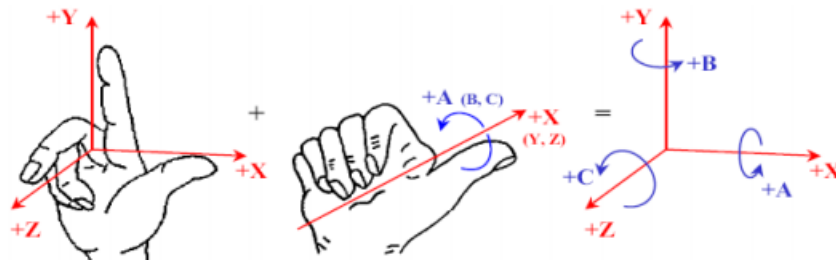
- Vyšší produktivita,
- vyšší přesnost,
- umožňuje výrobu složitějších součástí,
- výrobní čas je přesně stanoven programem,
- obsluha může pracovat na více strojích.[7]

Nevýhody:

- Vysoká cena strojů,
- složitější technologická příprava. [7]

2.1 Souřadnicový systém stroje

Výrobní stroje používají pravoúhlý kartézský souřadnicový systém. Ten je dán normou ČSN ISO „Terminologie os a pohybu“. Základní osy jsou X, Y a Z. Otáčivé osy kolem základních se označují A, B a C. Hodnoty souřadnicového systému mohou nabývat i záporných souřadnic. Souřadnicový systém je důležitý pro řízení stroje a zhotovení programu (Obr. 18) [6]



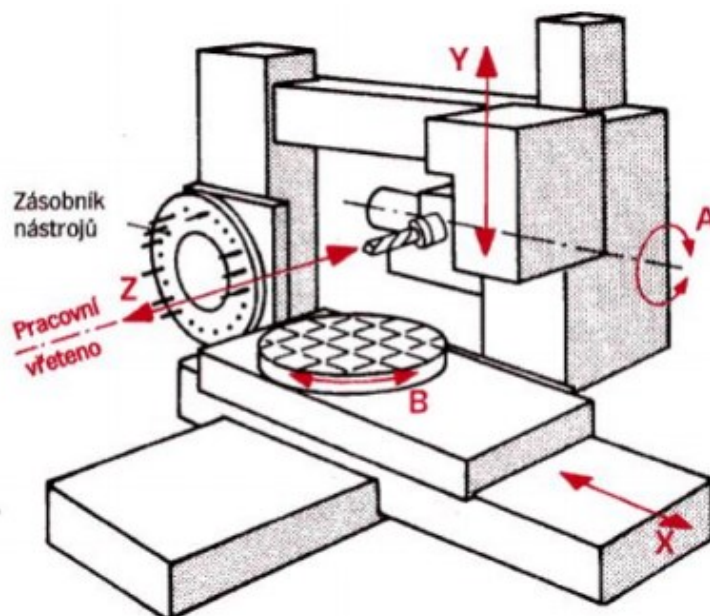
Obr. 18 Kartézský souřadnicový systém [7]

Souřadný systém se na stroji umísťuje podle následujících pravidel:

- Vychází se od nehybného obrobku,
- vždy musí být definována osa X,
- osa X leží v upínací rovině obrobku nebo je s ní rovnoběžná,
- osa Z je totožná nebo rovnoběžná s osou pracovního vřetena, která udílí hlavní řezný pohyb. [7]

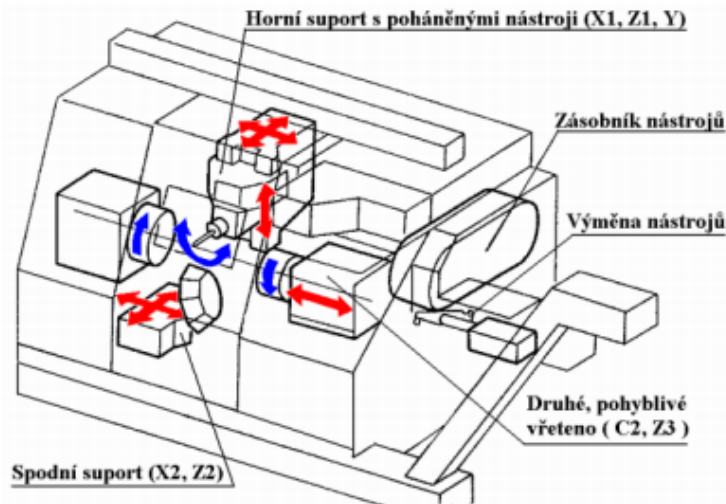
2.1.1 Příklady souřadnicových systémů

CNC frézka – V pracovním vřetenu je upnuta fréza. Osa Z je osa rotace vřetena s nástrojem. Pohyb v kladném směru znamená pohyb od materiálu. Osa X a Y jsou v rovině stolu. Osa X je rovnoběžná s upínací plochou obrobku a je kolmá na osu X a Z. Osy B a A jsou rotační kolem osy Y a X.[7]



Obr. 19 Souřadnicový systém obráběcího centra [7]

CNC soustruh – V pracovním vřetenu je upnutý obrobek. Pracovní nástroj koná posuvné pohyby ve směru souřadných os X a Z. Osa Z je pak osa rotace vřetena. Pohyb v kladném smyslu je pohyb nástroje od vřeteníku ke koníku. Osa X je kolmá na osu Z, vyjadřuje průměr součásti. Její kladný směr je od osy otáčení obrobku směrem k držáku nástroje. [7]



Obr. 20 Souřadnicový systém CNC soustruhu [7]

2.2 Pracovní prostor CNC stroje

Nulový bod stroje – Pevně zadaný výrobcem stroje. Tvoří počátek souřadného systému prostoru stroje. U soustruhu je umístěn v ose rotace obrobku v místě zakončení vřeteníku přírubou. U frézky je v krajní poloze stolu frézky v obou osách. Označuje se písmenem M (Obr. 21). [7]

Referenční bod stroje – Stanoven také výrobcem stroje. Obvykle bývá na koncových spínačích. Označuje se písmenem R (Obr. 21). [6]

Nulový bod obrobku – Značí počátek souřadného systému obrobku. Polohu nulového bodu volí programátor na nejvhodnějším místě a od něj počítá tvar součásti. Většinou se nachází v jednom z rohů na horní ploše polotovaru. Označuje se písmenem W (Obr. 21). [7]

Bod špičky nástroje – Nutný pro stanovení délkové korekce nástroje. Měří se i rádiusové korekce. [7]

Vztažný bod suportu a vřetena – Dosedací bod na ploše nosiče nástroje. V tomto bodě má nástroj nulový rozměr. K tomuto bodu se vztahují korekce nástroje. Značí se jako bod F (Obr. 21). [7]

2.3.1 FDM

Termoplastický materiál je navinut na kruhové cívce. Materiál se zahřeje na tavicí teplotu v tavicí hlavě a je dále přes tenkou trysku průtlačné hlavy vytlačován a nanášen na základě instrukcí počítače v rovině X, Y. Jakmile materiál ztuhne, posune se stavěcí základna o jednu tloušťku vrstvy níž a proces se opakuje. Při nevhodném tvaru se používá další tavicí hlavice obsahující jiný materiál, který slouží jako podpora. Ta se po dokončení od výrobku odstraní. Upravené FDM systémy pracují přímo v kancelářských prostředích bez speciálních požadavků na svůj provoz. [6]

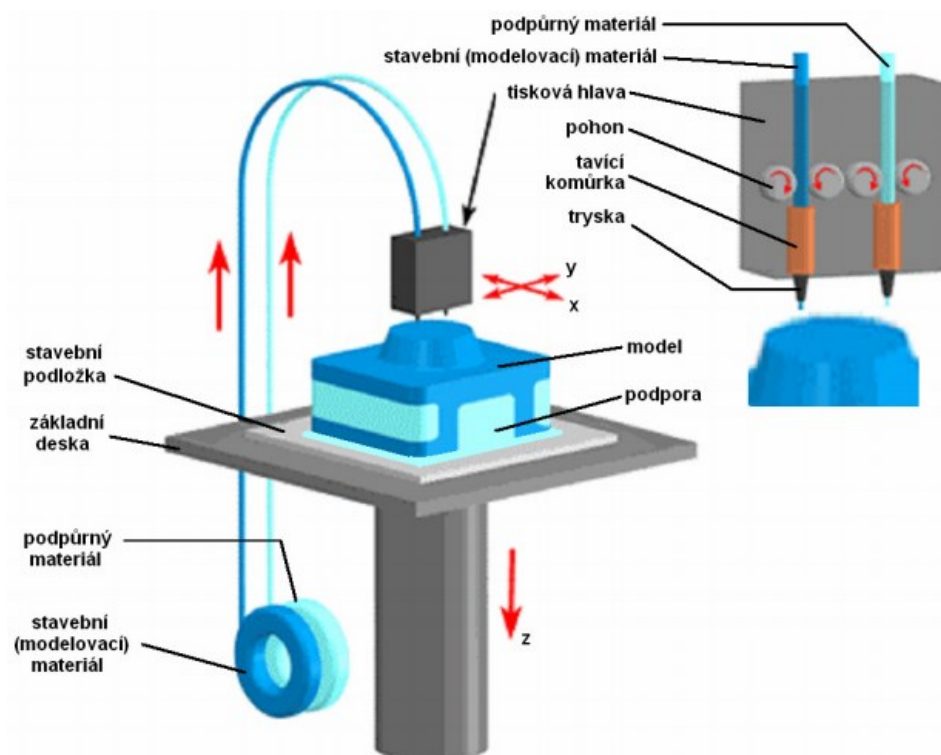
Výhody:

- Výroba prototypů, které se svými vlastnostmi blíží konečným produktům,
- při výrobě vzniká minimální odpad – pouze materiál podpor.

Nevýhody:

- Proces výroby nelze zrychlit z důvodu principu metody a vlastností materiálu,
- omezená přesnost daná průměrem výstupní trysky.

Materiály modelů jsou ABS, vosk, polykarbonát [11]



Obr. 23 FDM metoda [25]

2.3.2 SLS

Výchozí materiál představuje jemný prášek. Ten se nanese na podkladovou desku podavačem, uhladí válcem a nataví CO₂ laserem. Podkladová deska se posune o vrstvu níž a proces se opakuje. Pracoviště je naplněno inertním plynem a zahřáté na teplotu blízkou tavicí teplotě horní vrstvy materiálu. Toto přehřátí má pozitivní účinek na ustálení teplotní podmínky a na pozdější smrštění zhotovené vrstvy modelu. [6]

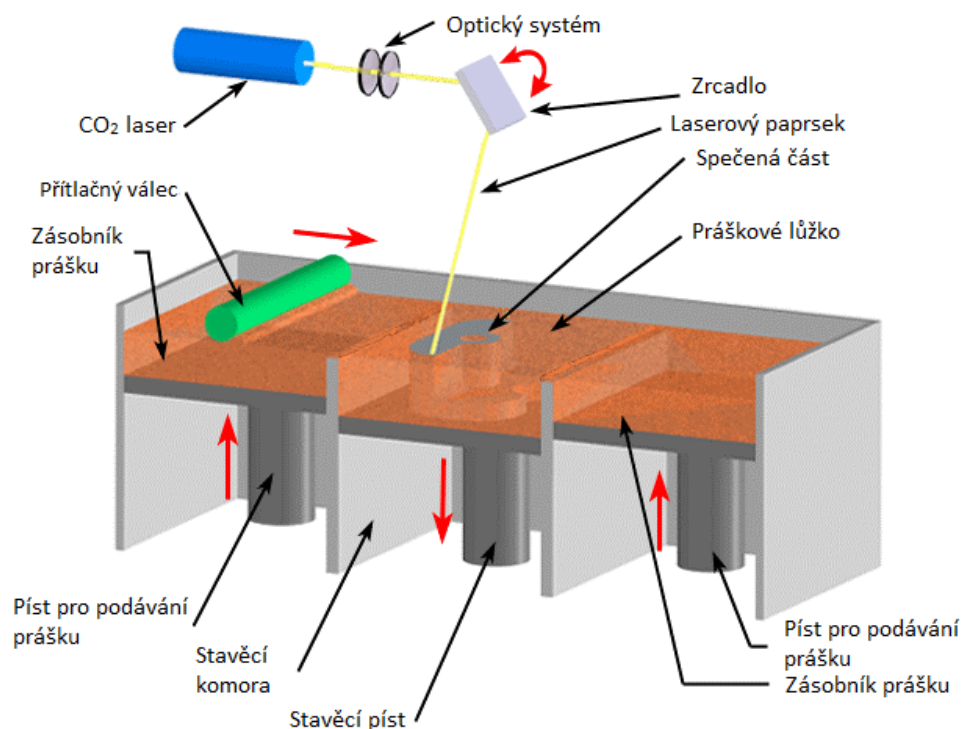
Výhody:

- Součásti vyrobené touto metodou vynikají svojí pevností,
- součást nepotřebuje podpory.

Nevýhody:

- Prostorově a energeticky náročné zařízení,
- menší kvalita povrchu s porovnáním s ostatními metodami.

Materiály modelu jsou polyamid, nylon, vosk, kovové prášky. [11]



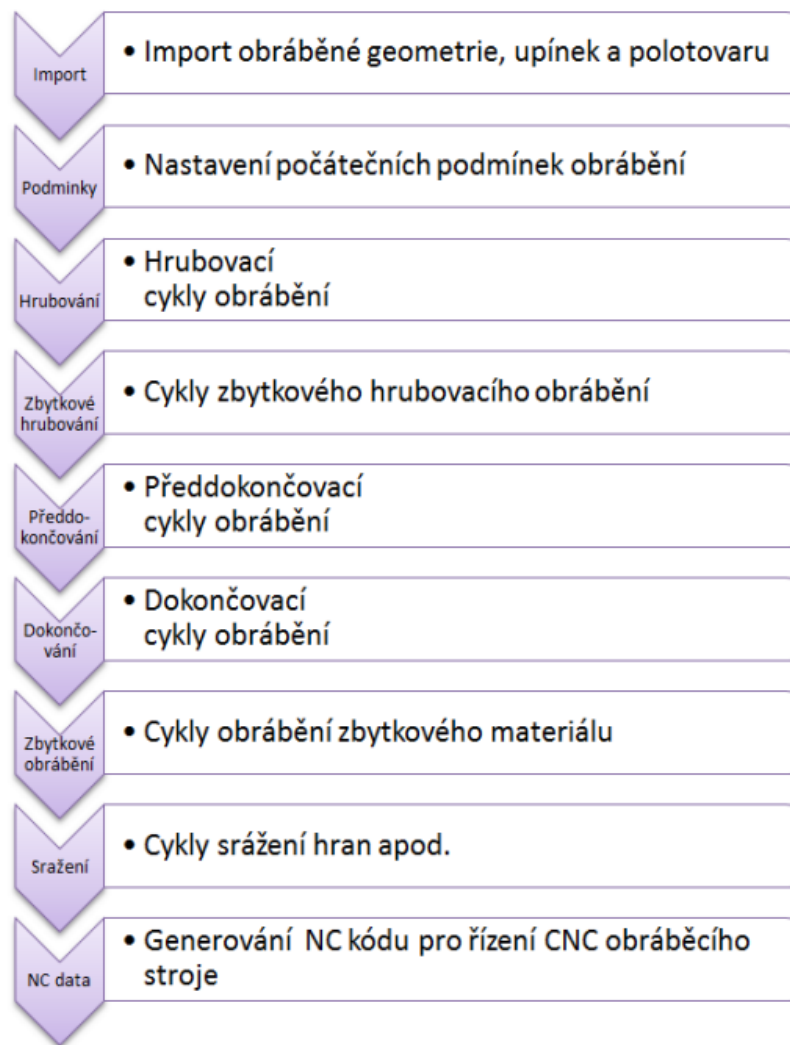
Obr. 24 SLS metoda [32]

3 CAM SYSTÉMY

CAM systém je systém, který nám připravuje data pro číslicově řízené stroje. Využívá dat z modelu součásti, která byla vytvořena v CAD systému. Umožňuje nám bezpečně simulovat práci stroje na počítači. Po odzkoušení nám vygeneruje program pro řízení NC a CNC strojů. [8]

Hlavní uplatnění CAM systémů je v oblasti výroby forem, tvarově složitých součástí pro letecký průmysl, lopatek turbín apod.

CAM systémy se s cenovou a technologickou dostupností stále více používají i při obrábění jednodušších součástek. Zvláště při sériové výrobě, kdy je možné pomocí CAM efektivně optimalizovat dráhy nástrojů, a zkrátit tak strojní čas. [8]



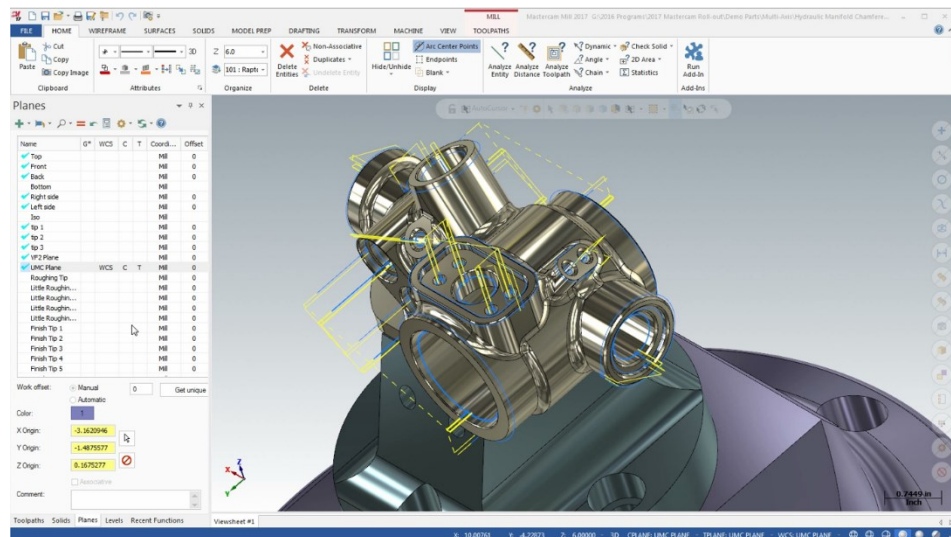
Obr. 25 Obecný postup pro tvorbu programu pomocí CAM [8]

Postprocesor – Překládá vygenerované dráhy nástroje z CAM programu do řeči srozumitelné pro příslušný řídicí systém obráběcího stroje. U některých CAM systémů se výběr provede ještě před zahájením tvorby postupu (např. MasterCAM, SolidCAM). U jiných se určí těsně před generováním NC kódu (např. PowerMill). Existuje mnoho řídicích systémů, včetně jejich variant, a proto se požadavky na postprocessing vždy liší podle použitého stroje a jeho řídicího systému. [8]

3.1 Nejrozšířenější CAM systémy

3.1.1 Mastercam

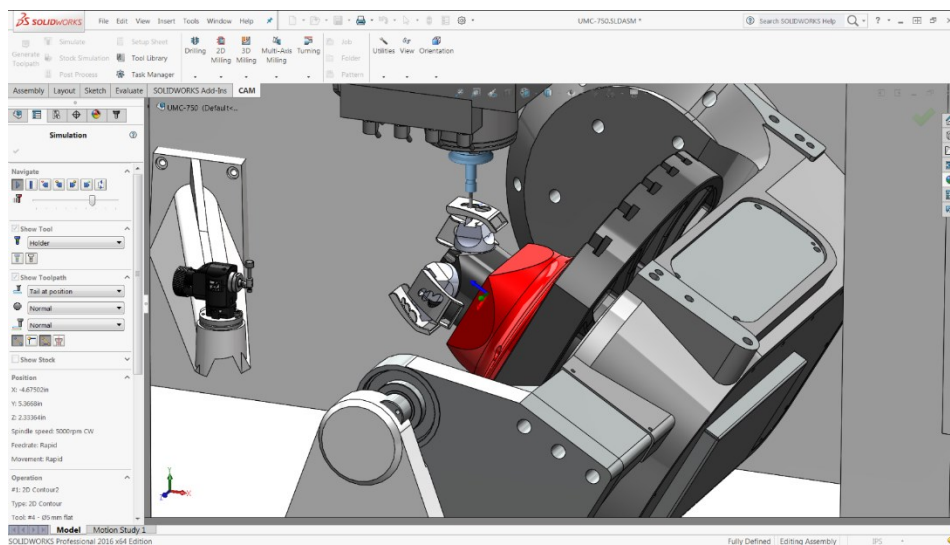
Jeden z nejrozšířenějších CAD/CAM systémů na světě. Umožňuje frézování od 2,5D až do 5D, soustružení 2osé, 4osé s více hlavami a vřety, elektroerozivní drátové řezání EDM, dřevoobrábění. Modul Blade Expert dokáže také obrábět jeden z nejnáročnějších případů, a to turbíny, ventilátory a lodní šrouby. Dalším zajímavým modulem je Mastercam Art, kterou ocení umělci. Díky modulu můžeme vytvářet 3D sochy z 2D obrázků. Umožňuje samostatnou implementaci CAM systému do Solidworks.[13]



Obr. 26 Uživatelské prostředí programu MasterCAM 2017 [14]

3.1.2 HSMWorks

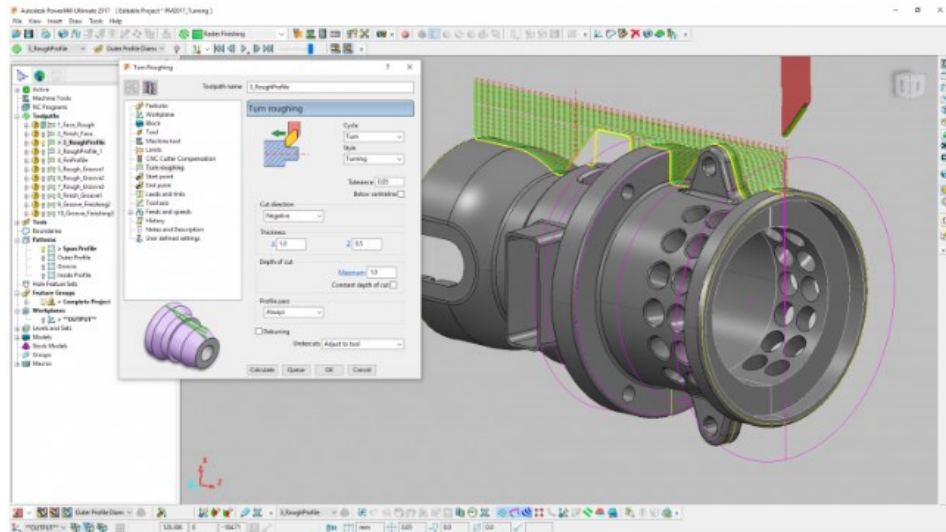
CAM pro integraci do systému SolidWorks. Obsahuje frézování od 2,5D do 5D a soustružení. Umožňuje optimalizaci obráběcích procesů jako je HSM obrábění, obrábění tenkých stěn nebo adaptivní obrábění, které generuje dráhu tak, aby byly dodrženy konstantní podmínky pro nástroj v průběhu obrábění (nepřekročí objem odebíraného materiálu, zatížení nástroje, atd.). Firma nabízí i CAM řešení pro Inventor s názvem Inventor HSM. [15]



Obr. 27 Uživatelské prostředí programu HSMWorks 2016 [16]

3.1.3 Autodesk PowerMill

System pro programování frézovacích center, včetně soustružnických drah. Umožňuje 2,5D až 5D obrábění. Nabízí funkce pro HSM hrubování, frézování žebířů a lopatek, různé strategie pro dokončovací metody atd. Vestavěná simulace umí zobrazit reálnou renderovanou výslednou kvalitu ploch po obrábění. Při dokončovacích operacích lze vybírat z desítek různých strategií obrábění pro co nejlepší povrch. Umožňuje úpravu NC kódu ještě v programu. [17]



Obr. 28 Uživatelské prostředí programu Autodesk PowerMill 2017 [18]

3.1.4 SolidCAM

CAM řešení pro Solidworks. Obsahuje moduly pro frézování od 2,5D až 5D, soustružení (i pro poháněné nástroje) a drátové řezání. Funkce jako HSM, HSS doplňuje patentovaná technologie iMachining, která umožňuje obrábět hlouběji s menším počtem drah, optimalizovat otáčky a posuvy nástroje, čímž snižuje časy obrábění. Umožňuje integraci i do Inventoru pod názvem InventorCAM. [19]

3.1.5 NX CAM

Komplexní CAD/CAM systém. Nabízí frézování, soustružení, drátové řezání. 2,5D až 5D frézování, má celou řadu funkcí, např. speciální modul pro obrábění oběžných kol turbín, obrábění HSM, obrábění negativních stěn, nebo automatizované obrábění, kdy se automaticky rozpoznávají tvary (otvory, dutiny atd.) obrobí podle predefinovaných pravidel. Pro složitější obráběcí aplikace lze také simulovat proces obrábění. Strojní čas vypočtený na základě definovaných technologických parametrů lze použít na cenové kalkulace a výpočty spotřeby nástrojů. [20]

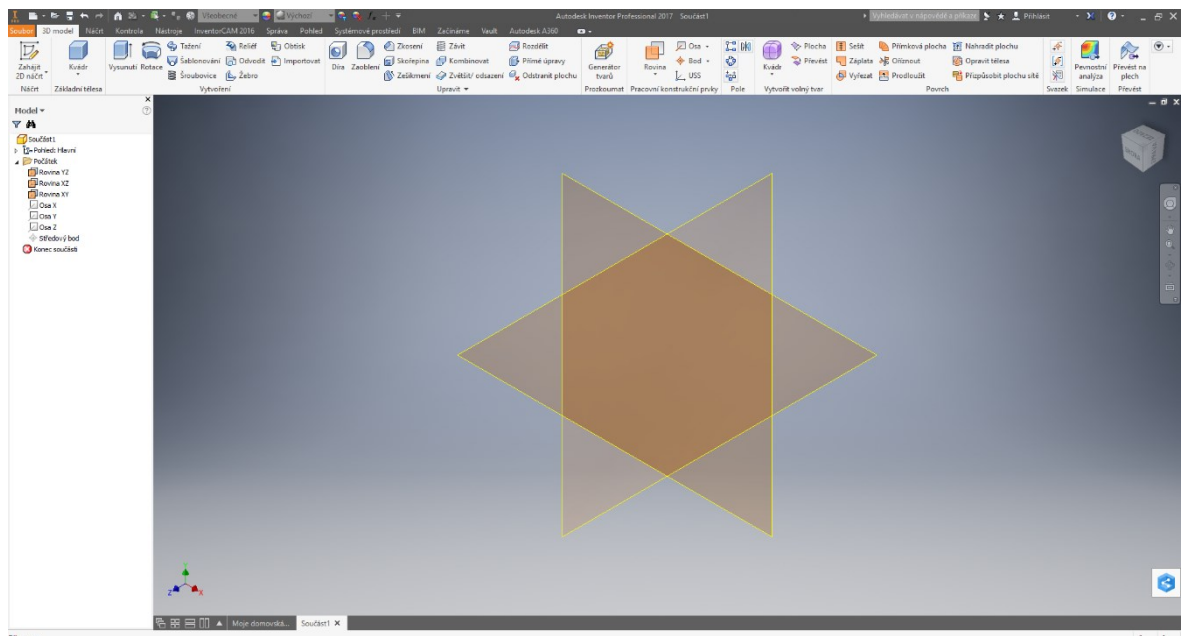
II. PRAKTICKÁ ČÁST

4 NÁVRH A TVORBA MODELU

Na návrh a tvorbu modelu byl použit 3D CAD software Autodesk Inventor Professional 2017 ve studentské verzi. Podle předlohy byl zhotoven model figurky na stolní fotbal, s kterým se dále pracovalo při programování.

4.1 Program Autodesk Inventor Professional 2017

3D CAD Inventor patří mezi komplexní konstrukční software, který umožňuje 3D konstrukci dílů, sestav, jejich pevnostní analýzu, tvorbu technické dokumentace a prezentace. Skládá se z mnoha doprovodných modulů usnadňujících práci. Program generuje modely ve formátu .ipt, avšak v programu lze použít i převod do jiných formátů. Autodesk Inventor ve studentské verzi je možné stáhnout zdarma přímo ze stránek výrobce.



Obr. 29 Základní prostředí programu Autodesk Inventor Professional 2017

4.2 Tvorba modelu

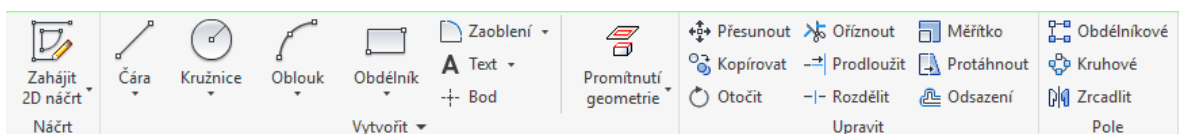
Jako předloha pro tvorbu modelu byla použita figurka postavy na stolní fotbal. Model byl zjednodušen a nebyly do něj udělány přední a zadní otvory na přišroubování, které by se po vstřikování dovrtaly. Rozměry panáčka byly zohledněny pouze orientačně, protože se jednalo o vlastní návrh. Byly zachovány pouze rozměry hlavního otvoru sloužícího pro uchytení na jednotlivé nerezové tyče a spodní hrací plocha.



Obr. 30 Předloha pro model

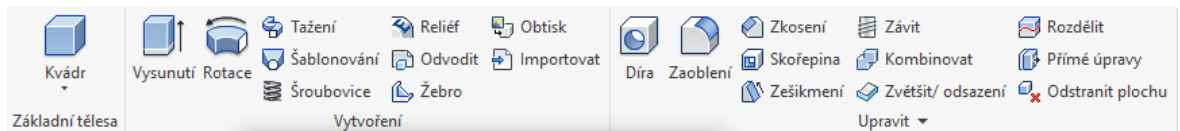
Tvorba modelu začínala volbou roviny pro kresbu náčrtu. Do náčrtů byl nakreslen půdorys nohou. Pomocí funkce odsazení roviny byly vytvořeny nové roviny, které byly od sebe vzdáleny o určitou vzdálenost. Do rovin byl vždy promítnut předchozí náčrt a pomocí funkce měřítko byl zvětšen. Tím bylo docíleno stejného tvaru po celé části nohou. Základní náčrt, od kterého vycházely ostatní, byl symetrický podle osy X i podle osy Y. V ostatních rovinách zůstala zachována pouze symetrie podle osy Y, protože se náčrt posuoval v ose dopředu k vytvarování kolen.

Při tvorbě nárysů byly použity pouze základní funkce, které Autodesk Inventor nabízí.



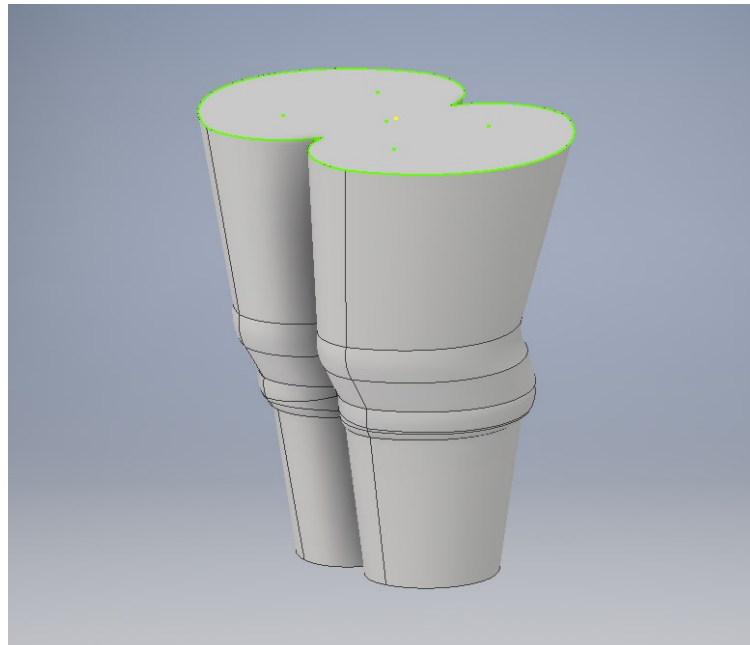
Obr. 31 Základní funkce pro tvorbu náčrtu

Na spojení jednotlivých půdorysů byla použita funkce šablonování, která označené náčrtky spojila do jednoho 3D objektu. Tato funkce byla využívána pro tvorbu celé postavy. Pouze krk, hlava a spodní hrací část byla vytvořena pomocí jiných funkcí, které jsou popsány dále.



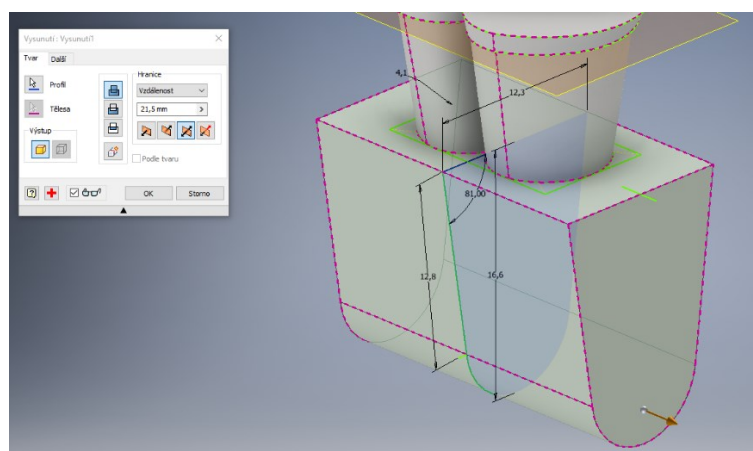
Obr. 32 Základní funkce pro 3D modelování

Ukázka postupného spojování jednotlivých náčrtů, které tvoří nohy modelu. Při tvorbě kolen byl půdorys posunut pouze dopředu v ose Y (Obr. 33).

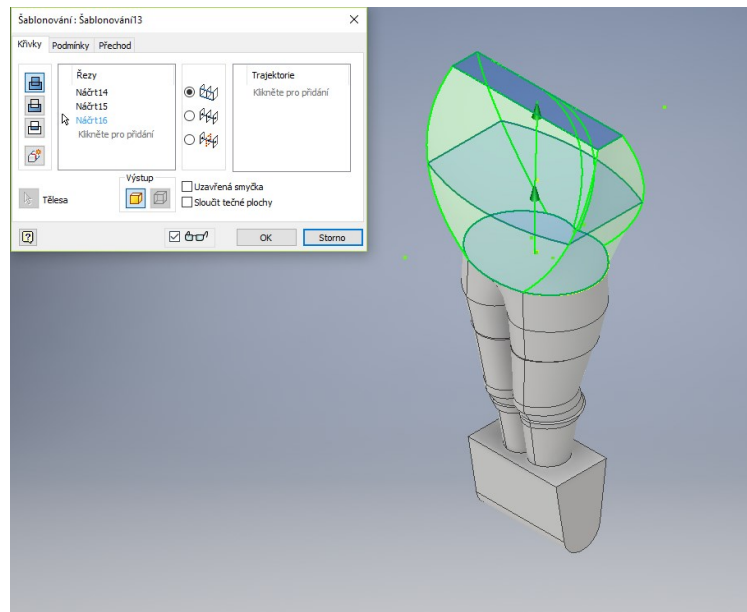


Obr. 33 Spojení části nohou pomocí funkce šablonování

Spodní hrací část byla vytvořena pomocí nárysu, který byl přesně zakótován podle reálné předlohy. Poté byl náčrt pomocí funkce vysunutí vytažen symetricky do prostoru (Obr. 34).

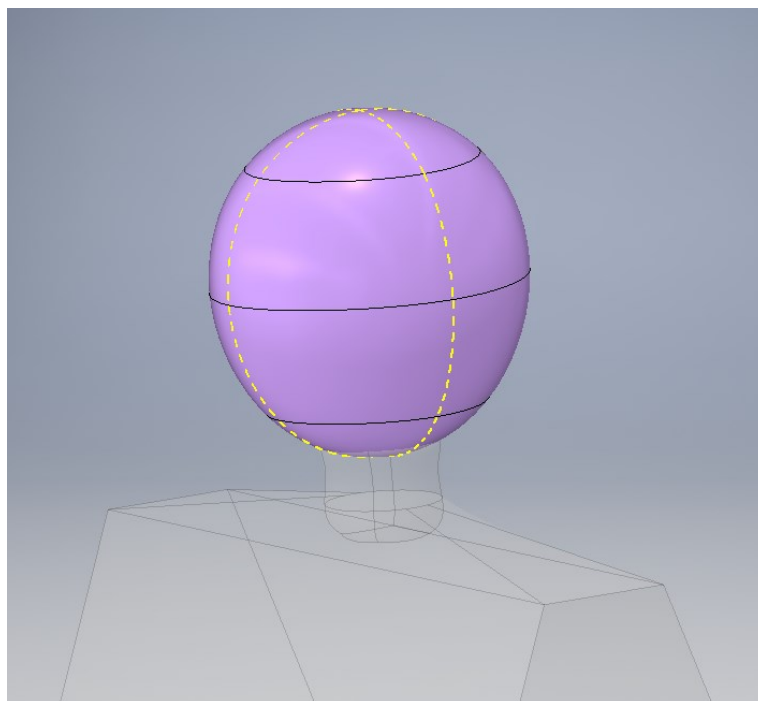


Obr. 34 Ukázka funkce vysunutí



Obr. 35 Ukázka funkce šablonování

Hlava a krk byly vytvořeny až na samotný konec. Byla použita funkce volný tvar, kdy po výběru základního geometrického tělesa (koule, kvádr, válec atd.) a volby jeho rozměrů a umístění je těleso rozděleno na zvolený počet elementů, s kterými lze libovolně ve všech směrech posouvat a měnit celkový tvar. Z důvodů zachování symetrie obou dutin byl tvar pouze protažen nahoru na jedné polovině a zrcadlen do druhé.

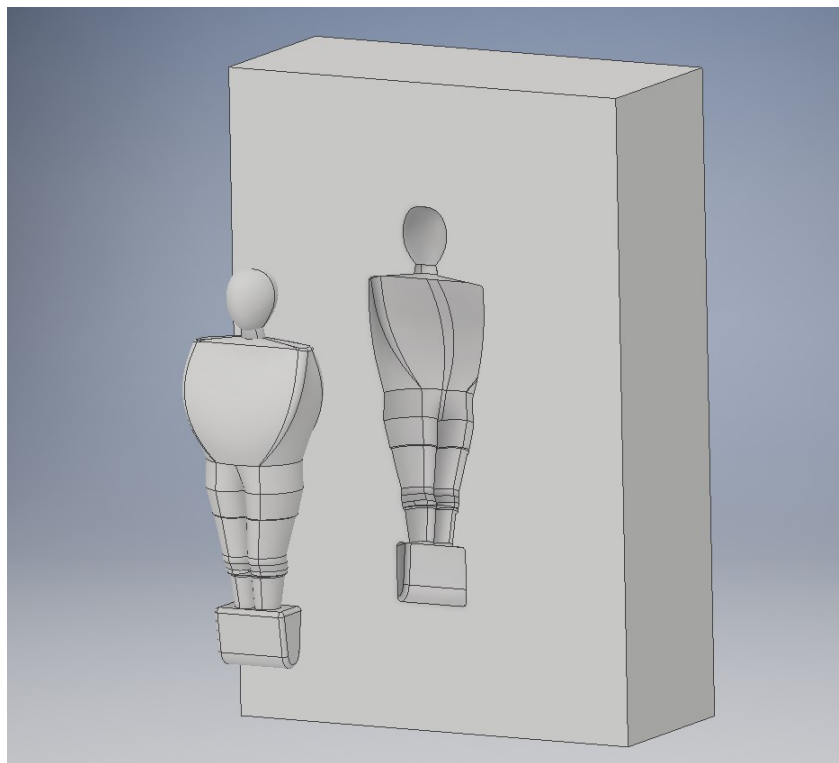


Obr. 36 Hlava rozdělená na více elementů

Vzhledem k usnadnění výroby a programování byly na modelu zaobleny všechny dostupné hrany. Poloměr zaoblení byl volen co největší.

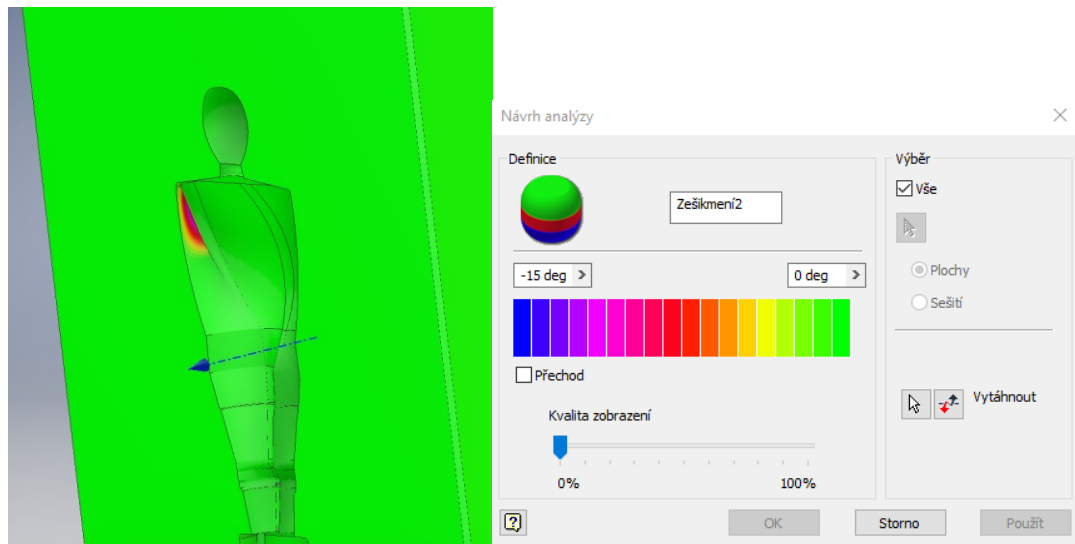
4.2.1 Dutina 1

Na tvorbu dutiny byla použita funkce kombinovat. Funkce slouží na vytvoření negativu vybraných částí modelu. V našem případě byl vytvořen negativ do vytvořeného kvádrů.



Obr. 37 Model 1 + dutina

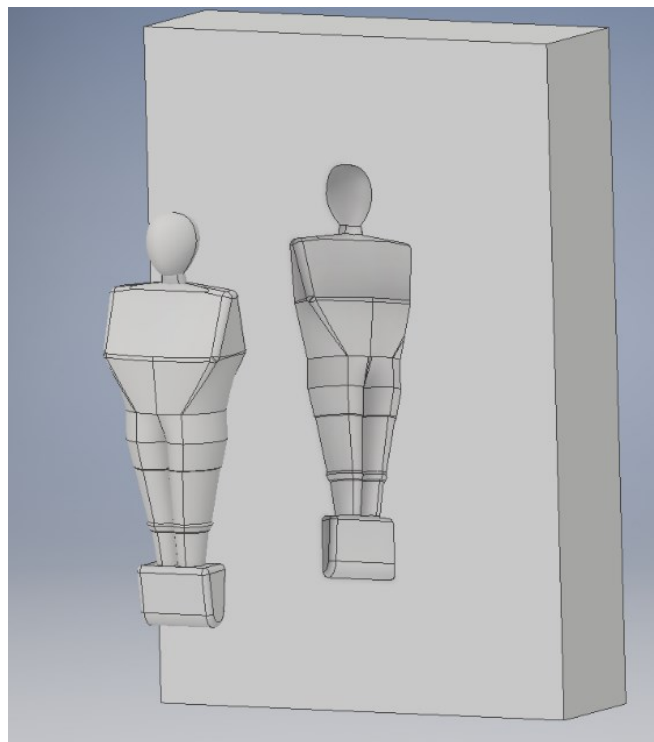
Byla provedena analýza zešikmení povrchu, aby se zabránilo zápornému úhlu v dutině, což by mělo za následek neodformovatelnost kusu při vstřikování. Rozsah úhlu byl zadán $-15^\circ - 0^\circ$. Znárodnění úhlu bylo graficky zobrazeno podle barvy. Čím tmavší barva byla na kuse, tím větší záporný úhel byl v dutině. V oblasti pod rameny bylo zaznamenáno úhlu až -14° .



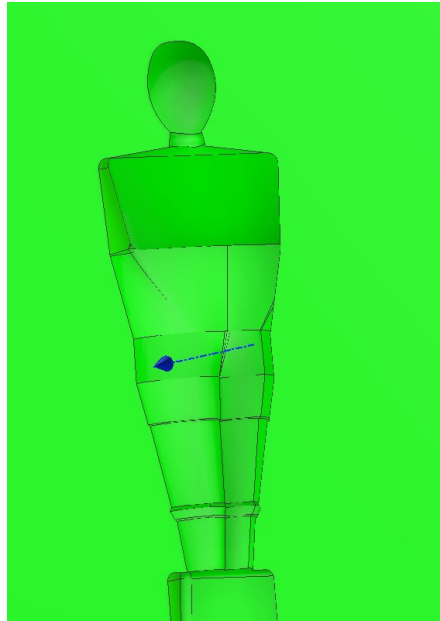
Obr. 38 Analýza zešikmení povrchu (dutina 1)

4.2.2 Dutina 2

Následná úprava modelu spočívala tedy hlavně v úpravě hrudi. Ta se nespojovala jako jeden celek pomocí tří náčrtů, ale byla rozdělena na dvě samostatná spojení (první polovina a druhá polovina zvlášť), což opravilo problém, ale uprostřed hrudi vznikl přechod, který byl částečně opraven zaoblením. Dále byla upravena část nohou, kde byla odstraněna kolena, která způsobila také záporný úhel.



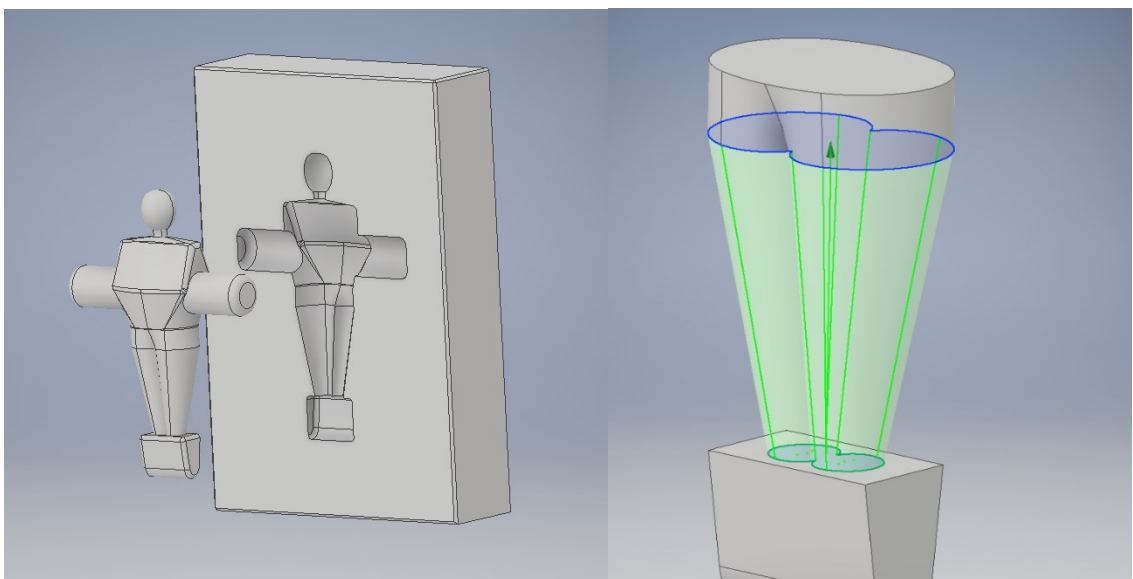
Obr. 39 Model 2 + dutina



Obr. 40 Analýza zešikmení
povrchu (dutina 2)

4.2.3 Dutina 3

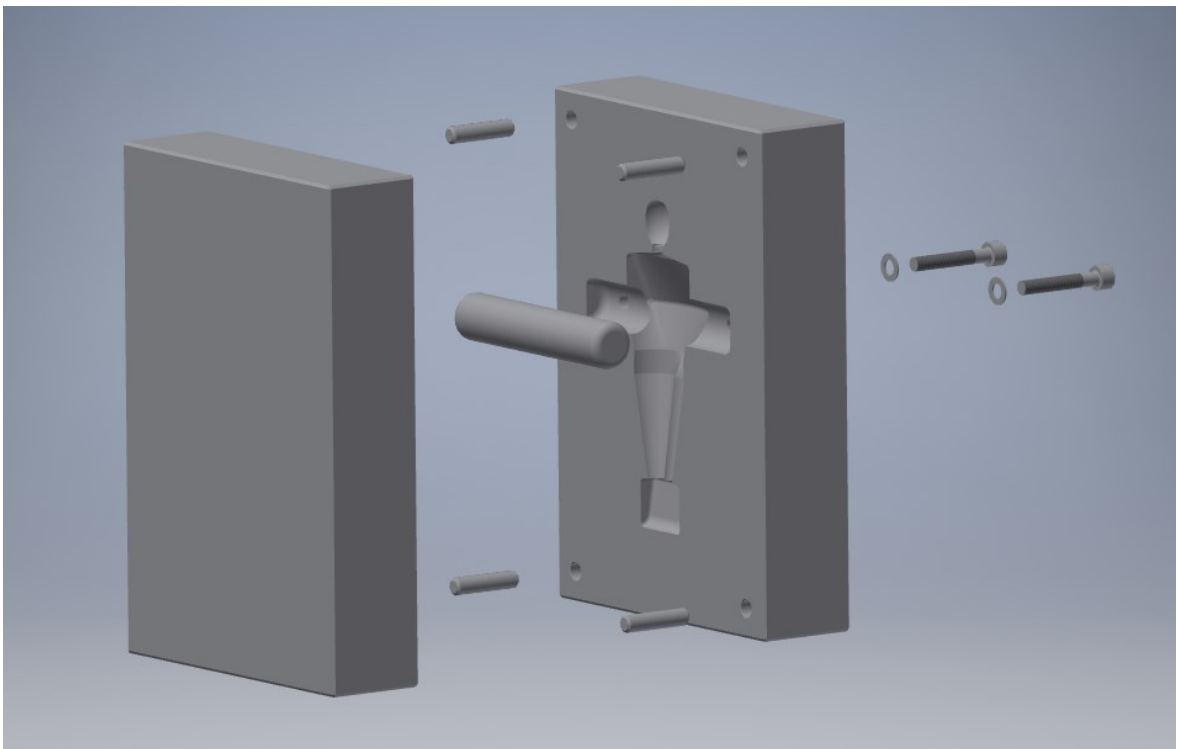
Konečná úprava spočívala ve zjednodušení oblasti nohou, ve které byly odstraněny složité přechody a prvky, které by zhoršovaly následnou výrobu dutiny. Změna byla provedena v úpravě spojení náčrtů, kdy nebyly spojeny všechny náčrty, které znázorňovaly kolena apod., ale pouze spodní a horní část. Tím vznikla část bez přechodu a tvořená jedním povrchem. Do figurky byl přidán čep, který byl také obtisknut do formy. Průměr čepu byl stejný jako velikost otvoru na reálném modelu.



Obr. 41 Konečná úprava (model 3)

4.2.4 Výsledná sestava

Kompletní sestava obsahuje dvě dutiny. Do jedné dutiny jsou nalisovány kolíky o průměru 6mm a vložen vnitřní čep, který má při budoucím vstřikování zajistit uprostřed figurky otvor. Čep je zajištěn pomocí šroubů, které jsou přimontovány ze zadní části dutiny. Druhá dutina obsahuje pouze otvory o průměru 6,05mm na vystředění obou dutin vůči sobě.



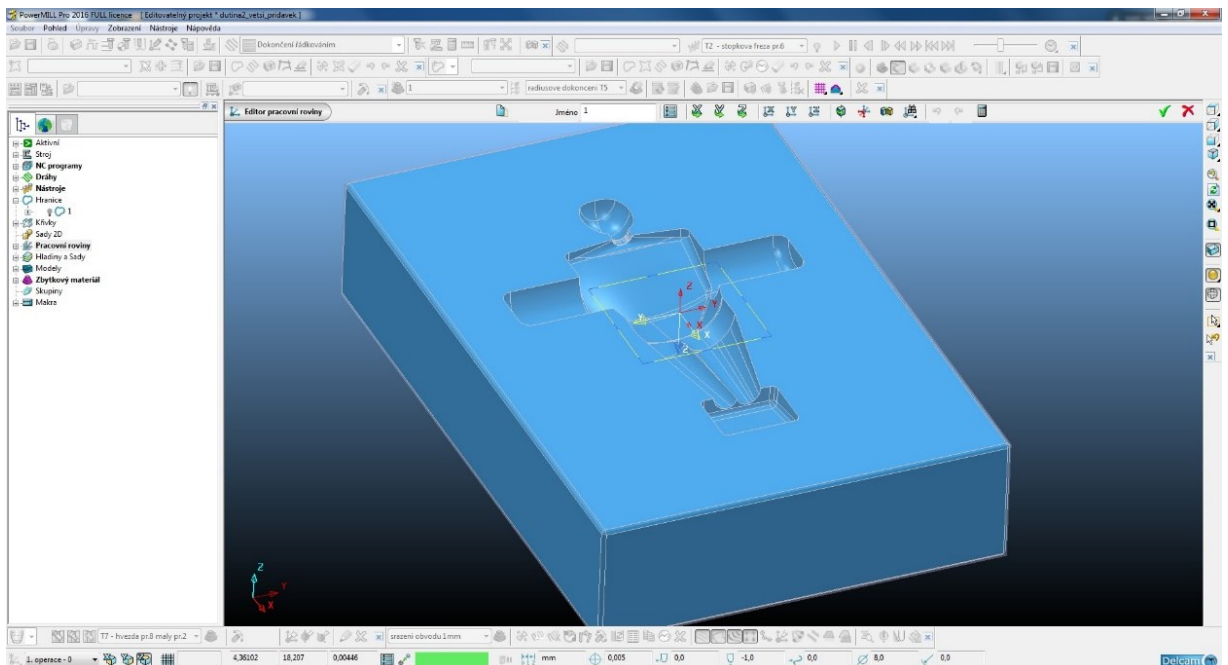
Obr. 42 Výsledná sestava

5 CNC PROGRAMOVÁNÍ A VOLBA ŘEZNÝCH PODMÍNEK

Pro programování byl zvolen CAM PowerMill Pro 2016. Zázemí pro práci s programem poskytla firma C. S. O., která je také vlastníkem licence. Protože se jednalo o symetrický model a tím i dutiny, stačilo naprogramovat jen jednu část, která byla vyrobena 2x. Dodatečné úpravy kusu jako vrtání děr, zahloubení a frézování na celkovou výšku byly naprogramovány pomocí ručního programování přímo na stroji.

5.1 Volba nulového bodu

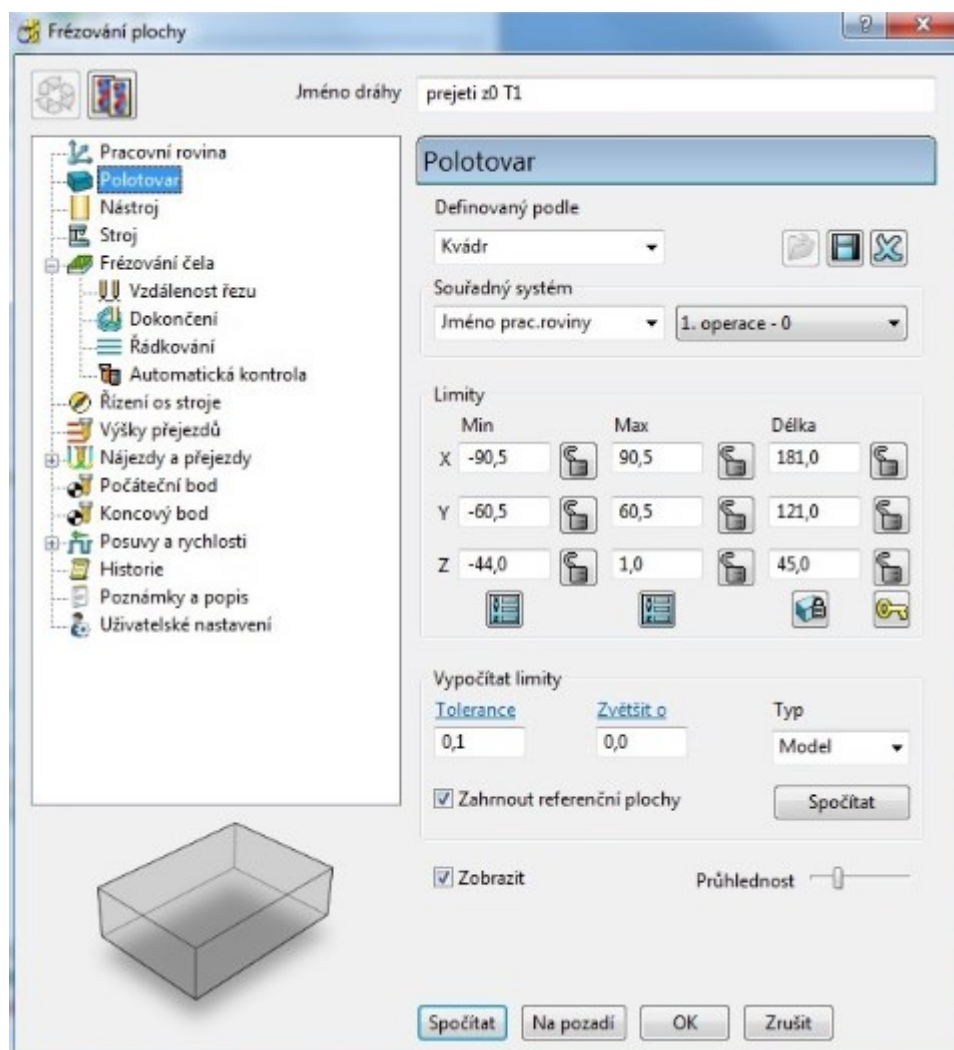
Jako první byl definován nulový bod modelu. Ten je možné volit libovolně v rozích, na středu kusu, nebo jinak odsazený od kraje. Je nutné definovat směry os souřadného systému. Jednalo se o kusovou výrobu, u které byla od začátku známá velikost polotovaru, který byl přesně rozměrově definován, a tak byl nulový bod zvolen na střed kusu jak v ose X, tak v ose Y. Ulehčilo se tím najetí nulového bodu na stroji, kdy se nemusely odečítat přídavky z různých stran kusu. Další část byla volena rovnoběžná s osou X.



Obr. 43 Definice nulového bodu

5.2 Definice polotovaru

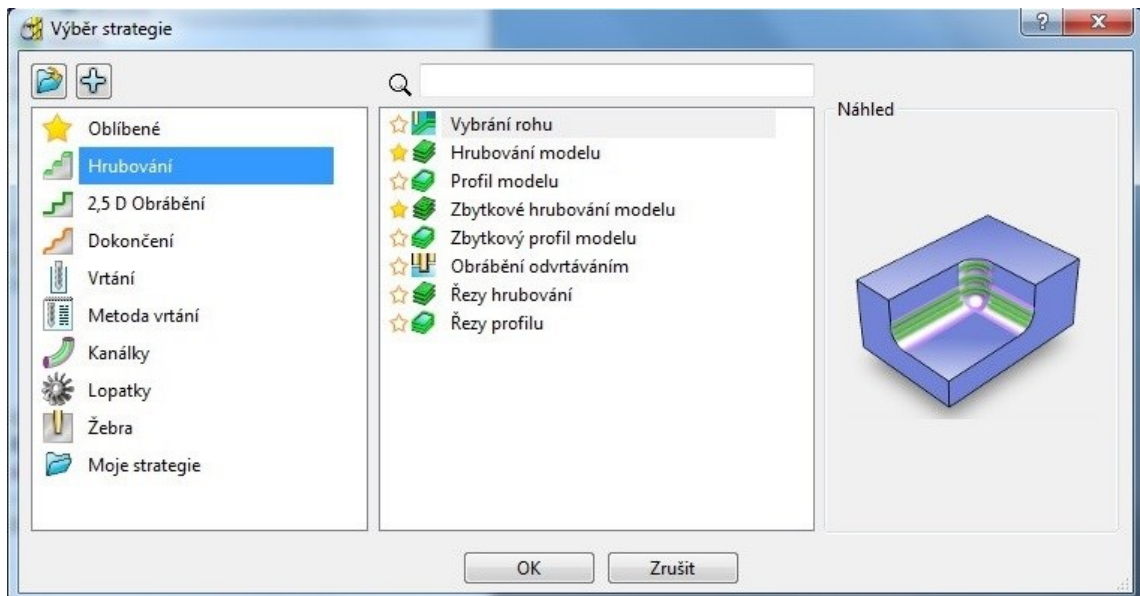
Rozměry polotovaru je nutné správně definovat na začátku programování. Program z něj vychází při generování drah obrábění. Také je možné je dodatečně upravovat při nastavení strategie. Tato úprava byla použita po operaci přefrézování čela, kdy hodnota Z-Max byla obrobena na čisto, tudíž hodnota byla upravena na 0, aby program stále nepočítal s přídavkem v dalších operacích. Velikost polotovaru si můžeme jednoduše zobrazit vzhledem k modelu výrobku.



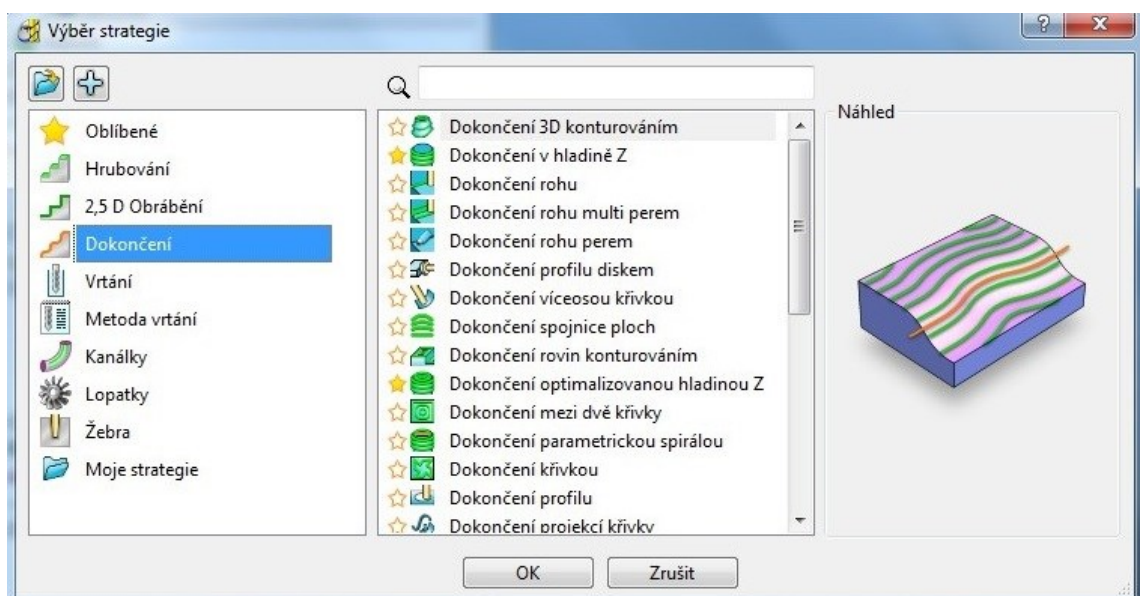
Obr. 44 Tabulka definice polotovaru

5.3 Volba obráběcí strategie

Volba obráběcí strategie závisí na požadovaném obrábění. Program PowerMill Pro 2016 nabízí nepřeberné množství stylů obrábění od hrubovacích metod, přes dokončovací až po obrábění lopatek a žeber. Každá strategie se liší vypočítanými drahami. U každé strategie je zobrazen náhled použití. Na výrobu byly použity funkce jako např. přerovnání čela kusu, hrubování modelu, atd.



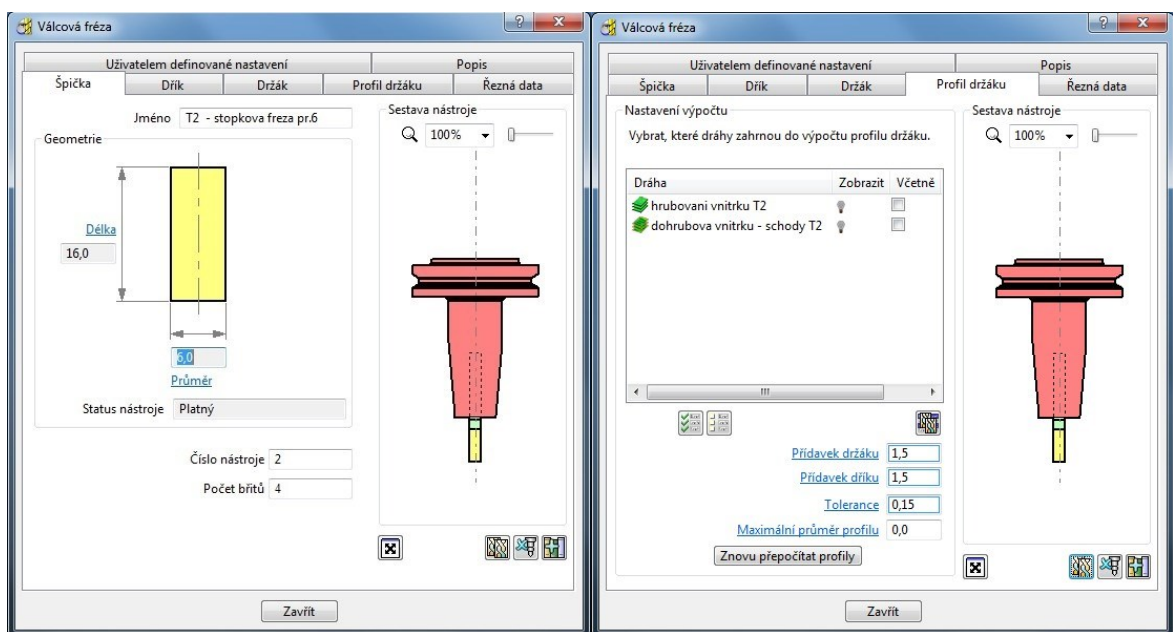
Obr. 45 Hrubovací strategie programu PowerMill Pro 2016



Obr. 46 Dokončovací strategie programu PowerMill Pro 2016

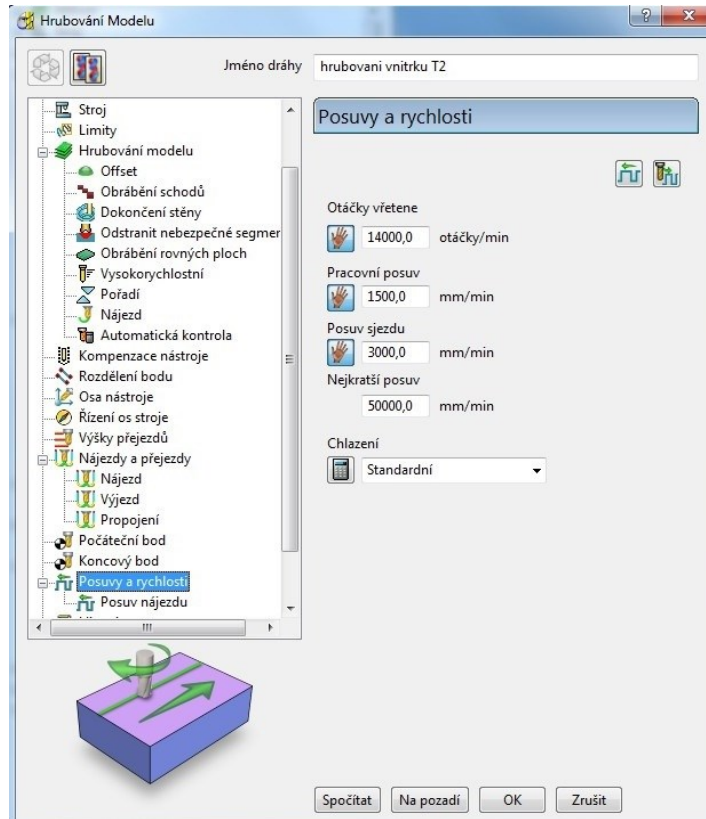
5.4 Volba nástrojů

Definice nástroje probíhá v nastavení strategie obrábění. Bylo nutné zadat základní geometrii jako je průměr a délka ostří nástroje. Podle průměru se počítají dráhy obrábění. Na správnou kontrolu bourání a kolizí je nutné mít definované správné vysunutí nástroje, dřík a samostatný držák nástroje, jejichž nastavení je v samostatných záložkách. V záložce Profil drážku je možnost zobrazení dráhy, které nástroj obrábí. Celá sestava nástroje a držáku je znázorněna v náhledu. Po každé úpravě se náhled automaticky aktualizuje.



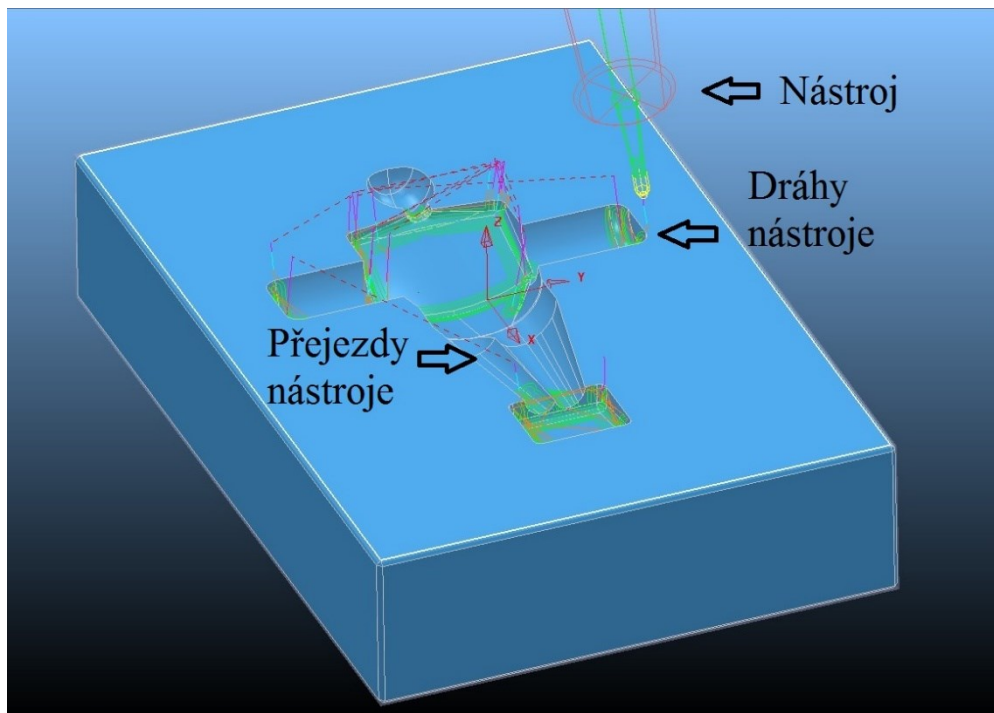
Obr. 47 Definice obráběcího nástroje

Řezné podmínky jsou definovány pro každou strategii zvlášť. Nachází se v definici strategie v panelu Posuvy a rychlosti. Otáčky vřetena a pracovní posuv byl u všech nástrojů zvolen na základě dosavadních zkušeností při obrábění s danými nástroji, aby bylo dosaženo co nejlepších výsledků opracování v co nejkratším čase obrábění.



Obr. 48 Tabulka definice řezných podmínek




Zobrazení drah nástroje je možné přehledně kontrolovat v programu (Obr. 49). Řezné dráhy jsou zobrazené zelenou barvou a přejezdy nástroje barvou červenou.




Obr. 49 Zobrazení drah nástroje (hrubování rádiusů kulovou frézou Ø 3mm)

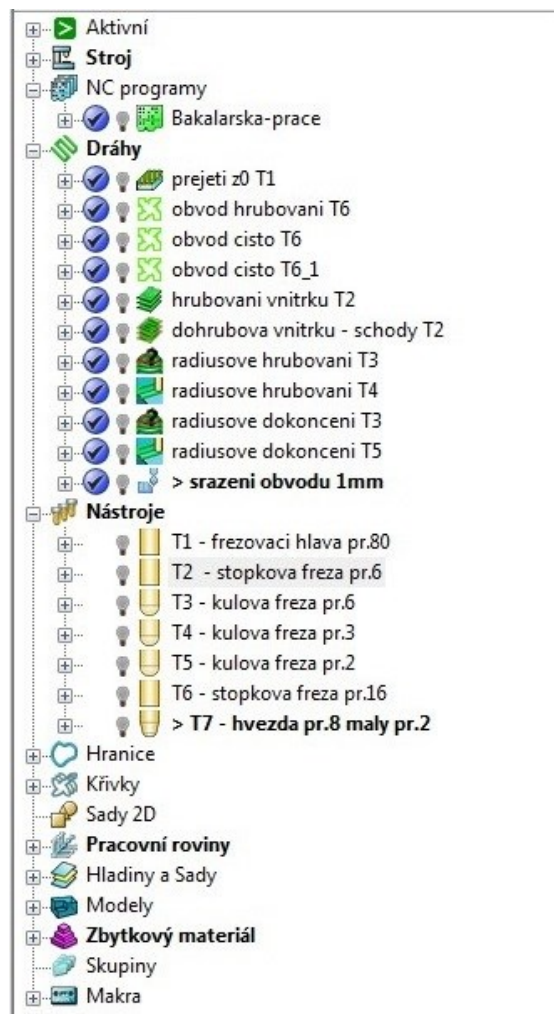
Tab. 5 Použité řezné nástroje

Popis	Obrázek nástroje
<p>Frézovací hlava Ø80mm s výměnnými destičkami</p> <p>Přerovnání čela kusu</p> <p>Dokončení</p> <p>Otáčky: 5 000 ot.min⁻¹</p> <p>Posuv: 3 000 mm.min⁻¹</p> <p>Strategie: frézování plochy</p>	
<p>Stopková fréza Ø 16mm</p> <p>Hrubování obvodu s přídavkem 0,1mm na stěnu, poté dokončení obvodu na čisto.</p> <p>Hrubování</p> <p>Otáčky: 14 000 ot.min⁻¹</p> <p>Posuv: 3 000 mm.min⁻¹</p> <p>Dokončení</p> <p>Otáčky: 4 000 ot.min⁻¹</p> <p>Posuv: 3 000 mm.min⁻¹</p> <p>Strategie: křivka profilu</p>	
<p>Stopková fréza Ø 6mm</p> <p>Hrubování dutiny a schodů s přídavkem 0,2mm pro kulovou frézu Ø6mm.</p> <p>Hrubování</p> <p>Otáčky: 14 000 ot.min⁻¹</p> <p>Posuv: 1 500 mm.min⁻¹</p> <p>Strategie: hrubování modelu</p>	

Kulová fréza Ø 6mm	
<p>Dohrubování po stopkové fréze Ø6mm s přídavkem 0,1mm. Dokončení dutiny a částí se zaoblením >3mm</p> <p>Hrubování Otáčky: 14 000 ot.min⁻¹ Posuv: 3 000 mm.min⁻¹</p> <p>Dokončení Otáčky: 4 000 ot.min⁻¹ Posuv: 3 000 mm.min⁻¹</p> <p>Strategie: dokončení strmé a plošné</p>	
Kulová fréza Ø 3mm	
<p>Dohrubování rádiusů <3mm po kulové fréze Ø6mm. Ponechání přídavku 0,1mm</p> <p>Hrubování Otáčky: 14 000 ot.min⁻¹ Posuv: 1 500 mm.min⁻¹</p> <p>Strategie: dokončení rohu multiperem</p>	
Kulová fréza Ø 2mm	
<p>Dokončení všech rádiusů <3mm</p> <p>Dokončení Otáčky: 14 000 ot.min⁻¹ Posuv: 1 500 mm.min⁻¹</p> <p>Strategie: dokončení rohu multiperem</p>	

Fréza na sražení hran $\text{Ø}8\text{mm}$ 45° , malý průměr 2mm	
Frézování obvodového sražení $1 \times 45^\circ$	
Dokončení	
Otáčky: $14\,000 \text{ ot. min}^{-1}$	
Posuv: $2\,000 \text{ mm. min}^{-1}$	
Strategie: frézování sražení	

Všechny vytvořené nástroje a dráhy jsou přehledně uspořádány ve stromu. Z něj je možné upravovat dráhy a nástroje. Lze také zobrazit jen vybrané dráhy a nástroje. Modré kruhy u drah a NC programu značí, že v pořádku proběhla kontrola na kolize a bourání.



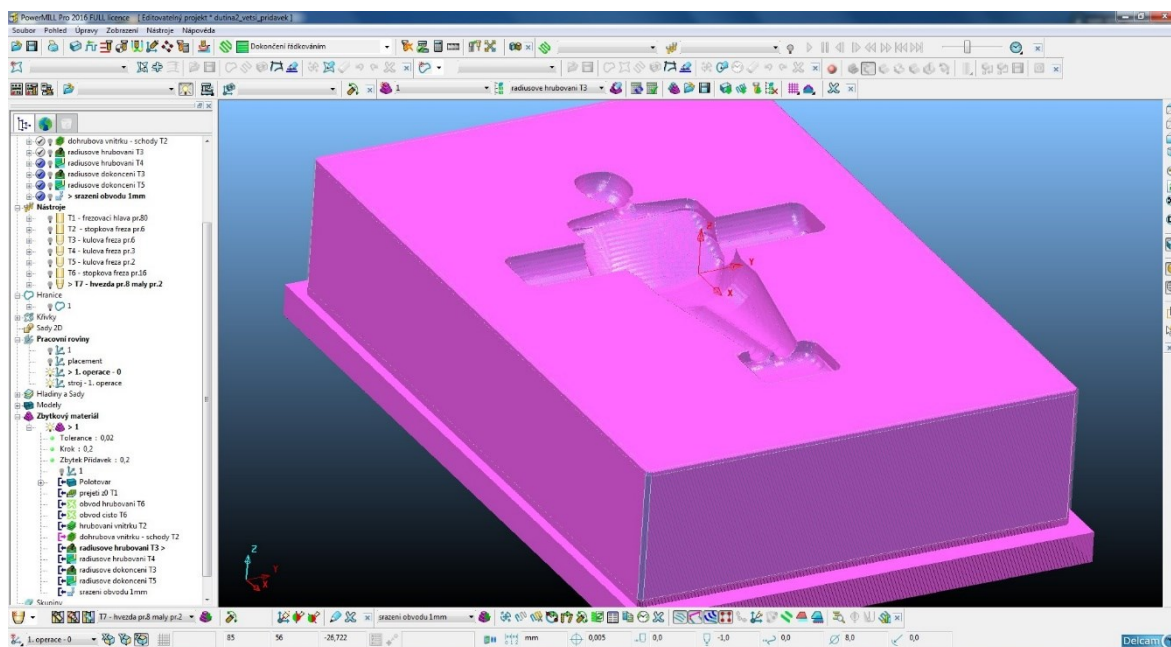
Obr. 50 Přehled vytvořených drah a nástrojů

6 VÝROBA NAVRHNUTÉHO MODELU

Výroba dvou dutin modelu probíhala na pětiosém stroji Hermle C20U s řídicím systémem Heidenhain iTNC530. Jako materiál výrobku byla zvolena slitina hliníku skupiny 5000.

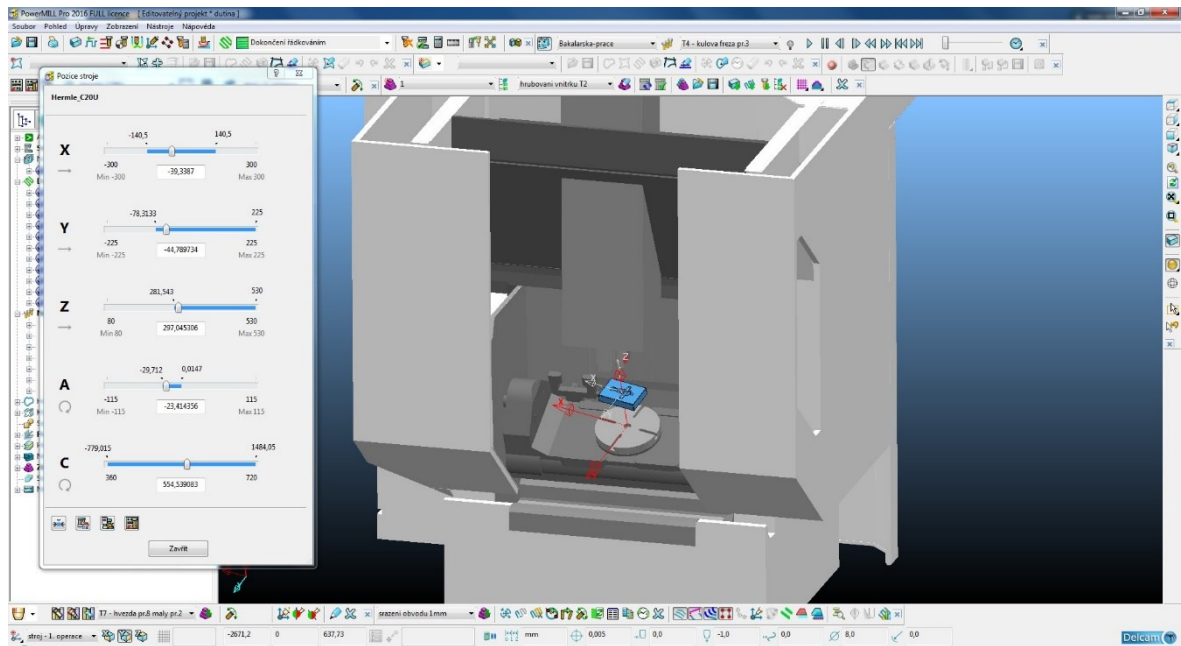
6.1 Simulace obrábění v programu PowerMill Pro 2016

Program PowerMill Pro 2016 nám nabízí možnost simulace obrábění ještě před vygenerováním kódu. V programu si můžeme zobrazit zbytkový materiál po zvolených operacích, čímž máme možnost zjistit chybu neobrobených částí a napojení nástrojů ještě před samotnou výrobou. Při změně nastavení strategie nebo změny dráhy nástroje se zbytkový materiál musí přepočítávat.



Obr. 51 Simulace zbytkového obrábění

Strojní simulace je další možností, kdy je nahrán kompletní model stroje, na kterém se bude obrábět. Při simulaci je možné si zobrazit aktuální souřadnice stroje ve všech osách.



Obr. 52 Strojní simulace v programu PowerMill Pro 2016

6.2 Materiál výrobku

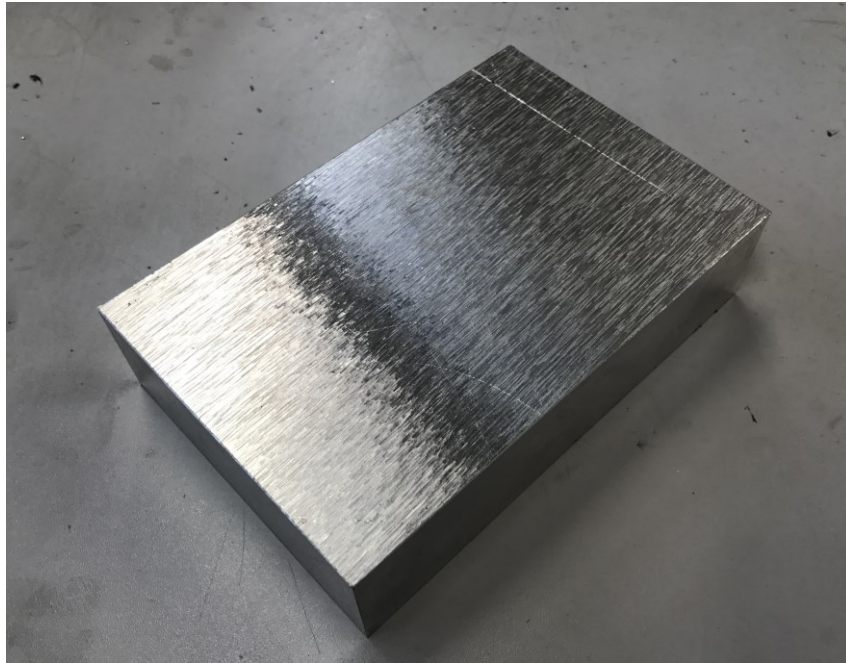
K výrobě byl použit materiál z hliníkové slitiny. Konkrétně se jedná o materiál s označením EN AW5754 (AlMg3). Tento materiál byl zvolen kvůli jeho cenové nenáročnosti.

Materiál je středně pevný, velmi dobře odolný proti korozi a dobře obrobitelný. Používá se pro chemický průmysl, stavbu vozidel a plavidel (nosné konstrukce, součásti zemědělských strojů, výměníky tepla). [30]

Rozměry polotovaru byly 181x121x45. (mm)

Tab. 6 Chemické složení materiálu EN AW5754 (AlMg3) [21]

Cr	Cu	Fe	Mg
max. 0,30%	max. 0,10 %	max. 0,40 %	2,6-3,6 %
Mn	Si	Ti	Zn
max. 0,50 %	max. 0,40 %	max. 0,15 %	max. 0,20 %



Obr. 53 Polotovár z hliníkové slitiny

6.3 Výroba modelu

Výroba probíhala na 5-ti osém obráběcím centru Hermle C20U se řídicím systémem Heidenhain iTNC530. Obráběcí program byl vytvořen v programu PowerMill Pro 2016 a následně byl zkontrolován na kolize a bourání. Po vygenerování byl program pomocí USB flash disku nahrán do stroje.



Obr. 54 Obráběcí stroj Hermle C20U [29]

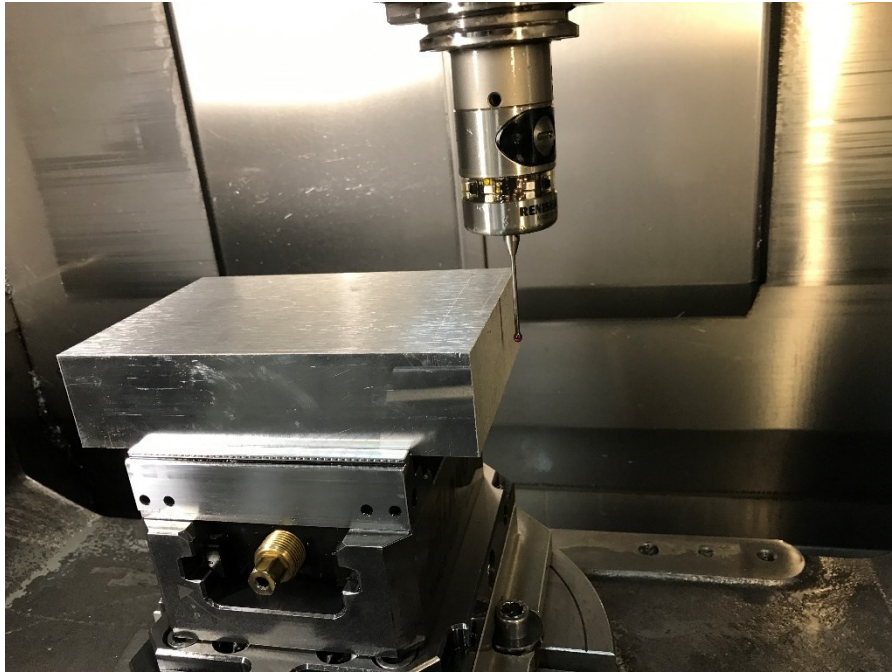
Tab. 7 Specifikace obráběcího stroje Hermle C20U [31]

Pracovní oblast x, y, z	600mm, 450mm, 450mm
Rychlost rychloposuvu	45 m.min-1
Zrychlení	6 m.s-2
Počet nástrojů v zásobníku	30
Maximální otáčky vřetena	10000/ 15000/ 18000/ 40000ot.min ⁻¹ (v závislosti na konfiguraci)
Výkon vřetena	15 kW
Maximální zatížení stolu	300 kg
Rozsah naklonění 5. osy (A)	± 115°
Rozměry stroje š, h, v	2350mm, 3300mm, 2800mm

6.3.1 První část dutiny

Výroba modelu začala najetím nulových bodů na polotovaru. K tomu byla použita dotyková sonda Renishaw. Nulový bod se najíždí podle programu, kde byl zvolen na středu kusu v ose X i v ose Y. V ose Z byl zvolen přídavek na obrábění 1mm. Z důvodu plynulého pětiosého obrábění byla ručně v programu na stroji přepsána tolerance výpočtu dráhy na 0,3mm. To mělo za následek plynulejší obrábění a kratší čas výroby.

Celkový čas obrábění byl 1 hodina a 6 minut. Po dokončení obrábění se v oblasti nohou vyskytlo špatné opracování, které mohlo být způsobeno zvětšenou tolerancí (Obr. 57).

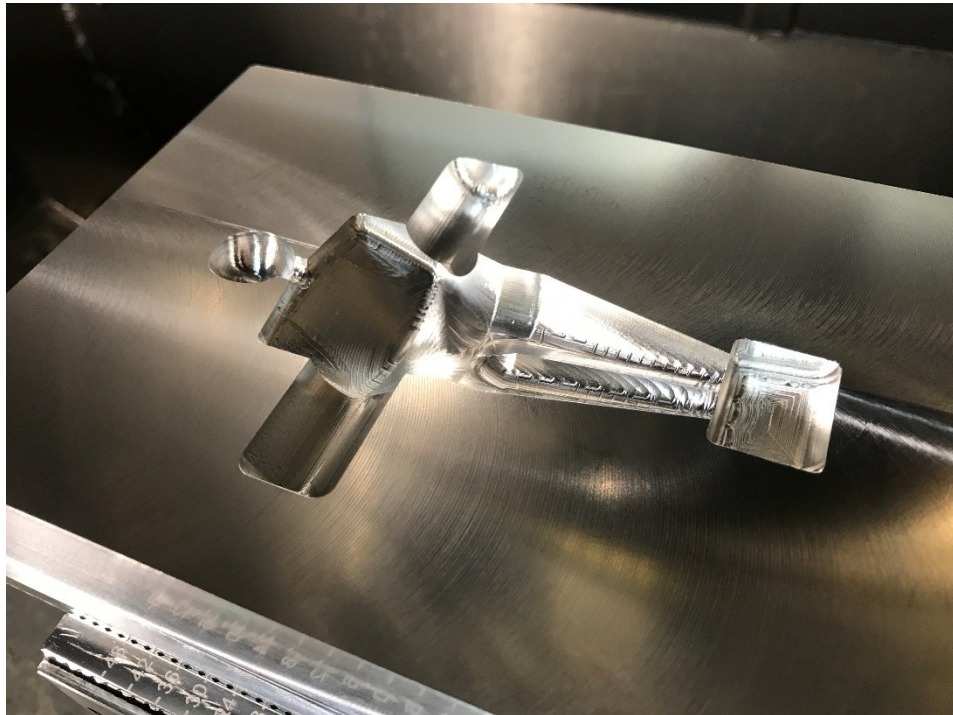


Obr. 55 Upnutí a najetí nulového bodu dotykovou sondou

Zbytkové hrubování dutiny, kdy byla zvolena možnost obrábění schodů (Obr. 56). Při této operaci byl ponechán přídavek na rádiusové hrubování kulovou frézou.



Obr. 56 Hrubování schodů – stopková fréza Ø6

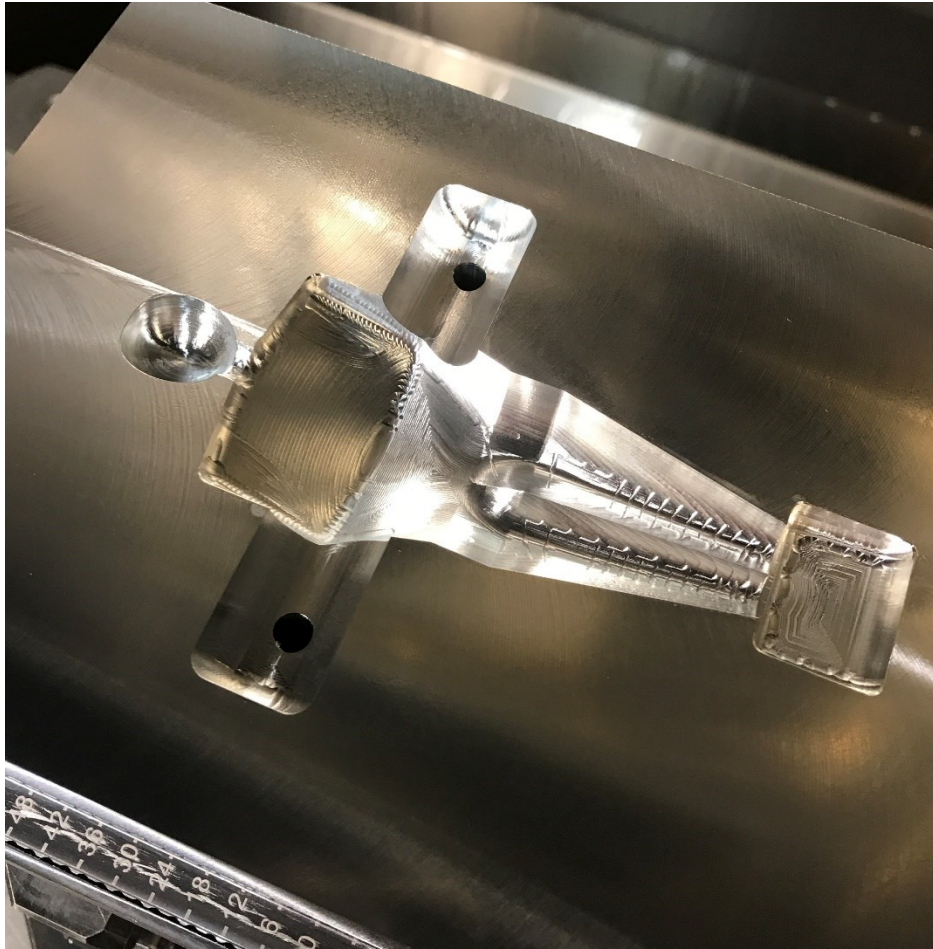


Obr. 57 První část dutiny

6.3.2 Druhá část dutiny

Druhá část byla obrobena upraveným programem, ve kterém byly zvětšeny přídavky na dokončení u kulových fréz z 0,1mm na 0,2mm. Tolerance drah byla na stroji zmenšena na hodnotu 0,05, a to kvůli možnosti odstranění přechodů, které vznikly v oblasti nohou u předchozího obrábění. Z důvodu minimálního zásahu do předchozího programu bylo vrtání děr na šroub napsáno pomocí ručního programování přímo na stroji, aby neovlivnilo výsledný čas obrábění.

Celkový čas obrábění byl 1 hodina a 24 minut. Špatné opracování v oblasti nohou zůstalo (Obr. 58).

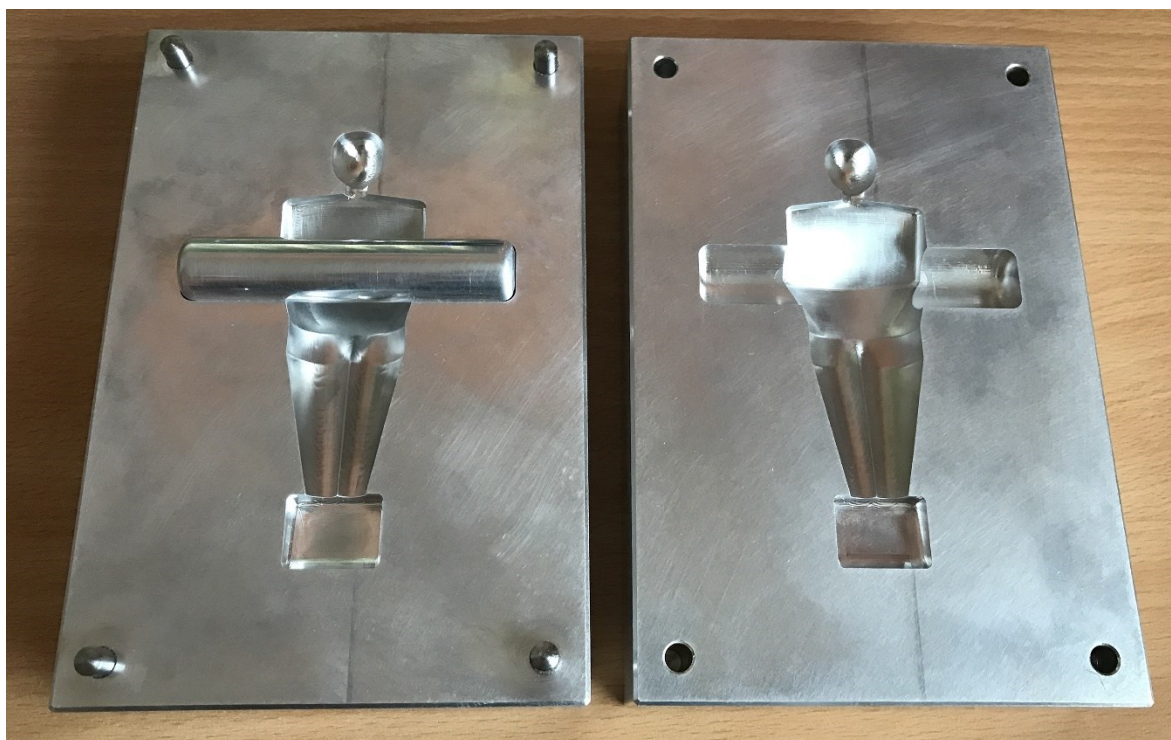


Obr. 58 Druhá část dutiny

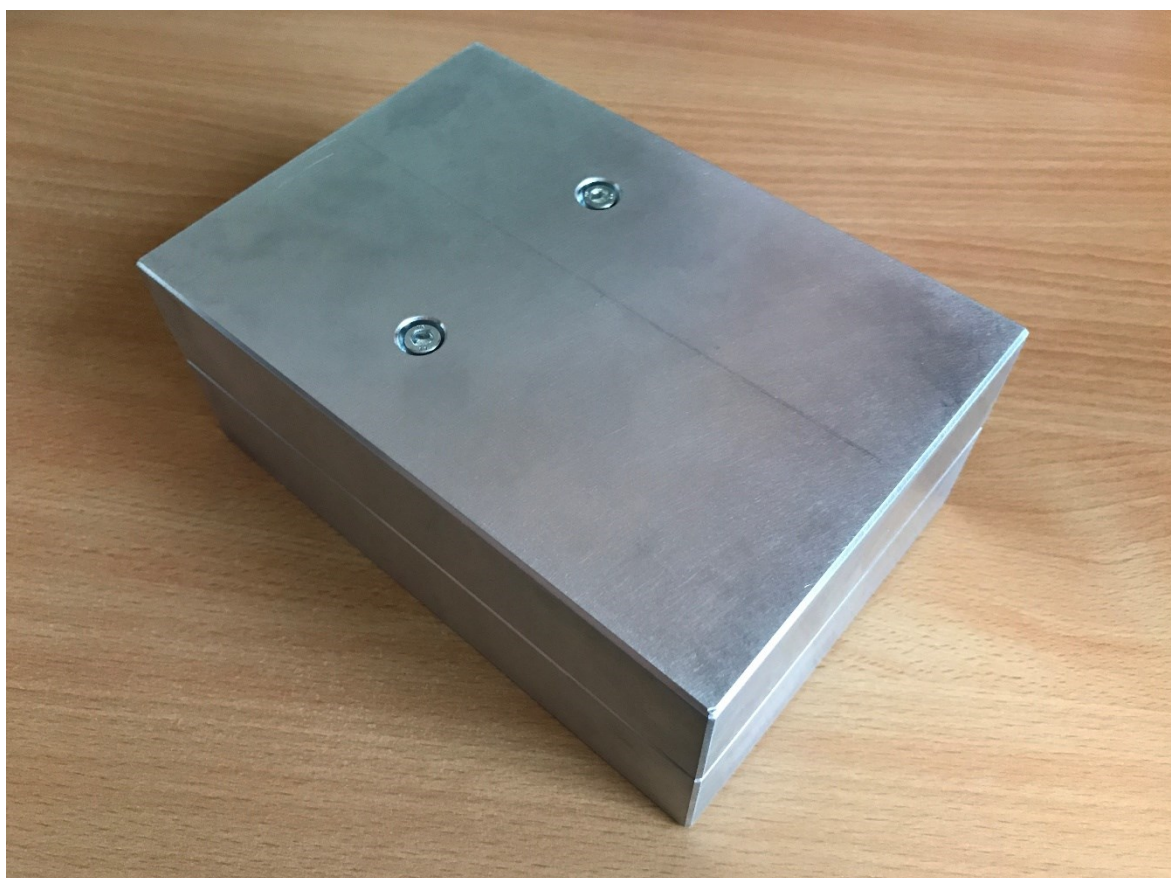
6.3.3 Dodatečné úpravy

Kusy byly ofrézovány na celkovou výšku 35mm a na obvodě byly sraženy hrany. Do druhé části dutiny, která měla otvory na šroub, bylo z druhé strany vyfrézováno zahloubení na šrouby a na přední straně byly v rozích vyfrézovány otvory, do kterých byly nalisovány 4x kolíky průměru 6mm. Do první části dutiny byly pouze na přední straně v rozích dodělány otvory průměru 6,05mm na vycentrování dutin vůči sobě.

Čep byl vyroben na soustruhu a na frézce do něj byly dodělány závity. Dutina byla začištěna pomocí brusné houby. Celý kus byl následně vyleštěn orbitální bruskou.



Obr. 59 Zhotovené obě části dutin



Obr. 60 Složené obě části dutin

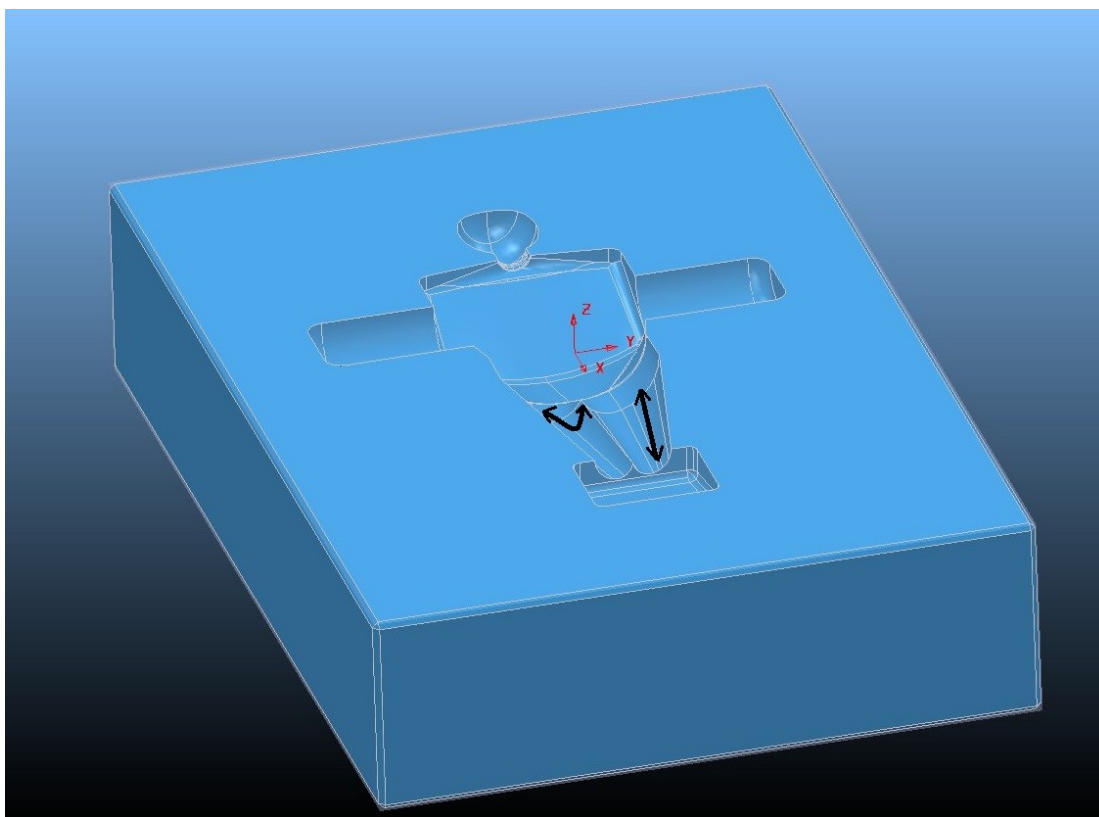
7 VYHODNOCENÍ A ZPRACOVÁNÍ VÝSLEDKŮ

Zvětšení přídávku a zmenšení tolerance nemělo za výsledek žádné zlepšení opracování. Čas obrábění se zvýšil o 18 minut. Při sazbě stroje 1000kč/h byla cena dutiny 1100kč a 1400kč, což představuje nárůst ceny na jednu dutinu o 27,3%. Opracování mohlo být způsobeno stářím stroje a tím pádem horším naklápěním os, nebo špatně zvoleným stylem obrábění.

Oprava by se zaměřila jen na oblast nohou, kde vznikaly problémy. Tato část by se obráběla pouze ve 3D. Ostatní části programu by zůstaly zachovány.

Návrh úpravy obrábění je zobrazen na obrázku 61.

Celkově se jednalo o jednodušší formu programování. Jako hranice byly určeny pouze okraje kusu, což by v normální výrobě nebylo moc vhodné používat kvůli dodatečným úpravám. Pokud by se totiž chtěl upravit např. pouze rozměr vnitřního čepu, nebylo by to možné kvůli tomu, že nástroj, který plochu čepu obráběl, dělal i jiné části těla. Kvůli tomu by se musela odjíždět celá dráha, což by bylo časově náročné. Úprava by byla definování hranic pro různé části dutiny.



Obr. 61 Znázornění úpravy obrábění

vlevo – původní styl pětiosého obrábění, vpravo – navrhnutá úprava 3D obrábění

ZÁVĚR

V teoretické části bakalářské práce je popsána třísková obráběcí metoda frézování, popsány číslíkově řízené stroje a CAM systémy. V praktické části byl v CAM systému PowerMill Pro 2016 naprogramován a na pětiosém stroji Hermle C20U vyroben model z hliníkové slitiny, který byl vytvořen v CAD programu Autodesk Inventor.

Z důvodu špatného opracování první části dutiny byl program na výrobu druhé části upraven. Byly zvětšeny přídávky na dokončení z 0,1mm na 0,2mm a zmenšena tolerance výpočtu drah na stroji. Celkový čas výroby se tím prodloužil, ale výsledná kvalita obrobění zůstala stejná.

Závěrem chci poznamenat, že výslednou kvalitu a efektivitu výroby může z velké části ovlivnit programátor, který by měl při programování výrobku vycházet ze svých vlastních zkušeností.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] KOCMAN, Karel. *Technologické procesy obrábění*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011. ISBN 978-80-7204-722-2.
- [2] FISCHER, Ulrich. *Základy strojnictví*. Praha: Europa-Sobotáles, 2004. ISBN 80-86706-09-5.
- [3] *Sandvik Coromant: Technická příručka - frézování* [online]. [cit. 2016-12-08]. Dostupné z: http://www.rpb.cz/sites/default/files/catalogues/sandvik/MTG_D.pdf
- [4] BÍLEK, Ondřej a Imrich LUKOVICS. *Výrobní inženýrství a technologie*. Ve Zlíně: Univerzita Tomáše Bati, 2014. ISBN 978-80-7454-471-2.
- [5] HLUCHÝ, Miroslav a Václav HANĚK. *Strojírenská technologie 2. 2.*, upr. vyd. Praha: Scientia, 2001. ISBN 80-7183-245-6.
- [6] ŠTULPA, Miloslav. *CNC: programování obráběcích strojů*. Praha: Grada, 2015. ISBN 978-80-247-5269-3
- [7] POLÁŠEK, Jaromír. *Číslicově řízené stroje* [online]. [cit. 2016-11-03]. Dostupné z: http://moodle2.voskop.eu/download/teu/U31_Cislicove_rizene_stroje.pdf. Elektronická učebnice. VOŠ, SOŠ A SOU KOPŘIVNICE.
- [8] SADÍLEK, Marek a Zuzana SADÍLKOVÁ. *Počítačová podpora procesu obrábění: učební text* [online]. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2012 [cit. 2016-11-03]. ISBN 978-80-248-2770-4. Dostupné z: http://projekty.fs.vsb.cz/459/ucebniopory/Pocitacova_podpora_procesu%20_obrabeni.pdf
- [9] SVRČINA, Josef. *Podstata frézování* [online]. Opava, 2012 [cit. 2016-12-15]. Dostupné z: http://www.strojka.opava.cz/UserFiles/File/_sablony/Praxe_II_a_III/VY_52_INOVACE_H-02-20.pdf. Střední škola průmyslová a umělecká, Opava.
- [10] *Tumlikovo Metal Cutting Technologies* [online]. [cit. 2016-12-05]. Dostupné z: <http://www.tumlikovo.cz/>
- [11] *Adaptivní technologie - metody Rapid Prototyping* [online]. [cit. 2016-12-15]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/podklady/sto_bak/cv_STV_04_Aditivni_technologie_metody_Rapid_Prototyping.pdf. Podklady do cvičení. VUT FSI.
- [12] *Happy Art* [online]. [cit. 2016-12-04]. Dostupné z: <http://www.happyart-3d.us/gallery/rapid.html>

- [13] *Mastercam CAD/CAM Systems* [online]. [cit. 2016-12-04]. Dostupné z: <http://www.mastercam.cz>
- [14] *QTE Manufacturing Solutions* [online]. [cit. 2016-12-04]. Dostupné z: <https://www.qtemfg.com/mastercam-2017/>
- [15] *IC Pro* [online]. [cit. 2016-12-04]. Dostupné z: [www
http://www.lcpro.cz/hsmworks.php](http://www.lcpro.cz/hsmworks.php)
- [16] *Autodesk* [online]. 2015 [cit. 2016-12-04]. Dostupné z: http://inthe-fold.autodesk.com/in_the_fold/2015/11/autodesk-announces-hsmworks-and-hsmxpress-2016.html
- [17] *CAD CAM SYSTEMS* [online]. [cit. 2016-12-04]. Dostupné z: <http://www.power-mill.cz/>
- [18] *Autodesk blogs* [online]. 2016 [cit. 2016-12-04]. Dostupné z: <http://blogs.autodesk.com/inthe-fold/autodesk-introduces-2017-cam-products-for-industrial-manufacturing/>
- [19] *SolidCAM* [online]. [cit. 2016-12-04]. Dostupné z: <http://www.solidcam.cz/>
- [20] *AXIOM TECH* [online]. [cit. 2016-12-04]. Dostupné z: <http://www.axiomtech.cz/24816-nx-cam>
- [21] *Nicromal* [online]. [cit. 2017-05-01]. Dostupné z: <http://www.nicromal.de/en/non-ferrous-metals/aluminium/en-aw-5754/70>
- [22] FIALA, Zdeněk. *Analýza měrných řezných sil pro nové obráběné materiály a CNC technologie: Analysis of specific cutting forces for new materials and CNC machining : zkrácená verze Ph.D. Thesis* [online]. 2014. V Brně: Vysoké učení technické, 2014 [cit.2016-12-22]. ISBN 978-80-214-5000-4. Dostupné z: <http://www.vutium.vutbr.cz/tituly/pdf/ukazka/978-80-214-5000-4.pdf>
- [23] *Sandvik Coromant: Technická příručka - materiály* [online]. [cit. 2016-12-05]. Dostupné z: http://www.rpb.cz/sites/default/files/catalogues/sandvik/MTG_H.pdf
- [24] MAŠEK, Petr a Pavel ZEMAN. Efektivní frézování kompozitů s termoplastickou maticí. *Průmyslové spektrum* [online]. 2013 [cit.2016-12-10]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/efektivni-frezovani-kompozitu-s-termoplastickou-matrici.html>
- [25] HLAWICZKA, Petr. Rychlá výroba prototypů - klíč k intenzivním aerodynamickým programům v F1. In: *FINEWS* [online]. 2013 [cit. 2017-01-30]. Dostupné z: <http://flnews.autoroad.cz/technika/45427-rychla-vyroba-prototypu-klic-k-intenzivnim-aerodynamickym-programum-v-f1-video>

[26] *Sandvik Coromant: Rotační nástroje* [online]. [cit. 2017-02-05]. Dostupné z: http://www.sandvik.coromant.com/sitecollectiondocuments/downloads/global/catalogues/cs-cz/rotating/rot_d.pdf

[27] *IGM nástroje a stroje s.r.o.* [online]. [cit. 2017-05-02]. Dostupné z: <http://www.igm.cz/tematicke-clanky/jake-rezne-podminky-jsou-nejlepsi-pro-frezovani/>

[28] *Řezné podmínky při obrábění: podklad pro výuku předmětu TECHNOLOGIE III - OBRÁBĚNÍ* [online]. 2001 [cit. 2017-02-12]. Dostupné z: http://www.kom.tul.cz/soubory/tob_rp.pdf. TU v Liberci, Katedra obrábění a montáže.

[29] *ProfmultiTec s.r.o.* [online]. [cit. 2017-03-30]. Dostupné z: <http://profmulti-tec.cz/stroje-a-zarizeni/>

[30] *NPS PROAL s.r.o.* [online]. [cit. 2017-04-30]. Dostupné z: <http://www.proal.cz/info/424413.htm>

[31] *Hermakina* [online]. [cit. 2017-04-30]. Dostupné z: http://www.hermakina.com.tr/systemfiles/pdf/ueberblick_en.pdf

[32] *RapidPrototyping.nl* [online]. [cit. 2017-05-09]. Dostupné z: <http://en.rapidprototyping.nl/3d-printing/techniques-in-3d-printing/sls-as-technology-for-3d-printing/>

Pozn.: Citace byly generovány z webové stránky <http://www.citace.com>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

CAM	Computer Aided Manufacturing
CAD	Computer Aided Design
AVO	Automatická výměna obrobků
CNC	Computer numeric control
NC	Numerical control
Ra	drsnost – střední aritmetická úchylka profilu
HSS	High Speed Steel
SK	slinutý karbid
2,5D	2,5 dimenze (obrábění v konstantní hloubce)
3D	3 dimenze
5D	5 dimenzí
HRC	Tvrdomost materiálu podle Rockwella
HSC	High Speed Cutting
HSM	High Speed Machining
FDM	Fused Deposition Modeling
SLS	Selective Laser Sintering
EDM	Electric Discharge Machining
X, Y, Z	základní osy u číslicově řízených strojů
A, B, C	otočné osy kolem základních u číslicově řízených strojů
Cr	chemická značka chromu
W	chemická značka wolframu
Mo	chemická značka molybdenu
TiC	karbid titanu
TiN	nitrid titanu

Al_2O_3	oxid hlinitý
f_z	posuv zubu [mm]
V_c	řezná rychlost [$\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$]
n	otáčky [min^{-1}]
V_f	pracovní posuv [$\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$]

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Čelní frézování	12
Obr. 2 Obvodové frézování	12
Obr. 3 Sousedné frézování [3]	13
Obr. 4 Nesousedné frézování [3]	13
Obr. 5 Čelní fréza [26]	14
Obr. 6 Hrubovací stopková fréza [26]	14
Obr. 7 Dokončovací stopková fréza [26]	15
Obr. 8 Stopková fréza na sražení hran [26]	15
Obr. 9 Stopková fréza na zaoblení hran [26]	15
Obr. 10 Závitová fréza [26]	16
Obr. 11 Geometrie břitu frézy [9]	16
Obr. 12 Způsoby řešení problémů vzniklých při frézování [27]	19
Obr. 13 Břítové destičky ze slinutého karbidu [23]	20
Obr. 14 Břítové destičky z řezné keramiky [23]	21
Obr. 15 Břítové destičky ze supertvrdeho materiálu [23]	21
Obr. 16 Speciální frézy na obrábění kompozitních materiálů [24]	22
Obr. 17 Emulzní kapalina	23
Obr. 18 Kartézský souřadnicový systém [7]	27
Obr. 19 Souřadnicový systém obráběcího centra [7]	27
Obr. 20 Souřadnicový systém CNC soustruhu [7]	28
Obr. 21 Pracovní prostor frézky [7]	29
Obr. 22 Srovnání prototypu s finálním výrobkem [12]	29
Obr. 23 FDM metoda [25]	30
Obr. 24 SLS metoda [32]	31
Obr. 25 Obecný postup pro tvorbu programu pomocí CAM [8]	32
Obr. 26 Uživatelské prostředí programu MasterCAM 2017 [14]	33
Obr. 27 Uživatelské prostředí programu HSMWorks 2016 [16]	34
Obr. 28 Uživatelské prostředí programu Autodesk PowerMill 2017 [18]	35
Obr. 29 Základní prostředí programu Autodesk Inventor Professional 2017	37
Obr. 30 Předloha pro model	38
Obr. 31 Základní funkce pro tvorbu náčrtu	38
Obr. 32 Základní funkce pro 3D modelování	39

Obr. 33 Spojení části nohou pomocí funkce šablonování	39
Obr. 34 Ukázka funkce vysunutí	39
Obr. 35 Ukázka funkce šablonování.....	40
Obr. 36 Hlava rozdělená na více elementů	40
Obr. 37 Model 1 + dutina.....	41
Obr. 38 Analýza zešikmení povrchu (dutina 1).....	42
Obr. 39 Model 2 + dutina.....	42
Obr. 40 Analýza zešikmení povrchu (dutina 2).....	43
Obr. 41 Konečná úprava (model 3)	43
Obr. 42 Výsledná sestava.....	44
Obr. 43 Definice nulového bodu.....	45
Obr. 44 Tabulka definice polotovaru	46
Obr. 45 Hrubovací strategie programu PowerMill Pro 2016.....	47
Obr. 46 Dokončovací strategie programu PowerMill Pro 2016	47
Obr. 47 Definice obráběcího nástroje	48
Obr. 48 Tabulka definice řezných podmínek.....	49
Obr. 49 Zobrazení drah nástroje (hrubování rádiusů kulovou frézou Ø 3mm)	49
Obr. 50 Přehled vytvořených drah a nástrojů	52
Obr. 51 Simulace zbytkového obrábění.....	53
Obr. 52 Strojní simulace v programu PowerMill Pro 2016.....	54
Obr. 53 Polotovaz z hliníkové slitiny	55
Obr. 54 Obráběcí stroj Hermle C20U [29]	55
Obr. 55 Upnutí a najetí nulového bodu dotykovou sondou.....	57
Obr. 56 Hrubování schodů – stopková fréza Ø6	57
Obr. 57 První část dutiny	58
Obr. 58 Druhá část dutiny.....	59
Obr. 59 Zhotovené obě části dutin.....	60
Obr. 60 Složené obě části dutin	60
Obr. 61 Znázornění úpravy obrábění.....	61

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Doporučené řezné rychlosti pro čelní frézování s frézami ze slinutého karbidu [10]	18
Tab. 2 Volba řezné kapaliny podle obráběného materiálu [1].....	24
Tab. 3 Požadavky na stroj [1]	25
Tab. 4 Volba materiálu nástroje podle obráběného materiálu [1]	25
Tab. 5 Použité řezné nástroje	50
Tab. 6 Chemické složení materiálu EN AW5754 (AlMg3) [21].....	54
Tab. 7 Specifikace obráběcího stroje Hermle C20U [31].....	56

SEZNAM PŘÍLOH

P I: Bakalářská práce ve formátu PDF

P II: Modely

P III Technická dokumentace

P IV: CNC program