

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



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Technologičnost konstrukce pro díly obráběné frézováním na CNC strojích

Technogenicity of construction for parts manufactured by milling on CNC

AUTOR: Stanislav Šťovíček

STUDIJNÍ PROGRAM: Výroba a ekonomika ve strojírenství

VEDOUCÍ PRÁCE: Tomíček, Jan, Ing., Ph.D.

PRAHA 2021

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Šťovíček** Jméno: **Stanislav** Osobní číslo: **485369**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**
Studijní program: **Výroba a ekonomika ve strojírenství**
Studijní obor: **Technologie, materiály a ekonomika strojírenství**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Technologičnost konstrukce pro díly obráběné frézováním na CNC strojích

Název bakalářské práce anglicky:

Technogenicity of construction for parts manufactured by milling on CNC machines

Pokyny pro vypracování:

Tato práce si klade za cíl shrnutí dostupných poznatků technologičnosti konstrukce se zaměřením na frézování na CNC strojích a využití SW pro programování těchto strojů.

Dílčí kroky práce:

- 1) Vysvětlení pojmu technologičnosti konstrukce
- 2) Představení zásad či opatření technologičnosti konstrukce se zaměřením na frézování dílů
- 3) Rozšíření zásad technologičnosti pro nasazení CNC strojů a SW pro programování
- 4) Ukázka rozdílného řešení při použití CAD/CAM SW
- 5) Prezentace zásad na ukázkovém dílu
- 6) Závěry a doporučení práce

Seznam doporučené literatury:

Bilík, Oldřich; Vrabec, Martin : Technologie obrábění s využitím CAD/CAM systémů, VŠB TUO, Ostrava, 2002
Mádl, J.;Kafka, J.; Vrabec, M.;Dvořák, R.: Technologie obrábění, Vydavatelství ČVUT, Praha, 2000
Mádl, J.;Zelenka, A.;Vrabec, M.: Technologičnost konstrukce, Vydavatelství ČVUT, Praha, 2005

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

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

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

Datum zadání bakalářské práce: **10.04.2021**

Termín odevzdání bakalářské práce: **29.07.2021**

Platnost zadání bakalářské práce: _____

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

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

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

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Abstrakt:

Tato práce se zabývá zásadami technologičnosti konstrukce při obrábění se zaměřením na frézování na CNC frézkách. Tyto zásady dále rozšiřuji na tvorbu NC kódu v CAD/CAM softwarech. V praktické části se věnuji aplikaci těchto zásad a optimalizaci zkušební dílu z pohledu technologičnosti konstrukce. Nakonec pro díl vytvářím NC kód v souladu s technologičností konstrukce ve Fusionu 360 a celý optimalizační proces porovnávám z různých hledisek.

Klíčová slova

technologičnost konstrukce, frézování, CNC frézky, CAM software, Fusion 360

Abstract:

This thesis deals with principles of technologicity of construction in machining with focus on milling on CNC machines. These principles are then extended to the creation of NC code in CAD/CAM software. In practical part of this work I focus on application of these principles and optimization of test part in regard of technologicity of construction. In the end I create NC code by rules of technologicity of construction in Fusion 360 and compare the optimization by different points of view.

Key words:

technologicity of construction, milling, CNC milling machines, CAM software, Fusion 360

Bibliografická citace

ŠŤOVÍČEK, S. *Technologičnost konstrukce pro díly obráběné frézováním na CNC strojích*. Praha, 2021. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní. Vedoucí práce Ing. Jan Tomíček, Ph.D.

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto práci na téma *Technologičnost konstrukce pro díly obráběné frézováním na CNC strojích* vypracoval samostatně, a to výhradně s použitím pramenů a literatury, uvedených v seznamu citovaných zdrojů.

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

V Praze dne

Podpis:

Poděkování

Tímto děkuji panu Ing. Janu Tomíčkoví, Ph. D. za cenné rady a připomínky při tvorbě této bakalářské práce.

1.	Úvod	8
2.	Technologičnost konstrukce	8
2.1.	Zásady technologičnosti konstrukce z hlediska obrábění	8
2.1.1.	Materiál součásti	9
2.1.2.	Volba polotovaru	10
2.1.3.	Počet upnutí	10
3.	Technologičnost konstrukce při obrábění na číslicově řízených obráběcích strojích	10
3.1.	Hlavní zásady obrábění na CNC frézkách	10
3.1.1.	Dutiny a kapsy	12
3.1.2.	Vnitřní zaoblení	12
3.1.3.	Minimální tloušťka stěn obrobku	13
3.1.4.	Díry	14
3.1.5.	Výška obráběných prvků	14
3.1.6.	Maximální rozměry obráběné součásti	15
3.1.7.	Podřezy	15
3.1.8.	Volba nástroje	15
4.	Tvorba NC programu	16
4.1.	Ruční programování	17
4.2.	Dílenské programování	18
5.	Strojní programování	18
5.1.	CAD systémy	19
5.1.1.	Nevyrobitelné prvky	19
5.1.2.	Nehospodárné prvky	20
5.2.	CAM systémy	21
6.	Praktická část	23
6.1.	Návrh součásti	23
6.2.	Optimalizace technologičnosti konstrukce obrobku	25
6.2.1.	Optimalizace spodní části formy	25
6.2.2.	Optimalizace vrchní části formy	26
6.3.	Tvorba NC kódu obrobku	27
6.3.1.	Tvorba NC kódu neoptimalizované spodní části formy	27
6.3.2.	Tvorba NC kódu neoptimalizované vrchní části formy	28
6.3.3.	Tvorba NC kódu optimalizované spodní části formy	29

6.3.4.	Tvorba NC kódu optimalizované vrchní části formy	30
6.3.5.	Porovnání	31
7.	Závěr.....	33
8.	Použitá literatura.....	34
9.	Seznam obrázků	36
10.	Seznam tabulek	37
11.	Seznam příloh.....	38
11.1.	Seznam elektronických příloh	38

1. Úvod

Vývoj výrobní techniky je nekončícím procesem, který přináší časté změny ve výrobě a v zavedení nových technologií. Doby konvenčních strojů jsou už ve většině odvětví pryč, a proto je pro průmyslové podniky v jednadvacátém století, které chtějí zůstat konkurence schopny, téměř nutností modernizovat výrobu zaváděním CNC technologií. Právě kvůli neustálému zrychlování výroby a tlaku na co největší hospodárnost je nutné i na tyto výrobní procesy aplikovat zásady technologičnosti konstrukce. Mnoho těchto zásad je společných s konvenční výrobou, ale existují i oblasti optimalizace technologičnosti, které přicházejí právě až se zavedením CNC obráběcích strojů. Je důležité, aby konstruktér i technolog společně našli balanc mezi co největší hospodárností vyráběného dílu a současným zachováním jeho požadované funkčnosti.

První NC stroje se objevily ke konci 2. světové války ve 40. a 50. letech 20. století. Tyto stroje se od těch soudobých lišily tím, že byly vybaveny motory, které se řídily instrukcemi přiváděnými na děrované pásce. Tato technologie byla v průběhu let vylepšena analogovými a digitálními počítači a v dnešní době pracují CNC systémy s těmi nejmodernějšími počítači a softwary, které práci s nimi mnohonásobně zrychlují, zjednodušují a zpřehledňují. Díky simulacím prováděným v moderních softwarech můžeme předcházet chybám ve výrobě ještě předtím, než se výroba dílu vůbec spustí a ušetřit tím čas i peníze.

2. Technologičnost konstrukce

Cílem technologičnosti konstrukce je najít a zvolit takové konstrukční řešení, které nám zaručí co nejlevnější výrobu při splnění všech požadovaných funkcí. Na provedení sledujeme funkční parametry, jimiž jsou například hmotnost, spolehlivost, životnost výrobku, náročnost na opravu a údržbu, ekologičnost a recyklovatelnost. Dále se řeší problémy efektivnosti výroby, kterými jsou například náklady na výrob, pracnost a v neposlední řadě uplatnění výrobku na trhu, takže jeho cena, design a atraktivita pro zákazníka. Všechny tyto parametry a funkce musíme volit s ohledem na výrobní možnosti podniku, ve kterém je součástí vyráběná. Vzít v potaz musíme dostupné stroje, technologie a také objemovou náročnost výroby, zdali se bude jednat spíše o sériovou anebo kusovou výrobu. Význam nalezení ideální technologičnosti konstrukce roste se zvyšujícím se objemem výroby [1][6].

2.1. Zásady technologičnosti konstrukce z hlediska obrábění

Obrábění je technologie, při které vzniká požadovaný tvar součásti odebráním materiálu. Tím se odlišuje od ostatních technologií jako je například tváření nebo odlévání. Materiál je z obrobku odebrán v podobě třísky.

U technologie obrábění má na dosažený stupeň technologičnosti konstrukce největší vliv volba materiálu, výchozí polotovar a jeho rozměry, požadavky na přesnost rozměrů a drsnosti povrchu obráběných ploch a pracnost. Tyto obecné zásady technologičnosti konstrukce platí jak pro obrábění na konvenčních, tak na číslicově řízených strojích [5].

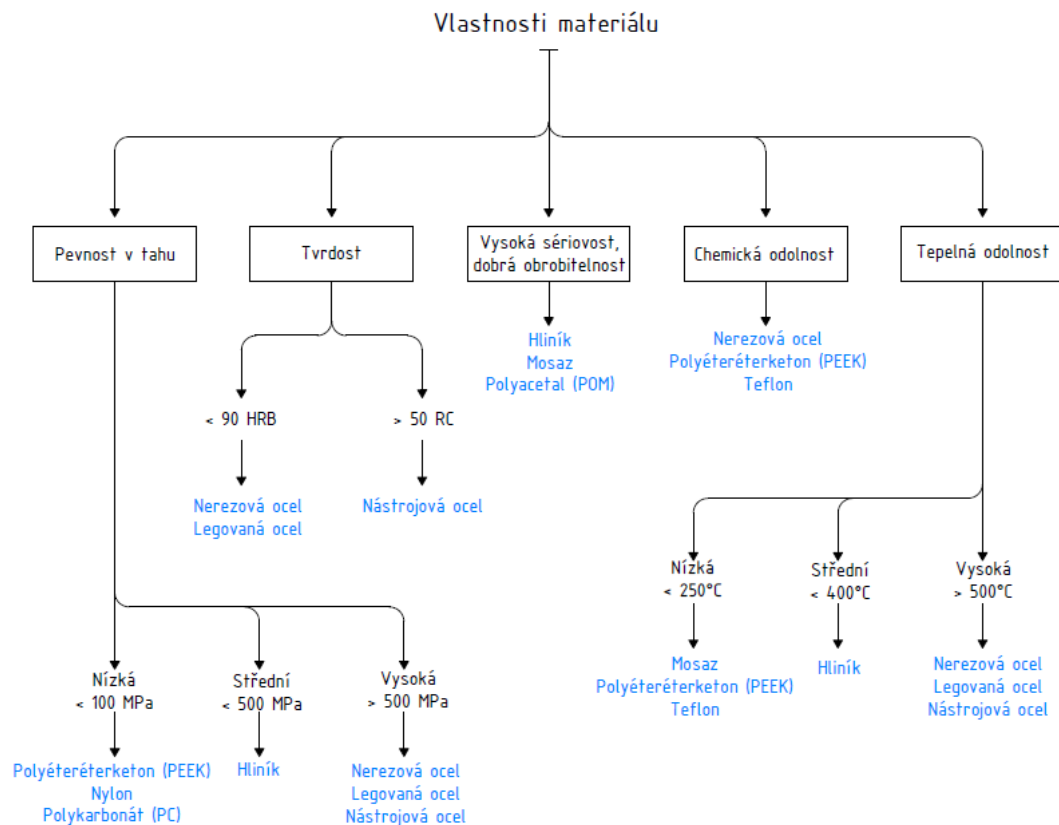
2.1.1. Materiál součásti

Volba materiálu při konstruování z hlediska technologičnosti konstrukce je jedním ze základních problémů. Musíme volit takový materiál, který povede k minimální ceně součásti včetně výrobních nákladů, při současném splnění všech požadovaných vlastností materiálu a parametrů výrobku. Při volbě materiálu podle ceny není vždy nejvhodnější řešení nejlevnější materiál. Dražší materiál může disponovat lepšími mechanickými vlastnostmi, což umožní menší rozměry dílce a tím pádem menší spotřebu materiálu při výběru polotovaru. To pozitivně ovlivní i další posuzované vlastnosti, jako je třeba hmotnost a potřeba menších spojovacích materiálů.

Obrobitelnost zvoleného materiálu je také důležitým faktorem. V dnešní době sice není problém obrábět prakticky jakýkoliv materiál, ale dobrá obrobitelnost nám umožní snížit strojní čas a výrobní náklady tvořené potřebou dražšího nástroje na obrábění.

Další vlastnosti, které určují technologickou vhodnost zvoleného materiálu, jsou pevnost v tahu, odolnost proti opotřebení, odolnost proti korozi a recyklovatelnost [1][3].

Mezi hlavní materiály, které se při obrábění používají patří kovy a jejich slitiny. Čím dál běžnější je i využití plastů, které mají širokou škálu vlastností vyhledávaných u materiálů používaných při obrábění, jako například nízká váha, chemická odolnost a elektrická nevodivost. Kvůli nízké ceně se plasty také často používají při výrobě prototypů a ladí se na nich postup výroby před zařazením větší série. Při výběru materiálu se řídíme jak cenou, tak i vlastnostmi, které po obrobeném dílci vyžadujeme. Volba materiálu není jednoduchá a často bývá kompromisem. Vlastnosti jednotlivých materiálů a zjednodušený rozhodovací diagram můžeme vidět na *obrázku 1*.



Obrázek 1: Schéma volby materiálu [13]

V diagramu vidíme, že pokud nepotřebujeme mechanicky a tepelně odolný materiál, tak můžeme volit levnější plasty a hliník, ale se stoupajícími nároky na tyto vlastnosti musíme volit kovové materiály, jako jsou oceli. Pokud hledáme materiály s vysokou tvrdostí, tak musíme použít nástrojové oceli, ale zároveň musíme počítat s tím, že tyto tvrdé materiály budou náročnější z hlediska obrobitelnosti. Pro vysokou sériovost a dobrou obrobitelnost používáme hlavně hliník, mosaz a polyacetal. Chemickou odolností disponují nerezové oceli, PEEK a teflon. Nejběžnějším materiálem, který se obrábí je Hliník 6061 (AlMg1SiCu) [13].

2.1.2. Volba polotovaru

Při volbě polotovaru se vždy snažíme vybrat takový, který směřuje k minimálním výrobním nákladům. Toho se docílí minimalizací množství materiálu odebraného obráběním. Zejména u číslicově řízených strojů, které dokážou hospodárně obrábět velmi složité tvary z vývalků, se dá těchto složitých polotovarů využít. Vysoká složitost polotovaru se ale vyplácí až se stoupající sériovostí výroby.[1]

2.1.3. Počet upnutí

Čím větší je počet technologických operací, tím větší jsou výrobní náklady na dílec, a proto je důležité obrábět na co nejmenší počet upnutí, nejlépe na jedno. Změnou upnutí také vznikají určité nepřesnosti, které mají za následek odchylky ve vzájemné poloze obráběných ploch. Z tohoto hlediska zlepšují situaci CNC stroje, jejichž vývoj umožňuje provádět řadu odlišných technologických operací na jedno upnutí a tím k tomuto cíli směřují.

3. Technologičnost konstrukce při obrábění na číslicově řízených obráběcích strojích

Při obrábění na konvenčních strojích kompenzujeme jednodušší pracovní cyklus složitějším nástrojem, popřípadě speciálním přípravkem. Z toho důvodu navrhuje konstruktér výrobky, které jsou složeny z jednodušších součástí, které se následně vzájemně pospojují.

Na rozdíl od toho nám stroje řízené počítačem umožňují obrábět složitými pohybovými cykly a tím pádem můžeme použít mnohem jednodušší standardizované nástroje pro výrobu tvarově složitých geometrií. Výměna nástrojů při obrábění na CNC strojích je také automatizovaná, a proto je použití většího množství nástrojů vhodnější než u konvenčního obrábění. Oblastí, kde nám tedy oproti konvenčnímu obrábění odpadají náklady, je minimální potřeba speciálních nástrojů na zakázku a redukce prostor, kde bychom tyto nástroje museli skladovat.

CNC obráběcí stroje nám umožňují vykonávat operace, které by u konvenčního obrábění byly velice nákladné anebo neproveditelné. Zároveň ale musíme počítat s tím, že důležitost dodržování technologičnosti konstrukce je ještě větší, kvůli finanční náročnosti těchto strojů.

3.1. Hlavní zásady obrábění na CNC frézkách

Volba materiálu z hlediska technologičnosti konstrukce je u CNC obrábění ještě zásadnější. Požadavek na co nejlepší obrobitelnost, kvůli levnějšímu obrábění stále přetrvává, ale důležitějším faktorem se stává schopnost vytváření vhodné třísky. Při obrábění na CNC strojích je zásah obsluhy do prostoru stroje nežádoucí anebo dokonce nemožný, a proto je vhodné volit

takový materiál, který netvoří dlouhé třísky, které by se mohly v prostorách stroje hromadit a tím pádem poškodit obrobek anebo dokonce samotný stroj.

Při kusové a malosériové výrobě bývá nevhodnější obrábět válcové a tažené polotovary, kvůli jednoduchému upnutí a výměně obrobku, ale se stoupající sériovostí se musíme snažit redukovat množství odebíraného materiálu a obrábění vzduchu, a proto se volí přesnější polotovary v podobě výkovků a odlitků. Je nutné tedy najít kompromis mezi dražším polotovarem a množstvím nepotřebných operací podle velikosti vyráběné série [1].

Dalším důležitým faktorem technologičnosti konstrukce při obrábění na CNC strojích je volba přesnosti rozměrů a drsnosti. Výhodou CNC strojů je právě dosahování vysokých přesností a malých drsností. Těch se samozřejmě dá dosáhnout při dobrých podmínkách i na konvenčních strojích. Velkým rozdílem a výhodou CNC strojů ale je jejich stála opakovatelnost bez rušivých vlivů lidského faktoru, a to i u levnějších CNC center. Důležité je, aby konstruktér předepisoval tyto parametry zodpovědně a dostatečně. Je nežádoucí předepisovat zbytečně vysoké jakostní parametry na plochy, které nejsou funkční, protože se zbytečně prodlužuje doba a nákladnost výroby.

Konstruktér by měl výrobek vědomě navrhovat s plochami, za které bude možné obrobek upnout, a to snadně a především pevně, aby nedocházelo k nepřesnostem a vzniku zmetků.

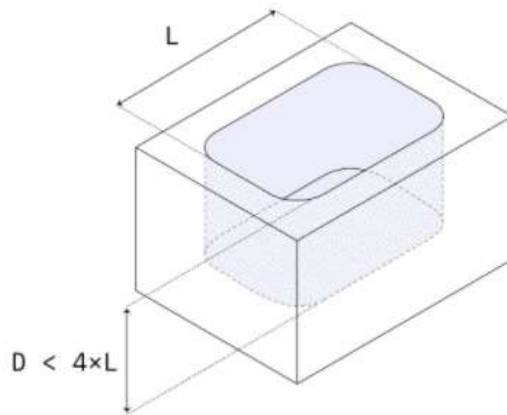
U všech těchto zásad je důležité hledět na velikost vyráběné série. U kusové série může být technologičnost značně nevyhovující, ale se stoupajícím množstvím vyrobených kusů se zvyšuje nárok na optimálně zvolenou technologičnost a postup výroby, protože každá ušetřená koruna a sekunda ve výrobě jednoho kusu se ve velkých sériích značně podepíše na celkových nákladech.

Na rozdíl od obrábění na konvenčních strojích, kdy se zásady technologičnosti konstrukce s vývojem strojů prakticky nemění, nám vývoj NC a zejména CNC obráběcí techniky přináší stále nové možnosti výroby tvarových ploch, a tím pádem se i zásady technologičnosti konstrukce s rozvojem této výrobní techniky mění. Zásady technologičnosti konstrukce je tedy nutné neustále přehodnocovat a sledovat vývoj numericky řízených obráběcích strojů [8].

V rámci technologičnosti konstrukce existují geometrické prvky a jejich parametry, kterým bychom se při návrhu součásti měli vyhnout.

3.1.1. Dutiny a kapsy

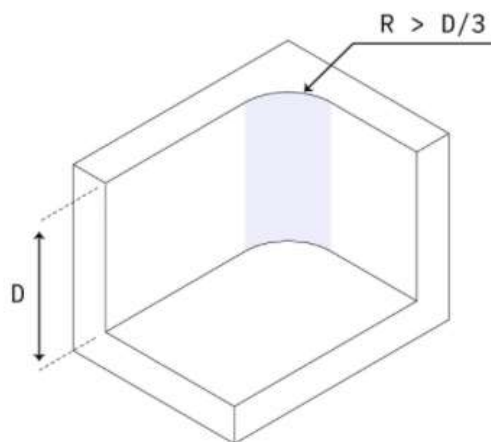
Při obrábění dutin je doporučeno, aby hloubka dutiny dosahovala maximálně hodnoty čtyřnásobku její šířky. Pokud by byla tato hodnota přesáhnutá, tak musíme použít nástroje s větším průměrem, a to nepříznivě ovlivní velikost zaoblení vnitřních rohů. Další omezující podmínkou je, aby hloubka dutiny nepřesáhla desetnásobek průměru nástroje. Při větší hloubce je problém s pevností a dosahem nástroje [14][15].



Obrázek 2: Schéma hloubky dutin a kapes [13]

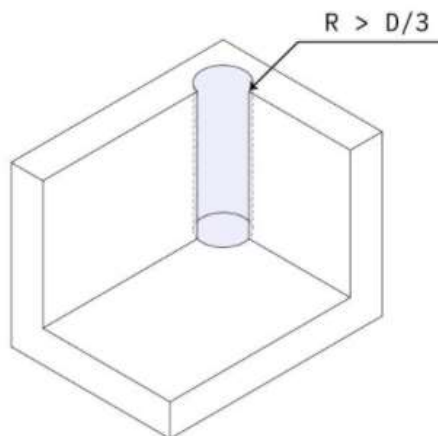
3.1.2. Vnitřní zaoblení

Obecně platí, že čím větší vnitřní zaoblení, tím lepší. Důvodem je, že čím menší zaoblení použijeme, tím menší nástroj na tvorbu této dutiny musíme použít, a to je samozřejmě v rámci technologičnosti nežádoucí. Menší nástroj totiž znamená delší strojní časy a zbytečné výměny nástrojů. Vhodná velikost vnitřního zaoblení je aspoň třetina hloubky kapsy [13][14].



Obrázek 3: Poloměr zaoblení vnitřního hrany [13]

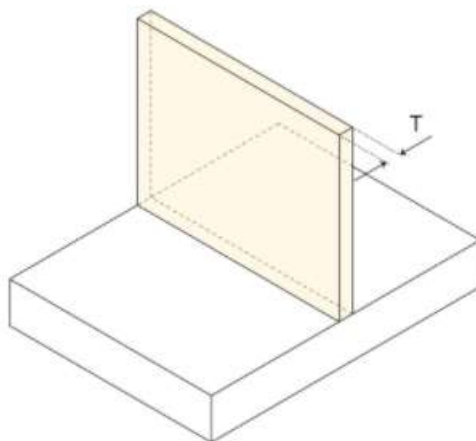
V některých konstrukčních případech se ale vyžaduje, aby do dutiny zapadl protikus s obdélníkovým průřezem. V tomto případě není řešením zmenšovat průměr nástroje a snažit se dosáhnout co nejmenšího zaoblení. Namísto toho je vhodné využít podříznutí hrany součásti, které umožní protikusu s ostrou hranou bez problému zapadnout. Toto podříznutí by mělo mít také velikost aspoň jedné třetiny hloubky dutiny [14].



Obrázek 4: Podříznutí vnitřní hrany [13]

3.1.3. Minimální tloušťka stěn obrobku

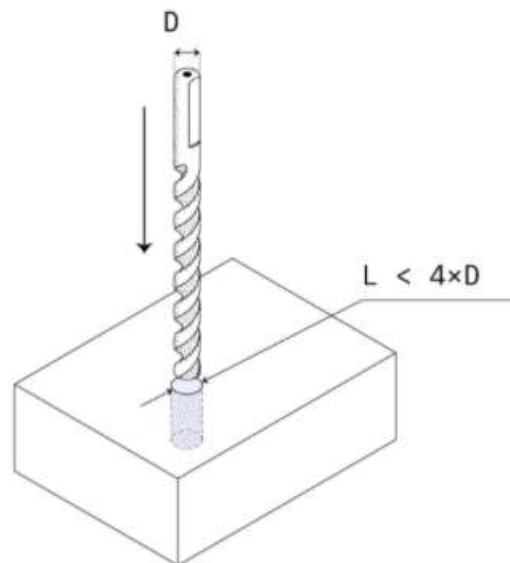
V rámci snižování hmotnosti dílu může být lákavým řešením zmenšovat tloušťky stěn, ale i to má své limity. Při snižování tloušťky stěny klesá tuhost výrobku a dochází k výraznějším vibracím při jeho obrábění. Z toho důvodu pak není možné dosáhnout požadovaných tolerancí a výsledný díl je nepřesný. Doporučená tloušťka stěny se samozřejmě liší u každého materiálu, ale obecně se dá říct, že by minimální tloušťka stěny u kovů měla být větší než 0,8 mm a u plastů 1,5 mm [13][15].



Obrázek 5: Minimální tloušťka stěny [13]

3.1.4. Díry

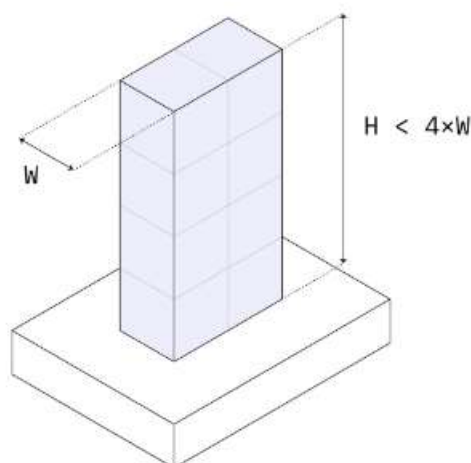
V rámci efektivní a jednoduché výroby je vhodné volit díry standardizovaných velikostí tak, aby bylo možné při jejich výrobě použít vrtáky běžných velikostí. Pokud je díra vrtaná vrtákem, musíme počítat s kuželovitým zakončením. V případě, že budeme obrábět díry nestandardizovaných velikostí, tak je vyrobíme stopkovou frézou a při jejich výrobě bude postupovat jako při obrábění dutin nebo kapes. Při posuzování technologičnosti se také musí brát ohled na hloubku vrtaného otvoru, protože pro extrémně hluboké otvory se musí použít specializované vrtáky, které nám samozřejmě mnohonásobně prodraží výrobu. Hloubka děr by pro jednoduchost výroby neměla přesahovat čtyřnásobek průměru vrtáku [13][16].



Obrázek 6: Rozměry vrtaných děr [13]

3.1.5. Výška obráběných prvků

Prvky, které jsou příliš vysoké se obtížně obrábějí. Důvodem je, že jsou tyto prvky náchylné k vibracím, a to komplikuje dodržení předepsaných tolerancí. Především tomuto problému se občas dá změnou upnutí, ale s tím mnohdy vyvstanou zase jiné problémy, proto je vhodné v rámci optimální technologičnosti konstrukce navrhovat prvky, jejichž výška nepřesahuje čtyřnásobek jejich šířky [13].



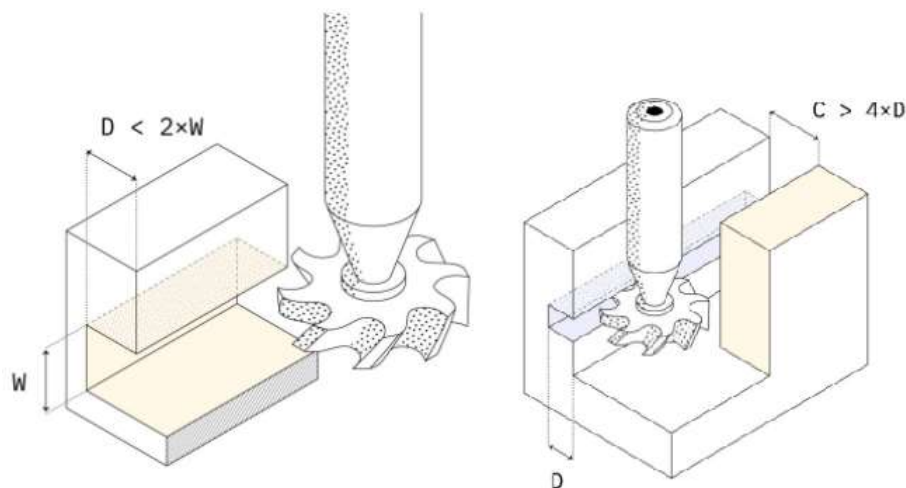
Obrázek 7: Optimální výška obráběného prvku [13]

3.1.6. Maximální rozměry obráběné součásti

Prostor pro obrábění je u CNC strojů omezen, a proto se musí při projektování dílu s těmito omezujícími podmínkami počítat. Při návrhu součásti je vhodné počítat s určitou rezervou a nehnat zbytečně schopnosti stroje do extrému. Pokud je třeba vyrobit nějakou větší součást, je možné jí konstruovat jako více dílů, které se samostatně obrobí a následně spojí v jeden. Pro běžné CNC frézky jsou krajní rozměry obráběné součásti 400 x 200 x 150 mm, velká obráběcí centra mohou tyto rozměry posunout až na 2000 x 800 x 1000 mm. Při použití víceosých strojů se tyto rozměry ještě více zmenšují z důvodu složitější manipulace [13].

3.1.7. Podřezy

Podřezy jsou prvky, které není možné obrábět běžnými nástroji, protože některé jejich části nejsou přístupné přímo od vřetene frézky a nacházejí se pod materiálem obrobku. K obrábění těchto ploch se používají frézy na T drážky (u kolmých ploch), anebo rybinové frézy (u ploch zkosených pod určitým úhlem). Hloubka podřezu by neměla přesáhnout dvojnásobek jeho šířky a při tvorbě jednostranného podřezu by měla být vzdálenost od protější stěny obrobku větší než čtyřnásobek hloubky podřezu, kvůli bezproblémovému přístupu nástroje [15].



Obrázek 8: Rozměry frézovaných podřezů [13]

3.1.8. Volba nástroje

Výhodou obrábění na číslicově řízených strojích je možnost tvorby složitých obráběcích drah. U konvenčního postupu obrábění vytváříme jednoduché řezné dráhy a při jejich tvorbě počítáme s teoretickým průměrem nástroje, proto například pro drážku nebo roh kapsy o velikosti 5mm použijeme nástroj o velikosti 5mm a jednoduchým pohybem tuto geometrii vytvoříme. U CNC strojů, ale můžeme použít menší nástroj a složitější interpolované dráhy, které roh kapsy nebo drážku o velikosti 5 mm také vytvoří a zároveň udrží vhodný úhel opásání. Kvůli tomu je vhodné volit při obrábění na CNC frézkách namísto nástroje, který má stejný teoretický rozměr jako obráběná geometrie nástroj, který má průměr menší ($R_{\text{nástroje}} < R_{\text{geometrie}}$). Toto rozhodnutí, ale musíme zvážit vzhledem k delšímu strojnímu času při obrábění menším nástrojem a najít vhodný kompromis.

Další aplikací je velmi přesné obrábění, kdy si můžeme změřit přesný rozměr nástroje a podle jeho skutečné velikosti upravit dráhy tak, abychom geometrii vyrobili co nejpřesněji.

4. Tvorba NC programu

Faktorem technologičnosti konstrukce, který se u konvenčního obrábění neobjevuje, je právě tvorba NC programu. Ten řídí celou výrobu součásti a zásadním způsobem ovlivňuje efektivnost výroby dílu. Kvalita NC programu je pro obrábění na CNC strojích stěžejní. Výroba na špičkovém CNC stroji s nevhodným a neefektivním NC programem může být zastíněna průměrným CNC strojem se správným a odladěným NC programem [1].

Za pomoci vytvořeného programu jsou CNC stroje ovládány řídicím systémem stroje. Program je tvořen alfanumerickými znaky, které zadávají stroji požadované činnosti a polohy, kam se má s nástrojem pohnout. V samotném programu na sebe navazují skupiny znaků, které nazýváme bloky a věty [9].

Údaje, které se v programu nacházejí můžeme rozdělit do tří skupin:

Údaje geometrické – Tyto údaje definují dráhy nástroje podle rozměrů obrobku a metody, kterou danou součást obrábíme. Patří sem i údaje o příjezdech a odjezdech nástroje od a zpět k součásti. Dráhy jsou popsány v kartézských souřadnicích, pro frézky jsou to většinou X, Y a Z. Pokud se jedná o program na víceosém stroji, tak se počet popsaných os navyšuje [9].

Údaje technologické – V těchto údajích najdeme parametry obrábění a informace, které souvisí s typem nástroje, jimiž jsou například řezná rychlost, otáčky vřetene, hloubka třísky, posuv a typ nástroje [9].

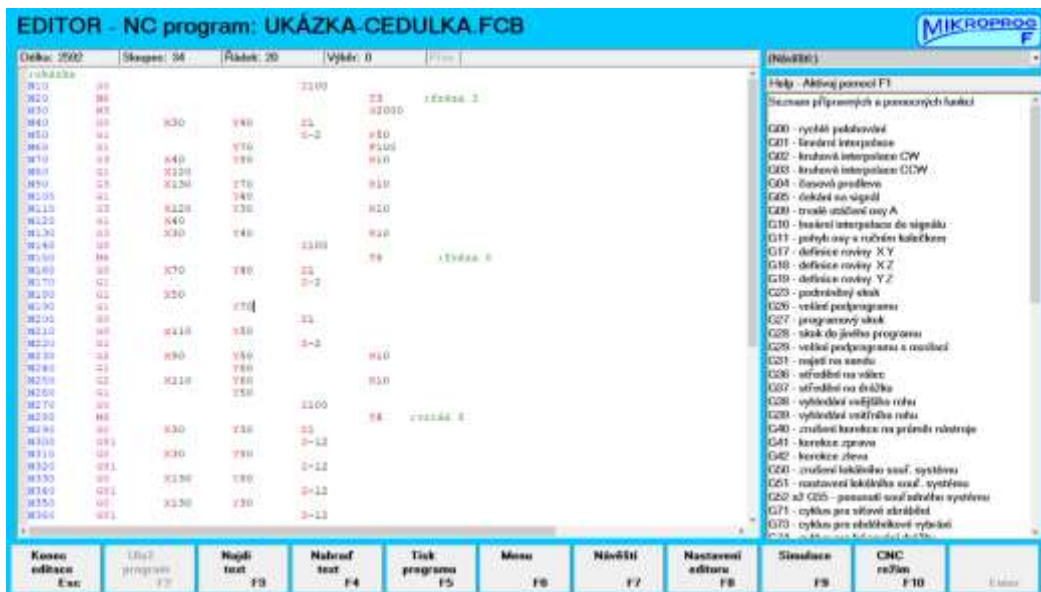
Údaje pomocné – Do této kategorie patří všechny ostatní rozkazy pro obráběcí stroj. Může se jednat například o přivedení řezné kapaliny, výměnu nástroje a podobně [9].

Struktura a formát programu jsou dány normou ISO 6983, která vznikla v roce 1982 a vychází ze starší normy DIN 66 025. S vývojem nových technologií a CNC strojů se ale stává, že tato norma nepostihuje všechny jejich možnosti, a proto výrobci řídicích systémů těchto strojů implementují vlastní funkce.

Programování CNC strojů lze provést třemi způsoby – ručním programováním, dílenským programováním a strojním programováním. Jednotlivé druhy tvorby NC programu podrobněji popíši v následujících třech kapitolách.

4.1. Ruční programování

Jedná se o nejstarší způsob tvorby NC kódu. Programátor sestavuje program zapisováním ISO kódu do textového editoru za pomoci výrobního výkresu. Ve výkresu si musí sám najít a vypočítat všechny důležité uzlové body. Jako textový editor se může využít například program MIKROPROG – F od firmy Mikronex, který ulehčuje programátorovi práci zabudovanou knihovnou všech funkcí, které jsou doplněny o krátký popis, co provádí a jaké adresy je u nich třeba zadat. Programátor má také možnost provést jednoduchou simulaci, díky které může včas odhalit chyby vzniklé při psaní programu.



Obrázek 9: Prostředí programu MIKROPROG – F a ukázka panelu pomocných funkcí

Ruční programování se využívá především pro výrobu jednoduchých součástí, anebo jako nástroj k odladění NC kódu vzniklého strojním programováním při velkosériové výrobě. Protože programátor vždy dokáže najít efektivnější dráhu nástroje než počítač a tím ušetří čas, který by ve velkých sériích zvyšoval náklady.

4.2. Dílenské programování

U dílenského programování se tvorba NC kódu přesouvá přímo do počítačového rozhraní stroje. Slouží k tomu speciální software, který uživatele vede k vytvoření programu tvorbou standartních konstrukčně technologických prvků (např. kapsa, sražení čela apod.), u kterých uživatel zadá pouze konkrétní rozměry a umístění. Tyto prvky jsou často v řídicích systémech přednastaveny již od dodavatele. Příprava součásti je značně rychlejší a jednodušší než u ručního programování. Nevýhodou ale je, že během dílenského programování stroj nepracuje. Pokud je obsluha dostatečně kvalifikovaná, tak se dá tato nevýhoda eliminovat tím, že bude další program připravovat během pasivního dozoru nad probíhající výrobou. Příkladem softwaru pro dílenské programování je program od firmy Heidenhain, viz *Obrázek 6* [9].

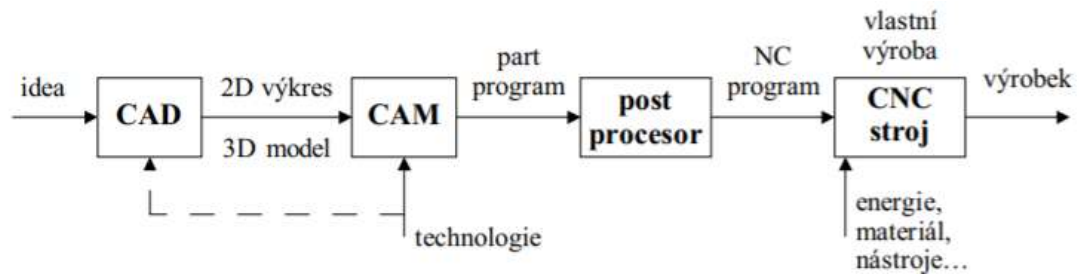


Obrázek 10: Ukázka dílenského programování [11]

5. Strojní programování

Jedná se o programování CNC strojů pomocí CAD/CAM systémů (Computer Aided Design/Computer Aided Manufacturing). Moderní obráběcí stroje ovládají několik os najednou. Psaní instrukcí a přepočítávání uzlových bodů pro všechny tyto pohyby by bylo velice náročné, a proto se tyto složité programy generují pomocí výpočetní techniky. K těmto výpočtům se používá software pro generování NC programů – CAM [1].

Prostřednictvím 3D CAD systému vymodelujeme obrobek, pro který následně v CAMu za použití vhodných funkcí a parametrů vygenerujeme NC program, který poté zajistí výrobu součásti v CNC stroji. Celý tento výrobní postup je znázorněn na *Obrázku 11*.



Obrázek 11: Výrobní etapy strojního programování [10]

V průběhu práce v CAMu se vždy kontroluje obráběcí proces v zabudovaném simulátoru. Jeden z hlavních parametrů, který se zde kontroluje, je čas výroby. Jedná se o důležitý parametr, od kterého se odvíjí kalkulace výrobku a jeho konečná cena [9].

5.1. CAD systémy

Neodmyslitelnou součástí strojního programování je právě použití CAD programů. Umožňují nám vymodelovat 3D model obráběné součásti, který je důležitou součástí partprogramu při následné práci v CAMu. Pro obrábění na CNC strojích je 3D model součásti často důležitější než výrobní výkres a je nezbytný pro tvorbu řídicího programu. V dnešní době existuje široký výběr těchto programů. Mezi nejpoužívanější programy patří například Inventor, SolidWorks, SolidEdge, Fusion 360 a CorelCAD. Mezi 2D programy, které už ale nejsou vhodné pro používání v CAD/CAM systémech, protože by se model musel předělat do 3D, patří například LibreCAD, nanoCAD a Cadkey 98 [12].

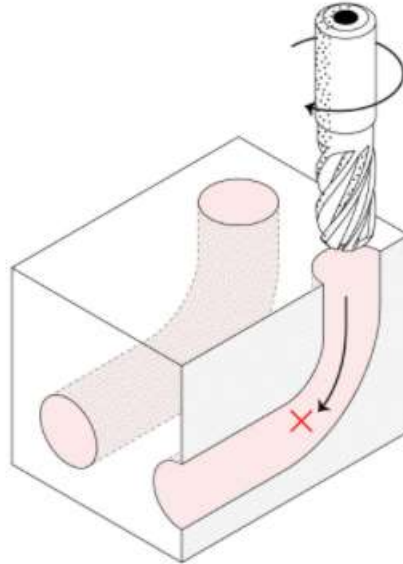
Je důležité, abychom uplatňovali zásady technologičnosti konstrukce již při tvorbě CAD modelu součásti obráběné na CNC frézce. Prvky, kterým bychom se při návrhu součásti měli vyhnout, se dají rozdělit na ty, které se na daném stroji nedají vyrobit vůbec, ať už kvůli tvaru nebo pozici na modelu, anebo ty, jejichž výroba je velice nevhodná a projektant by se jich měl při návrhu součásti vyvarovat.

5.1.1. Nevyrobitelné prvky

Vyrobitelnost a hospodárnost jednotlivých prvků se liší podle toho, kolik pohyblivých os daný stroj má. Zaměřím se na požadavky tvorby modelu pro běžné tříosé CNC frézky.

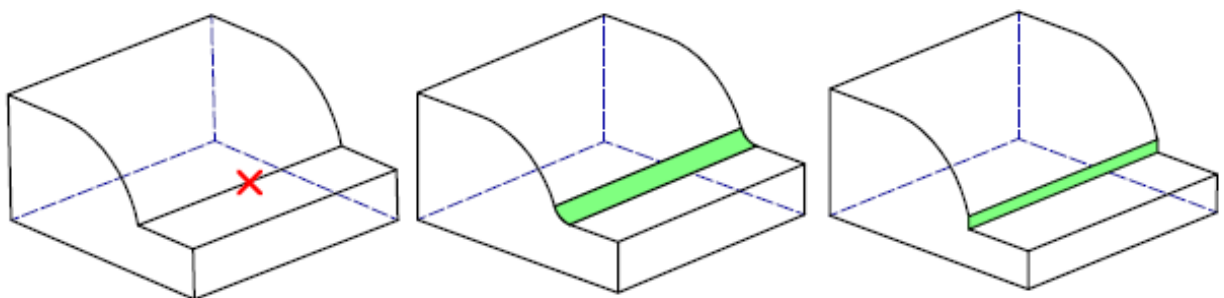
Přímé požadavky na CAD model jsou požadavky, které musí být splněny, jinak nebudeme schopni součást frézováním vyrobit. Tyto omezující požadavky vyvstávají právě ze samotného principu této technologie. Mezi tyto prvky patří:

Nepřístupné prvky – Frézováním není možné vyrobit vnitřní skryté prvky, ke kterým se nemůžeme dostat řezným nástrojem. Musíme brát v potaz geometrii používaných nástrojů, a proto nevytvářet vnitřní geometrie, které není možno vyrobit žádným druhem fréz, které máme v rámci technologie k dispozici. Mezi takové prvky patří například zakřivené otvory.



Obrázek 12: Omezení dosahu nástroje při tvorbě zakřiveného otvoru [13]

Hrany mezi tvarovými plochami – Dalším prvkem, který se nedá touto technologií vyrobit, jsou ostré hrany při přechodu z tvarové plochy do roviny. Tvarové plochy obrábíme za použití frézy s kulovou hlavou. Kvůli geometrii tohoto nástroje nemůžeme vytvořit přechodovou hranu bez zaoblení, které bude minimálně tak velké, jako je rádius hlavy nástroje, kterým plochu obrábíme. Při designování součásti a tvorbě jejího modelu proto musíme tato zaoblení doplnit anebo tvarovou plochu vyvýšit o sokl, který zajistí bezproblémovou obrobitelnost. Varianty designu jsou ukázány na Obrázku 13.

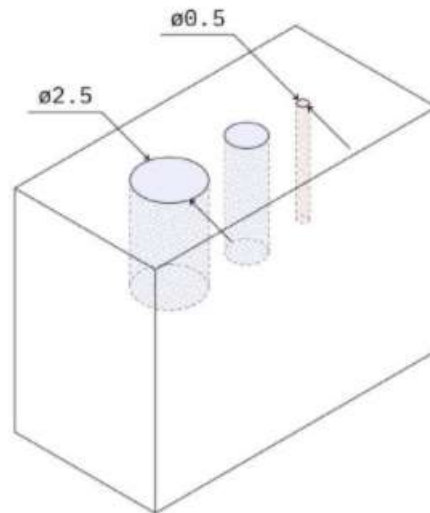


Obrázek 13: Design přechodu tvarových ploch do roviny

5.1.2. Nehospodárné prvky

Některé prvky na modelu součásti sice mohou být vyrobitelné technologií frézování, ale v rámci technologičnosti nesplňují hospodárnost výroby a z toho důvodu by se jim měl konstruktér, pokud možno, vyhýbat. Těmito prvky jsou:

Malé otvory – Skupina prvků, které výrazně prodražují výrobu součásti, jsou velmi malé otvory. Je důležité se těmito prvky vyhnout, protože komplikují a prodražují výrobu součásti. Pro jejich výrobu potřebujeme speciální nástroje a podmínky těchto operací se výrazně liší od běžného frézování. Co se rozměrů týče, tak je vhodné, aby se nejmenší díry pohybovaly v rozměrech do 0,5 mm, ideálně spíše do 2,5 mm. Cokoliv menšího než 0,5 mm se považuje za mikro – obrábění a nemělo by se u běžných součástí za žádnou cenu vyskytovat [15].



Obrázek 14: Malé otvory [13]

Nevhodně umístěné prvky – Umístění prvků na obrobku je také velmi důležité. Jak už jsem zmiňoval v kapitole 2.3.1, tak je podstatné obrábět na co nejmenší počet upnutí. Právě proto musíme model vytvářet tak, aby se pokud možno všechny prvky daly obrobřit na jedno upnutí. Při tříosém frézování jsme omezeni pohybem a nakloněním vřetene, a proto je nemožné obrábět prvky vodorovné s osou nástroje (až na výjimky jako jsou například podřezy).

5.2. CAM systémy

Při tvorbě NC programu pomocí CAM systému již programátor nemusí zadávat jednotlivé dráhy nástroje do vět v programu, ale využívá obráběcích funkcí, které daný software obsahuje a ty pak tento program vygenerují. Výhodou je, že programátor nemusí znát detailně ISO kód a jeho funkce. Na druhou stranu musí znát a vhodně volit jednotlivé obráběcí operace v CAMu.

Práce v CAMu začíná tvorbou partprogramu. Ten můžeme rozčlenit na geometrickou a technologickou část. V geometrické části jsou data o tvaru obrobku z CADu, tvaru polotovaru, souřadném systému obrobku, souřadném systému stroje, vztahu mezi nimi a rozložení přídavek na obrábění. V technologické části jsou pak základní technologická data jako poloha výchozího bodu, parametry nástrojů a jejich výměna.

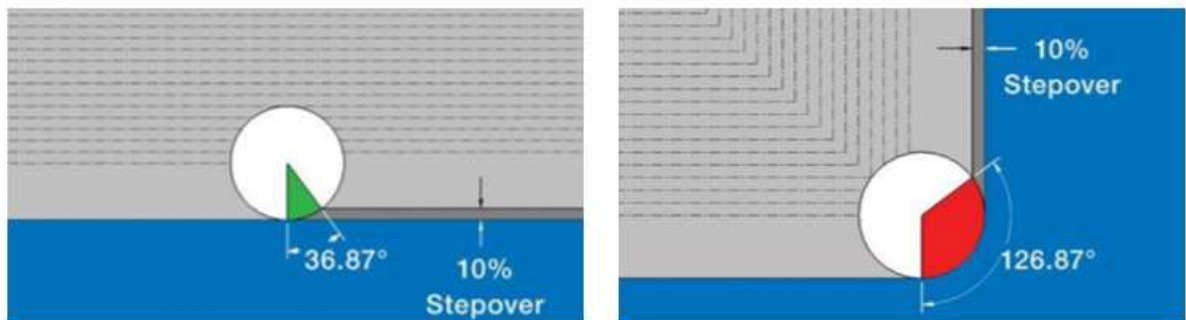
Data z partprogramu pak zpracovává procesor, který se volí podle typu technologie. Tato část CAMu generuje CL data (Cutter Location Data) a ty je poté potřeba transformovat do formátu požadovaného řídicím systémem CNC stroje. Tento převod zajišťuje postprocesor [1].

Funkce CAM softwarů, kterou je vhodné využívat, je tvorba pevných cyklů. Program sám rozezná standardizované geometrie jako jsou drážky, kapsy a díry a dokáže obrábění těchto prvků spojit v pevném cyklu. Výhodou tohoto řešení je, že jsme schopni tyto cykly upravovat v počítačovém rozhraní CNC stroje a nemusíme kvůli jejich úpravě předělávat NC program znova v CAM softwaru.

Tvorba programu v CAM softwaru má oproti předešlým způsobům tvorby NC kódu dvě hlavní výhody. První výhodou je tvorba obráběcích drah pro tvarově složité obrobky. Ruční a dílenské programování umožňuje tvorbu jednoduchých drah kopírujících základní geometrické tvary (přímky, čtverce, kružnice, atd.). Pokud chceme obrábět složité tvarové dílce, jako jsou například slévárenské formy s tvarovými vložkami, nevyhneme se tvorbě programu v CAM softwaru.

Druhou výhodou tvorby programu v CAM softwaru je vyšší produktivita obrábění díky možnosti použití různých obráběcích strategií umožňujících dodržení přesných technologických parametrů, které nejvíce vyhovují použitému stroji a nástroji.

Úhel opásání (φ) – Silové zatížení nástroje během obrábění je výrazně ovlivňováno velikostí úhlu, při kterém je fréza v kontaktu s materiálem obrobku. Pokud například obrábíme stěnu kapsy s radiálním přísunem o velikosti 10% z průměru frézy, tak dosahuje úhel opásání přibližně 37°. Ve chvíli, kdy ale řezný nástroj obrábí ostrý roh, tak se úhel opásání výrazně zvýší i přesto, že hodnota radiálního přísmu zůstala stále 10% z průměru frézy. Tento problém se pak v průběhu obrábění takové geometrie opakuje a dochází k nežádoucímu cyklickému namáhání nástroje, které vede ke zvyšování teploty, ztrátě stability a vzniku vibrací. To vše samozřejmě negativně ovlivňuje kvalitu obrobků, produktivitu, životnost nástroje a ve výsledku celkové náklady na výrobu.



Obrázek 15: Průběh velikosti úhlu opásání při obrábění různých geometrií [19]

Při použití ručního nebo dílenského programování se tento nevhodný jev kompenzoval zpomalením v rozích, použitím menšího nástroje nebo zvětšením zaoblení ostrého rohu, ale při tvorbě programu v moderních CAM softwarech můžeme využít moderní frézovací strategie, které tento problém s přetěžováním nástroje berou v potaz a řeší ho buď tvorbou drah, které nikdy nepřekročí stanovenou hodnotu úhlu opásání anebo upravují velikost posuvu v reakci na měnící se opásání nástroje. Příkladem takové frézovací strategie je trochoidní frézování [17][18].

Práce se softwarem CAM je především o tom správně zvolit strategie obrábění a pořadí operačních úseků souvisejících s jedním nástrojem. V simulátoru se zejména kontroluje dráha

nástrojů a konečná geometrie obrobku. Pokud se zvolí správné řezné podmínky, tak umí software určit i výrobní čas. V tomto čase ale nejsou zahrnuty časy upnutí/odepnutí součásti a výměny nástrojů, a proto se tato zpoždění v praxi kompenzují koeficienty, které mají firmy odzkoušené pro daný typ technologie. Málokdy se vše povede na poprvé. Důležitým pravidlem ale zůstává, abychom veškeré navrhování technologií a způsobů obrábění podřizovali tomu, jaké stroje a výbava nám jsou ve firmě dostupné [9].

6. Praktická část

Praktická část mé práce je zaměřena na návrh zkušební obrobku, který budu dále optimalizovat dle zásad technologičnosti konstrukce pro díly frézované na CNC frézkách z teoretické části mé práce. Poté k těmto obrobkům vytvořím a vygeneruji NC program v CAM softwaru Fusion 360 a porovnám jednotlivé parametry v rámci technologičnosti konstrukce. V závěru sepíši seznam prvků, které je vhodné v rámci tvorby dílů pro frézování na CNC frézkách optimalizovat.

6.1. Návrh součásti

Abych mohl aplikovat zásady technologičnosti konstrukce je zapotřebí vytvořit zkušební součást. Tato součást by měla být vhodná pro frézování na CNC frézce a měla by obsahovat prvky, které je možné v rámci technologičnosti optimalizovat. Prvky, které by tato součást měla obsahovat jsou:

- kapsa
- díra
- výstupek
- tvarová plocha

V rámci toho, aby mnou vybraná součást obsahovala všechny tyto prvky a nejednalo se jen o generický obrobek bez jakékoliv funkčnosti, jsem si vybral spodní a vrchní část formy na vstřikování plastů. Součást která bude do mnou vybrané formy vstřikována je plastová část zásuvky, pro jejíž tvar je třeba forma se všemi zmiňovanými prvky.



Obrázek 16: Součást vstřikovaná do obráběné formy (zásuvka)

Pro tvorbu modelů zásuvky i vrchní a spodní část formy na vstřikování plastů jsem použil 3D CAD software Autodesk Inventor 2019. V rámci zkušebního tělesa jsem vytvořil dva modely, vrchní a spodní část formy, které dohromady tvoří negativ výše vyobrazené zásuvky.

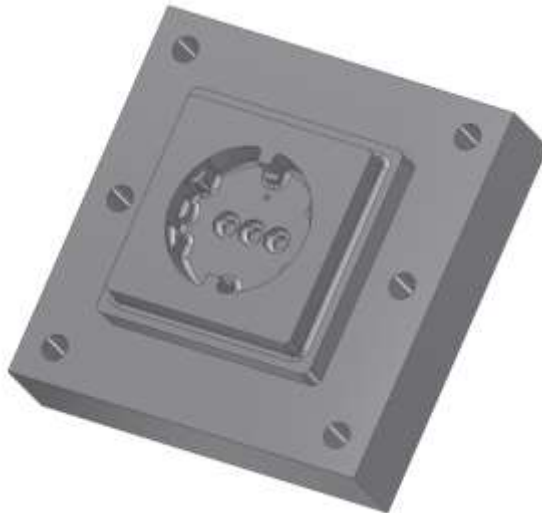
Při tvorbě dílů jsem musel zahrnout technologická řešení, která jsou pro formy na vstřikování plastů nezbytná. Jednou ze zásad je, že se na formě nesmí vyskytovat ostré vnitřní rohy a je nutné místo nich zahrnout rádiusy. Tato zaoblení slouží k lepšímu proudění plastu ve formě a k jednoduššímu vyndání odlitého dílu. Druhým geometrickým prvkem nezbytným pro formy na vstřikování plastů jsou technologické úkosy v řádech jednotek stupňů. Tyto úkosy jsou, stejně jako zaoblené rohy, důležité z pohledu jednoduššího uvolnění plastového dílu z formy. Z toho důvodu bychom měli na všechny kolmé stěny, kde nám to design a funkce odlévaného dílu dovolí, tato zkosení aplikovat.

Spodní část formy tvoří kapsa, ve které je negativ prohlubně zásuvky s výstupky pro tvorbu děr v zásuvce a šest slepých děr, do kterých přijdou ustavující prvky zajišťující správné dosednutí vrchní části formy. Po obvodu vnitřního „ostrůvku“ je právě zmiňovaný úkos pro lepší uvolnění odlitku a na všech vnitřních rozích technologická zaoblení. Už při návrhu jsem bral ohled na nástroj, kterým tuto kapsu budu obrábět, a podle toho jsem omezil její maximální hloubku. Je totiž důležité, aby nástroj při obrábění kapsy nekolidoval s čelem formy.



Obrázek 17: Spodní část formy před optimalizací

Vrchní část formy tvoří odstupňovaný výstupek (jeho vrchní část je také zkosená) a kapsa (její stěna je také zkosená) s mnoha dalšími prvky, které tvarují zadní stranu zásuvky. Zároveň jsou v kapse díry, do kterých zapadnou výstupky ze spodní části formy a malá průchozí díra sloužící jako vtoková soustava. Rozměry tří děr na dně zásuvky jsou dané normou (eurozástrčka typu CEE 7/17). Po obvodu je dále šest děr, tentokrát prostupných, které slouží ke správnému sestavení formy pomocí ustavujících prvků [20].



Obrázek 18: Vrchní část formy před optimalizací

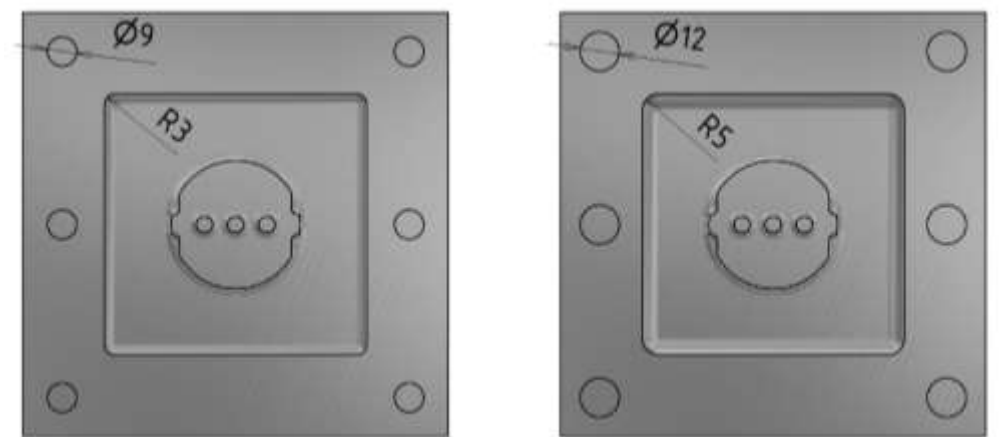
6.2. Optimalizace technologičnosti konstrukce obrobku

Cílem optimalizačních kroků je zjednodušit a zlevnit proces výroby součástí. Tohoto cíle se dá dosáhnout různými způsoby. Jedná se například o změnu velikosti obráběných prvků (zvětšení/zmenšení), celková změna tvaru některých prvků (lepší obrobitelnost/schopnost daný prvek frézování vyrobít), anebo celková změna proporcí vyráběného dílu.

6.2.1. Optimalizace spodní části formy

Prvním prvkem který v rámci technologičnosti konstrukce spodní části formy budu optimalizovat jsou zaoblení vnitřních hran kapes. Jak už jsem zmiňoval v kapitole 3.1.2, vnitřní zaoblení by se měla volit co největší, protože díky tomu můžeme obrábět větším nástrojem a tím ušetřit čas při výrobě. Zároveň bychom měli volit taková zaoblení, která jsou větší než třetina hloubky obráběné kapsy. V rámci těchto pravidel jsem změnil velikost zaoblení u spodní části formy z 3mm na 5mm. Je důležité brát ohled na to, abychom změnou těchto parametrů nijak neovlivnili funkčnost dílu, v mém případě rozměry vstřikovaného dílu. Tato zaoblení její funkčnost nijak nezmění a v rámci designu to pro výrobek také není problém. Naopak nám tato změna výrazně zkrátí čas obrábění a v některých případech může zredukovat počet nástrojů potřebných k výrobě dílu.

Další optimalizací spodní části formy je změna velikosti děr po obvodu sloužících k správnému dosednutí druhého kusu formy. U této změny nejde ani tak o velikost, ale o to abychom k výrobě díry nepotřebovali nástroj navíc. Tyto otvory budou sloužit k uložení kolíků, které budou lícovat s dírami, a proto budou tyto díry frézované. Kvalita po vrtání by totiž nebyla dostatečná na trvale kluzné vedení s minimální vůlí. Proto průměr díry zvětším z 9mm na 12mm. Tato úprava je dalším způsobem jak ušetřit při výrobě tohoto obrobku.

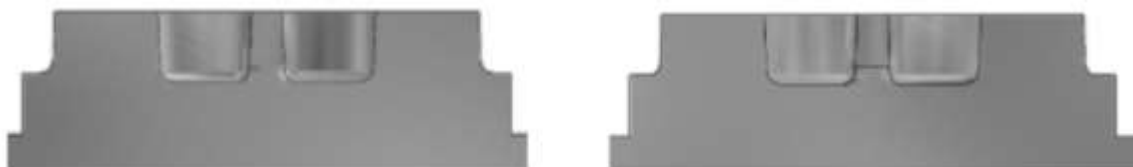


Obrázek 19: Optimalizace spodní části formy

6.2.2. Optimalizace vrchní části formy

Vrchní část formy je z geometrického hlediska složitější, a proto se u ní také vyskytuje větší množství optimalizovaných prvků. Některé z těchto změn ale přímo navazují na změny prováděné již u spodní části formy.

První úprava, kterou jsem provedl na modelu vrchní části formy zajišťuje, aby byla výroba této součásti jednodušší. V kapitole 5.1.1. jsem zmiňoval, že při obrábění tvarových ploch je nutné na jejich přechodu vytvořit buď rádius, anebo „sokl“. Na formě pro vstřikování plastů sice rádiusy jsou, ale pro jednodušší obrobení této geometrie jsem pod tvarové plochy přidal právě zmiňované sokly.

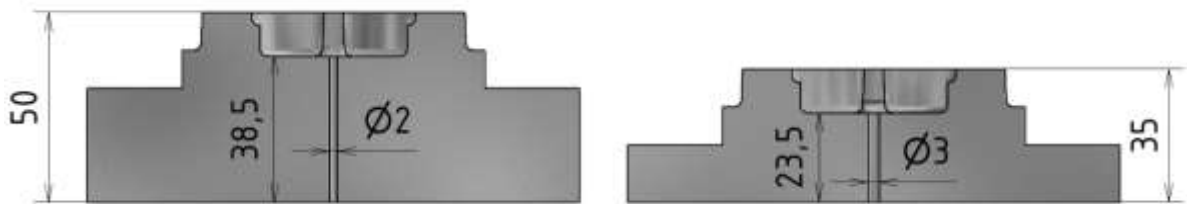


Obrázek 20: Optimalizace vyrobitelnosti tvarových ploch

Změnou, která koresponduje s optimalizací spodní části formy, je velikost ustavujících děr. Zde se rozměry také mění z průměru 9 mm na 12mm. Důvodem je redukce nástrojů potřebných k obrábění dílu.

Dalším krokem optimalizace technologičnosti konstrukce formy na mnou zvolenou součást je změna celkové velikosti. Model spodního dílu formy má rozměry 130 x 130 x 35 mm, ale vrchní část je o dost silnější a má rozměry 130 x 130 x 50 mm. Proto jsem tloušťku vrchní části formy a celkovou velikost zmenšil na stejných 35mm. Díky tomu mohou obě poloviny formy vyrábět ze stejného polotovaru, což je důležitý krok ve zlepšení technologičnosti konstrukce a to zejména se zvyšující se sériovostí frézovaného dílu.

Poslední prvek, který musí projít optimalizací, je díra vtokové soustavy. Na původním modelu má tato díra až moc malý průměr, který hraničí s mikro obráběním zmiňovaným v kapitole 5.1.2., což je velice nákladné a měli bychom se takovým geometriím vyhýbat. Druhým problémem je příliš velká hloubka, které se normálními vrtáky nedá docílit. Proto jsem její průměr zvětšil z 2mm na 3mm a její hloubku, úpravou celkové tloušťky zmiňované v předešlém odstavci, z 38,5mm na 23,5mm. Hodnota hloubky díry není stále z pohledu technologičnosti konstrukce ideální, ale blíží se hodnotě doporučené v kapitole 3.1.4.



Obrázek 21: Optimalizace velikosti polotovaru a vtokové soustavy u vrchní části formy

6.3. Tvorba NC kódu obrobku

Pro tvorbu NC kódu obou částí formy jsem použil program Fusion 360 od firmy Autodesk, jedná se o software, který disponuje jak CAD tak i CAM rozhraním.

Prvním krokem bylo načtení modelu do uživatelského prostředí Fusion 360, přenos dat proběhl, vzhledem k tomu, že jsou obě aplikace od stejného výrobce, bez nutnosti formátování.

6.3.1. Tvorba NC kódu neoptimalizované spodní části formy

Před samotnou tvorbou řezných drah nástrojů je nutné nastavit polotovar a souřadnicový systém obráběného dílu. V programu Fusion 360 se tato nastavení provádí v záložce manufacture. Zde si definujeme setup, který udává právě rozměry polotovaru a souřadnicový systém našeho obrobku. Střed souřadnicového systému jsem zvolil do levého spodního rohu polotovaru a polotovar jsem definoval jako kvádr o rozměrech modelu s přídatkem 1mm na vrchní straně. Jeho rozměry jsou tedy 130x130x36 mm.

Obrábění jsem začal odstraněním přídatku na čele polotovaru. Pro tuto operaci jsem použil 2D funkci „face“, která po nadefinování nástroje a řezných podmínek odebrala přídatek na vrchní straně polotovaru. Já zvolil stopkovou frézu o průměru 10mm.

Dále jsem pokračoval obráběním kapsy, která tvoří přední stranu zásuvky. K obrobení tohoto prvku jsem využil 3D funkci „Adaptive clearing“. Tato funkce slouží k odebírání velkého množství materiálu při konstantní hodnotě úhlu opásání nástroje, čímž je zajištěna jeho optimální produktivita. Kvůli zaobleným vnitřním rohům kapsy jsem zvolil jako nástroj kulovou frézu o průměru 6 mm.

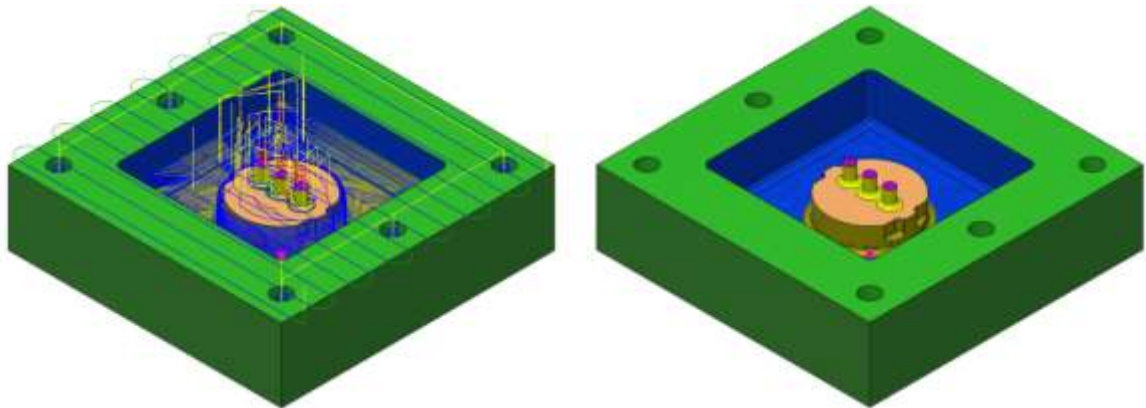
Po obrobení nejhlubší kapsy jsem přešel na tvorbu geometrie na výstupku, který vznikl předchozím obráběním. Zde je cílem vytvořit tři menší výstupky na podstavci uprostřed již obrobené kapsy. Pro tvorbu těchto drah jsem využil znovu 2D funkce „Adaptive clearing“ a obrobením jsem prostor kolem výstupků, poté jsem 2D funkcí „pocket“ vytvořil dráhy pro odebrání materiálu nad výstupky a nakonec jsem odebral materiál kolem výstupků a vytvořil rádiusy 3D

funkcí „Adaptive clearing“ se zapnutým zbytkovým obráběním. V této poslední funkci jsem využil kulovou frézu o průměru 4 mm.

Předposledním krokem bylo vytvoření čtyř zaoblených kapes a technologického zkosení po obvodu středového „ostrůvku“. Pro vytvoření těchto drah jsem použil 3D funkci „ramp“, která slouží k obrábění zkosených geometrií. Pro obrobení této geometrie jsem znovu použil kulovou frézu o průměru 4 mm.

Posledními prvky na této části formy bylo šest děr pro ustavující kolíky. Pro tvorbu těchto děr jsem vytvořil pevný cyklus, který každou tuto díru obrobil jako kapsu, kvůli požadavku na vysokou přesnost. Každá z těchto děr měla průměr 9mm, takže jsem zvolil stopkovou frézu o průměru 5mm.

Po vytvoření všech těchto drah jsem provedl simulaci obrábění, která proběhla bez problému a neukázala žádné kolize. Výsledný strojní čas vypočítal software na 41 minut a 44 sekund.



Obrázek 22: Simulace řezných drah – neoptimalizovaná spodní část formy

6.3.2. Tvorba NC kódu neoptimalizované vrchní části formy

Začátek procesu tvorby NC kódu vrchní části formy je podobný jako u spodní části. Začal jsem tvorbou setupu, ten se liší od spodní části formy rozměrem polotovaru. Polotovar má rozměr 130 x 130 x 51 mm a počátek souřadného systému je opět v levém spodním rohu dílu.

Pro odebrání přídavku na čele jsem použil znovu 2D funkci „face“ a stopkovou frézu o průměru 10 mm.

Následujícím krokem bylo odebrání materiálu kolem odstupňovaného výstupku, který zapadá do protikusu formy. Pro obrobení této geometrie jsem použil 3D funkci „Adaptive clearing“, která vygenerovala optimální dráhy s konstantním úhlem opásání nástroje. Tuto operaci jsem provedl také stopkovou frézou o průměru 10 mm.

Tato funkce neodebrala všechen materiál z prvního výstupku vedle technologického zkosení, takže jsem ještě použil 2D funkci „contour“ a kopírováním linky konce rádiusu pod zkosením jsem přebývající materiál odstranil.

Pro dokončení technologického zkosení na druhém výstupku jsem použil 3D funkci „ramp“ a kulovou frézu s průměrem 4 mm.

Pro odebrání materiálu v kapse uprostřed této formy jsem zvolil znovu 3D obráběcí strategii „Adaptive clearing“. Tentokrát s kulovou frézou o průměru 4 mm.

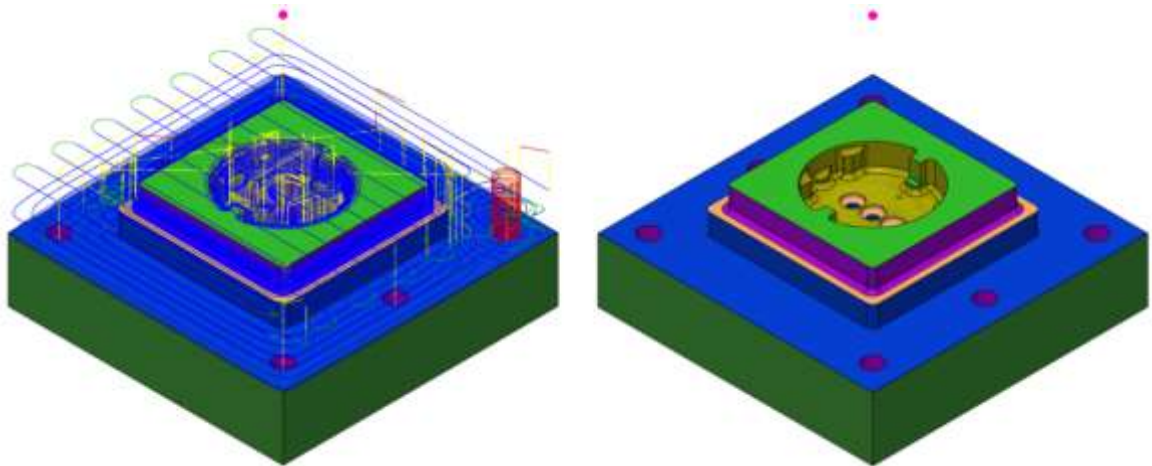
Technologické zkosení na vnitřní straně kapsy jsem obrobil 3D strategií „ramp“ a ostré rohy na výstupcích, které se dotýkají spodní části formy jsem vytvořil 2D funkcí „contour“ a stopkovou frézou o průměru 10 mm.

Dále jsem vytvořil pevný cyklus pro vytvoření děr, do kterých zapadají výstupky uprostřed spodní části formy, frézováním stopkovou frézou o průměru 3mm a zaoblené odstupňování jsem vytvořil 3D funkcí „Adaptive clearing“ kulovou frézou o průměru 4 mm.

Na obrobení vtokové soustavy u neoptimalizované vrchní části formy nebyl v knihovně nástrojů Fusion 360 dostatečně dlouhý vrták, takže musela zůstat v simulaci neobrobená. To znamená, že mnou navrhnutá optimalizace je opodstatněná a pro výrobu takového otvoru by se musel shánět velice drahý speciální nástroj.

Posledními prvky na této části formy bylo šest děr pro ustavující prvky. Jak jsem psal v kapitole 6.2.1., je třeba, aby se tyto díry frézovaly, kvůli vysokým nárokům na kvalitu povrchu. Problémem je, že jsou tyto díry moc hluboké a v knihovně Fusion 360 není fréza, která by je dokázala vyrobit. Z toho důvodu jsem u neoptimalizované verze vrchní části formy vyrobil otvory vrtákem o průměru 9 mm.

Po vytvoření všech drah, jsem stejně jako u spodní části formy, provedl simulaci, která by odhalila případné nechtěné kolize. Strojní čas vypočítal software na 41 minut a 55 sekund.



Obrázek 23: Simulace řezných drah – neoptimalizovaná vrchní část formy

6.3.3. Tvorba NC kódu optimalizované spodní části formy

Při tvorbě NC kódu pro optimalizovanou spodní část formy se setup vůbec nemění a polotovar i souřadnicový systém zůstává totožný s neoptimalizovanou variantou.

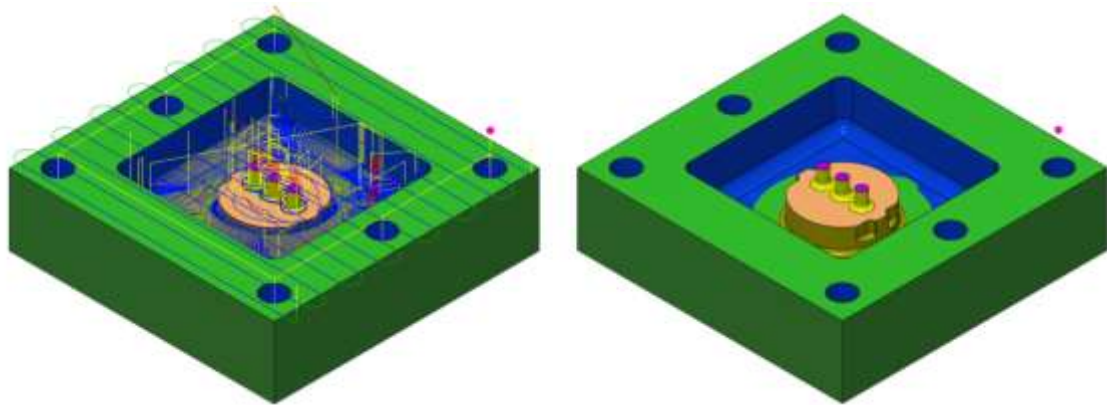
Pro odstranění přídávku na čele formy jsem postupoval stejně, změna nastala až u obrábění kapsy. Zde jsem na modelu zvětšil zaoblení rohů a dna, takže jsem mohl použít větší nástroj. Bral jsem ale ohled na optimální záběr nástroje, a proto jsem zvolil pro obrábění kulovou frézu o průměru 8 mm i přesto, že zaoblení mají poloměr 5 mm. Větší nástroj by sice ušetřil o něco více

času, ale možnost obrábět geometrii interpolovanou drahou umožní konstantní hodnotu úhlu opásání nástroje při použití 3D obráběcí funkce „Adaptive clearing“.

Následkem použití nástroje s větším poloměrem bylo nedokonalé obrobení dna v místě kolem „ostrůvku“ uprostřed kapsy s technologickým zkosením. K této nedokonalosti došlo kvůli tomu, že větší nástroj zanechal větší rádius a při obrábění technologického úkosu 3D funkcí „ramp“ a použití kulové frézy o průměru 4 mm, nedošlo i přes nastavení širšího záběru nástroje k jeho odstranění. Tento problém jsem jednoduše vyřešil použitím 2D funkce „contour“, která vytvořila řeznou dráhu pro stopkovou frézu o průměru 10 mm, kopírováním linky konce rádiusu technologického zkosení a zbývající materiál odstranila.

Poslední změnou při tvorbě kódu optimalizované spodní části formy byla velikost nástroje použitého v pevném cyklu na tvorbu otvorů pro ustavující prvky. Velikost děr se změnila z 9 mm na 12 mm a díky tomu jsem mohl díry obrobit stopkovou frézou o průměru 10 mm.

Simulace obrábění proběhla i u optimalizovaného dílu bez problémů a strojní čas vypočítaný softwarem se snížil na 33 minuta 26 sekund.



Obrázek 24: Simulace řezných drah – optimalizovaná spodní část formy

6.3.4. Tvorba NC kódu optimalizované vrchní části formy

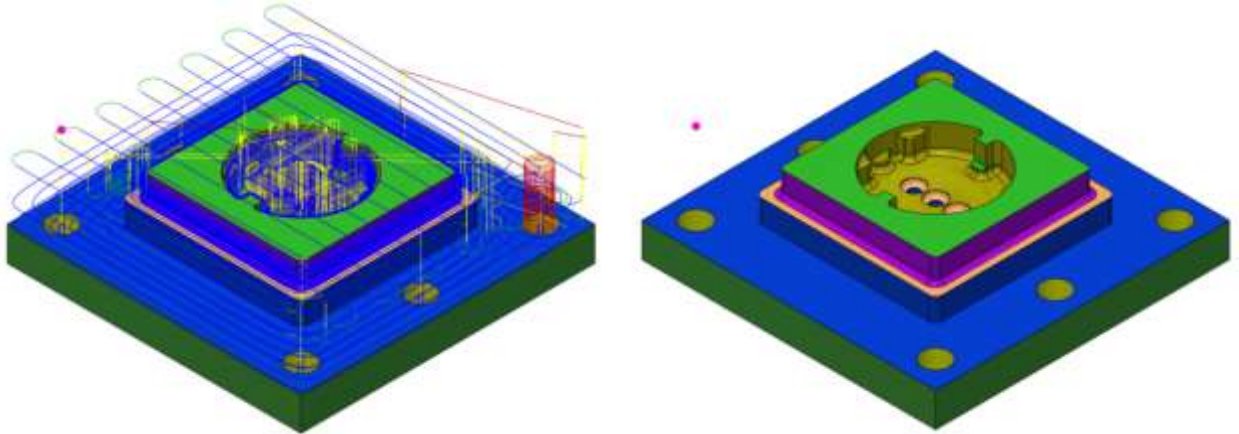
První změna u optimalizované vrchní části formy je už v setupu, díky změně rozměrů, je polotovar totožný se spodní částí formy, tedy 130 x 130 x 36 mm. Počátek souřadnicového systému je opět v levém spodním rohu.

Další změnou, v rámci tvorby drah nepatrnou, je přidání soklu u dvou výstupků. S těmi si 3D funkce „ramp“ poradila bez problému a obrobila tak stěny kapsy s technologickými úkosy.

Důležitá změna nastala u tvorby otvoru vtokové soustavy. V neoptimalizované verzi jsem nemohl otvor vyrobit, protože knihovna Fusionu 360 nedisponovala dostatečně malým a dlouhým nástrojem, ale po změně hloubky a průměru této díry jsem mohl otvor vyvrtat vrtákem o průměru 3 mm.

Posledním rozdílem oproti verzi před optimalizací, je stejně jako u spodní části formy, změna velikosti otvorů pro ustavující prvky, která se zvětšila z 9 mm na 12 mm a já tak mohl vytvořit pevný cyklus, který tyto otvory vyrobil frézováním stopkovou frézou o průměru 10 mm.

Simulace ukázala, že jsou všechny dráhy bez problémů a kolizí a celkový strojní čas vypočítala na 41 minut a 37 sekund.



Obrázek 25: Simulace řezných drah – optimalizovaná vrchní část formy

Po úspěšném ověření správnosti CL dat provedenou simulací u všech verzí forem jsem mohl přejít na samotnou tvorbu NC programu. K tomu slouží postprocessor, který vytvoří NC kód tak, aby vyhovoval stroji, na kterém se bude výrobek obrábět. Já nevytvářel kód pro žádný konkrétní stroj, takže jsem mohl vybírat z velkého množství postprocesorů pro CNC frézky od různých výrobců, které jsou dostupné v knihovně postprocesorů aplikace Fusion 360. Vybral jsem si postprocessor od firmy Fanuc a všechny čtyři NC kódy bez problému vytvořil. Soubory s NC kódy jsou k dispozici jako elektronické přílohy mé práce.

6.3.5. Porovnání

K porovnání mnou vytvořených programů může sloužit několik parametrů. Mezi ty na které se zaměřím patří strojní čas, počet nástrojů a vstupní materiál.

Strojní čas je velice důležitým parametrem a to zejména se stoupající sériovostí. U forem na vstřikování plastů se s tak velkou sériovostí nepočítá, ale i tak je vhodné strojní čas optimalizačními kroky co nejvíce snížit.

Tabulka 1: Obráběcí časy forem

	Před optimalizací	Po optimalizaci
Spodní část formy	41:44	33:26
Vrchní část formy	41:55	41:37

V tabulce můžeme vidět, že k největšímu ušetření času došlo u spodní části formy. Za to může optimalizační krok, kdy jsem změnil velikost vnitřního zaoblení kapsy. Tento rozdíl mohl být ještě o něco větší, kdybych k obrábění použil nástroj se stejným poloměrem jako je poloměr zaoblení v rohu, ale v porovnání s možností obrábět s optimální hodnotou úhlu opásání a ušetřit tak životnost nástroje, nebyl tento větší časový rozdíl tak výhodný.

U vrchní části formy se čas snížil jen minimálně, a to kvůli nepatrným změnám geometrii, které by na tento parametr měly vliv. Zaoblení u vrchní části formy jsem již více nezvětšoval, kvůli zachování designu a funkčnosti vstřikovaného výrobku.

Dalším faktorem, který se v rámci technologičnosti porovnává, je počet nástrojů potřebných k vyrobení obrobku.

Tabulka 2: Nástroje použité při obrábění forem

	Spodní část formy – před optimalizací	Spodní část formy – po optimalizaci	Vrchní část formy – před optimalizací	Vrchní část formy – po optimalizaci
Nástroje	stopková fréza Ø10	stopková fréza Ø10	stopková fréza Ø10	stopková fréza Ø10
	stopková fréza Ø5	kulová fréza Ø6	kulová fréza Ø4	kulová fréza Ø4
	kulová fréza Ø6	kulová fréza Ø4	stopková fréza Ø3	stopková fréza Ø3
	kulová fréza Ø4		vrták Ø9	vrták Ø3
			vrták Ø2 (nebyl v knihovně)	

V tabulce můžeme vidět, že u obou částí formy se mi povedlo redukovat počet řezných nástrojů. U spodní části z 4 na 3 a u vrchní části z 5 na 4. Tato změna je výhodná zejména z toho důvodu, že firmy vyrábějící tento obrobek nemusí skladovat tolik nástrojů a v případě vrchní části formy nemusí vyrábět otvor vtokové soustavy zbytečně malým a dlouhým vrtákem, který potřebuje speciální přípravky a podmínky na takto hluboké vrtání.

Posledním parametrem, který se mi povedlo zlepšit je stejný polotovar u obou částí formy (kvádr o rozměrech 130 x 130 x 36 mm). Tato změna se nejlépe projeví u velkosériových zakázek, ale i u menších sérií je vhodné skladovat a vyrábět z co nejmenšího množství druhů polotovarů.

7. Závěr

Cílem mé práce bylo přijít se seznamem doporučení pro design a výrobu dílu obráběných na CNC frézkách a následně tato doporučení aplikovat na mnou vybraném obrobku.

Tato doporučení se týkají jak designu a parametrů samotných prvků, vhodnosti a vyrobitelnosti prvků technologii frézování, tak i tvorby programu pro obrábění na CNC frézkách.

Tato doporučení jsou:

- maximální poloměr zaoblení rohů kapsy (redukce strojního času a počtu potřebných nástrojů)
- vyhnout se mikro obrábění
- vyhnout se příliš hlubokým dírám
- při přechodu z tvarové plochy počítat se zaoblením nebo „soklem“
- stejná velikost polotvaru
- používání progresivních hrubovacích cyklů při tvorbě NC programu v CAM softwaru
- používání pevných cyklů při tvorbě programu v CAM softwaru

Dodržení těchto pravidel výrazně sníží obráběcí čas. V případě obrábění spodní části formy mi ušetřila změna zaoblení rohu kapsy a možnost obrábět větším nástrojem přibližně 9 minut a to šlo jen o jedinou kapsu. Další výhodou větších zaoblení je možná redukce počtu nástrojů potřebných na výrobu dílu, to je výhodné jak z hlediska toho, že ušetříme čas při výměně nástroje, tak i z důvodu menšího počtu nástrojů, které musíme pro výrobu dílů skladovat.

Důležitým prvkem výroby je polotovar a jeho velikost. Já jsem v rámci optimalizace změnil velikost obou dílů tak, aby byla stejná. To výrazně sníží pořizovací náklady materiálu a zjednoduší výrobu. Obzvláště pokud by se daný díl vyráběl ve větší sérii.

Při tvorbě NC programu v CAM softwaru jsem volil progresivní obráběcí cykly, které dokážou zajistit větší výdrž obráběcího nástroje díky hlídání technologických parametrů jako je například úhel opásání. Pevné cykly nám zase umožní upravovat parametry prvků v rozhraní obráběcího stroje a celkově zjednoduší tvorbu NC kódu.

Rozsah a důležitost těchto pravidel závisí na velikosti vyráběné série a všechna tato doporučení musíme aplikovat tak, abychom zároveň zachovali funkčnosti optimalizovaného dílu. Pokud vytváříme prototyp nějakého dílu nebo jde o výrobek kusové výroby, tak není tak podstatné lpět na každé ušetřené sekundě nebo menším opotřebením nástroje, ale pokud vytváříme díl pro větší série, je vhodné dodržovat všechna tato doporučení, díky kterým bude náš výrobek a firma více konkurence schopna a výdělečná na trhu.

8. Použitá literatura

- [1] MÁDL, Jan, Antonín ZELENKA a Martin VRABEC. Technologičnost konstrukce: obrábění a montáže. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2005. ISBN 80-01-03288-4.
- [2] KAMENICKÁ, Pavlína. Způsoby upínání nástrojů a obrobků. Brno 2013. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. 48 s., 10 příloh. Vedoucí práce Ing. Milan Kalivoda.
- [3] BRÁZDA, Jiří. Technologie výroby obráběním na CNC strojích: Diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. s.65, příloh 10. Vedoucí práce Ing. Karel Osička.
- [4] MÁDL, CSC., Prof. Ing. Jan Mádl, CSc., Doc. Ing. Jindřich KAFKA, CSC., Ing. Martin VRABEC, CSC. a Ing. Rudolf DVOŘÁK, CSC. Technologie obrábění: 2. díl. 2007. CVUT.
- [5] MÁDL, CSC., Prof. Ing. Jan Mádl, CSc., Doc. Ing. Jindřich KAFKA, CSC., Ing. Martin VRABEC, CSC. a Ing. Rudolf DVOŘÁK, CSC. Technologie obrábění: 3. díl. 2007. CVUT.
- [6] Zvyšování kompetencí studentů technických oborů prostřednictvím modulární inovace studijních programů ISBN 978-80-2482772-8
- [8] Strojnické tabulky online: Technologičnost konstrukce se zaměřením na obrábění [online]. [cit.2021-02-10]. Dostupné z: <https://www.strojnicketabulkyonline.cz/obrabeni/technologicnost-konstrukce-se-zamerenim-na-obrabeni/>
- [9] ŠTULPA, Miloslav. CNC: programování obráběcích strojů. Praha: Grada, 2015. ISBN 978-80-247-5269-3.
- [10] KELLER, PH.D., Ing. Petr. Programování a řízení CNC strojů [online]. 2005 [cit. 2021-04-12]. Dostupné z: http://www.kvs.tul.cz/download/cnc_cadcam/pnc_2.pdf
- [11] Interempresas: Heidenhain – CNC numeric control [online]. [cit. 2021-04-12]. Dostupné z: <https://www.interempresas.net/Measure/Companies-Products/Product-Numerical-control-multifuncional-Heidenhain-iTNC-530-43182.html>
- [12] KOBLÁSA, Pavel. CNC stroje a jejich programování při výuce na středních odborných školách. Hradec Králové: Pedagogická fakulta Univerzity Hradec Králové, 2015. 49 s. Bakalářská práce.
- [13] 3D Hubs: CNC machining [online]. [cit. 2021-04-12]. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/guides/cnc-machining/#design-for-cnc>
- [14] Veryengineering: CNC Machining: A Simple Design Guidelines You Need to Follow [online]. [cit. 2021-04-12]. Dostupné z: <https://www.veryengineering.com/cnc-machining-a-simple-design-guidelines-you-need-to-follow/>
- [15] 3erp: Design for CNC Machining: Restrictions & Considerations [online]. [cit. 2021-04-12]. Dostupné z: <https://www.3erp.com/design-tips/design-for-cnc-machining-restrictions-considerations/>

- [16] Geomiq: CNC Machining Guide [online]. [cit. 2021-04-12]. Dostupné z: <https://geomiq.com/cnc-design-guide/>
- [17] KAKÁČ, M. Technologie frézování na CNC obráběcím centru metodou VoluMill. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 85 s. Vedoucí diplomové práce prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
- [18] KUNZO, A. Progresivní hrubovací strategie v CAM software. Praha: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní, 2016. 80 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jan Tomíček, Ph.D.
- [19] Steering Clear Of Corner Concerns. *Modern machine shop* [online]. 18.1.2006 [cit. 2021-7-15]. Dostupné z: <https://www.mmsonline.com/articles/steering-clear-of-corner-concerns>
- [20] ZÁSUVKY, REDUKCE A CESTOVNÍ ADAPTÉRY: Typy zásuvek ve světě [online]. 2018 [cit. 2021-7-27]. Dostupné z: <http://www.zasuvky.eu/index.php>

9. Seznam obrázků

Obrázek 1: Schéma volby materiálu [13]	9
Obrázek 2: Schéma hloubky dutin a kapes [13]	12
Obrázek 3: Poloměr zaoblení vnitřní hrany [13]	12
Obrázek 4: Podříznutí vnitřní hrany [13]	13
Obrázek 5: Minimální tloušťka stěny [13]	13
Obrázek 6: Rozměry vrtaných děr [13]	14
Obrázek 7: Optimální výška obráběného prvku [13]	14
Obrázek 8: Rozměry frézovaných podřezů [13]	15
Obrázek 9: Prostředí programu MIKROPROG – F a ukázka panelu pomocných funkcí	17
Obrázek 10: Ukázka dílenského programování [11]	18
Obrázek 11: Výrobní etapy strojního programování [10]	19
Obrázek 12: Omezení dosahu nástroje při tvorbě zakřiveného otvoru [13]	20
Obrázek 13: Design přechodu tvarových ploch do roviny	20
Obrázek 14: Malé otvory [13]	21
Obrázek 15: Průběh velikosti úhlu opásání při obrábění různých geometrií [19]	22
Obrázek 16: Součást vstřikovaná do obráběné formy (zásuvka)	23
Obrázek 17: Spodní část formy před optimalizací	24
Obrázek 18: Vrchní část formy před optimalizací	25
Obrázek 19: Optimalizace spodní části formy.....	26
Obrázek 20: Optimalizace vyrobitelnosti tvarových ploch	26
Obrázek 21: Optimalizace velikosti polotovaru a vtokové soustavy u vrchní části formy.....	27
Obrázek 22: Simulace řezných drah – neoptimalizovaná spodní část formy	28
Obrázek 23: Simulace řezných drah – neoptimalizovaná vrchní část formy	29
Obrázek 24: Simulace řezných drah – optimalizovaná spodní část formy.....	30
Obrázek 25: Simulace řezných drah – optimalizovaná vrchní část formy	31

10. Seznam tabulek

Tabulka 1: Obráběcí časy forem.....	31
Tabulka 2: Nástroje použité při obrábění forem.....	32

11. Seznam příloh

11.1. Seznam elektronických příloh

Příloha 1 – model spodní části formy před optimalizací

Příloha 2 – model vrchní části formy před optimalizací

Příloha 3 – model zásuvky před optimalizací

Příloha 4 – model spodní části formy po optimalizaci

Příloha 5 – model vrchní části formy po optimalizaci

Příloha 6 – model zásuvky po optimalizaci

Příloha 7 – NC kód spodní části formy před optimalizací

Příloha 8 – NC kód vrchní části formy před optimalizací

Příloha 9 – NC kód spodní části formy po optimalizaci

Příloha 10 – NC kód vrchní části formy po optimalizaci