

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ



Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie

Hrubovací strategie v CAM softwarech

Bakalářská práce

Autor práce: Tomáš Volák

Studijní obor: Teoretické základy strojního inženýrství

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

Praha 2021

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Volák** Jméno: **Tomáš** Osobní číslo: **483521**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**
Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Hrubovací strategie v CAM softwarech

Název bakalářské práce anglicky:

Roughing strategies in CAM softwares

Pokyny pro vypracování:

Při zvyšování výkonu frézování se moderní CAM zaměřují zejména na hrubovací fázi obrábění. Proces obrábění je zde podpořen speciálními strategiemi a způsoby obrábění jejich cílem je maximální využití možností stroje i nástroj. Cílem této práce je získání přehledu o aktuálním stavu a možnostech CAM software v dané oblasti a zařazení metod nabízených výrobci do existujících teoretických modelů. Dílčím cílem práce je pak aplikace hrubovacích strategií v vybraných CAM a hodnocení navržených drah.

Obsah práce:

- 1) Seznámení s problematikou rychlého hrubování a jeho programování
- 2) Přehled dostupných SW řešení a jejich konfrontace s teoretickými a vědeckými modely
- 3) Shrnutí možností SW v aktuální nabídce na trhu
- 4) příprava a vyhodnocení experimentu, který porovná vybrané SW
- 5) Vyhodnocení a závěry práce

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

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

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

Datum zadání bakalářské práce: **30.04.2021**

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 bakalářská práce se zabývá hrubovacími strategiemi v CAM softwarech. Jejím cílem je sestavení přehledu dostupných hrubovacích strategií pro frézování v prostředí CAM softwarů. Na začátku práce je stručně popsán princip hrubování, volba technologických podmínek a možnosti optimalizace obrábění. Další část práce je zaměřena na představení dostupných hrubovacích strategií a několika vybraných CAM softwarů.

Praktická část je věnována porovnání vybraných CAM softwarů. Hrubovací strategie jednotlivých CAM softwarů byly aplikovány na zkušebním tělesu a porovnány z hlediska vygenerované dráhy a strojního času.

Klíčová slova: hrubování, hrubovací strategie, CAD/CAM, CAM software

Abstract

This bachelor thesis deals with roughing strategies in CAM softwares and aims to compile an overview of available roughing strategies for milling in the CAM software environment. At the beginning of the thesis the principle of roughing, the choice of technological conditions and the possibility of optimizing machining are briefly described. The next part of the thesis is focused on the presentation of available roughing strategies together with the introduction of several selected CAM softwares. The practical part is devoted to the comparison of selected CAM software. Their roughing strategies were applied on the test body and then the generated path and machine time were compared.

Key words: roughing, roughing strategy, CAD/CAM, CAM software

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci Hrubovací strategie v CAM softwarech vypracoval samostatně pod vedením pana Ing. Jana Tomíčka Ph.D. s využitím použité literatury uvedené ve zdrojích.

V Praze dne:

Podpis:

Poděkování

Rád bych tímto poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Janu Tomíčkoví, Ph.D za odborný dohled, cenné připomínky a čas, který mi věnoval, při vypracování bakalářské práce.

Dále bych rád poděkoval mé rodině za jejich podporu a pomoc během celého studia. V neposlední řadě děkuji své přítelkyni Mgr. Veronice Halodové za podporu a pomoc se stylistikou a strukturou práce.

Obsah

1. Seznam zkratk	8
2. Úvod	9
3. Obrábění z pohledu úběru materiálu	10
4. Technologické podmínky	11
4.1. Řezné síly	11
4.2. Řezné nástroje	12
4.3. Tepelné jevy při obrábění	14
4.4. Řezné prostředí	14
5. Optimalizace obráběcího procesu	16
5.1. Adaptivní obrábění	17
5.2. Úhel opásání nástroje	18
6. CAD/CAM software	21
6.1. Vývoj CAD/CAM softwarů	21
7. Strategie CAM softwarů	23
8. Konvenční metody CAM softwarů	24
8.1. Konturování	24
8.2. Řádkové obrábění	25
9. Progresivní metody CAM softwarů	26
9.1. Strategie založené na MRR rovnici	26
9.1.1. HSC obrábění	27
9.1.2. HFC obrábění	28
9.1.3. HPC obrábění	28
9.2. Strategie výrobců CAM softwarů	29
9.2.1. Strategie využívající TEA	29
9.2.1.1. Metoda tenkých řezů	29
9.2.1.2. Trochoidní frézování	30
9.2.1.3. Vortex	32
9.2.1.4. TrueMill	33
9.2.1.5. Waveform	34
9.2.2. Ostatní strategie	35
9.2.2.1. Ponorné frézování	35
9.2.2.2. Zpětné hrubování	36
10. Představení vybraných CAM softwarů	38

10.1.	Autodesk Fusion 360	38
10.2.	Kovoprog frézování	39
10.3.	Autodesk FeatureCAM	39
10.4.	Autodesk PowerMill	40
10.5.	Openmind HyperMILL	40
10.6.	Siemens NX	41
11.	Experimentální část	42
11.1.	Porovnání drah jako cíle práce	42
11.2.	Návrh zkušebního tělesa	42
11.3.	Technologické podmínky experimentu	44
11.4.	Provedení experimentu	45
11.5.	Výsledky experimentu	45
11.5.1.	Autodesk Fusion 360	45
11.5.2.	Kovoprog frézování	46
11.5.3.	Autodesk FeatureCAM	47
11.5.4.	Autodesk PowerMill	48
11.5.5.	Openmind HyperMILL	49
11.5.6.	Siemens NX	50
11.5.7.	Celkové shrnutí experimentu a výsledky	51
12.	Závěr	56
13.	Zdroje	57
	Seznam příloh	62
	Seznam použitých softwarů	63

1. Seznam zkratek

A_{Di} - tloušťka třísky [mm]

a_e - šířka řezu [mm]

a_p - hloubka záběru [mm]

ACC (adaptive control constraint) - mezní adaptivní systém

ACG (adaptive control geometry) - geometrický adaptivní systém

ACO (adaptive control optimization) - optimalizační adaptivní systém

CAD (computer aided design) – počítačová podpora návrhu

CAM (computer aided manufacturing) – počítačová podpora výroby

CNC (computer numerically controlled) – počítačové řízení

F – celková řezná síla [N]

F_{ci} - teoretická řezná síla působící na i -tý zub [N]

F_H – axiální složka řezné síly [N]

F_y - radiální složka řezné síly [N]

F_z –tangenciální složka řezné síly [N]

f_z - posuv na zub [mm.zub⁻¹]

HFC (high feed cutting) – obrábění s vysokým posuvem

HPC (high performance cutting) - vysoce výkonné obrábění

HSC (high speed cutting) – obrábění vysokou řeznou rychlostí

HSM (high speed milling) – vysokorychlost frézování

k_{ci} - měrná řezná síla vztažená na 1 mm² průřezu třísky [N.mm⁻²]

MRR (Metal Removal Rate) – velikost úběru materiálu

n – otáčky vřetene [min⁻¹]

TEA (tool engagement angle) – úhel opásání

TrueMill (Tool Radius Uniform Engagement Mill) - obrábění s rovnoměrným zapojením poloměru nástroje

v_c – řezná rychlost [m.min⁻¹]

v_f - rychlost posuvu [mm.min⁻¹]

v_{fn} - rychlost posuvu nájezdu [mm.min⁻¹]

v_{fo} - rychlost posuvu odjezdu [mm.min⁻¹]

v_{fram} - rychlost rampového posuvu [mm.min⁻¹]

φ – úhel polohy břitu [°]

2. Úvod

Ve strojírenské výrobě se čím dál tím více rozšiřuje používání strojního programování pomocí CAD/CAM softwarů (computer aided designing/computer aided manufacturing).

Za pomoci CAD/CAM softwarů je možné výrobní procesy automatizovat, zrychlovat a tím snižovat celkové ekonomické náklady výroby.

CAD/CAM softwary lze použít jak pro hrubování, tak i pro obrábění na čisto. Tato práce se však zaměřuje pouze na aplikaci CAD/CAM softwarů v oblasti hrubování, což je obráběcí proces, jehož cílem je odebrání co největšího množství přebytečného materiálu z polotovaru v co nejkratším čase.

Součástí CAD/CAM softwarů jsou i již předdefinované hrubovací strategie, které lze přímo aplikovat ve výrobě.

V úvodu se tato práce věnuje vysvětlení základního principu hrubování, vhodné volbě technologických podmínek a možnostem optimalizace hrubování. V hlavní části práce je představen přehled dostupných hrubovacích strategií napříč všemi CAM softwary. Dále jsou tyto strategie porovnány a jsou zde uvedeny příklady jejich vhodné aplikace v praxi. Součástí je i představení několika vybraných CAM softwarů od výrobců Autodesk, Kovoprogram a Openmind. Experimentální část práce je zaměřena na porovnání a analýzu hrubovacích strategií vybraných CAM softwarů z pohledu navržených drah a strojního času při obrábění navrženého zkušební tělesa.

3. Obrábění z pohledu úběru materiálu

Technologie obrábění zaujímá ve strojírenské výrobě nenahraditelnou pozici. Umožňuje v několika technologických procesech vytvořit z polotovaru požadovaný výrobek dané geometrie. Samotné obrábění lze jednoduše rozdělit na dva základní druhy – hrubování a dokončování.

Hrubování

Hrubování je prvotní operací v celém obráběcím procesu. Základním požadavkem na hrubování je dosažení odebrání co největšího množství přebytečného materiálu z obrobku v co nejkratším čase, bez ohledu na rozměrovou přesnost a jakost obrobeného povrchu. Aby bylo tohoto požadavku dosaženo, jsou kladeny vyšší nároky na celou obráběcí sestavu, jelikož je proces hrubování doprovázen vyššími řeznými silami než u dokončování. Obecně lze také říci, že při hrubování se volí nižší řezná rychlost a vyšší posuv než u dokončování.

Do procesu hrubování lze také začlenit proces polohrubování, který spočívá ve sjednocení ohrubovaného povrchu do hladké linie pro následné dokončení.

Dokončování

Dokončování je proces, který nejčastěji následuje po hrubování. Jedná se o proces, při němž je požadavkem vytvoření konečné geometrie a jakosti povrchu obrobku. Při dokončování se volí většinou vysoká řezná rychlost, nízký posuv a malá hloubka řezu. Při dokončování je rovněž doporučován nepřerušovaný řez. [1,3]

4. Technologické podmínky

K tomu, aby finální obrobek měl požadované vlastnosti a samotný proces obrábění proběhl bezpečně a s ohledem na ekonomické požadavky trhu, je nutné znát základní elementy technologického procesu obrábění. [1]

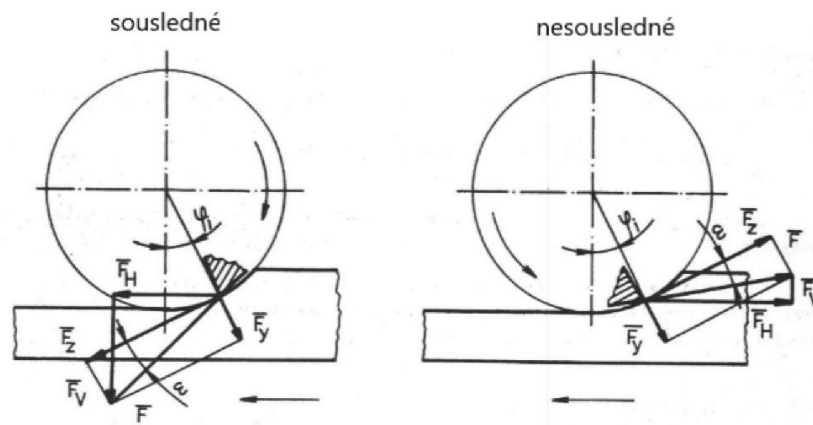
4.1. Řezné síly

Řezné síly jsou dynamickým jevem, který doprovází jakékoliv obrábění. Obráběný materiál klade břitu řezného nástroje odpor. Proto, aby nastalo obrábění, musí být tento odpor překonán řeznou silou F . [1]

Velikost poměru řezné síly a odporu umožní získat lepší přehled o mechanickém namáhání soustavy obrábění, a tím i stanovit vhodnou technologickou soustavu z pohledu pevnosti, tuhosti a dynamické stability řezného procesu. Dále je z něj možné získat informace pro určení požadavků na stroj a informace o namáhání řezného nástroje (například informace o tepelném namáhání a trvanlivosti nástroje, respektive jako celkové životnosti.)

Pro obráběcí stroje je znalost velikosti poměru řezné síly a odporu důležitá především pro stanovení dostatečného příkonu stroje. Zejména u hrubování je příkon stroje důležitým parametrem, jelikož při něm dochází k vysokému zatížení vřetene v důsledku velkého úběru materiálu. [2]

Řeznou sílu vzniklou při obrábění můžeme dále dělit na jednotlivé složky – tangenciální, radiální a axiální. Nejvýznamnější složkou řezné síly je tangenciální řezná síla, která tvoří největší část potřebného momentu k obrábění, a proto právě ona určuje potřebný příkon obráběcího stroje. Typický poměr řezných sil při hrubování je $F_z : F_H : F_v$ jako 4 : 2 : 1. Na Obr. 1 můžeme vidět rozklad řezné síly do jednotlivých složek u sousledného a nesousledného frézování. [1, 2, 11]



Obr. 1 – Schéma rozložení sil sousledného a nesousledného frézování [1]

F – celková řezná síla, F_z – tangenciální složka řezné síly, F_y – radiální složka řezné síly, F_H – axiální složka řezné síly, φ – úhel polohy břitu

Velikost řezné síly není během obráběcího procesu konstantní, ale kolísá (v rámci 20 %). Kolísání je způsobeno nekonstantními vlastnostmi obráběného materiálu a mechanikou tvorby třísek. Z těchto důvodů se počítá hodnota teoretické řezné síly nebo se řezná síla přímo měří na stroji pomocí dynamometru. [1, 3]

Výpočetní vzorec můžeme vidět níže:

$$F_{ci} = k_{ci} \cdot A_{Di} = k_{ci} \cdot a_p \cdot f_z \cdot \sin \varphi \quad [3]$$

F_{ci} ...teoretická řezná síla působící na i-tý zub [N]

k_{ci} ...měrná řezná síla vztahovaná na 1 mm² průřezu třísky [N.mm⁻²]

A_{Di} ...tloušťka třísky [mm²]

a_p ...hloubka záběru [mm]

f_z ...posuv na zub [mm]

φ ...úhel pootočení nástroje [°]

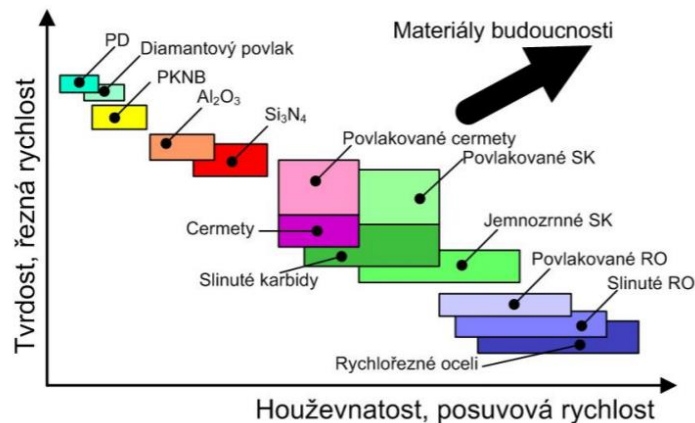
4.2. Řezné nástroje

Výběr správného řezného nástroje je stěžejním krokem pro zajištění stabilního obráběcího procesu. Vlastnosti, které očekáváme od ideálního nástroje jsou vysoká tvrdost, houževnatost a odolnost proti opotřebení. Zvláště u hrubování je vhodné volit

nástroje s vysokou houževnatostí, jelikož je proces hrubování doprovázen vysokými řeznými silami a dochází při něm k častému přerušování řezu. Z důvodu vzniku tření mezi nástrojem a obrobkem je také nutná teplotní a chemická stálost nástroje, aby nedocházelo k nadměrnému přetěžování nástroje nebo změně jeho fyzikálně-chemických vlastností. Velká část požadovaných vlastností pro nástrojové materiály je protichůdná, proto je velmi důležité nalézt nejlepší kompromis mezi všemi těmito vlastnostmi.

Dalším důležitým prvkem nástroje je jeho samotná geometrie a přítomnost utvařeče třísek, která je stanovena výrobcem. Pro účely hrubování slouží především kruhové břitové destičky nebo nástroje s geometrií s velkým poloměrem zaoblení rohů [4, 11]

Příklady materiálů určených pro výrobu řezných nástrojů jsou ukázány na Obr. 2. Jednotlivé materiály jsou umístěny do grafu podle jejich základních charakteristik pro porovnání.

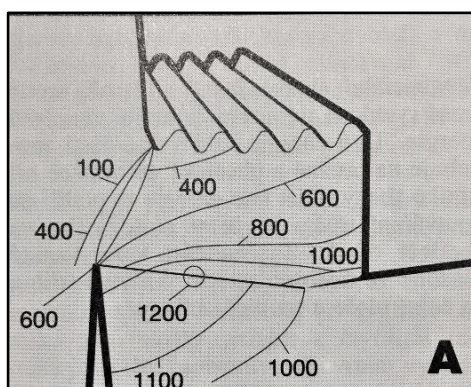


Obr. 2 – Ukázka nástrojových materiálů [6]

Dnes nejpoužívanějším materiálem pro nástroje jsou slinuté karbidy, které jsou velmi perspektivní i v rámci budoucího vývoje řezných nástrojů. Výroba destiček ze slinutého karbidu spočívá v lisování metalurgického prášku namíchaného podle požadovaných vlastností pro obrábění. Nejčastěji používané složky metalurgického prášku jsou karbidy wolframu (WC), titanu (TiC), niobu (NbC) a chromu (Cr₃C₂). Pro další zlepšení jejich už tak výborných vlastností (houževnatost a tvrdost) jsou destičky ze slinutého karbidu dále povlakovány tenkou vrstvou ušlechtilých kovů. [1]

4.3. Tepelné jevy při obrábění

Téměř veškerá mechanická energie vložená do procesu obrábění se přemění na teplo. Místa, kde vzniká největší část tepla, jsou oblasti v rovině stříhu, na čelní ploše a na ploše hřbetu nástroje. V extrémních případech je teplo vzniklé při obrábění zodpovědné za špatnou trvanlivost břitů nástroje a omezuje použití vyšších řezných rychlostí. Typické rozložení teplotních zón mezi břitem, obrobkem a třískou je vyobrazeno na obr. 3.



Obr. 3 – Teplotní pole obrobku, třísky a nástroje [11]

Jak vyplývá z Obr. 3, teploty pohybující se nad 900 °C se vyskytují na nástroji a v oblasti třísky. V ideálním případě se snažíme, aby se přechod tepla do břitu minimalizoval a vzniklé teplo v co největší míře odcházelo společně s třískou. Toho můžeme dosáhnout pomocí změny geometrie nástroje, konkrétně zvětšením úhlu čela nástroje, čímž se docílí zvětšení mezního úhlu roviny stříhu.

Odlišným způsobem optimalizace odvodu tepla z oblasti řezu je úprava řezného prostředí, kterému je věnována následující kapitola. [11]

4.4. Řezné prostředí

Řezná prostředí můžeme rozdělit na dva základní typy. Prvním je řezné prostředí bez přítomnosti procesních kapalin (tak jsou souhrnně označovány chladicí a řezné kapaliny). Tento typ řezného prostředí je využíván pro takzvané obrábění na sucho.

Druhým, častěji využívaným typem řezného prostředí je řezné prostředí s využitím procesních kapalin. Využívány jsou v něm především chladicí kapaliny,

jejichž primární funkcí je pomoc s odvodem tepla. Dále se uplatňují také při odvodu třísek.

Vytvoření vhodného řezného prostředí s sebou přináší výrazné prodloužení životnosti břitů nástroje.

Nejčastějšími důvody využití procesních kapalin během obrábění jsou například nutnost chlazení obrobku za účelem zajištění přesnosti rozměrů, zlepšení jakosti povrchu obrobku při obrábění korozivzdorné oceli nebo šedé litiny, usnadnění odstranění třísek při vrtání nebo frézování stopkovou frézou nebo umožnění obrábění malými řeznými rychlostmi.

I když se může zdát použití procesních kapalin z důvodu odvodu tepla a mazacího účinku při obrábění výhodné, není tomu tak ve všech ohledech. Z ekonomického hlediska nám totiž procesní kapaliny zvyšují náklady na výrobu, kdy 10-15% celkových nákladů tvoří právě náklady na procesní kapaliny (do nákladů se musí také započítat likvidace použitých kapalin) a v neposlední řadě procesní kapaliny mohou mít negativní vliv na samotný nástroj. Je tedy vhodné zvážit všechny aspekty a až poté rozhodnout, zda je vhodné a výhodné procesní kapaliny používat při obrábění.

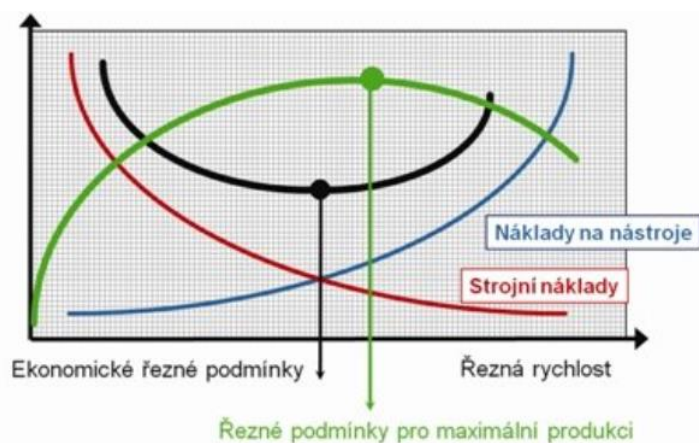
Příkladem metod, kdy chladicí kapaliny nejsou využívány jsou například progresivní obráběcí metody tzv. HSM (high speed milling), u kterých jsou využívány velké řezné rychlosti. Teploty vzniklé při takovémto obrábění přesahují přes teplotu 1 000 °C. Každá chladicí kapalina přivedená do blízkosti místa řezu by se okamžitě vypařila a ztratila, tak jakýkoliv chladicí účinek.

Druhým případem, kdy není využití chladicí kapaliny pro obráběcí proces příznivé, je frézování s využitím nástroje s výměnnými břitovými destičkami ze slinutého karbidu. Při obráběcím procesu dochází k nepříznivému ochlazování břitů, které jsou mimo záběr. Břit, který je v záběru s obrobkem je zahříván, po vyjetí z řezu je prudce ochlazen procesní kapalinou. Vlivem teplotních šoků vznikají v břitových destičkách trhliny a pnutí, které zkracují životnost jednotlivých destiček. [11, 7, 8]

5. Optimalizace obráběcího procesu

Optimalizace obráběcího procesu představuje významnou ekonomickou oblast ve strojírenské výrobě. Konkurence vytváří rostoucí tlak na jednotlivé podniky, aby zajistily při výrobě dosažení co nejvyšší produktivity s vynaložením co nejnižších výrobních nákladů.

Z ekonomického hlediska lze řešit optimalizaci pomocí výrobních nákladů. Na Obr. 4 je znázorněn obecný graf ukazující závislost řezné rychlosti na nákladech a závislost řezné rychlosti na produktivitě. Z grafu lze vidět, dvě exponenciály, které představují funkce strojních nákladů a nákladů na nástroj v závislosti na řezné rychlosti. Parabola černé barvy znázorňuje součet mezi těmito dvěma exponenciálami nákladů. Nejnižší bod této paraboly označuje neekonomičtější volbu řezné rychlosti s ohledem na obě skupiny nákladů. V grafu je dále znázorněna zelená parabola, která určuje funkci produktivity v závislosti na řezné rychlosti. Je patrné, že s rostoucí řeznou rychlostí stoupá produktivita jen do určitého bodu. Dalším zvýšením řezné rychlosti se zvyšuje rychlost opotřebení nástroje, což vede ke snížení jeho životnosti a k nutnosti častější výměny nástroje.



Obr. 4 – Graf minimálních nákladů a maximální produktivity [9]

Spojením nákladového hlediska a hlediska produktivity vzniká oblast ideální řezné rychlosti. Záleží jen na preferencích výrobce, jaké kritérium je pro danou výrobu výhodnější. Podle toho je pak zvolena řezná rychlost spolu s dalšími řeznými parametry. [9]

Dnes již více diskutovanou problematikou, než je jen stanovení ekonomické výhodnosti podle strojních nákladů a nákladů na nástroje, je optimalizace výrobního času

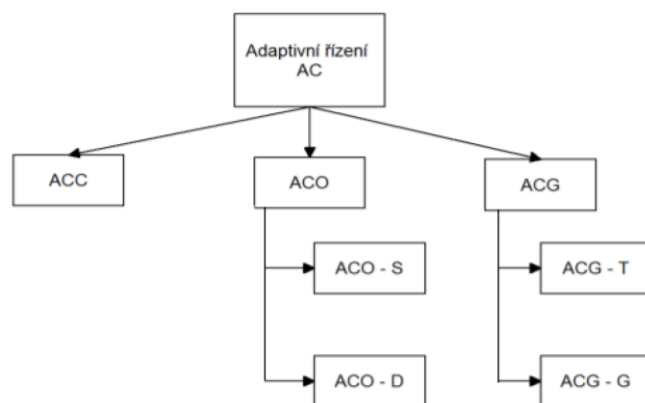
na možné minimum. V tomto ohledu můžeme pracovat s 3 základními řeznými parametry – hloubka řezu, posuv a řezná rychlost. Normativní model pro optimalizaci řezných podmínek je tvořen několika kroky, které mají následující pořadí – určení optimální trvanlivosti břitu, hloubky řezu, velikosti posuvu a dopočtu řezné rychlosti. Při určování řezných podmínek pomocí normativu je zvykem udělat zpětnou kontrolu výpočtů, především z důvodu respektování maximálního výkonu stroje.

Jelikož základní normativní model nezahrnuje konkrétní parametry dané výroby, je v dnešní době výhodnější používat komplexní výpočet pro určení optimálních řezných podmínek, jehož výstupem jsou jednotlivé hodnoty řezných parametrů spolu s trvanlivostí břitu. Vzhledem k složitosti výpočtu je vhodné ho realizovat pomocí počítačové techniky. U výpočtového modelu pomocí softwaru je nutné vložení konkrétních dat o obráběcím procesu (jako jsou popis nástroje, stroje a řezného prostředí). [4, 10]

5.1. Adaptivní obrábění

Základním rysem adaptivní optimalizace je okamžité stanovení optimálních řezných podmínek, které vycházejí z informací o aktuálním stavu obráběcího procesu stanovených pomocí snímačů. Adaptivní optimalizace probíhá na základě využití mezních hodnot řídicích veličin, mezi které patří příkon stroje, řezná síla, krouticí moment vřetene, teplota řezání, nárůst opotřebení v čase, akčních veličinách (řezné podmínky) apod., které adaptivní systém reguluje.

Adaptivní systémy existují v několika úrovních. Na Obr. 5 je vidět schéma rozdělení jednotlivých řídicích systémů.



Obr. 5 – Rozdělení řídicích systémů adaptivní optimalizace. Převzato z [10]

Nejjednodušším adaptivním řídicím systémem je ACC systém (adaptive control constraint), neboli adaptivní systém mezní. Při práci s ním jsou optimalizovány buď pouze otáčky, nebo posuv, avšak nedochází ke společné optimalizaci otáček a posuvu ve vzájemné vazbě. Kritériem optimalizace bývá nejčastěji maximální úběr s ohledem na omezující podmínky. Pokud při obrábění s danými otáčkami, posuvem a hloubkou řezu, je adaptivním systémem vyhodnocen nižší výkon, než je maximální dovolený výkon stroje pro bezpečné obrábění, je adaptivním systémem úměrně výkonu zvětšen posuv. Stejným způsobem probíhá optimalizace řezných podmínek při indikaci překročení maximální dovoleného výkonu stroje.

Optimalizační systém ACO (adaptive control optimization) přímo navazuje na systém ACC s tím rozdílem, že regulace řezné rychlosti je ve vazbě na posuv a kritérii optimalizace jsou minimální náklady, respektive maximální produktivita. Je tedy respektována vazba mezi řeznými podmínkami a trvanlivostí břitu nástroje. Dráha nástroje je vypočítána tak, aby v každém okamžiku obrábění bylo dodrženo dané zatížení nástroje, tím se prodlužuje životnost nástroje a zkracují se výrobní časy. Řídicími veličinami bývají nejčastěji příkon stroje, řezné síly, kroutící moment nebo drsnost obrobené plochy. Kvůli složitosti výpočtu je nutná kalkulace na počítači, který je součástí řídicího systému obráběcího stroje.

Adaptivní systém ACG (adaptive control geometry) se podobá systému meznímu a optimalizačnímu. Hlavním úkolem systému ACG je zajištění požadované přesnosti, resp. drsnosti obrobené plochy. V první řadě tyto systémy dbají na dosažení co nejlepší geometrie obrobku, není ale zanedbána ani ekonomická a kvantitativní stránka výroby.

Lze tedy zjednodušeně říci, že systémy adaptivní optimalizace při výrobě využívají maximálního potenciálu stroje a nástroje. Zároveň celý obráběcí proces kontrolují a případně regulují akční veličiny tak, aby nedošlo k překročení přípustných mezních hodnot stroje a nástroje. [10, 8]

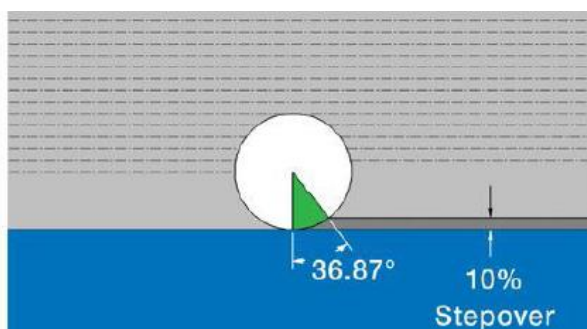
5.2. Úhel opásání nástroje

Úhlem opásání (anglicky tool engagement angle) je označován úhel mezi místem nájezdu břitu do materiálu a místem ukončení řezu břitem, tedy úhel, v němž je nástroj

v kontaktu s materiálem obrobku. I když se může zdát, že čím větší úhel opásání bude použit, tím bude proces obrábění rychlejší a produktivnější, není tomu tak.

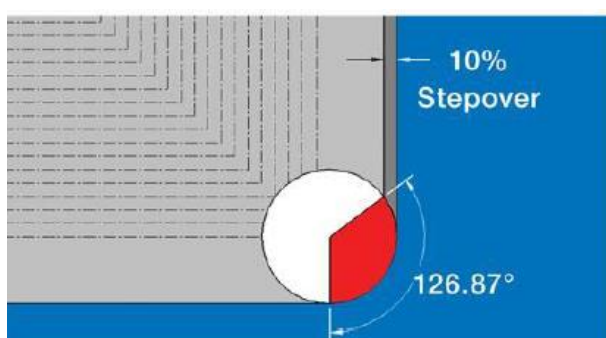
Při obrábění s velkým úhlem opásání dochází k nadměrnému zatěžování nástroje a snižování jeho životnosti. Může například docházet k tepelnému přetěžování nástroje. Při větším úhlu opásání bude břit nástroje větší část otáčky v záběru, proto bude vznikat více tepla, a zároveň se břit nebude stíhat chladit mezi jednotlivými záběry břitů. Použití velkého úhlu opásání nástroje je také provázáno velkými řeznými silami, které negativně přetěžují vřeteno stroje, proto je pak pro zajištění zachování dovoleného zatížení stroje, nutné zmenšit řezné podmínky (aby byl zachován stabilní proces obrábění) a tím se sníží produktivita výroby.

Například při hodnotě hloubky řezu 10% průměru frézy má úhel opásání velikost $36,87^\circ$. Při lineárním obrábění je úhel opásání neměnný a zachovávají se i řezné podmínky, jak je vidět na Obr. 6.



Obr. 6 – Lineární obrábění s hloubkou řezu 10 % [13]

Místy, v nichž je důležité dbát na úhel opásání jsou oblasti ostrých rohů nebo jiné specifické geometrie. Úhel opásání se v takovýchto místech náhle zvětší, i když hloubka řezu je stále zachována (viz Obr. 7). Takováto náhlá změna úhlu opásání má negativní vliv na celý proces obrábění, jak již bylo zmíněno výše.



Obr. 7 – Obrábění pravého rohu s hloubkou řezu 10 % [13]

Dříve se náhlá zvětšení úhlu záběru řešila pomocí snížení řezných parametrů. Dnes již existují CAM softwary, které podle definované hloubky řezu a průměr řezného nástroje určí odpovídající úhel opásání, který je po celou dobu obrábění konstantní. Je tedy zřejmé, že dráhy nástroje jsou vytvořené spíše na základě požadavků na úběr materiálu než na základě samotné geometrie obrobku. Jelikož během obrábění si nástroj udržuje konstantní úhel opásání a nepřerušovaný kontakt s materiálem obrobku je, na stroj i řezný nástroj vyvíjeno mnohem menší zatížení. Obráběcí proces bude díky tomu stabilnější, což vede k mnohem předvídatelnějšímu chování frézy a dosažení lepší kvality obráběného povrchu. V ostrých rozích nedochází k přetěžování nástroje, dráhy nástroje jsou plynulé a tangenciální. Obrobek tedy může mít libovolný tvar.

Při správné optimalizaci úhlu opásání lze tedy docílit větší produktivity a snížení celkového výrobního času. [12, 13, 14]

6. CAD/CAM software

Termín CAD/CAM označuje spojení dvou softwarů, které se podílejí na výrobních procesech s využitím počítačové techniky. V minulosti byly tyto dva programy rozdělené na samostatné jednotky – CAD, tvořící projektovou část výroby a CAM, zajišťující návrh samotné výroby. Takovéto rozdělení softwarů bylo velmi nevýhodné, především pro jejich následnou kooperaci – přenos dat, absence naprogramovaných prvků (nástroje, parametry stroje).

S následným vývojem a potřebou zdokonalovat výrobu došlo ke sjednocení obou softwarů. Dnes se již nejčastěji ve výrobě používají sjednocené CAD/CAM softwary, které zajišťují celý výrobní proces, od návrhu až po postprocessing, tedy vygenerování NC kódu.

Největší předností CAD/CAM softwaru je možnost vizualizace konečného obrobku a samotného procesu obrábění. V rámci vizualizace procesu obrábění je možné zobrazit dráhy a pohyby nástroje před samotným zahájením obráběcího procesu. Díky vizualizaci a následné analýze obrábění může dojít k optimalizaci obráběcího procesu nebo prevenci vzniků kolizí během obrábění. [15, 16]

Jedním z příkladů použití CAD/CAM softwarů je jejich využití u tvarově složitých součástí, kde nestačí ruční nebo dílenské programování. CAD/CAM softwary jsou takto používány např. při výrobě lisovacích forem, při níž je nutný současný pohyb nástroje ve více osách. [15]

6.1. Vývoj CAD/CAM softwarů

První zmínky o CAD/CAM softwarech sahají až do 70. let 20. století a jejich hlavním cílem bylo zvýšení produktivity a zrychlení výrobních procesů. Největší překážkou tehdejší doby byly problémy s kapacitou výpočetní techniky. Počítače dokázaly využít pro modelování pouze vektorovou grafiku ve 2D. Zásadní průlom přišel společně s příchodem osobních počítačů. Na začátku 80. let byl představen první software s grafickým rozhraním s názvem GibbsCAM.

Použití CAD/CAM softwaru má dlouhou historii i na území České republiky. Prvním ryze českým CAM softwarem byl v roce 1998 představen CAM software s názvem Kovoprogram od společnosti Kovosvit Sezimovo Ústí. [17]

V současné době jsou CAD/CAM softwary běžnou součástí výrobních procesů a existuje nepřehledné množství jejich typů od různých výrobců. [15]

7. Strategie CAM softwarů

Strategie v CAM softwarech existují jak pro hrubování, tak i pro dokončovací procesy. Jelikož tématem této bakalářské práce jsou hrubovací strategie, následující část bude věnována pouze jim.

Obráběcí strategie, neboli metody návrhu a výpočty optimálních drah nástroje, jsou již běžnou součástí CAM softwaru.

Základní podstatou hrubování je odebrání, co možná největšího množství přebytečného materiálu v co možná nejkratším čase. Po splnění primárního účelu hrubování je vhodné se zaměřit i na technologické podmínky samotného procesu.

Základním parametrem hrubovacích operací je úhel opásání nástroje, který má přímý vliv na celý proces hrubování. Jak již bylo v předchozích kapitolách řečeno, úhel opásání má přímý vliv na velikost odebraného materiálu a tepelné zatížení řezného nástroje.

Hrubovací strategie CAM softwarů si dávají za cíl, mimo vytvoření vhodných drah pro obráběcí nástroj, i navrhnout nejvhodnější a nejprogresivnější kombinaci úhlu opásání a zbylých řezných parametrů. Když bude mít nástroj menší úhel opásání, bude odebírat méně materiálu, ale zato bude moct být použit větší posuv a řezná rychlost, čímž dojde ke zkrácení výrobního času, a tedy i ke snížení celkových ekonomických nákladů na výrobu.

Dalšími cíli všech obráběcích strategií (včetně hrubovacích strategií) jsou např. minimalizace přejezdů nástroje mimo záběr a zajištění plynulých přejezdů mezi jednotlivými drahami. [12,18]

U dřívějších CAD/CAM softwarů byly nabízeny pouze tradiční konvenční neboli základní metody. Dnes, po značném a stále pokračujícím vývoji CAD/CAM softwarů, obsahují CAD/CAM softwary čím dál tím více nových a progresivních metod obrábění, které se již nesoustředí jen na obráběnou geometrii, ale berou ohled i na obráběcí nástroj. [10]

Strategie hrubování v CAM softwaru lze rozdělit na konvenční metody (jako jsou konturování a řádkové obrábění) a progresivní metody, využívající vysokorychlostní frézování neboli HSM (high speed milling). [18,19]

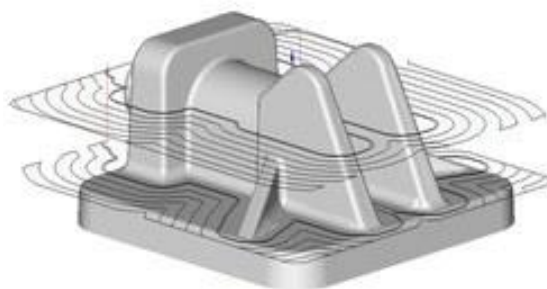
8. Konvenční metody CAM softwarů

Jak již bylo zmíněno mezi konvenční metody můžeme zařadit konturování a řádkové obrábění. Všechny tyto metody používají i ty nejzákladnější a bezplatně dostupné CAM softwary. [19]

8.1. Konturování

Konturování si můžeme představit jako postupné odřezávání materiálu pomocí jednotlivých řezů v Z souřadnici prováděných řezným nástrojem, který kopíruje požadovaný tvar obrobku v X a Y souřadnicích (viz Obr. 8). Z důvodu primárního pohybu jen ve 2 osách je tato metoda označována jako 2D nebo 2,5D frézování. Metodou konturování je především označováno obrábění vnějších částí obrobku. Pro obrábění vnitřních objemových ploch (kapes) se používá pojem kapsování. Konturování se využívá nejen u obrábění běžně dostupných polotovarů, ale především u odlitků, kde je požadavek na kopírování výsledné kontury.

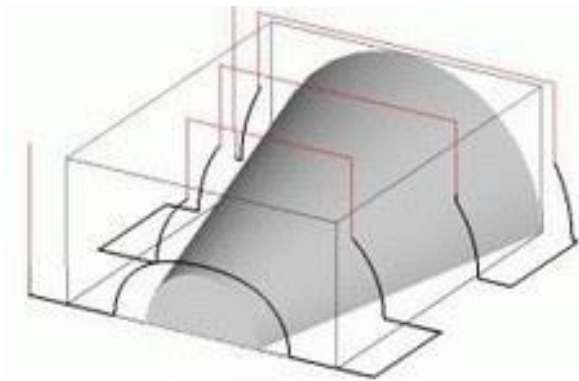
Pro zvýšení životnosti nástroje se většinou využívá souměrných drah, kdy se nástroj pohybuje v jednom směru. U konturování je dráha nástroje tvořena tzv. offsetovými křivkami. Dráhy opisované nástrojem se podobají spirále, kopírují požadovaný tvar z počátečního bodu do koncového podle tvar kapsy nebo vnější kontury. Při vytváření drah nástroje se většinou využívají korekce nástroje a adaptivní řízení úhlu opásání. [19]



Obr. 8 – Ukázka frézování s využitím konturování [20]

8.2. Řádkové obrábění

U této metody, jak již její název napovídá, jsou dráhy nástroje tvořeny sadou lineárních řezů v rovnoběžném směru. Podobně jako u konturování se tvoří dráhy řezného nástroje pouze ve 2D (XY souřadnicích), ale řezný nástroj po nich postupuje po jednotlivých řádcích, jak je vidět na Obr. 9. Frézování probíhá jednosměrným nebo obousměrným záběrem řezného nástroje. Z důvodů minimalizace přejezdů mimo záběr a udržování stále totožného zatížení řezného nástroje je více používané obousměrné řádkování. Velikost kroku je většinou rovna 0,8 násobku průměru nástroje s ohledem na maximální dovolený úhel opásání nástroje (aby nedocházelo k přetěžování řezného nástroje).



Obr. 9 – Ukázka řádkového obrábění [20]

Především u obrábění kapes pomocí metody řádkování dochází kvůli jednotlivým krokům k vytvoření stop po nástroji u stěn kapes. Z tohoto důvodu je nutné před dokončením procesu obrobít dráhu, která kopíruje přímý tvar kapsy.

Strategie řádkování je využívána především při obrábění ploch jednoduchých tvarů nebo při frézování s nástrojem s malým průměrem. [19]

9. Progresivní metody CAM softwarů

Spíše než pod pojmem progresivní metody, jsou tyto metody známy pod názvem HSM. Jedná se o nové a inovativní strategie hrubování spočívající ve zvýšení produktivity výroby. Jejich hlavním cílem je odebrání velkého objemu materiálu za malou časovou jednotku. Při HSM metodách se používají výrazně vyšší otáčky vřetene a větší hodnoty posuvu než u konvenčních metod. Z důvodu vyšších řezných parametrů jsou na nástroj kladeny větší nároky, především pak na jeho pevnost, houževnatost a nejvíce na teplotní odolnost. Obzvláště důležitá je odolnost nástroje vůči tepleným šokům a schopnost odvádět vzniklé teplo při obrábění, jelikož teplota třísek se pohybuje blízko tavné teplotě materiálu obrobku. Vysoké nároky jsou kladené také na samotný obráběcí stroj, především na vřeteno stroje a celkový příkon stroje. [5, 21]

Největší využití má HSM u obrábění hliníkových dílů např. v automobilovém, leteckém průmyslu, nebo při výrobě forem pro plastikářský průmysl.

Progresivních obráběcích metod existuje velké množství a díky neustálému vývoji dochází k vymyšlením nových, lepších, ekonomičtějších a produktivnějších metod. [21, 15]

9.1. Strategie založené na MRR rovnici

Základním měřítkem produktivity obrábění na CNC strojích je rovnice velikosti úběru materiálu (MRR). Jedná se o velmi jednoduchou rovnici obsahující základní řezné parametry. Každý technologický proces má vlastní specifickou MRR rovnici. Pro frézování platí následující MRR rovnice:

$$Q = v_f \cdot a_p \cdot a_e \quad [11, 22]$$

Q ... velikost úběru materiálu [$\text{mm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$]

v_f ... rychlost posuvu [$\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$]

a_p ... hloubka řezu [mm]

a_e ... radiální šířka řezu [mm]

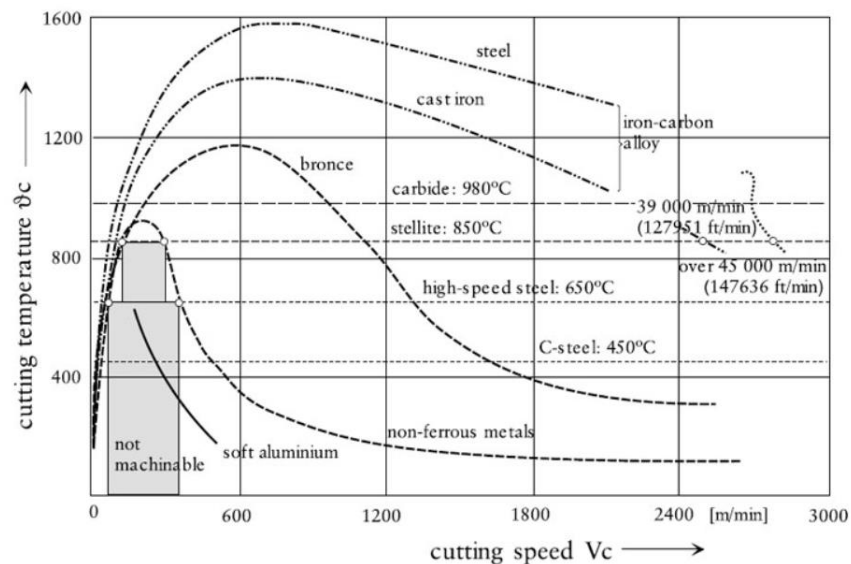
První tři základní metody vysokorychlostního obrábění fungují na principu zvyšování jednotlivých parametrů MRR rovnice. U každé z metod je výrazně navýšen

jeden parametr. Jelikož jsou na sobě všechny veličiny závislé dojde k úpravě i ostatních veličin, ale ve výrazně menší míře. [16]

9.1.1. HSC obrábění

Prvním takovouto metodou je HSC obrábění (high speed cutting), neboli obrábění vysokou řeznou rychlostí. Primární veličinou je v případě této metody řezná rychlost, která je často navýšena na maximální možnou rychlost včetně. Není neobvyklé použití 5-10 násobku běžné provozní řezné rychlosti. Šířka řezu se při obrábění pohybuje mezi 10–15 % průměru řezného nástroje a hloubka řezu je udržována konstantní.

Využitím vysoké řezné rychlosti se doba záběru nástroje spolu s obrobkem snižuje, čímž je zajištěna nižší řezná teplota (viz Obr. 10) a minimalizace přechodu vzniklého tepla do obrobku a nástroje. Největší část tepla odchází spolu s třískou. Zároveň při HSC obrábění vznikají nižší řezné síly a vibrace. Díky těmto výhodám zajišťuje využití HSC metody perspektivní a stabilní obráběcí proces, kterým lze dosáhnout nejméně 30 % navýšení úběru materiálu oproti konvenčnímu obrábění.



Obr. 10 – Graf závislosti řezné teploty na řezné rychlosti při vysokorychlostním obrábění [23]

HSC obrábění umožňuje obrábění malých, tenkostěnných obrobků a lze s jeho pomocí dosáhnout velmi dobrých vlastností obrobeného povrchu např. drsnosti až $R_a=0,2 \mu\text{m}$.

V praxi se HSC obrábění používá při výrobě forem, frézování dutin a výrobě zápusťek. [23, 24]

9.1.2. HFC obrábění

Pod pojmem HFC (high feed cutting) se skrývá frézování s vysokým posuvem. Tato metoda vznikla za účelem vyhovění neustále rostoucím požadavkům na zvyšování produktivity a snižování výrobního času. Úběr materiálu u této metody je o 200-300 % vyšší než u tradičního frézování. [25, 26]

HFC metoda je založená na využití vysokého posuvu na zub, který je až pětikrát větší než u běžného frézování. Hloubka řezu je menší a obvykle nepřesahuje velikost 2 mm. Třísky vzniklé při obrábění mají vzhled tenkých plátek, což je způsobeno malou hloubkou řezu. Tvar a velikost třísek mají pozitivní vliv na celý obráběcí proces. Při obrábění vzniká méně tepla a tím se i prodlužuje životnosti nástroje.

Další velkou výhodou HFC metody je velká stabilita obrábění a snížené riziko vzniku vibrací. Při obrábění vznikají minimální radiální a maximální axiální řezné síly, a to díky malému úhlu nastavení. Pro zajištění malého úhlu nastavení se při obrábění používají nástroje s větším počtem řezných destiček, nejčastěji trojúhelníkového, případně čtvercového tvaru.

HFC metoda nachází v praxi velmi široké uplatnění. Velmi dobrých výsledků dosahuje HFC metoda zvláště u čelního frézování nebo konturování. Hrubování s vysokým posuvem a malými hloubkami řezu vytvoří tvar téměř finální požadované kontury a kvality povrchu. V některých případech je obrobek hned po hrubovacím procesu dokončen. Další příklady praktického využití HFC metody, kdy je dosaženo vysoké účinnosti, jsou frézování dutin a spirálová interpolace u otvorů s velkým průměrem. [26]

9.1.3. HPC obrábění

Poslední z metod vycházejících z konceptu MRR rovnice je HPC (high performance cutting) metoda, neboli vysoce výkonné obrábění. Jejím cílem je maximalizace úběru materiálu při použití maximálních dovolených hodnot řezných

parametrů. Hloubka řezu může dosahovat až dvojnásobku průměru nástroje, šířka řezu může nabývat až hodnoty plného průměru nástroje a obrábění probíhá za použití vysokých řezných rychlostí. Jedinými limitujícími parametry pro obrábění jsou v případě HPC metody samotný výkon obráběcího stroje, dynamická tuhost obráběcího stroje a životnost nástroje. Nástroje používané při této metodě jsou vyráběny s ohledem na vysoké řezné podmínky obráběcího procesu.

I když je HPC metoda energeticky náročná, ve výrobě se přesto používá přibližně stejně často jako předchozí dvě zmiňované metody. [27]

9.2. Strategie výrobců CAM softwarů

Mnoho výrobců CAM softwarů vyvinulo spolu se samotným CAM softwarem i jednotlivé progresivní metody obrábění, které jsou přímo implementované v samotném CAMu. Všechny tyto metody mají od výrobce předem definovaný postup výpočtu dráhy nástroje a řezných parametrů.

Velká část progresivních metod od jednotlivých výrobců CAM softwarů je různou kombinací již zmiňovaných principů zvyšování úběru spolu s návrhem drah nástroje.

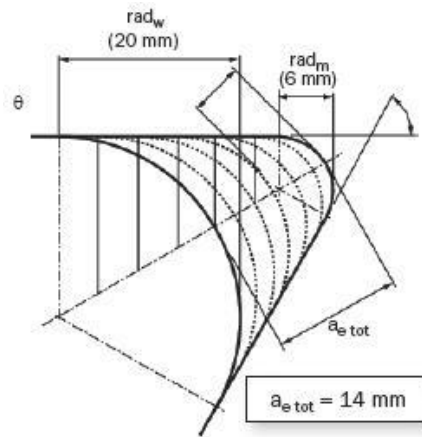
9.2.1. Strategie využívající TEA

Jedná se o progresivní hrubovací strategie, které jsou založené na dodržování maximálního úhlu opásání pro zajištění bezpečného a stabilního obrábění, bez nadměrného přetěžování nástroje, které může vzniknout např. při obrábění rohů kapes. Zbylé řezné podmínky jsou snaze o dosažení optimálního úhlu opásání přizpůsobeny.

9.2.1.1. Metoda tenkých řezů

Metoda tenkých řezů neboli anglickým názvem „slice milling“ je frézovací metoda, která se využívá pro polohrubovací a polodokončovací procesy. Metoda tenkých řezů, jak již název napovídá, spočívá v obrábění s malou šířkou řezu a současně s malým úhlem opásání. V důsledku volby těchto řezných parametrů dochází při obrábění ke vzniku nízkých řezných sil. Pro využití plného potenciálu řezného nástroje jsou při obrábění používány vysoký posuv a vysoká hloubka řezu dosahující plné délky řezného nástroje.

Oblasti, kde se metoda tenkých řezů používá, jsou například obrábění vnějších kontur obrobku, a především obrábění rohů kapes. Jedná se o oblasti, kam větší nástroj používaný u předchozí operace nemohl dosáhnout kvůli příliš velkému průměru, jak je vidět na Obr. 11.



Obr. 11 – Dráhy nástroje vnitřního rohu s úhlem 60° [28]

Důležitým prvkem při obrábění vnitřních rohů kapes metodou tenkých řezů je postupné snižování poloměru dráhy řezného nástroje a rychlosti posuvu po jednotlivých průchodech. [28]

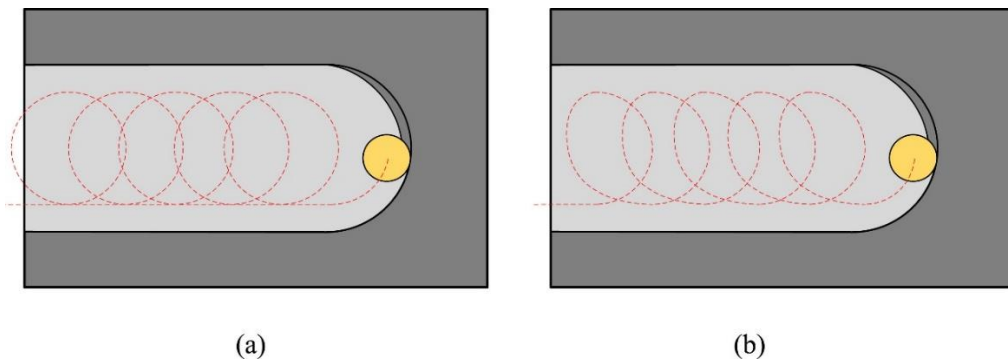
9.2.1.2. Trochoidní frézování

Vznik trochoidní metody obrábění je úzce spojen s problematikou obrábění rohů kapes. Při obrábění vnitřních rohů kapes dochází k náhlému navýšení úhlu opásání při příchodu řezného nástroje do vnitřních rohů kapsy, což má za následek přetěžování nástroje (jak bylo již popsáno výše). Jako jedno z řešení tohoto problému byly navrženy změny dráhy řezného nástroje. Ukázalo se, že dráhy v podobě série po sobě jdoucích kruhových oblouků v rohu kapsy, jsou velmi výhodné. Takto vzniklé kruhové dráhy se zdály být natolik perspektivní, že na jejich využití byla založena celá nová strategie – trochoidní obrábění.

V případě trochoidního frézování je dráha nástroje tvořena kombinací kruhových a lineárních pohybů, jak je znázorněno na Obr. 12 (a),(b). Pohyb nástroje má dvě fáze – část řeznou a neřeznou (při níž nástroj není v záběru). Při řezné části dochází k aktivnímu úběru materiálu při konstantním úhlu opásání, který je v porovnání s konvenčními metodami malý, což zajišťuje při obrábění vznik nízkých řezných sil. Díky tomu lze použít vysokou axiální hloubku řezu. Radiální hloubka řezu je při trochoidním frézování

nízká, nepřesahuje hodnotu $1/5$ průměru nástroje. Problém s limitovanou nízkou hodnotou radiální hloubky řezu na zub se řeší použitím vícebřitých nástrojů, které umožní použití vysokého posuvu, a tedy zefektivnění procesu obrábění.

Část pohybu, kdy není nástroj v kontaktu s obrobkem je využívána pro chlazení nástroje, což je pro celý proces velmi příznivé. Takováto optimalizace dráhy nástroje vede ke zkrácení doby obrábění a prodloužení životnosti řezného nástroje, a to zejména z důvodů vzniku menších řezných sil a lepší tepelné regulaci celého procesu.



Obr. 12 – Trochoidní křivky – kruhová dráha (a), dráha elipsy (b) [29]

Díky využití trochoidních drah lze dosáhnout lepších výsledků než u lineárního drážkování, proto je trochoidní frézování vhodné pro drážkování nebo odřezávání úzkých oblastí. V dnešní době se trochoidní dráha nástroje využívá i pro kapsovací cykly. Trochoidní metoda obrábění je vhodná i pro těžko obrobitelné materiály, díky menším řezným silám a lepšímu odvodu tepla vzniklého při obrábění dosahuje efektivnějších výsledků než běžné metody obrábění. [29,30]

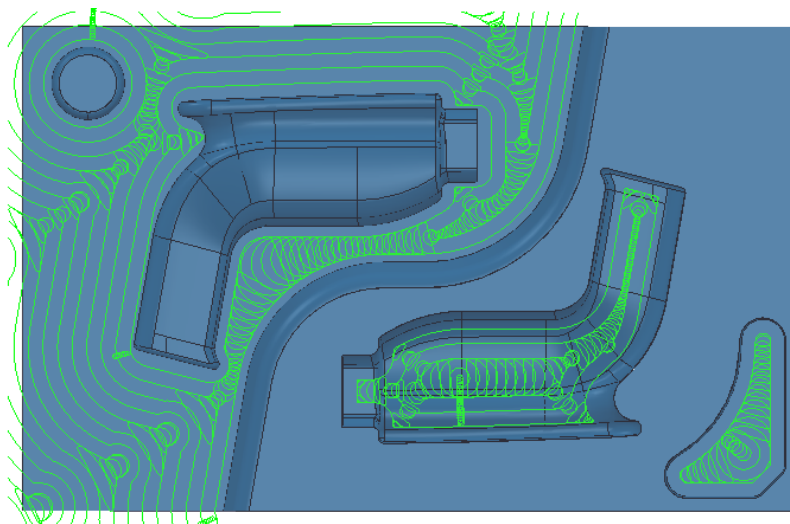
Možnosti využití trochoidní dráhy nástroje jsou intenzivně zkoumány a v současné době již existují desítky rozličných hrubovacích metod, které ze základu trochoidní dráhy vycházejí. Lze s nimi dosáhnout jak lepších výsledků z pohledu obráběného tvaru a povrchu, tak i kratších výrobních časů. Jedním z příkladů inovace trochoidního frézování může být, kdy se původní trochoida, která byla zaměřená na odstranění skokových změn zatížení nástroje, postupně mění na obecnou křivku zaměřenou na dodržení konstantního zatížení během řezu a co nejkratší neřezné pohyby. Díky tomu se trochoidní křivka vytrácí a dráha obrábění má obecný tvar. Názorný příklad je vyobrazen na Obr 30b, kde je možné vidět, že původně trochoidní křivka se

v tomto případě mění na sérii po sobě následujících elips. Další inovací, která stojí za zmínku je rozšíření původně pouze 2D trochoidních drah do 3D obrábění. [29]

9.2.1.3. Vortex

Díky čím dál tím zvětšující se poptávce po vysokorychlostních obráběcích strategiích, představila společnost Delcam v roce 2013 novou adaptivní hrubovací strategii nesoucí název Vortex. Nová vysokorychlostní obráběcí strategie byla určena primárně pro CAM programy PowerMILL a FeatureCAM. [31]

Hrubovací strategie Vortex je založena na využití offsetové dráhy nástroje, která se běžně používá i u konvenčního obrábění. Další podobnost mezi Vortex strategií a konvenčním obráběním spočívá v kontrolování a dodržování maximálního úhlu opásání pro optimální obrábění. Naopak zásadním rozdílem mezi konvenčním obráběním a Vortex strategií je odlišná dráha nástroje při obrábění vnitřních rohů kapes. U konvenčních metod v tomto případě dochází ke kritickému vzrůstu úhlu opásání a stroj je nucen snížit posuv, aby se zabránilo přetížení nástroje. U drah vytvořených strategií Vortex však není potřeba rychlost posuvu snižovat, protože dráha nástroje při vstupu do ostrého vnitřního rohů plynule přejde na trochoidní dráhu, což zamezí potenciálnímu přetížení nástroje (viz Obr. 13). Díky tomuto zamezení přetěžování nástroje může být při využití Vortex strategie po celou dobu obrábění udržován konstantní posuv.



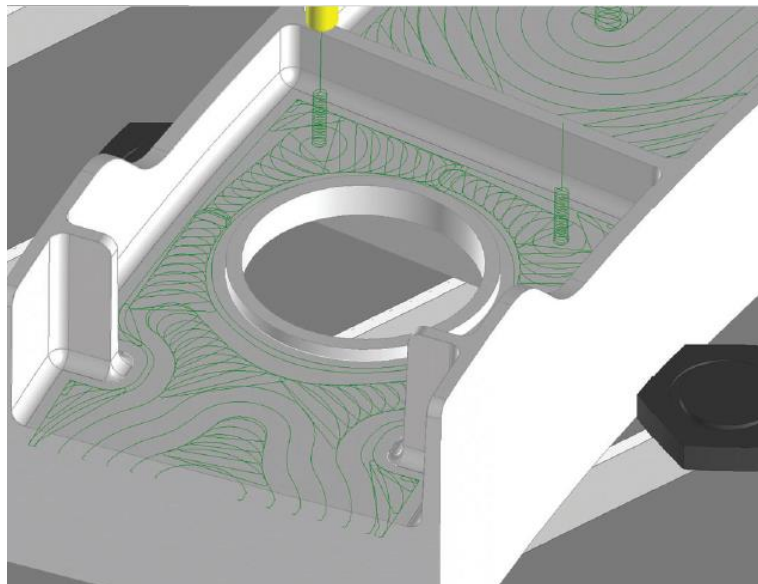
Obr. 13 – Vygenerovaná dráha strategií Vortex [32]

U metody Vortex je upřednostňováno spíše používání monolitní karbidových nástrojů před frézovacími hlavami s výměnnými břitovými destičkami. Monolitní nástroje jsou především vhodné pro obrábění s vyšší axiální hloubkou řezu, kdy lze využít plné délky řezné části nástroje a tím maximalizovat potenciál řezného nástroje. Zároveň díky využití plné délky řezné části nástroje dochází k rovnoměrnému opotřebení nástroje, což značně prodlouží životnost nástroje.

Spojením možnosti udržování konstantního posuvu, obrábění ve větší axiální hloubce (než u klasických strategií) a vysoké životnosti nástroje dochází k velmi významným časovým a finančním úsporám ve výrobě. [31, 32]

9.2.1.4. TrueMill

Technologie TrueMill, celým názvem Tool Radius Uniform Engagement, od společnosti Surfware využívá, jak již z názvu vyplývá, konstantního úhlu opásání a rovnoměrného zatížení nástroje při obrábění materiálu. Vizualizace vygenerovaných drah strategií TrueMill je zobrazena na Obr. 14.



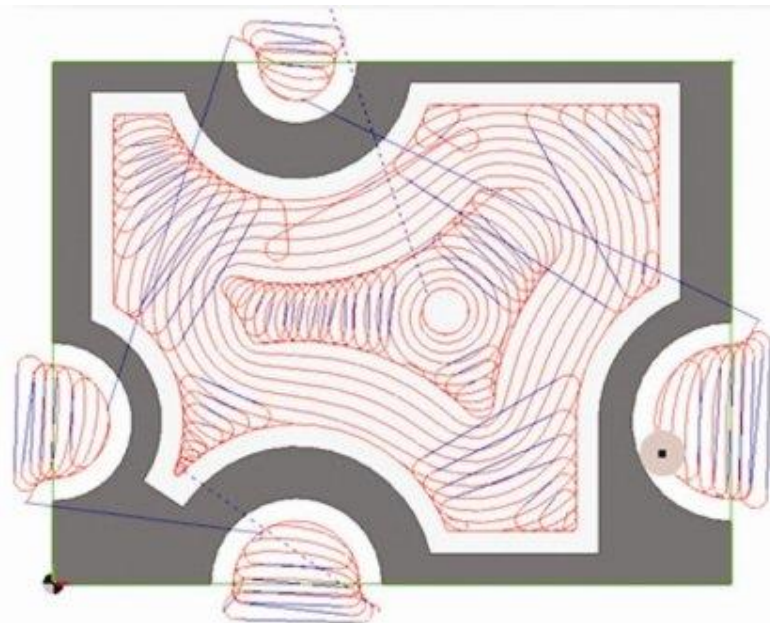
Obr. 14 - Vizualizace dráhy nástroje vygenerované metodou TrueMill [36]

Dráhy nástroje jsou plynulé, bez ostrých rohů a náhlých změn směru. V průběhu celého procesu obrábění jsou kontrolovány jak úhel styku nástroje s obrobkem, tak i zatížení nástroje. V průběhu obrábění zároveň dochází k optimalizaci rychlosti posuvu tak, aby byl použit maximální možný posuv stroje s ohledem na kritické parametry

nástroje. Celková dráha může být delší než u jiných progresivních metod, ale díky vysoké posuvové rychlosti dosahuje strategie TrueMill kratších strojních časů. Kratší strojní časy mají pozitivní vliv i na samotný nástroj, docílí se jimi kratší doby záběru nástroje, čímž dojde k snížení opotřebení a prodloužení životnosti řezného nástroje. Úběr materiálu je mnohem rychlejší a efektivnější než v případě konvenčních a některých progresivních strategií hrubování. [36, 37, 38]

9.2.1.5. Waveform

Waveform (vlnitá strategie) je součástí CAM softwaru EdgeCAM. Hrubovací strategie Waveform, obdobně jako ostatní výše jmenované strategie, pracuje s maximální dovolenou hodnotou úhlu opásání, která je po celou dobu hrubování udržována konstantní. Ukázka vytvořené dráhy nástroje je vyobrazena na Obr. 15.



Obr. 15 – Dráhy nástroje vytvořené Waveform strategií [39]

Waveform strategie klade důraz na plynulé hladké dráhy nástroje bez prudkých změn směru, přerušovaných řezů a s co nejmenšími vedlejšími časy, kdy se nástroj neúčastní řezu. Dráhy nástroje jsou algoritmem vytvořeny tak, aby nástroj po zahloubení do polotovaru na potřebnou hloubku řezu obráběl materiál po spirálové offsetové dráze, do doby, než dojde k jeho kontaktu s nejbližším prvkem obráběné kontury. Poté se dráha nástroje změni a dochází k postupnému obrábění vnitřních rohů kapsy. Obrábění rohů kapes probíhá pomocí trochoidních drah nástroje tak, aby byl zachován maximální dovolený úhel opásání.

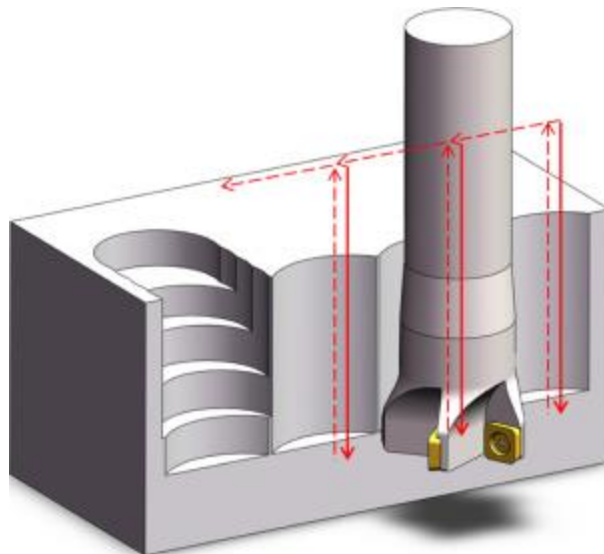
Podobně jako Vortex strategie i Wavefrom používá velkou axiální hloubku řezu s využitím plné délky řezného nástroje, což přispívá jinak k zvyšování efektivity obrábění, tak i k rovnoměrnému opotřebení nástroje, a tedy k prodloužení životnosti nástroje. [39, 40]

9.2.2. Ostatní strategie

Tyto strategie nepoužívají podmínku maximálního bezpečného úhlu opásání, jak je tomu u strategií využívajících TEA, ale soustředí se především na použití vhodné geometrické metody a optimálního záběru nástroje pro maximalizaci úběru materiálu.

9.2.2.1. Ponorné frézování

Ponorné frézování, spíše známé pod anglickým názvem „Plunge Milling“, je jednou z progresivních hrubovacích strategií především pro obrábění hlubokých kapes nebo drážek. Základním principem této metody je vytvoření série po sobě jdoucích vyvrtávacích cyklů, které jsou vedeny po vodící offsetové křivce (viz Obr. 16).



Obr. 16 – Schéma dráhy ponorného frézování [33]

Základní odlišností ponorného frézování od ostatních hrubovacích strategií je rozdílné rozdělení řezné síly do jednotlivých směrů. U ponorného frézování je dominantní složkou axiální síla, která zajišťuje vysokou tuhost při obrábění, vyšší přesnost a lepší drsnost povrchu než u konvenčního čelního obrábění.

Od ostatních strategií se v případě ponorného frézování dále liší i samotná geometrie nástroje, jelikož řez při frézování probíhá na čele nástroje. Největší průměr

nástroje je na začátku řezné části nástroje. Dřík nástroje je menšího průměru, a to z důvodu, aby při vodorovném pohybu frézy nedocházelo ke kontaktu dříku se stěnou obrobku. Nástroj v sobě má rovněž často dutiny sloužící pro přívod procesní kapaliny za účelem chlazení a zejména odvodu třísek. Dostatečný odvod třísek se řeší také metodou postupného nájezdu na konečnou hloubku. Správný odvod třísek má zásadní vliv na životnost nástroje. Při nedostatečném odvodu třísek by totiž nástroj třísky znovu obráběl, čímž by si svou životnost zkracoval.

Zásadní nevýhodou ponorného frézování je vzhled výsledného povrchu po dokončení ponorných cyklů. Jelikož jsou jednotlivé řezy provedeny s určitým krokem, mají stěny kapsy velmi hrubý povrch. Z tohoto důvodu je vhodné po ponorném frézování do hrubovacího procesu začlenit závěrečné ohrubování stěn kapsy, které připraví povrch kapsy na případné dokončovací procesy. [34, 35]

9.2.2.2. Zpětné hrubování

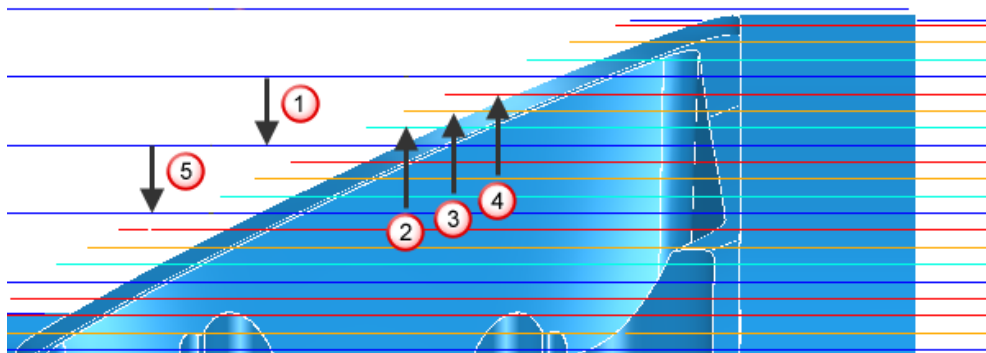
Poslední jmenovanou hrubovací strategií je strategie zpětného hrubování, anglickým názvem „Step cutting“. Běžně se můžeme setkat i s označením strategie obrábění schodů, či strategie terasováním. Terminologie názvu této strategie není příliš jednoznačná, jelikož výrobci jednotlivých CAM softwarů si své strategie pojmenovávají odlišně.

Princip této strategie je založen na vytváření tzv. mezilehlých řezů. Samotný pohyb nástroje se skládá ze dvou fází. Primární fází je obrobení tělesa směrem dolů danou hodnotou hloubky řezu, tuto fázi lze označit za hlavní krok. Sekundární fází je obrobení tělesa zpětnými pohyby nahoru, a to v několika krocích. Jednotlivé kroky nahoru jsou menší, než je hodnota hloubky řezu u hlavního kroku. Hlavní krok je tedy při sekundární fází rozdělen do několika menších kroků a zpětným pohybem nahoru je docíleno vytvoří jemnější struktury obráběné plochy, než byla po obrobení hlavním krokem. Sekundární fáze pohybu nahoru končí dosažením počáteční hladiny předchozího hlavního kroku a obě tyto fáze se znovu opakují.

Jelikož je při sekundární fází pohybu nástroje hodnota kroku značně menší než při primární fází, je při sekundárním pohybu v rámci zvýšení produktivity této strategie zvýšena hodnota posuvu na hodnotu, při které je dodrženo maximální zatížení nástroje. Další možností optimalizace, která přispívá především k plynulosti obrábění, je možnost

obráběné těleso nejprve obrobit tzv. „na hrubo“, tedy pouze hlavním krokem, a následně celou tuto vytvořenou strukturu obrobit už jen zpětným pohybem nahoru po jednotlivých hladinách.

Pro názornost je tato strategie skládající se z několika fází vyobrazena a popsána na Obr. 17.. Body číslo 1 a 5 jsou hlavní kroky směrem dolů (primární fáze), zbylé body (2, 3, 4) označují sekundární fázi pohybů směrem nahoru. Počet vytvořených Z hladin (teras, schodů) v rámci sekundární fáze je libovolný, v závislosti na konkrétní výrobě. Záleží tedy na požadavcích výroby, jak jemnou strukturu obráběné plochy vyžadujeme od hrubovacího procesu.














Obr. 17 – Schéma dráhy zpětného hrubování [51]

Jak je možné vidět na Obr. 17 tato hrubovací strategie se spíše používá pro obrábění šikmých ploch vyskytujících se především u 3D těles. [51]

10. Představení vybraných CAM softwarů

Další část této práce je věnována představení několika nejnámějších a nejpoužívanějších CAD/CAM softwarů od společností Autodesk, Openmind, Kovoprog a Siemens.

Jednotlivé CAM softwary lze rozdělit do 3 kategorií (jednoduché, střední a nejvyšší třída), jak je vidět na Obr. 18. Volba vhodného typu závisí především na uživateli a na požadavcích samotné výroby. Jednoduché CAM softwary jsou cenově dostupné, ale na úkor nízké ceny neobsahují pokročilé funkce 5osého frézování. Naopak v CAM softwarech nejvyšší třídy jsou funkce 5osého frézování běžně dostupné.

	2D /2,5D frézování	3osé frézování	3+2 poziční frézování	Základní víceosé frézování	Komplexní víceosé frézování	Úprava osy nástroje	Úprava dráhy nástroje	Speciální strategie
 <small>Autodesk Fusion 360</small> <small>Kovoprog frézování</small>								
 <small>Autodesk FeatureCAM</small>								
 <small>SIEMENS NX</small> <small>AUTODESK POWERMILL</small> <small>hyperMILL</small>								
								

Obr. 18 – Rozdělení CAM softwarů. Převzato a doplněno o vlastní data z [41]

10.1. Autodesk Fusion 360

Autodesk Fusion 360 (ve verzi 2020) je jedním z CAD/CAM softwarů od společnosti Autodesk. Fusion 360 je založený na cloud technologiích (veškerá data přebírá z internetu). Software kombinuje možnosti parametrického, volnoplášného a objemového modelování součástí i sestav, jejich analýzu, vizualizaci a CAM technologie pro programování obráběcích strojů. Od roku 2020 je ve Fusion 360 integrována aplikace pro návrh elektronických obvodů a desek plošných spojů.

V rámci CAM technologie disponuje Fusion 360 obráběcími strategiemi vysoce efektivního hrubování, optimalizací zatížení nástrojů při hrubování, automatizačními nástroji pro maximální zefektivnění výroby a širokou škálou postprocesorů pro generování NC-kódu nebo DXF souborů pro běžné řídicí systémy. [41, 42]

10.2. Kovoprog frézování

Dalším z jmenovaných softwarů je CAM software KOVOPROG (ve verzi 4.14) od společnosti Peška & Brtna Computer Service, s. r. o.. Jedná se o jediný český CAM software na trhu. Program je dostupný ve dvou verzích – drátové řezání, zabývající se především elektroerozivním obráběním, a třískové obrábění. Ve verzi třískového obrábění se KOVOPROG soustředí na soustružení s vodorovnou nebo svislou osou, frézování je omezené jen na 2,5D a vrtání.

I když se jedná o jeden z jednodušších CAM softwarů s omezenými možnostmi, přednostmi, které může KOVOPROG nabídnout, jsou jeho jednoduché ovládání, snadný princip, a především nabídka češtiny v základní verzi programu. Z těchto důvodů je velmi oblíbený zejména na tuzemském trhu. [43, 44]

10.3. Autodesk FeatureCAM

CAM software s názvem Autodesk FeatureCAM (ve verzi 2021) je dalším CAM softwarem od společnosti Autodesk. Jedná se o produkční software určený pro procesy frézování, soustružení a drátového řezání. Na rozdíl od ostatních CAM softwarů, které vytvářejí program pro výrobu obrobku po jednotlivých operacích (hrubování, polohrubování, dokončování), FeatureCAM sdružuje operace do technologických, předem definovaných prvků (díra, kapsa, zahloubení, výstupek, profil, závit atd.).

Každý prvek, anglicky „feature“, se skládá z jednotlivých po sobě jdoucích operací, které jsou automatizované a lze si je vybírat z nabídky. Jinou možností je ponechat rozpoznání jednotlivých technologických prvků obráběného tělesa na samotném FeatureCAMu, který aplikuje vhodné strategie a výběr nástroje na jednotlivé prvky tak, aby byla zajištěna jejich výroba. V případě potřeby je možné do procesu zasáhnout a upravit si výsledek dle vlastních požadavků.

Díky vysoké automatizaci je FeatureCAM velmi efektivním a oblíbeným CAM softwarem. [45]

10.4. Autodesk PowerMill

Autodesk PowerMill je CAM software nejvyšší třídy umožňující programování 3osých a 5osých frézovacích center. PowerMill obsahuje mnoho pokročilých funkcí. Příkladem může být možnost úpravy dráhy nástroje i po jejím výpočtu, tedy možnost změn nájezdů nebo přejezdů nástroje. Dalším příkladem je plná kontrola kolizí nástrojové sestavy se současnou kontrolou kolize samotného stroje. Současně je PowerMill vybaven širokou škálou obráběcích strategií, včetně strategií pro HSM frézování, umožňující obrábění tvarově složitých komponentů, např. radiálních nebo axiálních lopatkových kol.

Na rozdíl od jiných, jednodušších CAM softwarů, které kladou hlavní důraz na rychlost výpočtu dráhy nástroje, PowerMill klade velký důraz také na kvalitu a plynulost dráhy nástroje, čím se celý proces stává stabilnější, obrábění probíhá v kratším výrobním čase a přesnost a kvalita výsledného povrchu se zvyšuje. [41]

V nejnovější verzi PowerMill s označením 2021.1 bylo představeno několik vylepšení. Jednou z novinek je možnost dynamického nastavení stroje a možnost využití automatického zamezení kolizi s modelem u víceosého hrubování při použití nástrojů s kulovým koncem. [46]

10.5. Openmind HyperMILL

HyperMILL byl vydán společností OPEN MIND Technologies AG. Obdobně jako již zmiňovaný PowerMill, také patří mezi nejvyšší třídu CAM softwarů nabízející možnost programování v 2D, 3D, 5D, HSC a HPC obrábění se současnou možností optimalizace obráběcího procesu. V rámci softwaru je k dispozici široké spektrum obráběcích strategií (např. vortex strategie, trochoidní obrábění), které jsou určeny i pro frézování za využití nejmodernějších frézovacích nástrojů.

Samotný CAM software je rozdělen do několika částí, které lze libovolně rozšiřovat dle požadavků a náročnosti uživatele. Softwarové rozšíření, které se nejvíce soustředí na hrubování má název „MAXX Machining“. Jedná se o rozšíření obsahující funkce optimalizovaného hrubování, HFC a HPC frézování spolu s pokročilými

strategiemi pro dokončování a vrtání. Součástí rozšíření je i speciální funkce „Perfect Pocketing“ zajišťující adaptivní frézování kapes vysoké kvality.

Pro rok 2021 byla představena verze Hyper MIILL 2021.1, která nově obsahuje inovované 3D optimalizované hrubování spolu s dalšími vylepšeními CAM softwaru. [47, 48]

10.6. Siemens NX

Posledním z představených CAM softwarů je Siemens NX od stejnojmenné společnosti Siemens PLM Software. Siemens NX patří spolu s již jmenovanými CAM softwary do nejvyšší třídy CAM softwarů.

Siemens NX je komplexní CAD/CAM software poskytující podporu při návrhu i výrobě součástí. Ve výrobní části softwaru lze snadno programovat CNC obráběcí stroje, 3D tiskárny, CMM zařízení pro kontrolu kvality výroby nebo roboty.

V nejnovější dostupné verzi Siemens NX 1980 lze dosáhnout vyšší přesnosti a kvalita výroby spolu za současného snížení doby programování stroje, díky pokročilým obráběcím strategiím. Součástí softwaru je i vylepšení podprogramu Simcenter 3D, který nově umožňuje modelování a simulace točivých strojů, analýza akustiky interiérů/exteriérů a analýza kompozitních konstrukcí. Další novinkou je funkce robotického programování, rozšiřují možnosti obrábění o přesné obrábění velkých součástí nebo obrábění šesti a víceosými roboty, které značně urychluje a zlepšuje celkovou výrobu. [50]

11. Experimentální část

11.1. Porovnání drah jako cíle práce

Součástí této bakalářské práce je experimentální část zaměřená na porovnání výše zmiňovaných CAM softwarů a jejich progresivních obráběcích strategií z různých pohledů, které by pomohly určit jejich vhodnost či ekonomickou výhodnost pro obrábění různých obrobků, s ohledem na požadavky výrobce. Jednotlivé hrubovací strategie lze hodnotit a porovnávat z pohledu vygenerovaných drah, délky drah řezných a neřezných pohybů, nájezdů a výjezdů z materiálu, celkového času obrábění (podíl řezného a neřezného času), produktivních a neproduktivních časů, silového zatížení nástroje, opotřebení nástroje po obrábění, vizuálního vzhledu a parametrů (např. drsnost) finálního povrchu obrobku.

Jelikož nebylo možné uskutečnit reálný experiment, při kterém by bylo možné změřit a případně vyhodnotit všechny výše vyjmenovaná kritéria, byl experiment omezen pouze na teoretický, při kterém, za využití simulací v prostředí CAM softwarů, byly u jednotlivých obráběcích strategií zjištěny údaje o časech obrábění (řezné a neřezné pohyby) a délkách drah (řezných a neřezných pohybů). V reálném experimentu by se k měření silového působení použil rotační dynamometr, který se upíná přímo na vřeteno stroje a lze s ním měřit všechny složky řezné síly.

Z výše popsaného důvodu byla jako hodnotící kritérium zvolena délka času obrábění, která má u hrubovacího procesu zásadní ekonomický význam.

Podmínkami experimentu jsou shodná volba technologických parametrů pro všechny CAM softwary a obrábění totožného zkušební tělesa s navrženou geometrií.

11.2. Návrh zkušební tělesa

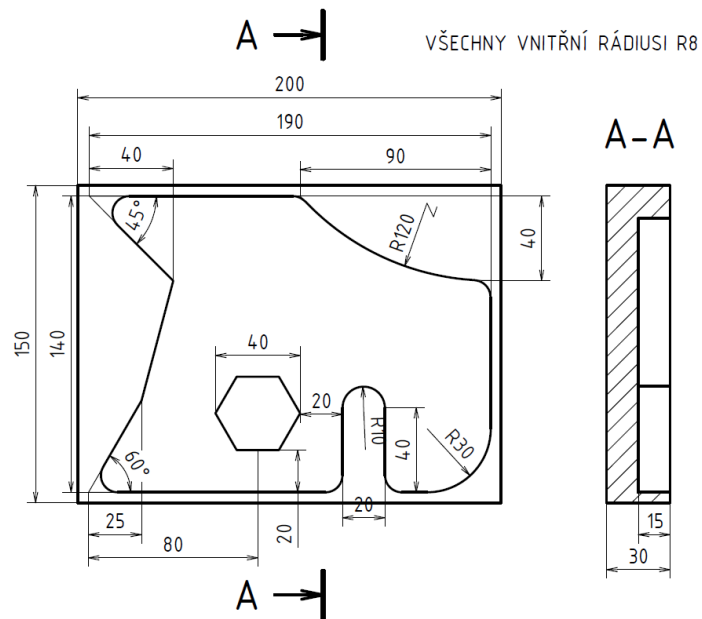
Prvním krokem experimentu byl návrh zkušební tělesa, který jsem provedl v CAD softwaru Autodesk Inventor 2020.

Jelikož v rámci experimentu bylo snahou aplikovat vytvořený přehled hrubovacích strategií uvedený v teoretické části této práce, který se spíše soustředí na 2D hrubovací strategie, byla jako zkušební těleso vytvořena 2D kapsa. Dalším důvodem pro volbu pouze 2D zkušební tělesa bylo, že některé z vybraných CAM softwarů jsou

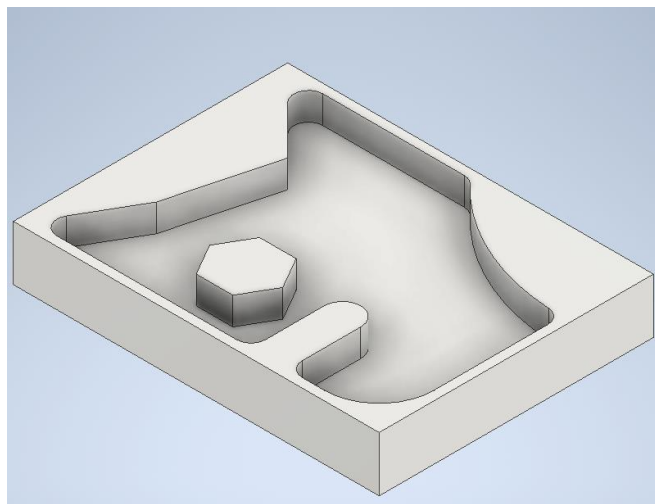
omezená pouze na 2,5D obrábění a nepodporují 3D obrábění, např. CAM software Kovoprog frézování.

Zkušební těleso – 2D kapsa

Jak je vidět na Obr. 19 a 20, těleso je navrženo jako uzavřená kapsa s ostrůvkem obsahující několik prvků, které se běžně používají v praxi. Součástí geometrie kapsy jsou vnitřní a vnější rádius, dva rohy s ostrým úhlem (60° a 45°) a dva pravé úhly.



Obr. 19 – Náčrt rozměrů zkušebního tělesa č. 1



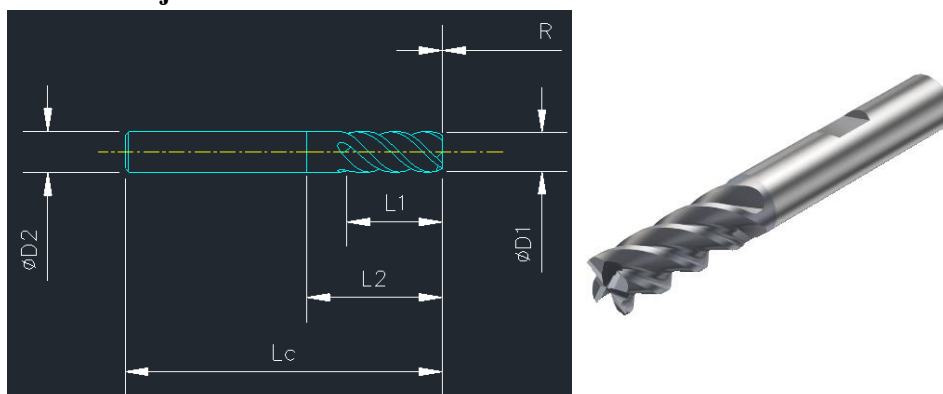
Obr. 20 – 3D schéma zkušebního tělesa č. 1

11.3. Technologické podmínky experimentu

Jelikož se jedná pouze o teoretické srovnání CAM softwarů a experimentální část zahrnuje pouze práci v prostředí CAM softwaru, nikoliv však aplikaci do reálné výrobní praxe, volba řezných parametrů bude omezena pouze volbou řezného nástroje.

Pro frézování jsem zvolil monolitní karbidovou stopkovou frézu CoroMill Plura určenou pro hrubování, kterou lze najít v katalogu společnosti Sandvik Coromant s.r.o. pod označením 1P341-0800-XB 1630. Fréza je opatřena PVD povlakem titan-aluminium nitridu (TiAlN) a je určena pro obrábění nízkolegovaných ocelí, austenitické korozi-vzdorné oceli a šedé litiny. [49]

Geometrie nástroje:



Obr. 21 – Schéma zvolené frézy [49]

Parametry zvoleného nástroje [49]:

- Délka řezné části: $L_1 = 19$ mm
- Délka ke krčku frézy: $L_2 = 27$ mm
- Celková délka frézy: $L_c = 63$ mm
- Průměr frézy: $\varnothing D_1 = 8$ h6 mm
- Průměr dříku: $\varnothing D_2 = 8$ mm
- Sražení rohu: $R = 1 \times 45^\circ$ mm
- Počet břitů: $z = 4$
- Úhel stoupání šroubovice: $\lambda = 45^\circ$
- Radiální úhel čela: $\gamma = 10,5^\circ$

Základní volbu řezných podmínek jsem provedl na základě doporučení výrobce nástroje pro hrubování kapsy z materiálů ze skupiny pod označením P1.2.Z.AN. Následně jsem tyto podmínky upravil a doplnil dle vlastních zkušeností (např. rychlost posuvu mimo řez) a dopočítal obecně platných vzorců pro řezné parametry (viz tab. 1). Řezné podmínky jsou pro všechny použité CAM softwary konstantní. Hloubku řezu $a_p = 15$ mm jsem zvolil s ohledem na nástroj, aby bylo možné zkušební těleso obrobit jedním řezem v Z hladině. Ostatní řezné parametry jsem ponechal dle doporučení konkrétního CAM softwaru.

Tab. 1 Zvolené řezné podmínky experimentu

Řezná rychlost v_c [m . min ⁻¹]	Otáčky vřetene n [min ⁻¹]	Posuv na zub f_z [mm]	Rychlost posuvu v_f [mm . min ⁻¹]	Hloubka záběru a_p [mm]	Šířka řezu a_e [mm]
176	7000	0,05	1400	15	2

Rychlost posuvu nájezdu v_{fn} [mm . min ⁻¹]	Rychlost posuvu odjezdu v_{fo} [mm . min ⁻¹]	Rychlost rampového posuvu v_{fram} [mm . min ⁻¹]	Velikost rychloposuvu v_{fr} [mm . min ⁻¹]
1000	1000	500	3000

11.4. Provedení experimentu

Jelikož použité CAM softwary nepodporují formát Autodesk Inventoru (IPT), bylo nutné exportovat zkušební těleso do přenosového formátu DWG nebo IGS, které jsou již podporované v prostředí CAM softwarů a lze je přímo importovat. Jediným problémem při importu zkušebních těles do CAM softwarů bylo sjednocení počátku souřadnicového systému importovaného tělesa, polotovaru a prostředí CAM softwaru. Souřadnicový systém jsem u všech CAM softwarů umístil do levého vrchního rohu.

Následný postup při výběru hrubovací strategie spolu s definicí nástroje a volbou řezných podmínek byl již velmi intuitivní, jelikož ovládání jednotlivých CAM softwarů je velmi podobné. Případné rozdíly v práci s jednotlivými CAM softwary jsou popsány níže u konkrétních CAM softwarů.

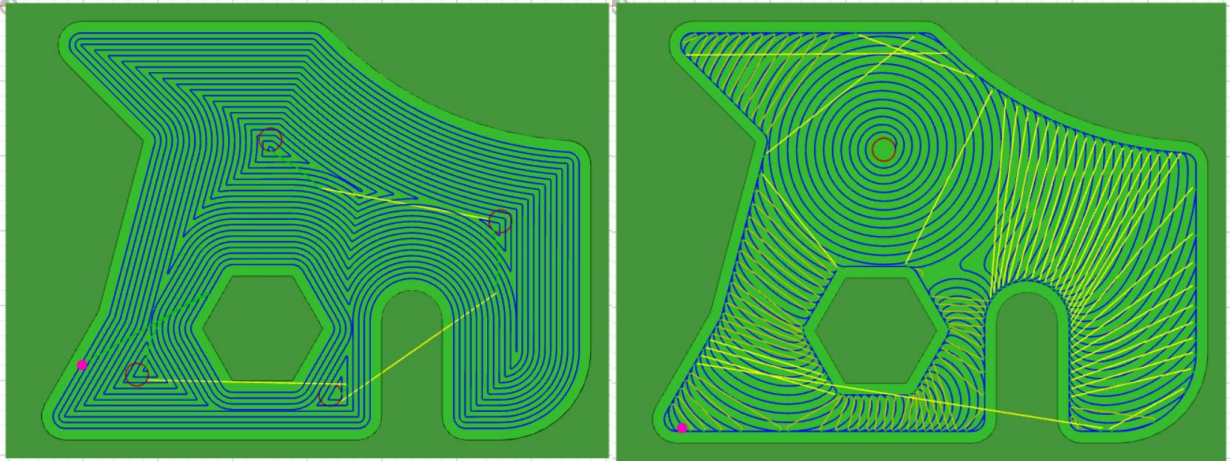
11.5. Výsledky experimentu

11.5.1. Autodesk Fusion 360

Jedná se o uživatelsky velmi přívětivý CAM software, který se velmi snadno ovládá i bez předchozích zkušeností, a to díky jednoduchosti a vizuální podobnosti s CAD softwarem Autodesk Inventor, který se běžně používá v praxi.

Autodesk Fusion 360 nabízí pro hrubování ve 2D strategii hrubování kapes nebo adaptivní hrubování. Strategie kapsování spočívá v tradičním konturováním (viz Obr. 22), zatímco adaptivní hrubování využívá obrábění po trochoidní křivce (viz Obr. 23).

Výsledné časy obrábění a délky drah nástroje jsou uvedeny v Tab. 2.



Obr. 22 – Strategie hrubování kapes

Obr.23 – Strategie adaptivní hrubování

Tab. 2 Výsledné časy a délky dráhy u jednotlivých strategií – Autodesk Fusion 360

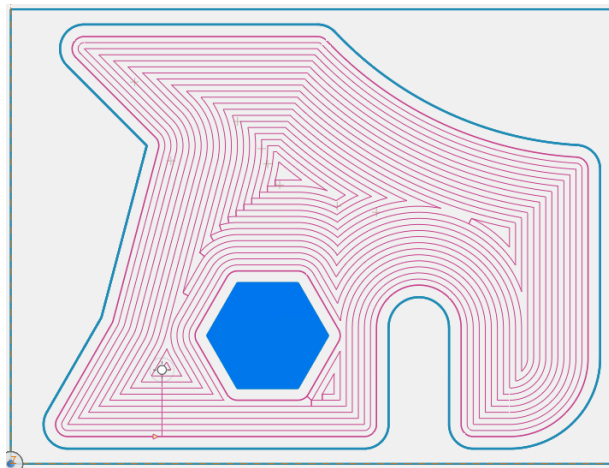
Autodesk Fusion 360	Čas [min:s]			Dráha [m]		
	Celkový	Obrábění	Rychloposuv	Celková	Obrábění	Rychloposuv
Hrubování kapes	6:50	6:35	0:15	9,12	8,84	0,28
Adaptivní hrubování	9:37	9:11	0:26	18,05	12,55	5,50

11.5.2. Kovoprog frézování

Jak již bylo zmíněno, CAM software Kovoprog frézování patří mezi jednodušší CAM softwary. Nabídka obráběcích strategií je v rámci tohoto CAM softwaru velmi omezená, a to pouze na konvenční strategie. Tento CAM software nenabízí žádnou z adaptivní strategií obrábění.

V rámci výběru vhodné hrubovací strategie pro zkušební těleso jsem použil strategii vybrání kapsy, která je založená na principu konturování (viz Obr. 24).

Výsledný čas a délka dráhy je uvedena v Tab. 3.



Obr.24 – Strategie vybrání kapsy

Tab. 3 Výsledný čas a délka dráha strategie – Kovoprog frézování

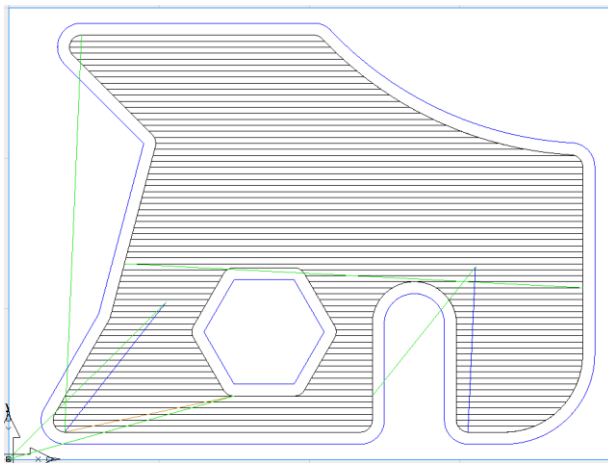
Kovoprog frézování	Čas [min:s]			Dráha [m]		
	Celkový	Obrábění	Rychloposuv	Celková	Obrábění	Rychloposuv
Vybrání kapsy	6:44	6:43	0:01	8,99	8,97	0,02

11.5.3. Autodesk FeatureCAM

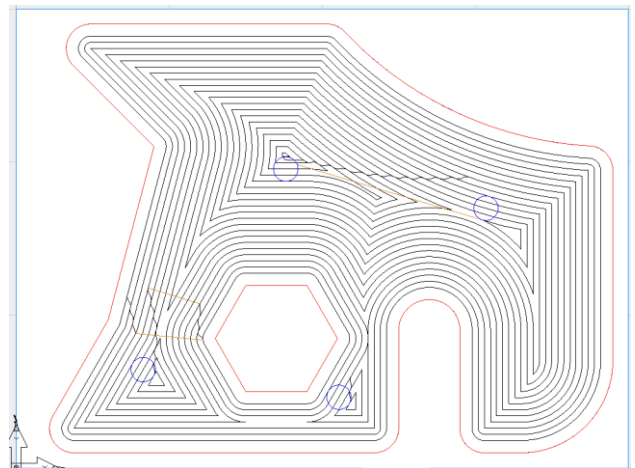
CAM software Autodesk FeatureCAM, jak již bylo zmíněno funguje na odlišném principu než ostatní CAM softwary. Autodesk FeatureCAM funguje na principu obrábění prvků jako jednoho celku.

U zkušebního tělesa jsem jako prvek zvolil kapsu. V rámci obrábění prvku kapsy jsem měl následně možnost výběru z několika strategií. Z konvenčních metod bylo v nabídce řádkování (viz Obr. 25) a konturování (viz Obr. 26). Z progresivní strategií zde byla nabízena strategie Vortex, která je založená na kombinaci konturování a obrábění po trochoidní křivce (viz Obr. 27).

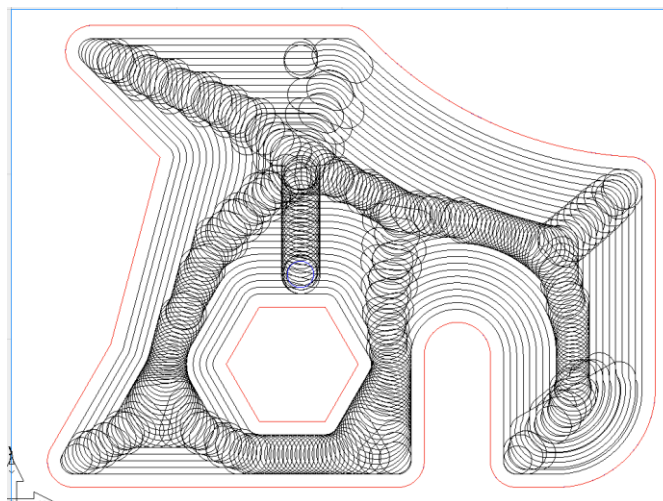
Výsledné časy obrábění a délky drah nástroje jsou uvedeny v Tab. 4.



Obr. 25 – Prvek kapsa - řádkování



Obr. 26 – Prvek kapsa - konturování



Obr. 27 – Prvek kapsa - strategie Vortex

Tab. 4 Výsledné časy a délky dráhy u jednotlivých strategií – Autodesk FeatureCAM

Autodesk FeatureCAM	Čas [min:s]			Dráha [m]		
	Celkový	Obrábění	Rychloposuv	Celková	Obrábění	Rychloposuv
Řádkování	6:55	6:48	0:07	9,68	9,52	0,16
Konturování	6:37	6:30	0:07	9,26	9,10	0,16
Vortex	15:13	15:05	0:08	21,31	21,12	0,19

11.5.4. Autodesk PowerMill

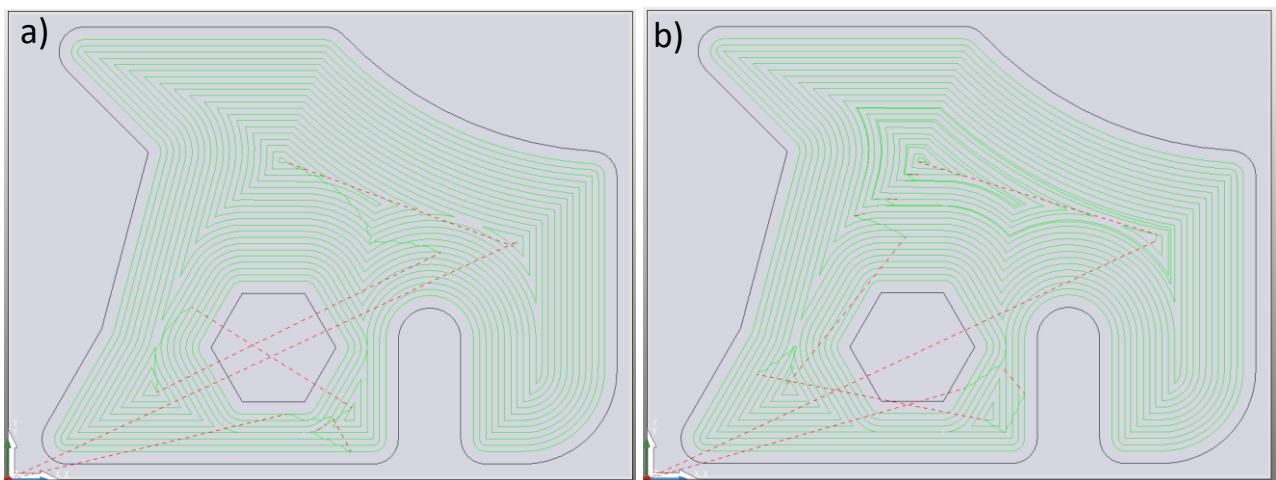
CAM software Autodesk PowerMill má ve své nabídce širokou škálu hrubovacích i dokončovacích strategií. Velkou předností tohoto CAM softwaru je možnost vytvořenou dráhu dále ručně upravovat nebo dodefinovat vlastnosti (nájezd do materiálu, výjezd z materiálu, rychloposuv, změna osy nástroje), podle kterých se dráha vypočte tak, aby vyhovovala dané výrobě.

Pro hrubování zkušebního tělesa jsem zvolil strategii hrubování modelu. V rámci této strategie si lze vybrat mezi obráběním rastrem, konturováním a strategií Vortex. Pro názornost jsem z nabízených možností zvolil konvenční metodu konturování a progresivní strategii Vortex.

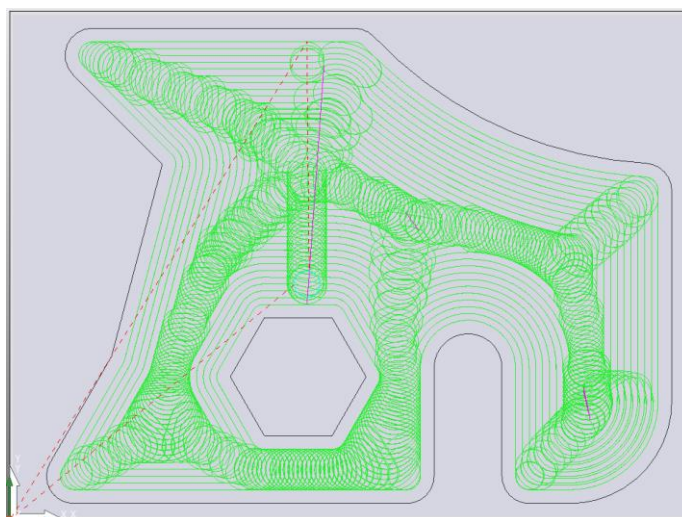
Na Obr. 28 (a),(b) lze vidět hrubování konturováním a hrubování konturováním do spirály. Rozdíl mezi nimi je v navazování jednotlivých kontur. U klasického konturování nástroj obrobí jednu konturu a následným přímým přejezdem se posune na konturu následující, zatímco u konturování do spirály je tento přechod eliminován a celá dráha tvoří plynulou spirálu.

Na posledním Obr. 29 je vyobrazena progresivní strategie Vortex.

Výsledné časy obrábění a délky drah nástroje jsou uvedeny v Tab. 5.



Obr. 28 – Strategie hrub. modelu – konturování (a), konturování do spirály (b)



Obr. 29 – Strategie hrub. modelu - Vortex

Tab. 5 Výsledné časy a délky dráhy u jednotlivých strategií – Autodesk PowerMill

Autodesk PowerMILL	Čas [min:s]			Dráha [m]		
	Celkový	Obrábění	Rychloposuv	Celková	Obrábění	Rychloposuv
Konturování	6:57	5:52	1:05	9,06	8,23	0,83
Konturování do spirály	7:45	6:24	1:21	9,89	8,98	0,91
Vortex	13:59	13:00	0:59	21,41	20,83	0,58

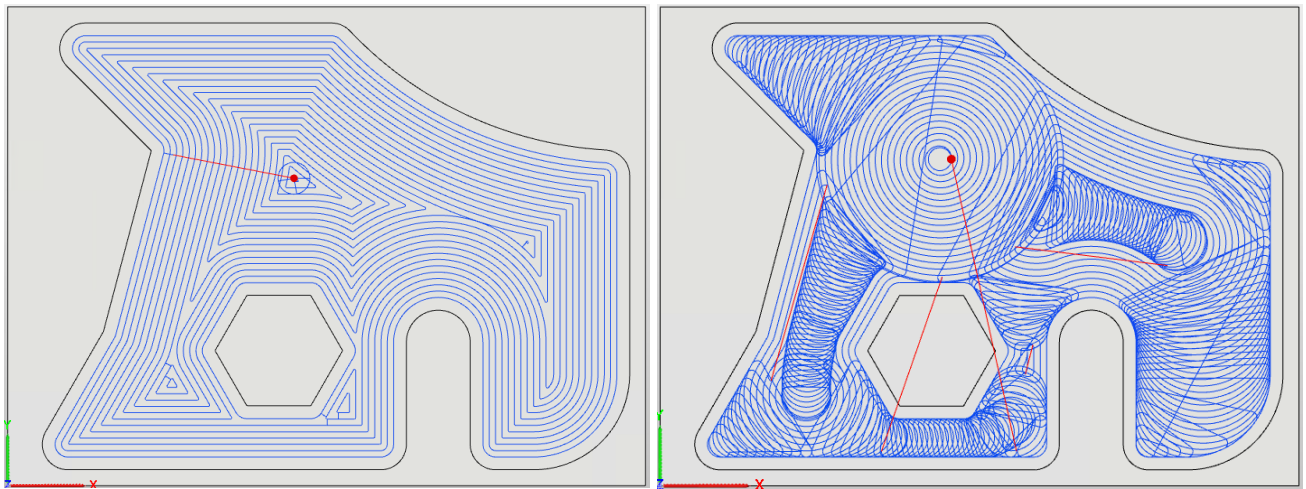
Další nabízenou hrubovací strategií bylo u tohoto CAM softwaru frézování odvrtáváním. Tuto strategii jsem však nepoužil, jelikož pro obrábění zkušebního tělesa není z důvodu jeho tvaru vhodná. Strategie frézování odvrtáváním (ponorné frézování) je spíše vhodná pro obrábění hlubokých kapes.

11.5.5. Openmind HyperMILL

Pro obrábění zkušebního tělesa jsem z velmi široké nabídky různých obráběcích strategií vybral v rámci 2D frézování strategii frézování kapes. Tato strategie nabízí možnost výběru metody konturování (viz Obr. 30).

CAM software Openmind HyperMILL má ve své nabídce obráběcích strategií, mimo již zmiňované, také strategii vysoce výkonného obrábění. Dráhy vytvořené touto strategií lze vidět na Obr. 31.

Výsledné časy obrábění a délky drah nástroje jsou uvedené v Tab. 6.



Obr. 30 – Strategie fréz. kapsy – konturování Obr. 31 – Strategie vysoce výkonného hrubování

Tab. 6 Výsledné časy a délky dráhy u jednotlivých strategií – Openmind HyperMILL

Openmind HyperMILL	Čas [min:s]			Dráha [m]		
	Celkový	Obrábění	Rychloposuv	Celková	Obrábění	Rychloposuv
Konturování	5:52	5:51	0:01	8,19	8,18	0,01
Vysoce výkonné hrubování	10:24	10:21	0:03	17,66	16,77	0,89

11.5.6. Siemens NX

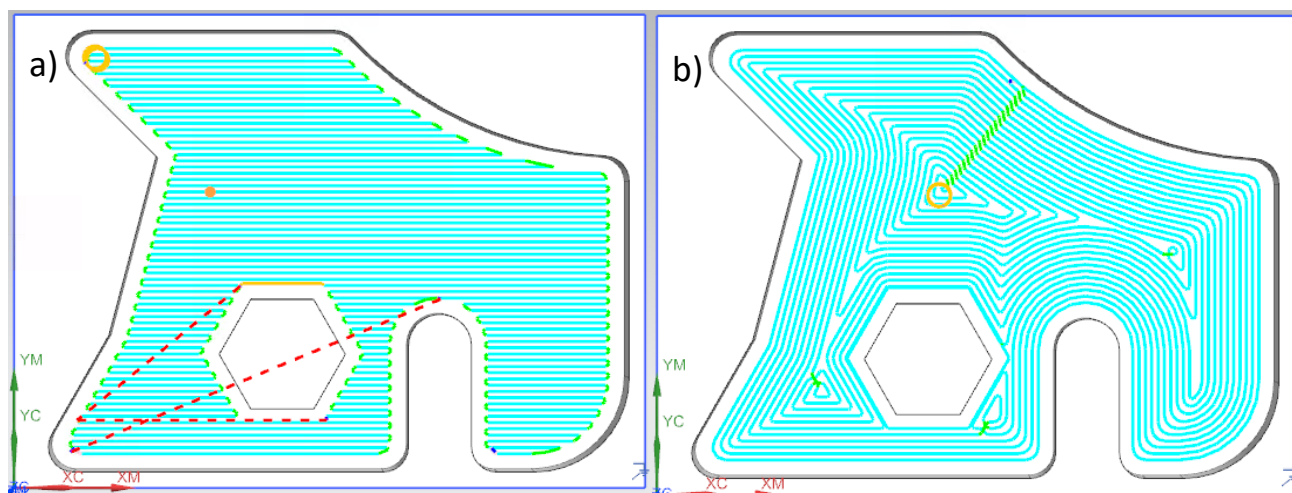
Jedná se o poslední porovnávaný CAM software. Pro obrábění zkušební tělesa nabízí tento CAM software potenciálně čtyři strategie, a to frézování kapsy, frézování dna a stěn, adaptivní frézování a ponorné frézování. Ačkoliv se strategie frézování kapsy a strategie frézování dna a stěn od sebe u řady těles liší, z důvodu geometrie tohoto konkrétního zkušební tělesa, kterým je uzavřená kapsa, byly jimi vytvořené dráhy, při zadání stejných řezných podmínek, totožné. Proto jsem pro porovnání s ostatními CAM softwary zvolil pouze operaci frézování kapsy.

V rámci operace frézování kapsy si lze vybrat z nabízených strategií frézování konturováním po částech nebo po obvodu a frézování řádkováním jednosměrným nebo obousměrným záběrem. Pro porovnání s drahami vygenerovanými ostatními CAM softwary jsem zvolil konturování po obvodu a řádkování obousměrným záběrem. Jimi vygenerované dráhy lze vidět na Obr. 32 (a),(b).

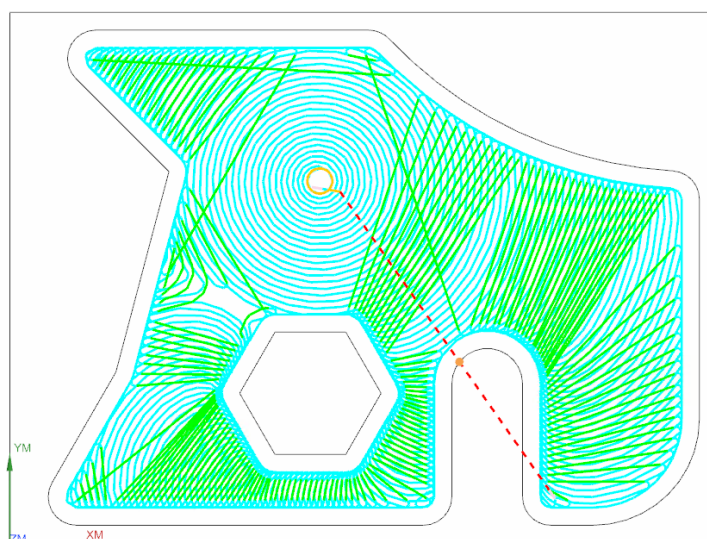
Při použití adaptivního frézování byla vytvořena optimalizovaná dráha trochoidní křivky (viz Obr. 33). Velmi podobná dráha obrábění byla vytvořena i v případě adaptivního obrábění CAM softwaru Autodesk Fusion 360.

Strategii ponorného frézování jsem nepoužil, jelikož pro obrábění tohoto konkrétního zkušební tělesa není vhodná, jak již bylo zmíněno u jednoho z předchozích CAM softwarů.

Výsledné časy obrábění a délky drah nástroje jsou uvedeny v Tab. 7.



Obr. 32 – Operace frézování kapsy – řádkování (a), konturování (b)



Obr. 33 – Adaptivní frézování

Tab. 7 Výsledné časy a délky dráhy u jednotlivých strategií – Siemens NX

Siemens NX	Čas [min]			Dráha [m]		
	Celkový	Obrábění	Rychloposuv	Celková	Obrábění	Rychloposuv
Konturování	5:54	5:53	0:01	8,24	8,21	0,02
Řádkování	6:04	6:00	0:04	8,49	8,40	0,09
Adaptivní frézování	8:11	7:48	0:23	11,46	6,59	4,87

11.5.7. Celkové shrnutí experimentu a výsledky

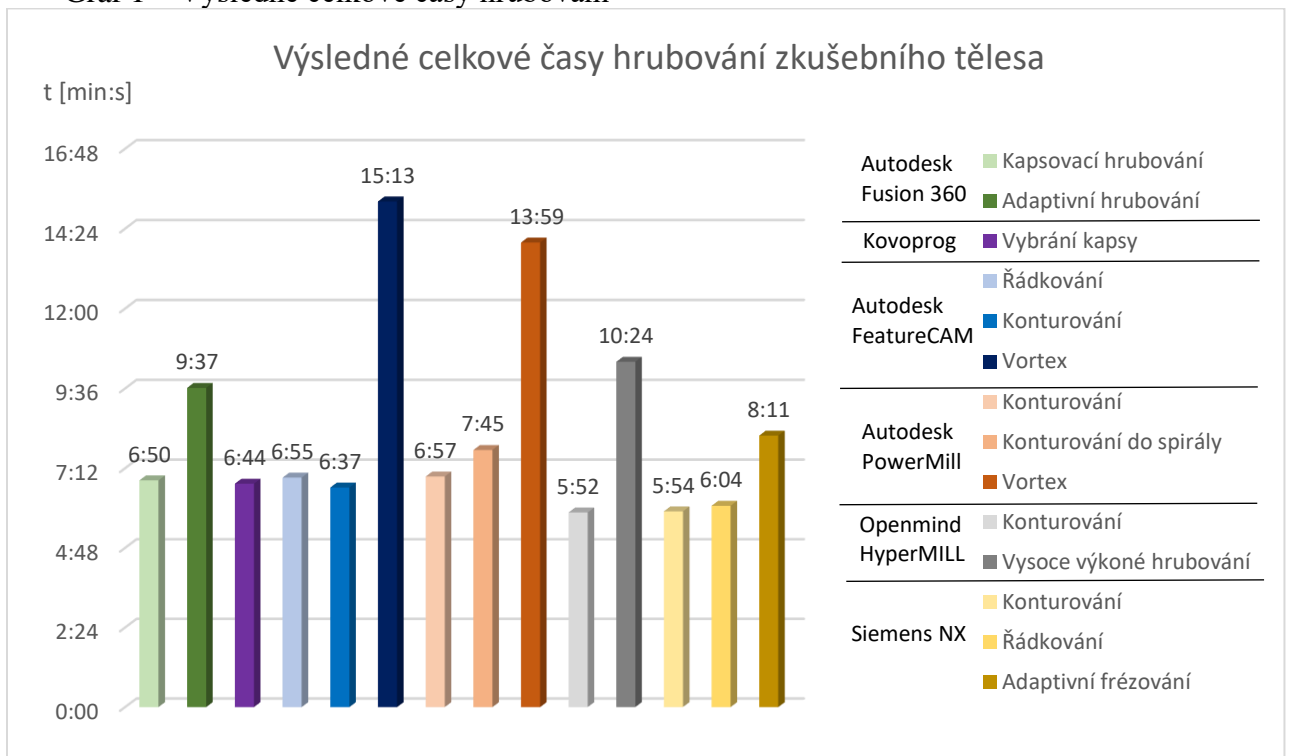
Podle výsledků experimentu bylo zjištěno, že nevhodnější hrubovací strategií pro obrobení zkušebního tělesa podle zvolených hodnotících kritérií je ve všech CAM softwarech strategie konturování, až na výjimku CAM softwaru Autodesk Fusion 360, kde byl nejkratší čas obrábění dosažen v případě adaptivního hrubování, které využívá obrábění po trochoidní křivce. Nejrychlejší čas hrubování vůbec byl dosažen v případě

strategie konturování v CAM softwaru Openmind HyperMILL (5 min a 52 s). Naopak nejdelšího celkového času bylo dosaženo při použití strategie Vortex v CAM softwaru Autodesk FeatureCAM (15 min a 13 s).

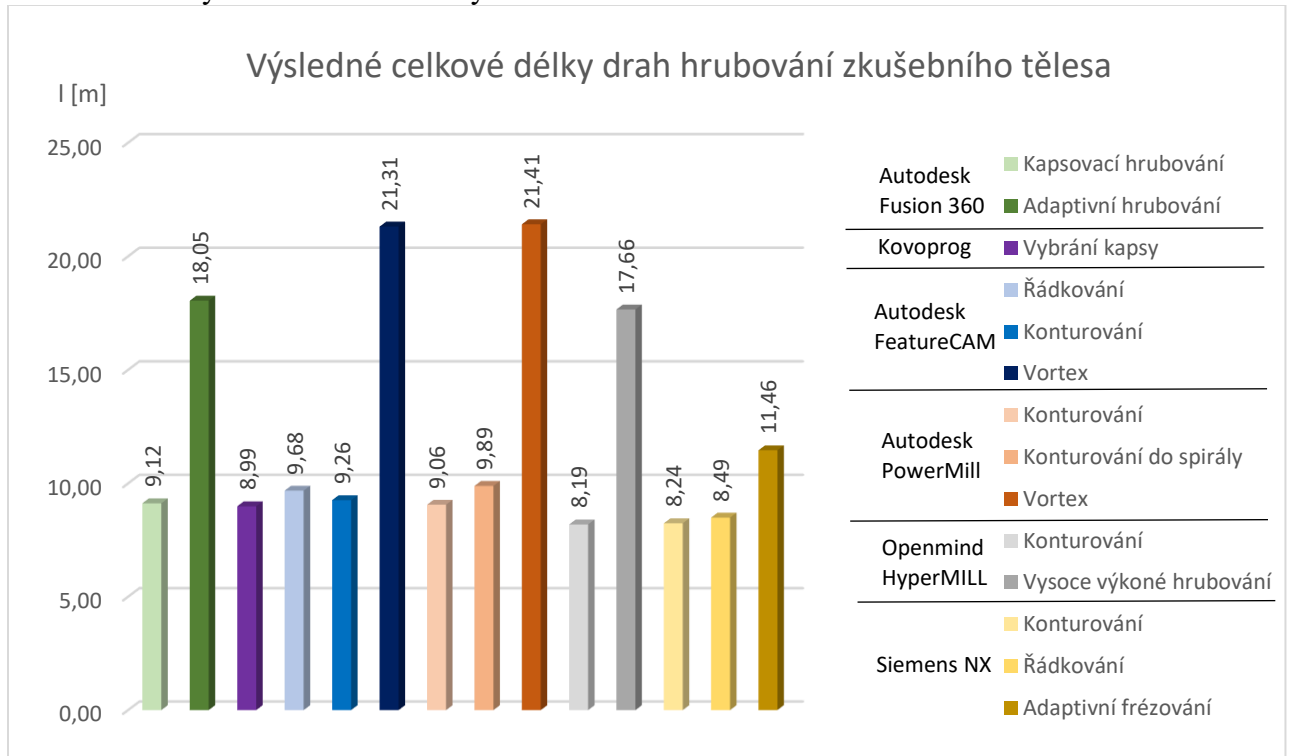
Ačkoli některé z vybraných CAM softwarů využívají stejné hrubovací strategie, časy a délky drah, kterých jimi bylo dosaženo při obrábění zkušební tělesa, se liší. Tyto rozdíly jsou tvořeny odlišnými vedlejšími pohyby a různou strukturou dráhy, které jsou předdefinované v rámci daného CAM softwaru. Při výrobě jednoho kusu zkušební tělesa by tyto rozdíly časů (řádově sekundy) nebyly příliš markantní, v sériové výrobě by však tyto rozdíly mohly tvořit v konečném výsledku hodiny, případně i delší časové úseky. Rozdíl mezi nejkratším (Openmind HyperMILL, 5 min a 52 s) a nejdelším (Autodesk PowerMill, 6 min a 57 s) časem při konturovacím hrubování činí 1 min a 5 s, což činí 18,5 % nárůst času při použití strategie konturování vytvořené CAM softwarem Autodesk PowerMill, oproti strategii konturování CAM softwaru Openmid HyperMILL.

Na následujících grafech 1 a 2, lze vidět celkové porovnání všech celkových časů a délek drah všech použitých strategií vybraných CAM softwarů.

Graf 1 – Výsledné celkové časy hrubování



Graf 2 – Výsledné celkové délky drah hrubování

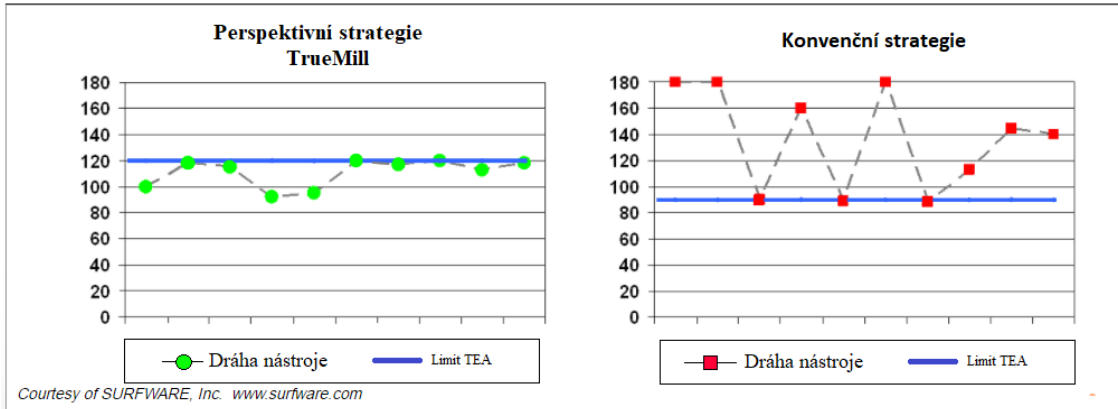


Výsledky, které byly v rámci teoretického experimentu zjištěny, nelze ale vykládat jednostranně, tedy že nejlepší pro praktické použití je konvenční obrábění konturováním, protože je nejkratší. Konvenční strategie se až příliš soustředí na samotnou geometrii obráběného tělesa. Dráhy těchto strategií jsou vytvořeny tak, aby byly co nejkratší, tedy i zdánlivě nejrychlejší, což odpovídá i výsledkům experimentu, avšak neberou v úvahu zatížení nástroje. Při obrábění konvenčními strategiemi proto může docházet k přetěžování nástroje, při kterém je nutné rapidní snížení rezných podmínek tak, aby nedošlo k jeho poškození, či naopak je nástroj při obrábění nedostatečně využíván.

Oproti tomu při obrábění progresivními hrubovacími strategiemi jsou vytvořené dráhy optimalizované tak, aby bylo možné použít vyšších rezných podmínek a byl využit maximální potenciál nástroje s ohledem na bezpečné a stabilní obrábění, bez zbytečného přetěžování nástroje a stroje. Vyšší rezné podmínky zásadně urychlí celý proces obrábění a sníží ekonomickou náročnost hrubovacího procesu. Další výhodou optimalizovaných drah je pozitivní vliv na nástroj, který během hrubovacího procesu není zbytečně přetěžován a díky tomu se sníží jeho opotřebení a zvýší jeho životnost.

Na Obr. 34 je možné vidět porovnání progresivní strategie (TrueMill) a konvenční strategie (konturování) při obrábění obecného tělesa tvaru kapsy, kdy díky

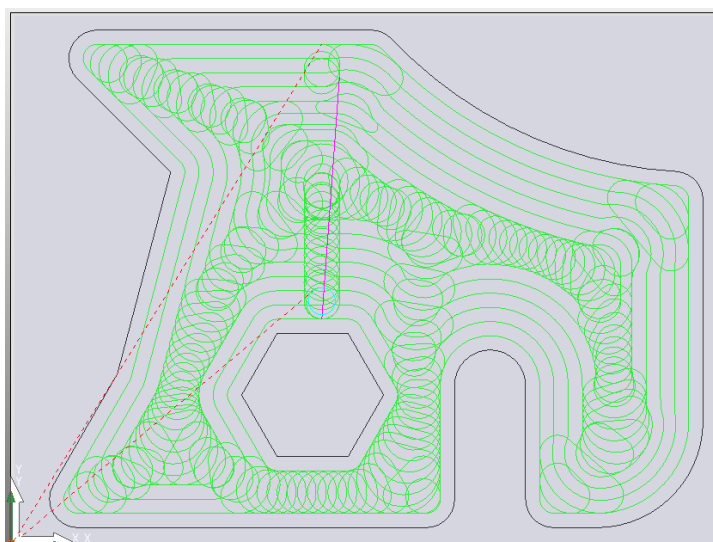
optimalizované dráze strategie TrueMill není překročena limitní hodnota úhlu opásání a nástroj tedy není během obrábění přetěžován. Oproti tomu u konvenční strategie můžeme v grafu vidět, že většinu času obrábění je limitní hodnota úhlu opásání překročena a dochází tedy k přetěžování nástroje. Takovéto obrábění by bylo velmi nestabilní a byl by zde vysoký předpoklad, že by došlo k poškození nebo zničení nástroje.



Obr. 34 – Grafy TEA při progresivní a konvenční strategii. Převzato a upraveno [52]

Pro potvrzení hypotézy, že při optimalizovaných řezných podmínkách by měla být z hlediska času progresivní strategie rychlejší, jsem vytvořil v prostředí CAM softwaru PowerMill optimalizovanou dráhu strategie Vortex. Jako základ pro optimalizaci a přepočítání řezných podmínek byla použita maximální hodnota řezné síly dosažená při obrábění konvenční strategií konturováním (tedy řezná síla při obrábění 100% průměrem nástroje, k této situaci dochází např. v ostrých rozích kapes). Tuto hodnotu řezné síly jsem považoval za maximální povolenou hodnotu řezné síly při obrábění strategií Vortex a úměrně k tomu jsem upravil řezné parametry (rychlost posuvu a šířku řezu), aby této hodnoty řezné síly bylo limitně dosaženo. Maximální hodnota řezné síly ($F_c = 204 \text{ kN}$) byla určena jako plocha vertikálního průřezu třísky vynásobená rychlostí posuvu. Rychlost posuvu byla po výpočtu upravena z původní hodnoty $1400 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ na $2800 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ a šířka řezu byla upravena z hodnoty 2 mm na hodnotu 4 mm .

Na Obr. 35 lze vidět vygenerované dráhy optimalizované strategie Vortex a níže v Tab. 8 jsou uvedené výsledné časy obrábění a dráhy nástroje.



Obr. 35 – Optimalizovaná strategie Vortex

Tab. 8 Výsledné časy a délky dráhy – optimalizované strategie Vortex

Autodesk PowerMill	Čas [min]			Dráha [m]		
	Celkový	Obrábění	Rychloposuv	Celková	Obrábění	Rychloposuv
Vortex - optimalizace	4:05	3:34	0:30	10,69	10,19	0,50

Při porovnání údajů z Tab. 5 a Tab. 8 o strategii Vortex CAM softwaru PoweMill lze vidět, že z původního celkového času při neoptimalizovaném obrábění (13 min a 59 s) bylo díky optimalizaci řezných podmínek dosaženo téměř třetinového času obrábění (4 min a 5 s).

Tento výsledek potvrzuje hypotézu, že při optimalizaci drah progresivních hrubovacích strategií se celý proces obrábění urychlí a sníží tak ekonomická náročnost hrubovacího procesu.

Zároveň je potřeba zmínit, že při použití progresivních strategií s optimalizovanými dráhami a řeznými parametry je nutné brát ohled na obráběcí stroj, jelikož je zásadní, aby byl obráběcí stroj schopný dosáhnout takto vysokých hodnot posuvu, řezné rychlosti a otáček. Jedině takový stroj dokáže plně využít výhody progresivních strategií.

12. Závěr

Tato bakalářská práce obsahuje aktuální přehled dostupných hrubovacích strategií nabízených v rámci běžně používaných CAM softwarů.

Za účelem přehlednosti byly všechny hrubovací strategie rozděleny do několika skupin a podskupin. Nejširším dělením hrubovacích strategie je rozdělení do dvou základních skupin – konvenční metody a progresivní metody. Progresivní hrubovací metody byly dále rozděleny na strategie založené na MRR rovnice a strategie výrobců CAM softwarů.

Dílním cílem této bakalářské práce byla praktická aplikace hrubovacích strategií ve vybraných CAM softwarech na zkušební těleso. Výsledkem experimentu je přehled nabízených hrubovacích strategií u jednotlivých CAM softwarů spolu s přehledem obráběcích časů a délek řezných a neřezných drah.

Z hlediska času a délky vytvořené dráhy se jevila u všech vybraných CAM softwarů, s výjimkou CAM softwaru Autodesk Fusion 360, jako nejvhodnější hrubovací strategie strategie konturováním. Nejrychlejší čas hrubování vůbec byl dosažen v případě strategie konturování v CAM softwaru Openmind HyperMILL (5 min a 52 s). Rozdíl mezi nejkratším a nejdelším časem dosaženým při konturovacím hrubování činí 1 min a 5 s, což je 18,5 % rozdíl mezi jednotlivými časy.

Naopak nejdelšího celkového času bylo dosaženo při použití strategie Vortex v CAM softwaru Autodesk FeatureCAM (15 min a 13 s).

Výsledky, které byly v rámci teoretického experimentu zjištěny, nelze ale vykládat jednostranně, jelikož v rámci experimentu nebyl brán v potaz vliv řezných sil při obrábění a řezné parametry byly pro konvenční i progresivní strategie totožné, což značně zkresluje výsledky u progresivních strategií, jelikož se u nich obecně používají vyšší řezné podmínky.

Pro potvrzení hypotézy, že při optimalizovaných řezných podmínkách by měla být z hlediska času progresivní strategie rychlejší, byl vytvořen další experiment. Celkový čas obrábění strategie Vortex CAM softwaru PoweMill se díky optimalizaci řezných podmínek snížil téměř na třetinu (4 min a 5 s). Tento výsledek potvrzuje hypotézu, že při optimalizaci drah progresivních hrubovacích strategií se celý proces obrábění urychlí a sníží tak ekonomická náročnost hrubovacího procesu.

13. Zdroje

- [1] MÁDL, Jan. *Teorie obrábění*. Praha: České vysoké učení technické, 1989. s. 39 - 50, s. 63 – 65, s 110 - 111.
- [2] BRYCHTA, Josef. *Nové směry v progresivním obrábění* [online]. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2008. s. 80 - 83. ISBN 978-80-248-1505-3
- [3] FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. s. 170 – 172. ISBN 80-214-2374-9.
- [4] VRABEC, Martin a Jan MÁDL. *NC programování v obrábění*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2004. s. 80 – 90. ISBN 80-01-03045-8.
- [5] *Vysokorychlostní obrábění – klíč k vyšší produktivitě* [online]. © 2021 MM Průmyslové spektrum [cit. 2020-11-18]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/vysokorychlostni-obrabeni-klic-k-vyssi-produktivite.html>
- [7] *Optimální řezné prostředí při třískovém obrábění kovů* [online]. © 2021 MM Průmyslové spektrum [cit. 2020-11-18]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/optimalni-rezne-prostredi-pri-triskovem-obrabeni-kovu.html>
- [8] *Adaptive Machining Makes a Robot More Productive* [online]. © 2021 Modern Machine Shop [cit. 2020-11-18]. Dostupné z: <https://www.mmsonline.com/articles/adaptive-machining-makes-a-robot-more-productive>
- [9] Příručka pro technology: Ekonomika výroby a celková optimalizace (1. část) [online]. © 2021 MM Průmyslové spektrum [cit. 2020-11-18]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/prirucka-pro-technology-ekonomika-vyroby-a-celkova-optimalizace-1-cast.html>
- [10] MÁDL, Jan a Ivo KVASNIČKA. *Optimalizace obráběcího procesu*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1998. s. 51 – 75, s. 144 – 150.
- [11] AB SANDVIK COROMANT - SANDIK CZ s.r.o. *Příručka obrábění – Kniha pro praxi*. Přel. M. Kudela. 1. vyd. Praha: Scientia, s. r. o., 1997. s. I-24-33, III-2-13, X7, X140-142. Přel. z: *Modern Metal Cutting - A Practical Handbook*. ISBN 91-97 22 99-4-6
- [12] *Strategie hrubování využívající optimalizované dráhy nástrojů* [online]. © 2021 MM Průmyslové spektrum [cit. 2020-11-05]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/novinka/strategie-hrubovani-vyuzivajici-optimalizovane-drahy-nastroju.html>
- [13] *Steering Clear Of Corner Concerns* [online]. © 2021 Modern Machine Shop [cit. 2020-12-05]. Dostupné z: <https://www.mmsonline.com/articles/steering-clear-of-corner-concerns>

- [14] WU, Shixiong, Wei MA, Haiping BAI, Chengyong WANG a Yuexian SONG. Engagement Angle Modeling for Multiple-circle Continuous Machining and Its Application in the Pocket Machining. *Chinese Journal of Mechanical Engineering* [online]. 2017, 30(2), s. 256 - 271 [cit. 2020-12-05]. ISSN 1000-9345. Dostupné z: doi:10.1007/s10033-017-0092-6
- [15] ŠTULPA, Miloslav. *CNC: programování obráběcích strojů*. Praha: Grada, 2015. s. 402 – 417, s. 1037 - 1040. ISBN 978-80-247-5269-3.
- [16] *Rough Milling: Speed vs. Power* [online]. © 2021 MoldMaking Technology [cit. 2020-12-10]. Dostupné z: <https://www.moldmakingtechnology.com/articles/rough-milling-speed-vs-power>
- [17] *CAD/CAM historie a současnost (2)* [online] © 2021 Technology-support [cit. 2020-12-10]. Dostupné z: <https://www.t-support.cz/kat/cad-cam-historie-a-soucasnost-2>
- [18] JANDA, Jiří. *Analýza možností NC programování uzavřených kapes*. Brno: VUT 2017. s. 14. Diplomová práce, VUT, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie.
- [19] HELD, Martin. A geometry-based investigation of the tool path generation for zigzag pocket machining. *The Visual Computer* [online]. 1991, 7(5-6), s. 296-308 [cit. 2020-12-16]. ISSN 0178-2789. Dostupné z: doi:10.1007/BF01905694
- [21] *Vysokorychlostní přesné obrábění* [online]. © 2021 ISENR Sveringe AB [cit. 2020-11-18]. Dostupné z: <https://www.iscar.com/newarticles.aspx/countryid/6/newarticleid/3194>
- [22] MOREIRA, L.C., W.D. LI, X. LU a M.E. FITZPATRICK. Energy-Efficient machining process analysis and optimisation based on BS EN24T alloy steel as case studies. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* [online]. 2019, 58, 1-12 [cit. 2020-12-15]. ISSN 07365845. Dostupné z: doi:10.1016/j.rcim.2019.01.011
- [23] SCHULZ, Herbert a Toshimichi MORIWAKI. High-speed Machining. *CIRP Annals* [online]. 1992, 41(2), 637-643 [cit. 2021-01-06]. ISSN 00078506. Dostupné z: doi:10.1016/S0007-8506(07)63250-8
- [24] TOH, C.K. Cutter path strategies in high speed rough milling of hardened steel. *Materials & Design* [online]. 2006, 27(2), 107-114 [cit. 2021-01-06]. ISSN 02613069. Dostupné z: doi:10.1016/j.matdes.2004.09.021
- [25] *Considerations for a High-Feed Milling Strategy* [online]. © 2021 MoldMaking Technology [cit. 2020-12-10]. Dostupné z: <https://www.moldmakingtechnology.com/articles/considerations-for-a-high-feed-milling-strategy>
- [26] FREIBURG D., LÖFFLER M., MERKLEIN M., BIERMANN D.. Surface structuring of forming tool surfaces by high-feed milling, 7. *WGP-Jahreskongress*

- Aachen, 5–6 Oktober 2017, *Apprimus Wissenschaftsverlag, Aachen* [online]. 2017, s. 63–70. [cit. 2021-01-06] Dostupné z: <https://d-nb.info/1155019458/34#page=73>
- [27] ALTINTAS, Y. a S.D. MERDOL. Virtual High Performance Milling. *CIRP Annals* [online]. 2007, **56**(1), s. 81-84 [cit. 2021-01-06]. ISSN 00078506. Dostupné z: doi:10.1016/j.cirp.2007.05.022
- [28] *Frézování metodou tenkých řezů a trochoidální frézování* [online] Sandvik Coromant [cit. 2021-04-27]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/milling/milling-holes-cavities-pockets/pages/slicing-trochoidal-milling.aspx>
- [29] LI, Zhaoyu, Lufeng CHEN, Ke XU, Yongsheng GAO a Kai TANG. Five-axis Trochoidal Flank Milling of Deep 3D Cavities. *Computer-Aided Design* [online]. 2020, 119, s. 2-10 [cit. 2021-02-16]. ISSN 00104485. Dostupné z: doi:10.1016/j.cad.2019.102775
- [30] SHIXIONG, Wu, Ma WEI, Li BIN a Wang CHENGYONG. Trochoidal machining for the high-speed milling of pockets. *Journal of Materials Processing Technology* [online]. 2016, 233, s. 29-33 [cit. 2021-02-16]. ISSN 09240136. Dostupné z: doi:10.1016/j.jmatprotec.2016.01.033
- [31] DELCAM. Vortex high-speed roughing. *News.Delcam*, [online]. 2012, s. 1-12 [cit. 2021-02-18]. Dostupné z: <https://docplayer.net/3585305-Vortex-high-speed-roughing.html>
- [32] *Vortex machining, PowerMill* [online]. © 2021 Autodesk Inc Knowledge Network [cit. 2021-02-18]. Dostupné z: <https://knowledge.autodesk.com/support/powermill/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2019/ENU/PWRM-ReferenceHelp/files/GUID-77122AF8-A489-43EB-A542-E21EAA660A0D-htm.html>
- [34] HUANG, Nuodi, Eugen KREBS, Jonas BAUMANN, Yuansheng ZHOU, Shijing WU a Dirk BIERMANN. Experimental investigation on influence of engagement angle and tool geometry on plunge milling. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. 2020, **108**(5-6), 1973-1978 [cit. 2021-02-19]. ISSN 0268-3768. Dostupné z: doi:10.1007/s00170-020-05480-x
- [35] RAUCH, Matthieu a Jean-Yves HASCOET. Selecting a milling strategy with regard to the machine tool capabilities: application to plunge milling. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. 2012, 59(1-4), s. 47-50 [cit. 2021-02-19]. ISSN 0268-3768. Dostupné z: doi:10.1007/s00170-011-3498-9
- [36] TERESKO, J. A Toolpath revolution. *Industry Week/IW* [online], 2005 prosinec, č. 12, s. 24 [cit. 2021-02-24]. Dostupné z: <http://web.a.ebscohost.com/ehost/detail/detail?vid=6&sid=9fcbc1b0-03b3-45c7-abd9-7f8d0fbfec97%40sessionmgr4006&bdata=JnNpdGU9ZWwhvc3QtbGl2ZSZzY29wZT1zaXRl>

- [37] TERESKO, J. Redefining High Speed Machining. *Industry Week/IW* [online], 2005 červen, č. 6, s. 21 [cit. 2021-02-24]. Dostupné z: <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=bth&AN=17173461&site=ehost-live&scope=site>
- [38] NÁPRSTKOVÁ, Nataša; NÁPRSTEK, Vladimír. Surfcam and its Education at FPTM. In: *6th International scientific conference engineering for rural development*. [online] Jelgava: LUA. 2007. s. 232-235 [cit. 2021-02-24]. Dostupné z: https://ilufb.llu.lv/conference/engineering-rural/2007/TF_Raksti-2007-232-235.pdf
- [39] *Revoluční hrubovací strategie pro vysokorychlostní obrábění* [online] MM Průmyslové spektrum [cit. 2021-02-25]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/revolucni-hrubovaci-strategie-pro-vysokorychlostni-obrabeni.html>
- [40] *EDGE CAM - Waveform* [online]. © 2021 Hexagon AB EDGE CAM [cit. 2021-02-25]. Dostupné z: <https://www.edgcam.com/waveform>
- [41] *Autodesk CAM - Inventor CAM, Fusion 360, PowerMill, FeatureCAM* [online] Arkance Systems [cit. 2021-04-27]. Dostupné z: <https://www.arkance-systems.cz/reseni/cad-cam-pro-strojirenstvi/autodesk-cam>
- [42] *Pokročilé funkce Fusin 360, které vám zefektivní práci* [online] Autodesk Fusion 360 [cit. 2021-04-27]. Dostupné z: <https://www.fusion360.cz/pokrocile-funkce-ktere-vam-zefektivni-praci/>
- [43] *Frézování a vrtání, CAD/CAM Kovoprog – třískové obrábění* [online] Kovoprog Peška & Brtna Computer Service s.r.o. [cit. 2021-04-27]. Dostupné z: <https://www.kovoprog.cz/cz/produkty/frezovani-a-vrtani.html>
- [44] *Původní český CAM systém* [online] MM Průmyslové spektrum [cit. 2021-04-27]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/puvodni-cesky-cam-system>
- [45] *Funkce pro CNC programování ve FeatureCAM* [online] CAD Studio s.r.o. [cit. 2021-04-27]. Dostupné z: <https://www.featurecam.cz/funkce-programu/>
- [46] *Co je nového v PowerMill 2021* [online] CAD Studio s.r.o. [cit. 2021-04-27]. Dostupné z: <https://www.powermill.cz/co-je-noveho-v-powermill-2021>
- [47] *MAXXimum Roughing* [online] OPEN MIND Technologies AG [cit. 2021-04-27]. Dostupné z: <https://www.openmind-tech.com/en/cam/hypermill-maxx-machining/roughing-hpc.html>
- [48] *hyperMILL – CAM systém, který Vám otevírá nové příležitosti* [online]. WESTCAM s.r.o [cit. 2021-04-27]. Dostupné z: <https://www.westcam.cz/produkty/cam/hypermill/>
- [49] *1P341-0800-XB 1630 Monolitní karbidová stopková fréza CoroMill® Plura pro střední hrubování* [online] Sandvik Coromant [cit. 2021-04-27]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/products/pages/productdetails.aspx?m=6259894&c=1P341-0800-XB%20%20%20%20%20%20%20%201630>

[50] CAM software [online]. Siemens Digital Industries Software [cit. 2021-06-16]. Dostupné z: <https://www.plm.automation.siemens.com/global/cz/products/manufacturing-planning/cam-software.html>

[51] *Step cutting PowerMill* [online]. © 2021 Autodesk Inc. [cit. 2021-07-21]. Dostupné z: <https://knowledge.autodesk.com/support/powermill/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2019/ENU/PWRM-ReferenceHelp/files/GUID-7304A67C-DEB4-4A46-9CEA-DBA7A0E57A46-htm.html>

Obrázky

[6] HUMÁR, Anton. *Materiály pro řezné nástroje*. Praha: MM Publishing, 2008. s. 235. ISBN 978-80-254-2250-2.

[20] *Frézovací cykly* [online]. © 2021 CAMservis, Ing. Adam Guryča [cit. 2020-12-16]. Dostupné z: <http://www.camservis.cz/frezovani/>

[33] *8-plunge milling, Fusion 360 Blog* [online]. © 2021 Autodesk Inc. [cit. 2020-02-19]. Dostupné z: <https://www.autodesk.com/products/fusion-360/blog/top-8-milling-tools-new-cnc-machinists/8-plunge-milling/>

[52] SURFWARE NEXT Courtesy of SURFWARE [online] Courtesy of SURFWARE, Inc. www.surfware.com [cit. 2021-07-21]. Dostupné z: <https://slideplayer.com/slide/7001165/>

Seznam příloh

- Příloha 1 – 3D model zkušebního tělesa
- Příloha 2 – výkres zkušebního tělesa
- Příloha 3 – Projekt – Autodesk Fusion 360 - Strategie hrubování kapes
- Příloha 4 – Projekt - Autodesk Fusion 360 - Strategie adaptivní hrubování
- Příloha 5 – Projekt – Kovoprog frézování - Strategie vybrání kapsy
- Příloha 6 – Projekt – Autodesk FeatureCAM - Prvek kapsa - řádkování
- Příloha 7 – Projekt - Autodesk FeatureCAM - Prvek kapsa - konturování
- Příloha 8 – Projekt - Autodesk FeatureCAM - Prvek kapsa - strategie Vortex
- Příloha 9 – Projekt – Autodesk PowerMill - Strategie hrub. modelu – konturování
- Příloha 10 – Projekt - Autodesk PowerMill - Strategie hrub. modelu - konturování do spirály
- Příloha 11 – Projekt - Autodesk PowerMill - Strategie hrub. Modelu - Vortex
- Příloha 12 – Projekt – Openmind HyperMILL - Strategie fréz. kapsy – konturování
- Příloha 13 – Projekt – Openmind HyperMILL - Strategie vysoce výkonného hrubování
- Příloha 14 – Projekt – Siemens NX - Operace frézování kapsy – řádkování
- Příloha 15 – Projekt – Siemens NX - Operace frézování kapsy – konturování
- Příloha 16 – Projekt – Siemens NX – Adaptivní frézování
- Příloha 17 - Projekt - Autodesk PowerMill - Vortex, optimalizace

Všechny přílohy jsou v elektronické podobě nahrány na přiloženém DVD.

Seznam použitých softwarů

Autodesk Inventor – verze 2020

Autodesk Fusion 360 – verze 2020

Kovoprogram frézování – verze 4.14

Autodesk FeatureCAM – verze 2021

Autodesk PowerMill – verze 2021

Openmind HyperMILL – verze 2021.1

Siemens NX – verze 1953