

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ



Ústav technologie, projektování a metrologie

Progresivní hrubovací strategie CAM software

Bakalářská práce

Autor práce: Josef Šreibr

Studijní obor: Technologie, materiály a ekonomika ve strojírenství

Vedoucí práce: Ing. Jan Tomíček, Ph.D

Praha 2022

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Šreibr** Jméno: **Josef** Osobní číslo: **456754**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**
Studijní program: **Výroba a ekonomika ve strojírenství**
Studijní obor: **Technologie, materiály a ekonomika strojírenství**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Progressivní hrubovací strategie CAM software

Název bakalářské práce anglicky:

Progressive roughing strategies in CAM software

Pokyny pro vypracování:

Cílem práce je zaměřit se na hrubovací strategie v CAM SW - je možné volit soustružení či frézování. Po seznámení s hrubovacími strategiemi bude navržena zkušební součást, která by měla být obrobena v rámci experimentu. Cílem experimentu je porovnat různé hrubovací strategie a výsledek obrábění. Dílčí úkoly:

1. rešerše na téma hrubovací strategie obrábění
2. Návrh zkušebního tělesa a podmínek experimentu
3. Příprava NC kódu pro experimentální obrábění
4. Provedení experimentu - obrábění
5. Měření a analýza dat z obrábění
6. Vyhodnocení a závěry

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: **15.03.2022**

Termín odevzdání bakalářské práce: **29.07.2022**

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 progresivními hrubovacími strategiemi v CAM software. Jejím cílem je sestavení dostupných CAM softwarů a jejich hrubovacích strategií pro frézování s následnou ukázkou obrobení zkušebního tělesa. Začátek práce je věnován stručnému popsání principů hrubování, technologickým podmínkám a možnosti optimalizace obrábění. Další část je zaměřená na některé dostupné hrubovací strategie CAM softwarů a jejich představení.

Praktická část se věnuje porovnání strategií jednotlivých CAM softwarů, které byly aplikovány na zkušební těleso a porovnány z hlediska vygenerovaných drah a obráběcích časů.

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

Abstract

This bachelor thesis deals with progressive roughing strategies in CAM software. It aim's to compile available CAM software and their roughing strategies for milling followed by a demonstration of the test body machining. The beginning of the work is devoted to a brief description of the principles of roughing technological conditions and the possibility of optimization of machining. The next part is focused on some of the available roughing strategies of CAM software and their introduction. The practical part is devoted to comparing strategies of individual CAM softwares that have been applied to the test body and compared in terms of generated pathways and machining times.

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

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci Progresivní 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 rady, připomínky a čas, který mi věnoval, při vypracování bakalářské práce.

Dále bych rád poděkoval mé rodině za jejich podporu a pomoc během celého studia.

Obsah

1. Seznam zkratk	8
2. Úvod	9
3. Hrubovací strategie obrábění	10
4. Technologický pohled na hrubování při frézování	11
4.1 Řezné síly při obrábění	12
5. CAD/CAM software	15
6. Hrubovací strategie CAM software	16
6.1 Adaptivní obrábění	17
6.2 Úhel opásání nástroje	17
6.3 Konvenční metody CAM softwarů	19
6.3.1 Řádkové obrábění	20
6.3.2 Konturování	20
6.4 Adaptivní metody v CAM softwarech	21
6.4.1 Rozdělení strategií závislé na MRR rovnici	22
6.4.2 HSC obrábění	22
6.4.3 HPC obrábění	23
6.4.4 HFC obrábění	23
6.5 Strategie CAM softwarů	23
6.5.1 Trochoidní frézování	24
6.5.2 Technologie TrueMill	25
6.5.3 Vortex	26
6.5.4 Waveform	27
6.5.5 Ponorné frézování	28
7. Praktická část	30
7.1 Ukázka jednotlivých CAM softwarů	30
7.2 Návrh zkušebního tělesa	32
7.3 Návrh technologických podmínek	35

7.4 Průběh experimentu	36
7.5 Výsledky.....	36
7.5.1 Kovoprog.....	36
7.5.2 Autodesk Fusion 360.....	37
7.5.3 Autodesk PowerMill.....	38
7.5.4 Autodesk FeatureCAM.....	39
7.5.5 Siemens NX.	41
7.5.6 Shrnutí praktické části a výsledky.....	42
8. Závěr.....	46
9. Zdroje.....	48
Seznam příloh	52
Seznam použitých softwarů	52

1. Seznam zkratek

CAD (computeraided design) – počítačová podpora návrhu

CAM (computeraidedmanufacturing) – počítačová podpora výroby

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]

A_{Di} - tloušťka třísky [mm]

a_e - šířka řezu [mm]

a_p - hloubka záběru [mm]

f_z - posuv na zub [$\text{mm} \cdot \text{zub}^{-1}$]

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

ϕ_i – úhel polohy břitu [$^\circ$]

k_{ci} - měrná řezná síla vztažená na 1 mm^2 průřezu třísky [$\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$]

P_c – řezný výkon [W]

CNC (computernumericallycontrolled) – počítačové řízení

HSM (high speed milling) – vysokorychlost frézování

MRR (Metal RemovalRate) – velikost úběru materiálu

HSC (high speed cutting) – obrábění vysokou řeznou rychlostí

CBN – kubický nitrid boru

PCD - polykrystalický diamant

HPC (high performance cutting) - vysoce výkonné obrábění

HFC (highfeedcutting) – obrábění s vysokým posuvem

n – otáčky vřetene [min^{-1}]

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

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

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

$v_{f\text{in}}$ - rychlost posuvu nájezdu [$\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$]

$v_{f\text{0}}$ - rychlost posuvu odjezdu [$\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$]

$v_{f\text{ram}}$ - rychlost rampového posuvu [$\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$]

$v_{f\text{r}}$ – velikost rychloposuvu [$\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$]

2. Úvod

V dnešní době je kladen velký důraz na vysokou produktivitu a zároveň ekonomičnost. Jelikož se jedná o první operaci odebrání materiálu a v dnešní době existuje velké množství různých hrubovacích strategií, jež se dají použít pouze v příslušných CAM softwarech, které danou strategii podporují. CAM software nám umožňuje dosáhnout námi požadované zkrácené doby obrábění, díky možnosti optimalizace odebraného materiálu a rychlosti úběru v co nejkratším čase. Důležitou vlastností je vizualizace obrábění, zajištění bezpečného, plynulého průběhu a příprava povrchu na další operace následující po hrubování. V minulosti se používaly pouze hrubovací strategie, které se zaměřovaly na geometrii dráhy nástroje, ale nezohledňovaly opotřebení nástroje a další důležité technologické vlastnosti.

V této bakalářské práci se budeme zabývat porovnáním progresivních hrubovacích strategií z vybraných CAM softwarů z oblasti frézování.

3. Hrubovací strategie obrábění

Součástí téměř všech CAM softwarů jsou strategie jak pro hrubovací obrábění, tak pro dokončovací. V následující kapitole se budeme věnovat hrubovací strategii se zaměřením na frézování, jak název téma bakalářské práce napovídá.

Při návrhu optimální hrubovací strategie musíme zohlednit všechny technologické aspekty, od rezné rychlosti až po úhel opásání, který je jedním z nejdůležitějších parametrů a má přímý vliv na proces hrubování.

Hrubování můžeme popsat jako odebírání velkého množství přebytečného materiálu za co nejkratší čas. Zpravidla bývá první a většinou ne jedinou operací zejména u dílů, které používají obecné polotovary (desky, tyče apod.)

S tím nám pomohou CAM softwary, které obsahují jednotlivé hrubovací strategie, jež nám umožní navrhnout krom drah nástroje, tak i co nejvhodnější a nejprogresivnější rezné parametry, které si můžeme v případě potřeby upravit. To nám umožní úsporu času a nákladů na výrobu.

4. Technologický pohled na hrubování při frézování

Na způsobu odebrání materiálu z obrobku a jeho výsledném povrch závisí použitá technologie obrábění, kterou můžeme rozdělit na hrubování a dokončování.

Hrubování

Hrubování je základní operací obrábění, jež se vyznačuje nižší rychlostí a vyšším posuvem než při dokončování. Základem je co největší možné množství odebraného materiálu z obrobku za co nejkratší čas. Je tedy velice důležité, abychom zvolili dostatečné technologické podmínky pro námi zvolený obráběcí stroj a nástroj s ohledem na ekonomičnost a produktivitu. Při této operaci se nedbá na geometrické vlastnosti povrchu.

Dokončování

Cílem dokončování je odebrání velmi malého objemu materiálu, aby výsledný povrch měl požadovanou přesnost a drsnost. Typicky se jedná o drsnost povrchu v rozmezí Ra 1,6 až 6,3 a přesnost IT 9 až 11. Často je jedná o finální operaci, po které může následovat broušení a leštění. [1]

Nejdůležitější vlastnosti hrubování:

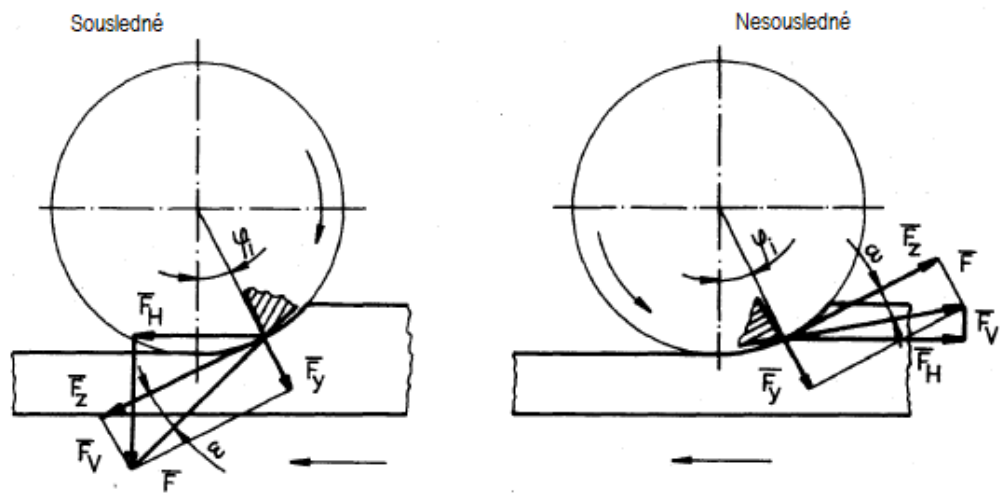
- Vysoký výkon – velké množství třísek
- Vysoké řezné síly – nutnost tuhého upnutí
- Vysoké požadavky na výkon – méně důležitá kvalita
- Nepřesnost výchozího polotovaru

4.1 Řezné síly při obrábění

Během obrábění vznikají řezné síly, které jsou dynamickým jevem doprovázeny během obrábění. Při obrábění, kteréhokoli materiálu, působí na břit řezného nástroje řezný odpor R , který musí být překonán řeznou silou F , aby došlo k jeho následnému obrobení. [2]

Pro stanovení dostatečného příkonu stroje, které je zejména u hrubování nezbytné, jelikož dochází k vysokému zatížení vřetene v důsledku velkého množství odebíraného materiálu, abychom znali především velikost řezných sil, působících na celou soustavu obrábění. To nám umožní, navržení technologické soustavy z hlediska dynamického namáhání, pevnosti a tuhosti obráběcího procesu. Další důležitou informací, kterou nám řezné síly poskytují, je volba nástroje s ohledem na jeho tepelné namáhání, které výrazně ovlivňuje životnost nástroje, a tedy i náklady na provoz. [3]

Při frézování je v záběru hned několik zubů najednou. Podle silového působení uvádíme dva druhy – válcové a čelní, které můžeme dále rozdělit na sousledné a nesousledné. Řezné síly vzniklé při obrábění můžeme dále dělit na – axiální, radiální a tangenciální. To můžeme vidět na Obr.1. [2,3]



Obr. 1 Rozdělení řezných sil při sousledném a nesousledném frézování [2]

F ... celková řezná síla,

F_z ... tangenciální složka řezné síly,

F_y ... radiální složka řezné síly,

F_H ... axiální složka řezné síly,

ϕ_i ... úhel polohy břitu

Důležitou silovou charakteristiku představuje řezná síla na jednotku plochy řezu – měrná řezná síla je daná vztahem [5]:

$$k_{ci} = \frac{F_{ci}}{A_{Di}} \quad (1.1)$$

Výpočet řezné síly můžeme vyjádřit pomocí vzorce [5]:

$$F_{ci} = k_{ci} \cdot A_{Di} = k_{ci} \cdot a_p \cdot f_z \cdot \sin \phi_i \quad (1.2)$$

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

k_{ci} ... měrná řezná síla vztažená na 1 mm^2 průřezu třísky [$\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$]

A_{Di} ... tloušťka třísky [mm^2]

a_p ... hloubka záběru [mm]

f_z ... posuv na zub [mm]

ϕ_i ... úhel pootočení nástroje [$^\circ$]

Řezné síly je možno teoreticky vypočítat nebo se mohou změřit pomocí dynamometru.

Výpočet řezného výkonu, resp. příkonu pro řezání [5]:

$$P_c = \frac{F_c \cdot v_c}{60} \quad (1.3)$$

P_c ... řezný výkon [W]

F_c ... řezná síla [N]

v_c ... řezná rychlost [m.mm⁻¹]

Cílem hrubování je odebrat co nejvíce materiálu, ale zároveň také připravit co nejlepší tvar a povrch pro dokončení – velikost přídatku, jeho rovnoměrné rozložení, minimum zbytkového materiálu apod.

Z toho plyne požadavek na poměrně složité dráhy nástroje – nutnost použití CAM softwaru, který můžeme optimalizovat vůči zvolenému kritériu.

5. CAD/CAM software

V minulosti byly tyto softwary využívány samostatně. CAD software (Computer Aided Design – počítačová podpora konstruování) slouží především ke kreslení, navrhování a konstruování na počítači. Po vytvoření digitalizovaného modelu a výkresu následovalo použití v CAM software (Computer Aided Manufacturing – počítačová podpora výroby) za účelem jeho prostudování pro stanovení technologického postupu v dané technologické operaci. Tím programátor získá přehled o ekonomické náročnosti na využití daného stroje a nástroje. Výstupem ze systému CAM jsou datové soubory, které postprocessor, jež je doplňkem CAM systému přeloží do G a M kódu, zadaného řídicímu systému stroje určenému pro výrobu.

Takovéto rozdělení softwarů bylo pro následný přenos dat a podporu CAD nástrojů nedostatečné, proto došlo ke sjednocení obou softwarů. Dnes se můžeme nejčastěji setkat s komplexními CAD/CAM softwary, které umožňují podporu výroby od návrhu výrobku až po samotné obrábění. CAM software nám poskytuje vizualizaci procesu obrábění, přičemž je možné sledovat dráhy nástroje a díky analýze obrábění se můžeme vyhnout případným kolizím a optimalizovat proces obrábění.

Díky jednotné správě dat a logice používání v rámci jednoho produktu, docílíme zvýšení produktivity a efektivity práce, tím se i snižují, jak pořizovací náklady, tak i náklady na školení dvou pracovníků.

V současné době se na trhu vyskytuje mnoho CAD/CAM softwarů, které podporují různé strategie obrábění, od základních geometrických prvků, kde stačí pouze ruční, či dílenské programování, až po tvarově složité obrobky, při nichž je nutný pohyb nástroje ve více osách [6].

6. Hrubovací strategie CAM software

Téměř všechny CAM softwary v dnešní době obsahují 2D a 3D strategie jak pro hrubování, tak pro dokončovací operace. Tématem této bakalářské práce jsou pouze progresivní hrubovací strategie, kterým se budeme věnovat v následující části.

Abychom splnili technologické podmínky procesu, je důležité stanovit základní parametry pro hrubovací operace. Jedním z nich, který se začal vyskytovat za poslední roky a většinou je již definovaný v CAM softwaru, je úhel opásání nástroje. Úhel opásání nástroje má přímý vliv na proces hrubování, tedy množství odebraného materiálu a tepelné zatížení rezného nástroje.

Optimalizace dráhy nástroje s využitím softwaru CAM, při procesu hrubování nám pomáhá vytvořit dráhy pro obráběcí nástroj tak, aby výsledná operace byla co nejprogresivnější, ať už z hlediska zkrácení přejezdů nástroje mimo záběr, tak i plynulých přejezdů mezi obráběním. [10]

Strategie CAM softwarů lze rozdělit na konvenční metody, které byly součástí dříve nabízených CAM softwarů a postupem času se přešlo na nově vyvinuté progresivní metody obrábění. Můžeme tedy říci, že konvenční metody obrábění zahrnují metody jako konturování a řádkové obrábění, zatímco progresivní metody berou ohled i na obráběcí nástroj využívající vysokorychlostní obrábění HSC (high speed cutting). [9,11]

6.1 Adaptivní obrábění

Adaptivní optimalizace spočívá v okamžitém stanovení optimálních řezných podmínek, které se získávají pomocí snímačů z aktuálního stavu obráběcího procesu. Adaptivní optimalizace reguluje adaptivní systém pomocí mezních hodnot řídicích veličin, jako např. příkonu stroje, kroutícího momentu vřetene, řezné síle apod., aby nedošlo k překročení přípustných mezních hodnot. Díky systému adaptivní optimalizace může stroj i nástroj využít celý svůj potenciál při výrobě.

Adaptivní systémy můžeme rozdělit podle jednotlivých řídicích systémů:

ACC (adaptive control constraint) v překladu adaptivní systém mezní, upravuje řezné podmínky tak, aby se optimalizovala buď rychlost posuvu, nebo rychlost otáček, nikoliv však obou společně.

ACO (adaptive control optimization) v překladu adaptivní systém optimalizace. Řezné podmínky se optimalizují tak, aby se dosáhlo maximální produktivity s minimálními náklady. Rozdíl oproti ACC je ve společné regulaci rychlosti posuvu a rychlosti otáček.

ACG (adaptive control geometry), neboli adaptivní systém geometrie. Zde se řezné podmínky procesu upravují tak, aby byla dosažena požadovaná rozměrová přesnost a kvalita povrchu, resp. drsnost obrobenej plochy. ACG se podobá jak řízení meznímu, tak i optimalizačnímu. [9]

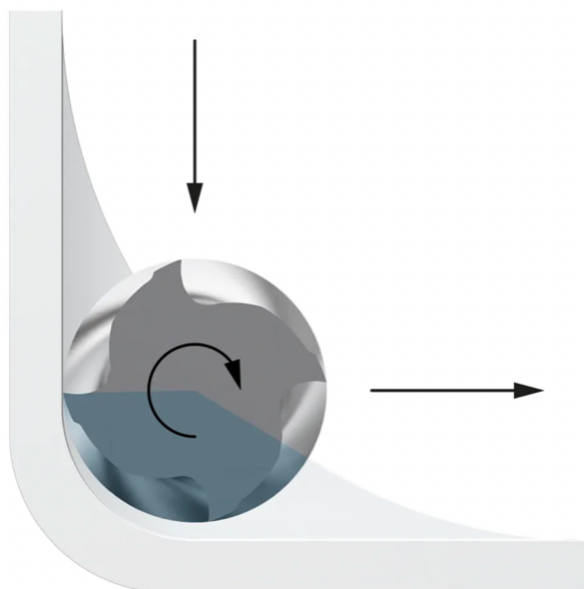
6.2 Úhel opásání nástroje

Úhlem opásání rozumíme úhel mezi místem nájezdu zubu do materiálu a místem ukončení řezu zubu. Je to tedy úhel, v němž je nástroj po celou dobu v kontaktu s odebíraným materiálem obrobku.

Při správném nastavení úhlu opásání můžeme dosáhnout zvýšení rychlosti hrubování, efektivně kontrolovat teploty v procesu a díky tomu využít vyšší hodnoty posuvu na zub a hloubky řezu, což zásadně zkracuje cyklový čas výroby součásti. Výhodou je menší namáhání vřetena nástroje. [7]

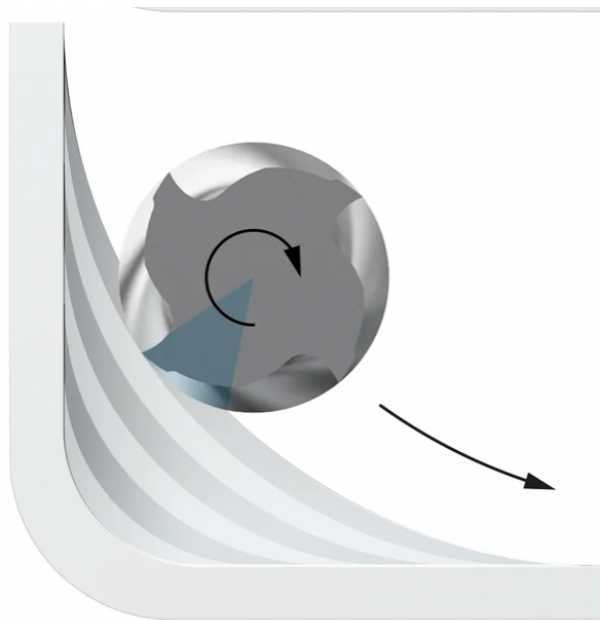
Na velikosti úhlu opásání záleží životnost nástroje, při velkém úhlu opásání vzniká více tepla, jelikož bude břit nástroje delší dobu v záběru a mezi jednotlivými záběry břitu se nebude stačit chladit, tím může docházet k tepelnému přetěžování nástroje. Velký úhel opásání má také negativní vliv na vřeteno stroje, které se bude přetěžovat díky vzniku velkých řezných sil a z hlediska produktivity bude muset dojít ke snížení řezných podmínek. [8]

Úhel opásání hraje důležitou roli především v oblasti ostrých rohů a jiné tvarově složité geometrii. Na Obr. 2 můžeme vidět nástroj s velkým úhlem opásání (cca 120°) vstupující do ostrého rohu materiálu, který odebírá velké množství materiálu najednou, nevýhodou je snížení řezných parametrů.



Obr. 2 Obrábění s velkým úhlem opásání (cca 120°) [7]

Na Obr. 3 můžeme vidět obrábění ostrého rohu s menším úhlem opásání (cca 30°), což umožňuje zvýšení rychlosti posuvu na zub. Břity nástroje odebírají menší množství materiálu, díky čemuž dochází k menšímu namáhání nástroje a vřetena stroje.



Obr. 3 Obrábění ostrého rohu s menším úhlem opásání (cca 30°) [7]

V dnešní době již existují CAM softwary, které nám sami nastaví optimální úhel opásání podle definovaných parametrů, jako je průměr rezného nástroje a hloubka řezu. Softwarem nastavený úhel opásání je při celém obrábění konstantní, a tak jsou na stroj i nástroj kladeny mnohem menší požadavky z hlediska zatížení a stability celého procesu obrábění. Dráhy nástroje jsou pozvolné a tangenciální a nedochází tak k tepelnému přetížení nástroje.

Správné nastavení úhlu opásání nám tedy umožní zvýšení produktivity a efektivnosti při celkovém obrábění. [7,8]

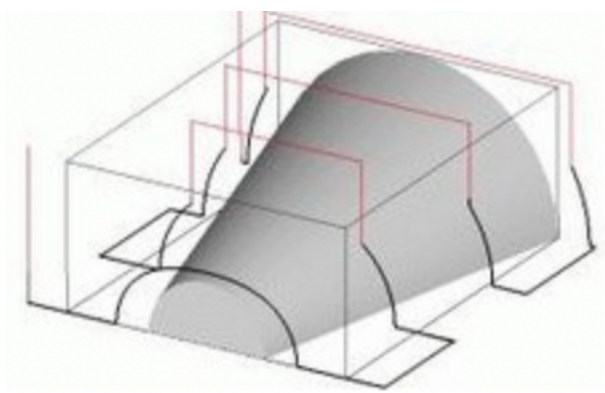
6.3 Konvenční metody CAM softwarů

V dnešní době jsou konvenční metody dostupné v základní sadě strategií v každém CAM softwaru. Jedná se především o strategie řádkování a konturování.

6.3.1 Řádkové obrábění

U této strategie obrábění jsou záběry lineární, a proto se neuplatňují neustálé změny směru dráhy nástroje. Díky tomu je objem dat ve výstupním NC kódu velmi malý. Po skončení hrubování, než se přejde na další operaci, je nutné odstranit nerovnosti kolem kontury dílu vzniklé po záběru nástroje. Existují dva druhy napojení hrubovacího záběru – jednosměrné a obousměrné obrábění. [12]

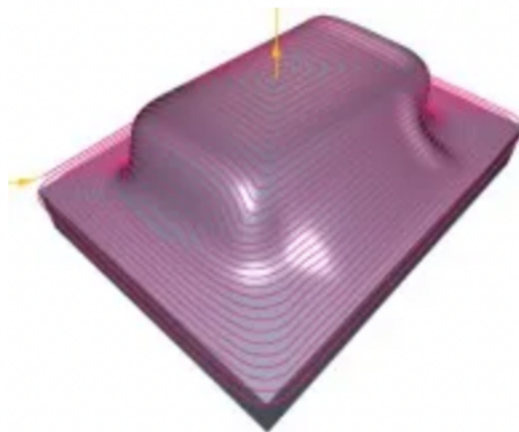
Jedná se o obrábění, kde se obráběcí nástroj pohybuje pouze v XY souřadnicích po jednotlivých řádcích, což můžeme vidět na Obr. 4. Řádkové obrábění se většinou používá tam, kde nám postačí hrubý obrobek, jež se příliš neliší od modelu. [11,12]



Obr. 4 Zobrazení řádkového obrábění [13]

6.3.2 Konturování

Při použití strategie konturování obráběcí nástroj odebírá materiál po vrstevnici v ose Z. Obráběcí nástroj kopíruje požadovaný tvar obrobku. Jedná se tedy o nepřerušovaný řez, kde jsou dvě osy v pohybu, ale jinak se jedná o 3D frézování. Nástroj se pohybuje v horizontální dráze nástroje (v XY souřadnicích, viz Obr. 5), přitom dochází k odebrání hlavní části materiálu. Dráha nástroje je tvořena offsetovými křivkami a podobá se spirále. Tato strategie je podobná kapesování s tím rozdílem, že při konturování se odebírá vnější část obrobku, zatím co při kapesování se odebírá vnitřní část obrobku (kapes). Často se používá pro základní hrubování modelů (např. odlitků), kdy dráhy vychází z aktuálního tvaru polotovaru. [11,14]



Obr. 5 Zobrazení strategie konturování. [14]

Pro zvýšení životnosti nástroje se používá frézování po vrstevnici, jelikož se jedná o nejvhodnější metodu umožňující použití sousledného frézování. Pro vyšší produktivitu se využívá konturování prováděné obvodem frézy, protože na větším průměru nástroje je v záběru větší počet zubů. Konturování využívá menší počet náhlých změn provozního zatížení a směru pohybu, to se uplatňuje při frézování s vysokými řeznými rychlostmi nebo rychlostmi posuvu. Pro optimální životnost nástroje je důležité zajistit, aby nástroj zůstal v záběru co nejdéle je to možné. [14]

6.4 Adaptivní metody v CAM softwarech

Jedná se o strategie, které udržují zadaný úhel opásání, čímž se zamezí přetížení a možnému poškození nástroje pomocí optimalizovaných záběrů získaných ze speciálních výpočtů. Tyto strategie jsou zaměřeny na vysokorychlostní obrábění (HSM) pomocí tvrdokovových nástrojů, a proto můžeme obrábět po celé délce břitu, při optimálním zatížení nástroje a řezné rychlosti. Konstantní zatížení nástroje nám pomáhá potlačit možné vibrace a zabraňuje případné deformaci nástroje. [15]

Adaptivní metoda zkracuje dobu obrábění v průměru o 25 % než při konvenčním hrubování – stroj využívá celou délku břitu při optimální rychlosti. Proto jsou na stroj i nástroj kladeny vysoké nároky. Stroj by měl splňovat dostatečný příkon kvůli zatěžování včetně z hlediska vysokých rychlostí otáček a větší hodnoty posuvu. Nástroj musí mít dostatečnou pevnost, tuhost a odolnost proti teplotním rázům, které vznikají při obrábění. [15,16]

6.4.1 Rozdělení strategií závislé na MRR rovnici

Strategie závislé na MRR rovnici můžeme rozdělit na tři základní druhy. Každá z metod vychází ze své vlastní rovnice založené na základních řezných parametrech, jako je velikost úběru materiálu, hloubce řezu, radiální šířce řezu a rychlosti posuvu. Každý parametr je jednotlivě výrazně navýšen, podle druhu použité metody a tím dojde k částečnému upravení i ostatních veličin, které vychází z následující MRR rovnice pro frézování. [17]

$$Q = a_p \cdot a_e \cdot v_f \quad (2.1)$$

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

a_p ... hloubka řezu [mm]

a_e ... radiální šířka řezu [mm]

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

6.4.2 HSC obrábění

Pod HSC obráběním (high speed cutting) si můžeme představit obrábění vysokou řeznou rychlostí. Základním parametrem u této metody je tedy řezná rychlost, která je podle výkonu vřetena nastavena na maximální hodnotu. Nástroj se může pohybovat 5-10 násobkem řezné rychlosti v závislosti na druhu obráběného materiálu.

Mezi výhody vysokorychlostního obrábění patří např. snížení tvorby otřepů, lepší odvádění třísek a zvýšená stabilita procesu. Vysokorychlostní obrábění nachází uplatnění především při obrábění slitin lehkých kovů, plastů a polymerních kompozitu (např. se skleněnými a uhlíkovými vlákny). Navíc je možné řezat vysoce legované oceli a litinu.

Řezné nástroje používané pro HSC podléhají mnohem vyšším požadavkům než u konvenčního frézování, proto se využívají především monolitické frézy. Jediným základním omezením, je jejich nízká životnost za zvýšené řezné rychlosti. Nástrojové materiály používané při HSC jsou převážně slinuté karbidy, nástrojová keramika, polykrystalický diamant (PCD) a kubický nitrid boru (CBN). Řezné nástroje určené pro HSC se vyznačují

lepší odolností proti opotřebení (aplikují se dodatečné povlaky proti opotřebení), větší přesností, vysokou statickou i dynamickou tuhostí.

Tato metoda se hojně využívá v leteckém a automobilovém průmyslu, objevuje se i při obrábění formy a zápustky. [17]

6.4.3 HPC obrábění

HPC metoda neboli high performance cutting, v překladu vysoce výkonné obrábění vyznačující se vyššími hodnotami hloubky řezu a_p , šířkou řezu a_e a posuvem na zub f_z , zatímco řezná rychlost v_c je nižší než u HSC.

Na řezné nástroje používané u HPC obrábění jsou kladeny speciální požadavky. Především musí být uzpůsobeny pro přenos podstatně větších řezných sil a tepelného zatížení. Z tohoto důvodu je nutno zajistit dostatečně výkonný obráběcí stroj.

I přes všechny tyto speciální požadavky se metoda HPC využívá ve výrobě stejně často, jako metody HSC a HFC. [17]

6.4.4 HFC obrábění

Frézování HFC (high feed cutting) se vyznačuje vysokým posuvem, které se nejčastěji používá při čelním hrubování. Rovnici MRR je možno zvýšit až na $1400 \text{ cm}^3/\text{min}$ na velké a rovinné plochy. Podmínkou u této metody je použití vhodných nástrojů. HFC frézování se může využít pro výrobu bloků motorů, forem a zápustek, nelze ji však aplikovat všude. [18]

6.5 Strategie CAM softwarů

Většina CAM softwarů navrhla své jednotlivé progresivní metody obrábění, přičemž každá z metod vyvinutá výrobcem daného softwaru obsahuje předem definovaný postup výpočtu řezných parametrů a drah nástroje.

Velká část vyvinutých metod CAM softwarů vychází z kombinace možnosti nastavení již zmíněných parametrů, jako je úhel opásání, velikost úběrů materiálu až po návrh drah nástroje.

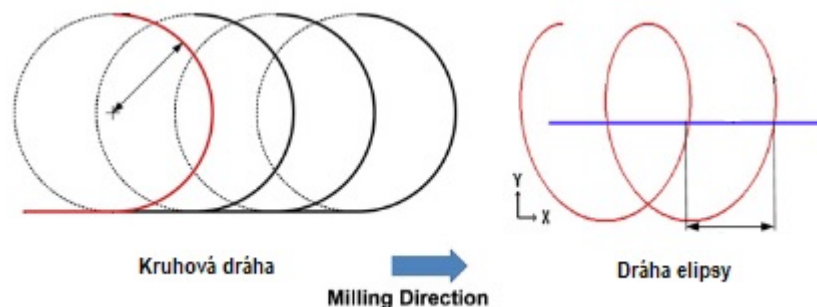
6.5.1 Trochoidní frézování

Pod trochoidním frézování si můžeme představit odebírání tenkých plátků materiálu, přičemž dráha nástroje je kombinací rovnoměrného kruhového pohybu s rovnoměrným lineárním pohybem vpřed. Poloměr trajektorie je spojitý, což vytváří příznivé podmínky pro frézování z hlediska kinematiky pohybu a zatížení nástroje.

Trochoidní metoda se využívá při frézování úzkých oblastí (např. ostrých rohů kapes, uzavřených dutin, drážek), hrubování tvrdého materiálu, kde se mění řezné zatížení. [19]

V ostrých rozích, štěrbinách apod. je zatížení nástroje velmi vysoké a to je způsobeno velkým úhlem záběru, který při frézování může dosáhnout až 180° . Trochoidní obrábění umožňuje snížení úhlu opásání během procesu, díky tomu dochází ke vzniku menších řezných sil a prodloužení životnosti nástroje. Malé řezné síly umožňují použití velkých axiálních hloubek řezu. Využita je celá délka ostří, což zajistí rovnoměrné rozložení tepla a v důsledku toho se prodlouží životnost nástroje. Je možné nastavit vysoké rychlosti posuvu stolu při použití mnohobřítých nástrojů, vzhledem k malé délce oblouku záběru. Maximální radiální hloubka řezu by při trochoidním frézování neměla překročit 20 % průměru frézy.

Na obr. 6 můžeme vidět trochoidní dráhu nástroje při kruhovém pohybu a dráhu elipsy, která má příznivější vliv na kinematiku chování obráběcího stroje.



Obr. 6 Znárodnění trochoidní křivky – kruhové dráhy a dráhy elipsy [19]

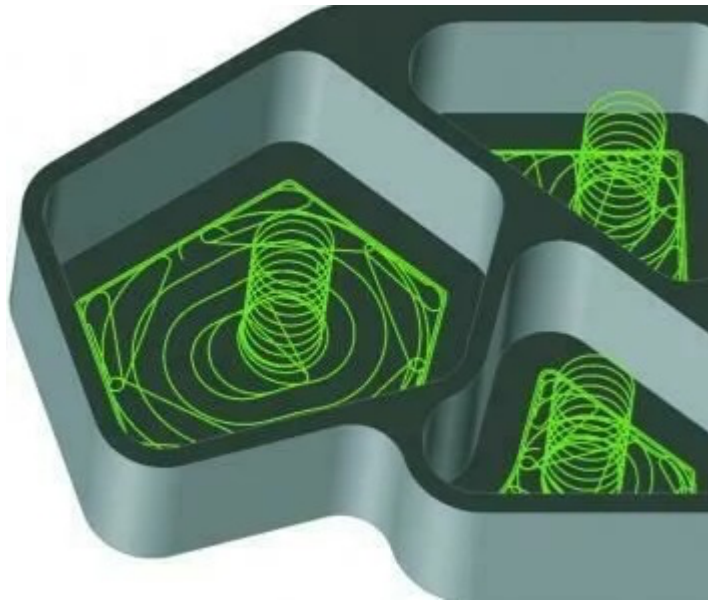
Díky trochoidnímu frézování dosáhneme lepších výsledků obrábění než u tradičních metod frézování drážek. Výhoda této metody spočívá ve snížení nákladů na nástroje, jelikož se zvyšuje životnost, výrazně se zlepšuje spotřeba energie a zkracuje čas výroby. [20,21]

6.5.2 Technologie TrueMill

Tato technologie vyvinutá společností Surftware využívá vysokorychlostního frézování pro obrábění rozmanitých tvarů, frézování čelních ploch, drážek apod. Technologie TrueMill mnohonásobně zvyšuje rychlost obrábění (vyšší posuvy a otáčky) a životnost řezného nástroje, oproti klasické technologii obrábění, díky odstranění šoků vzniklých kvůli náhlé změně pohybů a hlavně při obrábění vnitřních hran.

Dráha nástroje se automaticky přizpůsobuje, aby úhel styku nástroje s odebíraným materiálem nepřekročil maximální povolenou hodnotu a rychlosti posuvů se optimalizují v průběhu procesu podle pohybů, které jsou vykonávány. To znamená, že nástroj udržuje během záběru konstantní úhel opásání a nepřekročí naprogramovanou rychlost i množství odebíraného materiálu, čímž se minimalizují náklady spojené s poškozením nástroje.

Obrábění pomocí této technologie zvyšuje produktivitu oproti konvenčním hrubovacím strategiím. Použitou strategii TrueMill s vizualizací drah u vnitřní kapsy můžeme vidět na Obr. 7. [22,23]

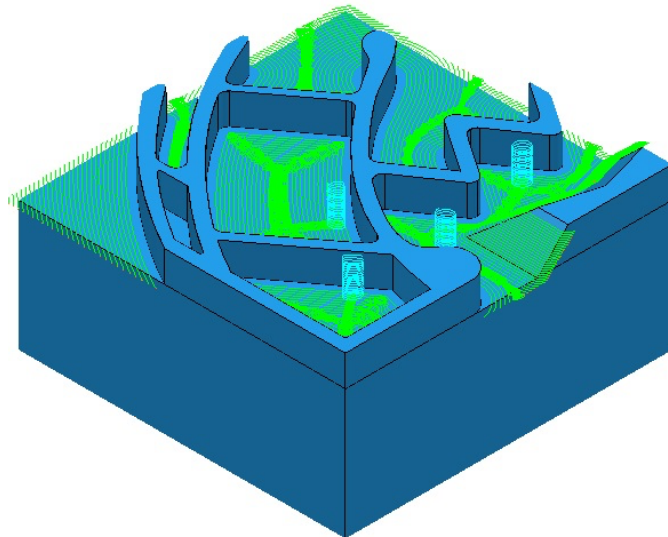


Obr. 7 Ukázka vytvořených drah pomocí metody TrueMill [23]

6.5.3 Vortex

Technologie Vortex byla vyvinuta společností DELCAM nejdříve pro CAM softwaru PowerMILL a FeatureCAM a později i pro ostatní. Dnes již spadají pod společnost Autodesk. Jedná se o adaptivní hrubování monolitickými karbidovými frézami, které vytváří lineární a trochoidní dráhy nástroje, při zaručeném konstantním úhlu opásání nástroje v záběru. Dráha nástroje je u této strategie kontinuální.

Odebírání materiálu je dáno velkým axiálním a radiálním krokem, aby se rovnoměrně využívalo celé ostří nástroje. Strategie Vortex umožňuje zadání minimálního rádiusu trochoidní dráhy nástroje, která přímo ovlivňuje nežádoucí zpomalování stroje v kruhových pohybech (Obr. 8). Metoda Vortex po celou dobu obrábění udržuje konstantní posuv. [24]



Obr. 8 Strategie Vortex – vygenerovaná dráha [25]

Společnou vlastností strategie Vortex a konvenčního obrábění je využití offsetové dráhy nástroje. Při překročení úhlu záběru o 15 % dochází k nadměrnému zatížení nástroje, a proto by neměl být překročen. Jakmile se nástroj blíží k maximálnímu úhlu záběru pro optimální obrábění, změní se dráha nástroje na trochoidní dráhu a tím se zamezí přetížení nástroje.

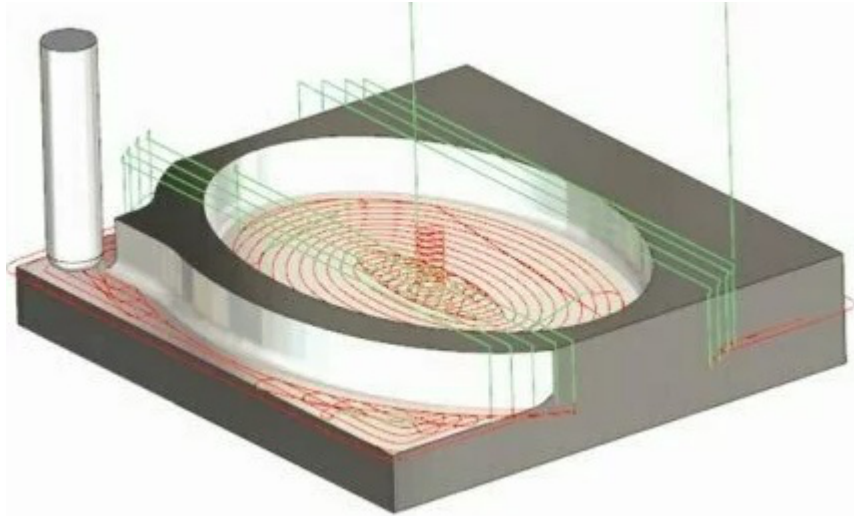
Podstatnou výhodou u hrubovací strategie Vortex je udržení konstantního posuvu, velkým radiálním a axiálním krokem, přičemž je využito celé ostří nástroje a díky tomu prodloužena životnost nástroje, úspora času a nákladů ve výrobě. [26]

6.5.4 Waveform

Waveform je vlnovitá hrubovací strategie vyvinuta spoluprací společností Sandvik Coromant a Planit Software. Jedná se o vysokorychlostní obrábění udržující konstantní zatížení rezného nástroje. Díky plynulým drahám nástroje nedochází k náhlým změnám směru posuvu. Tato obráběcí strategie je součástí CAM softwaru Edgecam. Při obrábění se udržuje konstantní úhel opásání nástroje v záběru a díky tomu může být i posuv nástroje konstantní v průběhu celého cyklu.

Strategie generuje dráhu pohybu nástroje od polotovaru k obrobku, tím se sníží množství přerušovaných řezů a nástroj je v kontaktu s materiálem delší dobu. Vytváří se ekvidistanty ve tvaru profilu obrobku až po polotovar. V případě frézování vnitřní kapsy se

nástroj nejprve zahloubí uprostřed do požadované hloubky a až poté začne hrubovat dráhu, dokud nedosáhne okraje kapsy. Nakonec se odstraní zbývající rohy. To můžeme vidět na Obr. 9.



Obr. 9 Strategie Waveform – vygenerovaná dráha [27]

Přesun nástroje k dalšímu řezu se uskutečňuje nejrychlejší možnou cestou, kde zůstane v řezu, ale při delších přejezdech odjede v ose Z a rychloposuvem se přemístí do další pozice. Jestliže nástroj zůstává v hloubce, řezná dráha se může automaticky generovat kolem polotovaru.

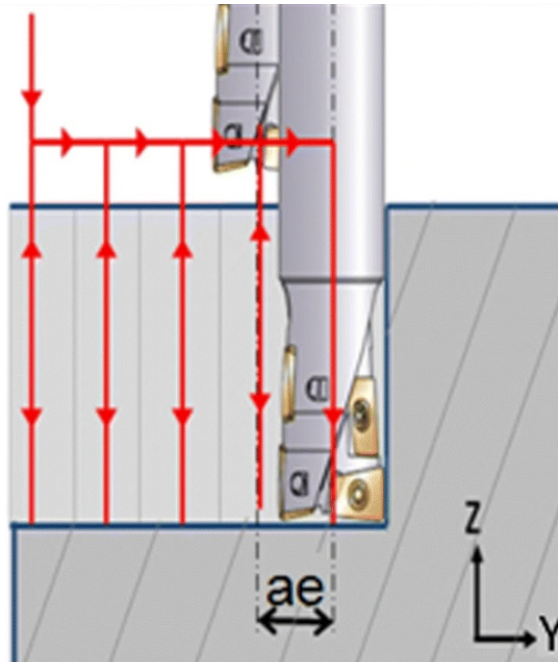
Zatížení nástroje je při hrubování rozloženo na celou délku nástroje, na rozdíl od tradičního hrubování. Radiální hloubka záběru je optimalizována tak, aby bylo možné docílit konstantních řezných podmínek, umožnil se dostatečný odvod třísek a spolu s nimi bylo odvedeno maximum tepla. To přispívá ke zvyšování efektivity obrábění, rovnoměrnému opotřebení nástroje a zvýšení jeho životnosti. [27]

6.5.5 Ponorné frézování

Ponorné frézování patří do progresivních hrubovacích strategií, používá se především pro obrábění hlubokých kapes a drážek. Zahrnuje sérii po sobě následujících cyklů zanořování do kapsy, oddělených o hodnotu radiálního posuvu a_e .

Na Obr. 10 můžeme vidět tři fáze ponorného frézovacího cyklu. Během fáze zanořování fréza při sjezdu naprogramovanou rychlostí podél osy Z odebírání materiálu.

Následně dochází k rychlému zvedání nástroje, a nakonec se během offsetové fáze nástroj pohybuje vysokou rychlostí nad obrobkem po trajektorii tak, aby byl překryt následující řez při příštím cyklu. Důležitou vlastností u této metody je geometrie nástroje, jež má přímý vliv na řezné síly. [28,29]



Obr. 10 Ukázka zanořování při ponorném frézování [28]

Na rozdíl od ostatních hrubovacích strategií probíhá řez na čele nástroje místo na obvodu, což je výhodné vzhledem ke změně směru řezných sil z radiálních na axiální. Využívá se tam, kde není možné frézování obvodem kvůli případnému vzniku vibrací. [29]

Ponorné frézování má výrazně lepší účinnost než konvenční metody při obrábění kovových materiálů a je možné použít menší řeznou rychlost. Výhodou u ponorného frézování je malá radiální řezná síla, která může snížit deformaci nástroje a obrobku, jelikož je hlavní složkou axiální řezná síla, která zajišťuje vysokou tuhost při obrábění. Je vhodná pro obrábění hlubokých dutin, kde je vyžadována délka přesahu nástroje. Lze efektivně obrábět i těžkoobrobitelné materiály bez zkrácení životnosti nástroje.

Jako nevýhodu ponorného frézování můžeme považovat hrubý vzhled povrchu po dokončení procesu, způsobený krokem mezi jednotlivými řezy. [30]

7. Praktická část

7.1 Ukázka jednotlivých CAM softwarů

V této části si představíme několik nepoužívanějších, zároveň nejznámějších CAD/CAM softwarů a jejich rozdělení podle úrovně systému a ceny.

CAM softwary mohou mít různá rozdělení a to např. podle ceny, použití nebo podle podpory ze strany výrobce. Téměř všechny CAM softwary mají několik základních modulů, které je možno navyšovat podle uživatelských preferencí na různá zaměření.

Tato práce se bude zabývat ukázkou jednotlivých hrubovacích strategií dostupných ve vybraných CAM softwarech.

7.1.1 Kovoprog (verze 4.14 rev.2)

Jedná se o jediného českého představitele CAM software na trhu vyvinutého společností Peška & Brtna Computer Service spol. s.r.o. V současnosti je možné si zvolit ze dvou verzí. První z nich je drátové řezání, které se zabývá elektroerosivním obráběním. U této verze máme k dispozici operace jak pro dvouosé, tak i čtyřosé řezání, jež je možno si zobrazit v manažeru operací 3D simulaci pohybu drátku. Druhá verze zabývající se třískovým obráběním se využívá pro soustružení, frézování a vrtání.

Kovoprog patří do skupiny cenově dostupnějších CAM softwarů, přičemž nabízí přehlednou a jednoduchou obsluhu, možnost češtiny již je součástí základní verze. [31]

7.1.2 Autodesk Fusion 360 (verze R2 CZ)

Autodesk Fusion 360 patří do skupiny 3D CAD/CAM softwarů od společnosti Autodesk. Je to aplikace založená na web-cloud technologiích. 3D CAD aplikace má jednoduché a rychlé ovládání, uživatel tak může zpracovávat součásti, sestavy, přímo editovat objemové a volno plošné modely, sestavovat analýzu, vizualizaci, výrobu, simulaci a CAM technologie pro programování obráběcích strojů. Samozřejmostí je mnoho možností rozšíření, které přidá pokročilé funkce podle konkrétního druhu.

V případě CAM softwaru máme možnost využít velké spektrum obráběcích strategií a postprocesorů, jež jsou potřebné pro generování NC kódu. [32,33]

7.1.3 Autodesk PowerMill (verze 2022.1)

Autodesk PowerMill patří mezi nejlépe hodnocené CAM softwary pro CNC programování tvarově složitých dílců a objemových 3D modelů. Používá se pro programování CNC průmyslových robotů a pětiosých frézovacích center. Mezi jednu z nejdůležitějších funkcí patří HSM strategie hrubování, díky této strategii se snižuje opotřebení nástroje a zkracuje se strojní čas, což umožňuje maximální efektivitu výroby. Oproti ostatním CAM softwarům vytváří po dokončení procesu vynikající výsledný povrch.

Nejnovější verze Autodesk PowerMill nám nabízí zrychlení kontroly kolize, kdy kontrola a ověření NC programu běží na pozadí a programátor může nadále pracovat. Další novinkou je jednodušší tvorba NC programu. [34]

7.1.4 Autodesk FeatureCAM (verze 2021)

FeatureCAM spadá do skupiny 3D CAD/CAM softwarů od společnosti Autodesk. Jeho funkcí je automatizace postupu CNC programování od návrhu až po výsledný NC kód. Mezi nejdůležitější vlastnosti patří výrazné snížení času přípravy výroby, díky rychlejšímu CNC programování, vyhýbání se kolizím a podpora mnoha strojů.

V nejnovější verzi došlo k vylepšení funkcí, které jsou např. možnosti rozpoznávání prvků z 3D modelu, vylepšení programování víceúčelových CNC strojů. [35]

7.1.5 Siemens NX (verze 2206)

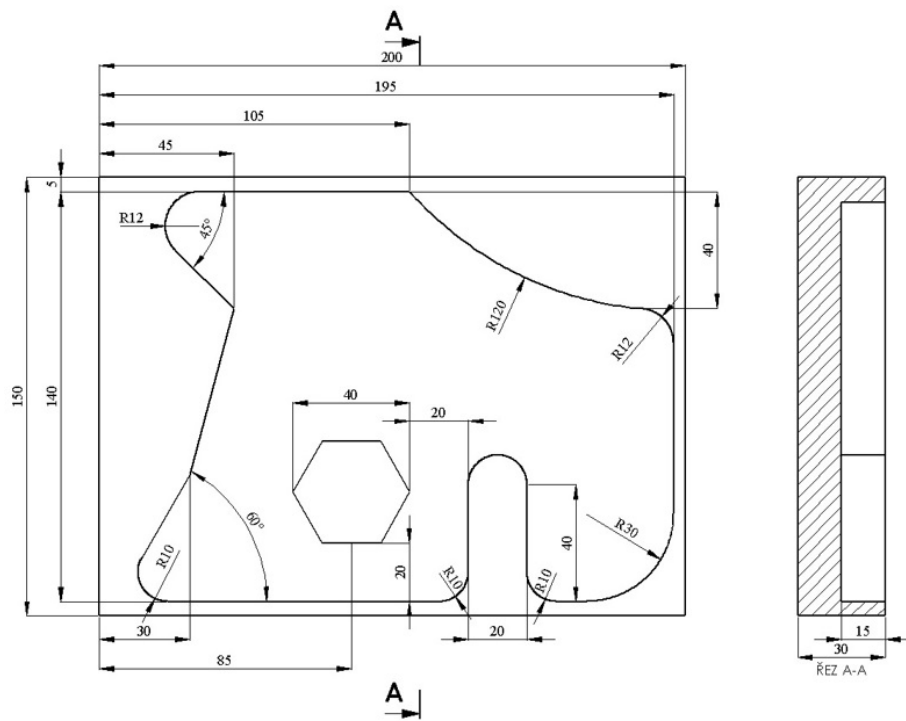
Siemens NX je software od společnosti Siemens PLM software. NX CAM poskytuje komplexní, integrované možnosti od návrhu až po NC programování a následnou výrobu. Umožňuje tedy použití 3D modelů, dat a procesů, které jsou vzájemně propojeny při plánování jednotlivých operací. Můžeme využít jak 2,5osé, tak i 5osé frézování, díky čemuž dochází k zefektivnění výroby a snížení doby cyklu. Používá se k výrobě forem a při velkoobjemové výrobě.

V nové verzi NX CAM 2206 došlo k vylepšení kontroly kolize a nástroje, zobrazení stopy nástroje umožňuje přehlednější zobrazení dráhy nástroje během simulace. Máme možnost změnit směr vřetena během programování, aniž bychom museli nastavovat postprocessor. Byl přidán nový modul On Machine Probing, jež umožňuje programátorům snadno definovat cykly na obráběcích strojích, zjednodušovat a provádět strojní cykly, a to vše v jedné operaci, přičemž automaticky rozpozná prvky na 3D součásti. [36]

7.2 Návrh zkušebního tělesa

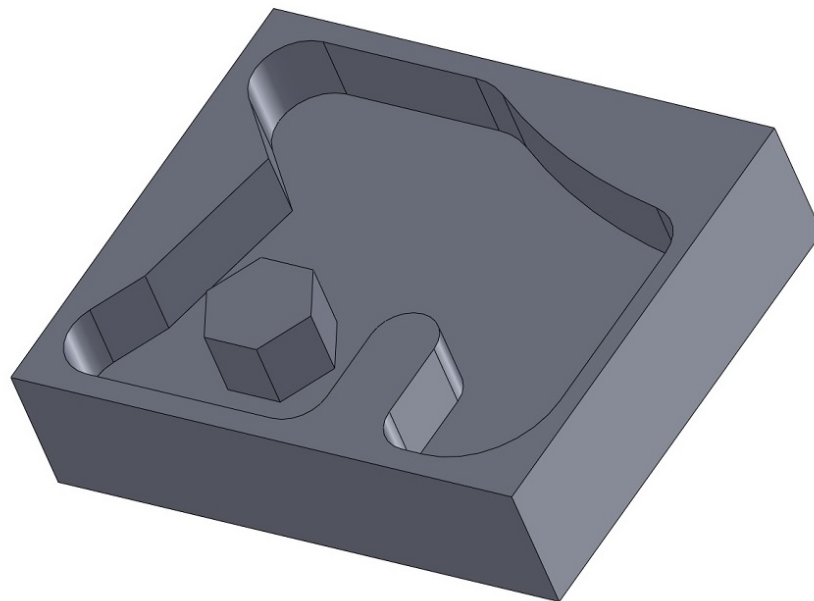
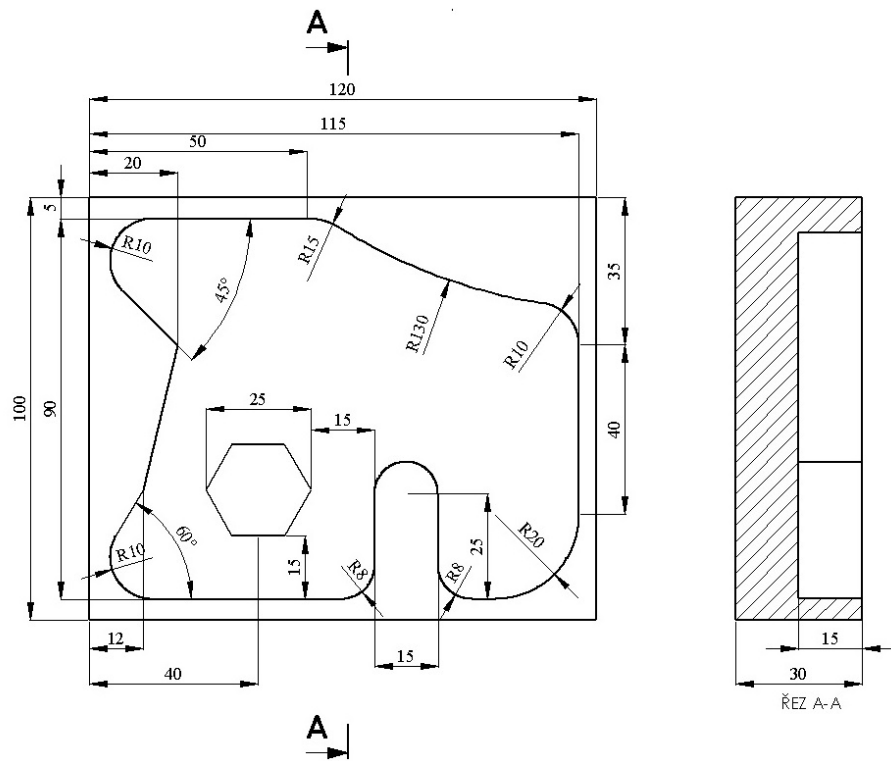
Počátečním krokem byl návrh zkušebního tělesa, na kterém jsem později aplikoval jednotlivé druhy hrubovacích strategií, které jsou uvedeny v teoretické části této práce. Návrh zkušebního tělesa jsem provedl v CAD softwaru Solid Works 2015. Jako zkušební těleso jsem se rozhodl vytvořit 2D kapsu z důvodu podpory 2,5D obrábění všech výše uvedených CAM softwarů. Některé CAM softwary nepodporují 3D obrábění, mezi které patří např. český software Kovoprog.

Na Obr. 11 můžeme vidět navržené těleso jako uzavřenou kapsu obsahující několik geometrických prvků, např. rádiusy, jak vnitřní, tak vnější ostrůvek, rohy s ostrým a pravým úhlem.



Obr. 11 Skica a 3D model zkušebního tělesa č.1

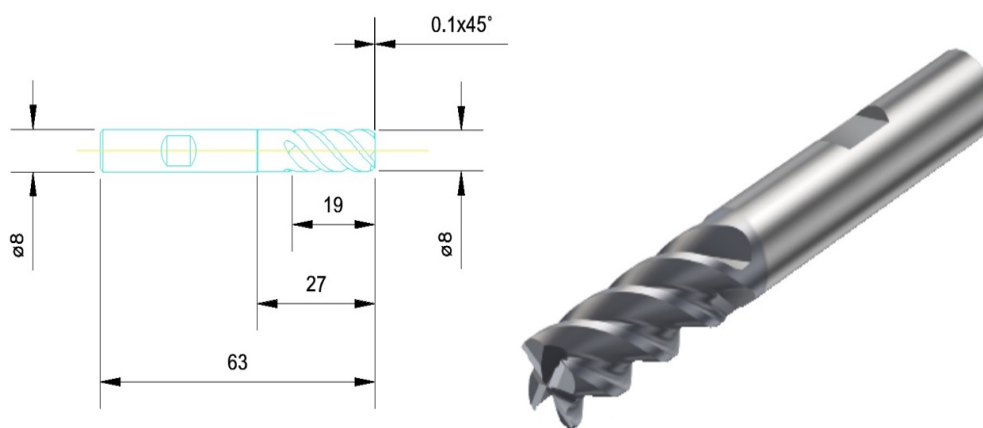
V průběhu experimentu jsme z důvodu snížení nákladu na materiál museli provést zmenšení tělesa, které můžeme vidět na Obr. 12. Dále bylo nutné odstranit ostrý vnitřní roh, který bychom nebyli schopni obrobit, a zůstal by zde neobrobený materiál.



Obr. 12 Skica a 3D model zkušebního tělesa č.2

7.3 Návrh technologických podmínek

Nejdříve jsem musel zvolit nástroj, kterým se bude zkušební těleso obrábět. Vycházel jsem z nástrojů mne dostupných, a proto jsem zvolil monolitní stopkovou frézu CoroMill Plura od společnosti Sandvik Coromant s.r.o., která je opatřena PVD povlakem TiAlN, jež je určena pro hrubování nízkolegovaných ocelí a korozivzdorných ocelí. V katalogu ji lze nalézt pod označením 1P341-0800-XB 1630. [38]



Obr. 13 Schéma použitého nástroje [37]

Volbu řezných podmínek jsem provedl podle doporučení výrobce nástroje. Nejprve jsem musel zvolit metodu obrábění, jaký tvar a z jakého materiálu bude těleso. Následně jsem podle doporučení výrobce nástroje pro hrubování kapsy z materiálů pod označením P1.2.Z.AN získal řezné podmínky uvedené v tab. 1, které jsem následně upravil dle vlastních zkušeností a pomocí obecných vzorců dopočítal některé řezné parametry. Při zadávání řezných podmínek jsem ponechal všechny hodnoty pro jednotlivé CAM softwary konstantní. Řezné parametry, které byly navrženy konkrétním CAM softwarem byly ponechány, kromě hloubky řezu. Tu jsem nastavil na $a_p = 15\text{mm}$ z důvodů obrobení tělesa jedním řezem při použití daného nástroje.

Tab. 1 Zvolené řezné podmínky

Otáčky vřetene n [min^{-1}]	Rychlost posuvu v_f [$\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$]	Řezná rychlost v_c [$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$]	Posuv na zub f_z [mm]	Šířka řezu a_e [mm]
7000	1400	176	0,05	2
Hloubka záběru a_p [mm]	Rychlost posuvu nájezdu v_{fn} [$\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$]	Rychlost posuvu odjezdu v_{fo} [mm $\cdot \text{min}^{-1}$]	Velikost rychloposuvu v_{fr} [mm $\cdot \text{min}^{-1}$]	Rychlost rampového posuvu v_{fram} [$\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$]
15	1000	1000	3000	500

7.4 Průběh experimentu

Prvotním krokem bylo exportování dat do formátu podporujícího jednotlivý CAM software. Model, který jsem vytvořil v Solid Worksu jsem tedy uložil ve formátu sldprt, DWG a IGS, aby bylo možné jeho použití ve všech výše uvedených CAM softwarech.

Po importu modelu byl postup obdobný a intuitivní ve všech CAM softwarech, od nastavení počátku souřadnicového systému, výběru hrubovací strategie, až po definici nástroje s nastavením řezných podmínek. Některé odlišnosti v postupech mezi jednotlivými CAM softwary nalezneme, ale více si o nich řekneme níže.

7.5 Výsledky

7.5.1 Kovoprog

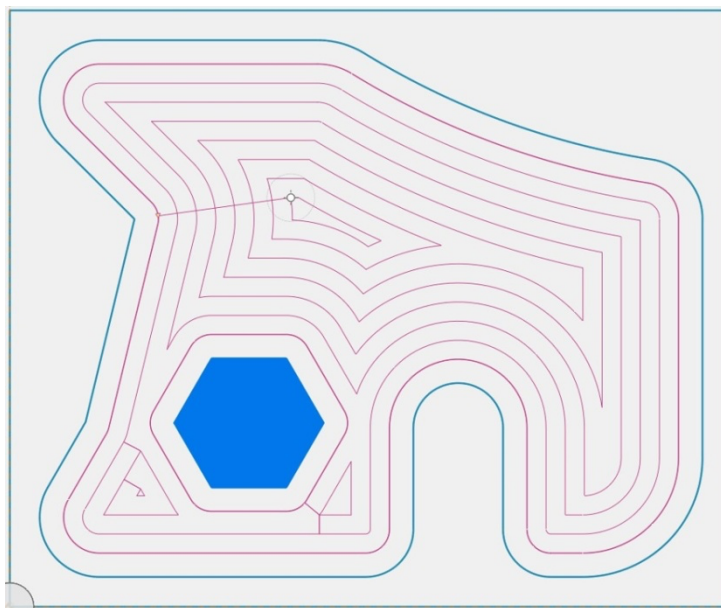
Jako první z použitých CAM softwarů jsem zvolil Kovoprog, jelikož patří mezi ty jednodušší. Tento CAM software nenabízí žádnou z adaptivních strategií, a proto jsem využil pouze konvenční.

Pro hrubování zkušebního tělesa jsem použil strategii vybrání kapsy, která je založená na principu konturování (Obr. 14). Jelikož je nabídka strategií velmi omezená, další strategii jsem nevyužil.

Výsledné délky dráhy nástroje i časy obrábění jsou pouze přibližné, z důvodů nesrozumitelného zadávání řezných podmínek a jsou uvedeny v Tab. 2.

Tab. 2 Výsledná délka dráhy nástroje a čas obrábění

Kovoprogram	Dráha [m]			Čas [min:s]		
	Obrábění	Rychloposuv	Celková	Obrábění	Rychloposuv	Celkový
Hrubování kapsy	2,15	0	2,15	1:47	0	1:47



Obr. 14 Strategie hrubování kapsy

7.5.2 Autodesk Fusion 360

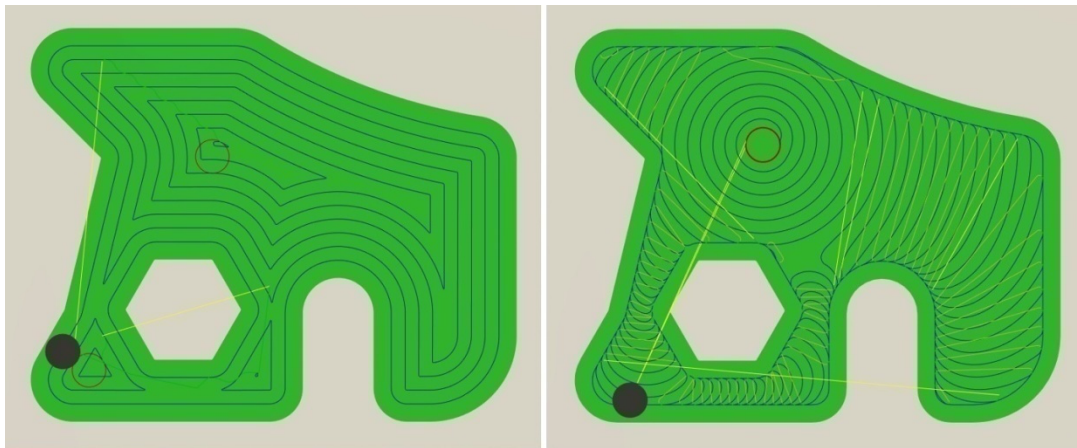
Další z použitých CAM softwarů je Autodesk Fusion 360, jež je velmi intuitivní a uživatelsky přívětivý. Jeho ovladatelnost je velmi podobná ostatním CAD/CAM softwarům od společnosti Autodesk a díky tomu se snadno ovládá i bez předchozích zkušeností.

V tomto CAM softwaru jsem použil pro hrubování strategii hrubování kapes, která je založená na principu konturování a adaptivní hrubovací strategii, jež využívá obrábění po trochoidní křivce (Obr. 15).

Výsledné délky dráhy nástroje a časy obrábění jsou uvedeny v Tab. 3.

Tab. 3 Výsledná délka dráhy nástroje a čas obrábění

Autodesk Fusion 360	Dráha [m]			Čas [min:s]		
	Obrábění	Rychloposuv	Celková	Obrábění	Rychloposuv	Celkový
Hrubování kapsy	3,08	0,19	3,27	4:34	0:16	4:50
Adaptivní hrubování	10,36	1,51	11,87	10:07	0:18	10:25



Obr. 15 Strategie hrubování kapsy (vlevo), strategie adaptivní hrubování (vpravo)

7.5.3 Autodesk PowerMill

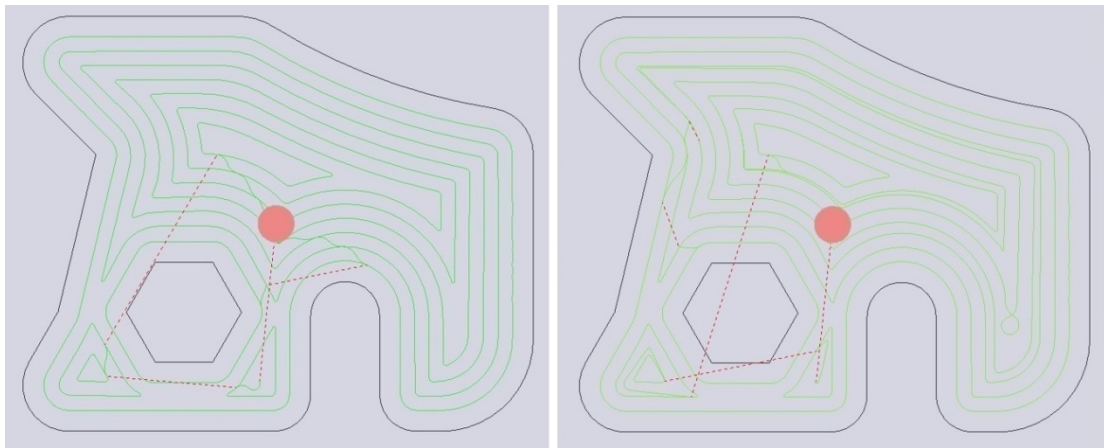
Autodesk PowerMill patří mezi nejpoužívanější CAM softwary. Vyznačuje se širokou škálou hrubovacích i dokončovacích strategií.

Tento CAM software nám umožňuje zvolit hrubovací strategii a lze si vybrat mezi obráběním konturováním, rastrem a strategií Vortex. Z nabízených metod jsem zvolil strategii konturováním, u které jsem vybral pro ukázkou konturování po obrysu a po spirále (Obr. 16). Rozdíl mezi nimi spočívá v přímém přejezdu nástroje z obrobene kontury na následující konturu, přičemž u konturování do spirály, je tento přechod eliminován, dráha je plynulá a tvoří spirálu. A jako další metodu hrubování jsem zvolil strategii Vortex. Zobrazení jednotlivých strategií můžeme vidět na Obr. 17.

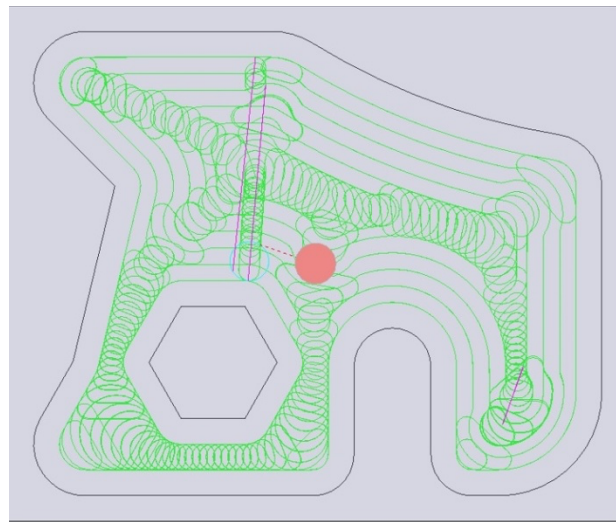
Výsledné délky dráhy nástroje a časy obrábění jsou uvedeny v Tab. 4.

Tab. 4 Výsledná délka dráhy nástroje a časy obrábění

Autodesk PowerMill	Dráha [m]			Čas [min:s]		
	Obrábění	Rychloposuv	Celková	Obrábění	Rychloposuv	Celkový
Konturování	1,94	0,33	2,27	1:23	0:38	2:01
Konturování do spirály	2,3	0,38	2,68	1:38	0:14	1:52
Vortex	10,62	0,52	11,14	7:35	1:40	9:15



Obr. 16 Strategie hrubování - konturování (vlevo), konturování do spirály (vpravo)



Obr. 17 Strategie hrubování – strategie Vortex

7.5.4 Autodesk FeatureCAM

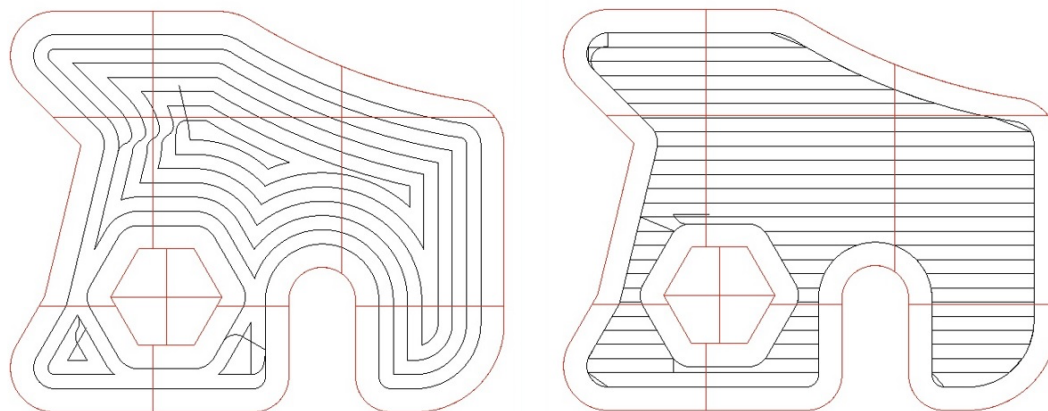
CAM software Autodesk FeatureCAM je založen na principu obrábění předem definovaných prvků (kapsa, profil apod.) jako jednoho celku.

V rámci obrábění zkušebního tělesa jsem u tohoto CAM softwaru zvolil obrábění kapsy, kde jsem měl následně možnost výběru z konvenčních metod a progresivních strategií. U volby konvenční metody jsem použil strategii konturování a řádkování. Jednotlivé strategie můžeme vidět na Obr. 18. Při výběru progresivní strategie jsem použil strategii Vortex. Ta kombinuje trochoidní obrábění po křivce s konturováním (Obr. 19).

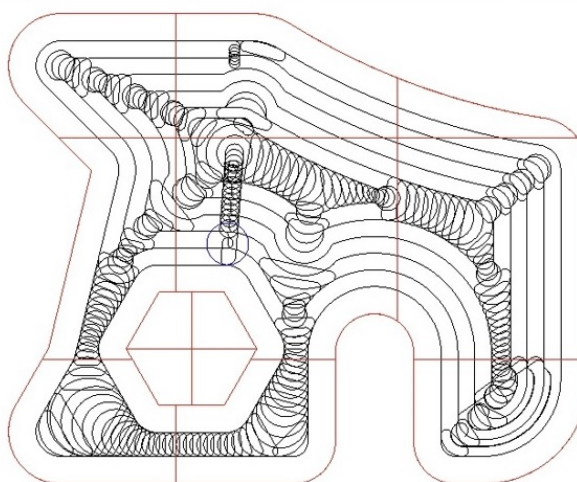
Výsledné délky dráhy nástroje a časy obrábění jsou uvedeny v Tab. 5.

Tab. 5 Výsledná délka dráhy nástroje a čas obrábění

Autodesk FeatureCAM	Dráha [m]			Čas [min:s]		
	Obrábění	Rychloposuv	Celková	Obrábění	Rychloposuv	Celkový
Konturování	2,17	0,01	2,18	1:48	0:01	1:49
Řádkování	3,03	0,04	3,07	2:07	0:03	2:10
Vortex	10,81	0,16	10,97	7:42	0:07	7:49



Obr. 18 Strategie hrubování kapsy - konturování (vlevo), řádkování (vpravo)



Obr. 19 Strategie hrubování kapsy – strategie Vortex

7.5.5 Siemens NX

Siemens NX je poslední z vybraných CAM softwarů, u kterého jsme porovnávali obrábění zkušebního tělesa. Zde byla možnost použití několika obráběcích strategií, z kterých jsem vybral pro frézování kapsy strategii konturováním, řádkováním a jako poslední strategii jsem zvolil adaptivní frézování (Obr. 20). Adaptivní frézování vytvoří dráhu obrábění po trochoidní křivce, která se podobá dráze vytvořené v CAM softwaru Fusion 360, při použití strategie adaptivního obrábění (viz Obr. 21). Zbylé strategie obrábění jsem nepoužil a to buď z důvodů nevhodného použití, nebo podobnosti použitých strategií.

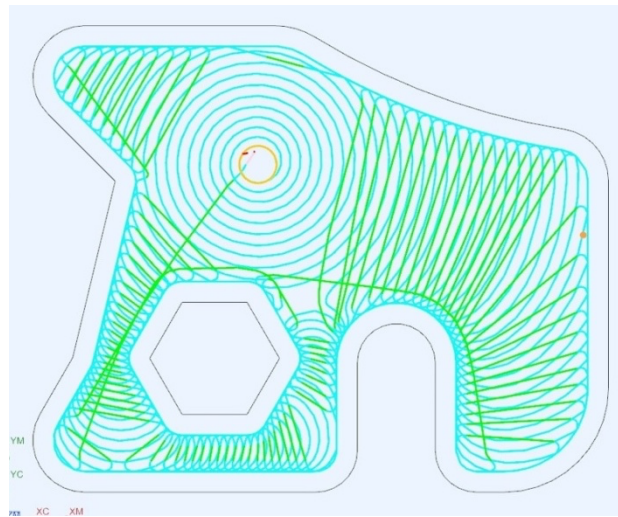
Výsledné délky dráhy nástroje a časy obrábění jsou uvedeny v Tab. 6.

Tab. 6 Výsledná délka dráhy nástroje a čas obrábění

Siemens NX	Dráha [m]			Čas [min:s]		
	Obrábění	Rychloposuv	Celková	Obrábění	Rychloposuv	Celkový
Konturování	2,30	0,02	2,32	1:57	0:01	1:58
Řádkování	2,48	0,45	2,93	1:58	0:02	2:00
Adaptivní frézování	9,36	0,06	9042	6:39	0:04	6:43



Obr. 20 Strategie frézování kapsy - konturování (vlevo), řádkování – cikcak (vpravo)



Obr. 21 Strategie frézování kapsy – Adaptivní frézování

7.5.6 Shrnutí praktické části a výsledky

V této části porovnávám výsledky hrubovacích strategií v CAM softwarech, které jsem použil. Jako nejvhodnější hrubovací strategii pro obrobení zkušebního tělesa vyšla podle hodnotících kritérií strategie konturováním. Přičemž nejrychlejší hrubovací čas byl dosažen konturováním v CAM softwaru Autodesk FeatureCAM (1:49 min). Naopak nejdelší obráběcí čas byl dosažen u strategie adaptivního hrubování CAM softwaru Autodesk Fusion 360 (10:25 min). Adaptivní strategie obráběly ve dvou vrstvách (hloubka záběru jedné vrstvy byla nastavena na $a_p=7,5\text{mm}$) z důvodů menšího objemu třísek, proto byl výsledný čas a dráha delší než u konvenčních strategií.

V případě, že bychom obráběli v jedné vrstvě na hloubku záběru $a_p=15\text{mm}$, výsledný čas by se zkrátil přibližně o 40 %. Došlo by k využití jejich vlastností a mohli bychom obrábět vyšší rychlostí se zatížením nástroje na maximum doporučení výrobce, oproti strategiím konvenčním. Adaptivní strategie mají delší dráhu, a proto nemohou být rychlejší při stejných řezných podmínkách.

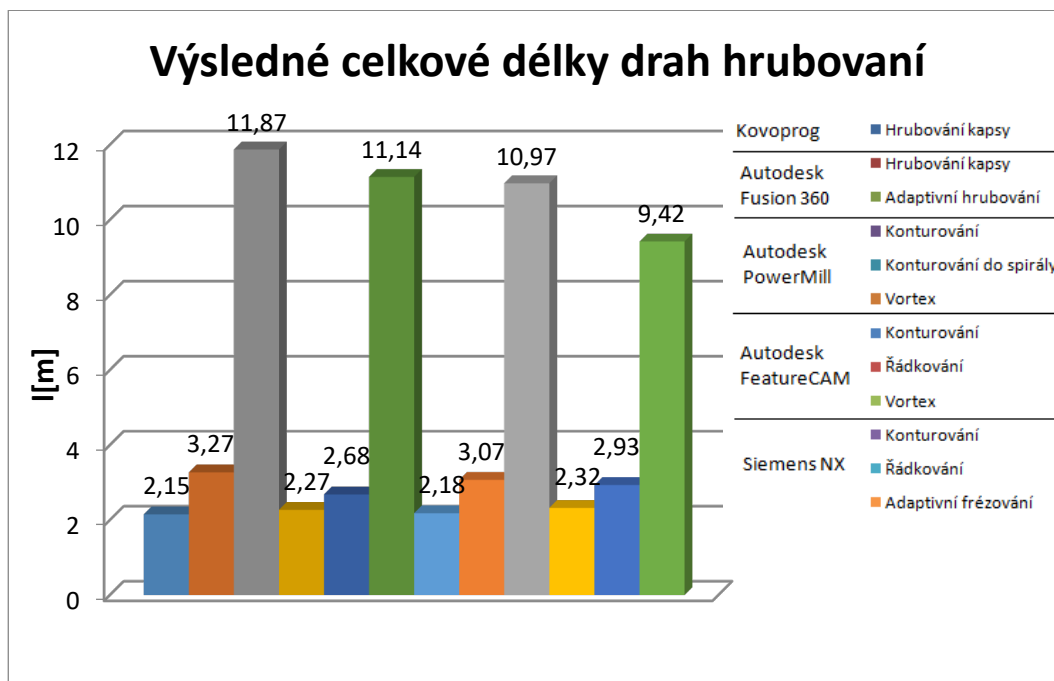
U všech zmíněných strategií v jednotlivých CAM softwarech, byly nastaveny stejné parametry, např. úhel opásání, zaoblení, rychlost posuvu apod.

Při porovnání výsledných časů a délek drah všech použitých CAM softwarů si můžeme všimnout rozdílů (viz. Graf 1 a 2), které jsou způsobeny různou strukturou dráhy a pohyby nástroje jednotlivých CAM softwarů, jelikož každý má své předdefinované

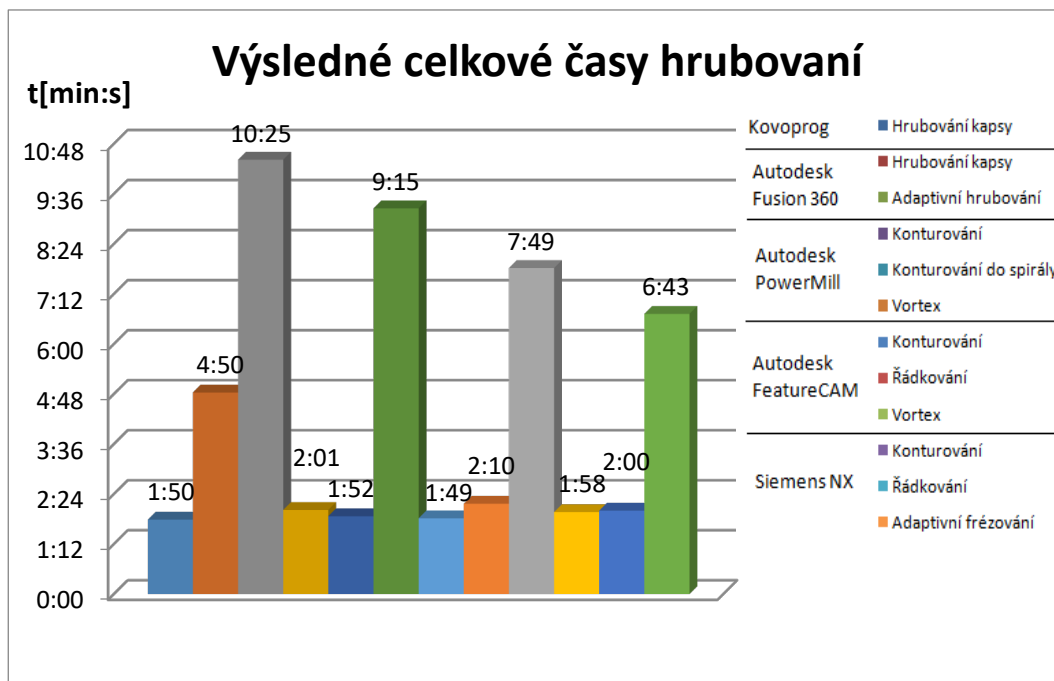
parametry. V případě porovnání hrubovacích časů při použité strategii konturování, byl rozdíl mezi nejkratším (Autodesk FeatureCAM 1:49 min) a nejdelším (Autodesk Fusion 360 4:50 min) hrubovacím časem 3:01 min.

Výsledné porovnání délek drah a časů můžeme vidět v příloženém grafu 1 a 2.

Graf 1 Výsledné celkové délky drah hrubování



Graf 2 Výsledné celkové časy hrubování



V rámci praktické části experimentu byly zjištěny výsledky nejkratšího času při obrábění strategií konturování, které nelze jednoznačně považovat za nejlepší. To proto, že použité konvenční strategie se soustředí na geometrii obráběného tělesa a aby bylo dosaženo co nejkratších časů a délek drah. Neberou v potaz zatížení nástroje, což může mít za důsledek snížení řezných podmínek z opatrnosti, aby nedošlo k jeho poškození a zkrácení trvanlivosti, či životnosti.

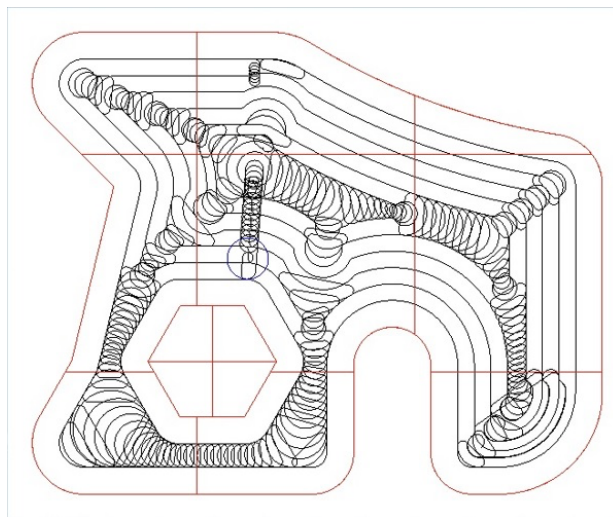
Naopak, při obrábění progresivními hrubovacími strategiemi, je možné použití vyšších řezných parametrů, jelikož jsou dráhy optimalizované. Díky tomu můžeme využít plný potenciál stroje i nástroje bez vlivu na snížení životnosti nástroje, nebo jeho přetížení. Základní požadavek při použití progresivních hrubovacích strategií, je kladen na obráběcí stroj, který musí být schopen dosáhnout vysoké řezné rychlosti, posuvu, otáček a zachytit vzniklé řezné síly.

Pro potvrzení hypotézy, že progresivní strategie jsou rychlejší, jsem optimalizoval řezné podmínky v softwaru Autodesk FeatureCAM. Vytvořil jsem optimalizovanou dráhu strategie Vortex, kde jsem nastavil hloubku záběru $a_p = 15\text{mm}$ a tím došlo k obrábění pouze jedné vrstvy namísto dvou.

Vygenerované dráhy můžeme vidět na obr. 22 a výsledné časy a dráhy obrábění v Tab. 7.

Tab. 7 Výsledná délka dráhy nástroje a čas obrábění - optimalizace

Autodesk FeatureCAM	Dráha [m]			Čas [min:s]		
	Obrábění	Rychloposuv	Celková	Obrábění	Rychloposuv	Celkový
Vortex	5,15	0,04	5,19	3:51	0:03	3:54



Obr. 22 Strategie Vortex – optimalizace

Při porovnání získaných hodnot z Tab. 5 a Tab. 7 u strategie Vortex softwaru Autodesk FeatureCAM si lze všimnout, že původní celkový obráběcí čas (7:49 min) se při optimalizaci řezných podmínek snížil (3:54 min) téměř o polovinu. Na Obr. 23 vidíme výsledek obrobeneho zkušebního tělesa s mapou, která byla vytvořena při obrábění nástrojem a zobrazuje nám tedy jeho dráhu.



Obr. 23 Ukázka výsledného obrábění frézou S6118.0

Můžeme tedy říci, že při optimalizaci řezných podmínek progresivních hrubovacích strategií, dosáhneme urychlení a tím i snížení ekonomické náročnosti procesu obrábění.

8. Závěr

V bakalářské práci byl proveden přehled používaných hrubovacích strategií. Všechny hrubovací strategie byly následně rozděleny do několika skupin. Základní rozdělení jsem provedl do dvou skupin – konvenční metody a progresivní metody, které byly dále rozděleny na strategie založené na MRR rovnice a strategie CAM softwarů.

V dostupných používaných CAM software, byly některé z těchto strategií použity na zkušební těleso. Toto zkušební těleso byl vlastní návrh, který měl ukázat možnosti a schopnosti použitých softwarů CAM.

Byly vygenerovány dráhy obrábění s tím, že parametry (řezná rychlost, hloubka záběru, úhel opásání nástroje, pokud bylo možné jej nastavit), byly pro konvenční strategie stejně zadané. Pro adaptivní strategie byly zadané parametry totožné, až na hloubku záběru $a_p = 7,5\text{mm}$, což se projevilo delším obráběcím časem, jelikož obráběli ve dvou vrstvách. Pro všechny vytvořené strategie byl kromě drah získán také teoretický čas obrábění, který byl určen pro nominální nástroj.

Z vybraných CAM softwarů při totožných řezných parametrech byla téměř u všech nejvhodnější strategie konturováním s výjimkou softwaru Autodesk Fusion 360. Nejrychlejší hrubovací čas dosáhl software Autodesk FeatureCAM (1:49 min), naopak s nejdelším časem strategie konturování software Autodesk Fusion 360 (4:50 min). Při použití strategie konturování CAM softwaru Autodesk Fusion 360, činí rozdíl obráběcích časů 3:01 min, dochází tedy téměř k dvojnásobnému navýšení času oproti softwaru Autodesk FeatureCAM.

Nejdelšího celkového hrubovacího času bylo dosaženo při použití strategie Vortex v softwaru Autodesk Fusion 360 (10:25 min). Tento výsledek ukazuje, že při stejných řezných podmínkách mají konvenční strategie oproti progresivním kratší dráhu obrábění a tím i rychlejší čas. V případě využití plného potenciálu nástroje a optimalizaci řezných podmínek, by bylo dosaženo u progresivních hrubovacích strategií urychlení procesu obrábění. Jak je možné vidět u strategie Vortex softwaru Autodesk FeatureCAM, kde se celkový obráběcí čas při optimalizaci řezných podmínek snížil téměř o polovinu. Tím byla potvrzena hypotéza, že při optimalizaci progresivních hrubovacích strategií se celý proces obrábění urychlí a dojde tak k ponížení ekonomické náročnosti.

Pro zkušební obrábění v rámci experimentu byl použit NC kód vytvořený v CAM softwaru Autodesk PowerMill. Pro obrábění byl z důvodů nedostupnosti použit nástroj jiný než, který je uveden v teoretické části. Byl použit nástroj pod označením TTI-OL957300, u kterého v průběhu experimentu došlo k jeho zničení (na špičce nástroje se vytvořila „zapečená hliníková čepička“). Následně byl použit dvoubřítý nástroj s povrchovou úpravou leštěním od společnosti Dormer Pramet s označením S6118.0. Výsledný celkový čas obrábění vygenerovaný softwarem byl 9:15 min a při praktickém obrábění bylo dosaženo času 8:22 min. Rozdíl mezi teoretickým a skutečným obráběcím časem je tedy 10 %.

9. Zdroje

- [1] VLACH, Bohumil. *Technologie obrábění a montáží*. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1990, 464 s.
- [2] MÁDL, Jan. *Teorie obrábění*. Praha: České vysoké učení technické, 1989. s. 39 - 50, s. 63 – 65, s 110 - 111.
- [3] BRYCHTA, Josef. *Nové směry v progresivním obrábění* [online]. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita, 2008. s. 80 - 83. ISBN 978-80-248-1505-3
- [4] FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. s. 170 – 172. ISBN 80-214-2374-9.
- [5] HUMÁR, A. *Technologie obrábění – I. část*. Studijní opory pro magisterskou formu studia "Strojírenská technologie". Brno: VUT Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2003. 138 s.
- [6] ŠTULPA, Miloslav. *CNC: programování obráběcích strojů*. Praha: Grada, 2015. s. 95 – 97. ISBN 978-80-247-5269-3.
- [7] *Strategie pokročilého hrubování – rychlost díky optimální dráze nástroje* [online]. © 2022 Strojírenství. [cit. 2022-06-24]. Dostupné z: <https://www.strojirenstvi.cz/strategie-pokrocileho-hrubovani-rychlost-diky-optimalni-draze-nastroje>
- [8] HUANG, Nuodi, Eugen KREBS, Jonas BAUMANN et al. Experimental investigation on influence of engagement angle and tool geometry on plunge milling. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. 2020, 108, 1973-1981 [cit. 2022-06-25]. Dostupné z: doi:doi.org/10.1007/s00170-020-05480-x
- [9] MÁDL, Jan a Ivo KVASNIČKA. *Optimalizace obráběcího procesu*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1998. s. 51 – 70, s. 143 – 148.
- [10] *Strategie hrubování využívající optimalizované dráhy nástrojů* [online]. © 2022 MM Průmyslové spektrum. [cit. 2022-06-25]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/novinka/strategie-hrubovani-vyuzivajici-optimalizovane-drahy-nastroju.html>
- [11] 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.2022-06-28]. ISSN 0178-2789. Dostupné z: doi:10.1007/BF01905694
- [12] *Rovnoběžné hrubování & Cik-Cak hrubování* [online]. © 2022 NCG CAM Solutions Ltd. [cit. 2022-07-25]. Dostupné z: https://www.ncgcam.cz/03_rovnobezne_hrubovani&cik_cak_hrubovani.php

- [14] *Frézování tvarových ploch* [online]. © 2022 Sandvik Coromant. [cit. 2022-07-25]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/milling/pages/profile-milling.aspx>
- [15] *Adaptivní obrábění* [online]. © 2022 NCG CAM Solutions Ltd. [cit. 2022-07-25]. Dostupné z: https://www.ncgcam.cz/04_adaptivni_obrabeni.php
- [16] *Vysokorychlostní přesné obrábění* [online]. © 2022 ISCAR. [cit. 2022-07-10]. Dostupné z: <https://www.iscar.com/newarticles.aspx/countryid/6/newarticleid/3194>
- [17] ZAWADA -MICHAŁOWSKA, Magdalena. High-Performance Milling Techniques of Thin-Walled Elements. *Advances in Science and Technology Research Journal* [online]. 2022, 98-110 [cit. 2022-07-21]. ISSN 2299-8624. Dostupné z: doi:10.12913/22998624/147813
- [18] ARAUJO, Anna Carla, Guillaume FROMENTIN a Patrick BLANDENET. Investigation on PCD cutting edge geometry for Ti6Al4V high-feedmilling. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. 2020, **111**, 1785–1796 [cit. 2022-07-21]. Dostupné z: doi:10.1007/s00170-020-06086-z
- [19] RAUCH, Matthieu, Emmanuel DUC a Jean-Yves HASCOET. Improving trochoidal tool paths generation and implementation using process constraints modelling. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* [online]. 2009, 49(5), 375-383 [cit. 2022-07-22]. ISSN 0890-6955. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijmachtools.2008.12.006
- [20] 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**, 29-43 [cit. 2022-07-22]. ISSN 0924-0136. Dostupné z: doi:10.1016/j.jmatprotec.2016.01.033
- [21] *Metody odřezávání tenkých vrstev* [online]. © 2022 Sandvik Coromant. [cit. 2022-07-22]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/milling/milling-holes-cavities-pockets/pages/slicing-trochoidal-milling.aspx>
- [22] *True Mill* [online]. © 2022 Technika a trh. [cit. 2022-07-22]. Dostupné z: <https://www.technikaatrh.cz/obrabeni/truemillObrázky>
- [24] *Využijte potenciál vašeho frézovacího centra naplno...* [online]. © 2022 Technický týdeník. [cit. 2022-07-22]. Dostupné z: https://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv/vyuzijte-potencial-vaseho-frezovaciho-centra-naplno-s-technologie-mi-delcam-vortex-a-machine-dna_20620.html

- [26] *Vortex machining, Power Mill* [online]. © 2022 Autodesk Inc Knowledge Network. [cit. 2022-07-22]. 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>
- [27] *Revoluční hrubovací strategie pro vysokorychlostní obrábění* [online]. © 2022 MM Průmyslové spektrum. [cit. 2022-07-22]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/revolucni-hrubovaci-strategie-pro-vysokorychlostni-obrabeni>
- [28] MONIES, Frédéric, Montassar FREDJ, Johanna SENATORE a Walter RUBIO. Influence of a cutter's main geometrical parameters on cutting forces in plunge milling of Ti6Al4V. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. 2020, **108**(11-12), 3835 - 3858 [cit. 2022-07-22]. ISSN 0268-3768. Dostupné z: doi:10.1007/s00170-020-05564-8
- [29] *Ponorné frézování* [online]. © 2022 Sandvik Coromant. [cit. 2022-07-22]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/milling/milling-holes-cavities-pockets/pages/plunge-milling.aspx>
- [30] YANG, Xiao-yu, Jin-yuan TANG. Research on manufacturing method of CNC plunge milling for spur face-gear. *Journal of Materials Processing Technology* [online]. 2014, **214**(12), 3013 - 3019 [cit. 2022-07-22]. ISSN 0924-0136. Dostupné z: doi:10.1016/j.jmatprotec.2014.07.010
- [31] *Frézování a vrtání* [online]. © 2022 Kovoprog Peška & Brtna Computer Service s.r.o. [cit. 2022-07-22]. Dostupné z: <https://www.kovoprog.cz/cz/produkty/frezovani-a-vrtani.html>
- [32] *Frézování Fusion 360* [online]. © 2022 ARKANCE SYSTEMS s.r.o. [cit. 2022-07-22]. Dostupné z: <https://f360.cz/vyroba/frezovani/>
- [33] *Autodesk Fusion 360 - plný 3D CAD/CAM software* [online]. © 2022 ARKANCE SYSTEMS s.r.o. [cit. 2022-07-22]. Dostupné z: <https://www.arkance-systems.cz/produkty/cad-cam-pro-strojirenstvi/autodesk-fusion-360#popis>
- [34] *Co je nového v PowerMill 2022* [online]. © 2022 ARKANCE SYSTEMS s.r.o. [cit. 2022-07-22]. Dostupné z: <https://www.powermill.cz/co-je-noveho-v-powermill-2022>
- [35] *Co je nového ve FeatureCAM 2020* [online]. © 2022 CAD STUDIO s.r.o. [cit. 2022-07-22]. Dostupné z: <https://www.featurecam.cz/co-je-noveho-ve-featurecam-2020/>

[36] *CAM software* [online]. © 2022 Siemens Software. [cit. 2022-07-22]. Dostupné z: <https://www.plm.automation.siemens.com/global/en/products/manufacturing-planning/cam-software.html>

[37] *IP341-0800-XB 1630* [online]. Sandvik Coromant. [cit. 2022-07-22]. 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>

Obrázky

[13] Frézovací cykly. In: *CAM servis* [online]. © 2022 [cit. 2022-07-25]. Dostupné z: <http://www.camservis.cz/frezovani/>

[23] Ukázka drah vygenerovaných pomocí technologie TrueMill. In: *MM Průmyslové spektrum* [online]. MM publishing, © 2022 [cit. 2022-07-22]. Dostupné z:

<https://www.mmspektrum.com/clanek/nastroje-pro-progresivni-triskove-obrabeni>

[25] Vortex machining of 2D features. In: *Autodesk Inc Knowledge Network* [online]. Autodesk Inc., © 2022 [cit. 2022-07-22]. Dostupné z:

<https://knowledge.autodesk.com/support/powermill/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2022/ENU/PWRM-ReferenceHelp/files/GUID-58F410FD-3F01-4FCD-ABCD-CB358AF0DD6A-htm.html>

Seznam příloh

- Příloha 1 – 3D model zkušební tělesa č.1
- Příloha 2 – výkres zkušební tělesa č.1
- Příloha 3 – 3D model zkušební tělesa č.2
- Příloha 4 – výkres zkušební tělesa č.2
- Příloha 5 – Projekt – Kovoprog frézování – Strategie hrubování kapsy
- Příloha 6 – Projekt – Autodesk Fusion 360 – Strategie hrubování kapsy
- Příloha 7 – Projekt - Autodesk Fusion 360 – Strategie adaptivní hrubování
- Příloha 8 – Projekt – Autodesk PowerMill – Strategie hrub. - konturování
- Příloha 9 – Projekt - Autodesk PowerMill – Strategie hrubování - konturování do spirály
- Příloha 10 – Projekt - Autodesk PowerMill – Strategie hrubování – Strategie Vortex
- Příloha 11 – Projekt – Autodesk FeatureCAM – Strategie hrub. kapsy - řádkování
- Příloha 12 – Projekt - Autodesk FeatureCAM – Strategie hrubování kapsy - konturování
- Příloha 13 – Projekt - Autodesk FeatureCAM – Strategie hrubování kapsy - strategie Vortex
- Příloha 14 – Projekt – Siemens NX – Strategie frézování kapsy – řádkování
- Příloha 15 – Projekt – Siemens NX – Strategie frézování kapsy - konturování
- Příloha 16 – Projekt – Siemens NX – Strategie frézování - Adaptivní frézování

Všechny přílohy jsou v elektronické podobě nahrány na příloženém DVD.

Seznam použitých softwarů

- Solid Works – verze 2015
- Siemens NX – verze 2206
- Kovoprog frézování – verze 4.14 rev.2
- Autodesk Fusion 360 – verze R2CZ
- Autodesk FeatureCAM – verze 2021
- Autodesk PowerMill – verze 2022.1