

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 2303T004 Strojírenská technologie-technologie obrábění

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Návrh strategie dokončování tvarových ploch

Autor: **Bc. Jiří Andrlík**
Vedoucí práce: **doc. Ing. Jiří Česánek, Ph.D.**

Akademický rok 2016/2017

Zadání

Prohlášení o autorství

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

V Plzni dne:

.....
podpis autora

Poděkování

Rád bych tímto poděkoval vedoucímu mé diplomové práce doc.Ing.Jiřímu Česánkovi, Ph.D. za vedení diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat mému konzultantovi Ing. Luboši Kroftovi za jeho rady a pomoc v průběhu tvorby práce a také dalším pracovníkům z výzkumného pracoviště RTI za jejich pomoc.

ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Andrlík	Jméno Jiří	
STUDIJNÍ OBOR	2303T004 / Strojírenská technologie - technologie obrábění		
VEDOUcí PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) doc. Ing. Česánek, Ph.D.	Jméno Jiří	
PRACOVÍŠTĚ	ZČU - FST - KTO		
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte
NÁZEV PRÁCE	Návrh strategie dokončování tvarových ploch		

FAKULTA	strojní	KATEDRA	KTO	ROK ODEVZD.	2017
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	75	TEXTOVÁ ČÁST	66	GRAFICKÁ ČÁST	9
---------------	----	---------------------	----	----------------------	---

STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK) ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY	Diplomová práce obsahuje návrh strategií pro dokončování tvarových ploch. Navržené strategie byly porovnány z hlediska řezných sil, kvality obrobené plochy, přesnosti a strojních časů.
KLÍČOVÁ SLOVA	strategie, dokončování, tvarové plochy, CAM, dráhy, frézování, řezné síly, kvalita povrchu

SUMMARY OF DIPLOMA SHEET

AUTHOR	Surname Andrlík	Name Jiří		
FIELD OF STUDY	2303T004 / Manufacturing Technology - Machining Technology			
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) doc. Ing. Česánek, Ph.D.	Name Jiří		
INSTITUTION	ZČU - FST - KTO			
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR	Delete when not applicable	
TITLE OF THE WORK	Draft of the strategy for the finishing contoured surfaces			

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	Machining technology	SUBMITTED IN	2017
----------------	------------------------	-------------------	----------------------	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	75	TEXT PART	66	GRAPHICAL PART	9
----------------	----	------------------	----	-----------------------	---

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	This thesis dissert on design of the strategy for the finishing contoured surfaces. The strategies were compared each other according to the development of the cutting forces, surface quality, accuracy and machining times.
KEY WORDS	Strategy, finishing, contoured surfaces, CAM, paths, milling, cutting forces, surface quality

Obsah

Seznam zkratk.....	10
1. Úvod	11
1.1 Cíle	11
2. Analýza současného stavu.....	13
2.1 Tvarové plochy	13
2.1.1 Obrábění tvarových ploch	13
2.2 Frézování tvarových ploch.....	14
2.3 CAD/CAM (Computer Aided Design/Computer Aided Manufacturing)	14
2.4 Dělení frézovacích operací	15
2.4.1 Hrubování	15
2.4.2 Předdokončování.....	19
2.4.3 Dokončování.....	19
2.5 Obrábění ve 3 osách	19
2.5.1 Řezné síly při 3 osém frézování obecných tvarových ploch	20
2.6 5-osé obrábění.....	21
2.6.1 Řezné síly při 5 osém obrábění.....	21
2.6.2 Vliv naklonění na řezné síly	22
2.7 Dokončování v CAD/CAM systémech	22
2.7.1 Obrábění po vrstevnicích.....	23
2.7.3 Kopírovací frézování	23
2.7.4 Příklady některých operací na dokončování tvarových ploch v CAD/CAM	26
2.8 Problematika dokončování v CAD/CAM systémech.....	29
2.8.1 Dokončovací operace v závislosti na typu tvarové plochy	30
2.9 Nástroje pro dokončování	31
2.9.1 Dokončovací nástroje	32
2.9.2 Namáhání a opotřebení nástrojů při dokončování	33
2.9.3 Vliv strategie na opotřebení	34
2.10 Využití inteligentních systémů při dokončování.....	36
2.11 Kvalita obrobeného povrchu	38
2.12 Shrnutí teoretické části	39
3. Výběr nejvhodnější varianty a její ověření na příkladu zvolené tvarové plochy	41
3.1 Návrh variant	41

3.1.1 Rozpočet drah po ploše	42
3.2 Příprava experimentu	43
3.2.1 Příprava programu	45
3.2.2 Nastavení dynamometru	48
3.3 Průběh experimentu	50
3.4 Zhodnocení variant	54
3.4.1 Zhodnocení řezných sil	54
3.4.2 Zhodnocení kvality povrchu	57
3.4.3 Zhodnocení dosažené přesnosti	60
4. Technicko-ekonomické hodnocení	62
4.1 Ekonomické hodnocení	62
4.2 Volba a seřazení hodnotících ukazatelů	63
4.3 Multikriteriální hodnocení	63
5. Zhodnocení	65
5.1 Zhodnocení	65
6. Závěr	66
Literatura	67
Přílohy diplomové práce	69

Seznam zkratek

CAD- Computer aided design – počítačová podpora kreslení
CAM- Computer aided manufacturing - počítačová podpora výroby
CNC- Computer numerical control – číslicové řízení počítačem
NC- Numerical control – číslicové řízení
VBD - vyměnitelná břitová destička
HSC- High speed cutting-vysokorychlostní obrábění
HFC-High feed cutting- vysoko posuvové obrábění
HPC- High performance cutting- vysoce výkonné obrábění
 a_p - Hloubka přisuvu ve směru osy nástroje [mm]
 a_e - Hloubka přisuvu ve směru kolmém na osu nástroje [mm]
 v_c -řezná rychlost [m/min]
n-otáčky
 f_z -posuv na zub[mm]
F-celková řezná síla
 F_x -Složka řezné síly ve směru X [N]
 F_y - Složka řezné síly ve směru Y [N]
 F_z - Složka řezné síly ve směru Z [N]
2D- dvě souvisle řízené osy
3D- tři souvisle řízené osy
CL data- Cutter Location – data vygenerovaná z CAM systému
FFT- Fast Fourier Transform - Rychlá Fourierova Transformace
HSS-High speed steel- rychlořezná ocel
 R_a - Průměrná aritmetická odchylka profilu drsnosti [μm]
 R_z - Největší výška profilu drsnost [μm]

1. Úvod

Strojírenská výroba prošla za dobu její existence určitým vývojem. V prvopočátcích byl trend spíše ve výrobě malých výrobních dávek a vzhledem k tehdejšímu vybavení i k jednoduchým a ne příliš komplikovaným výrobkům. V dnešním silně globalizovaném světě udávají směr hlavně nároky na produktivitu práce, velké výrobní dávky a v neposlední řadě na kvalitu jednotlivých produktů. Výroba různých komplikovaných součástí a tvarů, které byly před několika lety takřka nevyrobitelné, jsou díky dnešní technice a moderním CNC strojům zhotovitelné. Avšak i dnes je za potřebí řešit nové problémy, vzniklé postupným vývojem nových metod, postupů a technologií.

Je žádoucí, aby byly výrobní programy pokud možno co nejvíce pružné. Lze tím eliminovat vliv vysokého tempa změn ve výrobě a výroba je tímto lépe schopna reagovat na různé změny, přicházející z různých inovací a změn parametrů jednotlivých produktů. Důležitým prostředníkem k postupnému snižování specializace je využití více-osých počítačově řízených multifunkčních obráběcích center, která jsou schopna kombinovat různé výrobní operace. Možnosti výroby jsou tímto povýšeny a lze zhotovovat vskutku komplikované tvary i na jedno upnutí.

Zdokonalování výrobních strojů však není jediný směr, který je třeba neustále posouvat dopředu. Ruku v ruce se zdokonalováním CNC obráběcích strojů jdou i softwary CAM, které slouží jako pomoc pro výrobu a musí se tomuto tempu taktéž přizpůsobit. Využitím CAM systémů lze značně snížit náročnost přípravy výroby komplikovaných ploch spojenou s přípravou NC kódu, čímž dochází ke zvyšování produktivity. Tyto pomocné počítačové systémy tím pádem představují nezastupitelného pomocníka při návrhu a výrobě volných tvarových ploch a samotné využití CA systémů rozšířilo možnosti obráběcích strategií. Dříve byly takovéto obrobky, hlavně z důvodu finanční náročnosti, zhotovovány převážně pro letecký, automobilový a energetický průmysl. Dnes jsou právě díky těmto moderním CAM respektive CAD/CAM systémům, nabízejícím mnoho univerzálních i specializovaných operací, dostupné podobné výrobky s podobně komplikovanými tvary víceméně pro všechny výrobní obory. Samotný vývoj CAM systémů znamená rozšiřování nabídky možných funkcí, zdokonalování a zefektivňování jednotlivých operací, optimalizaci drah nástroje atd., čímž dochází ke snižování výrobních časů, snižování nákladů a přizpůsobení software potřebám zákazníka.

1.1 Cíle

Tato diplomová práce je zaměřena na dokončování tvarových ploch. Každá výrobní operace má svoje různé specifikace a omezení. Popsání jednotlivých vztahů pro každou výrobní operaci (soustružení, vrtání, frézování atd.) by bylo komplikované a svým rozsahem velice náročné. Pokud se jedná o obrábění různých komplikovaných tvarových ploch, je tento proces ve většině případů spojen s frézováním. Z toho důvodu je i tato diplomová práce zaměřena na dokončovací strategie z hlediska frézování.

CAD/CAM systémy mohou vytvářet NC programy v závislosti na vytvarované geometrii povrchu. Jakkoliv tyto systémy poskytují částečnou pomoc programátorovi z hlediska výběru

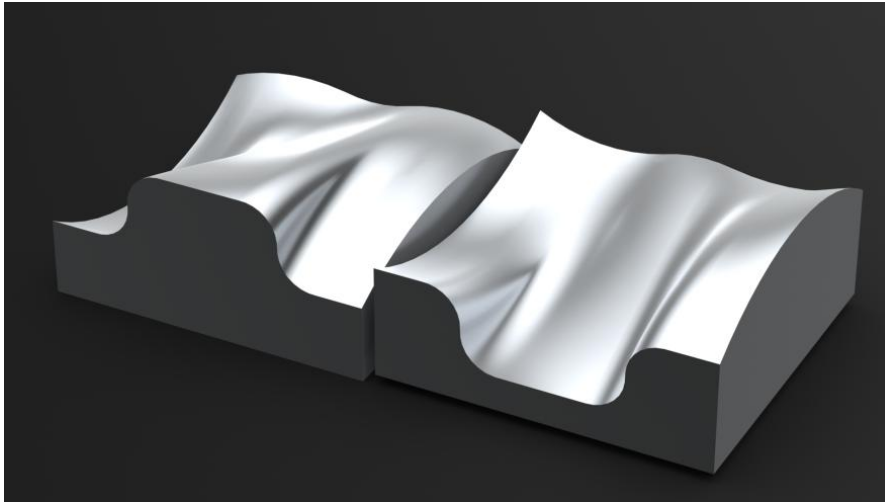
vhodných podmínek, jako jsou například posuv a otáčky vřetena, je obvykle tvarová plocha vytvořena na základě konstantních podmínek, které je programátor nucen použít s ohledem na nejkomplicovanější plochy, čímž je v podstatě nutné zvolit konzervativní řezné podmínky. Takovýto přístup je vcelku neefektivní. Některé CAD/CAM systémy nabízejí ve své nabídce adaptivní řízení nástroje, čímž dochází k zefektivnění obrábění, a také je možno nastavit zatížení nástroje tak, aby bylo relativně konstantní. Bohužel se tato možnost vyskytuje v podstatě jen u hrubování a dokončovací operace v CAM systémech tuto možnost nemají. Tudíž při dokončování tvarových ploch dochází ke kolísání řezné síly, což může negativně ovlivnit kvalitu výsledného povrchu a také opotřebení nástroje.

Cílem této diplomové práce je tedy navržení dokončovací strategie, která by omezovala výkyvy řezných sil a zajistila co nejstálější průběh řezných sil. Navržená strategie by měla samozřejmě také splňovat požadavky na výslednou kvalitu povrchu, jelikož kvalita obrobeného povrchu je sama o sobě podstatou dokončování. Všechny navržené strategie budou zároveň ověřeny na příkladu tvarové plochy.

2. Analýza současného stavu

2.1 Tvarové plochy

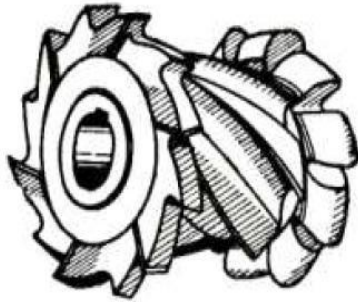
Tvarové plochy lze zjednodušeně charakterizovat jako různě zakřivené plochy, odlišujících se od konvenčních těles, kterými jsou válec hranol atd. V praxi se mnohdy vyskytují součásti, jejichž povrch je tvarován. Jejich tvar může být omezen přímkami, kružnicemi, nebo obecnými křivkami. Plochy mohou být zakřiveny v jedné rovině, nebo ve složitějších případech i ve třech navzájem kolmých rovinách. Samotné dvě základní obráběcí technologie lze obecně rozdělit dle využitelnosti na jednotlivá tělesa na základě jejich tvaru. Soustružení je vhodné k opracování rotačních těles, frézování je nejvíce využíváno na výrobu nerotačních součástí. Zatímco v minulosti bylo obrábění tvarových ploch díky nižší úrovni technické vyspělosti a vlivem nízké automatizace složité, dnes je výroba složitých výrobků mnohem dostupnější.



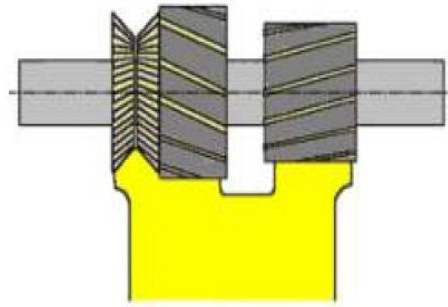
obrázek 2.1 - příklad tvarové plochy [1]

2.1.1 Obrábění tvarových ploch

Samotné obrábění tvarových ploch je ve většině případů doménou frézovacích operací. Možností je též aplikace moderních technologií obrábění vodním paprskem, laserem, popřípadě zhotovit složitou tvarovou plochu na 3D tiskárně, ale hlavní roli v této problematice zastává frézování. Na jednoduché tvarové plochy se využívají například tvarové frézy, nebo je možno jednoduché tvary obrábět dle orýsování. Složitější tvary lze zhotovit vzájemnou kinematikou nástroje a obrobku například na otočném stole, ale stěžejní je dnes obrábění s využitím více-osých CNC strojů. Zatímco předchozí způsoby byly uplatňovány spíše v minulosti, dnešní výrobě dominuje NC technika s uplatněním CAD/CAM systémů. Díky těmto moderním strojům lze dnes využít moderní techniku, nástroje, metody a obrábění tvarových ploch tím je povýšeno na vyšší úroveň.



Obr. 2. Fréza složená



Obr. 2a. Frézování lože obráběcího stroje frézami složenými

obrázek 2.2- dokončování tvarových ploch složenými frézami [2]

2.2 Frézování tvarových ploch

Jak bylo napsáno výše, k obrábění tvarových ploch se ve většině případů využívá frézování. To je samo o sobě velice rozšířená technologie, při níž dochází k úběru materiálu v podobě dělené třísky pomocí vícebřitého nástroje, který vykonává hlavní rotační pohyb. Vedlejší pohyb v podobě posuvu obrobku (popřípadě nástroje v závislosti na koncepci stroje) byl v minulosti prováděn sekvencí po sobě jdoucích přímočarých pohybů. Dnešní moderní CNC stroje zvládají vykonávat vedlejší posuvový pohyb po obecných tvarových křivkách ve všech souřadných osách stroje. Na frézkách, se dají zhotovovat různé tvary a plochy, podle požadavku zákazníka.

Obecně je známo, že frézování slouží ke zhotovování převážně rovinných a tvarových ploch, ale dnešní pokročilé metody a technika umožňují obrábět i tvarově komplikovanější součásti, což v důsledku znamená výkonnější obrábění, které však udržuje velmi dobrou kvalitu obrobku a rozměrovou přesnost.

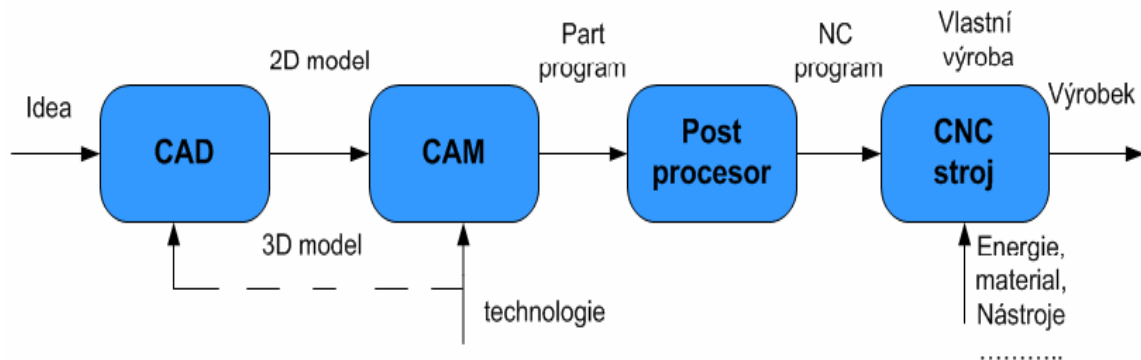
Samotná operace frézování je ovlivněna mnoha faktory, kterými jsou například výkon a přesnost stroje, nástroje a jejich trvanlivost, tuhost soustavy S-N-O-P, záběrové podmínky, zvolená strategie frézování atd. Proto je žádoucí, aby bylo předem rozmyšleno, jakým způsobem proběhne celé obrábění, aby bylo dosaženo požadované přesnosti a kvality. Vhodné je zvážit zařazení metod moderního obrábění, čímž může dojít k výraznému snížení výrobních časů a zvýšení produktivity.

Využitím CAD/CAM systémů v obrábění se v mnoha případech aplikuje strategie vedení nástroje (ZIG-ZAG), kdy je v podstatě uplatňováno sousledné i nesousledné frézování. Lze tím snížit čas spotřebovaný na přejezdech nástroje, čímž dojde ke snížení výrobního času. Avšak nástroj je v závislosti na aktuálnímu vedení nástroje po ploše vystavován různým dynamickým účinkům a zatížení nástroje se mění.

2.3 CAD/CAM (Computer Aided Design/Computer Aided Manufacturing)

Samotný CAD/CAM systém je počítačem podporovaný software, který slouží jako pomoc pro návrh a výrobu součástí. Vývojem softwaru došlo k integraci řetězce několika činností. Těmito činnostmi jsou modelování součástky a následný konstrukční návrh, návrh

technologie opracování součástí a technické dokumentace ve formě NC programu do jednoho počítačového systému.



obrázek 2.3 -Struktura výroby s aplikací CAD/CAM systému [3]

Modul CAD je programový nástroj sloužící v úvodní etapě výrobního procesu. Využívá se k vývoji a konstrukci součástí a zajišťuje přenos představ konstruktéra do PC. Konstruktor vytváří podle svých představ určité geometrické prvky a tvary, kterými zhotoví výsledný model produktu ve 3D. Popřípadě pomocí skic a obrysů ve 2D.

Modul CAM je programový nástroj, který má své využití při navrhování technologie a přípravě dat pro NC stroje s CNC řídicím systémem. Na základě vytvořené technologie se po ověření technologie v simulaci následně postprocesorem vygeneruje NC program. Při návrhu technologie se využívají data z CAD systému

Postprocesor slouží k transformaci obecných dat (CL data) z CAM systému na NC program pro předem nadefinovaný stroj a jeho řídicí systém.

2.4 Dělení frézovacích operací

K zhotovování tvarově složitých výrobků s využitím moderních CNC frézovacích strojů dochází převážně ve třech základních po sobě jdoucích operacích. Těmito operacemi jsou hrubování, předdokončování a dokončování přičemž každá z těchto operací má svůj účel.

2.4.1 Hrubování

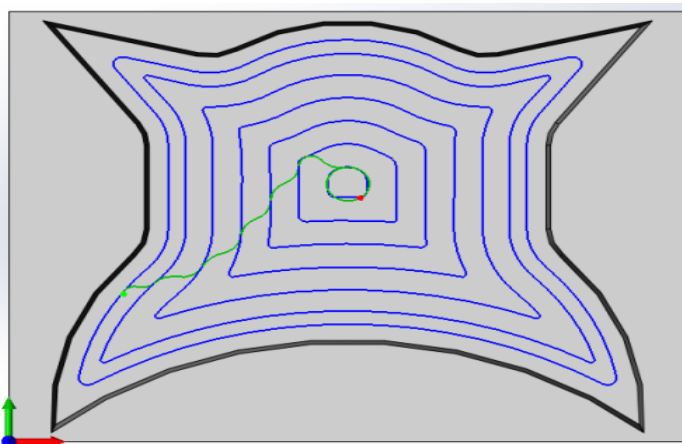
Hrubování vychází ze snahy odebrat pokud možno co nejvíce materiálu v co možná nejkratším časovém okamžiku. Výrazně jsou sníženy nároky na přesnost a kvalitu povrchu, které jsou ovlivněny zvoleným přídatkem pro následující operace. Pro hrubování se uplatňují především čelní válcové frézy jak v podobě monolitních fréz, tak v podobě hlavy s výměnnými břitovými destičkami. Někdy je zapotřebí přiřadit k prvotnímu hrubování další hrubovací operace. To může být zapříčiněno tvarem součásti, jelikož se zvolený nástroj nemusí dostat do všech požadovaných oblastí. Tyto oblasti je možno určit ručně, nebo je vygeneruje samotný software automaticky na základě výpočtů, beroucích v potaz požadovaný tvar, požadovaný přídatkem, velikost nástroje a stav po předchozí operaci.

2.4.1.1 Hrubovací operace v CAD/CAM systémech

Většina moderních CAD/CAM systémů disponuje klasickými operacemi jakými jsou například: hrubování, konstantní Z, rovinné, podle profilu atd. Každý výrobce software se snaží vylepšovat své produkty a získat tím konkurenční výhodu, která pomůže obstát v náročném konkurenčním prostředí. Jednou z takovýchto výhod je takzvané adaptivní obrábění, které je dnes například součástí CAD/CAM systému od firmy SolidWorks v podobě operace iMachining. V praxi je kladen veliký důraz na efektivitu obráběcích operací, což při vztažení na hrubování znamená odebrání co nejvíce materiálu za nejmenší čas, eliminaci přetížení a poškození nástroje a obrobku a připravení povrchu pro další operace. Právě adaptivní obrábění je schopno tyto podmínky dodržet.

2.4.1.1.1 Standardní generování drah

Právě běžně hrubovací operace zmíněné výše, u kterých se generuje dráha nástroje standardně v závislosti na obráběné geometrii, dostatečně nezohledňují různé úskali nástroje. Řezné podmínky, zatížení nástroje a řezné síly mají během samotného obrábění veliký vliv. Standardní generování dráhy však tyto aspekty nezohledňuje, což je obzvláště nevýhodné při hrubování, kdy je nástroj vystavován oproti dokončování mnohem většímu zatížení. V takovémto případě je zatížení nástroje proměnlivé stejně jako množství odebíraného materiálu.

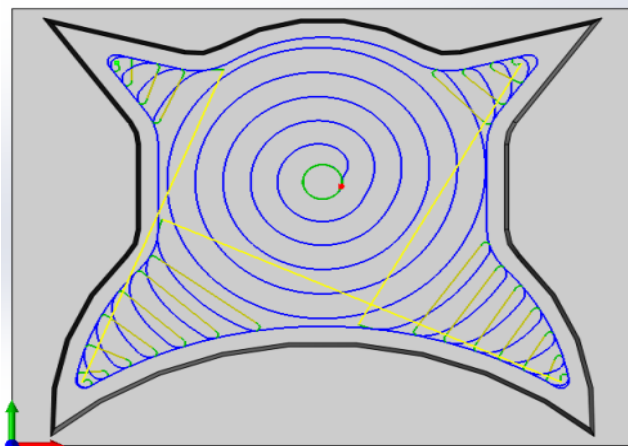


Obrázek 2.4 - dráha nástroje při standardním generování drah [4]

2.4.1.1.2 Adaptivní generování drah

Adaptivní obrábění vlastně znamená přizpůsobení obrábění více potřebám uživatele. Například softwaru HSM Works a Inventor HSM, užívající tuto technologii, mají při generování dráhy nastaveny parametry, které musí dodržet a nesmějí je přesáhnout. Právě podle těchto parametrů následně dojde k vygenerování dráhy. Adaptivní obrábění je koncipováno takovým způsobem, aby byla zajištěna stálost záběrových podmínek nástroje. Proto se specifikuje maximální zanoření nástroje do materiálu v podobě opásání, které v podstatě udává úhel kontaktu nástroje s materiálem. Tím je zajištěno, že nedojde

k překročení zadaného množství odebíraného objemu materiálu. Kladem je možnost využití maximální osvědčené posuvové rychlosti, aniž by docházelo k obavám o přetížení nástroje.

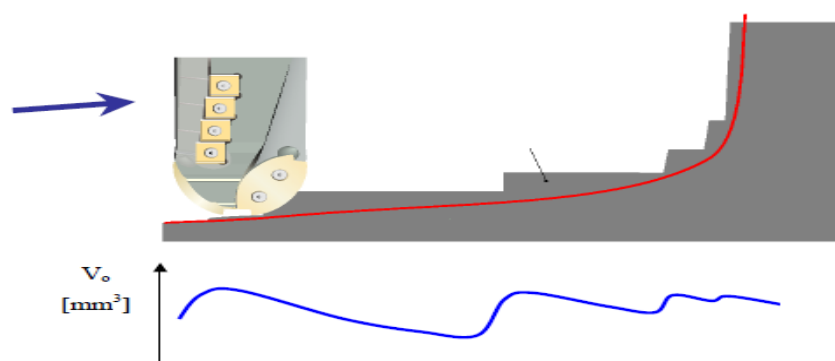


Obrázek 2.5- dráha nástroje při adaptivním generování drah[4]

Pokrok způsobený adaptivním obráběním, však neznamená zánik klasických drah, které byly vygenerovány standardním způsobem. Je to ale další krok v postupném zefektivňování výrobního procesu.

Vliv hrubování na průběh dokončování

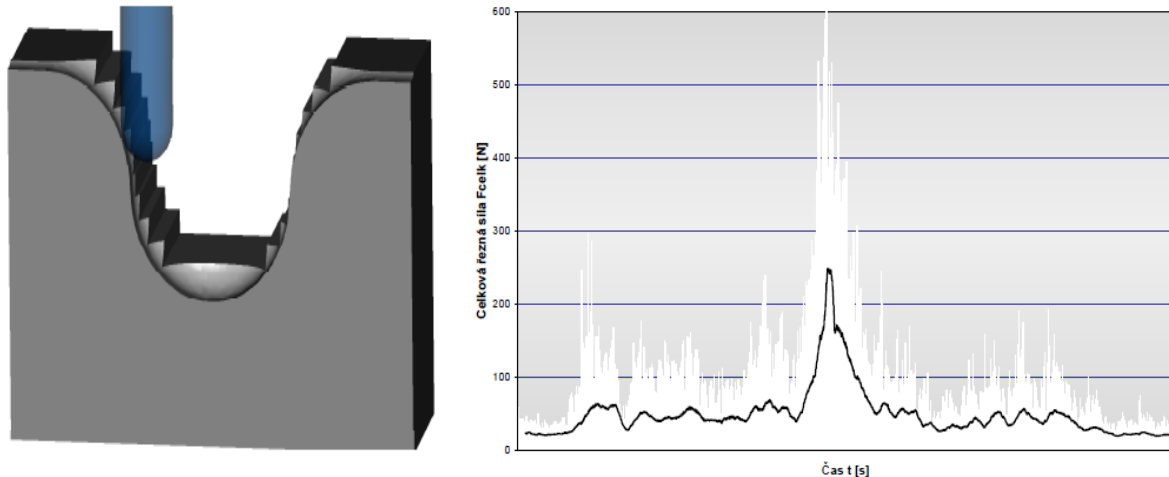
Výsledná kvalita a přesnost obrobené plochy je docílena dokončováním. Avšak nejde o samotný dokončovací proces a volbu strategie s ním spojený. Finální úprava plochy je závislá na předešlých operacích, tím pádem má samotné hrubování vliv na kvalitu výsledné plochy. V závislosti na proměnlivosti tvarových ploch dochází ke změně sklonu a plochy se mohou měnit například z konvexních na konkávní atd. Důležité je volit vzdálenost mezi jednotlivými dráhami nástroje tak, aby nebyly příliš velké rozdíly zbytkového objemu materiálu mezi jednotlivými dráhami. Při dokončení pak nástroj odebírá různé množství materiálu v závislosti na rozpočítání drah po ploše, jak je vidět na obrázku 2.6.



Obrázek 2.6-znázornění průběhu odebíraných objemů [5]

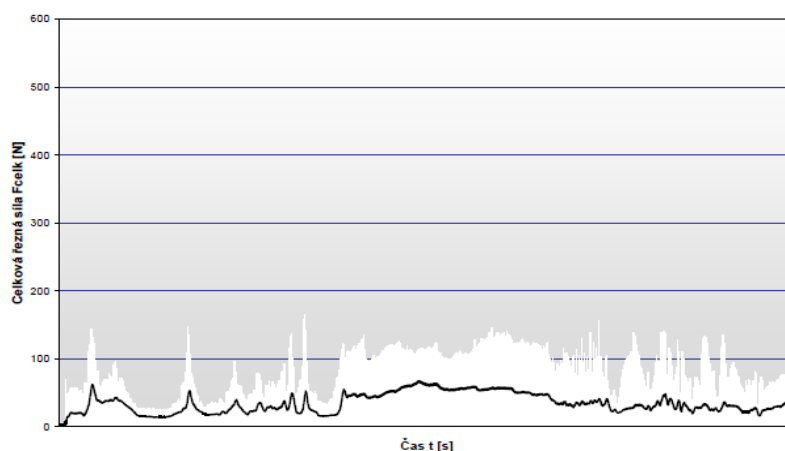
Vlivem různé velikosti zbytkových objemů, které setrvávají na obráběné ploše po hrubovacím cyklu, může docházet k přetěžování řezného nástroje. Dochází k riziku nestability řezného procesu, může dojít ke snížení trvanlivosti nástroje a dochází rovněž ke kolísání řezné síly, což způsobuje vychýlení špičky nástroje při řezném procesu. Řezné síly jsou závislé

na velikosti úběru materiálu, tím pádem je žádoucí, aby byl po hrubování ponechám co možná nejrovnoměrnější přídavek na dokončování. Místní prudký nárůst množství odebíraného materiálu by mohl vyvolat nadměrné opotřebení a popřípadě i destrukci nástroje. Hodnotu zanoření nástroje do zbytkové objemu, díky které je možno zjistit hodnotu aktuálního zatížení v podobě okamžitého průřezu třísky, lze určit na základě údajů z předchozí operace.



Obrázek 2.7- Obráběná plocha a průběh síly při konstantním posuvu [5]

Na obrázku 2.7 je patrné, že při využití konstantního posuvu došlo k prudkému nárůstu řezné síly v místě s velkým množstvím zbytkového materiálu. Podíl na skokové změně řezné síly má i vliv strategie vedení nástroje, jelikož při pohybu dolů dochází k tlačení nástroje do zbytkového materiálu. V tomto místě by mohlo hrozit přetížení nástroje. Z toho důvodu je důležité při dokončování optimalizovat řezné podmínky, tak aby se tomuto riziku předešlo. Na obrázku 2.8 je zobrazen průběh řezné síly po optimalizaci řezných podmínek. Na základě hodnoty hloubky třísky byl posuv snižován popřípadě zvyšován. Oproti prvnímu případu byl tedy posuv proměnlivý a závisel na hodnotě a_p . Jak je z grafu patrné, došlo k rapidnímu snížení výkyvů řezné síly.



Obrázek 2.8- Průběh síly při optimalizovaném posuvu [5]

Aplikací podobných optimalizací řezného procesu lze dosáhnout efektivnějšího obrábění, kvůli proměnlivým hodnotám zbytkového materiálu po hrubování. Proto je důležité věnovat hrubovacím a předdokončovací operacím velkou pozornost a snažit se o co nejrovnoměrnější přídavek na dokončování. Tím by nedocházelo k tak velikým výkyvům v průběhu řezných sil při využití konstantního posuvu a odpadla by tím nutnost hledat optimalizovaná řešení.

2.4.2 Předdokončování

Účelem předdokončování je eliminace velikých stop (tzv. schodů) po předchozí hrubovací operaci. Předdokončovací operace se zařazuje z toho důvodu, aby byla zajištěna pokud možno konstantní vrstva přídavku pro dokončování. To má žádoucí efekt na řezné podmínky, které by měly být při takovýchto podmínkách konstantní, tudíž i výsledné zatížení nástroje je v každý časový okamžik přibližně stejné. Pozitivní účinek konstantního zatížení lze spatřit ve výsledném nižším odtlačení nástroje a s tím spojenou lepší kvalitou obrobeneho povrchu. K operacím tohoto typu se převážně využívají toroidní frézy a frézy kopírovací. I zde může být základní operace doplněna o další předdokončovací operace, zaměřené na odstranění příliš velkého přídavku v rozích a podobných, obtížně dosažitelných míst.

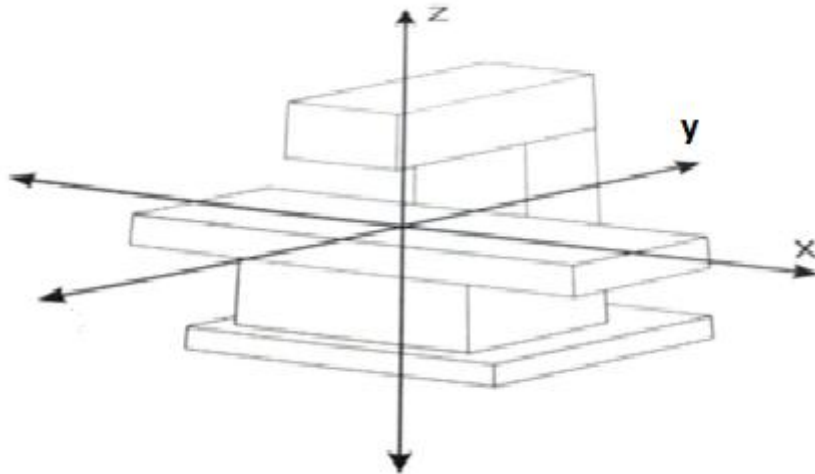
2.4.3 Dokončování

Při těchto operacích dochází k finálnímu opracování součástí. K dokončování tvarových ploch se nejčastěji používají kopírovací frézy. Základními atributy pro volbu vhodné dokončovací operace je kvalita obrobeneho povrchu a rozměrová přesnost obrobku. Pro splnění požadavků na přesnost a jakost se volí při dokončování malé hloubky řezu a posuvové rychlosti. Z toho lze vyvodit, že na dokončovací operace připadá největší spotřeba času. Při výběru nástroje je žádoucí, aby bylo pokud možno dokončit opracování součástí jedním nástrojem. Při využití více nástrojů při dokončování vznikají na povrchu stopy po jednotlivých nástrojích.

Přístupů pro dokončování je více. Jednou z univerzálních a často využívaných strategií frézování je strategie známá např. pod názvy konstantní Z nebo konturování v paralelních rovinách, při níž je obrobek rozdělen na vrstvy, jejichž tloušťka je dána hloubkou řezu. Frézování se provádí vrstvu po vrstvě. Pro každou vrstvu se vytváří obrys (kontura), odvozený od obrýsu součástky v dané výši, v případě hrubovací a předdokončovací operace s přídavkem pro následující operaci. Podle výzkumů a srovnávacích studií různých CAM systémů z hlediska výrobního času není rozhodující výška vrstvy (hloubka řezu), ale úroveň optimalizace drah nástroje při odebrání materiálu v jednotlivých vrstvách. Svou roli samozřejmě hraje i složitost tvaru jednotlivých vrstev a velikost nástroje. [6]

2.5 Obrábění ve 3 osách

Stroje zvládající souvislé řízení os X, Y, Z se nazývají 3 osé obráběcí stroje. Při tomto způsobu obrábění ve většině případů nástroj koná rotační pohyb, který je zároveň pohybem hlavním, a upnutý obrobek vykonává vedlejší pohyb (posuv, přísuv).



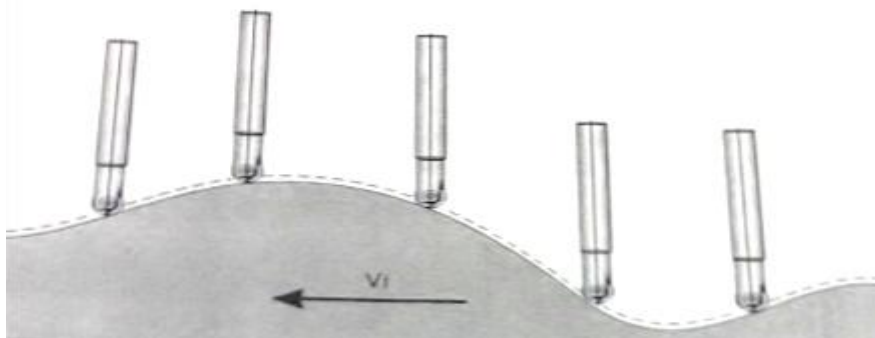
Obrázek 2.9-schéma orientace os u tříosé frézky [7]

V takovémto případě se nástroj pohybuje mezi dvěma body v prostoru, které musí obsluha předem v programu nadefinovat, různými způsoby. Může se pohybovat po přímkové či kruhové dráze, nebo po dráze ve tvaru spirály. Osa Z je ztotožněna s osou vřetena, tudíž i osa nástroje je shodná s osou Z. Náklon osy nástroje k rovině XY je tedy konstantní.

2.5.1 Řezné síly při 3 osém frézování obecných tvarových ploch

U strojů neumožňujících náklon vřetena je osa Z normála k ploše XY. Tím je dosaženo při obrábění rovinných ploch neměnného zatížení nástroje, kdy nástroj zajíždí do řezu při konstantní hodnotě úhlu záběru a směr posuvové síly je vzhledem k ose nástroje neměnná. Při takovémto způsobu obrábění je relativně jednoduché zjistit hodnoty řezných sil při obrábění čelní válcovou frézou či frézou kulovou. [7]

Výše popsaný stav obecně platí při frézování jednoduchých rovinných ploch. Při frézování obecných tvarových ploch je ovšem situace o poznání složitější. Úhel mezi osou nástroje a rovinou XY je stále konstantní, avšak povrch obrobku již není ztotožněn s rovinou XY. Úhel záběru je tím pádem proměnlivý v závislosti na tvarové ploše a nedá se ovlivnit. Stejně tak posuvová síla mezi nástrojem a obrobkem je proměnná a působí v jiném směru. Zatížení nástroje je tedy v každý časový okamžik různé, což má neblahý vliv na stabilitu řezání. Z toho důvodu je třeba upravovat a snižovat řezné a posuvové rychlosti, čímž dochází k zhoršení produktivity, zvýšení výrobních časů, změně jakosti obrobku atd.

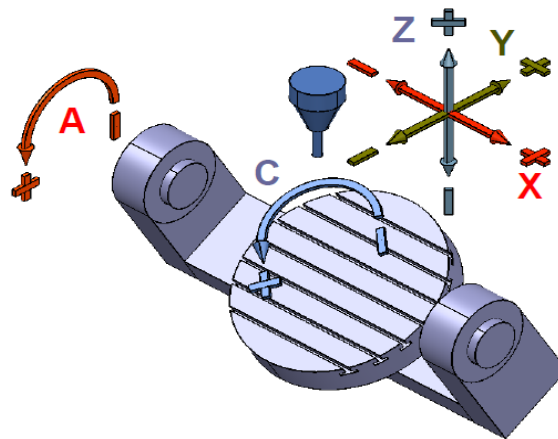


Obrázek 2.10- Kopírování tvarové plochy kulovou frézou při 3-osé technologii[7]

Problém v takovýchto případech nastává při obrábění různých kapes a vnitřních ploch, zejména pak při dokončovacích operacích kulovou frézou, při kterých hrozí, že bude povrch obráběn částečně špičkou nástroje. Špičkou nástroje prochází osa vřetena, tím pádem je v tomto bodě nulová řezná rychlost. Poloha a náklon nástroje vzhledem k obráběné ploše se mění, tudíž je i výpočet řezné síly v takovémto případě složitější a méně přesný.

2.6 5-osé obrábění

U 5osého obrábění se k souvislému řízení pohybu v souřadných osách X, Y, Z ještě přidává řízení rotací kolem jednotlivých os.

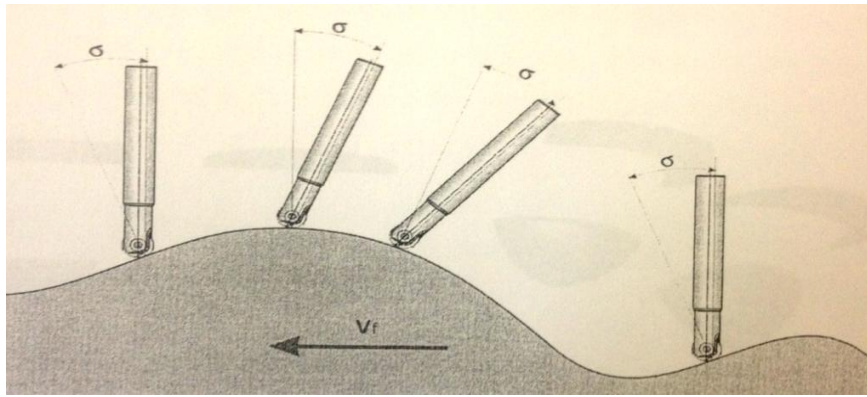


Obrázek 2.11-schéma možného provedení 5 osého frézovacího stroje [8]

V případě pěti osého obrábění je možné sjednocením pohybů udržovat předem určený konstantní náklon nástroje k povrchu obrobku. Není-li náklon proměnlivý, jsou řezné podmínky víceméně konstantní a také řezné síly se v průběhu obrábění nemění, což má pozitivní vliv na přesnost a jakost. Samozřejmě se jedná o relativně idealizovaný stav, jelikož konstantních řezných podmínek není možné, vlivem nerovnoměrného přídatku, různých vměstků, vibrací a dalších průvodních jevů obrábění, dosáhnout

2.6.1 Řezné síly při 5 osém obrábění

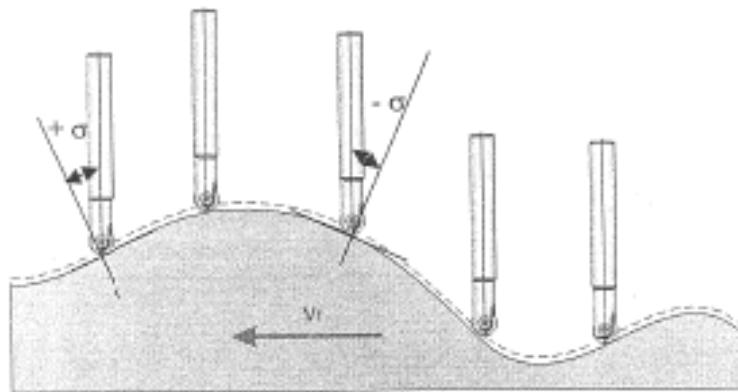
Pokud je znám úhel naklonění nástroje k obráběné ploše a zároveň je tento úhel konstantní v čase, lze výpočtem řezných sil predikovat zatížení nástroje. Z toho vyplývá, že je možné využít maximální možné namáhání nástroje během obrábění, aniž by došlo k jeho přetížení změnou záběrových podmínek. To je užitečné při správném výběru nástroje k požadované operaci. Samozřejmě je možné při konstantním úběru třísky optimalizovat řezné podmínky pro daný nástroj.



Obrázek 2.12- Konstantní úhel záběru při 5-osé technologii[7]

2.6.2 Vliv naklonění na řezné síly

O výše popisované problematice pojednává výzkumná zpráva Zatížení nástroje při frézování tvarových ploch od profesora Sovy, doc. Česánka a Ing. Dobrého [7], kde je podrobně popsána problematika obrábění tvarových ploch.



Obrázek 2.13- Změna úhlu záběru při užití 3-osé technologie[7]

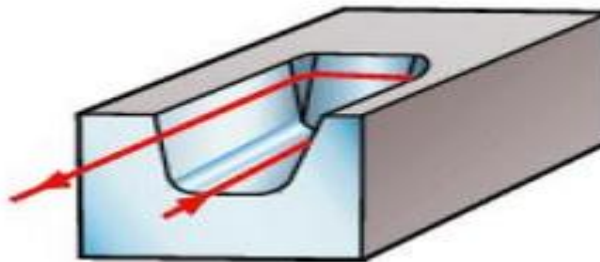
Na základě výzkumu, provedených experimentů a zjištěných hodnot byl vypočten průběh sil, na jehož základě bylo zjištěno, že se zvětšujícím náklonem frézy se zvětšují i síly působící na nástroj, důsledkem proměnlivé šířky třísky. Rozdíl maximální a minimální šířky třísky je pro úhel polohy zubu $\varphi = 90^\circ$ největší. Z toho plyne, že i řezná síla je při takovémto úhlu maximální. Z experimentu je také patrné, že dochází k rychlejšímu nárůstu zatížení při naklonění nástroje, což způsobuje jeho rozkmitání. Náklonem nástroje lze eliminovat místo s nulovou řeznou rychlostí a také snížit řezné síly na jednotlivých zubech, avšak namáhání nástroje se zvýší. [7]

2.7 Dokončování v CAD/CAM systémech

Při využití víceosého obrábění je důležité brát v potaz několik podstatných faktorů. Zvolená technologie je závislá na obráběném materiálu, typu zvoleného nástroje, komplikovanosti vyráběné součásti a na parametrech obráběcího stroje. V závislosti na složitosti tvaru obrobku jsou specifikovány nástroje potřebné k obrobění a řezné podmínky. Při použití CAD/CAM systémů lze obecně využít u dokončování tvarových ploch a dutin více přístupů.

2.7.1 Obrábění po vrstevnicích

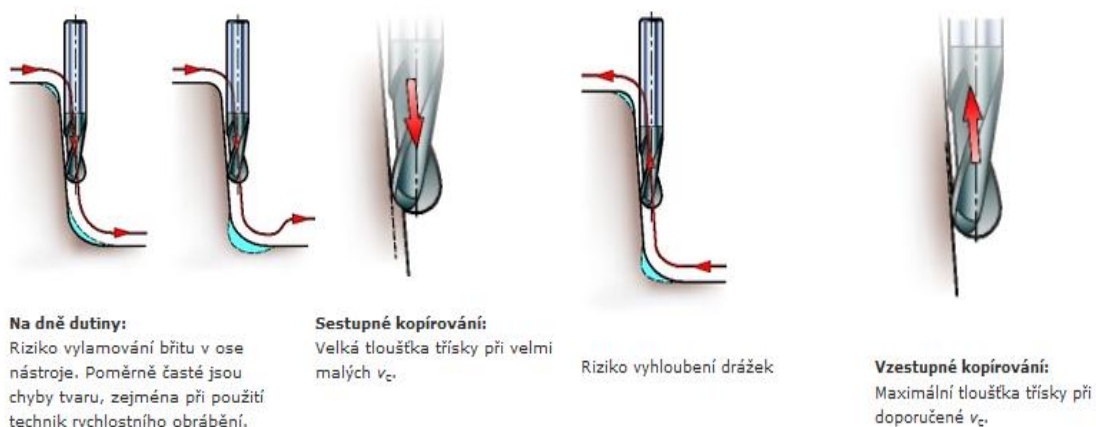
Tato technologie spočívá ve využití konstantních hladin neboli vrstevnic. Tyto křivky jsou spojnice bodů ležících ve stejné výšce. Při využití této metody nástroj odebrává materiál v daných vrstvách a až po obrobení kompletní vrstvy se nástroj dále posune hlouběji. Tento přístup je aplikovatelný u vnitřních kapes i pro vnější tvarové plochy při využití sousledného frézování. Výhoda u tohoto řešení je v možnosti uplatnění vysoké posuvové rychlosti a lepší kontrole řezné rychlosti, avšak v závislosti na tvaru (může dojít ke skokové změně vektoru směru pohybu a změně v_f). Je také vhodná k užití produktivní metody HSM. Problém může nastat při obrábění ploch s malým sklonem, kde je zapotřebí zmenšit axiální krok.



Obrázek 2.14- dráha nástroje při obrábění po vrstevnicích[10]

2.7.3 Kopírovací frézování

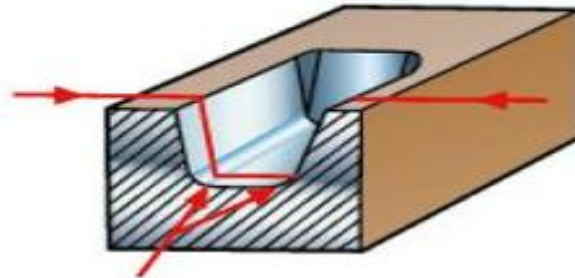
Při této metodě nástroj v podstatě kontinuálně kopíruje povrch obrobku. Jedná se o princip paralelních drah, kdy technolog předem nadefinuje vzdálenost mezi jednotlivými dráhami, které se vzájemně částečně překrývají. Aby bylo zamezeno obrábění špičkou nástroje, je opět výhodné využít naklonění nástroje, čímž v podstatě při frézování obecných tvarových ploch dochází k plynulému obrábění ve více osách. Důležité je vyhodnotit, zda dojde k vlečení nebo tlačení nástroje do materiálu, nebo zda se jedná o sestupné či vzestupné frézování. Na základě tohoto vyhodnocení je důležité následně upravit řeznou rychlost a posuv.



Obrázek 2.15- Kopírovací frézování[10]

Řídicí systém udržuje pohyb nástroje po ekvidistantě k obráběné ploše, čímž teoreticky zajišťuje v ideálním případě neměnnou hloubku záběru. Uplatnění této metody je při obrábění ploch s malým sklonem. Nevýhodou je však potřeba častého najíždění do materiálu a

vyjíždění z řezu, čímž dochází k negativním vlivům na celý řezný proces (otupení, vibrace atd.).

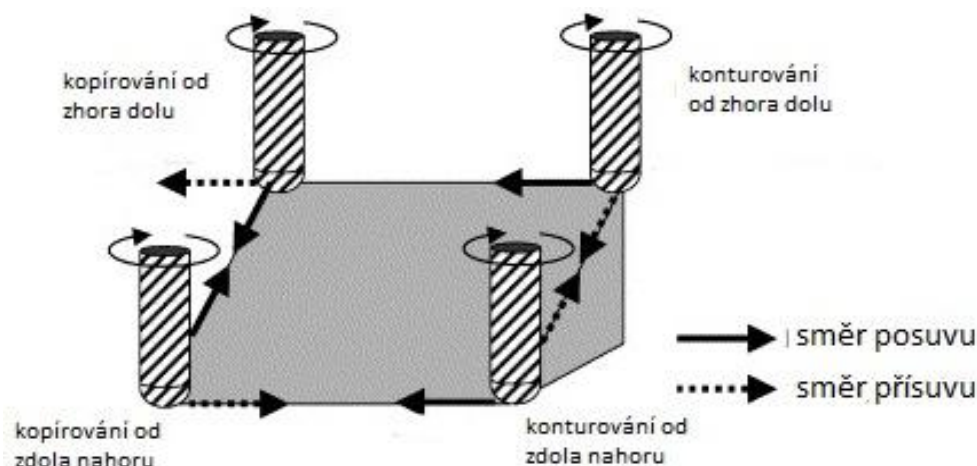


Obrázek 2.16-dráha nástroje při kopírování [10]

Přístupů k dokončování tvarových ploch je více než pouze výše zmíněné strategie. Obecně jsou však kombinací obrábění po vrstevnicích a kopírování. Většina funkcí je modifikací obrábění po vrstevnicích s možností editace dráhy ve vertikálním směru, z důvodu konstantního zatížení nástroje a požadavků na řezný proces a výsledné kvality opracování. Například rampování je příkladem úpravy dráhy z horizontálního způsobu obrábění do šroubovice a využívá se zejména při dokončování dutin. V tomto případě se nástroj pohybuje po obvodu dutiny po dráze, která má spirálovitý tvar a plynule se zanořuje hlouběji. Zjednodušeně se nástroj v první fázi zařezává do materiálu až na požadovanou hloubku nebo na dno obráběné dutiny. Povrch obrobku je v takovémto případě obráběn bočním bokem nástroje, což má pozitivní vliv v eliminaci vlivu nízké řezné rychlosti v blízkosti osy nástroje.

Metodu rampování je výhodné využít se sousledným frézováním. Při dokončování nehrozí náhodné nehomogenity v povrchu a při sousledném frézování se nástroj lépe zařizne do materiálu a nedochází k dalším negativním vlivům. Tato technologie je vhodná pro dokončování při malé hodnotě a_p .

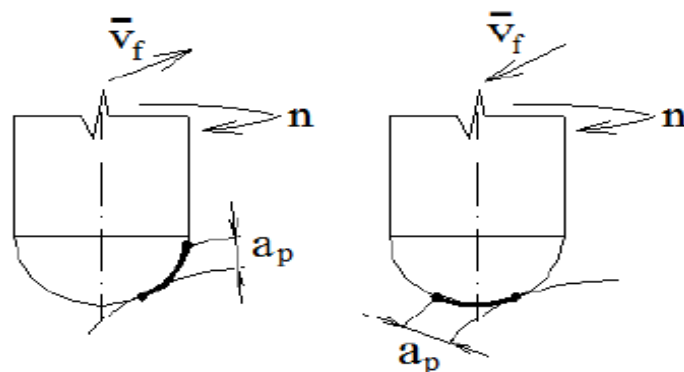
Při využití kopírovacího frézování a frézování po vrstevnicích lze v podstatě uplatnit dva přístupy. Plochy lze obrábět vedením nástroje od shora dolů nebo od zdola nahoru. U obrábění po vrstevnicích to znamená, že posuv je stále realizován po hladinách, ale přísuv je ve vertikálním směru veden směrem dolů či nahoru. Při využití těchto přístupů lze obecně vybírat ze 4 strategií, které jsou znázorněny na obrázku 2.17. Strategie obrábění po vrstevnicích je výhodná pro strmé plochy, zatímco kopírování je vhodné spíše pro plochy s malým sklonem.



Obrázek 2.17- Možnosti vedení nástroje po ploše[11]

Aby byl eliminován ztrátový čas spojený s přejezdy z koncového bodu jedné dráhy na výchozí pozici další dráhy, využívá se například metody ZIG-ZAG. Nástroj odebrává materiál v jednom směru a po dojetí do koncového bodu se přisune a začne odebírat materiál ve směru opačném. Dochází tím ke kombinování sousledného a nesousledného způsobu frézování. Pokud by bylo odebíráno velké množství materiálu, mohlo by docházet k různému namáhání nástroje v závislosti na aktuálním směru posuvu. Při dokončování je však odebírán pouze malá vrstva materiálu, tudíž je vliv na namáhání nástroje minimální. Samotné využití tohoto způsobu je výhodné z hlediska zkracování výrobních časů.

Vliv vedení nástroje po ploše je podstatný i z ohledu na dokončovací nástroj. Při obrábění se dostává část řezné hrany do záběru. V podstatě se jedná o dotykovou křivku mezi nástrojem a obrobkem. Polohu této křivky ovlivňuje směr posuvu frézy a může docházet k její změně i při konstantní hloubce řezu v závislosti na tvarové ploše. Na této části nástroje dochází k výraznému nárůstu teploty, deformace a celkově opotřebení. Zároveň má řezná hrana vliv na velikost průřezu odřezávané třísky a tím pádem zároveň ovlivňuje průběh a velikost řezných sil. Dotyková plocha nástroje je při stoupání nástroje po tvarové ploše na jedné straně od osy frézy. Při klesajícím pohybu frézy je řezná hrana okolo osy otáčení po obou stranách a prochází tedy přes střed nástroje, kde je nulová řezná rychlost. Z toho důvodu je vhodné tuto strategii využít při naklonění nástroje, aby došlo posunutí dotykové křivky mimo osu rotace frézy.

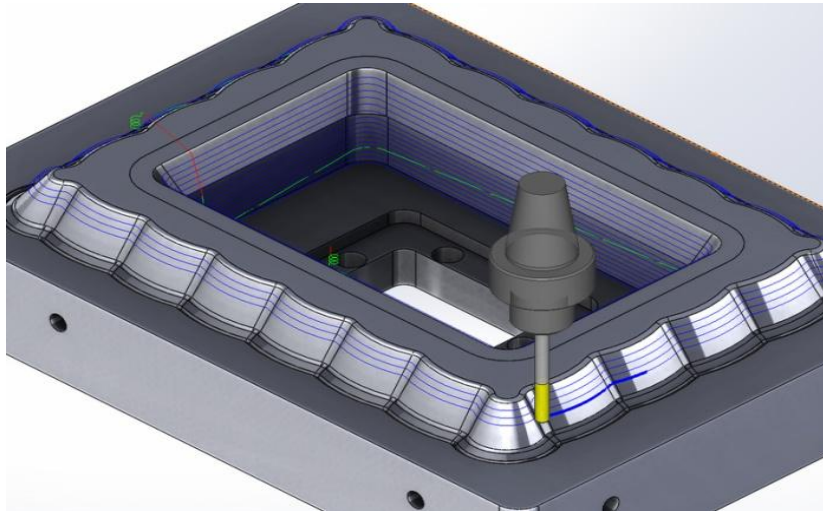


Obrázek 2.18- Změna řezné hrany při změně směru posuvu[8]

2.7.4 Příklady některých operací na dokončování tvarových ploch v CAD/CAM

Konstant Z

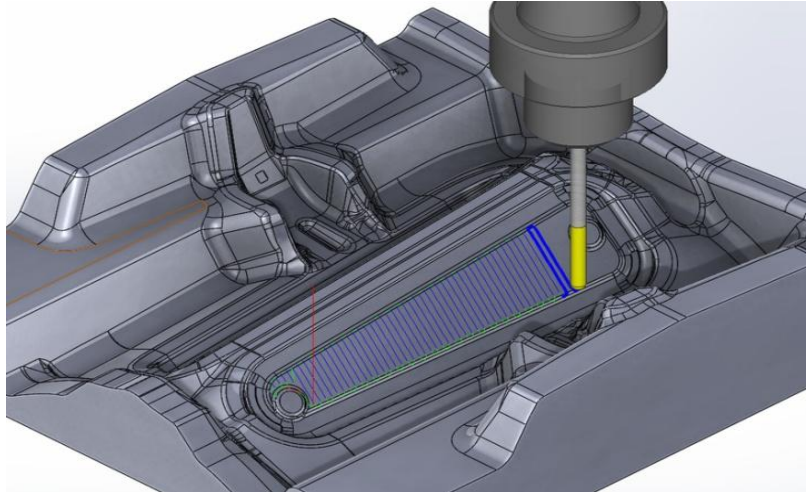
Jednotlivé dráhy jsou generovány z paralelních řezů tvarem v jednotlivých hladinách v ose Z. Tato operace má veliké uplatnění při dokončování strmých ploch. Lze stanovit limitní úhly, které omezí aplikaci této strategie pouze na strmé plochy a pro plochy s malým sklonem, pro které tato operace není ideální, zvolit jinou operaci. Velice často tedy dochází ke kombinaci s jinou operací. Typická je kombinace s řádkováním. K napojení obou operací pak dojde na hranici mezního sklonu.



Obrázek 2.19-příklad rozpočtení drah při operaci Konstant Z [9]

Řádkování

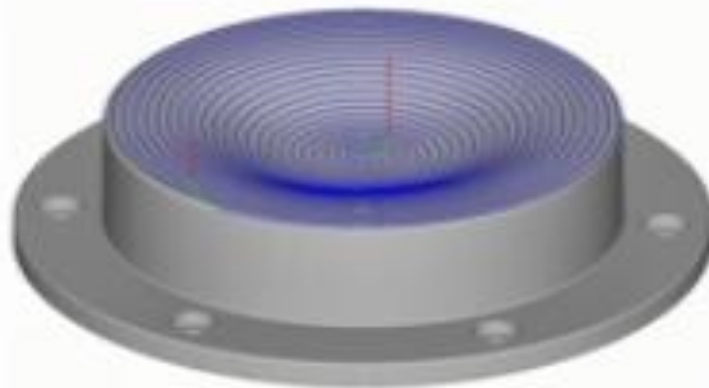
Jedná se o operaci hojně využívanou při dokončování tvarových ploch. Hodí se při snižování hran po hrubování a při dokončení plochých tvarů. V rovině XY jsou jednotlivé dráhy vzájemně rovnoběžné a v ose Z opisují (kopírují) tvar součásti. Je možné volit jednotlivé parametry radiálního a axiálního kroku v závislosti na požadavcích na kvalitu a přesnost obrobenej plochy. Pro dokončení celé tvarové plochy lze využít přístup, ve kterém je plocha, která v předchozím kroku nezískala požadovanou přesnost a jakost, obráběna na dvakrát a dráhy z prvního a druhého kroku jsou navzájem kolmé. Takovýto přístup však není příliš produktivní.



Obrázek 2.20- příklad rozpočtení drah při operaci Řádkování [9]

Spirála

V tomto případě je výsledná dráha ve tvaru spirály, což zajišťuje stálý kontakt nástroje s obrobkem. Krok definuje stoupání spirály a určuje vzdálenost mezi jednotlivými závity spirály. Střed spirály se obvykle volí automaticky, ale lze ho určit i ručně. Tento přístup se hodí pro dokončování mělkých kruhovitých tvarů.



Obrázek 2.21- příklad rozpočtení drah při operaci Spirála [9]

Další přístupy

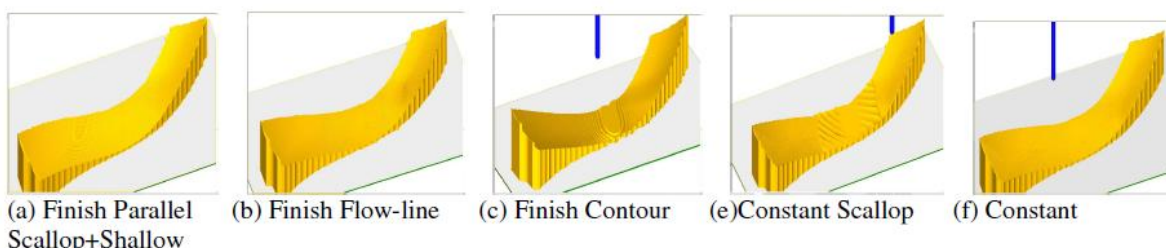
Další využívanou dokončovací operací je například Konstantní krok. U toho typu operace je udržován konstantní (ekvidistantní) krok od zadané křivky. Samozřejmě je zohledněn sklon jednotlivých tvarových částí. Vygenerované dráhy jsou od sebe na předem definované vzdálenosti a výsledný povrch je obroben s minimem přejezdů nástroje.

Jiný přístup vychází z obrábění plochy mezi křivkami. Dráha nástroje je při tomto způsobu generována na základě hranic tvaru a směrových profilů. Tvar dráhy je závislý na tvaru jednotlivých hranic a jednotlivé dráhy jsou plynule upravovány v závislosti na předchozí a následující dráze. Tím pádem dochází v každém kroku k úpravě vygenerované dráhy. Mezikřivkové obrábění se hodí k dokončování proměnlivých podélných tvarů.

Výčet výše uvedených operací není zdaleka konečný. Každý výrobce CAD/CAM systémů má svoje vlastní řešení a invence a jednotlivé operace u různých výrobců se mohou lišit. Avšak principy jednotlivých operací jsou podobné a vychází z principů kopírovacího a konturovacího frézování.

Z popisu jednotlivých operací v CAM systémech je patrné, že jejich využití je závislé na tvaru plochy a její geometrii. Některé operace jsou tedy obtížně využitelné pro některé typy tvarových ploch. To je evidentní z obrázku 2.22, kde je znázorněno porovnání vybraných operací na příkladu tvarové plochy v softwaru MasterCAM. Nejlepších výsledků dosáhl řádkovací způsob. Jak je z výsledků patrné, důležité je volit vhodnou funkci pro zvolenou tvarovou plochu. Jak je vidět z příkladu dokončovacího konturování, je vhodné tuto metodu používat pro strmé plochy ale pro mělké plochy je tato funkce nevyhovující. Výhodou řádkovacího způsobu je v tomto případě také čas potřebný k obrobení plochy, což je pro efektivní výrobu nezanedbatelný parametr.

Machining methods	NC [KB]	Simulation diagram	Feed Path Length [mm]	Rapid Path Length [mm]	Cycle Time	Efficiency	quality
Parallel	515.8	3-a	2539.828	454.349	5m43.68s	③	great
Flowline	258.8	3-b	2127.253	17.000	4m43.83s	①	perfect
Contour	517.6	3-d	2095.197	820.479	4m48.43s	②	bad
Constant Scallop	742.4	3-e	1703.711	63.03	3m47.69s	/	worst
Constant Scallop&Shallow	1131.7	3-f	2640.632	941.057	6m00.01s	④	good

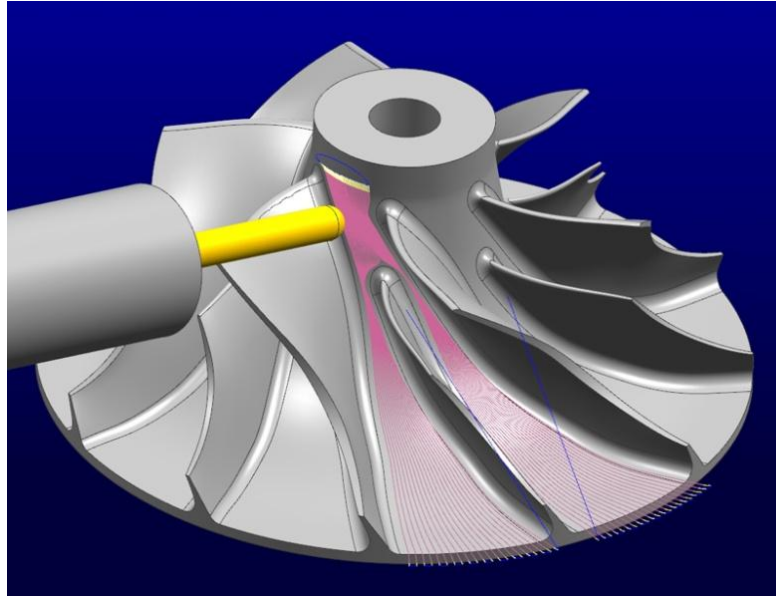


Obrázek 2.22- Porovnání vybraných strategií na příkladu tvarové plochy[13]

Speciální moduly pro dokončování tvarových ploch

Přední světové CAM systémy rozšiřují svoji vybavenost a produkují speciální moduly k různému užití. SolidCAM zakomponoval do své nabídky zajímavé moduly HSS (High Speed Surface) a HSM, které slouží k obrábění lokalizovaných tvarových i podřezaných ploch, avšak pouze ve třech osách.

Existují ale i jiné moduly, které si najdou svoje využití v obrábění tvarových ploch. NX CAM disponuje speciálním modulem pro obrábění oběžných kol turbín. Jeho pomocí se obrábí typizované části geometrie dílu (lopatky, mezilopatky atd). Programátor může v tomto modulu definovat radiální a axiální krok, popřípadě pouze zadat hodnotu Scallop height a software si dráhy dopočte automaticky.



Obrázek 2.23- Využití speciálních modulů[14]

2.8 Problematika dokončování v CAD/CAM systémech

V závislosti na nových požadavcích zákazníků došlo postupem času k aplikaci produktivních metod, kterými jsou vysokorychlostní obrábění (HSC), obrábění vysokými posuvovými rychlostmi (HFC) a vysoce výkonné obrábění (HPC), do výrobních procesů. Mnohé CAD/CAM systémy dokázali integrovat tyto produktivní metody do své nabídky obráběcích operací včetně adaptivního řízení drah, což zajišťuje velkou výhodu z pohledu produktivity práce. Uplatnění všech těchto strategií je však rozdílné, jak už z jejich názvu vypovídá.

Při hrubování má technolog jednoznačné zadání, odebrat co nejvíce materiálu za nejkratší dobu. Kvalita obrobeného povrchu musí být taková, aby bylo možno plnohodnotné dokončení s odpovídající výstupní kvalitou povrchu. Komplikace však nastává při dokončovacích operacích. Právě produktivní metody v kombinaci s adaptivním řízením drah v závislosti na obráběné ploše se při dokončovacích operacích ve většině CAM systémů nevyskytují. Právě dokončovací operace však dávají součásti finální tvar a spotřebují veliké množství času.

Moderní CAD/CAM systémy disponují mnoha operacemi, kterými je možno výrobek dokončit. Každá operace má svoje uplatnění a hodí se pro různé plochy. Každá operace však vychází z výše uvedených přístupů, popřípadě jsou tyto přístupy určitým způsobem upraveny podle potřeby. Jak již bylo uvedeno, jedná se kopírovací frézování a obrábění po vrstevnicích(konturovací).

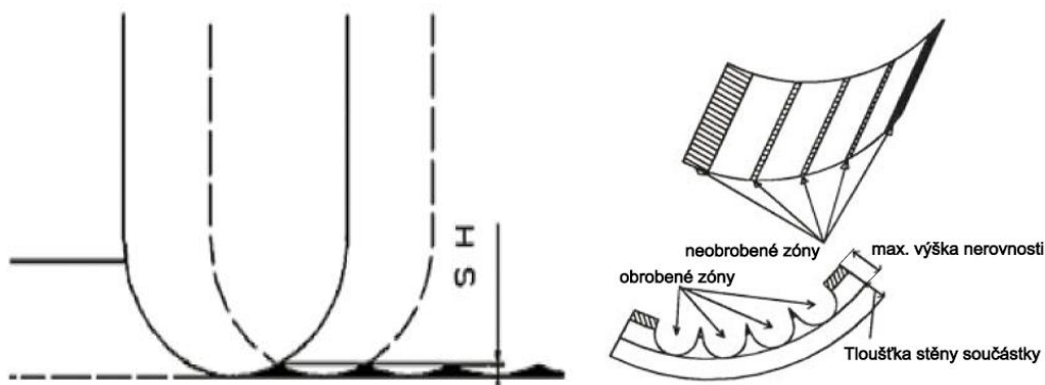
Při dokončování tvarových ploch je výhodnější zvolit konturovací frézování. Samotný celosvětový výrobce nástrojů firma Sandvik Coromant udává, že kopírovací frézování je vhodné aplikovat pouze ve zvláštních případech obrábění tvarových ploch.

2.8.1 Dokončovací operace v závislosti na typu tvarové plochy

Výše uvedené operace jsou, jak je z jejich popisu patrné závislé na tvaru obráběné plochy. Hlavní parametr podle kterého se popsané operace vybírají je sklon dané plochy. Podle sklonu plochy lze rozčlenit dostupné dokončovací operace do tří skupin. [15]

První část dokončovacích operací slouží k dokončování svislých stěn a stěn s malým úhlem sklonu. Vygenerované dráhy jsou závislé na stanoveném axiálním kroku dle požadavků programátora a CAM systém si sám dopočte radiální krok. Uživatel též může stanovit maximální úhel sklonu plochy určené k obrábění. Druhá varianta je zadání hodnoty Scallop height.

Parametr Scallop height v podstatě udává výšku nerovnosti. V praxi se jedná o nerovnost profilu Rz, která je měřena příčně na směr dráhy nástroje. Přesnost kopírování povrchu nástrojem lze ovlivnit právě zadáním vhodného parametru Scallop height a současně vhodně zvolenou hodnotou Machining tolerance, která udává přípustnou odchylku dráhy nástroje od teoretického modelu. Nastavení parametru Scallop height je v podstatě stanovení výsledné kvality obrobeneho povrchu. [16]



Obrázek 2.24- Scallop Height [16]

Druhá část dokončovacích operací je určena pro plochy mělké plochy a tvarové plochy s horizontálními rysy. Rozdíl oproti předchozí skupině je v tom, že programátor definuje radiální krok a software si sám dopočte axiální krok. CAM systém následně podle těchto hodnot a tvaru součásti vygeneruje výsledné dráhy nástroje. Podobně jako tomu bylo u předešlé skupiny je i zde možnost generovat dráhy dle hodnoty Scallop height a určit maximální sklon plochy k obrábění.

Poslední skupina operací je vhodná pro plochy s přechody v horizontálním a vertikálním směru. Dráhy nástroje jsou při těchto operacích generovány podle směru normál k povrchu. Obvykle se jedná o kombinaci prvních dvou skupin. Technolog v tomto případě definuje jak axiální, tak radiální krok. U některých CAM systémů je možno generovat dráhu dle hodnoty scallop height popřípadě stálým krokem dle definované 3D křivky.

Využití těchto operací je dostačující v případě, že přechody jednotlivých tvarů jsou jasně definované. V tom případě může programátor pro jednotlivé plochy nadefinovat vhodné operace a výsledné opracování by mělo být v případě vhodně zvolených parametrů

uspokojivé. Ve strojírenské praxi se však často vyskytují plochy, které jsou mnohem komplikovanější a tvarové plochy jsou tak proměnlivé, že výše popsané operace jsou pro obrobění takovýchto ploch nedostačující. Aby bylo dosaženo požadované kvality povrchu dochází obvykle ke snižování axiálního a radiálního kroku. Tím dochází k většímu překrývání drah nástroje, lepší kvalitě obrobeného povrchu, ale s velikým nárůstem výrobních časů. Částečným řešením by byla možnost využití adaptivního řízení drah, které by přizpůsobilo výsledný pohyb nástroje blíže požadavkům uživatele. Adaptivní generování drah se však při dokončování, jak už bylo zmíněno, u těchto operací nevyskytuje.

2.9 Nástroje pro dokončování

Obrábění opravdu složitých tvarových ploch je problematické nejen z důvodu generování drah. Samotný nástroj, kterým je při dokončování ve většině případů kulová fréza, má v každý časový okamžik jiné stykové místo s obrobkem v závislosti na tvaru obráběné plochy, což vede ke změně určitých parametrů. Průřez odebírané třísky je proměnlivý a mění se tím i řezná síla. Změna zatížení nástroje může mít důsledek v kvalitě obrobeného povrchu. Mění se také efektivní řezná rychlost, což je opět nežádoucí jev. Následující kapitola bude tím pádem věnována nástrojům, jelikož mají na celý výrobní proces zásadní vliv.

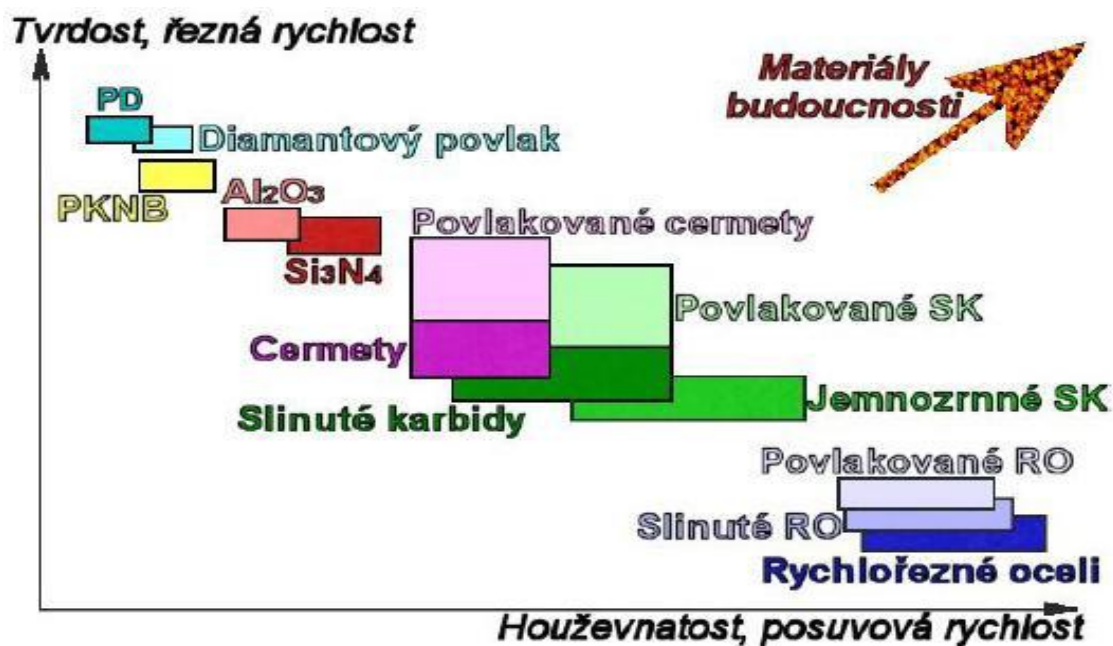
Jak již bylo v předchozích kapitolách popsáno, vývoj jde neustále kupředu. Stroje, softwary, postupy se neustále zdokonalují a ruku v ruce s tímto vývojem jdou i řezné nástroje. Inovace v nástrojích není spojena jen s vývojem nových nástrojových materiálů. Inovovány jsou konstrukční provedení nástrojů, dochází k vývoji nových tenkých vrstev a jejich aplikaci v různých kombinacích na nástroj tak, aby byly zajištěny nejlepší možné vlastnosti nástroje. Všechny jednotlivé aspekty ať už geometrie, mikrogeometrie, povrch nástroje hrají velkou roli při obrábění tvarových ploch, proto jsou znalosti a vhodný výběr nástroje při obrábění tak podstatné.

Rozvoj frézovacích strategií klade nové požadavky na výkonnost a univerzálnost nástrojů. Světoví producenti na to reagují neustálým rozšiřováním svého sortimentu a zavádějí specifické řešení fréz s víceúčelovým nasazením. Ideální řešení pro výrobní podniky spočívá v obrobění celé součástky jediným nástrojem v požadované kvalitě. To je však v podstatě nerealizovatelné obzvláště u tvarových ploch. Proto lze obecně rozdělit nástroje na hrubovací a dokončovací, avšak jsou samozřejmě i jiná hlediska, podle kterých lze frézovací nástroje rozdělit.

Samotná volba nástroje pro jednotlivé frézovací operace musí vzít v potaz skutečnosti, kterými jsou například obrábění daného materiálu a jeho tvar, nároky na požadovanou přesnost a jakost, zvolenou strategii obrábění, aplikaci produktivních metod atd. Proto je důležité volit nástroje dostatečně dimenzovaný, s vhodným počtem břitů a vhodně stanovenou geometrií, aby bylo sníženo riziko přílišného zatížení břítu řeznými silami a byly eliminovány vibrace a další negativní průvodní jevy obrábění.

S vzrůstajícími požadavky na snižování výrobních časů jsou čím dál častěji zaváděny produktivní vysokorychlostní metody. Těmto metodám však přestávají stačit jak rychlořezné oceli, jelikož nedosahují požadované tvrdosti a teplotní odolnost také není pro tyto operace

vhodná, tak i diamant při obrábění ocelových dílců vlivem afinity uhlíku k železu. Na obrázku 2-25 je graf závislosti tvrdosti a houževnatosti nástrojových materiálů. U frézování je důležité brát v potaz, že se v podstatě jedná o dynamický proces, při kterém dochází k rázům, tudíž není příliš vhodné pro křehké materiály, kterými jsou například kubický nitrid boru a keramika. Výrobci nástrojů jsou však schopni minimalizovat toto riziko a lze dnes na trhu pořídit i monolitní keramické frézy. K dokončování se pak využívají nástroje hlavně ze slinutého karbidu.



Obrázek 2.25- Nástrojové materiály [17]

2.9.1 Dokončovací nástroje

Při dokončování tvarových ploch se obecně využívají kulové (kopírovací) frézy. Kulové frézy mají řeznou hranu ve tvaru rádiusu. Tento typ fréz lze dále rozdělit na monolitní kulové frézy a kulové frézy s vyměnitelnými břitovými destičkami či hlavičkami. Na dokončování tvarových ploch lze taktéž využít takzvané toroidní a kopírovací frézy. Využití lze hledat zejména u produktivních metod HFC a HPC. Rádus zaoblení ostří u toroidních fréz není totožný s poloměrem frézy, čímž se liší od kulové frézy. Kopírovací frézy jsou obvykle opatřeny kruhovými destičkami a výhoda je v malém riziku vzniku vibrací.



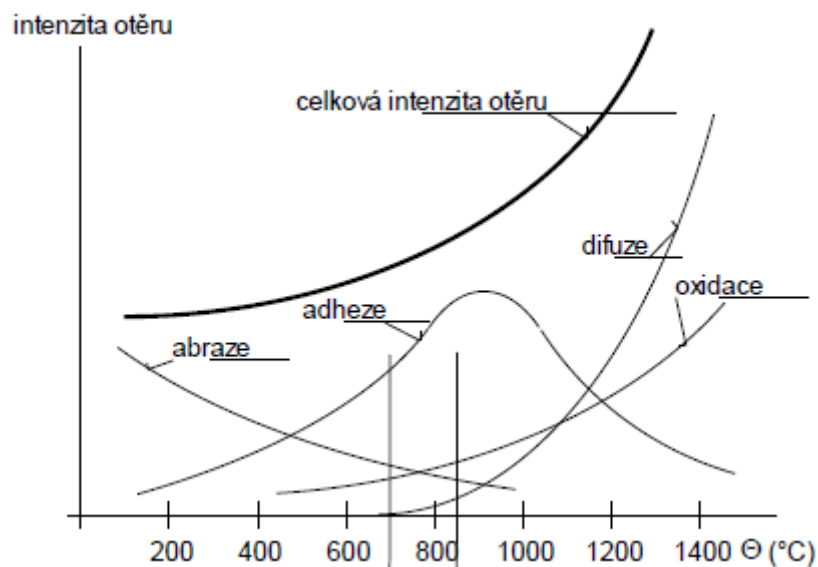
Obrázek 2.26- Výměnná hlavička pro dokončování [18]

Monolitní kulové nástroje se vyrábějí nejčastěji z tvrdokovu popřípadě z rychlořezné oceli. K upínání se využívá válcová stopka. Monolitní frézy lze pořídit v provedení s různým počtem břitů vedených ve šroubovici, obvykle mají však minimálně dva zuby. Škála průměrů je velká a nejmenší frézy mají i průměr menší než 1 mm. Podobným případem je taktéž kulová fréza s VBD, kde je břit frézy nahrazen vyměnitelnými břitovými destičkami, což má pozitivní vliv na náklady na nástroj, jelikož dochází pouze k výměně VBD namísto celého nástroje.

2.9.2 Namáhání a opotřebení nástrojů při dokončování

Řezný nástroj je v průběhu obrábění zásadně ovlivňován silovým a tepelným působením mezi břitem a obráběným materiálem. Při dokončovacích operacích je odlišná intenzita jednotlivých účinků na břit nástroje oproti hrubovacím operacím. Vzájemnou interakcí mezi nástrojem a obrobkem dochází k opotřebování břitu nástroje. Jedná se o opotřebení otěrem a plastickou deformací.

Otěr lze zaznamenat při jakémkoliv obrábění řeznými nástroji a vyskytuje se ve stykové ploše břitu s obrobkem. Při kontaktu těchto dvou materiálů dochází k fyzikálně-chemickým jevům vlivem působení tlaku a vzrůstající teplotě. Z fyzikálního hlediska jsou stěžejní brusný otěr (abraze) a přilnavost (adheze). Difúze a reakce jednotlivých materiálů má veliký vliv na opotřebení z hlediska chemického.



Obrázek 2.27 - Závislost intenzity otěru na teplotě[19]

Brusný otěr způsobují tvrdé částice v obráběném materiálu. Veliký vliv abraze může být u materiálů, které mají nehomogenní strukturu (např. litiny). Tyto tvrdé částice ryjí do povrchu nástroje a vytvářejí tím brusný otěr. Důležitý vliv zde má taktéž vysoká teplota a tlak. Otěr způsobený přilnavými účinky jednotlivých materiálů převažuje při obrábění chemicky příbuzných materiálů s řezným nástrojem. Při obrábění řeznými nástroji dochází k bodovému dotyku nástroje s obrobkem. Pokud nejsou vhodně nastaveny řezné podmínky, může docházet k návarům za studena a následně dochází k vytrhávání částic břitu.

Otěr způsobený chemickými účinky je způsoben difuzí a chemickými reakcemi. Difuze se vyskytuje při vysokých teplotách řezání nad cca 680°C. Dochází v podstatě k přesunu atomů do mřížky jiných prvků, popřípadě při teplotách nad 1200°C difundující prvek vytváří s jinými prvky mezikovové sloučeniny. Chemický otěr se vyskytuje při teplotách nad 700°C, když dochází k reakci určitých prvků v břitě s řezným prostředím (vzduch, procesní kapalina), popřípadě s obráběným materiálem.[19]

Tyto mechanismy ovlivňují opotřebení při různých podmínkách pokaždé jinou mírou. Typ a intenzita jednotlivých mechanismů opotřebení závisí na vlastnostech obráběného a řezného materiálu, typu řezného prostředí, teploty a řezné rychlosti. Celková velikost opotřebení je však dána působením jednotlivých mechanismů. Hlavními faktory, kterými je výsledné opotřebení ovlivněno, jsou[11]:

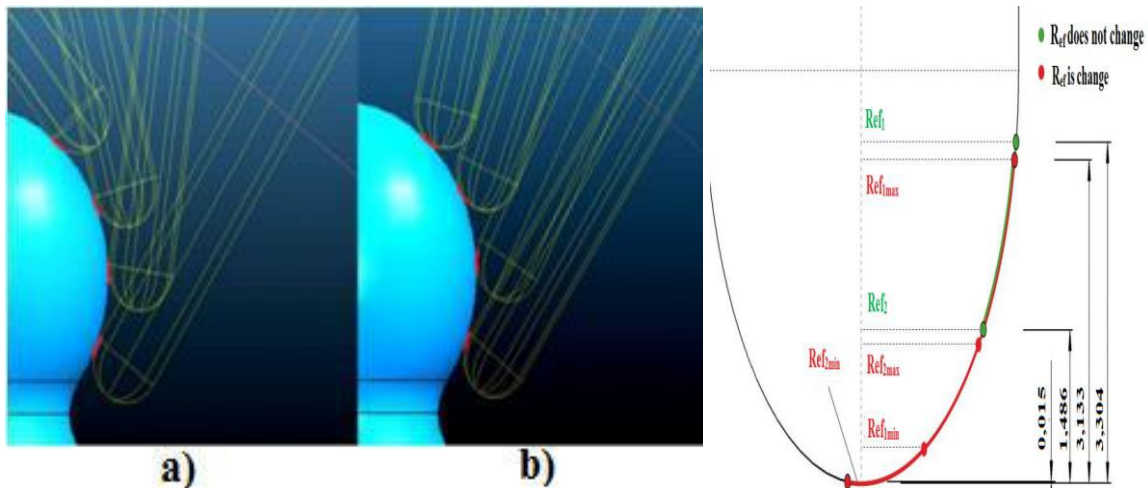
- kombinace řezného materiálu a materiálu obrobku
- technologické podmínky obrábění
- stabilita řezného procesu
- frézovací strategie

Jelikož se tato diplomová práce zabývá návrhem strategie, která by měla zohledňovat zatížení nástroje, je důležité pro lepší pochopení dané problematiky více přiblížit vliv frézovacích strategií na opotřebení nástroje.

2.9.3 Vliv strategie na opotřebení

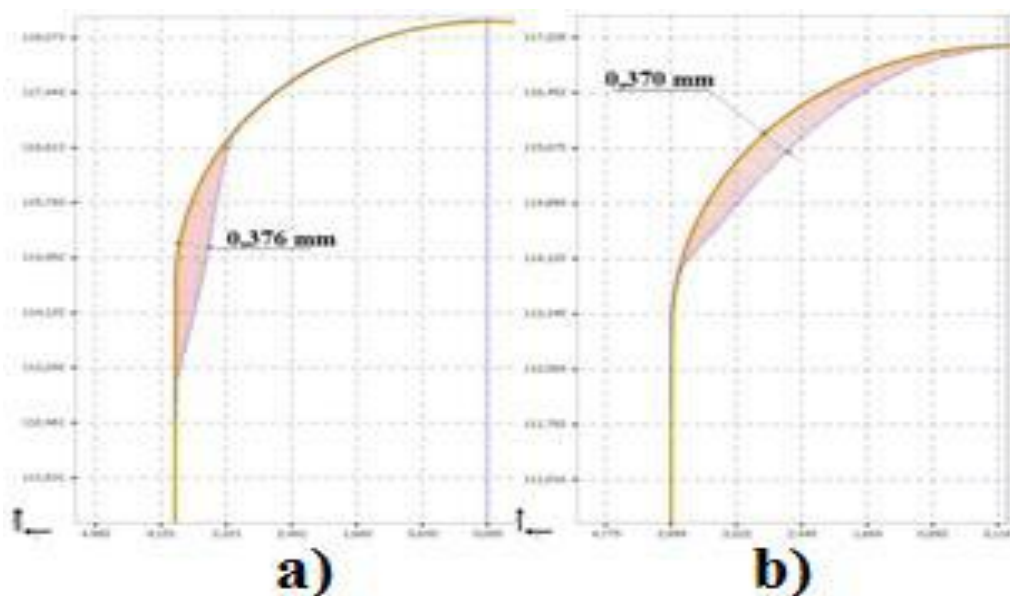
Opotřebení nástroje je jev nežádoucí doprovázející každý obráběcí proces. Velikost opotřebení ovlivňuje průběh řezných sil, řeznou teplotu a kvalitu obrobeného povrchu. Jak je však z předchozí kapitoly patrné, intenzita opotřebení se dá určitým způsobem ovlivňovat a snižovat. Vliv parametrů jako je řezná rychlost a teplota je obecně znám. Tato část je zaměřena na opotřebení vzhledem ke zvolené strategii v CAM systému.

Výzkum prof. Petera Pokorného a Ing. Rudolfa Zaujece [20] se zabýval porovnáním strategií dokončování tvarové plochy s ohledem na opotřebení. První strategie byla dána konstantním efektivním poloměrem nástroje. Strategie byla uzpůsobena tak, aby byl zajištěn konstantní bod kontaktu mezi nástrojem a tvarovou plochou. Druhá strategie využívala proměnné hodnoty R_{ef} a kontaktní bod mezi nástrojem a tvarovou plochou byl tedy taktéž proměnlivý. Pro rozpočet drah při této strategii sloužila operace Constant Z.



Obrázek 2.28- Konstantní a proměnný dotkový bod nástroje s plochou [20]

U první varianty je předpoklad většího opotřebení, ale toto opotřebení by mělo být pouze lokální dle části řezné hrany v záběru. Ve druhé strategii dochází k neustálé změně křivky dotyku mezi nástrojem a obrobkem, tudíž i kontaktní bod se mění. Opotřebení by tedy nemělo být tak intenzivní v jednom místě nástroje, avšak opotřebením by měla být ovlivněna větší část nástroje než u první strategie. Dále také při druhé strategii taktěž dochází k nárůstu teplem ovlivněné oblasti nástroje, což je způsobeno většími řeznými silami, které jsou způsobeny obráběním částí kulové frézy, která je v blízkosti osy nástroje. Tím dochází k obrábění řeznou rychlostí blízkí se k nule a nástroj materiál hrne před sebou.



Obrázek 2.29- Opotřebení nástroje pro jednotlivé strategie [20]

V případě aktivního řízení první strategie, bylo by možné po určité době a nabytí požadované hodnoty opotřebení změnit polohu nástroje do druhé předdefinované polohy, čímž by byl vytvořen druhý neměnný bod. Změnou kontaktního bodu na neopotřebovanou část břitu by došlo ke zvýšení trvanlivosti nástroje.

2.10 Využití inteligentních systémů při dokončování

Zajímavým, avšak odlišným směrem ve vývoji adaptivního řízení dokončovacích operací a kontrole řezných sil při vysokorychlostním dokončování za pomoci využití inteligentních systémů se zabývá výzkumná zpráva [21]. Záměrem tohoto výzkumu je řídit parametry řezného procesu při využití umělé inteligence, (neurální sítě, genetické algoritmy) přímo při obrábění. Cílem tohoto kombinovaného řídicího systému je udržování úběru materiálu při obrábění tak vysoko, aby byly co nejlépe využity možnosti stroje a nástroje, a také udržovat řezné síly nejbližší k předem stanoveným hodnotám.

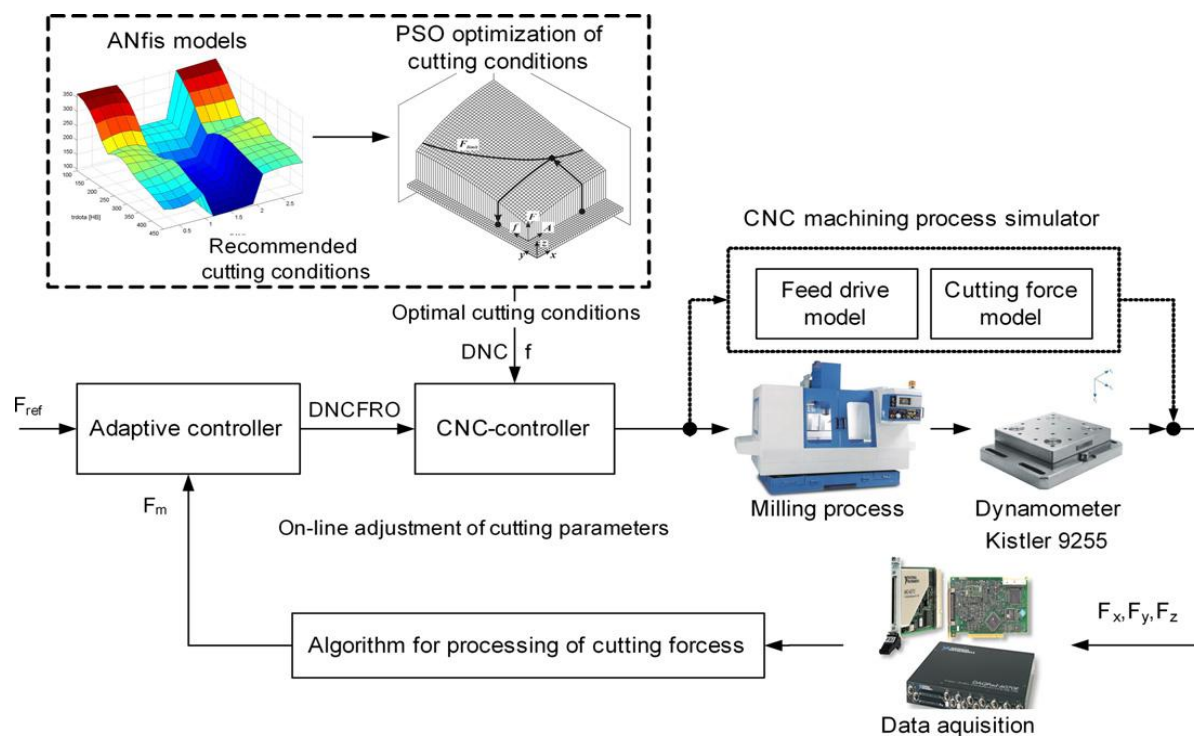
Využití zde nachází CNC strojí řídicí systém. Adaptivní geometrický kompenzační systém zlepšuje přesnost obrábění v reálném čase tím, že využívá kompenzaci chyb způsobenými například proměnlivou teplotou, opotřebením nástroje atd. Adaptivní optimalizační řízení je závislé na on-line měření opotřebením nástroje, díky čemuž následně systém nastaví nejefektivnější řezné podmínky pro aktuální řezné prostředí. Adaptivní omezovač řízení zvyšuje produktivitu maximalizací jedné či více proměnné v daném rozsahu ohraničeném řezným procesem a systémovými omezeními (řezné síly).

Tento výzkum se v podstatě snaží, na základě předem zrealizované optimalizace, vytvořit on-line adaptivní ovládání řezného procesu. Optimalizace se provádí pomocí algoritmu, který byl vytvořen pomocí modelu, na základě neuronových sítí a využitím fuzzy logiky. Celý proces v podstatě vychází z optimalizace posuvové rychlosti, která je provedena off-line, a následně se na základě on-line kontroly řezných sil a naměřených řezných sil využije právě vytvořená optimalizace posuvu.

Posloupnost jednotlivých kroků při optimalizaci řezného procesu je následující:

1. určení doporučených řezných podmínek využitím adaptivního neuro-fuzzy programu
2. optimalizace doporučených řezných podmínek (Particle Swarm Optimization)
3. předprogramované hodnoty posuvu určené na základě off-line optimalizace jsou poslány do řídicího systému CNC stroje.
4. naměřené řezné síly jsou odeslány ke zpracování do neurálního kontrolního programu
5. neurální kontrolní program nastaví optimální hodnoty posuvu a odešle je zpět do stroje.
6. kroky 4-6 se neustále opakují až do ukončení obrábění

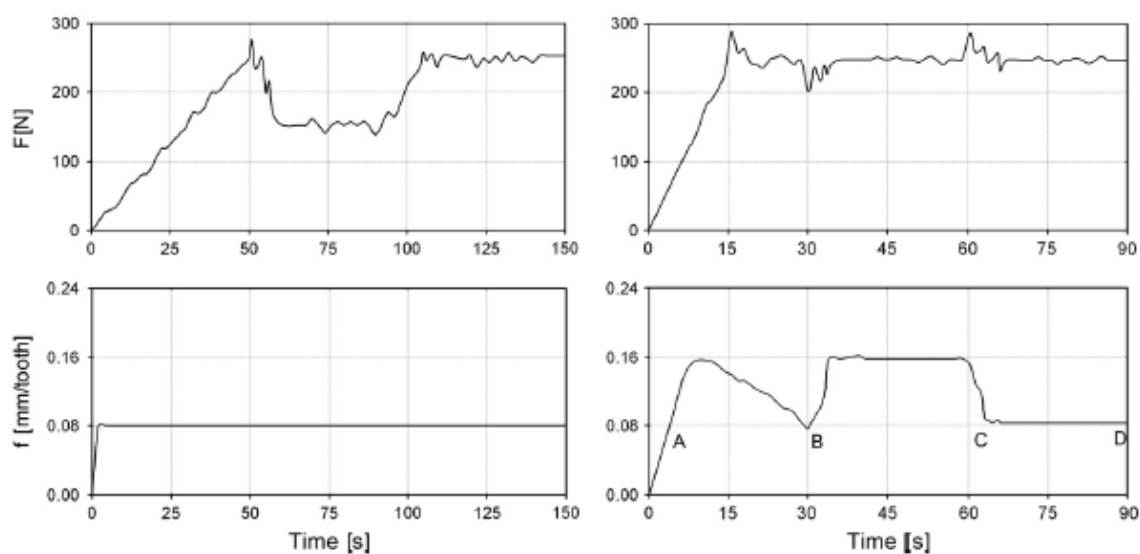
Schéma na obrázku 2.30 v podstatě popisuje výše zmíněnou sekvenci jednotlivých kroků. Navíc je zde pouze CNC machining process simulator, který slouží k otestování stability systému a ladění parametrů.



Obrázek 2.30-schéma řízení řezných sil s využitím inteligentních systému[21]

Použití tohoto přístupu je patrné na obrázku 2.31, kde jsou znázorněny 4 grafy. V Prvním sloupci je znázorněn průběh řezných sil obrábění při nastaveném konstantním posuvu. Druhý sloupec naznačuje průběh řezných sil při adaptivním řízení posuvové rychlosti. Porovnáním jednotlivých průběhů je patrné, že druhá varianta má hladší průběh řezných sil a nedochází k tak rapidním změnám zatížení nástroje.

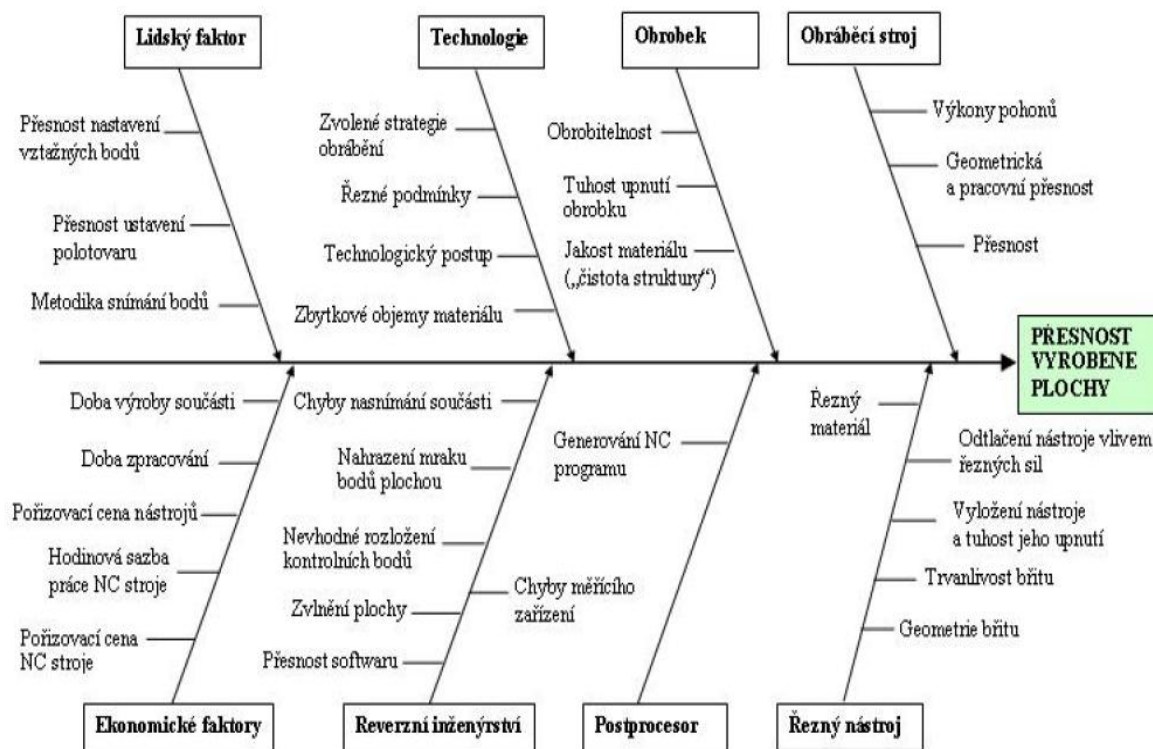
Zmíněný příklad řešení kontroly řezných sil při dokončování je zajímavý způsob řešení dané problematiky. V rámci této diplomové práce je dobré zmínit také alternativní způsoby řešení, které jsou zkoumány různými vědeckými týmy ve světě.



Obrázek 2.31- průběh řezných sil obrábění při konstantní a proměnné posuvové rychlosti[21]

2.11 Kvalita obrobeneho povrchu

Podstatou samotného dokončování je dát obrobku finální podobu o parametrech daných výkresovou dokumentací. Jedním z důležitých výstupů dokončovacího procesu je tedy i kvalita obrobeneho povrchu. Kvalitu povrchu lze ovlivňovat různými vlivy ať už volbou technologických podmínek, či volbou jiných nástrojů a tak dále. Přehled nejvýraznějších vlivů, které ovlivňují jakost povrchu lze spatřit na obrázku 2.32. Není to však pouze kvalitativní hledisko, které hraje roli v očích zákazníků, jelikož s tímto parametrem musí jít ruku v ruce i efektivita dokončování. Vhodná je tedy metoda dokončování, která dosáhne odpovídající kvality a přesnosti povrchu a zároveň se ukáže jako efektivní.



Obrázek 2.32-vlivy na přesnost vyrobené plochy[22]

Jak již bylo popsáno v předchozích kapitolách, kolísání řezné síly může neblaze ovlivnit výsledný povrch. Ta kolísá v závislosti na sklonu plochy, přídavku na obrábění, otupení bříty a dalších parametřů. Udržení konstantního zatížení, by mohlo tyto vlivy částečně eliminovat a tím přispět k dosažení odpovídající kvality a efektivity.

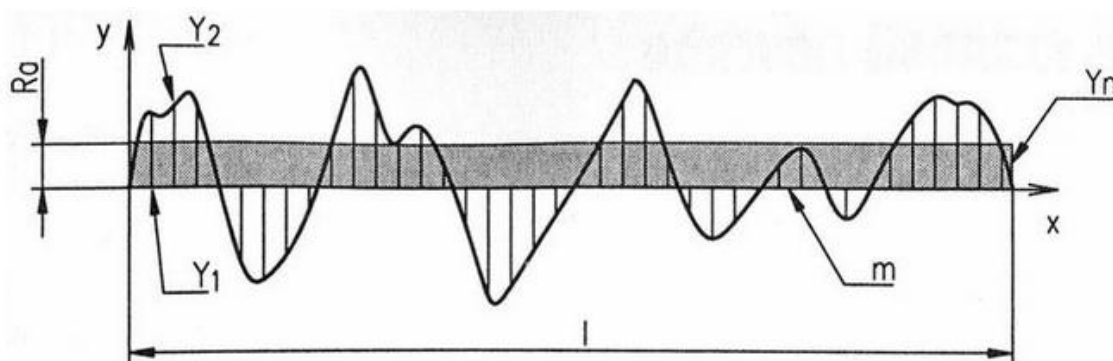
Samotná drsnost povrchu je v podstatě nepravidelná nerovnoměrnost tvaru povrchu, popsatelná statisticky vyhodnotitelnými charakteristikami. Při vyhodnocení drsnosti povrchu se používá mnoho přístupů. V rámci této diplomové práce se využije vyhodnocení drsnosti povrchu dle parametrů Rz a Ra, proto je vhodné jednotlivé parametry popsat. [23]

Parametr Ra je v podstatě výškový parametr, který udává střední hodnotu vzdálenosti zkoumaného povrchu od střední čáry daného povrchu. Jedná se o statistickou hodnotu, jelikož je tento parametr průměr absolutních hodnot všech souřadnic Z v rozsahu základní měřené délky. Tato hodnota nemusí být v praxi vždy dost dobře aplikovatelná. Dva povrchy se

stejnou hodnotou parametru Ra mohou mít zcela odlišný profil povrchu, což může mít důsledek ve snížení funkčnosti. [23]

Vztah pro výpočet hodnoty parametru Ra:

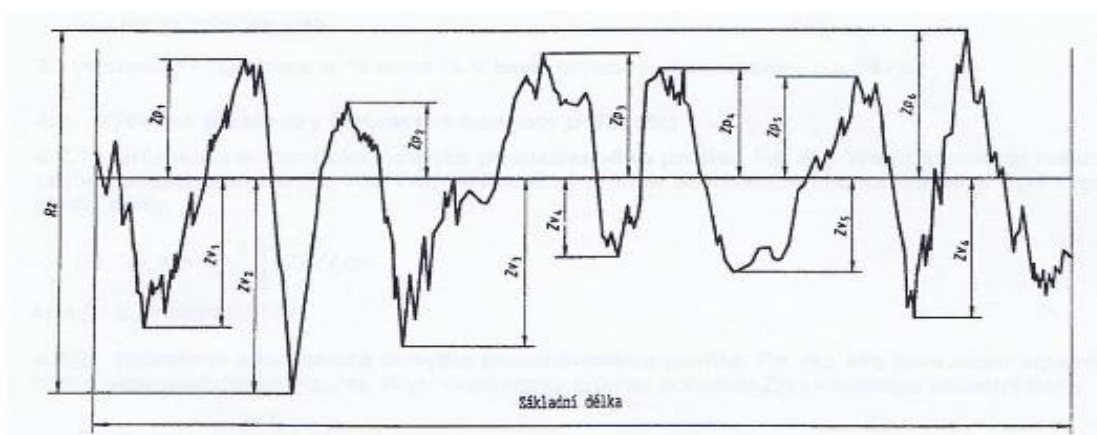
$$R_a = \frac{1}{n} \times \int_1^n |Z(x)| dx \text{ } [\mu m] \text{ } [25]$$



Obrázek 2.33-vyhodnocení drsnosti povrchu parametrem Ra[24]

Druhý parametr Rz je vyhodnocován dle výšky nerovnosti deseti bodů. Jedná se o střední hodnotu z absolutních hodnot výšek pěti nejvyšších výstupků a pěti nejnižších prohlubní profilu v rozsahu základní délky. Vztah pro výpočet parametru Rz:

$$R_z = \frac{\sum_{i=1}^5 |y_{pmi}| + \sum_{i=1}^5 |y_{rmi}|}{5} \text{ } [\mu m] \text{ } [25]$$



Obrázek 2.34- vyhodnocení drsnosti povrchu parametrem Rz [23]

Jak bylo popsáno, parametr Ra je v určitých situacích nevýhodný a není schopen dostatečně přesně vyjádřit stav povrchu. Proto se v rámci této práce využijí oba parametry Ra i Rz, aby nebyl výsledek při vyhodnocení metod z hlediska kvality povrchu zkreslen.

2.12 Shrnutí teoretické části

Výše uvedená teoretická část diplomové práce byla zpracována na základě výstupů českých, slovenských a dalších vědeckých týmů z celého světa. Tento mix české i cizojazyčné

literatury by měl představovat dostatečný základ k dané problematice dokončování tvarových ploch.

Z toho důvodu byly popsány tvarové plochy a způsoby jejich obrábění. Byla popsána aplikace CAM systémů při frézování tvarových ploch hlavně s ohledem na slabá místa v dokončování. Z toho důvodu byly taktéž rozebrány průběhy řezné síly při obrábění obecných tvarových ploch s využitím 3-osého či 5-osého obrábění. Tématu se taktéž týká volba dokončovacích nástrojů, jejich namáhání, opotřebení a také vliv zvolené strategie obrábění na opotřebení. V závěru teoretické části byly popsány vlivy na kvalitu obrobenej plochy, postup výpočtu některých parametrů drsnosti povrchu, které se využijí v další části práce, a taktéž bylo představeno řešení této problematiky, avšak odlišnou cestou s využitím inteligentních systémů při dokončování.

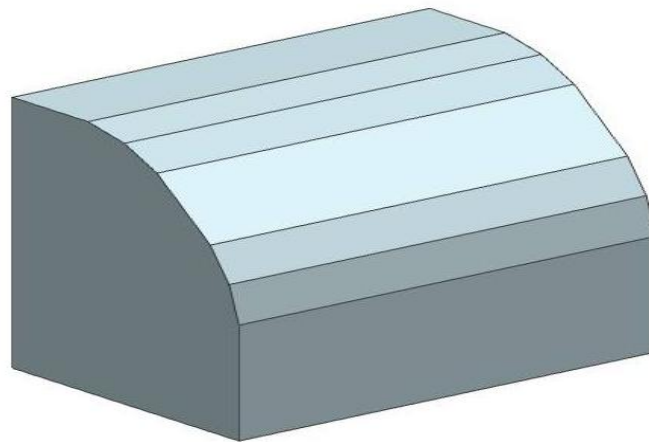
Takto zpracovaná teoretická část by měla představovat dostatečný informační základ k navržení strategie, která by eliminovala výkyvy řezných sil, zajišťovala odpovídající kvalitu povrchu a byla zároveň dostatečně efektivní.

3.Výběr nejvhodnější varianty a její ověření na příkladu zvolené tvarové plochy

3.1 Návrh variant

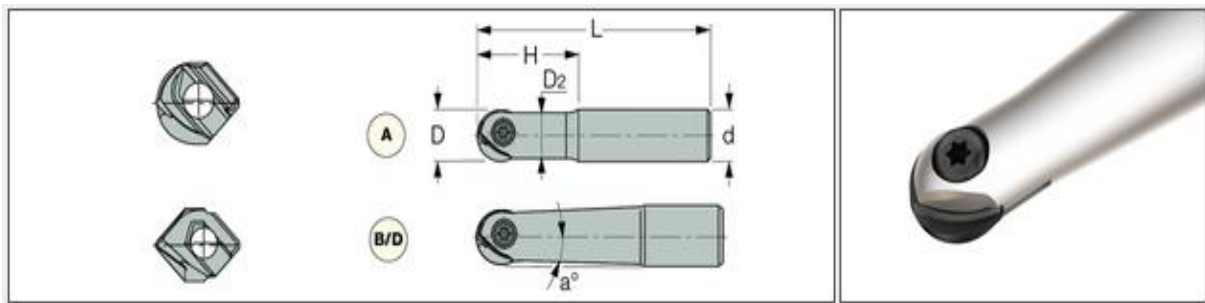
Vyjde-li se z nashromážděných poznatků, je možno na základě teoretické části navrhnout varianty strategií vedení nástroje po ploše, které se následně ověří na modelu, který je znázorněn na obrázku 3.1. Tento model zahrnuje plochy s určitým sklonem. Tím se jednotlivé varianty otestují v závislosti na sklonu obráběné plochy. Na níže představených variantách se ukáže vliv řezných podmínek (řezná rychlost) a vliv rozpočtu drah na dokončování.

Z toho důvodu byly navrženy celkově čtyři varianty řešení. Každá varianta je přitom modifikací dvou strategií rozpočtu drah a dvou přístupů ve volbě řezných podmínek. První přístup je dán konstantními otáčkami nástroje v celém průběhu obrábění. Druhý přístup je dán konstantní řeznou rychlostí. Tím pádem je nutno měnit otáčky nástroje v závislosti na sklonu obráběné plochy. K realizaci experimentu je nutné stanovit vhodnou strategii rozpočtu drah, zpracovat program v ISO kódu a provést samotný experiment. Aby nedocházelo při přejetí jedné dráhy ke změně sklonu plochy a bylo možné využít teoretického udržení konstantní řezné rychlosti, bylo nutné stanovit dráhy nástroje tak, aby se nástroj v záběru posouval po přímce. Samotný popis rozpočtu drah po ploše je popsán v dalších kapitolách.



obrázek 3.1- model obráběné plochy

K obrobení jednotlivých ploch byla využita kulová stopková fréza $\varnothing 16\text{mm}$ s jednou vyměnitelnou destičkou od firmy Iscar. Obchodní označení tělesa frézy je HCM D16-A-L130-C16. Destička má dva břity a je ze slinutého karbidu. Obchodní označení VBD je HCR D160-QF IC328 a jedná se o slinutý karbid patřící dle normy ISO do kategorie M. Schéma nástroje a břitové destičky je na obrázku 3.2.



obrázek 3.2-schéma použitého řezného nástroje a VBD

K upnutí nástroje byl využit hydraulický upínač (obrázek 3.3), který je možno využít do vysokých otáček až 30 000 ot/min, což je v závislosti na možnostech použitého stroje, který je představen dále, dostačující.



obrázek 3.3- upnutí nástroje hydraulickým upínačem

3.1.1 Rozpočet drah po ploše

Využitím konturovacího způsobu frézování byl zajištěn přímkový charakter jednotlivých drah, což je v tomto případě pro udržení konstantní řezné rychlosti žádoucí. První varianta rozpočtu drah využila strategie rozpočítání drah dle klasického přístupu, a to dle konstantního kroku $a_e=0,2\text{mm}$ pro plochy s úhly $0-45^\circ$ a konstantní krok v ose Z o velikosti $0,2\text{mm}$ pro plochy s úhly $45-90^\circ$. Tyto přístupy jsou s výhodou aplikovány v praxi právě pro uvedené rozmezí sklonů ploch. Plocha se sklonem 45° je záměrně širší než ostatní plochy, jelikož na polovině této plochy dojde k předělu mezi jednotlivými strategiemi. Tudíž bude polovina (10mm) plochy obráběna dle konstantního kroku a_e a polovina dle konstantního kroku v ose

Z. Tento způsob rozpočtu drah je v dalších částech této práce uváděn jako standardní rozpočet drah.

Druhý způsob rozpočítání drah je dán konstantní vzdáleností 0,2mm mezi jednotlivými dotykovými body obrobku s nástrojem. Přísuv nástroje je tedy konstantní v závislosti na tvaru plochy. Jednotlivé kontaktní body byly vypočteny ručně pomocí jednoduchých goniometrických funkcí.

Každá strategie rozpočtu drah se následně otestuje v prvním případě s využitím konstantních otáček nástroje po celý průběh obrábění a v druhém případě s využitím konstantní řezné rychlosti. U varianty s konstantní řeznou rychlostí bylo nutno vypočítat efektivní radius kulové frézy pro jednotlivé sklony ploch, aby bylo možno regulovat otáčky frézy.

K odzkoušení variant bylo využito frézovací centrum DMU 40 eVo linear od německého výrobce DMG MORI. Tento stroj disponuje širokým rozsahem otáček na vřetenu (až 24 000ot/min), což je pro tento experiment důležitý parametr.



obrázek 3.4 - frézovací centrum DMU 40 eVo linear

3.2 Příprava experimentu

Než se přistoupí k samotnému zkoumání jednotlivých variant, je nutné připravit samotný experiment. To zahrnuje přípravu polotovaru, přípravu programů, hrubování, přípravu dynamometru a celé soustavy na měření řezných sil.

Jako polotovar byl vybrán kvádr z oceli ČSN 12050.1, který byl broušen na přesné rozměry 90x60x100mm (obrázek 3.5). Jedná se o žíhanou ušlechtilou uhlíkovou konstrukční ocel s obsahem uhlíku 0,43-0,5%, která zároveň představuje etalonový materiál pro ocelové materiály z hlediska obrábělnosti.

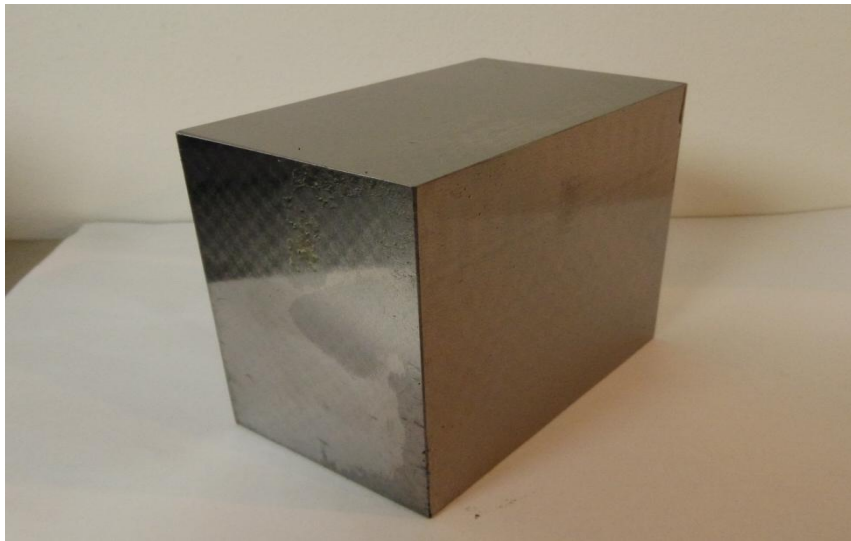
Chemické složení oceli je v tabulce 3.1 a výtah jednotlivých materiálových vlastností oceli je uveden v tabulce 3.2

Chem.prvek	C	Mn	Si	Cr	Ni	Cu	P	S
Dle ČSN	0,42-0,5	0,50-0,80	0,17-0,37	Max 0,25	Max 0,3	Max 0,3	Max 0,3	Max 0,035

tabulka 3.1-chemické složení oceli 12050 v %

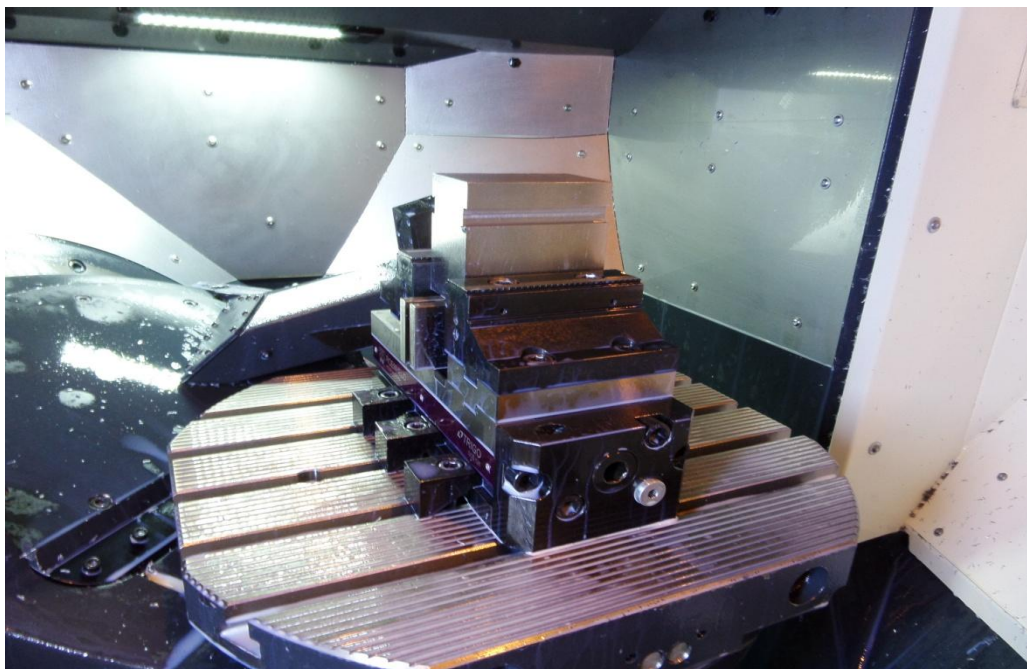
			12 050.1
Mez kluzu	R_{p0,2}	MPa	min. 325
Mez pevnosti	R_m	MPa	min. 540
Tažnost	A₅	%	min 17
Tvrдость		HB	max 225
Kontrakce	Z	%	
Modul pružnosti v tahu	E	GPa	211
Modul pružnosti ve smyku	G	GPa	79

tabulka 3.1- mechanické vlastnosti oceli 12050.1 dle ČSN 42 20 50 [26]



obrázek 3.5-polotovár

Aby se dal polotovár dobře upnout k dynamometru pomocí upínek, bylo nutné vyfrézovat po obvodu kvádrú dvě drážky za které byl následně obrobek upnut k dynamometru(Obrázek 3.6).

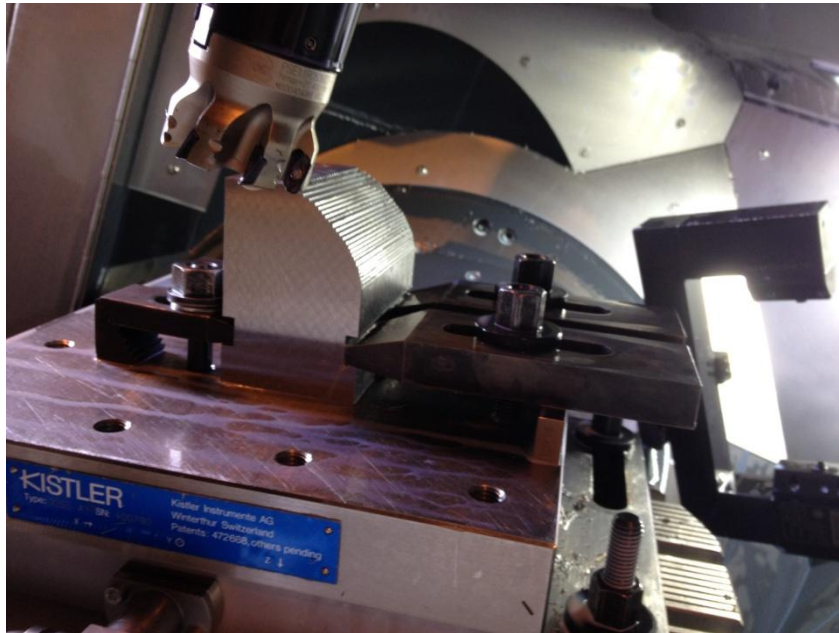


obrázek 3.6-frézování drážky pro upnutí na dynamometru

3.2.1 Příprava programu

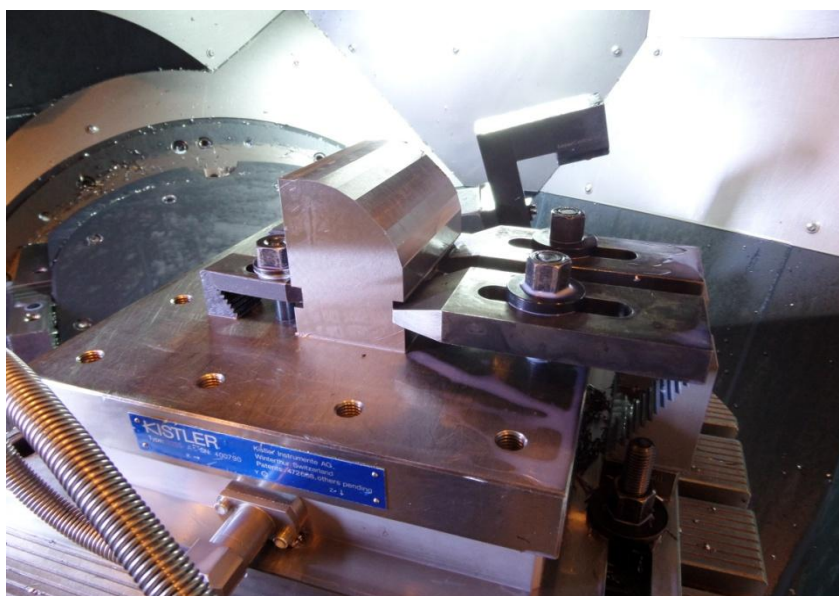
3.2.1.1 Hrubování

Každá ze čtyř variant se ověří na vlastním kvádru, tudíž je zapotřebí čtyř kvádrů. Každý kvádr byl hrubován stejným postupem, když byla nejprve tříosou technologií čelní válcovou frézou průměru $\varnothing 16\text{mm}$ se 4 zuby (SEH 42282) odebrána převážná část přebytečného materiálu. Pro dokončení byl stanoven přídavek 0,5mm, který by měl být dostatečný k dobrému zaznamenání rezných sil dynamometrem.



obrázek 3.7-využití pětiosého indexovaného obrábění při hrubování

Pro zaručení rovnoměrného přídávku na dokončení bylo využito pětiosého indexovaného obrábění. K tomu byla použita čelní válcová fréza průměru $\varnothing 50$ se 7 vyměnitelnými břitovými destičkami (Iscar) od firmy OSG (PSE11R050M22-7).

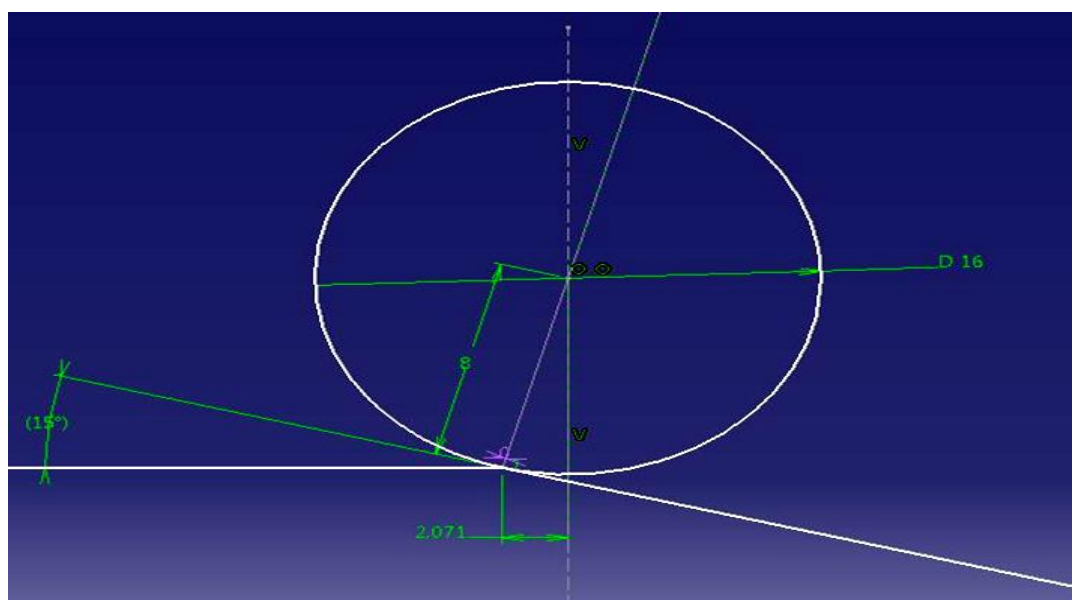


obrázek 3.8-upnutí obrobku na dynamometru (stav po hrubování)

Program na hrubování polotovaru byl vytvořen v systému SolidCAM a pomocí postprocesoru převeden do programu stroje. Výchozí stav po hrubování je možné vidět na obrázku 3.8. Program na hrubování je přiložen v příloze.

3.2.1.2 Dokončování

Konstantní řezná rychlost byla zvolena na hodnotě 150m/min a konstantní otáčky byly stanoveny na hodnotu 2984ot/min. Při záběru kulové frézy celým řezným průměrem 16mm a nastavených otáčkách 2984ot/min je řezná rychlost 150m/min. Z toho vyplývá jistá analogie nastavených hodnot. Taktéž je patrné, že plný průměr frézy je v záběru na ploše 90°, tudíž u všech čtyř variant je při obrábění této plochy využívána stejná řezná rychlost. U ostatních ploch při využití metody konstantní řezné rychlosti jsou otáčky proměnlivé v závislosti na efektivním průměru frézy. Výpočet efektivního průměru a stanovení otáček pro jednotlivé plochy je na obrázku 3.9 a v tabulce 3.3.



obrázek 3.9-schéma k výpočtu hodnot Ref

Císlo plochy	Sklon plochy (°)	Efektivní radius (mm)	Otáčky nástroje pro $v_c=150$ m/min (ot/min)
1.	0°	0	24 000 (limit stroje)
2.	15°	2,071	11 533
3.	30°	4	5 971
4.	45°	5,657	4 222
5.	60°	6,928	3 448
6.	75°	7,727	3 091
7.	90°	8	2986

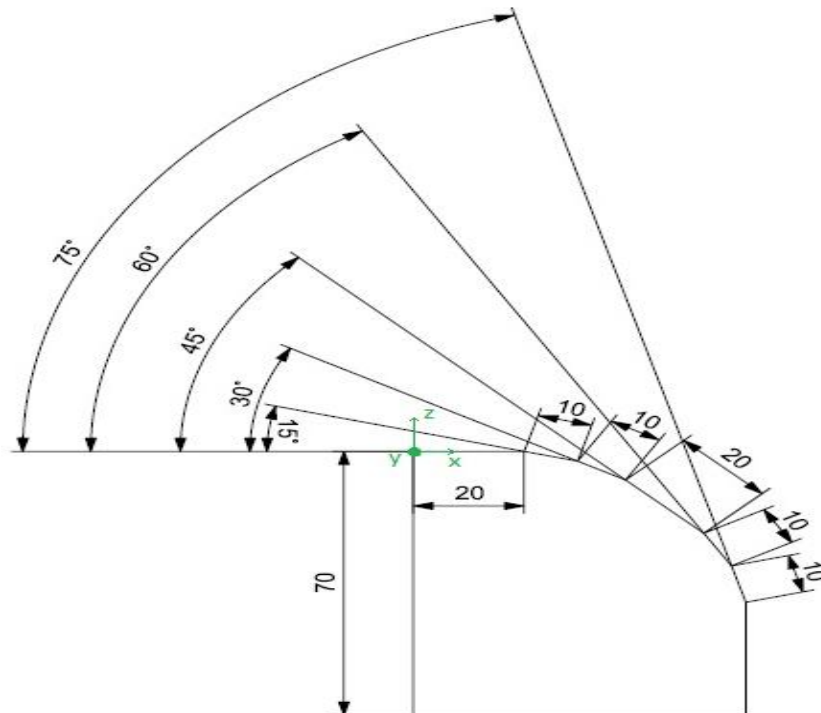
$$Ref = \sin\alpha * R$$

$$n = \frac{v_c * 1000}{\pi * 2 * Ref}$$

tabulka 3.3 - tabulka vypočtených hodnot efektivního radiusu frézy a otáček

V další části této kapitoly je popsán postup zhotovení programu pro strategii rozpočtu drah s konstantním krokem po ploše a pro konstantní krok a_e a konstantní krok v ose Z. Profil modelu s rozměry ploch je na obrázku 3.10.

Program byl připraven v ISO kódu. Všechny dráhy nástroje, které jsou naprogramovány pro dokončovací varianty mají přímkový charakter. Pro všechny varianty byl stanoven konstantní posuv 0,2mm/zub (0,4mm/ot).



obrázek 3.10-testovací plocha s nulovým bodem pro výpočet kontaktních bodů

3.2.1.3 Rozpočet drah dle konstantního kroku po ploše

Výpočet jednotlivých kontaktních bodů je vcelku triviální. Konstantní krok mezi jednotlivými dráhami byl stanoven na 0,2mm. Nulový bod obrobku pro výpočet kontaktních bodů byl umístěn dle obrázku 3.10. Pro určení jednotlivých bodů je zapotřebí zjistit pouze souřadnice X a Z jelikož souřadnice Y je ztotožněna s posuvem nástroje a při obrábění bude v závislosti na posuvu proměnlivá.

Horní plocha s nulovým sklonem je na zjištění kontaktních bodů nejjednodušší. Hodnota souřadnice Z je ve všech bodech nulová a v ose X je každý bod dán přírůstkem oproti předchozímu bodu o 0,2mm. Podobný výpočet je taktéž u poslední plochy, která je kolmá na horní plochu. Tato plocha se obrobí v celkové šířce 10mm. V tomto případě je hodnota souřadnice X ve všech bodech konstantní a v ose Z jsou jednotlivé body dány přírůstkem oproti předchozímu bodu o 0,2mm.

Kontaktní body ležící na plochách pod sklonem 15°,30°,45°,60° a 75° od horní plochy se vypočtou pomocí jednoduchých goniometrických funkcí. Rozpočítání všech kontaktních bodů nástroje s plochou je znázorněno v příloze.

3.2.1.4 Standardní rozpočet drah (konstantní krok a_e a konstantní krok v ose Z)

Při využití standardního rozpočtu drah byly jednotlivé dráhy opět rozpočítány ručně. Druhá možnost byla využití některého CAM systému a pro plochy 0-45° využít operaci sweeping (CATIA V5) a pro plochy 45°-90° operaci Z-level. Pro větší míru jistoty z hlediska vygenerování drah, bylo přistoupeno k tvorbě programu bez užití CAM systému.

3.2.2 Nastavení dynamometru

K měření řezných sil se využije tří složkový statický dynamometr od firmy Kistler (obrázek 3.11). Ten je založen na piezoelektrickém jevu, kdy v průběhu obrábění dochází vlivem řezných sil k deformaci deformačního členu. Na základě této deformace se indikuje malý elektrický náboj, který je dále veden speciálním kabelem do zesilovače a následně přeměněn na měřitelné napětí. Celá aparatura (obrázek 3.13) potřebná k měření řezných sil zahrnuje dále radič, měřící kartu, počítač, spojovací kabely měřící software a software na vyhodnocení.



obrázek 3.11-třísložkový dynamometr Kistler [27]

Upnutí obrobku na dynamometru musí být dostatečně tuhé, aby nedocházelo vlivem špatného upnutí ke zkreslení naměřených hodnot. Dále je důležité dobře nastavit tři kanálový zesilovač pro jednotlivé složky řezných sil F_x , F_y , F_z tak, aby se měřené síly pohybovaly v rozpětí nastaveném na zesilovači (obrázek 3.12).



obrázek 3.12-nastavení zesilovače

V případě, že by síly převyšovaly nastavenou hodnotu na zesilovači, je třeba tuto hodnotu upravit. Naopak kdyby byly řezné síly příliš malé a nastavení zesilovače počítalo s výrazně vyššími hodnotami, je třeba hodnotu na zesilovači opět upravit. Pro dobré nastavení zesilovače je vhodné znát očekávaný rozsah řezných sil. Proto se nejprve na první testovací ploše provedlo ověření nastavení zesilovače a došlo k úpravě hodnot na jednotlivých kanálech.



obrázek 3.13-aparatura k měření řezných sil

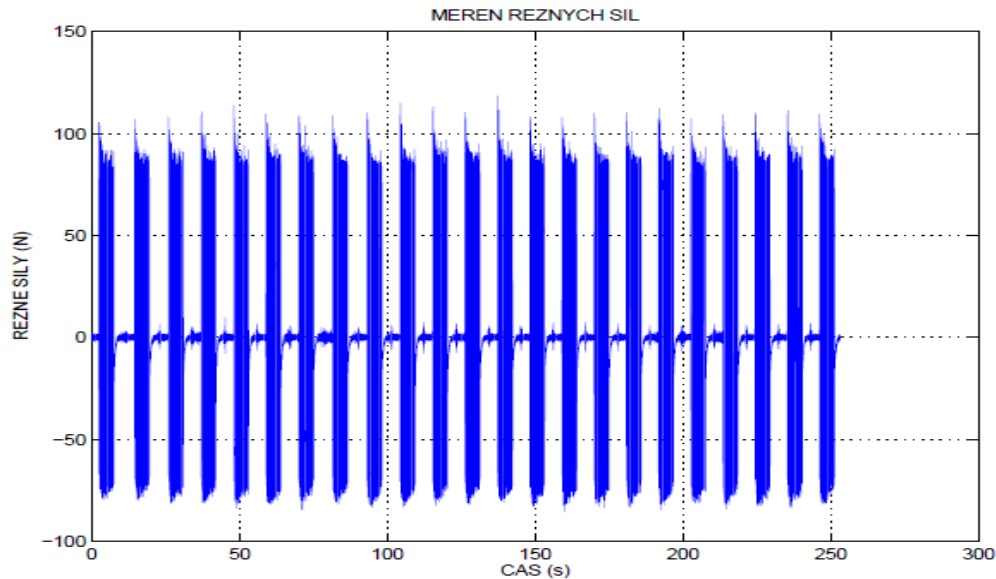
3.3 Průběh experimentu

Po přípravě polotovaru, programů, hrubování, přípravě dynamometrů a jeho odladění je možné přistoupit k samotnému zkoumání řezných sil. Pro každou plochu (1obrobek=7ploch) bylo měření opakováno minimálně desetkrát. Takto byly odzkoušeny všechny čtyři navržené varianty a naměřeny průběhy řezných sil (obrázek 3.14). Celkově se tedy následně vyhodnotí průběhy řezných sil F_x , F_y , F_z pro 28 (4x7) ploch. Tyto síly se vyhodnotí v programu Nasomer.



obrázek 3.14-průběh dokončování

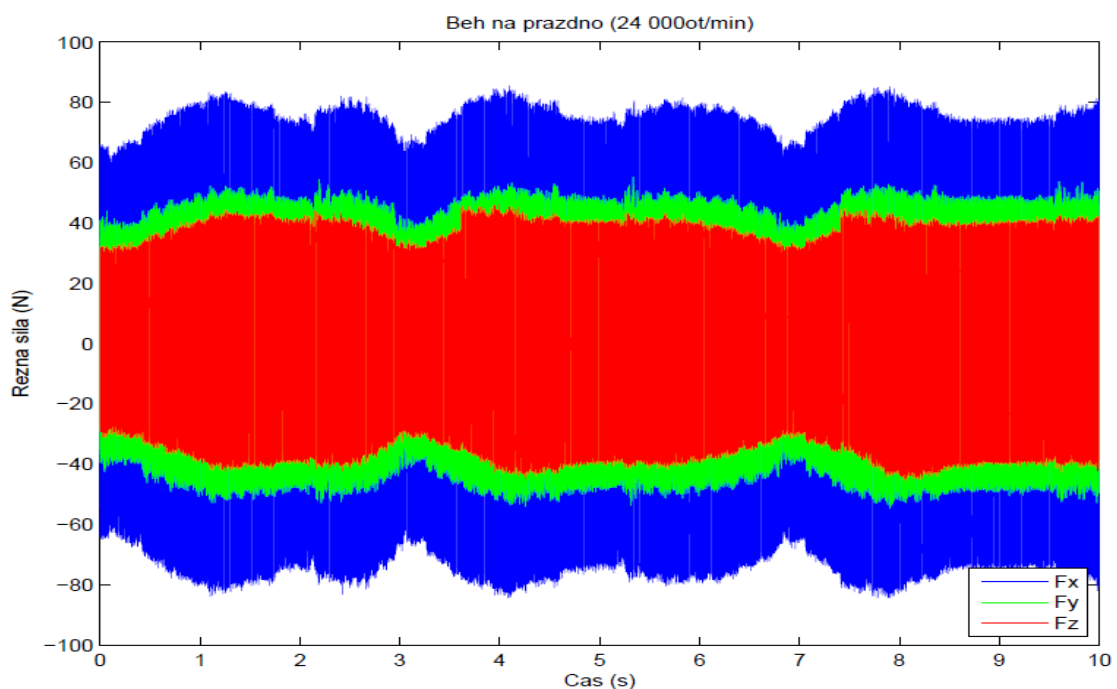
První byla testována varianta rozpočtu drah po křivce s konstantními otáčkami. Plocha se sklonem 15° byla naměřena na průběh sil celkem osmkrát vlivem závady na počítači. Ostatní plochy byly naměřeny celkově desetkrát. V průběhu měření se nevyskytl žádný problém a naměřené hodnoty jsou dobře vyhodnotitelné.



obrázek 3.15-naměřené hodnoty řezných sil pro jednu plochu

Druhá varianta standardního rozpočtu drah s konstantními otáčkami byla taktéž otestována bez komplikací. Všechny plochy kromě poslední se sklonem 90° byly naměřeny opět desetkrát. Poslední plocha byla naměřena pouze šestkrát z hlediska možné kolize s upínacím mechanismem. Naměřené hodnoty jsou opět dobře vyhodnotitelné.

U třetí varianty rozpočtu drah po křivce s konstantní řeznou rychlostí se vyskytla komplikace. Na ploše se sklonem 0° byly využity maximální otáčky včetně 24 000 ot/min, což však způsobilo silné vibrace celé soustavy S-N-O. Vliv vibrací na měření a vliv intenzity vibrací na jednotlivé složky řezných sil byl zjištěn přejetím dráhy s roztočeným vřetenem, ale nástroj při tom neodebíral žádný materiál. Na obrázku 3.16 je patrný vliv vibrací na dynamometr při běhu naprázdno (přejetí jedné dráhy bez odebrání třísky).

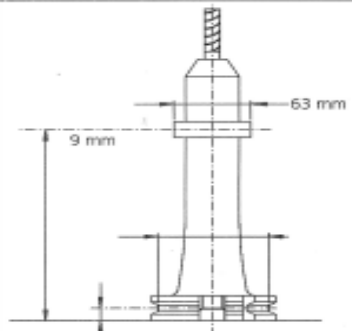


obrázek 3.16- průběh šumu na jednotlivých složkách řezných sil při běhu na prázdko

Jedna z možných příčin vznikajících vibrací bylo nevyvážení na straně nástroje. Z toho důvodu byl nástroj s upínačem odzkoušen ve firmě Hofmeister s.r.o. na vyvažovacím stroji od firmy Haimer (Haimer Tool Dynamic). Nástroj s upínačem byly vyhodnoceny jako vyvážené o čemž svědčí protokol o měření na obrázku 3.17. Tím pádem bylo možné vyloučit vliv nevyváženosti nástroje a vibrace byly způsobeny nedostatečnou tuhostí soustavy S-N-O.

HAIMER Quality Wins.	TD 2009 - ext.PC	S/N: 223-B (2008)
HOFMEISTER s.r.o. Daimlerova 9 301 00 Plzeň		

Vyvažovací protokol

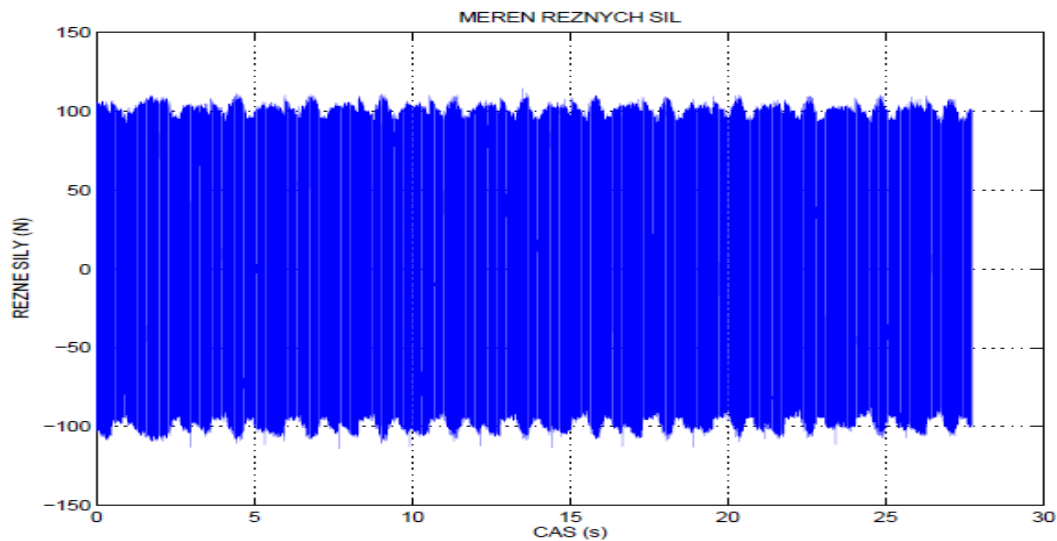
Datum: 09.05.2017 Zákazník: Zákázka: Operátor: Name 1 Rotor: 2650578-02-A3	
Povolené tolerance Třída vyváženosti: 2.5 Provozní otáčky: 25000 min ⁻¹ Hmotnost rotoru: 2.79 kg Průběh měření: statický, 1 rovina Přípustná zbytková nevyváha: 2.7 gmm Měřicí otáčky: 1100 min ⁻¹	

1 rovina			
Nevyváha:	2 gmm	4.9°	dobrý

Výsledek	
Kontrolovaná součást je v toleranci	dobrý

obrázek 3.17-vyvažovací protokol

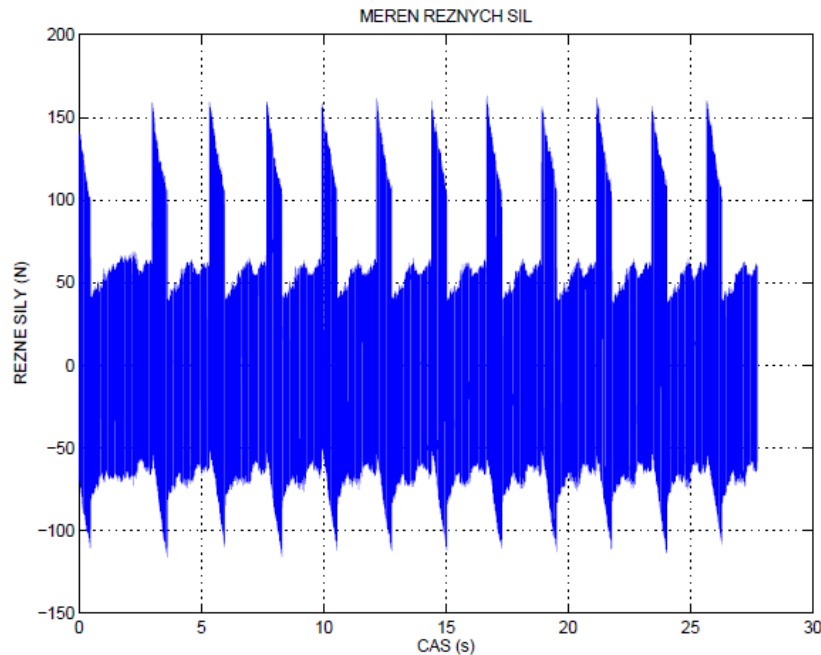
Při měření sil na ploše se sklonem 0° byly výsledné síly těmito vibracemi silně ovlivněny. Naměřená složka řezné síly F_x svými hodnotami nepřesáhla hodnoty sil, které byly generovány vibracemi stroje. Tím pádem není možné tuto složku odpovídajícím způsobem naměřit.



obrázek 3.18- naměřené síly F_x zatížené vibracemi při otáčkách 24 000 ot/min

Ostatní složky řezných sil F_y a F_z svými hodnotami převyšují šum generovaný vibracemi a je možné je naměřit, avšak zjištěné hodnoty jsou vlivem vibrační zátěží chybou o velikosti 50N, což je patrné na obrázku 3.19. Vlastní frekvence síly je při obrábění identická s frekvencí při běhu na prázdko. To bylo ověřeno z výsledků Rychlé Fourierovy transformace (FFT), což je jeden z nástrojů softwaru Nasomer. Z toho plyne, že je možné naměřený šum od naměřených hodnot při obrábění odečíst.

Obecně je problematika vysokorychlostního obrábění spojena právě s vznikajícími vibracemi, což představuje další zajímavé téma k šetření. V průmyslové praxi se však k obrábění takovýchto ploch kulové frézy příliš nepoužívají a tato testovaná plocha slouží pouze pro ukázkou. Při obrábění tvarových ploch je obecně v záběru větší průměr frézy než na této rovinné ploše, čímž je k udržení konstantní řezné rychlosti zapotřebí méně otáček. To je patrné na dalších naměřených hodnotách, kde se již obrábějí plochy se sklonem a jsou tedy zapotřebí nižší otáčky.



obrázek 3.19- naměřené síly F_y zatížené vibracemi při otáčkách 24 000 ot/min

Při testování dalších ploch se již vlivem snižujících se otáček v důsledku většího řezného průměru frézy razantně snižovaly vibrace. Tím pádem bylo možné síly relevantně vyhodnotit s chybou cca 20N pro sklon plochy 15° a u ploch s větším sklonem bylo nutné počítat s chybou do 5N.

Poslední varianta standardního rozpočtu drah s konstantní řeznou rychlostí byla poznamenána identickými problémy, jako třetí varianta. Z toho důvodu je možné relevantně vyhodnotit plochy se sklonem 15°- 90° a naměřené hodnoty F_y a F_z pro plochu 0° jsou pouze pro ilustraci.

3.4 Zhodnocení variant

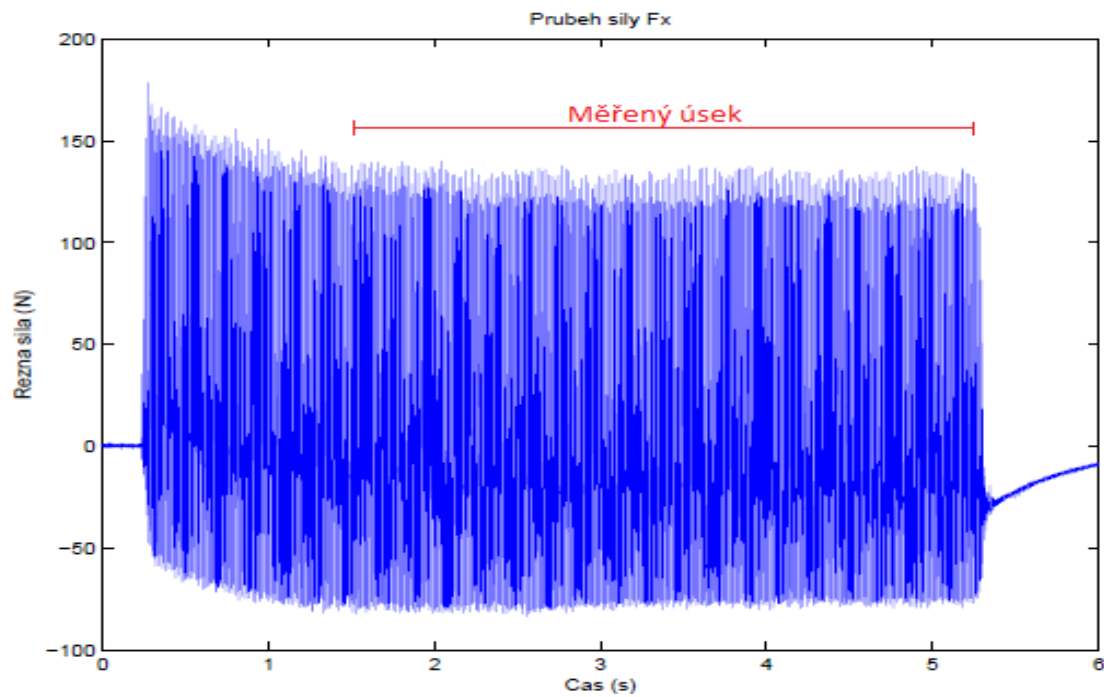
Jednotlivé varianty se následně zhodnotí z hlediska několika faktorů. Proběhne zhodnocení řezných sil a následně se porovná drsnost povrchu z hlediska parametrů R_a a R_z . Dále se vyhodnotí rozměrová přesnost a následně zhodnocení technickoekonomické na základě strojních časů jednotlivých variant.

3.4.1 Zhodnocení řezných sil

Jak již bylo zmíněno, každá plocha byla vyhodnocena z pohledu řezných sil samostatně pro všechny varianty. Aby se eliminoval vliv náhodných výkyvů naměřených hodnot, bylo měření opakováno ve většině případů desetkrát. Výsledná průměrná hodnota z těchto náměrů by měla být tím pádem více vypovídající. Každá složka řezných sil F_x , F_y , F_z byla vyhodnocena samostatně. Výsledná celková řezná síla byla vypočtena až ze získaných průměrů jednotlivých složek. Vztah pro výpočet průměrných hodnot jednotlivých složek:

$$\bar{F} = \frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n F_i \text{ [N]}$$

Většina náměrů je charakteristická tím, že v momentě najetí nástroje do řezu jsou jednotlivé složky vysoké a až po určité stabilizaci břitu v záběru síla poklesne a je víceméně rovnoměrná až do vyjetí nástroje z řezu. Při vyhodnocení se tyto první náběhy řezné síly zanedbaly a vyhodnotily se až síly, které byly konsolidované, což je označeno na obrázku (obrázek 3.20) v podobě vyznačeného úseku měření.



obrázek 3.20- vyhodnocování naměřeného vzorku

Každý náměr byl takto vyhodnocen ve všech složkách sil F_x , F_y , F_z a hodnoty zapsány do tabulek pro jednotlivé varianty. Následně byl v tabulce proveden součet jednotlivých složek a následně vypočten aritmetický průměr každé složky. Z tohoto průměru byla následně vypočtena přes kvadrát jednotlivých složek výsledná řezná síla v rovině XY, jelikož ta nám udává v podstatě odtlačení nástroje od obrobku a má na dokončování vliv. S ní byla vypočtena i celková řezná síla, která udává celkové zatížení nástroje. Všechny nashromážděné údaje pro třetí metodu jsou v tabulce 3.4, ostatní tabulky jsou v příloze. Vztah pro výpočet výsledné řezné síly:

$$F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2} [N]$$

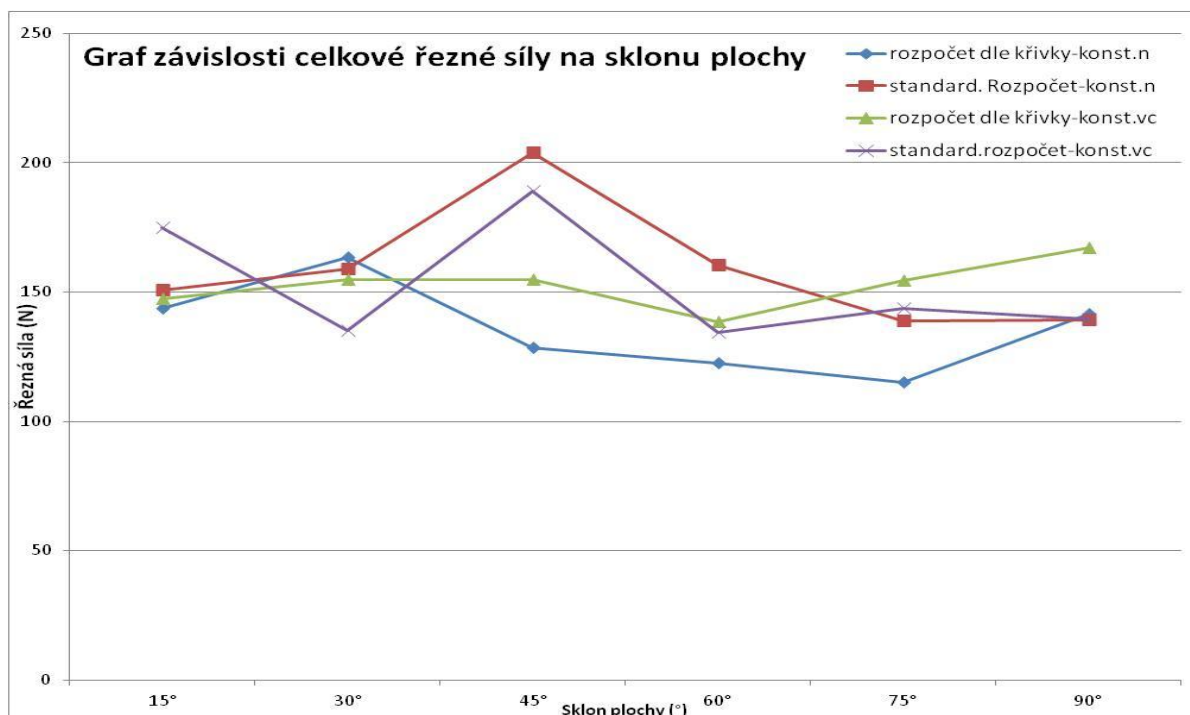
měření	3. konstantní krok po křivce - konstantí řezná rychlost																				
	1.plocha (0°)			2.plocha (15°)			3.plocha (30°)			4.plocha (45°)			5.plocha (60°)			6.plocha (75°)			7.plocha (90°)		
	F _x	F _y	F _z	F _x	F _y	F _z	F _x	F _y	F _z	F _x	F _y	F _z	F _x	F _y	F _z	F _x	F _y	F _z	F _x	F _y	F _z
1.	106,4	134,8	175,8	43,9	88,6	106,9	66,4	83,5	114,5	68,6	98,4	98,4	78,4	85,2	74,7	95,7	104,5	55,4	107,9	120,6	32,5
2.	106,7	131,1	169,4	45,2	89,8	113,5	67,1	83,7	115,5	68,4	98,4	96,4	78,9	85	74	95,9	104,7	57,6	109,4	122,8	32,5
3.	106,2	124,8	177,2	45,9	89,1	106,4	66,4	83	114,5	68,8	97,7	96,9	79,8	85,2	73,5	95,9	106	55,9	109,1	121,6	32,2
4.	106,4	132,6	164,1	41	86,2	107,4	65,9	83	110,8	68,4	99,1	96,2	79,3	85,2	73,7	95,2	104,7	55,2	108,9	122,1	32
5.	106,2	127	175,5	43,9	88,4	111,3	66,9	83,3	111,1	68,4	97,9	97,2	80,1	86,2	74,2	96,7	105,2	56,2	109,1	121,6	32,5
6.	107,9	130,1	160,9	40,3	86,4	107,9	65,4	84,5	110,1	68,1	98,6	99,9	79,3	86,2	74,5	98,6	106,2	57,9	109,4	122,8	32,7
7.	107,7	129,2	176,5	41	86,2	106,4	66,4	83,5	113	69,6	98,9	97,4	78,9	85,7	74	97,7	106,4	55,4	108,9	124,8	31,7
8.	104,2	126,7	161,4	43,5	85,9	113	66,4	83,3	111,3	68,4	99,1	97,7	78,9	85,7	74,2	97,4	106,4	55,7	109,6	122,6	31,7
9.	107,7	128,9	177,2	39,8	87,6	107,9	66,2	83,3	111,1	68,6	99,6	97,9	79,3	85,7	75,2	98,9	107,9	56,9	109,4	122,6	32,5
10.	107,9	129,2	172,1	41,7	90,3	108,4	66,7	84,2	110,8	68,8	99,9	98,1	79,3	86,2	75,4	98,6	107,7	55,9	110,4	122,1	32,5
suma	1067,3	1294,4	1710,1	426,2	878,5	1089,1	663,8	835,3	1122,7	686,1	987,6	976,1	792,2	856,3	743,4	970,6	1059,7	562,1	1092,1	1223,6	322,8
arit. průměr	106,7	129,4	171	42,62	87,85	108,9	66,38	83,53	112,27	68,61	98,76	97,61	79,22	85,63	74,34	97,06	105,97	56,21	109,21	122,36	32,28
celková síla	239,521			147,48			154,903			154,882			138,328			154,325			167,178		

tabulka3.4- naměřené hodnoty řezné síly a výpočet průměrné hodnoty a celkové řezné síly

Řezné síly byly naměřeny pro všechny plochy. Plocha se sklonem 0° však slouží pouze pro ilustraci a z důvodu velikého ovlivnění vyhodnocení se vynechá. V následujícím grafu jsou porovnány grafy se sklonem 15-90°. Nejdůležitější je výsledné rozpětí řezných sil. Optimální strategie z pohledu řezných sil je taková, která má toto rozpětí nejmenší. Jak je vidět z grafu 3.1, nejvýhodnější strategie z hlediska řezných sil je varianta s rozpočtem dle křivky a konstantní řeznou rychlostí. To je dáno jednak nejrovnoměrnějším úběrem materiálu vlivem vhodné strategie rozpočtu drah a také konstantní řeznou rychlostí, která bere v potaz proměnlivý průměr záběru nástroje. Naopak nejhůře ze srovnání vyplývá strategie se standardním rozpočtem a konstantními otáčkami, což poukazuje na nedokonalost klasického přístupu dokončování. Konkrétní hodnoty rozpětí řezných sil jsou v tabulce 3.5.

varianta	rozpětí řezných sil (N)
1.rozpočet dle křivky-konst.n	48,439
2.standard. Rozpočet-konst.n	65,16
3.rozpočet dle křivky-konst.vc	28,85
4.standard.rozpočet-konst.vc	54,401

tabulka 3.5-rozpětí celkových řezných sil jednotlivých variant



graf 3.1-závislost celkové řezné síly na sklonu plochy

3.4.2 Zhodnocení kvality povrchu

Každá testovaná plocha byla z hlediska drsnosti povrchu naměřena třikrát v příčném směru a třikrát ve směru obrábění (podélném). Z těchto trojic se vybrala nejvyšší hodnota parametrů drsností Ra a Rz. Výsledné hodnoty jsou společně s vypočteným rozpětím jednotlivých variant uvedeny v tabulce 3.6.

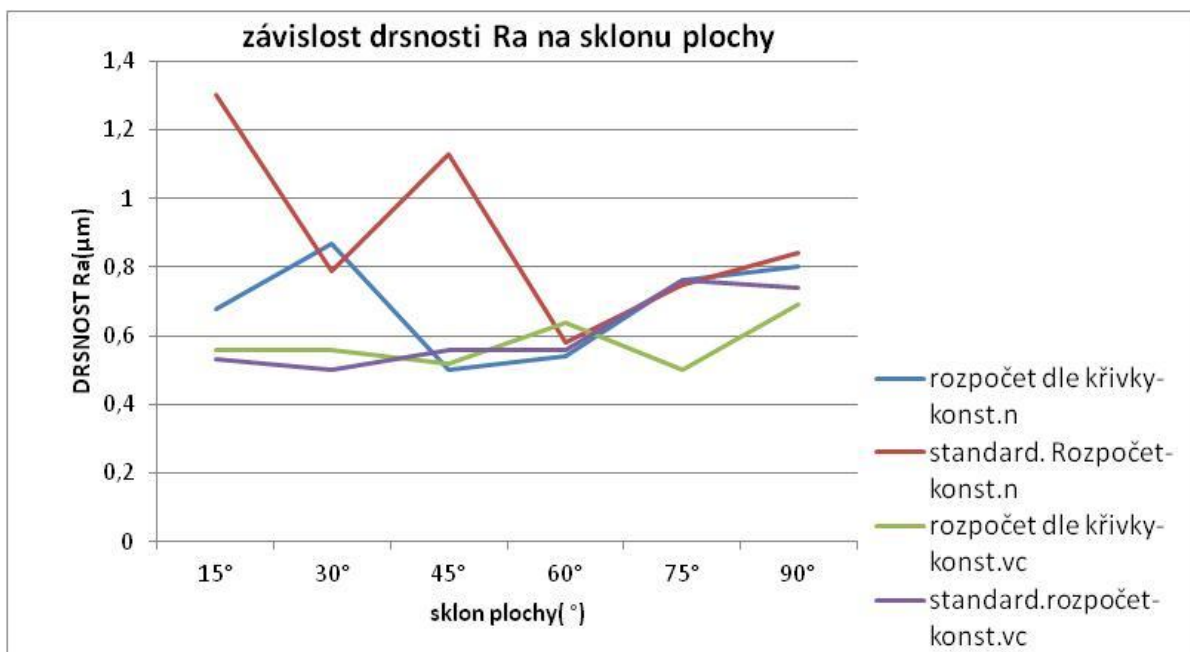
sklon plochy	parametr Ra (μm)Ⓜ														Rozpětí	
	0°		15°		30°		45°		60°		75°		90°		parametr Ra (μm)	
směr měření	podélný	příčný	podélný	příčný	podélný	příčný	podélný	příčný	podélný	příčný	podélný	příčný	podélný	příčný	podélný	příčný
1.varianta	1,42	1,72	1,08	0,68	0,62	0,87	0,48	0,5	0,56	0,54	0,72	0,76	0,92	0,8	0,6	0,37
2.varianta	2,61	2,82	0,99	1,3	0,74	0,79	0,64	1,13	0,53	0,58	0,62	0,75	0,84	0,84	0,46	0,72
3.varianta	1,87	1,28	0,63	0,56	0,49	0,56	0,66	0,52	0,42	0,64	1,22	0,5	0,7	0,69	0,8	0,19
4.varianta	1,41	1,86	0,65	0,53	0,62	0,5	0,6	0,56	0,63	0,56	0,81	0,76	0,57	0,74	0,24	0,26
	parametr rz (μm)Ⓜ														parametr rz (μm)	
1.varianta	7,9	10,48	8,57	8,3	4,35	6,7	3,19	4,01	3,2	4,18	4,09	6,22	5,58	5,21	5,38	4,29
2.varianta	11,5	14,24	6,69	9,35	4,62	6,86	4,25	7,85	3,18	4,57	3,63	5,54	4,9	5,81	3,51	4,78
3.varianta	10,04	6,97	4,51	4,52	2,85	4,56	3,51	4,63	3,51	5,55	5,84	3,68	4,5	4,39	2,99	1,87
4.varianta	7,74	9,24	4,11	5,08	4,68	4,07	3,56	4,2	3,85	4,94	4,86	5,79	3,33	7,46	1,53	3,39

tabulka 3.6- naměřené hodnoty parametru Ra a Rz včetně vypočteného rozpětí hodnot

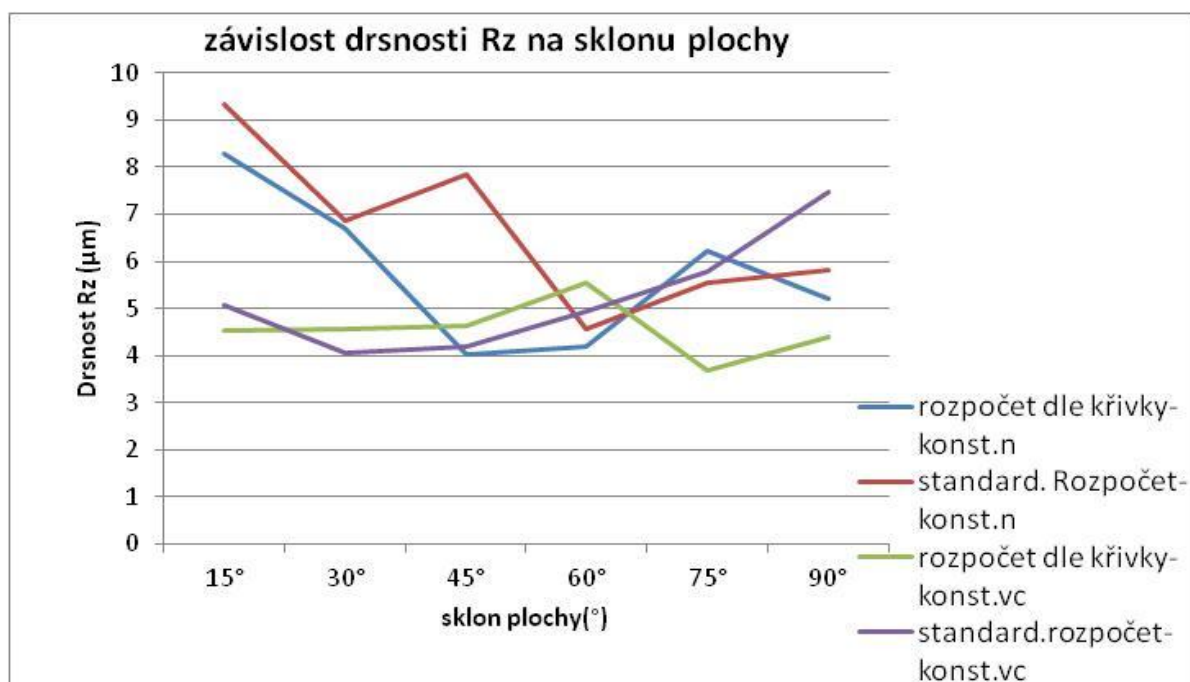
V následujících grafech 3.2, 3.3, 3.4, 3.5 jsou znázorněny závislosti jednotlivých parametrů na sklonu plochy. Vyhodnocení kvality povrchu bylo opět očistěno od výsledků první plochy, jelikož by došlo k výraznému zkreslení výsledných hodnot. Hodnoty drsnosti pro tuto plochu v tabulce jsou pouze pro ilustraci. Při vyhodnocení drsností jsou důležité jednak nejlepší dosažené hodnoty, ale hlavně rozpětí naměřených hodnot. Malé rozpětí drsností v podstatě

udává vhodnost strategie pro všechny sklony ploch. Velké rozpětí naopak udává vhodnost pouze pro některé typy ploch.

Při hodnocení příčné drsnosti parametrem Ra i Rz dosahuje nejlepších hodnot strategie s rozpočtem dle křivky a konstantní řeznou rychlostí. Při vyhodnocení obou parametrů parametru je patrné, že výsledek je dán jednak vhodnějším rozpočtem drah a za druhé i lepšími řeznými podmínkami oproti standardnímu rozpočtu a konstantním otáčkám. Tato strategie naopak ve výsledku dosáhla nejhorších naměřených hodnot i rozpětí u obou parametrů Ra, Rz.

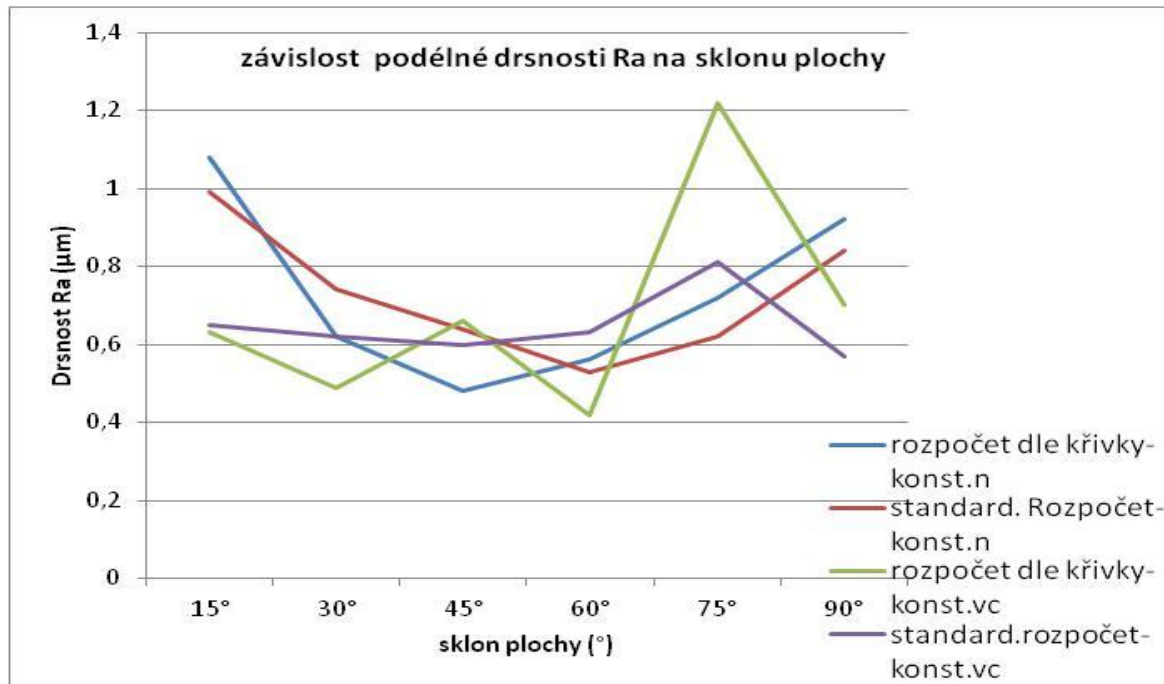


graf 3.2-závislost příčné drsnosti parametru Ra na sklonu plochy



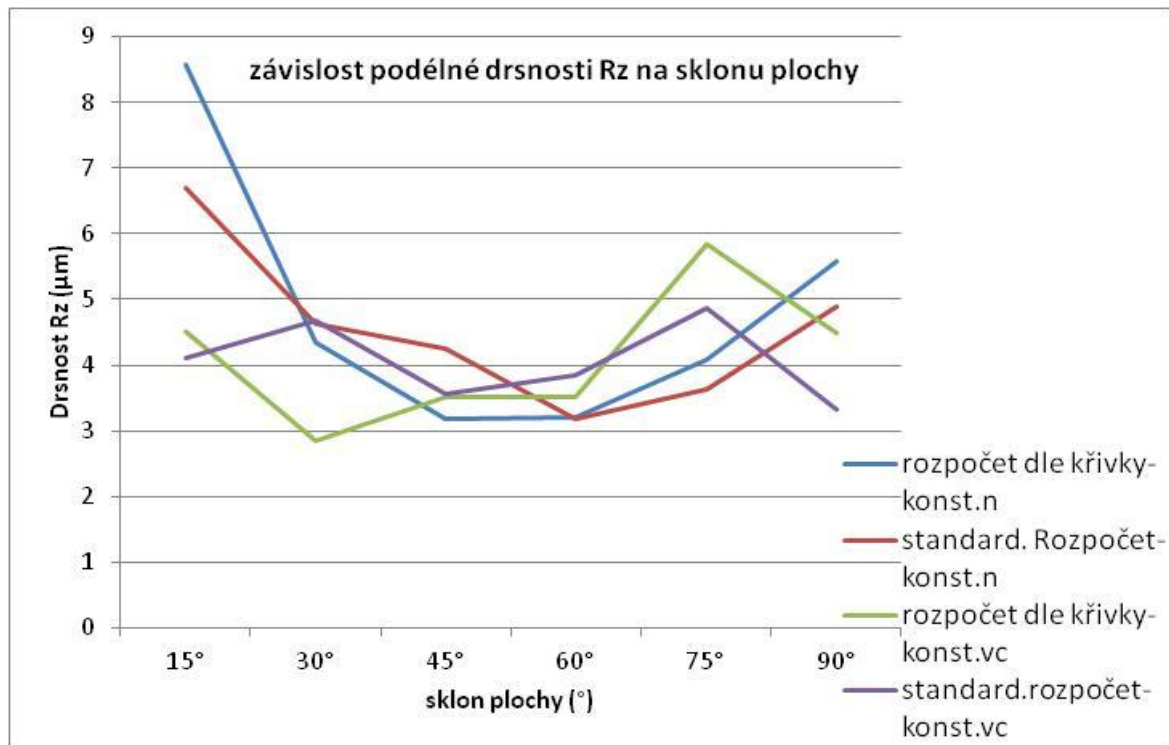
graf 3.3-závislost příčné drsnosti parametru Rz na sklonu plochy

U vyhodnocení podélné drsnosti parametrem Ra dosahuje nejlepších hodnot opět strategie s rozpočtem dle křivky a konstantní řeznou rychlostí, avšak zároveň není schopna tuto hodnotu držet na všech plochách a disponuje největším rozpětím hodnot ze všech variant. Veliké rozpětí hodnot je dáno výrazným zhoršením drsnosti na ploše se sklonem 75°. Očekávaná hodnota rozpětí u této varianty byla menší. Nejlepšího rozpětí podélné drsnosti dle parametru Ra dosahuje strategie standardního rozpočtu s konstantní řeznou rychlostí.



graf 3.4-závislost podélné drsnosti parametru Ra na sklonu plochy

U vyhodnocení podélné drsnosti parametrem Rz dosáhla nejlepší hodnoty opět strategie s rozpočtem dle křivky a konstantní řeznou rychlostí. Rozpětí naměřených hodnot se v porovnání s ostatními strategiemi zlepšilo, což je dáno jinou metodikou vyhodnocení parametrů Ra a Rz. Nejlepšího průběhu dosáhla strategie standardního rozpočtu s konstantní řeznou rychlostí.



graf 3.5-závislost podélné drsnosti parametru Rz na sklonu plochy

3.4.3 Zhodnocení dosažené přesnosti

Vyhodnocení přesnosti bylo provedeno jako odstup bodů od modelu (obrázek 3.21). K vyhodnocení přesnosti byl použit 3D souřadnicový měřicí stroj CMM Carl Zeiss Prismo 7 Navigator.

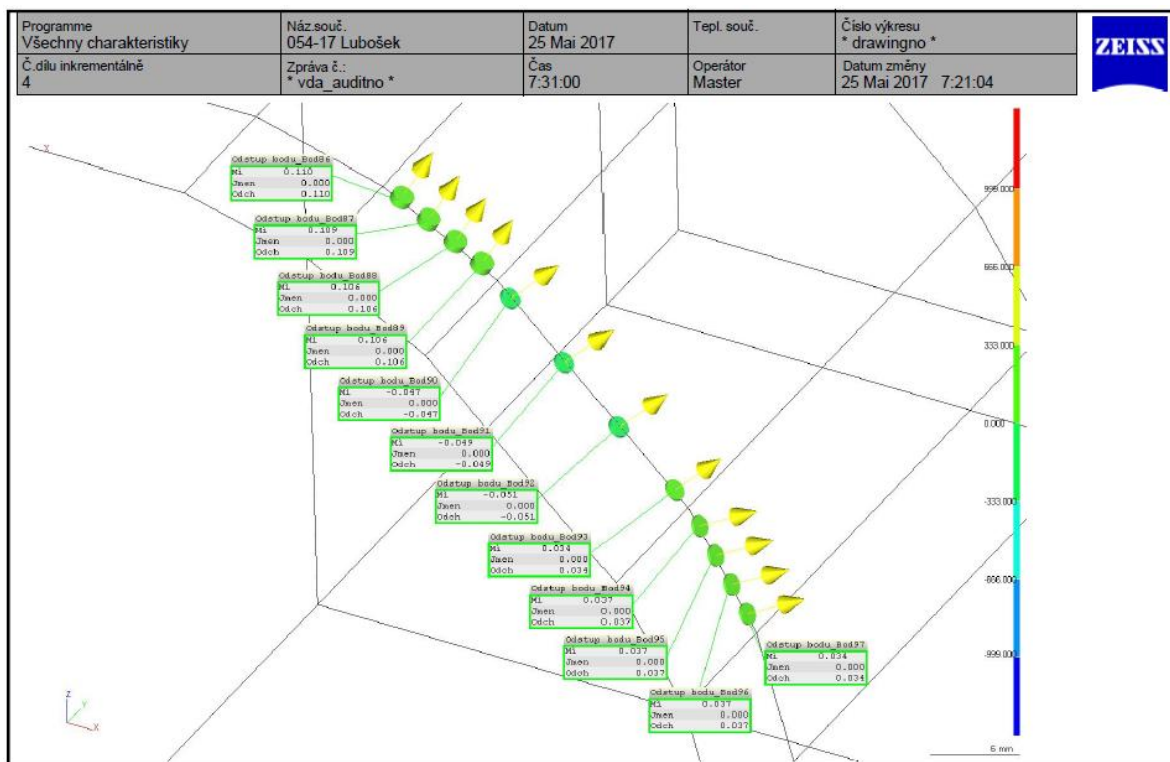


obrázek 3.21- CMM Carl Zeiss Prismo 7 Navigator [28]

Každá plocha byla naměřena minimálně čtyřikrát. U některých variant se vyskytl 1-2 případy, kdy byla naměřená nepřesnost 8krát vyšší než průměrné hodnoty. Tyto hodnoty byly

z vyhodnocení vynechány a vyhodnotila se největší nepřesnost z hodnot nezatížených takto velkou nepřesností. Největší naměřené nepřesnosti jednotlivých variant:

- Strategie rozpočtu drah dle plochy, konstantní otáčky-**168 μm**
- Strategie standardního rozpočtu drah, konstantní otáčky- **116 μm**
- Strategie rozpočtu drah dle plochy, konstantní řezná rychlost -**170 μm**
- Strategie standardního rozpočtu drah, konstantní řezná rychlost -**113 μm**



obrázek 3.22-odstup naměřených bodů od modelu

4. Technicko-ekonomické hodnocení

V rámci této diplomové práce byly vypracovány celkem 4 varianty strategie dokončování tvarových ploch, které je však nutno vyhodnotit z funkčního a ekonomického hlediska, což je právě úkolem technicko-ekonomického hodnocení. Každá varianta má jiné technické parametry a také parametry z hlediska ekonomického, čímž lze říct, že i hospodárnost jednotlivých variant je různá.

Cílem práce byl návrh dokončovací strategie, která by zajišťovala rovnoměrný průběh řezných sil, dosahovala požadované kvality povrchu a požadované přesnosti obrobené plochy a byla zároveň efektivní, co se výrobních časů týče. U všech variant byl zjištěn průběh řezných sil, drsnost povrchu dle parametrů Ra a Rz, rozměrová přesnost a výrobní čas, čímž je možné jednotlivé varianty v těchto aspektech dobře porovnat.

Hodnocení variant se provede s využitím párové analýzy a multikriteriálního hodnocení. Z toho důvodu je nezbytné zvolit technicko-ekonomické hodnotící kritéria, kterým se přiřadí důležitost v podobě váhy samotného kritéria. Ta se následně použijí v multikriteriálním hodnocení, ze kterého nakonec vzejde nejpřívětivější varianta.

4.1 Ekonomické hodnocení

Z povahy řešené problematiky v této diplomové práci se jedná o experimentální práci, ve které je ekonomické hledisko částečně upozaděno a zkoumají se jiné parametry než ty ekonomické. Náklady na stroj, materiál a nástroje jsou identické pro všechny varianty. Co se nákladů týče, lze tedy říct, že fixní náklady jsou pro každou variantu stejné. Variabilní náklady závislé na výrobním čase jsou v podstatě dány hodinovou sazbou stroje a strojním časem. Odlišnost jednotlivých variant z ekonomického hlediska je pouze ve strojních časech, tudíž se ekonomické hodnocení vztáhne pouze na náklady spojené s délkou doby provozu stroje.

Strojní hodinová sazba stroje je 1400Kč/hod. Jednotlivé výrobní časy strategií jsou uvedeny v tabulce níže. Provede-li se vypočet variabilních nákladů a následné srovnání jednotlivých metod, nejhůře vychází první varianta rozpočtu drah po křivce s konstantními otáčkami. To je dáno větším množstvím odjetých drah, než u standardního rozpočtu, a zároveň malou řeznou rychlostí u ploch s malým sklonem. Zajímavé je, že s využitím metody s konstantní řeznou rychlostí, se zvýšila efektivita oproti konstantním otáčkám cca o 33%, jelikož se lépe využily možnosti nástroje. Také lze z tabulky zjistit, že vlivem jiného rozpočtu drah při konstantních otáčkách došlo ke změně výrobních časů o 10 minut a úspoře 233 Kč na jednom obrobku. Využitím konstantní řezné rychlosti oproti konstantním otáčkám došlo ke zkrácení výrobních časů cca o 23 minut a úspoře 537 Kč nákladů za provoz stroje.

Číslo varianty	1.konst.n-po kř.	2.konst.n-stand	3.konst.vc-po kř	4.konst.vc-stand
Strojní čas	1h 17min	1h 7min	51min	44min
Variabilní náklady (VN=SHS*t_s)	1797 Kč	1563 Kč	1190 Kč	1027 Kč

4.2 Volba a seřazení hodnotících ukazatelů

Ukazatele slouží k popsání různých procesů. Každý ukazatel musí být popsán určitými prvky. Těmito prvky jsou název, náplň, hodnota ukazatele, jednotky a vypovídající hodnota. [12] Hodnotící ukazatele jsou v tomto případě technického a ekonomického rázu, ale mohou být i jiné například z hlediska bezpečnosti. K vzájemnému porovnání byly vybrány následující technické a ekonomické parametry:

- Rozpětí drsnosti povrchu Rz (příčná)
- Rozpětí drsnosti povrchu Ra (příčná)
- Rozpětí drsnosti povrchu Rz (podélná)
- Rozpětí drsnosti povrchu Ra (podélná)
- Dosažená přesnost
- Řezné síly (rozpětí)
- Variabilní náklady

Seřazení hodnotících ukazatelů se provede pomocí párové analýzy. Seřazené ukazatele se ohodnotí váhou podle důležitosti, kterou daný ukazatel vyjadřuje. Váha se získá vzájemným porovnáním jednotlivých ukazatelů, přičemž u každého páru ukazatelů se musí rozhodnout, který ukazatel je důležitější. Důležitější ukazatel získá číselnou hodnotu 1. Tyto hodnoty se ve výsledku sečtou a ukazatel s nejvyšší číselnou hodnotou získá nejvyšší váhu, tudíž je tento ukazatel nejdůležitější (tabulka 4.1).

	Drsnost Rz (příčná)	Drsnost Ra (příčná)	Drsnost Rz (podélná)	Drsnost Ra (podélná)	Rozpětí řezných sil	Variabilní náklady	přesnost	Celková hodnota	Váha
Drsnost Rz (příčná)	X	1	1	1	1	1	0	5	6
Drsnost Ra (příčná)	0	X	1	1	1	1	0	4	5
Drsnost Rz (podélná)	0	0	X	1	1	0	0	2	3
Drsnost Ra (podélná)	0	0	0	X	1	0	0	1	2
Rozpětí řezných sil	0	0	0	0	X	0	0	0	1
Variabilní náklady	0	0	1	1	1	X	0	3	4
přesnost	1	1	1	1	1	1	X	6	7

tabulka 4.1-párová analýza ukazatelů

4.3 Multikriteriální hodnocení

K určení nejvýhodnější varianty se provedlo multikriteriální hodnocení variant. Hodnoty všech ukazatelů pro jednotlivé dokončovací strategie jsou v tabulce 4.2.

	1. strategie	2.strategie	3.strategie	4.strategie
Drsnost Rz-příčná (μm)	4,29	4,78	1,87	3,39
Drsnost Ra-příčná (μm)	0,37	0,72	0,19	0,26
Drsnost Rz-podélná(μm)	5,38	3,51	2,99	1,53
Drsnost Ra-podélná(μm)	0,6	0,46	0,8	0,24
Rozpětí řezných sil (N)	48,5	65	29	54,5
Variabilní náklady (Kč)	1797	1563	1190	1027
Přesnost	Dobrá	Velmi dobrá	Dobrá	Velmi dobrá

tabulka 4.2- Hodnoty kritérií pro jednotlivé varianty

Každé strategii se přiřadí pro každý ukazatel hodnota od 10 do 100 v závislosti na hodnotách z tabulky výše. Výsledná hodnota se ještě vynásobí vahou daného ukazatele. Varianta s nejvyšším celkovým bodovým ohodnocením má nejlepší užítost. Výsledkem technicko-ekonomického hodnocení je tedy určení užítosti jednotlivých variant, dle uvedených ukazatelů (tabulka 4.3).

kriterium	váha	1.rozpočet dle křivky-konst.n		2.standard. Rozpočet-konst.n		3.rozpočet dle křivky-konst.vc		4.standard.rozpočet-konst.vc	
		prostá hodnota	vážená hodnota	prostá hodnota	vážená hodnota	prostá hodnota	vážená hodnota	prostá hodnota	vážená hodnota
drsnost rz (příčná)	6	45	270	40	240	100	600	55	330
drsnost ra (příčná)	5	55	275	30	150	100	500	70	350
drsnost rz (podélná)	3	30	90	45	135	55	165	100	300
drsnost ra (podélná)	2	40	80	55	110	30	60	100	200
rozpětí řezných sil	1	60	60	45	45	100	100	55	55
variabilní náklady	4	60	240	70	280	90	360	100	400
přesnost	7	80	560	90	630	80	560	90	630
Výsledná užítost	celkem: 28*100 = 2800	1575		1590		2345		2265	
relativní užítost variant (%)	X	56,25		56,79		83,75		80,89	

tabulka 4.3- Vyhodnocení variant multikriteriální analýzou

5. Zhodnocení

5.1 Zhodnocení

Cílem této diplomové práce bylo navržení strategie dokončování tvarových ploch, která by určitým způsobem dokázala udržovat stálý průběh řezných sil a s tím spojené namáhání nástroje, které může negativně ovlivnit dokončovací proces. Takováto strategie musí být schopna dosahovat kvality povrchu a rozměrové přesnosti odpovídající dokončování, jelikož podstatou dokončování je dát výrobku finální podobu o odpovídajících parametrech. Další důležitý aspekt je dostatečná efektivita dokončovací strategie a s tím spojená produktivita.

K tomu, aby mohly být navrženy dokončovací strategie, bylo nejdříve nutné popsat danou problematiku a nastínit pohled řešení, kterým se tato diplomová práce vydá. K tomu posloužila zpracovaná teoretická část, kde byla daná problematika podrobně rozebrána.

Dokončovací frézování je ovlivněno spoustou parametrů. Může se jednat o geometrii břitu, vyložení nástroje, záběrové podmínky atd. Tato práce se zaměřila na dva přístupy. Prvním parametrem byla strategie rozpočtu drah. Způsob rozpočtu dráhy, jak je i z výsledků experimentu patrné, zásadně ovlivňuje dokončovací proces s ohledem na řezné síly, kvalitu povrchu i rozměrovou přesnost. Druhý parametr, který byl v této práci zkoumán je vliv řezné rychlosti. Opět jak je z výsledků experimentu patrné, tento parametr taktéž ovlivňuje dokončování a hlavně z hlediska řezné síly a výrobních časů.

Na základě této teoretické části byly navrženy celkem 4 strategie kombinující tyto dva parametry. Byly porovnány strategie standardního rozpočtu běžně využívaného v CAM systémech a rozpočtu dle tvaru plochy v kombinaci s vlivem řezné rychlosti, která byla zkoumána ve strategiích v podobě konstantních otáček a konstantní řeznou rychlostí. Výsledky a srovnání jednotlivých strategií byly popsány v kapitolách 3.4.1, 3.4.2, 3.4.3.

Na základě dat naměřených v průběhu a po experimentu bylo taktéž vypracováno technicko-ekonomické zhodnocení všech variant, které kombinovalo zjištěné údaje technického rázu (drsnost, přesnost, řezné síly) s určitým ekonomickým ukazatelem v podobě variabilních nákladů.

Toto vyhodnocení ukázalo, že na základě zvolených ukazatelů byla jako nejlepší varianta zhodnocena 3.varianta rozpočtu drah dle tvaru plochy a konstantní řezné rychlosti. Ta dosahovala nejmenšího rozpětí řezných sil a z hlediska zatížení nástroje je tedy nejvhodnější. Zároveň dosahovala nejlepších výsledků v příčné drsnosti, což je do jisté míry dáno vhodným způsobem rozpočítání drah.

Všechny varianty vykazovaly horší podélnou drsnost ve směru obrábění, než u příčné drsnosti kolmé na směr obrábění, což je pro frézování typické. Variabilní náklady spojené s délkou provozu stroje byly mnohem lepší u strategií s konstantní řeznou rychlostí, jelikož byly využity větší otáčky (kromě plochy 90°) a byl více využit potenciál řezného nástroje.

6. Závěr

Zjištěné závěry dávají představu o vlivech strategie rozpočtu drah a řezné rychlosti. V dalších šetřeních je žádoucí hledat vzájemné propojení dalších faktorů, které ovlivňují dokončování. Na tomto základě by mohla být v budoucnu vytvořena metodika, na jejímž základě by mohly být voleny parametry dokončování v závislosti na definovaných požadavcích.

Tato diplomová práce může posloužit jako jakýsi preexperiment, který lze využít právě pro stanovení takovéto metodiky. Výzkumný tým z výzkumného pracoviště RTI pod Fakultou strojní v Plzni se zabývá právě touto problematikou a s pomocí a radami těchto pracovníků byla tato diplomová práce vypracována. Tato práce jim může pomoci do dalšího bádání. V delší časovém horizontu je možná aplikace této metodiky pro dokončování tvarových ploch u producentů moderních CAM systémů.

Literatura

- [1] GrabCAD. *Waves* [online].2016 [cit. 2017-5-29]. Dostupné na:<https://grabcad.com/library/ondas-waves-1>
- [2] M.L. Gear Designs. *Frézování tvarových ploch* [online]. 2015 [cit. 2017-5-29]. Dostupné na: <http://mlgeardesigns.blog.cz/1503/frezovani-tvarovych-ploch>
- [3] SADÍLEK, M., *CAM systémy v obrábění I. 1. Vyd.* Ostrava :VŠB – TU Ostrava, 2008, 153 s., ISBN 978-248-1821-4.
- [4] 1CPro.CZ. *HSMWorks/Inventor HSM-Adaptivní obrábění* [online]. 2015 [cit. 2017-5-29]. Dostupné na: http://1cpro.cz/hsmworks_adaptivni_obrabeni.php
- [5] SOVA, F., HAMOUZ, L. Softwarová optimalizace dráhy frézovacího nástroje při práci na čisto. In *Strojírenská technologie - Plzeň 2004*. Plzeň: Západočeská univerzita, 2004. s. 1-15. ISBN: 80-7043-304-3
- [6] CAD.CZ. *CAM systémy a výroba tvarových ploch* [online]. 2011 [cit. 2017-5-29]. Dostupné na: <https://www.cad.cz/strojirenstvi/38-strojirenstvi/2321-cam-systemy-a-vyroba-tvarovych-ploch.html>
- [7] Česánek,J., Dobrý,A., Sova,F. *Zatížení nástroje při frézování tvarových ploch*. Dílčí výzkumná zpráva k projektu ME 365 za rok 2002. Plzeň: Západočeská univerzita, 2002.
- [8] POKORNÝ, P., KUBEK, A. *Problematika opotrebenia pri 5-osovom frézovaní*. In *Strojírenská technologie: Sborník příspěvků IV. Mezinárodní konference*, 25. - 26.1.2011, Plzeň, ČR. Plzeň : Západočeská univerzita v Plzni, 2011, ISBN 978-80-7043-934-0.
- [9] SOLIDCAM.CZ. *HSR/HSM moduly pro 3D vysokorychlostní obrábění*. [online] [cit. 2017-5-29]. Dostupné na:<http://www.solidcam.cz/produkty/cam-moduly/3d-hsm-vysokorychlostni-frezovani/>
- [10] *Příručka Sandvik Coromant -Tvarové frézování* [online]. [cit. 2017-5-29]. Dostupné z: http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/milling/application_overview/profile_milling/profile_milling/pages/default.aspx
- [11] *Surface topography analysis in high speed finish milling inclined hardened steel* [online]. School of Engineering (Mechanical), University of Birmingham, 2003 [cit. 2017-5-29]. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022460X03012598>
- [12] KLEINOVÁ, Jana. *Ekonomické hodnocení výrobních procesů*. 1. vyd. V Plzni: Západočeská univerzita, 2005, 88 s. ISBN 80-704-3364-7
- [13] W. J. Ren, J. Y. He, Y. Yu, *Tool-Path Scheduling for Free-Form Surface Based on MasterCAM*, Applied Mechanics and Materials, Vols. 556-562, pp. 1400-1403, 2014. Dostupné z: <https://www.scientific.net/AMM.556-562.1400>
- [14] AXIOMTECH.CZ. *5 osé frézování* [online] [cit. 2017-5-29]. Dostupné na: <http://www.axiomtech.cz/24820-nx-cam-5-ose-frezovani>

- [15] HNATIK, Jan, Lubos KROFT a Jan KUTLWASER. *Constant chip volume machining*. [online]. 2015, [cit. 2017-5-29]. Dostupné na: https://www.researchgate.net/publication/311662248_Constant_Chip_Volume_Machining
- [16] CAD.CZ. *CAM systémy a výroba tvarových ploch* [online] [cit. 2017-5-29]. Dostupné na: <https://www.cad.cz/component/content/article/1402.html>
- [17] Materiály pro rezné nástroje [online] [cit. 2017-5-29]. Dostupné na: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/mat_pro_rez_nastroje/materialy_pro_rezne_nastroje_v2.pdf
- [20] Pokorný,P; Zaujec,R. *Wear and Durability Milling Tools Depending on the CAM Strategies* [online]. 2015, , 7 [cit. 2017-5-29]. Dostupné na: <https://otik.uk.zcu.cz/handle/11025/16131>
- [19] Teorie obrábění. *Podklady pro zkoušku* [online] [cit. 2017-5-29] Dostupné na: <https://portal.zcu.cz/portal/studium/courseware/kto/to/prednasky.html>
- [18] MMSPEKTRUM. *Moderní výkonné frézovací nástroje výměnná hlavička* [online]. 2008 [cit. 2017-5-29]. Dostupné na: <http://www.mmspektrum.com/clanek/moderni-vykonne-frezovaci-nastroje-2.html>
- [21] Zuperl U., Cus F., Reibenschuh M. *Neural control strategy of constant cutting force system in end milling* [online]. 2010, [cit. 2017-5-29]. Dostupné na: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0736584510001468>
- [22] Kroupa, M. *POROVNÁNÍ PŘESNOSTI DIGITALIZOVANÉ TVAROVÉ PLOCHY S PŮVODNÍ PLOCHOU MODELU*. Plzeň, 2008. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni. Vedoucí práce doc. Ing Jiří Česánek Ph.D.
- [23] Nezdařilová M. *Metrologická confirmace měřidla*[online]. 2011, [cit. 2017-5-29]. Dostupné na: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=41432
- [24] UPVP3D.CZ. *Měření jakosti povrchu*. [online]. [cit. 2017-5-29]. Dostupné na http://uvp3d.cz/drtic/?page_id=1985
- [25] GAJDOŠÍK, D. *Měření drsnosti povrchů se zaměřením na měřící techniku Mytutoyo SJ 210*. České Budějovice, 2013. Bakalářská práce. Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích. Vedoucí práce PaedDr. Bedřich Veselý, Ph.D.
- [26] ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE PŘI VUT BRNO. *Ocel 12 050* [online]. [cit. 2017-5-29]. Dostupné z:http://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/databaze_modelu_soubory/ocel_12050.3.pdf
- [27] Měřicí vybavení KTO/RTI. *Katedra technologie obrábění* [online]. [cit. 2017-5-29]. Dostupné z: http://www.kto.zcu.cz/o-katedre/Vybaveni_katedry/merici_vybaveni_KTO.html
- [28] Internetové stránky RTI. *Laboratoř dílenské metrologie*. [online]. [cit. 2017-5-29]. Dostupné na: http://www.rti.zcu.cz/laboratore/ldm/vybaveni_ldm.html

Přílohy diplomové práce



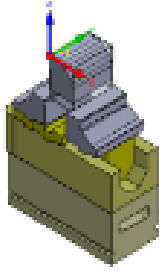
Návrh strategie dokončování tvarových ploch


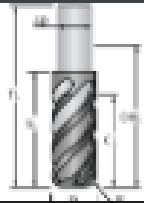

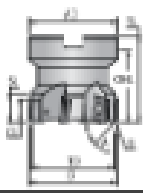
PŘÍLOHA č. 1: Program na hrubování a seřizovací list

**PŘÍLOHA č. 2: Rozpočítání kontaktních bodů a středů nástroje pro rozpočet drah
dle tvaru plochy**

PŘÍLOHA č. 3: Tabulky naměřených hodnot řezných sil pro jednotlivé strategie

Příloha č.1: Program na hrubování a seřizovací list

		Nastavení projektu pro: POLOTOVAR_SESTAVA									
Jednotky	mm										
Typ obrábku	Frézování										
CNC-název	M3_H330_DMU40eVa_ZAPADOCESKA_UN										
Obráběný materiál	0										
Error	0										
Adaptér nástroje	H9K63										
Obráběný materiál	CSN 12 050 (C45 - 1.0503)										
Operace	9										
											
						Velikost polotovaru	X:60.1 Y:100.1 Z:90.1				
						Model	D:\ZČU\Práce ZČU\Solid CAM\CTX BETA\ZCU\Disertace\Test A1\Polotovaz sestava.SLDASM				
						Adresář	D:\ZČU\Práce ZČU\Solid CAM\CTX BETA\ZCU\Disertace\Test A1\POLOTOVAR_SESTAVA.prt				
						Poznámky k obrábku					
						Název projektu	POLOTOVAR_SESTAVA				
						X min	X max	Y min	Y max	Z min	Z max
						-2.85	69.115	-32.5	152.5	-36.35	52
						Celkový čas:					0:07:35

T34-Spindle_Y-1A	Popis nástroje: Fr D16 r0.2 L32 z4 (ostrena) - SEH 422825				
		Prumer nástroje=15.5 Prumer stopky=16 Vyhlozeni=45 Delka rezne hrany=32	Počet zubů: 4 Cutting time: 0:03:38 mm		
Toroidní fréza - WELDON KFH D16x80 ID:Fr					
T126-Spindle_Y-1B	Popis nástroje: Fr D50 r2 L10 z7 (OSG) - PSE11R050M22-7				
		Prumer nástroje=50 Prumer stopky=49 Vyhlozeni=39.95 TD=50 Delka rezne hrany=10 Uhel spicky=0	Počet zubů: 7 Cutting time: 0:03:58 mm		
Čelní fréza - TRN D22 L60 ID:Fr D50 r2 L10					

Index	Název operace - (Typ Operace)						
	Nul. Bod	Otáčky Dok.	Posuv XY/Posuv	Posuv Z/Posuv pro Do	Čas		
	Číslo nástroje	Chlazení nástroje					
Popis							
X min	X max	Y min	Y max	Z min	Z max		
1	HRUB (MACH - 3D iMachining) :						
	Nulový bod 1 (1- Poloha)		2281	4559	80000	0:03:02	
	T34-Spindle_Y-1A			Chlazení vřetene/hlavyc:Kapalina			
	26.997	69.115	-10.173	110.278	-36.35	2	

2	ODLEHCE NI NAHOTOVY - (Kontura) :					
	Nulový bod 1 (1- Poloha)	180	0.1	0.05	0:00:36	
	34-Spindle_Y-1A		Chlazení vřetene/hlavyc:Kapslina			
	-2.85	2.15	-16.273	116.273	0	4
3	PLOCHA 0 NAHOTOVY - (Kontura) :					
	Nulový bod 1 (1- Poloha)	250	0.15	0.15	0:01:28	
	126-Spindle_Y-1B		Chlazení vřetene/hlavyc:Proud vzduchu vřetenem			
	10	10	-52.5	152.5	0.5	3
4	PLOCHA 15 NAHOTOVY - (Kontura) :					
	Nulový bod 1 (2- Poloha)	250	0.15	0.15	0:00:30	
	126-Spindle_Y-1B		Chlazení vřetene/hlavyc:Proud vzduchu vřetenem			
	24.959	52.5	-52.5	152.5	-0.811	9
5	PLOCHA 30 NAHOTOVY - (Kontura) :					
	Nulový bod 1 (3- Poloha)	250	0.15	0.15	0:00:30	
	126-Spindle_Y-1B		Chlazení vřetene/hlavyc:Proud vzduchu vřetenem			
	34.239	52.5	-52.5	152.5	-4.653	17
6	PLOCHA 45 NAHOTOVY - (Kontura) :					
	Nulový bod 1 (4- Poloha)	250	0.15	0.15	0:00:30	
	126-Spindle_Y-1B		Chlazení vřetene/hlavyc:Proud vzduchu vřetenem			
	45.744	52.5	-52.5	152.5	-14.306	27
7	PLOCHA 60 NAHOTOVY - (Kontura) :					
	Nulový bod 1 (5- Poloha)	250	0.15	0.15	0:00:30	
	126-Spindle_Y-1B		Chlazení vřetene/hlavyc:Proud vzduchu vřetenem			
	52.5	57.896	-52.5	152.5	-30.141	39
8	PLOCHA 75 NAHOTOVY - (Kontura) :					
	Nulový bod 1 (6- Poloha)	250	0.15	0.15	0:00:30	
	126-Spindle_Y-1B		Chlazení vřetene/hlavyc:Proud vzduchu vřetenem			
	52.5	59.239	-52.5	152.5	-35.051	52

Upínač

Příloha č.2: Rozpočítání kontaktních bodů a středů nástroje pro rozpočet drah dle tvaru plochy

1.plocha(0°)								2.plocha (15°)				3.plocha (30°)			
kontaktní body		střed nástroje		kontaktní body		střed nástroje		kontaktní body		střed nástroje		kontaktní body		střed nástroje	
X	z	X	Z	X	Z	X	Z	x	z	x	z	x	z	X	Z
0	0	0	8	10,2	0	10,2	8	20,193	-0,01	22,071	7,74	29,832	-2,688	33,659	4,3402
0,2	0	0,2	8	10,4	0	10,4	8	20,386	-0,062	22,264	7,688	30,005	-2,788	33,832	4,2402
0,4	0	0,4	8	10,6	0	10,6	8	20,579	-0,114	22,457	7,636	30,178	-2,888	34,005	4,1402
0,6	0	0,6	8	10,8	0	10,8	8	20,772	-0,166	22,65	7,584	30,351	-2,988	34,178	4,0402
0,8	0	0,8	8	11	0	11	8	20,965	-0,218	22,843	7,532	30,524	-3,088	34,351	3,9402
1	0	1	8	11,2	0	11,2	8	21,158	-0,27	23,036	7,48	30,697	-3,188	34,524	3,8402
1,2	0	1,2	8	11,4	0	11,4	8	21,351	-0,322	23,229	7,428	30,87	-3,288	34,697	3,7402
1,4	0	1,4	8	11,6	0	11,6	8	21,544	-0,374	23,422	7,376	31,043	-3,388	34,87	3,6402
1,6	0	1,6	8	11,8	0	11,8	8	21,737	-0,426	23,615	7,324	31,216	-3,488	35,043	3,5402
1,8	0	1,8	8	12	0	12	8	21,93	-0,478	23,808	7,272	31,389	-3,588	35,216	3,4402
2	0	2	8	12,2	0	12,2	8	22,123	-0,53	24,001	7,22	31,562	-3,688	35,389	3,3402
2,2	0	2,2	8	12,4	0	12,4	8	22,316	-0,582	24,194	7,168	31,735	-3,788	35,562	3,2402
2,4	0	2,4	8	12,6	0	12,6	8	22,509	-0,634	24,387	7,116	31,908	-3,888	35,735	3,1402
2,6	0	2,6	8	12,8	0	12,8	8	22,702	-0,686	24,58	7,064	32,081	-3,988	35,908	3,0402
2,8	0	2,8	8	13	0	13	8	22,895	-0,738	24,773	7,012	32,254	-4,088	36,081	2,9402
3	0	3	8	13,2	0	13,2	8	23,088	-0,79	24,966	6,96	32,427	-4,188	36,254	2,8402
3,2	0	3,2	8	13,4	0	13,4	8	23,281	-0,842	25,159	6,908	32,6	-4,288	36,427	2,7402
3,4	0	3,4	8	13,6	0	13,6	8	23,474	-0,894	25,352	6,856	32,773	-4,388	36,6	2,6402
3,6	0	3,6	8	13,8	0	13,8	8	23,667	-0,946	25,545	6,804	32,946	-4,488	36,773	2,5402
3,8	0	3,8	8	14	0	14	8	23,86	-0,998	25,738	6,752	33,119	-4,588	36,946	2,4402
4	0	4	8	14,2	0	14,2	8	24,053	-1,05	25,931	6,7	33,292	-4,688	37,119	2,3402
4,2	0	4,2	8	14,4	0	14,4	8	24,246	-1,102	26,124	6,648	33,465	-4,788	37,292	2,2402
4,4	0	4,4	8	14,6	0	14,6	8	24,439	-1,154	26,317	6,596	33,638	-4,888	37,465	2,1402
4,6	0	4,6	8	14,8	0	14,8	8	24,632	-1,206	26,51	6,544	33,811	-4,988	37,638	2,0402
4,8	0	4,8	8	15	0	15	8	24,825	-1,258	26,703	6,492	33,984	-5,088	37,811	1,9402
5	0	5	8	15,2	0	15,2	8	25,018	-1,31	26,896	6,44	34,157	-5,188	37,984	1,8402
5,2	0	5,2	8	15,4	0	15,4	8	25,211	-1,362	27,089	6,388	34,33	-5,288	38,157	1,7402
5,4	0	5,4	8	15,6	0	15,6	8	25,404	-1,414	27,282	6,336	34,503	-5,388	38,33	1,6402
5,6	0	5,6	8	15,8	0	15,8	8	25,597	-1,466	27,475	6,284	34,676	-5,488	38,503	1,5402
5,8	0	5,8	8	16	0	16	8	25,79	-1,518	27,668	6,232	34,849	-5,588	38,676	1,4402
6	0	6	8	16,2	0	16,2	8	25,983	-1,57	27,861	6,18	35,022	-5,688	38,849	1,3402
6,2	0	6,2	8	16,4	0	16,4	8	26,176	-1,622	28,054	6,128	35,195	-5,788	39,022	1,2402
6,4	0	6,4	8	16,6	0	16,6	8	26,369	-1,674	28,247	6,076	35,368	-5,888	39,195	1,1402
6,6	0	6,6	8	16,8	0	16,8	8	26,562	-1,726	28,44	6,024	35,541	-5,988	39,368	1,0402
6,8	0	6,8	8	17	0	17	8	26,755	-1,778	28,633	5,972	35,714	-6,088	39,541	0,9402
7	0	7	8	17,2	0	17,2	8	26,948	-1,83	28,826	5,92	35,887	-6,188	39,714	0,8402
7,2	0	7,2	8	17,4	0	17,4	8	27,141	-1,882	29,019	5,868	36,06	-6,288	39,887	0,7402
7,4	0	7,4	8	17,6	0	17,6	8	27,334	-1,934	29,212	5,816	36,233	-6,388	40,06	0,6402
7,6	0	7,6	8	17,8	0	17,8	8	27,527	-1,986	29,405	5,764	36,406	-6,488	40,233	0,5402
7,8	0	7,8	8	18	0	18	8	27,72	-2,038	29,598	5,712	36,579	-6,588	40,406	0,4402
8	0	8	8	18,2	0	18,2	8	27,913	-2,09	29,791	5,66	36,752	-6,688	40,579	0,3402
8,2	0	8,2	8	18,4	0	18,4	8	28,106	-2,142	29,984	5,608	36,925	-6,788	40,752	0,2402
8,4	0	8,4	8	18,6	0	18,6	8	28,299	-2,194	30,177	5,556	37,098	-6,888	40,925	0,1402
8,6	0	8,6	8	18,8	0	18,8	8	28,492	-2,246	30,37	5,504	37,271	-6,988	41,098	0,0402
8,8	0	8,8	8	19	0	19	8	28,685	-2,298	30,563	5,452	37,444	-7,088	41,271	-0,06
9	0	9	8	19,2	0	19,2	8	28,878	-2,35	30,756	5,4	37,617	-7,188	41,444	-0,16
9,2	0	9,2	8	19,4	0	19,4	8	29,071	-2,402	30,949	5,348	37,79	-7,288	41,617	-0,26
9,4	0	9,4	8	19,6	0	19,6	8	29,264	-2,454	31,142	5,296	37,963	-7,388	41,79	-0,36
9,6	0	9,6	8	19,8	0	19,8	8	29,457	-2,506	31,335	5,244	38,136	-7,488	41,963	-0,46
9,8	0	9,8	8	20	0	20	8	29,65	-2,558	31,528	5,192	38,309	-7,588	42,136	-0,56
10	0	10	8												

4.plocha (45°)				5.plocha (60°)				6.plocha (75°)				7.plocha (90°)							
kontaktní body		střed nástroje		kontaktní body		střed nástroje		kontaktní body		střed nástroje		kontaktní body		střed nástroje		kontaktní body		střed nástroje	
x	z	X	Z	x	z	X	Z	x	z	X	Z	x	z	X	Z	x	z	X	Z
38,46	-7,729	43,976	-1,931	45,51	-14,78	52,56	-8,981	52,519	-21,86	59,389	-17,73	57,513	-30,58	65,188	-28,32	60,044	-40,24	68,044	-40,24
38,601	-7,87	44,117	-2,072	45,651	-14,92	52,701	-9,122	52,619	-22,03	59,489	-17,9	57,565	-30,78	65,24	-28,51	60,044	-40,44	68,044	-40,44
38,742	-8,011	44,258	-2,213	45,792	-15,06	52,842	-9,263	52,719	-22,21	59,589	-18,08	57,617	-30,97	65,292	-28,71	60,044	-40,64	68,044	-40,64
38,883	-8,152	44,399	-2,354	45,933	-15,2	52,983	-9,404	52,819	-22,38	59,689	-18,25	57,669	-31,16	65,344	-28,9	60,044	-40,84	68,044	-40,84
39,024	-8,293	44,54	-2,495	46,074	-15,34	53,124	-9,545	52,919	-22,55	59,789	-18,42	57,721	-31,36	65,396	-29,09	60,044	-41,04	68,044	-41,04
39,165	-8,434	44,681	-2,636	46,215	-15,48	53,265	-9,686	53,019	-22,73	59,889	-18,6	57,773	-31,55	65,448	-29,28	60,044	-41,24	68,044	-41,24
39,306	-8,575	44,822	-2,777	46,356	-15,63	53,406	-9,827	53,119	-22,9	59,989	-18,77	57,825	-31,74	65,5	-29,48	60,044	-41,44	68,044	-41,44
39,447	-8,716	44,963	-2,918	46,497	-15,77	53,547	-9,968	53,219	-23,07	60,089	-18,94	57,877	-31,93	65,552	-29,67	60,044	-41,64	68,044	-41,64
39,588	-8,857	45,104	-3,059	46,638	-15,91	53,688	-10,11	53,319	-23,25	60,189	-19,11	57,929	-32,13	65,604	-29,86	60,044	-41,84	68,044	-41,84
39,729	-8,998	45,245	-3,2	46,779	-16,05	53,829	-10,25	53,419	-23,42	60,289	-19,29	57,981	-32,32	65,656	-30,06	60,044	-42,04	68,044	-42,04
39,87	-9,139	45,386	-3,341	46,92	-16,19	53,97	-10,39	53,519	-23,59	60,389	-19,46	58,033	-32,51	65,708	-30,25	60,044	-42,24	68,044	-42,24
40,011	-9,28	45,527	-3,482	47,061	-16,33	54,111	-10,53	53,619	-23,76	60,489	-19,63	58,085	-32,71	65,76	-30,44	60,044	-42,44	68,044	-42,44
40,152	-9,421	45,668	-3,623	47,202	-16,47	54,252	-10,67	53,719	-23,94	60,589	-19,81	58,137	-32,9	65,812	-30,64	60,044	-42,64	68,044	-42,64
40,293	-9,562	45,809	-3,764	47,343	-16,61	54,393	-10,81	53,819	-24,11	60,689	-19,98	58,189	-33,09	65,864	-30,83	60,044	-42,84	68,044	-42,84
40,434	-9,703	45,95	-3,905	47,484	-16,75	54,534	-10,96	53,919	-24,28	60,789	-20,15	58,241	-33,29	65,916	-31,02	60,044	-43,04	68,044	-43,04
40,575	-9,844	46,091	-4,046	47,625	-16,89	54,675	-11,1	54,019	-24,46	60,889	-20,33	58,293	-33,48	65,968	-31,21	60,044	-43,24	68,044	-43,24
40,716	-9,985	46,232	-4,187	47,766	-17,04	54,816	-11,24	54,119	-24,63	60,989	-20,5	58,345	-33,67	66,02	-31,41	60,044	-43,44	68,044	-43,44
40,857	-10,13	46,373	-4,328	47,907	-17,18	54,957	-11,38	54,219	-24,8	61,089	-20,67	58,397	-33,86	66,072	-31,6	60,044	-43,64	68,044	-43,64
40,998	-10,27	46,514	-4,469	48,048	-17,32	55,098	-11,52	54,319	-24,98	61,189	-20,84	58,449	-34,06	66,124	-31,79	60,044	-43,84	68,044	-43,84
41,139	-10,41	46,655	-4,61	48,189	-17,46	55,239	-11,66	54,419	-25,15	61,289	-21,02	58,501	-34,25	66,176	-31,99	60,044	-44,04	68,044	-44,04
41,28	-10,55	46,796	-4,751	48,33	-17,6	55,38	-11,8	54,519	-25,32	61,389	-21,19	58,553	-34,44	66,228	-32,18	60,044	-44,24	68,044	-44,24
41,421	-10,69	46,937	-4,892	48,471	-17,74	55,521	-11,94	54,619	-25,49	61,489	-21,36	58,605	-34,64	66,28	-32,37	60,044	-44,44	68,044	-44,44
41,562	-10,83	47,078	-5,033	48,612	-17,88	55,662	-12,08	54,719	-25,67	61,589	-21,54	58,657	-34,83	66,332	-32,57	60,044	-44,64	68,044	-44,64
41,703	-10,97	47,219	-5,174	48,753	-18,02	55,803	-12,22	54,819	-25,84	61,689	-21,71	58,709	-35,02	66,384	-32,76	60,044	-44,84	68,044	-44,84
41,844	-11,11	47,36	-5,315	48,894	-18,16	55,944	-12,37	54,919	-26,01	61,789	-21,88	58,761	-35,22	66,436	-32,95	60,044	-45,04	68,044	-45,04
41,985	-11,25	47,501	-5,456	49,035	-18,3	56,085	-12,51	55,019	-26,19	61,889	-22,06	58,813	-35,41	66,488	-33,14	60,044	-45,24	68,044	-45,24
42,126	-11,4	47,642	-5,597	49,176	-18,45	56,226	-12,65	55,119	-26,36	61,989	-22,23	58,865	-35,6	66,54	-33,34	60,044	-45,44	68,044	-45,44
42,267	-11,54	47,783	-5,738	49,317	-18,59	56,367	-12,79	55,219	-26,53	62,089	-22,4	58,917	-35,79	66,592	-33,53	60,044	-45,64	68,044	-45,64
42,408	-11,68	47,924	-5,879	49,458	-18,73	56,508	-12,93	55,319	-26,71	62,189	-22,57	58,969	-35,99	66,644	-33,72	60,044	-45,84	68,044	-45,84
42,549	-11,82	48,065	-6,02	49,599	-18,87	56,649	-13,07	55,419	-26,88	62,289	-22,75	59,021	-36,18	66,696	-33,92	60,044	-46,04	68,044	-46,04
42,69	-11,96	48,206	-6,161	49,74	-19,01	56,79	-13,21	55,519	-27,05	62,389	-22,92	59,073	-36,37	66,748	-34,11	60,044	-46,24	68,044	-46,24
42,831	-12,1	48,347	-6,302	49,881	-19,15	56,931	-13,35	55,619	-27,22	62,489	-23,09	59,125	-36,57	66,8	-34,3	60,044	-46,44	68,044	-46,44
42,972	-12,24	48,488	-6,443	50,022	-19,29	57,072	-13,49	55,719	-27,4	62,589	-23,27	59,177	-36,76	66,852	-34,5	60,044	-46,64	68,044	-46,64
43,113	-12,38	48,629	-6,584	50,163	-19,43	57,213	-13,63	55,819	-27,57	62,689	-23,44	59,229	-36,95	66,904	-34,69	60,044	-46,84	68,044	-46,84
43,254	-12,52	48,77	-6,725	50,304	-19,57	57,354	-13,78	55,919	-27,74	62,789	-23,61	59,281	-37,15	66,956	-34,88	60,044	-47,04	68,044	-47,04
43,395	-12,66	48,911	-6,866	50,445	-19,71	57,495	-13,92	56,019	-27,92	62,889	-23,79	59,333	-37,34	67,008	-35,07	60,044	-47,24	68,044	-47,24
43,536	-12,81	49,052	-7,007	50,586	-19,86	57,636	-14,06	56,119	-28,09	62,989	-23,96	59,385	-37,53	67,06	-35,27	60,044	-47,44	68,044	-47,44
43,677	-12,95	49,193	-7,148	50,727	-20	57,777	-14,2	56,219	-28,26	63,089	-24,13	59,437	-37,72	67,112	-35,46	60,044	-47,64	68,044	-47,64
43,818	-13,09	49,334	-7,289	50,868	-20,14	57,918	-14,34	56,319	-28,44	63,189	-24,3	59,489	-37,92	67,164	-35,65	60,044	-47,84	68,044	-47,84
43,959	-13,23	49,475	-7,43	51,009	-20,28	58,059	-14,48	56,419	-28,61	63,289	-24,48	59,541	-38,11	67,216	-35,85	60,044	-48,04	68,044	-48,04
44,1	-13,37	49,616	-7,571	51,15	-20,42	58,2	-14,62	56,519	-28,78	63,389	-24,65	59,593	-38,3	67,268	-36,04	60,044	-48,24	68,044	-48,24
44,241	-13,51	49,757	-7,712	51,291	-20,56	58,341	-14,76	56,619	-28,95	63,489	-24,82	59,645	-38,5	67,32	-36,23	60,044	-48,44	68,044	-48,44
44,382	-13,65	49,898	-7,853	51,432	-20,7	58,482	-14,9	56,719	-29,13	63,589	-25	59,697	-38,69	67,372	-36,43	60,044	-48,64	68,044	-48,64
44,523	-13,79	50,039	-7,994	51,573	-20,84	58,623	-15,04	56,819	-29,3	63,689	-25,17	59,749	-38,88	67,424	-36,62	60,044	-48,84	68,044	-48,84
44,664	-13,93	50,18	-8,135	51,714	-20,98	58,764	-15,19	56,919	-29,47	63,789	-25,34	59,801	-39,08	67,476	-36,81	60,044	-49,04	68,044	-49,04
44,805	-14,07	50,321	-8,276	51,855	-21,12	58,905	-15,33	57,019	-29,65	63,889	-25,52	59,853	-39,27	67,528	-37	60,044	-49,24	68,044	-49,24
44,946	-14,22	50,462	-8,417	51,996	-21,27	59,046	-15,47	57,119	-29,82	63,989	-25,69	59,905	-39,46	67,58	-37,2	60,044	-49,44	68,044	-49,44
45,087	-14,36	50,603	-8,558	52,137	-21,41	59,187	-15,61	57,219	-29,99	64,089	-25,86	59,957	-39,65	67,632	-37,39	60,044	-49,64	68,044	-49,64
45,228	-14,5	50,744	-8,699	52,278	-21,55	59,328	-15,75	57,319	-30,17	64,189	-26,03	60,009	-39,85	67,684	-37,58	60,044	-49,84	68,044	-49,84
45,369	-14,64	50,885	-8,84	52,419	-21,69	59,469	-15,89	57,419	-30,34	64,289	-26,21	60,061	-40,04	67,736	-37,78	60,044	-50,04	68,044	-50,04

Příloha č.3: Tabulky naměřených hodnot řezných sil pro jednotlivé strategie

Náměr	1. konstantní krok po ploše - konstantní otáčky																				
	1.plocha (0°)			2.plocha (15°)			3.plocha (30°)			4.plocha (45°)			5.plocha (60°)			6.plocha (75°)			7.plocha (90°)		
	Fx (N)	Fy (N)	Fz (N)	Fx (N)	Fy (N)	Fz (N)	Fx (N)	Fy (N)	Fz (N)	Fx (N)	Fy (N)	Fz (N)	Fx (N)	Fy (N)	Fz (N)	Fx (N)	Fy (N)	Fz (N)	Fx (N)	Fy (N)	Fz (N)
1.	92	135	125,2	71,5	-98,4	78,1	-63,1	-118,2	95,7	-49,9	-88,1	77,9	-58,6	-84	67,1	-65,9	-79,3	49,1	-85,4	-108,4	35,4
2.	92,3	133,3	122,3	68,8	-99,6	75,7	-62,8	-115,7	92,5	-51,7	-86,9	77,9	-58,6	-84	67,1	-65,5	-79,8	49,8	-83,5	-108,2	37,6
3.	93	137	119,9	69	-99,6	76,9	-63,5	-118,9	96,7	-52	-85,7	78,6	-57,8	-84,2	67,1	-65,7	-79,3	48,3	-83,2	-107,2	39,8
4.	91,8	136,7	120,1	69,3	-102,1	76,9	-62,4	-117,4	94,2	-52,1	-87,2	77,9	-58,5	-84,5	67,4	-65,8	-79,8	48,8	-83,2	-107,2	38,6
5.	89,1	138,9	120,8	69,5	-100,8	76,4	-62,4	-118,2	94,7	-51,9	-86,2	78,1	-58,5	-83,3	67,9	-65,9	-79,8	48,8	-83,5	-107,2	38,3
6.	90,3	140,6	124,5	69,9	-99,9	72,8	-62,6	-119,6	94,5	-52,1	-88,1	78,4	-59	-83,5	66,4	-66,3	-80,1	48,8	-84,5	-107,7	37,1
7.	91,6	136,7	121,8	71,4	-98,4	72,8	-63,2	-117,2	94	-50,5	-88,6	79,1	-59,5	-83,5	67,9	-66,3	-80,3	49,8	-83,6	-107,4	37,4
8.	90,3	138,2	120,1	71,9	-99,3	76,9	-63	-117,2	94,7	-52,1	-89,1	78,1	-57,9	-84	67,4	-66,3	-80,6	50	-83,9	-106,9	36,6
9.	89,1	141,4	121,3	X	X	X	-63,3	-117,7	92,8	-51,4	-88,4	78,9	-57,9	-83,3	67,4	-66,6	-80,8	50,5	-84,5	-107,2	36,9
10.	90,6	138,2	123,3	X	X	X	-62,2	-117,4	93,5	-51,8	-89,4	78,1	-58,6	-83,3	67,6	-67,5	-80,3	50,5	-83,6	-106,9	37,4
suma	910,1	1376	1219,3	561,3	-798,1	606,5	-628,5	-1178	943,3	-515,5	-877,7	783	-584,9	-837,6	673,3	-661,8	-800,1	494,4	-838,9	-1074	375,1
arit. průměr	91,01	137,6	121,93	70,163	-99,76	75,813	-62,85	-117,8	94,33	-51,55	-87,77	78,3	-58,49	-83,76	67,33	-66,18	-80,01	49,44	-83,89	-107,4	37,51
celková síla	205,143			143,607			163,442			128,421			122,353			115,003			141,371		

Náměr	2. standardní rozpočet drah - konstantní otáčky																				
	1.plocha (0°)			2.plocha (15°)			3.plocha (30°)			4.plocha (45°)			5.plocha (60°)			6.plocha (75°)			7.plocha (90°)		
	Fx (N)	Fy (N)	Fz (N)	Fx (N)	Fy (N)	Fz (N)	Fx (N)	Fy (N)	Fz (N)	Fx (N)	Fy (N)	Fz (N)	Fx (N)	Fy (N)	Fz (N)	Fx (N)	Fy (N)	Fz (N)	Fx (N)	Fy (N)	Fz (N)
1.	-71,8	164,8	98,9	-74,5	-104,2	72,5	-69,6	-107,2	89,4	-94,7	-138,2	117,2	-83,5	-106,7	84,7	-85,9	-90,6	53	-95,2	-94	26,1
2.	-71,5	164,6	98,1	-74	-110,8	75,7	-68,4	-110,8	91,8	-95,9	-138,4	116,2	-83,7	-107,2	84,7	-88,6	-90,8	54	-95	-95,9	26,9
3.	-70,6	161,6	96,9	-78,4	-110,1	73,5	-68,8	-110,8	90,6	-96,2	-137,7	117,2	-84,7	-106,9	83,5	-86,7	-91,8	53,7	-96,7	-97,2	27,3
4.	-71,3	162,1	97,7	-73,7	-108,4	71,5	-69,1	-109,9	89,1	-95,2	-137,5	115,7	-84,2	-106,9	84	-86,9	-92,8	54,7	-97,4	-97,7	26,9
5.	-70,3	160,9	95,5	-74,5	-112,5	72,8	-69,1	-110,4	90,8	-94,7	-135,7	116,9	-85,2	-106,7	84,2	-88,6	-92,8	55,2	-97,2	-97,7	27,3
6.	-71,3	160,9	96,2	-72,3	-111,6	73,5	-68,8	-110,8	91,1	-95,9	-138,7	116	-84	-107,4	83,5	-88,1	-93	54	-97,7	-97,7	27,1
7.	-70,1	159,7	95,5	-77,9	-105,2	69,6	-68,8	-110,1	91,8	-94,7	-137,7	116,2	-84	-106,7	84,5	-88,6	-92,8	54	X	X	X
8.	-70,3	161,9	93,3	-73,2	-109,6	70,1	-69,1	-110,8	92,3	-95,5	-137,7	116,5	-85,4	-107,9	84,7	-88,4	-92,5	54,4	X	X	X
9.	-70,1	161,4	94,2	-75,2	-106	75	-69,6	-109,6	91,1	-94,5	-137,7	116,5	-84,5	-108,4	83,7	-89,4	-94	54,9	X	X	X
10.	-69,6	161,1	96,7	-74	-110,6	74,5	-69,6	-110,6	91,1	-95,7	-137,2	116	-84,2	-107,4	84	-88,9	-94,5	54,7	X	X	X
suma	-706,9	1619	963	-747,7	-1089	728,7	-690,9	-1101	909,1	-953	-1376,5	1164,4	-843,4	-1072,2	841,5	-880,1	-925,6	542,6	-579,2	-580,2	161,6
arit. průměr	-70,69	161,9	96,3	-74,77	-108,9	72,87	-69,09	-110,1	90,91	-95,3	-137,65	116,44	-84,34	-107,22	84,15	-88,01	-92,56	54,26	-96,53	-96,7	26,93
celková síla	201,202			150,864			158,619			203,931			160,283			138,771			139,263		

měření	3. konstantní krok po křivce - konstantí řezná rychlost																				
	1.plocha (0°)			2.plocha (15°)			3.plocha (30°)			4.plocha (45°)			5.plocha (60°)			6.plocha (75°)			7.plocha (90°)		
	Fx	Fy	Fz	Fx	Fy	Fz	Fx	Fy	Fz	Fx	Fy	Fz	Fx	Fy	Fz	Fx	Fy	Fz	Fx	Fy	Fz
1.	106,4	134,8	175,8	-43,9	-88,6	106,9	66,4	-83,5	114,5	-68,6	-98,4	98,4	-78,4	-85,2	74,7	-95,7	-104,5	55,4	-107,9	-120,6	32,5
2.	106,7	131,1	169,4	-45,2	-89,8	113,5	67,1	-83,7	115,5	-68,4	-98,4	96,4	-78,9	-85	74	-95,9	-104,7	57,6	-109,4	-122,8	32,5
3.	106,2	124,8	177,2	-45,9	-89,1	106,4	66,4	-83	114,5	-68,8	-97,7	96,9	-79,8	-85,2	73,5	-95,9	-106	55,9	-109,1	-121,6	32,2
4.	106,4	132,6	164,1	-41	-86,2	107,4	65,9	-83	110,8	-68,4	-99,1	96,2	-79,3	-85,2	73,7	-95,2	-104,7	55,2	-108,9	-122,1	32
5.	106,2	127	175,5	-43,9	-88,4	111,3	66,9	-83,3	111,1	-68,4	-97,9	97,2	-80,1	-86,2	74,2	-96,7	-105,2	56,2	-109,1	-121,6	32,5
6.	107,9	130,1	160,9	-40,3	-86,4	107,9	65,4	-84,5	110,1	-68,1	-98,6	99,9	-79,3	-86,2	74,5	-98,6	-106,2	57,9	-109,4	-122,8	32,7
7.	107,7	129,2	176,5	-41	-86,2	106,4	66,4	-83,5	113	-69,6	-98,9	97,4	-78,9	-85,7	74	-97,7	-106,4	55,4	-108,9	-124,8	31,7
8.	104,2	126,7	161,4	-43,5	-85,9	113	66,4	-83,3	111,3	-68,4	-99,1	97,7	-78,9	-85,7	74,2	-97,4	-106,4	55,7	-109,6	-122,6	31,7
9.	107,7	128,9	177,2	-39,8	-87,6	107,9	66,2	-83,3	111,1	-68,6	-99,6	97,9	-79,3	-85,7	75,2	-98,9	-107,9	56,9	-109,4	-122,6	32,5
10.	107,9	129,2	172,1	-41,7	-90,3	108,4	66,7	-84,2	110,8	-68,8	-99,9	98,1	-79,3	-86,2	75,4	-98,6	-107,7	55,9	-110,4	-122,1	32,5
suma	1067,3	1294,4	1710,1	-426,2	-878,5	1089,1	663,8	-835,3	1122,7	-686,1	-987,6	976,1	-792,2	-856,3	743,4	-970,6	-1060	562,1	-1092	-1224	322,8
arit. průměr	106,7	129,4	171	-42,62	-87,85	108,9	66,38	-83,53	112,27	-68,61	-98,76	97,61	-79,22	-85,63	74,34	-97,06	-106	56,21	-109,2	-122,4	32,28
celková síla	239,521			147,48			154,903			154,882			138,328			154,325			167,178		

měření	4. standardní rozpočet drah - konstantní řezná rychlost																				
	1.plocha (0°)			2.plocha (15°)			3.plocha (30°)			4.plocha (45°)			5.plocha (60°)			6.plocha (75°)			7.plocha (90°)		
	Fx (N)	Fy (N)	Fz (N)	Fx (N)	Fy (N)	Fz (N)	Fx (N)	Fy (N)	Fz (N)	Fx (N)	Fy (N)	Fz (N)	Fx (N)	Fy (N)	Fz (N)	Fx (N)	Fy (N)	Fz (N)	Fx (N)	Fy (N)	Fz (N)
1	98,1	121,3	152,8	-68,8	-101	134,5	56,2	-72,8	100,6	-84	-118	116,9	-65,9	-92	72,5	-86,2	-99,6	57,6	-84,5	-108	31
2.	98,9	123,3	137,5	-64,2	-101	129,2	55,4	-73,5	99,9	-84,2	-119	118,9	-64,9	-92,3	73,2	-86,9	-99,9	57,6	-85	-105	32
3.	97,4	126,2	148,4	-67,4	-101	127,4	55,2	-74	100,6	-85,2	-118	119,9	-64,5	-92,5	72,5	-86,2	-97,4	56,4	-84,2	-105	31,7
4.	97,9	123,3	147,7	-68,6	-99,6	117,7	56,9	-74,2	99,1	-84,7	-119	119,4	-64,9	-92,5	72,5	-86,4	-99,1	56,6	-84,2	-107	31,5
5.	96,9	126,2	140,4	-68,8	-101	129,6	56,9	-74,5	98,9	-86,2	-120	118,7	-65,2	-92,5	73	-87,2	-101	57,1	-84,2	-107	31,5
6.	98,1	125,5	147,9	-64,9	-101	121,6	55,7	-74,7	97,9	-85,2	-119	118,2	-65,9	-92,5	73,2	-87,2	-99,1	57,6	-85	-108	31,3
7.	96,2	120,1	138,7	-66,7	-101	134,5	55,7	-75,2	97,7	-85,7	-119	118,2	-65,9	-92	72,5	-86,7	-98,4	56,4	-84,7	-105	31,3
8.	97,7	129,6	147	-66,4	-102	122,6	54,7	-75,2	95,7	-85,7	-120	119,9	-65,2	-91,8	72,5	-87,2	-99,4	56,6	-84,2	-107	31,5
9.	97,4	121,6	149,4	-64	-100	120,8	54,4	-74,7	96,9	-86,9	-121	119,9	-65,9	-92,3	72,5	-87,6	-101	57,6	-84,2	-107	31,3
10.	99,1	118,9	134,8	-66,4	-98,9	126,5	54,4	-74,2	97,2	-86,4	-121	118,7	-67,1	-92	73	-86,2	-98,1	56,2	-84,5	-107	31,5
suma	977,7	1236	1445	-666	-1006	1264	555,5	-743	984,5	-854	-1194	1189	-655	-922	727,4	-868	-993	569,7	-845	-1065	314,6
arit. průměr	97,77	123,6	144,5	-66,6	-101	126,4	55,55	-74,3	98,45	-85,4	-119	118,9	-65,5	-92,2	72,74	-86,8	-99,3	56,97	-84,5	-107	31,46
celková síla	213,813			174,744			135,273			188,918			134,517			143,628			139,525		