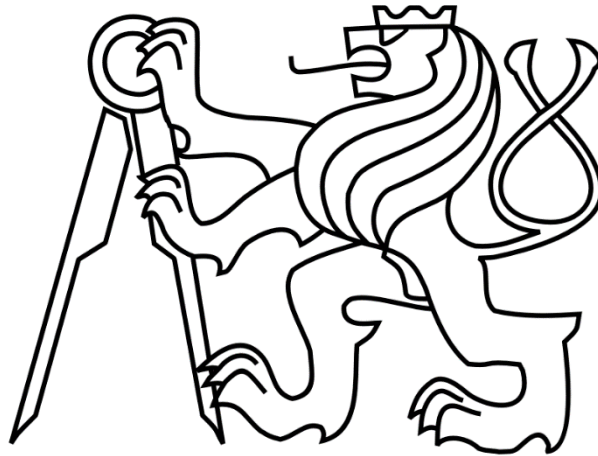


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

Ústav výrobních strojů a zařízení



Diplomová práce

**Optimalizace NC kódu na základě zatížení nástroje
a dynamických vlastností stroje**

2022

Bc. Martin Kůrka

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Kůrka** Jméno: **Martin** Osobní číslo: **426057**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav výrobních strojů a zařízení**
Studijní program: **Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Výrobní stroje a zařízení**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Optimalizace NC kódu na základě zatížení nástroje a dynamických vlastností stroje

Název diplomové práce anglicky:

NC code optimization based on the cutting tool load considering the machine tool dynamic properties

Pokyny pro vypracování:

Provedte analýzu možností optimalizace posuvových rychlostí při frézování se zohledněním zatížení nástroje a dynamických vlastností stroje. Stručná osnova: 1. Rešerše přístupů a metod k optimalizaci posuvových rychlostí při frézování a postupů virtuálního obrábění; 2. Návrh operace s proměnným zatížením nástroje pro analýzu kinematických parametrů obrábění; 3. Simulace silového zatížení nástroje složkami řezných sil podél dráhy nástroje; 4. Návrh postupu optimalizace posuvových rychlostí nástroje v NC kódu; 5. Analýza a zhodnocení výsledků. Rozsah grafické části: 0 stran; Rozsah textové části: 60-80 stran.

Seznam doporučené literatury:

MAREK, Jiří. Konstrukce CNC obráběcích strojů IV.0. Praha: MM publishing, 2018. MM speciál. ISBN 978-80-906310-8-3; ALTINTAS, Yusuf. Manufacturing automation: metal cutting mechanics, machine tool vibrations, and CNC design. 2nd ed. New York: Cambridge University Press, 2012. ISBN 978-0-521-17247-9; ALTINTAS, Y., et al. Virtual process systems for part machining operations. CIRP Annals, 63(2), 585–605, 2014; ERKORKMAZ, K., LAYEGH, S. E., LAZOGLU, I., & ERDIM, H. Feedrate optimization for freeform milling considering constraints from the feed drive system and process mechanics. CIRP Annals, 62(1), 395–398, 2013.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Matěj Sulitka, Ph.D., ústav výrobních strojů a zařízení FS

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

Datum zadání diplomové práce: **19.10.2021**

Termín odevzdání diplomové práce: **03.01.2022**

Platnost zadání diplomové práce: **20.02.2022**

Ing. Matěj Sulitka, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

Ing. Matěj Sulitka, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

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

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl v příloženém seznamu veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací, vydaným ČVUT v Praze 1. 7. 2009.

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

V Praze dne 2.1.2022

.....
podpis

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce panu Ing. Matěji Sulitkovi, Ph.D. za vedení mé práce, cenné rady v jejím průběhu, trpělivost, ochotu a čas, který mi při konzultacích věnoval. Dále bych rád poděkoval konzultantům panu Ing. Michalovi Stejskalovi, panu Ing. Janovi Moravcovi, Ph.D., panu Mgr. Jiřímu Faltovi a paní Mgr. Barboře Hauptfleischové za jejich rady a čas při konzultacích.

Rád bych také poděkoval své rodině a manželce Janě Kůrkové za trpělivost a podporu během studia.

Anotace

Autor:	Bc. Martin Kůrka
Název DP:	Optimalizace NC kódu na základě zatížení nástroje a dynamických vlastností stroje
Rozsah práce:	71 Str., 68 Obr., 16 Tab.
Akademický rok vyhotovení:	2021/2022
Škola:	ČVUT v Praze – Fakulta strojní
Ústav:	Ú12135 – Ústav výrobních strojů a zařízení
Vedoucí diplomové práce:	Ing. Matěj Sulitka, Ph.D.
Konzultanti:	Ing. Michal Stejskal, Ing. Jan Moravec, Ph.D., Mgr. Jiří Falta, Mgr. Barbora Hauptfleischová
Zadavatel:	ČVUT FS, Ústav výrobních strojů a zařízení
Využití:	Optimalizace posuvové rychlosti, snížení zatížení nástroje
Klíčová slova:	Posuvová rychlost, řezné síly, NC kód, NC blok, objem odebraného materiálu, simulace obrábění
Anotace:	Tato diplomová práce se zabývá návrhem operací s proměnlivým zatížením nástroje pro analýzu kinematických parametrů obrábění. Na těchto operacích jsou následně analyzovány složky zatížení nástroje (řezné síly, objem odebíraného materiálu a kroučící moment). Podle těchto složek zatížení nástroje je navržena optimalizace posuvové rychlosti v NC kódu. Vybraná optimalizace je ověřena jak z hlediska chování interpolátoru (žádané a reálné posuvové rychlosti), tak z hlediska vibrací nástroje.

Annotation

Author:	Bc. Martin Kůrka
Title of dissertation:	NC code optimization based on the cutting tool load considering the machine tool dynamic properties
Extent:	71 p., 68 Fig., 16 Tab.
Academic year:	2021/2022
University:	CTU in Prague – Faculty of Mechanical Engineering
Department:	Ú12135 – Department of Production Machines and Equipment
Supervisor:	Ing. Matěj Sulitka, Ph.D.
Consultants:	Ing. Michal Stejskal, Ing. Jan Moravec, Ph.D., Mgr. Jiří Falta, Mgr. Barbora Hauptfleischová
Submitter of the Theme:	CTU – Faculty of Mechanical Engineering, Department of Production Machines and Equipment
Application:	Feed rate optimization, tool load reduction
Key words:	Feed rate, cutting forces, NC code, NC block, material removal rate, machining simulation
Annotation:	This thesis deals with the design of variable tool load operations for the analysis of kinematic machining parameters. The tool load components (cutting forces, material removal rate and torque) are subsequently analysed on these operations. According to these tool load components, the feed rate optimization in the NC code is proposed. The selected optimization is verified both in terms of interpolator behavior (position set-point and linear scale position) and tool vibration.

Seznam použitých veličin a jednotek

a_e	[mm]	Šířka řezu
a_p, b	[mm]	Hloubka řezu
D, DN	[mm]	Průměr nástroje
D_{cap}	[mm]	Efektivní průměr nástroje
F	[N]	Výsledná síla řezání
F_a	[N]	Aktivní síla
F_c, F_t	[N]	Řezná síla (tangenciální)
F_{cn}, F_n, F_r	[N]	Normálová (řezná) síla
F_p	[N]	Pasivní síla
f_z, c	[mm/zub]	Posuv na zub
F_x	[N]	Síla v ose X
F_y	[N]	Síla v ose Y
h	[mm]	Tloušťka třísky
K_{ic}	[N/mm ²]	Řezný koeficient
K_{ie}	[N/mm]	Třecí koeficient
MRR	[mm ³ /s]	Úběr materiálu za vteřinu
n	[ot/min], [min ⁻¹]	Otáčky
RD	[mm]	Rádus dráhy
RHR	[mm]	Radiální hloubka řezu
RR	[mm]	Rádus rohu
v_c, v	[m/min]	Řezná rychlost
v_f, f_x, f_v	[mm/min]	Posuvová rychlost
z	[-]	Počet břitů nástroje
z_c	[-]	Efektivní počet břitů
α	[°], [rad]	Úhel hřbetu
γ	[°], [rad]	Úhel čela
λ	[°], [rad]	Úhel šroubovice
ϕ	[°], [rad]	Úhel natočení nástroje
φ	[°], [rad]	Úhel záběru frézy

Přehled zkratk

B-Rep	Boundary Representation
CAD	Computer aided design
CAM	Computer aided manufacturing
CL	Cutter Location
CNC	Computerized numerical control
CSG	Constructive Solid Geometry
HFM	high feed milling
IPM	Inch per minute
MKP	Metoda konečných prvků
MRR	Material removal rate
NC	Numerical control
Voxel	Volumetric pixel

Obsah:

1. Úvod.....	1
2. Virtuální obrábění	2
2.1. Obecné technologické parametry při frézování	2
2.1.1. Posuvová rychlost	2
2.1.2. Hloubka řezu.....	3
2.1.3. Šířka řezu	3
2.1.4. Řezná rychlost.....	4
2.2. Virtuální modelování strojů a obrábění	4
2.3. Modelování a simulace řezných sil.....	6
2.3.1. Význam řezných sil při obrábění	6
2.3.2. Silové zatížení nástroje při frézování	6
2.3.3. Popis řezných sil.....	7
2.3.4. Mechanistický model řezných sil.....	7
2.3.5. Měření řezných sil	9
2.3.6. Aplikace modelů řezných sil.....	10
2.4. Modelování úběru materiálu.....	10
2.4.1. Objemová reprezentace těles	10
2.4.2. Drátová reprezentace těles.....	11
2.4.3. Metoda reprezentace obrobku pomocí elementů (voxelů)	12
2.5. Software Millvis.....	13
3. Přístupy a metody k optimalizaci posuvových rychlostí při frézování.....	14
3.1. Strategie obrábění	14
3.1.1. Způsoby generování drah nástroje v CAM software.....	14
3.1.2. Bodové obrábění.....	17
3.1.3. Obrábění bokem	18
3.2. Základní dynamika pohonů	18
3.3. Softwary používané pro optimalizaci technologických podmínek obrábění.....	20
3.3.1. CGTech Vericut.....	20
3.3.2. ICAM	23
3.3.3. NCBrain	24
3.3.4. Production module Third Wave Systems	25
3.3.5. Shrnutí.....	25
3.4. Případová studie optimalizace posuvové rychlosti pro frézování volných tvarů.....	26
3.4.1. Model řezu.....	26
3.4.2. Optimalizační schéma.....	28
4. Návrh operace s proměnným zatížením nástroje pro analýzu kinematických parametrů obrábění	30
4.1. Drážka s proměnlivým přídavkem.....	30
4.2. Roh kapsy	31

5. Simulace silového zatížení nástroje složkami řezných sil podél dráhy nástroje.....	32
5.1. Mechanistický model řezných sil na jednoduché drážce	32
5.1.1. 100 % zatížení nástroje v řezu	34
5.1.2. 50 % zatížení nástroje v řezu	36
5.2. Vývoj sil na drážce s proměnlivým přídatkem	38
5.3. Obrábění rohu kapsy	42
5.4. Zhodnocení jednotlivých příkladů obrábění	44
6. Návrh postupu optimalizace posuvových rychlostí nástroje v NC kódu.....	44
6.1. Experiment na stroji MCU 700 s různými variantami vložených NC bloků před rádius 44	
6.2. Vyhodnocení posuvových rychlostí z interpolátoru	48
6.3. Chování interpolátoru	50
6.4. Analýza vzdálenosti před rádiusem kapsy pro zahájení změny posuvové rychlosti	52
6.5. Návrh strategie optimalizace posuvové rychlosti	54
7. Analýza a zhodnocení výsledků	56
7.1. Představení experimentu	56
7.2. Upravený model kapsy a prvotní simulace zatížení kapsy	57
7.3. Simulace zatížení upraveného NC kódu	59
7.4. Vyhodnocení měření vibrací a chování interpolátoru	61
7.5. Zhodnocení výsledků experimentu optimalizovaného NC kódu a kvality obroběného povrchu	62
8. Závěr.....	64
Použitá literatura.....	66
Seznam obrázků	69
Seznam tabulek	71
Seznam použitého softwaru	71
Seznam příloh – elektronické (CD).....	71

1. Úvod

Hlavním účelem optimalizace je vylepšení stávajícího stavu nebo parametrů. Můžeme optimalizovat podle různých kritérií či optimalizovat jeden nebo více parametrů. Optimalizace NC kódu se zabývá úpravou parametrů NC kódu a jejich změnou pro dosažení lepšího výsledku v daném směru.

U optimalizací NC kódu můžeme optimalizovat:

- Řezné podmínky zapsané v NC kódu (např. posuvová rychlost, otáčky)
- Dráhy nástroje (např. omezit přejezdy vzduchem)

Tyto optimalizace NC kódu můžeme provádět například z důvodu:

- Snížení zatížení nástroje
- Snížení času obrábění
- Zvýšení životnosti nástroje
- Zlepšení kvality obrobeného povrchu

Tato práce se zabývá optimalizací NC kódu, která je zaměřena na úpravu řezných podmínek, konkrétně posuvové rychlosti. Díky úpravám posuvové rychlosti přímo ovlivňujeme zatížení nástroje. Můžeme tak optimalizovat posuvovou rychlost z hlediska určitých druhů zatížení.

Aby mohla být optimalizace aplikována na NC kód vzorového dílce, je třeba nejdříve získat znalosti o virtuálním modelování a simulaci řezného procesu. Součástí simulace řezného procesu je zatížení nástroje. Porozumění výpočtu řezných sil, úběru materiálu za minutu a výpočtu kroutícího momentu je důležité pro správné zvolení hodnoty posuvové rychlosti v NC kódu.

Při optimalizaci posuvové rychlosti je podstatné si uvědomit důvod optimalizace. V našem případě je optimalizace prováděna z důvodu snížení zatížení nástroje a kladného vlivu na jeho životnost. Proto je v drtivé většině všech případů optimalizací posuvové rychlosti prováděných v této práci posuvová rychlost snižována. To s sebou nese jisté nevýhody, například při snížení posuvové rychlosti na nějakém úseku NC kódu nám vzrůstá čas obrábění a mírně klesá produktivita.

Mezi předpokládané výhody optimalizace podle zatížení nástroje a dynamických vlastností stroje naopak patří:

- Zrovnoměrnění zatížení nástroje v průběhu obrábění
- Předcházení zvýšené intenzitě opotřebení nástroje, což přispívá k jeho vyšší životnosti (úspora nákladů na nástroj)
- Možnost eliminace odpružení nástroje a podřezů, což vede ke snížení rizika vzniku chyb na obrobeném povrchu

2. Virtuální obrábění

Tato kapitola slouží pro představení základních technologických parametrů. Tyto parametry budou v pozdějších kapitolách využívány pro výpočet řezných sil, případně pro definici řezných podmínek pro vzorové příklady obrábění.

V následujících kapitolách budou představena schémata virtuálního modelování strojů a nástrojů, modelování a simulace řezných sil, kde se zaměříme především na mechanistický model řezných sil. A jako poslední si ukážeme metody modelu úběru materiálu a následně nastíníme využití těchto metod v softwaru Millvis, ve kterém budou pozdější simulace řezných sil a jiných parametrů probíhat.

2.1. Obecné technologické parametry při frézování

Při frézování máme několik základních technologických parametrů. Tyto parametry přímo ovlivňují řezný proces. Dále jsou důležité pro výpočty řezných sil, objemu odebraného materiálu, kroutícího momentu atd., souhrnně můžeme tyto parametry označit jako řezné podmínky. [1]

Mezi základní řezné podmínky patří řezná rychlost, posuvová rychlost a hloubka řezu.

2.1.1. Posuvová rychlost

Posuv je dráha nástroje nebo obrobku v mm, kterou urazí za určitý časový úsek, otáčku, nebo odebere jeden zub ve směru řezu (Obr. 1.).

Rozlišujeme základní druhy posuvů: posuv na otáčku f_n [mm/ot] a posuv na zub f_z [mm/zub], tyto druhy posuvů se nejčastěji udávají u frézování. U soustružení se nejčastěji udává posuvová rychlost za minutu v_f [mm/min]. [1] [2]

Vztah (1) mezi otáčkami, posuvem na zub a posuvovou rychlostí za minutu:

$$f_z = \frac{v_f}{n * z_c} \quad (1)$$

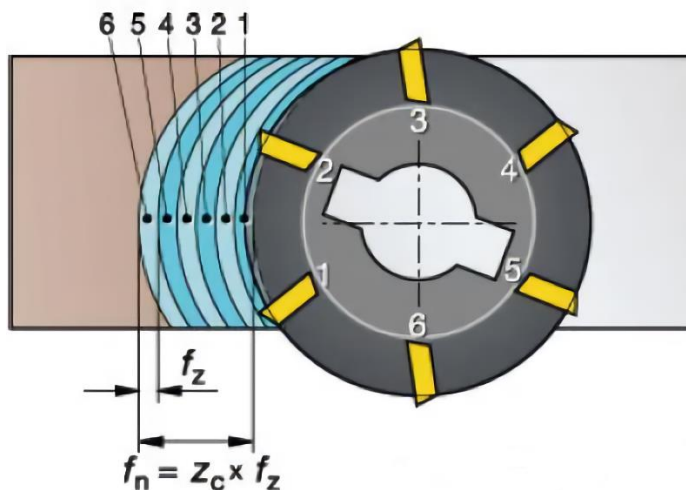
Kde: z_c – efektivní počet břitů [-]

v_f – posuvová rychlost [mm/min], f_z – posuv na zub [mm/zub]

n – otáčky [ot/min]

Doporučené hodnoty posuvové rychlosti se dají dohledat v katalogích výrobců nástrojů, kde jsou udávány v závislosti na obráběném materiálu, tvaru a materiálu břitové destičky a v neposlední řadě také na aplikaci použití (hrubování, před dokončování, dokončování).

V katalogu u každé výměnné břitové destičky lze dohledat hodnoty minimálních a maximálních posuvových rychlostí. Doporučené hodnoty řezných podmínek je nutné dodržovat podél celé dráhy nástroje pro správné utváření třísky, vyhovující kvalitu a trvanlivost břitu nástroje.



Obr. 1.: Posuv na zub [2]

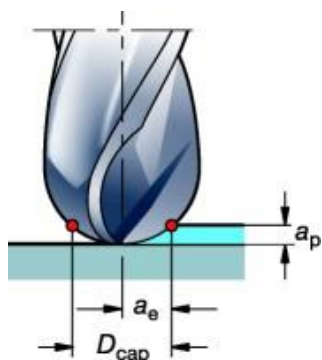
2.1.2. Hloubka řezu

Hloubka řezu a_p [mm] neboli tloušťka odřezávané vrstvy (Obr. 2.) je vzdálenost v mm, která je měřená mezi obrobenou a obráběnou plochou. Tuto hodnotu lze měřit ve směru posuvové rychlosti nebo ve směru kolmém na hlavní pohyb nástroje. [1]

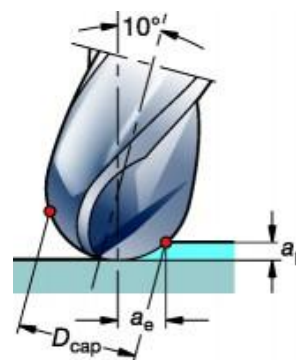
Doporučené hodnoty hloubky řezu můžeme opět nalézt v katalozích výrobců nástrojů. Jsou hlavně závislé na geometrii břitové destičky, nebo nástroje. Výrobce udává maximální a minimální hodnotu pro správné utváření třísky.

2.1.3. Šířka řezu

Šířka řezu a_e [mm] je radiální šířka frézy zapojená do řezu. Na obrázcích (Obr. 2. a Obr. 3.) vidíme ovlivnění efektivního průměru nástroje D_{cap} [mm] a šířky řezu a_e v závislosti na naklonění nástroje. Šířka řezu a_e zůstává prakticky neměnná díky tomu, že se jedná o frézu s kulovým čelem nástroje. Pokud by se jednalo o frézu s jiným, než kulovým čelem nástroje byla by šířka řezu a_e mnohem více ovlivněna. [2]



Obr. 2.: Kulová fréza [3]



Obr. 3.: Naklonená kulová fréza [3]

2.1.4. Řezná rychlost

Řezná rychlost v_c [m/min] je zjednodušeně rychlost řezného pohybu, která je udávána v metrech za minutu. V praxi lze zjednodušeně spočítat jako obvodová rychlost ostří nástroje (2). [1]

$$v_c = \frac{\pi * D * n}{1000} \text{ [m/min]} \quad (2)$$

Kde: D – značí průměr nástroje [mm]

n – jsou otáčky nástroje [min^{-1}]

Máme ale několik parametrů, které ovlivňují řeznou rychlost i když nejsou obsaženy v rovnici (2). Mezi tyto parametry patří: obráběný materiál, materiál nástroje nebo materiál řezné destičky, geometrie nástroje, chlazení, mazání, vlastnosti obráběcího stroje atd. [1]

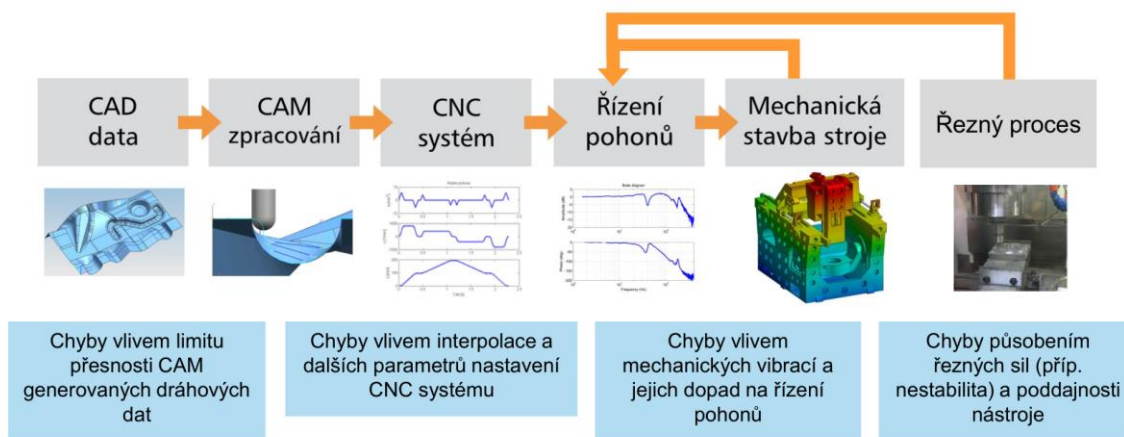
Proto nejčastěji určujeme počáteční řeznou rychlost podle tabulek výrobců nástrojů, kde jsou zohledněny hlavně parametry jako řezný materiál, geometrie břitu a obráběný materiál. Podle průměru nástroje D a vzorce (2) lze vypočítat otáčky a nejbližší nižší nastavit na obráběcím stroji.

Efektivní (skutečná) řezná rychlost

Efektivní řezná rychlost se určuje jako obvodová rychlost na efektivním průměru nástroje D_{cap} [mm]. Tato hodnota má význam při určování správných řezných podmínek pro danou hloubku řezu a_p . Efektivní řezná rychlost má největší význam při použití kulových fréz, fréz s kruhovými břitovými destičkami, nebo u fréz s větším zaoblením rohů.

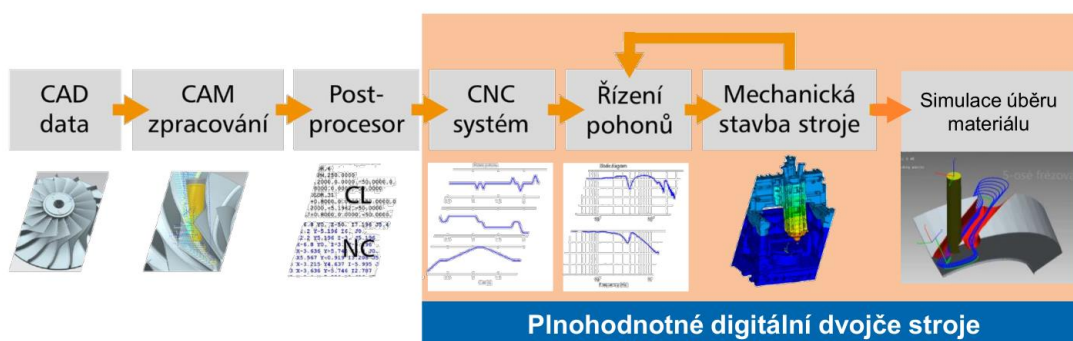
2.2. Virtuální modelování strojů a obrábění

Při postupu návrhu jakéhokoli výrobku jsou vstupním souborem CAD data a následné zpracování pomocí CAM softwaru, který vytváří data dráhového řízení nástroje (CL data) podle zvoleného nástroje, řezných podmínek a zvolené strategie. Následně, po zpracování postprocesorem vzniká NC kód. Tento NC kód vstupuje do CNC řídicího systému, kde jsou interpolátorem řídicího systému data interpretována do časově parametrizovaných dat. Následně vstupují do hry také pohony konkrétního stroje a případně konstrukce stroje. Celý proces obrábění můžeme vidět na následujícím obrázku (Obr. 4.). [4] [5]



Obr. 4.: Schéma obráběcího procesu [4]

Pokud se budeme bavit o virtuálním modelu CNC stroje, tak schéma procesu je podobné. Na začátku, tak jako u schématu obráběcího procesu, jsou vstupujícími parametry CAD/CAM data zpracována postprocesorem. Následně si NC kód vytvořený postprocesorem převezme interpolátor CNC řídicího systému, který je propojený s modelem mechaniky celého stroje včetně pohonů a nosné struktury. A na konec následuje simulace úběru materiálu. Případně může využít také model řezného procesu a model dynamiky obrobku. [4]



Obr. 5.: Schéma virtuálního modelu stroje [6]

Virtuální model stroje (Obr. 5.) nachází své uplatnění: při vývoji nových výrobních strojů a systémů, při monitorování chování určitého stroje nebo výrobní operace, a v neposlední řadě při přípravě procesů obrábění a jejich kontroly. [4]

Téma této práce svou oblastí zaměření spadá do části, kdy máme vygenerovaná NC data post-procesorem. Na základě jejich simulace a z toho plynoucího zatížení nástroje jsou data upravována tak, aby byl nástroj co nejkonstantněji zatížen. Mezi hlavní části, o které se opírá tato práce patří: simulace obráběcího procesu a následná optimalizace NC kódu. Tato optimalizace by ideálně měla přinést lepší průběh zatížení nástroje, snížení vibrací a rázů, které přispějí k delší životnosti nástroje.

2.3. Modelování a simulace řezných sil

Tato kapitola slouží pro stručné uvedení do problematiky modelování a simulace řezných sil. Je zde představeno silové zatížení nástroje při frézování, základní popisy řezných sil a mechanistický model řezných sil. Dále kapitola obsahuje stručné představení měření řezných sil a oblastí aplikací modelů řezných sil.

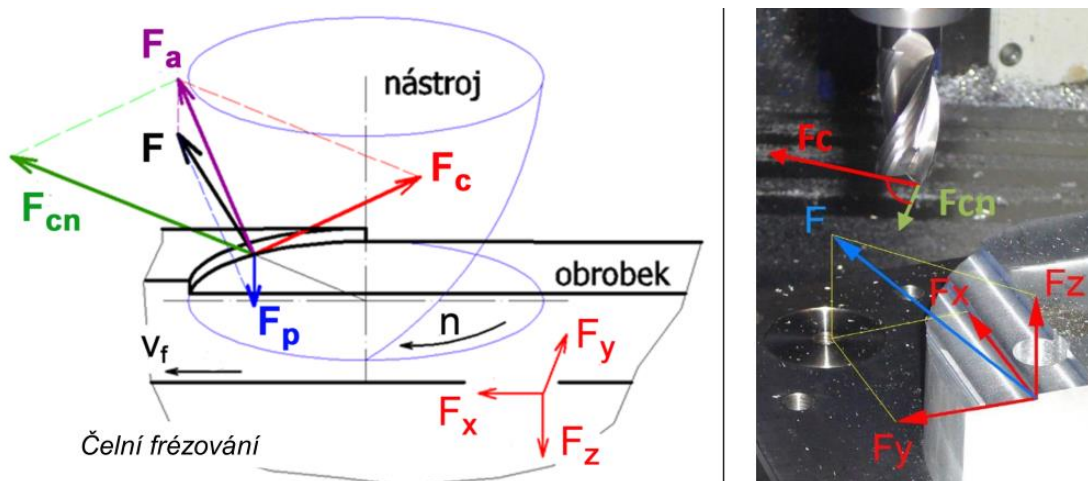
2.3.1. Význam řezných sil při obrábění

Řezné síly jsou spojeny s požadavkem odříznutí přebytečné části materiálu z polotovaru označované jako tříska. K tomu, abychom byli schopni oddělit třísku od polotovaru, musíme překonat odpor materiálu řeznou silou. To, jaký odpor nám materiál klade, je dáno jeho vlastnostmi. [7] [8]

Význam řezných sil při konstrukci strojů je nezanedbatelný. Znalost silového zatížení je hlavním parametrem při dimenzování pohonů obráběcích strojů. Největší význam mají pro pohony anebo rotační stoly. U obráběcích strojů způsobují řezné síly statické nebo dynamické chyby. Statické chyby jsou zapříčiněny odtlačením nástroje od obrobku vyvolané střední složkou síly. Při požadavku na minimalizaci chyb přesnosti obrábění je zapotřebí dosáhnout potřebné tuhosti v místě nástroje. V případě dynamických chyb, které jsou vyvolány harmonickým buzením stroje nebo nástroje, případně zvýšením silového zatížení. Tyto chyby zapříčiní zhoršení kvality obrobeného povrchu. Vznik harmonického buzení může být zapříčiněn např. zvýšenou poddajností nástroje a obrobku. [7] [8]

2.3.2. Silové zatížení nástroje při frézování

Při frézování na nástroj působí několik složek sil (Obr. 6.), mezi hlavní můžeme zařadit řeznou (tangenciální) a normálovou sílu. Dále na nástroji zaznameneáme i aktivní a pasivní sílu, kdy např. pasivní síla se nám snaží nástroj vychýlit směrem od obrobku. Vektorovým součtem všech složek sil, které působí na nástroj, získáme celkovou řeznou sílu F .



Obr. 6.: Silové zatížení nástroje při frézování [7]

Kde: F – výsledná síla řezání [N]
 F_a – aktivní síla [N]
 F_c – řezná síla [N]
 F_{cn} – normálová řezná síla [N]
 F_p – pasivní síla [N]

2.3.3. Popis řezných sil

Existuje několik přístupů k popisu řezných sil:

Jako **první** máme „*popis na základě geometrických a materiálových procesů tvorby třísky (mechanistický model)*“. Mezi výhody tohoto popisu patří rychlost výpočtů. Mezi nevýhody naopak nutnost ověření pomocí provedení experimentu, přepočítání naměřených složek sil ze systému X, Y, Z do systému c, f, p či nižší přesnost. [7]

Jako **druhý** máme „*popis na základě nominální měrné řezné síly pro různé materiály*“. Tento popis se zakládá na Kienzleho vztahu a popisu řezné síly F_c pomocí měrného řezného odporu a průřezu třísky. Mezi výhody tohoto systému patří rychlost výpočtu, univerzálnost použití, případně že odpadá nutnost ověřování pomocí experimentů. Mezi nevýhody patří to, že touto metodou dokážeme počítat pouze řeznou sílu a stejně jako u předchozí metody nižší přesnost. [7]

Jako **třetí** máme „*popis pro konkrétní technologické aplikace*“. Mezi výhody této metody patří rychlost výpočtů. Mezi nevýhody této metody patří stejně jako u první metody nutnost provádět ověřující experimenty a s tím spojená časová náročnost. [7]

Jako **čtvrtý** máme „*simulace úběru materiálu pomocí MKP a materiálových konstitutivních modelů*“. Mezi výhody tohoto modelu patří rozsáhlost získaných parametrů, kdy kromě výpočtu řezných sil můžeme získat i teplotní pole, napětí a ovlivnění obrobku. Další výhodou je, že není třeba provádět ověřující experimenty. Mezi nevýhody patří mnohonásobně delší doba výpočtu a přesnost tohoto výpočtu je závislá na okrajových podmínkách. [7]

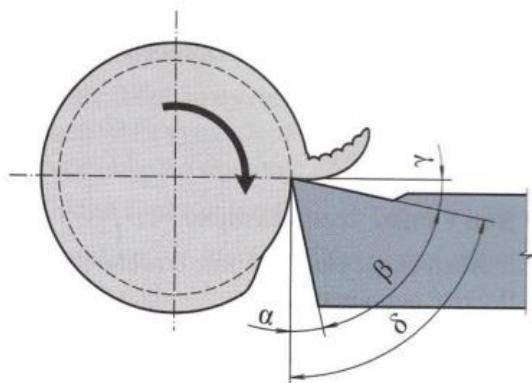
Volbu mezi jednotlivými přístupy popisu učiníme podle konkrétních technologických aplikací, při volbě je třeba zohlednit také omezení jednotlivých druhů popisu řezných sil nástroje. [7]

2.3.4. Mechanistický model řezných sil

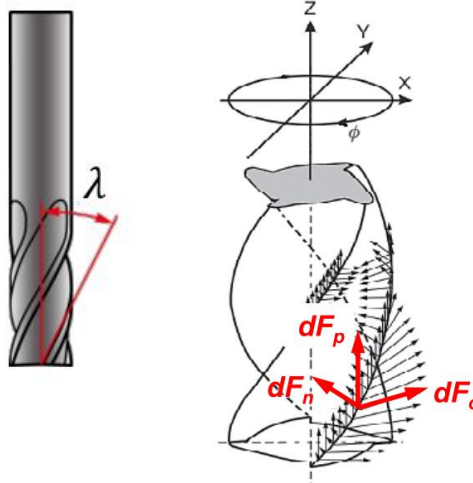
Mechanistický model řezných sil pracuje se složkami řezných sil, které jsou vyjádřeny jako funkce průřezu třísky. Dále pracuje s měrnými řeznými koeficienty K_{ie} (třecí koeficient) a K_{ic} (řezný koeficient), které jsou určeny na základě experimentů. Tato metoda implicitně nezohledňuje vliv řezných podmínek a geometrie ostří. Je tak možné získat přenositelný model pro různé geometrie břitů, různé řezné podmínky a různé operace (soustružení, frézování). [7] [9]

Pokud máme přenositelný model sil, tak do řezných koeficientů K_{ie} a K_{ic} vstupují dále parametry geometrie nástroje (Obr. 7.), jako:

- úhel čela γ
- úhel hřbetu α
- úhel šroubovice λ



Obr. 7.: Úhly na nástroji [9]



Obr. 8.: Hrana břitu [9]

K vytvoření mechanistického modelu řezných sil je použita integrace síly (3) podél hrany břitu (Obr. 8.). [9]

Mechanistický model řezných sil pak vypadá takto (4). Složky jednotlivých sil jsou vázány k elementu řezné hrany nástroje (c, n, p).

$$h_j = F_t \sin(\phi_j) \quad (3)$$

$$\begin{aligned} F_c &= b(K_{ce} + K_{cc}h) \\ F_n &= b(K_{ne} + K_{nc}h) \\ (F_f &= b(K_{fe} + K_{fc}h)) \end{aligned} \quad (4)$$

$$F_p = b(K_{pe} + K_{pc}h)$$

Kde: h – tloušťka třísky, b – hloubka řezu

K_{ie} a K_{ic} – řezné koeficienty

F_c – řezná síla (tangenciální)

F_n – síla normálová

F_p – síla pasivní

Při soustružení jsou nejdůležitější parametry: úhel čela, sklon ostří, tloušťka třísky a jejich vzájemná kombinace. Model použitý na přímém ostří nástroje je možno přenést na tvarové ostří s velmi velkou přesností měřených a vypočítaných průběhů sil. [7]

Při frézování je řezná složka síly závislá hlavně na řezné rychlosti, úhlu šroubovice a jejich vzájemných kombinacích. U tečné a normálové složky síly se k těmto parametrům přidává posuv na otáčku. V případě opotřebení nástroje na hřbetu bude docházet ke zvyšování celkové hodnoty řezné síly, je to dáno především rostoucí normálovou složkou síly a řeznou složkou síly. Při rostoucím opotřebení dochází ke změně poměrů mezi tangenciální (řeznou) složkou síly a normálovou složkou síly. V extrémních případech může normálová složka síly převýšit řeznou složku. To pro obráběcí stroj znamená vyšší požadavky na kroutící moment až o 50 %, dále se zvýší ohybové namáhání nástroje a deformace na nástroji či obrobku. Takovéto obrábění je energeticky náročnější, a to bez zvýšení produktivity či jakosti obrábění. [7] [9]

2.3.5. Měření řezných sil

Měření řezných sil rozdělujeme na přímé a nepřímé. Měření řezných sil nachází uplatnění např. při verifikacích mechanistických či jiných silových popisů viz. výše.

Přímé měření se používá např. při nástrojových testech, zkouškách obrobiteľnosti, případně při optimalizaci řezného procesu. K přímému měření používáme hlavně dynamometry (Obr. 9.). Mezi výhody měření pomocí dynamometrů patří vyšší přesnost, ale na druhou stranu je to metoda časově náročná. Je totiž potřeba provést zpracování signálu a následné vyhodnocení. [7]

Dynamometr by měl mít ideálně vysokou tuhost, malou hysterezi, vysokou citlivost, široký měřicí rozsah a výborné dynamické vlastnosti. Dynamometry se poté dělí na dva druhy: rotační, který vidíme (Obr. 9.) vpravo nahoře a stacionární, které představují zbylé tři obrázky.



Obr. 9.: Piezoelektrické dynamometry [7]

Dynamometry můžeme použít u skoro všech obráběcích operací jako např. frézování, soustružení, broušení, vrtání atd. Obvykle jsou dynamometry upnuty mezi nástroj a vřeteno v případě rotačních dynamometrů. V případě stacionárních dynamometrů jsou upnuty mezi obrobek a stůl (pro frézování) nebo mezi nástroj a nožovou hlavu (pro soustružení).

Mezi nepřímé měření patří stanovení řezné síly buďto z kroutícího momentu anebo z výkonu. Nepřímé měření nevyžaduje složitou přípravu a je velice rychlé. Bohužel ale nenabízí takovou přesnost a citlivost jako měření přímé. Aplikaci nepřímého měření můžeme nalézt např. při hrubovacím a výkonovém obrábění, kde nepotřebujeme vysokou přesnost měření. [7]

2.3.6. Aplikace modelů řezných sil

Modely řezných sil nachází uplatnění v oblasti virtuálního modelu stroje (digitální dvojčata). Slouží také k odhalení chyb obráběného povrchu. Další uplatnění nachází při simulacích řezných sil. Zde můžou sloužit např. k odhalení míst, kde dochází k přetížení nástroje, kolizím nebo podobným nežádoucím jevům. V této práci jsou jako vstupní data výsledky simulací řezných sil a jiných parametrů na zvolených obrobkách, podle kterých je upravena posuvová rychlost nástroje.

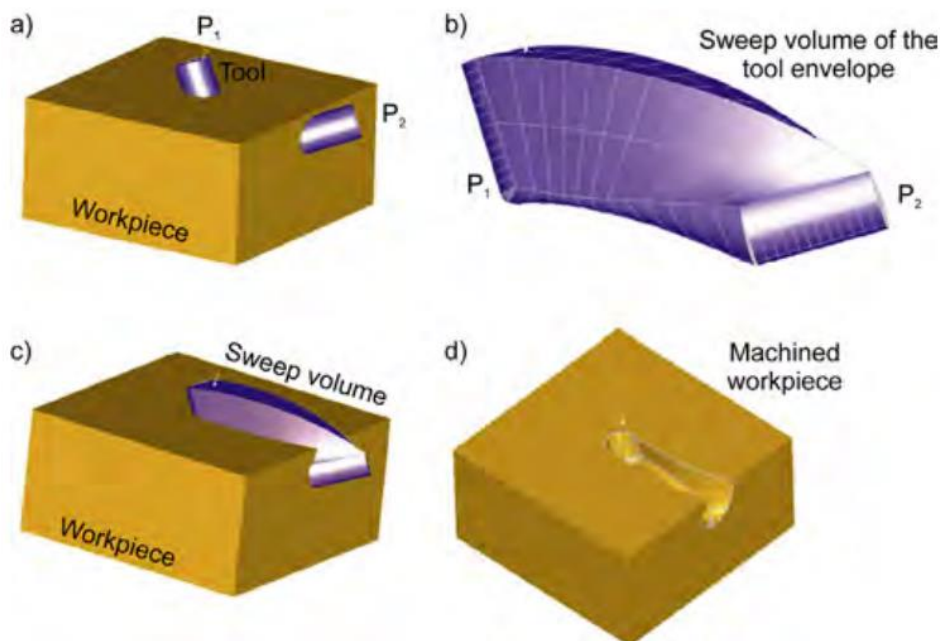
2.4. Modelování úběru materiálu

Pro reprezentaci obrobku a nástroje, a následném výpočtu úběru materiálu existuje řada strategií a metod.

Mezi základní metody patří: objemová reprezentace těles, drátová reprezentace těles, metoda reprezentace obrobku pomocí elementů, které reprezentují objemové těleso (těleso je složeno z krychlí – voxelů).

2.4.1. Objemová reprezentace těles

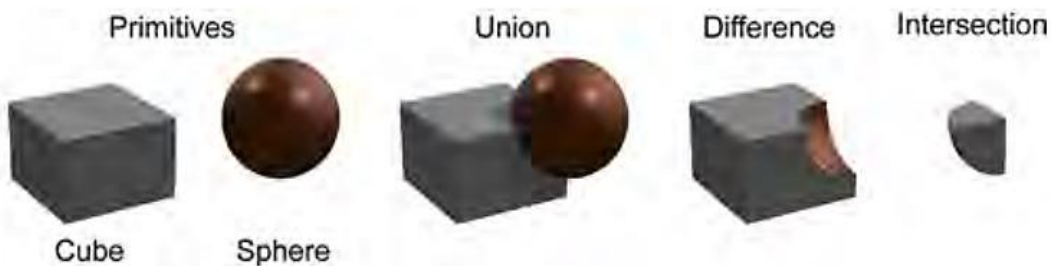
Tato metoda se používá k modelování prostorových modelů nebo objektů. Metoda se dále dělí podle technologie popisu na Boundary Representation (B-Rep), Constructive Solid Geometry (CSG). Metoda B-Rep popisuje tělesa pomocí hranic, tj. povrchovými políčky s hranami a vrcholy. Zároveň nabízí velkou podporu matematických tvarů a křivek. Díky čemuž dosahuje velké flexibility návrhu tvaru a vysokou reprodukovatelnost povrchu. Umožňuje také spojitou a přesnou reprezentaci rozmítání objemu pohyblivé obálky frézy, jak můžeme vidět na obrázku (Obr. 10.). [10]



Obr. 10.: Objemová reprezentace těles (nástroj – obrobek) [10]

Při použití technologie popisu B-Rep je výpočet průsečíku mezi reprezentovanými plochami obtížný a výpočetně časově náročný úkol. [10]

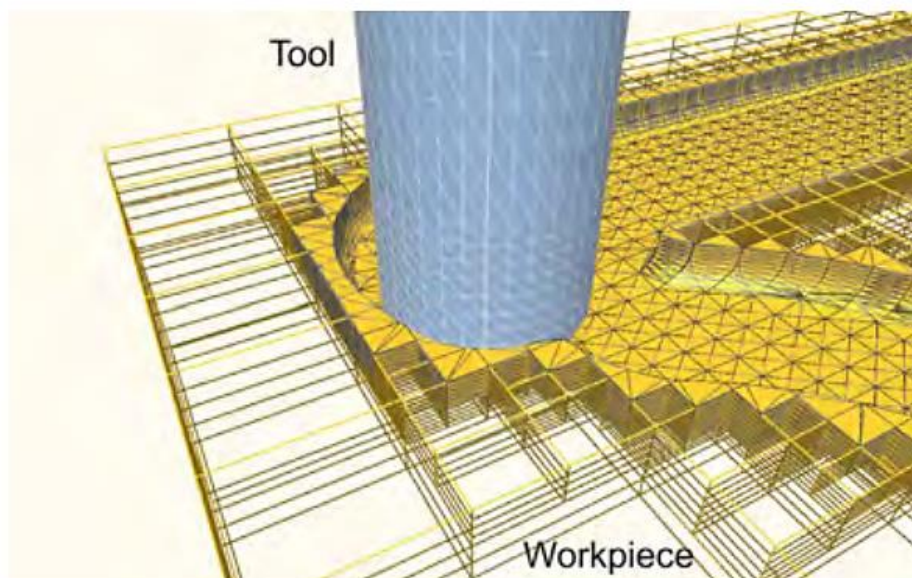
Na rozdíl od techniky popisu B-Rep umožňuje reprezentace CSG snadný popis složení jednotlivých komponent. Hlavní myšlenkou techniky CSG je kombinovat tělesa pomocí booleovských operací jako je sjednocení, rozdíl nebo průnik. Tyto operace jsou vidět na následujícím obrázku (Obr. 11.). [10]



Obr. 11.: Booleovská operace – základní tvary – sjednocení – rozdíl – průnik [10]

2.4.2. Drátová reprezentace těles

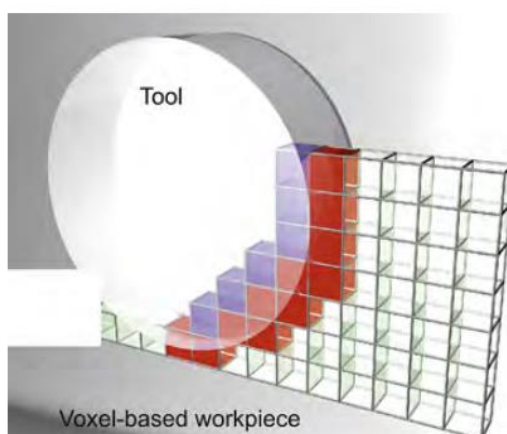
Metoda je založena na tvarech 3D objektu reprezentovaném pomocí bodů a čar. Takto zhotovené modely umožňují rychlé a jednoduché vizualizace součástí, jak je znázorněno na (Obr. 12.), ale nedosahují takové jemnosti jako v případě reprezentace dílů pomocí objemového modelu tělesa. Model zhotovený pomocí této metody nenese žádné informace o vnitřku a vnějšku součásti. [10]



Obr. 12.: Drátová reprezentace těles [10]

2.4.3. Metoda reprezentace obrobku pomocí elementů (voxelů)

Metoda založená na objemových elementech neboli voxelech představuje diskrétní reprezentaci objektů. Při použití metody založené na voxelech se objem aproximuje pomocí malých stejnoměrných krychliček (Obr. 13.), které se nazývají voxely (volumetric pixel). Voxely jsou vyplněny materiálem, nebo zůstávají prázdné. Protože počet voxelů závisí na rozlišení, je zde velkou nevýhodou paměťová náročnost a výpočetní čas při vyšších rozlišeních. [11] [10]



Obr. 13.: Příklad úběru materiálu – model reprezentován sítí voxelů [10]

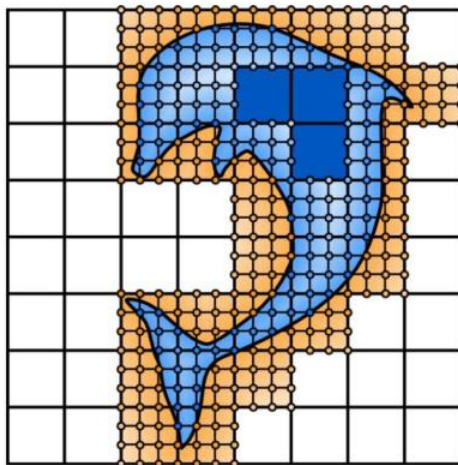
Vzhledem k tomu, že modely reprezentované sítí voxelů jsou jednoduše implementovatelné, používají se nejčastěji pro reprezentaci obrobků nebo nástrojů. Tyto modely jsou využívány také pro simulaci pětiosého obrábění. [10]

Vzhledem k diskrétnímu vzorkování voxelů je tato modelovací technika vystavena chybám aliasingu. Tato chyba může být potlačena zvýšením počtu prvků (voxelů), ale na úkor vyššího výpočetního výkonu a větší náročnosti na paměť. Pokud je zapotřebí přesnější model, lze použít objemové modelování těles pomocí technologie CSG nebo B-Rep. [10]

2.5. Software Millvis

Tento software je vyvíjen na Ústavu výrobních strojů a zařízení na Fakultě strojní ČVUT. Software Millvis slouží pro vizualizaci obráběcího procesu, jeho analýzu (čas obrábění a kvalita povrchu) a porovnání se žádanými vlastnostmi. Software Millvis se dá použít i pro optimalizaci obrábění a výpočtu sil působících v průběhu řezného procesu nástroje a obrobku. Nabízí i řadu dalších funkcí, ale pro tuto práci je důležitá vizualizace obráběcího procesu, výpočet sil a jiných parametrů v průběhu obrábění. [12]

Software Millvis využívá k reprezentování obrobku a nástroje metodu vizualizace pomocí elementů neboli voxelů s využitím techniky distance field. Aby bylo možné co nejlépe zobrazit složité tvary obrobků anebo nástrojů musí být síť voxelů co nejhustší. Hustší síť voxelů sebou nese zdatelně vyšší nároky na výpočetní výkon a paměť zřízení. Proto je v počítači rozdělíme na síť bloků a každému přiřadíme stav, který rozliší, jestli se blok nachází vně, uvnitř anebo blízko povrchu dané součásti. A hodnoty distance field uložíme jen pro bloky blízko povrchu. Díky tomu snížíme výpočetní a paměťovou náročnost. [13]



Obr. 14.: Rozdělení mřížky na bloky [13]

Na obrázku (Obr. 14.) vidíme rozdělení obrázku delfína na bloky, přičemž v bílých a modrých blocích se neukládají hodnoty distance field, zároveň síť bílých a modrých bloků může být daleko méně hustá. Kontura tvaru delfína je pokryta daleko hustší sítí bloků se stavem blízko povrchu a s uloženou hodnotou vzdálenostní funkce. [13]

V této diplomové práci bude software Millvis využíván zejména na odbavení řezného procesu, a také pro jeho analýzu a optimalizaci podle zatížení nástroje.

3. Přístupy a metody k optimalizaci posuvových rychlostí při frézování

Tato kapitola nastíní volbu strategie obrábění a zaměří se na přístupy jednotlivých komerčních softwarů k optimalizaci posuvové rychlosti v NC kódu. Následně bude představena základní dynamiku pohonů obráběcích strojů a případová studie pro optimalizaci posuvové rychlosti při frézování volných tvarů.

3.1. Strategie obrábění

Tato kapitola slouží pro představení základních a pokročilých strategií obrábění. Mezi pokročilé strategie obrábění patří např. vysoko posuvové frézování (high feed milling) nebo adaptivní obrábění.

Výrobní postup (Tab. 1.) se skládá z hrubování, následně je před-dokončení a jako poslední je dokončování. Při volbě strategií se musí rozlišovat pro jakou z těchto částí výrobního postupu je strategie určena.

Tab. 1.: Přehled částí výrobního procesu:

Hrubování – úkolem je odebrat co nejvíce materiálu za co nejkratší čas
Před-dokončení – úkolem je vytvořit konstantní přídavek pro dokončování
Dokončování – úkolem je vytvořit kvalitní a přesnou plochu

3.1.1. Způsoby generování drah nástroje v CAM software

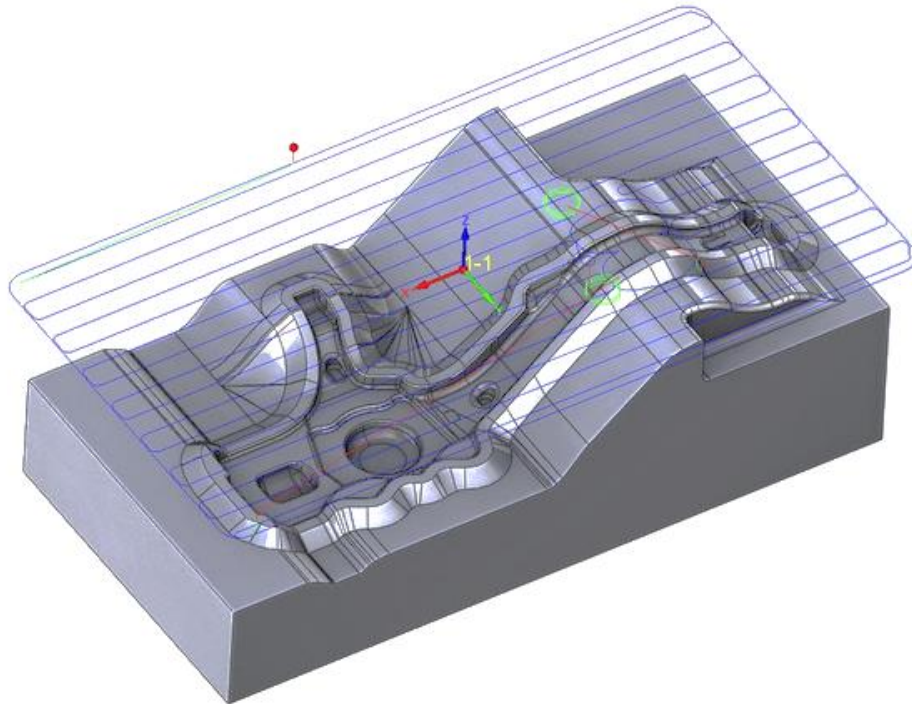
Máme několik základních způsobů generování drah nástroje mezi ty základní patří např.: konturové hrubování, lineární hrubování, kapsování. Tyto metody patří mezi ty základní a nejstarší.

Mezi ty pokročilejší a v dnešní době už dostupné (z hlediska výpočetního výkonu a možností strojů) technologie řadíme: adaptivní obrábění, high feed milling (vysoko posuvové obrábění) a další. Tyto technologie nabízí oproti standardnímu generování drah nástroje vyšší efektivitu a zohledňují také třeba zatížení nástroje.

Standardně generované dráhy nástroje

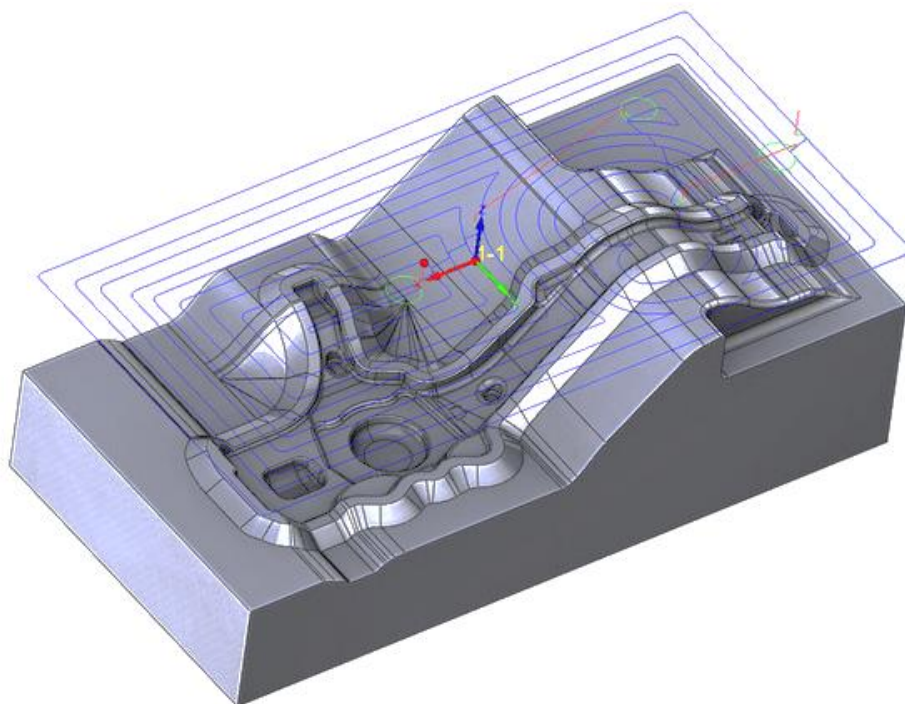
Lineární generování drah – tato strategie se používá nejčastěji při hrubování čel nebo při obrábění rovinných ploch. Pohyb nástroje je realizován po přímkách (Obr. 15.). Mezi výhody lineárního generování drah patří třeba konstantní úběr třísky, neměnné zatížení nástroje a jeho delší životnost. [14]

Při obrábění tvarově složitějších ploch je výhodnější použít konturové hrubování, které nabídne lepší efektivitu. Dráhy konturového hrubování se lépe přizpůsobí tvarovým částem a plocha je tak lépe připravena na další obrábění.



Obr. 15.: Lineární generování drah [15]

Konturové hrubování – tato strategie patří mezi nejběžnější způsoby hrubování a je určená pro efektivní odebrání velkého objemu materiálu. Vytváří se série drah v rovinách Z, které jsou zadány jako hloubka řezu. Tyto dráhy jsou tvořeny tak, aby bylo odstraněno co nejvíce materiálu bez přerušování řezu (Obr. 16.). [14]



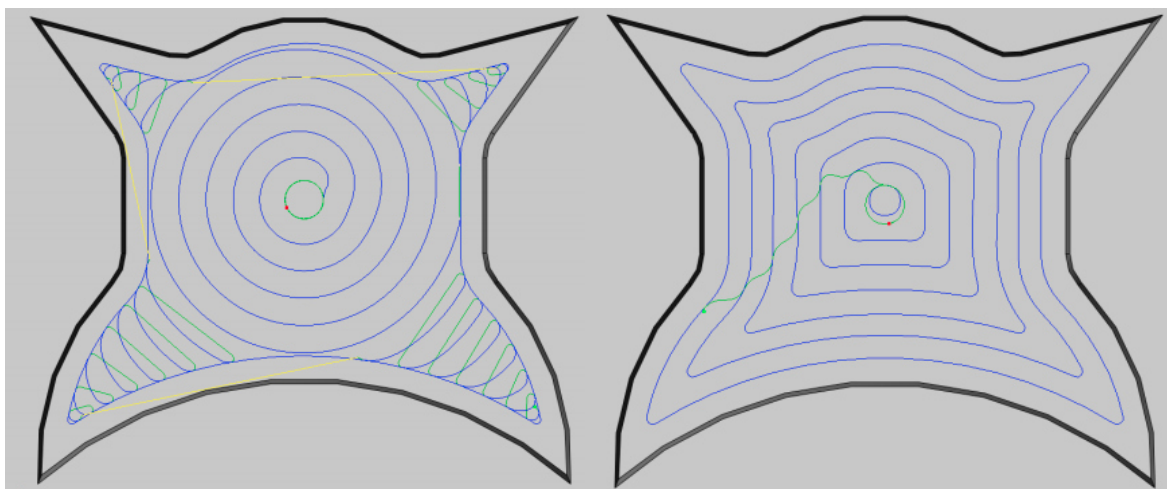
Obr. 16.: Konturové hrubování [15]

Standardní generování drah nástroje probíhá pouze vzhledem ke geometrii obráběné plochy a nezohledňuje potřeby nástroje. V určitých případech to může mít své výhody jako jsou např. jednoduchost případně nenáročnost z hlediska požadavků na stroj nebo na CAM software. Spíše to má ale nevýhody, mezi ty hlavní patří nekonstantní zatížení nástroje a měnící se objem odebíraného materiálu u některých způsobů generování drah nástroje. Takovéto generování drah není příliš vhodné, obzvláště pokud se jedná o hrubování. [16]

Adaptivní obrábění $a_p \gg a_e$

Adaptivní obrábění je technologie, při které má systém zadaná určitá kritéria, která má dodržet, nebo nemůže dojít k jejich překročení. Dle těchto zadaných kritérií systém generuje dráhu nástroje. [16]

Na rozdíl od standardního generování drah (Obr. 18.) je to adaptivní generováno tak, aby se po celou dobu operace dodržely konstantní podmínky zatížení nástroje (Obr. 17.). „Hlavním faktorem pro toto je, že se nepřekročí objem odebíraného materiálu v čase, a to na základě maximálního zanoření nástroje do materiálu neboli opásání (úhel styku nástroje s obráběným materiálem). Díky tomu je možné jezdit na 100 % vyzkoušeného posuvu bez obav, že v některých místech bude nástroj přetížen.“ [16]



Obr. 17.: Adaptivní generování dráhy [16]

Obr. 18.: Standardní generování dráhy [16]

Adaptivní obrábění má výhodu v efektivnějším generování drah, které zároveň zohledňuje nástroj a jeho zatížení, díky tomu je obráběcí proces bezpečný a nehrozí poškození obrobku nebo nástroje.

Tento způsob obrábění se hodí zvláště při hrubování, nebo kapesování, kdy potřebujeme odebrat velké množství materiálu efektivně, ale zároveň bezpečně. Oba tyto požadavky adaptivní obrábění splňuje.

High feed milling $a_p \ll a_e$

Vysoko posuvové frézování neboli high feed milling (HFM) je technologie založená na obrábění vysokými posuvovými rychlostmi. Tento druh frézování nabízí oproti konvenčnímu frézování daleko lepší obráběcí časy. Technologie HFM obrábí při malých hloubkách řezu, zato ale při vysokých posuvech na zub (až 3 mm/z), tento způsob obrábění je vhodnější z hlediska životnosti nástroje. Technologie HFM je využívána převážně u operací jako jsou: rovinné frézování, kapsování, zapichování, frézování tvarově složitých ploch nebo forem.

Mezi hlavní výhody HFM patří nižší radiální zatížení nástroje, které příznivě ovlivňuje směr řezných sil. Díky tomuto jevu se zmenšují vibrace nástroje a je dosaženo vyšší produktivity. V porovnání s jinými strategiemi je snížen příkon a řezné síly.

Malá hloubka řezu a_p má výhody v tom, že nedochází k tak velkému opotřebení ostří. To nám dává možnosti obrábět těžko obrobitelné materiály jako jsou materiály s vysokou tvrdostí nebo vyšší houževnatostí. [17]

Při použití speciálních držáků nástrojů můžeme použít frézy s velkým vyložením, a to až několikanásobkem (až 7x) jejich průměru. Speciální držáky slouží k utlumení vibrací. [17]

3.1.2. Bodové obrábění

Při použití kulových fréz je nejkritičtější místo v ose nástroje, kde je řezná rychlost nulová. Díky tomu dochází k nepříznivým vlivům jako je pěchování třísky, vyšší tvorba nárůstku nebo zvýšení teploty řezu. Tyto nepříznivé vlastnosti nám způsobují zhoršení povrchu, nižší trvanlivost nástroje nebo v nejhorším případě jeho poškození. Tyto nežádoucí vlastnosti lze eliminovat naklopením nástroje nebo obrobku. [3]

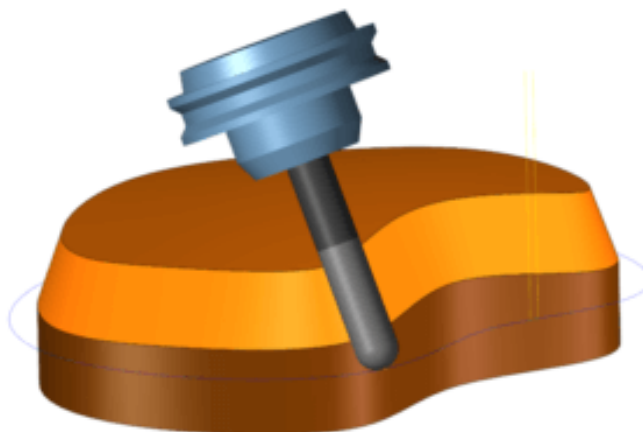
Bodové frézování neboli frézování špičkou nástroje je prováděno kulovou frézou (Obr. 19.), kdy je fréza naklopena o zhruba 10-15° mimo osu, čímž docílíme posunutí oblasti řezu od osy nástroje. Tím se zlepší obrobená plocha a zvýší trvanlivost nástroje. Tento druh obrábění se používá u pětiosých strojů. [18]



Obr. 19.: Frézování špičkou nástroje [3]

3.1.3. Obrábění bokem

Při obrábění bokem je nástroj naklopen (Obr. 20.) tak, aby obráběl celou řeznou částí nástroje. Při tomto druhu obrábění dosahujeme lepší kvality obrobené plochy a kratšího času obrábění. Takovýto způsob obrábění je řazen spíše do pomocných operací a není příliš určen pro tvarově složité dílce jako jsou např. turbínová kola. Tento druh obrábění se používá u pětiosých strojů. [19] [20]



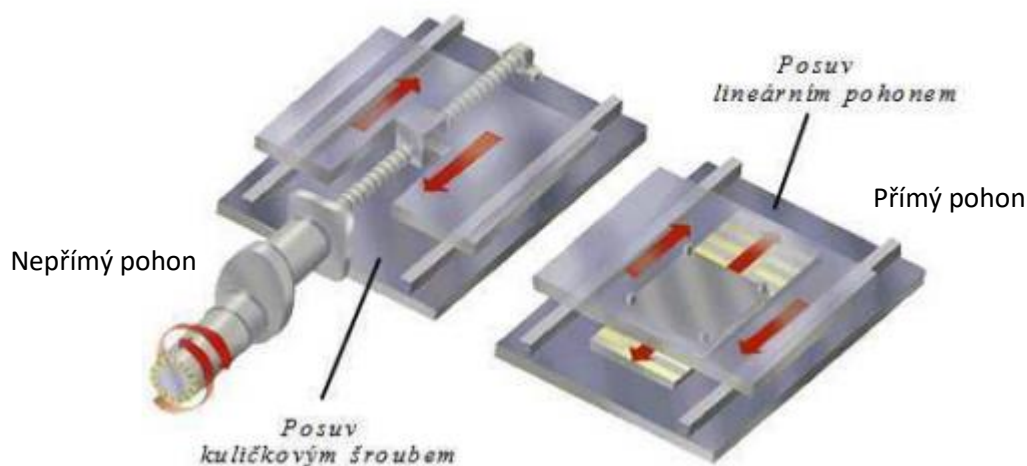
Obr. 20.: Obrábění bokem [21]

3.2. Základní dynamika pohonů

Pohony jsou nedílnou součástí obráběcích strojů. Zvolený druh pohonu přímo souvisí s dynamickými vlastnostmi stroje. Ovlivňuje například maximální posuvovou rychlost jednotlivých os, zrychlení os atd. Pohony dělíme na přímé a nepřímé.

Přímé pohony mají nespornou výhodu v tom, že odpadají vložené převody a s tím spojená setrvačná hmota a chovají se jako jedno-hmotový systém. Díky těmto vlastnostem nabízejí daleko vyšší dynamiku než pohony nepřímé. Mezi zástupce přímých pohonů patří např. lineární motor (Obr. 21. vpravo), který je využit u pohybových os stroje. Pokud pomineme pohybové osy, tak mezi další přímé pohony patří prstencové motory, které jsou použity u otočných stolů anebo elektro vřetena. Mezi nevýhody přímých pohonů patří nutnost mít větší sílu než v případě nepřímého pohonu s převodem, dále pak je nevýhodou přenos vibrací zpět do pohonu nebo tepelné ovlivnění uvnitř stroje od pohonů.

Nepřímé pohony mají výhodu v jeho lepší dostupnosti a finanční náročnosti. Mají horší dynamiku než přímé pohony, ale vynahrazují to svojí univerzálností a jednodušší konstrukcí. Mezi základního představitele nepřímých pohonů patří systém motoru kuličkového šroubu a kuličkové matice (Obr. 21. vlevo).



Obr. 21.: Přímý a nepřímý pohon [22]

Regulace pohonů – kaskádní regulace

Kaskádní regulace je přístup řízení posuvové osy CNC stroje, kdy máme nejvíce podřízenou proudovou smyčku, která se většinou zanedbává kvůli vysokému propustnému pásmu proudové smyčky (1kHz až 10 MHz). Nad proudovou smyčkou je nadřazena rychlostní smyčka a obě jsou podřízeny polohové smyčce. Mezi výhody tohoto způsobu regulace pohonů patří jednoduchost a velmi dobré výsledky požadovaných veličin. [22]

Omezení ryvu

Zadávání požadavku na skokovou změnu rychlosti jsou pro pohony strojů v dnešní době nepřijatelné. A u vysokorychlostního obrábění máme problém i s rampovým průběhem rychlosti (tj. omezení zrychlení) zvláště tam, kde jsou použity přímé pohony.

Pokud se budeme bavit o pohonech s vyšší dynamikou je nutno brát ohled ještě na parametr zvaný ryv. S ryvem je nutno počítat kvůli zmírnění prudkých změn sil při rozběhu a zpomalení. Ryv je definován jako derivace zrychlení podle času. Velikost ryvu přímo ovlivňuje rozkmitání konstrukce stroje. Na rozdíl od řezných sil, jejichž frekvence buzení je dána technologickým procesem (otáčky, počet zubů), je buzení od zrychlujících sil širokopásmové a předem neodhadnutelné. Z tohoto důvodu roste riziko shody silového buzení s vlastními frekvencemi konstrukce stroje. [23]

Omezením hodnoty ryvu lze více rozložit velikosti impulsů pohonů do konstrukce stroje v čase a tím znatelně snížit riziko samobuzených kmitů. Doporučená hodnota ryvu je dána kvalitami stroje, tedy: uložením stroje na základech, tlumením a uchycením posuvové osy, odolností rámu proti vibracím, ale i obsluha stroje může do hodnot ryvu zasáhnout a dát na svůj subjektivní názor. Hodnota ryvu se nastavuje v parametrech řídicího systému, je možnost nastavit omezení pro každý pohon zvlášť nebo pro obecnou dráhu v prostoru, kdy spolupracuje více pohonů zároveň (souřadných os). [23]

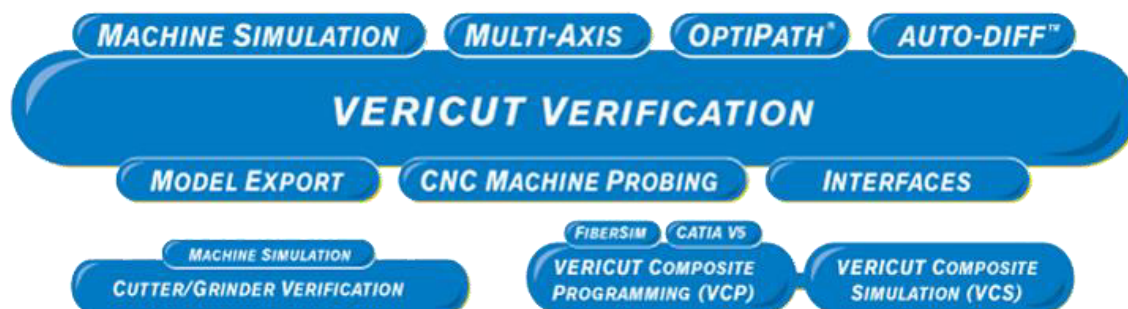
3.3. Softwary používané pro optimalizaci technologických podmínek obrábění

Tato kapitola se zabývá různými komerčními softwary pro optimalizaci NC kódu. Zmíněny jsou všechny optimalizace NC kódu, ale z hlediska zaměření této práce jsou porovnávány hlavně optimalizace zabývající se úpravou řezných podmínek.

3.3.1. CGTech Vericut

CGTech Vericut je software, který se zabývá simulací a optimalizací CNC obrábění. Tento software nám dokáže pomoci při odhalování chyb programů, detekování kolizí nebo třeba při neefektivním obrábění. Mezi přednosti patří také, že dokáže simulovat všechny druhy CNC strojů a nástrojů včetně všech strojů od předních výrobců jako jsou například Mazak, Makino, DMG/ Mori Seiki, Okuma a další.

Vericut je modulární systém, který nabízí několik základních i pokročilých modulů (Obr. 22.). Mezi ty základní patří: Vericut verification, Optipath optimalizace, CNC machine simulation. Pomocí dalších modulů je možnost si systém doplnit o moduly, které jsou vhodné např. pro měřicí sondy nebo elektroerozivní hloubící operace. [24]



Obr. 22.: Moduly systému Vericut [24]

Modul OPTIPath

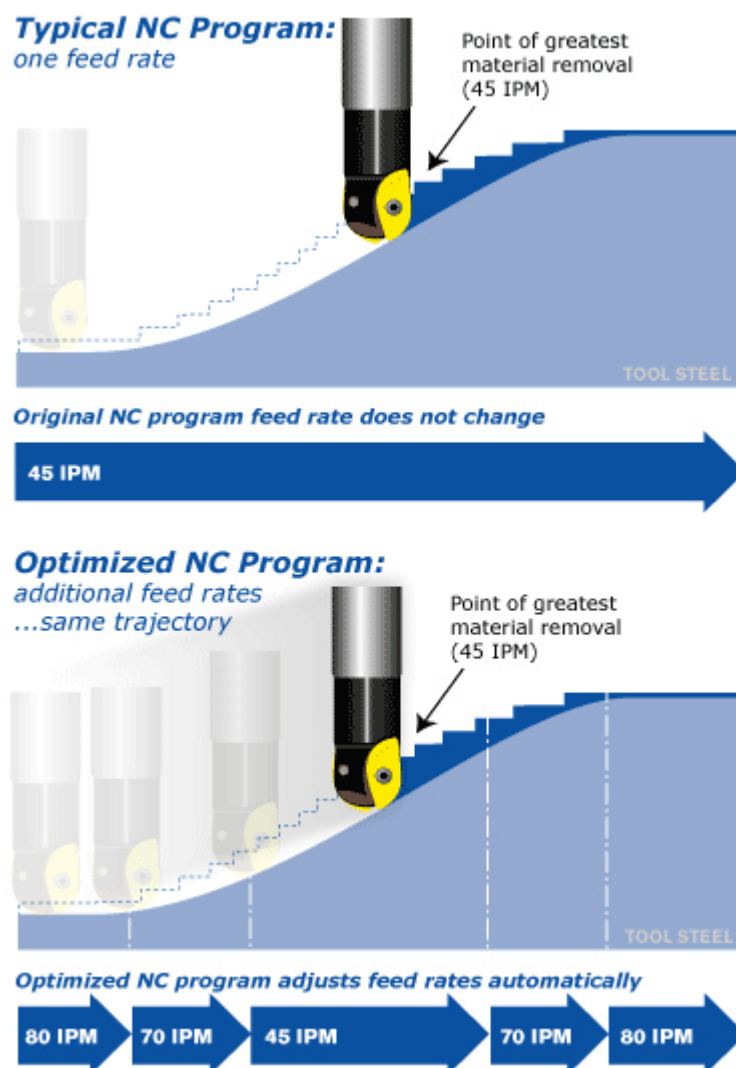
Pro téma této diplomové práce je nejdůležitější modul pro NC optimalizace OPTIPath. Tento modul se zaměřuje na optimalizaci dráhy nástroje z hlediska efektivity a rychlosti obrábění.

Optimalizace se provádí pomocí úpravy posuvové rychlosti v NC programu tak, aby bylo dodrženo optimální zatížení nástroje pro jeho maximální produktivitu. Pomocí těchto optimalizací se mohou zkrátit NC programy, zlepšit opracování povrchu a snížit opotřebení nástroje. [25]

„OPTIPath rozdělí řezný pohyb na menší segmenty a přiřadí jim nejvhodnější rychlost posuvu pro každý stav na základě množství odebraného materiálu v jednotlivých segmentech. Poté je dráha nástroje optimalizována změnou rychlosti posuvu. Trajektorie se nemění.“ [25]

Funguje to tak, že pokud nástroj má odebrat velké množství materiálu – posuvová rychlost se sníží, pokud naopak méně – posuvová rychlost se zvýší (Obr. 23.). Systém má informaci o ubíraném materiálu v daném segmentu. Tato data jsou kombinována s daty stroje, jako je kapacita obráběcího stroje (výkon, typ vřetena atd.), tuhost přípravku i svorky a typ řezného nástroje (materiál, konstrukce, počet zubů, délka atd.).

Podle těchto dat modul automaticky vypočítá a uloží upravenou posuvovou rychlost. Tuto aktualizovanou hodnotu posuvové rychlosti zapíše do nového NC kódu. [25] [26]



Obr. 23.: Úprava rychlosti v segmentech [24]

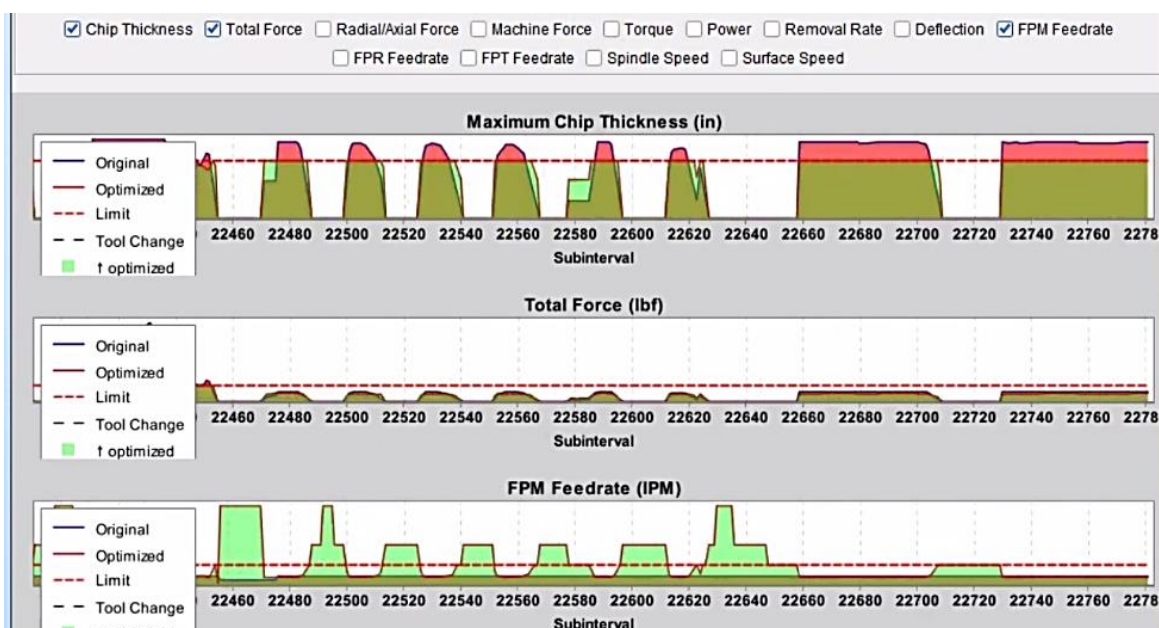
Simulace obráběcího procesu

Software CGTech Vericut nabízí optimalizaci na základě (Obr. 24.): tloušťky třísky, objemu odebraného materiálu, kombinace dvou předchozích parametrů atd. Výčet možností optimalizace nabízí i redukci obrábění vzduchem. Přehled optimalizací vyplývá z produktových videí, kde je blíže ukázáno grafické rozhraní programu a jeho funkce. Je možné, že v průběhu času došlo ke změně nabídky optimalizací.



Obr. 24.: Přehled optimalizací [27]

Na obrázku (Obr. 24.) nahoře vidíme přehled toho, co si můžeme v softwaru Vericut nechat vykreslit do grafické podoby. Mezi parametry patří: tloušťka třísky, celková síla, kroutící moment, objem odebraného materiálu, posuvová rychlost v různých jednotkách, rychlost vřetena atd. Na grafech (Obr. 25.) pod tímto výčtem parametrů můžeme vidět, že červenou čárkovanou čarou je značen limit. V tomto případě se nejspíše jedná o limit maximální tloušťky třísky. Zelené oblasti představují optimalizovaný průběh. V posledním grafu pak vidíme optimalizovanou posuvovou rychlost v palcích z minutu (IPM).



Obr. 25.: Přehled možností grafického vykreslení [28]

Můžeme vidět na obrázcích výše, že CGTech Vericut pracuje hlavně s parametry objemu odebraného materiálu a tloušťkou třísky. Bez předchozích zkušeností se softwarem CGTech Vericut nelze blíže určit, jestli se metody optimalizace rozšířily o jiné parametry a případně jestli se tak v budoucnu stane. Neznámým faktorem je i metoda výpočtu síly, případně její možnosti.

3.3.2. ICAM

System ICAM nabízí různé nástroje v oblasti optimalizace. Mezi ty hlavní patří SmartPATH® (optimalizace dráhy nástroje), SmartCUT™ (eliminace řezů vzduchem) a SmartFEED™ (úprava posuvové rychlosti)

SmartPATH®

Tento nástroj slouží pro hledání optimální cesty pro přejezd nástroje. Přitom respektuje kinematiku stroje a pojezdu nebo jeho velikost. Výhoda tohoto nástroje spočívá v přenositelnosti. Je možné vzít partprogram a přenést ho z jednoho CNC stroje na druhý, který může mít odlišnou kinematiku.

„Tento nástroj lze také použít k automatickému vytvoření optimální dráhy nástroje, která zajistí, že generované víceosé pohyby nezpůsobí kolize s dynamicky se měnícím polotovarem v procesu a se všemi ostatními okolnostmi, jako jsou přípravky a pohyblivé / nepohyblivé součásti stroje.“ [29]

SmartCUT™

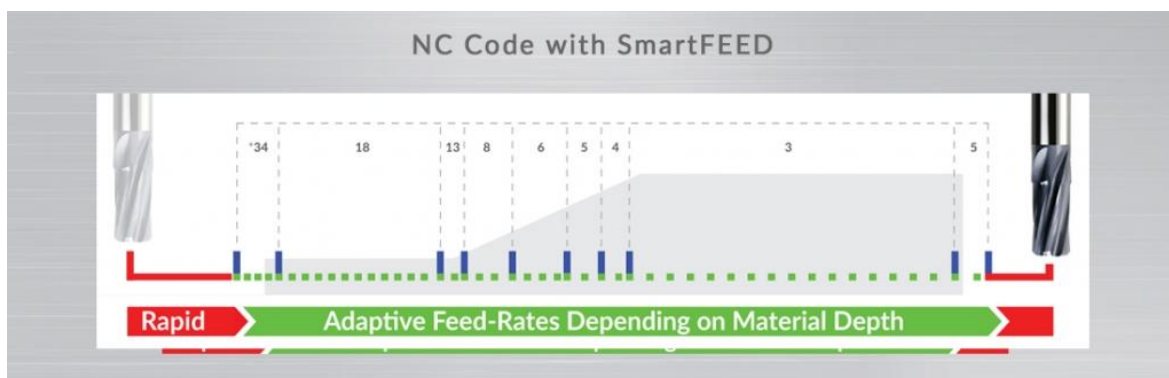
Tento nástroj slouží k simulaci úběru materiálu a detekci, kdy nástroj není v záběru s materiálem. Tyto pohyby vzduchem změní, pokud je to možné, na rychloposuvy. Díky tomu dochází k úspoře času při obrábění. V kombinaci s nástrojem SmartPATH® místo změny pracovního posuvu na rychloposuv, použije SmartCUT™ na detekci počátečního a koncového bodu řezného pohybu vzduchem. Následně SmartPATH® zajistí výpočet nejrychlejší cesty k začátku dalšího řezu.

Tyto nástroje se dají přizpůsobit potřebám uživatele, kdy je možné nastavení minimální bezpečné vzdálenosti, nebo nastavení přejezdů vzduchem a mnoho dalších. Následně modul provede změnu v NC kódu, pokud podmínky vyhovují nastaveným parametrům, např. nastavené minimální vzdálenosti.

Tento nástroj spolu s výše zmíněným slouží k eliminaci zbytečných drah nástroje nebo ke zvýšení efektivity těchto drah. [29]

SmartFEED™

„Tento nástroj optimalizuje posuvy řezu pomocí simulace úběru materiálu k automatickému přepočítání nejlepšího posuvu obrábění na základě schopností obráběcího stroje, referenčních řezů nástroje a zapojení řezného nástroje v reálném čase do materiálu během výroby.“ [29]



Obr. 26.: ICAM SmartFEED [29]

Podobně jako u systému Vericut probíhá optimalizace posuvové rychlosti rozdělených úseků dráhy na základě simulované hloubky řezu (Obr. 26.). Díky tomu je dosaženo rovnoměrné zátěže s vyšší efektivitou obrábění. Mezi další výhody této optimalizace patří opět zvýšení životnosti nástroje spolu s kvalitou obrobeného povrchu.

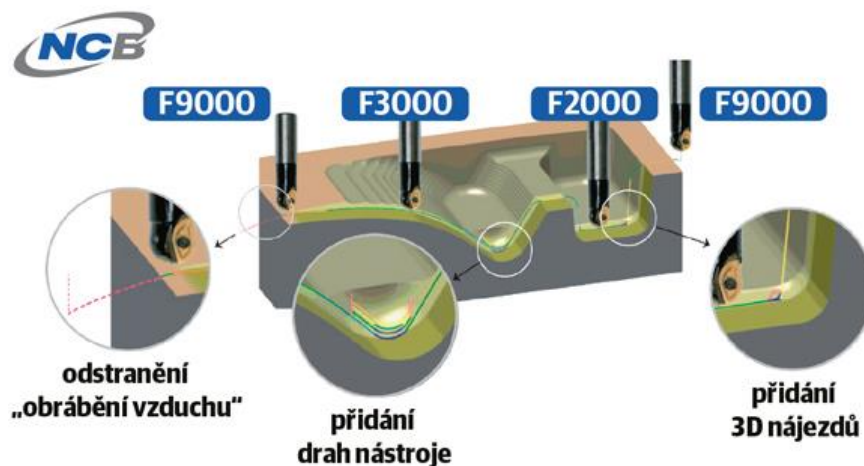
3.3.3. NCBrain

Software NCBrain slouží jako výše zmíněné programy pro optimalizaci NC kódu. NCBrain funguje na principu nahrání originálního NC kódu a definicí výchozího polotovaru, použitých nástrojů a jejich upínačů. Na základě těchto informací se provede simulace a vygeneruje se nový optimalizovaný NC kód přímo pro konkrétní CNC stroj. [30]

Způsoby optimalizace NC kódu v softwaru NCBrain (Obr. 27.) [30]:

- probíhá v závislosti na množství odebíraného materiálu v konkrétním místě řezu
- odstranění nadbytečných drah nástroje (např. dráhy s malým úběrem materiálu)
- přidáním drah nástroje v místech, kde dochází k nekonstantnímu odebírání materiálu
- ověření kolizních situací, ověření podřezání nebo nedostatečného obrobení

NCBrain nabízí podobné výhody jako předchozí softwary (CGTech Vericut, ICAM).



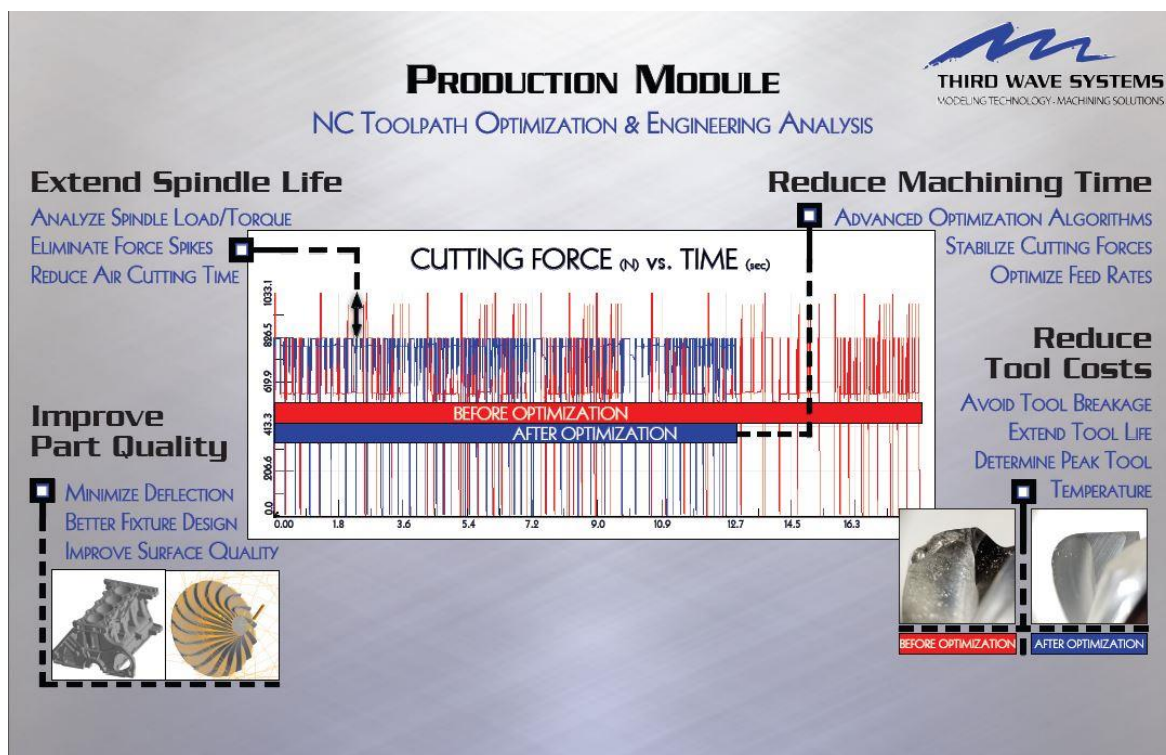
Obr. 27.: NCBrain Druhy optimalizace [30]

3.3.4. Production module Third Wave Systems

Production module od společnosti Third Wave Systems je jako ostatní programy v kapitole 3.3. software na optimalizaci drah nástroje s tím, že „*integruje fyzikální modely materiálů, data CAD/CAM, geometrii nástrojů a obrobků pro analýzu a optimalizaci obráběcích procesů.*“ [31]

Tento program analyzuje každou část dráhy nástroje a vypočítá tangenciální složku řezné síly (Obr. 28.), výkon vřetena, teplotu a další. Dále nabízí možnost porovnat vypočítané vstupy s limity optimalizace. Program nabízí také funkci pro redukci drah, kdy se obrábí vzduchem. [31]

Výpočtem tangenciální složky řezné síly a zahrnutím fyzikálních informací o materiálu se tento program liší od výše zmíněných, které většinou optimalizují NC kód pouze podle odebíraného materiálu.



Obr. 28.: Production module [31]

3.3.5. Shrnutí

V této kapitole byly popsány 4 programy od různých softwarových společností, které se zabývají optimalizací NC kódu z hlediska úpravy řezných podmínek. Softwary jako Vericut, ICAM nebo NCBrain nabízejí optimalizaci, která vychází ze strategie rozdělení NC kódu na úseky, kde je upravena posuvová rychlost. Posuvová rychlost je upravována většinou na základě množství odebíraného materiálu. Tato metoda, jak ukazují grafy jednotlivých programů, může uspořit nějaký čas při obrábění. Z hlediska optimálního zatížení nástroje je třeba uvažovat i jiné aspekty než jenom odebíraný materiál.

Optimalizace NC kódu na základě zatížení nástroje a dynamických vlastností stroje

U posledního softwaru jménem Production module jsou zohledněny i jiné parametry než jen množství odebíraného materiálu. Production module zohledňuje také fyzikální vlastnosti materiálu a počítá řeznou sílu. Díky tomu nabízí komplexnější a lepší optimalizaci řezných podmínek než ostatní softwary.

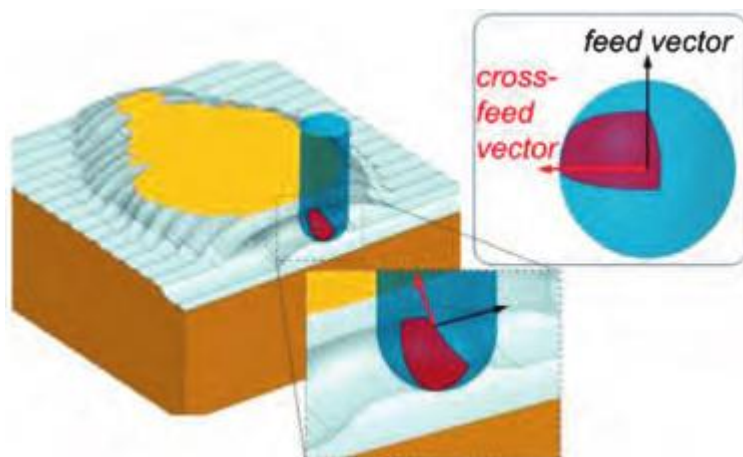
3.4. Případová studie optimalizace posuvové rychlosti pro frézování volných tvarů

Metodika optimalizace posuvových rychlostí pro frézování volných tvarů s vazbou na dynamiku pohonů je systematicky zpracovaná v publikaci autorů: Kaan Erkorkmaz, S. Ehsan Layegh, Ismail Lazoglu a Huseyin Erdim.

Tato publikace pojednává o výzkumu modelování a optimalizaci tří a pětiosých operací se zaměřením na mechaniku řezu. Motivací výzkumu je: generování drah nástroje se zaměřením na vylepšení plynulosti, zlepšení výsledné kvality dílů, zkrácení času cyklů, optimalizace posuvové rychlosti na základě kinematických a dynamických limitů pohonů. [32]

3.4.1. Model řezu

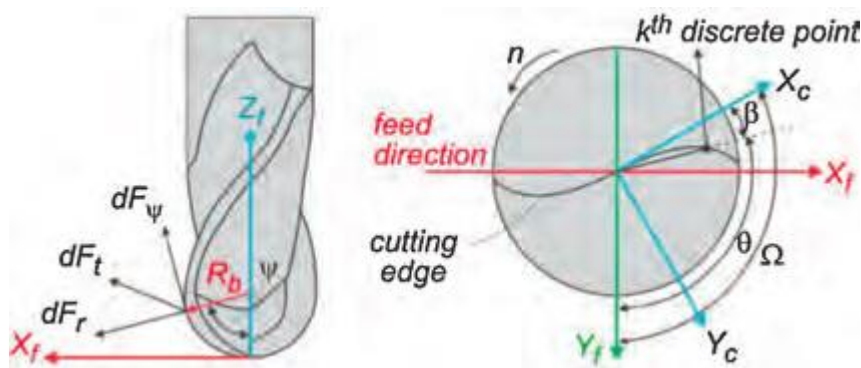
Modelování procesu řezu vychází z mechanistického modelu řezných sil, přičemž je důležité nalezení oblasti záběru mezi nástrojem a obrobkem. Protože vstupní a výstupní úhly se podél osy frézy liší od jednoho CL bodu do druhého, přesnost simulovaných řezných sil je závislá na přesnosti modelu řezu. Pro účely výzkumu byl vyvinut model řezného procesu založený na Parasolid jádře. Níže je uvedena ilustrace 3D a 2D záběrových zón (Obr. 29.). [32]



Obr. 29.: 2D a 3D záběrové zóny [32]

Pro odhad řezných sil v každém CL bodě je použit mechanistický model s polárním vzorkováním.

Složky řezné síly na nástroji (Obr. 30.), které lze odhadnout pomocí rovnic (5). [32]

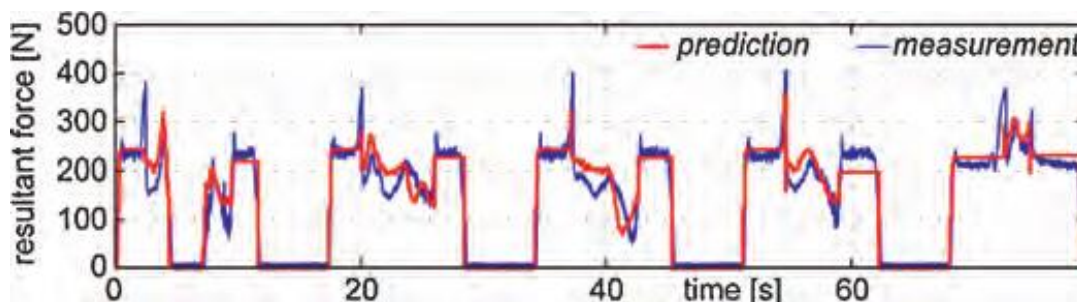


Obr. 30.: Řezné síly [32]

$$\begin{aligned}
 dF_r &= K_{rc}dA_c + K_{re}dZ \\
 dF_\psi &= K_{\psi c}dA_c + K_{\psi e}dZ \\
 dF_t &= K_{tc}dA_c + K_{te}dZ
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

Kde: $K_{rc}, K_{\psi c}, K_{tc}$ – radiální, axiální a tangenciální koeficienty řezné síly
 $K_{re}, K_{\psi e}, K_{te}$ – koeficienty řezné hrany
 dA_c, dZ – okamžité zatížení třískou a integrační tloušťkou podél osy nástroje

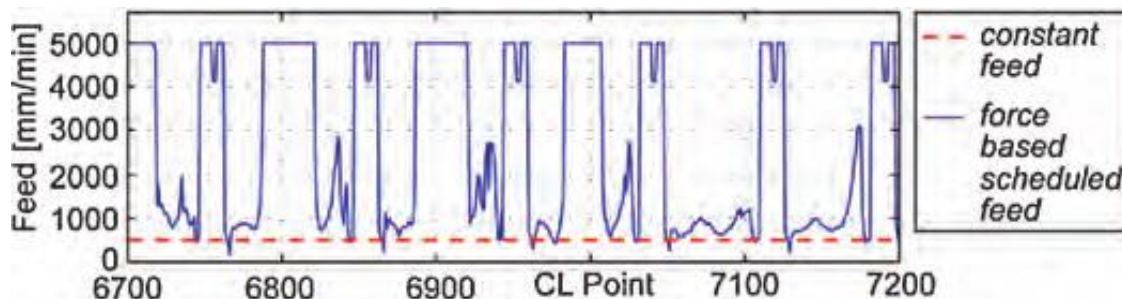
Výpočet simulace řezných sil je řešen v globálních souřadnicích stroje. V rámci výzkumu byly provedeny simulace a měření výsledné síly pro pět drah nástroje s konstantním posuvovou rychlostí. Na obrázku můžeme vidět porovnání vypočítané a měřené dráhy nástroje. (Obr. 31.). [32]



Obr. 31.: Porovnání naměřených a simulovaných sil [32]

Při standardních frézovacích operacích je posuvová rychlost konstantní, je to z důvodu bezpečnosti, aby se zabránilo poškození stroje, nástroje a rozměrovým chybám. S využitím odhadu oblasti záběru a řezných sil v každém CL bodě a téměř lineárním vztahem mezi posuvovou rychlostí a řeznou silou byl vytvořen model plánování posuvové rychlosti. Pomocí tohoto modelu se výsledná řezná síla regulovala kolem stanovené limitní síly.

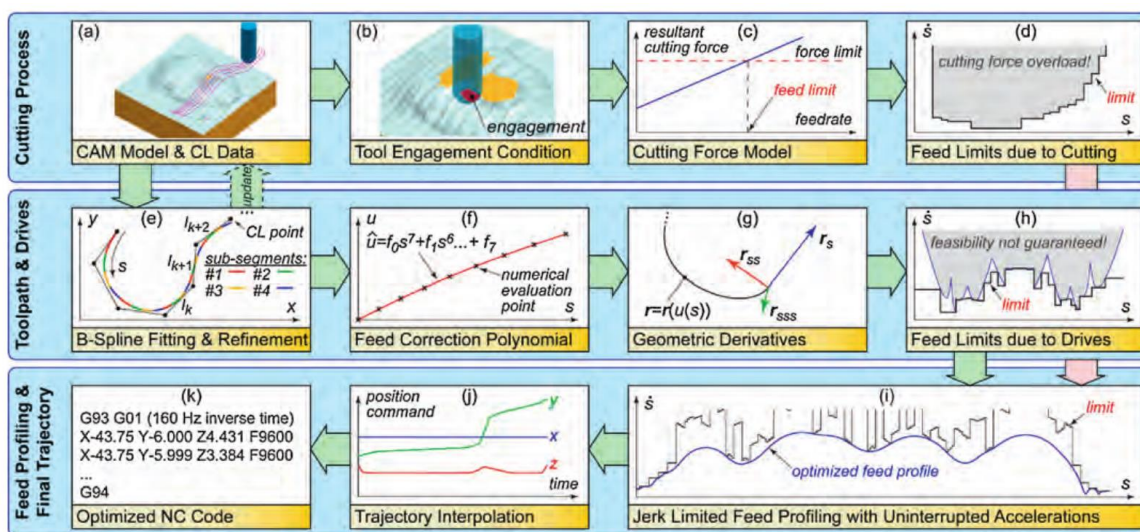
Probíhalo to tak, že když je oblast záběru malá, posuvová rychlost se automaticky zvýší, aby se zkrátila doba cyklu a zvýšila se produktivita. Na následujícím obrázku vidíme graf optimalizované posuvové rychlosti při nastavené limitní síle 250 N (Obr. 32.). [32]



Obr. 32.: Optimalizovaná posuvová rychlost pro každý CL bod [32]

Limity pohonů jsou: rychlost osy, zrychlení a ryv. Omezení těchto parametrů pomáhá zvýšit životnost pohonů, omezuje vibrace a dynamické chyby polohování. [32]

3.4.2. Optimalizační schéma



Obr. 33.: Optimalizační schéma [32]

Na obrázku výše (Obr. 33.) vidíme jednotlivé kroky toho, jak tato metoda postupuje. Jednotlivé kroky si vysvětlíme níže:

- Vstupní data, kdy vytvoříme dráhu nástroje v CAM softwaru a generujeme CL data.
- CAM model a CL data se použijí pro určení geometrie záběru.
- Simulace sil a drah nástroje pro dvě různé konstantní posuvové rychlosti, výsledkem bude vztah mezi posuvovou rychlostí a výslednou řeznou silou pro jednotlivá místa řezu.
- Určení lokální mezní hodnoty posuvové rychlosti, která je určena řezným procesem.

- e) CL body se vyhladí do C^2 drah nástroje dosazených do kubických B-splinů, které jsou parametrizovány podle čtyř následujících bodů f), g), h), i). Následně se B-spliny převedou na kubické polynomy, které jsou výhodné pro interpolaci.
- f) B-spliny se parametrizují pomocí průměrné délky křivky, kterou vypočítáme pomocí průměru třech po sobě jdoucích délek křivek. Po parametrizování celé dráhy nástroje se skutečná délka oblouku numericky integruje za pomoci Simpsonova pravidla.
- g) Eliminace nespojitostí na spojích segmentů, resp. vyrovnání posuvové rychlosti. Polynomiální korekce posuvové rychlosti nám umožní výpočet geometrické derivace polohy nástroje vzhledem k parametru oblouku.
- h) Použitím řetězového pravidla tyto derivace použijeme k výpočtu lokálních limitů posuvové rychlosti, se zohledněním limitů pohonů.
- i) Po přepočtu získáváme optimalizovaný profil posuvové rychlosti, který zohledňuje omezení řezného procesu a limity pohonů.
- j) Profilovací algoritmus zajistí dodržení zadaného tangenciálního zrychlení a ryvu. Zároveň nám omezí zbytečné průchody nulovým tangenciálním zrychlením na hranici segmentů, což vede ke zkrácení doby cyklu v porovnání s klasickou kusovou modulací a konstantní posuvovou rychlostí a plynulým zrychlením.
V momentě, kdy je dráha nástroje a profil posuvové rychlosti parametrizován, jsou dohromady interpolovány, abychom získali časově závislé polohové příkazy s určitou vzorkovací frekvencí.
- k) Následně jsou naprogramovány do NC kódu v režimu „inverzního času“ posuvového módu.

Tato metoda patří mezi komplexní strategie pro plánování drah nástroje, při zachování co nejnižší doby cyklu se zohledněním limitů pohonů. [32]

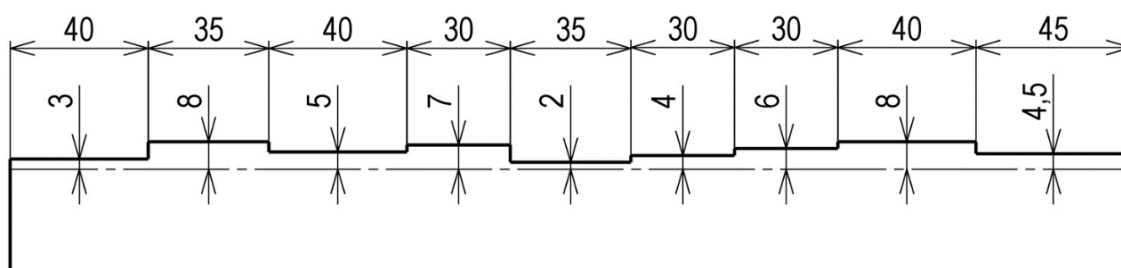
4. Návrh operace s proměnným zatížením nástroje pro analýzu kinematických parametrů obrábění

Pro vlastní řešení kinematických parametrů zatížení byly vybrány dva modelové příklady. Na těchto příkladech lze ukázat vliv posuvové rychlosti na parametry zatížení nástroje. U obou zvolených příkladů předpokládáme, že jsou vyrobené z duralu.

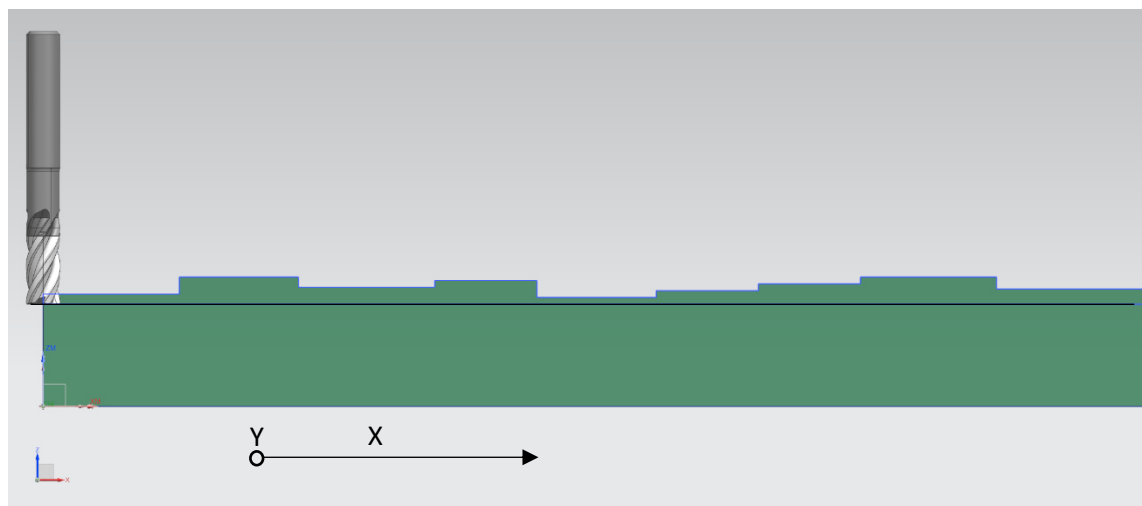
4.1. Drážka s proměnlivým přídávkem

Prvním základním příkladem je drážka s nekonstantním přídávkem materiálu, na kterém bude zkoumáno zatížení nástroje při obrábění. Tento přídavek si můžeme představit jako např. zbytky po předchozím obrábění.

Na obrázku (Obr. 34.) vidíme rozměry jednotlivých částí i výšku přídávků drážky.



Obr. 34.: Rozměry drážky s nekonstantním přídávkem materiálu



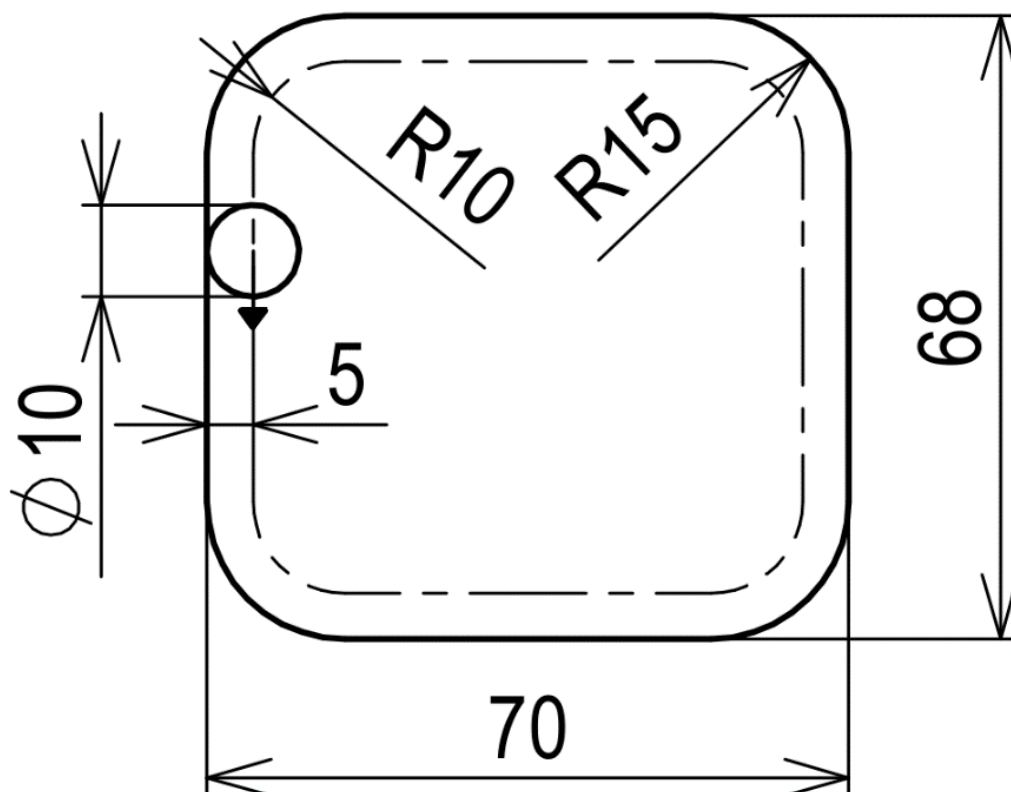
Obr. 35.: Obrábění drážky s nekonstantním přídávkem materiálu

Obrábění této drážky vidíme na obrázku (Obr. 35.), kdy se nástroj pohybuje zleva doprava. Během obrábění naráží na příslušný nárůst materiálu. S nárůstem materiálu souvisí zvýšené zatížení nástroje jako je např. silové zatížení ve směru X a Y, nárůst úběru materiálu za vteřinu (neboli Material removal rate – MRR) nebo nárůst momentu potřebného na vřetení.

4.2. Roh kapsy

Druhým základním příkladem je tato kapsa (Obr. 36.), kde při obrábění rohů dochází k nárůstu opásání před zatáčkou. V dalších kapitolách bude věnována pozornost na to, jaký je průběh parametrů zatížení nástroje při průjezdu rádiusem kapsy.

Dráhy nástroje jsou generovány tak, že se do středu kapsy nástroj zavrtá do nastavené hloubky a pak se od středu „čtvercově“ rozjíždí až k hranám kapsy. Na obrázku (Obr. 36.) je čerchovanou čarou naznačená poslední část dráhy, která se už dotýká kontury finálního obrobku kapsy. Na nárůst opásání nástroje a s tím spojené zvýšené zatížení má největší vliv kontura po předchozím průjezdu nástroje („čtvercová“ dráha o průměru nástroje blíže středu). Další faktor, který ovlivňuje strmost a míru zvýšení opásání je poloměr rádiusu, kterým nástroj projíždí.



Obr. 36.: Rozměry kapsy

5. Simulace silového zatížení nástroje složkami řezných sil podél dráhy nástroje

V této kapitole bude představen model řezných sil a na výše zmíněných modelových příkladech si ukážeme vývoj složek sil podél řezné hrany. Dále si ukážeme vývoj sil při obrábění rohu kapsy s využitím softwaru Millvis a provedeme zhodnocení jednotlivých příkladů obrábění.

5.1. Mechanistický model řezných sil na jednoduché drážce

Prvním krokem je ověření modelu řezných sil na jednoduché drážce při obrábění v jednom směru.

Tento zjednodušený model řezných sil bude sloužit jako ověření funkčnosti a vhodnosti softwaru Millvis pro aplikace této práce, dále bude sloužit k lepšímu pochopení výpočtu složek řezných sil podél řezné hrany nástroje.

Podrobněji byl software Millvis představen v rešerši. Model řezných sil byl řešen pomocí skriptu v Matlabu, který vychází z mechanistického modelu řezných sil, který byl rovněž představen v rešerši.

Mechanistický model řezných sil při frézování vychází z integrace řezných sil podél hrany břitu nástroje. Jednotlivé síly obecného mechanistického modelu jsou reprezentovány rovnicemi (6). [7]

Jejich reálné působení vidíme na obrázku (Obr. 37. a Obr. 38.)

$$F_c = b(K_{ce} + K_{cc}h)$$

$$F_n = b(K_{ne} + K_{nc}h)$$

$$F_p = b(K_{pe} + K_{pc}h)$$

(6)

Kde: h – tloušťka třísky

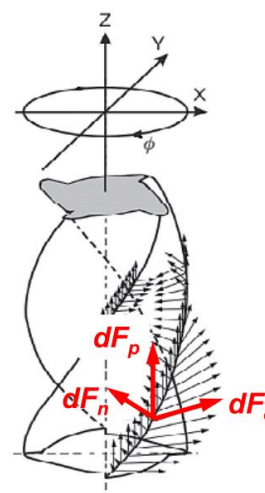
b – hloubka řezu

K_{ie} a K_{ic} – řezné koeficienty

F_c – řezná síla (tangenciální)

F_n – síla normálová

F_p – síla pasivní

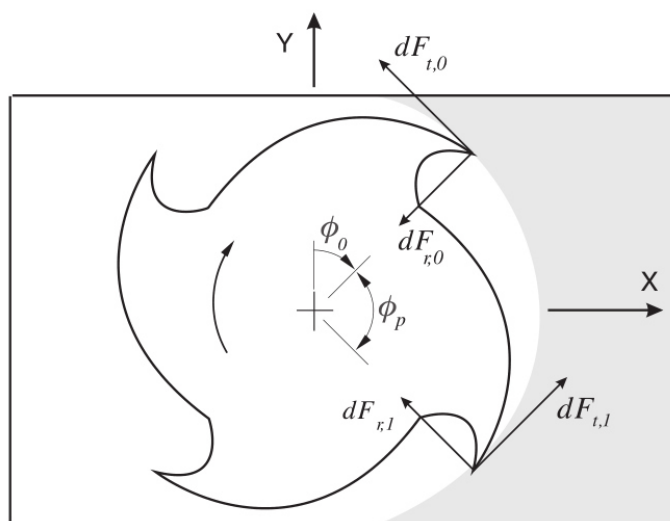


Obr. 37.: Hrana břitu [9]

Protože jako materiál pro vybrané příklady obrábění máme zvolený dural, bylo třeba získat měrné řezné koeficienty K_{ie} (třecí koeficient) a K_{ic} (řezný koeficient) s hodnotami určenými přímo pro dural. Z Ústavu výrobních strojů a zařízení Fakulty strojní byly tyto třecí a řezné koeficienty (7) poskytnuty pro potřeby této práce.

$$\begin{aligned}
 K_{ce} &= 15 \\
 K_{cc} &= 1220 - 129 v - 320 \gamma \\
 K_{ne} &= 16 \\
 K_{nc} &= 650 - 139 v - 750 \gamma \\
 K_{pe} &= 0 \\
 K_{pc} &= 640 \lambda - 320 \gamma \lambda
 \end{aligned}
 \tag{7}$$

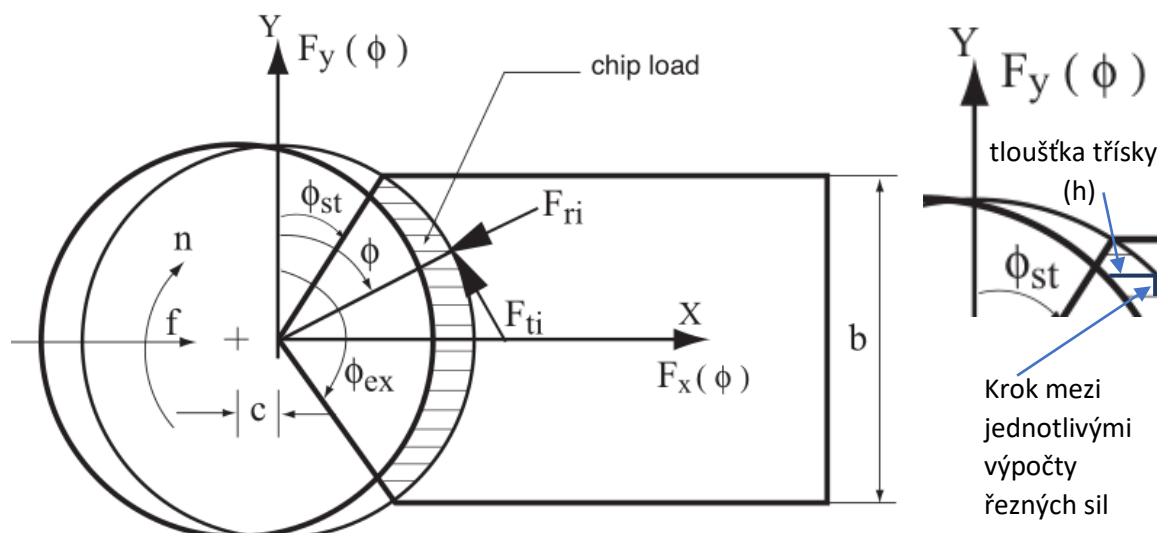
Kde: γ – úhel čela (rad)
 λ – úhel sklonu ostří (rad)
 v – řezná rychlost (m/s)



Obr. 37.: Působení jednotlivých složek sil na břity nástroje [33]

Na obrázku výše (Obr. 37.) vidíme, jak síly působí na jednotlivé břity nástroje. V tomto obrázku převzatém z publikace MANUFACTURING AUTOMATION [33] je použito jiné označení tangenciální a normálové síly. V našem případě je řezná (tangenciální) síla $F_c = F_t$ v publikaci. Normálová síla $F_n = F_r$ v publikaci. Rozkladem těchto dvou složek řezných sil do osy X a Y získáme celkovou sílu působící v jednotlivých osách, tedy F_x a F_y . Velikosti podílů řezné a normálové síly v jednotlivých osách jsou závislé na úhlu natočení nástroje ϕ . Na tomto úhlu je závislá i aktuální tloušťka třísky h (Obr. 38.). Tloušťku třísky spočítáme z jednoduchého vztahu (8) uvedeného níže.

Počet jednotlivých kroků na šířce obrobku je dán pootočením nástroje o určitý počet stupňů (krok). Čím více kroků, tím hladší a lépe vykreslený průběh řezných sil dostaneme. Hloubka řezu je dána zanořením nástroje v ose Z.



Obr. 38.: Vývoj tloušťky třísky v průběhu natočení nástroje [33]

$$h(\phi) = c * \sin(\phi) \quad (8)$$

Kde: c – posuv na zub [mm/zub]

ϕ – okamžitý úhel natočení [°]

5.1.1. 100 % zatížení nástroje v řezu

Abychom byli schopni vypočítat tyto koeficienty, je nutné si zvolit nástroj, který bude obrábět naši vzorovou drážku. Pro zjednodušení výpočtu budeme vycházet, že frézovací nástroj má nulový úhel šroubovice, tedy úhel sklonu ostří λ bude roven 0°. Tím nám odpadne pasivní síla ve směru osy Z.

Na nástroj v našem případě bude působit pouze tangenciální (řezná síla) a normálová síla.

Jako nástroj si můžeme představit frézu s těmito parametry:

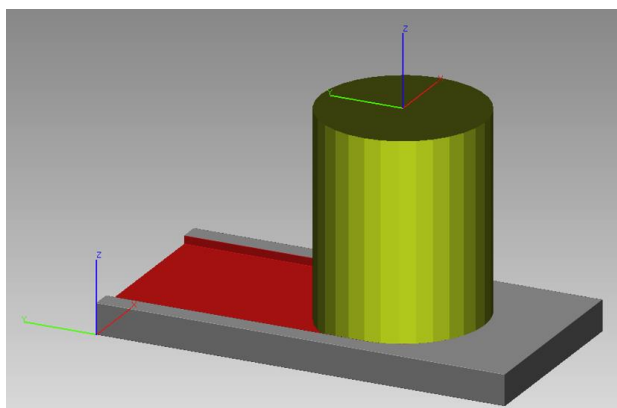
Průměr nástroje (D)	80 mm
Počet břitů (z)	7
Úhel čela (γ)	8°
Úhel sklonu ostří (λ)	0°

Řezné podmínky:

Posuv na zub (f_z)	0,05 mm/zub
Tloušťka třísky (a_p)	5 mm
Otáčky (n)	1000 ot/min
Zatížení nástroje v řezu	100 %
Opásání nástroje	180°

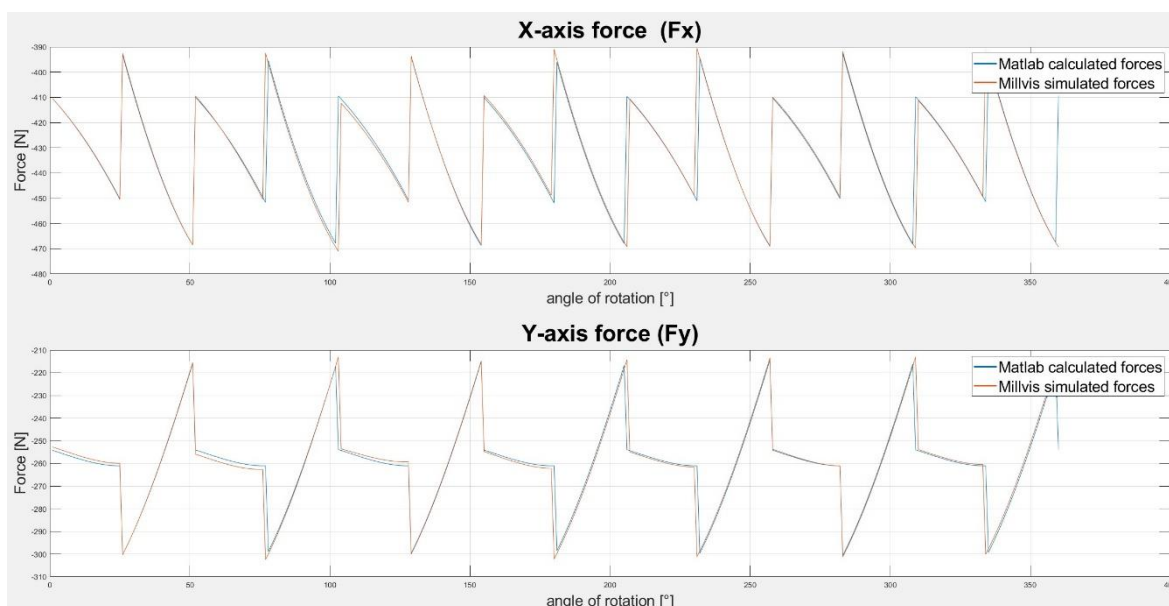
$$f = f_z * z * n = 0,05 * 7 * 1000 = 350 \text{ mm/min} \quad (9)$$

Toto jsou zvolené parametry nástroje a abychom měli řezné podmínky kompletní, přepočítáme posuv na zub na posuvovou rychlost podle rovnice (9). Po tomto kroku už máme všechny potřebné veličiny, abychom mohli nastavit simulaci obrábění jednoduché drážky v softwaru Millvis (Obr. 39.).



Obr. 39.: Obrábění základní drážky se 100 % zatížením nástroje v řezu

Provedeme simulaci obrábění v Millvisu a uložíme soubor s řeznými silami. Dále proběhlo vytvoření skriptu v Matlabu, který po jednotlivých stupních počítá výslednou tangenciální (řeznou sílu) a normálovou sílu. Tyto síly je dále třeba rozložit do souřadného systému X a Y, abychom dostali výsledné průběhy sil působící v jednotlivých osách (F_x a F_y). Následně můžeme tyto složky sil vůči sobě porovnat (ze simulace v Millvisu a z vytvořeného skriptu v Matlabu). Porovnání vidíme na obrázku dole (Obr. 40.).



Obr. 40.: Porovnání simulace v Millvisu a Matlab výpočtu, 100 % zatížení nástroje v řezu

Jak je vidět z grafů nahoře (Obr. 40.), tak průběhy sil jsou téměř identické. Což jen potvrzuje správnost výpočtu sil.

5.1.2. 50 % zatížení nástroje v řezu

Jako další příklad si ukážeme situaci, kdy zachováme nástroj, mírně změníme řezné podmínky a zatížení nástroje v řezu změníme na 50 %. Přepočítání změněné posuvové rychlosti z mm/zub na mm/min je uvedeno v rovnici (10). Kompletní přehled řezných podmínek je vidět níže.

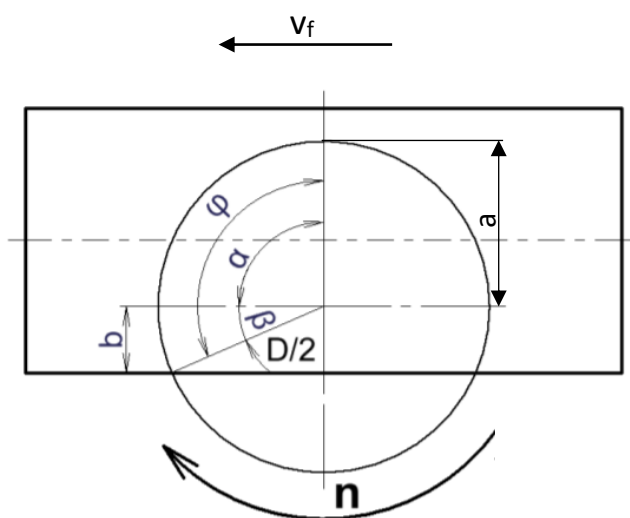
Řezné podmínky:

Posuv na zub (f_z)	0,03 mm/zub
Tloušťka třísky (a_p)	5 mm
Otáčky (n)	1000 ot/min
Zatížení nástroje v řezu	50 %
Opásání nástroje	90°

$$f = f_z * z * n = 0,03 * 7 * 1000 = 210 \text{ mm/min} \quad (10)$$

Abychom spočítali úhel záběru frézy φ (Obr. 41.), je nutné si uvědomit, jak je obrábění provedeno. Je třeba znát procentuální zatížení nástroje (v CAM softwaru je to veličina, která říká kolika procenty průměru nástroje smí nástroj obrábět), díky této hodnotě můžeme provést rozhodnutí podle tabulky níže (Tab. 2.).

V případě, že nástroj obrábí více než půlkou průměru využijeme rovnice (11). V případě, že nástroj obrábí méně než půlkou svého průměru využijeme rovnice (12) a v případě, že nástroj obrábí přesně půlkou využijeme rovnice (13). V tomto případě, kdy obrábíme přesně půlkou nástroje, je úhel opásání přesně 90° (13).

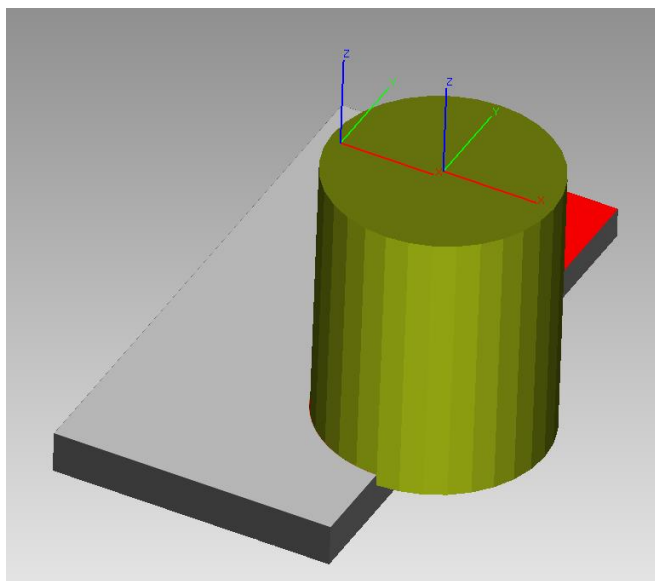


Obr. 41.: Výpočet úhlu záběru frézy φ [34]

Tab. 2.: Úhel opásání nástroje:

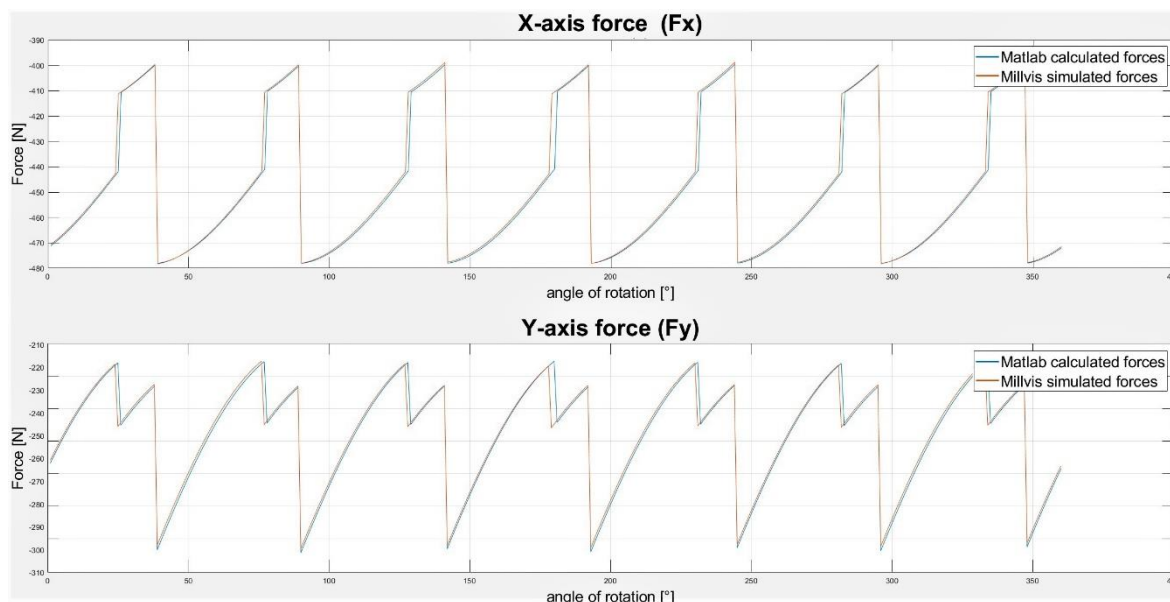
<p>Případ, kdy je zatížení nástroje v řezu vyšší než 50 %</p> $\alpha = 90^\circ = \sin^{-1}(1)$ $\beta = \sin^{-1}\left(\frac{b}{D/2}\right) \quad (11)$ $\varphi = \alpha + \beta$	<p>Případ, kdy je zatížení nástroje v řezu menší než 50 %</p> $\alpha = \sin^{-1}\left(\frac{a}{D/2}\right)$ $\varphi = \alpha \quad (12)$
<p>Případ, kdy je zatížení nástroje v řezu rovno 50 %</p> $\varphi = \alpha = 90^\circ \quad (13)$	

Na následujícím obrázku (Obr. 42.) můžeme vidět simulaci obrábění drážky s 50 % zatížením nástroje v řezu. Pro to, aby nástroj obráběl na straně obrobku, je nutné znovu vytvořit NC kód, který se posléze nahraje do Millvisu. Následně provedeme novou simulaci řezného procesu.



Obr. 42.: Obrábění základní drážky s 50 % zatížením nástroje v řezu

Při srovnání průběhů sil (Obr. 43.) v Matlabu a Millvisu s 50 % zatížením nástroje v řezu, dostáváme podobně dobrou shodu jako v předchozím případě (100 % zatížení nástroje v řezu). Což opět potvrzuje správnost výpočtu sil.



Obr. 43.: Porovnání simulace v Millvisu a Matlab výpočtu, 50 % zatížení nástroje v řezu

Při porovnání průběhů s 50 % a 100 % zatížením nástroje v řezu dostáváme sice jiné vizuální průběhy sil, ale maxima a minima silového zatížení F_x a F_y vykazují velice podobné hodnoty. Je to pravděpodobně způsobeno tím, že v tomto případě drážky je maximální průřez třísky v 90° opásání nástroje. Oba představené případy s 50 % a 100 % zatížením nástroje v řezu obrábějí materiál v oblasti 90° opásání nástroje, proto tedy vykazují velice podobné maximální hodnoty sil.

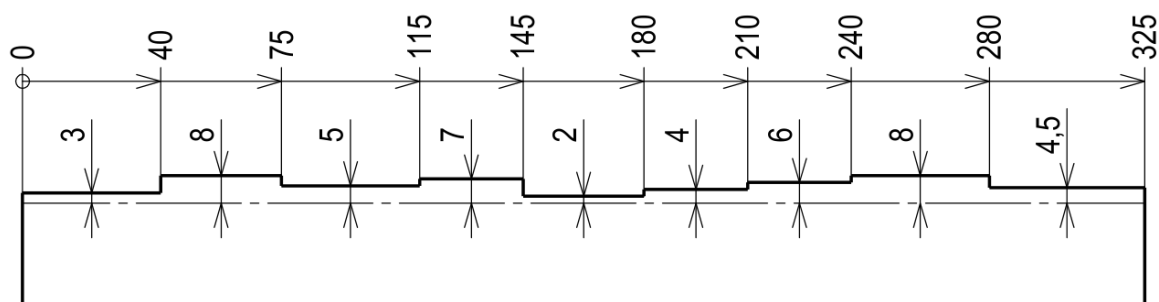
5.2. Vývoj sil na drážce s proměnlivým přídatkem

V této kapitole využijeme mechanistického modelu řezných sil z minulé kapitoly a aplikujeme ho na první modelový příklad představený v kapitole 4.1., dále rozšíříme skript v Matlabu o další parametry zatížení nástroje jako je úběr materiálu za vteřinu (MRR) a kroučící moment.

Pro připomenutí rozměrů drážky (Obr. 44.) jsou níže uvedeny její rozměry s kótováním od počátku pro lepší orientaci v grafech.

Jako nástroj byla zvolena fréza o průměru 10 mm a sklonu ostří 0° (pro zjednodušení výpočtu). Další parametry nástroje (Tab. 4.) a řezné podmínky (Tab. 5.) jsou rovněž uvedeny níže.

Pro tuto drážku byla provedena citlivostní analýza na změnu posuvu. Zvoleny byly tři posuvy na zub (Tab. 3.), pro které byl proveden výpočet osových sil F_x a F_y . Pro tyto posuvy na zub byl rovněž vypočítán kroučící moment a úběr materiálu za vteřinu (MRR).



Obr. 44.: Rozměry drážky s proměnlivým přidavkem (kóta od počátku)

Tab. 3.: Přehled posuvových rychlostí:

$f_z = 0,09$ mm/zub
$f_z = 0,06$ mm/zub
$f_z = 0,03$ mm/zub

Tab. 4.: Nástroj – fréza s těmito parametry:

Průměr nástroje (D)	10 mm
Počet břitů (z)	4
Úhel čela (γ)	8°
Úhel sklonu ostří (λ)	0°

Tab. 5.: Řezné podmínky:

Posuv na zub (f_z)	Viz tabulka (Tab. 3.)
Tloušťka třísky (a_p)	Viz poloha nástroje (Obr. 44.)
Otáčky (n)	1000 ot/min
Zatížení nástroje v řezu	100 %
Opásání nástroje	180°

Výpočet parametrů byl proveden pro výchozí posuv na zub $f_z = 0,06$ mm/zub. Následně byl posuv snížen i zvýšen o 50 % (Tab. 3.) a rovněž pro něj byly vypočítány všechny parametry. Pro představu je posuvová rychlost spočítána podle rovnic (14) uvedených níže.

Posuvová rychlost:

$$f_{0,09} = f_z * z * n = 0,09 * 4 * 1000 = 360 \text{ mm/min}$$

$$f_{0,06} = f_z * z * n = 0,06 * 4 * 1000 = 240 \text{ mm/min} \quad (14)$$

$$f_{0,03} = f_z * z * n = 0,03 * 4 * 1000 = 120 \text{ mm/min}$$

Na obrázku níže (Obr. 45.) můžeme vidět vypočítané osové síly F_x a F_y na délce jedné otáčky nástroje, konkrétně na úseku od 150 mm do 150,12 mm, což odpovídá hloubce řezu 2 mm. V grafu jsou vidět 4 vrcholy silového zatížení v ose X a Y, což odpovídá počtu břitů nástroje, tedy čtyřem.

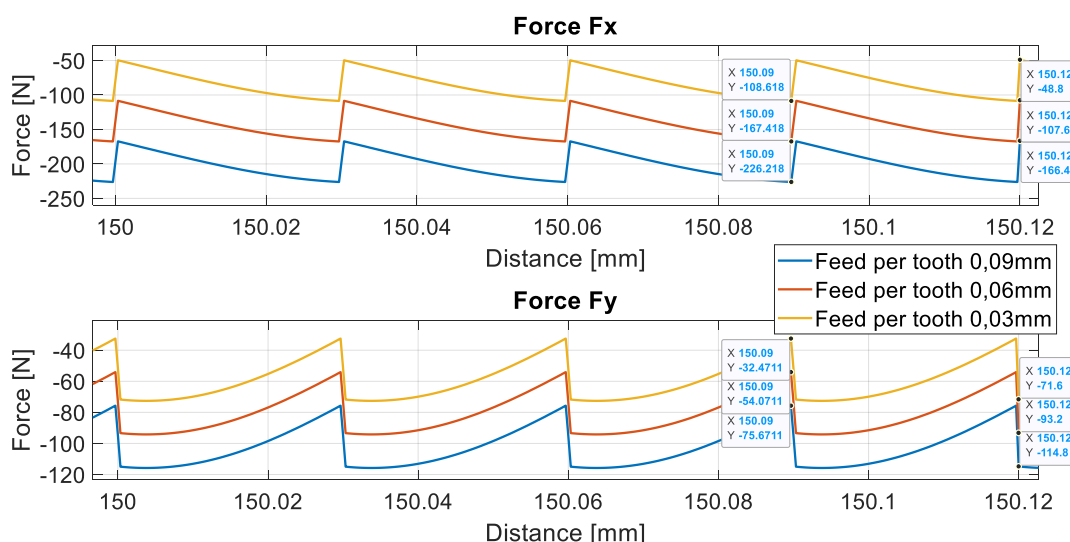
Maximální a minimální hodnoty silového zatížení v tomto úseku jsou uvedeny v tabulkách (Tab. 6. a Tab. 7.). Zobrazeno je také procentuální vyjádření sil F_x a F_y , které je počítáno vůči výchozímu posuvu na zub ($f_z = 0,06$ mm/zub). Tento parametr nám říká, jak moc jednotlivá složka síly reaguje na změnu posuvové rychlosti. Procentuální vyjádření osových sil (F_x a F_y) je stejné na všech úsecích drážky.

Tab. 6.: Maximální průběhy sil na zvoleném úseku:

Posuv na zub	F_x [N]	F_y [N]	Procentuální vyjádření vůči $f_z = 0,06$ mm/zub	
			F_x [%]	F_y [%]
$f_z = 0,06$ mm/zub	-167,42	-93,2	Výchozí f_z (100 %)	Výchozí f_z (100 %)
$f_z = 0,03$ mm/zub	-108,42	-71,6	64,8 %	76,8 %
$f_z = 0,09$ mm/zub	-226,22	-114,8	135,1 %	123,2 %

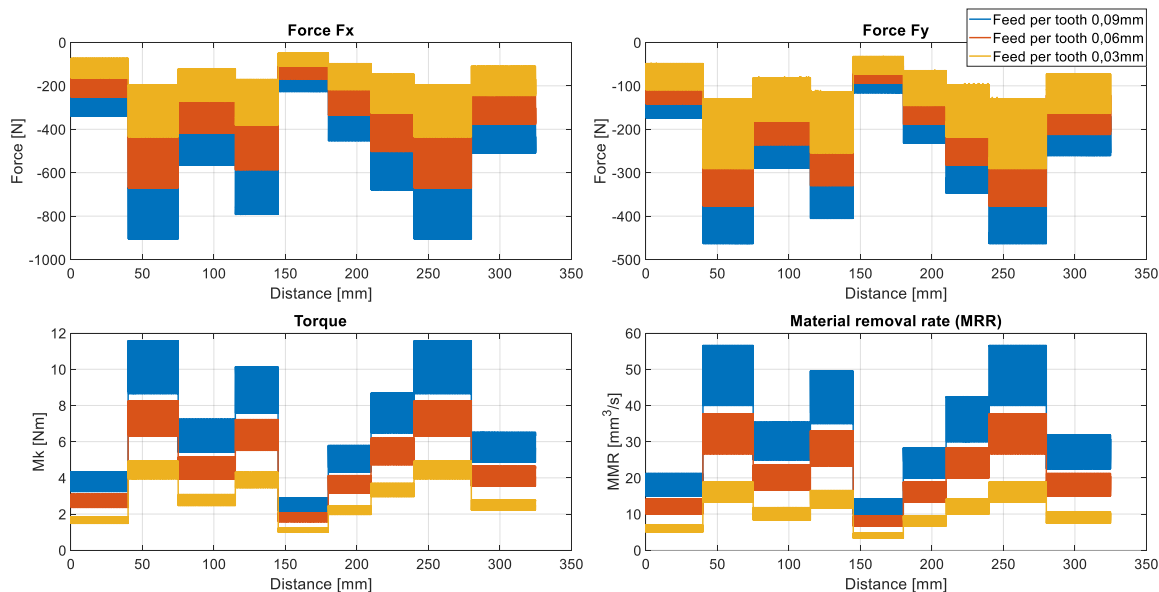
Tab. 7.: Minimální průběhy sil na zvoleném úseku:

Posuv na zub	F_x [N]	F_y [N]	Procentuální vyjádření vůči $f_z = 0,06$ mm/zub	
			F_x [%]	F_y [%]
$f_z = 0,06$ mm/zub	-107,6	-54,07	Výchozí f_z (100 %)	Výchozí f_z (100 %)
$f_z = 0,03$ mm/zub	-48,8	-32,47	45,4 %	60 %
$f_z = 0,09$ mm/zub	-166,4	-75,67	154,6 %	139,9 %



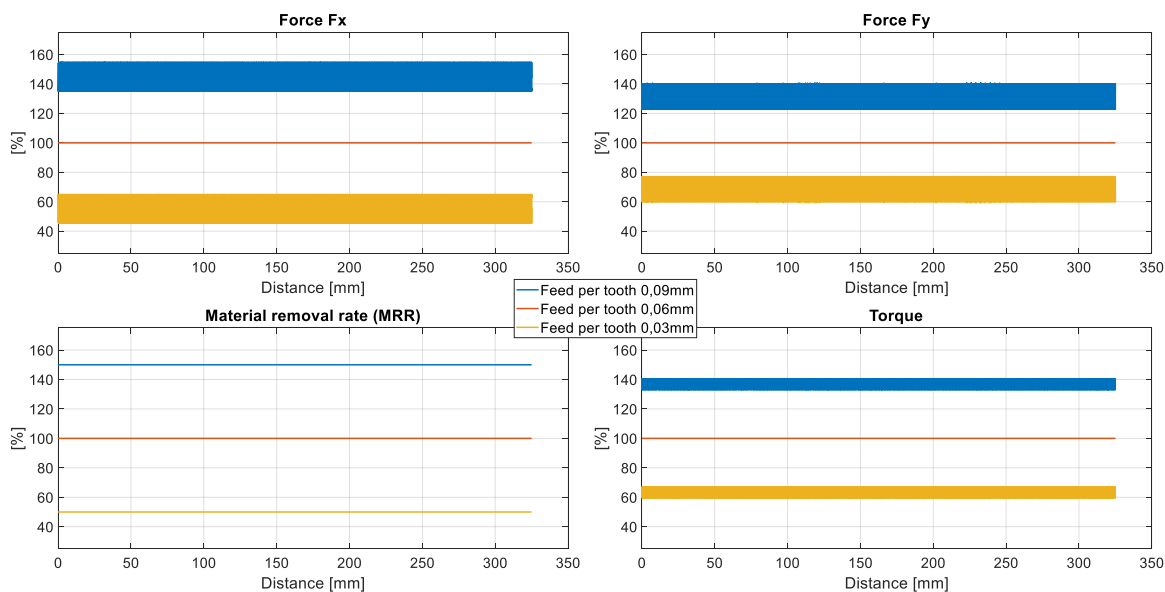
Obr. 45.: Průběh sil na úseku drážky od 150 mm do 150.12 mm

Při vykreslení všech parametrů na celé délce drážky dostaneme: průběhy osových sil F_x a F_y (Force Fx a Force Fy), průběh úběru materiálu za vteřinu (MRR) a průběh kroučícího momentu (Torque). Všechny tyto parametry jsou vidět na následujícím grafu (Obr. 46.).



Obr. 46.: Vykreslení všech parametrů na celé délce drážky

Po provedení stejného procentuálního vyjádření jako v tabulkách (Tab. 6. a Tab. 7.) aplikovaného na výše zmíněné parametry, dostáváme následující graf (Obr. 47.).



Obr. 47.: Procentuální vyjádření všech parametrů na celé délce drážky

Při bližším zkoumání procentuálního vyjádření jednotlivých parametrů dostáváme mírně odlišné reakce na zvýšení posuvové rychlosti (Obr. 47.). Třeba u úběru materiálu za vteřinu (MRR) došlo v tomto případě ke stejné procentuální změně jako byla změna posuvové rychlosti. Tedy pokud se posuv na zub zvýšil o 50 %, došlo ke stejnému zvýšení i u parametru úběru materiálu za vteřinu (MRR). Podobné reakce na změnu posuvové rychlosti vykazuje i síla ve směru osy X (Force Fx), i když ne tak přesně jako úběr materiálu za vteřinu (MRR).

U kroutícího momentu (Torque) a osově síly ve směru Y (Force Fy) dostáváme mírnější reakci na změnu posuvové rychlosti. Při zvýšení posuvu na zub o 50 % oproti výchozí hodnotě reagovaly tyto parametry zvýšením zhruba o 40 %.

5.3. Obrábění rohu kapsy

Jak jsme si již dříve představili, tak druhý jednoduchý příklad obrábění, kde bychom mohli docílit zlepšení pomocí optimalizace, je obrábění rohů kapsy. Při obrábění rohů kapsy dochází k nárůstu opásání nástroje, jak je vidět na grafech v tabulce níže (Tab. 10.).

V jednotlivých krocích obrábění si můžeme všimnout cihlové čáry, která představuje úhel opásání (engagement angle). Úhel opásání roste z výchozí hodnoty 115° do své maximální hodnoty 175°. Jedná se přibližně o 50 % nárůst oproti své výchozí hodnotě. Nárůst opásání s sebou přináší i nárůst úběru materiálu za vteřinu (MMR) a s tím spojený nárůst ostatních parametrů (síly ve směru posuvové rychlosti (feed force) a kr. momentu (torque)). Zvýšení úhlu opásání nástroje o zhruba 50 % v našem případě způsobí zvýšení úběru materiálu za vteřinu přibližně o 45 %. Zvýšení síly ve směru posuvové rychlosti je zhruba šestinásobné a zvýšení momentu na vřetení je o 33 % vyšší oproti výchozí hodnotě.

Z grafů v tabulce níže (Tab. 10.) tedy vyplývá, že nejvíce na vzrůstající objem odebíraného materiálu reaguje síla ve směru posuvové rychlosti.

Tato simulace proběhla už jen v softwaru Millvis. Obráběla se základní kapsa, která byla představena v kapitole 4.2., pro připomenutí v tabulce níže (Tab. 10.) jsou uvedeny její rozměry. Jako nástroj byla zvolena fréza se čtyřmi břity o průměru 10 mm a následujících parametrech (Obr. 48. a Tab. 8.). Řezné podmínky byly nastaveny podle tabulky (Tab. 9.).

Tab. 8.: Nástroj – fréza s těmito parametry:

Průměr nástroje (D)	10 mm
Počet břitů (z)	4
Úhel sklonu ostří (λ)	37°
Délka nástroje	80 mm
Výška ostří	20 mm

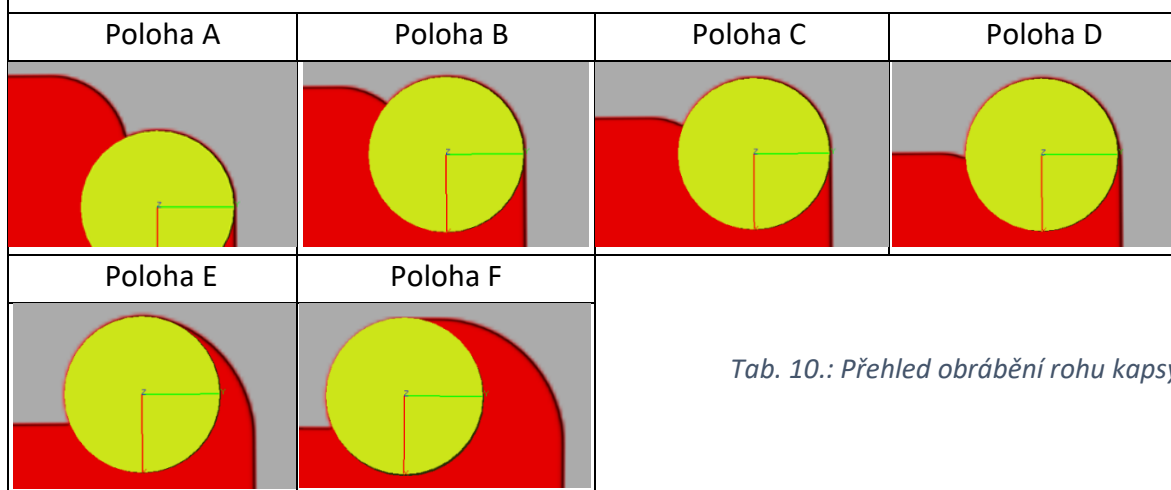
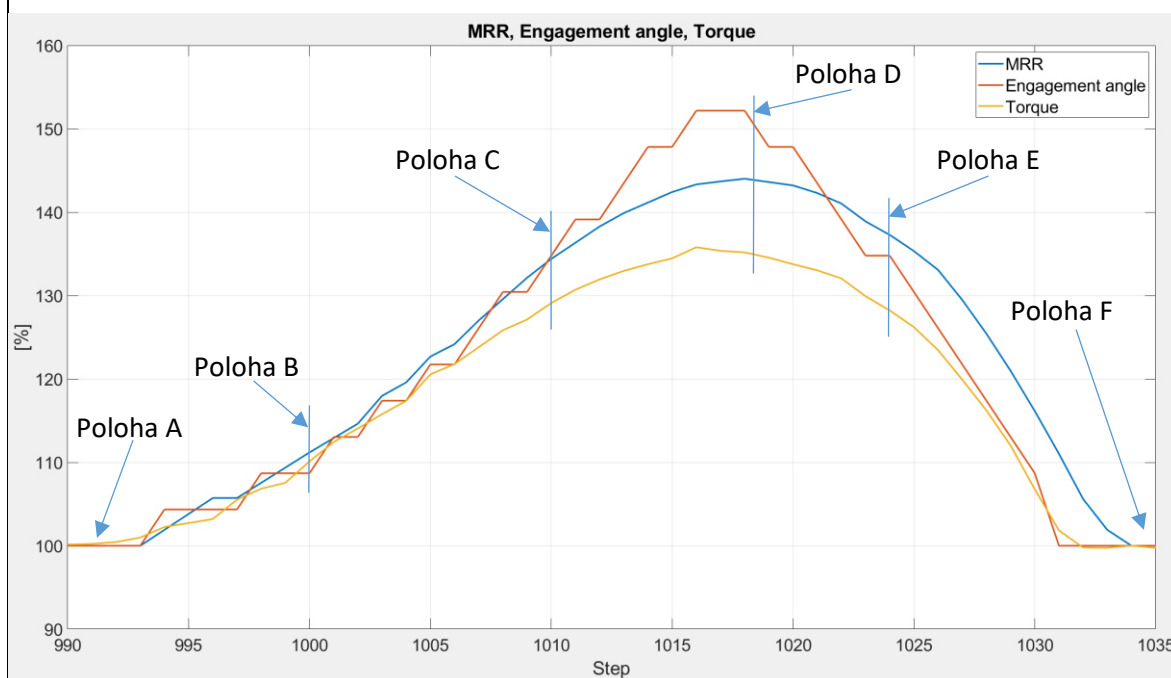
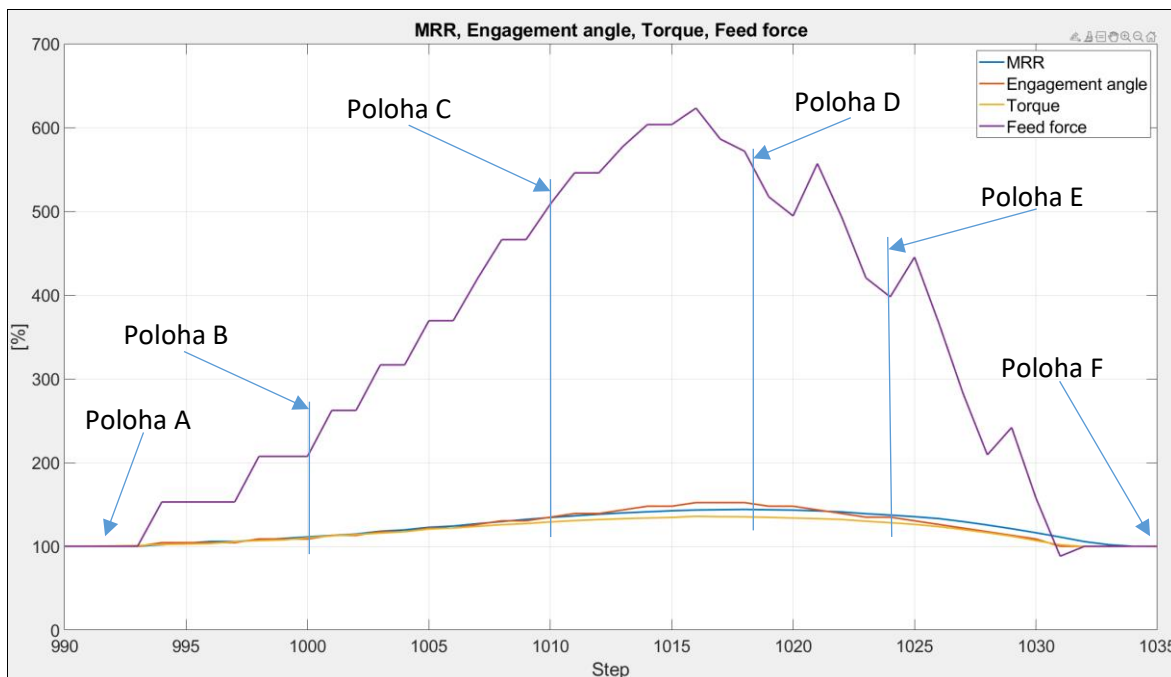
Tab. 9.: Řezné podmínky:

Posuvová rychlost	900 mm/min
Tloušťka třísky (ap)	5 mm
Otáčky (n)	2750 ot/min
Zatížení nástroje v řezu	63,9 %
Výchozí opásání nástroje	115°

Tab. 10.: Přehled obrábění rohu kapsy



Optimalizace NC kódu na základě zatížení nástroje a dynamických vlastností stroje



Tab. 10.: Přehled obrábění rohu kapsy

5.4. Zhodnocení jednotlivých příkladů obrábění

V kapitole 5. jsme si představili model řezných sil a porovnali ho se softwarem Millvis. Porovnání proběhlo na jednoduchých a komplexnějších drážkách. Ve všech případech se průběhy vypočítaného a vykresleného průběhu ze softwaru Millvis shodovaly na velice dobré úrovni. Což ověřilo správnost výpočtu skriptu v Matlabu a dále verifikovalo Millvis jako velice užitečný software pro výpočet zatížení nástroje při řešení složitějších NC kódů. Jako příklad, kdy byl použit jen software Millvis je uvedena předešlá kapitola 5.3., kdy byl výpočet zatížení nástroje při průjezdu zatáčkou příliš složitý na řešení analytickou metodou. S využitím simulace v softwaru Millvis jsme schopni si jednotlivé parametry exportovat v textovém souboru a dále s nimi pracovat v Matlabu. Tyto simulované parametry zatížení nástroje v softwaru Millvis budou v příštích kapitolách využívány pro optimalizaci a výpočet příslušné posuvové rychlosti v daném NC bloku.

6. Návrh postupu optimalizace posuvových rychlostí nástroje v NC kódu

V této kapitole se zaměříme na provedení experimentu, který měl za úkol zjistit reálné chování interpolátoru pro různé NC kódy. Dále bude představena geometrická analýza pro zahájení změny posuvové rychlosti v určité vzdálenosti před rádiusem. Nakonec s použitím těchto znalostí provedeme návrh strategie pro změnu posuvové rychlosti.

6.1. Experiment na stroji MCU 700 s různými variantami vložených NC bloků před rádius

Při simulacích v softwaru Millvis se nejlepších výsledků optimalizace dosáhlo při vyšším počtu vložených NC bloků, na kterých se upravila posuvová rychlost. Tím pádem při simulaci bylo řízení posuvové rychlosti prováděno po menších skocích, což lépe vyrovnávalo změnu opásání a s tím spojené vzrůstající zatížení nástroje. Otázka ale zněla, jak se zachová interpolátor řídicího systému stroje při těchto skocích posuvové rychlosti. V případě, že jsou vložené NC bloky blízko sebe, jak na to bude reagovat interpolátor s žádanou polohou a jak zareagují pohony stroje s reálnou polohou na pravítkách.

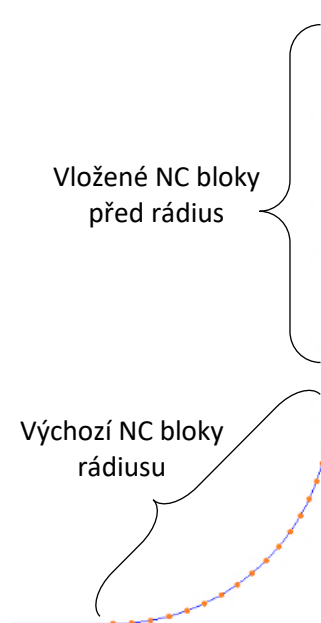
Proto byl vytvořen experiment, který měl na dvou rádiusech kapsy vždy různý počet NC bloků (Obr. 50.). Experiment byl postaven tak, že proběhlo obrábění ve vzduchu na stroji MCU 700 (Obr. 49.) na Ústavu výrobních strojů a zařízení Fakulty strojní. Na stroji bylo postupně odbaveno 22 NC kódů a snímaly se tyto parametry:

- žádané polohy X, Y, Z
- žádané rychlosti X, Y, Z
- skutečné polohy X, Y, Z
- skutečné rychlosti X, Y, Z

NC kódy pro experiment byly tvořeny tak, aby zohledňovaly různé způsoby vkládání NC bloků. Řezné podmínky experimentu jsou uvedeny v tabulce (Tab. 11.).



Obr. 49.: MCU 700 [36]



Obr. 50.: Vložené NC bloky

Před experimentem byly dva předpoklady, jak by se mohl interpolátor zachovat:

- 1) První předpoklad byl, že stroj, který má na některém z vložených NC bloků upravenou posuvovou rychlost, bude od posledního vloženého NC bloku zpomalovat, aby dosáhl předepsané posuvové rychlosti bez rázů.
- 2) Druhá předpoklad byl, že když bude vloženo deset NC bloků před rádius a na všech bude upravena posuvová rychlost, tak interpolátor s funkcí lookahead proloží tyto NC bloky plynulým snížením posuvové rychlosti tak, aby dodržel posuvovou rychlost na každém NC bloku, ale zároveň nesnižoval skokovitě na každém NC bloku posuvovou rychlost.

Zároveň u některých NC kódů jsme testovali, jak daleko musí být první NC blok umístěn (při využití předpokladu 1) před začátek rádiusu a v jaké vzdálenosti od tohoto NC bloku dojde ke zpomalení na požadovanou posuvovou rychlost.

Tab. 11.: Řezné podmínky:

Otáčky	2750 ot/min
Výchozí posuvová rychlost	900 mm/min
Minimální využitá posuvová rychlost v NC kódu	640 mm/min

Maximální dovolená posuvová rychlost (dle nástroje)	($f_z 0,09$) - 990 mm/min
Minimální dovolená posuvová rychlost (dle nástroje)	($f_z 0,03$) - 330 mm/min
Průměr nástroje	10 mm
Počet zubů nástroje	4

Pro představení všech použitých NC kódů byly vytvořeny tabulky (Tab. 12. a Tab. 13.), kde je uvedeno: označení NC kódu, počet přidáných NC bloků před rádius s upravenou posuvovou rychlostí, počet stávajících NC bloků rádiusu s upravenou posuvovou rychlostí. Měření proběhlo pro výchozí posuvovou rychlost (Tab. 12.), tedy 900 mm/min. Následně bylo provedeno měření rychloposuvu (Tab. 13.), kde byla posuvová rychlost na všech NC blocích desetinásobně navýšena. Měření rychloposuvu má za cíl ukázat, jak se bude stroj chovat v situaci, kdy je posuvová rychlost v rádiusech nad limitem stroje.

Tab. 12.: Přehled NC kódů – běžný posuv (900 mm/min):

Číslo měření	Počet přidáných NC bloků před rádius s upr. pos. rychlostí	Počet stávajících NC bloků rádiusu, s upravenou posuvovou rychlostí	Označení NC kódu	Poznámka k NC kódu
1	10	12	10B-12B	NC bloky před rádiusem umísťovány po 1 mm
2	10	1	10B	NC bloky před rádiusem umísťovány po 1 mm
3	5	6	5B-6B	NC bloky před rádiusem umísťovány po 2 mm
4	5	1	5B	NC bloky před rádiusem umísťovány po 2 mm
5	2	3	2B-3B-15	1. NC blok umístěn 5 mm před začátkem rádiusu 2. NC blok umístěn 15 mm před prvním NC blokem
6	2	3	2B-3B-10	1. NC blok umístěn 5 mm před začátkem rádiusu 2. NC blok umístěn 10 mm před prvním NC blokem
7	2	1	2B-15	1. NC blok umístěn 5 mm před začátkem rádiusu 2. NC blok umístěn 15 mm před prvním NC blokem
8	2	1	2B-10	1. NC blok umístěn 5 mm před začátkem rádiusu 2. NC blok umístěn 10 mm před prvním NC blokem
9	1	3	1B-3B	Vložen pouze 1 NC blok 5 mm před rádius na kterém je změněna posuvová rychlost
10	1	1	1B	Vložen pouze 1 NC blok 5 mm před rádius na kterém je změněna posuvová rychlost
11	0	0	VÝCHOZÍ	Výchozí NC kód bez úprav (900 mm/min)

Tab. 13.: Přehled NC kódů – rychloposuv (9000 mm/min):

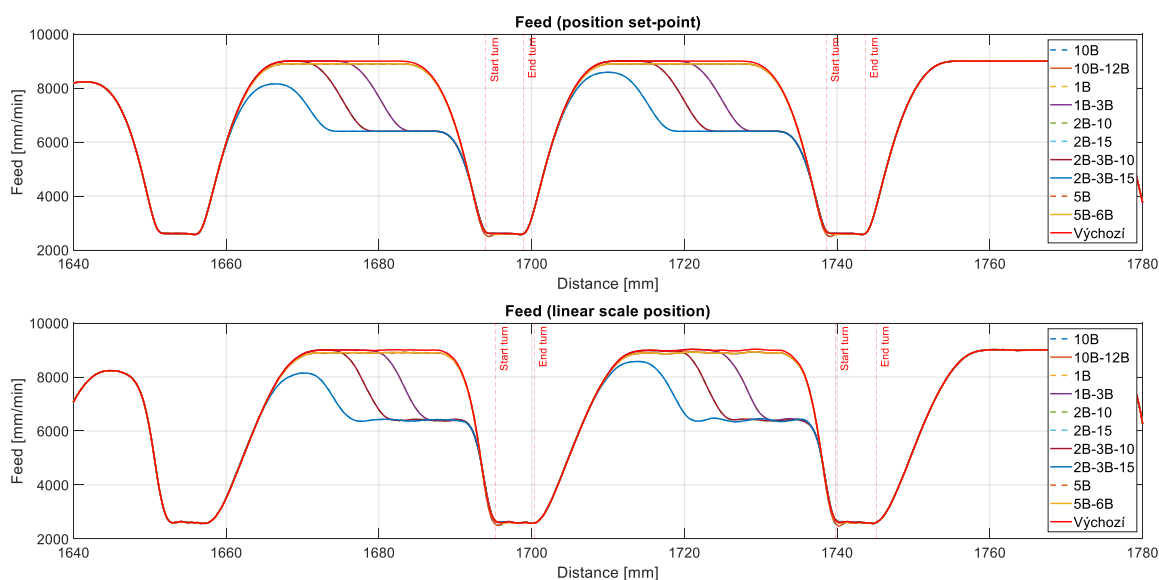
Číslo měření	Počet přidanych NC bloků před rádiem s upr. pos. rychlostí	Počet stávajících NC bloků rádiu, s upravenou posuvovou rychlostí	Označení NC kódu	Poznámka k NC kódu
1	10	12	10B-12B	NC bloky před rádiem umísťovány po 1 mm
2	10	1	10B	NC bloky před rádiem umísťovány po 1 mm
3	5	6	5B-6B	NC bloky před rádiem umísťovány po 2 mm
4	5	1	5B	NC bloky před rádiem umísťovány po 2 mm
5	2	3	2B-3B-15	1. NC blok umístěn 5 mm před začátkem rádiu 2. NC blok umístěn 15 mm před prvním NC blokem
6	2	3	2B-3B-10	1. NC blok umístěn 5 mm před začátkem rádiu 2. NC blok umístěn 10 mm před prvním NC blokem
7	2	1	2B-15	1. NC blok umístěn 5 mm před začátkem rádiu 2. NC blok umístěn 15 mm před prvním NC blokem
8	2	1	2B-10	1. NC blok umístěn 5 mm před začátkem rádiu 2. NC blok umístěn 10 mm před prvním NC blokem
9	1	3	1B-3B	Vložen pouze 1 NC blok 5 mm před rádiem na kterém je změněna posuvová rychlost
10	1	1	1B	Vložen pouze 1 NC blok 5 mm před rádiem na kterém je změněna posuvová rychlost
11	0	0	VÝCHOZÍ	Výchozí NC kód bez úprav (9000 mm/min)

V poznámkách k měření jsou uvedeny doplňující informace k jednotlivým měřením. Použité označení NC kódů bude používáno v následujících grafech.

6.2. Vyhodnocení posuvových rychlostí z interpolátoru

Po provedení měření a zaznamenání všech potřebných parametrů, bylo provedeno vyhodnocení v programu Matlab. Vyhodnocení probíhalo vykreslením grafů, kdy na ose X máme ujetou dráhu (distance) v milimetrech a na ose Y posuvovou rychlost (feed) v milimetrech za vteřinu.

Na následujících grafech je vidět celkový souhrn měření pro běžnou posuvovou rychlost (Obr. 52.) a pro rychloposuv (Obr. 51.). Pro lepší přehlednost je zobrazena pouze část, kde docházelo k úpravám posuvové rychlosti. V grafech je rovněž vyznačen začátek (start turn) a konec (end turn) jednotlivých rádiusů, kde byla upravována posuvová rychlost. V horním grafu je znázorněna žádaná posuvová rychlost (position set-point) z interpolátoru řídicího systému stroje a ve spodním grafu je vidět reálná posuvová rychlost (linear scale position) měřená z pravítek stroje.



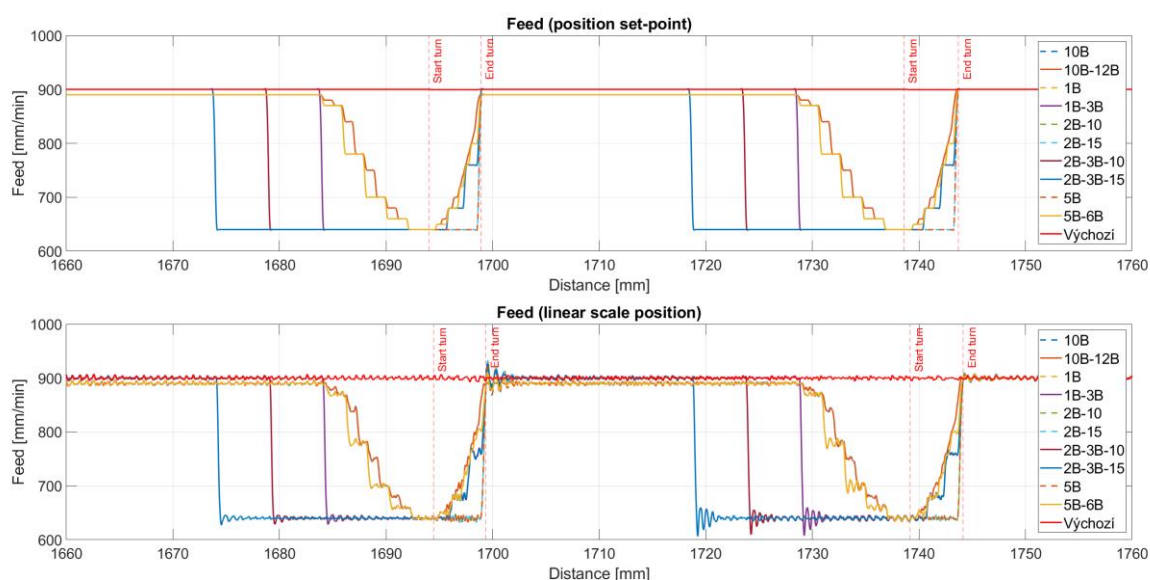
Obr. 51.: Posuvová rychlost - 9000 mm/min

Při testování rychloposuvu je na grafech vidět, že jsme nad hranicí limitů pohonů. Při obrábění takto ostrých rádiusů nejsou pohony stroje MCU 700 schopny interpolovat takto vysoké posuvové rychlosti ve dvou osách. Na grafech (Obr. 51.) je vidět, že obráběcí stroj musí daleko dříve brzdit.

Například při měření, kdy jsou jednotlivé NC bloky od sebe vzdálené 1 či 2 mm nemá stroj šanci, při takto vysokých posuvových rychlostech, dodržet požadované hodnoty (žádanou posuvovou rychlost). Proto není prakticky rozdíl mezi výchozím NC programem (Výchozí) a optimalizovaným NC programem s NC bloky vzdálenými 1 či 2 mm (10B, 10B-12B, 5B, 5B-6B). Rozdíly vidíme pouze u měření, kdy je použit první NC blok 5 mm před rádiusem (1B, 1B-3B, 2B-10, 2B-15, 2B-3B-10, 2B-3B-15).

Zároveň si můžeme všimnout, že při projetí rádiusu o poloměru 15 mm (rozměry zmíněné v kapitole 4.2.) musí stroj MCU 700 zpomalit až na hodnotu kolem 2600 mm/min. Po projetí rádiusu se posuvová rychlost vrací na původní hodnotu 9000 mm/min. Posuvová rychlost 2600 mm/min zhruba odpovídá maximální posuvové rychlosti použitelné při obrábění rádiusu o poloměru 10 mm na stroji MCU 700, což je pro běžné obrábění zcela dostačující.

Pro tuto práci je důležitější následující graf (Obr. 52.), který reprezentuje obrábění posuvovou rychlostí respektující limity nástroje, pro připomenutí se jedná o posuvovou rychlost v rozmezí 0,03 – 0,09 mm/zub, což při přepočítání posuvové rychlosti do mm/min odpovídá 330 – 990 mm/min. Tyto hodnoty jsou pro CNC obrábění daleko běžnější, a proto se budeme při vyhodnocení zabývat primárně měřením s posuvovou rychlostí 900 mm/min představeném v následujícím grafu (Obr. 52.).



Obr. 52.: Posuvová rychlost - 900 mm/min

V grafu (Obr. 52.) z měření posuvové rychlosti, která dosahovala maximální hodnoty 900 mm/min (výchozí nastavená hodnota posuvové rychlosti) můžeme vidět žádané posuvové rychlosti (position set-point) a reálné posuvové rychlosti (linear scale position).

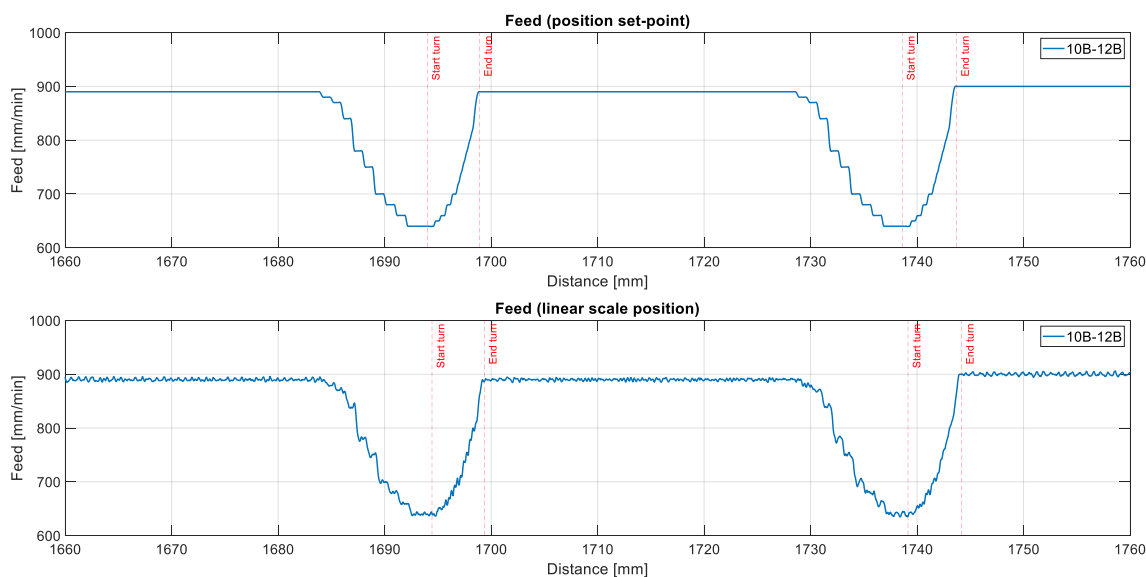
Z důvodu menšího rozptylu maximální a minimální hodnoty posuvové rychlosti, než u rychloposuvu, vidíme větší detail na průběhu reálné posuvové rychlosti z pravítek stroje. Na složce reálné posuvové rychlosti jsou vidět také menší zákmity a drobný překmit nastavené posuvové rychlosti. Je to způsobeno nízkými frekvencemi, které vstupují do konstrukce stroje, což je částečně dáno podsklepením místa, kde je stroj MCU 700 umístěn. Rozdílné zákmity v jednotlivých průjezdech rádiusy jsou dány rozdílnou mechanickou stavbou jednotlivých os.

6.3. Chování interpolátoru

Jak jsme si ukázali na předchozích grafech, tak předpoklad toho, že by interpolátor stroje prokládal několik NC bloků plynulým snížením posuvové rychlosti, se nepotvrdil. Rovněž se nepotvrdil předpoklad, že by interpolátor začal plynule brzdit před NC blokem se sníženou posuvovou rychlostí. Výjimku tvoří pouze obrábění rychloposuvem, kdy interpolátor nemá jinou možnost, než začít brzdit ve větší vzdálenosti před rádiusem. To navozuje dojem toho, že při vysokých posuvových rychlostech (rychloposuv) by mohly tyto dva předpoklady platit. Při obrábění posuvovými rychlostmi, které jsou v rámci limitů CNC stroje a nástroje, tyto předpoklady neplatí.

Z výsledků měření posuvové rychlosti naopak vyplývá, že vložený NC blok s upravenou posuvovou rychlostí stroj vnímá jako příkaz. Ten se pak snaží dodržet v co nejkratším čase s ohledem na nastavené tolerance.

Na následujícím grafu (Obr. 53.) můžeme vidět měření NC kódu s upravenou posuvovou rychlostí na deseti vložených NC blocích před rádiusem, a na dvanácti stávajících NC blocích v rádiusu.

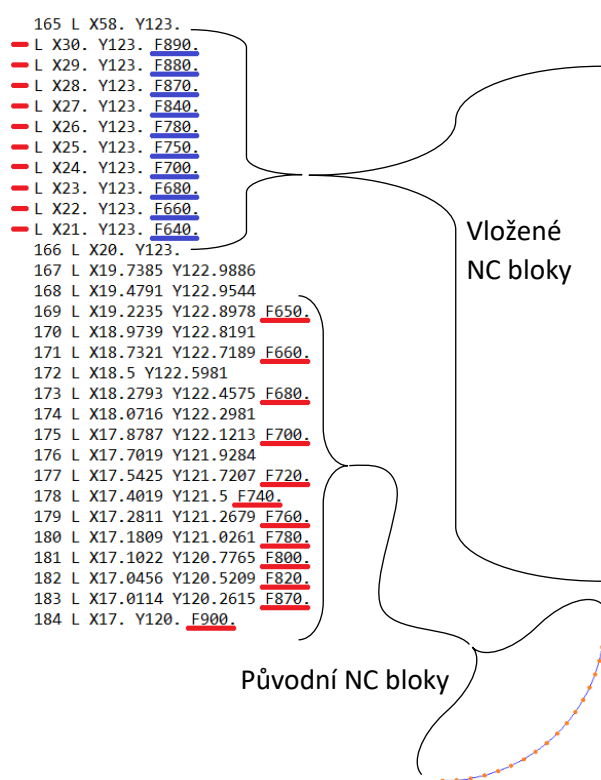


Obr. 53.: Měření 10B-12B

Z tohoto grafu (Obr. 53.) je vidět chování žádané posuvové rychlosti (position set-point), jak na každém NC bloku postupně skokovitě upravuje posuvovou rychlost. V tomto NC kódu jsou NC bloky rozmístěny 1 mm daleko od sebe a na každém je předepsána úprava posuvové rychlosti.

Z grafu (Obr. 53.) je vidět že vzdálenost 1 mm je pro obráběcí stroj MCU 700 dostatečná vzdálenost na to, aby skokovitě upravil posuvovou rychlost. Při nájezdu zpět na původní posuvovou rychlost se upravuje posuvová rychlost na stávajících NC blocích v rádiusu. Podrobně je to vidět na následujícím obrázku (Obr. 54.).

Na grafu posuvové rychlosti (Obr. 53.) jak žádané, tak reálné si můžeme všimnout, že v druhé polovině nájezdu zpět na původní posuvovou rychlost už nejsou skoky jasně patrné a body se spojí do jedné křivky, vcelku strmého nárůstu posuvové rychlosti.



Obr. 54.: NC kód pro měření 10B – 12B (NC bloky rádiusu)

To, proč interpolátor obráběcího stroje spojí tyto NC bloky do jedné křivky nárůstu posuvové rychlosti je dáno tím, že od řádku 177 v NC kódu (Obr. 54.) jsou předepsané změny posuvové rychlosti příliš blízko sebe (vzdálenost zhruba 0,232 – 0,25 mm). Interpolátor už by nestihl skokovitě zrychlit a nedodržel by nastavené tolerance. Proto místo toho zrychluje až do té doby, než dosáhne poslední předepsané posuvové rychlosti.

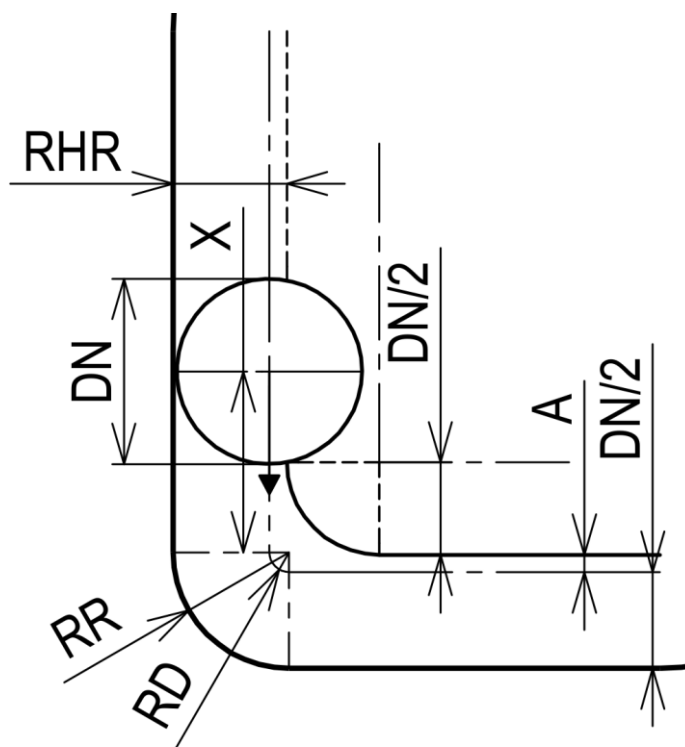
Z tohoto chování interpolátoru jde usuzovat, že postup vkládání více NC bloků před rádius nijak interpolátor neovlivní a snaží se dodržet nastavené posuvové rychlosti, pokud nejsou NC bloky příliš blízko sebe. Měnit posuvovou rychlost na NC blocích vzdálených 1 mm od sebe se jeví jako vhodné, protože jak jsme si na minulém grafu (Obr. 53.) ukázali, tak interpolátor nemá na této vzdálenosti problém měnit posuvovou rychlost. Zároveň při použití vzdálenosti 1 mm je posuvová rychlost dobře říditelná na několika NC blocích a nevzniká příliš velké množství NC bloků.

Zároveň v kapitole 5.3. Obrábění rohu kapsy jsme v tabulce (Tab. 10.) mohli vidět, že nárůst opásání před rádiusem je pozvolnější než jeho následné klesání. Proto nástup posuvové rychlosti po projetí vrcholu opásání musí být také strmější a nevedí nám ani částečné sloučení nárůstu posuvové rychlosti na stávajících NC blocích rádiusu.

6.4. Analýza vzdálenosti před rádiusem kapsy pro zahájení změny posuvové rychlosti

Při obrábění rohů kapsy dochází při nájezdu do rádiusu ke zvýšenému opásání nástroje. Se zvýšeným opásáním nástroje souvisí i zvýšení zatížení nástroje, jak jsme si v předchozích kapitolách ukázali. Největší nárůst vzhledem k opásání nástroje má posuvová síla. Další parametry se zvýší úměrně k úhlu opásání (kapitola 5.3.).

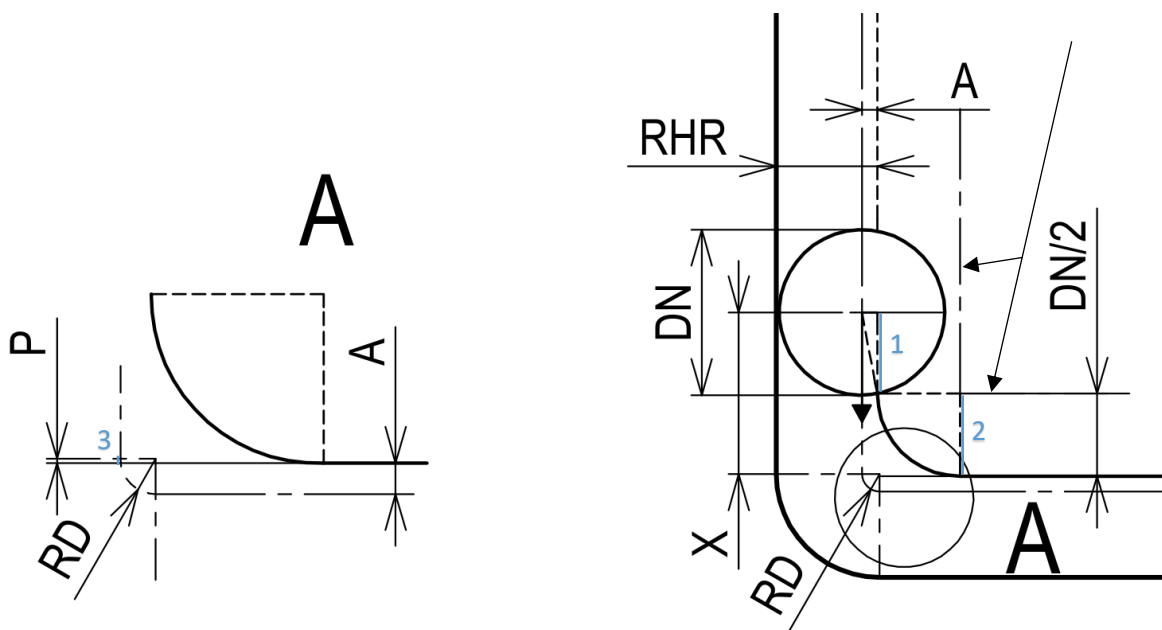
V této kapitole se budeme zabývat geometrickou analýzou toho, od kdy vlastně začne opásání narůstat. Pro lepší názornost stavu před nájezdem do rádiusu se můžeme podívat na následující náčrt rohu kapsy (Obr. 55.).



Obr. 55.: Náčrt rohu kapsy

Na vzdálenost (X) mezi středem nástroje a začátkem rádiusu (RD) programovaného v NC kódu má vliv: průměr nástroje (DN), radiální hloubka řezu (RHR), která je dána procentuálním vyjádřením zanoření nástroje a poloměr oblouku dráhy nástroje (RD).

Další faktor, který ovlivňuje vzdálenost (X) mezi středem nástroje a začátkem rádiusu (RD) je trajektorie předchozího průjezdu nástroje (označena čerchovanou čarou) a její následná kontura na obrobku. Tato kontura přímo ovlivní vzdálenost (X) mezi středem nástroje a začátkem rádiusu (RD) a je tedy nutné jí připočítat k dříve zmíněným parametrům.



Obr. 56.: Součet vzdáleností před rádiusem (detailní pohled)

Abychom určili výslednou vzdálenost (X) středu nástroje od začátku oblouku programovaného v NC kódu, musíme nejdříve určit vzdálenosti 1,2,3, které jsou naznačeny na obrázku výše (Obr. 56.).

V CAM softwaru se při volbě strategie obrábění definuje zatížení nástroje v řezu, tato hodnota je dána v procentech a určuje kolik procent průměru nástroje bude zanořeno v materiálu obrobku. Například při průměru nástroje 16 mm a při jeho zatížení v řezu na 60 %, je výsledná vzdálenost (RHR) rovna 9,6 mm. Radiální hloubka řezu (RHR) se tedy odvíjí od nastavené hodnoty uživatelem v CAM softwaru, následně jsou podle této hodnoty tvořeny dráhy NC kódu.

Výpočet vzdálenosti (A) od středu nástroje k hranici dříve obrobené vrstvy je dán rozdílem radiální hloubky řezu (RHR) a poloměrem nástroje (DN/2).

Vzdálenost 1 vypočteme podle upravené Pythagorovy věty, výpočet je uveden v následujícím vzorci (15).

$$\text{Vzdálenost 1} = \sqrt{\left(\frac{DN}{2}\right)^2 - A^2} \quad (15)$$

Vzdálenost 2 je v případě kolmého rohu rovna poloměru nástroje (DN/2).

Vzdálenost 3 (P) je kladná nebo záporná hodnota. Záleží na tom, jestli je poloměr dráhy nástroje (RD) menší nebo větší než vzdálenost A. Výsledná vzdálenost 3 (P) se vypočte podle rovnice (16) a potom se odečte anebo přičte k součtu vzdáleností 2 a 3.

$$\text{Vzdálenost 3} = A - RD \quad (16)$$

Výsledná vzdálenost X od středu nástroje do začátku oblouku programovaného v NC kódu je dána součtem všech tří dříve vypočítaných vzdáleností (1,2,3). Výsledný vztah je popsán rovnicí níže (17).

$$X = \text{Vzdálenost 1} + \text{Vzdálenost 2} + (\pm \text{Vzdálenost 3}) \quad (17)$$

6.5. Návrh strategie optimalizace posuvové rychlosti

Strategie optimalizace posuvové rychlosti vychází z vhodného rozmístění NC bloků před obráběný rádius. Jak jsme si v kapitole 4.2. a 6.4. ukázali, tak opásání nástroje začíná vzrůstat ještě před samotným začátkem rádiusu programovaného v NC kódu. Je tedy vhodné začít postupně snižovat posuvovou rychlost na úseku od začátku nárůstu opásání až do začátku rádiusu programovaného v NC kódu. Při projetí prvního NC bloku rádiusu v NC kódu opásání nástroje dosahuje maximální hodnoty a následně začíná klesat. V této části, kdy klesá opásání nástroje, je možné postupně navyšovat posuvovou rychlost na stávajících NC blocích rádiusu, aby se kompenzovalo klesající opásání nástroje.

Jak jsme mohli vidět v kapitole 4.2. Roh kapsy, tak posuvová síla během obrábění rohu se zvýší šestinásobně. Ostatní parametry se zvýší v podobné míře jako úhel opásání, takže dojde k navýšení zhruba o 35 – 45 %.

Při optimalizaci, snažící se snížit posuvovou sílu, narážíme na spodní limit posuvové rychlosti nástroje. Posuvová síla není totiž tolik citlivá na změnu posuvové rychlosti. Při testech optimalizace na rádiusu z kapitoly 4.2. bylo provedeno snížení posuvové rychlosti z 900 mm/min na 300 mm/min. Reakcí posuvové síly na tuto úpravu posuvové rychlosti bylo snížení zhruba na polovinu její maximální hodnoty. Posuvová síla se při snížení posuvu zhruba o 67 % snížila přibližně o 50 % oproti její maximální hodnotě. Takže i při takovémto snížení posuvové rychlosti byl její nárůst přibližně trojnásobný oproti výchozí hodnotě před najetím do rádiusu.

Lepších výsledků bylo dosaženo při optimalizaci pomocí ostatních parametrů jako je úběr materiálu za vteřinu a kroutící moment. Tato optimalizace má výhodu ve velmi podobném nárůstu jednotlivých parametrů vůči sobě. Takže při optimalizaci pomocí úběru materiálu za vteřinu dochází zároveň k velmi dobré optimalizaci kroutícího momentu. Zároveň tento druh optimalizace nenaráží na spodní hranici posuvové rychlosti nástroje. Při testech provedených v kapitole 6.3. Chování interpolátoru byla snížena posuvová rychlost z 900 mm/min na zhruba 640 mm/min. Toto snížení posuvové rychlosti postačovalo k redukci úběru materiálu za vteřinu na úroveň před najetím do rádiusu.

Pro závěrečný experiment představený v následující kapitole byla zvolena optimalizace pomocí úběru materiálu za vteřinu. Tato optimalizace lépe vyhovuje nástrojovým parametrům, konkrétně doporučenému rozmezí posuvové rychlosti. Navíc úběr materiálu za vteřinu neboli MRR je dobře citlivé na změnu posuvové rychlosti.

Konkrétně jsou optimalizační schémata založena na vypočtení vzdálenosti od kdy dojde k navyšování úhlu opásání představeného v minulé kapitole. Následně se výsledná vzdálenost zaokrouhlí na celé milimetry. Tato vzdálenost je následně rozdělena na NC bloky po 1 mm. Vzdálenost 1 mm se dobře osvědčila při měření chování interpolátoru z kapitoly 6.3., kde bylo vidět, že CNC stroji MCU 700 nedělalo problém dodržet nastavené posuvové rychlosti a zároveň rozestup NC bloků byl dostatečně jemný.

Pro závěrečný experiment byla použita optimalizace pomocí úběru materiálu za vteřinu. Posuvová rychlost na jednotlivých NC blocích se určovala pro tuto optimalizaci podle následujícího vztahu (18).

$$f_x = f_v * \frac{MRR_v}{MRR_x} \quad (18)$$

Kde: f_v – výchozí posuv nastavený v NC kódu

MRR_v – výchozí úběr materiálu (MRR) před najetím do rádiusu

f_x – hledaná posuvová rychlost na souřadnici přidaného NC bloku

MRR_x – úběr materiálu (MRR) na souřadnici přidaného NC bloku

K tomu, abychom mohli použít tento vzorec výpočtu, je třeba provést prvotní simulaci NC kódu v softwaru Millvis, který nám vykreslí hodnotu úběru materiálu za vteřinu. Zároveň je ve stavovém poli simulace zobrazena souřadnice X a Y polohy nástroje. To nám významně ulehčí hledání příslušné hodnoty úběru materiálu za vteřinu, náležitě souřadnici vloženého NC bloku.

Například pokud vložíme nový NC blok 1 mm před první NC blok rádiusu se souřadnicí X 20, hledáme optimalizovanou posuvovou rychlost (f_x) náležitě souřadnici X 21. Provedeme simulaci a zjistíme hodnotu úběru materiálu za vteřinu, která pro náš příklad bude rovna 2170 mm³/s. Výchozí posuvová rychlost je rovna 3000 mm/min a výchozí úběr materiálu za vteřinu na rovné dráze před rádiusem je roven 1340 mm³/s. Následně dosadíme do rovnice (18) a vypočteme hodnotu upravené posuvové rychlosti:

$$f_x = f_v * \frac{MRR_v}{MRR_x} = 3000 * \frac{1340}{2170} = 1852 \text{ mm/min} \Rightarrow 1850 \text{ mm/min}$$

Výsledný posuv nastavený na NC bloku X 21 by byl po zaokrouhlení 1850 mm/min. Takto se dají vypočítat posuvy na kterémkoli NC bloku. Nevýhoda této metody je, že k tomu, aby vzorec (18) fungoval, potřebujeme znát průběh úběru materiálu za vteřinu (MRR). Mezi výhody naopak patří nenáročnost výpočtu a vcelku univerzální použití napříč NC kódem.

Simulace úběru materiálu za vteřinu je v softwaru Millvis vcelku rychlá a zároveň tím verifikujeme NC kód, že neobsahuje chyby či chybně generované dráhy nástroje anebo špatně nastavené parametry. Takto ověřený NC kód je daleko bezpečnější na stroji spustit.

7. Analýza a zhodnocení výsledků

V této kapitole si představíme a zhodnotíme provedený experiment na příkladu mírně upravené kapsy. Tento experiment by měl analyzovat výsledky optimalizace NC kódu puštěného na stroji. Jako první krok byla provedena simulace úběru materiálu za vteřinu, potřebná pro optimalizaci posuvové rychlosti. Následně bylo provedeno obrábění duralového polotovaru se záznamem vibrací nástroje při obrábění rohů. Nakonec byl vyhodnocen experiment včetně detailních fotografií obrobeného povrchu a jeho struktury.

7.1. Představení experimentu

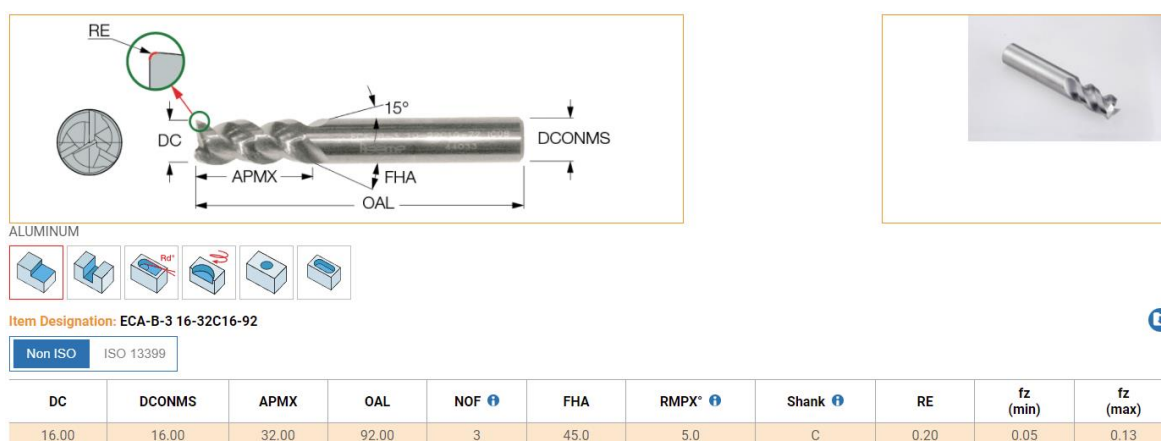
Tento experiment má za úkol měřit vibrace na nástroji během obrábění výchozího a optimalizovaného NC kódu. Předpoklad je takový, že při snížení posuvové rychlosti během nárůstu opásání při obrábění radiusů, dojde ke zmírnění vibrací nástroje.

Experiment bude probíhat na CNC stroji MCU 700, při těchto řezných podmínkách (Tab. 14.).

Tab. 14.: Řezné podmínky experimentu:

Otáčky nástroje (n)	10000 ot/min
Výchozí posuvová rychlost (f)	3000 mm/min
Axiální hloubka řezu (ap)	3,815 mm

Použitý nástroj byl Iscar ECA-B-3 16-32C16-92, viz obrázek níže (Obr. 57.). Jedná se o tříbřitou frézu o průměru 16 mm. Rozsah posuvové rychlosti při výše zmíněných otáčkách je od 1500 mm/min do 3900 mm/min.

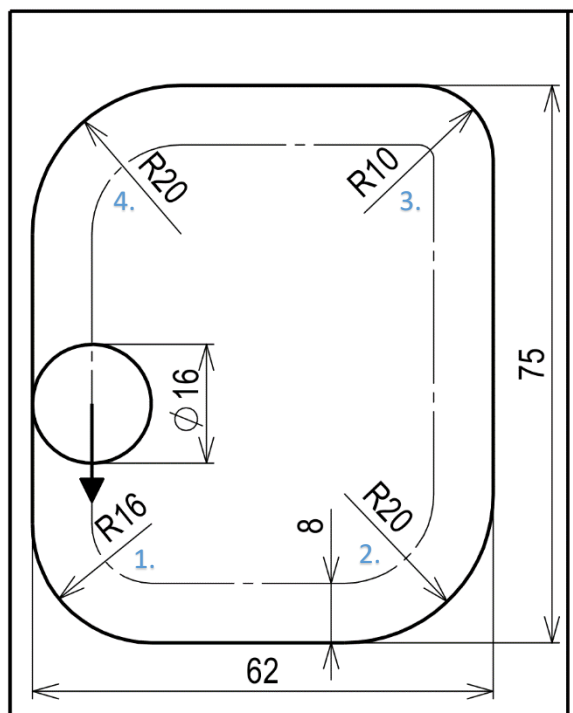


Obr. 57.: Nástroj pro obrábění kapsy experimentu [37]

V následující kapitole bude představen náčrt obrobku kapsy, která má oproti té dříve představené mírně odlišné rozměry. Dále bude provedena prvotní simulace obrábění v softwaru Millvis využívající právě zmíněné řezné podmínky (Tab. 14.).

7.2. Upravený model kapsy a prvotní simulace zatížení kapsy

Pro potřeby tohoto experimentu byl upraven model kapsy, který je vidět na obrázku níže (Obr. 58.). Model kapsy vychází z předchozího modelu, byl trochu rozšířen po stranách. Rádiusy byly upraveny tak, aby byly více různorodé a lépe reflektovaly reálné obrábění obrobku.



Obr. 58.: Náčrt upravené kapsy

Počet vložených NC bloků je na každém rádiusu individuální. Podle geometrické analýzy zmíněné v kapitole 6.4. bylo určeno místo odkud začne narůstat opásání. Tato hodnota byla následně zaokrouhlena směrem dolů na celá čísla. Od tohoto místa budou vkládány NC bloky ve vzdálenosti 1 mm až do místa začátku rádiusu v NC kódu.

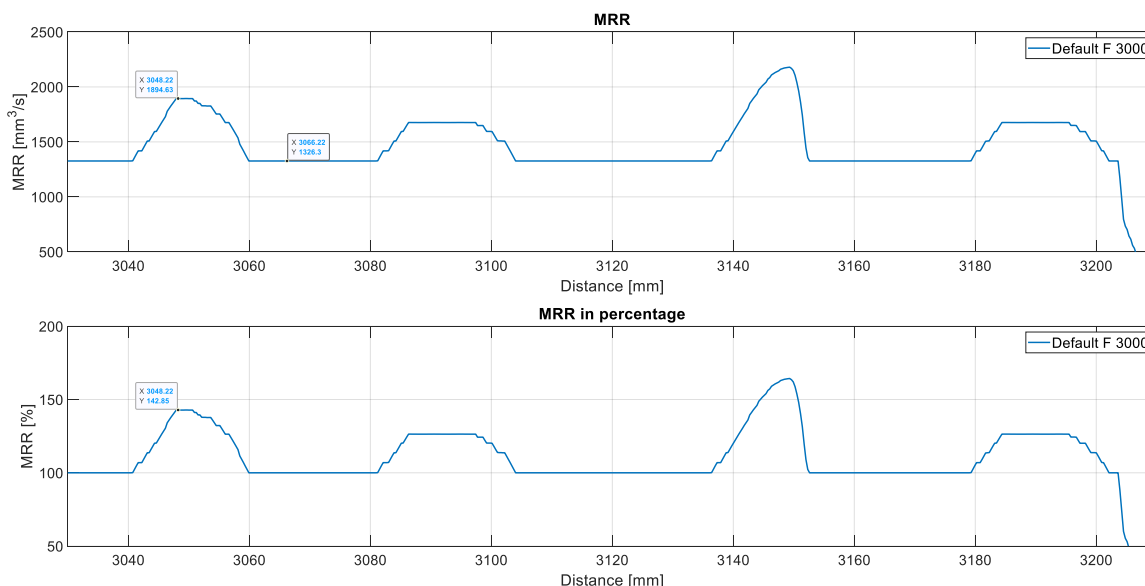
Přehled určených vzdáleností nárůstu opásání pomocí geometrické analýzy a zvolených vzdáleností prvního NC bloku je zobrazen v tabulce níže (Tab. 15.).

Tab. 15.: Přehled vzdáleností NC bloků před rádiusem:

Č. rádiusu	Určená vzdálenost nárůstu opásání	Vzdálenost prvního NC bloku
1.	6,82	6
2.	4,29	4
3.	12,67	12
4.	4,29	4

Při znalosti polohy jednotlivých NC bloků a výchozích řezných podmínek můžeme vykreslit graf úběru materiálu za vteřinu na jednotlivých rádiusech kapsy.

Níže uvedený graf (Obr. 59.) úběru materiálu za vteřinu zobrazuje všechny čtyři rádiusy. Pomocí tohoto grafu můžeme vypočítat optimalizovanou posuvovou rychlost podle vzorce (18) z kapitoly 6.5.



Obr. 59.: Přehled úběru materiálu za vteřinu pro čtyři rádiusy kapsy

Z grafu (Obr. 59.) je vidět, že nejvyšší zatížení nástroje nastává na třetím rádiusu. Je to rádius s nejnižším poloměrem dráhy nástroje. Obecně lze u pravouhlých rádiusů tvrdit, že čím nižší rádius dráhy nástroje, tím vyšší je opásání nástroje.

Na příkladu maximální hodnoty opásání prvního rádiusu si ukážeme výpočet optimalizované posuvové rychlosti pro tuto souřadnici. Po dosazení do rovnice (19) dostáváme výslednou posuvovou rychlost 2100 mm/min. Můžeme si vybrat, jestli chceme při výpočtu v rovnici (19) využít výchozí hodnoty úběru materiálu za vteřinu (mm³/s) anebo procentuální vyjádření.

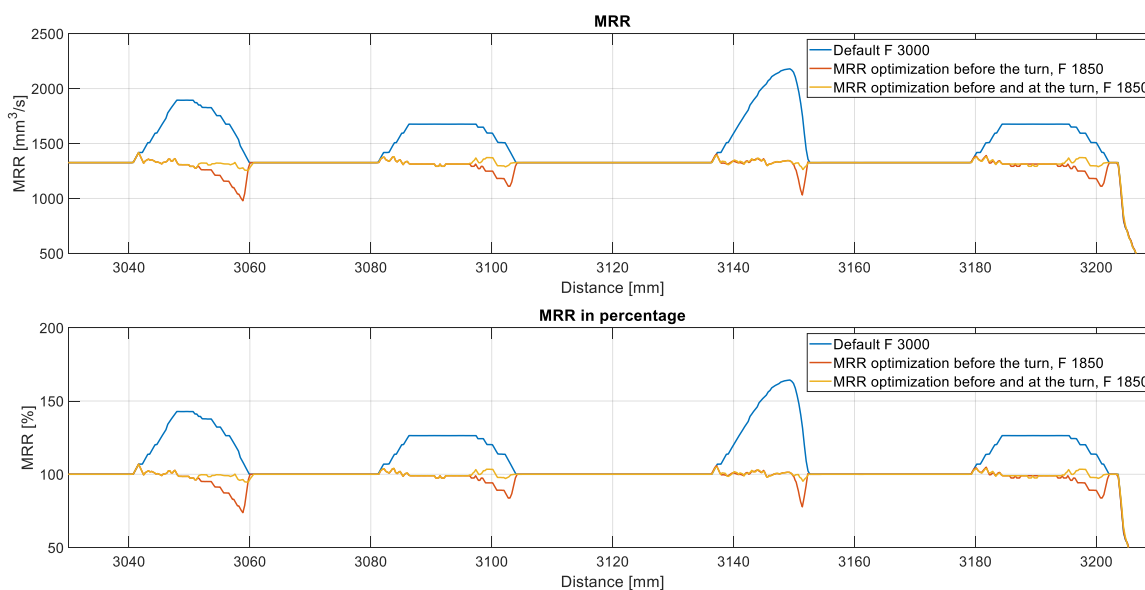
$$f_x = f_v * \frac{MRR_v}{MRR_{3048}} = 3000 * \frac{1326}{1895}, \text{ nebo } \frac{3000}{1,4285} = 2100 \text{ mm/min} \quad (19)$$

Stejným způsobem, jako jsme spočítali optimalizovanou posuvovou rychlost pro maximální hodnotu opásání prvního rádiusu, spočítáme i zbývající posuvové rychlosti příslušící k dalším vloženým NC blokům.

7.3. Simulace zatížení upraveného NC kódu

Po vytvoření optimalizovaných NC kódů byla provedena verifikace v softwaru Millvis. Zároveň byla provedena simulace úběru materiálu za vteřinu, aby se ověřila správnost vypočítaných posuvových rychlostí.

Na grafu níže (Obr. 60.) vidíme průběh úběru materiálu za vteřinu pro optimalizované NC kódy v porovnání s výchozím NC kódem.



Obr. 60.: Simulace optimalizovaných a výchozích NC kódů

Na grafu výše (Obr. 60.) vidíme průběh úběru materiálu za vteřinu pro:

- Výchozí NC kód (Default F 3000)
- NC kód, který optimalizoval posuvovou rychlost před nájezdem do rádiusu (MRR optimization before the turn, F 1850)
- NC kód, který optimalizoval posuvovou rychlost před nájezdem do rádiusu i v rádiusu (MRR optimization before and at the turn, F 1850)

Výsledné simulace úběru materiálu za vteřinu vypadají na první pohled správně. Rozptyl jednotlivých hodnot MRR na NC blocích je $\pm 5\%$ oproti výchozí hodnotě. Výjimkou je pouze úsek obrábění rádiusu, kdy NC kód bez optimalizace v rádiusu vykazuje krátkodobý pokles MRR. Je to způsobené klesajícím opásáním během obrábění rádiusu a nevzrůstající posuvovou rychlostí.

Z časových důvodů měření byl na stroji MCU 700 testován pouze výchozí NC kód a NC kód s optimalizací před rádiusem i v rádiusu. Výsledná část optimalizovaného NC kódu pro první rádius je uvedena na obrázku níže (Obr. 61.).

```
- L Y32.  
- L Y31. F2790.  
- L Y30. F2680.  
- L Y29. F2500.  
- L Y28. F2350.  
- L Y27. F2260.  
121 L Y26. F2170.  
122 L X-66.6629 Y25.2453 F2100.  
123 L X-66.552 Y24.4978  
124 L X-66.3684 Y23.7648  
125 L X-66.1139 Y23.0533  
126 L X-65.7908 Y22.3702  
127 L X-65.4023 Y21.7221 F2170.  
128 L X-64.9522 Y21.1152  
129 L X-64.4447 Y20.5553  
130 L X-63.8848 Y20.0478 F2260.  
131 L X-63.2779 Y19.5977  
132 L X-62.6298 Y19.2092 F2350.  
133 L X-61.9467 Y18.8861  
134 L X-61.2352 Y18.6316 F2500.  
135 L X-60.5022 Y18.448  
136 L X-59.7547 Y18.3371 F2680.  
137 L X-59. Y18.3 F2850.  
L X-58. F3000.
```

Obr. 61.: Část NC kódu pro první rádius

Červenou pomlčkou jsou označeny vložené NC bloky s upravenou posuvovou rychlostí s postupným snížením, která je podtržena modrou čarou. Červeným podtržením je naznačena upravená posuvová rychlost s postupným zvýšením na stávajících NC blocích rádiusu.

Je zde důležité zmínit, že při odbavení NC kódu interpolátorem dochází k načítání posuvové rychlosti z následujícího řádku v NC kódu. Takže například řádku 121 náleží posuvová rychlost F2100. Tento proces načítání posuvové rychlosti z následujícího řádku probíhá v celém NC kódu. Proto je důležité na první vložený NC blok (řádek) nepředepisovat žádnou posuvovou rychlost. Posuvová rychlost použitá na prvním vloženém NC bloku (řádku) je uvedena v následujícím NC bloku (řádku), tedy F2790.

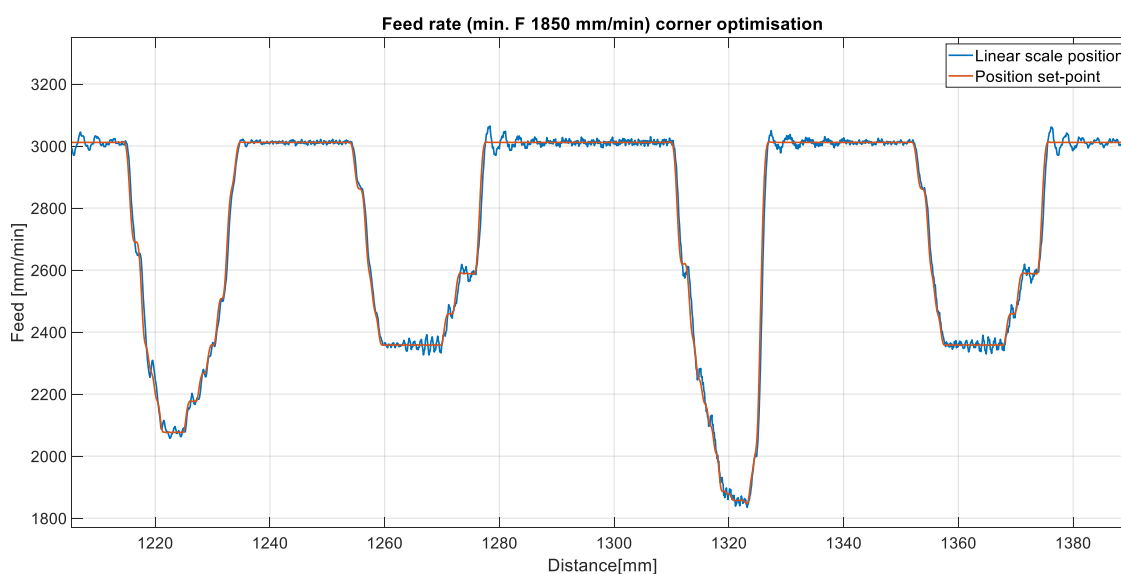
Tento jev přebírání posuvové rychlosti byl zaznamenán při experimentu s různými variantami vložených NC bloků z kapitoly 6.1. Při tomto měření byl už tento jev známý a mohla být správně posuvová rychlost zapsaná do NC kódu. Díky tomu je úprava posuvové rychlosti provedena ve správný okamžik.

7.4. Vyhodnocení měření vibrací a chování interpolátoru

Při měření na CNC stroji MCU 700 byly zaznamenávány tyto parametry:

- žádané polohy X, Y
- žádané rychlosti X, Y
- skutečné polohy X, Y
- skutečné rychlosti X, Y
- vibrace v osách X, Y, Z

Na obrázku níže (Obr. 62.) můžeme vidět vykreslení žádané a skutečné posuvové rychlosti v závislosti na její poloze.

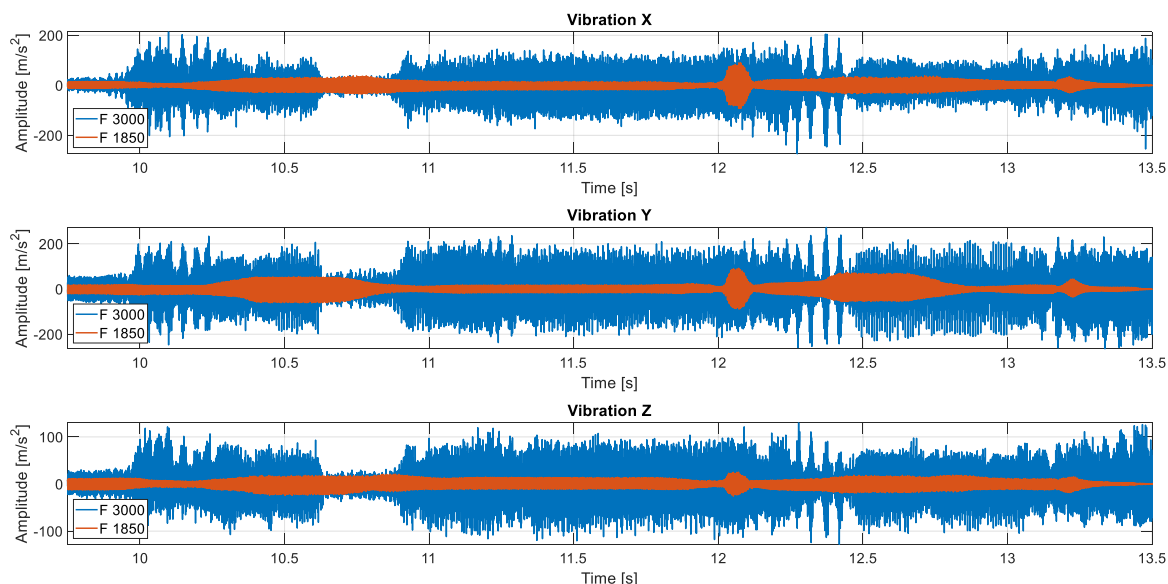


Obr. 62.: Vykreslení žádané a skutečné posuvové rychlosti experimentu

Na grafu výše (Obr. 62.) nejsou na křivce žádané posuvové rychlosti (Position set-point) a skutečné posuvové rychlosti (Linear scale position) příliš patrné skoky změny posuvové rychlosti. Je to zapříčiněno pravděpodobně tím, že snížení posuvu je příliš vysoké na NC bloky rozmístěné 1 mm daleko od sebe. Dochází tedy při průchodu NC kódu interpolátorem k částečnému prokládání křivky posuvové rychlosti.

V tomto experimentu není prokládání křivky posuvové rychlosti nijak omezující. Cílem experimentu je dokázat snížení vibrací při obrábění rohu s optimalizací (snížením) posuvové rychlosti. Případná plynulejší změna posuvové rychlosti je vzhledem k vibracím nástroje spíše prospěšná.

Na následujícím obrázku (Obr. 63.) časového průběhu záznamu vibrací v osách X, Y, Z, můžeme vidět obrábění čtyř rádiusů kapsy. Časový úsek, který odpovídá obrábění optimalizovanou posuvovou rychlostí je zobrazen na grafu níže v čase od 9,75 s do 13,5 s.



Obr. 63.: Vibrace v osách X, Y, Z

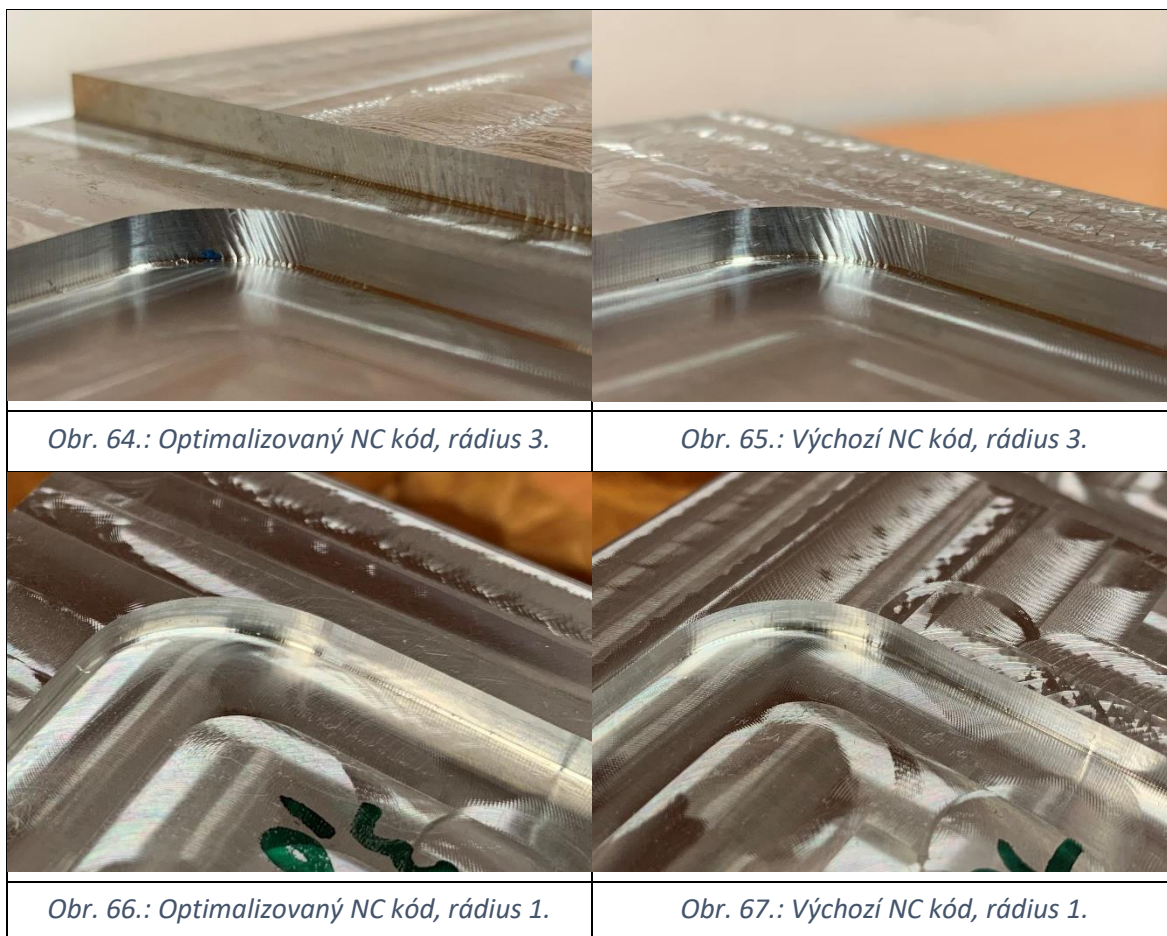
Na grafu (Obr. 63.) je patrné snížení amplitudy vibrací při obrábění optimalizovaným posuvem (F 1850). Bohužel není jasně zřetelné kde který rádius začíná a kde končí. Nicméně zjištění, že došlo k poklesu amplitudy je pozitivní výsledek experimentu.

7.5. Zhodnocení výsledků experimentu optimalizovaného NC kódu a kvality obrobeného povrchu

V této kapitole byl představen experiment zaměřený na měření vibrací během obrábění rohu kapsy, měřily se NC kódy s optimalizovanou a neoptimalizovanou posuvovou rychlostí. Z výsledků měření bylo zjištěno, že některé vložené NC bloky byly příliš blízko sebe a docházelo k částečnému proložení křivky posuvové rychlosti. Naopak měření vibrací nástroje přineslo pozitivní výsledky.

Aby byl experiment kompletní je třeba ještě zhodnotit kvalitu obrobeného povrchu. V následující tabulce (Tab. 16.) jsou uvedeny obrázky obrobeného povrchu kapsy.

Tab. 16.: Přehled obrobeného povrchu kapsy



Jak je na obrázcích výše vidět, kvalita povrchu optimalizovaného a výchozího NC kódu je podobná. Pokud se zaměříme na detaily jednotlivých rádiusů (Obr. 64. a Obr. 65., Obr. 66. a Obr. 67.) tak i na obrázcích můžeme vidět velice drobné rozdíly na stěnách kapsy.

Na stěnách kapsy optimalizovaného NC kódu jsou občas patrnější otisky nástroje. Způsobují to pravděpodobně změny posuvové rychlosti, které stroj vnímá jako příkaz k prudkému snížení na požadovanou posuvovou rychlost. Je možné, že tyto skoky zanechávají na hranách obrobku viditelné stopy. Také je možné, že při zvyšování posuvové rychlosti na stávajících NC blocích rádiusu, dochází k větším otiskům břitů nástroje do obrobku. Skok posuvové rychlosti při interpolaci dvou os může mít rovněž vliv na kvalitu obrobené plochy rohu kapsy.

Pokud se podíváme na všechny obráběné rohy společně, najdeme v kvalitě obrobeného povrchu jen nepatrné rozdíly. Což je rovněž pozitivní zjištění.

Ve výsledku tedy záleží na tom, na co je obrobek určený a jestli optimalizované dráhy nástroje jsou jako operace hrubovací, před–dokončovací nebo dokončovací. Optimalizace posuvové rychlosti cílí na operace hrubovací anebo před–dokončovací. U těchto operací nehraje kvalita povrchu roli. Jedná-li se o operaci dokončovací, není zde optimalizace posuvové rychlosti vhodná z důvodu požadavku na zachování konstantních řezných podmínek během obrábění pro co nejlepší kvalitu obrobeného povrchu.

8. Závěr

Tato práce nejprve představila virtuální modelování strojů a obrábění. Pozornost byla zaměřena hlavně na simulaci řezného procesu, kde bylo představeno modelování a simulace řezných sil. Podrobněji byl popsán mechanistický model řezných sil, který byl později používán v této práci.

Pro softwary zabývající se simulací řezného procesu je důležité představení metod objemové reprezentace těles, kterou využívá i software Millvis. Tento software byl používán k simulacím a verifikacím řezného procesu zvolených vzorových dílců. Podrobněji byly představeny i komerční softwary zaměřující se na optimalizaci NC kódu, strategie obrábění, způsoby generování drah a publikace, zabývající se optimalizací posuvové rychlosti pro frézování volných tvarů. Všechny tyto znalosti byly přínosné pro následující tvorbu vlastní práce.

Při tvorbě práce byly navrženy dvě vzorové operace (vzorové příklady): drážka s proměnlivým přídávkem a roh kapsy.

Na příkladu jednoduché drážky a drážky s proměnlivým přídávkem jsme si představili silové zatížení, které vzniká při obrábění. K výpočtu sil byl použit mechanistický model řezných sil, který byl aplikován na jednoduchou drážku. Po verifikaci modelu na jednoduché drážce mohl být aplikován na drážku s proměnlivým přídávkem. Na této drážce bylo vidět, že zvýšený přídavek materiálu a posuvová rychlost mají velký vliv na silové zatížení nástroje během obrábění. Bylo zjištěno, že silové zatížení v ose X a úběr materiálu za vteřinu vykazovaly vyšší nárůst při změně posuvové rychlosti, oproti ostatním parametrům.

Na příkladu kapsy jsme si představili průběh zatížení nástroje během obrábění rohů. Tento příklad vychází z reálných operací obrábění, kdy při frézování rádiusu vzroste opásání nástroje. Tento nárůst opásání rovněž zapříčiní nárůst zatížení nástroje. Při obrábění vzorového rohu kapsy jsme došli k závěru, že opásání vzrostlo zhruba o 50 % oproti běžné hodnotě. Tento nárůst následoval stejně i kroutící moment a úběr materiálu za vteřinu. Síla ve směru posuvu reagovala daleko více a zvýšila se zhruba na šestnásobek běžné hodnoty.

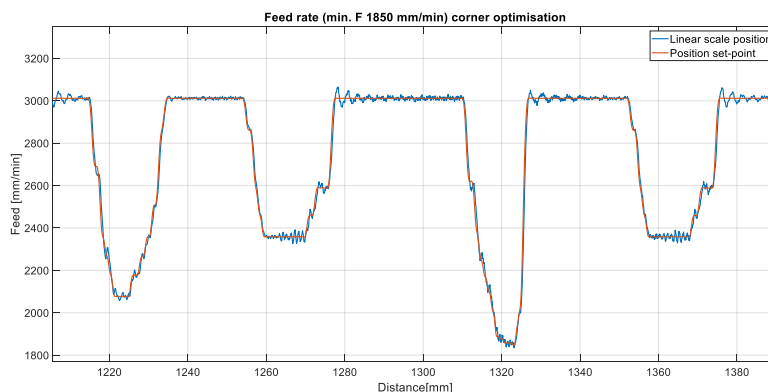
Byla také představena geometrická analýza vzdálenosti určující bod, od kdy začne opásání narůstat. Díky této analýze bylo možné určit souřadnici, která byla ve formě NC bloku vložena do NC kódu. Od tohoto NC bloku se přidávaly další NC bloky do NC kódu v určité vzdálenosti až do prvního NC bloku rádiusu. Počet přidávaných NC bloků pro rádiusy, zmíněné v této práci, se pohyboval v rozmezí od čtyř do dvanácti nově přidávaných NC bloků při vzdálenosti 1 mm mezi jednotlivými NC bloky. Množství nově přidávaných NC bloků bylo závislé na poloměru dráhy nástroje, kterou při obrábění rádiusu nástroj sleduje.

Při testech citlivosti posuvové síly na změnu posuvové rychlosti se ukázalo, že změna není tak velká, jak se očekávalo. Výsledkem bylo zjištění, že abychom zrovnoměrnili průběh posuvové síly, musela by být posuvová rychlost snížena hluboko pod hranici minimálního posuvu na zub, doporučeného výrobcem nástroje. Nevýhody pro obráběcí proces při takto nízké posuvové rychlosti jsou značné.

Pro finální experiment byla nakonec představena optimalizace na základě úběru materiálu za vteřinu. Optimalizace podle úběru materiálu za vteřinu dosahovala daleko lepších výsledků při změně posuvové rychlosti.

Finální experiment se zaměřoval na test vibrační nástroje při obrábění původním NC kódem a optimalizovaným NC kódem se sníženou posuvovou rychlostí při obrábění rádiusu. Tento experiment byl proveden při obrábění kapsy z duralu s mírně upravenými rozměry a rádiusy. Výsledkem experimentu bylo, že vibrace se opravdu snížily, nicméně není jisté, jestli je snížení posuvové rychlosti jediným parametrem, který měl na snížení vibrační vliv. Pro ověření a verifikaci experimentu s vibracemi by bylo vhodné provést více testů obrábění kapsy na různých místech polotovaru, aby se vliv optimalizace posuvové rychlosti potvrdil.

Při provádění experimentů v této práci bylo zjištěno, že změna posuvové rychlosti zapsaná do NC bloku je strojem vnímána jako požadavek na její prudké snížení, což se nepředpokládalo. Původní představa byla, že funkce look ahead proloží více NC bloků s upravenou posuvovou rychlostí postupným snížením. Místo toho se ale interpolátor stroje zachová tak, že pokud může, tak skokovitě sníží nebo zvýší posuvovou rychlost podle požadavku v NC kódu. Interpolátor stroje prokládá křivku posuvové rychlosti pouze v případě, že se blížíme limitu zrychlení nebo zpomalení posuvové rychlosti na dané vzdálenosti. Což bylo vidět na grafu (Obr. 68.) při závěrečném experimentu na některých úsecích dráhy.



Obr. 68.: Vykreslení žádané a skutečné posuvové rychlosti experimentu

Při zkoumání obrobeného povrchu kapsy přinesl experiment podobnou kvalitu povrchu jak při obrábění výchozím NC kódem, tak při obrábění optimalizovaným NC kódem. Při detailním pohledu najdeme na hranách rádiusu kapsy mírně vyšší otisky nástroje, což je pravděpodobně způsobeno právě zmíněnými skoky posuvové rychlosti.

Budoucí práce na toto téma by se mohly zaměřit na výzkum funkce look ahead při interpolaci skoků programované rychlosti či na dopad skoků posuvové rychlosti na živostnost nástroje. Nebo zohlednit další kritéria optimalizace posuvové rychlosti, jako například kritérium eliminace buzení nástroje nevhodným spektrem frekvencí od řezných sil v oblastech zvýšeného opásání nástroje (obrábění rádiusů atd.).

Použitá literatura

MAREK, Jiří. *Konstrukce CNC obráběcích strojů IV.0. Praha: MM publishing, 2018. MM speciál. ISBN 978-80-906310-8-3*

ALTINTAS, Yusuf. *Manufacturing automation: metal cutting mechanics, machine tool vibrations, and CNC design. 2nd ed. New York: Cambridge University Press, 2012. ISBN 978-0-521-17247-9.*

ALTINTAS, Y., et al. *Virtual process systems for part machining operations. CIRP Annals - Manufacturing Technology. 2014, (63), 585-605.*

ERKORKMAZ, K., LAYEGH, S. E., LAZOGLU, I., & ERDIM, H. *Feedrate optimization for freeform milling considering constraints from the feed drive system and process mechanics. CIRP Annals. 2013, (62), 395-398.*

- [1] *Obrábění* [online]. In: . [cit. 2021-07-21]. Dostupné z: <http://physics.ujep.cz/~mkormund/P232/Obr%C3%A1b%C4%9Bn%C3%AD.pdf>
- [2] *Výpočtové vztahy a definice pro frézování* [online]. [cit. 2021-07-21]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/machining-formulas-definitions/pages/milling.aspx>
- [3] *Strategie frézování naklopeným nástrojem* [online]. [cit. 2021-07-21]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/strategie-frezovani-naklopenym-nastrojem.html>
- [4] *Virtuální modelování strojů. ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE | FAKULTA STROJNÍ: Ústav výrobních strojů a zařízení | Ú12135, 2018.*
- [5] *SIMULACE CNC OBRÁBĚNÍ. MM Průmyslové spektrum* [online]. 2011, **2011**(78), 46-49 [cit. 2021-07-21]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/110732>
- [6] *Virtuální modelování strojů a obrábění. ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE | FAKULTA STROJNÍ: Ústav výrobních strojů a zařízení | Ú12135, 2019.*
- [7] *Modelování řezných sil. 2017. ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE | FAKULTA STROJNÍ: Ústav výrobních strojů a zařízení | Ú12135, 2017.*
- [8] *Zatížení obráběcího stroje řeznými silami. ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE | FAKULTA STROJNÍ: Ústav výrobních strojů a zařízení | Ú12135.*
- [9] *Výzkum a modelování řezných sil. 2018. ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE | FAKULTA STROJNÍ: Ústav výrobních strojů a zařízení | Ú12135, 2018.*
- [10] *Virtual process systems for part machining operations. CIRP Annals - Manufacturing Technology. 2014, 2014(63), 586-589.*
- [11] *Softwarový modul pro možnost rychlé vizualizace virtuálně obrobeného povrchu: DV#1(2012-1). V-12-079. ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE | FAKULTA STROJNÍ: Ústav výrobních strojů a zařízení | Ú12135, 2012.*

- [12] WP01 - Software - ČVUT: Softwarový systém pro virtuální obrábění. : V-19-073 [online]. ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE | FAKULTA STROJNÍ: Ústav výrobních strojů a zařízení | Ú12135 [cit. 2021-12-18].
- [13] DV#1(2012-1) Softwarový modul pro možnost rychlé vizualizace virtuálně obroběného povrchu. : V-12-079 [online]. ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE | FAKULTA STROJNÍ: Ústav výrobních strojů a zařízení | Ú12135 [cit. 2021-12-18].
- [14] *Optimalizace postupu hrubování při frézování tělesa převodovky* [online]. Praha, 2019 [cit. 2021-09-22]. Dostupné z: https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/84896/F2-BP-2019-Hornych-Ondrej-Bakalarska%20prace_Optimalizace%20postupu%20hrubovani%20telesu%20převodovky.pdf?sequence=-1&isAllowed=y. Bakalářská práce. ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE | FAKULTA STROJNÍ. Vedoucí práce Tomíček Jan.
- [15] *3D HSM vysokorychlostní frézování. In: Solidcam.com* [online]. [cit. 2021-07-21]. Dostupné z: <https://www.solidcam.com/cs/produkty/0/3d-hsmvysokorychlostni-frezovani/>
- [16] *Frézování v praxi. 1C Pro* [online]. , 4-17 [cit. 2021-07-21]. Dostupné z: https://web.rcmt.cvut.cz/users/cerny/NCR_dopl/Frezovani_v_praxi.pdf
- [17] *Vysokoposuvové frézování ocelí* [online]. Ostrava, 2014 [cit. 2021-07-21]. Dostupné z: https://dspace.vsb.cz/bitstream/handle/10084/105097/GAZ0019_FS_B2341_2303R002_2014.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Bakalářská práce. VŠB – Technická univerzita Ostrava.
- [18] *Co je to tvarové frézování?* [online]. [cit. 2021-07-21]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/milling/pages/profile-milling.aspx>
- [19] *InventorHSM Pro* [online]. [cit. 2021-07-21]. Dostupné z: <https://www.solidcam.com/cs/produkty/0/souvisle-5-ose-frezovani/>
- [20] *Frézovací cykly: HRUBOVÁNÍ* [online]. [cit. 2021-07-21]. Dostupné z: <http://www.camservis.cz/frezovani/>
- [21] *Production module* [online]. [cit. 2021-07-21]. Dostupné z: Dostupné z: <https://www.inventor3dblog.cz/inventorhsm-pro/>
- [22] *ZLEPŠENÍ DYNAMIKY CNC OS S KULIČKOVÝMI ŠROUBY* [online]. Brno, 2011 [cit. 2021-09-22]. Dostupné z: https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=41065. Bakalářská práce. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ.
- [23] *Servomechanismy ve výrobních strojích*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2004. ISBN 80-0102902-6.
- [24] *VERICUT. AXIOM TECH* [online]. [cit. 2021-07-21]. Dostupné z: <https://www.axiomtech.cz/24753-vericut>
- [25] *VERICUT Modul OPTIPath. AXIOM TECH* [online]. [cit. 2021-07-21]. Dostupné z: <https://www.axiomtech.cz/24888-optimalizace-optipath>

- [26] *OPTIPath. CGTech* [online]. [cit. 2021-07-21]. Dostupné z: <https://www.cgtech.com/products/product-line/100-optipath.html>
- [27] *Tighter Integration Between OptiPath & Force* [online]. 2018 [cit. 2021-08-12]. Dostupné z: https://www.youtube.com/watch?v=aDQxGzq0Eel&ab_channel=CGTechVERICUT
- [28] *VERICUT CNC Simulation - An Introduction* [online]. 2020 [cit. 2021-08-12]. Dostupné z: <https://youtu.be/ZmutpdMW8iQ>
- [29] *Smartpack. ICAM* [online]. [cit. 2021-07-21]. Dostupné z: <https://icam.com/tool-path-optimization-software/>
- [30] *NCCBrain* [online]. [cit. 2021-07-21]. Dostupné z: <https://www.ncbrain.cz/>
- [31] *Production module* [online]. [cit. 2021-07-21]. Dostupné z: <https://www.thirdwavesys.com/production-module/>
- [32] Feedrate optimization for freeform milling considering constraints from the feed drive system and process mechanics. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* [online]. 2013, **2013**(62), 395-398 [cit. 2021-07-22].
- [33] *MANUFACTURING AUTOMATION: METAL CUTTING MECHANICS, MACHINE TOOL VIBRATIONS, AND CNC DESIGN. Second Edition. New York, NY 10013-2473, USA: CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS, 2012. ISBN 978-1-107-00148-0.*
- [34] *Hodnocení řezných sil po aplikaci vysokorychlostního frézování* [online]. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2018 [cit. 2021-12-22]. Dostupné z: https://dspace.vsb.cz/bitstream/handle/10084/129507/KAS0129_FS_N2301_2303T002_2018.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Diplomová práce.
- [35] ISCAR. *ISCAR catalogue* [online]. [cit. 2021-12-13]. Dostupné z: <https://www.iscar.com/eCatalog/item.aspx?cat=5623020&fnum=3183&mapp=ML&app=59&GFSTYP=M&isoD=1>
- [36] *Mas Kovosvit* [online]. [cit. 2021-12-19]. Dostupné z: <https://www.kovosvit.cz/mcu-700vt-5x-next-generation-p39.html>
- [37] ISCAR ECA. *ISCAR catalogue* [online]. [cit. 2021-12-30]. Dostupné z: <https://www.iscar.com/eCatalog/item.aspx?cat=5621810&fnum=1844&mapp=ML&app=59&GFSTYP=M&isoD=1>

Seznam obrázků

Obr. 1.: Posuv na zub [2]	3
Obr. 2.: Kulová fréza [3]	3
Obr. 3.: Naklopená kulová fréza [3]	3
Obr. 4.: Schéma obráběcího procesu [4]	5
Obr. 5.: Schéma virtuálního modelu stroje [6]	5
Obr. 6.: Silové zatížení nástroje při frézování [7]	6
Obr. 7.: Úhly na nástroji [9]	8
Obr. 8.: Hrana břitu [9]	8
Obr. 9.: Piezoelektrické dynamometry [7]	9
Obr. 10.: Objemová reprezentace těles (nástroj – obrobek) [10]	11
Obr. 11.: Booleovská operace – základní tvary – sjednocení – rozdíl – průnik [10]	11
Obr. 12.: Drátová reprezentace těles [10]	12
Obr. 13.: Příklad úběru materiálu – model reprezentován sítí voxelů [10]	12
Obr. 14.: Rozdělení mřížky na bloky [13]	13
Obr. 15.: Lineární generování drah [15]	15
Obr. 16.: Konturové hrubování [15]	15
Obr. 17.: Adaptivní generování dráhy [16]	16
Obr. 18.: Standardní generování dráhy [16]	16
Obr. 19.: Frézování špičkou nástroje [3]	17
Obr. 20.: Obrábění bokem [21]	18
Obr. 21.: Přímý a nepřímý pohon [22]	19
Obr. 22.: Moduly systému Vericut [24]	20
Obr. 23.: Úprava rychlosti v segmentech [24]	21
Obr. 24.: Přehled optimalizací [27]	22
Obr. 25.: Přehled možností grafického vykreslení [28]	22
Obr. 26.: ICAM SmartFEED [29]	24
Obr. 27.: NCBrain Druhy optimalizace [30]	24
Obr. 28.: Production module [31]	25
Obr. 29.: 2D a 3D záběrové zóny [32]	26
Obr. 30.: Řezné síly [32]	27
Obr. 31.: Porovnání naměřených a simulovaných sil [32]	27
Obr. 32.: Optimalizovaná posuvová rychlost pro každý CL bod [32]	28
Obr. 33.: Optimalizační schéma [32]	28
Obr. 34.: Rozměry drážky s nekonstantním přírůstkem materiálu	30
Obr. 35.: Obrábění drážky s nekonstantním přírůstkem materiálu	30

Obr. 36.: Rozměry kapsy	31
Obr. 37.: Hrana břitu [9]	32
Obr. 37.: Působení jednotlivých složek sil na břity nástroje [33]	33
Obr. 38.: Vývoj tloušťky třísky v průběhu natočení nástroje [33]	34
Obr. 39.: Obrábění základní drážky se 100 % zatížením nástroje v řezu	35
Obr. 40.: Porovnání simulace v Millvisu a Matlab výpočtu, 100 % zatížení nástroje v řezu ...	35
Obr. 41.: Výpočet úhlu záběru frézy φ [34]	36
Obr. 42.: Obrábění základní drážky s 50 % zatížením nástroje v řezu	37
Obr. 43.: Porovnání simulace v Millvisu a Matlab výpočtu, 50 % zatížení nástroje v řezu ...	38
Obr. 44.: Rozměry drážky s proměnlivým přírůstkem (kóta od počátku)	39
Obr. 45.: Průběh sil na úseku drážky od 150 mm do 150.12 mm	40
Obr. 46.: Vykreslení všech parametrů na celé délce drážky	41
Obr. 47.: Procentuální vyjádření všech parametrů na celé délce drážky	41
Obr. 48.: Nástroj pro obrábění kapsy [35]	42
Obr. 49.: MCU 700 [36]	45
Obr. 50.: Vložené NC bloky	45
Obr. 51.: Posuvová rychlost - 9000 mm/min	48
Obr. 52.: Posuvová rychlost - 900 mm/min	49
Obr. 53.: Měření 10B-12B	50
Obr. 54.: NC kód pro měření 10B – 12B (NC bloky rádiusu)	51
Obr. 55.: Nákres rohu kapsy	52
Obr. 56.: Součet vzdáleností před rádiusem (detailní pohled)	53
Obr. 57.: Nástroj pro obrábění kapsy experimentu [37]	56
Obr. 58.: Náčrt upravené kapsy	57
Obr. 59.: Přehled úběru materiálu za vteřinu pro čtyři rádiusy kapsy	58
Obr. 60.: Simulace optimalizovaných a výchozích NC kódů	59
Obr. 61.: Část NC kódu pro první rádius	60
Obr. 62.: Vykreslení žádané a skutečné posuvové rychlosti experimentu	61
Obr. 63.: Vibrace v osách X, Y, Z	62
Obr. 64.: Optimalizovaný NC kód, rádius 3.	63
Obr. 65.: Výchozí NC kód, rádius 3.	63
Obr. 66.: Optimalizovaný NC kód, rádius 1.	63
Obr. 67.: Výchozí NC kód, rádius 1.	63
Obr. 68.: Vykreslení žádané a skutečné posuvové rychlosti experimentu	65

Seznam tabulek

Tab. 1.: Přehled částí výrobního procesu:	14
Tab. 2.: Úhel opásání nástroje:	37
Tab. 3.: Přehled posuvových rychlostí:	39
Tab. 4.: Nástroj – fréza s těmito parametry:	39
Tab. 5.: Řezné podmínky:	39
Tab. 6.: Maximální průběhy sil na zvoleném úseku:	40
Tab. 7.: Minimální průběhy sil na zvoleném úseku:	40
Tab. 8.: Nástroj – fréza s těmito parametry:	42
Tab. 9.: Řezné podmínky:	42
Tab. 10.: Přehled obrábění rohu kapsy	42
Tab. 11.: Řezné podmínky:	45
Tab. 12.: Přehled NC kódů – běžný posuv (900 mm/min):	46
Tab. 13.: Přehled NC kódů – rychloposuv (9000 mm/min):	47
Tab. 14.: Řezné podmínky experimentu:	56
Tab. 15.: Přehled vzdáleností NC bloků před rádiusem:	57
Tab. 16.: Přehled obrobeného povrchu kapsy	63

Seznam použitého softwaru

Millvis

MATLAB R2020b

Siemens NX 12.0

DS SolidWorks 2017

Microsoft Excel

Microsoft Excel

Seznam příloh – elektronické (CD)

Zadání diplomové práce 1804 Kůrka.pdf

Diplomová práce 1804 Kůrka.pdf