

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: P2301 Strojní inženýrství

Studijní obor: 2303V004 Strojírenská technologie-technologie obrábění

DISERTAČNÍ PRÁCE

Optimalizace strategie obrábění složitých
prostorových ploch

Autor: **Ing. Luboš Kroft**

Školitel: **doc. Ing. Jiří Česánek, Ph.D.**

Konzultant specialista: **Ing. Jan Hnátík, Ph.D.**

Akademický rok 2017/2018

PROHLÁŠENÍ O AUTORSTVÍ

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

Prohlašuji, že jsem předloženou práci na téma:

Optimalizace strategie obrábění složitých prostorových ploch

vypracoval samostatně, pod odborným dohledem školitele a s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této práce.

V Plzni dne:.....

.....

Podpis autora

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych na tomto místě poděkoval mým dvěma školitelům doc. Ing. Jiřímu Česánkovi, Ph.D. a Ing. Janu Hnátíkovi, Ph.D. za jejich vedení, věcné připomínky v průběhu celého studia a především při zpracování této disertační práce.

Dále bych chtěl poděkovat Katedře technologie obrábění a Regionálnímu technologickému institutu za zázemí, které mi během studia a řešení disertační práce poskytovaly. Rovněž velice děkuji doc. Ing. Miroslavu Gombárovi, PhD. za pomoc v oblasti návrhu experimentu a statistického modelování. Dále děkuji všem osloveným, za jejich rady a připomínky, které mi v souvislosti s touto prací poskytovali.

Velký dík patří i mojí manželce, rodině a přátelům, bez jejichž podpory bych nemohl tuto práci zpracovat.

ANOTACE

AUTOR	Příjmení (včetně titulů) Ing. Kroft	Jméno Luboš
STUDIJNÍ OBOR	Strojírenská technologie-technologie obrábění	
VEDOUcí PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) doc. Ing. Česánek, Ph.D.	Jméno Jiří
PRACOVIŠTĚ VEDOUcíHO	ZČU – FST - KTO	
DRUH PRÁCE	disertační	
NÁZEV PRÁCE	Optimalizace strategie obrábění složitých prostorových ploch	

Fakulta: Strojní
Katedra: Technologie obrábění
Rok odevzdání: 2018

Počet stránek (A4 a ekvivalentů A4)

Celkem	127	Textová část	88	Grafická část	39
---------------	-----	---------------------	----	----------------------	----

STRUČNÝ POPIS ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY	<p>Téma dizertační práce je zaměřeno na zefektivňování dokončování tvarově složitých prostorových ploch při technologii frézování. Největší význam v celé práci má ověření vlivu strategie využívající konstantní řeznou rychlosti a její uplatnění v metodice návrhu nové dokončovací strategie využitelné v CAM modulech. Tento vliv byl ověřen dvěma navazujícími experimenty a vliv na zvýšení efektivity a drsnosti povrchu byl jednoznačně prokázán. Na základě těchto výsledků byla tato strategie využita při metodice návrhu nové dokončovací strategie.</p>
KLÍČOVÁ SLOVA	zvýšování efektivity, prostorové plochy, optimalizace, CAD/CAM, konstantní řezná rychlost, kvalita dokončování.

SUMMARY

AUTHOR	Surname (including of Degrees) Ing. Kroft	Name Luboš
FIELD OF STUDY	Technology of Metal Cutting	
SUPERVISOR	Surname (including of Degrees) doc. Ing. Česánek, Ph.D.	Name Jiří
INSTITUTION	UWB – FME - TMC	
TYPE OF WORK	dissertation	
TITLE OF THE WORK	The optimization machining strategies of the complex spatial areas	

Faculty: Mechanical Engineering
 Department: Technology of Metal Cutting
 Submitted in: 2018

Number of pages (A4 a eq. A4)

Totally	127	Text part	88	Graphical part	39
----------------	-----	------------------	----	-----------------------	----

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	The dissertation thesis is focused on the efficiency increase during the milling technology finishing of complex spatial areas. The verification of the impact of a strategy using a constant cutting speed is the most significant value of this work with its possibilities of application in the methodology of new finishing strategies design implemented into CAM modules. Two interdependent experiments were designed to verify this impact and the influence on the efficiency and surface roughness was positively proved. This strategy was used to create the methodology design of a new finishing strategy based on these results.
KEY WORDS	Efficiency increase, spatial areas, optimization, CAD/CAM, constant cutting speed, surface finishing quality

Obsah

Seznam obrázků	8
Seznam tabulek	11
Seznam zkratk	12
Úvod	14
1 Cíle disertační práce	16
2 Plochy ve strojírenské praxi	17
2.1 Techniky modelování těles	17
2.1.1 Hraniční reprezentace	18
2.1.2 Konstruktivní reprezentace	19
2.1.3 Dekompoziční reprezentace	20
2.1.4 Polygonální síť	21
2.2 Shrnutí	22
3 Obrábění tvarových ploch	23
3.1 Řetězec CAD/CAM/CNC	24
3.2 Standardní optimalizace řetězce CAD/CAM/CNC	26
3.3 Moderní způsoby optimalizace	27
3.3.1 Optimalizace na základě přímého měření při obrábění	28
3.3.2 Optimalizace na základě simulace procesu obrábění	29
3.3.3 Použití produktivnějších technologií zvyšujících efektivitu – HSC, HPC, HFC a další	38
3.3.4 Zvýšení funkčních vlastností strategií	39
3.3.5 Shrnutí moderních optimalizačních způsobů	41
3.4 Operace moderních CAM systémů pro frézování tvarově složitých ploch	42
3.4.1 Hrubovací operace v moderních CAM systémech	43
3.4.2 Dokončovací operace v moderních CAM systémech	43
3.5 Shrnutí	49
4 Zvyšování efektivity dokončovacího frézování	50
4.1 Teoretický základ ověření vlivu použití konstantní řezné rychlosti	50
4.2 Navrhování experimentů na základě statistického plánování	53
4.2.1 Vyhodnocení naměřených dat z hlediska statistiky	54
4.3 Charakteristika experimentálního studia	55
4.3.1 Sledované parametry	55
4.3.2 Experimentální vybavení	58

5	Experiment ověření vlivu změny kvality dokončené plochy na změnách řezné rychlosti	61
5.1	Návrh a příprava experimentu a postup realizace	61
5.1.1	Zkušební vzorek	62
5.1.2	Příprava programů	63
5.1.3	Realizace experimentu	63
5.2	Měření a zpracování sledovaných parametrů	65
5.2.1	Zpracování řezných sil	65
5.2.2	Měření parametrů drsnosti	66
5.2.3	Měření rozměrové přesnosti	67
5.3	Analýza výsledků sledovaných parametrů	68
5.3.1	Technologické hodnocení výsledků	68
5.3.2	Statistické hodnocení výsledků	77
5.4	Shrnutí a posouzení výsledků	80
5.4.1	Shrnutí výsledků	80
5.4.2	Posouzení výsledků pro dokončovací operace	81
6	Experimentální zkoumání kvality a rozměrové přesnosti při dokončování rádiusové plochy za použití konstantní řezné rychlosti	82
6.1	Návrh experimentu a postup realizace	82
6.1.1	Zkušební vzorek	84
6.1.2	Příprava programů	85
6.1.3	Realizace experimentu	86
6.2	Měření a zpracování sledovaných parametrů	88
6.2.1	Zpracování řezných sil	88
6.2.2	Měření parametrů drsnosti	88
6.2.3	Měření rozměrové přesnosti	90
6.3	Analýza výsledků sledovaných parametrů	90
6.3.1	Technologické hodnocení výsledků	90
6.3.2	Statistické hodnocení výsledků	111
6.4	Shrnutí a posouzení výsledků	114
6.4.1	Shrnutí výsledků	114
6.4.2	Posouzení výsledků pro dokončovací operace	115
7	Metodika návrhu dokončovací operace	116
7.1	Struktura návrhu nové obráběcí operace	116
7.1.1	Zadání	117

7.1.2	Určení funkčních vlastností.....	117
7.1.3	Navržení principů řešení	117
7.1.4	Ověření základních principů.....	120
7.1.5	Slabá místa základních principů.....	121
7.1.6	Návrh algoritmu nové dokončovací strategie.....	122
7.1.7	Analýza využitelnosti navrhovaného algoritmu pro současné CAM moduly 124	
7.2	Shrnutí	125
	Závěr.....	127
	Citovaná literatura	128
	Přílohy dizertační práce.....	i

Seznam obrázků

Obrázek 2-1 - Příklad tvarové plochy ve strojírenské praxi a jejího obrábění [25].....	17
Obrázek 2-2 - Příklad nejednoznačné reprezentace modelu a možné řešení v počítačové grafice.....	18
Obrázek 2-3 - Ukázka reprezentace a seznamu k VEFS struktury tělesa [5].....	19
Obrázek 2-4 - Konstruktivní zápis modelování těles [5]	20
Obrázek 2-5 - Obsazení prostoru dekompoziční metodou – Oktalový strom [5]	20
Obrázek 2-6 - Příklad tělesa reprezentované polygonální sítí – metodou triangulace: A) celkový pohled, B) detail [9].....	21
Obrázek 3-1 - Příklad projekce drah na obecnou tvarovou plochu [12].....	23
Obrázek 3-2 - Ukázka rozdílných kvalitativních výsledků vlivem aproximace	24
Obrázek 3-3 - Struktura výroby při použití CAD/CAM systému	24
Obrázek 3-4 - Standardní způsob optimalizace výroby.....	26
Obrázek 3-5 - Místa vstupu moderních optimalizačních metod.....	27
Obrázek 3-6 - Schéma aktivního upínače kompenzujícího vibrace při obrábění tenkostěnných dílů [18]	28
Obrázek 3-7 - Návrh reálného aktivního upínače pro lopatkové kolo [18]	29
Obrázek 3-8 - Diferenciální popis plochy na nástroje, odřezávané třísky a s tím spojené zatížení nástroje [20]	31
Obrázek 3-9 - Výkonová charakteristika vřetena obráběcího stroje	33
Obrázek 3-10 - Diagram stability pro parametry hloubka řezu a otáčky se dvěma odlišnými oblastmi stability.....	34
Obrázek 3-11 - Optimalizace drah nástroje pro prostorovou tvarovou plochu: A) úprava drah ve 2D; B) prostorové dráhy a 3D model odebraného materiálu [24].....	35
Obrázek 3-12 - Teplotní bilance procesu obrábění [26]	36
Obrázek 3-13 - Simulace obrábění termických jevů: A) simulace drah nástroje a odstranění materiálu, B) Teplotní pole obrobeneé plochy [27].....	36
Obrázek 3-14 - Ukázka modelování teplotních jevů při obrábění pomocí MKP: A) teplo dodané do obrobku vlivem obrábění, B) Simulace teplotního pole při řezání (stupnice nereprezentuje teplotu řezání ale rozsah zobrazovaných hodnot) [28]	37
Obrázek 3-15 - Hloubka a šířka řezu pro různé typy aplikace HPC obrábění [32]	38
Obrázek 3-16 - A) Dráhy bez optimalizačních funkcí B) Dráhy upravené na základě morfující spirály, trochoidy a adaptivního generování C) Detail trochoidních drah.....	40
Obrázek 3-17 - Změna řezného parametru a_e vlivem tvaru součásti [33].....	40
Obrázek 3-18 - A) kopírovací způsob obrábění, B) řádkovací způsob obrábění[34].....	44
Obrázek 3-19 - Odchytky ploch pro jednotlivé strategie [34]	45
Obrázek 3-20 - Ukázka rozpočtu drah s konstantním krokem v jedné ose [2].....	46
Obrázek 3-21 - Ukázka rozpočtu drah nástroje dle konstantního kroku po profilu [2]	47
Obrázek 3-22 - Definice pojmu pro rozpočet dle výšky zbytkové nerovnosti [14]	47
Obrázek 3-23 - Dráhy pro přechodový rádius generované na základě výšky zbytkového materiálu	48
Obrázek 3-24 - Ukázka rozpočtu drah nástroje Scallop height [2]	48
Obrázek 4-1 - Pozice kontaktního bodu nástroje pro obecnou tvarovou plochu.....	51
Obrázek 4-2 - Porovnání efektivního průměru pro kulovou a válcovou frézu [3]	51
Obrázek 4-3 - Návrh algoritmu využívající úpravu řezných podmínek se zachováním konstantní řezné rychlosti.....	52

Obrázek 4-4 - Centrální kompozitní plán[36].....	54
Obrázek 4-5 - Kolmá a podélná rovina protínající texturu povrchu [2]	56
Obrázek 4-6 - Parametr drsnosti Ra [39].....	57
Obrázek 4-7 - Parametr drsnosti Rz ISO [39]	57
Obrázek 4-8 - A) Přehled použitých nástrojů, B) nástrojová sestava: upínač s frézou Dn = 14,1 mm	59
Obrázek 4-9 - Sestava pro záznam řezných sil [3]	59
Obrázek 4-10 - Upevnění dynamometru a polotovaru [3]	60
Obrázek 5-1 - Návrh experimentálního vzorku, A) boční pohled s rozměry, B) prostorový pohled [3]	62
Obrázek 5-2 - Ukázka tvorby programu v SW Excel [3]	63
Obrázek 5-3 - Částečně dokončený obrobek (sklon šikmé plochy $\alpha=75^\circ$).....	64
Obrázek 5-4 - Záznam průběhu řezných sil jednoho přejezdu, A) nefiltrovaný záznam ze SW Dynoware, B) Vyfiltrovaný záznam z aplikace stanovující maximum.....	65
Obrázek 5-5 - Rozležení bodů a náměrů se značením ploch a přechodů [3].....	66
Obrázek 5-6 - Ukázka měření parametrů drsnosti v kolmém směru [3]	67
Obrázek 5-7 - Rozložení bodů po ploše.....	67
Obrázek 5-8 - Záznam řezné síly F _x (sklon plochy $\alpha=25^\circ$; přechod z vc=100 na z vc=125,05) [3]	68
Obrázek 5-9 - Graf závislosti řezné síly F _{xy} pro strategii A [3]	70
Obrázek 5-10 - Graf závislosti řezné síly F _{xy} pro strategii B [3]	70
Obrázek 5-11 - Graf průběhu drsnosti Rz vlivem jednotlivých změn řezné rychlosti pro strategii A [3].....	72
Obrázek 5-12 - Graf průběhu drsnosti Rz vlivem jednotlivých změn řezné rychlosti pro strategii B [3]	73
Obrázek 5-13 - Graf průběhu odstupu bodu od modelu vlivem jednotlivých změn řezné rychlosti pro strategii A [3].....	75
Obrázek 5-14 - Graf průběhu odstupu bodu od modelu vlivem jednotlivých změn řezné rychlosti pro strategii B [3].....	75
Obrázek 5-15 - Graf tvarové úchylnosti odstupu bodu od modelu naměřené přes plochu vzorku pro vc=175m/min [3].....	76
Obrázek 5-16 - Graf statistického hodnocení celkové síly F	78
Obrázek 5-17 - Grafická závislost strategií na sklonu plochy	79
Obrázek 5-18 - Graf statistického hodnocení drsnosti povrchu Rz.....	79
Obrázek 6-1 - Směry rozpočtu drah jednotlivých strategií v souřadném systému stroje pro testované vzorky[2].....	83
Obrázek 6-2 - Schématické zobrazení experimentálního vzorku.....	84
Obrázek 6-3 - Rozdělení zkušební plochy pomocí úhlů [2]	85
Obrázek 6-4 - Ukázka vstupních dat pro tvorbu programu v SW Excel	85
Obrázek 6-5 - Směr drah pro dokončovací operace na rádiusové ploše [2].....	86
Obrázek 6-6 - Schéma míst náměrů řezných sil [2].....	87
Obrázek 6-7 - Dokončené rádiusové plochy umístěné na vzorcích [2].....	88
Obrázek 6-8 - Ukázka měření drsnosti [2].....	89
Obrázek 6-9 - Rozležení bodů a náměrů se značením ploch a přechodů [2].....	89
Obrázek 6-10 - Rozložení bodů po ploše [2]	90
Obrázek 6-11 - Ukázka vyhodnocovaných míst bez prvního náměru [2]	91
Obrázek 6-12 - Orientace řezných sil při dokončování (Pohled shora) [2]	91

Obrázek 6-13 - Graf průběhu sil F_{xy} pro jednotlivé vzorky strategie A2	92
Obrázek 6-14 - Graf průběhu sil F_{xy} pro jednotlivé vzorky strategie C2	93
Obrázek 6-15 - Grafické porovnání průměrných hodnot řezné síly F_{xy} pro strategie $v_c =$ konst. a $n =$ konst.	93
Obrázek 6-16 - Grafické porovnání průměrných hodnot řezné síly F pro strategie $v_c =$ konst. a $n =$ konst.	94
Obrázek 6-17 - Graf vlivu rádiu dokončované plochy na řeznou sílu F_{xy} [2].....	95
Obrázek 6-18 - Graf vlivu průměru nástroje na řeznou sílu F_{xy} [2]	95
Obrázek 6-19 - Graf závislosti parametru drsnosti R_z pro jednotlivé strategie na ploše $R =$ 16 mm obráběné nástroje $D_n = 4,9$ mm	97
Obrázek 6-20 - Graf závislosti parametru drsnosti R_z pro jednotlivé strategie na ploše $R =$ 30 mm obráběné nástroje $D_n = 16$ mm.....	97
Obrázek 6-21 - Graf průměrných hodnot a rozptylů pro drsnost R_z - dle řezných podmínek [2]	99
Obrázek 6-22 - Graf průměrných hodnot a rozptylů pro drsnost R_a - dle řezných podmínek [2]	99
Obrázek 6-23 - Graf vlivu průměru nástroje na průměrné hodnoty parametru R_z	100
Obrázek 6-24 - Graf srovnání teoretických a skutečných hodnot drsnosti R_a [2]	101
Obrázek 6-25 - Graf srovnání teoretických a skutečných hodnot drsnosti R_z [2]	102
Obrázek 6-26 - Graf průběhu vlivu rádiu plochy na drsnost R_z [2].....	103
Obrázek 6-27 - Graf závislosti odstupů bodu od modelu pro jednotlivé strategie na ploše $R = 30$ mm obráběné nástroje $D_n = 3$ mm	105
Obrázek 6-28 - Skutečná a ideální plocha pro rádius R 16 dokončovanou strategií C2 nástrojem průměru $D_n = 4,9$ mm [2]	105
Obrázek 6-29 - Graf závislosti odstupů bodu od modelu pro jednotlivé strategie na ploše $R = 16$ mm obráběné nástroje $D_n = 14,1$ mm.....	106
Obrázek 6-30 - Graf průběhu průměrných hodnot odstupů bodu od modelu pro jednotlivé strategie [2]	106
Obrázek 6-31 - Graf průměrných hodnot a rozptylů odstupů bodu od dle strategií [2]	107
Obrázek 6-32 - Graf průběhů odstupů bodů od modelu pro jednotlivé průměry nástrojů dle úhlu měření [2].....	108
Obrázek 6-33 - Graf průměrných hodnot a rozptylů odstupů bodu od modelu pro jednotlivé průměry nástrojů [2]	108
Obrázek 6-34 - Graf průběhů odstupů bodů od modelu pro jednotlivé rádiusy ploch dle úhlu měření [2].....	109
Obrázek 6-35 - Graf porovnávání průměrných hodnot časové náročnosti pro strategie v_c $=$ konst. a $n =$ konst. [2]	110
Obrázek 6-36 - Graf průměrných pořadí drsnosti R_z a rozptylů dosažených hodnot ve svislém směru.....	111
Obrázek 6-37 - Graf vlivu průměru nástroje a rádiu plochy na parametr drsnosti R_z	112
Obrázek 6-38 - Graf statistického hodnocení sumy průměrných pořadí dle Kruskal- Wallisovo testu pro odstup bodů od modelu	113
Obrázek 7-1 - Schéma návrhu nové dokončovací strategie.....	116
Obrázek 7-2 - Diagram přípravy a zpracování dat.....	123
Obrázek 7-3 - Diagram generování drah nové strategie dokončování	124

Seznam tabulek

Tabulka 4-1 – Rozhodovací tabulka pro volbu hypotéz [36].....	55
Tabulka 4-2 – Počty kusů nástrojů využitých pro druhý experiment.....	58
Tabulka 5-1 – Vstupní proměnné a konstantní faktory pro plánování experimentu	61
Tabulka 5-2 – Hodnoty řezné síly F_{xy} pro strategii B [3].....	69
Tabulka 5-3 – Tabulka hodnot drsnosti pro strategii A [3]	71
Tabulka 5-4 – průměrné hodnoty odstup bodu od modelu pro strategii A [3]	74
Tabulka 5-5 – Tabulka posouzení statistického významu pro velikost celkové síly F	77
Tabulka 5-6 – Tabulka posouzení vlivu jednotlivých faktorů	78
Tabulka 6-1 – Vstupní faktory pro plánovaný experiment	84
Tabulka 6-2 – Ukázka zpracování dat pro hodnocení řezných sil F_{xy} [2].....	94
Tabulka 6-3 – Příklad zpracování dat drsnosti R_z pro strategii A1 [2]	98
Tabulka 6-4 – Ukázka tabulky hodnotící odstup bodu od modelu pro strategii C2 [2] ..	104
Tabulka 6-5 – Hodnocení časové náročnosti jednotlivých strategií [2]	110

Seznam zkratk

Zkratka, symbol	Význam	Jednotka
CSG	Constructive solid geometry - Konstruktivní geometrii těles	-
STL	Těleso tvořené stereo-litografií	-
VEFS	Z anglického vertex (hrana), edge(stěn), face(plocha) a solid(těleso).	-
Voxel	Objemový pixel – krychle o rozměrech 1x1x1 pixel	-
B-rep	Boundary representation – hraniční reprezentace	-
HW	Hardware	-
SW	Software	-
SNOP	Soustava obrábění - stroj, nástroj, obrobek, (upínač) přípravek	-
CAD	Computed aided design – počítačová podpora konstrukce	-
CAM	Computed aided manufacturing – počítačová podpora výroby	-
NC	Numerical control – číslicově řízený	-
CNC	Computer numerical control – počítačově řízený	-
HSC	High speed cutting – vysoko-rychlostní řezání (obrábění)	-
HPC	High performance cutting - vysoce výkonné řezání (obrábění)	-
HFC	High feed cutting – vysoko-posuvové řezání (obrábění)	-
iMaching	Operace ze SW SolidWorks – využívající HPC a další metody optimalizace	-
CC	Cutter contact – bod doteku nástroje	-
CL bod	Cutter Location	-
CL data	Cutter Location data – data drah nástroje, řezné podmínky a další v jazyce CAM modulu	-
VBD	Vyměnitelná břitová destička	-
Ra	Průměrná aritmetická odchylka profilu drsnosti	μm
Rz	Nejvyšší výška profilu drsnosti	μm
Ra _t	Teoretická průměrná aritmetická odchylka profilu drsnosti	μm
Rz _t	Teoretická nejvyšší výška profilu drsnosti	μm
R _{sm}	Střední vzdálenost rýh	mm
L _t	Celková délka	mm
λ _c	Mezní vlnová délka	mm
r _š	Rádus špičky hrotu měřicího stroje pro drsnost povrchu	μm

α	Úhel sklonu plochy	°
a_e	Radiální krok nástroje	mm
a_p	Axiální krok nástroje	mm
v_c	Řezná rychlost	m/min
f	Posuv na otáčku	mm
f_z	Posuv na zub	mm/zub
v_f	Posuvová rychlost	mm/min
R	Poloměr rádiusové plochy	mm
Q	Teplo	J
$Q_{T\check{C}}, Q_{T_H}, Q_{Dl-III}$	Teplo vzniklé: třením čela, třením hřbetu, plastickou deformací v oblasti I až III	J
$\varnothing D$	Průměr nástroje	mm
$\varnothing D_e$	Efektivní průměr nástroje	mm
F_x, F_y, F_z	Řezné síly ve směru x, y, z	N
F_{xy}	Rovina odtlačení nástroje	N
ch+	Maximální odchylka	μm
ch-	Minimální odchylka	μm
DoE	Design of Experiments – metoda návrh experimentu	-
ANOVA	analýzy rozptylu	-
α_v	Stanovaná hladina významnosti	%
„p“	Dosažená hladina významnosti	%

Úvod

Neustálý vývoj a zlepšování vysoce výkonných obráběcích procesů je velice důležitý pro rozvoj oblasti strojírenské výroby, kterou ovlivňuje velké množství moderních trendů, jako např. zvyšování přesnosti výroby, tvarové složitosti komponent, pozornost k životnímu prostředí nebo zvyšování efektivity. Protože mnoho oblastí, jako jsou řezné materiály, obráběcí stroje a další, se v dnešní době přibližuje fyzikálním limitům, je třeba se zaměřit na zefektivňování procesů v oblasti návrhu strategie, její optimalizace a možnosti zvýšení výkonu pro stávající techniku. Zejména jedná-li se o výrobu prostorových tvarových ploch, je zvyšování a optimalizace strategie výroby často řešenou problematikou.

Oblast výroby složitých prostorových ploch je možné rozdělit dle použité strojírenské technologie nebo např. dle výrobního způsobu zpracování materiálu na:

- Konvenční – obrábění složitých prostorových ploch především frézováním
- Nekonvenční – výroba například pomocí elektroerozivního obrábění
- Aditivní – výroba hybridních struktur a dalších tvarových komponent

Při uvažování v oblasti konvenčního obrábění je dominantním způsobem výroby složitých prostorových ploch zejména frézování. Z ostatních konvenčních technologií je možné zmínit například broušení nebo excentrické soustružení, ale jejich procentuální zastoupení je výrazně nižší než pro frézování. Při výrobě tvarových ploch procesem frézování je možné tento proces rozdělit na hrubovací, před-dokončovací a dokončovací fázi.

Vzhledem k současnému tlaku na vysokou efektivitu výroby je návrh obráběcí technologie, jeho optimalizace a příprava výroby realizována především mimo obráběcí stroje. Zde, pro zmiňovanou problematiku, nachází významné uplatnění virtuální výrobní systémy. V oblasti strojírenské výroby mají největší podíl CAD/CAM systémy, které mohou být velice užitečným prostředkem pro zvýšení produktivity.

K zefektivnění obrábění tvarově složitých ploch je možné využít různých optimalizačních přístupů. Při pohledu na základní podstatu jednotlivých systémů sloužících pro zefektivňování obráběcích technologií je možné je rozdělit do následujících skupin:

- Optimalizace řezných podmínek na základě simulace procesu obrábění – predikce vibrací, opotřebení a dalších jevů pomocí optimalizačního SW
- Optimalizace řezných podmínek na základě přímého měření některého negativního doprovodného jevu přímo při obrábění
- Použití produktivnějších technologií zvyšujících efektivitu – HSC, HPC, HFC a další
- Zvýšení funkčních vlastností strategií použitých při přípravě obráběcí strategie

Ze zmíněných fází návrhu výroby v posledních několika letech prodělaly významné zvýšení efektivity především hrubovací cykly. Zde se již výrazně uplatňují produktivnější technologie v kombinaci s dalšími optimalizačními procesy. Hrubovací cykly, jejichž hlavním úkolem je především odebrání velkého množství materiálu v co možná nejkratším čase za dodržení požadované kvality, se za současného stavu poznání dají označit za efektivní.

V oblasti dokončování je cílem dosáhnout požadované rovnoměrné kvality dokončené plochy za co nejkratší čas. Zefektivňování těchto druhů operací je dnes řešeno převážně prvními dvěma způsoby, tedy optimalizací silového zatížení a řezných podmínek, a to jak před samotným generováním drah nástroje, tak následně přímým měřením a kompenzací nějakého doprovodného jevu při dokončovacím frézování.

Vzhledem k tomu, že na obráběných dílech se běžně vyskytují plochy vyjádřené matematickými funkcemi, jako jsou B- spline křivky, NURBS plochy nebo plochy vytvořené například pomocí reverzního inženýrství reprezentované množinou bobů nebo triangulací, musí tuto složitost zvládat také technologické cykly a simulační procesy. V kombinaci se zvyšujícími se požadavky na rozměrovou přesnost a kvalitu dokončené plochy je patrné, proč je optimalizace strategií dokončovací fáze značně komplikovaná.

Jednou z velice vhodných cest pro zvýšení efektivity dokončovací fáze je optimalizace samotných technologických cyklů používaných při návrhu strategie. Jedná se o málo rozšířenou variantu, neboť pro vysoko-objemové typy výroby bývá většinou optimalizace realizována pomocí některého typu simulačního procesu. V případě této disertační práce je řešena problematika zefektivňování dokončovacích operací a to přímo na úrovni CAM modulu. Z pohledu optimalizačních technik se jedná o metodu zvyšování funkčních vlastností využitím vhodného typu rozpočtu v kombinaci s inovativní definicí řezných podmínek. Díky této kombinaci je očekáván nejen nárůst efektivity celého dokončovací fáze, ale také zvýšení kvalitativních parametrů.

1 Cíle disertační práce

Náplň předkládané disertační práce vychází z požadavků optimalizace dokončovacích strategií. Základní myšlenkou je předpoklad, že vlivem měnícího se efektivního průměru nástroje klesá u současných strategií řezná rychlost, což může mít za následek rozdílné výsledky rozměrové přesnosti a kvality dokončené plochy. Z tohoto předpokladu vychází hlavní cíl práce, a to ověření možnosti použití konstantní řezné rychlosti při dokončování tvarově složitých prostorových ploch. Po ověření využitelnosti konstantní řezné rychlosti pro dokončování bude tato strategie použita pro návrh metodiky dokončovací operace splňující moderní přístupy obrábění.

Pro ověření zmíněných předpokladů bude nutné vyřešit následující dílčí cíle:

- Ověření vlivu změny otáček na kvalitativní parametry dokončeného povrchu (drsnost a rozměrová přesnost)
- Zjištění vlivu použití konstantní řezné rychlosti vzhledem k použité strategii a průměru nástroje při obrábění rádiusové plochy

Teoretická část práce má za cíl popis jednotlivých metod při tvorbě tvarových prostorových ploch a to zejména z pohledu jejich využitelnosti v technické praxi.

Dále následuje rozbor problematiky obrábění tvarových prostorových ploch. Vzhledem k cílům celé práce je analýza zaměřena na optimalizační procesy obrábění tvarových ploch. Analýza těchto způsobů dává ucelený pohled na aktuálně ve světě využívané optimalizační přístupy a také odhaluje slabá místa jednotlivých řešení.

Praktická část se soustředí na návrh řešení dané problematiky. Teoretické předpoklady budou následně ověřeny dvěma na sebe navazujícími experimenty. Nejprve bude nutné zjistit, zda využití konstantní řezné rychlosti nemá negativní vliv na dokončovanou plochu. Vzhledem k možnosti použití zmíněné strategie se jedná především o změny rozměrové přesnosti a kvality dokončeného povrchu vlivem změn otáček nástroje.

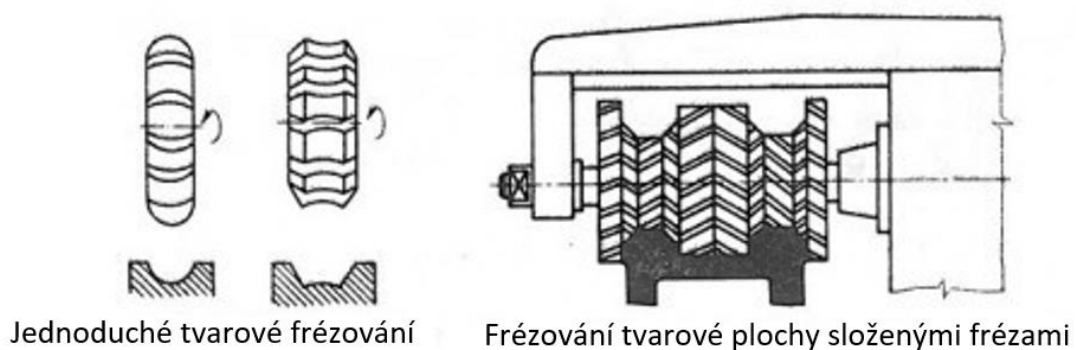
Jako další krok následuje ověření použitelnosti strategie využívající konstantní řeznou rychlost pro obrábění rádiusové plochy. Z důvodu tvorby metodiky dokončovacích operací, je do tohoto testu také zahrnuto ověření vlivu techniky rozpočtu drah na rádiusovou plochu a vliv průměru nástroje a samotného rádiu plochy opět na kvalitativní parametry dokončované plochy.

Důležitým výstupem této práce by měla být metodika návrhu dokončovací strategie, která by splňovala současné požadavky na technologické dokončovací cykly obsažené v CAM systémech. Návrh takovéto strategie by měl obsahovat jak jevy zkoumané v této práci, tak také jevy a optimalizační přístupy již ověřené, nebo používané a výsledná strategie by měla pracovat na jejich vhodné kombinaci.

Všechny cíle stanové v této disertační práci vycházejí z problematiky zefektivňování dokončovacích strategií pro složité prostorové tvary řešené na Katedře technologie obrábění (dále jen KTO).

2 Plochy ve strojírenské praxi

Každé těleso jak ve strojírenské praxi, tak v reálném světě je složené z ploch. Plochy využívané ve strojírenství je možné rozdělit např. dle tvořící křivky na rotační, rovinné a tvarové. První dvě zmíněné plochy je možné spojit se základními technologiemi obrábění. Vzájemnou kombinací rovinných a rotačních ploch vznikla první tělesa s tvarovými plochami. Tato tělesa se vyznačovala jednoznačným přechodem mezi jednotlivými plochami. S postupným rozvojem techniky ovšem tyto jednoduché tvarové plochy přestávaly dostačovat konstrukčním požadavkům a tak vznikly plochy s nedefinovaným přechodem.



Obrázek 2-1 - Příklad tvarové plochy ve strojírenské praxi a jejího obrábění [25]

Vzhledem ke komplexnosti tvarových ploch se jejich zpracování od 60 let minulého století stalo doménou počítačové techniky, ve strojírenské praxi tedy CAD/CAM systémů. Rozdělení ploch v počítačové grafice je možné provést např. dle vzniku:

- Plochy tvořené z hraničních křivek
- Plochy reprezentované sítí bodů
- Plochy vzniklé vzájemnou kinematikou
- Plochy založené na analytickém předpisu

Tvarové plochy se dnes ve strojírenské praxi běžně vyskytují. Z toho vyplývá nutnost obrábění takovýchto ploch a s tím spojená optimalizace procesu výroby. Způsobů optimalizace obrábění tvarových ploch je poměrně velké množství, aby bylo možné se zaměřit na konkrétní metody, je nezbytné nejprve rozdělit a důkladněji pochopit samotné tvarové plochy a jejich reprezentace v počítačové grafice. Jedním z důvodů je, že ne všechny popisy jsou vhodné pro strojírenskou praxi. Zde je potřebná provázanost celé problematiky optimalizace obrábění tvarových prostorových ploch s CAD/CAM systémy.

2.1 Techniky modelování těles

Aby bylo možné přistoupit k rozdělení jednotlivých ploch, je třeba se zaměřit na samotné způsoby modelování. V počítačové grafice jsou tělesa reprezentována třemi základními způsoby. Obecně je lze dělit na hraniční, plošnou a objemovou reprezentaci. Tyto obecné reprezentace mají v moderních počítačových systémech vždy svůj reálný algoritmus, podle kterého jsou tělesa tvořena. Z pohledu modelování těles je možné rozdělit metody na:

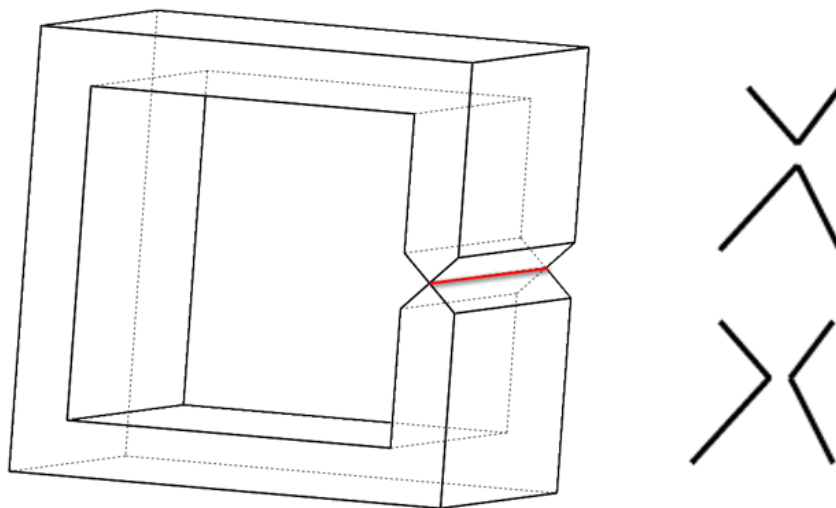
- Hraniční modely
- Dekompoziční modely
- Konstruktivní modely
- Polygonální sítě

Jako jeden z výchozích modelů je tvorba tělesa pomocí hraniční reprezentace, která těleso popisuje na základě hraničních prvků, kterými jsou vrchol, hrana nebo stěna. Dále pak konstruktivní geometrii těles např. CSG. Ty se využívají zejména pro modely konkrétních CAD systémů. V případě reprezentace těles v univerzálních formátech jako např. STL, kde jsou plochy reprezentovány množinou trojúhelníků nebo pomocí polygonálních sítí. Tato práce se nezabývá obecně počítačovou grafikou, a proto jsou v následujícím textu rozebrány pouze způsoby využívané v technické praxi.

2.1.1 Hraniční reprezentace

Jak již bylo zmíněno výše, hraniční způsob reprezentace, je jedním z nejvíce využívaných způsobů. Tělesa jsou reprezentována jako mnohostěn, který popisuje jeho povrch. Jako základní stavební části slouží vrcholy, hrany a stěny, jejichž vzájemná kombinace popisuje povrch tělesa. V případě hraniční reprezentace se neuchovávají informace o vnitřních bodech. V některých případech je možné je odvodit pomocí vztahů k hraničním prvkům. [5]

Z pohledu jednoznačné reprezentace je důležité, aby těleso bylo považováno za „manifold“, tedy odpovídalo nějakému skutečnému tělesu. Podmínka je splněna, pokud každá hrana sousedí právě se dvěma plochami. Ukázka takového tělesa, viz obrázek 2-2.

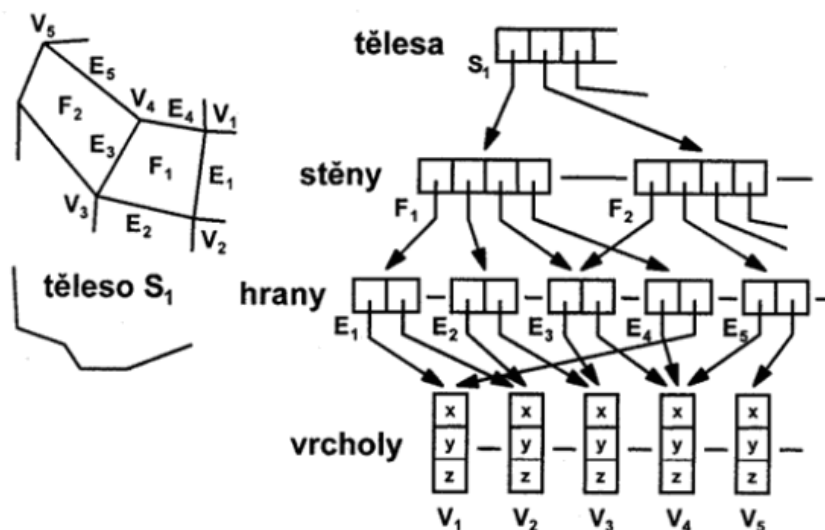


Obrázek 2-2 - Příklad nejednoznačné reprezentace modelu a možné řešení v počítačové grafice

V předchozí části bylo zmíněno, že k popisu tělesa slouží základní prostorové prvky. Těleso složené z vrcholů hran a ploch, které jsou uspořádány do seznamu a jsou mezi nimi definovány jednotlivé vztahy, viz obrázek 2-3.

Algoritmů využívající hranovou reprezentaci je několik. Jako základní je možné označit hranovou reprezentaci využívající pouze seznamu vrcholů a hran. Rozšířením o plochy získává

daná struktura mnohem více vypovídající schopnost o obsahu tělesa. Stále ovšem nedává všechny topologické informace potřebné pro další zpracování. [5,6,7]



Obrázek 2-3 - Ukázka reprezentace a seznamu k VEFS struktuře tělesa [5]

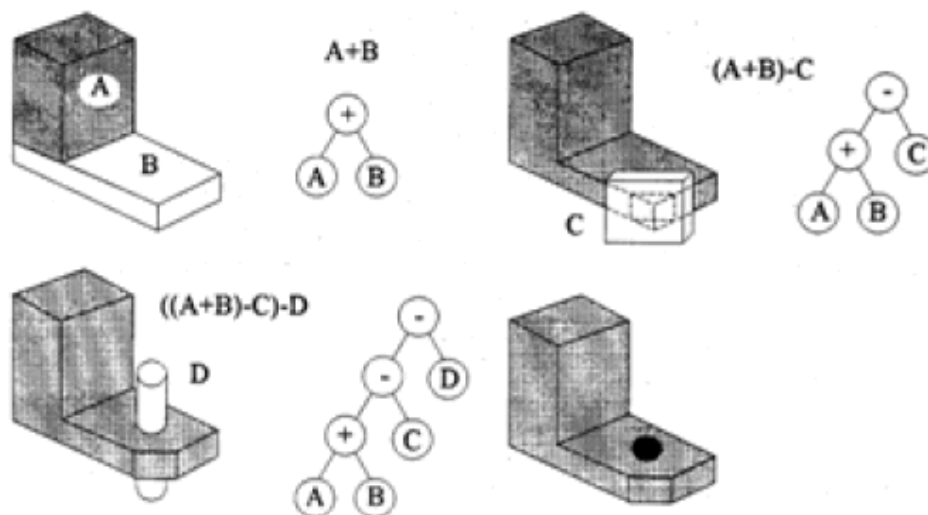
Tyto informace jsou obsaženy až v případě využití strukturované reprezentace tělesa. Jako příklad je zde uvedena struktura zápisu pro VEFS reprezentace. Zmíněná struktura obsahuje topologické informace o provázání prvků a je tedy vhodná pro počítačovou grafiku, díky jednoznačné definici tělesa a jeho pozici v prostoru. Jedná se o plošnou datovou strukturu, kterou je možné převést na tzv. okřídlenou hranu, díky které je možné označit reprezentaci za objemnou. [5,6,7]

Velice důležitým aspektem pro modelování a následnou optimalizaci tvarových prostorových ploch v CAD/CAM systémech je, že všechny výše zmíněné struktury mohou obsahovat na pozici stěn a hran nejen rovinné plochy a křivky, ale také nerovinné (obecné). Díky tomu je možné v modelech používat jednak analytické křivky a plochy nebo plochy vzniklé interpolací nebo aproximací. Díky tomu je tato na první pohled jednoduchá datová struktura využívána i v současnosti a to zejména pro popis složitých prostorových ploch v CAD systémech. [6,7]

Využití obecných křivek, jako hran nebo hraničních ploch přináší velké možnosti, ovšem ve strojírenské praxi není možné využít jakýkoliv obecný popis. Křivky jako pojem jsou velice komplikované. Pro účely této práce bude dostačující definovat křivku jako dráhu pohybujícího se bodu. Dále pak se bude pracovat s analytickými křivkami, tedy s takovými, které je možné nějak matematicky popsat. Výčet analytických křivek využitelných v CAD/CAM systémech a jejich matematický popis je uveden v příloze 1.[8]

2.1.2 Konstruktivní reprezentace

Jako nejznámější konstruktivní reprezentaci využívanou v CAD/CAM systémech, lze označit CSG modelování. Tento způsob je založen na teorii množin. Jako základní konstrukční elementy se využívají jednoduchá a snadno definovatelná tělesa jako jsou kvádr, válec, koule a další. Jednotlivé množinové operace jsou zaznamenávány ve stromě, na jehož základu je výsledné těleso modelováno. Využívá se množinových operací jako je sjednocení, průnik, rozdíl a další. Ukázka zápisu SCG stromu je vidět na následujícím obrázku, viz obr. 2-4.

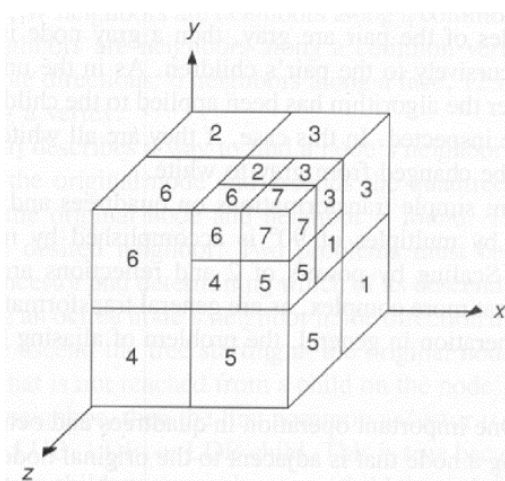


Obrázek 2-4 - Konstruktivní zápis modelování těles [5]

Ovšem tento typ reprezentace není vhodný pro tvarové prostorové plochy, a v případě kombinace základních těles a analytických křivek nebo ploch je nutné model převést např. na hraniční reprezentaci. Využití tohoto typu modelu lze nalézt u některých optimalizačních technik, jak je uvedeno v další části práce. Z těchto důvodů nebude samotná metoda modelování pomocí konstruktivní reprezentace těles v této práci řešena detailněji.

2.1.3 Dekompoziční reprezentace

Tento způsob vychází především z metody objemové reprezentace. Prostor je rozdělen do trojrozměrných buněk reprezentovaných voxely, u kterých je zaznamenávána obsazenost. Díky tomu je možné definovat těleso v prostoru. Tento obecný dekompoziční model má své algoritmy lišící se především rozdělením prostoru jako takového. Nevýhodou těchto modelů je jejich omezená přesnost, a tedy nevhodnost použití pro reprezentaci tvarových prostorových ploch.



Obrázek 2-5 - Obsazení prostoru dekompoziční metodou – Oktalový strom [5]

Jako jedna z použitelných metod dekompoziční reprezentace použitelných v CAD/CAM systémech se jeví oktalový strom, viz obr. 2-5. Oproti ostatním typům se jedná o hierarchickou

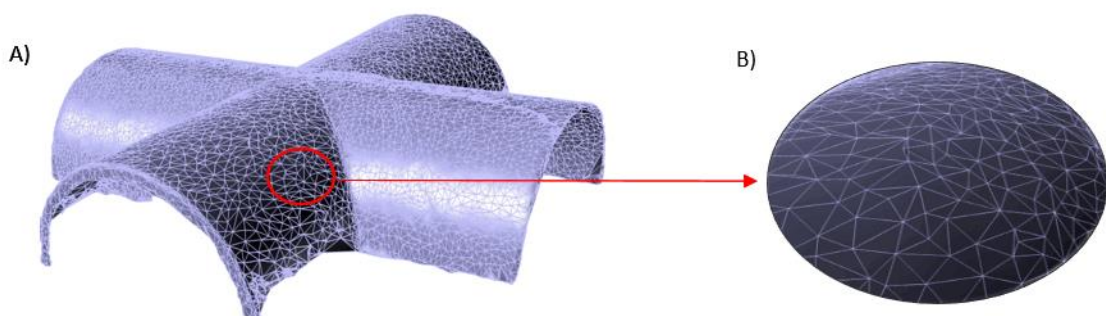
variantu buněčného modelu, u níž se velikost jednotlivých voxelů mění dle tvaru součásti. Kromě stavu buňky „obsazeno-neobsazeno“ je možné mít ještě voxel částečně obsazený. V případě částečného obsazení krajního prvku dochází k jeho rozdělení na polovinu a to i ve všech třech směrech. V této struktuře tedy fungují mezi buňkami množinové operace jako např. v CSG reprezentaci.

Pro modelování se tyto typy reprezentací příliš nehodí, jak již bylo zmíněno, ale uplatnění těchto modelů lze nalézt při určitých typech optimalizačních procesů. Na základě, například oktalových stromů nebo jejich modifikací, je možné provést simulaci např. procesu broušení a to i s výpočtem úběru materiálu a dalších doprovodných jevů. Jednotlivé způsoby optimalizací jsou uvedené v kapitole 3.3.

2.1.4 Polygonální síť

Jedná se o další velice rozšířený způsob datové reprezentace prostorových modelů. Tento způsob je velice blízký hranové reprezentaci. Jedná se tedy ve většině případů o seznam souřadnic vrcholů, stěn nebo ploch, kterými je každé těleso reprezentováno.

Obdobně jako u předchozích představitelů existuje velké množství algoritmů, kterými se model vytváří. Jako základního představitele je možné vybrat těleso tvořené množinou bodů. Jedná se např. o modely získané ze skeneru, kdy výstupem je množina bodů reprezentující těleso. V tomto případě je datová struktura uložena jako seznam souřadnic jednotlivých vrcholů vztažených k výchozímu bodu. Výhodou může být malá náročnost na uložení dat a to i velmi rozsáhlých těles. Nevýhodou těchto typů souborů je redundantnost dat, nespolehlivost při vytváření hran a také složitost vyhledávání konkrétních bodů. Těleso reprezentované množinou bodů nebývá konečným formátem, ale bývá dále zpracováno a to např. metodou triangulace nebo proložením tzv. Bézierových plátů vycházejících z Bézierových křivek, viz příloha 1.



Obrázek 2-6 - Příklad tělesa reprezentovaného polygonální sítí – metodou triangulace: A) celkový pohled, B) detail [9]

Jako mnohem vhodnější typ reprezentace je využití metody blízké se hranové reprezentaci, a to díky využívání polygonů. Ten ovšem nemá obecně tvar mnohoúhelníku, ale využívá se metody triangulace. Těleso je tedy složeno z množiny trojúhelníků jak je vidět na obrázku 2-6. Jako jeden z nejrozšířenějších formátů využívajících reprezentaci pomocí trojúhelníků je formát STL. Jde o těleso tvořené stereo-litografií, které má normou stanovené algoritmy, a je možné ho tedy obecně používat pro datovou reprezentaci napříč různými CAD/CAM systémy. Využitím STL formátu se zabývá zdroj [10]. Mimo to je také hojně využíván pro různé optimalizační algoritmy. Jedna z mnoha prací, zabývajících se použitím těchto typů souborů pro návrh technologie a jeho optimalizací, je od Gerardo Salas Bolaños a kol. V jejichž

práci je řešena optimalizace drah generovaných za pomoci STL modelu a optimalizaci především výpočtové náročnosti. Pro účely této práce jsou STL a další univerzální formáty důležité především z pohledu využití při optimalizačních procesech a jejich samotná struktura nebude dále rozebírána.

2.2 Shrnutí

Z výše zmíněných metod modelování je patrné, že každá má své uplatnění v určitých částech počítačové grafiky. Z pohledu strojírenské praxe, která je pro složité prostorové plochy realizována převážně v CAD/CAM systémech, je nejvyužívanějším způsobem modelování hraniční reprezentace. Jedná se o jednodušší způsob a díky možnosti využití analytických křivek je také nejvíce univerzálním. Další metody mají své uplatnění především v simulačních procesech nebo pro reprezentaci jednodušších těles.

Využití analytických křivek dává velké možnosti modelování. To je výhodou zejména při tvorbě tvarově komplikovaných dílů např. karoserií automobilů nebo leteckých komponent. Zde je popis pomocí analytických křivek takřka nutností, a to díky matematickému základu a rychlé a vhodné modifikaci ploch dle potřeb autora.

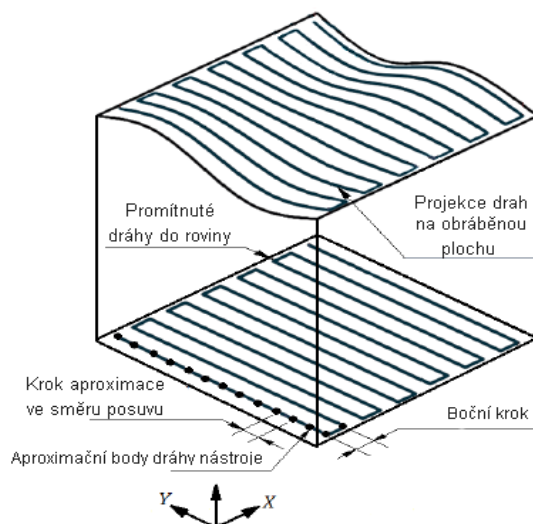
Druhým a z pohledu této dizertační práce důležitým faktorem, je využití analytických křivek při generování a následné optimalizaci drah nástroje, kde je několik rozdílných aspektů. U snahy optimalizovat obrábění je zásadní především způsob reprezentace tvarově složitých ploch v CAM systémech jejich aproximace dráhami nástroje. Některé základní poznatky jsou také uvedeny v dizertační práci autora M. SATISH CHANDRA [11], jenž se zabýval rozpočtem drah pro tvarově složité plochy. Dalším neméně důležitým prvkem je samotná přesnost aproximace drah nástroje přes zmíněné analytické křivky, tato problematika byla řešena například v práci „Iso-level tool path planning for free-form surfaces“ [12], ve které autoři řeší přesnost a efektivitu generování drah pro takovéto plochy a navrhují optimalizační přístup pro generování drah. Při generování drah nástroje většinou také dochází k převodu modelu do jiného formátu, což může být prvním úskalím a místem vzniku tvarových odchylek. Tato problematika ve vztahu ke generování drah je řešena i v článku autorů BOLAÑOS, BEDI a MANN ze zdroje [13].

Výše zmíněná problematika slouží k hlubšímu pochopení samotných optimalizačních technik, především pomocí simulace procesu. Tato část je řešena v následujících kapitolách.

3 Obrábění tvarových ploch

Výrobu tvarových ploch je možné realizovat různými způsoby, jak bylo zmíněno v úvodu, avšak dominantní technologií je frézování. Z možných způsobů frézování tvarových prostorových ploch je v současnosti nejvyužívanější způsob výroby za pomoci vzájemné kinematiky nástroje s rádiusovým tvarem ostří a obrobku, čímž je dosaženo výsledného tvaru. Tento způsob výroby je realizován takřka výhradně na NC strojích s CNC řízením (dále jen CNC stroj). Díky tomu se dnes do popředí dostávají různé softwary pro podporu a optimalizaci výroby, které se stávají nedílnou součástí při návrhu a realizaci strategie obrábění.

Pojem strategie doznal během posledních let podstatné změny. V minulosti byl tento pojem nejčastěji spojen s použitím vhodného stroje nástroje nebo směru obrábění. Dnes se strategií rozumí spíše volba funkce v daném SW. Rozvoj techniky umožnil používání nových progresivních technologií, jako jsou HSC, HPC, tvrdé obrábění, trochoidní obrábění a další. Díky tomu je možné snížit čas výroby a zvýšit životnost nástroje a tím zvýšit produktivitu celého procesu tedy optimalizovat celý proces.

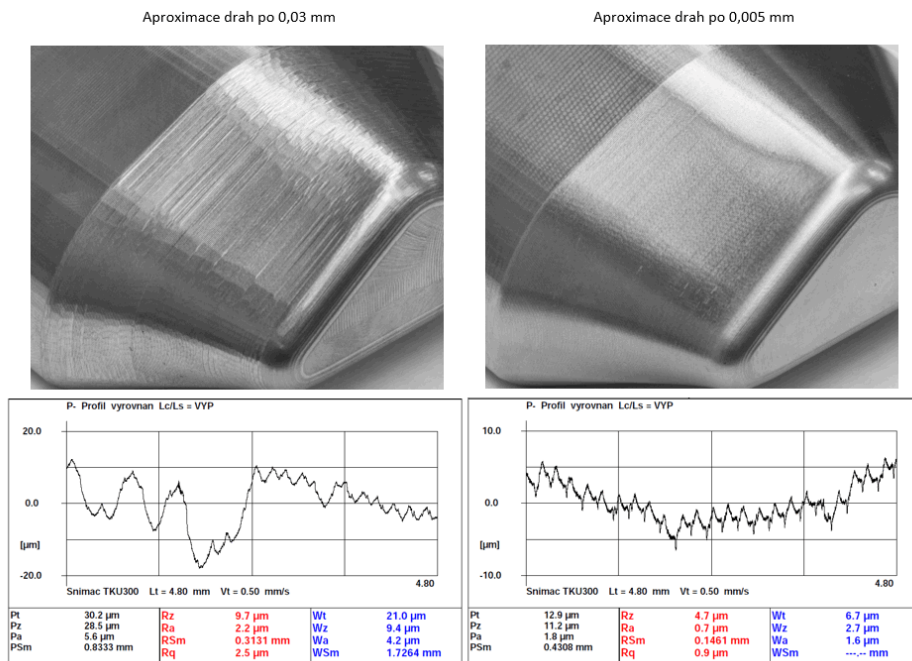


Obrázek 3-1 - Příklad projekce drah na obecnou tvarovou plochu [12]

Procesní řetězec sloužící k přípravě výroby je možné označit jako CAD/CAM/CNC. I přes použití moderních způsobů výroby, sebou nese problematika obrábění tvarově složitých prostorových ploch mnoho úskalí. Jedním z nich je modelování tvarových ploch, jejich reprezentace, přesnost aproximace, a mnoho dalších aspektů samotného zobrazení. Důležitým faktorem ovlivňujícím výslednou kvalitu je projekce drah na tvarovou plochu jak je vidět na obrázku 3-1 a dále pak aproximace dle typu interpolace konkrétního stroje. Příklad výrazně rozdílných kvalitativních výsledků dokončeného povrchu je možné vidět na obr. 3-2. Jako další zásadní vliv lze označit obráběný materiál a jeho mechanické a fyzikální vlastnosti, typ nástroje a jeho řezivost, zvolené řezné podmínky a další členy soustavy SNOP. V neposlední řadě také zvolenou metodu optimalizace navržených drah nástroje a řezných podmínek, tedy tzv. optimalizace obrábění. Všechny zmíněné parametry ovlivňují povrchovou integritu obrobků, a jsou závislé na řadě parametrů celého výrobního procesu.

Bylo by možné zde vyjmenovat ještě další řadu faktorů relevantních pro dosažení požadovaného výsledku. Při zaměření se na optimální technologii pro obrábění tvarově složitých prostorových ploch, bude cílem dosáhnout požadovaných kvalitativních a

rozměrových požadavků v co možná nejkratším čase při minimálním opotřebení nástroje a dalších částí soustavy SNOP. A to při zohlednění všech relevantních faktorů.

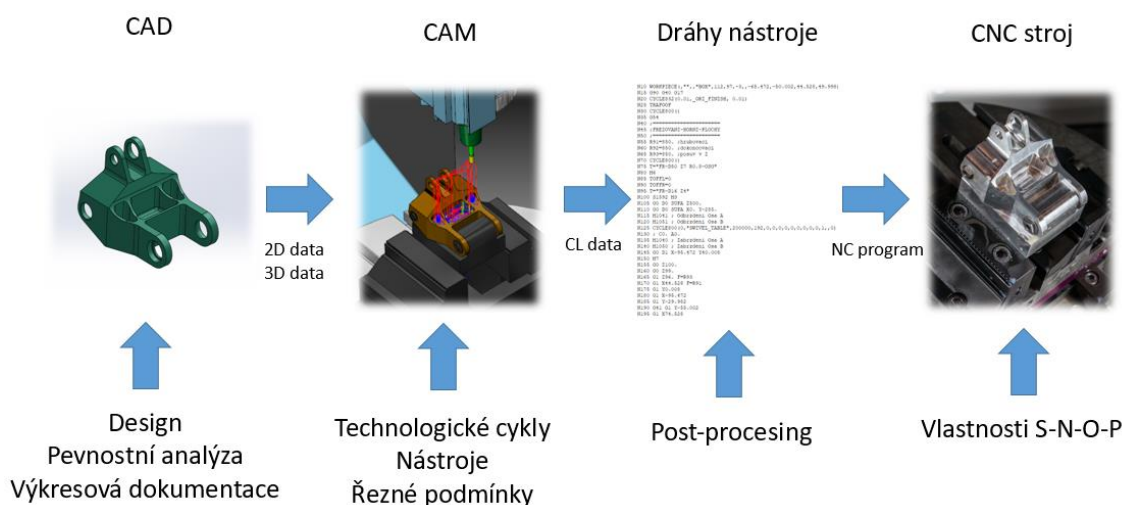


Obrázek 3-2 - Ukázka rozdílných kvalitativních výsledků vlivem aproximace

Jako jeden z velice efektivních způsobů, jak takového výsledku dosáhnout, je využít jeden z optimalizačních přístupů. Následující rozbor se zabývá principem optimalizačních přístupů a jejich řešením

3.1 Řetězec CAD/CAM/CNC

CAD/CAM/CNC označuje systém návrhu a přípravy výroby a výroby, jehož značná část se odehrává mimo obráběcí stroj, v počítačovém prostředí. Lze je chápat jako souhrn jednotlivých činností, které probíhají v daných rozhraních a provázejí výrobek od návrhu až po samotnou výrobu. Schéma CAD/CAM/CNC řetězce je zobrazeno obr. 3-3.



Obrázek 3-3 - Struktura výroby při použití CAD/CAM systému

- **CAD modul**

Tento modul zajišťuje přenesení nápadu nebo idejí do počítače. Jedná se o zanesení geometrie pomocí interaktivní formy do modelu. Tento model představuje základní databázi prvků, které byly na součásti vytvořeny, a je základem pro výrobu součásti. Modely jsou realizovány buď ve 2D, což znamená, že je k dispozici jen obrys součásti nebo ve 3D, což je jeden z prostorových modelů součásti. Dnes se nejvíce využívají 3D modely, které je možné přenést do CAMu, a tím usnadnit další fáze přípravy výroby. Nedílnou součástí CAD modulů jsou různé pevnostní analýzy nebo možnosti tvorby výkresové dokumentace a další nadstavbové funkce.

- **CAM modul**

CAM označuje systém přípravy dat pro CNC stroje. V této fázi přípravy výroby se definuje nulový bod, polotovar používané nástroje a nadefinují se jednotlivé technologické operace tak, aby byla součást obrobena dle požadavků. Jako vstupní data se využívají modely z CAD systémů, databáze nástrojů, obráběných materiálů, knihovny upínačů a další. Všechny tyto prvky zvyšují výslednou kvalitu generovaných dat. Poslední součástí CAM modulu je určitý způsob simulace a verifikace navržených drah nástroje. Dle použité úrovně je možné kontrolovat dráhy nástrojů, množství a přesnost odebraného materiálu nebo celkové pohyby v kinematice stroje a další. Zejména poslední dvě zmíněné možnosti pomáhají zachytit případné nedostatky drah nástroje ještě před obráběním na konkrétním stroji. Jedná se zde však pouze o kontrolu vlastních pohybů a nikoliv o jednotlivé vlivy vznikající při samotném procesu.

- **Postprocessing**

Postprocesor je softwarový převodník dat z CAM systému do dat, která jsou srozumitelná pro jednotlivé CNC stroje. Jedná se o převod jednotlivých drah nástrojů, řezných podmínek nebo využívaných cyklů do ISO kódu nebo jiných jazyků řídicích systémů pro konkrétní CNC stroj. Tato součást řetězce vypadá jako pouhý převodník mezi jednotlivými komunikačními prostředními, avšak jeho vliv na výsledek celého procesu je značný. Už samotný typ drah je důležitým faktorem. Kromě lineární interpolace, využívané na CNC strojích nejčastěji, je dnes také možnost využívat například spline interpolaci, a to dle možností konkrétního stroje. Díky tomu je možné výrazně zvýšit plynulost obrábění tvarových ploch a i celkovou efektivitu obrábění. Další velice důležitý faktor při překladi dat je např. způsob řízení víceosých pohybů, tzn., jaká osa se bude kdy a kde natáčet, neboť tyto data z CAM systému obsahují povětšinou pouze číselné hodnoty, ale fyzickou reprezentaci zajišťuje až samotný postprocesor. [15, 16]

- **CNC stroj**

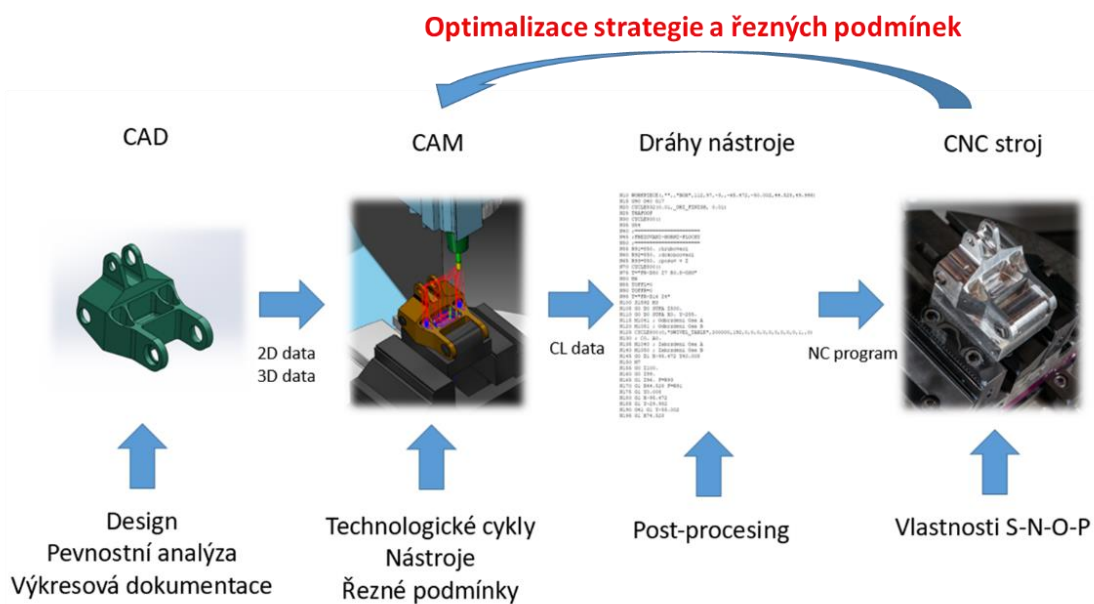
Jedná se poslední článek v řetězci, nikoliv však v důležitosti. CNC stroj je zásadním článkem celého řetězce a jeho vlastnosti výrazně ovlivňují celkový výsledek zvláště pak při obrábění tvarově složitých ploch. Základní soubor vlastností dává již samotný koncept stroje, dále pak jeho základní přesnost, dynamika a další vlastnosti ovlivňují kvalitu a rozměrovou přesnost dokončené plochy. Stroj je ovšem pouze jedna ze, součástí, která se významně podílí na kvalitě výrobků. Významný vliv mají použité nástroje, způsob upnutí a tedy celá soustava SNOB jak již bylo zmíněno. A je tedy nutné při návrhu technologie obrábění zohlednit všechny součásti celé soustavy.

3.2 Standardní optimalizace řetězce CAD/CAM/CNC

Vzhledem k tomu, že návrh celé technologie zvláště při obrábění tvarově složitých ploch není zcela triviální a pro správný výsledek je nutné zohlednit velké množství faktorů. Je zcela běžné, že navrhovaná strategie nemusí být optimální hned při svém prvním návrhu. V takovémto případě nastupuje proces optimalizace.

Pokud se hovoří o tom, že navrhovaná technologie není optimální, znamená to např., že není dosaženo požadované tvarové přesnosti nebo kvality dokončeného povrchu. Dále pak například může docházet k nadměrnému opotřebením nástrojů, jejich nečekané destrukci, nebo ke vzniku doprovodných jevů procesu obrábění jako jsou např. vibrace, teplotní ovlivnění obrobku vlivem tepla vzniklého při procesu obrábění a další. Tyto všechny faktory negativně ovlivňují jednak průběh celého procesu, jeho stabilitu a také cenovou náročnost.

Standardní způsob optimalizace se v praxi také označuje jako odladění technologie nebo výroba zkušební série. Všechny tyto pojmy však mají velice obdobný průběh. A tedy po prvotním návrhu technologie je vygenerován program, který je spuštěn na stroji. Při samotném obrábění se začnou projevovat nedostatky technologie, např. vznik vibrací, špatná kvalita povrchu a další. Reakcí je úprava drah nástroje změna nástroje nebo řezných podmínek nebo celá změna koncepce obráběcí strategie. Takto modifikovaný program je opět spuštěn na stroji a celý proces se opakuje. Až po díl vyrobený v požadované kvalitě. Příklad konvenčního přístupu optimalizace je na obrázku 3-4.



Obrázek 3-4 - Standardní způsob optimalizace výroby

Nevýhod celého tohoto procesu je celá řada. Prvně výroba je realizována na reálném stroji. A stroj tedy nevyrábí, což zvyšuje náklady na přípravu výroby. Dále pak může docházet k výrobě neshodných dílců a to jak vlivem chybných drah nástroje, tak například díky zalomení nástroje. Další díly je nutné poté vyrobít při optimalizaci životnosti nástrojů. Opět zde dochází k úpravě řezných podmínek nástrojů, jejich drah nebo změnám typů nástrojů. Všechny tyto faktory zvyšují celkové náklady obrábění.

Dalším úskalím takového způsobu optimalizace je, že některé strojírenské odvětví neumožňují výrobu najížděcích kusů. Např. je nemyslitelné při výrobě tělesa parní turbíny

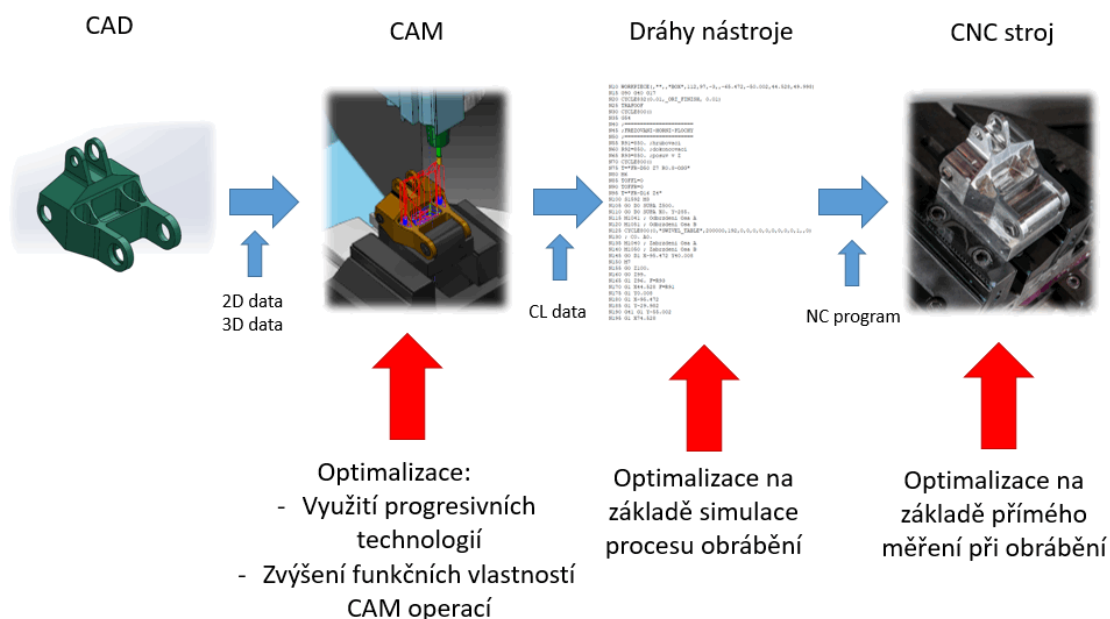
vyrobit jeden kus jako najížděcí a poté až kus, který bude kvalitativně v pořádku. Zde poté dochází, z důvodu bezpečnosti, ke snižování řezných podmínek, což zvyšuje celkové náklady.

Oproti moderním způsobům je dnes tento způsob velice neefektivní. Přesto je velice často využívaný zejména u typů výroby s menším objemem kusů. To je zejména z důvodu nižší úrovně pochopení celého procesu. Neznamená to, že by méně objemové typy výroby byly jednodušší nebo méně náročné. Ale hloubka poznání celého procesu je nižší vzhledem k nižší standardizaci celého procesu. S tím je spojen i převod znalostí do znalostních databází využívaných v jednotlivých částech návrhového řetězce. Mnohem větší důraz je zde kladen na kvalitní obsluhu, technologa a programátora, tedy lidskou složku celého procesu.

3.3 Moderní způsoby optimalizace

Moderní způsob optimalizace je velice široký pojem a zahrnuje velké množství optimalizačních metod, kterými je možno docílit požadovaného výsledku bez nutnosti odladění výroby na stroji. Metody je možné rozdělit dle toho, do jaké části řetězce CAD/CAM/CNC vstupují:

- Optimalizace řezných podmínek na základě přímého měření při obrábění
- Optimalizace řezných podmínek na základě simulace procesu obrábění
- Použití produktivnějších technologií zvyšujících efektivitu – HSC, HPC, HFC a další
- Zvýšení funkčních vlastností strategií použitých při přípravě obráběcí strategie



Obrázek 3-5 - Místa vstupu moderních optimalizačních metod

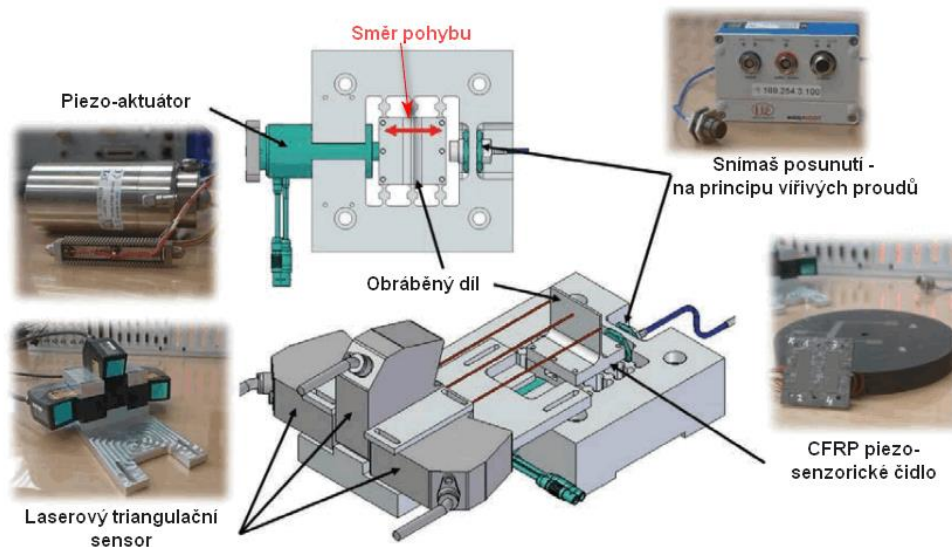
Jak je z rozdělení na obrázku 3-5 patrné, dle zvolené metody je možné optimalizovat proces technologie v různých místech řetězce. Je samozřejmé, že jednotlivé metody se od sebe liší a to jak principem co ovlivňují, tak také náročností zpracování a prostředky potřebnými k realizaci. Také je možné a v některých případech dokonce nezbytné, jednotlivé metody řadit za sebe a ověřit tak například teoretický výpočet vibrací reálným měřením a kompenzací.

3.3.1 Optimalizace na základě přímého měření při obrábění

Do této skupiny lze zařadit všechny způsoby optimalizace, které jsou přímo spojeny s měřením a následnou optimalizací přímo na stroji. Jedná se o směr vývoje zefektivňování obrábění tvarově složitých prostorových ploch použitím snímačů. Ty mohou být implementovány a to jak do nástrojů resp. upínačů nástrojů, tak také do upínačů obrobku. Na základě měření některého z přímých nebo doprovodných jevů obrábění dochází k úpravám řezných podmínek nebo aktivní kompenzaci zvoleného jevu. Takto vybavené komponenty umožňují identifikovat a následně také předejít situacím, které je možné označit za kritické (zlomení nástroje, vznik vibrací a další). Díky tomu je možné negativní projevy obrábění snížit nebo zcela omezit.

Ve většině případů jsou měřeny řezné síly jako přímý jev, vibrace jako negativní jev procesu obrábění nebo signál z akustické emise. Možné jsou i další způsoby, například zatížení motorů pro posuvové osy, ale výše zmíněné jsou nejrozšířenější. Na základě stanovení limitních hodnot, například řezných sil, jsou korigovány řezné podmínky nebo kontrolována destrukce nástroje jak bylo uvedeno ve v článku „In-Process Detection of Tool Failure in Milling Using Cutting Force Models“ [17].

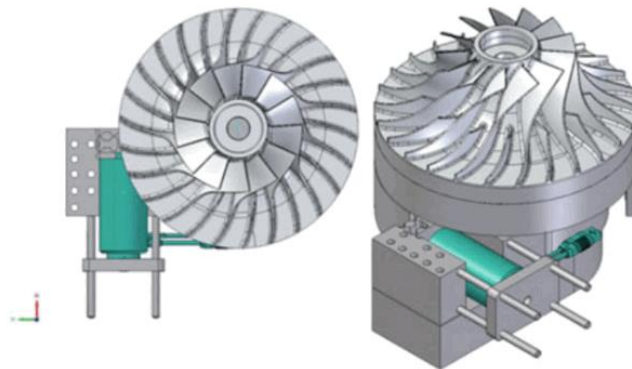
Ze zmíněných metod má největší praktické uplatnění měření a kompenzace přímo vibrací. Vzhledem k dnešnímu rozvoji elektroniky je možné tento jev sledovat hned několika fyzikálními principy. Díky tomu, že snímače pro určité fyzikální principy jsou dnes již dostatečně subtilní, aby bylo možné je zabudovat přímo do speciálních upínačů. A HW i SW pro zpracování a převod signálu má dostatečný výkon je možné nejen celý proces měřit, ale také aktivně kompenzovat.



Obrázek 3-6 - Schéma aktivního upínače kompenzujícího vibrace při obrábění tenkostěnných dílů [18]

Komplexní řešení nabízí práce ze zdroje [18] autorů MÖHRING, WIEDERKEHR, LEREZ, SIEBRECHT a SCHMITZ, kde je představen celkový koncept upínače aktivně odstraňující vibrace při obrábění tenkostěnných součástí. Práce je řešena na příkladu lopatkového kola. Celá sestava upínače je znázorněna na obr. 3-6. Na schématu upínače je vidět, že ke kompenzaci vibrací slouží piezo aktivní člen, který vyvozuje kmity o určité frekvenci posunutě, tak aby působil proti kmitům způsobeným obráběním. Díky tomu dochází k celkovému snížení vibrací. Ke snímání vibrací slouží několik principiálně odlišných snímačů. Tento koncept byl testován a

na základě výsledků jednotlivých snímačů měřících a kontrolních byl následně vyvinut reálný upínač, jehož návrh je vidět na obrázku 3-7. Díky aktivní kompenzaci je možné za stejných podmínek obrábění dosáhnout mnohem lepší drsnosti povrchu.



Obrázek 3-7 - Návrh reálného aktivního upínače pro lopatkové kolo [18]

Tento přístup má své uplatnění a je to jedna z možných cest optimalizace strategie při obrábění tvarově složitých ploch. Z citovaných zdrojů je patrné, že aktivní kompenzace negativních jevů obrábění na základě jejich měření nebo měření jiných veličin je velice efektivní způsob. Jedná se o poměrně sofistikovaný upínací systém, jehož nalezením je možné dosahovat výrazně lepších kvalitativních výsledků než bez aktivní kompenzace.

Nevýhodou celého konceptu je víceméně jednoúčelovost, a to jak z důvodu jedinečnosti konstrukce upínače, tak především díky rozmístění měřících senzorů. To není možné zvolit libovolně pro všechny typy součástí. Především pak ale samotné nalezení celého kompenzačního nastavení, jako např. optimální kompenzační frekvence není triviální úkol a vyžaduje simulaci celého procesu, řadu měření a vyhodnocení jednotlivých parametrů. Díky tomu je jeho uplatnění reálné především při velko-objemových typech výroby a to zejména tenkostěnných dílců. Pro takovéto typy výroby je možné věnovat odladění celého systému velké množství úsilí a času neboť při výrobě velkých sérií je možné takto ušetřit množství času i dalších nákladů spojených s nespolehlivostí celého procesu obrábění.

Dalším slabým místem jsou poměrně vysoké požadavky na vyhodnocovací SW a HW, který v reálném čase musí zpracovat velké množství dat.

3.3.2 Optimalizace na základě simulace procesu obrábění

U optimalizačních způsobů je možné simulace procesu obrábění označit jako trend v této oblasti. Jeho historie sahá již do minulosti kdy i prostou verifikaci drah nástroje a odebraného materiálu bylo možné označit za optimalizační proces. V současnosti jsou především díky rozvoji výpočetní techniky simulační procesy o mnoho dál. Díky simulačním modelům uvažujícím nejen samotné dráhy, ale i fyzikální limity celé soustavy SNOP je dnes možné simulovat vibrace při obrábění predikovat a měřit teplotní pole, nebo predikovat zbytková pnutí obrobeneho povrchu. Všechny dílčí způsoby směřují ke komplexnímu způsobu simulačních optimalizací nazvaných virtuální obrábění.

Pokud bychom se zaměřili na místo v řetězci, do něhož zasahují simulační procesy obrábění, jednalo by se o data za postprocesorem, tedy optimalizace na základě simulace CL dat nebo již přímo NC programu. Díky těmto simulačním metodám je možné provést

optimalizaci navržené technologie ještě před nasazením na reálný stroj, a tím ušetřit značné náklady.

Ve většině případů se jedná o samostatně fungující SW využívající model a data z řetězce CAD/CAM/CNC, který na základě analýzy parametrů obrábění a vnitřních algoritmů provede úpravu řezných podmínek nebo rozložení drah nástroje. V některých případech je optimalizační algoritmus postaven jako modul některého konkrétního CAD/CAM systému. V případě obou realizací se ovšem jedná o optimalizační algoritmus zaměřený jen na určitou skupinu obrobků. Důvodem je nutnost poměrně rozsáhlé znalostní databáze. Na základě parametrů kontroly a informací ze znalostní databáze je poté optimalizace realizována. [1,19]

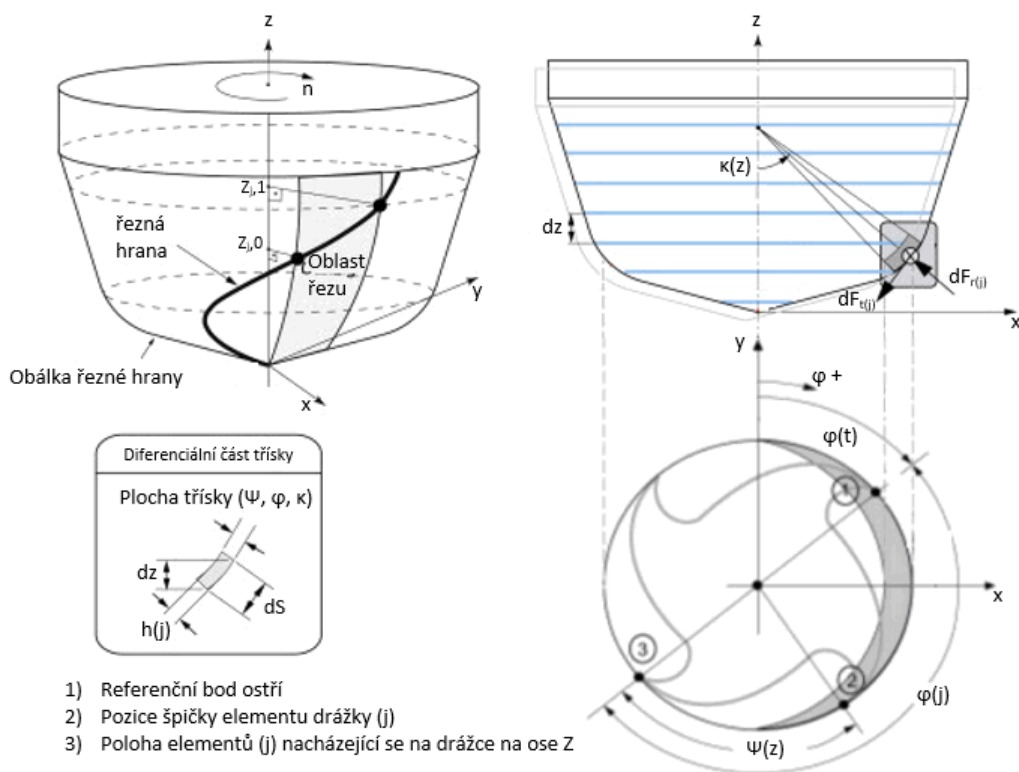
Změna rozložení drah nástroje může být pro jednodušší operace a optimalizační procesy řešena například změnou bočního kroku pro frézování. Ve složitějších případech pak úpravou drah, např. pro tvarově složité prostorové plochy změnit rozložení drah za účelem snížení vibrací.[1,19]

Jako jednodušší způsob je možné označit přístupy využívající korekci řezných parametrů na již generovaných CL datech nebo NC programu. Tento způsob lze najít také v komerčních SW, jako jsou Vericut-Optipath nebo Computer Science. Optimalizace probíhá v několika krocích, z nichž nejdůležitějším je analýza záběrových a řezných podmínek. Na základě této analýzy je poté vypočítáno zatížení nástrojů a z nich provedena optimalizace posuvové rychlosti a dalších řezných parametrů.[1]

Důvodem využívání takového způsobu je především měnící se přídavek podél tvarových ploch. Díky změnám tvaru a ve většině případů nerovnoměrnosti přídavků dochází ke kolísání zatížení. S tím je spojen vznik negativních doprovodných jevů. Díky analýze zatížení při průchodu jednotlivých drah je možné v takovýchto místech upravit řezné podmínky a tím dosáhnout kvalitnějšího výsledků. Základním parametrem pro tento druh optimalizace je posuv nebo posuvová rychlost, a dále je pak možné upravovat řeznou rychlost resp. otáčky vřetena.[19]

Jedna ze zmíněných metod byl v minulosti řešena také na KTO a to v disertační práci doktora Hamouze [1]. Tato práce se zabývá návrhem a ověřením generátoru optimalizačních drah pro obrábění zápustkových forem. Cílem práce bylo navrhnout vhodný algoritmus a strukturu znalostní databáze. Nakonec byl celý koncept zpracován jako softwarová aplikace. I když se tato práce zabývá jiným typem optimalizace, než která bude řešena v této praktické části, budou některé její pasáže využívány jako cenný zdroj informací zejména pro výpočty a návrh metodiky.

Komplexnějším typem SW sloužícího pro optimalizace jsou simulační algoritmy fyzikálních a mechanických procesů a operací ve virtuálním prostředí. Jejich snaha je lepší porozumění těmto procesům a jejich využití pro zefektivnění obrábění zejména pak pro tvarově složité prostorové plochy.



Obrázek 3-8 - Diferenciální popis plochy na nástroje, odřezávané třísky a s tím spojené zatížení nástroje [20]

Vlivem analytického a experimentálního zkoumání tvorby třísky a doprovodných jevů procesu obrábění jsou tvořeny algoritmy pro jednotlivé obráběcí metody. Pomocí modelovacích technik jsou analyzovány například změny objemu odebírané třísky a axiální a radiální hloubky řezu, tepelné jevy doprovázející obrábění nebo vibrace vzniklé odebráním materiálu. Na základě těchto informací jsou pak následně vypočítány řezné síly točivý moment a další parametry využívané k optimalizaci. Optimalizační proces má za cíl navrhnout parametry obrábění tak, aby došlo k co nejefektivnějšímu úběru materiálů za respektování fyzikálních možností celé soustavy SNOP.

Jako jednu z hlavních výhod simulačních analýz je vysoká přesnost výpočtu celého procesu obrábění. Tento fakt je zdokumentován jako částečný výstup v článku „Prediction of Feed-Rate Slowdowns in Precise Micromilling Processes“ [21], kde je výrazný rozdíl mezi simulací drah v CAM systému a analýzou posuvů. Hodnoty simulace z CAM systému jsou více než poloviční oproti simulační analýze a následnému reálnému obrábění. Aby však optimalizační algoritmy simulačních technik fungovaly správně, vyžaduje systém kvalitní matematické modely obráběcích procesů, dynamické charakteristiky a kinematiku strojů a matematický popis nebo geometrický model využití řezné části nástroje pro optimalizované dráhy a to v diskretních intervalech.

Příklad diskretního popisu obecného tvarového nástroje včetně ukázky zatížení elementem třísky je na obr. 3-8. Detailní rozbor je pak uveden ve zdroji [20] včetně matematického aparátu jeho využití pro třísové obrábění. [19,20]

Vzhledem k rozsáhlosti optimalizačních metod resp. algoritmů, které jsou pro optimalizaci využívány, není možné v této práci detailně rozebrat každý případ. Z tohoto důvodu následující

rozběr obsahuje pouze analýzu nejčastějších jevů a v obecné rovině uvádí optimalizační metodu každého z nich.

3.3.2.1 Optimalizace zatížení stroje a nástroje

Zatížení stroje a nástroje jsou limity, které určují rozsah řezných a posuvových rychlostí, hloubku a šířku řezu a mnoho dalších parametrů obrábění jako např. vyložení nástroje. Aby se zabránilo přetížení, je zapotřebí kontrolovat a optimalizovat zvolené řezné parametry na základě krouticího momentu a výkonu obráběcího stroje. Na velikost krouticího momentu má vliv především tangenciální řezná síla. Tato složka má spolu s hodnotou řezné rychlosti dominantní vliv také na výkon obráběcího stroje. Na základě této síly je možné vypočítat jak krouticí moment na nástroji z rovnice (1), tak také výkonové zatížení stroje (2). [19]

$$M_k = F_t \times \frac{D_n}{2} \text{ [Nm]} \quad (1)$$

$$P_{PE} = \frac{F_t \times v_c}{60 \times 10^4} \times \mu \text{ [kW]} \quad (2)$$

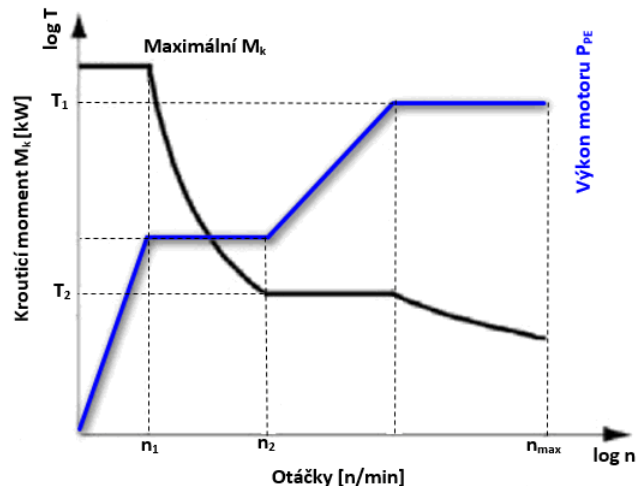
Oba limity musí být kontrolovány zároveň. Pro operaci frézování je ještě nutné zahrnout úhlové pootočení ϕ nástroje, neboť dle pozice břitu vůči obrobku se ještě jednotlivé parametry mohou měnit, viz rovnice (3) a (4) a hodnoty $M_k(\phi)$ a $P_{PE}(\phi)$ nabývají svých lokálních minim a maxim. [19]

$$M_k(\phi) = F_t(\phi) \times \frac{D_n}{2} \text{ [Nm]} \quad (3)$$

$$P_{PE}(\phi) = \frac{F_t(\phi) \times v_c}{60 \times 10^4} \times \mu \text{ [kW]} \quad (4)$$

Při optimalizačních procesech je tedy nutné, aby výpočtový algoritmus zohledňoval maximální možný úběr materiálu a to bez přetížení stroje i nástroje. Na základě znalostí o procesu obrábění je tedy možné zvolit pro konkrétní nástroj, stroj a obráběný materiál optimální podmínky.

Zároveň je při optimalizaci nutné, aby algoritmy využívaly znalostních databází, do kterých jsou zahrnuty informace o výkonových charakteristikách jednotlivých motorů. V současné době se asynchronní motory hojně využívají v koncepci elektro-vřeten pro otáčení nástroje. Tyto motory mají svojí výkonovou charakteristiku. Její příklad je uveden na obr. 3-9. Z výkonové charakteristiky je možné vyčíst, že očekávaný krouticí moment motoru není stejný pro celé spektrum otáček vřeten. Naopak s rostoucími otáčkami hodnota krouticího momentu klesá. Znalost těchto charakteristik je pro optimalizaci nezbytná, neboť algoritmus musí při návrhu řezných podmínek zohledňovat výkonovou charakteristiku daného motoru a volit např. hodnoty posuvu nejen dle zatížení vzniklého od obrábění, ale zároveň dle aktuálních otáček vřeten. [19]



Obrázek 3-9 - Výkonová charakteristika včetně obráběcího stroje

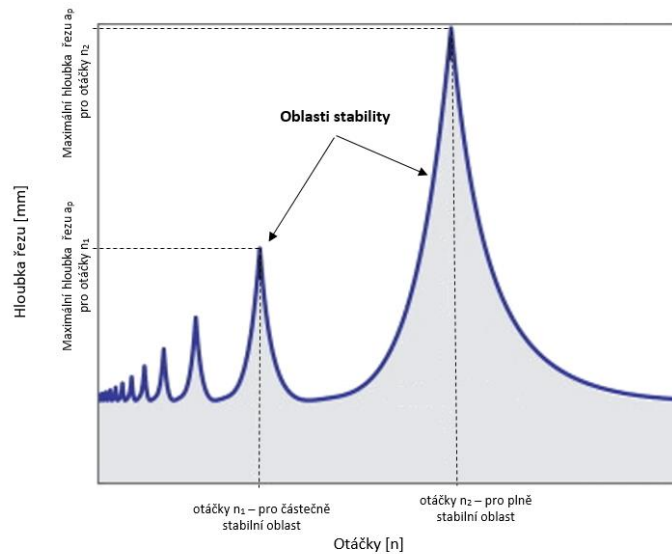
Volba podmínek optimalizačním algoritmem nesmí způsobovat další negativní jevy (vibrace apod.). Zde je nutný vstup dalších parametrů, jako je délka vyložení nástroje nebo zaoblení ostří. Pokud se přiblíží např. hodnota přísuvu pod minimální hranici danou právě zaoblením ostří je možné místo snížení řezných sil dosáhnout naopak jejich nárůstu. Proto nejen maximální, ale také minimální hodnoty sledovaných a korigovaných parametrů jsou důležité pro správnou optimalizaci procesu obrábění.

Optimalizace zatížení může probíhat, jak na CL datech a tedy v průběhu postprocessingu tak také již při návrhu strategie v CAM systému.

3.3.2.2 Optimalizace vibrací

Vznik vibrací je doprovodným jevem procesu obrábění. Jedná se jev, který vzniká jako reakce a odezva na buzení a je způsoben nedostatečnou dynamickou tuhostí jednoho nebo více členů soustavy SNOP. V základu rozeznáváme tři základní typy vibrací dle buzení. Volné a buzené vibrace, jejichž vznik je ve většině případů také spojen s obráběním, ovšem není možné zcela ovlivnit strategií obrábění, ale spíše jednotlivými členy SNOP respektive jejich dynamickými parametry. Jako příklad buzených vibrací doprovázejících každý proces frézování, můžeme uvést kmitání vznikající postupným zajižděním břitů do obrobku. Z pohledu optimalizace strategie obrábění jsou však důležité především samobuzené vibrace. Jejich vznik je spojen s interakcí mezi nástrojem a obrobkem resp. jako odezva vzájemného pohybu a silového působení mezi nimi. [22]

Základními řeznými parametry, které vznik a velikosti samobuzených vibrací ovlivňují, jsou řezná rychlost resp. otáčky nástroje a záběrové parametry tedy hloubka a šířka řezu. Při optimalizačních procesech zabývajících se vibracemi dochází dle zvoleného algoritmu ke změnám řezných podmínek, tak aby se pro aktuální pozici nástroje nacházeli v stabilní oblasti. Pro optimalizovanou strategii jsou dle algoritmu a znalostních databází obsahujících informace o limitech silové zátěže nástrojů, točivých momentů a dalších omezujících parametrů vypočítány řezné podmínky. Další fáze optimalizace využívá různých diagramů vzájemného působení jednotlivých parametrů a posouvá řezné podmínky do stabilních oblastí.



Obrázek 3-10 - Diagram stability pro parametry hloubka řezu a otáčky se dvěma odlišnými oblastmi stability

Příklad takového diagramu je zobrazen na obrázku 3-10, kde jsou zobrazeny dvě oblasti, částečně stabilních a plně stabilních hodnot pro vzájemné působení hloubky řezu a_p a otáček dle navržených limitů. Z takovýchto podmínek se optimalizační algoritmus snaží vybrat co možná nejvyšší hodnoty. Tyto hodnoty ovšem nesmí posouvat zase jiné parametry mimo oblast stabilního obrábění. Celý algoritmus pak takto vypočítá a upraví všechny ovlivnitelné parametry dle matematického modelu dynamického chování celého procesu.[22,23]

Obdobně jako tomu bylo pro minulý způsob optimalizace, je tento přístup možné uplatnit, jak v CAM systému tak také na CL data nebo NC program. Pokud se jedná o použití v CAM systémech, to bývá řešeno takřka výhradně specializovaným modulem sloužící pro optimalizaci určité skupiny výrobků například lopatkových kol. Optimalizace CL dat nebo NC programu probíhá většinou v samostatném SW. Zde jsou načteny další data většinou z CAD nebo CAM části řetězce a dle těchto informací algoritmus upraví výslednou strategii.

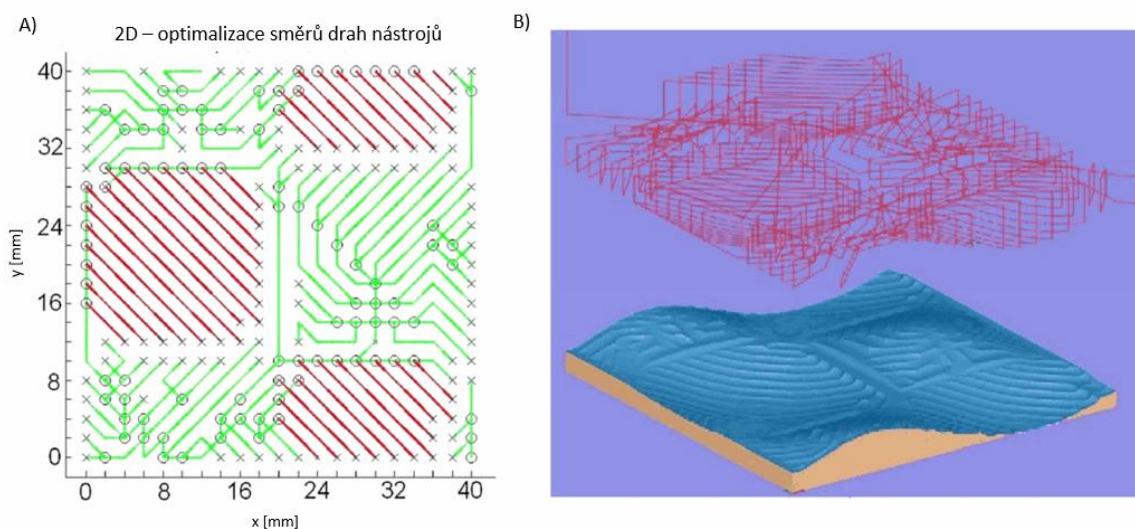
3.3.2.3 Optimalizace drah nástroje

Optimalizace drah nástroje je jedním z vysoce sofistikovaných přístupů a jeho využití vyžaduje kvalitní algoritmy a rozsáhlé znalostní databáze konkrétního procesu obrábění. Potřeba optimalizovat kromě řezných parametrů i samotné dráhy nástroje vznikala v návaznosti na již zmíněné metody. Vzhledem k tomu že standardní operace v CAM systémech při generování drah využívají pouze geometrii těles je nutné dráhy dále optimalizovat.

Jsou-li využity např. optimalizace posuvů na základě zatížení, vlivem měnící se geometrie obrobku a přídavku obrábění může docházet k velice kolísavým řezným podmínkám, které ovšem splňují optimalizační kritéria metody kontroly zatížení. Původní algoritmy jsou sice schopné průběh posuvů vyhladit, ovšem ve většině případů je toho docíleno snížením hodnot v kritických místech. Tímto filtrováním dojde k úpravě bez vzniku např. vibrací ovšem za snížení efektivity celého optimalizačního procesu.[19]

Na základě těchto zjištění bylo třeba, aby optimalizační algoritmy reagovaly a upravovaly dráhy dle více kritérií. Nejen samotné silové zatížení, ale výsledná kvalita dokončené plochy a doba celé operace dala vzniknout tzv. Multi-objektové optimalizaci. Tento způsob zahrnuje

několik optimalizačních kritérií, které vzájemně kombinuje. Každému kritériu je přiřazena váha a optimální cesta je hledána jako průnik jednotlivých kritérií. Tento kompromis je následně považován za optimální dráhu pro konkrétní řešení. [19,24]



Obrázek 3-11 - Optimalizace drah nástroje pro prostorovou tvarovou plochu: A) úprava drah ve 2D; B) prostorové dráhy a 3D model odebraného materiálu [24]

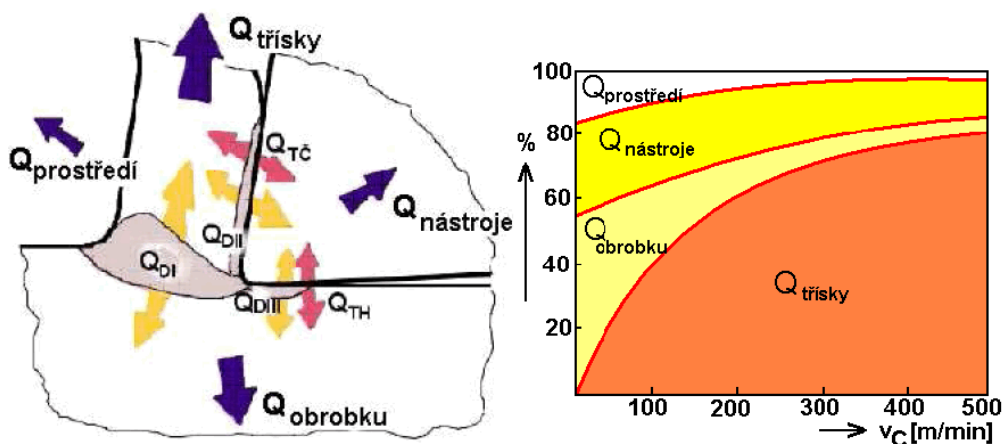
Jak již bylo zmíněno, tak generování drah v současných CAM systémech probíhá na základě geometrických informací daného modelu. Pro takto generované dráhy ovšem není využíváno mechanických, zejména potom dynamických vlastností chování procesu frézování. Optimalizace drah může mít opět různá praktická řešení. Jedním z nich je přidání drah do míst, kde dochází k přetížení nástroje. Řešení přidáním drah v takovýchto místech, kde snižování řezných podmínek není efektivním způsobem, může sice prodloužit celkovou dráhu obráběné součásti, ale díky využití vyšších posuvů je výsledný čas obrábění kratší. [19,24]

Jako další příklad je uváděna metoda optimalizace řešená v práci autorů LAZOGLU, MANAV, MURTEZA OGLU [24]. Základním předpokladem je, že současné CAM systémy využívají ke generování drah nástrojů pro tvarové prostorové plochy vždy pouze jeden způsob řízení směru nástroje (jedním směrem, tam a zpět, spirálou, atd..). To je ale pro obecné tvarové plochy nevhodné a může díky tomu docházet i k velice výraznému nárůstu řezných sil. Autoři navrhují algoritmus, který dle minimálního silového zatížení generuje dráhy různým způsobem pro různé oblasti. Příklad takovéto plochy je uveden na obr. 3-11. V části A jsou zobrazeny 2D dráhy. Je zde patrné, že každá oblast využívá jiného směru generování drah. Na části B je pak takto optimalizovaná dráha ve 3D a výsledný model odebraného materiálu. Díky takovéto optimalizaci je možné snížit řezné síly a dosáhnout tak nižšího zatížení nástroje. Maximální hodnota zatížení je důležitá z pohledu hrubování. Při zaměření na dokončování jsou zásadní především výrazné skokové změny zatížení.

Při zaměření se opět na místo vstupu optimalizace drah nástroje do řetězce CAD/CAM/CNC, jedná se ve většině studované literatury o samostatně stojící SW pracující s daty především z CAD modulu a CL daty nebo ISO programem. Doplnující informace např. pro Multi-objektovou analýzu jako jsou vyložení nástroje, zaoblení ostří a další je možné přenášet z CAM modulu. Vstup přímo do CAM modulu nebyl nalezen a to zejména díky vysokým požadavkům na knihovny a znalostní databáze, které žádný současný CAM modul neobsahuje.

3.3.2.4 Analýza a optimalizace mikroskopických jevů

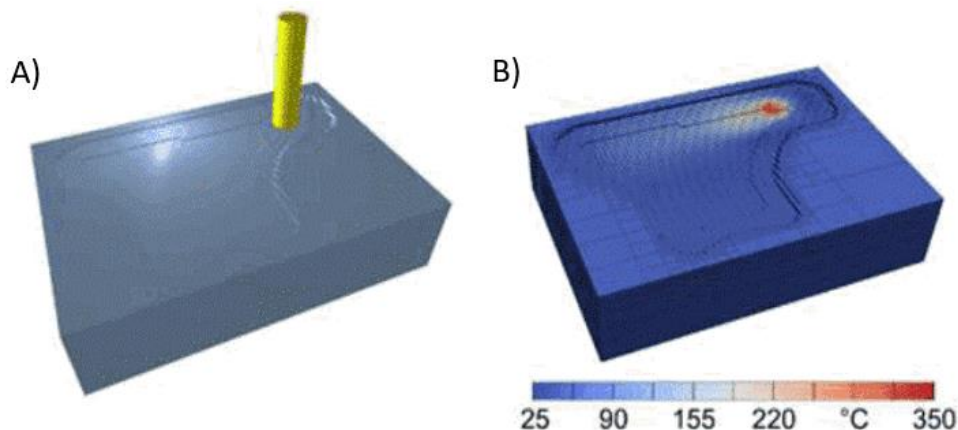
Mikroskopické jevy jako jsou např. teplotní pole, zbytkové napětí a mnoho dalších jsou běžně přímo spojené s procesem obrábění. Jedná se o doprovodné jevy, které obráběcí proces běžně vytváří a ovlivňuje. Jejich modelování a predikce simulačními technikami je v současnosti jedním z trendů, který se snaží pokrýt především Multi-objektová analýza. Jak již bylo zmíněno, současné metody simulací se zabývají různými mikroskopickými jevy, ale za nejčastěji v literatuře zmiňovaný je možné považovat teplo, a tak další rozbor bude zaměřen na modelování teplotních jevů při obrábění.



Obrázek 3-12 - Teplotní bilance procesu obrábění [26]

Vliv tepla a jeho vzniku při obráběcích procesech je velice důležitý, neboť pro některé technologie se až 90% energie přemění na teplo. Odvod tepla z místa řezu je realizován celou soustavou SNOP jak je vidět na obr. 3-12 a rozdělení odváděného tepla primárně ovlivňuje řezná rychlost.

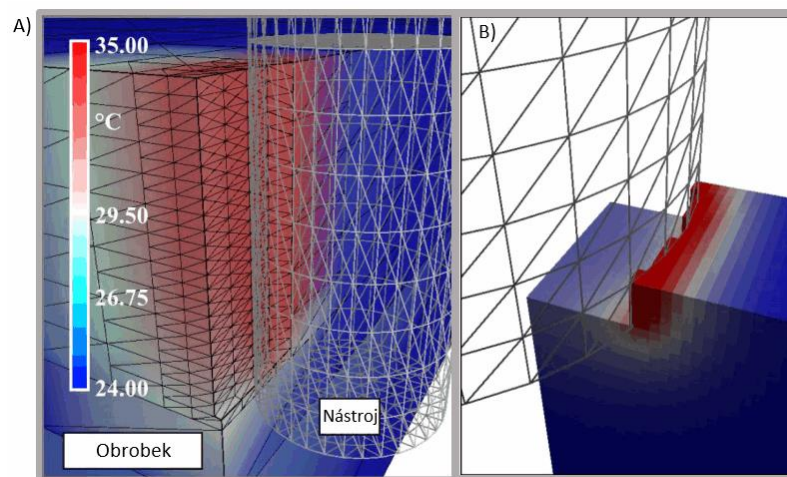
Tepelné působení na celou soustavu SNOP nám sebou nese celou řadu doprovodných vlivů, které do značné míry ovlivňují spolehlivost celého procesu jako teplotní zatížení nástroje, teplotní šoky způsobené chlazením a mnoho dalších. Kromě spolehlivosti může dojít vlivem např. teplotních deformací také k poškození a znehodnocení obrobku. Součásti, u kterých tento problém nastává často, jsou tenkostěnné díly především z leteckého a automobilového průmyslu. Na základě potřeb zvýšit spolehlivost vznikla potřeba simulovat tyto jevy ještě před samotnou výrobou.



Obrázek 3-13 - Simulace obrábění termických jevů: A) simulace drah nástroje a odstranění materiálu, B) Teplotní pole obrobenej plochy [27]

Díky modelování je možné predikovat vývoj tepla v jednotlivých částech obráběného dílu, ukázka modelování tepelných jevů je na obrázku 3-13. Na základě takovéto simulace pak lze upravit strategii obrábění, nebo jinak kompenzovat obráběcí proces např. použit jiného typu chlazení nebo použitím jiného nástroje. Díky tomu je možné docílit lepšího rozložení teplotního pole, tak aby bylo co možná nejhodnější vzhledem k tvarovým odchýlkám součásti.

Matematický model je vytvořen na základě silového zatížení, tvaru vznikající třísky, plochou kontaktu mezi břitem a obrobkem a fyzikálních vlastností používaných materiálů. Díky znalostem o jednotlivých metodách obrábění je možné vypočítat odpovídající energii vzniklou řezáním. K těmto druhům modelování se většinou využívá MKP simulací. Abychom mohli postup tepla při obrábění reprezentovat je MKP analýza kombinována s dekompozičním nebo CSG zobrazováním, čímž vzniká hybridní forma simulace. Tímto tématem se zabývá článek z pramene [27], kde je popsán způsob simulace a výpočet a vyjádření odebraného materiálu využívající právě hybridní simulaci kombinující MKP a CSG, viz obrázek 3-14.



Obrázek 3-14 - Ukázka modelování teplotních jevů při obrábění pomocí MKP: A) teplo dodané do obrobku vlivem obrábění, B) Simulace teplotního pole při řezání (stupnice nereprezentuje teplotu řezání ale rozsah zobrazovaných hodnot) [28]

Simulační modely je ovšem potřeba kalibrovat, k tomu slouží experimenty sledující vznik tepla vlivem mechanického působení nástroje. Jako jeden z příkladů využití simulací pro predikci obrábění je možné uvést článek ze zdroje [28], který se zabývá ověřením modelu termomechanického namáhání tenkostěnných dílů. Jeho výsledek ukazuje možnost predikce teplotního pole vlivem obrábění zkušebních tenkostěnných žeber. Model se ovšem zabývá pouze takto idealizovaným modelem a jeho obecné využití pro obecné tvarové plochy je třeba ověřit celou řadou dalších experimentů.

Obdobným způsobem fungují simulační procesy pro další mikroskopické jevy procesu obrábění, jako jsou např. zbytkové pnutí pro broušení. Tento způsob simulace je ve všech studovaných zdrojích postaven mimo CAM modul a funguje jako samostatný SW.

Jednotlivé zobrazovací techniky simulačních metod jsou uvedeny v příloze 2, a to včetně nalezených literárních pramenů s praktickými příklady použití.

Vzhledem k omezenému použití se optimalizační techniky založené na analytickém popisu používají pro sofistikované moduly např. optimalizaci strategie obrábění lopatek nebo lopatkových kol kulovým nástrojem, kde jsou všechna data analyticky popsána.

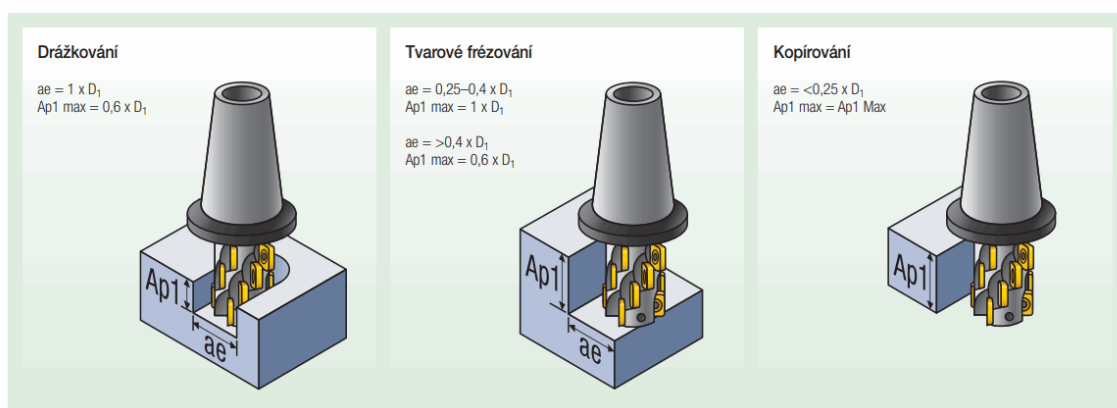
3.3.3 Použití produktivnějších technologií zvyšujících efektivitu – HSC,HPC, HFC a další

Princip metod obrábění jako jsou HSC (high speed cutting - vysokorychlostní obrábění) nebo HPC jsou známy již řadu let. Praktické využití těchto metod a především začlenění přímo do procesního řetězce CAD/CAM/CNC je ovšem aktuální problematikou několika posledních let. Cílem následujícího textu není rozbor samotných metod, jako jsou HSC,HFC a další. Jejich teoretický základ byl zkoumán již více, jak před 20 lety a výzkum určitých vlastností jednotlivých metod byl realizován také na KTO. Probíhal zde výzkum zaměřený na HSC obrábění viz zdroj [29], který se zabýval vysokorychlostním obráběním vysoce legované oceli o tvrdosti 56 HRC. Detailně, pak morfologií tvoření třísky a silovým zatížením. Cílem dalšího rozboru bude spíše využití produktivních metod obrábění především v CAM systémech a jejich využití ke zvyšování efektivitu obrábění tvarově složitých prostorových ploch.

V minulosti byly progresivní metody využívány především jako samostatný proces. Tento trend byl dán stavem poznání a techniky. V současné době kdy výpočetní i řídicí technika dosahuje dostatečných výkonů, je možné začlenit tyto metody i do operací v CAM systémech, využívaných pro obrábění tvarově složitých prostorových ploch. Tímto je také definována část řetězce, ve které je možné optimalizovat proces obrábění využitím produktivních metod obrábění. Jedná se buď o úpravu drah spojenou s využitím nějaké ze zmíněných metod, ale častěji o celou operaci založenou na takovémto principu.

Tyto operace se dnes již běžně vyskytují. Příkladem operace využívající produktivní metod může být iMachining ze SW SolidCAM. Jedná se operaci využívající generování drah na základě kontroly opásání resp. střední tloušťky třísky. Rozdílný přístup oproti klasickým operacím je hned několik. Z pohledu produktivních metod obrábění je to právě využití principu HPC. V porovnání s konvenčními metodami dochází při HPC obrábění ke snížení mechanického a také tepelného zatížení nástroje. To je zapříčiněno zkrácením doby kontaktu nástroje a materiálu. Díky tomu je možné využívat vysokých posuvových a řezných rychlostí, hodnot přísuvu a vyšší hloubky řezu, a to až po limit řezné hrany nástroje. Oproti konvenčním technologiím je tak možné dosáhnout vyššího objemu odebraného materiálu v kratším čase a nižšího opotřebení nástroje. [30,31]

Veškeré záběrové a řezné podmínky je nutné přizpůsobit vždy konkrétnímu typu aplikace, jak je patrné na obr. 3-15. V moderních CAM operacích jsou požadavky HPC dále kombinovány s dalšími funkčními přístupy zefektivňování drah za účelem zvýšení např. životnosti nástroje nebo snížení brzdění posuvů a další. Tyto přístupy budou popsány v následující kapitole 3.3.4.



Obrázek 3-15 - Hloubka a šířka řezu pro různé typy aplikace HPC obrábění [32]

Jako další příklad využívání moderní produktivních strategií obrábění v CAM systémech může být používání HFC obrábění. Zde sice nejsou samostatné operace používající tuto strategii, ale CAM systémy umožňují velice přesně definovat geometrii nástroje, a také upravit dráhy tak aby nedocházelo ke zbytečnému brzdění nástroje a tedy snižování efektivity celého procesu. Příkladem mohou být strategie využívající generování drah po spirále a to i na tvarové prostorové plochy.

Nejen samotné použití produktivních strategií, ale také jejich dopad na dokončené kvalitativní parametry jsou zásadní. Pokud bychom chtěli využívat nějakou z produktivních strategií pro dokončování je zásadním vlivem kvalita a rovnoměrnost dokončeného povrchu, jak se můžeme dočíst v literatuře např., ze zdroje [31] pro HFC obrábění vykazuje dokončená plocha výraznou anizotropii v jednom směru. To může být způsobeno s největší pravděpodobností třením hřbetu nástroje o dokončenou plochu. Je proto důležité si uvědomit, že využití produktivních strategií má své limity.

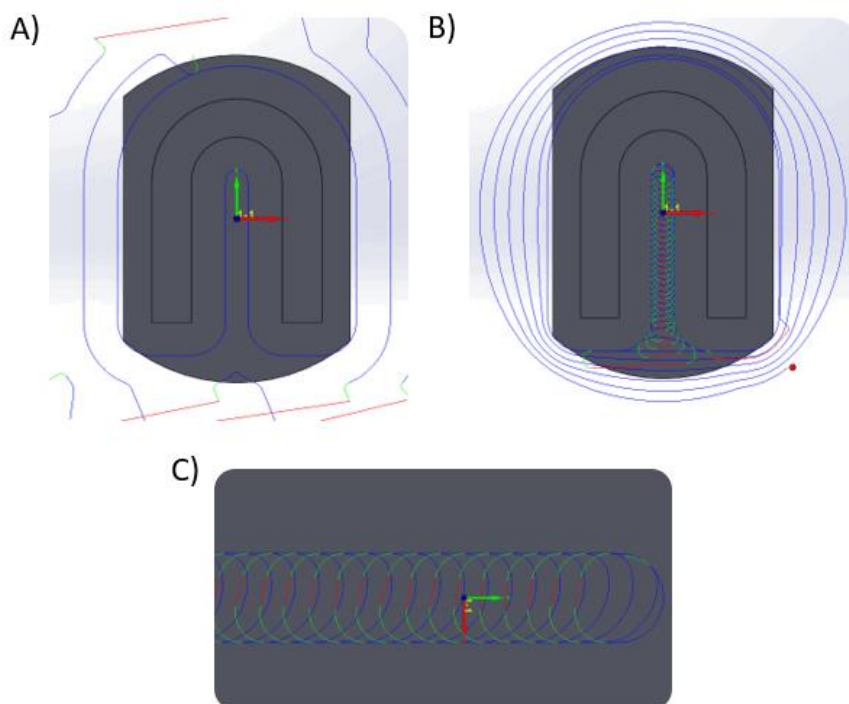
Z pohledu optimalizace procesu obrábění je využití těchto strategií velice vhodné neboť je možné optimalizovat technologii již v CAM systému, a tedy bez nutnosti použití dalších optimalizačních algoritmů a procesů. V kombinaci s vhodnými funkčními vlastnostmi tvoří produktivní strategie velice vhodný optimalizační aparát. Jejich využití především při hrubování a to zejména u tvarově složitých prostorových ploch je dnes velice hojně využíván přístup.

3.3.4 Zvýšení funkčních vlastností strategií

Posledním typem optimalizačního přístupu je zvýšení funkčních vlastností jednotlivých strategií. Tento pojem může zahrnovat různé algoritmy, ale v zásadě se jedná o vhodné úpravy drah nástrojů s využitím kontroly zatížení. V praxi jsou nejčastěji využívány adaptivní dráhy nástrojů a to v kombinaci s tvarem tzv. morfující spirály nebo trochoidním tvarem drah. Obě zmíněné vlastnosti přinášejí určité benefity pro zvyšování efektivity a jejich kombinací vzniká velice silný aparát, kterým je možné dosáhnout požadovaných optimalizačních výsledků. Využití tvaru morfující spirály při generování drah nástroje je v současnosti umožněno především díky vysokému výpočetnímu výkonu počítačové techniky, obdobně jako generování drah adaptivním způsobem.

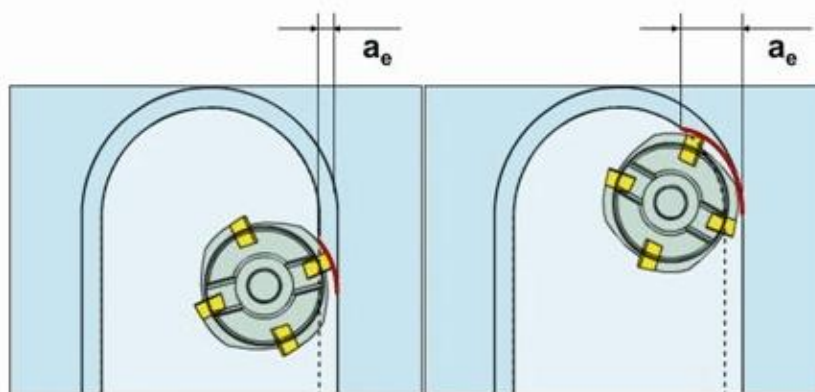
V případě generování drah ve tvaru morfující spirály nebo trochoidy nástroj nevykonává lineární dráhy, ale dráhy jsou složeny především ze samých kruhových drah. Díky tomu, že charakter drah je zcela odlišně koncipován oproti konvenčním drahám, nedochází v místech změn směru k brzdění a snižování posuvů. Naopak při takovémto způsobu pohybu nástroje je sice celková dráha i několikanásobně delší než u klasické strategie, ale pohyb je mnohem plynulejší. Pokud zmíněné principy využijeme s metodami, které využívají vyšších posuvových rychlostí než je obvyklé jako např. HFC nebo HPC, je možné docílit výrazné časové úspory. Rozdílný výsledek generovaných drah je zobrazen na obrázku 3-16 A) a B).

V případě morfující spirály jsou dráhy přizpůsobeny tvaru součásti tak, aby nedocházelo k výkonovým výkyvům. Střed spirály bývá umístěn v přibližném středu obráběného prostoru. V případě, že není možné spirálu plně rozvinout např. v drážkách nebo kanálech, dochází k přechodu tvaru drah na trochoidní. Trochoida je využívána pouze pro místo kontaktu nástroje s obráběnou plochou a pro přiblížení a oddálení nástroje. V místech přejezdů jsou využívány co nejkratší dráhy. Oba principy jsou zobrazeny na obrázku 3-16 B).



Obrázek 3-16 - A) Dráhy bez optimalizačních funkcí B) Dráhy upravené na základě morfuující spirály, trochoidy a adaptivního generování C) Detail trochoidních drah

Druhou funkční vlastností je generování drah adaptivním způsobem. Operace označované za adaptivní byly v CAM systémech již v minulosti. Ovšem adaptivní reakce, resp. kritéria využívaná pro rozhodovací blok, se v posledních několika letech proměnila. V minulosti byla jako adaptivní operace považována taková, která minimalizovala počet přejezdů efektivnějším rozložením drah. Dráhy nebyly generovány vždy např. zleva doprava po hladinách, ale interní algoritmus zvolil oblasti tak, aby jejich obrábění bylo vždy v co možná nejkratším čase. Jako takovou operaci je možné uvést např. Roughing ze SW CATIA. Takto koncipované operace jsou dnes stále k dispozici v CAM systémech.



Obrázek 3-17 - Změna řezného parametru a_e vlivem tvaru součásti [33]

Současnost adaptivního řízení posunula tento pojem dál. Snaha o generování drah s co možná nejmenším počtem přejezdů zůstala, ale moderní algoritmy splňující pojem adaptivního řízení obsahují mnohem více kritérií. Jedním ze základních kritérií současného adaptivního řízení je konstantní zatížení nástroje. Možností kontroly zatížení je několik např.

dle objemu odebírané třísky nebo dle výpočtu na základě řezných podmínek a fyzikálních vlastností materiálu.

Důležité je chování algoritmu v případě, že by mělo dojít k přetížení. Příklad změny jednoho z řezných parametrů je vidět na obr. 3-17, kde vlivem tvaru obráběné součásti dochází ke změně řezného parametru a_e . Zde je možné opět reagovat několika způsoby. Nejjednodušší je úprava řezných podmínek. Takto se chovají i některé další optimalizační aplikace, ovšem k těmto úpravám nedochází již při samotném výpočtu operace, ale až zpětně při kontrole například CL dat. Další možnou variantou jak zabránit přetížení nástroje přidáním dráhy tak aby záběrové podmínky byly zachovány.

V současné době jsou většinou využívány obě varianty, tedy do určité hodnoty přetížení systém upravuje řezné podmínky a měla-li by tato hodnota klesnout pod stanovený limit, dojde k vygenerování další dráhy. Tento systém se může jevit jako velice časově náročný, jsou-li však vhodně nastavené limity řezných podmínek, je možné využívat velice vysokých řezných a posuvových rychlostí a tím zkrátit čas výroby i při vyšším počtu drah nástroje.

Moderní CAM systémy resp. operace využívající moderní optimalizační způsoby dnes ve většině případů kombinují obě funkční vlastnosti a dráhy jsou tedy generovány jako morfuující spirála nebo trochoidy s adaptivním řízením zatížení a efektivním rozložením pro konkrétní součást. Ve většině případů je dnes tento způsob kombinován s produktivními metodami obrábění, jako je především HPC ale i další. Touto kombinací dvou optimalizačních přístupů je docíleno vysoké efektivity úběru materiálu za jednotku času, snížení opotřebení nástrojů, ale dalších negativních doprovodných jevů spojených s obráběním jako jsou vibrace a další. Tyto všechny výhody jsou aplikovány přímo při návrhu strategie v CAM systému a není tedy nutné využívat dalších optimalizačních přístupů.

3.3.5 Shrnutí moderních optimalizačních způsobů

Vzhledem k různorodosti a tvarové složitosti součástí vyráběných v současnosti frézování je z pohledu konkurenceschopnosti nezbytné zvyšovat efektivitu celého procesu. Při návrhu technologie v řetězci CAD/CAM/CNC je zejména pro tvarově složitě součásti nutné provádět optimalizaci navržené technologie. Klasický a v současnosti hojně využívaný způsob optimalizace strategie na reálném stroji je nevhodný zejména z ekonomického a ekologického pohledu. Z toho důvodu se dnes dostávají do popředí různé optimalizační techniky vstupující do řetězce přípravy výroby a výroby tak aby došlo k úspoře zdrojů.

Z pohledu řetězce poslední optimalizační technikou je korigovat určité měřitelné jevy přímo na stroji. K tomuto účelu slouží různé speciální upínací zařízení, a to jak pro nástroje, tak především pro obrobky. Tyto upínací mechanismy obsahují různé měřicí senzory. Na základě měření přímo při obrábění upraví optimalizační algoritmus parametry řezu tak, aby se sledované jevy dostaly do požadovaných hodnot. Výhodou takového systému je možnost korigovat různé procesy online a reagovat tak na jevy přímo spojené s daným procesem. Na druhé straně vysoké požadavky na rychlost přenosu, výpočtu a reakce kladou značné nároky na HW i SW a také nutnost kalibrace daného systému pro každou typovou součást dává prostor využití zejména pro velko-objemové typy výroby.

Simulační optimalizační metody jsou velice efektivním způsobem, jak dosáhnout optimální strategie obrábění a to bez nutnosti testování výroby na reálném stroji a reálných dílech. Jedná se o SW aplikaci obsahující optimalizační algoritmy, které na základě vstupů

zanalyzují a popřípadě upraví stávající nastavení řezných podmínek, drah nástroje a dalších vstupních vlivů. Takové to aplikace se vyskytují jednak jako samostatně stojící SW nebo jako modul implementovatelný do řetězce CAD/CAM/CNC. Vliv na simulační optimalizační techniky mají jednak samotné algoritmy analyzující různé přímé nebo doprovodné jevy vzniklé od obrábění. A dále pak reprezentační metoda využitá pro simulaci. Vzájemné kombinace nejsou zcela libovolné a ve většině případů dávají základní možnosti uplatnění dané simulační optimalizační metody.

Vzhledem k tomu, že simulační optimalizační metody ve většině případů vyžadují kvalitní matematický aparát a rozsáhlé znalostní databáze, je jejich uplatnění opět především ve výrobě, kde jsou si díly typově podobné a vyrábějí se ve větším množství. Přínosem je vysoká přesnost výsledku simulace daného jevu a možnost predikovat i jevy, které jiné metody neumožňují jako např. termomechanické namáhání.

Poslední dva způsoby se zabývají především vstupem přímo do operací v CAM modulu. Využití produktivních technologií je možné dosáhnout hospodárného úběru a snížit tak např. opotřebení nástrojů nebo zvýšit ekonomickou výhodnost dané strategie. Kombinací produktivních technologií a zvyšování funkčních vlastností systému dochází k tvorbě optimálnějších drah již při jejich návrhu. Výhodou těchto dvou způsobů je implementovatelnost přímo do CAM modulu, jak již tomu v některých případech došlo. A také univerzálnost využití, a to i přes nutnost znalostní databáze, která ovšem využívá zejména výkonové parametry strojů a fyzikální vlastnosti obráběných materiálů. Oproti např. simulační technice ovšem posledně zmíněné metody neumožňují optimalizovat tak rozličné množství jevů. Takto navržené strategie je možné z pohledu např. nějakého specifického jevu dále optimalizovat.

Na základě těchto zjištění je další část rozboru věnována především možnostem CAM modulu, jeho možnostem využití pro návrh a optimalizace zejména při obrábění tvarově složitých prostorových ploch.

3.4 Operace moderních CAM systémů pro frézování tvarově složitých ploch

Jak již bylo zmíněno, je výroba tvarově složitých prostorových plochy frézováním, a to včetně dokončení bez nutnosti dalšího opracování, velice moderní a žádaný způsob. Nahrazení finišovacích operací dokončovacím frézováním, je v současnosti uplatňováno také na výrobky s vysokými nároky na kvalitu a přesnost dokončené plochy. A to i v případě součástí sloužících jako nástroje například vstřikovací a tvářecí formy nebo díly z automobilového a leteckého průmyslu a další tvarově složitě součásti. V těchto případech má na celkovou efektivitu výroby vliv celá řada faktorů, ovšem možnost nahrazení ručních nebo strojních finišovacích operací dokončovacím frézováním může vést ke značné ekonomické úspoře a velké konkurenční výhodě.

Proces celé výroby tvarově složitých součástí součástí můžeme obecně rozdělit do fází:

- Hrubování
- Před-dokončování
- Dokončování

Z pohledu kvality hotového výrobku mají všechny tyto fáze svůj význam, a také využívají určitou skupinu operací v CAM modulu, tak, aby daný proces byl co možná nejefektivnější. Co se týče jednotlivých operací v CAM modulu, bývají rozděleny pouze na hrubovací a

dokončovací. Pro před-dokončování jsou využívány buď hrubovací, nebo dokončovací operace s upravenými parametry nastavení dle konkrétních požadavků.

3.4.1 Hrubovací operace v moderních CAM systémech

Smyslem hrubovací operace je odebrat maximální možné množství materiál obrobku za co nejmenší časový úsek, tedy co nejefektivněji. Většina moderních CAM systémů obsahuje hrubovací operace, které nějakým způsobem uplatňují některou z optimalizačních metod uvedených v kapitolách 3.3.3 a 3.3.4. Hrubovací operace je možné rozdělit do tří základních kategorií.

Základním typem jsou operace, které pro hrubování upraví dráhy dle objemového modelu tak aby docházelo k minimu přejezdů a úběr materiálu, tak byl co nejefektivnější. Dalším stupněm je možné označit operace počítající zatížení nástroje, např. dle opásání a upravují dráhy, tak aby nedocházelo k přetěžování stroje i nástroje. Většina těchto operací je velice intuitivní a usnadňují snadno a rychle nadefinovat obráběnou geometrii a vygenerovat dráhy nástroje a to z pravidla po hladinách. Vzhledem k vysokému stupni automatizace výběru obráběných ploch, je v některých případech problematické omezit místa, kde obrábění není požadováno. Zde je pak nutné pomocí limitů pracovní prostor omezovat stejně jako volit vhodné typy nájezdů a odjezdů, tak aby nedocházelo ke kolizím.

Posledním a nejvyšším stupněm jsou adaptivní operace využívající určité znalostní databáze. Jedná o operace, které jednak generují dráhy adaptivně dle tvaru polotovaru a součásti a s ohledem na zatížení SNOB. Tyto hodnoty jsou vypočítávány z výkonových parametrů stroje a fyzikálních vlastností obráběného materiálu. Zároveň jsou pro dráhy uplatňovány metody HPC technologií pro co nejefektivnější úběr materiálu. Aby bylo dosaženo, co nejvyšší efektivity s ohledem na fyzikální vlastnosti obráběcích strojů je snaha o co nejmenší brzdění a opětovné zrychlování pohybu nástroje. Proto se takto navržené operace snaží negenerovat ostré rohy, ale naopak je snaha napojovat dráhy hladce. Využívá se k tomu např. trochoidní tvar drah.

Použitím těchto moderních operací přináší velice efektivní způsob obrábění, se zvýšením produktivity a životnosti nástrojů, ale i strojů a to i o desítky procent. Ovšem takto automaticky pracující operace sebou nese i značné omezení. Zejména co se týče neschopnosti významněji ovlivňovat dráhy nástroje. Dále pak také modifikace nebo volba řezných podmínek pouze uživatelem není zcela možná vzhledem k matematické provázanosti na znalostní databáze. Tedy pokud operace negeneruje námi požadované dráhy, např. u složitějších součástí, není zcela triviální strategií upravit dle představ uživatele.

Všechny zmíněné operace je možné použít pro určitý typ před-dokončovacího obrábění. Nutné bývá upravit některý z technologických parametrů, řezných podmínek nebo použitý nástroj. Zde je výhodou, že operace umožňují vyhodnotit, jako polotovar výsledek předcházejí ho obrábění. Dráhy, které jsou vygenerovány jen v místech, kde je zbytkový materiál.

V určitých specifických případech je možné moderní operace použít také pro dokončení, ale i tak je použití omezené.

3.4.2 Dokončovací operace v moderních CAM systémech

Co se týče dokončovacích operací pro obrábění tvarově složitých prostorových ploch je nutné před celkovým zhodnocením uvažovat několik hledisek celého procesu. Základním

parametrem je počet řízených os. Základní rozdělení uváděné v literatuře je dnes na 2-1/2D, 3D a víceosé stroje. Pro účel dokončování na základě vzájemné kinematiky obrobku a nástroje je nutné zvažovat alespoň 3D frézování. V případě víceosého obrábění, je možné získat značné výhody v možnosti přístupnosti různých komplikovaných tvarů, ale z hlediska CAM modulu bývají využívány obdobné operace. Rozdíl je pak v řízení naklápění a dalších aspektů víceosého obrábění. Pro účely této práce budou analyzovány tříosé operace a jejich možnosti.

V CAM modulech je dnes celá řada funkcí určených k dokončování. Každý systém má své označení, ale základní rozdělení bývá vždy obdobné. Plochy jsou rozděleny dle úhlu sklonu od osy nástroje. Pokud na obráběné ploše dochází k významným změnám sklonu tečny v místě kontaktu nástroje, ve většině případů nastávají problémy, zvláště při přibližování se k ose nástroje.

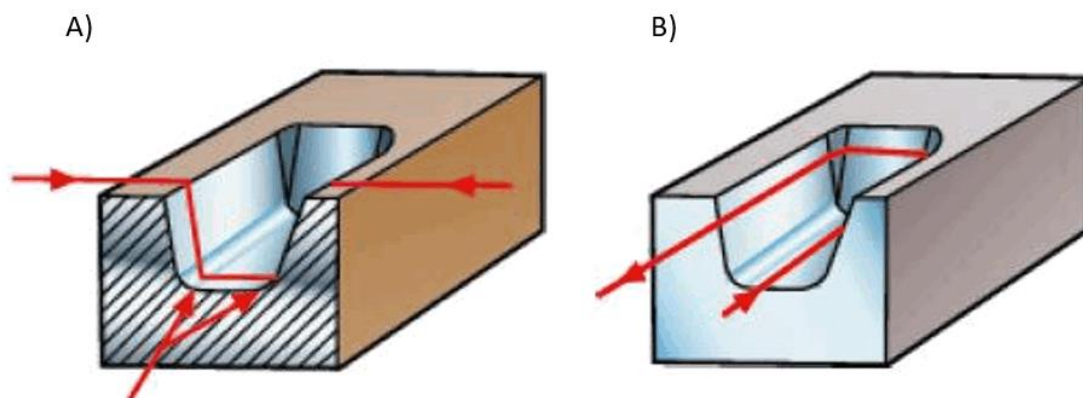
Dalším hlediskem dokončovacích operací je směr generování drah vzhledem k obráběné ploše. Rozlišujeme zde dva základní typy a to kopírovací frézování a řádkování neboli konturové frézování. Operace v moderních CAM modulech v některých pokročilých funkcích používají kombinaci obou strategií. Převážně se jedná o řádkování s možností úpravy dráhy ve vertikálním směru kvůli zachování řezných podmínek a dosažení tak požadované kvality výsledné plochy

3.4.2.1 Kopírovací dokončování

V prvním případě je způsob výroby plochy realizován, tak že nástroj kopíruje tvar plochy ve vertikálním směru. Posuv nástroje je veden v horizontálním směru a přísuv kolmo na posuv. Schematicky je tato strategie zobrazena na obrázku 3-18 A), kde je dobře patrný směr vedení nástroje.

Uplatnění této strategie lze nalézt především při obrábění ploch s malým sklonem. V současnosti je kopírovací frézování na ústupu, a to zejména kvůli změně dotykového bodu CC, při pohybu po kontuře povrchu, která může vyústit až ke změně souslednosti obrábění. Tento fakt může mít za následek velice rozdílné výsledky kvality dle zvoleného směru. Proto se kopírování používá pouze pro specifické způsoby obrábění nebo pro případy, kdy další způsoby generování drah selhávají.

Praktickým případem použití kopírovacího frézování můžou být spirálové strategie reprezentované např. v SW Catia strategií „Spiral Milling“ nebo operace na horizontální plochy „Sweeping“ opět ze SW Catia. Popřípadě další paprskové nebo „tužkové“ metody rozložení drah po ploše splňující kopírovací principy.



Obrázek 3-18 - A) kopírovací způsob obrábění, B) řádkovací způsob obrábění[34]

3.4.2.2 Řádkovací dokončování

Řádkování se od prvního způsobu odlišuje tím, že dráhy jsou generovány v řezech kolmých na horizontální rovinu. Přířez je možné realizovat ve vertikálním směru od shora dolů nebo naopak a posuv dle profilu součásti, jak je schematicky zobrazeno na obr. 3-18 B).

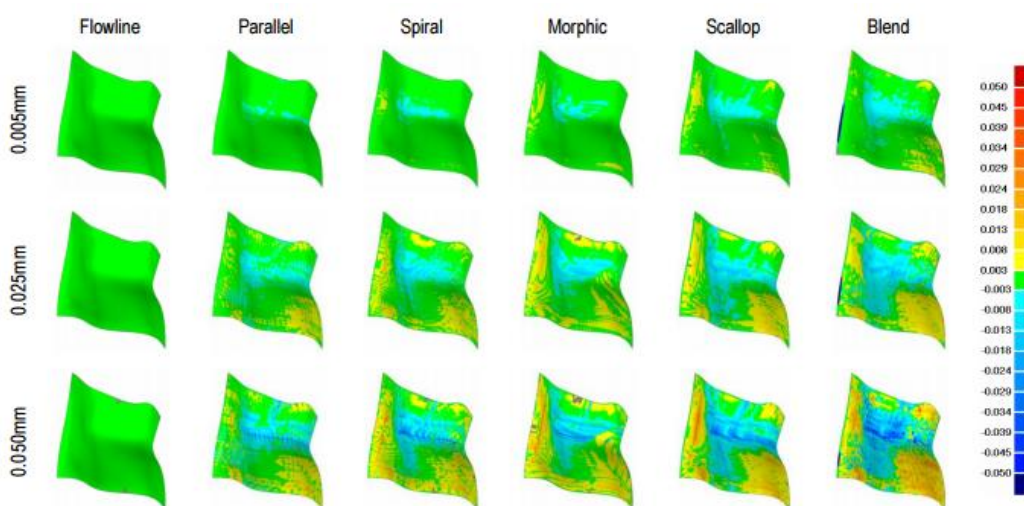
Řádkování je v současnosti nejrozšířenější způsob dokončování. Výhodou je vhodnost pro obecné tvarové plochy. Při řádkování nedochází k výrazným změnám řezných parametrů. Především změny hloubky a šířky řezu, ale i směru a celkového opásání nástroje jsou pro řádkovací metodu méně časté a pozvolnější, což snižuje celkové kolísání řezných sil a průchod nástroje je tak plynulejší. Také je zde možné pro jednotlivé řezy kombinovat sousledné a nesousledné frézování, čímž je možné snížit přebytečné nájezdy a odjezdy a navíc je nástroj zatížen rovnoměrně, což může zvyšovat životnost nástroje.

Problematické mohou být plochy s malým sklonem nebo přechody tohoto charakteru, kde se dostává do řezu střed nástroje. Tyto problémy je nutné řešit zjemněním kroku nebo úpravou řezných podmínek.

Z praktických strategií ze současných CAM modulů je možné jako příklad použít rozpočet „Konstantní Z“ z operace HSM ze SW SolidWorks, nebo obrobnou operaci „Z-level“ ze SW Catia. Také většina spirálových operací a různých strategií využívajících rovnoměrné generování drah s rovnou nebo křivkou splňují principy řádkování.

3.4.2.3 Způsoby rozpočtu

Pro řádkovací, ale i kopírovací metodu dokončování je důležitým faktorem způsob rozpočtu drah. Rozpočet drah nám zásadně ovlivňuje rozměrovou přesnost dokončené plochy, ale především její kvalitu. Tento fakt je řešen v různých pramenech především ve světové literatuře. Příklad je zobrazen na obrázku 3-19, kde jsou porovnány různé typy rozpočtu a jejich dopad na výslednou kvalitu. V samotném článku [34] jsou tyto výpočty také ověřovány praktickými testy.

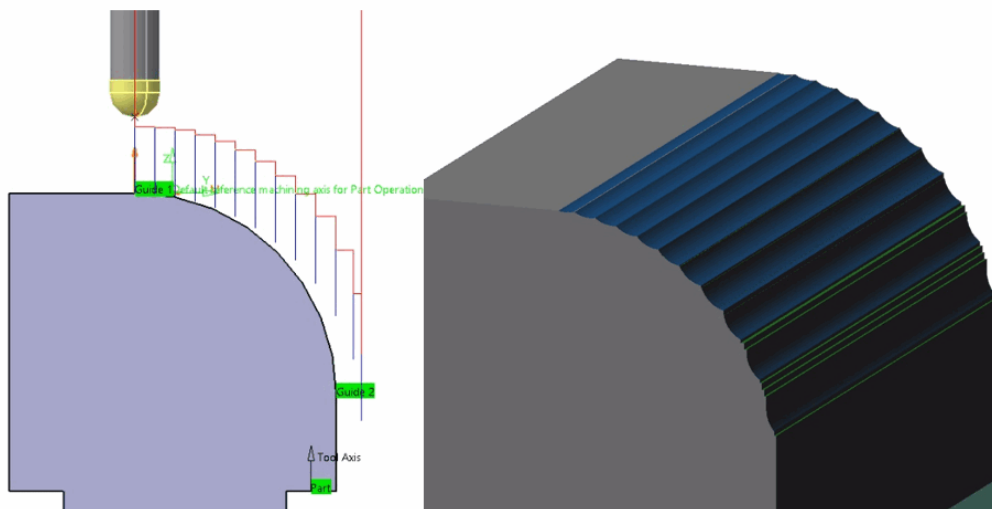


Obrázek 3-19 - Odchylky ploch pro jednotlivé strategie [34]

U způsobu rozpočtu drah pro tvarové plochy je možné provést rozdělení na tři základní typy. Jedná se o rozpočet dle kroku v jedné ose, dle kroku po profilu plochy a dle výšky zbytkového materiálu. Samozřejmě tyto typy se v různých CAM systémech označují rozdílně, ale v obecné rovině jsou využívány tyto základní způsoby.

A) Rozpočet s konstantním krokem v jedné ose

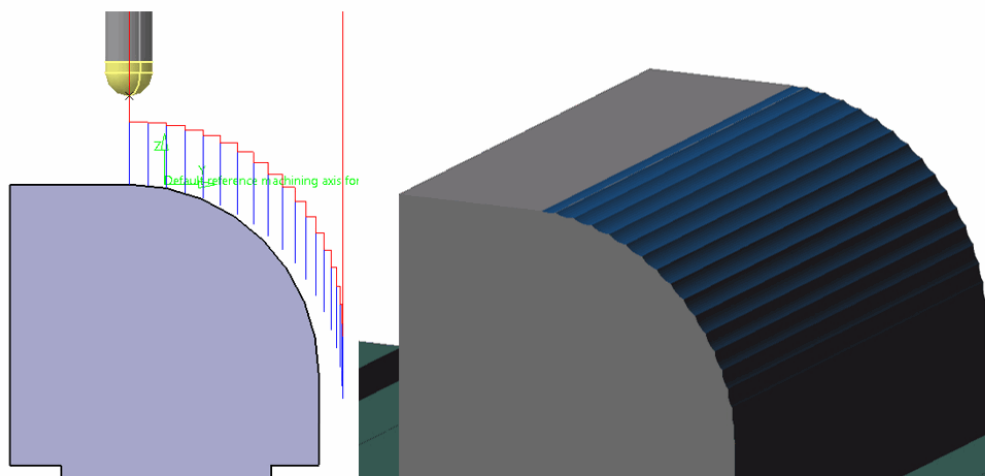
Tento způsob je jedním z nejjednodušších a vyznačuje se dodržení konstantní vzdálenosti mezi jednotlivými drahami v jedné z os dle způsobu generování. Ve většině případů se jedná o osu nástroje. Algoritmus výpočtu vždy provede krok v zadané ose. Dle tvaru jsou následně dopočítány další hodnoty pro konkrétní hladinu. Nevýhodou této metody je, že při větších změnách sklonu tečny k dané ploše dochází k velice nerovnoměrnému kroku a tím nižší kvalitě dokončené plochy. Na obrázku 3-20 je příklad rozpočtu pro rádiovou plochu, kde je viditelná rozdílná hodnota vzdálenosti mezi jednotlivými drahami. Uplatnění takového to rozpočtu je především pro plochy, u nichž dochází k malé změně úhlu tečny v místě dotyku. [2]



Obrázek 3-20 - Ukázka rozpočtu drah s konstantním krokem v jedné ose [2]

B) Rozpočet s konstantním krokem po profilu

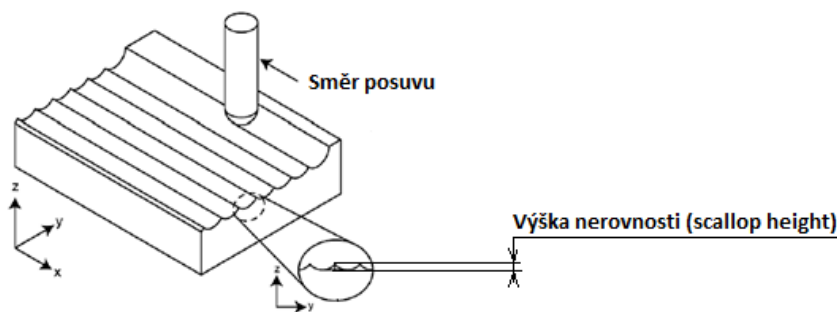
Způsob rozpočtu v tomto případě využívá konstantního kroku dle profilu, který tvarová plocha vytváří v průmětu na zvolenou rovinu. Standardně je vždy vypočítána hodnota kontaktu pro danou dráhu ve dvou osách. Zadaný krok ovšem není realizován v jedné či druhé ose, ale jako vzdálenost normál po sobě jdoucích bodů. Díky tomu dochází k rovnoměrnému rozložení a také kvalita dokončené plochy je podstatně lepší. Naopak dráhy jsou v určitých místech spíše zhuštěny. To ovšem v některých případech výrazně zvyšuje celkový počet drah a tím prodlužuje celkovou délku obrábění. Ukázka tohoto způsobu je opět provedena na rádiusové ploše na obr. 3-21.



Obrázek 3-21 - Ukázka rozpočtu drah nástroje dle konstantního kroku po profilu [2]

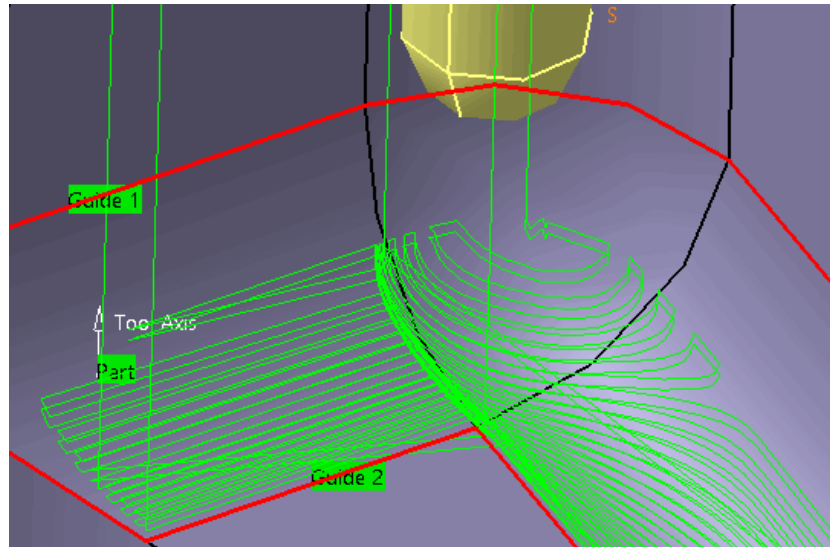
C) Rozpočet dle zadané výšky nerovnosti

Vzhledem k tomu, že pro dokončovací operace, kdy povrch vzniká vzájemnou kinematikou obrobku s nástrojem, se využívají frézy s kulovým čelem, je výsledný profil dokončené plochy dán výškou neodříznutého materiálu. Jak je vidět na obr. 3-22, profil tvoří materiál, který zůstává mezi dvěma přejezdy. Tyto hodnoty výšek nerovností odpovídají hodnotě drsnosti Rz. [14]



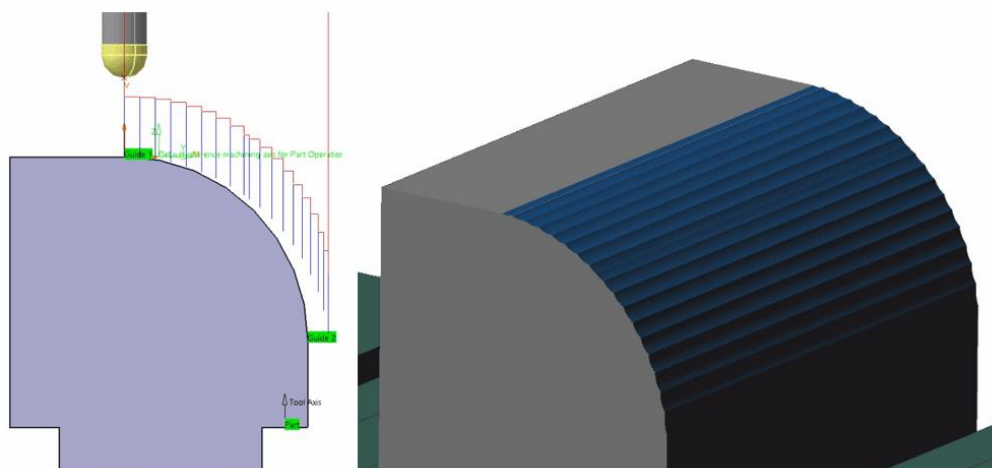
Obrázek 3-22 - Definice pojmu pro rozpočet dle výšky zbytkové nerovnosti [14]

V případě rozpočtení drah na základě výšky zbytkové nerovnosti systém nevypočítává body dle konkrétního kroku, ale tak aby po následujícím přejezdu byla výšky vždy pod zvolené maximum. Hodnota vypočteného kroku bývá v CAM systémech ještě porovnána s maximálním krokem v radiálním nebo axiálním směru popřípadě obou současně a to z důvodu korektního výpočtu např. pro svislé stěny.



Obrázek 3-23 - Dráhy pro přechodový rádius generované na základě výšky zbytkového materiálu

Na obr. 3-24 je vidět příklad rozpočtu drah dle výšky zbytkové nerovnosti opět pro rádiusovou plochu. Z obrázku je patrné, že ve spodní části plochy blížící se vertikální stěně se tato strategie oproti rozpočtu s konstantním krokem po profilu chová jinak. Dráhy jsou zde méně zhuštěné a jejich tedy méně. Díky tomu je možné efektivně obrobit danou plochu s předem definovanou kvalitou. Bohužel, i když se rozpočet na základě výšky zbytkové nerovnosti jeví, jako optimální především při obrábění prostorových ploch může být jeho využití dosti komplikované. V případech nasazení rozpočtu dle výšky zbytkové nerovnosti např. pro dokončování tvarových přechodových rádiů na dnech kapes algoritmus CAM modulu v zájmu dodržení požadovaných parametrů může dráhy různě obracet, tvořit smyčky nebo dráhu přerušit a vyjízďet v jiném směru než je směr obrábění. To vede ke zhoršení kvality plochy a v některých případech také ke kolizím nástroje a obrobku. Příklad je uveden na obrázku 3-23, kde je patrné, že dráhy generované na základě řádkování s rozpočtem dle výšky zbytkového materiálu jsou velice těžkopádné a nevhodné pro dokončení takovéto plochy.



Obrázek 3-24 - Ukázka rozpočtu drah nástroje Scallop height [2]

3.5 Shrnutí

Na základně výše zmíněné rešerše je patrné, že optimalizace obrábění tvarových ploch je u nás, ale především ve světě velice aktuální problematikou. Ze zmíněných metod optimalizace je v současnosti v literatuře nejčastěji uváděná optimalizace na základě simulace obrábění. Výsledkem těchto simulačních metod by mělo být virtuální obrábění schopné (na základě výpočtových algoritmů, zvolené strategie a znalostních databází) upravit dráhy tak, aby výsledek obrábění byl v požadovaných tolerancích bez nutnosti dalšího testování.

Další možnosti optimalizace, především s využitím efektivních technologií v kombinaci se zvyšováním funkčních vlastností strategií v CAM modulu, je dnes doménou výrobců tohoto SW. Výrazný pokrok byl proveden v oblasti hrubování, kde se již vyskytují operace využívající především HPC technologii v kombinaci s adaptivním generováním drah.

V porovnání s hrubováním se v CAM modulu pro dokončování takovéto strategie takřka nevyskytují. Dokončovací operace dává výsledné užité vlastnosti obráběné plochy a je samozřejmé, že užívané strategie musejí mít jiné funkční vlastnosti než pro hrubování. Některé operace určené pro dokončování je pro specifické obrobky možné modifikovat tak, aby splňovali např. HSC nebo HFC. Ovšem operace kombinující moderní obráběcí strategie a řízení drah nástroje dle obráběné plochy pro zachování konstantního zatížení (např. využívající adaptivní princip úpravy drah nástroje v CAM modulu) primárně nejsou.

Na základě těchto faktů probíhá na Západočeské univerzitě resp. na KTO ve spolupráci s Regionálním technologickým institutem (dále jen RTI) výzkum zaměřený na problematiku zefektivňování dokončovacích strategií pro složité prostorové plochy. Jedná se o metody optimalizace drah přímo v CAM modulu po vzoru hrubovacích strategií.

Při řešení bylo testováno několik přístupů a vzniklo na tuto problematiku několik článků a také diplomových prací. Praktická část této disertační práce se zabývá především použitím konstantní řezné rychlosti pro dokončovací frézování tvarových ploch. A dále je navržena metodika pro dokončovací operaci využívající moderní způsoby řízení.

4 Zvyšování efektivity dokončovacího frézování

Praktická část dizertační práce se zabývá ověřením použití konstantní řezné rychlosti pro dokončovací frézování. V rámci výzkumu na KTO bylo již testováno několik možností optimalizujících strategií pro dokončování.

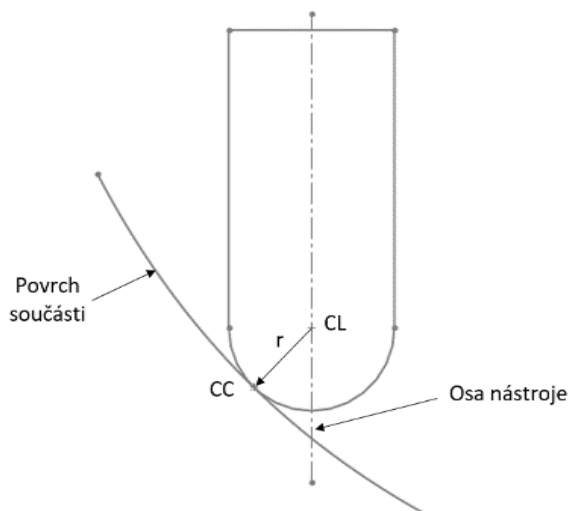
Jednou z takových možností se zabývá článek publikovaný v roce 2016 ze zdroje [35], jedná se o dokončování založené na odebírání konstantního objemu materiálu. Koncept vychází z hrubovací strategie a dráhy byly generovány pro rádiusovou plochu tak, aby objem odebíraného materiálu byl takřka konstantní. Pro tento přístup ovšem nebyl přínos zcela patrný. Výhody použití konstantního objemu se projevovaly až v případě, že přírůstek pro dokončování byl mnohem větší, než je obvyklé. Zde pak úpravy drah, které jsou založeny na výpočtu objemu odebíraného materiálu, snižovaly řezné síly. Díky tomu byla vyšší stabilita řezu především v místech blízkých se středu nástroje.

Jako další variantu pro zefektivnění dokončovacích strategií je možno uvažovat strategii založenou na konstantní řezné rychlosti. Zdůvodnění, proč tomu v současných strategiích tak není, je uvedeno v následující kapitole 4.1. Prvotní experiment s využitím této strategie byl proveden již v diplomové práci „Návrh strategie dokončování tvarových ploch“, autora J. Andrlíka [4]. Zde se jednalo o obrábění šikmých ploch s různým sklonem, kdy byla porovnána standardní technologie s konstantními otáčkami oproti upraveným otáčkám vždy pro konkrétní efektivní průměr nástroje. Využívaly se dva rozpočty drah a jeden průměr nástroje. I přes nízkou vypovídací schopnost experimentu byla výsledná kvalita dokončené plochy s použitím konstantní řezné rychlosti v porovnání s konstantními otáčkami lepší.

Z výše popsaných a i dalších pramenů zabývajících se touto problematikou vyplývá, že oblast dokončovacího frézování je třeba dále rozvíjet. Jedním z možných způsobů zefektivňování je využití konstantní řezné rychlosti. Jedná se o zcela inovativní přístup, jehož hlubší prozkoumání pro dokončovací strategie není doposud provedeno. Na základě těchto zjištění jsou stanoveny cíle této dizertační práce, tedy tento vliv ověřit a následně zapracovat princip konstantní řezné rychlosti do strategie využitelné v reálných CAM modulech. Koncept úpravy drah pro dokončovací strategie na základě využití konstantní řezné rychlosti byl tedy podroben dalšímu zkoumání. Výsledky experimentů zabývajících se touto problematikou byly částečně prezentovány v diplomových pracích ze zdrojů [2] a [3]. Tyto diplomové práce vycházejí z celé problematiky dokončování řešené na KTO a RTI a byly řešeny jako součást této dizertační práce.

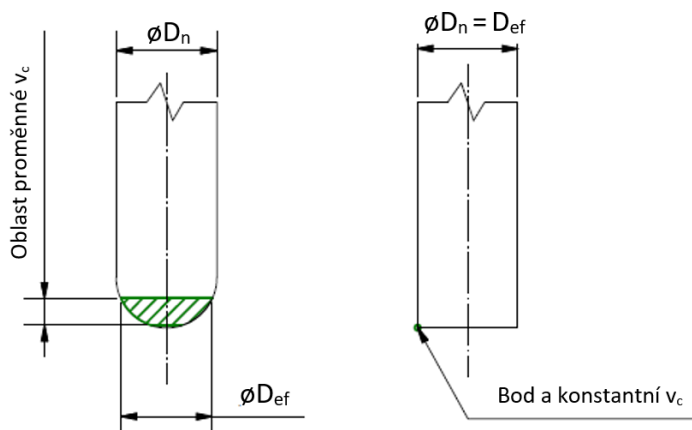
4.1 Teoretický základ ověření vlivu použití konstantní řezné rychlosti

Jako základní charakteristický znak dokončování tvarových prostorových ploch pomocí frézy s kulovým čelem je proměnný kontaktní bod nástroje a obrobku (CC - Cutter contact). Jedná se o bod na ostří nástroje, který je v kontaktu s obrobkem. Na základě tohoto bodu je možné odvodit efektivní průměr nástroje D_{ef} . Vzhledem k tomu, že úhel sklonu tečny od normály v bodě CC je pro obecné tvarové prostorové plochy proměnný, mění se podle bodu CC také průměr D_{ef} , jak je patrné z obr. 4-1.



Obrázek 4-1 - Pozice kontaktního bodu nástroje pro obecnou tvarovou plochu

Standardní strategie v CAM modulech stanovují otáčky pro maximální hodnotu poměru nástroje D_n . Tyto otáčky jsou využívány pro všechny dráhy dané strategie. Díky změně D_{ef} dochází k různým proměnám řezné rychlosti a ta je při pohybu po tvarové ploše nekonstantní. Rozdílné hodnoty průměrů a oblast nekonstantní v_c je vidět na obrázku 4-2.



Obrázek 4-2 - Porovnání efektivního průměru pro kulovou a válcovou frézu [3]

Tento jev má řadu negativních dopadů. Jedním z nich je nutnost pro komplikované tvarové dílce používat kombinaci různých typů strategií pro dokončování, což s sebou opět nese celou řadu úskalí. Vlivem změn řezných podmínek je také velice komplikované dosahovat rovnoměrné kvality dokončeného povrchu. Tyto, ale i další jevy vedou velice často k tomu, že uživatelé CAM modulů upravují dráhy tak, aby předešli těmto nedostatkům. V praxi se velice často dokončovací dráhy generují z několika odlišných strategií daného CAM modulu, dráhy se více zahušťují nebo se využívají před-dokončovací operace, a to snižuje celkovou efektivitu a zvyšuje náklady na výrobu.

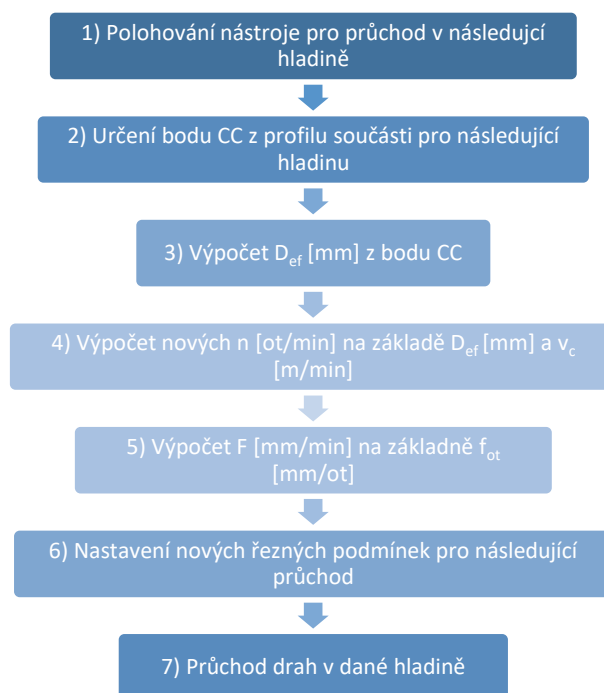
Z těchto důvodů byla navržena strategie dodržující konstantní řeznou rychlost také při dokončovacích operacích. Principem je výpočet otáček na základě efektivního průměru nástroje. V tomto případě je ovšem nutné striktně používat řádkovací metodu, neboť při kopírování by tento způsob optimalizace nebylo možné využívat.

Konstrukce vřeten moderních frézovacích CNC strojů ovšem neumožňuje plynulou regulaci otáček v závislosti na poloze nástroje, nedochází k interpolaci otáček. Je tedy nutné tyto změny realizovat pomocí informací v NC programu. To sebou samozřejmě nese určitá omezení. Zejména co se týče typů rozpočtu drah, najíždění a vyjíždění do materiálu a další omezující podmínky, které je nutné akceptovat při generování drah s použitím konstantní řezné rychlosti.

Pro sledování vlivů strategie využívající konstantní řeznou rychlost byly navrženy dva experimenty realizované v rámci této dizertační práce. První z provedených experimentů sledoval kvalitativní změny dokončované plochy v závislosti na změně otáček. Jednalo se o skokové změny v závislosti na strmosti obráběné plochy. Pro tento experiment byla použita šikmo skloněná plocha jako nejjednodušší příklad tvarové plochy. Pro zkoumané jevy ovšem dostačující. Detailně je celý experiment popsán v kapitole 5.1.

Pro druhý experiment byla využita rádiusová plocha s různým poloměrem, jako složitější typ tvarové plochy. Zde se již zkoumal samotný vliv konstantní řezné rychlosti na kvalitu dokončované plochy, a to při třech strategiích rozpočtu drah. Detailní popis je v kapitole 6.1. Návrh základního algoritmu využívající zejména pro druhý experiment a následnou metodiku, je detailně zobrazen na obrázku 4-3, postup je následující:

- 1) Po průchodu nástroje jednou hladinou dojde k vyjetí mimo materiál a následnému polohování nástroje pro průchod další hladinou
- 2) Z aktuální pozice nástroje je dle charakteru tvarové plochy určen bod CC
- 3) Následuje výpočet efektivního průměru D_{ef} z kontaktního bodu CC
- 4) Pro definovanou hodnotu řezné rychlosti v_c , algoritmus vypočítá nové otáčky n
- 5) Na základě těchto nových otáček n je poté dopočítána z definovaného otáčkového posuvu f , posuvová rychlost v_f
- 6) Tyto nové řezné podmínky jsou zapsány do programu a následně nastaveny na stroji
- 7) Obrábění pokračuje průchodem v hladině dle tvaru součásti.



Obrázek 4-3 - Návrh algoritmu využívající úpravu řezných podmínek se zachováním konstantní řezné rychlosti

Pro obecný základní algoritmus dochází ke změnám otáček pro každou hladinu. Při velmi malém kroku přísuvu je možné, že změny otáček nebudou mít žádné zásadní dopady na kvalitu dokončeného povrchu. Ovšem při výraznějších změnách by mohlo docházet změnou otáček k negativním dopadům na dokončovanou plochu. Například jiné odtlačení, vibrace a další. Pro ověření tohoto vlivu byl navržen experiment zabývající se kvalitou dokončeného povrchu šikmé plochy. Popis samotného experimentu je uveden v kapitole 5, včetně zhodnocení výsledků a shrnutí.

Experiment z kapitoly 6 už je přímo ověřením použití řezné rychlosti pro dokončování. Vzhledem k tomu, že problematika dokončování obecné tvarové plochy sebou nese celou řadu dalších komplikací, je pro ověření vlivu samotné konstantní řezné rychlosti proveden experiment na rádiusových plochách. Z důvodu potřeby zobecnit závěry experimentu, byly rádius plochy, průměr nástroje a způsob rozpočtu drah po ploše zvoleny jako proměnné. Ostatní faktory byly nastaveny jako konstantní.

Vzhledem k tomu, že pro plno-faktorový experiment by bylo nutné provést výrobu značného množství dílců, bylo použito statistické plánování experimentů. Díky tomuto typu plánování experimentů je možné otestovat větší množství proměnných a jejich interakce za reálně proveditelného počtu experimentů. Základy této metody jsou uvedeny v následující kapitole.

4.2 Navrhování experimentů na základě statistického plánování

Vzhledem k značnému počtu faktorů ovlivňujících dokončovací obrábění, bylo pro ověření technického hodnocení zařazeno navržení a vyhodnocení provedených experimentů pomocí statistického plánování. Jedná se pouze o podpůrnou metodu, která by ovšem v případě chybějících souvislostí měla přinést vysvětlení zkoumaných jevů.

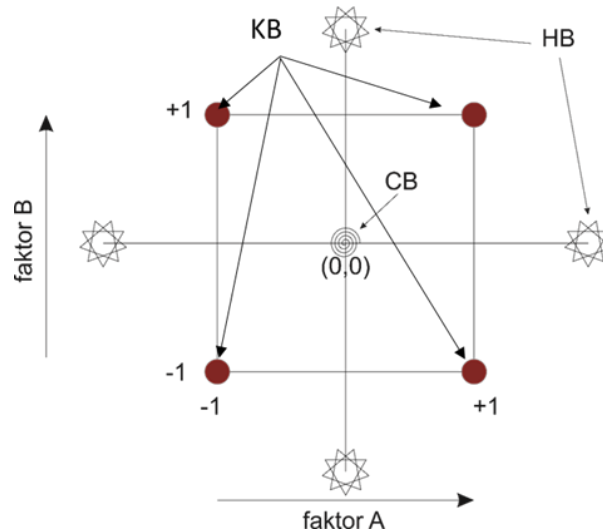
Každý technologický proces je možné chápat jako tzv. „černou skříňku“. Ta na základě kontrolovaných, konstantních a náhodných faktorů generuje určité výsledky. Díky plánování experimentu pomocí statistiky by mělo být možné poté odezvy matematicky popsat a pochopit tak fungování sledovaného procesu.

Z tohoto důvodu je potřeba experimenty, respektive kontrolované faktory navrhnout tak, aby umožňovaly statistické vyhodnocení. Pro návrh experimentu byla použita metoda DoE (Design Of Experiment), která je založena na analýze rozptylu ANOVA. Základní úkolem DoE je vzájemnou vhodnou kombinací vstupních faktorů získat co nepřesnější odezvy. Samotná ANOVA poté umožňuje zjistit, zda jsou nějaké vztahy mezi vstupními faktory a odezvami, a to ve dvou základních rovinách. Jednak rozptyl hodnot samotnými vstupy a dále poté rozptyl způsobený náhodnými nebo konstantními faktory. Vzájemně se poté jednotlivé vlivy testují a určuje jejich významnost. [36,37]

Aby byl výstup co nejpřesnější, je nezbytné sledovat odezvy procesu v několika bodech sledovaného prostoru. Proto je vzhledem k povaze testovaného procesu potřeba zvolit vhodný plán. Frézování se řadí mezi procesy s možnou nelinearitou průběhů, proto byl zvolen centrální kompozitní plán, který díky funkcím vyššího řádu je pro frézování vhodný. [36,37]

Sledované body v prostoru jsou pro centrální kompozitní plán tři základní. Rozložení bodů ve zkoumaném prostoru je zobrazeno na obr. 4-4 a jejich výčet je uveden zde [36]:

- Krychlové body (KB) – Tyto body jsou v plánu vždy a slouží k výpočtu efektu faktorů.
- Centrální body (CB) – min. počet = 2. Vyjadřují čistou chybu měření.
- Hvězdicové body (HB) – počet těchto bodů je $n=2k$. Slouží pro zpřesnění výpočtu regresních koeficientů. (k = počet faktorů)



Obrázek 4-4 - Centrální kompozitní plán[36]

Zvolené sledované faktory je možné rozdělit na intervalové, poměrové, ordinální a nominální. Při samotném experimentu byly využity intervalové proměnné. Jedná se o takové faktory, u nichž jsme možné popsat rozdíly mezi dvěma hodnotami daného intervalu. Jako příklad využitý v této práci je možné uvést řeznou rychlost. Nominální proměnná je taková, u níž jsme schopni rozeznat, zda je jedna hodnota odlišná od další, ale nikoliv stanovit nějaký rozdíl. Jedná se např. o použité strategie. Poslední využitou proměnnou v této práci je ordinální. Jde o faktor, kde lze jednotlivé hodnoty seřadit, ale není znám rozdíl ani hodnoty mezi nimi. Výčet jednotlivých konstantních a proměnných faktorů je proveden u každého návrhu experimentu samostatně.

4.2.1 Vyhodnocení naměřených dat z hlediska statistiky

Detailní statistické vyhodnocení experimentů není v práci dále uvedeno. V kapitolách hodnocení jsou pouze stručně posouzeny získané výsledky. Z tohoto důvodu je zde popsán mechanismus statistického vyhodnocení. Jedná se pouze o obecný popis testování hypotéz a následné vyhodnocení daných sledovaných parametrů.

Z pohledu statistického vyhodnocení je prvním krokem volba hladiny významnosti naměřených dat α . Pro technické obory se standardně používá hladina $\alpha_v = 5\% \rightarrow \alpha_v = 0,05$. Tato hodnota je velice důležitá. Aby vyhodnocovaná data měla statistický význam, musí být jejich vypočtená hladina významnosti p , pod zvolenými 5%. V takovémto případě je přijata alternativní hypotéza a zamítnuta hypotéza nulová. Přijetí alternativní hypotézy v praxi znamená, že alespoň jedna střední hodnota je odlišná od ostatních a tedy statisticky významná. Pokud je tomu naopak, statistické metody hodnocení nenašly mezi daty žádný rozdíl a jejich vliv je nulový.

Tabulka 4-1 – Rozhodovací tabulka pro volbu hypotéz [36]

$p < \alpha$	H_1 přijímám, H_0 zamítám
$p \geq \alpha$	H_0 přijímám, H_1 zamítám

Pro praktické využití mají smysl pouze faktory splňující první řádek tabulky 4-1. V takovémto případě jsou výsledky zatíženy chybou pod hodnotu 5%, a je možné z nich usuzovat relevantní závěry.

4.3 Charakteristika experimentálního studia

Vzhledem k tomu, že pro ověření vlivu konstantní řezné rychlosti byly navrženy dva na sebe navazující experimenty, jsou v následujícím textu popsány společné vstupní a sledované parametry a také použité experimentální vybavení.

Především z důvodu základního studia vlivu konstantní řezné rychlosti by oba prováděné experimenty měly dát odpovědi na míru ovlivnění sledovaných parametrů měnícími se otáčkami, ale i dalšími pro dokončování důležitými parametry.

4.3.1 Sledované parametry

Z cíle experimentu vyplývá, že sledovanými parametry pro hodnocení experimentu budou parametry drsnosti a rozměrové přesnosti dokončené plochy. Přímou při výrobě bude měřena řezná síla a čas obrábění. Vzhledem k tomu, že především parametrů hodnocení drsnosti je celá řada, jsou zde představeny konkrétní sledované veličiny prováděných experimentů:

- Složky řezné síly F_{xy} a F
- Parametry drsnosti povrchu R_a a R_z
- Rozměrová přesnost na základě odstupů bodů od modelu
- Čas obrábění – pouze pro druhý experiment

4.3.1.1 Řezné síly

Řezné síly vznikající při odřezávání materiálu jsou ovlivněny mnoha parametry. Jako základní je možné označit obráběný materiál, geometrii nástroje, technologii obrábění, typ operace a záběrové podmínky. V tomto případě, při zaměření se na dokončovací frézování, jsou řezné síly relativně malé v porovnání s jiným typem frézovací operace. Dá se říci, že z pohledu dokončování není maximální hodnota řezných sil parametrem určujícím celkovou bezpečnost a stabilitu celého procesu. Při dokončování tyto hodnoty zdaleka nedosahují velikosti jako např. při hrubovacím frézování nebo při vrtání a není možné tedy dle maximální řezné síly hodnotit celou technologii dokončování.

Důležitý jevem projevujícím se na řezných silách je z pohledu dokončování jejich celkový průběh. Vlivem kolísání řezných sil, a to i v rádech desítek procent, může být zapříčiněn vznik vibrací, nebo nerovnoměrné odtlačení nástroje způsobující nerovnoměrnou kvalitu dokončeného povrchu. Z tohoto důvodu bylo sledování řezných sil doprovodným měřením, které v případě kolísání dalších sledovaných parametrů mělo pomoci objasnit dosažené výsledky.

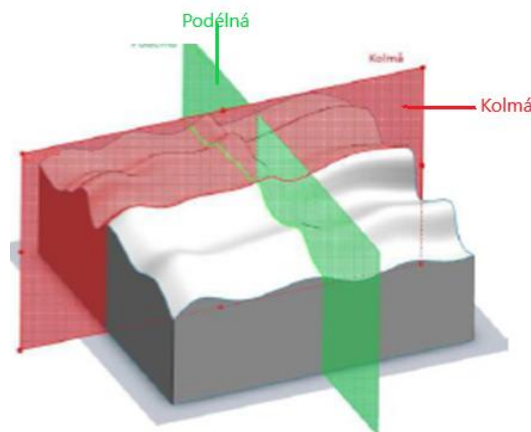
Použitý typ dynamometru a celé řezné soustavy dává možnost sledovat řezné síly z pohledu obrobku. Jednotlivé měření složky F_x , F_y a F_z tedy byly orientované dle souřadného

systému stroje. Neboť rozbor jednotlivých složek by s největší pravděpodobností nedával očekávané souvislosti se sledovanými parametry kvality, byl pro výsledné hodnocení vytvořen skalární součin a to v rovině XY. Hodnoty řezných sil F_{xy} by měly vyjadřovat odtlačení nástroje a být porovnatelné s některým kvalitativním parametrem. Jako druhý parametr bude vyhodnocena také celková řezná síla F , a to z důvodu zastoupení všech měřených složek.

4.3.1.2 Drsnost povrchu

Jak již bylo v předchozím textu naznačeno, výsledkem žádné obráběcí operace není dokonale hladká plocha, ale každý povrch má určitou texturu. Provede-li se myšlený řez, který bude vhodně orientovaný, získáme křivku tvořenou výstupky a rýhy, jak je vidět na obr. 4-5. Tato křivka reprezentuje texturu daného povrchu. Vzhledem k různorodosti povrchů jejich měření a především hodnocení kvality se pro její posuzování používá termín drsnost obrobene plochy.[38]

Z důvodu vzájemné porovnatelnosti se měření a vyhodnocování drsnosti řídí normou ČSN EN ISO 4285 – 4288. Norma stanovuje měřicí podmínky vzhledem k typu měřeného povrchu, výběr filtru a další proměnné pro zvolený parametr drsnosti povrchu. V případě těchto experimentů byly použity dva standardní parametry a to R_a a R_z , které jsou dále popsány detailněji.



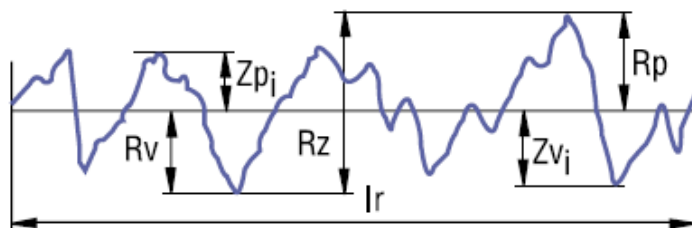
Obrázek 4-5 - Kolmá a podélná rovina protínající texturu povrchu [2]

Pro frézovací operace má na celkovou drsnost vliv celá řada faktorů. Také směr měření vzhledem ke směru pohybu nástroje může mít rozhodující vliv na měřené hodnoty drsnosti povrchu. Pokud se měří rovnoběžně se směrem obrábění, bude mít dominantní vliv na naměřené hodnoty velikost posuvu. Naopak při měření kolmo na směr obrábění bude mít významný vliv hodnota bočního kroku a velikost nástroje. Z tohoto důvodu bylo měření provedeno v obou základních směrech vzhledem k trajektorii pohybu nástroje.

Vybrané parametry drsnosti:

- **Parametr R_a – Střední aritmetická odchylka drsnosti**

Použití tohoto parametru vyplývá ze strojírenské praxe. Jedná se o nejčastěji využívaný parametr drsnosti povrchu, a proto bylo jeho hodnocení využito i pro naše experimenty. I když je tento parametr často využíván, tak jeho vypovídající schopnost je velice malá. Parametr R_a málo reaguje na extrémní výšky nebo rýhy profilu a výsledná hodnota může být často zavádějící.

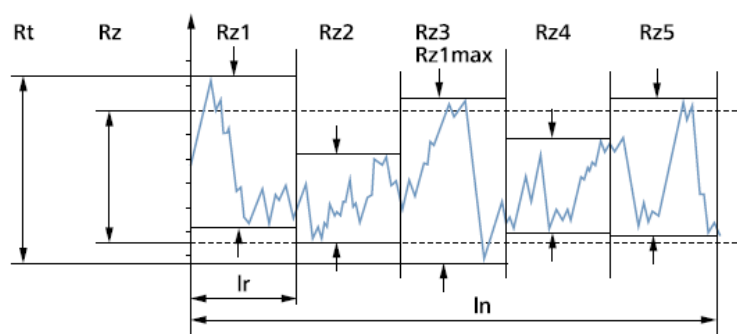


Obrázek 4-6 - Parametr drsnosti Ra [39]

Definice profilu je dána normou a jedná se o hodnotu středních hodnot absolutních odchylek filtrovaného profilu drsnosti od střední čáry uvnitř základní délky. [39]

- **Parametr Rz ISO**

Parametr Rz se skládá z pěti středních hodnot jednotlivých lokálních maximálních rozdílů nejvyššího vrcholu a nejhlubší rýhy profilu. Tyto lokální maximální hodnoty jsou měřeny vždy na základní délce a hodnoty jsou vztažené od střední hodnoty profilu uvnitř vztažené dráhy. [39]



Obrázek 4-7 - Parametr drsnosti Rz ISO [39]

Výhodou tohoto parametru je podstatně vyšší vypovídající schopnost zejména o nosném podílu plochy. Nevýhodou může být zkreslení výsledku způsobené nahromaděním rýh a špiček ve velmi malém úseku vůči základní měřené délce. I tak je Rz druhým nejrozšířenějším parametrem drsnosti a díky jeho vyšší vypovídající schopnosti byl vybrán jako druhý reprezentant pro vyhodnocení experimentů.

4.3.1.3 Rozměrová přesnost

Posledním sledovaným parametrem je rozměrová přesnost dokončené plochy. V případě experimentu ověřujícího vliv konstantní řezné rychlosti na šikmých plochách je možností měření více. Abychom byli schopni naměřené výsledky alespoň částečně porovnávat s následujícími experimenty, bylo nutné zvolit takovou metodu, která bude využitelná i pro následující experimenty. A dále také bylo nutné, aby daný výstup byl kvantifikovatelný kvůli možnosti řadit jednotlivé varianty od nejlepší po nejhorší.

Dle těchto všech kritérií bylo zvoleno měření rozměrové přesnosti na 3D souřadnicovém měřicím stroji. Využívanou metodou bylo měření odstupů vybraných bodů od modelu. Povrch modelu byl brán jako nulová hodnota a od ní byly měřeny úchyly daných bodů reprezentující důležitá místa. Tato místa jsou pro konkrétní experiment uvedena v kapitolách 5.2 a 6.2 zabývajících se měřením a zpracováním dat.

4.3.2 Experimentální vybavení

Na základě návrhu experimentů bylo zvoleno příslušné experimentální vybavení. Nástroje a zařízení pro provedení experimentu mají zásadní vliv na výsledky a jsou rozebrány v následujícím textu. Popis vybavení pro měření a vyhodnocení kvality dokončených ploch je uveden v příloze 6.

4.3.2.1 Stroj

Vzhledem k typu experimentu, který využívá značný otáčkový rozsah, bylo použito lineární frézovací centrum DMU 40 eVo linear od německého výrobce DMG MORI. Jedná se o stroj s pěti plynule řízenými osami, který má maximální otáčky vřetene až $n_{\max} = 24\,000$ ot/min. Dále pak díky lineárním motorům umožňuje velké zrychlení a je tedy vhodný pro dokončovací operace složitých prostorových ploch, při kterých stroj musí často brzdit a opětovně zrychlovat. Bližší specifikace je uvedena v příloze 3.

4.3.2.2 Nástroje

Pro dokončovací operaci vzorků byla použita monolitní kulová fréza se čtyřmi zuby. V provedených experimentech byl využit pouze jeden typ nástroje. Z důvodu alespoň částečné porovnatelnosti mezi oběma experimenty byl nástroj vyroben speciálně a specifikace parametrů řezné části je uvedena v příloze 3. Nemožnost využití komerčních nástrojů byla dána především proměnným průměrem nástroje v druhém provedeném experimentu. Zde vlivem statistického plánování nebyly průměry celočíselné, a proto byly všechny nástroje broušeny v Laboratoři experimentálního obrábění Regionálního technologického institutu. Nástroj byl vyroben ze slinutého karbidu bez následného povlakování a upínací část byla stopková, aby bylo možné použít standardní upínače.

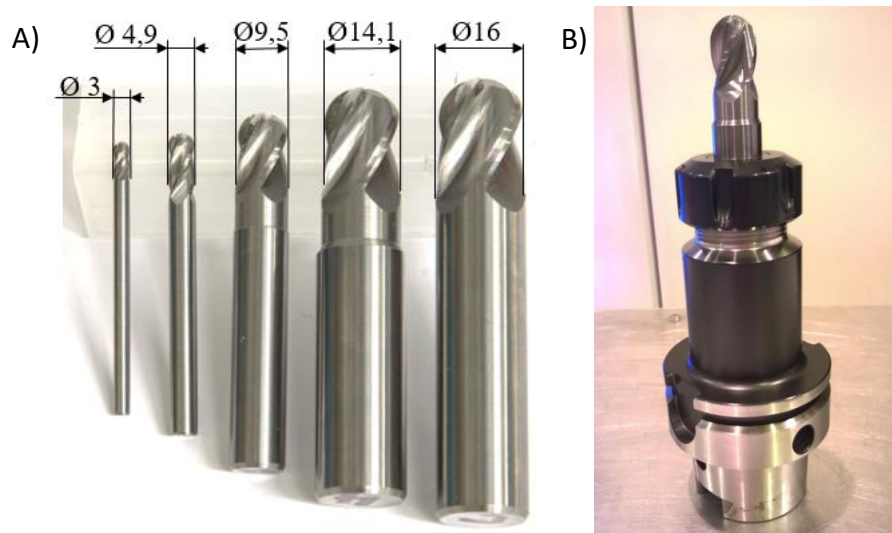
V prvním experimentu byl použit nástroj s průměrem $D_n = 16$ mm. Vzhledem k typu experimentu byl použit pouze jeden průměr. Pro provedení celého experimentu byly využity tři kusy nástroje.

Pro druhý experiment byly použity nástroje s průměry: $D_n = 3$ mm; $D_n = 4,9$ mm; $D_n = 9,5$ mm; $D_n = 14,1$ mm a $D_n = 16$ mm. I když se nejedná o standardní průměry z pohledu následného statistického vyhodnocení, byly neceločíselné průměry důležité. Počty kusů jednotlivých nástrojů jsou uvedeny v tabulce 4-2.

Tabulka 4-2 – Počty kusů nástrojů využitých pro druhý experiment

Průměr nástroje D_n [mm]	Počet kusů [ks]
3	3
4,9	5
9,5	5
14,1	5
16	3

Pro upínání byl použit standardní upínač s rozhraním HSK 63 A. Jednalo se o kleštinový upínač ER 25 pro průměry $D_n = 3 - 9,5$ mm a kleštinový upínač ER 32 pro průměry nástroje $D_n = 14,1$ a 16 mm. Oba použité upínače měly základní délku $L = 100$ mm. Všechny použité nástroje a příklad nástrojové sestavy je uveden na obr. 4-8.



Obrázek 4-8 - A) Přehled použitých nástrojů, B) nástrojová sestava: upínač s frézou $D_n = 14,1$ mm

4.3.2.3 Soustava pro měření řezných sil

Vzhledem k měření zatížení nástroje při obrábění byla použita soustava pro měření řezných sil. Skládající se z částí:

- Statický obrobkový 3-složkový piezoelektrický dynamometr - Kistler 9255 A
- Osmikanálový zesilovač - Kistler 5080
- Digitalizační karta pro SW Dynoware – Kistler 5697
- Notebook se zabudovanou měřicí kartou a SW Dynoware

Část měřící soustavy je zobrazena na obr. 4-9.



Zesilovač

Digitalizační karta

Notebook s SW

Obrázek 4-9 - Sestava pro záznam řezných sil [3]

Měření řezných sil bylo realizováno pomocí obrobkového dynamometru od firmy Kistler. Jak je vidět na obrázku 4-10, dynamometr je upnut přímo na pracovní stůl stroje a pomocí upínek je k němu upevněn obrobek. Měřený signál je přes zesilovač a digitalizační kartu zpracováván v notebooku v SW Dynoware také od výrobce Kistler.



Obrázek 4-10 - Upevnění dynamometru a polotovaru [3]

4.3.2.4 Ostatní vybavení

Pro upínání nástroje byl použit kleštinový upínač ER 32 s rozhraním HSK 63A a měřicí přístroj ZOLLER GENIUS 3 pro vstupní kontrolu bříty a měření délkové korekce nástroje.

5 Experiment ověření vlivu změny kvality dokončené plochy na změnách řezné rychlosti

Na základě zjištěných skutečností bylo před komplexním otestováním využití konstantní řezné rychlosti pro dokončování tvarově složitých prostorových ploch nutné vyřešit vliv změny otáček na dokončovanou plochu. Z těchto požadavků také vyplynuly cíle tohoto experimentu:

- Hlavní cíl – zkoumání vlivu změny otáček na kvalitu dokončené plochy
- Dílčí cíl – zkoumání vzájemného působení změny otáček a sklonu dokončované plochy
- Dílčí cíl – zkoumání vzájemného působení změny otáček a použité strategie rozpočtu

Těmto cílům byl také přizpůsoben polotovár. Testování bylo realizováno na rovinné ploše skloněné vždy pod určitým úhlem. Jako nástroje byla použita fréza jednoho průměru z kapitoly 4.3.2.2. Pro rozpočet dráhy byly využity dvě metody rozpočtu drah, a to rozpočet v jedné ose a rozpočet dle profilu plochy.

Očekávaným výstupem tohoto experimentu by měla být relevantní data o vlivu změny otáček na kvalitu a rozměrovou přesnost dokončené plochy. Dále je očekáváno ověření, zda vliv sklonu plochy nebo metody rozpočtu drah nástroje bude mít na výslednou jakost vliv.

5.1 Návrh a příprava experimentu a postup realizace

Návrh experimentu byl realizován pomocí statistického plánování, jako již bylo uvedeno. V první fázi bylo nutné stanovit proměnné a konstantní faktory. I když cílem experimentu bude ověření vlivu změny otáček na výslednou plochu, byla pro základní nastavení řezných podmínek zvolena hodnota řezné rychlosti. K tomuto kroku bylo přistoupeno z důvodu druhého proměnného faktoru, kterým je sklon plochy α . Pokud bychom k základní definici řezných podmínek použili otáčky, nebylo by možné porovnávat různé sklony oproti sobě. Zejména z důvodu různé řezné rychlosti na přechodech pro různé sklony ploch. Neboť vlivem efektivního průměru D_{ef} by pro stanovené otáčky byla pro různé sklony vždy jiná řezná rychlost. Při obrábění jednoho sklonu plochy se změnou řezné rychlosti budou měnit otáčky. Základní myšlenka experimentu bude tedy naplněna a zároveň budou různé sklony obráběny porovnatelnými podmínkami.

Tabulka 5-1 – Vstupní proměnné a konstantní faktory pro plánování experimentu

Proměnné faktory								
Strategie	A - konstantní krok v ose				B - konstantní krok po profilu			
Úhel sklonu plochy [°]	α	25			50		75	
Řezná rychlost [m/min]	v_c	100	125,05	150,025	175	199,975	224,95	250
Konstantní faktory								
Posuv na zub [mm]	f_z	0,1						
Radiální krok rozpočtu drah [mm]	a_e	0,1						
Hloubka řezu [mm]	a_p	0,2						
Průměr frézy [mm]	D_n	16						
Počet zubů [mm]	z	4						

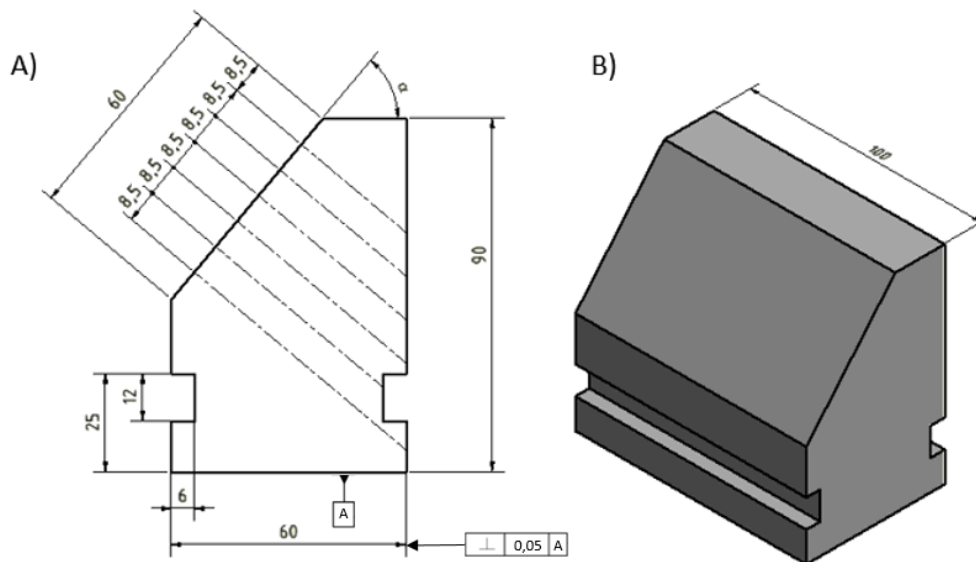
Posledním proměnným faktorem je metoda rozpočtu. Z teoretických poznatků vyplývá, že tento fakt může mít značný vliv. Pro rozpočet každé plochy byly využity dvě metody. Jako první rozpočet s konstantním krokem v jedné ose a jako druhý rozpočet s konstantním krokem po profilu. Rozpočet dle výšky zbytkového materiálu nebyl použit, neboť výsledek by se u šikmých ploch ztotožňoval s variantou rozpočtu po profilu.

Jako konstantní faktory byl zvolen přídavek na dokončení, boční krok rozpočtu, posuv na zub, počet zubů nástroje a průměr nástroje. Další parametry jako např. vyložení nástroje, upnutí obrobku byly používány totožně tak, aby bylo výsledky možné porovnávat. Detailně jsou parametry uvedeny v tabulce 5-1.

Na základě typu experimentu a požadavků na výstup byl pro statistické plánování zvolen centrálně středěný kubický plán. Tento typ je pro zvolenou problematiku vhodný. Díky kubickému výpočtovému modelu bylo možné využít větší množství řezných rychlostí. Celkový počet testovaných vzorků nám dává vzájemná kombinace dle počtu proměnných faktorů. Pro každou metodu rozpočtu bylo nutné vyrobit tři vzorky. Vzhledem k tomu, že některé body experimentu bylo nutné zopakovat pro ověření plánu, byl pro jednoduchost výroby opakován celý experiment. Výsledný počet vyráběných vzorků bude tedy 12. Celý plán experimentu je uveden v příloze 4.

5.1.1 Zkušební vzorek

Prostorový pohled na vzorku je zobrazen na obr. 5-1. Jednalo se o kvádr o rozměrech 60x100x90. Tyto kostky byly z důvodu snížení chyby upínáním, a to jak při obrábění tak především při měření, broušeny. Ve zkušebním vzorku jsou vydrobeny upínací drážky pro jednoduché upevnění na dynamometr.



Obrázek 5-1 - Návrh experimentálního vzorku, A) boční pohled s rozměry, B) prostorový pohled [3]

Polotovar byl připraven s definovaným přídavkem rovnoměrně konstantním po celé ploše. Obráběná šikmá plocha je rozdělena po 8,5 mm. Po této vzdálenosti vždy dojde ke změně řezných podmínek. Toto bylo důležité především z pohledu měření, a to jako přímo na stroji tak posléze i mimo stroj.

Polotovary experimentálního vzorku byla uhlíková ocel s označením ČSN 41 2050.1 nebo dle DIN C45. Důvodem použití tohoto materiálu je, že se jedná o etalonový materiál z pohledu obrobitelnosti pro skupinu ocelí. Z tohoto důvodu bylo rozhodnuto realizovat výchozí experimenty na tomto typu materiálu. Celá specifikace materiálu je uvedena v příloze 5.

5.1.2 Příprava programů

Přípravu programů pro celkovou realizaci experimentu je možné rozdělit do dvou částí. Pro přípravu vzorků, jejich modelování, hrubování a před-dokončení byl využit SW SolidWorks, respektive pro přípravu programů modul SolidCAM.

Pro dokončovací fázi byl program vytvořen bez použití CAD/CAM SW. Dráhy byly vytvořeny „ručně“ v SW Excel. Vzhledem k tomu, že je obráběnou plochou pouze šikmá plocha, byla příprava programů realizována na základě výpočtu jednotlivých bodů v rovině XZ, dle souřadného systému stroje. Pro daný sklon byla vždy z předchozího bodu CC na základě goniometrických funkcí vypočtena pozice dalšího bodu CC. Tento výpočet byl opakován až do místa změny podmínek. Tam se změnila hodnota řezné rychlosti a výpočet pokračoval dále. Vzhledem k tomu, že pro řízení reálného stroje nejsou dostačující souřadnice bodů CC, bylo nutné vždy souřadnice přepočítat na špičku nástroje, což je ale při znalosti průměru nástroje sklonu plochy triviální záležitost. Ukázka z tvorby programu je uvedena na obrázku 5-2.[3]

Souřadnice x	Souřadnice z	Délka přepony (pro vc)	Rychlost vc	Otáčky	Posuv. Rychlost	NC Program
9,002946094	-0,749537704	0	100	4707,408479	941,4816958	L X9,0029 Z-0,7495 FMAX TOOL CALL Z S4707 F941 CALL LBL1
9,217396786	-0,849537704	0,236620158	100	4707,408479	941,4816958	L X9,2174 Z-0,8495 FMAX TOOL CALL Z S4707 F941 CALL LBL1
16,29426962	-4,149537704	8,045085383	100	4707,408479	941,4816958	L X16,2943 Z-4,1495 FMAX TOOL CALL Z S4707 F941 CALL LBL1
16,50872032	-4,249537704	8,281705541	100	4707,408479	941,4816958	L X16,5087 Z-4,2495 FMAX TOOL CALL Z S4707 F941 CALL LBL1

Obrázek 5-2 - Ukázka tvorby programu v SW Excel [3]

Samozřejmě by bylo možné realizovat přípravu dokončovacích drah v CAM modulu. Tyto systémy umožňují generovat dráhy dle zvolených strategií rozpočtu drah. K vytvoření dokončovacích drah za pomoci SW Excel bylo přistoupeno z důvodu neznalosti vnitřních výpočtových algoritmů jednotlivých operací v CAM modulech. Je velmi pravděpodobné, že operace dle svých vnitřních algoritmů upravují rozpočet drah nástroje nejen dle zadaných parametrů, ale také dle různých vnitřních kontrolních a omezujících podmínek. To by mohlo vést ke zkreslení drah. V důsledku čehož by nebyl testován samotný rozpočet jako jedna z očekávaných částí výstupu experimentu, ale pouze jako operace zvoleného CAM modulu. [3]

5.1.3 Realizace experimentu

Po upevnění dynamometru na pracovní stůl stroje a připevnění obrobku na dynamometr byl k sestavě připevněn měřící kabel spojený s měřící sestavou. Experiment probíhal vzestupně dle sklonu obráběné plochy od nejmenší po největší sklon, a to vždy při střídání strategie A a B. Pomocí dotykové sondy byl nastaven nulový bod obrobku, který byl pro hrubování, před-dokončování i dokončování umístěn v totožném místě, čímž byl zaručen konstantní přídavek pro obrábění.

5.1.3.1 Hrubování a před-dokončení

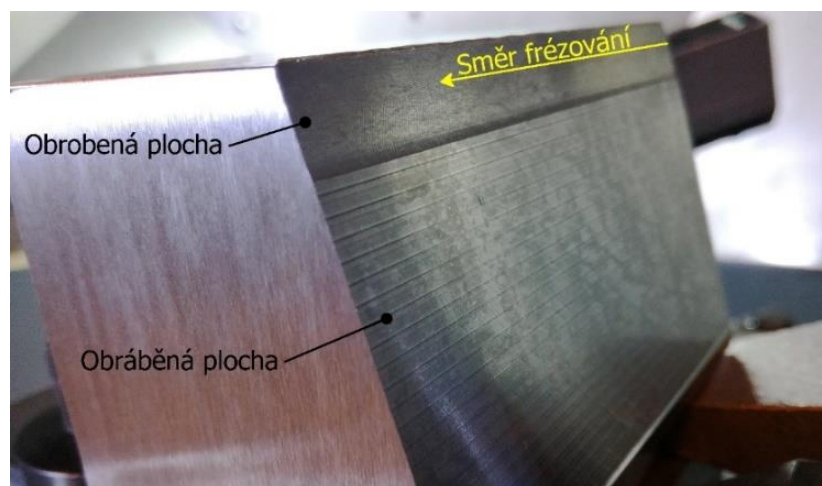
Pro každý sklon plochy byl vytvořen samostatný hrubovací a před-dokončovací program, a to v CAM modulu SolidCAM. Jejich struktura byla pro všechny sklony obdobná. Pro hrubování byla využita operace iMachining, která využívá HPC obrábění. Především díky poměrně velkému množství materiálu, které bylo třeba odebrat. Pro tuto operaci byla využita monolitní čelní válcová fréza o průměru 16 mm.

Před samotným dokončováním kulovou frézou byla ještě zařazena operace pro vytvoření rovnoměrného přídávku. Využití rovnoměrného přídávku není sice v praxi vždy používáno, ale v případě našeho experimentu bylo vhodné. Cílem bylo zjistit vliv především použití konstantní řezné rychlosti a nikoliv předpřipravené plochy. Z tohoto důvodu rovnoměrný přídavek snižoval další vlivy tak, aby očekávané výsledky nebyly dále zkreslovány. Pro před-dokončení bylo použito rovinné frézování, a to v naklopení dle konkrétního sklonu. Pro tuto operaci byla využita čelní válcová fréza s VBD. Před-dokončená plocha je vidět na obr. 5-3, označená jako obráběná plocha.

5.1.3.2 Dokončování a záznam sil

Před začátkem dokončování bylo třeba zkontrolovat měřicí sestavu a kalibrovat ji pro rozsahy řezných sil vyvozených konkrétním typem obrábění. Velikost zesílení proto byla nastavena na doporučenou hodnotu a po prvních zkušebních přejezdech upravena na 200 [N] pro každý kanál. Nastavení rozsahu je velice důležité, neboť pokud by došlo k překročení rozsahu jednoho z měřených kanálů, byl by záznam pro danou složku zkreslený. Dále bylo nutné vypočítat z velikosti vzorku a aktuální posuvové rychlosti čas přejezdu, aby byl měřený záznam dostatečně dlouhý.

Dokončování bylo realizováno sousledně, řádkovací metodou, a to od shora dolů. Průběh dokončování byl následující. Program vytvořený v SW Excel vždy obsahoval jednotlivé průjezdy dle stanovené strategie rozpočtu drah, a to nastavenými otáčkami. Po přejetí vzdálenosti 8,5 mm na skloněné ploše došlo ke změně otáček, a to skokově mezi dvěma po sobě jdoucími drahami. Na tomto přechodu byl očekáván rozdíl jakosti dokončené plochy. Aby nebylo nutné měřit záznam řezných sil po celé ploše, bylo měření realizováno vždy čtyři přejezdy před změnou parametrů a minimálně čtyři přejezdy po změně. Díky tomu byl pořízen jednak záznam pro všechny hodnoty řezných rychlostí a především byla zaznamenána změna při přechodu na jiné řezné podmínky. Schematické zobrazení směru frézování a obrobena plocha je zobrazena na obr. 5-3.



Obrázek 5-3 - Částečně dokončený obrobek (sklon šikmé plochy $\alpha=75^\circ$)

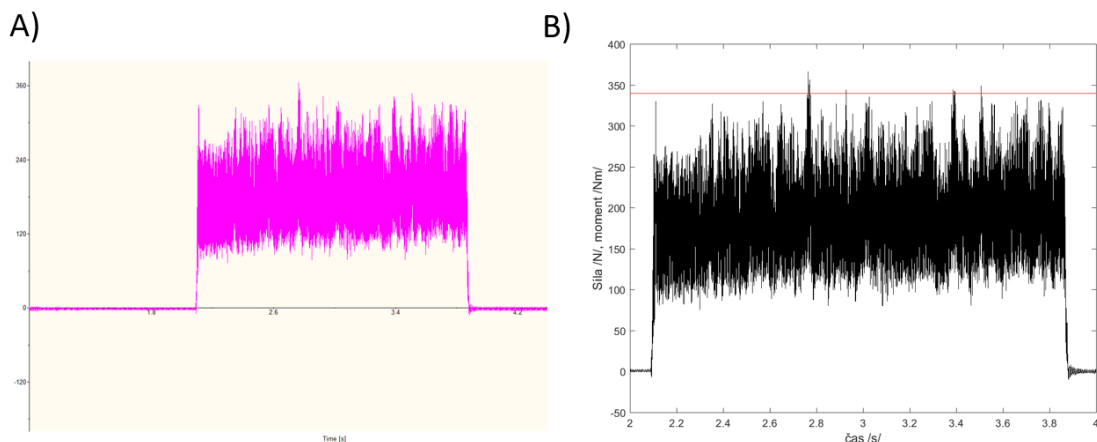
Dokončování probíhalo bez větších komplikací, i když na konci každé plochy bylo patrné, že nástroj bez povlakování již v místě kontaktu vykazuje opotřebení především díky tepelnému působení vyvozené posledními dvěma řeznými rychlostmi. Kontrola břitu byla provedena pomocí lupy. Komplikace z pohledu celkového obrábění nastala při posledním úseku obrábění sklonu $\alpha = 75^\circ$. Zde musel být program ručně ukončen přibližně 4 mm před koncem plochy, a to z důvodu zamezení kolize nástroje a upínky. Tento fakt neměl na výsledky žádný vliv, pouze musel být brán v potaz při následném měření. Zejména při měření drsnosti povrchu musela být volena dráha tak, aby se hrot nedostal na nedokončenou plochu.

5.2 Měření a zpracování sledovaných parametrů

Po provedení experimentu bylo dalším krokem měření samotných sledovaných parametrů a jejich následné zpracování. Parametry drsnosti a rozměrové přesnosti byly měřeny v Laboratoři dílenské metrologie RTI. Zpracování naměřených dat převážně v SW Excel.

5.2.1 Zpracování řezných sil

Řezné síly byly měřeny při realizaci experimentu, a to v SW Dynoware. V tomto SW následně probíhala první fáze zpracování. Nejprve bylo nutné jednotlivé měřené přejezdy rozdělit tak, aby každý přejezd byl umístěn do jednoho souboru. Vzhledem k tomu, že náměr je v podstatě grafická závislost silového působení nástroje v čase, bylo potřeba náměry nějakým způsobem očistit a určit maximální hodnotu. Neočištěný záznam je na obrázku 5-4 A) K tomu posloužila aplikace vytvořená v SW Matlab, která načetla daný náměr, odfiltrovala z něho zaznamenané šумы, uložila maximální hodnotu do souboru a vytvořila kontrolní graf tak, aby bylo možné jakoukoliv hodnotu zkontrolovat. Tento graf je vidět na obr. 5-4 B), kde je patrné, že použitá aplikace kromě šumu filtrovala také špičky výkmitů.



Obrázek 5-4 -Záznam průběhu řezných sil jednoho přejezdu, A) nefiltrovaný záznam ze SW Dynoware, B) Vyfiltrovaný záznam z aplikace stanovující maximum

Následné zpracování již probíhalo v SW Excel, kde byly jednotlivé složky načteny a následně zpracovány pomocí funkcí v Excelu. Pro každý náměr byla vypočítána celková síla F a také síla v rovině XY dle vzorců (5) a (6).

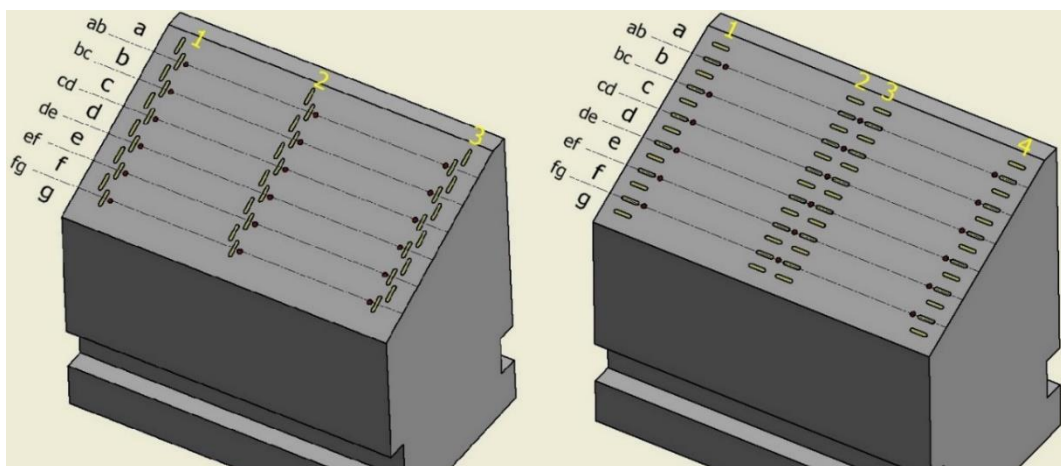
$$F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2} \quad (5)$$

$$F_{xy} = \sqrt{F_x^2 \times F_y^2} \quad (6)$$

5.2.2 Měření parametrů drsnosti

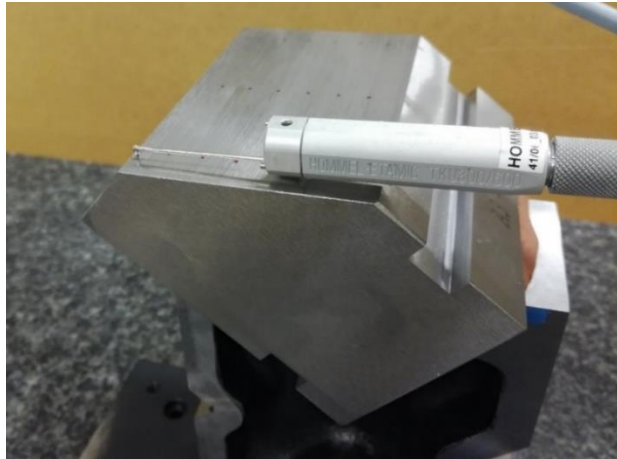
Měření bylo realizováno dle norem ISO 4288:1998 a ISO 3274:1998. Vzhledem k tomu, že technologie frézování vytváří periodickou texturu povrchu, bylo nastavení jednotlivých parametrů měření provedeno dle metody R_{sm} . Jako filtr pro měření byl použit Gaussův filtr dle ČSN ISO 16610-2. Dle hodnot střední vzdálenosti elementů drsnosti bylo nutné nastavit hodnotu vlnové délky λ_c . Pro měření ve směru kolmém na dráhy byla hodnota zvolena na $\lambda_c=0,8$ [mm], pro měření ve směru rovnoběžném se směrem drah nástroje byla hodnota zvolena na $\lambda_c=0,25$ [mm].

Měření bylo realizováno na profilo/drsnoměru HOMMEL ETAMIC T8000. Celá specifikace je uvedena v příloze 6. Pro měření byl využit, diamantový hrot s radiem špičky $r_s = 0,2 \mu\text{m}$. Měřená délka dráhy byla standardní dle citované normy a to vždy $L_t = 4,8$ mm. Naměřená data byla označena vždy dle konkrétního měřeného vzorku. Jednotlivé oblasti každého vzorku byly označeny pomocí písmena a-g, jak je zobrazeno na obrázku 5-5.



Obrázek 5-5 - Rozložení bodů a náměrů se značením ploch a přechodů [3]

Průběh samotného měření byl následující. Vzorek byl v první fázi očištěn a označen tak, aby byla patrná místa změn jednotlivých řezných rychlostí. Dále se každý vzorek umístil dle sklonu plochy do prizmatu tak, aby dokončená plocha vzorku byla v horizontální poloze. Polohování a orýsování vzorku je zobrazeno na obrázku 5-6. Na takto polohovaném vzorku poté probíhalo samotné měření. Jak již bylo uvedeno, měření probíhalo ve dvou směrech. Při měření v rovnoběžném směru se směrem drah bylo pro každou oblast měřeno ve čtyřech místech, pro kolmý směr vůči dráhám bylo měřeno třikrát. Krajní body se nacházely 10 mm od hrany vzorku a body uvnitř v polovině, nebo v případě měření rovnoběžně s dráhami 1 – 3 mm na každou stranu od středu. Celé rozložení měřených míst je zobrazeno na obr. 5-5. Z obrázku je patrné, že se měřilo vždy samostatně pro oblast jedné řezné rychlosti a následně přechod mezi po sobě jdoucími řeznými rychlostmi. Tímto způsobem byla změřena drsnost ve všech důležitých místech vzorku pro zjištění zkoumaného vlivu konstantní řezné rychlosti na dokončenou plochu. Celkem tak bylo měřeno 91 náměrů na každý vzorek.

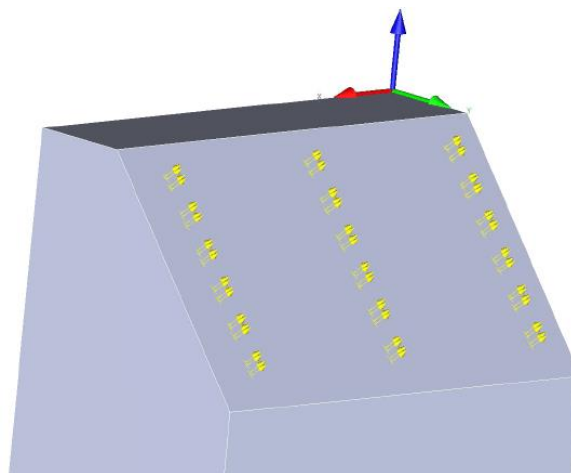


Obrázek 5-6 - Ukázka měření parametrů drsnosti v kolmém směru [3]

Zpracování naměřených dat probíhalo již v SW Excel, do kterého byla pomocí makra z VBA Excel načtena data z původních souborů generovaných interním SW profilo/drsnoměru HOMMEL ETAMIC T8000. Z naměřených dat byla pro každou oblast vybrána maximální hodnota, která je pro drsnost rozhodující. Tato maxima byla následně vzájemně porovnávána a zpracovávána v grafech.

5.2.3 Měření rozměrové přesnosti

Realizace měření rozměrové přesnosti bylo obdobné jako u drsnosti povrchu. Měření bylo provedeno na 3D souřadnicovém měřícím stroji Carl Zeiss Prismo 7 Navigator, jehož detailní specifikace je v příloze 6. Pro zvolenou metodu měření, tedy odstup zvolených bodů od modelu, bylo třeba vytvořit rastr bodů. Ten byl vytvořen ve SW Calipso. Pro každou změnu řezné rychlosti byly měřeny dva body nad změnou řezných podmínek a dva body po změně řezných podmínek. Vzdálenost od přechodu byla 0,75 mm a stejná vzdálenost byla i mezi oběma body. Měření bylo provedeno ve třech řezech. Ve stejném rozložení jako při měření drsnosti povrchu. Tedy krajní body 10 mm od hrany vzorku a body uvnitř v polovině vzorku. Díky tomu bylo možné sledovat změny přesnosti dokončeného povrchu po celé dokončené ploše.



Obrázek 5-7 - Rozložení bodů po ploše

Zpracování naměřených dat bylo opět provedeno v SW Excel. Naměřená data byla pomocí makra z VBA Excel načtena a následně uložena a srovnána pro každou plochu tak, aby

odpovídala směru výroby vzorku. Následně byl z dvou náměrů pro každou plochu vypočten aritmetický průměr. K tomuto kroku bylo přistoupeno vzhledem k tomu, že data vykazovala Gaussovo rozdělení. Následně bylo možné jednotlivé náměry dále vzájemně porovnat a reprezentovat pomocí grafů.

5.3 Analýza výsledků sledovaných parametrů

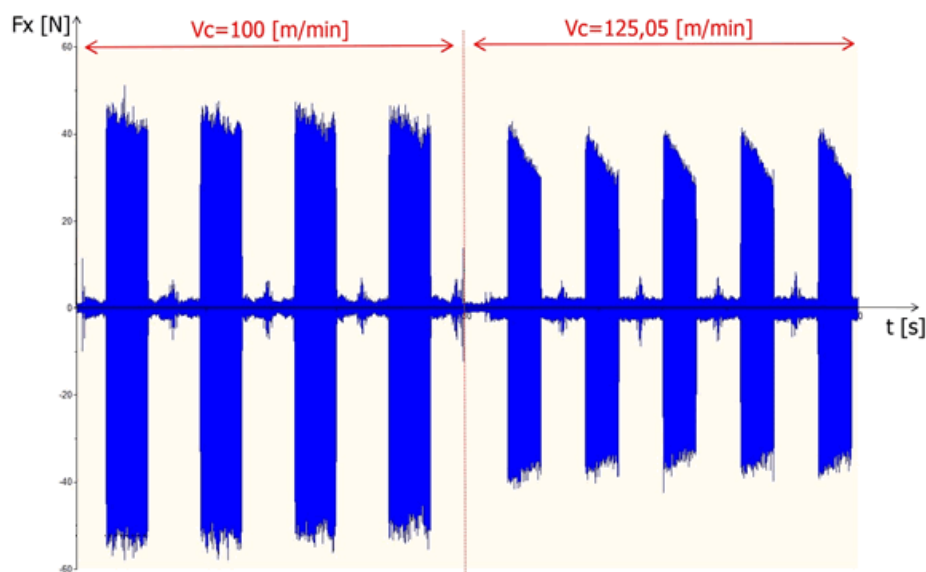
Plánování experimentu bylo provedeno za pomoci statistiky, z tohoto důvodu byla kapitola zabývající se vyhodnocením naměřených dat rozdělena do dvou kapitol. První částí bylo technologické hodnocení. Hodnoceno bylo působení variant na jednotlivé sledované parametry, jejich vzájemné interakce a celkové posouzení využitelnosti konstantní řezné rychlosti pro dokončovací operace. Druhá část hodnocení je spojena s hodnocením dosažených výsledků z pohledu statistiky. Toto hodnocení by mělo potvrdit nebo naopak vyvrátit výsledky technologického hodnocení.

5.3.1 Technologické hodnocení výsledků

Technologické hodnocení bude probíhat ve stejném sledu jako měření a zpracování výsledků. Základní vyhodnocení tedy bude vždy pro jednotlivé sledované parametry. Následně v případě prokázání vzájemné interakce mezi sledovanými vlivy bude posouzen jejich dopad na jednotlivé parametry a výsledky porovnány vůči sobě.

5.3.1.1 Hodnocení řezných sil

V předchozím textu bylo uvedeno, že maximální hodnoty řezných sil při dokončování nedosahují v porovnání s ostatními operacemi takových velikostí, aby docházelo k přetěžování soustavy SNOP. I přesto je jejich vliv významný. Zejména pak průběh může mít vliv na rovnoměrnost dokončeného povrchu. Na obrázku 5-8 je prezentována změna průběhu složky řezné síly F_x při přechodu z $v_{c1} = 100$ [m/min] na $v_{c2} = 125,05$ [m/min]. Tento konkrétní záznam je pro sklon plochy $\alpha=25^\circ$. Z obrázku je patrné, že při změně otáček dojde k poklesu měřené složky řezné síly. Změna není vidět jen na samotném maximu, ale také průběh řezné síly jednotlivých přejezdů je odlišný. Důležitým poznatkem je, že změna řezné rychlosti se projevuje skokově změnou jednotlivých složek řezné síly a jejich kolísání může mít vliv na další sledované parametry.



Obrázek 5-8 - Záznam řezné síly F_x (sklon plochy $\alpha=25^\circ$; přechod z $v_c=100$ na $v_c=125,05$) [3]

Jednotlivé záznamy z daného místa měření byly z důvodu lepší přehlednosti zpracovány pomocí aritmetického průměru. Tím vznikla jedna hodnota řezné síly pro každou v_c na začátku a na konci plochy. Pro řeznou sílu působící v rovině XY jsou hodnoty pro strategii A uvedeny v tabulce 5-2, tabulky pro celkovou sílu F jsou uvedeny v příloze 7. Pro zkoumání jednotlivých vlivů změny řezné rychlosti na velikost řezné síly byly vytvořeny grafy závislostí F_{xy} a F na délce obrobenej plochy, přičemž řezná rychlost se mění právě v závislosti na délce plochy. Délka obráběné plochy byla použita v grafech z důvodu lepšího zobrazení, neboť reprezentace tímto způsobem je nejpřehlednější při zobrazení daných hodnot z pohledu k měření na začátku a na konci každé plochy. V grafu jsou zobrazeny hodnoty řezných sil před změnou a po změně otáček, a to pro všechny sklony jednotlivých vzorků. Opakovaná měření jsou označena písmenem „a“.

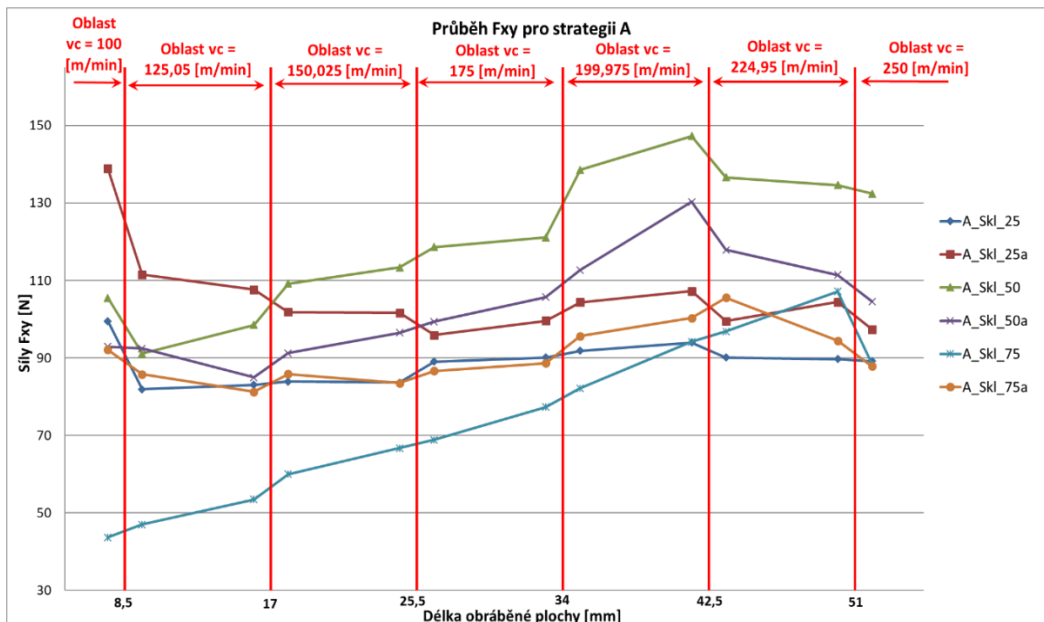
Tabulka 5-2 – Hodnoty řezné síly F_{xy} pro strategii B [3]

v_c [m/min]	F_{xy} [N]	B_Skl_25	B_Skl_25a	B_Skl_50	B_Skl_50a	B_Skl_75	B_Skl_75a
$v_c=100$	Nad přechodem	149,71	112,95	60,24	82,28	60,21	42,42
$v_c=125,05$	Pod přechodem	118,10	83,21	60,40	84,42	62,68	43,37
	Nad přechodem	107,59	80,84	66,31	88,24	78,33	46,90
$v_c=150,025$	Pod přechodem	106,75	84,02	68,01	90,39	88,37	51,36
	Nad přechodem	111,27	84,21	74,02	93,43	101,88	58,59
$v_c=175$	Pod přechodem	102,20	76,05	86,70	99,34	109,65	62,23
	Nad přechodem	115,49	84,30	94,76	106,01	107,96	78,89
$v_c=199,975$	Pod přechodem	113,41	99,18	95,27	101,82	120,97	84,79
	Nad přechodem	111,53	97,53	109,54	109,79	125,52	84,75
$v_c=224,95$	Pod přechodem	87,19	89,09	110,07	101,85	119,79	95,21
	Nad přechodem	103,13	93,42	122,97	91,42	123,47	95,26
$v_c=250$	Pod přechodem	96,76	86,02	119,30	95,50	124,73	77,57

V textu práce jsou hodnoceny řezné síly F_{xy} jako vhodnější zástupce pro zkoumání vlivu odtlačení nástroje. Na velikost řezné síly v rovině XY má značný vliv sklon plochy res. rozdílným efektivním průměrem D_{ef} pro jednotlivé sklony. Vzhledem k tomu, že pro celkové hodnocení je mnohem důležitější průběh řezných sil než celková velikost, je možné použít F_{xy} .

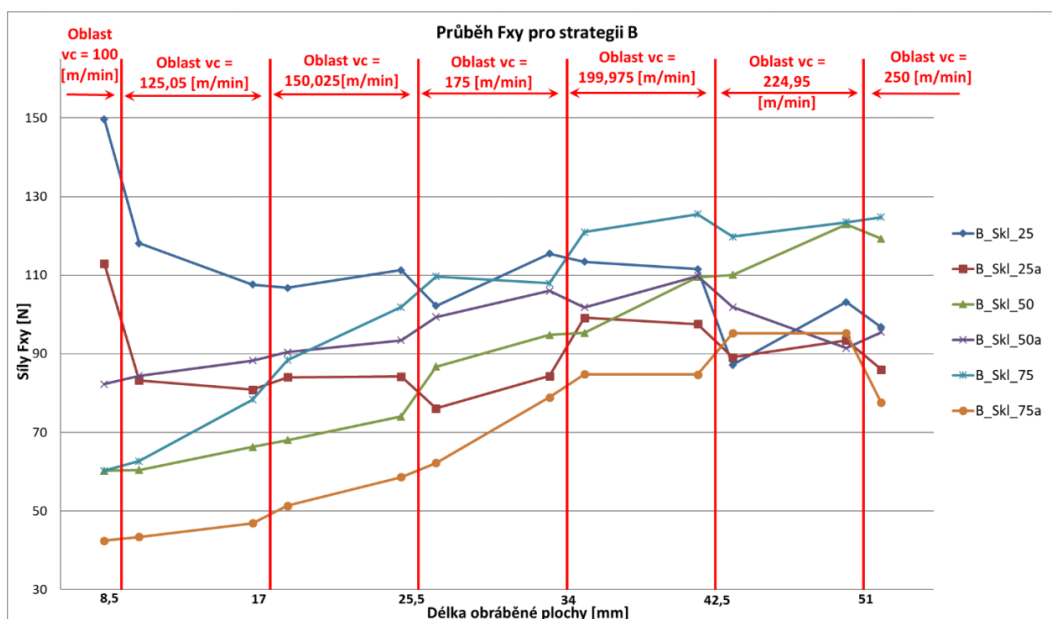
Z grafu na obr. 5-9, na kterém jsou řezné síly F_{xy} pro strategii A, je patrné, že nejvyšší hodnota byla dosažena při sklonu $\alpha=50^\circ$. Zde dochází také k nárůstu sil postupným zvyšováním řezné rychlosti, a to o přibližně 60 [N]. Obdobný průběh, i když s nižšími hodnotami, byl zaznamenán při opakovaném měření. V případě ostatních průběhů sice síly, s výjimkou prvního náměru pro řeznou rychlost $v_c = 100$ [m/min], rostou a to takřka lineárně, ale nárůst je velice malý. Jediný výrazný nárůst je u prvního vzorku pro sklon $\alpha=75^\circ$. Při opakovaném měření byl ovšem průběh přibližně stejný jako u sklonu $\alpha=25^\circ$. Je tedy možné, že tento průběh byl způsoben jiným vlivem, například opotřebením nástroje. Pro většinu měření docházelo k nárůstu řezných sil také mezi měřeními na začátku a na konci jednotlivých řezných rychlostí. Tento nárůst je většinou v rozmezí jednotek [N], ale je možné ho přiřadit otupování řezných hran nástroje.

Důležitým jevem, který je možné velice dobře vysledovat téměř u všech sledovaných změn, je že mezi jednotlivými změnami řezné rychlosti jsou nárůsty řezných sil velice malé, v řádech jednotek [N]. Z toho je možné usuzovat, že vliv změny řezné rychlosti by nemusel mít výrazný vliv na kvalitativní parametry dokončeného povrchu.



Obrázek 5-9 - Graf závislosti řezné síly F_{xy} pro strategii A [3]

Při pohledu na průběh řezné síly v rovině XY pro strategii B, zobrazené na obrázku 5-10, lze zjistit, že zde se pokles řezných sil mezi první a druhou řeznou rychlostí projevoval pouze pro sklon $\alpha=25^\circ$, a to výrazně. Od tohoto místa je průběh takřka lineárně stoupající a obdobný průběh lze vidět také u ostatních sklonů. U strategie B konstantního rozpočtu drah dle profilu je patrný menší a pozvolnější nárůst než u strategie rozpočtu A. Také zde nedochází k tak výraznému kolísání řezných sil s výjimkou sklonu $\alpha=25^\circ$.



Obrázek 5-10 - Graf závislosti řezné síly F_{xy} pro strategii B [3]

Zaměříme-li se i zde na změny průběhu řezných sil vlivem změn řezné rychlosti, u většiny přechodů je možné pozorovat velice malá změna maximálně v rozsahu 10 [N]. Jediná výjimka při změně z $v_{c1} = 100$ [m/min] na $v_{c2} = 125,05$ [m/min] u již zmiňovaného sklonu $\alpha=25^\circ$. To je opět velice vhodný výsledek, který dává možnost využití konstantní řezné rychlosti.

Zajímavé hodnoty jsou dosaženy např. u strategie B při sklonu $\alpha=75^\circ$. Zde je při opakování naměřena rozdílná hodnota síly o cca 20 [N]. To může být způsobeno např. opotřebením nástroje.

Při shrnutí výsledků obou strategií pro jednotlivé sklony je patrné, že průběhy až na určité výjimky jsou obdobné. Také změny řezných sil pro jednotlivé skoky řezných podmínek nevykazují velký rozptyl. Proto je možné z pohledu řezných sil brát použití strategie, která by měnila otáčky dle efektivního průměru D_{ef} nástroje jako použitelnou. Vliv použité strategie zde není zcela patrný. To může být způsobeno nevhodným bočním krokem, malým rozsahem sklonu plochy nebo nějakým dalším neuvažovaným vlivem. Pro celkovou řeznou sílu F jsou průběhy a tabulky s naměřenými daty v příloze 7. Průběhy jsou ovšem velice podobné řezné síle F_{xy} a není tedy nutné je zde detailně rozebírat.

5.3.1.2 Hodnocení drsnosti povrchu

Pro vyhodnocení drsnosti byl použit obdobný systém jako pro řezné síly. Rozdíl byl ve zpracování dat pro jednotlivé části vzorku. V případě řezných sil se jednalo o aritmetický průměr, zatímco u drsnosti povrchu byla do tabulky zapsána maxima. Z pohledu drsnosti jsou pro nás maximální hodnoty důležitější, neboť v praxi se pro hodnocení stavu povrchu používá právě maximální hodnota. Z těchto tabulek byly vytvořeny grafy znázorňující opět průběh jednotlivých parametrů drsnosti na změnách řezných sil vyjádřených obráběnou délkou.

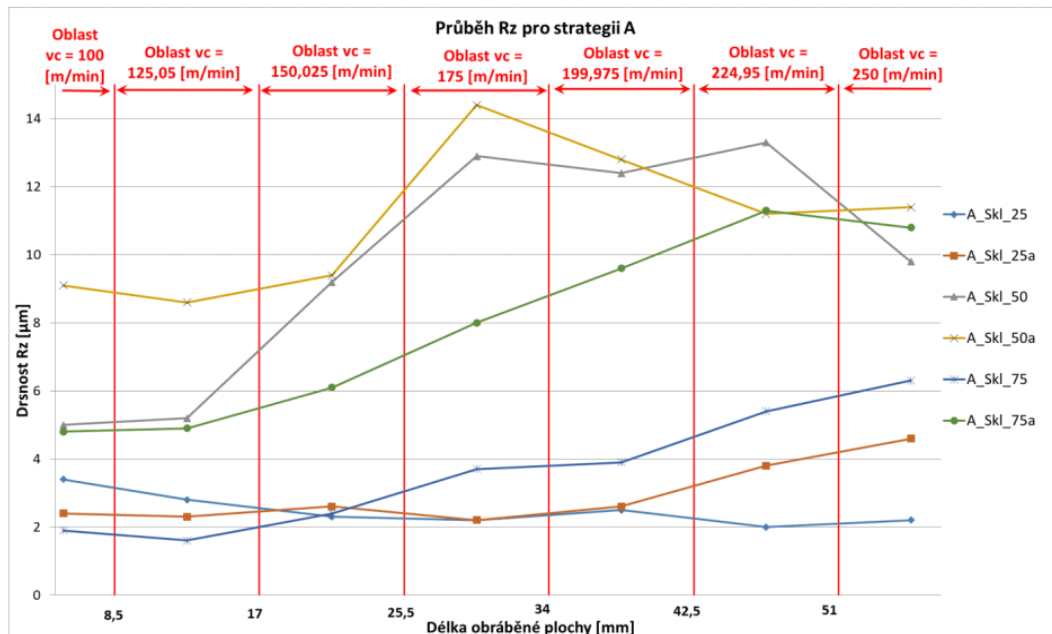
Tabulka 5-3 – Tabulka hodnot drsnosti pro strategii A [3]

Strategie A	A_Skl_25		A_Skl_25a		A_Skl_50		A_Skl_50a		A_Skl_75		A_Skl_75a	
v_c [m/min]	Ra [μm]	Rz [μm]	Ra [μm]	Rz [μm]	Ra [μm]	Rz [μm]	Ra [μm]	Rz [μm]	Ra [μm]	Rz [μm]	Ra [μm]	Rz [μm]
100	0,4	3,4	0,3	2,4	0,5	5	1,8	9,1	0,2	1,9	0,9	4,8
125,05	0,3	2,8	0,3	2,3	0,6	5,2	1	8,6	0,1	1,6	0,9	4,9
150,025	0,3	2,3	0,2	2,6	1,3	9,2	1,2	9,4	0,3	2,4	1	6,1
175	0,3	2,2	0,2	2,2	2,2	12,9	2,3	14,4	0,6	3,7	1,5	8
199,975	0,3	2,5	0,3	2,6	2	12,4	1,7	12,8	0,8	3,9	2	9,6
224,95	0,3	2	0,4	3,8	1,8	13,3	1,8	11,2	0,9	5,4	2,2	11,3
250	0,3	2,2	0,4	4,6	1,7	9,8	1,7	11,4	0,9	6,3	2,1	10,8

Vzhledem k tomu, že průběh drsnosti je jak pro parametr Ra tak pro Rz takřka identický, bude v hlavní části práce detailně popsána pouze drsnost dle parametru Rz. Tabulka s hodnotami pro strategii B a grafy pro průběh parametru Ra je uveden v příloze 8.

Pro strategii rozpočtu drah dle jedné osy označenou jako A, zobrazenou na obr. 5-11 je patrné, že významný vliv na hodnotu dosažení drsnosti má především sklon plochy. Průběh sklonu $\alpha=25^\circ$ je takřka lineární bez výrazného nárůstu kromě posledních dvou přechodů. Naopak plocha se sklonem $\alpha=50^\circ$ vykazuje mezi řeznými rychlostmi $v_{c3} = 150,025$ [m/min] a $v_{c6} = 224,95$ [m/min], výrazný nárůst. Především hodnota drsnosti $v_{c4} = 175$ [m/min] je výrazně

odlehlá od ostatních měřených segmentů. I tak plocha se sklonem $\alpha=50^\circ$ vykazuje výrazně vyšší hodnoty drsnosti. V případě ploch se sklonem $\alpha=75^\circ$ je průběh rostoucí, ale oproti prvnímu vzorku, který se více blíží sklonu $\alpha=25^\circ$, opakované měření roste mnohem výrazněji a měřené hodnoty se blíží sklonu $\alpha=50^\circ$. Zde není možné z naměřených dat určit důvod takto rozdílného výsledku a bude třeba podrobit tento jev dalšímu zkoumání.

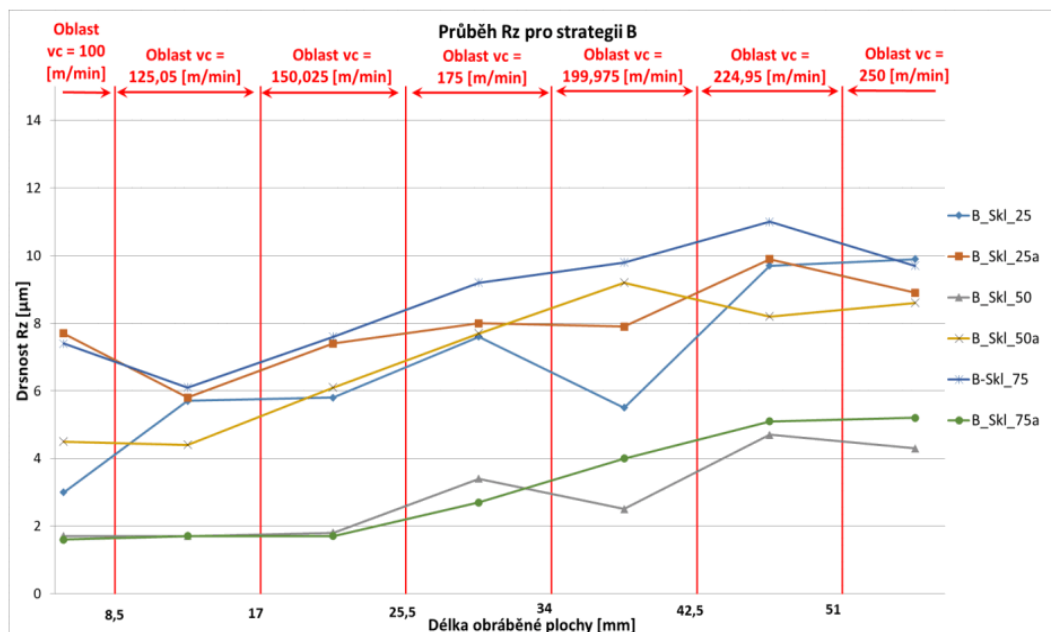


Obrázek 5-11 - Graf průběhu drsnosti Rz vlivem jednotlivých změn řezné rychlosti pro strategii A [3]

Alespoň částečné vysvětlení pro takto rozdílné výsledky jednotlivých sklonů je možné získat při porovnání s dosaženými výsledky při strategii B. Jednotlivé sklony jsou detailně popsány dále, ale při bližším prozkoumání průběhů a porovnání se strategií A je patrné, že volba strategie v kombinaci se sklonem má největší vliv na dosaženou drsnost. Tento fakt je velice zásadní. Především pro další zkoumání dokončování s použitím konstantní řezné rychlosti a následnou tvorbu metodiky dokončovací strategie.

Z grafu na obrázku 5-12 je patrné, že hodnoty drsnosti Rz pro rozpočet drah dle strategie B jsou sice vlivem stoupající řezné rychlosti rostoucí, ale průběh pro všechny sklony má obdobný charakter. Z toho lze usuzovat, že pro strategii B, na hodnoty drsnosti Rz nemá sklon plochy žádný významný vliv. Vzhledem k podstatě rozpočtu drah se jedná o očekávaný závěr.

U strategie B a jednotlivých sklonů je možné např. pro plochy s $\alpha=25^\circ$ pozorovat takřka shodné hodnoty. Ovšem pro zbylé dva sklony je obdobný pouze charakter průběhu a maximální hodnoty jsou rozdílné. Jedním z vysvětlení může být průběh řezných sil. Při srovnání průběhů sil v rovině XY a průběhů drsnosti pro strategii B, lze zjistit, že vzorky s nejnižší položeným průběhem mají také nejnižší hodnoty Rz. Tuto spojitost je možné pozorovat také u ostatních průběhů. Tento fakt je velice významný a je možné ho dále využít pro metodiku návrhu dokončovací operace.



Obrázek 5-12 - Graf průběhu drsnosti Rz vlivem jednotlivých změn řezné rychlosti pro strategii B [3]

Posledním a z pohledu naplnění cílů experimentu nejdůležitějším jevem je kolísání hodnot drsnosti vlivem změn řezné rychlosti. Zatímco u strategie A došlo zejména pro sklon plochy $\alpha=50^\circ$ k markantnímu nárůstu hodnot drsnosti dokončené plochy, pro strategii B takový nárůst není zcela pozorovatelný. K drobnému zakolísání došlo pouze pro sklon $\alpha=25^\circ$ u jednoho vzorku, ale ostatní hodnoty vykazují pozvolné zvyšování. Z toho je tedy patrné, že z pohledu drsnosti dokončené plochy při využití vhodného rozpočtu je použití konstantní řezné rychlosti využitelné.

Z vyhodnocení drsnosti povrchu na sledovaných vzorcích je možné vyvodit několik závěrů. Prvním závěrem je, že na hodnoty drsnosti má zásadní vliv použitý rozpočet v kombinaci se sklonem dokončované plochy. Tento závěr má pro dokončování obecně tvarově složité prostorové plochy, resp. tvorbu metodiky dokončovacích strategie, důležitý přínos. Je patrné, že pokud na ploše dochází k výrazné změně sklonu tečny od horizontální roviny, je nezbytné použít jiný rozpočet drah, než je konstantní boční krok v jedné ose. Bude tak možné dosáhnout rovnoměrné kvality dokončeného povrchu. Dalším výstupem je, že změny řezných podmínek nezpůsobují zhoršování sledovaných parametrů kvality povrchu. V případě tohoto závěru se jeví strategie s konstantní řeznou rychlostí jako využitelná pro další rozvoj zvyšování efektivity v oblasti dokončovacích operací. Posledním závěrem je, že pro strategii B je možné najít spojitost mezi průběhem řezné síly F_{xy} a drsnosti Rz. Z provedeného experimentu není možné vyvodit obecně platný závěr, ale z pohledu dalšího rozvoje má tento fakt důležitou roli. Pokud bychom byli schopni na základně řezných sil odvodit kvalitu dokončené plochy, bylo by možné tento vztah použít pro úpravu drah již v samotném návrhu.

Hodnocení drsnosti ve vertikálním směru nepřineslo žádné zásadní výsledky vzhledem ke zkoumaným jevům. Hodnoty kopírovaly trendy zjištěné při hodnocení ve vertikálním směru. V textu práce není hodnocení uvedeno a jednotlivá data je možné najít v elektronické příloze práce.

5.3.1.3 Hodnocení rozměrové přesnosti

Naměřené hodnoty byly opět zpracovány do tabulek, pro každý segment vzorku byl vytvořen aritmetický průměr z jednotlivých odstupů do modelu. V případě rozměrové přesnosti by bylo vhodnější vyhodnocovat maximální hodnotu měřenou na dané ploše namísto aritmetického průměru. Vzhledem k tomu, že naměřené výsledky slouží pro vzájemné porovnání dosažené přesnosti mezi jednotlivými vzorky resp. vzájemné porovnání využitých strategií, sklonů a jevů na přechodech řezných parametrů, nedošlo využitím aritmetického průměru k žádnému výraznému ovlivnění výsledků. Možnost využít aritmetický průměr dával také charakter dat, která kolísala přes danou plochu v řádech setin milimetru a vykazovala tak Gaussovo rozdělení a také návaznost na statistické vyhodnocení, které s průměry pracuje.

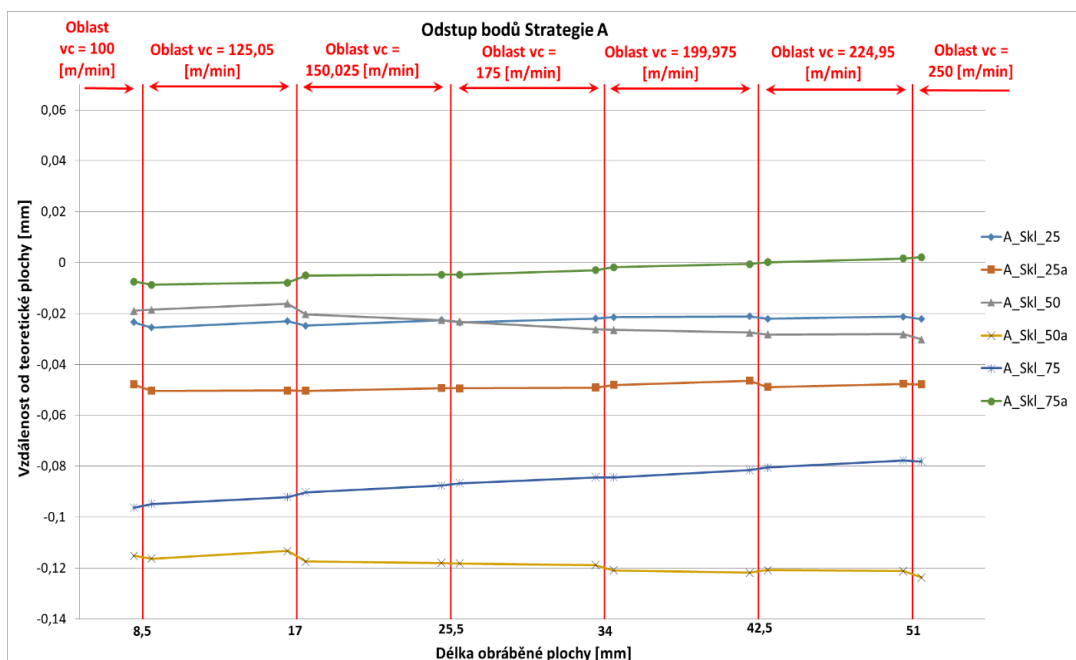
Tabulka 5-4 – průměrné hodnoty odstavu bodu od modelu pro strategii A [3]

v_c [m/min]	Strategie A	A_Skl_25	A_Skl_25a	A_Skl_50	A_Skl_50a	A_Skl_75	A_Skl_75a
vc=100	Nad přechodem	-0,0235	-0,0479	-0,0189	-0,1152	-0,0963	-0,0075
	Pod přechodem	-0,0256	-0,0504	-0,0186	-0,1163	-0,0949	-0,0087
vc=125,05	Nad přechodem	-0,0230	-0,0503	-0,0161	-0,1133	-0,0921	-0,0079
	Pod přechodem	-0,0248	-0,0504	-0,0203	-0,1176	-0,0903	-0,0051
vc=150,025	Nad přechodem	-0,0226	-0,0494	-0,0226	-0,1180	-0,0876	-0,0047
	Pod přechodem	-0,0236	-0,0494	-0,0232	-0,1182	-0,0867	-0,0047
vc=175	Nad přechodem	-0,0220	-0,0491	-0,0263	-0,1188	-0,0844	-0,0030
	Pod přechodem	-0,0214	-0,0481	-0,0265	-0,1210	-0,0844	-0,0019
vc=199,975	Nad přechodem	-0,0212	-0,0464	-0,0275	-0,1219	-0,0816	-0,0005
	Pod přechodem	-0,0221	-0,0489	-0,0283	-0,1209	-0,0805	0,0002
vc=224,95	Nad přechodem	-0,0212	-0,0476	-0,0281	-0,1212	-0,0778	0,0016
	Pod přechodem	-0,0222	-0,0479	-0,0302	-0,1238	-0,0782	0,0021

Z takto zpracovaných dat byly poté vytvořeny grafy průběhů odstavů bodů od modelu v závislosti na vzdálenosti, obdobně jako tomu bylo pro řezné síly a drsnost povrchu. Příklad naměřených dat pro strategii A je uveden v tabulce 5-4. Tabulka pro strategii B je uvedena v příloze 9, zdrojová data jsou uvedena v elektronické příloze práce.

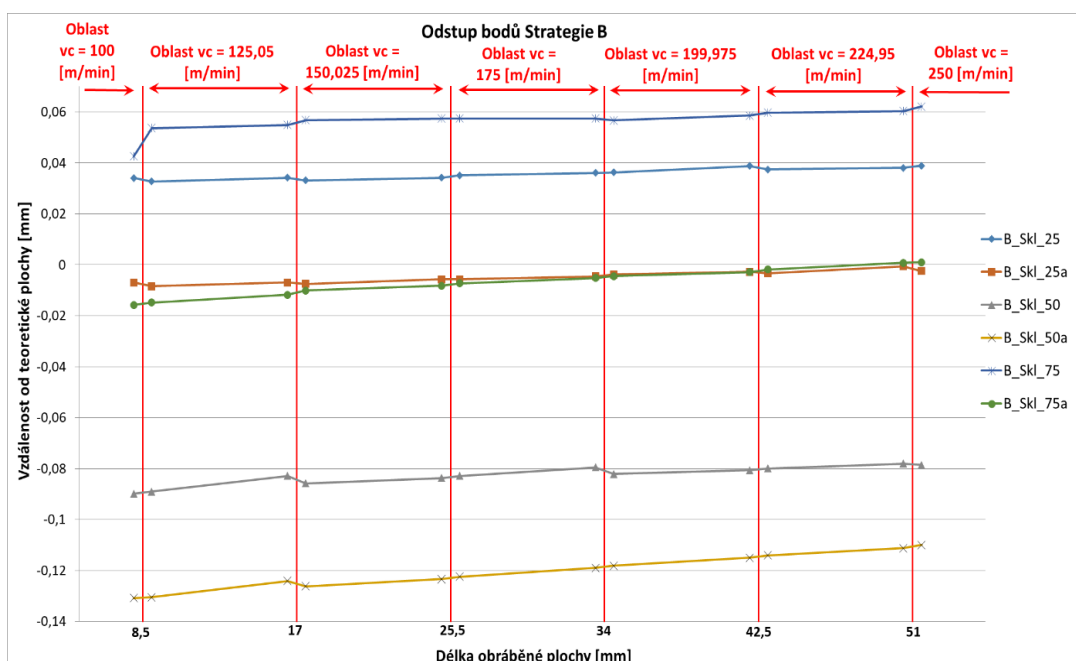
Z grafu závislosti odstavu jednotlivých bodů od modelu zobrazeného na obrázku 5-13 pro strategii A je možné vypočítat tři jevy relevantní pro oblast výzkumu řešenou v této dizertační práci. První z nich je fakt, že jednotlivé maximální hodnoty odstavů bodů jsou více závislé na opotřebení použitého nástroje, než na některém ze sledovaných parametrů. Tento závěr je patrný z toho, že nejsou pozorovány společné maximální hodnoty pro jednotlivé sklony ani strategie rozpočtu. Každý vzorek má svoje maximum dle aktuálního odtlačení a není možné vypočítat společnou charakteristiku ani s průběhem řezných sil.

Rozdílné maximální velikosti tvarových odchylek jsou s největší pravděpodobností dány efektivním průměrem pro daný sklon plochy. Jedná se o negativní jev, neboť jeho kompenzace je značně problematická, zejména při obrábění tvarově složitých ploch díky neznalosti hodnoty odtlačení. Protože práce se zabývá zkoumáním vlivu konstantní řezné rychlosti, která, jak je patrné, nepřináší výrazné zhoršení sledovaného parametru, nebude se práce dále tímto jevem zabývat.



Obrázek 5-13 - Graf průběhu odstupu bodu od modelu vlivem jednotlivých změn řezné rychlosti pro strategii A [3]

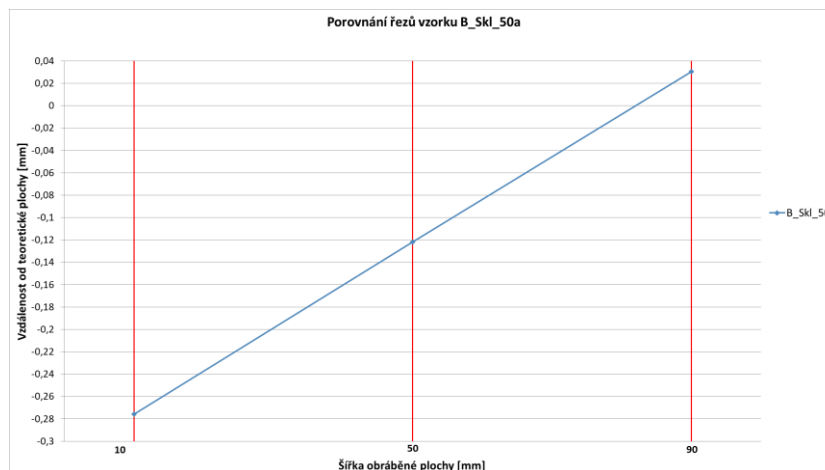
Mnohem podstatnější je tedy druhý fakt, a to že tyto průběhy mají sice se stoupající řeznou rychlostí rostoucí tendenci, ale průběh je takřka lineární bez významnějšího kolísání. Také nárůst v průběhu jednoho vzorku je v rozsahu maximálně 0,02 mm, což je výsledek velice příznivý. Zde už je možné najít vztah rozptylu hodnot pro jednotlivé měřené sklony, kdy např. plocha se sklonem $\alpha=25^\circ$ vykazuje nejmenší hodnoty rozptylu a naopak plocha se sklonem $\alpha=50^\circ$ má rozptyl výrazně vyšší. Takovýto průběh je pro strategii rozpočtu B. Bylo by tedy možné zde nalézt i spojitost s použitou strategií, ovšem jak již bylo zmíněno, hodnoty rozptylu jsou tak malé, že už se dostáváme k hodnotám chyb měření a pro detailnější prozkoumání by bylo třeba provést další experimenty zaměřené na zmíněnou oblast.



Obrázek 5-14 - Graf průběhu odstupu bodu od modelu vlivem jednotlivých změn řezné rychlosti pro strategii B [3]

Posledním vlivem, který bylo možné posoudit ze zpracovaných dat, je rozdíl odstupů bodu od modelu před změnou řezných podmínek a po jejich změně. Z grafů, a to jak pro strategii A tak strategií B, je patrné, že změny hodnot jednotlivých odstupů se mění jen minimálně. Je tedy možné usuzovat, že změna řezné rychlosti má na hodnotu odstupů od pomyslné nuly jen velmi malý vliv. Tento výsledek je opět velice kladný pro další testování dokončovacích strategií využívajících konstantní řeznou rychlost.

U několika vzorků byla po naměření zjištěna velice odlišná hodnota odstupů od teoretické nuly po délce měřené plochy. Zatímco na začátku měření byla hodnota odstupů takřka -0,28 mm, na konci měřené plochy byla hodnota +0,02. Tento rozdíl takřka 0,3 mm byl s největší pravděpodobností způsoben chybou při ustavení při samotné výrobě.



Obrázek 5-15 - Graf tvarové úchylnosti odstupů bodu od modelu naměřené přes plochu vzorku pro $vc=175m/min$ [3]

Chybě ustavení je možné tento jev přisoudit hned z několika důvodů. Prvním je výskyt pouze u několika vzorků. Ke kolísání pro jednotlivé segmenty docházelo takřka u všech vzorků a rozdíly hodnoty byly v maximálně v řádech jednotek mikrometrů. Takto markantní rozdíl byl pouze u malé skupiny vzorků. Druhý důvod, proč daný průběh přiřadit chybě ustavení, je dán takřka lineární změnou hodnot přes měřený segment. Díky tomu bylo možné danou chybu výroby popsat a následně odfiltrovat. Při měření byla tato chyba odstraněna natočením měřicího souřadného bodu. Vzhledem k tomu, že nárůst byl přes všechny oblasti takřka identický, bylo možné dopočítat úhel natočení, a tím nedostatek vzniklý při výrobě vzorků kompenzovat. Příklad rozdílného výsledku na dané ploše je zobrazen na obrázku 5-15.

Z celkového hodnocení rozměrové přesnosti dokončené plochy stanovené na základě odstupů bodu od modelu je možné usoudit několik závěrů. Nejdůležitějším z nich je, že vlivem změn řezné rychlosti nedochází k markantním změnám odstupů. Díky tomu je strategie dokončování s konstantní řeznou rychlostí možné doporučit k dalšímu komplexnějšímu zkoumání. Dále je pak možné najít určité rozdíly vlivem sklonu plochy. Tato skutečnost je důležitá pro další zkoumání, ale z provedeného experimentu není možné vyvodit obecné závěry. Posledním faktem je, že bez ohledu na použitou strategii nebo sklon plochy jsou maximální hodnoty dokončené plochy značně odlišné. Tento fakt lze přisuzovat opotřebení nástroje a rozdílnému efektivnímu průměru D_{ef} pro každý sklon plochy.

5.3.2 Statistické hodnocení výsledků

Statistické vyhodnocení celého experimentu probíhalo následovně. Prvně byla měřená data zkoumána z pohledu hrubých chyb a odlehklých hodnot. K tomu byl použit Grubbsův test. Tyto hodnoty byly odstraněny tak, aby nezkreslovaly následné vyhodnocení. Dále pak bylo zjištěno, zda naměřené hodnoty vykazují Gaussovo rozdělení pomocí Shapiro-Wilkovo testu. V případě, že ano, bylo dále provedeno testování hypotéz a následně provedena analýza rozptylu. Zde byl posouzen vliv jednotlivých hypotéz. V tomto případě se pracuje pouze s daty, která vykazují statistický význam tedy ta, která přijímají alternativní hypotézu. Neboť v případě analýzy rozptylu se jedná o speciální případ lineární regrese, díky tomu je tedy možné data s prokázaným vlivem popsat lineárním modelem.

Příklad zpracovaných dat je uveden v tabulce 5-5. Důležitým parametrem je hodnota dosažené hladiny významnosti „p“. Tento parametr je porovnán s hodnotou $\alpha_v = 0,05$ a na základě tohoto posouzení je posouzena hladina statistické významnosti. V uvedeném příkladu je vidět, že hodnota tohoto faktoru je pod 1% což znamená, že data jsou statisticky významná. Dále je důležitý parametr „Adjusted R2“, který popisuje upravený index determinace. Zjednodušeně je možné tuto hodnotu chápat jako schopnost modelu vysvětlit variabilitu experimentálně získaná data. Pro celkovou sílu F je tato shoda pouze 55%, což je relativně málo. Vzhledem k tomu, že se jedná o upravený index determinace, tato hodnota je ovlivněna množstvím porovnávaných faktorů. Pro tento konkrétní model je porovnáváno celkem sedm faktorů. Díky tomu je hodnota výpočtem snížena, a to v závislosti na vlivu jednotlivých faktorů. Díky významnému vlivu některého neuvažovaného faktoru je po výpočtu tato hodnota relativně nízká, to ovšem nesnižuje celkovou vypovídající schopnost naměřených dat.

Tabulka 5-5 – Tabulka posouzení statistického významu pro velikost celkové síly F

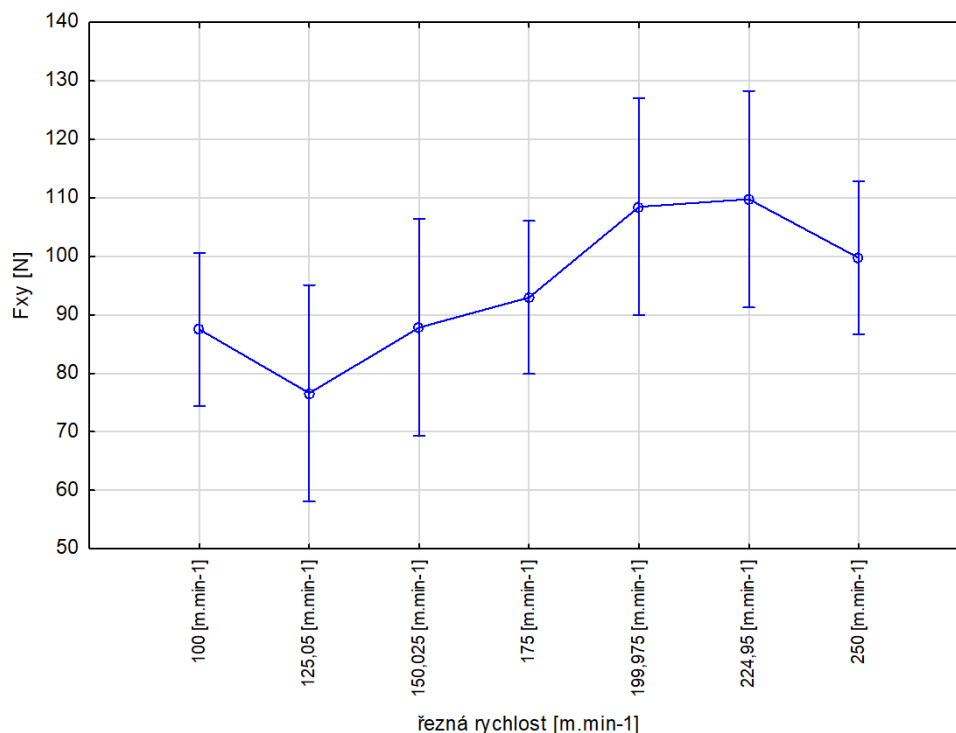
Dependent Variable	Test of SS Whole Model vs. SS Residual (ANOVA.sta)										
	Multiple R	Multiple R2	Adjusted R2	SS Model	df Model	MS Model	SS Residual	df Residual	MS Residual	F	p
Fc[N]	0,93044 2	0,86572 3	0,55987 0	81379,5 5	41	1984,86 7	12622,3 0	18	701,238 6	2,83051 6	0,00997 5

V případě statistického významu celého modelu byl následně proveden test posouzení jednotlivých sledovaných faktorů. Ten je pro parametr celkové síly F uveden v tabulce 5-6. Zde je již možné pozorovat, že významný vliv má samotný sklon a poté vzájemná kombinace sklonu a použité strategie. Poslední statisticky významné hodnoty byly zjištěny pro konstantní nebo zanedbané faktory. Vzhledem k tomu, že tyto faktory mají významný vliv, je již zmiňovaná hodnota „Adjusted R2“ pro tento model relativně nízká.

Tabulka 5-6 – Tabulka posouzení vlivu jednotlivých faktorů

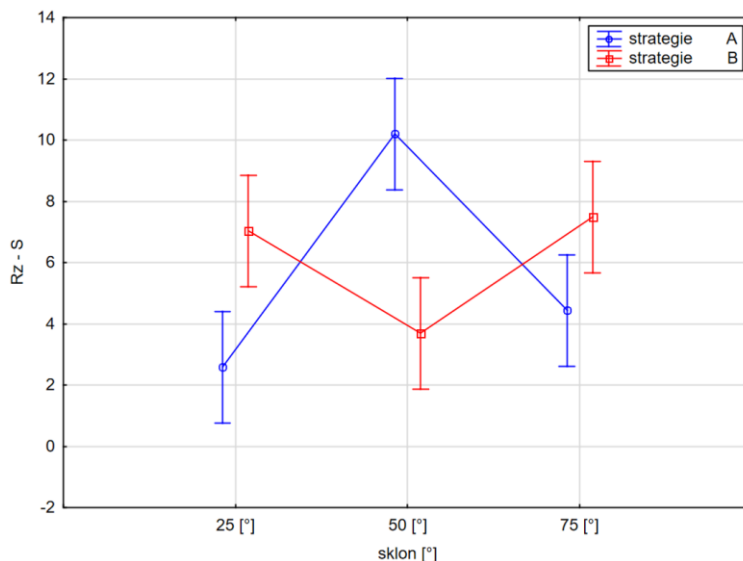
Effect	Univariate Tests of Significance for Fc[N] (ANOVA.sta) Sigma-restricted parameterization Effective hypothesis decomposition				
	SS	Degr. of Freedom	MS	F	p
Intercept	799683,4	1	799683,4	1140,387	0,000000
řezná rychlost [m.min-1]	10311,3	6	1718,5	2,451	0,065548
sklon [°]	33253,8	2	16626,9	23,711	0,000009
strategie	992,0	1	992,0	1,415	0,249746
řezná rychlost [m.min-1]*sklon [°]	9563,5	12	797,0	1,137	0,391619
řezná rychlost [m.min-1]*strategie	739,6	6	123,3	0,176	0,979994
sklon [°]*strategie	17707,2	2	8853,6	12,626	0,000375
řezná rychlost [m.min-1]*sklon [°]*strategie	2757,9	12	229,8	0,328	0,973187
Error	12622,3	18	701,2		

Výsledky statistického hodnocení prokazují trendy zjištěné pro řezné síly. Shodný trend s technickým hodnocením byl nalezen jak pro sílu F, tak pro F_{xy} . Pro složku v rovině XY nebyl model ověřen, ale zjištěné trendy se shodují. Pro celkovou sílu je také trend shodný a je možné ho vidět na grafu na obrázku 5-16.



Obrázek 5-16 - Graf statistického hodnocení celkové síly F

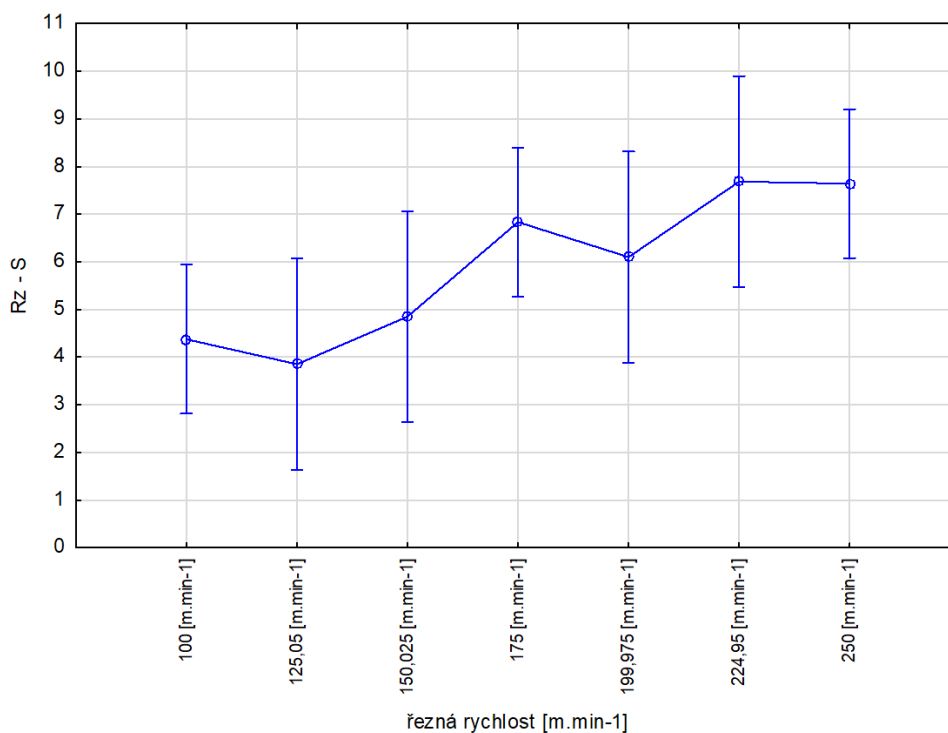
Na základě těchto výsledků je možné potvrdit mírný nárůst řezných sil, a to pro vlivem stoupající řezné rychlosti. Zobrazený propad mezi $v_{c1} = 100$ [m/min] a $v_{c2} = 125,05$ [m/min], je možné sledovat také u technického hodnocení, kdy vlivem zvyšující se řezné rychlosti nejprve řezná síla klesá a následně začne růst.



Obrázek 5-17 - Grafická závislost strategií na sklonu plochy

Pro hodnocení drsnosti povrchu byla analyzovaná data statisticky významná zejména pro parametr Rz. Zde má na průběh významný vliv řezná rychlost a strategie v kombinaci se sklonem plochy. Statistické vyhodnocení nám opět potvrdilo trendy sledované již při technickém hodnocení. Kombinace strategie dokončování a sklonu plochy zcela patrně kopíruje technické hodnocení. Pro strategii B je u sklonu $\alpha=50^\circ$ patrné mírné snížení a následný nárůst, který je v grafu na obr. 5-12, jen málo patrný. Naopak u strategie A je pro tento sklon viditelný nárůst, který můžeme také pozorovat v grafu na obrázku 5-11.

Vliv řezné rychlosti na drsnost Rz je, že vlivem stoupající řezné rychlosti hodnoty Rz mírně rostou. Nedochází však k žádnému výraznému skoku a je tedy možné se ztotožnit s výsledky z technického hodnocení. Graf je patrný na obr. 5-18.



Obrázek 5-18 - Graf statistického hodnocení drsnosti povrchu

Hodnocení rozměrové přesnosti se nepodařilo prokázat. Velký podíl na tom může mít zmiňovaná chyba ustavení, kterou bylo možné v technickém hodnocení kompenzovat. Avšak při statistické hodnocení takto postupovat nelze, a tak byla značná část dat označena jako chybná. Veškerá data použitá pro statistické hodnocení jsou v elektronické příloze této dizertační práce s názvem: „Statistické vyhodnocení prvního experimentu“

5.4 Shrnutí a posouzení výsledků

Základním cílem celého experimentu bylo zjistit, zda bude mít změna otáček, v tomto případě reprezentovaná hodnotami řezné rychlosti, vliv na kvalitu dokončené plochy. V jednotlivých bodech bylo provedeno shrnutí vlivů pro jednotlivé sledované parametry. V následujícím textu jsou tyto výsledky porovnány vůči sobě z důvodu celkového posouzení změny řezných parametrů na dokončovanou plochu.

5.4.1 Shrnutí výsledků

Provedený experiment dává ucelený přehled o základních projevech změny otáček na dokončenou plochu. Dosažené výsledky dávají odpověď na výchozí cíle, a to zda změny otáček ovlivní drsnost a rozměrovou přesnost na přechodech jednotlivých segmentů. Výrazná změna sledovaných parametrů drsnosti a rozměrové přesnosti mezi dvěma po sobě jdoucími řeznými podmínkami nebyla pozorována ani v kombinaci s použitou strategií rozpočtu ani sklonem dokončované plochy. Také celkový charakter průběhu je vhodný pro nasazení strategie pro další experimenty. Ve většině případů je charakter sledovaných parametrů zvyšující se, a to jak pro řezné síly, tak parametry kvality. To je sice nevhodné při dokončování šikmých ploch, ale vzhledem k cílům experimentu je to jev očekávaný.

Vliv použité strategie se projevuje především na parametrech drsnosti. Zde je patrné, že nevhodný typ rozpočtu může mít negativní vliv na drsnost dokončené plochy i u velmi jednoduchých tvarů. Pro následující experimenty je tedy s tímto jevem třeba počítat a zohlednit ho.

Sklon plochy se nejvíce projevoval pro průběh řezných sil. Ty jsou ovšem nejvíce ovlivňovány záběrovými podmínkami, které v tomto případě nejvíce ovlivnil právě sklon plochy a jedná se tedy o očekávaný výsledek.

Velice zajímavé je porovnání průběhu řezných sil v rovině XY a hodnot drsnosti R_z pro strategii B. Zde je velice dobře pozorovatelné, že mají oba parametry velice podobný charakter průběhu, ale mají podobné rozložení, i co se týče jednotlivých vzorků. Například vzorek se sklonem $\alpha=75^\circ$ má nejnižší hodnoty drsnosti R_z a také síly v dané rovině jsou nejnižší. Obdobné průběhy můžeme najít i pro ostatní vzorky. Tento fakt je velice důležitou souvislostí pro další vývoj dokončovací strategie. Z provedeného experimentu není možné vytvářet obecné závěry, ale bude dobré se na vzájemnou interakci zaměřit i v následujících experimentech.

Statistické hodnocení, zejména pro parametry drsnosti R_z a celkové síly F , potvrzuje zjištěné trendy, a to jak o vlivu změny řezné rychlosti, tak částečně i o sklonu plochy a použité strategii. Zjištěná data mají shodu s modelem jen něco málo přes 50%, což se může zdát jako nedostatečné. Ovšem je zapotřebí brát v úvahu, že například boční krok jako konstantní faktor má velký vliv na všechny sledované parametry. Proto je potřeba dát přesnost modelu pouze jako orientační hodnotu.

5.4.2 Posouzení výsledků pro dokončovací operace

Všechny zmíněné výsledky jsou sice reprezentované pouze na šikmé ploše, ale hlavní cíl zjištění vlivu změny kvality dokončené plochy změnami řezných podmínek se podařilo prokázat celkem jednoznačně. Ze všech zmíněných výsledků je patrné, že tyto uvažované skoky otáček by neměl mít na jakost dokončené plochy zásadní dopad. Díky těmto závěrům je možné podrobit strategii dokončování s použitím konstantní řezné rychlosti zkoumání na tvarově složitější ploše. Tyto následující experimenty by měly přinést detailnější informace o vlivu jejího použití na sledované parametry zejména kvality dokončené plochy.

6 Experimentální zkoumání kvality a rozměrové přesnosti při dokončování rádiusové plochy za použití konstantní řezné rychlosti

Výsledky předchozího experimentu prokázaly, že použitím konstantní řezné rychlosti nedochází k zhoršování sledovaných parametrů v rozsahu platnosti provedeného experimentu. Pro ověření, zda bude mít tato strategie přínosy z pohledu efektivity a zlepšení jakosti dokončené plochy zvláště pro tvarově složitě plochy, je nutné provést další experimenty. První z nich je představen v následující kapitole.

První experiment byl realizován na šikmých plochách, ty lze chápat jako tvarové plochy při tříosém obrábění, ale pouze jako úplně nejjednodušší variantu tvarové plochy. Realizace následujícího experimentu byla provedena na rádiusové ploše. Tu lze chápat jako další úroveň reprezentující obecnou tvarovou plochu. Z pohledu měření a vyhodnocení je ovšem velice výhodnou zvláště pro hodnocení vlivu konstantní řezné rychlosti. Celý experiment byl dále rozšířen o další vlivy.

Jedním z těchto zkoumaných vlivů je průměr dokončovacího nástroje. Vzhledem k problematice dokončování, které je realizováno kulovou frézou, jsou předpoklady, jaký vliv má průměr nástroje na dokončovanou plochu. Ovšem relevantní data z experimentálního měření nebyla nalezena v žádném zdroji. Navíc, spojíme-li průměr nástroje s velikostí rádiusové plochy, vznikne vzájemnou kombinací další problematika, pro jejíž objasnění nebyl nalezen relevantní pramen. Jako další vliv bude tedy zkoumán rádius dokončované plochy.

Kromě těchto doprovodných jevů budou v provedeném experimentu řešeny různé strategie rozpočtu drah vždy v kombinaci s použitím konstantních otáček nebo konstantní řezné rychlosti. V tomto případě již změna otáček není spojena se změnou efektivní řezné rychlosti, ale naopak.

Hodnocení efektivity procesu bude v tomto výchozím experimentu posuzováno pouze na základě času dokončování.

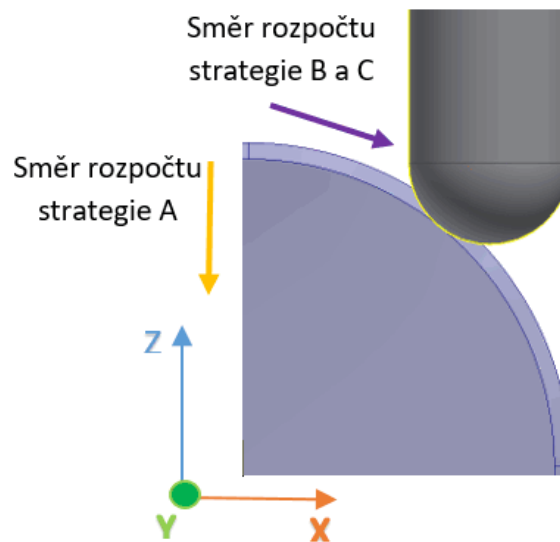
Z výše zmíněných poznatků je možné shrnout a zformulovat cíle celého experimentu:

- Ověření zvýšení efektivity vlivem použití strategie s konstantní řeznou rychlostí
- Ověření vlivu strategie využívající konstantní řeznou rychlosti na kvalitu dokončeného povrchu
- Ověření vlivu použité strategie rozpočtu drah v kombinaci s konstantní řeznou rychlostí na kvalitu dokončené plochy
- Určení vlivu průměru nástroje a jeho interakce s ostatními faktory na sledované parametry
- Určení vlivu rádiu dokončované plochy a jeho interakce s ostatními faktory na sledované parametry

6.1 Návrh experimentu a postup realizace

Pro návrh experimentu bylo opět využito statistické plánování. Pro tento experiment byly vybrány čtyři proměnné faktory. Vzhledem k tomu, že výsledky by měly prokázat vliv použití konstantní řezné rychlosti, bylo nutné vzájemně porovnat standardní strategii, která nastaví otáčky dle maximálního průměru nástroje a strategii novou. Tyto dva typy strategií byly vždy kombinovány s třemi základními typy rozpočtu popsány v teoretické části. Pro náš případ

byla pro rozpočet v jedné ose použita osa nástroje. Rozpočty dle profilu a dle výšky zbytkového materiálu poté používaly pro krok vždy sečnu dané části rádiu. Strategie rozpočtu dle profilu měla tento krok definovaný na začátku, zatímco pro strategii rozpočtu dle výšky zbytkového materiálu byla hodnota kroku vypočítávána dle zadané hodnoty zbytkové výšky. Všechny směry rozpočtu jsou zobrazeny na obr. 6-1.



Obrázek 6-1 - Směry rozpočtu drah jednotlivých strategií v souřadném systému stroje pro testované vzorky[2]

Dalším proměnným faktorem byl zvolen průměr nástroje, a to z důvodu prozkoumání jeho vlivu na kvalitu dokončené plochy. Jedná se sice o obecně známý vliv, který předpokládá, že využitím většího průměru nástroje by měla být především drsnost dokončeného povrchu nižší. Většina realizovaných experimentů v nalezených pramenech však využívá pouze jeden průměr nástroje a experimentální ověření tohoto vlivu na kvalitu dokončené plochy nebylo tak z dostupných zdrojů nalezeno, a to jak pro rádiusové plochy, tak pro obecné tvarové plochy.

Posledním proměnným faktorem je rádius dokončované plochy. Vzhledem k tomu, že při prvním experimentu bylo pro určitý sklon plochy dosaženo výrazně horších výsledků drsnosti, byl zde předpoklad, že změna sklonu tečny kontaktního bodu CC od horizontální roviny může mít vliv na drsnost dokončeného povrchu. Proto byla zvolena rádiusová plocha z rozsahem 0° až 90° . Na této ploše dojde k plynulé změně sklonu tečny v kontaktním bodě CC a bude tedy možné lépe prozkoumat, zda tato změna má výrazný vliv na drsnost dokončení plochy pro jednotlivé strategie. Z důvodu zobecnění očekávaných výsledků byly zvoleny rádiusové plochy v rozsahu $R = 10 - 50$ mm.

Obdobně jako u prvního experimentu byly jako konstantní faktory zvoleny přídavek na dokončení, boční krok rozpočtu nebo výška zbytkového materiálu, posuv na zub, počet zubů nástroje a typ nástroje. Ostatní parametry byly voleny s ohledem na co nejlepší výsledek dokončování, jako např. vyložení nástroje a další. Detailně jsou parametry uvedeny v tabulce 6-1.

Tabulka 6-1 – Vstupní faktory pro plánovaný experiment

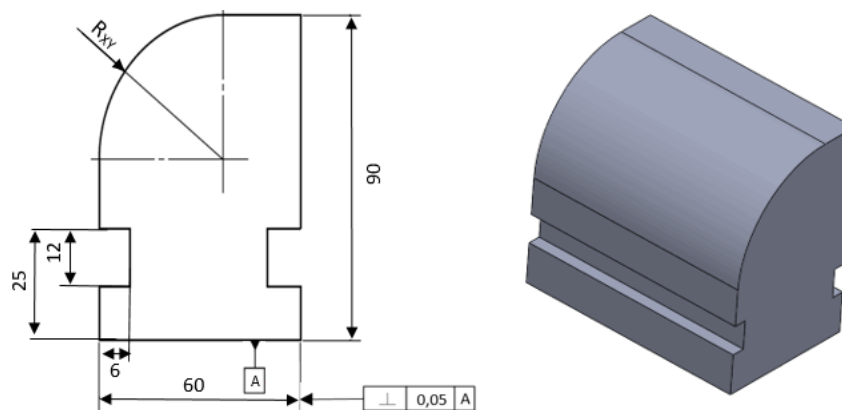
Proměnné faktory						
Strategie	A - konstantní krok v ose Z	B - Konstantní krok po křivce		C – Rozpočet dle zadané výšky nerovnosti		
Varianta řezné rychlosti	1 – konstantní otáčky			2 – konstantní v_c		
Rádus dokončované plochy [mm]	R	10,201	16	30	44	49,799
Průměry fréz [mm]	D_n	3	4,9	9,5	14,1	16
Konstantní faktory						
Posuv na zub [mm]	f_z	0,1				
Radiální krok rozpočtu drah [mm]	a_e	0,1				
Výška zbytkového materiálu [μm]		0,9				
Hloubka řezu [mm]	a_p	0,2				
Řezná rychlost [m/min]	v_c	80				
Počet zubů [-]	z	4				

Dle takto definovaných proměnných faktorů byl vytvořen plán experimentu. Pro plánování byly faktory strategie rozpočtu drah a definice řezných podmínek sloučeny do jednoho zahrnujícího oba vlivy. Plán byl tedy vytvořen vždy pro konkrétní strategii rozpočtu A, B nebo C a číslo uvedené za ní značilo, zda bude strategie realizována konstantními otáčkami nebo konstantní řeznou rychlostí.

Dle statistického plánování byl použit ortogonální centrálně středěný plán. Na základě tohoto plánu byl výsledný počet vzorků 60. Tato hodnota je dána vzájemnou kombinací jednotlivých proměnných faktorů. Oproti prvnímu experimentu se tak jedná o výrazně vyšší počet vzorků. Díky tomu samotné provedení a následné měření a zpracování vzorků bylo značně náročnější. Celý plán je uveden v příloze 10.

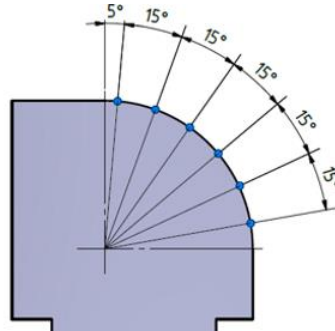
6.1.1 Zkušební vzorek

Návrh zkušební vzorku vycházel ze stejného základu, jako u prvního experimentu. Jednalo se o kvádr o rozměrech 60x100x90. Schematické znázornění se základními rozměry a prostorový pohled vzorku je zobrazen na obr. 6-2. Všechny vzorky byly broušeny pro zvýšení přesnosti při polohování a měření a také drážky pro upínání jsou totožné.



Obrázek 6-2 - Schématické zobrazení experimentálního vzorku

Výchozí polotovary byly obrobeny s konstantním přírůstkem po celé ploše. Oproti prvnímu experimentu nebyla plocha rozdělena dle vzdálenosti, ale vzhledem k tomu, že rádius plochy byl na jednotlivých vzorcích různý, byl jediným společným geometrickým parametrem úhel daného segmentu. Rozdělení plochy bylo realizováno pomocí úhlu od vertikální roviny. První segment byl po 5° a každý další poté po 15°. Rozdělení zkušební vzorku je vidět na obr. 6-3.



Obrázek 6-3 - Rozdělení zkušební plochy pomocí úhlů [2]

Materiál experimentálních vzorků byl opět totožný s prvním experimentem a jednalo se o etalonovou ocel ČSN 41 2050.1 nebo dle DIN C45. Celá specifikace je v příloze 5.

6.1.2 Příprava programů

Příprava programů byla realizována obdobně jako v prvním experimentu. Pro modelování, hrubování a před-dokončování byl použit SW SolidWorks resp. modul SolidCAM.

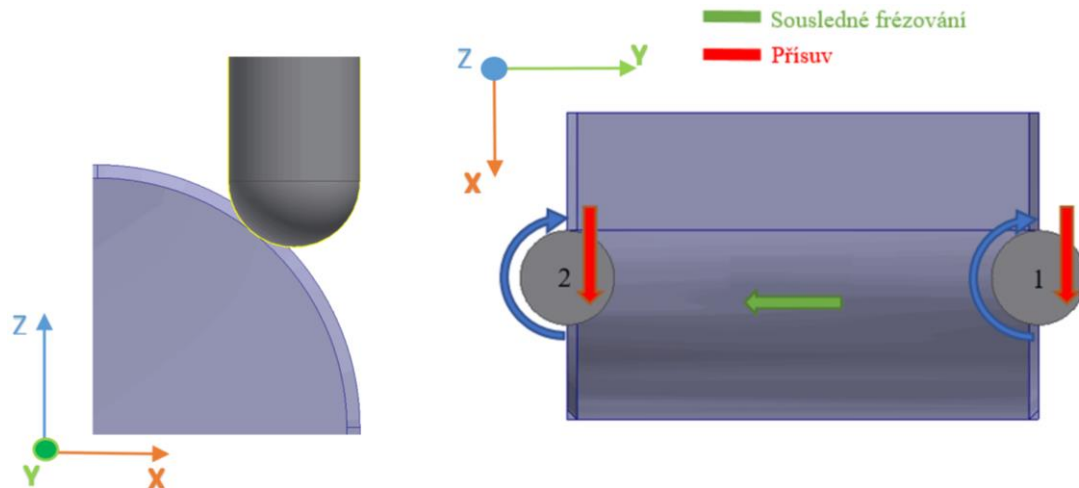
$$R^2 = (X - I)^2 + (Z - K)^2 \quad (7)$$

Dokončovací programy byly opět vytvořeny pomocí SW Excel z již zmiňovaných důvodů. V případě prvního experimentu bylo možné jednotlivé programy vytvořit „ručně“ kopírováním různých funkcí přímo v Excelu. Umožňoval to malý počet potřebných programů. V případě aktuálního experimentu byla potřeba vytvořit pro všechny kombinace vycházející z plánu mnohem větší množství programů. Z tohoto důvodu bylo v SW VBA Excel vytvořeno makro, které využívalo rovnici kružnice (7) a dle zvolené strategie rozpočtu, velikosti vzorku a průměru nástroje vytvořilo celý program automaticky.

	A	B	C	D	E	F	G	H
1								
2	Start bod X:	10,201 mm		Generuj drahy				
3	Start bod Z:	0 mm						
4								
5	Střed rádiusu X:	0 mm						
6	Střed rádiusu Z:	49,799 mm						
7								
8	Rádius plochy R:	49,799 mm						
9	Průměr nástroje Dtool:	16 mm						
10	Boční krok	0,2 mm						
11								
12	Číslo nástroje:	660						
13	Rezná rychlost:	80 mm/min						
14	Posuv na zub:	0,1 mm/zub						
15	Scallop height	0,0009 mm						
16	tolerance scallop height	5 %						
17								

Obrázek 6-4 - Ukázka vstupních dat pro tvorbu programu v SW Excel

Jednotlivé možnosti vstupních dat pro konkrétní rozpočet jsou zobrazeny na obrázku 6-4. Dá se říci, že byl vytvořen modul generující dráhy pro rádiusové plochy daného vzorku. Zde již byl výstupem program včetně příkazů pro volání nástroje, nastavení rezných podmínek, roztočení nástroje a další náležitosti korektního NC programu, tedy obdobně jako tomu je při generování programu z CAM modulu. Nástroj byl následně řízen opět dle bodů v rovině XZ a posuv byl realizován ve směru osy Y. Uspořádání obrobku v souřadném systému stroje je zobrazeno na obrázku 6-5.



Obrázek 6-5 - Směr drah pro dokončovací operace na rádiusové ploše [2]

6.1.3 Realizace experimentu

Realizace experimentu proběhla na stejném strojním vybavení jako v předchozím případě. Vzorek byl umístěn na dynamometru a upnut pomocí upínek. Celá sestava byla připevněna přímo ke stolu stroje. Detailně je možné upevnění vidět na obrázku 4-10.

6.1.3.1 Hrubování a před-dokončení

Každý rádius byl nejprve hrubován a posléze před-dokončen pomocí programu z modulu SolidCAM. Struktura programu byla pro všechny sklony obdobná. Prvním nástrojem byla monolitní válcová fréza průmětu $D_n = 16$ mm. Poté byla pře-frézována horní plocha až po začátek samotného rádiu. Toto byl velice důležitý krok, neboť pokud by se horní plocha nesnížila pod hranici přídávku nad dokončování, došlo by při obrábění v prvních dráhách k zanoření celé špičky do materiálu. Tento fakt by mohl mít nejen vliv na sledované parametry, ale mohlo by také dojít k poškození nástroje. Protože na zkušební vzorky byly z důvodu ušetření materiálu vyrobeny dva rádiusy, bylo nutné horní plochu obrobit tak, aby se druhá plocha na druhé straně nepoškodila. Dle použité kombinace rádiusových ploch na vzorku byla horní plocha obráběna monolitními válcovými frézami průměru $D_n = 6$ mm a $D_n = 10$ mm.

Před provedením experimentu byla opět celá funkční plocha vzorku před-dokončena. Důvody rovnoměrného před-dokončení jsou uvedeny v kapitole 5.1.3.1. Pro tuto operaci byla použita kulová fréza s VBD, kterou byla celá plocha obrobena s definovaným přídávkem. Použitá fréza je specifikována v příloze 3. Pro generování drah byl opět použit modul SolidCAM.

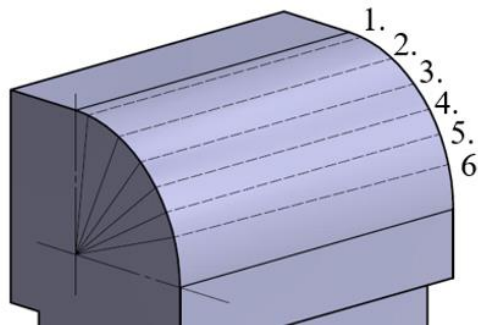
Při hrubování nebyl zaznamenán žádný jev, který by měl negativně ovlivnit jednotlivé sledované parametry dokončovaného povrchu. Díky vhodně zvolenému obráběnému

materiálu a řezným podmínkám nedocházelo ani k intenzivnímu otupování použitých nástrojů a celý proces byl stabilní.

6.1.3.2 Dokončování a záznam sil

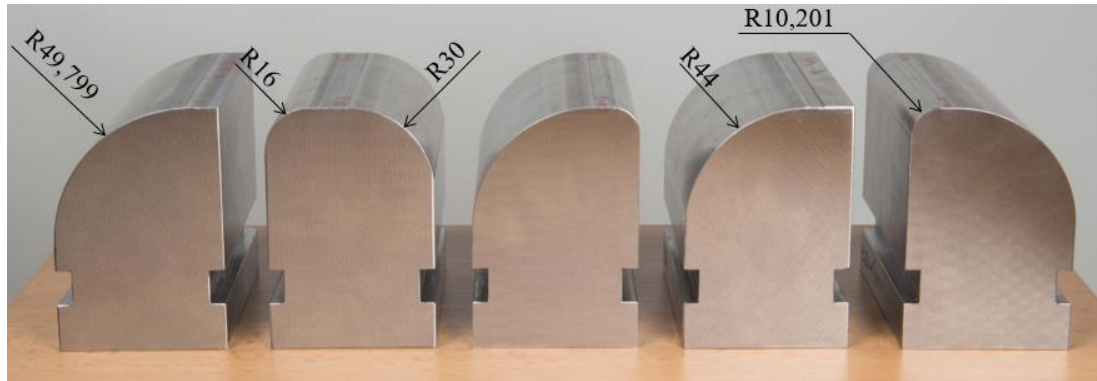
Realizace celého experimentu proběhla dle plánu. Jednotlivé vzorky byly seřazeny dle průměru tak, aby nebylo nutné měnit pro každý vzorek nástroj. Při dokončování byly měřeny řezné síly obdobně, jako tomu bylo v prvním experimentu. Před začátkem měření bylo opět nutné přednastavit rozsahy pro jednotlivé složky měřených řezných sil. Vzhledem k typům rozpočtu byla nejvyšší řezná síla očekávána pro strategii A2. Tento jev bylo možné očekávat vzhledem k vysokým otáčkám v horní části rádiu a velkému bočnímu kroku použitého rozpočtu. Dle této strategie byly nastaveny hodnoty jednotlivých složek.

Dokončovací program byl spuštěn a nástroj začal obrábět dle zvolené strategie. Při dosažení měřicího místa byla v programu umístěna funkce programového stopu M0. Po zastavení programu byla spuštěna měřicí soustava a těsně po zahájení měření opětovně spuštěn dokončovací program. Dodržení tohoto postupu je zcela zásadní. Neboť došlo-li by k opětovnému spuštění programu před zahájením měření, nemuselo by dojít ke korektnímu automatickému resetu měřicí aparatury. Z důvodu provedení resetu v zatíženém stavu by byla naměřená data irelevantní. Měření bylo realizováno v šesti místech dle úhlu, jak již bylo zmíněno. Grafické rozložení měřicích míst je možné najít na obr. 6-6. Čas záznamu byl vypočítán z délky obrobku a posuvové rychlosti tak, aby každý záznam obsahoval minimálně čtyři přejezdy. V případě vzorků obráběných strategií s konstantní řeznou rychlostí bylo zejména v prvních třech měřených místech pořízeno mnohem více náměrů. Díky tomu byl pozorován vznik vibrací při určitém otáčkovém rozsahu vzniklý samotným strojem. Je možné, že se jedná o rezonanci způsobenou kmity vzniklými otáčením vřetena stroje. Detailně nebyla tato problematika řešena, ale při vyhodnocení řezných sil bylo toto místo zcela jasně pozorovatelné a bylo třeba s tímto faktem při vyhodnocení uvažovat.



Obrázek 6-6 - Schéma míst náměrů řezných sil [2]

Průběh dokončování byl bezproblémový. Po každém vzorku byly prozkoumány řezné hrany nástroje a v případě otupení byl nasazen nový nástroj. Výraznější otupení se projevilo pouze u dvou nejmenších průměrů ($D_n = 3$ a $4,9$ mm). Pro tyto dva průměry nástroje taktéž nebylo možné plochy o rádiu $R = 30$ a $R = 44$ mm dokončit až k samotnému okraji plochy. Tento fakt byl způsoben použitým typem upínače, který neumožňoval přístup nástroje až k okraji a použitým vyložení nástroje z upínače, které by se dalším zvýšením mohlo negativně projevit na sledovaných parametrech dokončeného povrchu. Vzhledem k místům měření se ovšem nejednalo o zásadní nedostatek, neboť úplné konce ploch nebyly měřeny. Bylo možné tedy program zkrátit tak, aby nedošlo ke kolizi upínače s obrobkem.



Obrázek 6-7 - Dokončené rádiusové plochy umístěné na vzorcích [2]

Jediným výrazným nedostatkem zjištěným při dokončování bylo pootočení dynamometru o $0,1^\circ$. Vzhledem k tomu, že tento fakt byl zjištěn v průběhu dokončování, nebyl záměrně kompenzován a s danou nepřesností bylo potřeba uvažovat při vyhodnocování experimentu.

6.2 Měření a zpracování sledovaných parametrů

Naměřená data bylo nutné dále zpracovat. Zpracování dat probíhalo převážně v SW Excel. Vzhledem k velkému množství naměřených dat bylo pro načítání a prvotní zpracování vytvořeno makro v SW VBA Excel, které tuto práci výrazně usnadnilo a zamezilo vzniku chyb při kopírování a ručním zpracování dat.

Měření jednotlivých parametrů drsnosti a rozměrové přesnosti bylo provedeno v laboratoři dílenské metrologie v regionálním technologickém institutu.

6.2.1 Zpracování řezných sil

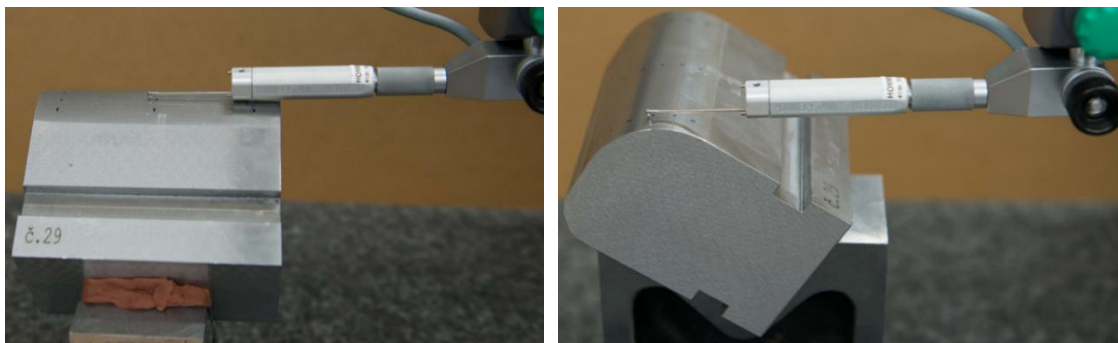
V případě řezných sil bylo postupováno identicky jako při prvním experimentu. Jedinou výraznou změnou byl počet zpracovaných náměrů. Celý náměr byl načten do měřicího SW Dynoware. Při dělení jednotlivých náměrů byl počet použitých náměrů rozdělen dle typu strategií. Zatímco pro strategii využívající konstantní otáčky byl počet exportovaných náměrů vždy stejný, pro použití strategie s konstantní řeznou rychlostí bylo exportováno rozdílné množství náměrů. V prvním případě byl počet stanoven na čtyři náměry. Počet jednotlivých náměrů pro druhou variantu nebyl stanoven dopředu, ale odvíjel se dle charakteru průběhu celého náměru. Byl-li tento charakter lineární, byl exportován pouze minimální počet náměrů vystihující trend změny. V případě kolísajících náměrů bylo exportováno až dvacet náměrů, které byly dále zpracovány. Tento proměnný faktor ještě výrazněji zvýšil množství naměřených dat.

Další zpracování aplikací z SW Matlab a následné výpočty v Excelu už byly zcela totožné s prvním experimentem a nebudou zde znovu detailně rozebrány.

6.2.2 Měření parametrů drsnosti

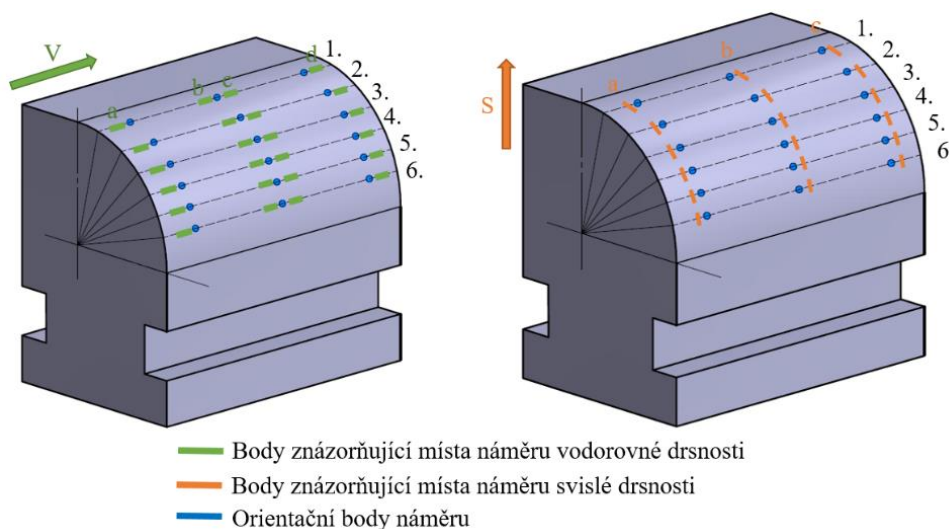
Dalším měřeným parametrem byla drsnost povrchu. Pro měření byly použity stejné normy 4288:1998 a ISO 3274:1998 jako v předchozím případě. Obdobné bylo také nastavení měřicího stroje profilo/drsnoměru HOMMEL ETAMIC T8000, jehož celá specifikace je v příloze 6. Použit byl měřící dotek s rádiem špičky $r_s = 2 \mu\text{m}$ a Gaussův filtr dle ČSN ISO 16610-2. S ohledem na periodicitu povrchu byla použita také stejná vlnová délka λ_c , a to pro měření ve směru kolmém

na dráhy hodnota $\lambda_c=0,8$ [mm] a pro měření ve směru rovnoběžném se směrem drah nástroje hodnota $\lambda_c=0,25$ [mm]. Jediným rozdílným parametrem byla měřená délka. Vzhledem k charakteru obráběných ploch by se měřící dotek při použití standardní měření délky $L_t = 4,8$ mm dostal mimo rozsah měření. Proto byla pro měření celého experimentu použita zkrácená délka měření $L_t = 1,5$ mm dle stejné výše citované normy.



Obrázek 6-8 - Ukázka měření drsnosti [2]

Realizace měření je zobrazena na obrázku 6-8. Před začátkem měření bylo nutné vzorky očistit a především označit tak, aby jednotlivá místa měření byla zcela patrná. Pro každou měřicí polohu bylo nutné ustavit vzorky do měřicího prizmatu tak, aby dotyk mohl přejet požadovanou část plochy. Toto polohování bylo značně časově náročné. Měření v obou směrech probíhalo dle rozmístění z obr. 6-9. Ve směru rovnoběžném se směrem obrábění byly realizovány čtyři měření. Dvě přibližně 5-10 mm od hrany a dvě uprostřed. Pro směr měření kolmý na dráhy nástroje bylo měřeno ve třech místech, a to na krajích vždy 10 mm od hrany plochy a uprostřed. Takto byla měřena všechna zkoumaná místa. Výsledná data nám dávají obraz o stavu sledované plochy. Na jednom vzorku bylo celkem provedeno 42 měření.



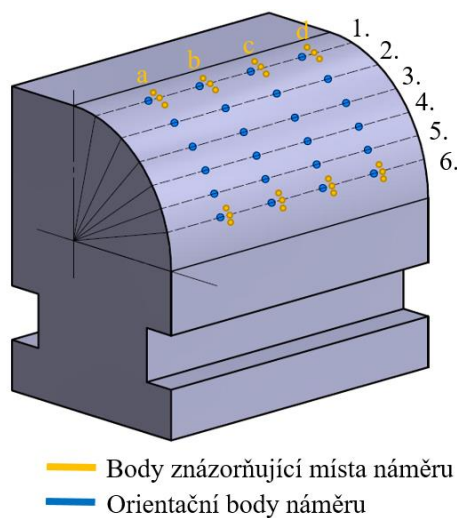
Obrázek 6-9 - Rozložení bodů a náměrů se značením ploch a přechodů [2]

Následné zpracování vzorků probíhalo v první fázi pomocí maker v SW VBA Excel. Data byla načtena do Excelu z původních souborů interního SW profilu/drsnoměru HOMMEL ETAMIC T8000. Obdobně jako v prvním experimentu byla pro každou měřenou oblast vybrána maximální hodnota. Ta z pohledu hodnocení drsnosti má největší význam. Tyto maximální hodnoty byly dále porovnány a zpracovány do grafů.

6.2.3 Měření rozměrové přesnosti

Při měření rozměrové přesnosti pomocí odstupů bodů od modelu byla využita obdobná síť jako pro měření drsnosti. Stejná místa měření nám umožňují v rámci vyhodnocení hledat vzájemné vazby mezi jednotlivými sledovanými parametry. Detailní rozložení je vidět na obrázku 6-10. K měření byl použit stejný stroj, a to 3D souřadnicový měřicí stroj Carl Zeiss Prismo 7 Navigator, jehož detailní specifikace je v příloze 6.

Měřicí program byl vytvořen ve SW Calipso. Pro každou úroveň měření byly umístěny tři body. První bod byl umístěn ve vzdálenosti 0,75 mm nad místem měření, druhý bod přímo na hraně měření a třetí 0,75 mm pod místem měření. Měření bylo provedeno ve čtyřech řezech. Rozložení bodů bylo obdobné jako u ostatních měření. Krajiní body byly umístěny 10 mm od hrany vzorku a vnitřní body vždy 30 mm od hrany, jak je znázorněno na obr. 6-10. Opět tak byla měřena celá sledovaná plocha.



Obrázek 6-10 - Rozložení bodů po ploše [2]

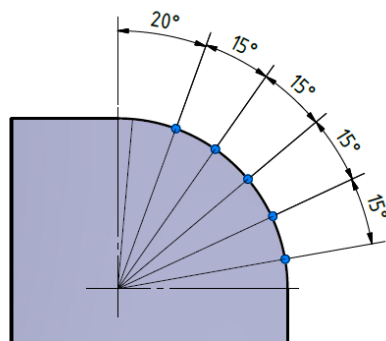
Zpracování naměřených dat bylo provedeno identicky s prvním experimentem a není zde detailně rozebráno. Všechna data byla nakonec umístěna do tabulky, porovnána a zpracována ve formě grafů.

6.3 Analýza výsledků sledovaných parametrů

Zhodnocení získaných dat bude opět realizováno na dvě části. První technologické hodnocení by mělo určit především vliv použití konstantní řezné rychlosti, ale i dalších proměnných faktorů, na sledované parametry. Statistické hodnocení je využito jako doplňkové hodnocení pro podpoření nebo vyvrácení závěrů z technologického hodnocení.

6.3.1 Technologické hodnocení výsledků

Díky značnému množství měřených dat bylo technologické hodnocení rozděleno do několika částí. Jako základní budou vyhodnoceny jednotlivé sledované parametry, zejména pak parametry kvality povrchu. Pro každý sledovaný parametr budou následně vyhodnoceny jednotlivé proměnné faktory. V případě nalezení vzájemného vztahu, a to jak mezi jednotlivými parametry nebo proměnnými faktory, budou tyto interakce vyhodnoceny v závěru každé části.



Obrázek 6-11 - Ukázka vyhodnocovaných míst bez prvního náměru [2]

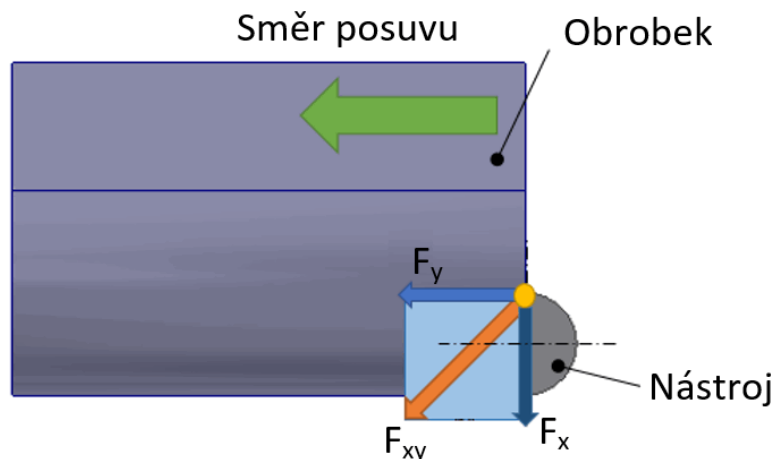
Vzhledem k základní myšlence celého experimentu, tedy ověření vlivu konstantní řezné rychlosti, bylo nutné pro tuto strategii měnit každou hladinu otáčky dle efektivního průměru nástroje. Díky rozptylu použitých průměrů nástroje a úhlovému záběru rádiusové plochy bylo především pro první oblast dosaženo limitů otáček stroje. Z tohoto důvodu v této oblasti nebyla navržená strategie dodržena a není tedy možné objektivně hodnotit její vliv. Vzhledem k tomu, že problematika řešená v této disertační práci by měla vyústit v metodiku dokončovací strategie, je nutné limity otáček uvažovat i nadále při zpracování zmíněné metodiky. Proto nebyla data z této oblasti hromadně vyřazena. V průběhu hodnocení je třeba však s tímto faktem počítat a v některých částech hodnocení bylo nutné díky výraznému zkrácení celou oblast vyřadit. Ukázka rozložení měřících bodů bez prvního náměru je zobrazena na obr. 6-11. Tento fakt by se měl ovšem odrazit v návrhu metodiky tak, aby se negativní vlivy neprojevovaly.

6.3.1.1 Hodnocení řezných sil

Řezná síla byla v celé práci využívána jako doprovodný parametr. Z již zmíněných důvodů tomu tak bude i v této části. Není tedy cílem z průběhů vyvozovat nějaké konečné výsledky, ale pouze naměřená data zanalyzovat a v případě interakce využít v hodnocení následujících parametrů.

- **Vliv konstantní řezné rychlosti**

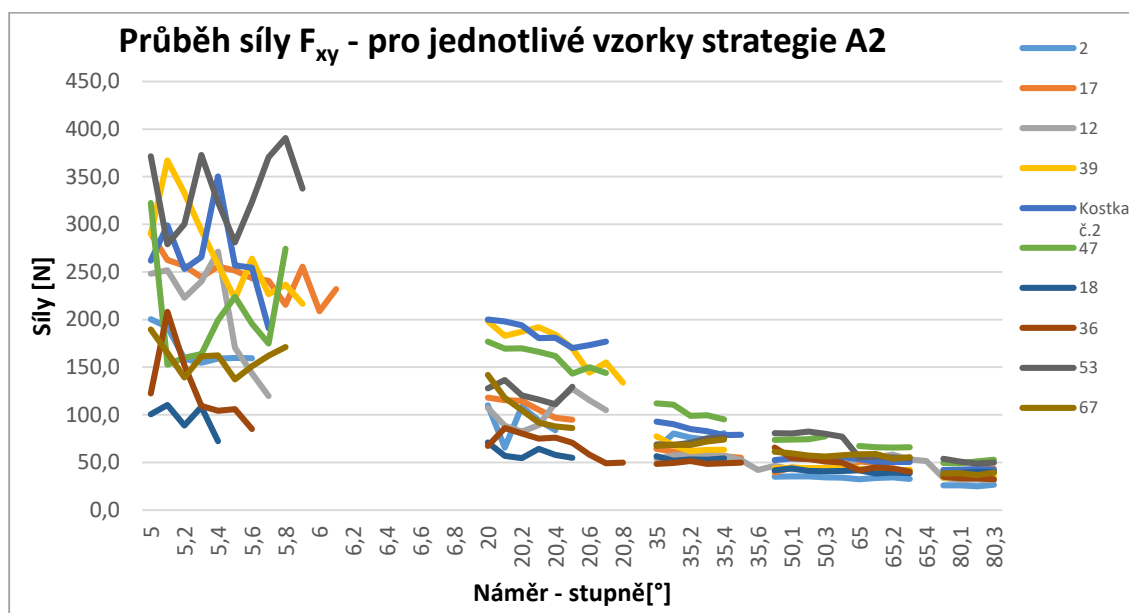
Záznamy pro jednotlivá měřená místa byly v první fázi zpracovány jednotlivě pro každou strategii zvlášť. Následně byla jednotlivá data zpracována pomocí aritmetického průměru pro každou strategii tak, aby bylo možné posoudit vliv konstantní řezné rychlosti pro průběh řezných sil.



Obrázek 6-12 - Orientace řezných sil při dokončování (Pohled shora) [2]

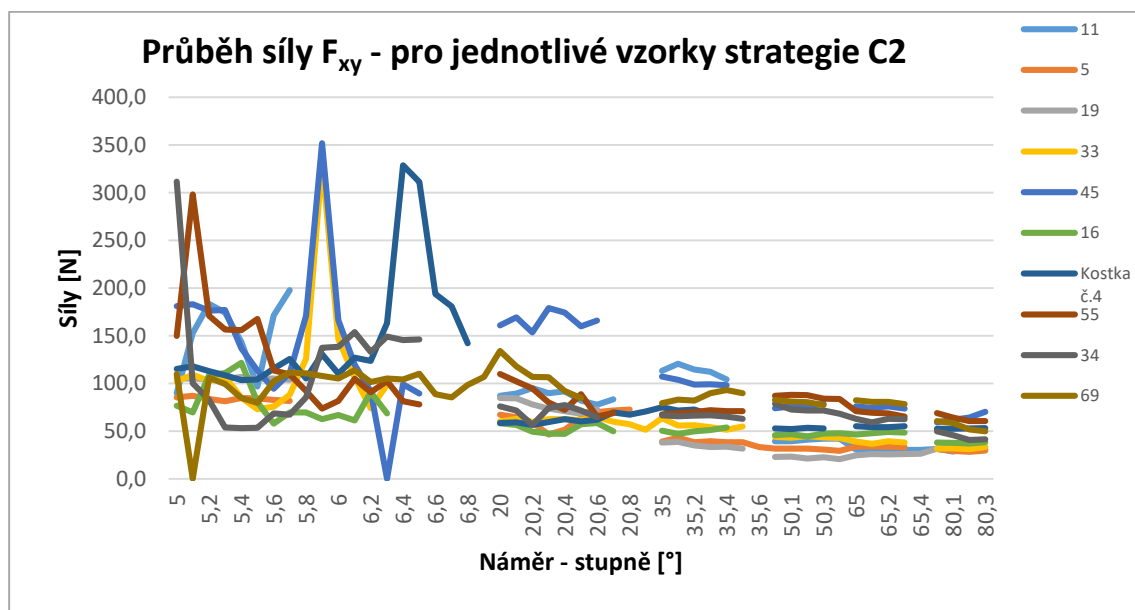
Průběhy sil v rovině XY jsou takřka shodné. Jedná se o pozvolna klesající charakter. Je patrné, že vlivem průměru nástroje, rádiem dokončené plochy, opotřebením a dalších jsou maxima různě rozmístěna. Co se týče vlivu konstantní řezné rychlosti na sílu v rovině XY je patrné, že v případě určitých kombinací proměnných faktorů způsobuje kolísání především v prvních dvou náměrech. Tento fakt ovšem může být způsoben nedodržením konstantní řezné rychlosti díky limitům otáček stroje. Rozložení sil v rovině XY je patrné z obrázku 6-12.

Na obrázku 6-13 je zobrazen graf pro průběh řezné síly v rovině XY pro strategii A. Tato strategie se projevovala největším kolísáním řezné síly F_{xy} v prvních dvou náměrech a to bez ohledu na použitou metodu definice řezných podmínek. To je způsobeno větším krokem mezi prvními hladinami, což je pro rozpočet v jedné ose typické.



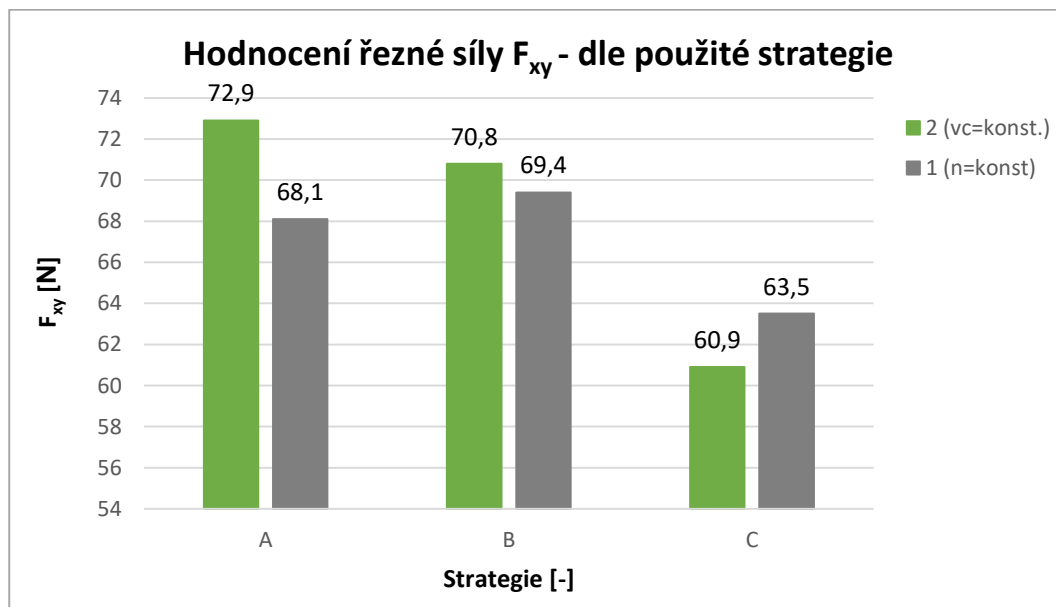
Obrázek 6-13 - Graf průběhu sil F_{xy} pro jednotlivé vzorky strategie A2

Porovná-li se data pro např. strategii C také s využitím konstantní řezné rychlosti, je vidět, že kolísání bylo zaznamenáno pouze u jednoho ze vzorků a ostatní průběhy jsou svým charakterem totožné s průběhem strategie využívající konstantní otáčky. Tyto průběhy jsou zobrazeny na grafu v obrázku 6-14. Oproti strategii C1 jsou zde vyšší hodnoty maximální řezné síly, ovšem průběh řezných sil je rovnoměrnější a rychleji klesající. Grafy průběhů ostatních strategií jsou uvedeny v příloze 11. Naměřená data jsou kvůli značnému rozsahu uvedena pouze v elektronické příloze disertační práce. Výrazný nárůst patrný mezi úhly 5,8° až 6,8° byl zaznamenán při kritických otáčkách kolem $n=19\ 500$ [ot/min]. Jednalo se o kmitání celého stroje, a to i bez záběru nástroje, a to v rozsahu otáček $n= \pm 200$ [ot/min] okolo zmíněného hodnoty. Z tohoto důvodu není těmto hodnotám možné přikládat velký význam, neboť se více než o řezné síly způsobené obráběním, jednalo o záznam celkové rezonance stroje.



Obrázek 6-14 - Graf průběhu sil F_{xy} pro jednotlivé vzorky strategie C2

Je patrné, že pro síly v rovině XY nemá využití konstantní řezné rychlosti výrazně zhoršující se trend oproti strategii využívající konstantní otáčky s výjimkou strategie rozpočtu drah v jedné ose. Maximální hodnoty jsou sice vyšší, ale pouze v průměru o 10-30 [N], což vzhledem k zatížení nástroje při dokončování není výrazný nárůst. Naopak při využití vhodné strategie rozpočtu drah je možné průměrnou sílu nepatrně snížit. Tento jev je patrný z grafu na obrázku 6-15.



Obrázek 6-15 - Grafické porovnání průměrných hodnot řezné síly F_{xy} pro strategie $v_c = \text{konst.}$ a $n = \text{konst.}$

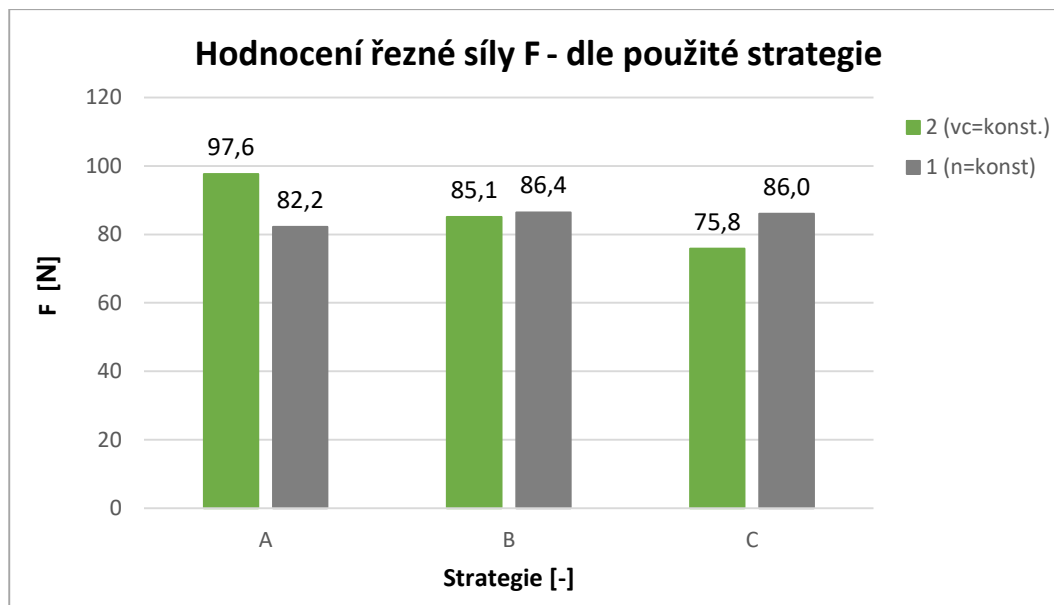
Hodnoty pro graf z obrázku 6-15 byly zpracovány následovně. Pro každou strategii byly všechny náměry konkrétní strategie seřazeny dle průměru nástroje a rádiu plochy. Z těchto náměrů byly vytvořeny průměry pro jednotlivé náměry přes všechny průměry nástroje a rádiu plochy. Z těch byl následně vytvořen celkový průměr. Ukázka zpracování dat je uvedena

v tabulce 6-2. Pro toto zpracování nebyl použit první náměr, pro který nebyla dodržena konstantní řezná rychlost z důvodu limitu otáček stroje.

Tabulka 6-2 – Ukázka zpracování dat pro hodnocení řezných sil F_{xy} [2]

Průměr nástroje	Rádus plochy	Strategie	20°	20,1°	20,2°	20,3°
3	30	A1	105,4	101,2	98,4	115,2
4,9	44	A1	112,6	108,5	106,7	108,4
4,9	16	A1	124,1	116,6	112,5	115,5
9,5	49,799	A1	83,8	87,8	87,6	85,8
9,5	10,2019	A1	80,1	75,0	70,7	72,5
9,5	30	A1	127,5	127,8	128,5	126,4
9,5	30	A1	129,8	130,3	133,4	131,7
14,1	44	A1	137,7	145,8	137,6	132,1
14,1	16	A1	119,6	109,2	103,2	103,9
16	30	A1	101,1	94,0	90,0	88,4
Průměr sloupce			112,2	109,6	106,9	108,0

Při analýze celkové řezné síly F , byly rozdíly mezi jednotlivými strategiemi, a to jak rozpočtu drah, tak nastavení řezných podmínek, mnohem méně patrné. Tento jev je způsoben mnohem větším kolísáním celkové řezné síly způsobené zejména složkou v ose Z . Všechny průběhy pro jednotlivé vzorky jsou uvedeny v příloze 11. I tak je patrné, že strategie využívající konstantní řeznou rychlost dosahují při vhodné kombinaci s typem rozpočtu drah nepatrně nižších hodnot celkové síly F .

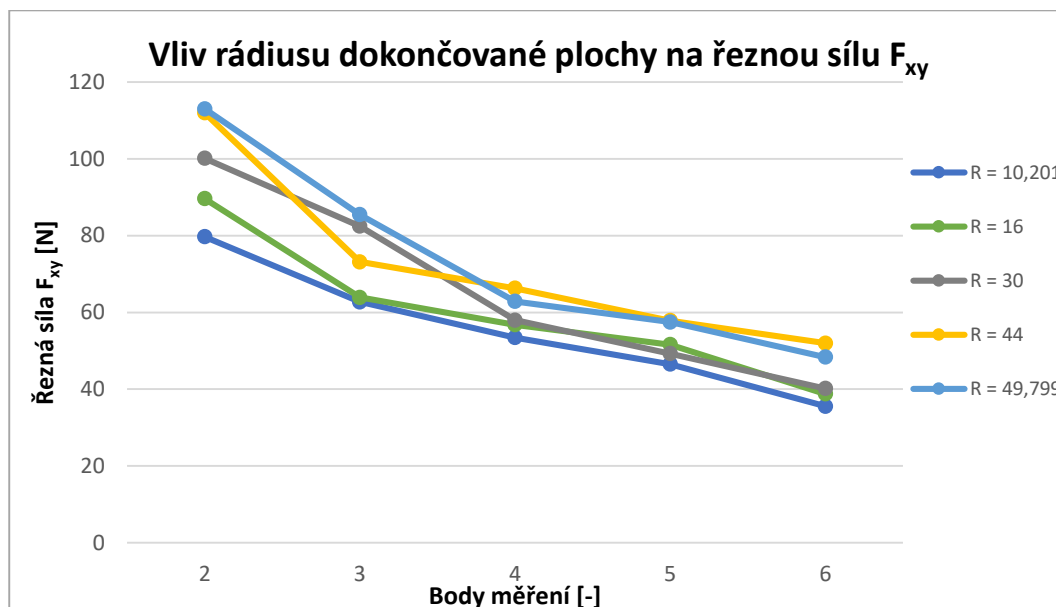


Obrázek 6-16 - Grafické porovnání průměrných hodnot řezné síly F pro strategie $vc = konst.$ a $n = konst.$

- **Vliv průměru nástroje a rádiu obráběné plochy**

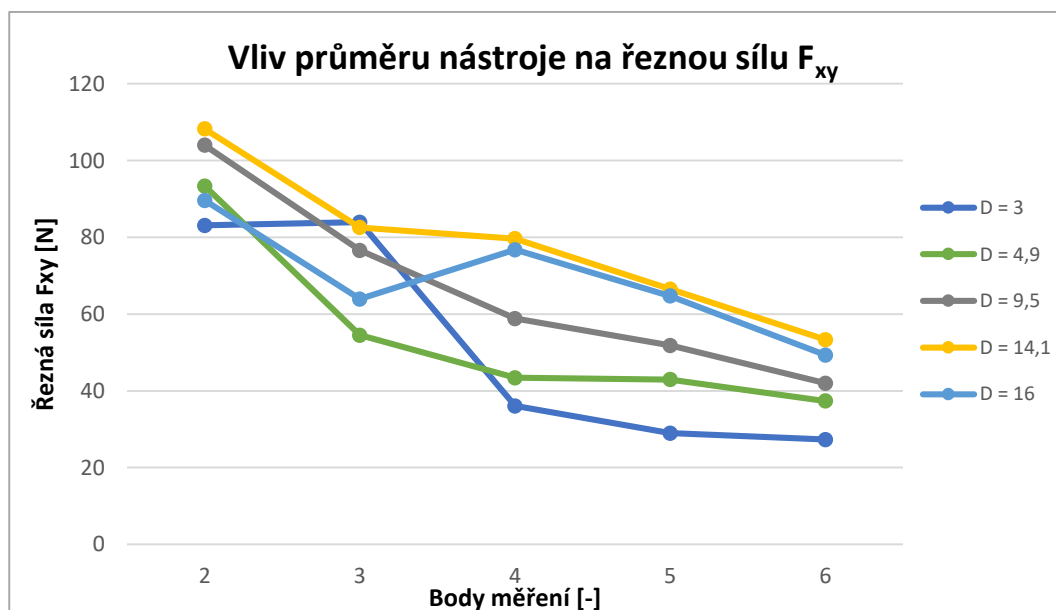
Tyto vlivy nebyly z průběhu jednotlivých vzorků nijak pozorovatelné. Z tohoto důvodu byly pro hodnocení tohoto vlivu využity průměrné hodnoty. Zde je patrné, že s rostoucím rádiem

plochy roste hodnota pro složku síly F_{xy} . Jak je vidět z grafu na obrázku 6-17, je tento fakt pozorovatelný takřka v celém průběhu. Charakter všech rádií je klesající, ovšem žádné markantní rozdíly zejména při vyšších efektivních průměrech není možné pozorovat a bude třeba využít statistické vyhodnocení pro další prozkoumání tohoto vlivu.



Obrázek 6-17 - Graf vlivu rádiu dokončované plochy na řeznou sílu F_{xy} [2]

Hodnocení výsledku u vlivu průměru nástroje je bohužel neprůkazné. Jednotlivé průběhy řezných sil jsou opět převážně klesající s rostoucím efektivním průměrem nástroje, ale jednoznačně pozorovatelný vliv průměru nástroje pro celý průběh řezných sil zde není. Pro náměry od úhlu 50° je možné pozorovat pokles řezných sil s klesajícím průměrem nástroje, a to u všech průměrů s výjimkou nástroje $D_n = 16$ mm, viz obr. 6-18. Obdobné výsledky byly také hodnoceny pro celkovou řeznou sílu F .



Obrázek 6-18 - Graf vlivu průměru nástroje na řeznou sílu F_{xy} [2]

Z celkového hodnocení průběhu obou sledovaných výslednic řezné síly je možné vyhodnotit zejména vliv použití konstantní řezné rychlosti a použité strategie. Strategie rozpočtu má na parametry řezné síly podstatný vliv zejména v oblasti s malým efektivním průměrem, kdy dochází vlivem velkého bočního kroku u strategie A k nárůstu maximální řezné síly a také k výraznému kolísání. Mnohem výrazněji se tento jev projevuje pro celkovou řeznou sílu F , kdy do její hodnoty zasahuje složka F_z , která je právě vlivem malého efektivního průměru značně kolísavá a také dosahuje vyšších hodnot než v dalších měřených částech. V případě použití konstantní řezné rychlosti je tento jev ještě markantnější.

Obecně je možné říci, že samostatný vliv použití konstantní řezné rychlosti má negativní dopad především pro maximální hodnoty při malém efektivním průměru. Nejedná se však o nijak výrazný nárůst a průběhy řezných sil jsou v rovině XY totožné s použitím strategie využívající konstantní otáčky. Naopak využijeme-li vhodný typ rozpočtu, v našem případě strategii C, dojde k snížení řezné síly, a to jak v rovině XY, kde je rozdíl pozorovatelný, tak také celkové síly. Což je pro celkové využití strategie s konstantní řeznou rychlostí pozitivní jev. Zda bude mít tento výsledek dopad na parametry kvality povrchu, je třeba zhodnotit v další části práce při hodnocení ostatních sledovaných parametrů.

Z pohledu dalších faktorů je možné relevantně vyhodnotit pouze vliv rádiu dokončované plochy. Zde je patrné, že s rostoucím rádiem dokončované plochy roste také řezná síla, a to jak F_{xy} , tak také F . Vliv průměru nástroje se prokázal nepodařilo.

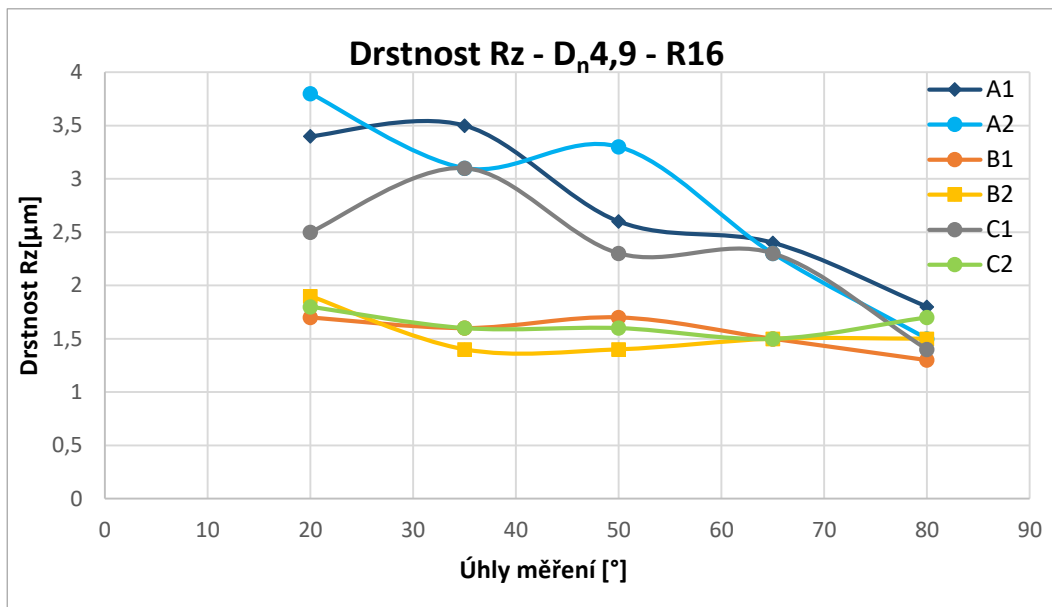
6.3.1.2 *Hodnocení drsnosti povrchu*

Postup při vyhodnocení drsnosti byl obdobný jako pro řezné síly. Celkové hodnocení je zde rozděleno pro jednotlivé proměnné faktory. Hodnoty, se kterými je dále pracováno, jsou maxima z jednotlivých částí měření. Prokázání jednotlivých vlivů na drsnost povrchu je jedním z důležitých zkoumání, neboť se jedná o zásadní parametr při hodnocení kvality dokončené plochy.

- **Vliv konstantní řezné rychlosti**

V případě tohoto vlivu jsou v první řadě hodnoceny jednotlivé průběhy a dále jsou vytvořeny průměrné hodnoty pro jednotlivé strategie. Všechna data pro drsnost povrchu jsou zpracována bez prvního náměru. Hodnoty drsnosti pro toto místo měření bez ohledu na použitou strategii dosahovaly až desetkrát vyšší hodnoty a byly tím potlačeny všechny ostatní vlivy.

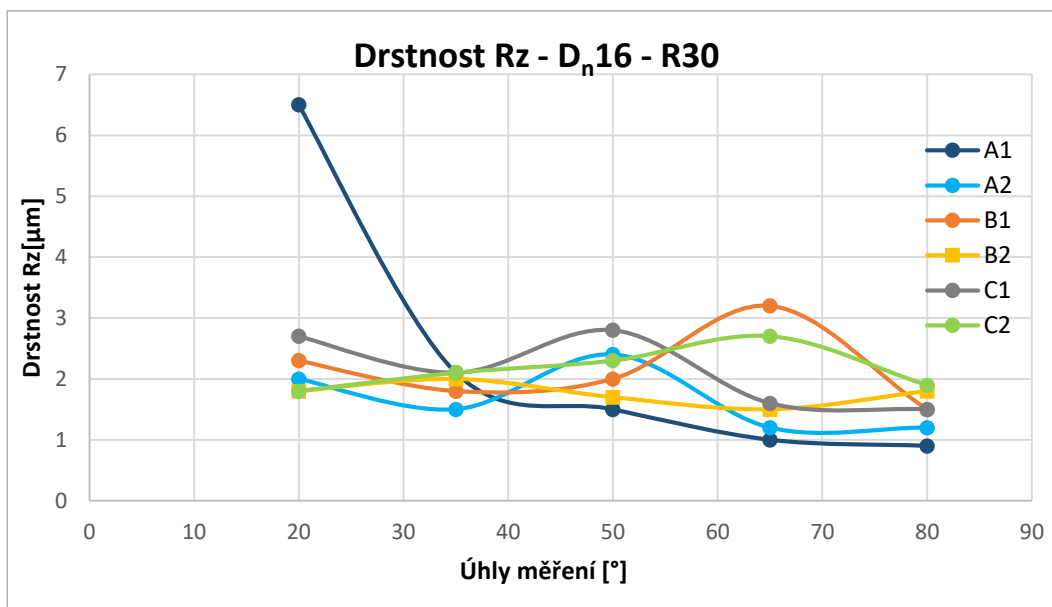
Z průběhů jednotlivých testovaných kombinací průměr nástroje a rádius obráběné plochy je vidět, že největší sklon ke kolísání průběhu drsnosti má strategie A. Naopak pro všechny testované kombinace dosahovala absolutně nejlepších výsledků strategie C v kombinaci s konstantní řeznou rychlostí. Příklad průběhu pro malý nástroj je zobrazen na obr. 6-19. Zmíněná charakteristika je zde patrná.



Obrázek 6-19 - Graf závislosti parametru drsnosti Rz pro jednotlivé strategie na ploše R = 16 mm obráběné nástroje D_n = 4,9 mm

V případě strategie B v kombinaci s konstantní řeznou rychlostí, která byla zejména pro menší průměry nástroje srovnatelná se strategií C, byl ovšem u větších průměrů zjištěn nárůst zejména maximální hodnoty drsnosti plochy. I tak lze danou strategii hodnotit jako druhou nejvhodnější.

Výše zmíněné tvrzení je možné ověřit na grafu z obrázku 6-20, kde je naopak zobrazen průběh pro největší nástroje, a i zde je patrné, že strategie C2 má nejrovnoměrnější průběh, i když maximální hodnota není nejnižší.



Obrázek 6-20 - Graf závislosti parametru drsnosti Rz pro jednotlivé strategie na ploše R = 30 mm obráběné nástroje D_n = 16 mm

V případě průběhů je tedy možné říci, že z pohledu rozpočtu má nejlepší hodnoty strategie C v kombinaci s konstantní řeznou rychlostí. Naopak nejhorších výsledků bylo dosaženo strategií A. Vliv konstantní řezné rychlosti nepřispívá k výraznému snížení celkové

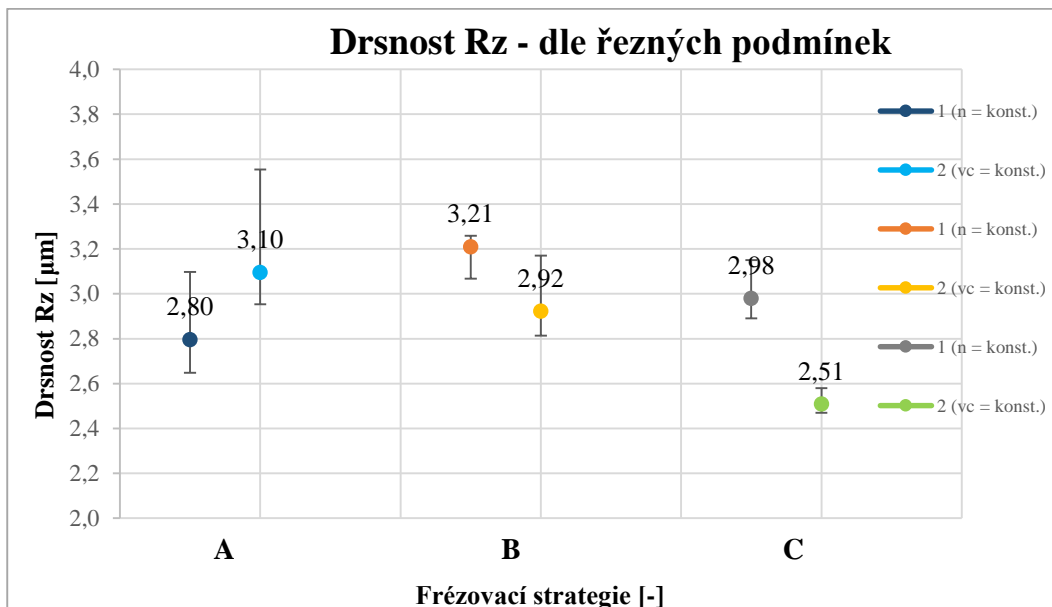
drsnosti plochy, ale dosahované výsledky jsou rovnoměrnější. Grafy s ostatními průběhy pro parametry drsnosti Rz a všechny grafy s průběhy parametru drsnosti Ra jsou uvedeny v příloze 12.

Další hodnocení provedené na základně průměrných hodnot vyžadovalo zpracování dat. Příklad zpracování je uveden v tabulce 6-3. Ostatní tabulky jsou uvedeny v elektronické příloze dizertační práce „Zpracování drsnosti povrchu“. Tyto hodnoty byly poté zpracovány do grafu a výsledek je patrný z obr. 6-21.

Tabulka 6-3 – Příklad zpracování dat drsnosti Rz pro strategii A1 [2]

Konst. n [min ⁻¹]	Rz [μm]					PrůměrA1
A1	6,8	2,7	2,5	2,3	1,6	
A1	9,5	4,3	3,8	3,4	2,7	
A1	3,4	3,5	2,6	2,4	1,8	
A1	3,4	2,4	2,6	2,3	2,1	
A1	2,2	1,8	2,1	2	1,6	
A1	2,4	1,7	1,5	1,2	1,5	
A1	2,4	2,1	3	1,8	2	
A1	6,5	3,4	3,4	2,9	2,3	
A1	2	2,7	3,7	4,2	1,3	
A1	6,5	2,1	1,5	1	0,9	
Průměr	4,51	2,67	2,67	2,35	1,78	2,80
Min.	2	1,7	1,5	1	0,9	1,78
Max.	9,5	4,3	3,8	4,2	2,7	4,51
ch+	4,99	1,63	1,13	1,85	0,92	1,71
ch-	2,51	0,97	1,17	1,35	0,88	1,02

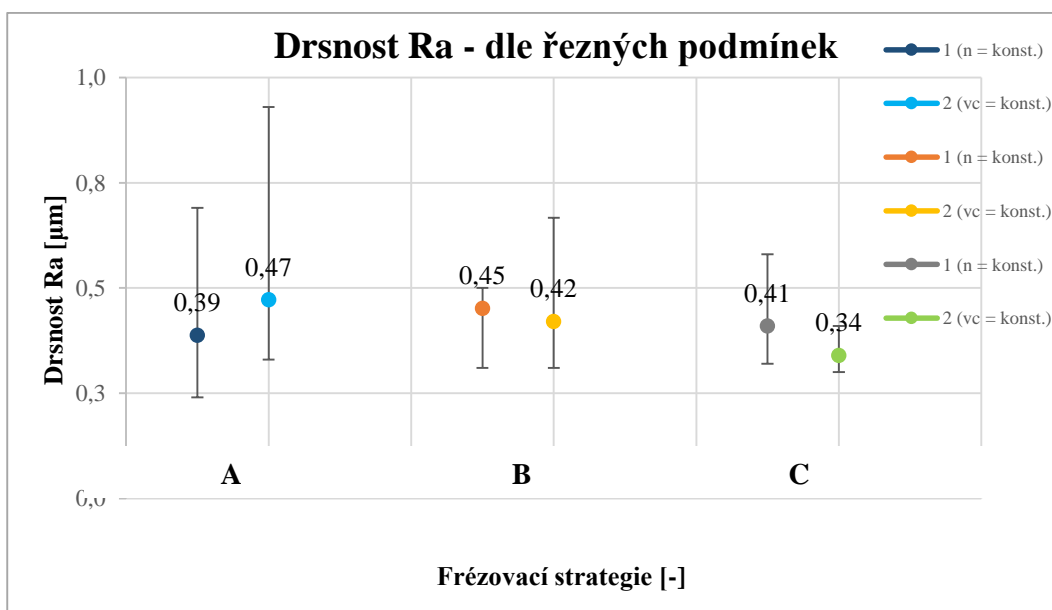
Z grafů průměrných hodnot je patrné, že jak drsnost Rz na obrázku 6-21, tak drsnost Ra na obr. 6-22 nejvíce ovlivňuje volba rozpočtu strategie. Průměrné hodnoty drsnosti jsou nejvyšší pro strategii A a použití konstantní řezné rychlosti pro tento rozpočet má spíše negativní vliv, a to pro oba sledované parametry. To je s největší pravděpodobností způsobeno nevhodnou kombinací vysokých otáček a velikého bočního kroku při malém efektivním průměru nástroje.



Obrázek 6-21 - Graf průměrných hodnot a rozptylů pro drsnost Rz - dle řezných podmínek [2]

V případě rozpočtů B a C jsou výsledky ovlivněné použitím konstantní řezné rychlosti lepší. Pro strategii C je tento fakt jednoznačný zvláště drsnosti Rz. Zde je hodnota oproti standardní technologii využívající konstantní otáčky nejen nižší, ale také má nejmenší rozptyl hodnot.

Výsledky pro strategii B jsou rozdílné pro parametry drsnosti Ra a Rz. Zatímco pro drsnost Rz je vhodnější při rozpočtu podél křivky použít konstantní řeznou rychlost, pro parametr Ra je tomu naopak. Výsledek z grafu na obr. 6-22, může být ovšem zavádějící, neboť rozdíl drsnosti je pro technologii B $dRa = 0,2 \mu\text{m}$. To je hodnota v praxi velice malá a je tedy možné, že rozdílné výsledky mezi drsnostmi Ra a Rz pro strategii B způsobuje nějaký další neuvažovaný faktor.



Obrázek 6-22 - Graf průměrných hodnot a rozptylů pro drsnost Ra - dle řezných podmínek [2]

Z prezentovaných výsledků je patrné, že významný vliv na celkové hodnoty drsnosti povrchu má použitá strategie rozpočtu drah. V případě použití vhodného rozpočtu je možné

dosáhnout použitím konstantní řezné rychlosti ještě nižších hodnot drsnosti dokončeného povrchu. Tento jev je výrazně patrný především z průběhů jednotlivých vzorků. Až na výjimky dosahovala strategie C2 nejen nejmenších hodnot, ale také podstatně menšího rozptylu, a to i oproti stejnému typu rozpočtu drah využívající konstantní otáčky. Díky těmto výsledkům je možné z pohledu drsnosti dokončovaného povrchu strategii využívající konstantní řeznou rychlost považovat za použitelnou. Důležitým faktorem zůstává rozpočet drah nástroje, vzhledem k prokazatelnému zlepšení hodnot drsnosti pro strategii B a C. Tento fakt bude vhodné uplatnit v metodice návrhu dokončovací strategie. Pro obecné použití bude nezbytné provést experimenty na komplikovanějších typech ploch a také na různých typech materiálu.

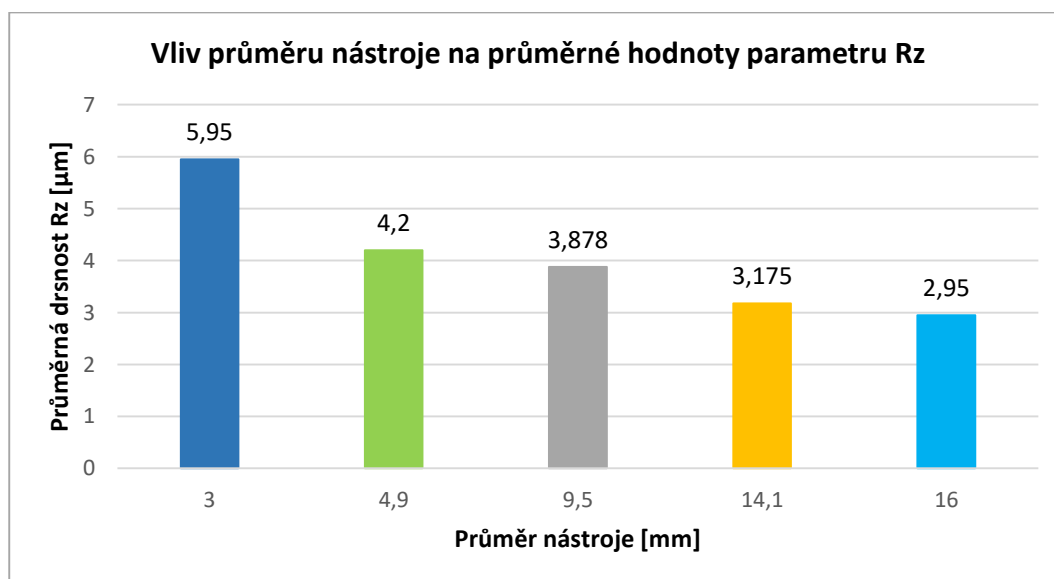
- **Vliv průměru nástroje**

V této části vyhodnocení drsnosti se práce zabývá vlivem průměru nástroje na drsnost dokončené plochy. Jednotlivé průběhy jsou prezentovány v předchozím hodnocení. Z těchto výsledků je patrné, že vliv nástroje na průběhy jednotlivých parametrů drsnosti je možné těžko vypořádat. A to především z důvodu méně výrazného vlivu oproti strategii rozpočtu drah a definici otáček.

Pro toto hodnocení je možné vytvořit průměrné hodnoty pro jednotlivé nástroje. Příklad zpracování dat pro hodnoty parametru Rz je pro některé strategie prezentován v tabulce umístěné v příloze 12. Každá konečná průměrná hodnota je tvořena z maximálních hodnot jednotlivých náměrů pro plochy dokončované daným nástrojem.

Na základě dat z tabulky v příloze 12 je možné vytvořit grafické hodnocení vlivu průměru nástroje na parametr drsnosti Rz. Z grafu je patrné, že s použitím většího průměru nástroje dosahovaná drsnost klesá. To odpovídá předpokladům vycházejícím z teorie obrábění, kdy s použitím většího průměru nástroje výsledná drsnost klesá. Je třeba ale říci, že průkaznost tohoto hodnocení není příliš vysoká, a to s odvoláním na výsledky předchozího hodnocení.

Vzhledem k tomu, že průměr nástroje má prokazatelně menší vliv než použitá strategie, a také to, že pro všechny nástroje, nebyl proveden vlivem statistického plánování stejný počet experimentů. Technické hodnocení tohoto vlivu je pouze orientační. Pro hlubší pochopení této problematiky bude nutné počkat na statistické hodnocení, nebo provést další testy zaměřené výhradně na tento vliv.



Obrázek 6-23 - Graf vlivu průměru nástroje na průměrné hodnoty parametru Rz

Velice zajímavé porovnání je ovšem vzhledem k průměru nástroje možné provést mezi teoretickou a skutečnou drsností. V různých publikacích byla nalezena celá řada výpočtů drsnosti využívající různé geometrické parametry, a to zejména nástrojů. Vzorce využitě pro porovnání jsou ze zdroje [40], jedná se o vzorce pro jemné frézování kulovou frézou.

Výpočet vychází z předpokladu, že drsnost dokončeného povrchu je tvořena pomocí obloukové reprodukce využívající nástroje s nenulovým poloměrem špičky. Z této skutečnosti vychází i výpočet teoretické hodnoty drsnosti. [40]

$$Ra_t = \frac{10^3 * r_\epsilon^2 * (2 * \alpha_A - \sin 2 * \alpha_A)}{f} \quad (8)$$

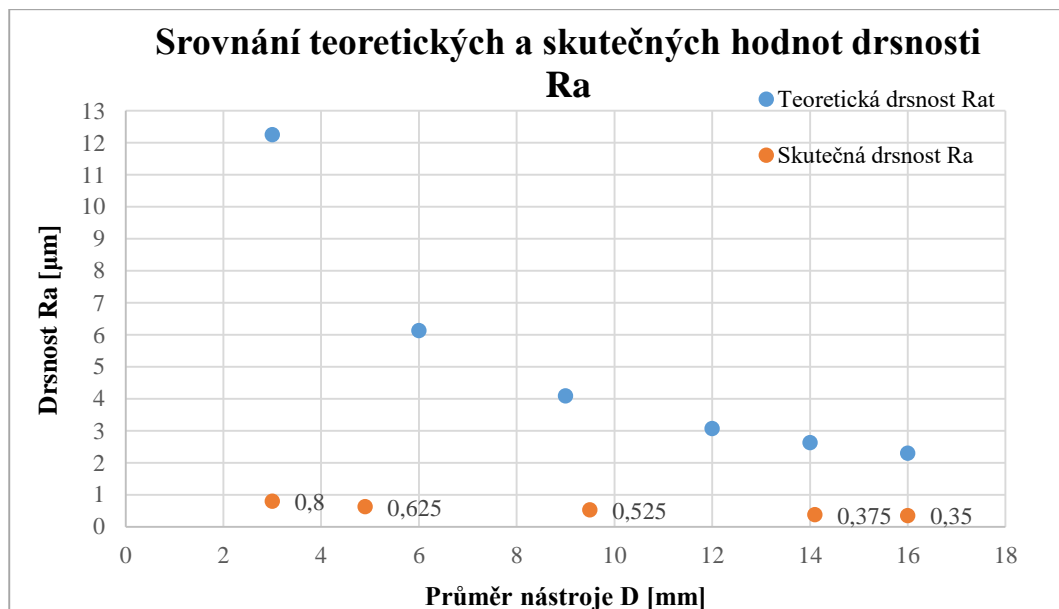
$$\alpha_A = \arccos * \left[\frac{r_\epsilon}{f} * \left(\arcsin \frac{f}{2 * r_\epsilon} + \frac{f}{4 * r_\epsilon^2} * \sqrt{4 * r_\epsilon^2 - f^2} \right) \right] \quad (9)$$

$$r_\epsilon = \frac{D}{2} \quad (10)$$

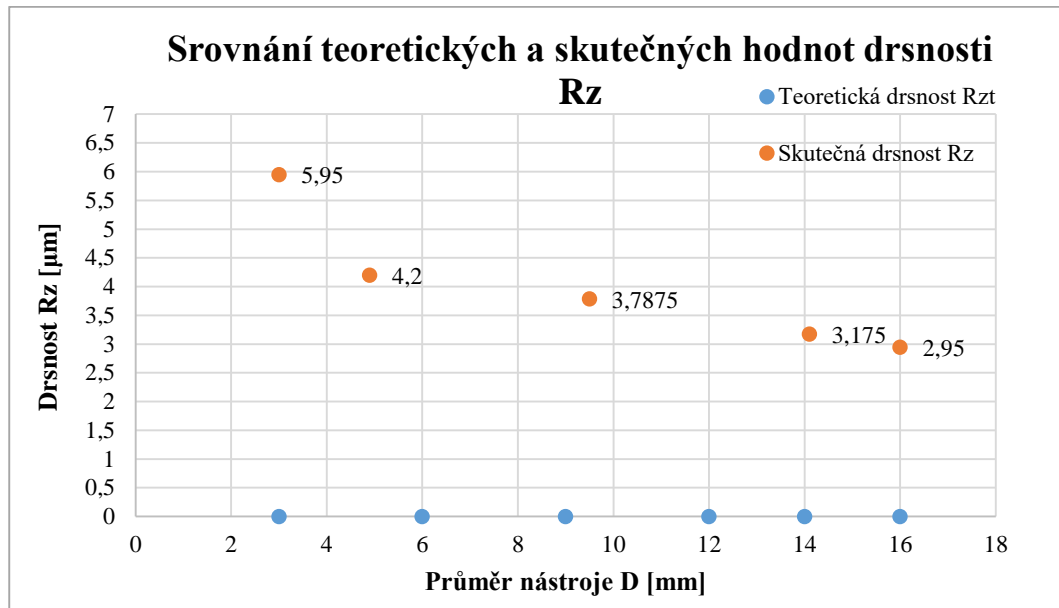
Obdobný vztah platí pro teoretický výpočet parametru Rz: [50]

$$Rz_t = r_\epsilon * \left(1 - \sqrt{1 - \frac{a_e^2}{4 * r_\epsilon^2}} \right) \quad (11)$$

Po dosažení jednotlivých parametrů jsou výsledkem teoretické hodnoty drsnosti pro uvažované průměry nástrojů. Tato data byla vypočítána jak pro drsnost Ra, tak Rz a výsledky jsou uvedeny v grafech na obrázcích 6-24 a 6-25.



Obrázek 6-24 - Graf srovnání teoretických a skutečných hodnot drsnosti Ra [2]



Obrázek 6-25 - Graf srovnání teoretických a skutečných hodnot drsnosti Rz [2]

V případě obou výsledných hodnot je možné konstatovat shodu pouze v trendu. Pro oba parametry drsnosti povrchu jsou výsledné trendy s rostoucím průměrem nástroje klesající. V případě parametru Ra je ovšem vypočtená hodnota několikanásobně vyšší než skutečná drsnost naměřená na testovaných vzorcích. V případě parametru Rz je tomu přesně naopak. Trend je opět shodný, ale vypočtené hodnoty jsou několikanásobně nižší než reálně naměřené.

Uvedené příklady vzorců použité pro výpočet parametrů drsnosti se z nalezených zdrojů nejvíce shodovaly. I přes to je nutné konstatovat, že výpočet drsnosti pro tvarové plochy v současnosti není k dispozici a zejména hodnoty parametru Rz z použitých vzorců jsou mimo možnost frézovací strategie. Důvodem takto významného rozdílu bude s největší pravděpodobností tvar plochy, pro kterou byly vzorce vytvořeny.

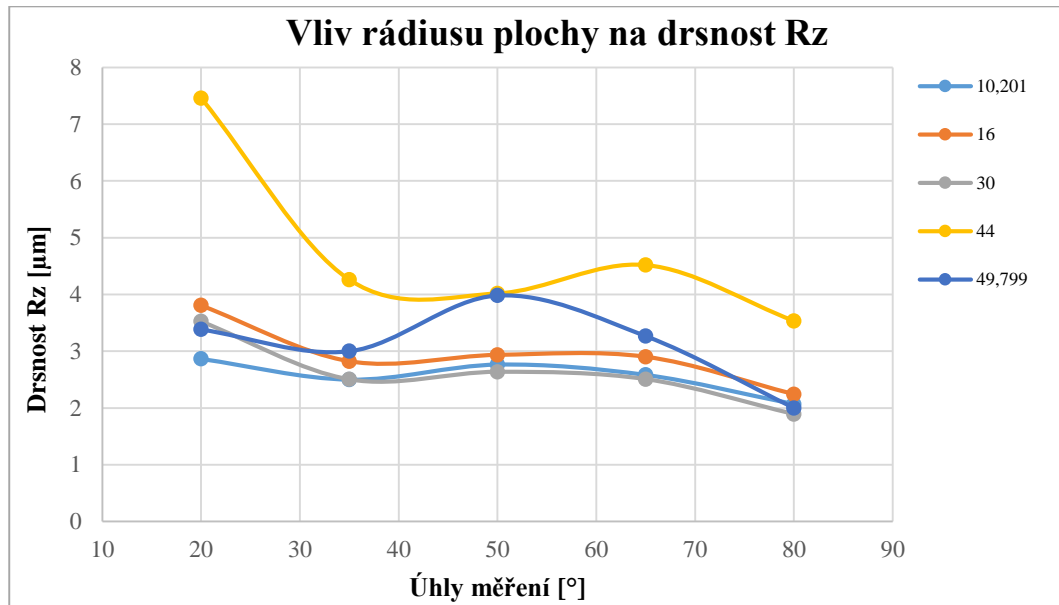
Co se týče vlivu průměru nástroje na drsnost dokončené plochy. Byly zde z vyhodnocených experimentů potvrzeny předpoklady z teorie obrábění, že s klesajícím průměrem nástroje dochází k nárůstu parametrů drsnosti. Pro hlubší prozkoumání této problematiky by ovšem bylo nutné provést experiment zaměřený přímo na tuto problematiku. Další zkoumání by také vyžadovalo teoretické určování drsnosti povrchu.

- **Vliv rádiu obráběné plochy**

Posledním zkoumaným proměnným faktorem ovlivňujícím parametry drsnosti byl rádius dokončované plochy. Z průběhů jednotlivých kombinací proměnných faktorů uvedených v první části hodnocení drsnosti není vliv rádiu dokončované plochy nijak patrný. V tomto případě mají všechny zmíněné faktory výrazně vyšší vliv na konečnou drsnost povrchu. Pro výchozí posouzení nám opět slouží tabulka jednotlivých náměrů v příloze 12. Zde jsou opět vypočteny průměry, jako tomu bylo v předchozím případě. Nyní ovšem pro jednotlivé rádií dokončené plochy. V textu je opět uveden pouze parametr Rz. Parametr drsnosti Ra měl zcela totožný průběh, a proto jsou data uvedena pouze v elektronické podobě.

Z tabulky hodnot v příloze 12, je opět vytvořen graf uvedený na obr. 6-26. Z tohoto grafu je možné vidět, že s výjimkou plochy s rádiem R = 44 mm jsou všechny průběhy totožné. Vypovídající schopnost tohoto grafu je opět velice nízká, neboť je vytvořen z průměrných

hodnot. Pokud bychom prozkoumali data z tabulky, je možné najít pro plochu s $R = 44$ mm a plochu s $R = 30$ mm obdobou hodnotu drsnosti R_z při použití dvou nejmenších průměrů nástroje. Díky vyššímu počtu vzorků pro rádius $R = 30$ mm je to ovšem průměrná hodnota srovnatelná s ostatními rádiusy.



Obrázek 6-26 - Graf průběhu vlivu rádiu plochy na drsnost R_z [2]

Z těchto výsledků není možné prokázat vliv rádiu plochy na parametry drsnosti. Z výsledků je sice možné pozorovat nárůst drsnosti, a to zejména jeho rozptýlu vlivem zvětšujícího se rádiu plochy. Ovšem pro rádius $R = 44$ mm jsou hodnoty výrazně vyšší. Tento fakt bude s největší pravděpodobností způsoben jiným z faktorů. Opět by v případě potřeby prozkoumání této oblasti bylo třeba provést další zkoumání.

6.3.1.3 Hodnocení rozměrové přesnosti

Posledním hodnoceným parametrem je rozměrová přesnost. Zpracování dat bylo provedeno pomocí aritmetického průměru obdobně jako u prvního experimentu. Opět k tomu bylo možné přistoupit díky Gaussovu rozložení naměřených dat. Naměřené výsledky slouží pro vzájemné porovnání dosažené přesnosti mezi jednotlivými vzorky, proto je možné pro vzájemné porovnání využít aritmetického průměru, aniž by došlo k ovlivnění výsledků.

Data byla zpracována dle vzorů uvedených v tabulce 6-4 a v příloze 13. Pro lepší přehlednost byly vytvořeny grafy jednotlivých sledovaných vzorků. V první fázi jsou hodnoceny jednotlivé průběhy každého vzorku. Následně jsou vytvořeny průměry pro jednotlivé sledované faktory.

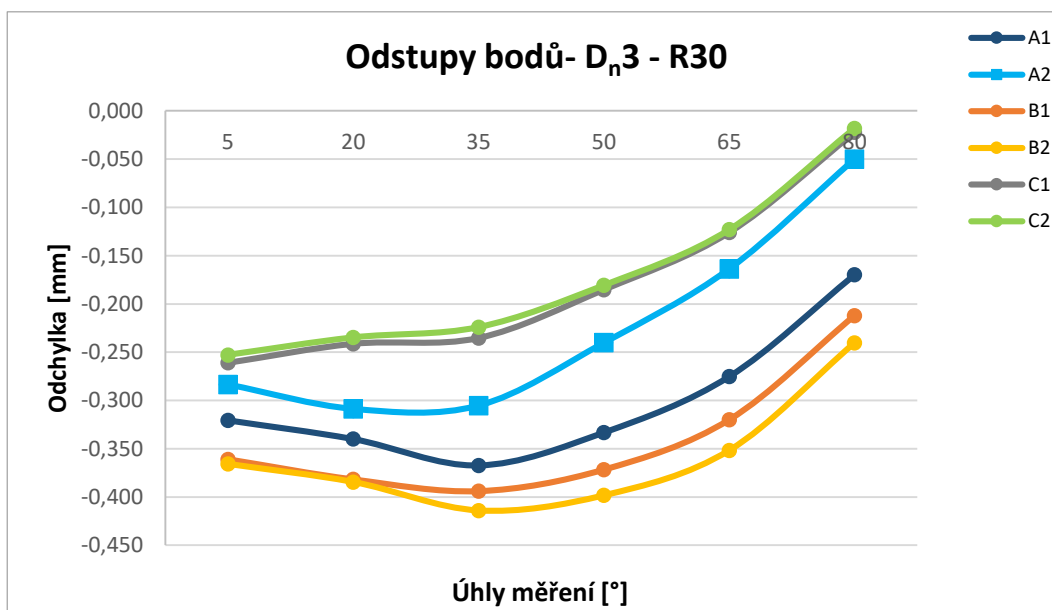
- **Vliv konstantní řezné rychlosti**

Zpracování dat je uvedeno v tabulce 6-4. Již z těchto dat je možné pozorovat, že dosahované výsledky jsou značně rozdílné zejména vlivem vzájemné interakce průměr nástroje vůči rádiu plochy pro vzorky dokončené jednou ze zvolených strategií. Stejně vyhodnocení je možné provést při zkoumání jednotlivých průběhů. Zde je také vidět, že dosahované výsledky jsou mnohem více závislé na vzájemném vztahu průměr nástroje vůči rádiu dokončené plochy.

Tabulka 6-4 – Ukázka tabulky hodnotící odstup bodu od modelu pro strategii C2 [2]

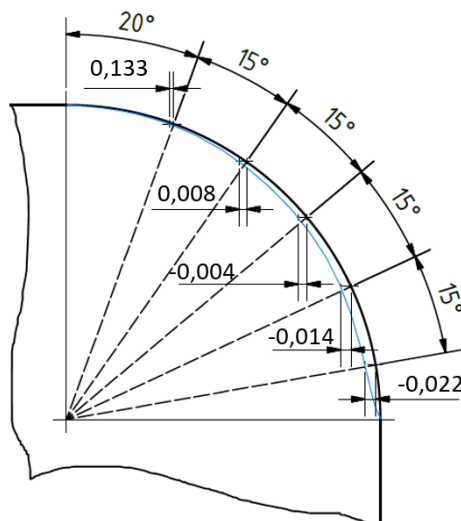
Průměr nástroje	Rádus plochy	Strategie	Průměrný odstup 20°	Průměrný odstup 35°	Průměrný odstup 50°	Průměrný odstup 65°	Průměrný odstup 80°	Průměr C2
3	30	C2	-0,235	-0,224	-0,181	-0,123	-0,018	-
4,9	16	C2	0,133	0,008	-0,004	-0,014	-0,022	
4,9	44	C2	-0,008	-0,028	-0,043	-0,044	-0,051	
9,5	30	C2	-0,234	-0,219	-0,191	-0,146	-0,087	
9,5	30	C2	-0,297	-0,275	-0,237	-0,176	-0,109	
9,5	10,201	C2	0,055	0,032	0,006	-0,020	-0,038	
14,1	16	C2	0,112	-0,019	-0,038	-0,052	-0,059	
14,1	44	C2	-0,007	-0,024	-0,038	-0,040	-0,045	
16	30	C2	-0,261	-0,213	-0,153	-0,076	0,000	
Průměr			-0,082	-0,107	-0,097	-0,077	-0,048	
Min			0,133	0,032	0,006	-0,014	0,000	0,031
Max			-0,297	-0,275	-0,237	-0,176	-0,109	-0,219
ch+			0,215	0,139	0,104	0,062	0,048	0,114
ch-			0,215	0,168	0,139	0,099	0,062	0,137

Pro většinu kombinací je možné pozorovat postupně rostoucí nebo klesající průběh, a to bez ohledu na použitý rozpočet drah nástroje nebo definici pracovních podmínek. Příklad je uveden na obrázku 6-27, kde jsou zobrazeny hodnoty průběhu pro průměr nástroje $D_n = 3$ mm a rádus plochy $R = 30$ mm. Z grafu je patrné, že všechny průběhy jsou rostoucí a se zvyšujícím se úhlem tečny dotykového bodu od vertikální roviny, se odstup přibližuje povrchu součásti. Z pohledu dokončování se jedná o nevhodný výsledek, neboť jeho kompenzace v reálné výrobě je velice komplikovaná. Pro strategii dodržující konstantní řeznou rychlost je tento výsledek neutrální. Nezamezuje použití zmíněné strategie v praxi, ale také nepřináší z toto pohledu žádné benefity.



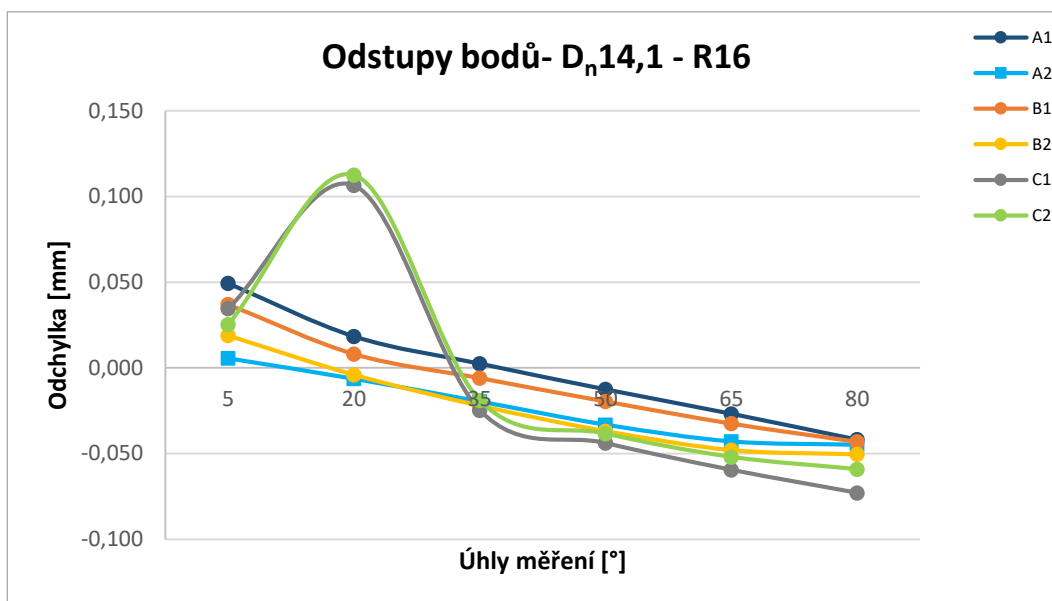
Obrázek 6-27 - Graf závislosti odstupe bodu od modelu pro jednotlivé strategie na ploše R = 30 mm obráběné nástroj Dn = 3 mm

Je tedy možné říci, že většina dokončených ploch nebyla ve skutečnosti rádiusová, ale že dokončený tvar měl tvar postupně se odchylojící od ideálního rádia nebo naopak. Příklad je uveden na obr. 6-28, kde je patrné, že dochází vlivem změny efektivního průměru k odlišnému odtlačení nástroje a rozměrová přesnost se mění v rozmezí takřka 0,2 mm. Jedná se o horší výsledek v porovnání s průměrem celé strategie, který byl pro variantu C2 pod 0,1 mm.



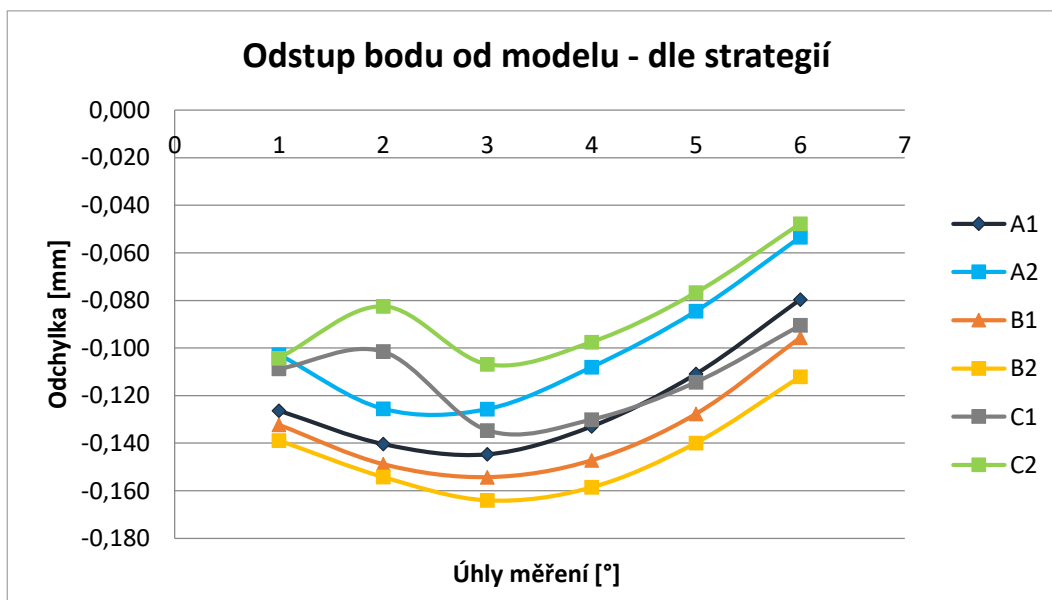
Obrázek 6-28 - Skutečná a ideální plocha pro rádius R 16 dokončovanou strategií C2 nástrojem průměru Dn = 4,9 mm [2]

V některých případech došlo v rámci jedné použité strategie rozpočtu drah ke kolísání hodnot měřených odstupů. Příklad je zobrazen na obr. 6-29. Z grafu je vidět, že s výjimkou strategie C mají všechny ostatní průběhy postupně klesající trend. Všechny strategie jsou si charakterem i dosahovanými hodnotami velice blízké. Pro strategií C byl v místě druhého náměru zaznamenán nárůst, a to bez ohledu na použitou strategii definice řezných podmínek. Je možné, že se jedná o nějakou chybu způsobenou měřením nebo nějakým doprovodným jevem.



Obrázek 6-29 - Graf závislosti odstupu bodu od modelu pro jednotlivé strategie na ploše R = 16 mm obráběné nástroje D_n = 14,1 mm

Ze zmíněných grafů průběhů ani z grafů umístěných v příloze 13 pro jednotlivé vzorky není možné vyhodnotit vliv použité strategie ani vliv konstantní řezné rychlosti, neboť všechny průběhy odstupů jsou si velice blízké. Z tohoto důvodu byly vytvořeny průměrné hodnoty pro jednotlivé strategie. Zde je možné již pozorovat názorněji vliv jednotlivých strategií. Obdobně jako tomu bylo v hodnocení rozměrové přesnosti minulého experimentu, není zcela zásadní maximální hodnota, ale spíše průběh a rozptyl hodnot.

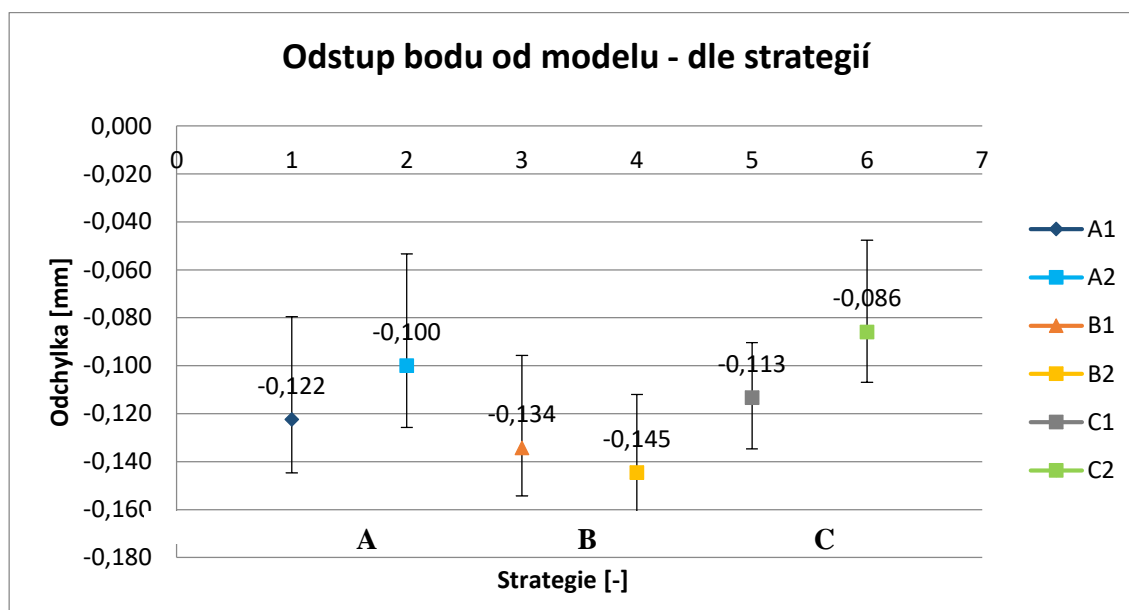


Obrázek 6-30 - Graf průběhu průměrných hodnot odstupu bodu od modelu pro jednotlivé strategie [2]

Z grafu na obrázku 6-30 je možné vidět, že průběh pro všechny strategie je takřka totožný. Rozptyl hodnot se pro každou ze strategií pohybuje okolo 0,1 mm, a to i s daty, která se značně odchylovala, jako již zmiňovaný příklad.

Hodnocení nevhodnější strategie je možné provést z grafu na obr. 6-31, kde jsou zobrazeny rozptyly hodnot. Ze zmíněného grafu je možné pozorovat, že nejlepší možné

hodnoty rozptylu byly dosaženy pro strategii C1, která má průměrný rozptyl hodnot do 0,044 mm. Tento výsledek však nemusí být zcela relevantní. Neboť ostatní hodnoty se, až na strategii A2, pohybovaly okolo 0,05 mm, takže průměrné rozestupy jsou velice malé. Naopak nejnižšího průměru dosahovala strategie C2. Oproti výsledkům drsnosti povrchu jsou zde mnohem méně patrné rozestupy mezi jednotlivými strategiemi. Při porovnání strategií s konstantními otáčkami vůči konstantní řezné rychlosti jsou průměrné hodnoty lepší pro druhou volbu. Opět je potřeba zmínit, že rozdíly v rozptylu hodnot jsou v řádech setin milimetru a konkrétní výsledek je svázán s použitým průměrem nástroje, rádiem plochy a strategií rozpočtu drah.



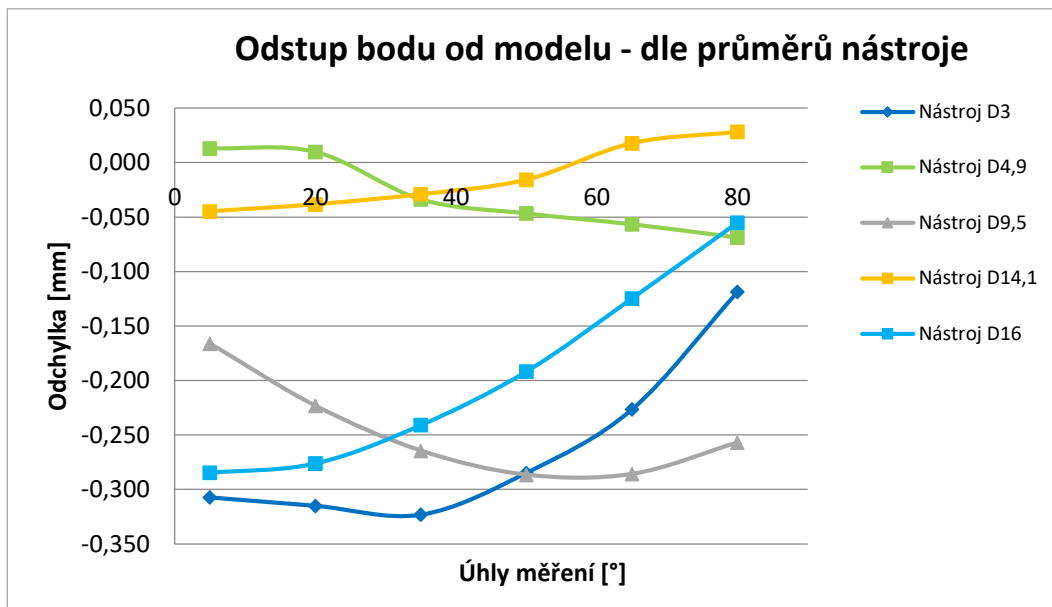
Obrázek 6-31 - Graf průměrných hodnot a rozptylů odstupu bodu od dle strategií [2]

Vliv konstantní řezné rychlosti je v případě dosažených výsledků velice složité vyhodnotit. Z průběhů jednotlivých vzorků není obecně závěry vyhodnotit, neboť vyšší vliv mají evidentně faktory průměru nástroje a rádiu plochy resp. jejich kombinace. Z průměrných hodnot je možné vyhodnotit nevhodnější variantu, ale vlivem zkreslení způsobené průměrem hodnot jsou rozdíly mezi jednotlivými strategiemi velice malé. Asi nejdůležitější výsledek je možné vyvodit z rozptylu jednotlivých hodnot. Ten je nejnižší pro variantu A2. Obdobně tedy jako u drsnosti povrchu je možné říci, že použitím konstantní řezné rychlosti je možné při vhodném rozpočtu drah dosáhnout nejmenšího rozptylu hodnot.

- **Vliv průměru nástroje a rádiu obráběné plochy**

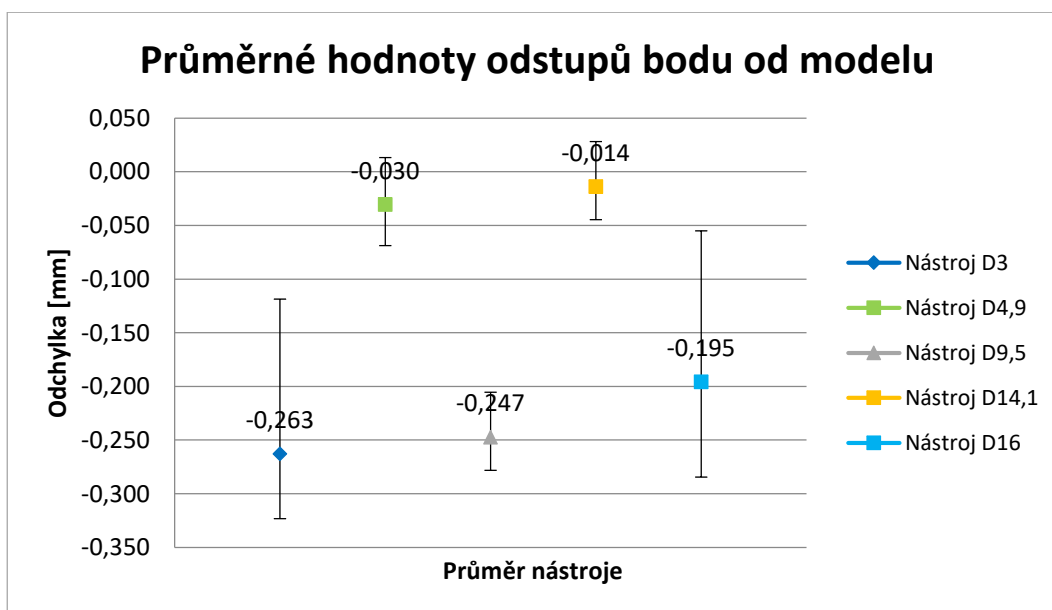
V hodnocení parametru rozměrové přesnosti jsou proměnné faktory průměru nástroje a rádiu plochy hodnoceny společně. Především z důvodu vzájemného působení těchto faktorů popsaného v předešlé části hodnocení rozměrové přesnosti. Zpracování naměřených dat bylo opět provedeno analogicky a jeho příklad je možné nalézt v tabulce v příloze 13. Z těchto dat byly opět vytvořeny grafy pro lepší vizuální prezentaci výsledků.

Z grafických výsledků dat uvedených na obrázku 6-32 je možné pozorovat, že jednotlivé průměry nástroje mají značně odlišný průběh. Zatímco nástroje s průměrem $D_n = 4,9$ mm a $D_n = 14,1$ mm mají takřka ideální průběh s kolísáním do 0,1 mm. Nástroje s průměrem $D_n = 3$ mm a $D_n = 16$ mm mají postupně rostoucí průběh. Rozdíl hodnot je přibližně 0,2 mm. Úplně odlišný průběh je možné pozorovat pro nástroj s průměrem $D_n = 9,5$ mm, kde je průběh naopak klesající s rozdílem okolo 0,15 mm.



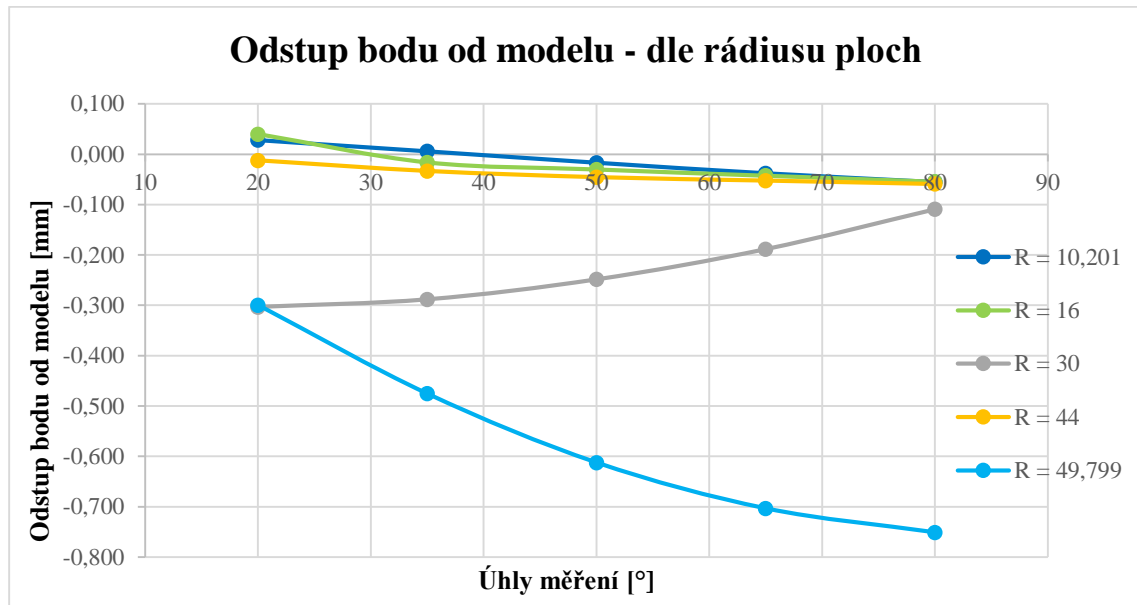
Obrázek 6-32 - Graf průběhů odstupů bodů od modelu pro jednotlivé průměry nástrojů dle úhlu měření [2]

Obdobné výsledky je potom možné pozorovat z rozptylů hodnot, viz obr. 6-33, kde nástroje s průměrem $D_n = 3$ mm a $D_n = 16$ mm mají velice výrazné rozptyly oproti ostatním, kde je rozptyl výrazně nižší a pro nástroje s průměrem $D_n = 9,5$ mm je i posazen výrazně níže.



Obrázek 6-33 - Graf průměrných hodnot a rozptylů odstupů bodu od modelu pro jednotlivé průměry nástrojů [2]

Co se týče rádia dokončované plochy, jsou opět výsledky velice nejednoznačné. Plochy s rádiem $R = 10,201$ mm, $R = 16$ mm a $R = 44$ mm mají opět ideální průběh s velice malým rozptylem do 0,1 mm. Plocha s rádiem $R = 30$ mm má sice postupně rostoucí trend, ale s hodnotami do 0,2 mm. Nejhorší výsledek dosahuje plocha s $R = 49,799$ mm, kde jsou hodnoty výrazně klesající, a to o více než 0,35 mm. Tento fakt je možné přičíst tomu, že plocha byla díky statistickému plánování obráběna pouze nástroje s průměrem $D_n = 9,5$ mm a v případě této plochy byl výsledek velice nejednoznačný již vlivem použité strategie.



Obrázek 6-34 - Graf průběhů odstupů bodů od modelu pro jednotlivé rádiusy ploch dle úhlu měření [2]

Na základě zmíněných výsledků není možné určit vliv faktoru průměru nástroje a rádiu obráběné plochy na rozměrovou přesnost dokončené plochy. V některých případech si výsledky různých průměrů nástroje korespondují, ale další hodnota průměru tento trend naopak vyvrací. U rádiů ploch je možné vidět, zejména pro dva nejmenší, poměrně malý rozptyl hodnot. Ovšem zcela v kontrastu jsou naopak dva největší rádiusy, z čehož je patrné, že ani zde není možné vyvodit nějaké obecně platné závěry. Pro výsledné zhodnocení vlivu posledních dvou faktorů bude třeba vyčkat na výsledky statistiky.

6.3.1.4 Hodnocení z pohledu časové úspory

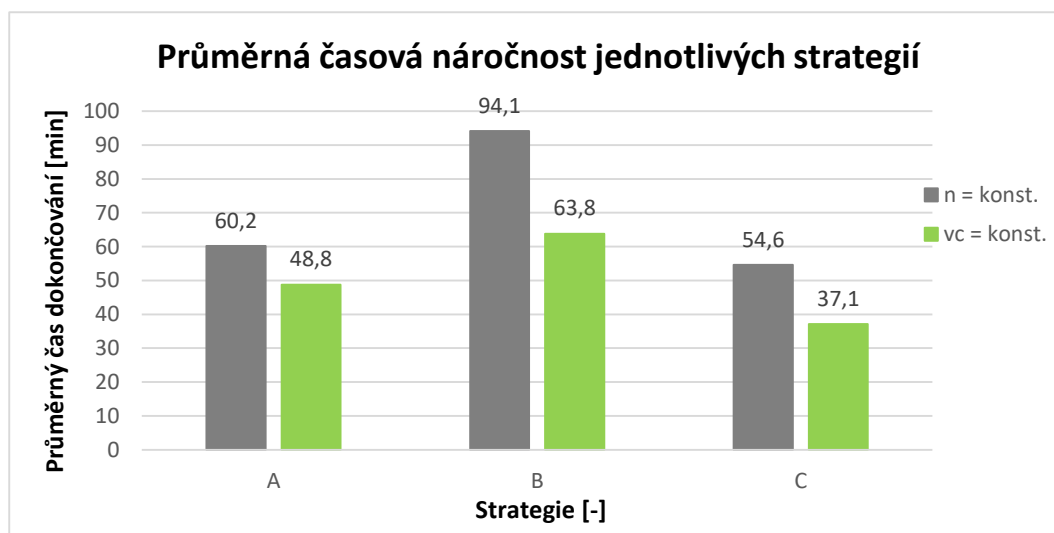
Z pohledu celé disertační práce je důležitým faktorem efektivita celého dokončovacího procesu. Tu je možné částečně hodnotit jak dle již zmíněných sledovaných parametrů, kde vlivem např. zlepšení kvality pro nějakou variantu je možné využít vyšší rezné podmínky a docílit tak efektivnějšího úběru. Důležité je ovšem vzájemné porovnání použitých strategií z pohledu časové náročnosti samotného obrábění.

Výsledky jednotlivých strategií jsou zobrazeny v tabulce 6-5. Zde je vidět, že nejmenší množství času na obrobení všech vzorků bylo potřeba pro strategii C. Vzhledem k tomu, že se jedná o celkový čas obrábění, je tento fakt očekávaný. Pro menší rádiusy plochy dosahovala lepších výsledků strategie A, ale z celkového pohledu je díky vhodnějšímu typu rozpočtu nejvýhodnější již zmiňovaná strategie C.

Tabulka 6-5 – Hodnocení časové náročnosti jednotlivých strategií [2]

	Čas dokončování [min]					
	A1	A2	B1	B2	C1	C2
D = 3 mm, R = 30 mm	21,0	18,0	33,0	23	35	24
D = 4,9 mm, R = 16 mm	18,0	16,0	28,0	20	22,5	16,5
D = 4,9 mm, R = 44 mm	47,0	39,0	75,0	53	60	42
D = 9,5 mm, R = 10,201 mm	21,0	17,0	32,0	22,3	21	15
D = 9,5 mm, R = 30 mm	60,0	49,0	96,0	66	56	38
D = 9,5 mm, R = 49,799 mm	101,0	81,0	153,0	106	88	59
D = 14,1 mm, R = 16 mm	47,0	38,0	73,0	48,5	39	26
D = 14,1 mm, R = 44 mm	128,0	103,0	202,0	133	96	64
D = 16 mm, R = 30 mm	99,0	78,0	155,0	102	74	49
Čas celkem [min]	542,0	439,0	847,0	573,8	491,5	333,5
Průměr [min]	60,2	48,8	94,1	63,8	54,6	37,1

Při hodnocení přínosu použití konstantní řezné rychlosti bude jeho vliv nejlépe patrný z grafu na obrázku 6-35. Zde je vidět, že při použití konstantní řezné rychlosti je možné průměrně ušetřit velké množství času, a to bez ohledu na použitý typ rozpočtu.



Obrázek 6-35 - Graf porovnávání průměrných hodnot časové náročnosti pro strategie $vc = konst.$ a $n = konst.$ [2]

Zmíněné výsledky jsou dány vlivem proměnných otáček, a to zejména v oblasti s menším efektivním průměrem, kdy dochází při použití otáčkového posuvu k výraznému zrychlení celého obrábění. S rostoucím efektivním průměrem se vliv použití konstantní řezné rychlosti vytrácí a obě strategie se k sobě přibližují.

Zvýšení efektivity tímto způsobem je možné při použití otáčkového posuvu, což je ale jednou ze základních podmínek celé strategie zmíněné již v kapitole 4.1. Zmíněné výsledky jsou velice důležité zejména pro metodiku návrhu dokončovací strategie. Dá se ale říci, že

pokud by se i do stávajících strategií zapracovala tuto možnost úpravy řezných parametrů, bylo by možné zvýšit efektivitu dokončování z pohledu časové náročnosti.

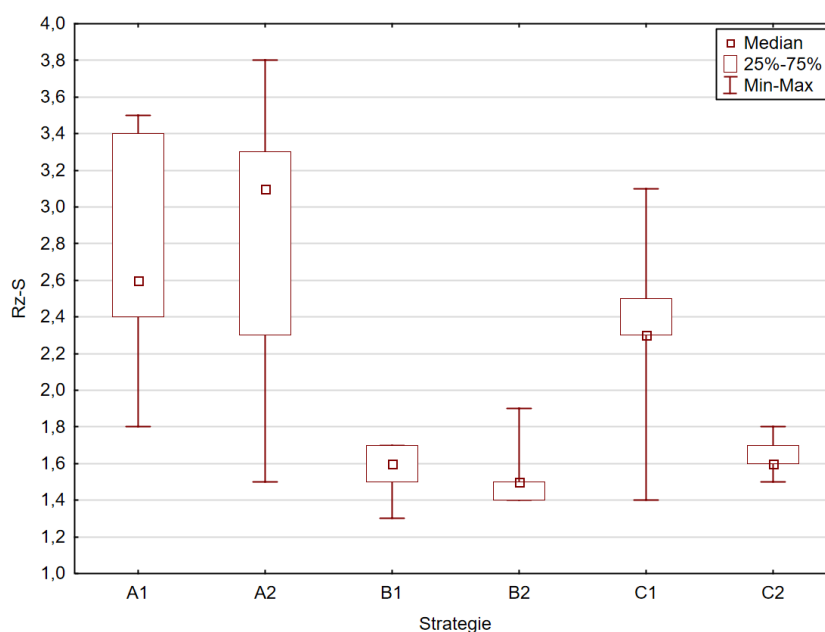
Základním cílem celého experimentu bylo zjistit, zda bude mít vliv změna otáček, reprezentovaná v tomto případě hodnotami řezné rychlosti, zásadní dopad na kvalitu dokončené plochy. V jednotlivých bodech bylo provedeno shrnutí vlivů pro jednotlivé sledované parametry. V následujícím textu jsou tyto výsledky porovnány vůči sobě z důvodu celkového posouzení změny řezných parametrů na dokončovanou plochu.

6.3.2 Statistické hodnocení výsledků

Průběh zpracování statistických dat byl obdobný jako při prvním experimentu, a proto zde nebude dále detailně zpracováván. Pro tento experiment byl pro vyhodnocení použit Kruskal-Wallisovo test namísto metody ANOVA. Tento test je ne-parametrickou obdobou metody ANOVA, který nepracuje s původními hodnotami, ale systematicky přiřazuje jednotlivým faktorům pořadová čísla. Tento test byl použit z důvodu možnosti porovnávat více skupin nominálních faktorů, což bylo vhodnější pro takto rozsáhlý objem dat.

Hodnocení tedy u žádného z faktorů s prokázaným vlivem neprobíhalo dle konkrétních hodnot parametru, ale na základě průměru pořadí, s kterým Kruskal-Wallisův test pracuje. Z tohoto důvodu je možné brát vyhodnocená data pouze jako informace o pořadí dosažených výsledků a jejich vzájemného rozdílu nebo nastalých trendů, která však mají statistický význam. Není ovšem možné provést na základě tohoto hodnocení kvantifikovatelné kvalitativní porovnání.

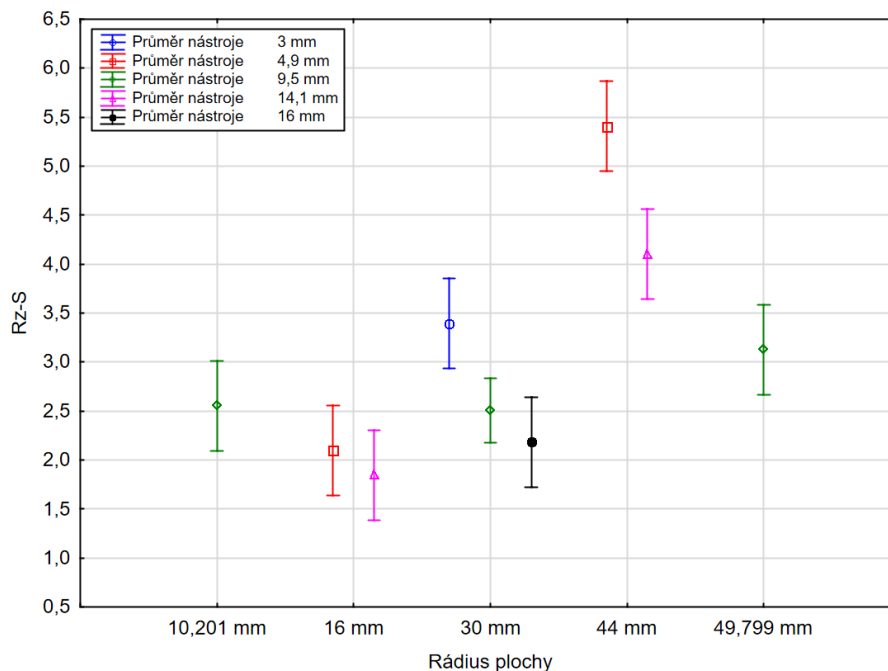
Pro parametr drsnosti Rz se hodnotil vliv jednotlivých strategií vždy pro jednu kombinaci průměru nástroje a rádiu plochy. Ze statistického vyhodnocení je možné doplnit a porovnat výsledky vyhodnocené v technickém hodnocení. Podařil se zde prokázat vliv použití konstantní řezné rychlosti, a to v kombinaci s rozpočtem na základě výšek zbytkového materiálu. Tato kombinace dosahovala v průměru nejnižších velikostí drsnosti a také nejmenšího rozptylu naměřených hodnot. Příklad je zobrazen na grafu na obr. 6-35, kde jsou uvedeny mediány a rozptyl hodnot v rozložení: minimum, 25%, medián, 75% a maximum.



Obrázek 6-36 - Graf průměrných pořadí drsnosti Rz a rozptylů dosažených hodnot ve svislém směru

Jedná se o výsledky takřka shodné s technickým hodnocením a ty je tedy možné považovat za ověřené. Obdobné výsledky byly dosaženy pro hodnoty Ra a oba vertikální směry.

Pro faktor rádiu plochy, který se v technickém hodnocení nepodařilo prokázat, je možné ze statistických dat pozorovat mírný trend nárůstu s rostoucím rádiem plochy. A to s výjimkou rádiu $R = 44$ mm, kde hodnoty výrazně narůstají. Tento faktor je zobrazen společně s vlivem průměru nástroje na grafu z obrázku 6-37.



Obrázek 6-37 - Graf vlivu průměru nástroje a rádiu plochy na parametr drsnosti Rz

Co se týče vlivu průměru nástroje, je zde možné pozorovat např., že pro průměr $D_n = 9,5$ mm neměl rádius dokončované plochy z pohledu drsnosti Rz takřka žádný vliv, neboť hodnoty se pohybují v úzkém rozmezí. Naopak u průměrů nástroje $D_n = 4,9$ mm a $D_n = 14,1$ mm, jsou hodnoty dosažené pro rozdílné rádie značně odlišné. Z těchto všech výsledků není možné sestavit trend vlivu průměru nástroje na drsnost Rz.

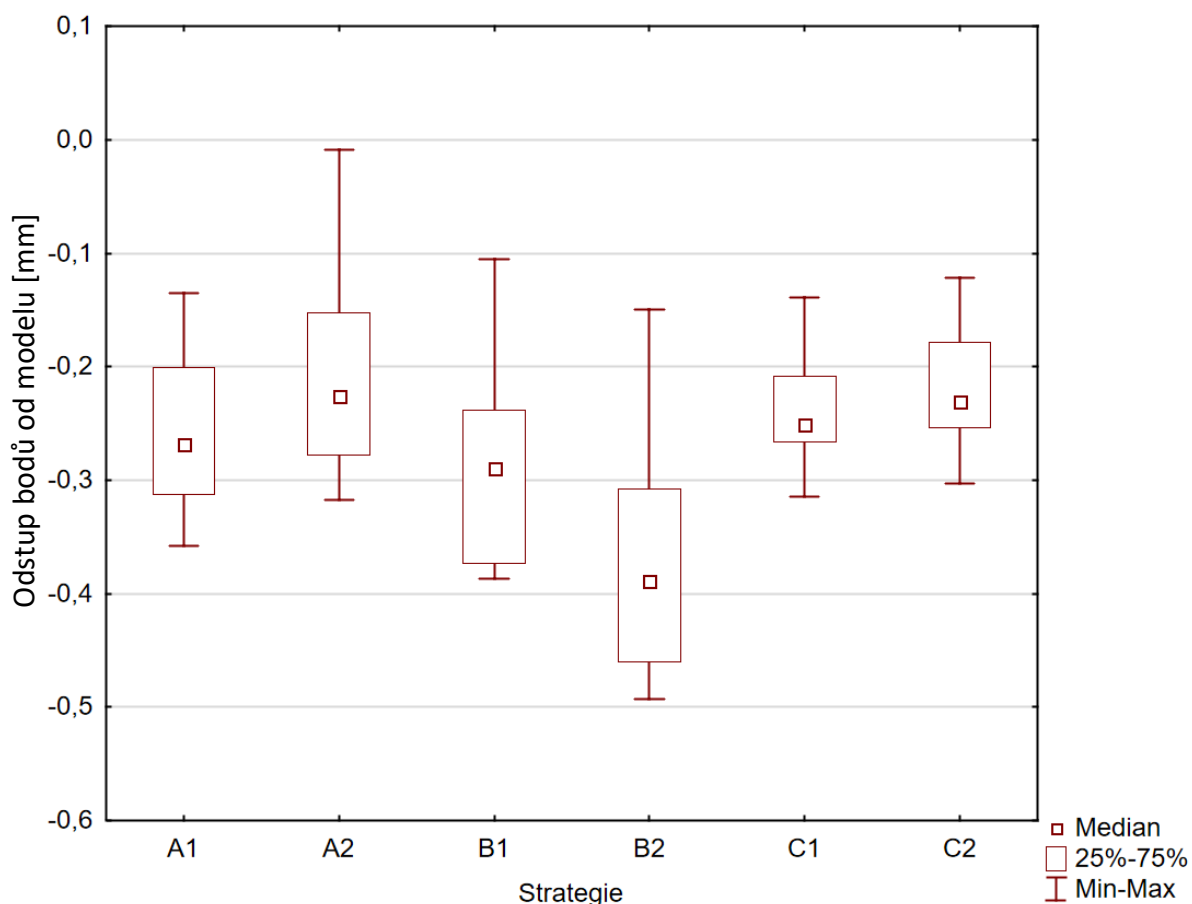
Porovnáme-li výsledky z grafu z obr. 6-37 s daty z technického hodnocení, je možné usuzovat, že vcelku vhodné výsledky pro zmíněné nástroje průměru $D_n = 4,9$ mm a $D_n = 14,1$ mm mohly být v technickém hodnocení způsobeny chybou aritmetického průměru. Tímto zpravováním se s největší pravděpodobností maximální a minimální hodnoty vzájemně vyrušily. Naopak pro hodnoty ostatních nástrojů se projevil podobný rozptyl a je třeba brát zmíněná data z technického hodnocení pro vliv průměru nástroje za málo průkazná.

V případě hodnocení rozměrové přesnosti se opět podařilo vyhodnotit vzájemné působení použitých strategií pro jednotlivé vzorky jedné kombinace průměru nástroje a rádiu plochy. Jediné relevantní závěry je možné provést pro hodnocení použité strategie rozpočtu drah a definice řezných podmínek.

Z grafu na obrázku 6-38 je patrné, že nejhorších výsledků dosahovala strategie B s konstantním krokem dle profilu plochy. Pro tuto strategii byl použitím konstantní řezné rychlosti rozptyl hodnot ještě mírně navýšen. Tento trend se projevoval také pro strategii A, kde bylo dosaženo mírně lepších hodnot mediánu v porovnání se strategií B. V případě

strategie rozpočtu C dle výšky zbytkového materiálu nebyl vliv definice řezných podmínek zcela patrný. V porovnání s ostatními strategiemi byl ovšem nižší rozptyl hodnot a také o něco nižší hodnota mediánu.

Celkově je tedy možné říci, že výraznější vliv měla použitá strategie rozpočtu drah než volba řezných podmínek. I když jsou vzájemné rozdíly průměrného pořadí malé a vlivem průměru je možné uvažovat zkreslení hodnot, kopírují tato data trendy zjištěné v technickém hodnocení. Je tedy možné říci, že statistická data technické hodnocení potvrzují.



Obrázek 6-38 - Graf statistického hodnocení sumy průměrných pořadí dle Kruskal-Wallisovo testu pro odstup bodů od modelu

Jak již bylo zmíněno pro ostatní faktory, tedy průměr nástroje a rádius plochy, nebyla data průkazná a není možné z nich usoudit relevantní závěry.

I když se z pohledu statistického vyhodnocení podařilo prokázat jen málo zkoumaných jevů, pro zásadní závěry vyvozené z technického hodnocení byl vliv prokázán. Zejména pro kvalitativní parametry drsnosti povrchu a odstupu bodů od modelu byly trendy zjištěné v technickém hodnocení statisticky ověřeny. Vzhledem k tomu, že např. naměřená data pro drsnost R_z , i při vyšším počtu porovnávaných proměnných faktorů vykazovala shodu okolo 68%, jsou zmíněné statistické výsledky hodnotným doplněním technického hodnocení.

6.4 Shrnutí a posouzení výsledků

Vzhledem k cílům celého experimentu bylo nezbytné celé hodnocení rozdělit do několika částí. Primárním cílem bylo prokázat vliv použití strategie s konstantní řeznou rychlostí na kvalitativní parametry dokončovaného povrchu.

6.4.1 Shrnutí výsledků

Z jednotlivých proměnných faktorů měly nejzásadnější vliv kvalitativní sledované parametry. Z nich má poté pro dokončovací operace vyšší význam drsnost povrchu, která je pro tvarové plochy častěji sledována. Rozměrovou přesnost pro tvarové složité plochy je v praxi často složité vyhodnocovat, a proto je z pohledu důležitosti sledovaných parametrů o něco méně významnou. Nejmenší důraz je ze sledovaných parametrů kladen na řezné síly. Co se týče efektivity - poslední sledovaný parametr, tedy čas obrábění, je velice významný.

Z jednotlivých sledovaných proměnných faktorů ovlivňujících drsnost dokončené plochy jako dominantní vychází strategie rozpočtu drah nástroje. Vliv použití konstantní řezné rychlosti při použití strategie A a C ještě zlepšuje hodnoty dosažené drsnosti. A to nejen maximální hodnotu, ale především rozptyl hodnot je vlivem použití konstantní řezné rychlosti nižší. Nejnižších hodnot, a to jak z jednotlivých průběhů, ale také průměrných, dosahovala strategie C2. Tyto závěry technického hodnocení byly ověřeny pomocí statistiky, kdy vyhodnocená data ve velké míře kopírovala zmíněné trendy.

Hodnocení vlivu průměru nástroje dopadlo dle teorie obrábění a to tak, že tedy vlivem použití většího průměru nástroje je dosahováno nižších drsností povrchu. Zajímavý výsledek vyplývá z porovnání dosažených výsledků s teoretickým výpočtem drsnosti povrchu pro jemné frézování kulovým nástrojem. Z prezentovaných grafů vyplývá, že teoretické výpočty absolutně neodpovídají realitě dokončování. Pro hodnoty drsnosti R_z jsou skutečné hodnoty několikanásobně vyšší a naopak pro hodnoty R_a jsou reálné výsledky výrazně lepší než data z použitých vzorců. To může být s největší pravděpodobností způsobeno nevhodným typem součásti pro použité vzorce. V případě změn rádiu plochy nebyl vliv na drsnost dokončené plochy dostatečně prokázán.

Hodnocení rozměrové přesnosti nepřineslo významné výsledky, a to pro žádný proměnný faktor. Z hlediska strategie má použitý způsob rozpočtu vliv na výsledný odstup od ideální plochy, ale z technického hodnocení jeho vliv není možný zcela relevantní prokázat, neboť je jednoznačný pouze z průměrných hodnot. Částečně byl tento fakt prokázán díky statistickému hodnocení, kdy nejlepších hodnot dosahovala strategie C. Použití konstantní řezné rychlosti nemá na rozměrovou přesnost dokončení plochy významný vliv, a to ani pozitivní ani negativní. Je pravdou, že strategie s nejmenším rozptylem byla C1, tedy strategie využívající konstantní otáčky, ale pro další strategie rozpočtu není vliv prokazatelný a rozestupy mezi jednotlivými strategiemi jsou v řádech jednotek setin milimetru. Obdobně dopadlo i statistické hodnocení. Pro faktory průměru nástroje a rádius dokončené plochy není možné relevantní výsledky vyvodit.

Zkoumání řezných sil prokázalo vliv zejména použití konstantní řezné rychlosti, jejím použitím dojde k výraznému snížení řezných sil. V kombinaci s vhodným rozpočtem drah je možné dosahovat nižších řezných sil, a to zejména v rovině XY. Tento fakt je možné spojit s nižšími hodnotami drsnosti pro strategie B2 a C2. Přímoou spojitost se ovšem prokázat nepodařilo. Vliv průměru nástroje je patrný pouze pro náměry od sklonu tečny kontaktního

bodů 35°. Zde se zvyšujícím se průměrem roste řezná síla, ale pouze v řádu několika desítek Newtonů. Naopak do hodnoty 35° je patrný vliv rádiu dokončované plochy. Do tohoto místa jsou vyšší hodnoty řezných sil pro větší radius plochy a naopak. Tyto výsledky nebylo možné propojit s dalšími sledovanými parametry, a to zejména díky nízké průkaznosti těchto parametrů.

Z pohledu časové úspory je jednoznačně výhodnější použití konstantní řezné rychlosti. Díky přepočtu posuvové rychlosti vždy pro konkrétní otáčky dochází k výrazné časové úspoře, a to zejména pro strategii C. Ta díky typu rozpočtu drah obsahuje menší množství drah než strategie B, ale dráhy jsou efektivněji rozloženy, čímž je čas dokončování výrazně nižší než pro zbylé strategie.

6.4.2 Posouzení výsledků pro dokončovací operace

Výsledky experimentu dávají poměrně jasné informace o vlivu strategie využívající konstantní řeznou rychlosti pro dokončování. Zejména z pohledu drsnosti a časové náročnosti se dá říci, že použitím konstantní řezné rychlosti s vhodným typem rozpočtu drah je možné dosáhnout výrazně lepších výsledků zmiňovaných parametrů. Tyto závěry byly pro drsnost povrchu ověřeny pomocí statistického hodnocení.

Pro zbylé dva parametry, tedy řezné síly a rozměrovou přesnost, již není možné takto jednoznačně výsledky konstatovat. Např. data pro rozměrovou přesnost dosahují při použití konstantní řezné rychlosti také lepších výsledků, ale tyto hodnoty nejsou zdaleka tak průkazné. A to ani za použití statistického hodnocení, i když zde jsou jisté vlivy pozorovatelné. Pouze na výsledcích statistiky ovšem není možné vytvořit relevantní závěry.

Žádný z výsledků neprokázal negativní dopad použití strategie využívající konstantní řeznou rychlost na kvalitativní parametry. Z tohoto posouzení je tedy možné říci, že v případě začlenění strategie využívající konstantní řeznou rychlost je možné dosáhnout efektivnějšího dokončovacího procesu.

Celou strategii bude samozřejmě nutné před reálným použitím podrobit dalším experimentům, především pro složitější tvarové plochy a také různé konstrukční materiály. Už nyní je ovšem možné konstatovat, že tato strategie má výrazný potenciál pro optimalizaci a zefektivnění dokončovací strategie a to přímo na úrovni CAM modulu. Díky těmto výsledkům je možné přistoupit k návrhu metodiky dokončovací strategie, která bude založena na použití konstantní řezné rychlosti.

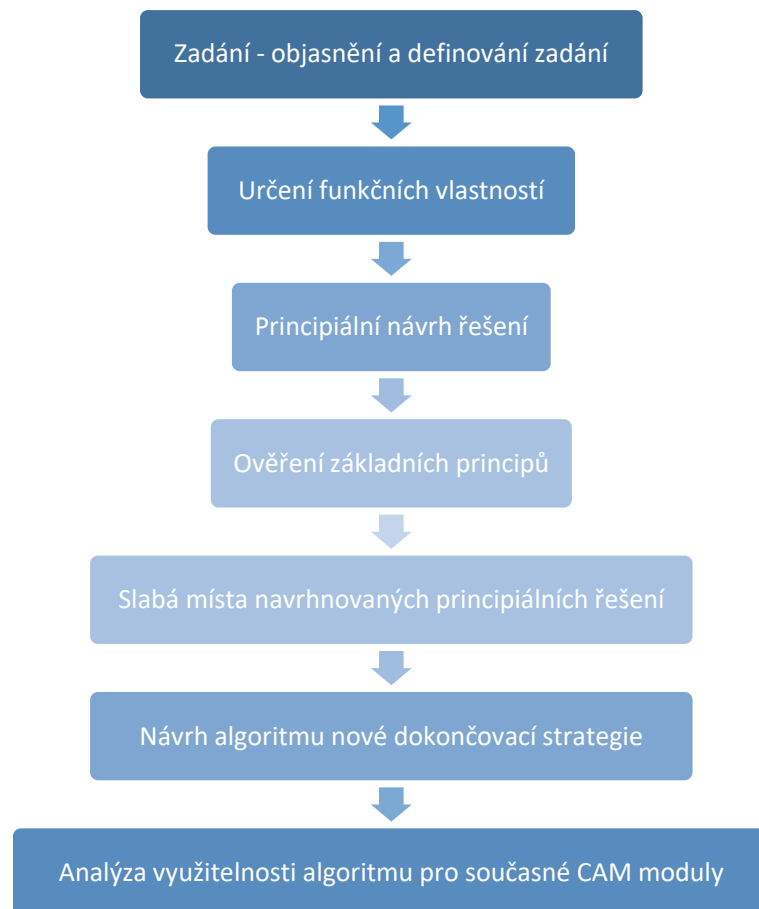
7 Metodika návrhu dokončovací operace

Vývoj nové obráběcí strategie je velice komplikovanou mezioborovou problematikou řešenou většinou ve velkých týmech odborníků z různých oborů. V rámci výzkumu a vývoje obráběcích technologií na KTO vznikla celá řada studií zabývajících se zvýšením efektivity obráběcích strategií. Vzhledem k úzkému kolektivu pracovníků specializujících se převážně na samotnou technologii obrábění není na KTO vyvíjen celý algoritmus strategie, ale pouze ověřován její princip. Ze zmíněných důvodů není výstupem práce celá strategie resp. algoritmus použitelný a zpracovatelný do nějakého stávající CAM modulu. Místo takového konkrétního algoritmu je zde zpracována metodika návrhu operace využívající principy z teoretické části práce a uplatňující definici rezných podmínek s ohledem na zachování konstantní rezné rychlosti.

Při návrhu obráběcí strategie nelze použít nějaký obecně platný procedurální přístup nebo normu, neboť pro tuto oblast se žádné takovéto dokumenty nevyskytují. Z tohoto důvodu metodika pro návrh dokončovací strategie vychází z obecně platných požadavků při vývoji nových SW aplikací. Celý proces návrhu je rozdělen do několika částí, z nichž nejdůležitější je návrh použitých metod a strategií pro algoritmus.

7.1 Struktura návrhu nové obráběcí operace

Návrh obráběcí strategie je proveden dle určitého návodu modifikovaného pro uvedené účely. Důležité body řešení jsou rozpracovány dále dle návrhu z obrázku 7-1.



Obrázek 7-1 - Schéma návrhu nové dokončovací strategie

7.1.1 Zadání

Zadání problematiky řešené v této dizertační práci vzniklo na základě potřeb praxe zvyšovat efektivitu dokončovacího procesu pro tvarově složité prostorové plochy. Důvodem hlubší analýzy bylo, že při řešení dané problematiky nebyly nalezeny relevantní prameny v literárních zdrojích ani funkční strategie vyskytující se v současných CAM modulech. Existují sice optimalizační přístupy umožňující zefektivnit dokončovací obrábění, ale v tomto případě je snaha optimalizovat dráhy již na úrovni CAM modulu, tak jak jsou tomu přizpůsobeny např. hrubovací strategie.

7.1.2 Určení funkčních vlastností

Navrhovaná strategie by měla splňovat aktuální požadavky na produktivní obrábění. Základem takovéto strategie je odebrat potřebný materiál v co možná nejkratším čase a za co možná nejlepší kvality obrobenej plochy. Dalším faktorem je bezpečnost a spolehlivost celého procesu. Oproti návrhu technologie, která se dle zásad definuje tak, aby splnila kvalitativní požadavky v minimální předepsané míře a nikoliv aby dosahovala nejlepší možné kvality, je pro novou strategii logickým požadavkem dosažení maximální možné kvality. Tu je posléze možné snížit úpravou nějakého parametru definujícího řezné podmínky.

Z těchto bodů je možné stanovit jednotlivé funkční vlastnosti nové dokončovací strategie:

- Snížením časové náročnosti
- Zvýšením kvality dokončené plochy
- Zvýšením bezpečnosti dokončování
- Zvýšením životnosti nástrojové sestavy

Z těchto funkčních vlastností vychází návrh dokončovací strategie a jsou navrženy principiální metody řešení.

7.1.3 Navržení principů řešení

Princip zefektivňování dokončovacích operací vychází z několika základních metod optimalizace. Každý z nich má svůj vliv na zvýšení efektivity, bezpečnosti. Výsledné efektivity by mělo být dosaženo vzájemnou kombinací jednotlivých metod. Vzhledem k tomu, že je třeba navrhovanými principy postihnout jednotlivé funkční vlastnosti, je třeba každému bodu přiřadit alespoň jednu metodu, která principiálně řeší danou problematiku. Následně je třeba vyhodnotit jednotlivé metody a jejich případné kombinace. Po vyhodnocení bude následovat ověření použitých principů.

7.1.3.1 *Snížení časové náročnosti dokončování*

Vzhledem k povaze dokončování je možné říci, že z celé technologie frézování tvarově složitých ploch se jedná o nejméně efektivní část procesu obrábění. Poměr časové náročnosti a objemu odebraného materiálu je zde obecně nejmenší. Samozřejmě hlavním důvodem je podstata dokončování převážně určující funkční vlastnosti dokončené plochy. Z pohledu kontroly záběrových a řezných podmínek a optimalizace drah nástroje s ohledem na tvar součásti je možné v dnes používaných strategiích nalézt poměrně značné nedostatky.

Nejmarkantnější je nedodržování konstantních řezných podmínek během obrábění. Pro dokončování tvarových prostorových ploch se v současnosti při obrábění realizované vzájemnou kinematikou obroku a nástroje využívají nástroje s kulovým čelem. Tyto nástroje

vlivem změny sklonu tečny vůči horizontální rovině v bodě CC mění také svoji efektivní řeznou rychlost, a tím i definovaný otáčkový posuv nebo posuv na zub. Tato fakta byla popsána v kapitole 4. Částečně je možné tento jev kompenzovat pomocí naklápění pro víceosé stroje. Tento fakt v navrhovaném řešení není uvažován.

Principem, který by mohl danou problematiku vyřešit, je použití konstantní řezné rychlosti při dokončování. Jedná se o strategii popsanou v kapitole 4.1, kde je nejen popsán princip, ale také uveden návrh algoritmu využívající konstantní řeznou rychlost. V dalších kapitolách jsou provedeny experimenty, které snížení časové náročnosti jednoznačně potvrzují.

Jedná se o zcela novou strategii, jejíž myšlenka vznikla na KTO na ZČU. Její zařazení do dokončovací operace by mělo přinést další benefity, nicméně využitím proměnných řezných podmínek dle aktuálního efektivního průměru nástroje by pro novou strategii měl být základní princip snížení časové náročnosti.

7.1.3.2 *Zvýšení kvality dokončené plochy*

Druhým funkčním principem je zvýšení kvality dokončené plochy při uvažovaném zachování základních ovlivňujících kritérií. Na celkovou kvalitu má významný vliv velké množství parametrů, a to jak statických, tak také dynamických. Zde je nutné zmínit, že zásadní vliv má charakter dokončované plochy, neboť ten je spolu s materiálem obrobku, nástrojem, řeznými podmínkami a strategií generování drah jedním z hlavní kritérií ovlivňujících kvalitu dokončené plochy.

Jak již bylo zmíněno, jedním ze zásadních kritérií je rozpočet drah nástroje pro konkrétní plochu. Volba základního rozpočtu drah po ploše, vzdálenosti bočního kroku a další parametry ovlivňují výsledek dokončování. V různých CAM modulech je možné nalézt velké množství různorodých typů rozpočtu využívající jak řádkovací tak konturovací způsob obrábění. Zaměříme-li se na podstatu rozpočtu drah po ploše, je možné metody kategorizovat do třech základních typů uvedených v teorii v kapitole 3.4.2.3.

Vliv typu rozpočtu byl testován v provedených experimentech a podařilo se ho prokázat, a to i na plochách, které obecnou tvarovou plochu značně zjednodušovaly. Z toho důvodu je volba dokončovací strategie rozpočtu drah zahrnuta jako základní princip zvyšující jakost dokončené plochy.

Z pohledu dokončené plochy není důležitá pouze maximální hodnota, i když její velikost je určujícím kritériem. Dalším zásadním parametrem je také rovnoměrnost rozložení dokončované plochy. Pokud se při např. měření drsnosti zjistí, že na jednom místě testovaného vzorku je měřený parametr drsnosti výrazně vyšší než na jiném, je možné předpokládat, že v jiném místě měření může být tato hodnota opět rozdílná a třeba mimo toleranci. Proto je důležité, aby nová dokončovací strategie dosahovala co možná nejrovnoměrnější kvality po celé ploše. Kromě použité strategie rozpočtu drah má na hodnoty kritérií kvality povrchu významný vliv dodržení řezných podmínek při dokončování. Zdůvodnění může být, že při použití konstantní řezné rychlosti pro dokončování a s tím spojená úprava posuvové rychlosti má za následek rovnoměrnější záběrové podmínky. Tento jev byl opět vyhodnocován především v rámci druhého experimentu a pozitivní vliv nové strategie definice řezných podmínek byl alespoň částečně prokázán.

Z tohoto důvodu je využití konstantní řezné rychlosti vhodné využít při návrhu nové dokončovací metody nejen z důvodu snížení času dokončování, ale také z důvodu zvýšení kvality dokončené plochy.

7.1.3.3 *Zvýšení bezpečnosti dokončování*

Tento požadavek vyplynul především z potřeby kontrolovat celý výrobní proces. Takovéto nároky, a to nejen na obráběcí proces, vznikly v automobilovém a leteckém průmyslu z důvodu zvýšení bezpečnosti a snížení nákladů spojených s řešením chyb a poruch vzniklých při výrobě. Potřeba mít celý proces pod kontrolou se v současnosti rozšířila i do ostatních strojírenských oblastí a je tedy aktuálním tématem optimalizace jakéhokoliv procesu.

Z pohledu dokončování tvarově složitých ploch je bezpečnost důležitým prvkem. Chyby vzniklé při návrhu výroby nebo její realizaci můžou způsobit značné náklady, a to jak finanční tak i materiální, zejména jedná-li se o jednu z posledních operací celé výroby. Při dokončování je jedním ze zásadních kritérií ovlivňujících bezpečnost kvalita před-dokončené plochy.

Na následné parametry dokončovací strategie má velice důležitý vliv hodnota přídávku pro dokončování a také kvalita před-dokončené plochy. Vzhledem k tomu, že využití konstantního přídávku pro dokončování je v praxi využíváno jen zřídka, dalším důležitým faktorem je také hrubovací nebo před-dokončovací krok a celkové rozložení materiálu pro konkrétní plochu.

Kvalitně připravená plocha je tedy z pohledu bezpečnosti dokončování jednou z možností. Tento požadavek ovšem není možné splnit vždy a je tedy potřeba, aby i dokončovací strategie obsahovaly určité bezpečnostní algoritmy zvyšující míru spolehlivosti. Jednou z velice účinných metod je kontrola zatížení nástroje. Jedná se o zatížení stanovené z objemu odebíraného materiálu. Na základně tohoto zatížení je možné vyhodnotit místa, kdy je stanovená hodnota překročena a reagovat úpravou nějakého parametru tak, aby tento fakt nenastal.

V zásadě existují dva již využívané způsoby, jak může algoritmus reagovat na příliš vysoké zatížení nástroje. První z nich je úprava řezných podmínek nejčastěji posuvové rychlosti. Jedná se o princip, který využívají některé externí SW uvedené v teoretické části práce. Tímto způsobem sice nástroj obrábí stejný objem materiálu, ale vlivem snížení posuvové rychlosti dojde ke snížení řezných sil, a tím snížení zatížení nástroje.

Druhou možností je přidání další dráhy tak, aby klesla hodnota objemu odebírané třísky a došlo opět ke snížení řezných sil. V tomto případě je možné, aby algoritmus dráhy přidával v různých směrech. Jedním z používaných a v praxi ověřených principů je přidání dráhy ve stejném řezu, ale s větším přídávkem. Dalo by se říci před-dokončovací dráhu. Tím by pro následující dokončovací dráhu ubylo množství materiálu a řezné síly by poklesly. Druhou možností je přidat dráhy po obráběné ploše. Tedy zmenšit boční krok, a tím pro každou dráhu snížit opět objem odebíraného materiálu.

Z výše zmíněných metod je zřejmé, že všechny vedou k obdobnému cíli. Pro definici algoritmu nové dokončovací strategie je ovšem potřeba vybrat pouze jeden. To z důvodu duplicity jednotlivých metod při zapracování do výsledného algoritmu. Použití metody snižující řezné podmínky je sice efektivní, ale jde přímo proti použití konstantní řezné rychlosti. Oba principy si sice neodporují, ale mohlo by dojít ke snižování vlivu konstantní řezné rychlosti zejména na efektivitu. Z tohoto důvodu zatím zmíněná metoda použita nebude.

Možnost úpravy drah zmenšením rozestupů mezi dráhami je sice možné, ale velice obdobný algoritmus byl již přímo na KTO testován a jeho vliv se prokázat nepodařilo. Je pravdou, že ve zmíněném experimentu nebyl použit výhradně pro zvýšení bezpečnosti, ale i přes to není jeho zapracování nejhodnější variantou.

Jako nejvhodnější varianta byla zvolena možnost přidání drah nástroje ve stejné vzdálenosti s odlišným přírůstkem pro dokončování. Hlavním důvodem bylo použití této metody v hrubovacích strategiích, kde se pod označením adaptivního řízení skrývá právě kontrola zatížení nástroje s následným rozložením drah s odlišným přírůstkem. V tomto případě samozřejmě nelze uplatnit zcela stejný přístup, ale výchozí myšlenka je totožná.

7.1.3.4 *Zvýšení životnosti nástrojové sestavy*

Jedná se o funkční vlastnost úzce spjatou s předchozím požadavkem bezpečnosti. Ovšem v tomto případě je nutné uvažovat nejen snížení životnosti vlivem nějakého jevu spojeného s chybou drah nástroje nebo nevhodným charakterem předpřipravené plochy, ale také opotřebení přímo spojené s procesem řezání.

Opotřebení nástroje je běžným doprovodným jevem jakéhokoliv řezání založeného na mechanickém úběru materiálu břitem nástroje. Otupení je možné určitými přístupy snížit, ale zcela se mu vyhnout nelze. Jedním z faktorů zvyšujících otupení břitu nástroje je kolísání řezných sil a s tím spojené doprovodné jevy jako je nerovnoměrné záběrové podmínky, vznik vibrací a další. Všechny tyto doprovodné jevy snižují životnost a efektivitu celého procesu a tím zvyšují náklady na dokončování.

Částečné omezení tohoto vlivu by měla přinést kombinace již zmíněných principů. Rovnoměrnější podmínky by měla zajistit zejména kontrola zatížení nástroje, popsána výše. Pokud by dokončování probíhalo za rovnoměrných podmínek vlivem použití konstantní řezné rychlosti, mělo by opět dojít ke snížení opotřebení nástroje. Samotný vliv opotřebení při použití konstantní řezné rychlosti při provedených experimentech zkoumán nebyl. Částečné snížení opotřebení je možné očekávat vlivem snížení řezných sil, které z provedených experimentů vyplývá. K výraznému snížení vlivem použití strategie využívající konstantní řeznou rychlost dochází zejména pro řezné síly v rovině XY.

7.1.4 *Ověření základních principů*

Výše zmíněné principy jsou vybrány jako jedny z řady možných metod jak zvýšit funkční vlastnosti dokončovacích strategií. Pro použití v nové strategii je ovšem důležité, aby základní vlivy splňovaly požadavky na dokončování a zlepšovaly požadované funkční vlastnosti. Před zapracováním jednotlivých metod do algoritmu dokončovací strategie je ovšem nutné funkční vlastnosti ověřit. Ověření jednotlivých faktorů není cílem návrhu metodiky, zde je pouze nutné uvést, zda byl daný princip testován a s jakými výsledky ve vztahu k dokončené ploše.

7.1.4.1 *Ověření strategie využívající konstantní řeznou rychlost*

Tomuto principu se věnují kapitoly 4 až 6, kde je popsán systém a algoritmus této strategie a následně provedeny experimenty pro ověření daného principu. Z dosažených výsledků vyplývá, že při použití konstantní řezné rychlosti dochází ke snížení časové náročnosti a následně také ke zlepšení dosahované kvality dokončované plochy. Pro parametry drsnosti byl tento jev zcela prokazatelný a nejen na maximální hodnotu drsnosti, ale zejména na rovnoměrnost rozložení sledovaných parametrů. V případě rozměrové přesnosti jsou výsledky nejednoznačné, ale rozhodně nebylo pozorováno zhoršení tohoto parametru.

Z těchto výsledků je možné prohlásit, že strategie využívající konstantní řeznou rychlost má ověřené pozitivní vlivy, a to jak na efektivitu, tak i na kvalitativní parametry a je tedy vhodná pro dokončovací operaci.

7.1.4.2 *Ověření vlivu rozpočtu drah nástroje*

V tomto případě se jedná o výsledky, které bylo možné očekávat. Nejlepších výsledků bylo ze všech sledovaných parametrů dosaženo při strategii C, tedy rozpočtu dle výšek zbytkového materiálu. Jedná se o komplexní porovnání, neboť jsou parametry, které při určité kombinaci faktorů dosahovaly lepších výsledků při použití zbylých strategií rozpočtu drah nástroje.

Také je třeba říci, že reálné algoritmy strategií v reálných CAM modulech jen zřídka využívají pouze jeden parametr pro rozpočet drah nástroje. Ve většině případů se jedná o hybridní rozpočet dle zadaných kritérií kombinující a upravující dráhy dle konkrétního algoritmu. Nicméně z provedených experimentů je patrné, že použitím strategie využívající výšku zbytkového materiálu je možné prokazatelně dosáhnout lepších výsledků. Z tohoto důvodu by měla nová strategie pro dokončování uplatňovat toto kritérium při generování drah nástroje.

7.1.4.3 *Ověření metody kontroly zatížení*

Vzhledem k tomu, že princip kontroly zatížení byl řešen v několika vědeckých pracích a s úspěchem je využíván pro hrubovací strategie, není jeho vliv ověřován v této práci a zmíněný princip je pouze zahrnut do návrhu nové dokončovací strategie.

7.1.5 Slabá místa základních principů

Je nasnadě, že zmíněné principy a metody s sebou nenesou pouze samé pozitivní dopady. Proto je před použitím jednotlivých metod nutné zvážit také slabá místa každého principu, popřípadě jejich vzájemné interakce.

7.1.5.1 *Slabá místa strategie využívající konstantní řeznou rychlost*

Základním a neodstranitelným slabým místem této metody je nulová řezná rychlost v ose nástroje, resp. nekonečně velké otáčky nutné pro dosažení nenulové řezné rychlosti. Samotná osa je sice pro reálnou výrobu problematické místo, ale pro strategii dokončování pomocí konstantní řezné rychlosti jsou problematická místa také v blízkosti osy nástroje. Pro tyto body již nejsou otáčky nekonečně velké, ale současný technický rozvoj v konstrukci obráběcích strojů má běžné používané limity značně nižší, než by byl požadovaný rozsah otáček. Je tedy nutné počítat, že reálné využití konstantních otáček bude možné realizovat pouze v rozsahu otáček stroje. Především pro malé efektivní průměry je tedy potřeba připravit algoritmus na nemožnost použití konstantní řezné rychlosti a definovat podmínky na základě jiných parametrů.

Druhým a neméně komplikovaným místem jsou doprovodné jevy při vysokých otáčkách vřetena. Při realizaci druhého experimentu bylo zaznamenáno zvýšení vibrací, a to na záznamech řezných sil. Při použití vysokých otáček bylo na záznamu naměřeno bez zátěže cca 50 [N], a to přibližně ve všech sledovaných složkách. Tento fakt by mohl zvyšovat riziko vibrací i při samotném dokončování. Jedním z podporujících argumentů pro to, že vysoké otáčky mohou způsobovat vibrace, jsou hodnoty při otáčkách okolo $n = 19\,500$ [ot/min], kdy byl zaznamenán nejen na náměrech výrazný nárůst vibrací, a to i bez zátěže do materiálu.

Zmíněná slabá místa jsou sice nepříjemná a bude nutné je dále zkoumat a dát si na jejich projev pozor, ale nejedná se o problematiku, která by zamezovala použití.

7.1.5.2 *Slabá místa volby strategie*

V případě volby dokončovací strategie jsou slabá místa dána samotným typem rozpočtu. Pro navrhovanou variantu C je možné označit jako slabé místo vyšší počet drah v porovnání se

strategií konstantního rozpočtu dle jedné osy. Pro případy ploch blízcích se svým charakterem vertikálním stěnám je možné tento způsob označit za vhodnější oproti rozpočtu na základě výšek zbytkového materiálu. Především z důvodu menší složitosti výpočtu je pro zmiňovanou plochu výhodnější, neboť rozpočet dle výšky zbytkového materiálu je zbytečně těžkopádný.

V případě volby strategie rozpočtu drah se ovšem nejedná o omezení spojená s funkcí, ale spíše o doporučení možnosti využití jiné strategie. Pro okrajové případy, ve kterých je možné navrhanou variantu C nahradit jednodušším způsobem rozpočtu při zachování obdobných výsledků dokončování a nižšího času dokončování. Příkladem nadbytečného použití strategie využívající rozpočtu drah na základě výšky zbytkového materiálu mohou být strmé stěny. V případě, že by zde nedocházelo k výrazné změně úhlu tečny v místě kontaktu nástroje CC vůči horizontální rovině pro po sobě jdoucí dráhy nástroje, je možné nahradit navrhanou strategii např. rozpočtem v jedné ose.

7.1.5.3 Slabá místa adaptivní úpravy drah

U adaptivního generování drah je jediným významným slabým místem zvýšení časové náročnosti. Díky přidávání drah je možné zvýšit celkový čas obrábění, a to pokud nejsou parametry kontroly zatížení nastaveny rozumně i několikanásobně. V případě rozumného nastavení kritérií kontroly je ovšem možné dosáhnout srovnatelných výsledků i při větším počtu drah. Zejména na tom má podíl možnost využívat vysoké posuvové rychlosti při nižších hodnotách objemu odebíraného materiálu.

Z tohoto důvodu je možné slabé místo adaptivní úpravy drah najít především v definici a nastavení kritérií kontroly zatížení a nikoliv v samotném principu.

7.1.6 Návrh algoritmu nové dokončovací strategie

Algoritmus dokončovací operace by měl obsahovat všechny zmíněné funkční vlastnosti. Jejich zpracování by mělo brát v úvahu slabá místa a také veškerá omezení definovaná uživatelem. Celý algoritmus se skládá z několika částí, které na sebe logicky navazují. V první části jsou uživatelem nastavena vstupní data, která systém musí zahrnout do výpočtu. Dále musí proběhnout návrh obráběcí strategie dle charakteru zvolených ploch. V dalším kroku musí opět uživatel vstoupit a zkontrolovat popřípadě upravit navrhanou strategii. Následuje samotný rozpočet drah včetně výpočtu řezných podmínek.

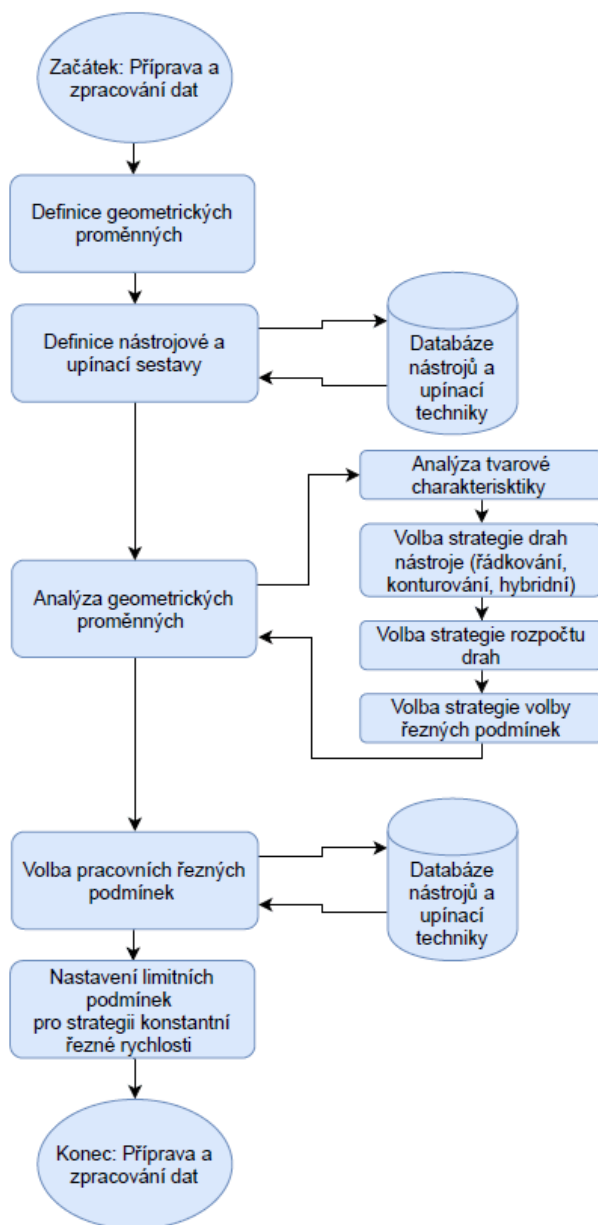
Diagram algoritmu přípravy a zpracování dat je zobrazen na obr. 7-2. Přípravu je nutné začít výběrem jednotlivých geometrických proměnných. Základem je samotná obráběná plocha. Pro spoustu případných druhů výpočtu jsou také důležité řídicí a limitní křivky popřípadě pomocné plochy sloužící pro rozpočet drah.

Následujícím nezbytným krokem je definice nástroje popřípadě nástrojové sestavy a upínacího přípravku. Tato data jsou nezbytná pro analyzování geometrických proměnných. Analýza geometrických proměnných je důležitým krokem, v tomto místě by mělo být provedeno hodnocení tvarové charakteristiky obráběné plochy. Dělení ploch je nutné provést hned v počátku tak, aby bylo možné přizpůsobit strategii v dalších krocích.

Dle charakteristiky plochy bude zvolen základní typ výpočtu drah. Pro ten je třeba následně zvolit metodu rozpočtu drah po dané ploše. Posledním krokem analýzy bude nastavení řezných podmínek tak, aby další části algoritmu generovaly dráhy s konstantní řeznou rychlostí. Všechny zmíněné kroky by měly být primárně voleny dle principiálních návrhů

z předchozích kapitol. V případě, že uživatel nebude s některými nastaveními souhlasit, je možné tyto parametry upravit.

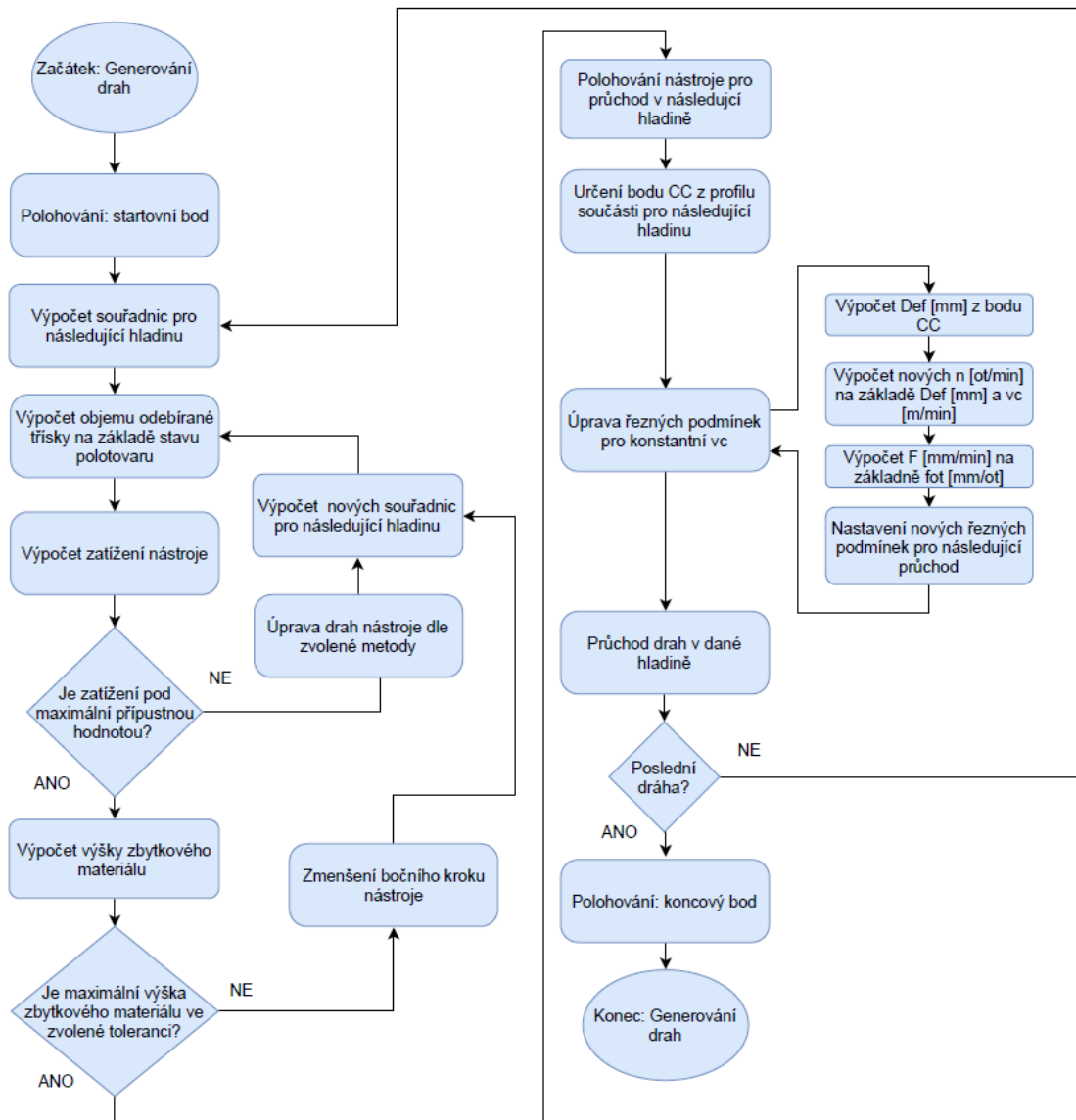
Po analýze obráběné geometrie je následujícím krokem volba pracovních podmínek. Je třeba definovat řeznou rychlost, otáčkový posuv, základní hodnotu bočního kroku popřípadě maximální povolenou výšku zbytkového materiálu, další potřebná data. Nezbytným krokem je také definice limitních podmínek, a to zejména bude-li používána strategie s konstantní řeznou rychlostí.



Obrázek 7-2 - Diagram přípravy a zpracování dat

Všechna zmíněná data jsou následně využita přímo pro algoritmus rozpočtu drah. Ten je z velké části shodný s návrhem z kapitoly 4.1. Celý algoritmus je poté zobrazen na obr. 7-3. Celý proces rozpočtu drah dle zvolených parametrů začíná kontrolou zatížení nástroje a kontrolou výšky zbytkového materiálu. V případě překročení parametrů dochází k úpravě drah

nástroje a následnému výpočtu nových souřadnic. Pokud jsou oba kontrolované parametry v pořádku, následuje polohování pro průchod hladinou.



Obrázek 7-3 - Diagram generování drah nové strategie dokončování

Z kontaktního bodu profilu obráběné plochy je třeba provést výpočet efektivního průměru. Pro zvolené podmínky poté otáčky a posuvovou rychlost dle definovaných řezných podmínek. Tyto podmínky jsou poté zařazeny k dráhám pro danou hladinu. Následuje průchod drah v dané hladině. Po něm je třeba rozhodnout, zda jde o poslední dráhu či nikoliv. V případě, že daná dráha nebyla poslední, je celý proces vrácen na polohování na další hladinu. Pokud ano, je nástroj polohován na koncový bod a celý proces polohování je ukončen.

Na zmíněných diagramech je návrh dokončovací strategie využívající principy definované v předchozích kapitolách.

7.1.7 Analýza využitelnosti navrhovaného algoritmu pro současné CAM moduly

Posledním bodem je analýza použitelnosti navrhovaného algoritmu v současných CAM modulech. Vzhledem k tomu, že návrh celé strategie vycházel z analýzy současného stavu,

měly by zde být pouze ověřeny jednotlivé funkční principy a jejich možné využití v CAM modulech.

7.1.7.1 Strategie využívající konstantní řeznou rychlost

Jedná se zřejmě o nejkomplicovanější část v zapracování celé strategie. Důvodů je hned několik. Prvním je, že se jedná o zcela novou strategii, jejíž veškeré vnitřní algoritmy ještě nejsou zpracovány. Bude nezbytné provést rozsáhlé testování funkčnosti před nasazením do reálných CAM modulů.

Dále pak samotný výpočet vychází z kontaktního bodu nástroj CC. Zde je nezbytné, aby tento bod byl k dispozici v CAM modulu pro všechny hladiny průchodu tak, aby dle zpracovaného algoritmu bylo možné upravovat řezné podmínky. Jedná se ovšem o parametr, se kterým současné CAM moduly již pracují, a nemělo by tedy být problematické jeho využití pro úpravu řezných podmínek.

Posledním krokem bude zpracování algoritmu pro analýzu geometrických proměnných. Tento krok by měl automaticky dle znalostní databáze vyhodnotit charakter dané plochy a navrhnout funkční strategii směru drah, jejich rozpočtu po ploše a také použitelnost strategie s konstantní řeznou rychlostí. Rozhodujícím kritériem by měla být strmota dané plochy respektive proměnnost sklonu a jeho rozsah. Dle těchto parametrů je možné následně zvolit kopírování nebo řádkování a k tomu příslušná další kritéria.

7.1.7.2 Volba strategie

Zpracování strategie využívající pro rozpočet výšku zbytkového materiálu by měl být do dané operace pouze minimální problém. Většina CAM modulů tuto možnost nabízí, a to jak samostatně, tak i v kombinaci s dalšími strategiemi. Z pohledu využitelnosti je tedy problematické pouze navržení rozhodovacího kritéria pro jaký charakter plochy by měla být tato strategie použita a do jaké míry jejím vlivem dráhy ovlivňovat.

7.1.7.3 Adaptivní úpravy drah

Opět se jedná o algoritmus, který již upravuje dráhy např. pro hrubovací strategie. Pro zpracování do dokončovacích strategií je nezbytné upravit rozhodovací kritérii tak, aby odpovídaly charakteru dokončování. Není tedy možné dodržovat konstantní zatížení. Důležitější je přetížení v místech nekvalitního před-dokončení dané plochy. V tomto místě musí algoritmu zareagovat dle zvolené metody zmíněné v kapitole 7.1.3.

Druhou problematikou vyplývající z námi zvolené metody řešení je uložení původních souřadnic dráhy nástroje a jeho zařazení pro odsazenou dráhu. Zde se opět jedná spíše o problematiku vytvoření algoritmu pro daný SW než samotné kontroly úpravy drah. Obdobně je tomu u kontroly drah nástroje na dodržení výšky zbytkového materiálu. Opět se jedná spíše o problematiku zapracování než samotného řešení, neboť všechna potřebná data mohou současné CAM moduly ze zadaných vstupů dopočítat.

7.2 Shrnutí

V předchozím textu je proveden návrh dokončovací operace resp. zpracována metodika návrhu tak, aby nově vzniklá strategie splňovala moderní požadavky a zároveň zvyšovala efektivitu dokončování tvarově složitých ploch. V rámci návrhu dokončovací strategie byly využity ověřené principy. Ověřeným a např. pro hrubovací strategie používaným principem je adaptivní řízení drah nástroje. To by mělo snížit kolísání řezných sil a zvýšit tak rovnoměrnost

kvality celé dokončené plochy. Dále by pak mělo dojít ke snížení opotřebení nástroje a zvýšení spolehlivosti celého dokončování.

Do návrhu nové strategie byl rovněž včleněn vliv rozpočtu drah nástroje. Jeho základní vlivy jsou známy, ale vzhledem k používání konstantní řezné rychlosti by mohlo být při vhodné kombinaci dosaženo výrazných úspor a zvýšení kvality dokončené plochy. Z výsledků na provedených experimentech vyplývá, že kombinace rozpočtu drah na základě výšky zbytkového materiálu a úpravy řezných podmínek se zachováním konstantní řezné rychlosti je možné takovýchto požadavků dosáhnout. Proto byla tato kombinace zahrnuta do návrhu nové strategie.

Všechny funkční principy a hypotézy pro zvýšení efektivity a bezpečnosti výroby byly popsány a ověřeny. Také byla zhodnocena slabá místa jednotlivých metod řešení a následně provedeno posouzení z pohledu použitelnosti metod pro reálné CAM systémy. Popsaná metodika nedefinuje přesně jednotlivá kritéria, neboť ty mohou být v různých typech SW rozdílná. Dle konkrétního modulu je možné je buď definovat, nebo dopočítat z jiných dat. Je zde však proveden návrh použitelný pro další výzkum a rozvoj v oblasti dokončovací strategii, což bylo cílem celé kapitoly. Na základě těchto údajů jsou sestaveny NC programy pro další testování navržené dokončovací strategie.

Závěr

Cílem této dizertační práce bylo zvýšit efektivitu obrábění tvarově složitých prostorových ploch. Z provedené rešerše vyplynulo, že v současné době je jedním z optimalizačních trendů procesu obrábění simulační metoda. Tento způsob je možné zahrnout do tzv. virtuálního obrábění, které je dnes při zapojení systému výroby do průmyslu 4.0 vyžadován u většiny průmyslových odvětví.

Dalším způsobem zvyšování efektivitu obrábění prostorových ploch je zvyšování užitečných vlastností strategií v CAM modulech. Zde se vývoj v poslední době věnoval zejména hrubovacím strategiím. Pro oblast dokončování ale strategie zvyšující efektivitu nejsou k dispozici. Jedním ze způsobů, jak zvýšit efektivitu celého dokončovacího procesu, je využití konstantní rezné rychlosti pro tyto strategie. Základní definicí této strategie a jejím ověřením se zabývá tato dizertační práce.

Při studiu této strategie bylo navrženo a ověřeno funkční schéma generování drah pro obecné tvarové plochy se zachováním konstantní rezné rychlosti. Vzhledem k tomu, že se jedná o zcela inovativní přístup, bylo potřeba experimentálně ověřit jednotlivé aspekty celé strategie. Pro základní ověření byly navrženy dva na sebe navazující experimenty, jejichž provedením a vyhodnocením byl pozitivní vliv této strategie prokázán.

Při experimentálním zkoumání byl v první fázi vyvrácen negativní dopad změn otáček na kvalitu dokončené plochy. Při vyhodnocení výsledků došlo k mírnému nárůstu všech sledovaných parametrů vlivem stoupajících otáček, ale žádné skokové změny naměřeny nebyly. Na základě těchto zjištění byl proveden komplexní experiment zabývající se již přímým vlivem strategie využívající konstantní reznou rychlost na kvalitu dokončené plochy.

Do druhého experimentu byly zahrnuty ještě další faktory jako rádius plochy a průměr nástroje, a to z důvodu následné tvorby metodiky návrhu dokončovací strategie, jako jednoho z cílů celé práce. Výsledky druhého experimentu jednoznačně prokázaly pozitivní vliv strategie využívající konstantní reznou rychlost na časovou náročnost a drsnost povrchu. Zejména při vhodné volbě rozpočtu drah je možné dosahovat jak nižších, tak také výrazně rovnoměrnějších drsností povrchu v porovnání se standardní strategií využívající konstantní otáčky.

Hlavním výstupem této práce je metodika návrhu dokončovací strategie. Díky pozitivním výsledkům experimentu využívá nově navržená strategie konstantní reznou rychlost a další metody optimalizace analyzované v teoretické části práce. Na základě toho by bylo možné generovat efektivní program s dostatečnou mírou bezpečnosti bez nutnosti další optimalizace. Konkrétní algoritmus strategie vzhledem k multioborové problematice nebyl cílem této práce. Navrhovaný algoritmus by bylo možné zpracovat dle navržených schémat do konkrétního SW. Navrhovaná metodika je využívána pro generování drah v navazujících experimentech.

Závěrem je možné konstatovat, že rešeršní práce dostupných zdrojů a experimentální studium naplnilo stanovené cíle a jejich výsledky jsou využitelné v dalším výzkumu této oblasti.

Další směr vývoje dokončovací strategie využívající konstantní reznou rychlost by se měl zaměřit na ověření celého principu při obrábění různých typů obráběných materiálů na komplikovanějších příkladech obecných tvarových ploch. A dále pak ověřit vzájemnou kombinaci jednotlivých principů z navržené metodiky. Dalším směrem by mohlo být také využití 3D korekcí, resp. rozdělení jejich platností pro různé oblasti obráběné plochy, oproti v současnosti využívané platnosti v rámci celé strategie.

Citovaná literatura

- [1] HAMOUZ, Libor. *Softwarová optimalizace obrábění složitých tvarových ploch při práci na čisto s ohledem na ochranu nástroje*. Plzeň, 2003. Dizertační práce. Západočeská univerzita v Plzni. Vedoucí práce Prof. Ing. František Sova, CSc.
- [2] FRANĚK, Tomáš. *Vliv průměru nástroje na kvalitu dokončení rádiusové plochy*. Plzeň, 2018. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni. Vedoucí práce Jan Hnátík.
- [3] JÁSEK, Ondřej. *Vliv změny řezné rychlosti na tvarovou přesnost dokončené plochy*. Plzeň, 2018. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni. Vedoucí práce Jan Hnátík.
- [4] ANDRLÍK, Jiří. *Návrh strategie dokončování tvarových ploch*. Plzeň, 2016. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni. Vedoucí práce Jiří Česánek.
- [5] DANNHOFEROVÁ, Jana. *Počítačová grafika - Modelování těles - prezentace k přednášce* [online]. [cit. 2018-07-03].
- [6] *Geometrické modelování* [online]. Katedry matematické informatiky - Univerzity Palackého v Olomouci [cit. 2018-07-03]. Dostupné z: https://cs.wikibooks.org/wiki/Geometrie/Geometrick%C3%A9_modelov%C3%A1n%C3%AD
- [7] *Reprezentace těles - hraniční reprezentace těles*. [online]. [cit. 2018-07-03]. Dostupné z: <http://statnice.e-misa.info/B1-06.pdf>
- [8] Konstruktivní a počítačová geometrie - Křivky. *Matematika online* [online]. Brno: Ústav matematiky FSI VUT Brno [cit. 2018-07-02]. Dostupné z: <http://mathonline.fme.vutbr.cz/Krivky/sc-1182-sr-1-a-165/default.aspx>
- [9] SURYNKOVÁ, Petra. *Rekonstrukce ploch: Polygonální a analytická reprezentace Vybrané metody aproximace ploch* [online]. In: . Matematicko-fyzikální fakulta Univerzita Karlova v Praze [cit. 2018-07-05]. Dostupné z: http://www.surynkova.info/dokumenty/ja/Prezentace/doktor_unor_2011.pdf
- [10] WU, Tong a Edmund H. M. CHEUNG. *Enhanced STL* [online]. [cit. 2018-06-28]. DOI: 10.1007/s00170-005-0001-5. ISBN 0268-3768. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s00170-005-0001-5>
- [11] CHANDRA, M. SATISH. TOOL PATH GENERATION FOR FREEFORM SURFACES [online]. ROORKEE - INDIA, 2008 [cit. 2018-07-05]. Dostupné z: http://shodhbhagirathi.iitr.ac.in:8081/jspui/bitstream/123456789/11423/1/MIEDG1383_2.pdf. Dizertační práce. INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY ROORKEE. Vedoucí práce Dr N. K. Mehta
- [12] ZOU, Qiang, Juyong ZHANG, Bailin DENG a Jibin ZHAO. *Iso-level tool path planning for free-form surfaces* [online]. [cit. 2018-07-03]. DOI: 10.1016/j.cad.2014.04.006. ISBN 0010-4485. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0010448514000700>.
- [13] BOLAÑOS, Gerardo Salas, Sanjeev BEDI a Stephen MANN. A topological-free method for three-axis tool path planning for generalized radiused end milled cutting of a triangular mesh surface. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. 2014, **70**(9-12), 1813-1825 [cit. 2018-06-28]. DOI: 10.1007/s00170-

013-5450-7. ISSN 0268-3768. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s00170-013-5450-7>

[14] JAIN, PRAKHAR. *Effect of Tool Radius and Iso-parametric Discretization of Triangulated NURBS Surfaces on Surface Finish in 3-axis Vertical Finish Machining Using Ball End Mill*. INDIA, 2016. Dizertační práce. THAPAR UNIVERSITY. Vedoucí práce Dr. Ravinder Kumar Duvedi.

[15] SADÍLEK, Marek. *CAM systémy v obrábění I*. Ostrava :VŠB – TU Ostrava, 2008. 153 s. ISBN 978-248-1821-4.

[16] SADÍLEK, Marek. *Postprocesor - slabé místo CAM systémů?* [online]. 2005 [cit. 2015-08-31]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/postprocesor-slabe-misto-cam-systemu.html>

[17] ALTINTAS, Y. a I. YELLOWLEY. In-Process Detection of Tool Failure in Milling Using Cutting Force Models. *Journal of Engineering for Industry* [online]. 1989, 111(2), 149- [cit. 2018-07-16]. DOI: 10.1115/1.3188744. ISSN 00220817. Dostupné z: <http://ManufacturingScience.asmedigitalcollection.asme.org/article.aspx?articleid=1447147>

[18]. MÖHRING, Hans-Christian, Petra WIEDERKEHR, Christoph LEREZ, Tobias SIEBRECHT a Holger SCHMITZ. *Case Study 1.1: Identification and Active Damping of Critical Workpiece Vibrations in Milling of Thin Walled Workpieces* [online]. 2018-08-30 [cit. 2018-07-16]. DOI: 10.1007/978-3-319-45291-3_1. ISBN 978-3-319-45290-6. Dostupné z: http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-45291-3_1

[19] ALTINTAS, Y., P. KERSTING, D. BIERMANN, E. BUDAK, B. DENKENA a I. LAZOGLU. Virtual process systems for part machining operations. *CIRP Annals* [online]. 2014, 63(2), 585-605 [cit. 2018-07-18]. DOI: 10.1016/j.cirp.2014.05.007. ISSN 00078506. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0007850614001899>

[20] MERDOL, S. Doruk a Yusuf ALTINTAS. Virtual cutting and optimization of three-axis milling processes. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* [online]. 2008, 48(10), 1063-1071 [cit. 2018-07-23]. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2008.03.004. ISSN 08906955. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0890695508000461>

[21] MEIJER, Alexander, Eugen KREBS, Petra WIEDERKEHR a Dirk BIERMANN. *Prediction of Feed-Rate Slowdowns in Precise Micromilling Processes* [online]. [cit. 2018-07-16]. DOI: 10.3390/jmmp2010019. ISBN 2504-4494. Dostupné z: <http://www.mdpi.com/2504-4494/2/1/19>

[22] QUINTANA, Guillem a Joaquim CIURANA. Chatter in machining processes: A review. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* [online]. 2011, 51(5), 363-376 [cit. 2018-07-19]. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2011.01.001. ISSN 08906955. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0890695511000022>

[23] MERDOL, S. Doruk a Yusuf ALTINTAS. *Virtual Simulation and Optimization of Milling Applications—Part II: Optimization and Feedrate Scheduling*. DOI: 10.1115/1.2927435. ISBN 1087-1357. Dostupné také z:

<http://ManufacturingScience.asmedigitalcollection.asme.org/article.aspx?articleid=1468147>

[24] LAZOGLU, I., C. MANAV a Y. MURTEZAOGLU. Tool path optimization for free form surface machining. *CIRP Annals* [online]. 2009, **58**(1), 101-104 [cit. 2018-07-23]. DOI: 10.1016/j.cirp.2009.03.054. ISSN 00078506. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0007850609000511>

[25] Za odbornými znalostmi evropsky a interaktivně: Frézování tvarových ploch. [online]. [cit. 2014-11-10]. Dostupné z: <http://zoei.sssebrno.cz/frezovani-tvarovych-ploch>

[26] *Přednášky k předmětu: Strojírenská technologie obrábění: Základy obrábění - tvoření třísky, charakteristiky, jevy*. Plzeň. Katedra technologie obrábění, Západočeská univerzita v Plzni.

[27] JOLIET, R., A. BYFUT, T. SURMANN a A. SCHRÖDER. Incremental Generation of Hierarchical Meshes for the Thermomechanical Simulation of NC-milling Processes. *Procedia CIRP* [online]. 2013, **12**, 25-30 [cit. 2018-07-24]. DOI: 10.1016/j.procir.2013.09.006. ISSN 22128271. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2212827113006471>

[28] JOLIET, R., A. BYFUT, P. KERSTING, A. SCHRÖDER a A. ZABEL. Validation of a Heat Input Model for the Prediction of Thermomechanical Deformations during NC Milling. *Procedia CIRP* [online]. 2013, **8**, 403-408 [cit. 2018-07-24]. DOI: 10.1016/j.procir.2013.06.124. ISSN 22128271. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2212827113004010>

[29] ŘEHOŘ, Jan. *STUDIUM HSC OBRÁBĚNÍ - EXPERIMENTÁLNÍ FRÉZOVÁNÍ ZÁPUSTKOVÉ OCELI EŠ 41 9556.4 – 56HRC*. Plzeň, 2004. Dizertační práce. Západočeská univerzita v Plzni.

[30] BYRNE, G., E. AHEARNE, M. COTTERELL, B. MULLANY, G.E. O'DONNELL a F. SAMMLER. High Performance Cutting (HPC) in the New Era of Digital Manufacturing – A Roadmap. *Procedia CIRP* [online]. 2016, **46**, 1-6 [cit. 2018-07-16]. DOI: 10.1016/j.procir.2016.05.038. ISSN 22128271. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2212827116304930>

[31] HENSE, Rouven, Christoph WELS, Petra KERSTING, Ulrich VIERZIGMANN, Maria LÖFFLER, Dirk BIERMANN a Marion MERKLEIN. High-feed milling of tailored surfaces for sheet-bulk metal forming tools. *Production Engineering* [online]. 2015, **9**(2), 215-223 [cit. 2018-07-16]. DOI: 10.1007/s11740-014-0597-0. ISSN 0944-6524. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s11740-014-0597-0>

[32] *Katalog - frézovací a vrtací nástroje* [online]. 2010 [cit. 2018-07-16]. Dostupné z: <http://www.tyroline.cz/data/upload/widia-frezovaci-vrtaci-nastroje.pdf>

[33] DE VOS, Patrick. Příručka pro technology: Dynamické frézování - využití kompenzačního přístupu. *MM spektrum* [online]. 2013/7, 25.6.2013 [cit. 2018-07-18]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/prirucka-pro-technology-dynamicke-frezovani-vyuziti-kompenzacniho-pristupu.html>

- [34] CZERECH, Łukasz. Selection of Optimal Machining Strategy in the Manufacture of Elements Bounded by Curvilinear Surfaces. *acta mechanica et automatica*, 2013, 7.1: 5-10. Dostupné z: <http://www.degruyter.com/view/j/ama.2013.7.issue-1/ama-2013-0001/ama-2013-0001.xml>
- [35] HNATIK, Jan, Lubos KROFT a Jan KUTLWASER. Constant Chip Volume Machining. *Proceedings of the 26th International DAAAM Symposium 2016* [online]. DAAAM International Vienna, 2016, 2016, , 0960-0966 [cit. 2018-08-07]. DAAAM Proceedings. DOI: 10.2507/26th.daaam.proceedings.135. ISBN 9783902734075. Dostupné z: http://www.daaam.info/Downloads/Pdfs/proceedings/proceedings_2015/135.pdf
- [36] GOMBÁR, Miroslav. *Plánovanie experimentov (DoE) ako nástroj efektívneho výskumu technologických procesov*. [Prezentace]
- [37] SKLENIČKA, Josef. *Príspevek k experimentálnému stanovení modelu silového zatížení*. Plzeň, 2017. Dizertační práce. Západočeská univerzita v Plzni.
- [38] POSPĚCH, Zdeněk. *Přednášky z předmětu dílenská metrologie - Drsnost povrchu*. Interní zdroj.
- [39] *Drsnost povrchu dle DIN EN ISO* [online]. Webové stránky JENOPTIK [cit. 2018-08-09]. Dostupné z: <https://www.hommel-etamic.cz/cz/technicke-informace/drsnost-povrchu-dle-din-en-iso/>
- [40] Ing. POTÁCEL, Václav. Technologické aspekty struktury povrchu při dokončovacím obrábění. [Online] 22. Duben 2004. [Citace: 12. Listopad 2017.] <http://www.vutium.vutbr.cz/tituly/pdf/ukazka/80-214-2691-8.pdf>
- [41] *KONSTRUKTIVNÍ A POČÍTAČOVÁ GEOMETRIE - Kapitola 7 - Křivky a plochy technické praxe* [online]. Brno: Ústav matematiky FSI VUT Brno [cit. 2018-07-02]. Dostupné z: <http://mathonline.fme.vutbr.cz/pg/flash/TeorieGrafika/pocGrafika7.pdf>
- [42] CAMPBELL, Richard J. a Patrick J. FLYNN. *A Survey Of Free-Form Object Representation and Recognition Techniques* [online]. [cit. 2018-07-03]. DOI: 10.1006/cviu.2000.0889. ISBN 1077-3142. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1077314200908890>
- [43] WEINERT, Klaus, Shangjian DU, Patrick DAMM a Marc STAUTNER. Swept volume generation for the simulation of machining processes. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* [online]. 2004, 44(6), 617-628 [cit. 2018-07-24]. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2003.12.003. ISSN 08906955. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0890695503003158>
- [44] WIEDERKEHR, P. a T. SIEBRECHT. *Virtual Machining: Capabilities and Challenges of Process Simulations in the Aerospace Industry* [online]. [cit. 2018-07-18]. DOI: 10.1016/j.promfg.2016.11.011. ISBN 2351-9789. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2351978916301470>
- [45] ODENDAHL, Sven, Achim PEUKER a Andreas ZABEL. *Improving the Simulation Accuracy in NC Milling by Using a Global CSG Workpiece Model* [online]. [cit. 2018-07-18]. DOI: 10.1016/j.procir.2012.05.018. ISBN 2212-8271. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2212827112001199>

- [46] WIEDERKEHR, P., T. SIEBRECHT, J. BAUMANN a D. BIERMANN. *Point-based tool representations for modeling complex tool shapes and runout for the simulation of process forces and chatter vibrations* [online]. [cit. 2018-07-18]. DOI: 10.1007/s40436-018-0219-8. ISBN 2095-3127. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s40436-018-0219-8>
- [47] SURMANN, Tobias, Eduard UNGEMACH, Andreas ZABEL, Raffael JOLIET a Andreas SCHRÖDER. Simulation of the Temperature Distribution in NC-Milled Workpieces. *Advanced Materials Research* [online]. 2011, **223**, 222-230 [cit. 2018-07-24]. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.223.222. ISSN 1662-8985. Dostupné z: <https://www.scientific.net/AMR.223.222>
- [48] UNGEMACH, Eduard, Tobias SURMANN a Andreas ZABEL. Dynamics and Temperature Simulation in Multi-Axis Milling. *Advanced Materials Research* [online]. 2008, **43**, 89-96 [cit. 2018-07-24]. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.43.89. ISSN 1662-8985. Dostupné z: <https://www.scientific.net/AMR.43.89>.
- [49] JEŽEK, F., TOMICZKOVÁ, S., *Geometrie pro FST 2 – Pomocný učební text*. Plzeň: 2010
- [50] VORÁČKOVÁ, Š., ŠÍR, Z., *Plochy počítačové grafiky II* [online]. [cit. 2018-06-28]. Dostupné z: https://www.fd.cvut.cz/personal/voracsar/GM/PGR021/Plochy_Nurbs.pdf
- [51] I WANG, Gaige, Lihong GUO, Hong DUAN, Heqi WANG, Luo LIU a Mingzhen SHAO. *A Hybrid Metaheuristic DE/CS Algorithm for UCAV Three-Dimension Path Planning* [online]. [cit. 2018-07-02]. DOI: 10.1100/2012/583973. ISBN 1537-744X. Dostupné z: <http://www.hindawi.com/journals/tswj/2012/583973/>

Seznam vlastních publikací

A) Příspěvky na mezinárodní konferenci

- [1] ŘEHOŘ, J., KOUŘIL, K., **KROFT, L.**, SKLENIČKA, J. Trendy v konstrukci výstružníků. *Strojírenská technologie*, 2014, roč. 19, č. 3,4, s. 227-232. ISSN: 1211-4162
- [2] ŘEHOŘ, J., KOUŘIL, K., SKLENIČKA, J., **KROFT, L.** Trendy v konstrukci výstružníků. In *5. Mezinárodní konference ICTKI 2014: Sborník příspěvků*. Ústí nad Labem: Univerzita J. E. Purkyně v Ústí n. Labem (UJEP), 2014. s. 306-311. ISBN: 978-80-7414-679-4
- [3] ŘEHOŘ, J., KOUŘIL, K., **KROFT, L.**, SKLENIČKA, J. Trendy v konstrukci výstružníků. In *Rizika podnikových procesů 2014*. Ústí nad Labem: Univerzita J. E. Purkyně, 2014. s. 1-6. ISBN: 978-80-7414-766-1
- [4] HNÁTÍK, J., **KROFT, L.**, KUTLWAŠER, J. Constant chip volume machining. In *Proceedings of the 26th DAAAM International Symposium*. Vienna: DAAAM International, 2016. s. 960-966. ISBN: 978-3-902734-07-5 , ISSN: 1726-9679
- [5] **KROFT, L.** The influence of the finishing strategy on the quality of the surface. In *Annals of DAAAM and Proceedings of the International DAAAM Symposium*. Vienna: Danube Adria Association for Automation and Manufacturing, DAAAM, 2016. s. 524-533. ISBN: 978-3-902734-08-2 , ISSN: 1726-9679.
- [6] HNÁTÍK, J., SKLENIČKA, J., **KROFT, L.** *Power calculation for iMachining*. SolidCAM, 2016.
- [7] **KROFT, L.**, HNÁTÍK, J., BÍCOVÁ, K. The effect of the strategy of finishing on dimensional accuracy. In *Proceedings of the 28th DAAAM International Symposium*. Vienna: DAAAM International Vienna, 2017. s. 575-581. ISBN: 978-3-902734-11-2 , ISSN: 1726-9679.
- [8] HNÁTÍK, J., **KROFT, L.**, BÍCOVÁ, K. The influence of finishing strategy on the quality of surface. In *Material Science Forum*. Trans Tech Publications Ltd, 2017. s. 18-24. ISBN: 978-3-0357-1565-0 , ISSN: 0255-5476
- [9] HNÁTÍK, J., **KROFT, L.** Specific design of critical drivetrain component. In *Proceedings of the 28th DAAAM International Symposium*. Vienna: DAAAM International, 2017. s. 567-574. ISBN: 978-3-902734-11-2 , ISSN: 1726-9679.
- [10] VYŠATA, J., **KROFT, L.** Využití i-machiningu při ortogonálním rotačním frézování drážek konstantního profilu. In *MANUFACTURING TECHNOLOGY - PILSEN 2017: Conference proceeding*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2017. s. 1-9. ISBN: 978-80-261-0636-4
- [11] HAMBERGER, A., DAŇA, M., **KROFT, L.** Technologie výroby a návrh vložky válce maloobjemového motocyklu. *Strojírenská technologie*, 2017, roč. 22, č. 2, s. 76-80. ISSN: 1211-4162.
- [12] ČESÁNEK, J., MILSIMEROVÁ, A., **KROFT, L.**, VYŠATA, J. *Problematika technologie programování NC strojů*. Plzeň, 2017

B) Ověřené technologie a funkční vzorky

- [1] MATĚJKA, J., HNÁTÍK, J., SKLENIČKA, J., **KROFT, L.** *Optimalizace geometrie stříhacího kotoučového nože*. 2015.

- [2] SKLENIČKA, J., HNÁTÍK, J., MATĚJKA, J., **KROFT, L.** *Sada měděných tvarových příložek.* 2015.
- [3] MILSIMEROVÁ, A., BÍCOVÁ, K., FULEMOVÁ, J., **KROFT, L.** *Optimalizace tvaru dutiny lisovacího přípravku.* 2015.
- [4] **KROFT, L.**, MILSIMEROVÁ, A., FULEMOVÁ, J., BÍCOVÁ, K. *Geometrická úprava lisovacího trnu.* 2015.
- [5] FULEMOVÁ, J., BÍCOVÁ, K., MILSIMEROVÁ, A., **KROFT, L.** *Regenerace vyhlazovacího členu pro výfukové potrubí.* 2016.
- [6] MATĚJKA, J., HNÁTÍK, J., SKLENIČKA, J., **KROFT, L.** *Regenerace použitých prvků pro tváření trubek.* 2015.
- [7] MATĚJKA, J., HNÁTÍK, J., SKLENIČKA, J., BÍCOVÁ, K., MILSIMEROVÁ, A., **KROFT, L.**, FULEMOVÁ, J. *Přípravek pro dovařování stínícího deflektorového plechu - geometrická úprava.* 2015.
- [8] SKLENIČKA, J., HNÁTÍK, J., MILSIMEROVÁ, A., **KROFT, L.** *Inovativní technologie frézování tvarové desky využitím progresivních strategií.* 2015.
- [9] HNÁTÍK, J., **KROFT, L.**, MATĚJKA, J. *Sada upínacích čelistí pro upínání trubek.* 2016.
- [10] MATĚJKA, J., **KROFT, L.**, KUTLWAŠER, J. *Technologie obrobení speciálního stříhacího přípravku.* 2016.
- [11] SKLENIČKA, J., HNÁTÍK, J., MILSIMEROVÁ, A., **KROFT, L.** *Technologie výroby tvarového trnu z otěruvzdorného materiálu.* 2017.
- [12] SKLENIČKA, J., MATĚJKA, J., HNÁTÍK, J., **KROFT, L.** *Sada tvarových měděných elektrod.* 2017.
- [13] SKLENIČKA, J., MATĚJKA, J., HNÁTÍK, J., **KROFT, L.** *Sada tvarových měděných elektrod II.* 2017.
- [14] MATĚJKA, J., **KROFT, L.**, MILSIMEROVÁ, A., BÍCOVÁ, K. *Optimalizace tvaru trnu lisovacího přípravku.* 2015.
- [15] SKLENIČKA, J., MATĚJKA, J., FULEMOVÁ, J., **KROFT, L.** *Upínací kámen pro zajištění řemenu.* 2016.
- [16] **KROFT, L.**, MATĚJKA, J. *Pastorek závodního řízení automobilu.* 2016.
- [17] HNÁTÍK, J., **KROFT, L.**, MATĚJKA, J. *Přípravek pro svařování radiátorových plechů.* 2016.
- [18] SKLENIČKA, J., MATĚJKA, J., **KROFT, L.**, DUCHEK, V. *Úprava lisovací vložky z nástrojové oceli.* 2017.
- [19] MATĚJKA, J., HNÁTÍK, J., SKLENIČKA, J., **KROFT, L.** *Funkční vzorek hliníkového založení vložky katalyzátoru.* 2015.
- [20] FULEMOVÁ, J., BÍCOVÁ, K., **KROFT, L.**, MILSIMEROVÁ, A. *Přípravek pro dovaření držáku čidla.* 2015.
- [21] **KROFT, L.**, MATĚJKA, J., SKLENIČKA, J., HNÁTÍK, J. *Speciální lisovací vložka.* 2015.
- [27] MATĚJKA, J., HNÁTÍK, J., **KROFT, L.** *Přípravek pro prostřihování radiátorových plechů.* 2016.
- [22] MATĚJKA, J., HNÁTÍK, J., **KROFT, L.** *Základna tvarového trnu.* 2016.
- [23] SKLENIČKA, J., **KROFT, L.**, MATĚJKA, J. *Trn pro konečné natvarování výstupu výfukového potrubí.* 2016.

- [24] **KROFT, L.**, MATĚJKA, J., MILSIMEROVÁ, A. *Technologie obrobení základny měřicího přípravku z cementační oceli.* 2016.
- [25] MATĚJKA, J., **KROFT, L.**, HNÁTÍK, J. *Technologie výroby přesných vložek z nástrojové oceli.* 2016.
- [26] SKLENIČKA, J., MILSIMEROVÁ, A., **KROFT, L.**, FULEMOVÁ, J. *Optimalizace stříhacího nástroje I.* 2015.
- [27] MILSIMEROVÁ, A., **KROFT, L.**, BÍCOVÁ, K., SKLENIČKA, J. *Dělený lisovací přípravek.* 2015.
- [28] SKLENIČKA, J., MATĚJKA, J., HNÁTÍK, J., MILSIMEROVÁ, A., **KROFT, L.** *Sada speciální upínek pro svařovací přípravek DACIA II.* 2016.
- [29] MATĚJKA, J., HNÁTÍK, J., SKLENIČKA, J., FULEMOVÁ, J., **KROFT, L.**, MILSIMEROVÁ, A., BÍCOVÁ, K., DUCHEK, V. *xxxxx Optimalizace drsnosti vodící plochy naváděcího pravítka.* 2016.
- [30] SKLENIČKA, J., MATĚJKA, J., HNÁTÍK, J., MILSIMEROVÁ, A., **KROFT, L.** *Přípravek pro dovařování držáku výfukové soustavy.* 2016.
- [31] **KROFT, L.**, FULEMOVÁ, J., MILSIMEROVÁ, A. *Speciální lisovací nástroj průvlakového typu.* 2016.
- [32] SKLENIČKA, J., MATĚJKA, J., HNÁTÍK, J., **KROFT, L.** *Sada měděných vložek svařovacího přípravku.* 2017.
- [33] SKLENIČKA, J., MILSIMEROVÁ, A., **KROFT, L.**, FULEMOVÁ, J. *Optimalizace stříhacího nástroje II.* 2015.
- [34] SKLENIČKA, J., MATĚJKA, J., HNÁTÍK, J., **KROFT, L.** *Speciální tvarový trn – optimalizace tvarově složitě plochy.* 2015.
- [35] HNÁTÍK, J., **KROFT, L.**, SKLENIČKA, J., MATĚJKA, J. *Technologie frézování tvarového prototypového dílce.* 2015.
- [36] FULEMOVÁ, J., BÍCOVÁ, K., MILSIMEROVÁ, A., **KROFT, L.** *Odlehčení dovařovacího přípravku.* 2016.
- [37] FULEMOVÁ, J., BÍCOVÁ, K., MILSIMEROVÁ, A., **KROFT, L.** *Speciální ohýbací čelisti pro ohýbačku SILFAX.* 2016.
- [38] SKLENIČKA, J., HNÁTÍK, J., **KROFT, L.**, BÍCOVÁ, K. *Obrobení dovařovaného dílu z elektrodové mědi.* 2017.
- [39] SKLENIČKA, J., HNÁTÍK, J., **KROFT, L.**, FULEMOVÁ, J. *Přípravek pro dovaření škrtecí klapky.* 2015.
- [40] SKLENIČKA, J., HNÁTÍK, J., MILSIMEROVÁ, A., **KROFT, L.** *Upínací svařovací přípravek z elektrodové mědi CuCrZr.* 2016.
- [41] HNÁTÍK, J., MILSIMEROVÁ, A., **KROFT, L.** *Technologie obrobení tvarového dílce ze slitiny elektrodové mědi.* 2016.
- [42] **KROFT, L.**, HNÁTÍK, J., MATĚJKA, J. *Technologie výroby pastorků pro závodní automobil.* 2016.
- [43] FARSKÝ, J., HRONEK, O., **KROFT, L.**, BAKŠA, T., ZETEK, M. *Měřicí přípravek pro VBD.* 2017.
- [44] SKLENIČKA, J., MATĚJKA, J., HNÁTÍK, J., **KROFT, L.** *Technologie obrobení dílu formy.* 2017.

Přílohy dizertační práce

Obsah příloh dizertační práce

PŘÍLOHA č. 1.....	iv
Výčet analytických křivek	iv
PŘÍLOHA č. 2	ix
PŘÍLOHA č. 3	xiii
DMU EVO 40 linear – podrobný popis	xiii
Geometrie použitých nástrojů – podrobný popis	xiii
Dynamometr KISTLER 9255A – podrobný popis	xiii
Kulvé frézy ISCAR včetně VBD - podrobný popis –.....	xiii
PŘÍLOHA č. 4	xviii
Plán experimentu „Ověření vlivu změny kvality dokončené plochy na změnách řezné rychlosti“	xviii
PŘÍLOHA č. 5	xxi
Specifikace obráběného materiálu C45	xxi
PŘÍLOHA č. 6	xxiii
Profilo/drsnoměru HOMMEL ETAMIC T8000 – podrobný popis	xxiii
3D souřadnicový měřicí stroj Carl Zeiss Prismo 7 Navigator – podrobný popis	xxiii
Podrobný popis - profilo/drsnoměru HOMMEL ETAMIC T8000	xxiv
Podrobný popis - 3D souřadnicový měřicí stroj Carl Zeiss Prismo 7 Navigator	xxiv
PŘÍLOHA č. 7	xxv
Tabulky a grafy vyhodnocení řezných sil pro experiment „Ověření vlivu změny kvality dokončené plochy na změnách řezné rychlosti“	xxv
PŘÍLOHA č. 8	xxviii
Tabulky a grafy vyhodnocení drsnosti povrchu pro experiment „Ověření vlivu změny kvality dokončené plochy na změnách řezné rychlosti“	xxviii
PŘÍLOHA č. 9	xxxi
Tabulka vyhodnocení rozměrové přesnosti pro experiment „Ověření vlivu změny kvality dokončené plochy na změnách řezné rychlosti“	xxxi
PŘÍLOHA č. 10	xxxiii
Plán experimentu „Zkoumání kvality a rozměrové přesnosti při dokončování rádiusové plochy za použití konstantní řezné rychlosti“	xxxiii
PŘÍLOHA č. 11	xxxviii
Grafy vyhodnocení řezných sil pro experiment „Zkoumání kvality a rozměrové přesnosti při dokončování rádiusové plochy za použití konstantní řezné rychlosti“	xxxviii
PŘÍLOHA č. 12	xlvi

Tabulka a grafy vyhodnocení drsnosti Ra a Rz pro experiment „Zkoumání kvality a rozměrové přesnosti při dokončování rádiusové plochy za použití konstantní řezné rychlosti“xlv

PŘÍLOHA č. 13lvii

Tabulky a grafy vyhodnocení odstuhu bodu od modelu pro experiment „Zkoumání kvality a rozměrové přesnosti při dokončování rádiusové plochy za použití konstantní řezné rychlosti“lvii

PŘÍLOHA č. 1

Výčet analytických křivek

Všechny tyto analytické křivky vycházejí z obdobných principů. Jedná se vždy o bod označovaný jako řídicí. Soustava těchto bodů je základem pro jednotlivé křivky. Ty však skrze body většinou neprocházejí a jedná se tedy vždy o určitý typ aproximační křivky. Typ aproximace je různý vždy podle typu křivky. Obecně však můžeme nazvat tyto funkce jako bázové, pod kterými se mohou skrývat obecně matematické polynomy nebo funkce dle typu křivky. Výsledný tvar křivky nám pak dává lineární kombinace řídicího bodu a bázové funkce. [8,10]

Ne všechny křivky jsou vhodné pro tvoření plochy pomocí hraniční reprezentace. Proto následující výčet postihuje pouze křivky a z nich plochy využívané v technické praxi.

- **Fergusonovy křivky**

Základní typ křivek, který se využívá od 60 let minulého století. Základem tohoto typu křivky je oblouk tvořený čtyřmi body P_0 až P_3 . Kde body P_0 a P_3 jsou hraničními body křivky a z nich vycházejí vektory $\xrightarrow{P_0P_1}$ a $\xrightarrow{P_3P_2}$, které ovlivňují tvar křivky. Jako příklad, je možné uvést následující popis Fergusonovy křivky. Tato křivka je popsána jako soustava parametrických rovnic (1). [41,49]:

$$\begin{aligned} F_0(t) &= t^3 - t^2 - t + 1 \\ F_1(t) &= -3t^3 + 4t^2 \\ F_2(t) &= t^3 - t^2 \\ F_3(t) &= t^3 - 2t^2 + t \end{aligned} \tag{1}$$

Hodnota parametru t je od 0 do 1 a pro každý krok je určen jeden bod. Po výpočtu jednotlivých rovnic polynomu se pak dosadí do rovnice (2) pro získání výsledného bodu na křivce v osách X, Y a Z. [41]

$$Q(t) = \sum_{i=0}^3 P_i F_i(t); t \in \langle 0, 1 \rangle \tag{2}$$

Pokud bychom chtěli pomocí Fergusonova popisu, vytvořit plochu bylo by třeba definovat druhou soustavu rovnic obdobnou jako (1) a výslednou rovnici by bylo třeba rozšířit o další rozměr viz rovnice(3). [41,49]

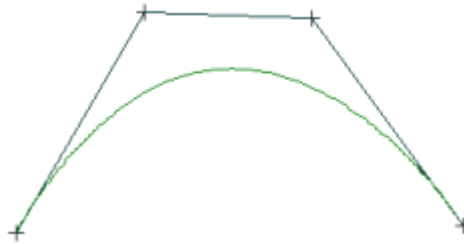
$$Q(t, s) = \sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^3 P_{ij} F_i(t) F_j(s); t, s \in \langle 0, 1 \rangle \times \langle 0, 1 \rangle \tag{3}$$

- **Bézierovy křivky**

Jedná se o velmi často využívanou křivku. Její popis je velmi podobný Fergusonově křivce. Opět zde křivku tvoří čtveřice bodů P_0 až P_3 , kdy skrz body P_0 a P_3 křivka prochází a zbylé dva nám dávají směrnice vektory, které jsou v počátečním a koncovém bodě ke křivce tečné. Pro Bézierovu křivku se využívá zobecnění pomocí binomického rozvoje. Díky kterému nám z předchozího případu vznikne Bézierova křivka o $n+1$ řídicích bodech. Budeme-li vycházet ze vzorců (1), bude zápis Bézierovy křivky vypadat následovně [41]:

$$Q(t) = \sum_{i=0}^n P_i F_i^n(t); t \in \langle 0, 1 \rangle \tag{4}$$

Obdobným způsobem jako u Fergusonovy křivky se poté postupuje také při vytváření ploch. Výslednou křivku je možné vidět na obrázku Příloha 1-1 . [41]



Příloha 1- 1- Bézierova křivka [41]

- **Coonovy křivky**

Křivky opět založené na popisu pomocí bázových polynomů. Velice podobné Fergusonovým křivkám avšak rozdíl u Coonových křivek je že začátek ani konec není v těchto bodech. Popis křivky je opět řešeno pomocí bodů P_0 až P_3 , počáteční a koncové body jsou umístěny v antitěžističích trojúhelníků $P_0P_1P_2$ $P_1P_2P_3$. [41]

Hladké napojení jednotlivých křivek je možné pokud mají na sebe navazující části shodné první tři body s předchozími třemi posledními. Tímto způsobem je možné popsat po částech polynomickou křivku, která se nazývá Coonsův kubický B – spline [41].

Přidáním dalšího rozměru je možné z křivek vytvořit plochu a to obdobně jako pro Fergusonovy křivky. [41]

- **B – spline křivky**

Dosavadní křivky respektive jejich tvar závisel na tvaru bázových funkcí, tedy typu polynomu popisující jednotlivé body s tím že parametr t byl intervalem od 1 do 0. Pro popis křivky pomocí B – splinu je potřeba definovat tzv. uzlový vektor. Jedná se o posloupnost reálných čísel, na základě kterých jsou vypočítávány jednotlivé hodnoty B - spline funkcí. [41]

Uzlový vektor sebou nese další omezení pro definování křivek. Hodnoty vektoru bývají většinou v intervalu od 0 do 1, dále pak počet opakujících se uzlů je dán stupněm křivky. V neposlední řadě nesmí být uzlový vektor klesající. [41,42,51]

Definice funkce pro B-spline je možné provést následovně:

$$N_i^0(t) = \begin{cases} 1 & \text{pro } t \in (t_i, t_{i+1}) \\ 0 & \text{jinak} \end{cases} \quad (5)$$

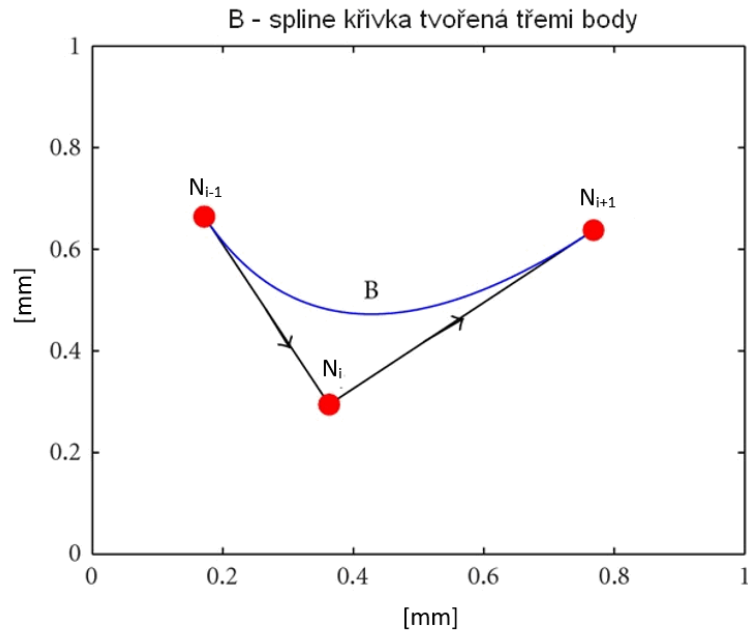
$$N_i^k(t) = \frac{t - t_i}{t_{i+k} + t_i} N_i^{k-1}(t) + \frac{t_{i+k+1} - t}{t_{i+k+1} + t_{i+1}} N_{i+1}^{k-1}(t) \quad (6)$$

$$\text{kde: } 0 \leq i \leq n - k - 1; 1 \leq k \leq n - 1; \frac{0}{0} := 0 \quad (7)$$

Bude-li uzlový vektor definován jako:

$$t = (t_0, t_1, \dots, t_n) \quad (8)$$

Výsledná křivka je opět dána kombinací bodů a hodnot příslušné funkce. Ovšem pro výpočet je nutné použít algoritmus (nejčastěji deBoorův, založena na vlastnostech B – spline) neboť výpočty jsou zde značně složitější, ukázka viz Příloha 1-2. [41,50]



Příloha 1- 2- Příklad tvorby křivky pomocí B – spline [11]

Tvorba plochy je zde opět řešena přidáním dalšího směru. Díky tomu je nutné použít dva uzlové vektory, které vytvoří síť bodů s řádky a sloupci. [41]

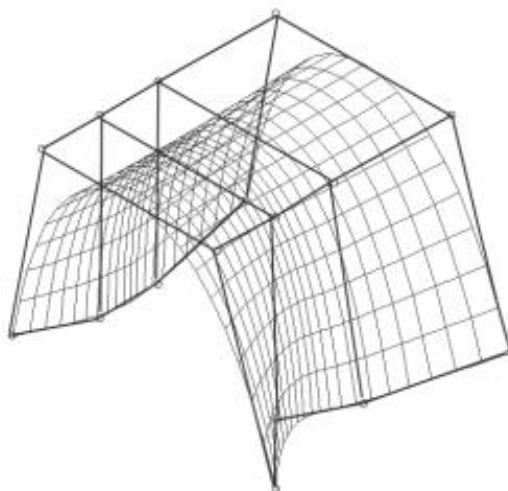
- **NURBS křivky**

Zkratka NURBS je v literatuře vysvětlována různě správný překlad je však neuniformní racionální B-spline. Jde tedy o aproximační křivku vycházející z bodů proložené B – spline funkcí viz definice B – spline křivek. Rozdílný přístup k tvorbě a následné reprezentaci nám dávají pojmy neuniformní a racionální. [41,12]

První rozdíl od klasické B – spline křivky dává pojem neuniformní. Pro NURBS popis to znamená, že průběh po křivce nemusí být plynulý. Tato funkční vlastnost je dána, tím že sousední hodnoty uzlového vektoru respektive jejich rozdíl nemusí být konstantní. [41,12]

Druhou odlišností je vlastnost racionality funkcí, ten vznikl přidáním vah k jednotlivým bodům. Hodnota váhy (obvykle kladné číslo) nám pro každý bod udává hodnotu přitažení bodu k aproximační křivce. Tedy má-li např. bod N_n váhu 10 krát menší než bod N_{n+1} znamená to, že křivka bude s bodem N_{n+1} mnohem více semknuta než s bodem N_n u kterého může díky aproximačním funkcím dojít k výraznějšímu odchýlení. [41,12]

Z pohledu geometrické reprezentace je potřeba bodům přiřadit další dimenzi. Díky těmto funkčním vlastnostem, které dávají větší možnosti při úpravě, jsou NURBS křivky velice často využívány v technické praxi díky vhodným modelačním schopnostem. Výsledná plocha je posléze tvořena řídicí sítí, ke které se jednotlivé body dle váhy více či méně blíží. Ukázka je zobrazena na obrázku Příloha 1-3 [41,12,42]

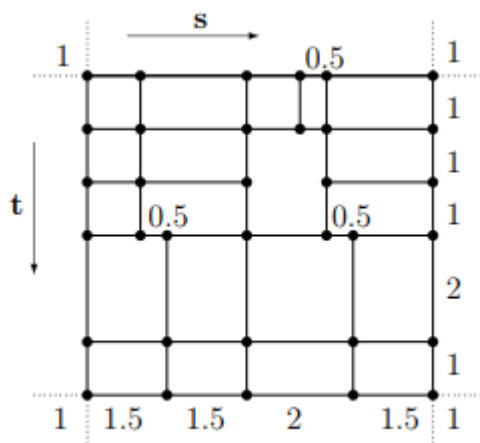


Příloha 1- 3 - NURBS plocha a její řídicí síť [41]

Jako u B – splinu je tvorba ploch pomocí NURBS křivek řešena přidáním dalšího rozměru. Obecný popis je zde však díky rozrůstajícímu se počtu parametrů již značně komplikovaný. [41]

- **T – spline křivky**

Poslední modifikací jsou tzv. T – spline plochy. Jedná se o obdobu NURBS plocha a křivek které ovšem nepotřebují pravidelnou síť, viz Příloha 1- 4 a propojení jednotlivých bodů je dáno pouze popisem uzlových vektorů.



Příloha 1- 4- Ukázka obecné sítě pro T - splajny [41]

T – splajny mají větší uplatnění v grafice především díky velice výhodným možnostem modifikace, například přidáváním bodů bez nutnosti měnit původní tvar a přidávat celý sloupec do základní sítě.

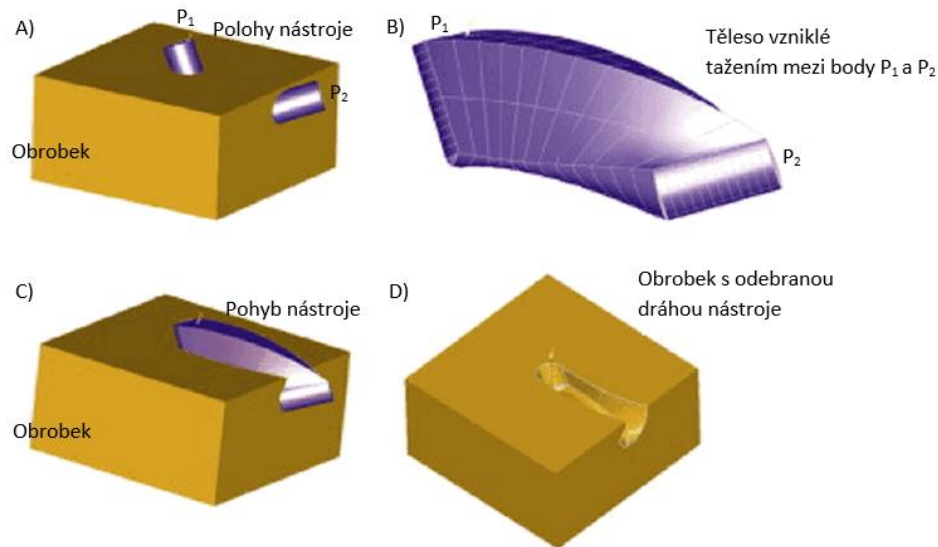
PŘÍLOHA č. 2

Zobrazovací techniky simulačních metod

V textu práce jsou obecně uvedeny optimalizační postupy na základě simulování procesu obrábění ve virtuálním prostředí. Konkrétní simulační techniky jsou uvedeny v následujícím textu a rozděleny dle modelovacích metod, včetně příkladů využití v nalezených zdrojích:

- **CSG metody**

Vzhledem k možnostem modelování se jedná o výpočtově jednodušší metodu než například B-rep., proto je pro simulační procesy vhodnější a také využívanější. Díky tomu že její podstatou je kombinace základních těles a booleovské operace mezi nimi je možné ji využívat pro simulace i komplikovaných pohybů viz obrázky Příloha 2-1. Simulačním výstupem může být přesnost dokončeného tvaru, ale také predikce řezných sil a další jevy. [4,43]



Příloha 2- 1 - Simulace obrábění CSG metodou: A) výchozí a koncové umístění nástroje v obrobku, B) těleso vzniklé tažením tvaru nástroje mezi body P₁ a P₂, C) těleso pohybu nástroje umístěné do obrobku, D) obrobek vzniklý odebrání pohybu nástroje [43]

Základní princip konstrukce CSG modelů je popsán v kapitole 2.1.2. Využitím a principem této modelační techniky se zabývá značná řada zdrojů. Základní informace o této metodě jsou např. uvedeny v článku ze zdroje [44], kde jsou vysvětleny základní principy simulace na základě CSG a dále byl proveden experiment pro ověření základní myšlenky a to na leteckém dílu. Sledovaným vlivem jsou nepřesnosti výroby vzniklé dynamickým chováním procesu obrábění. Důležitá není ovšem pouze metoda, ale také přesnost samotné CSG simulace. Např. přesnost predikce řezných sil je řešena v práci kolektivu autorů ODENDAHL, PEUKER a ZABEL ze zdroje [45]. Možnosti využití CSG modelování ovšem nejsou vhodné pro všechny optimalizační problematiky. Zdroj s názvem „Point-based tool representations for modeling complex tool shapes and runout for the simulation of process forces and chatter vibrations“ [46] uvádí určité omezení pro CSG reprezentaci např. složitých tvarových nástrojů. V této práci je uveden příklad nahrazení CSG modelování reprezentací těles množinou bodů.

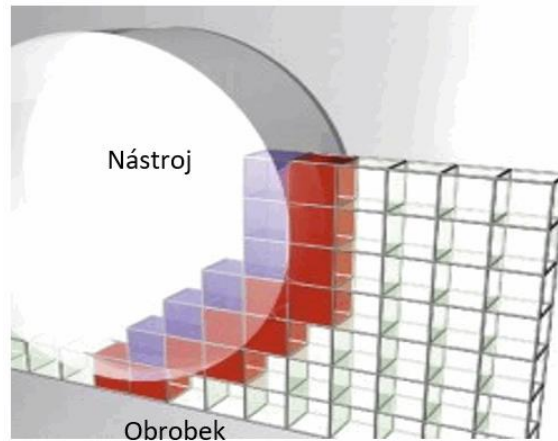
- **Procesy využívající hranového modelování**

V případě hranového modelování se jedná převážně o modelovací techniku. Model, který je reprezentován převážně body a hraničními křivkami není zcela vhodný pro simulační procesy. V některých případech je možné využít jeho vlastnosti pro jednoduchou vizualizaci například kvalitativního výsledku obrábění. Výhodou této metody je vysoká přesnost a relativně nižší výpočetní nároky pro simulaci. V některých zdrojích se používá hranové

reprezentace např. B-rep. pro zobrazení modelu a další simulace využívá jiných vhodnějších technik. Samostatné využití hranové reprezentace pro celkový optimalizační algoritmus běžně nevyužívá. [19]

- **Dekompoziční systémy**

Dekompoziční modelovací techniky jsou pro optimalizaci obrábění využívány zejména v oblasti simulace teplotních jevů nebo zatížení nástroje. Technika vychází z dekompoziční techniky řešené v kapitole 2.1.3. Simulace odebrává jednotlivé buňky vlivem pohybu nástroje vždy po určitém kroku simulace. Buňky obrobek zůstávají prázdné, zatímco neobrobené jsou zaplněny. Ukázka takovéto simulace je na obr. Příloha 2-2.



Příloha 2- 2 - Využití dekompozičního modelování pro simulace tepelných jevů procesu frézování [47]

Pro kvalitní trojrozměrnou simulaci jsou ovšem nevýhodou implementace této modelovací techniky vysoké HW nároky a dlouhý čas výpočtu. Z tohoto důvodu bývá prostorový kvádr nahrazen rovnoběžnými úsečkami. Těmi jsou poté reprezentovány plochy těles. [19,47]

Modelovaná plocha



Příloha 2- 3 - Příklad zobrazení plochy pomocí metody Z-buffer [19]

Takto upravená metoda se nazývá Z-buffer a jejím využitím především pro dynamické a teplotní jevy se zabývá článek z pramenu [48] zkoumající tento způsob modelování pro víceosé obrábění. Příkladem takto tvořené plochy je na obrázku Příloha 2- 3. Rozložení plochy je reprezentované délkou jednotlivých úseček. Další modifikací může být orientace úseček dle třech základních os prostorového zobrazení. Jejich vzájemnou kombinací vzniká modelovací technika využívající k reprezentaci těles v prostoru tzv. dexely. Tento způsob modelování je

mnohem vhodnější pro implementaci v jednotlivých optimalizačních SW, neboť má nižší nároky oproti klasickému voxelovému zobrazení. [19,48]

- **Procesy využívající bodového modelování**

Modely založené na reprezentaci těles pomocí jednotlivých bodů se nejvíce uplatňují pro simulace proudění. V těchto případech je snaha nahradit MKP simulace, které výsledek zkrslují především o okolí okrajových podmínek simulace. [19]

Pro optimalizační techniky je možné bodového zobrazování využít např. pro simulace vysokorychlostního obrábění kde jsou kombinovány jak fyzikální jevy, tak proces obrábění.

- **Analytické optimalizační metody**

Využití analytického modelování je jednou z možností jak popsat vzájemné působení mezi nástrojem a obrobkem. Tyto metody jsou s výhodou využívány pro optimalizace tříosých ale i víceosých strategií obrábění tvarových prostorových ploch. Jednou z výhod použitelnosti je vhodnost interpretace takovýchto ploch analytickou metodou. Dále pak také vhodné využití popisu víceosých drah nástroje pomocí CL (cutter location) nebo CC (cutter contact) bodů. Díky těmto informacím snadno získatelným z CAD a CAM modulů je možné relativně jednoduše vypočítat aktuální hloubku nebo šířku řezu pro jednotlivé dráhy nástroje. Na základě těchto informací je možné použít jednotlivé optimalizační přístupy. [19]

Výhodou je, že tento způsob optimalizace je velice rychlý. Je-li k dispozici analytický popis jednotlivých křivek obráběné plochy na nástroje, jsou nároky simulace oproti ostatním metodám relativně nízké. Problém a zásadní nedostatek nastává v případě absence analytického popisu ploch určených pro optimalizaci. Vzhledem k tomu, že tato metoda vychází z přesného matematického modelu je třeba všechna tato data modelu do tohoto způsobu reprezentace převést, což je v mnoha případech dost komplikované. Převod je realizován aproximací ploch čímž, ale může docházet ke zkreslení. [19]

PŘÍLOHA č. 3

DMU EVO 40 linear – podrobný popis

Geometrie použitých nástrojů – podrobný popis

Dynamometr KISTLER 9255A – podrobný popis

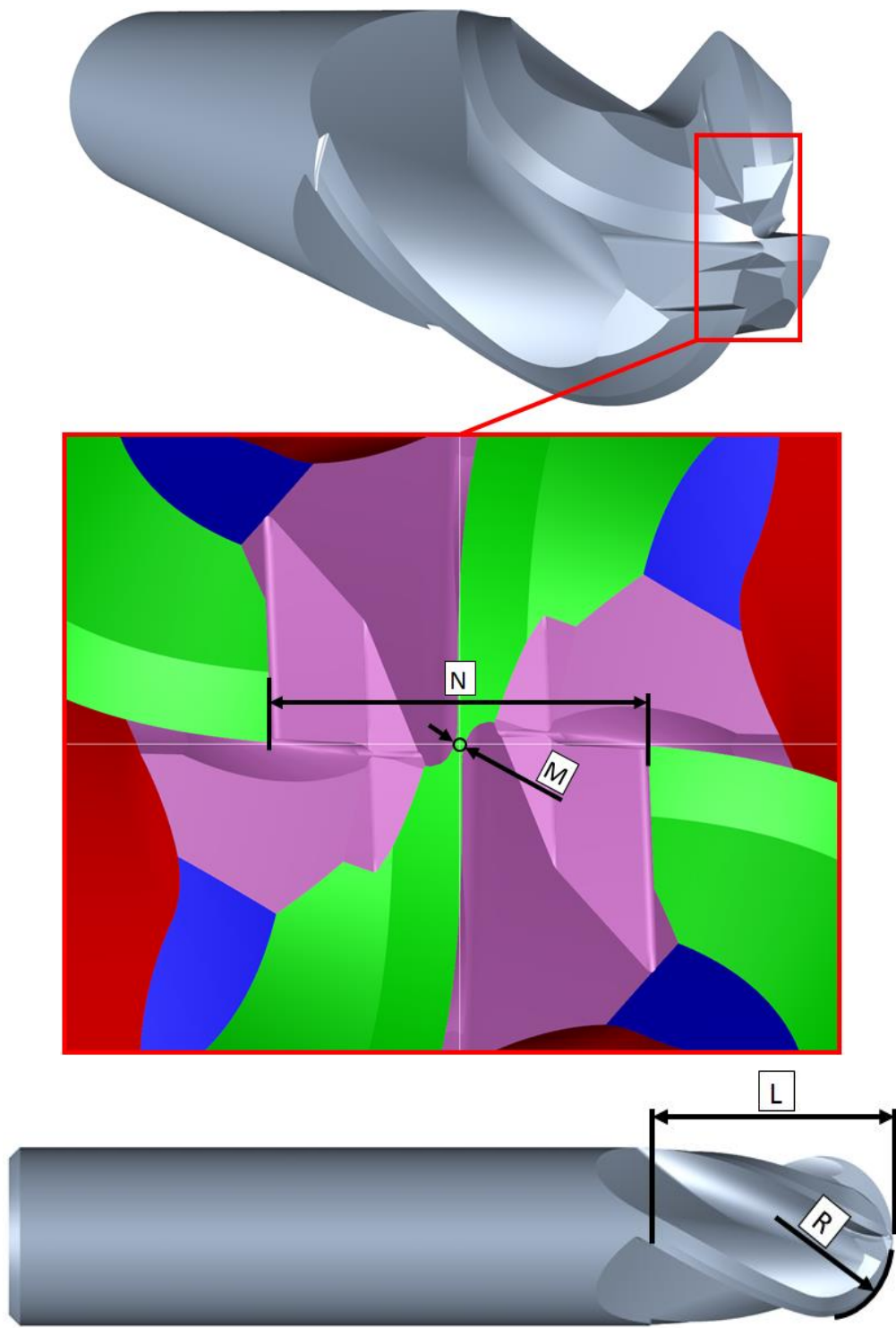
Kulové frézy ISCAR včetně VBD - podrobný popis –

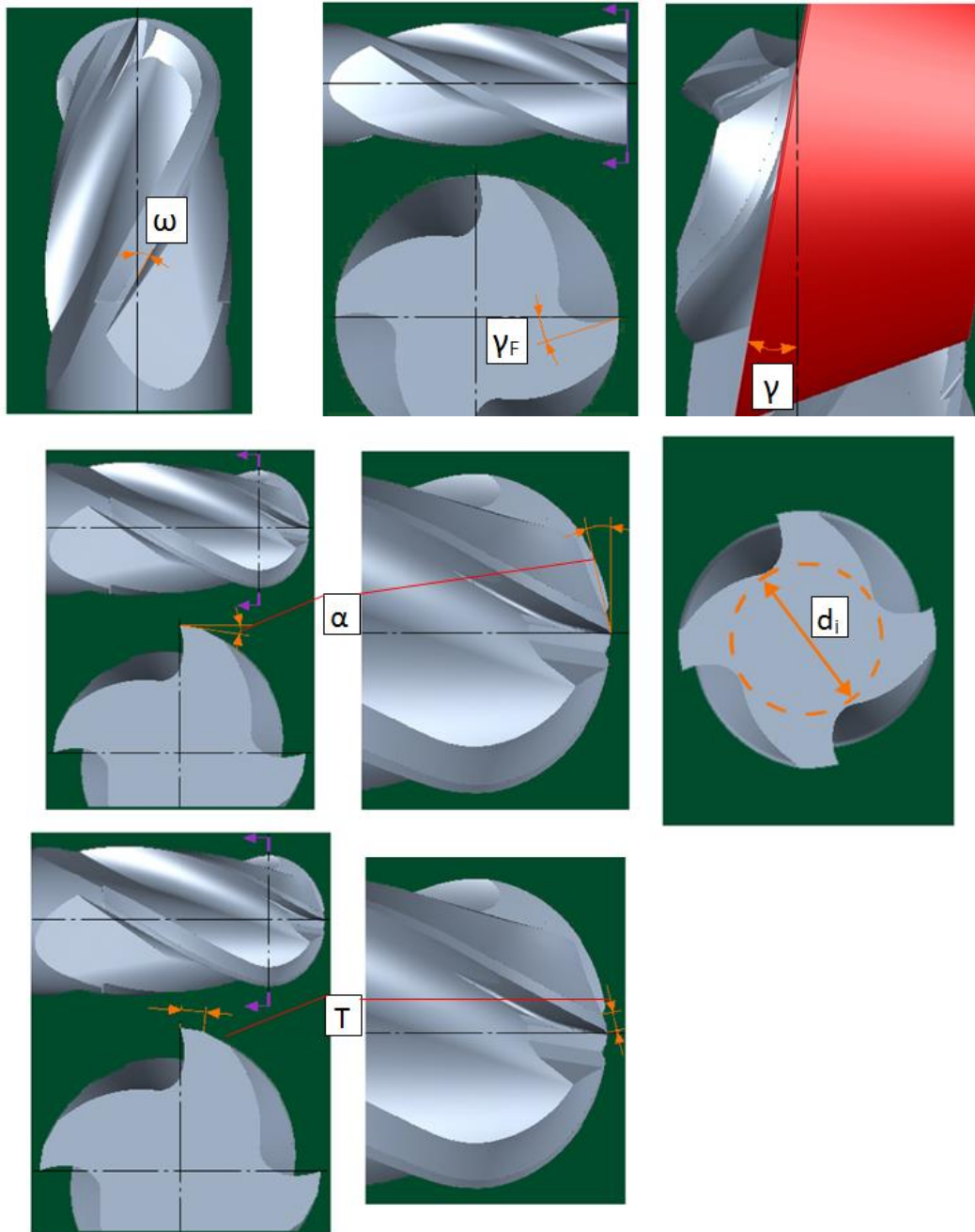
Podrobný popis DMU EVO 40 linear

Lineární frézovací centrum DMU 40 eVo linear	
	<p>Velikost pracovního prostoru:</p> <p>Osa X: 400mm Osa Y: 400mm Osa Z: 375mm</p> <p>Max. hm. obrobku: 250kg Max. otáčky: 24 000 ot/min</p>

Podrobný popis - Geometrie použitých nástrojů

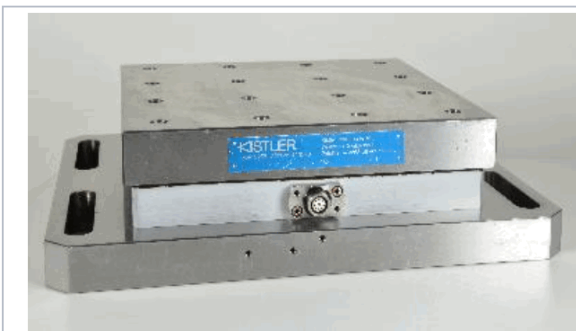
	Nástroj 1	Nástroj 2	Nástroj 3	Nástroj 4	Nástroj 5
Průměr D [mm]	16	14,1	9,5	4,9	3
Počet zubů Z	4	4	4	4	4
Úhel šroubovice ω [°]	30	30	30	30	30
Rádus R [mm]	8	7,05	4,75	2,45	1,5
Úhel čela v drážce γ_F [°]	9	9	9	9	9
Úhel čela ve vylehčení γ [°]	2	2	2	2	2
Úhel hřbetu α	10	10	10	10	10
Šířka fazety T [mm]	1	0,9	0,6	0,3	0,2
Příčné ostří M [mm]	0,12	0,1	0,08	0,04	0,04
Šířka vylehčení N [mm]	5	4,3	3	1,5	1
Délka řezné části L [mm]	22	20	14	11	7
Průměr jádra d_j [mm] (= 50 % z D)	8	7,05	4,75	2,45	1,5





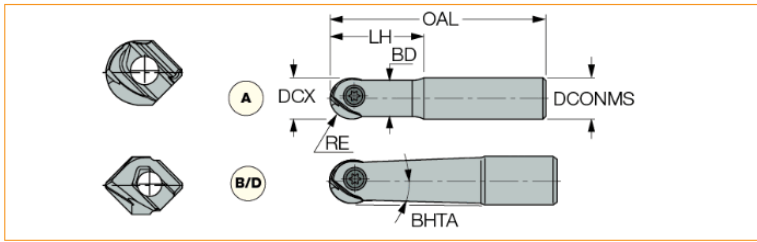
Podrobný popis - Dynamometr Kistler 9255A

► Statický dynamometr 3 složkový KISLTLEK



	Parametry		
	F _x	F _y	F _z
Max. zatížení	20 kN	20 kN	40 kN
Citlivost (nominální)	-8 pC/N	-8 pC/N	-3,7 pC/N
Vlastní frekvence	1 700 Hz		
Použitelný na stroji	DMU 65, DMU 40 eVo, MCV 750 A		

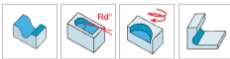
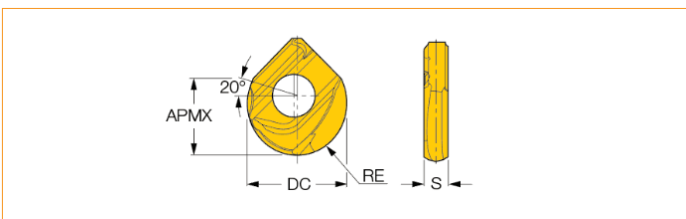
Podrobný popis – Kulové frézy ISCAR včetně VBD – před-dokončení rádiusové plochy



Item Designation: HCM D16-A-L130-C16



DCX	LH	OAL	DCONMS	Shank	BHTA	BD	kg	Type	MIID
16.00	36.0	130.00	16.00	C	-	14.40	0.18	A	HBR D160-QF



Designation	DC	APMX	RE	S	fz (min)	fz (max)	Tough ← Hard Grade & Vc
HBR D160-QF	16.00	10.30	8.00	3.37	0.08	0.15	IC328 IC928 IC908

PŘÍLOHA č. 4

**Plán experimentu „Ověření vlivu změny kvality dokončené plochy
na změnách řezné rychlosti“**

ID	Skutečné pořadí	Run	režná rychlost	sklon	strategie	kostka
1	1	46	100	25	A	1
2		47	100	25	A	2
3	2	6	125,05	25	A	1
4	3	27	150,025	25	A	1
10	4	26	175	25	A	1
9		44	175	25	A	2
5	5	29	199,975	25	A	1
6	6	25	224,95	25	A	1
7	7	5	250	25	A	1
8		45	250	25	A	2
32		19	100	25	B	3
31		30	100	25	B	4
33		15	125,05	25	B	3
34		12	150,025	25	B	3
39		38	175	25	B	3
40		57	175	25	B	4
35		23	199,975	25	B	3
36		20	224,95	25	B	3
37		11	250	25	B	3
38		49	250	25	B	4
11		9	100	50	A	5
12		55	100	50	A	6
13		7	125,05	50	A	5
14		43	150,025	50	A	5
20		32	175	50	A	5
19		60	175	50	A	6
15		17	199,975	50	A	5
16		51	224,95	50	A	5
18		1	250	50	A	5
17		14	250	50	A	6
41		13	100	50	B	7
42		39	100	50	B	8
43		18	125,05	50	B	7
44		16	150,025	50	B	7
49		24	175	50	B	7
50		33	175	50	B	8
45		58	199,975	50	B	7
46		42	224,95	50	B	7
48		48	250	50	B	7
47		52	250	50	B	8
22		3	100	75	A	9
21		4	100	75	A	10
23		34	125,05	75	A	9
24		50	150,025	75	A	9

30		10	175	75	A	9
29		53	175	75	A	10
25		8	199,975	75	A	9
26		22	224,95	75	A	9
27		2	250	75	A	9
28		28	250	75	A	10
51		36	100	75	B	11
52		40	100	75	B	12
53		21	125,05	75	B	11
54		41	150,025	75	B	11
59		31	175	75	B	11
60		56	175	75	B	12
55		59	199,975	75	B	11
56		54	224,95	75	B	11
58		35	250	75	B	11
57		37	250	75	B	12

PŘÍLOHA č. 5

Specifikace obráběného materiálu C45

Přehled vlastností oceli C45E (C45 R)							1.1191 (1.1201)										
Druh oceli	Nelegovaná ušlechtilá ocel k zušlechťování																
TDP	ČSN EN 10083-2: 2007. Tato norma obsahuje též ocel C45, klasifikovanou jako jakostní ocel k zušlechťování. Oceli C45 nelze nahradit ušlechtilé oceli C45E popř. C45R. C45 však lze nahradit ocelmi C45E resp. C45R.																
Dřívější označení	C45E (C45R) podle ČSN EN 10083-1: 1991+A1: 1996; Ck 45 (Cm 45) podle DIN 17200; 12 050 podle ČSN.																
Použití	Často používaná nelegovaná ocel pro výrobu méně namáhaných strojních dílů ve stavu zušlechťeném nebo normalizačně žíhaném. Optimálních mechanických hodnot včetně houževnatosti se dosahuje v zakaleném a následně popuštěném stavu. U tvarově složitějších dílů se pro zamezení vzniku trhlin dává přednost kalení do oleje. Ocel je vhodná i k povrchovému kalení plamenem nebo indukci.																
Chemické složení v % hmot. (rozbor tavby)	C	Si max.	Mn	P max.	S max. ¹⁾	Cr max.	Mo max.	Ni max.	Cr+Mo+Ni								
	0,42-0,50	0,40	0,50-0,80	0,030	0,035	0,40	0,10	0,40	max. 0,63								
Složení hotového výrobku ²⁾	0,40-0,52	0,43	0,46-0,84	0,035	0,040	0,45	0,13	0,45									
Mechanické vlastnosti v zušlechťeném stavu. ³⁾	Průměr mm	R _e min. MPa		R _m MPa		A min. %		Z min. %		KV min. J							
	d ≤ 16	490		700-850		14		35		-							
	16 < d ≤ 40	430		650-800		16		40		25							
Mechanické vlastnosti ve stavu normalizačně žíhaném ³⁾	d ≤ 16	340		min. 620		14		-		-							
	16 < d ≤ 100	305		580		16		-		-							
	100 < d ≤ 250	275		560		16		-		-							
Maximální hodnoty tvrdosti pro stav :	Zpracováno na stříhatelnost (+S)			Žíháno na měkko (+A)				Povrchově kaleno (tvrdost povrchu)									
	HB max. 255			HB max. 207				HRC min. 55									
Prokalitelnost ⁴⁾	Vzdálenost od plochy kaleného čela zkušebního tělesa v mm																
	Tvrdost v HRC																
	+H	Mez	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	13	15	20	25
	max	62	61	61	60	57	51	44	37	34	33	32	31	30	-	-	-
	min	55	51	37	30	28	27	26	25	24	23	22	21	20	-	-	-
<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> <p>Popouštěcí křivka (referenční vzorek průměr 10 mm)</p> <p>Tvrdość v HRC</p> <p>Teplota popuštění st.C</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>Křivky prokalitelnosti</p> <p>Tvrdość v HRC</p> <p>Vzdálenost od plochy kaleného čela v mm</p> <p>— H max — H min</p> </div> </div>																	
Technologické vlastnosti																	
Tváření za tepla	Doporučené rozmezí teplot pro tváření za tepla : 1150 až 850 °C																
Teplné zpracování	Normalizační žíhání °C	Žíhání na měkko °C	Isotermické žíhání °C	Teplota Kalení °C	Kalici prostředí	Teplota popouštění °C	Zkouška kalením čela °C										
	840 až 880	650 až 700	800 až 950 660 -1 hod.	820 až 860	voda nebo olej	550 až 660	850 ± 5										
	Uvedené podmínky jsou doporučeny s výjimkou zkoušky kalením čela (zkouška prokalitelnosti.) Teplota kalení při spodní hranici se doporučuje pro kalení do vody a při horní hranici při kalení do oleje. Jako kalici prostředí lze použít i syntetické kapaliny-emulze.																
Obrobiteľnosť	Obrobiteľnosť ťhiskovým obráběním může být ve stavu po válcování ztížena vlivem zvýšené pevnosti. Pro obrábění je výhodnější stav žíhaný na měkko. Zlepšenou obrobiteľnosť vykazuje ocel C45R se zvýšeným obsahem S.																
Stříhatelnost	Přichází v úvahu např. při dělení tyčí na vsázkové délky pro zápusťkové kování. Ocel C45 je stříhatelná za studena i ve stavu po válcování u průměrů nad 80 mm.																
¹⁾ obsah síry u oceli C45R je 0,020 až 0,040 % s dovolenou odchylkou v hotovém výrobku ± 0,005 %. ²⁾ u jedné tavby smí být překročena horní nebo spodní hranice rozmezí, ale nikoliv obě současně. ³⁾ uvedené hodnoty musí být dosažitelné po odpovídajícím tepelném zpracování (zušlechťení popř. normalizačním žíhání) též u oceli dodávané ve stavu po válcování nebo ve stavu měkce žíhaném. Prokazují se na referenčním vzorku odpovídajícího průměru. Zkušební tělesa pro stanovení mechanických hodnot musí být odebrána v souladu s předpisem normy TDP. R _e –mez kluzu, R _m – pevnost v tahu, A – tažnost (počáteční délka L ₀ = 5,65√S ₀), Z – kontrakce, KV – nárazová práce, zkušební těleso ISO s V-vrubem (průměr ze tří naměřených hodnot, z nichž žádná nesmí být menší než 70% minimální střední hodnoty). ⁴⁾ pro ocel objednanou bez požadavků na prokalitelnost jsou hodnoty prokalitelnosti pouze informativní.																	

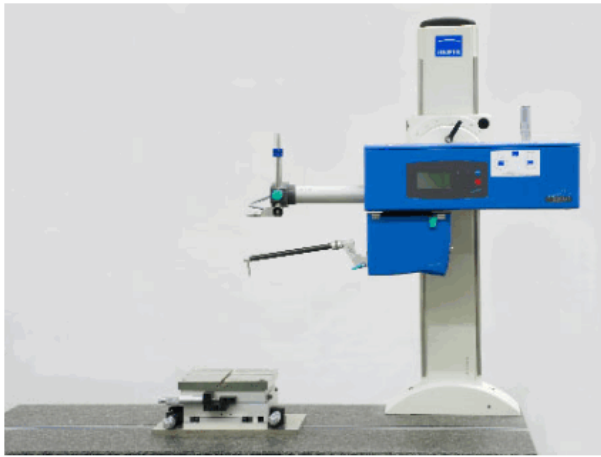
PŘÍLOHA č. 6

Profilo/drsnoměru HOMMEL ETAMIC T8000 – podrobný popis

**3D souřadnicový měřicí stroj Carl Zeiss Prismo 7 Navigator –
podrobný popis**

Podrobný popis - profilo/ drsnoměru HOMMEL ETAMIC T8000

HOMMEL ETAMIC T-8000 profilodrsnoměr



Posuv - Waveline 120

- ▶ Max. dráha: 120 mm
- ▶ Posuvová rychlost: 0,1-3 mm/s
- ▶ rozlišení měření 0,01/0,1 μm

Sloup - Wavelift 400

- ▶ pojezd: 400 mm
- ▶ rychlost: 0,1 - 12 mm/s

Profiloměr - Wavecontour

- ▶ Max. zdvih: 60 mm
- ▶ rozlišení v ose Z: 0,05 μm

Podrobný popis - 3D souřadnicový měřicí stroj Carl Zeiss Prismo 7 Navigator



Rozměry pracovního prostoru:

- X = 900 mm
- Y = 1200 mm
- Z = 500 mm
- Posuvová rychlost = 100 mm/min

Nejistota měření:

- otočná hlava = $1,6 + L/350 \mu\text{m}$
- pevná hlava = $0,9 + L/350 \mu\text{m}$

Další vybavení:

- Laserová skenovací hlava (s nejistotou měření $\pm 25 \mu\text{m}$)

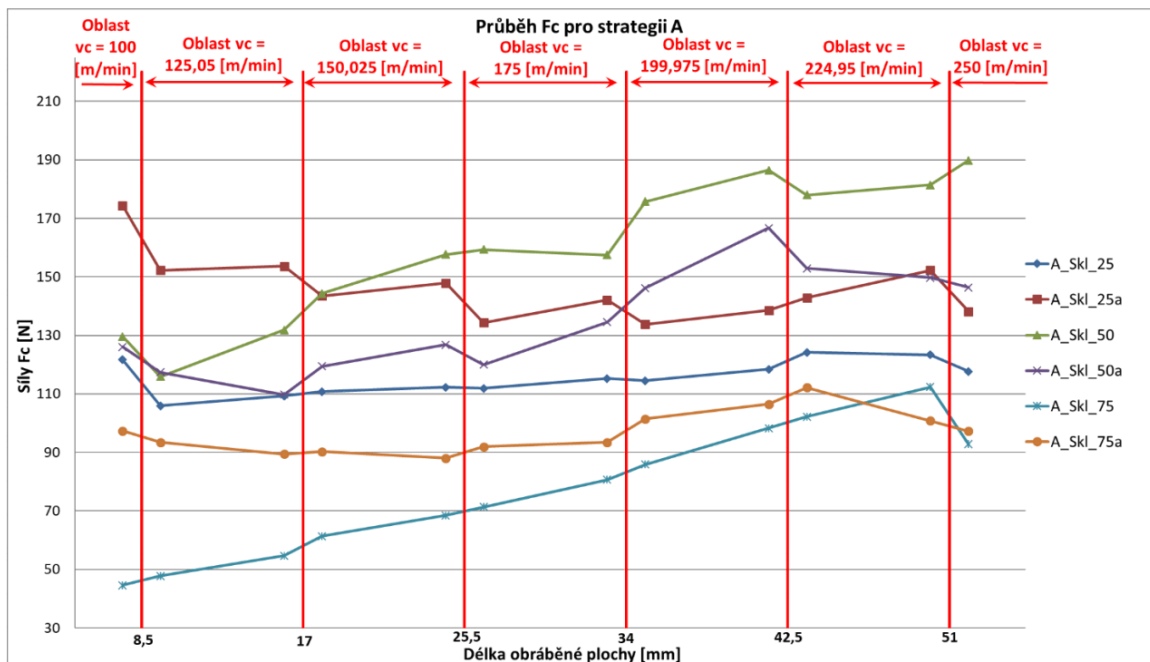
PŘÍLOHA č. 7

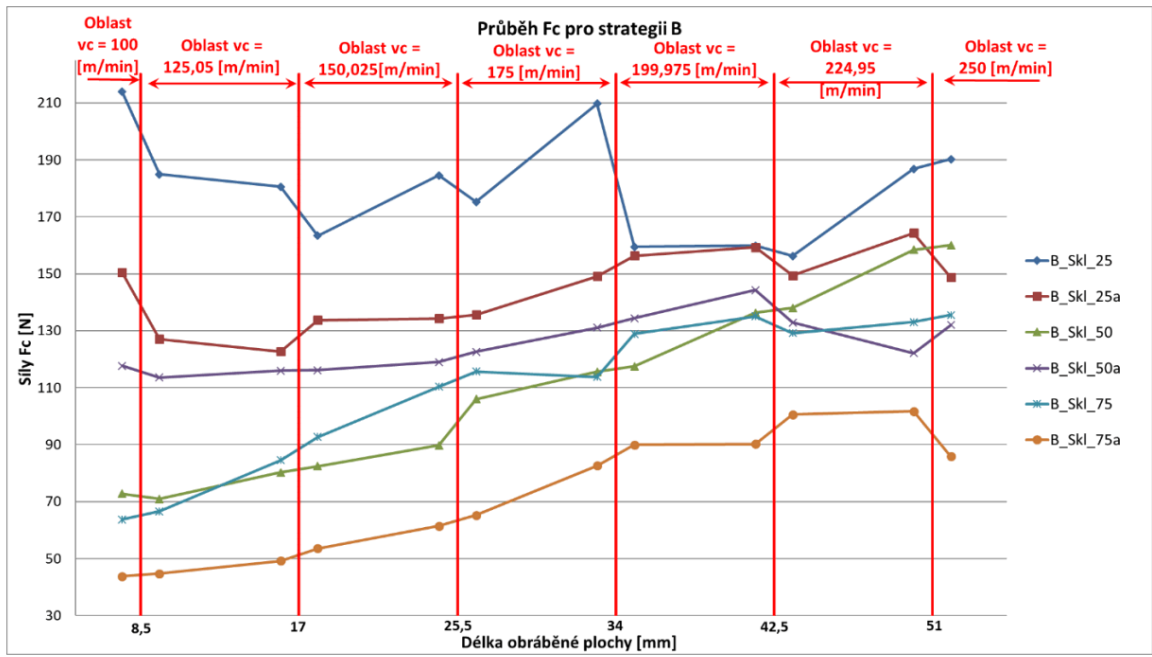
Tabulky a grafy vyhodnocení řezných sil pro experiment „Ověření vlivu změny kvality dokončené plochy na změnách řezné rychlosti“

Tabulka řezných sil F pro strategii A

v_c [m/min]	F [N]	A_Skl_25	A_Skl_25a	A_Skl_50	A_Skl_50a	A_Skl_75	A_Skl_75a
$v_c=100$	Nad přechodem	121,69	174,32	129,56	126,07	44,58	97,34
$v_c=125,05$	Pod přechodem	105,93	152,27	115,93	117,39	47,78	93,44
	Nad přechodem	109,25	153,62	131,82	109,76	54,64	89,44
$v_c=150,025$	Pod přechodem	110,76	143,51	144,29	119,48	61,34	90,31
	Nad přechodem	112,25	147,84	157,65	126,81	68,43	88,01
$v_c=175$	Pod přechodem	111,92	134,37	159,28	119,98	71,38	91,91
	Nad přechodem	115,24	142,08	157,47	134,51	80,67	93,45
$v_c=199,975$	Pod přechodem	114,45	133,80	175,69	146,13	85,86	101,42
	Nad přechodem	118,40	138,58	186,42	166,68	98,25	106,44
$v_c=224,95$	Pod přechodem	124,23	142,79	177,98	152,92	102,18	112,18
	Nad přechodem	123,39	152,26	181,40	149,72	112,38	100,81
$v_c=250$	Pod přechodem	117,62	138,19	189,78	146,35	92,79	97,29

Grafy strategie A pro F a strategie B pro F





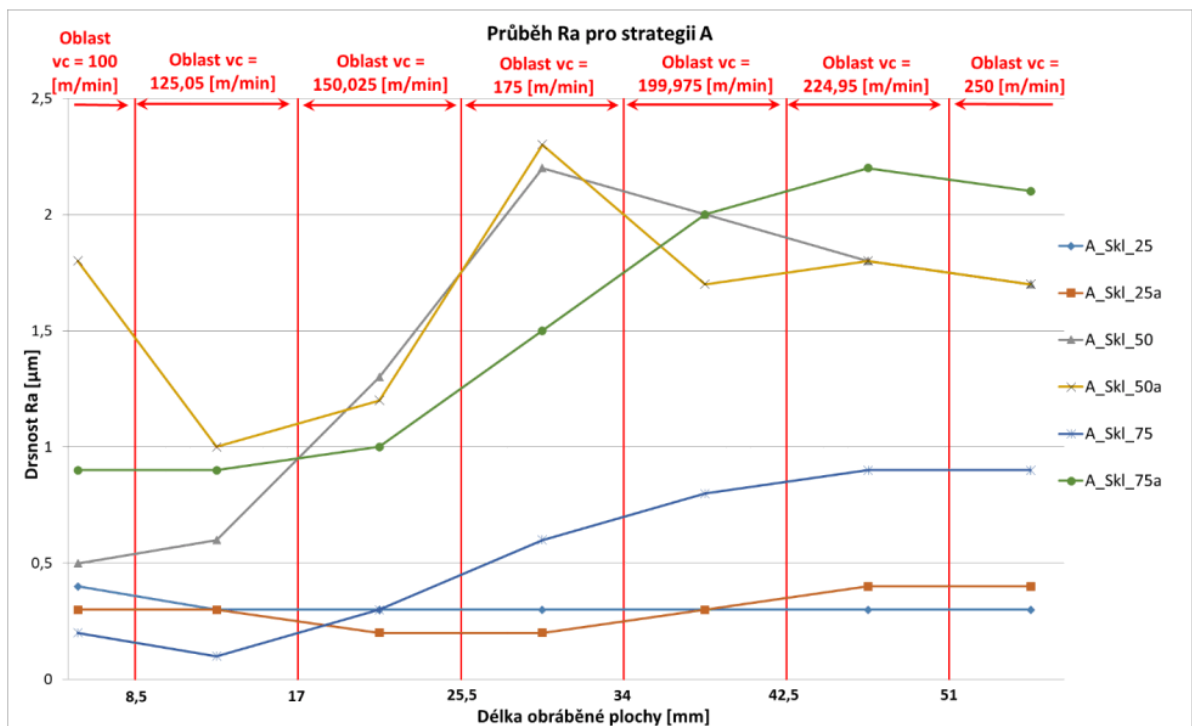
PŘÍLOHA č. 8

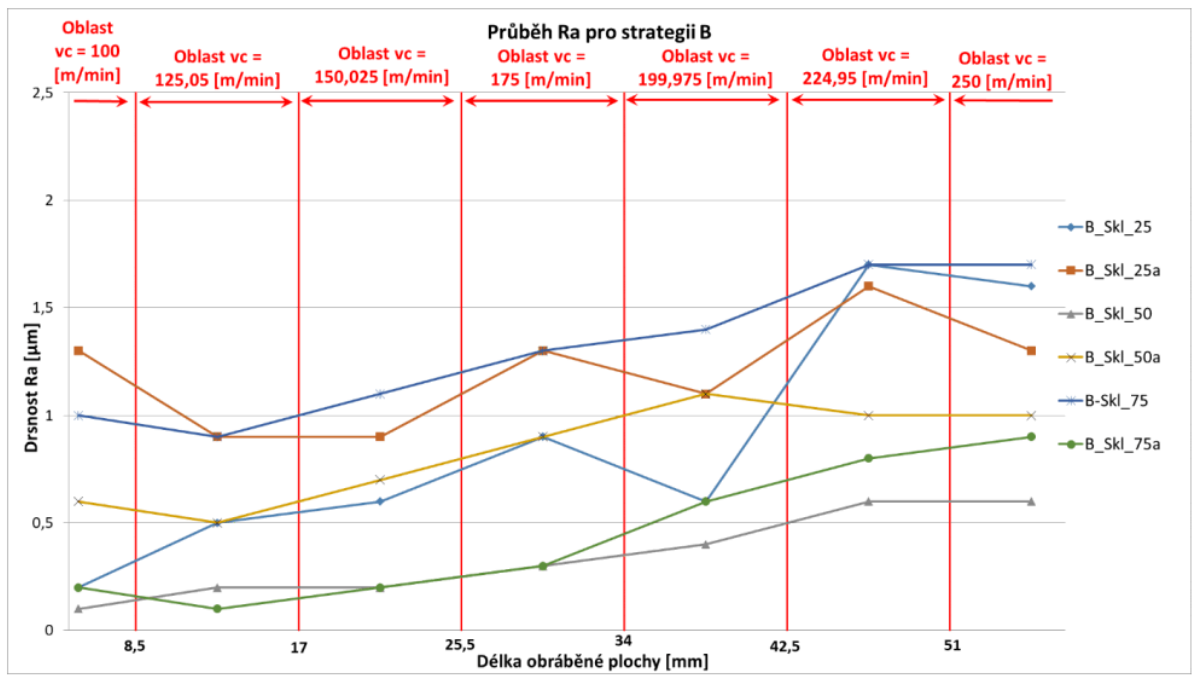
**Tabulky a grafy vyhodnocení drsnosti povrchu pro experiment
„Ověření vlivu změny kvality dokončené plochy na změnách řezné
rychlosti**

Tabulka drsnosti Ra a Rz pro strategii B

Strategie B	B_Skl_25		B_Skl_25a		B_Skl_50		B_Skl_50a		B-Skl_75		B_Skl_75a	
v_c [m/min]	Ra [μm]	Rz [μm]	Ra [μm]	Rz [μm]	Ra [μm]	Rz [μm]	Ra [μm]	Rz [μm]	Ra [μm]	Rz [μm]	Ra [μm]	Rz [μm]
100	0,2	3	1,3	7,7	0,1	1,7	0,6	4,5	1	7,4	0,2	1,6
125,05	0,5	5,7	0,9	5,8	0,2	1,7	0,5	4,4	0,9	6,1	0,1	1,7
150,025	0,6	5,8	0,9	7,4	0,2	1,8	0,7	6,1	1,1	7,6	0,2	1,7
175	0,9	7,6	1,3	8	0,3	3,4	0,9	7,7	1,3	9,2	0,3	2,7
199,975	0,6	5,5	1,1	7,9	0,4	2,5	1,1	9,2	1,4	9,8	0,6	4
224,95	1,7	9,7	1,6	9,9	0,6	4,7	1	8,2	1,7	11	0,8	5,1
250	1,6	9,9	1,3	8,9	0,6	4,3	1	8,6	1,7	9,7	0,9	5,2

Grafy drsnosti Ra a Rz strategie A a B





PŘÍLOHA č. 9

**Tabulka vyhodnocení rozměrové přesnosti pro experiment
„Ověření vlivu změny kvality dokončené plochy na změnách řezné
rychlosti**

	Strategie B	B_Skl_25	B_Skl_25a	B_Skl_50	B_Skl_50a	B_Skl_75	B_Skl_75a
vc=100	Nad přechodem	0,0340	-0,0069	-0,0899	-0,1308	0,0426	-0,0157
vc=125,05	Pod přechodem	0,0327	-0,0084	-0,0891	-0,1305	0,0536	-0,0148
	Nad přechodem	0,0342	-0,0070	-0,0828	-0,1241	0,0549	-0,0118
vc=150,025	Pod přechodem	0,0332	-0,0075	-0,0858	-0,1262	0,0567	-0,0101
	Nad přechodem	0,0342	-0,0057	-0,0837	-0,1234	0,0574	-0,0082
vc=175	Pod přechodem	0,0351	-0,0057	-0,0829	-0,1224	0,0574	-0,0073
	Nad přechodem	0,0361	-0,0046	-0,0794	-0,1189	0,0574	-0,0052
vc=199,975	Pod přechodem	0,0363	-0,0038	-0,0821	-0,1181	0,0567	-0,0044
	Nad přechodem	0,0388	-0,0028	-0,0806	-0,1150	0,0586	-0,0029
vc=224,95	Pod přechodem	0,0374	-0,0033	-0,0799	-0,1140	0,0597	-0,0018
	Nad přechodem	0,0380	-0,0006	-0,0780	-0,1113	0,0603	0,0008
vc=250	Pod přechodem	0,0389	-0,0024	-0,0785	-0,1099	0,0621	0,0010

PŘÍLOHA č. 10

Plán experimentu „Zkoumání kvality a rozměrové přesnosti při dokončování rádiusové plochy za použití konstantní řezné rychlosti“

Skutečné pořadí	Datum	Pořadí	Průměr nástroje	Rádus plochy	Strategie	Číslo polotovaru	Název naměřených dat řezných sil	Název program	Poznámky	Čas programu	Délka nást. sest
1	13.2.	57	3	30	A2	2	A2_D3_R30_(1 až 6)	A2_Dn3_Rpl30_13_02	Program zkrácen do z-27, 1. záznam sil nekompletní	18 min	122,113
2	13.2.	25	3	30	C1	80	C1_D3_R30_(1 až 6)	A2_Dn3_Rpl30_13_02	Program zkrácen do z-27, 3. záznam sil nekompletní	35 min	122,113
3	13.2.	47	3	30	B1	6	B1_D3_R30_(1 až 6)	B1_Dn3_Rpl30_13_02	Program zkrácen do z-27	33 min	122,113
4	13.2.	32	3	30	B2	7	B2_D3_R30_(1 až 6)	B2_Dn3_Rpl30_13_02	Program zkrácen do z-27	23 min	122,047
5	13.2.	2	3	30	A1	9	A1_D3_R30_(1 až 6)	A1_Dn3_Rpl30_13_02	Program zkrácen do z-27	21 min	122,047
6	13.2.	21	3	30	C2	11	C2_D3_R30_(1 až 6)	C2_Dn3_Rpl30_13_02	Program zkrácen do z-27	24 min	122,047
7	13.2.	8	4,9	16	B2	1	B2_D4,9_R16_(1 až 6)	B2_Dn4,9_Rpl16_13_02	Program zkrácen do z-44,1	20 min	131,764
8	13.2.	3	4,9	44	C1	3	C1_D4,9_R44_(1 až 6)	C1_Dn4,9_Rpl44_13_02	Program zkrácen do z-44,1	60 min	131,764
9	13.2.	53	4,9	44	B2	13	B2_D4,9_R44_(1 až 6)	B2_Dn4,9_Rpl44_13_02	Program zkrácen do z-44,1	53 min	131,764
10	14.2.	40	4,9	16	C2	5	C2_D4,9_R16_(1 až 6)	C2_Dn4,9_Rpl16_13_02	Program zkrácen do z-44,1	16,5 min	131,764
11	14.2.	59	4,9	16	B1	8	B1_D4,9_R16_(1 až 6)	B1_Dn4,9_Rpl16_13_02	Program zkrácen do z-44,1	28 min	131,773
12	14.2.	50	4,9	44	B1	15	B1_D4,9_R44_(1 až 6)	B1_Dn4,9_Rpl44_13_02	Program zkrácen do z-44,1	75 min	131,773
13	14.2.	39	4,9	44	A2	17	A2_D4,9_R44_(1 až 6)	A2_Dn4,9_Rpl44_13_02	Program zkrácen do z-44,1	39 min	131,773
14	14.2.	41	4,9	16	A2	12	A2_D4,9_R16_(1 až 6)	A2_Dn4,9_Rpl16_13_02	Program zkrácen do z-44,1	16 min	131,773
15	14.2.	19	4,9	44	C2	19	C2_D4,9_R44_(1 až 6)	C2_Dn4,9_Rpl44_13_02	Program zkrácen do z-44,1	42 min	131,841
16	14.2.	51	4,9	44	A1	21	A1_D4,9_R44_(1 až 6)	A1_Dn4,9_Rpl44_13_02	Program zkrácen do z-44,1	47 min	131,841
17	14.2.	28	4,9	16	C1	10	C1_D4,9_R16_(1 až 6)	C1_Dn4,9_Rpl16_13_02	Program zkrácen do z-44,1	22,5 min	131,841
18	14.2.	43	4,9	16	A1	79	A1_D4,9_R16_(1 až 6)	A1_Dn4,9_Rpl16_13_02	Program zkrácen do z-44,1	18 min	131,841

19	14.2.	18	9,5	49,799	A1	23	A1_D9,5_R49,799_(1 až 6)	A1_Dn9,5_Rpl49,799_14_02		101 min	136,587
20	15.2.	45	9,5	10,2019	A1	4	A1_D9,5_R10,201_(1 až 6)	A1_Dn9,5_Rpl10,201_14_02		21 min	136,587
21	15.2.	58	9,5	30	B2	25	B2_D9,5_R30_(1 až 6)	B2_Dn9,5_Rpl30_14_02		66 min	136,587
22	15.2.	16	9,5	49,799	C1	27	C1_D9,5_R49,799_(1 až 6)	C1_Dn9,5_Rpl49,799_14_02		88 min	136,587
23	15.2.	54	9,5	30	C1	29	C1_D9,5_R30_(1 až 6)	C1_Dn9,5_Rpl30_14_02		56 min	136,587
24	15.2.	55	9,5	30	B2	31	B2_D9,5_R30_(1a až 6a)	B2_Dn9,5_Rpl30_14_02	opakovaně	64 min	137,525
25	15.2.	5	9,5	10,201	B1	22	B1_D9,5_R10,201_(1 až 6)	B1_Dn9,5_Rpl10,201_14_02		32 min	137,525
26	15.2.	15	9,5	30	C2	33	C2_D9,5_R30_(1 až 6)	C2_Dn9,5_Rpl30_14_02		37,5 min	137,525
27	15.2.	23	9,5	30	A1	35	A1_D9,5_R30_(1 až 6)	A1_Dn9,5_Rpl30_14_02		60 min	137,525
28	15.2.	48	9,5	30	A1	37	A1_D9,5_R30_(1a až 6a)	A1_Dn9,5_Rpl30_14_02	opakovaně	60 min	137,525
29	15.2.	37	9,5	10,201	B2	14	B2_D9,5_R10,201_(1 až 6)	B2_Dn9,5_Rpl10,201_14_02		22,3 min	137,525
30	15.2.	38	9,5	30	B1	49	B1_D9,5_R30_(1 až 6)	B1_Dn9,5_Rpl30_14_02		96 min	137,686
31	16.2.	60	9,5	30	A2	39	A2_D9,5_R30_(1 až 6)	A2_Dn9,5_Rpl30_14_02		49 min	137,686
32	16.2.	11	9,5	49,799	A2	Kostka č.2	A2_D9,5_R49,799_(1 až 6)	A2_Dn9,5_Rpl49,799_14_02	Z polotovaru Test A1	81 min	137,686
33	16.2.	9	9,5	30	C1	41	C1_D9,5_R30_(1a až 6a)	C1_Dn9,5_Rpl30_14_02	opakovaně	55,5 min	137,728
34	16.2.	10	9,5	30	B1	43	B1_D9,5_R30_(1a až 6a)	B1_Dn9,5_Rpl30_14_02	opakovaně	95 min	137,728
35	16.2.	27	9,5	49,799	B2	Kostka č.1	B2_D9,5_R49,799_(1 až 6)	B2_Dn9,5_Rpl49,799_14_02	Z polotovaru Test A1	106 min	137,728
36	20.2.	34	9,5	30	C2	45	C2_D9,5_R30_(1a až 6a)	C2_Dn9,5_Rpl30_14_02	opakovaně	38 min	137,728
37	20.2.	26	9,5	30	A2	47	A2_D9,5_R30_(1a až 6a)	A2_Dn9,5_Rpl30_14_02	opakovaně	49 min	137,728

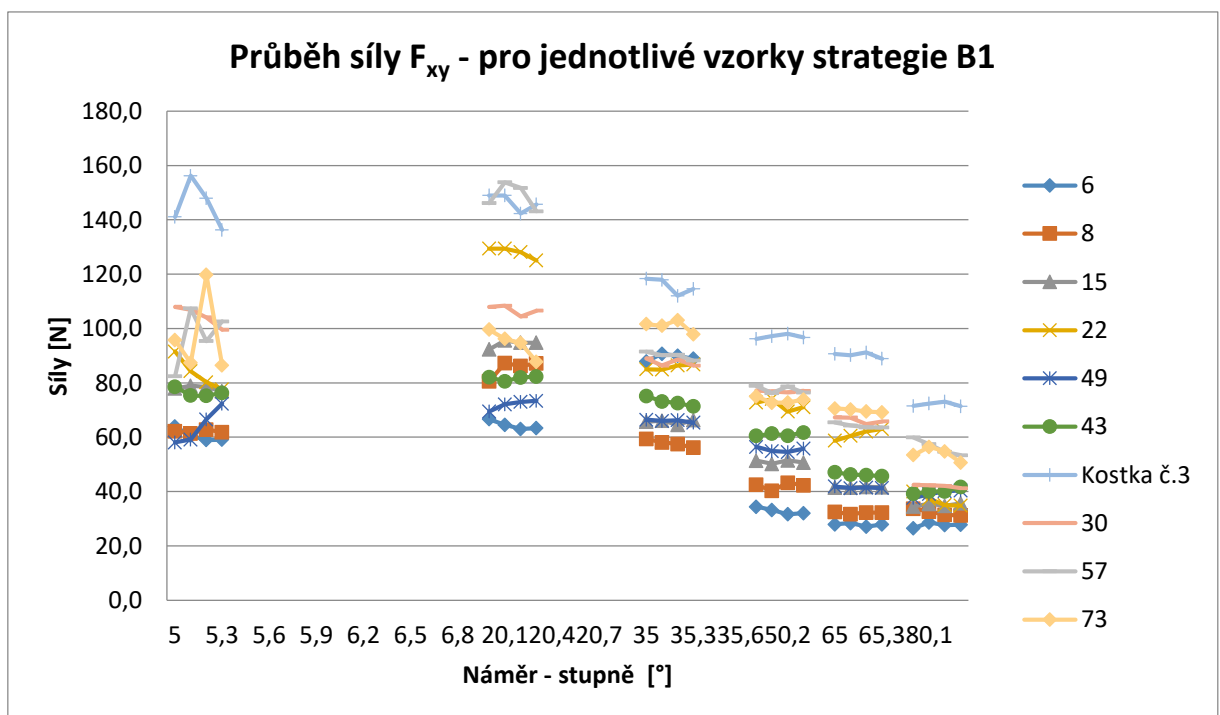
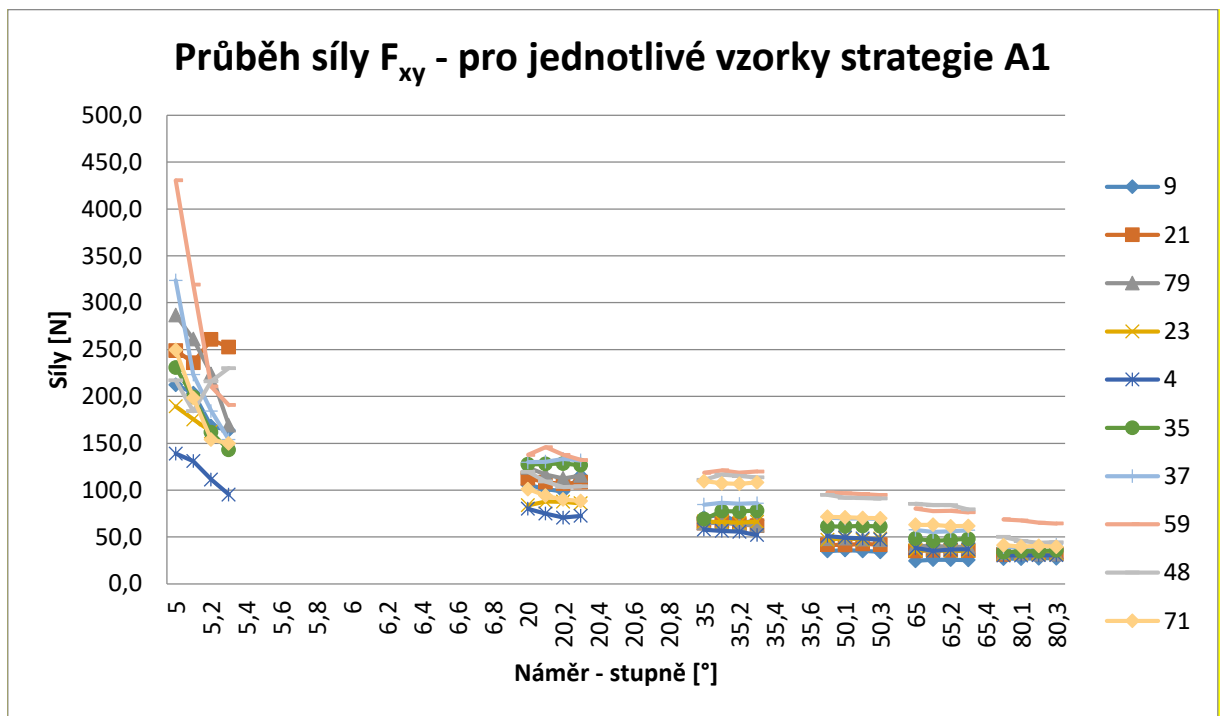
38	20.2.	20	9,5	49,799	B1	Kostka č.3	B1_D9,5_R49,799_(1 až 6)	B1_Dn9,5_Rpl49,799_14_02	Z polotovaru Test A1	153 min	138,06
39	20.2.	14	9,5	10,201	C2	16	C2_D9,5_R10,201_(1 až 6)	C2_Dn9,5_Rpl10,201_14_02		15 min	138,06
40	20.2.	1	9,5	10,201	A2	18	A2_D9,5_R10,201_(1 až 6)	A2_Dn9,5_Rpl10,201_14_02		17 min	138,06
41	20.2.	44	9,5	49,799	C2	Kostka č.4	C2_D9,5_R49,799_(1 až 6)	C2_Dn9,5_Rpl49,799_14_02	Z polotovaru Test A1	59 min	138,06
42	20.2.	46	9,5	10,201	C1	20	C1_D9,5_R10,201_(1 až 6)	C1_Dn9,5_Rpl10,201_14_02		21 min	138,06
43	20.2.	17	14,1	16	A2	36	A2_D14,1_R16_(1 až 6)	A2_Dn14,1_Rpl16_16_02		38 min	141,860
44	20.2.	6	14,1	16	B2	32	B2_D14,1_R16_(1 až 6)	B2_Dn14,1_Rpl16_16_02		48,5 min	141,860
45	20.2.	30	14,1	44	C1	51	C1_D14,1_R44_(1 až 6)	C1_Dn14,1_Rpl44_16_02		96 min	141,860
46	21.2.	56	14,1	44	A2	53	A2_D14,1_R44_(1 až 6)	A2_Dn14,1_Rpl44_16_02	1. Měření mimo rozsah	103 min	141,860
47	21.2.	7	14,1	16	C1	26	C1_D14,1_R16_(1 až 6)	C1_Dn14,1_Rpl16_16_02		39 min	141,860
48	21.2.	36	14,1	16	B1	30	B1_D14,1_R16_(1 až 6)	B1_Dn14,1_Rpl16_16_02		73 min	141,860
49	21.2.	49	14,1	44	C2	55	C2_D14,1_R44_(1 až 6)	C2_Dn14,1_Rpl44_16_02		64 min	141,704
50	21.2.	29	14,1	16	C2	34	C2_D14,1_R16_(1 až 6)	C2_Dn14,1_Rpl16_16_02		26 min	141,704
51	21.2.	22	14,1	44	B1	57	B1_D14,1_R44_(1 až 6)	B1_Dn14,1_Rpl44_16_02		202 min	141,704
52	21.2.	52	14,1	44	A1	59	A1_D14,1_R44_(1 až 6)	A1_Dn14,1_Rpl44_16_02	1. Měření mimo rozsah, změněn rozsah na 300 N, pro další přejezdy vrácen na 200 N	128 min	141,704
53	22.2.	4	14,1	16	A1	48	A1_D14,1_R16_(1 až 6)	A1_Dn14,1_Rpl16_16_02		47 min	141,704
54	22.2.	35	14,1	44	B2	61	B2_D14,1_R44_(1 až 6)	B2_Dn14,1_Rpl44_16_02		133 min	141,704
55	22.2.	24	16	30	B2	63	B2_D16_R30_(1 až 6)	B2_Dn16_Rpl30_16_02		102 min	137,838
56	22.2.	31	16	30	C1	65	C1_D16_R30_(1 až 6)	C1_Dn16_Rpl30_16_02		74 min	137,838

57	22.2.	12	16	30	A2	67	A2_D16_R30_(1 až 6)	A2_Dn16_Rpl30_16_02		78 min	137,838
58	22.2.	33	16	30	A1	71	A1_D16_R30_(1 až 6)	A1_Dn16_Rpl30_16_02		99 min	137,838
59	23.2.	42	16	30	C2	69	C2_D16_R30_(1 až 6)	C2_Dn16_Rpl30_16_02		49 min	137,838
60	23.2.	13	16	30	B1	73	B1_D16_R30_(1 až 6)	B1_Dn16_Rpl30_16_02		155 min	137,838

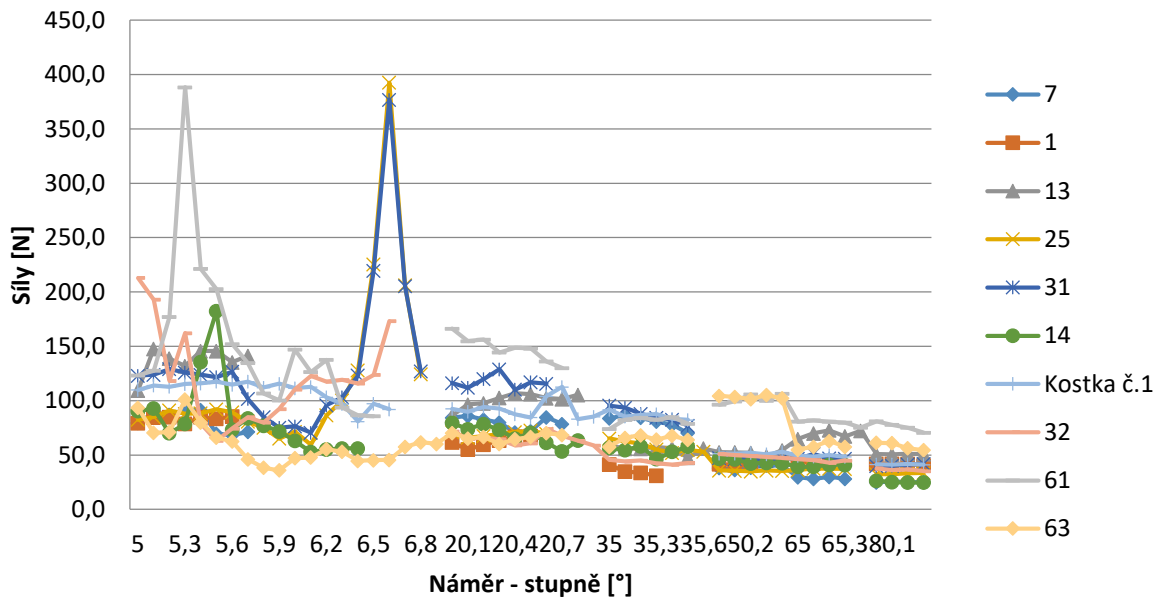
PŘÍLOHA č. 11

**Grafy vyhodnocení řezných sil pro experiment „Zkoumání kvality
a rozměrové přesnosti při dokončování rádiusové plochy za použití
konstantní řezné rychlosti“**

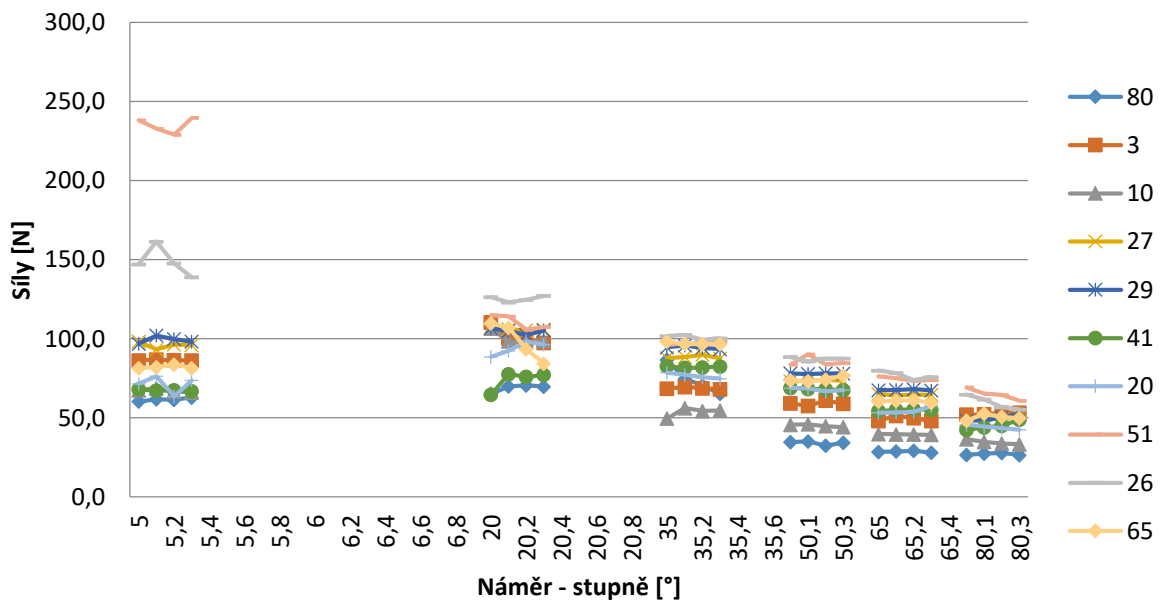
Grafy průběhu sil F_{xy} jednotlivých vzorků pro strategie A1,B1,B2,C1,C2

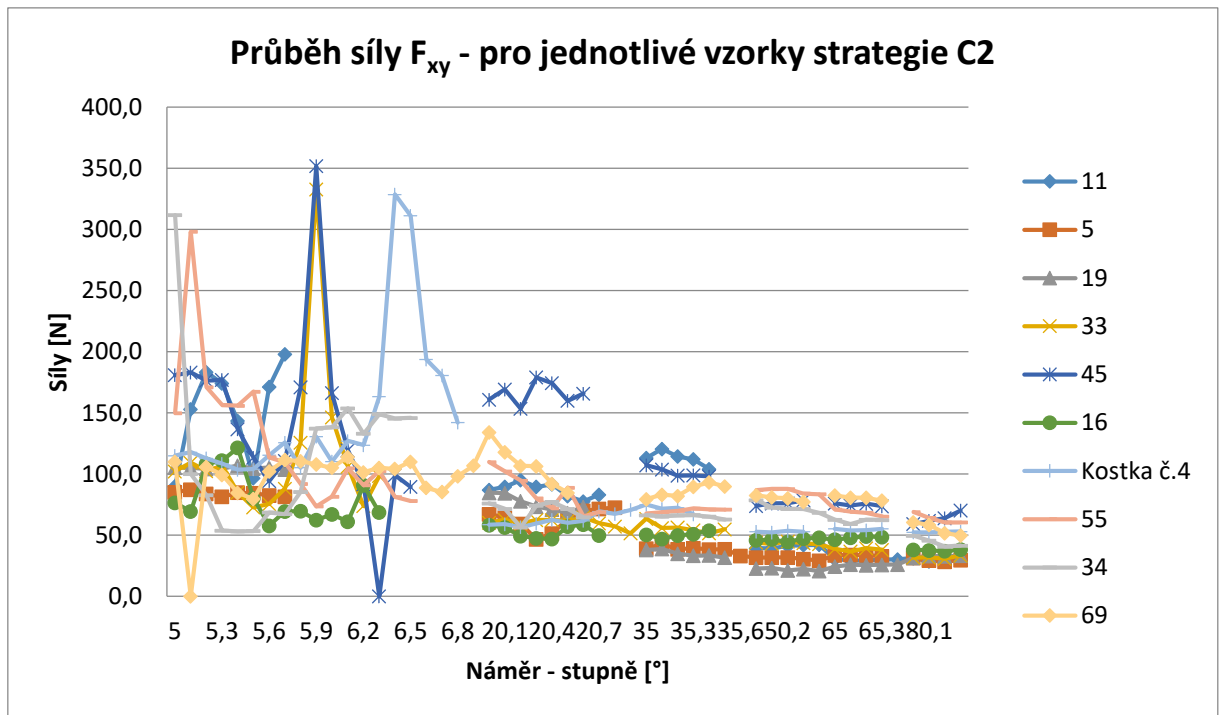


Průběh síly F_{xy} - pro jednotlivé vzorky strategie B2

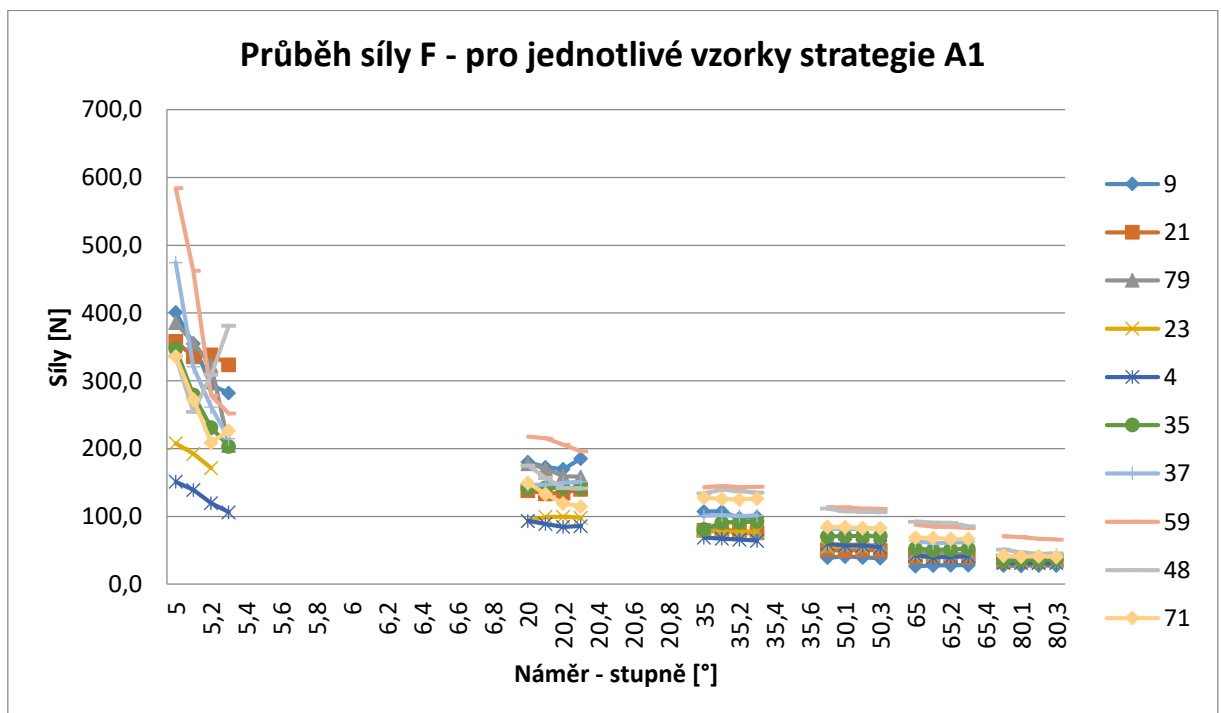


Průběh síly F_{xy} - pro jednotlivé vzorky strategie C1

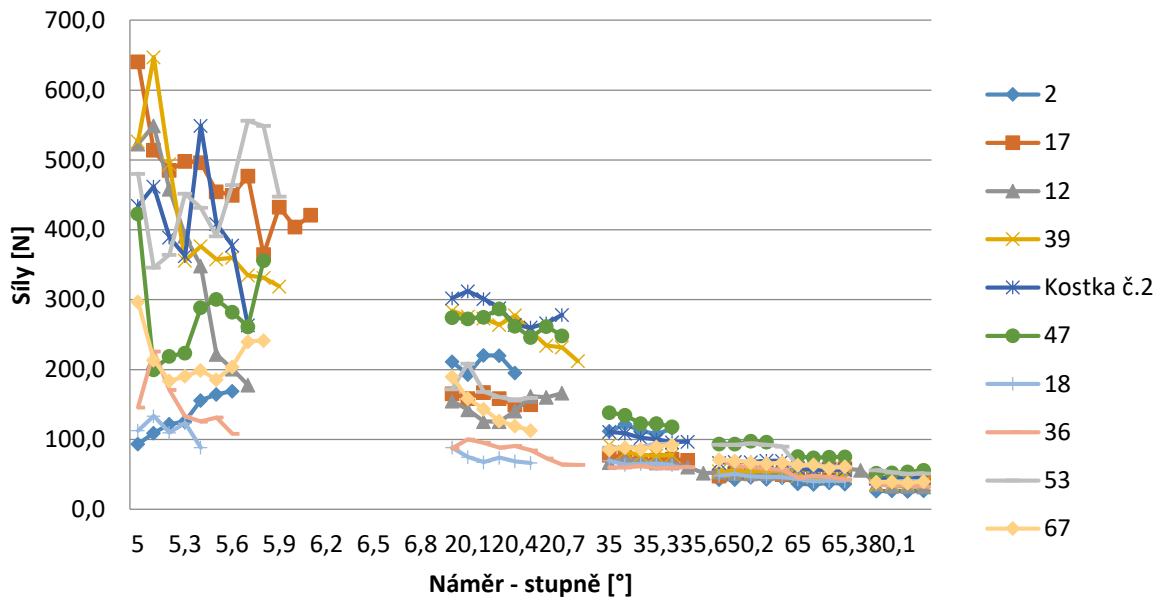




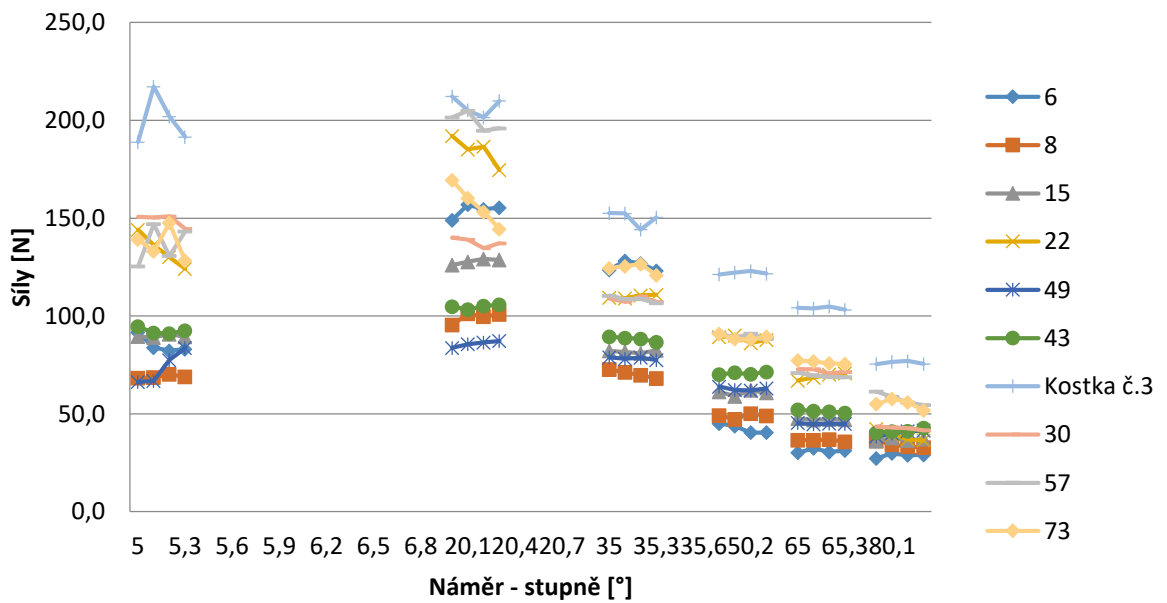
Grafy průběhu sil F jednotlivých vzorků pro strategie A1,A2,B1,B2,C1,C2



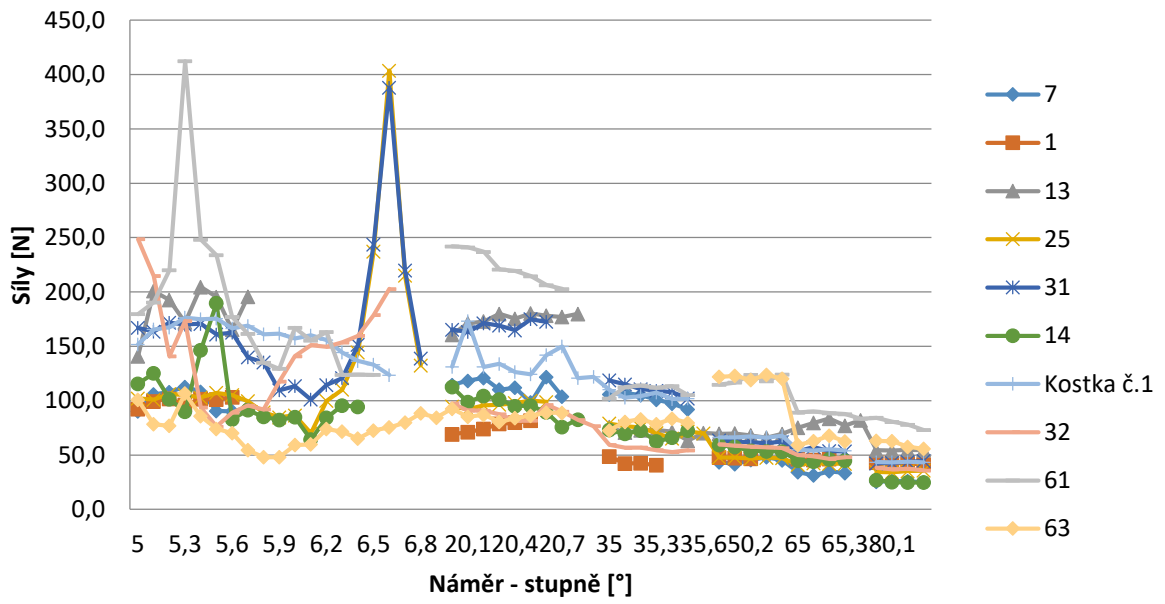
Průběh síly F - pro jednotlivé vzorky strategie A2



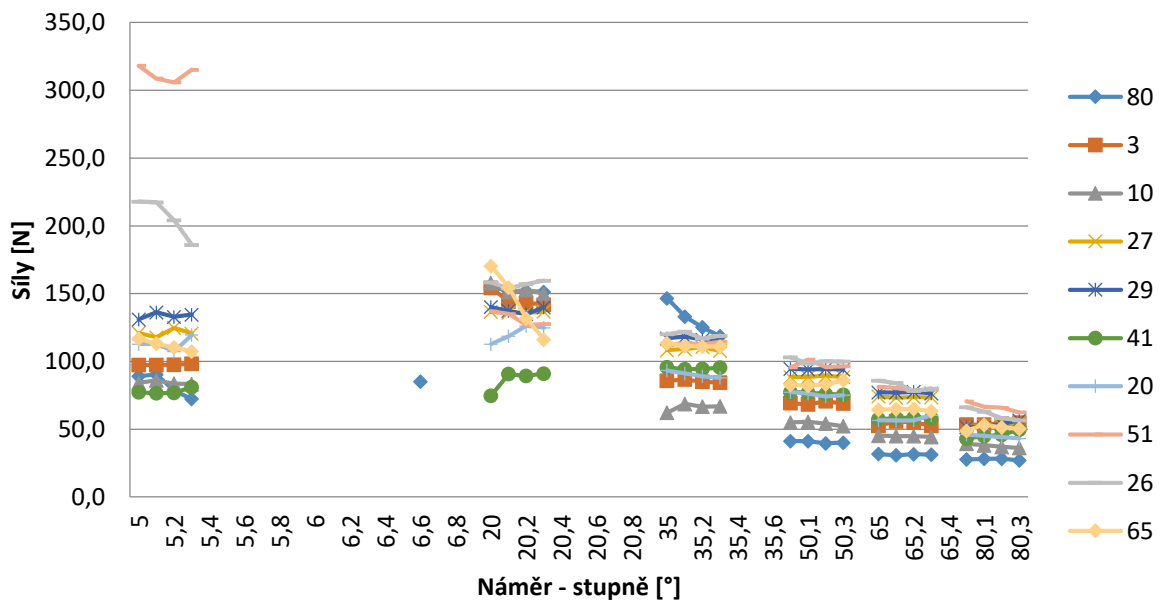
Průběh síly F - pro jednotlivé vzorky strategie B1



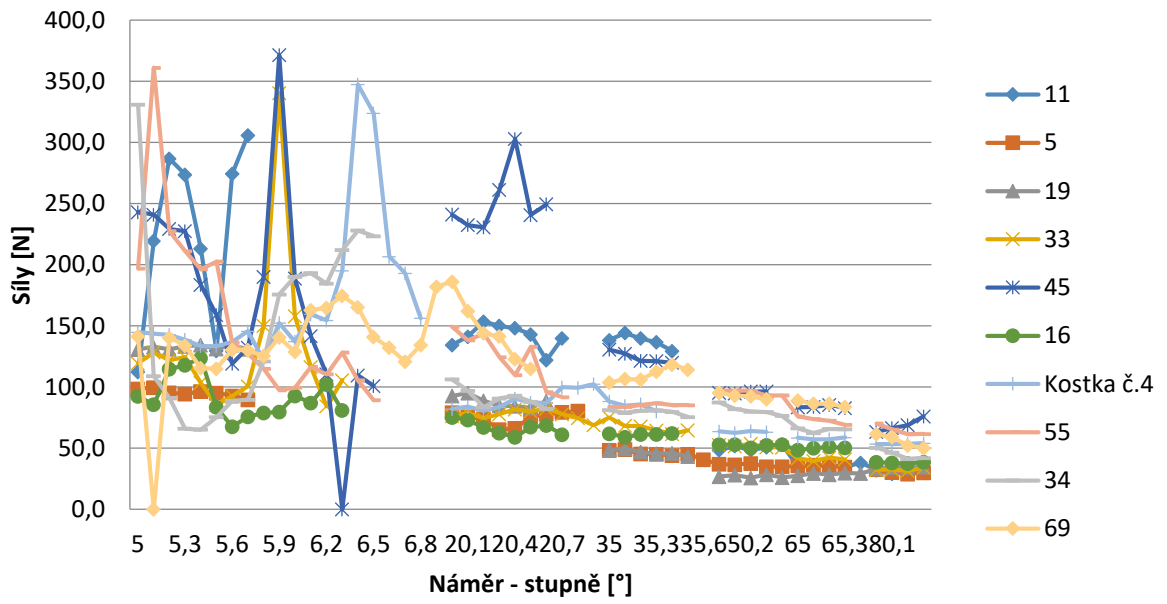
Průběh síly F - pro jednotlivé vzorky strategie B2



Průběh síly F - pro jednotlivé vzorky strategie C1



Průběh síly F - pro jednotlivé vzorky strategie C2



PŘÍLOHA č. 12

**Tabulka a grafy vyhodnocení drsnosti Ra a Rz pro experiment
„Zkoumání kvality a rozměrové přesnosti při dokončování rádiusové
plochy za použití konstantní řezné rychlosti“**

Tabulka drsnosti Rz pro všechny vzorky strategie A2

Konst. vc[m/min]	Rz [μm]					Průměr A2	
A2	8	3	3	1,9	1,5		
A2	9,4	7,2	5,8	5,5	3,8		
A2	3,8	3,1	3,3	2,3	1,5		
A2	3,2	1,7	2	2,1	2,9		
A2	5,6	2,2	3,6	3,1	2,3		
A2	4,5	3,5	4,1	5,1	4,3		
A2	1,9	1,7	1,5	1,2	1,4		
A2	2,1	1,1	1,2	1,4	1,2		
A2	8,3	3	2,9	2,4	1,9		
A2	2	1,5	2,4	1,2	1,2		
Průměr	4,88	2,8	2,98	2,62	2,2		3,10
Min.	1,9	1,1	1,2	1,2	1,2		2,20
Max.	9,4	7,2	5,8	5,5	4,3	4,88	
ch+	4,52	4,4	2,82	2,88	2,1	1,78	
ch-	2,98	1,7	1,78	1,42	1	0,90	

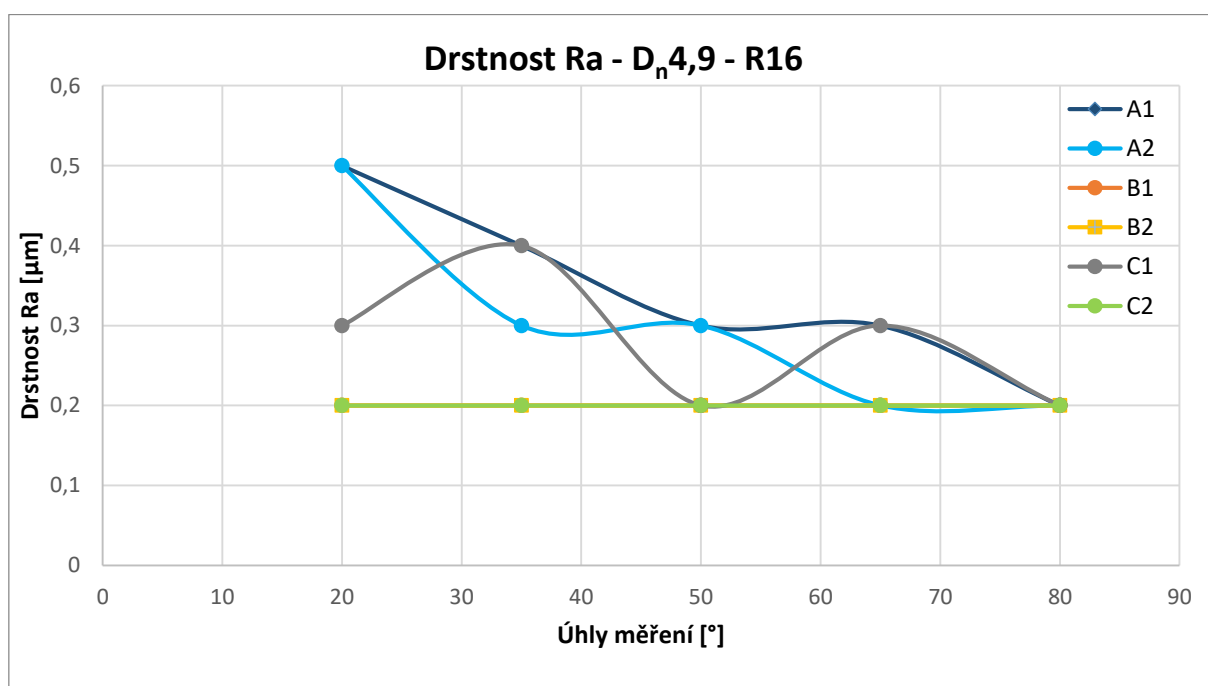
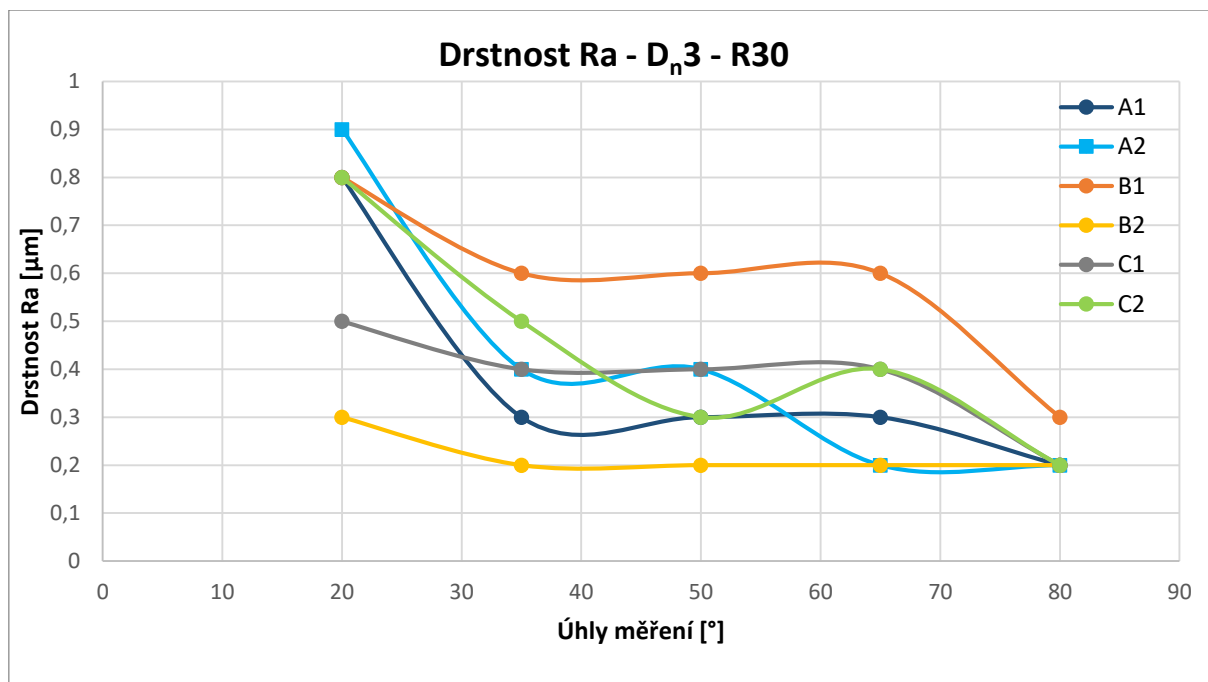
Tabulka průměrných hodnot drsnosti Rz pro všechny průměry nástroje

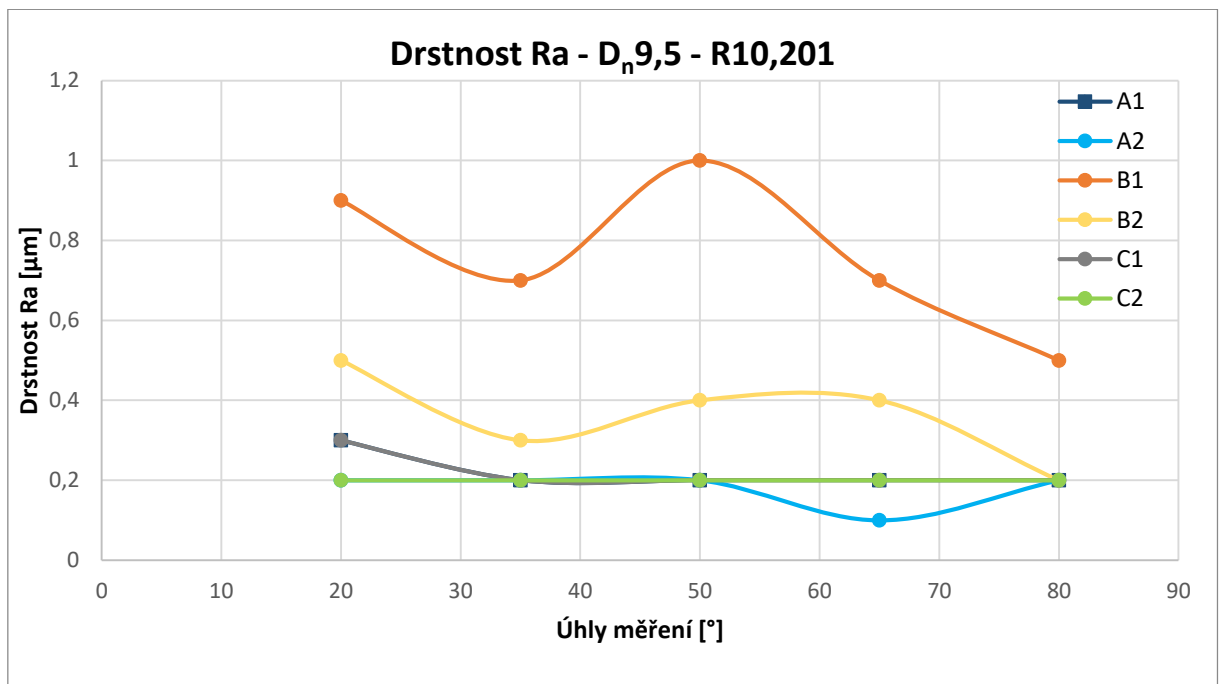
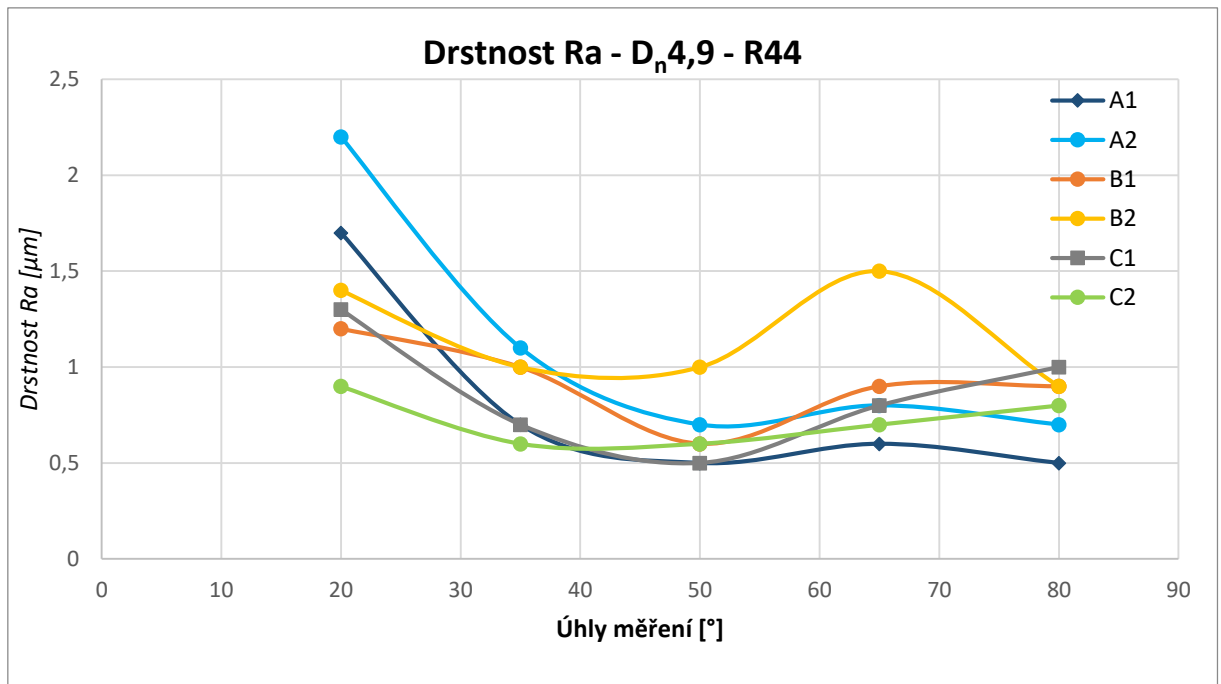
Pr. nástroje D [mm]	R. plochy [mm]	Strategie	Rz [μm]					Rz - max. [μm]	Průměr [μm]
3	30	B1	5,7	4,4	5,3	4,9	2,9	5,7	5,95
3	30	C2	6,2	4,3	2,7	3,9	1,9	6,2	
4,9	16	C2	1,8	1,6	1,6	1,5	1,7	1,8	4,2
4,9	16	B1	1,7	1,6	1,7	1,5	1,3	1,7	
4,9	44	B1	6,4	4,8	3,7	5,8	4,6	6,4	
4,9	44	C2	6,9	3	3,2	3,8	4,3	6,9	
9,5	10,201	B1	5,7	5,5	6,5	5,6	4,4	6,5	3,7875
9,5	10,201	C2	1,6	1,5	1,5	1,7	1,3	1,7	
9,5	30	C2	1,5	1,3	1,4	1,4	1,6	1,6	
9,5	30	B1	2,1	1,8	1,2	1,3	1,2	2,1	
9,5	30	B1	2,4	2	1,3	1,4	1,5	2,4	
9,5	30	C2	4,5	3,6	2,9	2,8	2,2	4,5	
9,5	49,799	B1	2,7	5,9	8,4	6,3	1,8	8,4	
9,5	49,799	C2	2,1	2,1	3,1	1,8	2,3	3,1	
14,1	16	B1	1,3	2,3	2	2	1,1	2,3	3,175
14,1	16	C2	1,5	1,7	1,6	1,5	1,5	1,7	
14,1	44	C2	3,9	3,1	2,8	3,5	3	3,9	
14,1	44	B1	4,8	3	2,9	2,7	2,3	4,8	
16	30	C2	1,8	2,1	2,3	2,7	1,9	2,7	2,95
16	30	B1	2,3	1,8	2	3,2	1,5	3,2	

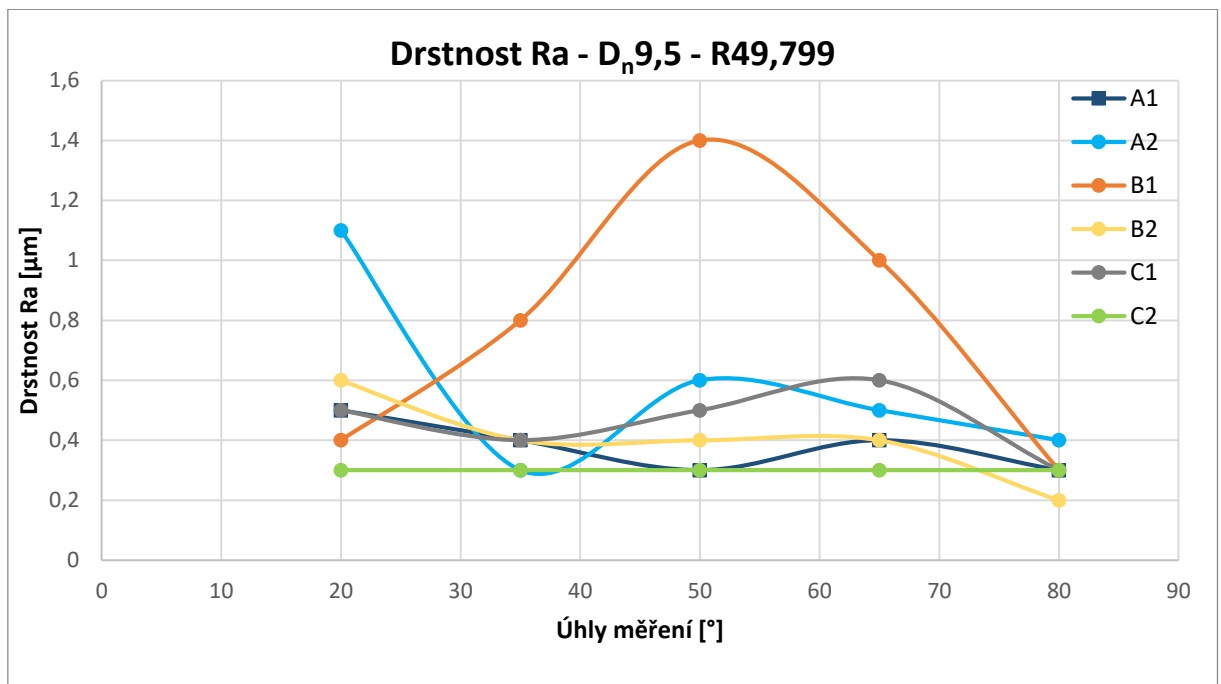
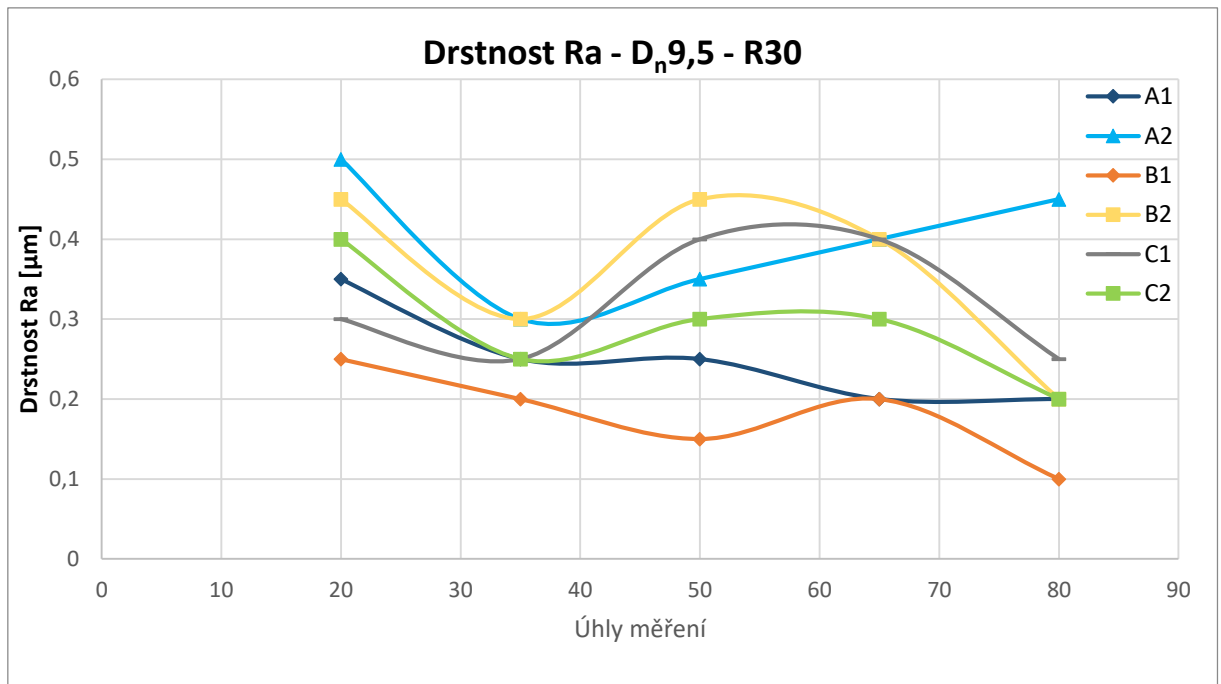
Tabulka průměrných hodnot drsnosti Rz pro všechny rádiusy ploch

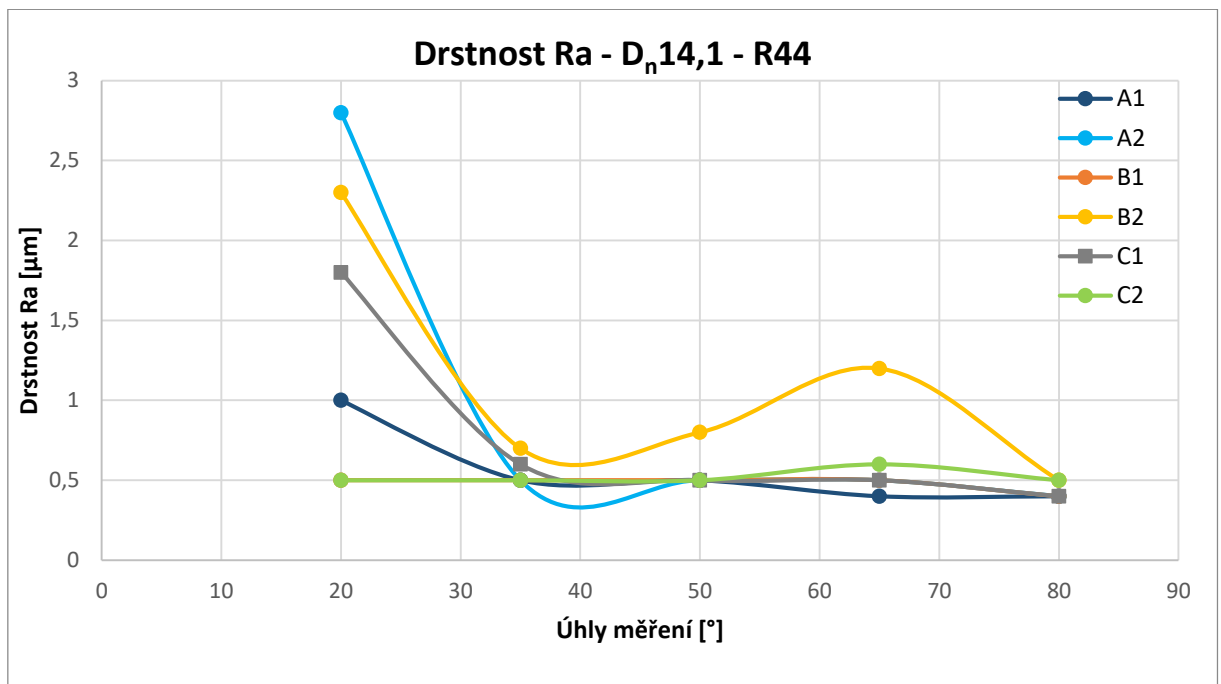
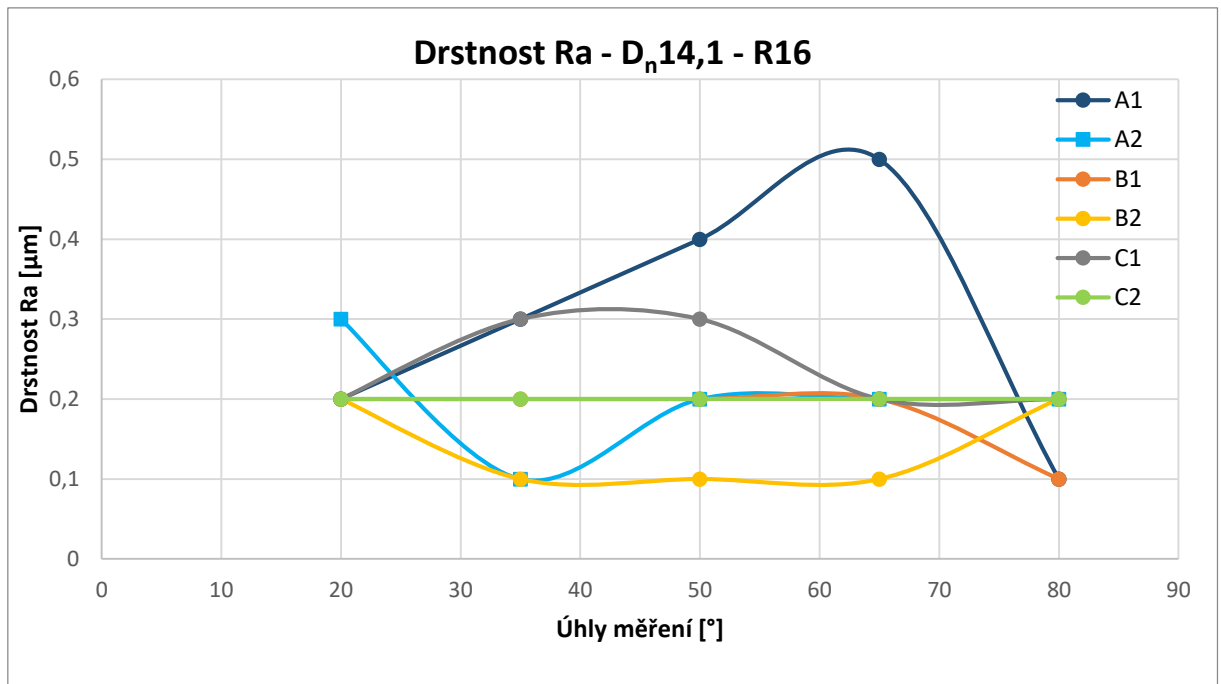
Pr. nástroje D [mm]	R.plochy [mm]	Strategie	Rz [μm]					Rz - max. [μm]	Průměr [μm]
3	30	B1	5,7	4,4	5,3	4,9	2,9	5,7	5,95
3	30	C2	6,2	4,3	2,7	3,9	1,9	6,2	
4,9	16	C2	1,8	1,6	1,6	1,5	1,7	1,8	1,75
4,9	16	B1	1,7	1,6	1,7	1,5	1,3	1,7	
4,9	44	B1	6,4	4,8	3,7	5,8	4,6	6,4	6,65
4,9	44	C2	6,9	3	3,2	3,8	4,3	6,9	
9,5	10,201	B1	5,7	5,5	6,5	5,6	4,4	6,5	4,1
9,5	10,201	C2	1,6	1,5	1,5	1,7	1,3	1,7	
9,5	30	C2	1,5	1,3	1,4	1,4	1,6	1,6	2,65
9,5	30	B1	2,1	1,8	1,2	1,3	1,2	2,1	
9,5	30	B1	2,4	2	1,3	1,4	1,5	2,4	
9,5	30	C2	4,5	3,6	2,9	2,8	2,2	4,5	
9,5	49,799	B1	2,7	5,9	8,4	6,3	1,8	8,4	
9,5	49,799	C2	2,1	2,1	3,1	1,8	2,3	3,1	5,75
14,1	16	B1	1,3	2,3	2	2	1,1	2,3	2
14,1	16	C2	1,5	1,7	1,6	1,5	1,5	1,7	
14,1	44	C2	3,9	3,1	2,8	3,5	3	3,9	4,35
14,1	44	B1	4,8	3	2,9	2,7	2,3	4,8	
16	30	C2	1,8	2,1	2,3	2,7	1,9	2,7	2,95
16	30	B1	2,3	1,8	2	3,2	1,5	3,2	

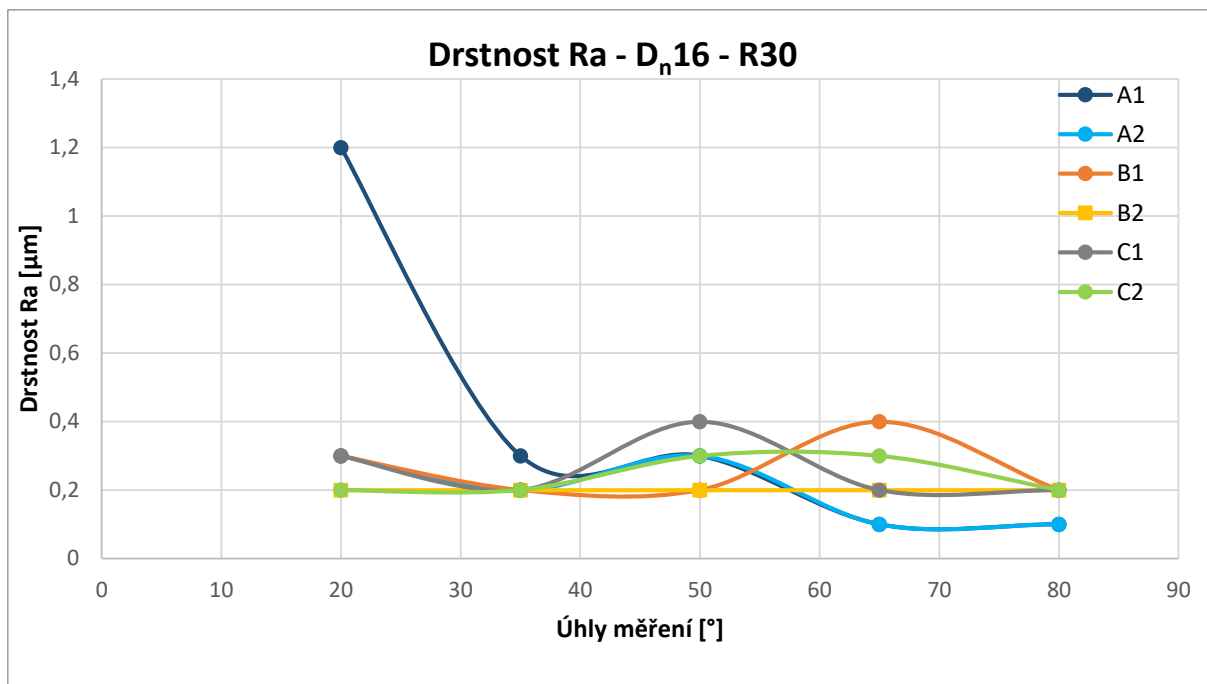
Grafy drsnosti Ra Pro jednotlivé vzorky



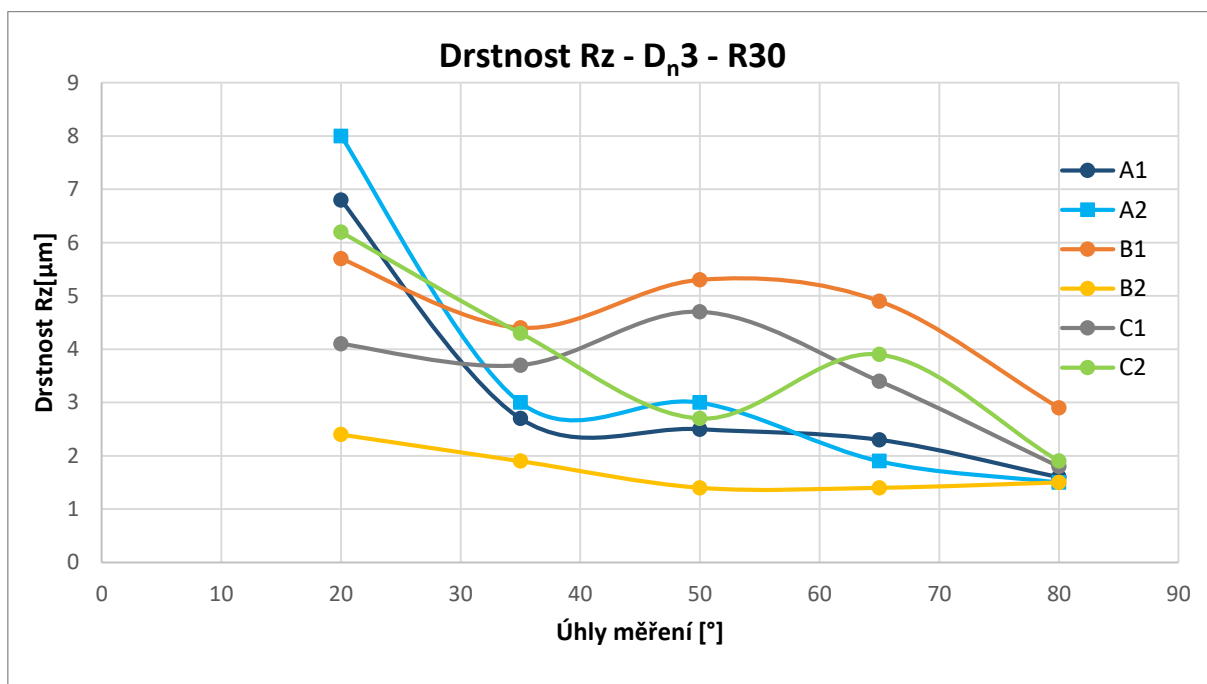


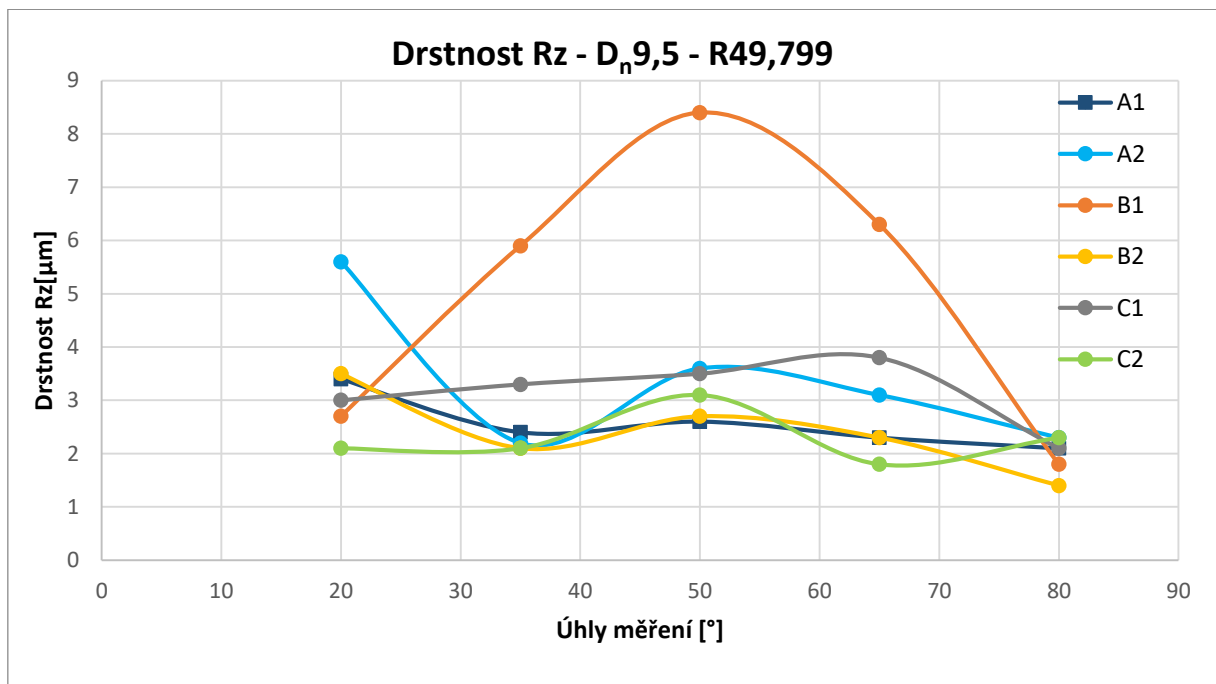
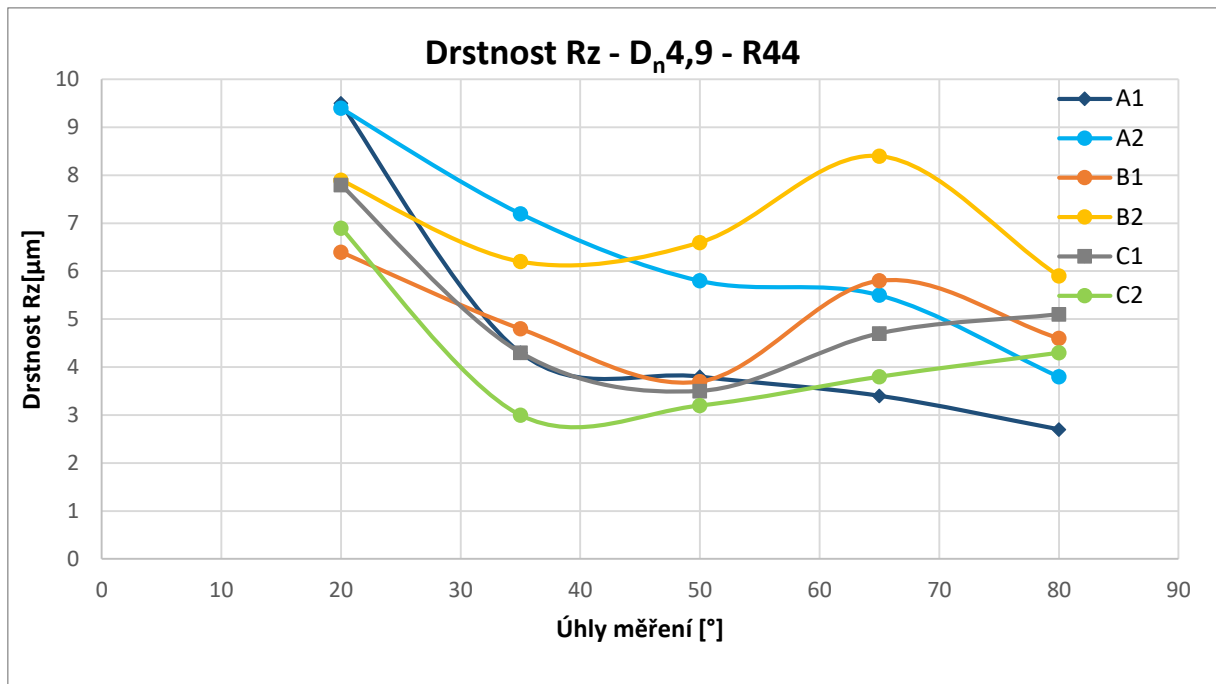


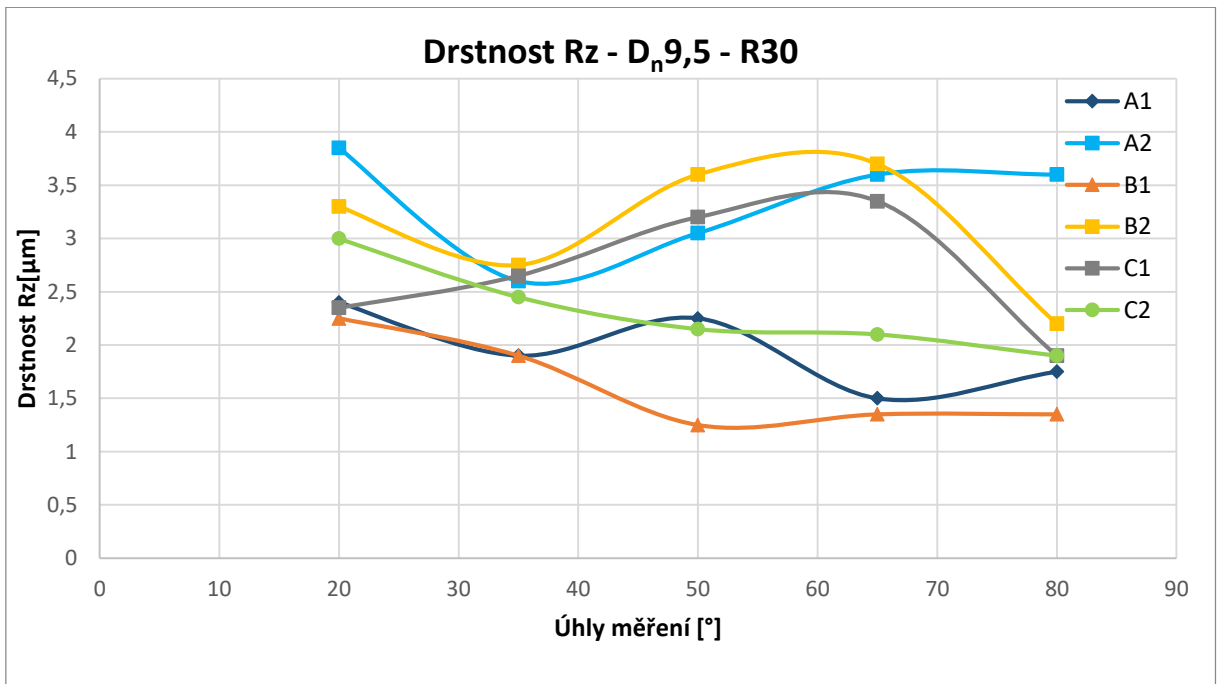
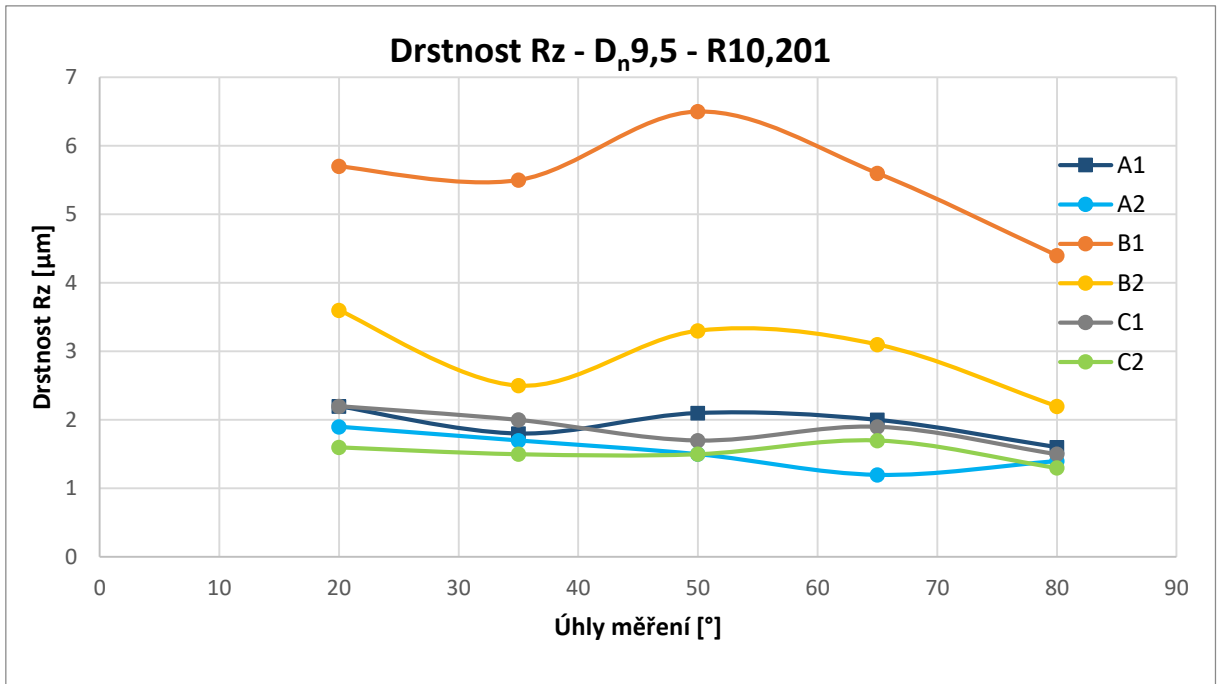


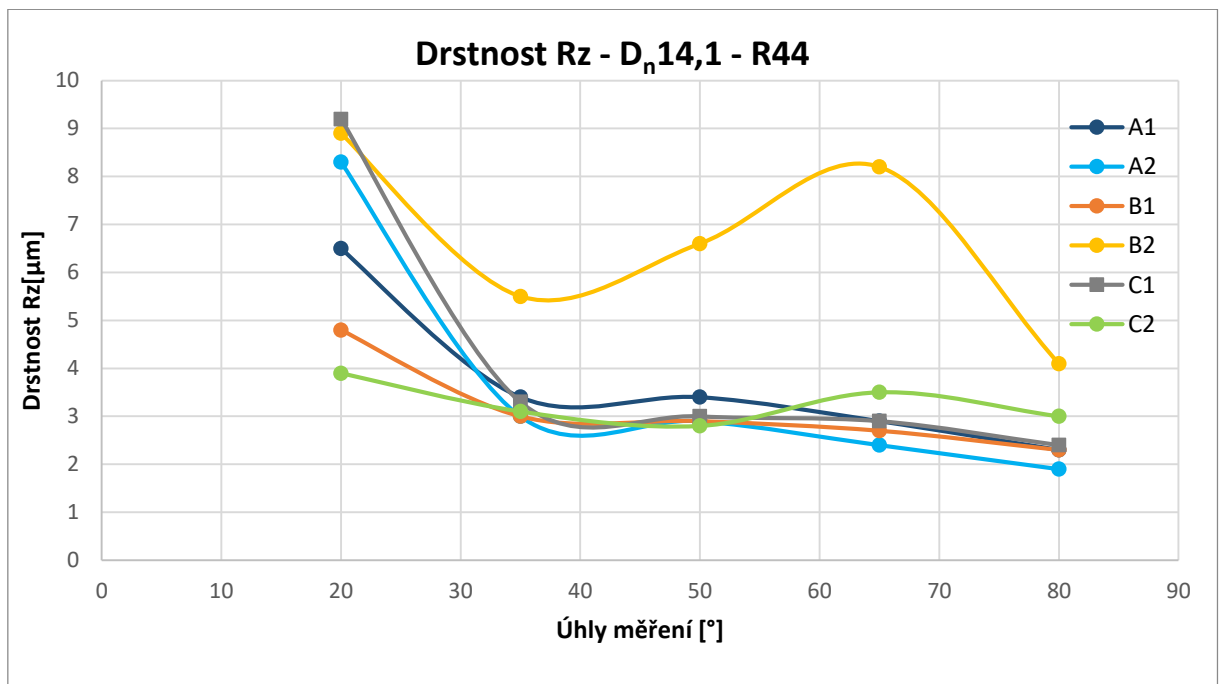
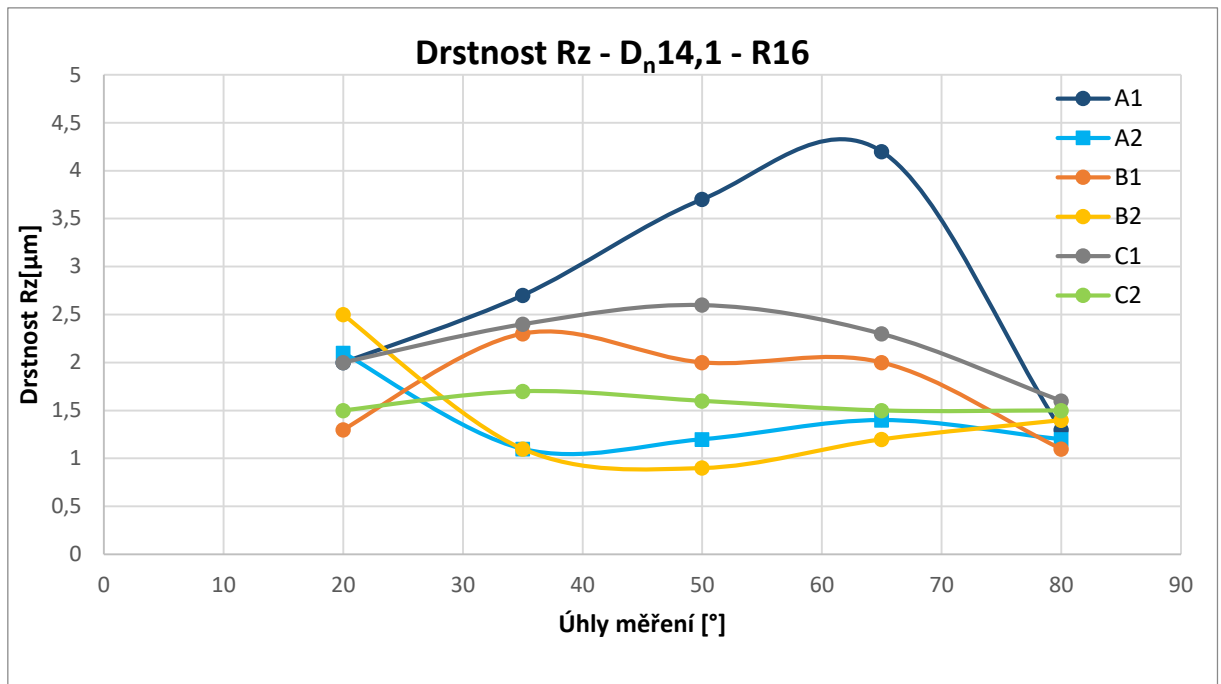


Grafy drstnosti Rz Pro jednotlivé vzorky









PŘÍLOHA č. 13

Tabulky a grafy vyhodnocení odstupů bodu od modelu pro experiment „Zkoumání kvality a rozměrové přesnosti při dokončování rádiusové plochy za použití konstantní řezné rychlosti“

Tabulka průměrných hodnot odstupu bodu od modelu pro nástroj Dn = 14,1 mm

Průměr nástroje	Rádus plochy	Strategie	Průměr odstup 20°	Průměr odstup 35°	Průměr odstup 50°	Průměr odstup 65°	Průměr odstup 80°	Průměrné hodnoty
14,1	16	A2	-0,0063	-0,0196	-0,0331	-0,0428	-0,0448	
14,1	16	B2	-0,0040	-0,0220	-0,0368	-0,0479	-0,0504	
14,1	44	C1	-0,0146	-0,0316	-0,0469	-0,0512	-0,0602	
14,1	44	A2	0,0080	0,0037	0,0009	-0,0014	0,0004	
14,1	16	C1	0,1065	-0,0248	-0,0439	-0,0595	-0,0729	
14,1	16	B1	0,0082	-0,0059	-0,0195	-0,0325	-0,0431	
14,1	44	C2	-0,0075	-0,0241	-0,0377	-0,0396	-0,0452	
14,1	16	C2	0,1125	-0,0189	-0,0383	-0,0519	-0,0591	
14,1	44	B1	-0,0038	-0,0144	-0,0254	-0,0328	-0,0343	
14,1	44	A1	0,0015	-0,0052	-0,0116	-0,0170	-0,0183	
14,1	16	A1	0,0184	0,0025	-0,0125	-0,0268	-0,0418	
14,1	44	B2	-0,0044	-0,0270	-0,0429	-0,0553	-0,0666	
Průměr			0,018	-0,016	-0,029	-0,038	-0,045	
Min			-0,015	-0,032	-0,047	-0,059	-0,073	-0,045
Max			0,112	0,004	0,001	-0,001	0,000	0,018
ch+			0,095	-0,012	-0,028	-0,040	-0,044	0,040
ch-			0,003	-0,016	-0,018	-0,021	-0,028	0,023

Grafy odstupu bodů pro jednotlivé vzorky

