

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní zaměření: Strojírenská technologie – technologie obrábění

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Vliv poloměru nástroje na kvalitu dokončování rádiusové plochy

Autor: **Bc. Tomáš Franěk**
Vedoucí práce: **Ing. Jan Hnátík, Ph.D.**

Akademický rok 2017/2018

ZADÁNÍ

ZADÁNÍ

Prohlášení o autorství

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

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

V Plzni dne:

.....

podpis autora

Poděkování

Děkuji Ing. Janu Hnátíkovi, Ph.D. za odborné vedení této diplomové práce a Ing. Luboši Kroftovi za cenné rady při jejím zpracování.

Také bych rád poděkoval panu Ing. Miroslavu Gombárovi Ph.D. za odbornou pomoc a poskytnuté rady v oblasti statistiky využité v této diplomové práci

ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Franěk	Jméno Tomáš	
STUDIJNÍ OBOR	Strojírenská technologie – technologie obrábění		
VEDOUCÍ PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) Ing. Hnátík Ph.D.	Jméno Jan	
PRACOVIŠTĚ	ZČU - FST – KTO		
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte
NÁZEV PRÁCE	Vliv poloměru nástroje na kvalitu dokončování rádiusové plochy		

FAKULTA	strojní	KATEDRA	KTO	ROK ODEVZDÁNÍ	2018
---------	----------------	---------	------------	------------------	-------------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	87	TEXTOVÁ ČÁST	75	GRAFICKÁ ČÁST	12
--------	----	--------------	----	------------------	----

STRUČNÝ POPIS	<p>Tato diplomová práce se zabývá dokončovacím frézováním rádiusových ploch se záměrem popisu vztahu mezi poloměrem nástroje a poloměrem rádiusové plochy. Vztah je demonstrován pomocí dosažené kvality dokončeného povrchu, tvarové přesnosti a dalších parametrů. V práci jsou také porovnány vybrané dokončovací strategie a zkoumán vliv konstantní řezné rychlosti na dokončování proces.</p>
KLÍČOVÁ SLOVA	<p>Dokončovací frézování, tvarové frézování, CAM, poloměr nástroje, konturovací frézování, drsnost dokončené plochy, kulová fréza</p>

SUMMARY OF DIPLOMA SHEET

AUTHOR	Surname Franek	Name Tomas	
FIELD OF STUDY	Manufacturing Processes – Technology of Metal Cutting		
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) Ing. Hnátík Ph.D.	Name Jan	
INSTITUTION	ZČU - FST - KTO		
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR	Delete when not applicable
TITLE OF THE WORK	The influence of the tool radius on the quality of radius surface finishing		

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	KTO	SUBMITTED IN	2018
---------	-------------------------------	------------	------------	--------------	-------------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	87	TEXT PART	75	GRAPHICAL PART	12
---------	----	-----------	----	----------------	----

BRIEF DESCRIPTION	<p>This diploma thesis is mainly focused on finishing milling of radius surfaces with intent to describe the relationship between the tool radius and the radius of the surface. The relationship is demonstrated by the achieved quality of the finished surface, shape accuracy and other parameters. The selected milling strategies have been compared in this thesis and the influence of constant cutting speed on the finishing process has been examined.</p>
KEY WORDS	<p>Finishing milling, profile milling, CAM, tool radius, contour milling, roughness of the finished surface, ball nose end mill</p>

Obsah

Seznam obrázků.....	9
Seznam tabulek.....	12
Seznam použitých zkratk a symbolů.....	13
1 Úvod	14
1.1 Cíle diplomové práce	15
2 Analýza současného stavu řešené problematiky	16
2.1 Shrnutí poznatků současného stavu	18
2.2 Popis a využití rádiusové plochy	19
2.3 Obráběcí stroje pro výrobu tvarových ploch	19
2.3.1 Třiosé obrábění.....	20
2.3.2 Pětiosé obrábění.....	20
2.4 Počítačová podpora při výrobě tvarových ploch	21
2.4.1 Úvod do CAM Softwaru	21
2.4.2 Rozdělení CAM.....	21
2.4.3 Strategie rozpočtu drah při 3 osém obrábění	21
2.5 Nástroje pro dokončení tvarových ploch	24
2.5.1 Popis kulových fréz	24
2.5.2 Kontaktní bod nástroje při frézování radiusových ploch.....	24
2.5.3 Směr pohybu nástroje při dokončování radiusové plochy.....	25
2.5.4 Popis toroidních fréz.....	26
2.5.5 Dostupné průměry kulových fréz a jejich konstrukční provedení.....	26
2.6 Kvalita obrobene plochy	27
2.6.1 Parametry drsnosti a její značení	27
2.6.2 Vlivy ovlivňující drsnost dokončené plochy	28
2.7 Shrnutí teoretické části.....	30
3 Praktická část diplomové práce.....	31
3.1 Cíle a plánování praktické části diplomové práce	31
3.2 Úvod do základní problematiky statistiky použité v této diplomové práci	31
3.3 Popis stroje, nástroje, obrobku, upínače a použitých pomůcek	33
3.4 Popis NC programu pro dokončování	35
3.5 Popis průběhu experimentu	36
4 Práce s dokončenými výrobky	38
4.1 Měření drsnosti dokončeného povrchu	38

4.2	Měření tvarové přesnosti	39
5	Vyhodnocení naměřených dat z technologického hlediska.....	40
5.1	Určení vlivu konstantní řezné rychlosti a konstantních otáček při dokončování	41
5.1.1	Určení vlivu zkoumané oblasti pomocí drsnosti povrchu R_a , R_z	41
5.1.2	Určení vlivu zkoumané oblasti pomocí řezných sil	43
5.1.3	Časové zhodnocení frézovacích strategií s konst. n a konst. v_c	48
5.1.4	Úspora v peněžních jednotkách na základě strojní hodinové sazby stroje.....	49
5.2	Určení vlivu frézovacích strategií.....	50
5.2.1	Drsnost povrchu R_a , R_z	50
5.2.2	Tvarová přesnost	53
5.3	Určení vlivu průměru nástroje a poloměru rádiusu ve vztahu k dokončované ploše.....	55
5.3.1	Drsnost povrchu R_a , R_z	55
5.3.2	Porovnání skutečných parametrů drsnosti R_a , R_z s teoretickými R_{a_t} , R_{z_t}	58
5.3.3	Vliv poloměru dokončované plochy na kvalitu povrchu.....	60
5.3.4	Tvarová přesnost	63
6	Vyhodnocení naměřených dat z hlediska statistiky	66
7	Celkové zhodnocení	71
8	Závěr	73
	Citovaná literatura	74

Seznam obrázků

Obr. 1	- Graf pracnosti montáže a obrábění [2].....	14
Obr. 2	- Ukázka využití rádiusové plochy [3].....	19
Obr. 3	- Ukázka rádiusové plochy	19
Obr. 4	- Orientace a značení os podle pravidla pravé ruky [4].....	20
Obr. 5	- Rádiusová plocha vyrobitelná 3osým frézováním	20
Obr. 6	- Ukázka rozpočtu drah s konstantním krokem v ose nástroje.....	22
Obr. 7	- Ukázka rozpočtu drah nástroje Constant 3D.....	22
Obr. 8	- Definice pojmu scallop height [6].....	23
Obr. 9	- Ukázka rozpočtu drah nástroje Scallop height.....	23
Obr. 10	- Porovnání monolitní čelní válcové frézy a frézy kulové s VBD [8].....	24
Obr. 11	- Kontaktní a poziční bod nástroje [6].....	24
Obr. 12	- Efektivní průměr nástroje kulové frézy a čelní válcové frézy	25
Obr. 13	- Znázornění směru obrábění.....	25
Obr. 14	- Porovnání frézy s kulovým čelem (vlevo) a frézy toroidní (vpravo) [9].....	26

Obr. 15 - Kulová fréza monolitní a kulová fréza s VBD [8]	26
Obr. 16 - Kulová fréza osazena 1 vyměnitelnou břitovou destičkou	26
Obr. 17 - kolmá a podélná drsnost [10]	27
Obr. 18 - Předepisování drsnosti na výkrese [11]	27
Obr. 19 - Parametr drsnosti Ra [11]	28
Obr. 20 - Parametr drsnosti Rz ISO [11].....	28
Obr. 21 - Ukázka závislosti posuvu a radiálního kroku frézy [2]	29
Obr. 22 - Svěrák ARNOLD SC 5x [13]	30
Obr. 23 - Centrální kompozitní plán [14].....	32
Obr. 24 - Frézovací centrum DMU eVolinear [16].....	33
Obr. 25 – Přehled použitých nástrojů a upnutá monolitní fréza D = 14,1 mm	34
Obr. 26 - Proces zpracování polotovaru	34
Obr. 27 - Upnutí polotovaru a dynamometr 5080 KISTLER.....	34
Obr. 28 - Rozbor názvu jednotlivých programů.....	35
Obr. 29 - Znázornění principu výpočtu drah nástroje při frézovací strategii A	36
Obr. 30 - Soustava pro měření řezných sil (Zleva: zesilovač signálu, digitalizační karta, SW: Dynoware)	36
Obr. 31 - Schéma náměru řezných sil.....	37
Obr. 32 - Vyhrubovaný a předdokončený polotovar	37
Obr. 33 - Dokončené rádiusové ploch	38
Obr. 34 - Znázornění měření drsnosti.....	38
Obr. 35 - Ukázka náměru vodorovné a svislé drsnosti.....	39
Obr. 36 - CMM Carl Zeiss Prismo 7 Navigator [17].....	39
Obr. 37 - Znázornění měření tvarové přesnosti.....	39
Obr. 38 - Vyhodnocovaná oblast po zanedbání 1. bodu.....	40
Obr. 39 - Graf znázorňující drsnost Rz - dle řezných podmínek.....	42
Obr. 40 - Graf znázorňující drsnost Ra - dle řezných podmínek.....	43
Obr. 41 - Orientace řezných sil a vektorových součinů při dokončování (Pohled shora).....	44
Obr. 42 - Graf znázorňující dosahované hodnoty Fxy	45
Obr. 43 - Graf znázorňující průběh vektorového součinu řezných sil Fx, Fy	46
Obr. 44 - Graf znázorňující dosahované hodnoty Fxy	47
Obr. 45 - Graf znázorňující průběh řezné síly Fc	47
Obr. 46 - Příklad grafu znázorňující časové srovnání dokončovacích strategií a úsporu při dokončování s $v_c = \text{konst.}$	48
Obr. 47 - Graf znázorňující průběh parametru Ra.....	51

Obr. 48 - Graf znázorňující průběh parametru Rz.....	51
Obr. 49 - Graf znázorňující průměr a rozptyl parametru Ra	52
Obr. 50 - Graf znázorňující průměr a rozptyl parametru Rz	52
Obr. 51 - Skutečná a ideální plocha rádiusu $R = 49,799$	54
Obr. 52 – Odstup bodu od modelu u jednotlivých dokončovacích strategií	54
Obr. 53 - Průměr a rozptyl odstup bodu od modelu u dokončovacích strategií	55
Obr. 54 - Srovnání teoretických a skutečných hodnot drsnosti Ra	59
Obr. 55 - Srovnání teoretických a skutečných hodnot drsnosti Rz	59
Obr. 56 - Graf znázorňující průběh parametru Rz.....	62
Obr. 57 - Graf znázorňující průměr a rozptyl parametru Rz	62
Obr. 58 - Graf znázorňující odstup bodu od modelu u jednotlivých průměrů nástroje.....	64
Obr. 59 - Graf znázorňující průměr a rozptyl pro jednotlivé průměry nástroje	64
Obr. 60 - Odstup bodu od modelu u jednotlivých poloměrů rádiusových ploch	65
Obr. 61 - Průměr a rozptyl odstup bodu od modelu u dokončovacích rádiusů	65
Obr. 62 - Statistický vliv frézovací strategie na vektorový součin F_{xy}	67
Obr. 63 - Vliv průměru nástroje na parametr Rz.....	68
Obr. 64 - Vliv poloměru rádiusové plochy na parametr Rz	69
Obr. 65 - Statistický vliv rádiusu dokončované plochy na vektorový součin F_{xy}	70
Obr. 66 - Statistický vliv průměru nástroje na vektorový součin F_{xy}	70

Seznam tabulek

Tab. 1 - Zvolené faktory experimentu	32
Tab. 2 - Rz - konstantní otáčky	41
Tab. 3 - Rz - konstantní řezná rychlost.....	42
Tab. 4 - Ukázka vyhodnocení řezných sil	44
Tab. 5 – Fxy - konstantní otáčky	45
Tab. 6 – Fxy - konstantní řezná rychlost	45
Tab. 7 – Vektor řezné síly F_c , - konstantní otáčky a konstantní řezná rychlost.....	46
Tab. 8 - Přehled časové úspory u jednotlivých kombinací $\varnothing D$ a R v procentech.....	48
Tab. 9 - Přehled časové úspory pro jednotlivé kombinace $\varnothing D$ a R v minutách.....	49
Tab. 10 – Celková časová úspora stroje vyčíslená v peněžních jednotkách	50
Tab. 11 - Ukázka tabulky hodnotící odstup bodu od modelu pro strategii A1.....	53
Tab. 12 - Vliv průměru nástroje na kvalitu dokončované plochy - parametr Ra	56
Tab. 13 - Vliv průměru nástroje na kvalitu dokončované plochy - parametr Rz	57
Tab. 14 - Vliv poloměru plochy její kvalitu - parametr Rz	60
Tab. 15 - Vliv poloměru plochy její kvalitu - parametr Ra (Výňatek).....	61
Tab. 16 - Ukázka tabulky hodnotící odstup bodu od modelu pro $\varnothing D = 14,1$ mm.....	63
Tab. 17 - Znázornění způsobu volby hypotézy	66
Tab. 18 - Znázornění vlivu průměru nástroje a poloměru rádiusu na parametr Rz.....	67
Tab. 19 - Scheffeho test pro vliv poloměru rádiusu na Rz	68
Tab. 20 - Scheffeho test pro vliv poloměru rádiusu na Ra	69

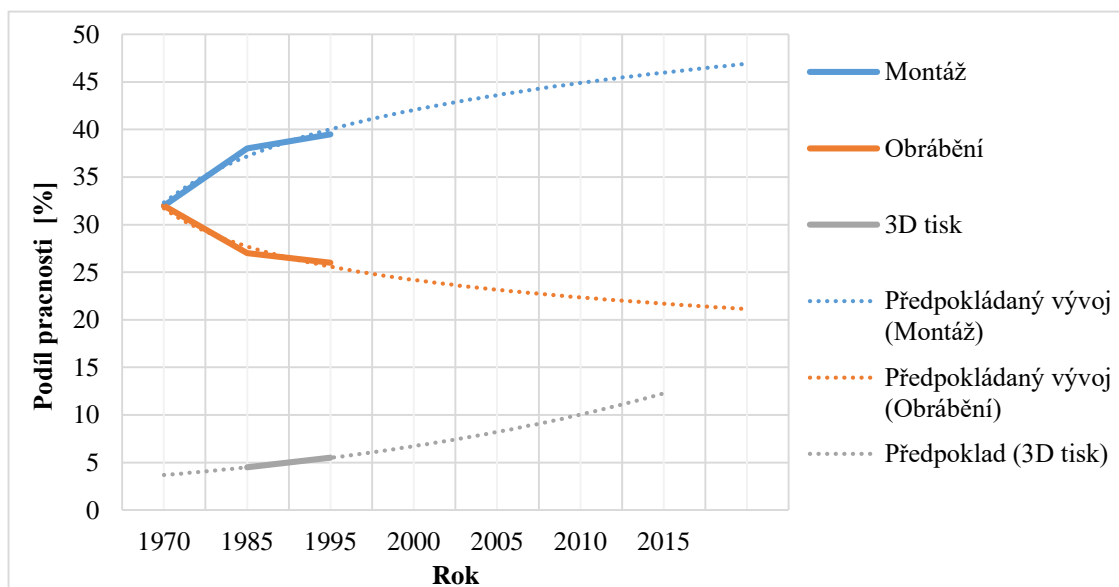
Seznam použitých zkratk a symbolů

Zkratka, symbol	Význam	Jednotka
CAD	Computed aided design – počítačová podpora konstrukce	-
CAM	Computed aided manufacturing – počítačová podpora výroby	-
NC	Numerical control – číslicově řízený	-
HSC	High speed cutting – vysokorychlostní řezání (obrábění)	-
CNC	Computer numerical control – počítačově řízený	-
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
a _e	Radiální krok nástroje	mm
a _p	Axiální krok nástroje	mm
v _c	Řezná rychlost	m/min
f	Posuv	mm
f _z	Posuv na zub	mm/zub
v _f	Posuvová rychlost	mm/min
R	Poloměr rádiusové plochy	mm
ØD	Průměr nástroje	mm
ØD _e	Efektivní průměr nástroje	mm
ØD _t	Teoretický průměr nástroje	mm
SNOP	Soustava obrábění - stroj, nástroj, obrobek, (upínač) přípravek	-
CC	Cutter contact – bod doteku nástroje	-
VBD	Vyměnitelná břitová destička	-
α,β,γ	Úhel čela, úhel břitu, úhel hřbetu	°
F _x , F _y , F _z	Řezné síly ve směru x, y, z	N
F _{xy} , F _c	Vektorový součin F _x , F _y , vek. Součin F _x , F _y , F _z	N
ch+, ch-	Maximální odchylka, Minimální odchylka	μm
α	Zvolená hladina významnosti	-
H ₁	Nenulový hypotéza	-
H ₀	Nulová hypotéza	-
p	Vypočtená hladina významnosti	-

1 Úvod

Obrábění je definováno jako technologický proces, při kterém dochází k úběru materiálu mechanickými, chemickými nebo kombinovanými způsoby. [1] V případě strojního obrábění řezáním, odebíráme materiál břitem řezného nástroje ve formě třísky. Tento proces je realizován na obráběcím stroji, kde zdrojem mechanické práce je elektromotor. Historie strojního obrábění sahá svými kořeny až do 18. století. Od té doby byla tato oblast zkoumána a aktivně rozvíjena. K jejímu rozvoji přispěla skutečnost neustále se zvyšujících požadavků na produktivitu a ekonomičnost obráběcího procesu.

Pokrok zaznamenala i výpočetní technika, která se začala aktivně využívat ve prospěch strojního obrábění jako počítačová podpora výroby v podobě CAD a CAM technologií. CAD představoval evoluci ve způsobech vytváření a editace technické dokumentace. CAM přinesl inovace, změnu a usnadnění ve tvorbě NC kódů a možnost vizualizace obráběcího procesu. V souvislosti s tematikou této práce se budu problematice CAM systému věnovat podrobněji v kapitole 2.4.



Obr. 1 - Graf pracnosti montáže a obrábění [2]

Na základě předpokladu vývoje vyplývajícího z grafu pracnosti je vidět, že největší podíl pracnosti zabírá ruční montáž, zatímco podíl obrábění klesá. Jednouúčelové obráběcí stroje jsou nahrazovány multifunkčními obráběcími centry za jediným účelem – vyrobit součást požadované kvality v co nejkratším čase. Obráběcí centrum lze definovat jako multifunkční zařízení disponující různými technologiemi výroby (soustružení, frézování, vrtání apod..) nainstalovanými v jednom obráběcím stroji. Hlavním přínosem obráběcího centra je tedy možnost obrobít danou součást ideálně na jedno upnutí tzv. kompletním obráběním.

Řada moderních výrobků se vyznačuje rostoucí tvarovou a rozměrovou složitostí, které se musí výrobci řezných nástrojů a obráběcích strojů přizpůsobit, aby udrželi svoje místo na trhu. Na základě těchto skutečností došlo ve 21. století k rozvoji technologických možností obráběcích center. Moderní centra umožňují obrábění ve třech až pěti osách současně. Dochází zde k vzájemné kombinaci pohybů nástroje a obrobku. Do obráběcích center bývají také výjimečně zapojovány nekonvenční technologie, jako je například laser. Laser lze využít například pro natavování obráběného materiálu (Laser supported turning), ale i pro další technologie jako je vrtání, gravírování, svařování atd.

Mezi moderní trendy výroby se zařadila také technologie 3D tisku. (stereolitografie, selective laser sintering). Na rozdíl od obrábění, kde zpravidla materiál ubíráme se při 3D tisku materiál přidává. Obecně jsou tiskové technologie založeny na vrstvení materiálu upevněném na klesajícím stole. V případě laserového sintrování je výrobek po jednotlivých vrstvách navarován laserem. Technologii laserového sintrování lze např. využít i pro opravování zmetkovitých dílů. 3D tisk zatím nachází své uplatnění převážně v leteckém průmyslu, nebo v lékařství. V procesu třískového obrábění lze 3D tisk brát spíše jako zajímavou alternativu obrábění, sloužící například pro efektivní výrobu prototypů (rapid prototyping). O plnohodnotné konkurenci obráběcích strojů, resp. multifunkčních obráběcích center nemůžeme hovořit z důvodu vysoké spotřeby energie a především celkových nákladů této technologie.

Obráběcí proces se obecně skládá z hrubování a dokončování. V případě nutnosti zrovnoměnění přídavku na dokončení se může zařadit ještě proces předdokončení. Hrubováním je odebrána většina přebytečného (nevyužitého) materiálu s požadavkem pro rychlý a efektivní úběr. Tuto skutečnost potvrzuje i vznik moderních obráběcích technologií typu HSC, iMachining. U dokončovacích procesů se klade důraz jak na efektivitu obrábění, tak i na rovnoměrnou jakost povrchu, na rozměrovou a geometrickou přesnost. Dokončování tvarově složitých součástí je obvykle realizováno řádkovacími procesy. V případě součástí (např. forem) menší hloubky lze použít i procesy kopírovací. Dokončování rádiusových ploch je prováděno prostřednictvím fréz s kulovým čelem různých průměrů. Právě aplikace nástroje určitého poloměru na obrobení rádiusové plochy navrženého poloměru může mít stěžejní vliv na jeden z důležitých faktorů dokončené plochy a to na její drsnost.

1.1 Cíle diplomové práce

Cíle této diplomové práce vycházejí z problematiky zefektivňování dokončovacích strategií pro složité prostorové tvary řešené na Katedře technologie obrábění. Tato problematika byla již zkoumána z několika hledisek a nyní se intenzivně pracuje na použití konstantní řezné rychlosti pro dokončovací frézování těchto tvarových ploch.

Jedním z dílčích cílů je zjištění vlivu změny poloměru nástroje na rozměrovou přesnost a kvalitu dokončené plochy. Tímto tématem se zabývá tato diplomová práce.

Ačkoli název této práce pracuje s termínem „poloměr nástroje“, již na počátku zpracování teoretické části se jako vhodnější prostředek pro popisování vztahů a závislostí nabízel termín „průměr nástroje“. Důvodem této změny je snazší orientace v problematice. Vzhledem k charakteru práce, nedochází změnou pojmů ke znehodnocení nebo zkreslení poznatků zjištěných v této práci a ani ovlivnění závěru, k němuž jsem v této práci dospěl.

V této diplomové práci hrají podstatnou roli následující faktory: průměr nástroje, poloměr dokončované rádiusové plochy, trojice frézovacích strategií určených pro dokončování a konstantní řezná rychlost (resp. konstantní otáčky). Cílem této práce je jednotlivé faktory mezi sebou porovnat a určit, zda mezi nimi existuje nějaký vztah, nebo provázanost. Tento vztah bude vysvětlen pomocí dosažené kvality dokončené plochy jednotlivých vzorků.

K získání co nejvíce obecného vztahu bude pro průměr nástroje a poloměr dokončované plochy zvolen rozsah hodnot průměrů nástroje a poloměru rádiusových ploch. Jednotlivé vzorky budou v experimentální části práce dokončeny pomocí zvolených frézovacích strategií při aplikaci konstantní řezné rychlosti, nebo konstantních otáček. Pro zjištění kvality dokončeného povrchu bude naměřena nejvyšší hodnota drsnosti povrchu ve vodorovném a svislém směru. Zjištění tvarové přesnosti bude realizováno proměřením každého vzorku na 3D měřicím přístroji a následně porovnáním rozdílu naměřeného bodu od polohy bodu na „ideálním“ 3D modelu vytvořeného v CAD systému.

2 Analýza současného stavu řešené problematiky

Pro zjištění aktuálního stavu řešené problematiky byla provedena rešerše literárních zdrojů. Vyhledání adekvátních literárních zdrojů proběhlo na základě klíčových slov definovaných v anotačním listě diplomové práce. V následujících odstavcích bude stručně pohovořeno o záměru vybraných prací.

1. **Bc. ANDRLÍK, Jiří. Návrh strategie dokončování tvarových ploch. [Online] 2016. [Citace: 30. Zář 2017.] <https://portal.zcu.cz/portal/studium/prohlizeni>.**

V diplomové práci byl primárně zkoumán vliv řezné rychlosti při dokončovacím frézování tvarových ploch. Dále bylo cílem navržení obráběcích strategií pro frézování tvarových ploch. Strategie byly v závěru práce porovnány podle různých hledisek. Experiment byl realizován s konstantní řeznou rychlostí.

Bc. Jiří Andrlík aplikoval tvarové frézování na plochách skloněných pod různým úhlem. Na základě vyhodnocení použitých strategií v práci loňského diplomanta vyšla jako nejvýhodnější strategie s rozpočtem drah dle tvaru plochy a s konstantní řeznou rychlostí. Právě tento závěr je výchozím bodem mé práce a důvodem k pokračování ve výzkumu.

Základní odlišnost mé práce však spočívá v charakteru obráběné plochy. Jak již bylo uvedeno v předchozí kapitole, na rozdíl od Bc. J. Andrlíka bych se rád zaměřil na dokončování ploch rádiusových.

2. **Bc. FÜGNER, Tomáš. Výroba přesných volných ploch frézováním. [Online] 2016. [Citace: 19. Říjen 2017.] https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/66560/F2-DP-2016-Fugner-Tomas-Diplomova-prace_Fugner.pdf?sequence=-1.**

Tato práce se zabývá frézovacími strategiemi při výrobě tzv. volných ploch. Je zde rovněž zkoumána produktivita výroby těchto ploch a kvalita tvarové plochy. Podkladem pro praktickou část diplomové práce byla tvarová plocha sloužící pro optické aplikace. Hlavním záměrem bylo najít kompromis mezi optimalizací dráhy nástroje, produktivitou, výrobním časem a přesností finálního povrchu. Experimentem bylo potvrzeno, že vybraná metoda sousledného obrábění (ZIG) dosahuje požadované přesnosti.

3. **Bc. MATULA, Lukáš. Jakost povrchu při frézování kulovou frézou na nakloněných plochách. [Online] 2014. [Citace: 10. Listopad 2017.] <http://docplayer.cz/19159934-Jakost-povrchu-pri-frezovani-kulovou-frezou-na-naklonenych-plochach-bc-lukas-matula.html>.**

Teoretická část je tvořena popisem frézovacích nástrojů a frézovacích strojů. Je zde také rozebrána metodika vyhodnocení drsnosti povrchu. V praktické části byl vytvořen model s nakloněnými plochami, pro který byla určena strategie obrábění. Model byl následně obroben na CNC stroji. Po obrobení výrobků byla naměřena data drsností povrchu pro vyhodnocení kvality jednotlivých obrobených ploch. Práce zkoumá hodnoty parametrů drsnosti R_a a R_z v závislosti na sklonu plochy s odlišnou šířkou záběru a_e , vliv nástroje na parametry drsnosti povrchu R_a a R_z . Dále porovnává kvalitu obrobené plochy při změně posuvové rychlosti, řezné rychlosti, druhu frézování. Na základě experimentu byl zjištěn velký vliv šířky záběru a částečně i sklon nástroje na výslednou drsnost obrobené plochy.

4. **Bc. MÁČALA, Adam. Vliv strategie obrábění na jakost povrchu při CNC frézování. [Online] 2011. [Citace: 6. Prosinec 2017.] http://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/15496/m%E1%20ala_2011_dp.pdf?sequence=1.**

Diplomová práce Bc. A. Máčaly se zaměřuje na zkoumání vlivu mezi vybranými řeznými podmínkami a drsností obrobeného povrchu vyrobeného CNC frézováním. V teoretické části jsou zmíněny okruhy, které slouží k lepšímu pochopení problematiky prováděné v experimentu. Experiment spočíval v obrobení konkávní a konvexní rádiusové plochy kulovými nástroji různých průměrů. Po obrobení následovalo vyhodnocení závislosti průměru nástrojů na drsnosti dokončené plochy, závislosti radiálního kroku a_e na drsnosti povrchu a závislost parametru scallop height rovněž na drsnosti povrchu. Ve všech třech případech bylo dokázáno, že mezi sledovanými faktory je přímá úměra. Na závěr byl rovněž porovnán strojní čas samotné výroby s časem odhadovaným na výrobu použitým CAM softwarem. Čas odhadnutý CAM softwarem byl nižší.

5. VIJAYARAGHAVAN, Athulan. **Improving endmilling surface finish by workpiece rotation and adaptive toolpath spacing.** *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. [Online] 17. Květen 2008. [Citace: 17. Listopad 2017.]
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0890695508001454?via%3Dihub>.

V práci jsou prezentovány dvě metody ke zlepšení kvality povrchu součástí dokončených kulovou frézou. V první metodě je povrch vylepšen hledáním optimálního úhlu natočení polotovaru a ve druhé metodě je povrch vylepšován adaptivně proměnou velikostí kroku při použití rastrové dráhy nástroje. Jedná se o obrábění nepravidelné tvarové plochy s konvexními i konkávními tvary. Výsledky jsou ověřeny na experimentu, který prokázal, že strategie proměnné mezery mezi drahami nástroje zlepšuje kvalitu povrchu až o 50% s malým nárůstem délky dráhy nástroje.

6. MLAĐENOVIĆ, C. **The influence of milling strategies on roughness of complex surfaces.** *Journal of Production Engineering*. [Online] 17. Leden 2014. [Citace: 17. Listopad 2017.]
<http://www.jpe.ftn.uns.ac.rs/papers/2014/no1/10-Mladjenovic.pdf>.

Tato práce analyzuje vliv frézovacích strategií na drsnost povrchu. Cílem bylo porovnání čtyř frézovacích strategií ($z = const$, $z \neq const$, *Raster* 0°, *Raster* 90°) a výběr takové, po které je redukováno, nebo úplně vyloučeno ruční leštění pro dosažení požadované drsnosti. Pro porovnání byl proveden experiment. Experiment spočíval v obrobení celkem čtyř identických tvarových součástí skládajících se z tvarových ploch pod úhly 85 – 5°. Pro dokončení každé součásti byla použita jedna ze 4 frézovacích strategií. Nástrojem byla kulová fréza. Po provedení experimentu bylo zjištěno, že pro plochy s relativně malou hodnotou úhlu vzniká nejvhodnější povrch použitím strategie $z = const$. Při plochách skloněných pod větším úhlem byla nejvhodnější strategie $z \neq const$. Strategie *Raster* se při použití kulové frézy ukázali jako nevhodné pro dokončování rovných ploch.

7. JAIN, Prakhar a DUVEDI, Ravinder Kumar. **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.** *PhD Thesis*. [Online] 2016. [Citace: 20. Říjen 2017.]
<http://tudr.thapar.edu:8080/jspui/bitstream/10266/4079/5/4079.pdf>.

V této disertační práci byl naprogramován algoritmus pro dráhu nástroje při obrábění konkávních a konvexních NURBS (Non-uniform rational B-spline) povrchů kulovou frézou. Dalším cílem této práce bylo zjistit efekt vliv poloměru nástroje na obrábění konvexního a konkávního NURBS povrchu. Bylo zjištěno, že poloměr má velký vliv na minimální možnou

výšku nerovnosti (scallop height). Menší poloměr nástroje pomáhá dosáhnout kvalitnějšího povrchu bez značného nárůstu přejezdů nástroje.

2.1 Shrnutí poznatků současného stavu

Společným znakem všech výše uvedených prací je výroba tvarových ploch různého charakteru a následné dokončení pomocí nástroje s kulovým čelem. Hlavním cílem prací byla optimalizace dokončovacího procesu, porovnání vybraných frézovacích strategií, nebo provedení experimentu pro zjištění závislosti mezi vybranými parametry.

Na základě shrnutí současného poznání lze říci, že problematika závislosti průměru nástroje na drsnosti dokončované rádiusové plochy již byla určitým způsobem zkoumána. Společným znakem pro nalezené práce, pojednávající o této problematice je skutečnost, že ve všech případech byla obráběna vždy rádiusová plocha pevně stanoveného poloměru různými průměry nástrojů. Tím pádem závěr plynoucí z těchto prací lze považovat za hodnotný, pouze tehdy, pokud obrábíme poloměr se shodným rozměrem. Jako další zjištěný poznatek zmíním použití CAM softwaru pro vygenerování dráhy nástroje. Moderní CAM softwary umožňují nadefinovat různé hodnoty programu tak, aby si mohl programátor co nejvíce obráběcí proces přizpůsobit své představě. I přes to ale dochází v některých případech k tomu, že CAM software při výpočtu drah potlačí programátorem zadané hodnoty, resp. je nedodrží zcela přesně a přizpůsobí si dráhy nástroje na základě principů, podle kterých je naprogramován viz kapitola 2.4. Jedním z takových případů může být i obrábění rádiusové plochy. Zařazením CAM softwaru do experimentu se tedy zvyšuje počet faktorů ovlivňujících samotný experiment a může to být důvod pro zpochybnění správnosti vyvozených závěrů. Další rozdíl v mé diplomové práci představuje i realizace dokončovacího obrábění za pomoci metody konstantní řezné rychlosti.

V experimentální části mé diplomové práce bude realizováno obrábění rádiusových ploch určených poloměrů kulovými nástroji se zvoleným rozsahem průměrů. To znamená, že na rozdíl od analyzovaných prací bude v mé práci proměnný jak průměr nástroje, tak i poloměr rádiusové plochy. Díky tomu bude možné vyvodit obecnější závislost mezi poloměrem obráběné plochy, průměrem nástroje a výslednou drsností povrchu. Pro svoji experimentální část bych také rád využil generování drah nástroje v programu Microsoft Excel na základě rovnice kružnice - tedy absenci jakéhokoliv CAM softwaru právě na základě výše uvedených důvodů.

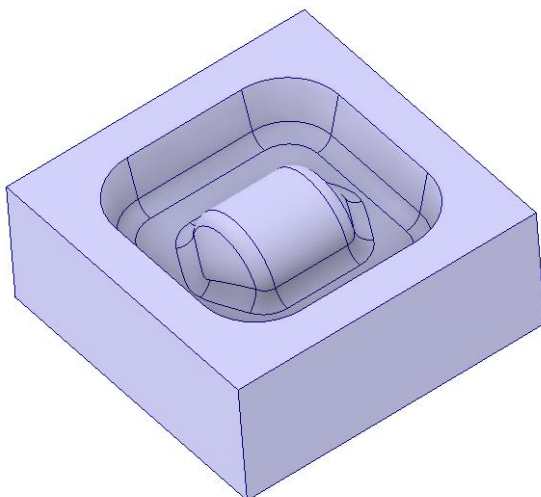
2.2 Popis a využití rádiusové plochy

Rádiusové plochy se uplatňují ve většině odvětví moderního průmyslu, kde je požadavek na tvarově složité díly (strojírenství, automotive, letectví, energetika, popř. zdravotnictví viz Obr. 2).



Obr. 2 – Ukázka využití rádiusové plochy [3]

Rádiusová plocha může být chápána, jako tvarová plocha určitého poloměru R . Tvarové plochy jsou často kombinací zaoblených křivek (spline), profilů propojených zaoblenou trajektorií, nebo představují zaoblený přechod mezi ostrým rohem. Tvarové plochy mohou tvořit samostatnou součást, nebo jsou prvkem na jinak tvarově pravidelném dílu. Na Obr. 3 je rádiusová plocha znázorněna v podobě vnitřních zaoblených přechodů v rozích, na dně kapsy a pak také na výstupku uprostřed.

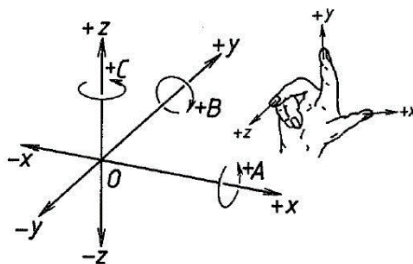


Obr. 3- Ukázka rádiusové plochy

Ve strojírenském průmyslu se s rádiusovou plochou ve většině případů setkáváme v podobě znázorněné na Obr. 3. Zaoblení rádiusové plochy zajišťuje spojitou změnu tvaru a eliminuje např. vznik vrubu. Drážky obrobene frézou, nebo osazení vyrobená soustružnickým nožem, obsahují rovněž zaoblené hrany, což je dáno poloměrem zaoblení špičky nástroje, resp. špičky řezné destičky. Použití a velikost rádiusové plochy je většinou ovlivněna funkčním požadavkem konkrétního dílu. V krajních případech se může jednat o designový prvek součásti.

2.3 Obráběcí stroje pro výrobu tvarových ploch

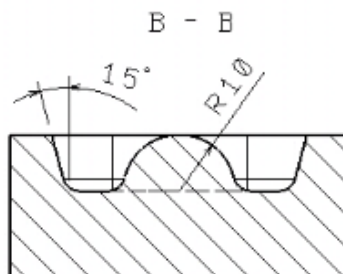
Tvarové plochy lze vyrobit např. použitím moderních technologií (3D Tisk). Ve většině případů je však využívána výroba frézováním. Díky moderním obráběcím centrům lze tento požadavek efektivně plnit. Pro výrobu tvarových ploch se nejčastěji uplatňuje tří, nebo pětiosé obrábění. Pro přehlednost a upřesnění os využívaných v obrábění, je zde uveden obrázek s jejich značením a orientací podle pravidla pravé ruky.



Obr. 4 - Orientace a značení os podle pravidla pravé ruky [4]

2.3.1 Třiosé obrábění

Při tříosém obrábění se rozumí plynulý pohyb os X,Y,Z, přičemž je každá osa řízena současně. Stroje se nazývají tříosé frézky. [5]. Při tomto způsobu obrábění je osa nástroje stále v kolmém směru k souřadnému systému obrobku. Z důvodu absence naklápění obrobku, nebo nástroje je nutné většinu rádiusových ploch vyrábět řádkováním pomocí kulového nástroje. Příklad rádiusové plochy vyrobitelné tříosým obráběcím strojem můžete vidět na Obr. 5



Obr. 5 - Rádiusová plocha vyrobitelná 3osým frézováním

2.3.2 Pětiosé obrábění

Pro pětiosé obrábění je rovněž charakteristický pohyb ve 3 osách X,Y,Z. Tento pohyb je ještě navíc doplněn rotacemi okolo jednotlivých os. [5]. Pětiosé obrábění se uplatňuje při výrobě tvarových a rádiusových ploch, kde je současné natočení obrobku a nástroje cestou k vyšší produktivitě výroby např. využitím kratších nástrojů. Otočné pohyby obrobku a nástroje jsou sladěny podle konkrétní obráběné plochy. Natočení nástrojů umožňuje jejich hospodárnější využití a tedy menší počet výměny nástrojů (např. sražení hran natočením frézy namísto srážecí.)

V případě frézování kulovým nástrojem je možné nástroj vyklonit o programátorem definovaný úhel. Při užití vyklonění hovoříme o strategii frézování vlečením, nebo tlačáním nástroje. Tím eliminujeme obrábění středem kulové frézy, kde je nulová řezná rychlost. Vykloněním nástroje dochází zároveň i ke změně působení směru řezných sil, což se negativně projeví na tuhosti celé obráběcí soustavy, a tedy na výsledné přesnosti obrobku.

Obecně lze většinu složitých tvarových ploch vyrobit i na tříosém stroji. Taková výroba by ale byla často zdlouhavá a neefektivní. Z této skutečnosti pramení primární výhoda a aplikace pětiosých obráběcích strojů (center), u kterých je výroba mnohem rychlejší. Nevýhodou pak může být omezená tuhost soustavy SNOP při naklápění a případné polohové nepřesnosti při návratu do výchozí polohy obrobku. Dále pak také ekonomické faktory, jako je cena stroje a cena jeho obsluhy. Tyto skutečnosti je nutno porovnat s počtem vyráběných kusů, zda se nám centrum vyplatí.

Jak již bylo zmíněno, tato diplomová práce je primárně zaměřena především na zkoumání frézovacích strategií prováděnými různými průměry nástroje. Použití pětiosého frézování by do práce vneslo velké množství dalších faktorů, které by mohly mít vliv na správnost vyvozených závěrů. Z tohoto důvodu jsem se rozhodl omezit pouze na frézování ve třech osách.

2.4 Počítačová podpora při výrobě tvarových ploch

2.4.1 Úvod do CAM Softwaru

CAD/CAM lze definovat jako virtuální podporu výroby. Jedná se o software umožňující získat vizuální (rozměrovou) představu o navrhované součásti popř. procesu. CAD/CAM softwary proto nachází uplatnění ve spoustě moderních strojírenských podnicích. Lze říci, že s CAD softwary pracuje převážně konstruktér. V případě CAM softwaru jde především o návrh obráběcí technologie technologem. CAM software slouží pro nastavení a simulaci obráběcího procesu, případně také pro vytvoření NC kódu.

2.4.2 Rozdělení CAM

CAM softwary můžeme dělit podle různých hledisek. Jedním z nich je například počet os, ve kterých lze realizovat obrábění v základní verzi softwaru. Rozeznáváme dvou a půlosé, tří, nebo pětiosé CAMy.

V případě tříosých CAM softwarů dochází k výrobě tvarových ploch souvislým řízením ve třech osách, kdy nástroj kopíruje obráběný profil. Rozdílem oproti plynulému pětiosému obrábění je to, že nástroj zůstává v průběhu řezu v konstantní poloze. V případě programování pomocí pětiosého CAM softwaru lze pro úběr materiálu využít příkazy, které umožňují naklápění nástroje a obrobku podobně jak již bylo popsáno v kapitole 2.3.2.

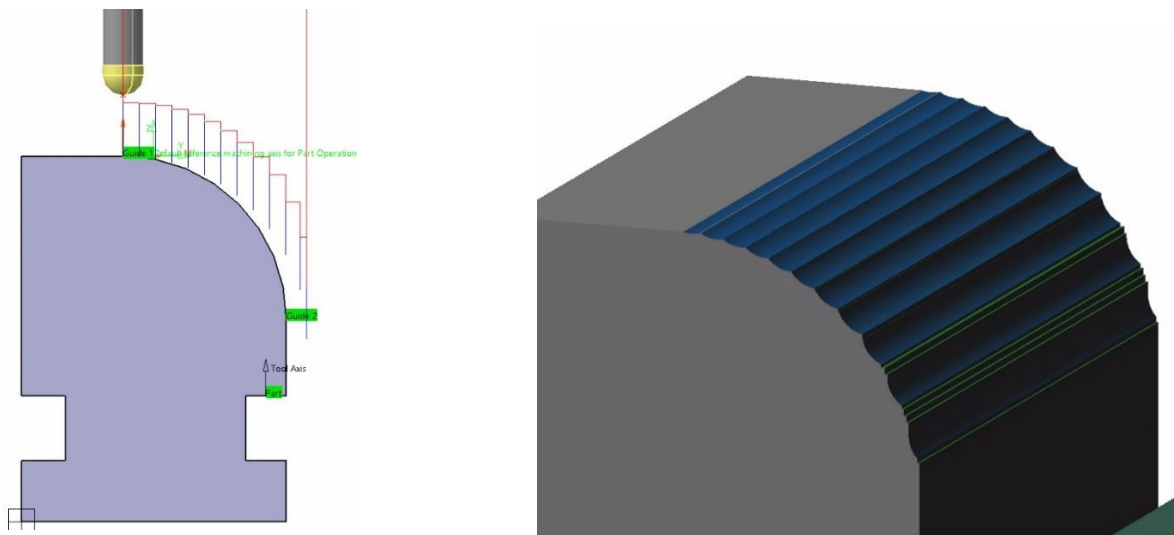
Dalším kritériem členícím systémy CAM je to, zda jsou integrovány v CAD systému, nebo tvoří samostatně stojící jednotku. Některé moderní CAD/CAM softwary také mohou být modulární. To znamená, že software je v základu vybaven pouze základními funkcemi a veškeré nadstavbové moduly je nutné v případě potřeby dodatečně dokoupit, což je případ i tří, nebo pětiosého obrábění.

2.4.3 Strategie rozpočtu drah při 3 osém obrábění

Jak již bylo zmíněno dříve, moduly CAM softwarů nabízejí tří i pětiosé obráběcí strategie. Primárním úkolem frézovací strategie je rozpočítat dráhy na základě definovaného nástroje a na základě tvaru dokončované součásti. Pro exaktnější pochopení popisovaných strategií a jako zdroj obrázkových informací byl využit CAM software CATIA V5.

A) Rozpočet s konstantním krokem v ose nástroje

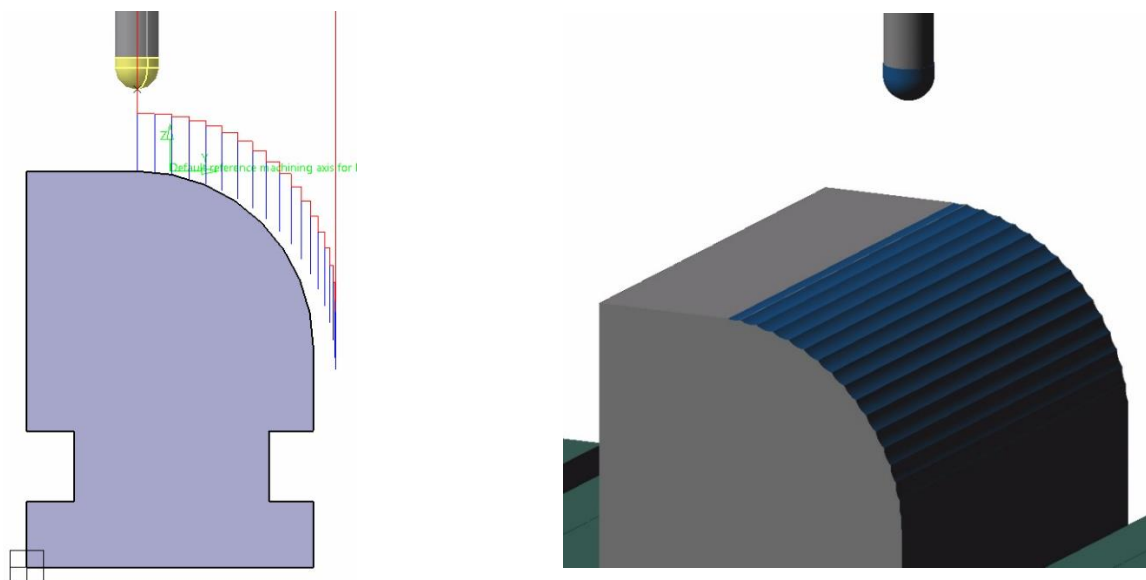
Tato strategie se vyznačuje dodržением konstantní vzdálenosti mezi jednotlivými drahami nástroje podél zvolené osy. Při obrábění nástroj opisuje tvar součásti a postupuje v konstantních krocích v ose nástroje. Nevýhodou této metody ve vztahu k dokončování rádiusových ploch je skutečnost, že CAM software dodržuje konstantní krok v jednom směru a nebere ohled na zaoblení obráběné plochy. Z tohoto důvodu vzniká nekvalitní povrch, čím blíže vertikální straně obrobku se nástroj nachází. Na Obr. 6 je tato strategie vyobrazena. Pro názornost problému této strategie byl zvolen enormně velký radiální krok nástroje. Tento způsob rozpočtu drah je tedy vhodnější pro dokončení spíše horizontálních ploch, které se nevyznačují příliš velkým sklonem.



Obr. 6 - Ukázka rozpočtu drah s konstantním krokem v ose nástroje

B) Rozpočet s konstantním krokem po křivce

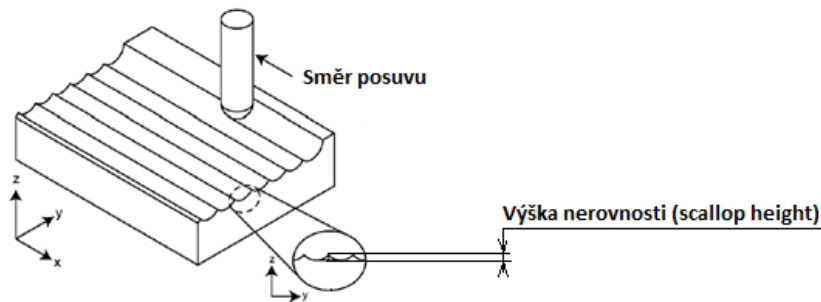
V tomto případě nástroj kopíruje dokončovanou konturu plynule ve dvou osách. Opět je zde definována vzdálenost dráhy nástroje s tím rozdílem, že díky rozpočtu ve dvou osách zároveň je dokončovaný povrch plynule kopírován po celé délce zaoblené plochy. Vypočtený krok nástroje je tedy na většině obráběné plochy konstantní a dochází k získání rovnoměrnějšího, resp. kvalitnějšího povrchu dokončované plochy. Pokud porovnáme rozpočet s konstantním krokem v ose nástroje a rozpočet po křivce je zřejmé, že rozpočet po křivce je pro dokončování rádiusových ploch vhodnější. Neznamená to ale, že tento rozpočet je bezchybný. Nevýhodou tohoto rozpočtu je hromadění drah u vertikální strany rádiusu viz Obr. 7.



Obr. 7 - Ukázka rozpočtu drah nástroje Constant 3D

C) Rozpočet dle zadané výšky nerovnosti

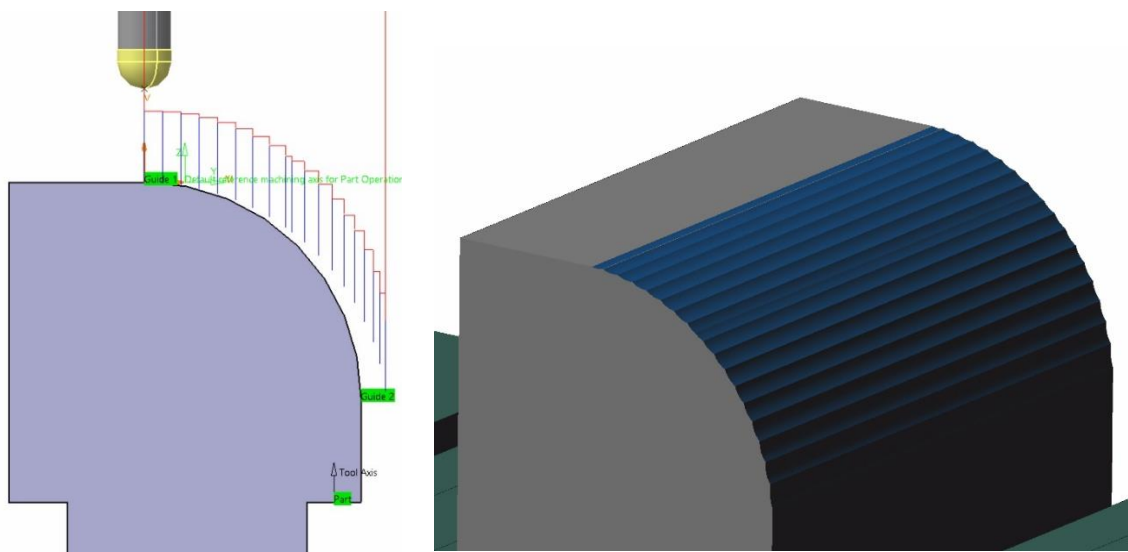
Výška nerovnosti může být definována jako výška neodříznutého materiálu. Jedná se o materiál, který na součásti zůstává i po přejetí nástroje. Tento fakt má zásadní vliv na drsnost obrobeneho povrchu. Výstupky zůstávající na obrobku mohou být využity pro hodnocení drsnosti pomocí parametru R_z . [6]



Obr. 8 - Definice pojmu scallop height [6]

Rozpočet pomocí parametru zadané výšky nerovnosti lze ovlivnit definovatelnou maximální povolenou hodnotou. Rozpočet této strategie lze také definovat vzdálenostmi mezi jednotlivými drahami nástroje, kde CAM systém umožňuje nadefinovat maximální a minimální („rozumnou“) vzdálenost. Čím menší radiální krok frézy, tím lepší povrch, ale delší čas obrábění. Při dokončování kulovou frézou dochází na dokončovaném povrchu k vytváření charakteristických výstupků. Tyto výstupky jsou způsobeny specifickým tvarem kulové frézy, nebo příliš vysokou hodnotou zadané výšky nerovnosti.

Na Obr. 9 je znázorněn rozpočet pomocí popisované strategie. Můžeme zde vidět, že dráhy nejsou nahromaděné u vertikální strany radiusu, jako tomu bylo u předchozího rozpočtu. Povolená hodnota výšky nerovnosti byla opět z důvodu přehledné demonstrace zvolena vyšší. [7]



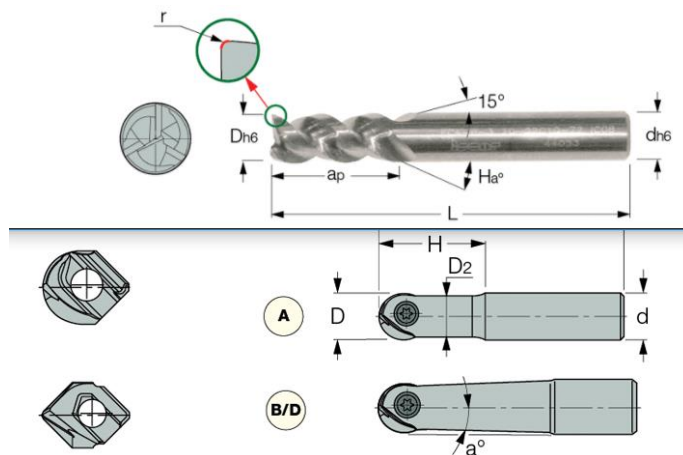
Obr. 9 - Ukázka rozpočtu drah nástroje Scallop height

Na všech vyobrazených strategiích rozpočtu drah (Obr. 6,7,9) je patrné, že v určité oblasti radiusové plochy nebyla konstantní vzdálenost mezi drahami nástroje vždy dodržena. I přes programátorem požadované a pevně zadané hodnoty si CAM software některé dráhy přizpůsobil podle svých algoritmů a principů. Tyto obrázky mohou také posloužit jako důkaz k tomu, co jsem zmínil v závěru kapitoly 2.1.

2.5 Nástroje pro dokončení tvarových ploch

2.5.1 Popis kulových fréz

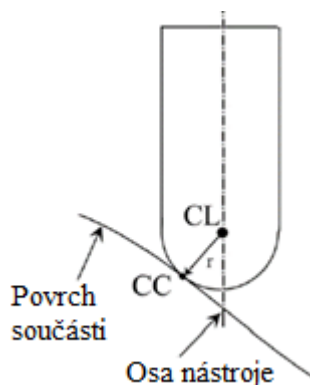
Pro vyrobení tvarové plochy je nutno použít nástroj, kterým je fréza s kulovým čelem, resp. kulová fréza. Kulová fréza se vyznačuje tím, že poloměr zaoblení řezné hrany odpovídá poloměru nástroje na rozdíl od běžné čelní válcové frézy, kde je poloměr zaoblení výrazně menší viz Obr. 10. Na základě této skutečnosti se využívá kulových fréz pro dokončení různých forem a jiných rádiusových ploch řádkovací metodou.



Obr. 10 - Porovnání monolitní čelní válcové frézy a frézy kulové s VBD [8]

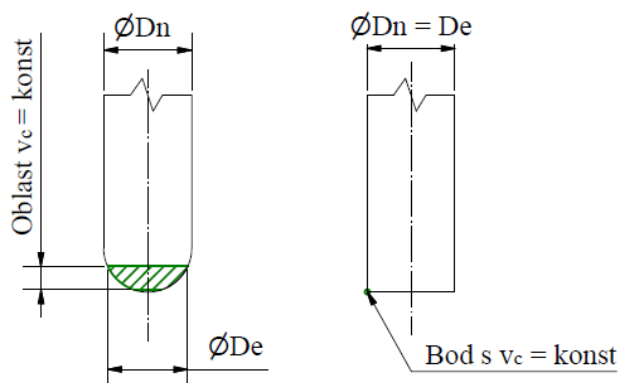
2.5.2 Kontaktní bod nástroje při frézování rádiusových ploch

Jedním ze základních charakteristických znaků při dokončování rádiusové plochy kulovým nástrojem je proměnný kontaktní bod nástroje s obrobkem. (CC - Cutter contact). Kontaktní bod nástroje lze definovat jako bod řezné části nástroje, který je při řezu v kontaktu s obrobkem – tedy odebírá třísku. Kontaktní bod lze ale také chápat jako bod tvořící efektivní průměr nástroje D_e . Na rozdíl od frézování ploch skloněných pod určitým úhlem, kde je kontaktní bod frézy neměnný se při frézování ploch rádiusových kontaktní bod nástroje mění podle toho, jak fréza při obrábění rádiusovou plochou postupuje. Tato skutečnost má za následek změnu efektivního průměru frézy a rovnoměrné opotřebování nástroje. Na Obr. 11 můžeme vidět také bod vyjadřující polohu nástroje. (CL - Cutter location). Tímto bodem prochází křivka znázorňující dráhu nástroje při obrábění. Poloha tohoto bodu je na rozdíl od bodu CC v průběhu obrábění pevná. [6]



Obr. 11 - Kontaktní a poziční bod nástroje [6]

Efektivní průměr se liší podle typu nástroje a podle typu obráběné plochy. V případě obrábění rádiusové plochy čelní válcovou frézou je efektivní průměr po celý proces obrábění konstantní a jeho hodnota je shodná s průměrem nástroje. Zatímco v případě aplikace kulového nástroje je efektivní průměr proměnný podle toho, jak nástroj po jednotlivých drahách sestupuje rádiusem. Vzhledem k charakteristickému tvaru kulového nástroje se tedy mění i řezná rychlost. Ve své diplomové práci jsem se rozhodl při dokončovacím obrábění využít inovativní metody v podobě zachování konstantní řezné rychlosti. Principem této metody je plynulý přepočet otáček pro každou dráhu nástroje a tedy jiný efektivní průměr D_e . Tímto způsobem bude zajištěna konstantní řezná rychlost v celém rozsahu efektivních průměru (řezné části nástroje) viz zeleně šrafovaná oblast na Obr. 12.,

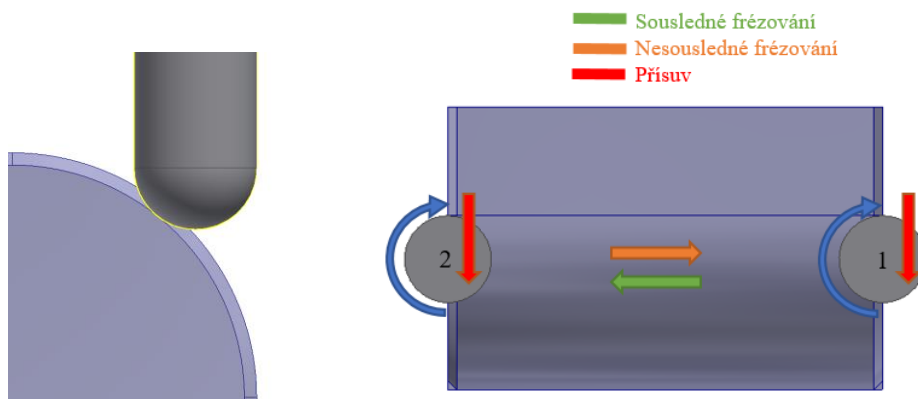


Obr. 12 - Efektivní průměr nástroje kulové frézy a čelní válcové frézy

2.5.3 Směr pohybu nástroje při dokončování rádiusové plochy

Frézování lze obecně rozdělit podle různých hledisek. Například podle směru otáčení nástroje a směru posuvu vzhledem k obrobku. Jinými slovy na frézování sousledné a nesousledné. Obecným poznatkem z praxe bývá snaha o upřednostňování sousledného frézování z důvodu snazšího odchodu třísky z místa řezu a vzniku kvalitnějšího povrchu dokončené plochy.

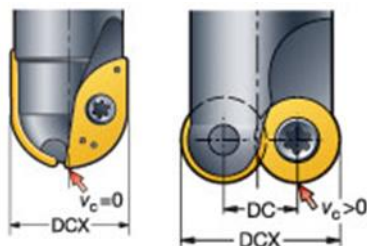
Při frézování rádiusové plochy kulovým nástrojem můžeme docílit sousledného, nebo nesousledného frézování různými způsoby. Záleží z pravidla vždy na výchozí poloze nástroje a směru posuvové rychlosti. Na níže uvedeném obrázku jsou vybrané situace znázorněny. V případě výchozí polohy nástroje č. 1 a směru posuvu zprava doleva docílíme při dodržení znázorněného směru přísuvu frézování sousledného. V případě pozice nástroje č. 2 a opačného směru posuvu pak frézování nesousledného. V mé diplomové práci bude rádiusová plocha dokončena pomocí sousledného frézování tzn. Poloha nástroje č. 1.



Obr. 13 - Znázornění směru obrábění

2.5.4 Popis toroidních fréz

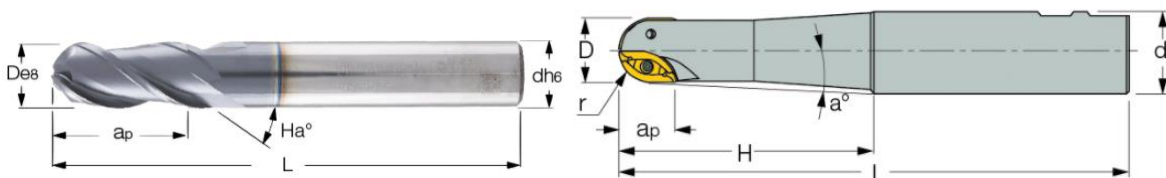
Další možností jak obrábět rádiusovou plochu je použití tzv. toroidní frézy. Řeznou část tohoto nástroje tvoří dvojice břitů. Tyto destičky se do výrobcem určené průměrové řady navzájem překrývají, aby došlo k vyloučení nulové řezné rychlosti vznikající v ose nástroje, což je častým problémem u fréz s kulovým čelem. Toroidní frézy se vyznačují především svojí univerzálností. Kromě tvarového frézování je lze využít i pro hrubovací procesy. [9] Na Obr. 14 jsou obě popisované frézy znázorněny. Pro realizaci experimentu mé diplomové práce bude použita kulová fréza.



Obr. 14 - Porovnání frézy s kulovým čelem (vlevo) a frézy toroidní (vpravo) [9]

2.5.5 Dostupné průměry kulových fréz a jejich konstrukční provedení

V současné době je na trhu dostupný široký rozsah průměrů kulových fréz. Pro průměr kulové frézy je stěžejní také její konstrukční provedení. Nástroj může být monolitní, s vyměnitelnou břitovou destičkou nebo s vyměnitelnou frézovací hlavou. Samotná frézovací hlava může být pak také z jednoho kusu, nebo může být osazena řeznými destičkami. Monolitní nástroje jsou k dispozici již od průměru 0,1 mm do 25 mm. Tyto nástroje jsou vyrobeny především ze slinutých karbidů, nebo z rychlořezné oceli. Nástroje s vyměnitelnou břitovou destičkou se vyrábějí až do průměru 50 mm. [8] V případě nutnosti obrobení rádiusové plochy větším nástrojem mohou být vhodnou alternativou frézy toroidní.



Obr. 15 - Kulová fréza monolitní a kulová fréza s VBD [8]

Pro dokončování rádiusových ploch lze využít jak monolitní frézy, tak frézy s VBD. Pro dokončování povrchu frézou s VBD je vhodnější zvolit typ frézy, u kterého je v nástrojovém držáku osazena pouze jedna vyměnitelná břitová destička. Předpokladem je dosažení kvalitnějšího povrchu.

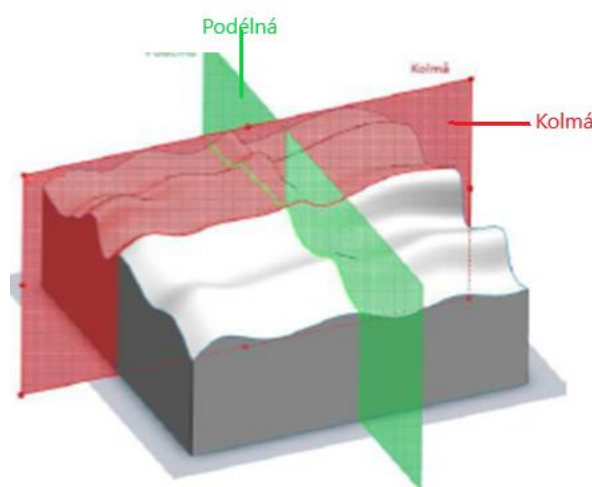


Obr. 16 - Kulová fréza osazena 1 vyměnitelnou břitovou destičkou

2.6 Kvalita obrobené plochy

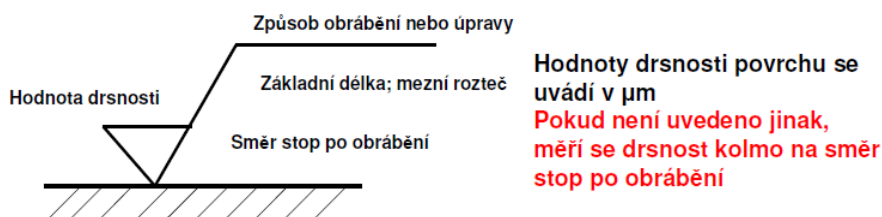
Pokud provedeme pomyslný, vhodně orientovaný řez texturou povrchu získáme křivku, která je tvořena nerovnoměrnými výstupky. Výstupky jsou různě vysoké a mají různý výškový a délkový rozestup. Abychom mohli nějakým způsobem kvalitu obrobené plochy posuzovat a hodnotit byl zaveden pojem drsnost obrobené plochy. Pro vyhodnocení drsnosti jsou na základě příslušné normy používány parametry popsané v tomto odstavci.

Žádný obrobený povrch není v praxi ideálně hladký. Jedním z charakteristických znaků obrobeného povrchu jsou stopy po nástroji. Velikost a vzdálenost těchto stop ovlivňuje výslednou drsnost povrchu. V případě frézování je třeba drsnost povrchu vyhodnocovat ve dvou směrech. Drsnost ve vodorovném (podélném) směru (směr řezného pohybu) a drsnost ve směru svislém (kolmém), což je drsnost ve směru radiálního kroku nástroje [10]. Pojem kolmé a podélné drsnosti je znázorněn na Obr. 17



Obr. 17 - kolmá a podélná drsnost [10]

Drsnost povrchu je jedním z hlavních požadavků při dokončovacím frézování. Dokončované plochy bývají na výrobních výkresech často označeny hodnotou předepisující jakost daného povrchu. Tato hodnota definuje souhrn nerovností dokončeného povrchu s roztečí menší, než je hodnota udaná ve značení drsnosti. [11]

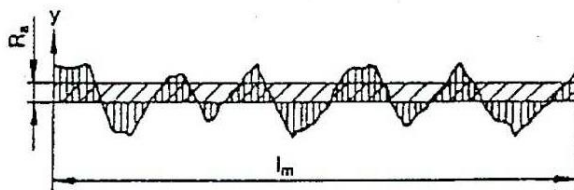


Obr. 18 - Předepisování drsnosti na výkrese [11]

2.6.1 Parametry drsnosti a její značení

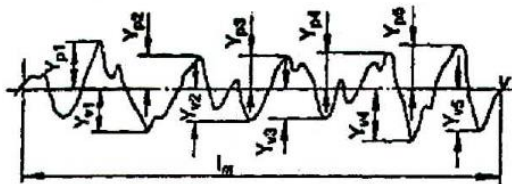
Drsnost povrchu je jedním z mnoha faktorů integrity povrchu. Norma ČSN EN ISO 4285 – 4288 definuje různé parametry pro vyhodnocování textury povrchu. Vybrané parametry drsnosti je nutno chápat a vyhodnocovat statisticky. [11] Pro teoretickou a následně i praktickou část mé diplomové práce jsem se rozhodl vybrat a podrobněji popsat parametry R_a a R_z .

Parametr R_a – Tato hodnota je používána zejména na výkresové dokumentaci a je definována jako aritmetický střed odchylek filtrovaného profilu drsnosti od střední čáry uvnitř měřené dráhy. Střední čára profilu je vedena tak, aby plochy nad a pod čárou byly stejné. [11]. Tato hodnota, ale může být často zavádějící. Pro příklad si představme dokončený povrch pístnice, ve které se pohybuje píst s těsněním. Uvažujme, že většina plochy bude mít minimální hodnotu drsnosti kromě jednoho nebo dvou výběžků, resp. prohlubní. Pokud k vyhodnocení použijeme parametr R_a , průměrná hodnota bude nízká. Výběžky totiž byly v ostatních hodnotách zprůměrovány a téměř zanedbány. Tuto skutečnost je nutné si při volbě hodnotícího parametru uvědomit a případně zvolit parametr jiný.



Obr. 19 - Parametr drsnosti R_a [11]

Parametr R_z ISO – Výška 10ti bodů Parametr R_z ISO udává sumu pěti nejvyšších špiček nad střední linií a pět nejhlubších rýh pod střední linií profilu uvnitř vztažné dráhy. Nevýhodou při vyhodnocování pomocí tohoto parametru může být nahromadění špiček a rýh ve velmi malé délce vůči vztažné dráze. Tato skutečnost vede k vzniku značně vyšších hodnot parametru R_z , které pak nesprávně charakterizují střední stav profilu. [11]



Obr. 20 - Parametr drsnosti R_z ISO [11]

2.6.2 Vlivy ovlivňující drsnost dokončené plochy

Drsnost dokončené plochy je v průběhu obrábění ovlivňována mnoha vlivy vstupujícími do průběhu obráběcího procesu. Ve své práci jsem se rozhodl blíže popsat pouze některé z uvedených vlivů. Zásadní vliv na drsnost plochy má obráběcí soustava S-N-O-(U)P, řezné prostředí, zvolená technologie obrábění a zvolené řezné podmínky. Mezi vedlejší vlivy patří například ekonomické faktory a lidský faktor.

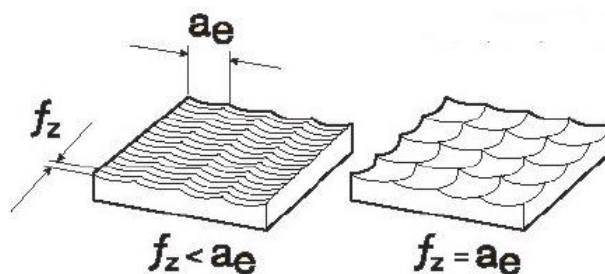
(S) Stroj – Pro dosažení co nejlepšího povrchu je z hlediska stroje stěžejní jeho celková přesnost. Ta závisí na seřízení stroje a tlumících vlastnostech rámu stroje. Snahou o regulaci a tlumení rázů, které vznikají při chodu stroje, lze přispět ke kvalitnímu povrchu obrobku. Tlumení lze také ovlivnit vhodnou volbou materiálu rámu. Materiál rámu může mít vliv při určitých parametrech řezu (např. vysokých otáčkách, které obecně mohou mít významný vliv na přesnost a kvalitu dokončované plochy)

(N) Nástroj – Vzhledem k tomu, že jednou z vlastností textury povrchu je velikost stop po nástroji lze říci, že vliv na kvalitu obrobku má i samotný obráběcí nástroj.

- Geometrie nástroje – Geometrie nástroje je popsána různými nástrojovými úhly ($\alpha, \beta, \gamma, \dots$), které definují tvar řezné části nástroje. Kvalita obrobku je ovlivněna

velikostí jednotlivých úhlů, ale také materiálem obrobku, který je danou geometrií obráběn.

- **Stabilita nástroje** – Stabilitu nástroje je nutné zajistit kvalitním upínacím systémem. Stejně jako u požadavků kladených na rám stroje je jedním z požadavků na upínací část nástroje schopnost tlumit chvění a vibrace od řezné části nástroje a zaručit přesné, pevné upnutí s minimálním házením. Je také třeba zmínit, že čím kratší vyložení nástroje, tím tužší upnutí a kvalitnější povrch. [12]
- **Řezné podmínky** – Mezi základní řezné podmínky ovlivňující drsnost povrchu při dokončovacím frézování patří řezná rychlost v_c , radiální krok frézy a_e a posuv na zub f_z . Pro dosažení plochy kvalitnější drsnosti platí obecně pravidlo použití vyšší hodnoty řezné rychlosti než při hrubování. Optimální hodnota řezné rychlosti však úzce souvisí s trvanlivostí nástroje a s materiálem obrobku. Proto většina výrobců nástrojů udává doporučené řezné rychlosti vzhledem ke konkrétnímu obráběnému materiálu. Dalším ze zmiňovaných parametrů je hodnota a_e . Na základě experimentu provedeného v diplomové práci pana Bc. Matuly lze říci, že se zvětšující se bočním krokem frézy se drsnost dokončeného povrchu zhoršuje. Dalším z vybraných parametrů je hodnota posuvu na zub f_z . Posuv hraje stěžejní roli při ovlivnění kvality povrchu. Při hrubovacích operacích, kde je upřednostněn hospodárný úběr materiálu jsou zpravidla využívány maximální posuvové hodnoty doporučené výrobcem nástroje. Pro operace dokončovací, kde je požadavek na určitou drsnost povrchu je třeba využít hodnoty nižší. I v případě dokončovacího frézování je ale nutné obrábět efektivněji, tj. vyrobit danou součást v požadované kvalitě za nejkratší čas. Jak již bylo zmíněno na začátku této kapitoly, při frézování rozlišujeme drsnost příčnou a podélnou. Právě pomocí regulace hodnot a_e a f_z můžeme zajistit stejnou hodnotu drsnosti v příčném i podélném směru. Nastavením hodnot a_e a f_z tak, aby se sobě rovnaly, viz Obr. 21. dosáhneme větší únosnosti, resp. životnosti povrchových vrstev a snazšího leštění (je-li požadováno). [2]



Obr. 21 - Ukázka závislosti posuvu a radiálního kroku frézy [2]

(O) Obrobek – Drsnost povrchu obrobené plochy obrobku závisí na obrobitelnosti a také na sklonu daného materiálu k tvorbě nárůstku. Nárůstek je i přes některá pozitiva chápán spíše jako negativní jev. Pro tvárné materiály, kde hrozí tvorba nárůstku, je vhodné volit spíše nástroje s pozitivnější geometrií. Omezíme tím vytrhávání materiálu a získáme lepší drsnost povrchu.

(U) Upínač - Pro získání kvalitního povrchu je nutné zajistit i pevné upnutí obrobku při současném umožnění bezproblémového přístupu nástroje a kleštiny. Díky modernímu sortimentu upínek a svěráků lze zajistit kvalitní upnutí i pro složité tvarové plochy obráběné na pětiosých centrech viz Obr. 22



Obr. 22 - Svěrák ARNOLD SC 5x [13]

2.7 Shrnutí teoretické části

Teoretická část je složena ze dvou částí. První polovina teoretické části obsahuje analýzu současného stavu poznání v oblasti tvarového frézování. Na základě vyhledaného okruhu závěrečných prací a vědeckých článků, lze říci, že ani jedno z akademických děl se v plné míře neztotožňuje s problematikou řešenou v této diplomové práci. Tvarové frézování již bylo námětem mnoha prací, nicméně v mojí práci je k němu přistupováno způsobem dosud nezkoumaným.

Druhá polovina teoretické části se zabývá stručným uvedením do zkoumané oblasti dokončovacího obrábění a výtahem, resp. shrnutím pojmů týkajících se dokončovacího frézování rádiusových ploch. Jedním z důvodů pro popis jednotlivých oblastí obrábění byla i jejich spojitost s následujícím experimentem. Většina popisovaných skutečností v teoretické části je tedy využita ve své praktické podobě v experimentu. Závěr teoretické části popisuje faktory ovlivňující dokončený povrch a dvojici použitých parametrů k vyhodnocení drsnosti.

3 Praktická část diplomové práce

3.1 Cíle a plánování praktické části diplomové práce

Praktická část diplomové práce se stejně jako část teoretická skládá ze dvou částí. V první polovině bude proveden experiment a polovině druhé bude popsáno zpracování dokončených vzorků a vyhodnocení naměřených dat. Na základě naměřených dat dojde k vyvození závislosti mezi zkoumanými veličinami a parametry.

Cíl experimentu spočíval v dokončení celkem 60ti rádiusových ploch různého poloměru vybraným kulovým nástrojem s příslušnou frézovací strategií a jednou ze dvou stanovených metod nastavení rezných podmínek. Na obrobených vzorcích budou primárně měřeny a vyhodnocovány parametry R_a , R_z . V průběhu dokončovacího obrábění budou měřeny rezné síly a zaznamenáván čas dokončování. Dále bude proveden náměr a vyhodnocení odstepu bodu od modelu (tvarová přesnost).

Pro realizaci experimentu bylo nutné vytvořit nejprve jeho plán. Na základě splnění požadovaného cíle diplomové práce bylo třeba provést vhodné nadefinování faktorů, se kterými je třeba v průběhu experimentu pracovat. Konstantní faktory tvořila rezná rychlost $v_c = 80 \text{ m/min}$, posuv na zub $f_z = 0,1 \text{ mm/zub}$, radiální krok nástroje $a_e = 0,1 \text{ mm}$, axiální krok nástroje $a_p = 0,1 \text{ mm}$ a otáčky n . Jako proměnné faktory byly nadefinovány průměr nástroje D , poloměr obráběné plochy R a trojice frézovacích strategií zmiňovaná v teoretické části práce (Rozpočet s konstantním krokem v ose nástroje, rozpočet s konstantním krokem po křivce a rozpočet dle zadané výšky nerovnosti). Dalším podstatným požadavkem bylo dokončení poloviny vzorků inovativní metodou dodržení konstantní rezné rychlosti. Druhá polovina bude dokončena konvenční způsobem s požadavkem na konstantní otáčky.

Pro průměr nástroje a poloměr rádiusu byl zvolen vhodný rozsah mezních hodnot. Průměry kulové frézy se pohybují v rozmezí $D = 3 - 16 \text{ mm}$, rádius plochy v rozsahu $R10 - R50 \text{ mm}$. Ve spolupráci s p. Ing. Gombárem Ph.D. došlo ke statistickému rozvržení jednotlivých proměnných faktorů na základě stanoveného rozsahu a k jejich shromáždění do tabulky, která představuje základní plán pro realizaci experimentu. Ukázka plánu experimentu je přiložena v příloze práce.

3.2 Úvod do základní problematiky statistiky použité v této diplomové práci

V předchozím textu je zmíněné využití matematicko-statistické analýzy pro tvorbu samotného plánu experimentu. Statistika byla do této práce zařazena jako podpůrná metoda pro doplnění technického vyhodnocení. Jejím primárním úkolem je vytvoření modelu, který na základě definovaných faktorů popisuje chování zkoumaného systému. (technologického procesu) Aby tato metoda šla pro vyhodnocení použít, bylo nutné experiment navrhnout tak, aby svými kritérii, skladbou vstupních faktorů a sledovaných výstupů odpovídal požadavkům statistické analýzy a přitom dodržel zadání diplomové práce. Na základě této skutečnosti je nutné provést alespoň stručný úvod do oblasti statistiky ve vztahu k této diplomové práci.

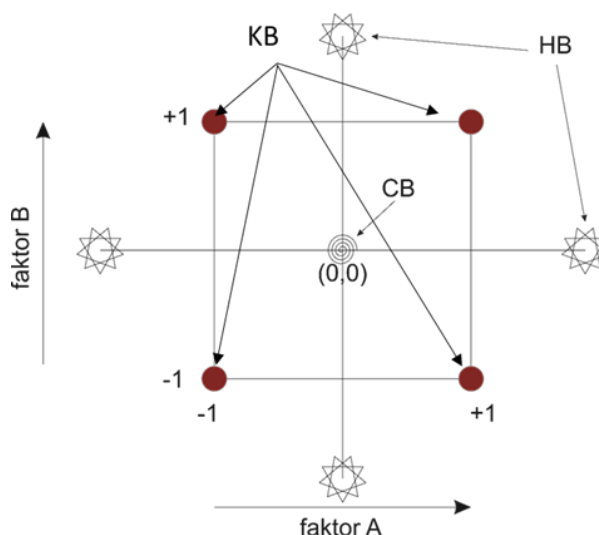
Obecně je možné každý technologický proces charakterizovat jako tzv. „černou skříňku“, kde na základě vstupu v podobě říditelných proměnných (faktorů) je možné sledovat změnu výstupu v podobě sledovaných parametrů (odezvy). Jedním ze způsobů, kterak lze docílit takové kombinace faktorů, aby odezva byla co nejočekávanější i přes zmiňovanou „černou skříňku“ je využití experimentu DoE (Design of Experiments). Princip DoE vychází ze základní analýzy rozptylu (ANOVA). Analýza rozptylu umožňuje ověřit, zda mají vstupní faktory vliv

na sledované veličiny. Dochází k rozkladu celkového rozptylu na dvě dílčí oblasti rozptylů. Rozptyl vyvolaný vlivem jednotlivých faktorů na oblast náhodnou. Mezi těmito oblastmi je poté statisticky testována významnost poměru. [14] [15]

Na základě plánování experimentů DoE lze rozlišit několik typů: 2^k (K-p) – standardní návrhy (Box, Hunter a Hunter), 3^k (K-p) – standardní návrhy (Box, Hunter a Hunter), návrhy s 2 a 3 úrovněmi, nebo centrální kompozitní plány. [14] Vzhledem k charakteru následujícího experimentu a typu faktorů je nejvhodnější centrální kompozitní plán. Jedná se o model vyšších řádů, u kterého je očekáván nelineární průběh, což je pro tuto práci předpokládáno.

Centrální kompozitní plán je charakterizován třemi druhy bodů. Jsou to: [14] [15]

- 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)



Obr. 23 - Centrální kompozitní plán [14]

Zvolené sledované faktory jsou popsány v předchozí kapitole, zde budou znázorněny ve formě tabulky.

Tab. 1 - Zvolené faktory experimentu

Sledované proměnné faktory		Sledované konstantní faktory	
Faktor	Zvolený rozsah	Faktor	Nastavená hodnota
$\varnothing D$ [mm]	3 – 16	v_c [m/min]	80
R [mm]	10 – 50	n [min ⁻¹]	
Fr. Strategie [-]	A, B, C		

Nyní lze zvolené faktory popsat v souvislosti s předchozím obrázkem. Krychlové body jsou reprezentovány jednotlivými kombinacemi sledovaných faktorů. Hvězdicové body představují krajní hodnoty stanoveného rozsahu pro průměr nástroje a poloměr plochy. Centrální bod je vyjádřen střední (optimální) hodnotou pro hvězdicové body.

Na základě předchozího popisu byl pro každou strategii (A1, A2, C1, C2 atd.) Vytvořen centrální kompozitní plán. Výsledných šest plánů bylo sjednoceno do plánu společného, který

představoval průběh následujícího experimentu. Díky takto sestavenému plánu je možné přesně určit, jaké průměry nástrojů bude nutné pro dokončení použít a také jaké hodnoty poloměrů rádiusových ploch bude nutno dokončit jednotlivými frézovacími strategiemi.

Dle charakteru proměnných faktorů teorie statistiky rozeznává jednotlivé typy proměnných. V případě této práce je rozdělení následující: $\varnothing D$, R – intervalová proměnná, frézovací strategie – ordinální proměnná. Pro intervalovou proměnnou je charakteristická změna ve stanoveném intervalu. Pro ordinální proměnnou je možné proměnné uspořádat dle pořadí. [14]

Na základě statistického modelu bude možné určit, závislosti mezi faktory a také to, který faktor nejvíce ovlivňuje faktory ostatní. Z důvodu zpřesnění statistické vypovídací hodnoty jsou některá měření opakována.

3.3 Popis stroje, nástroje, obrobku, upínače a použitých pomůcek

Polotovary byly obráběny na stroji DMU 40 eVolinear. Jedná se o frézovací centrum s plynulým řízením v pěti osách. Pro můj experiment však plně dostačovalo obrábění tříosé. Centrum bylo vybaveno řídicím systémem Heidenhein iTNC530.



Obr. 24 - Frézovací centrum DMU eVolinear [16]

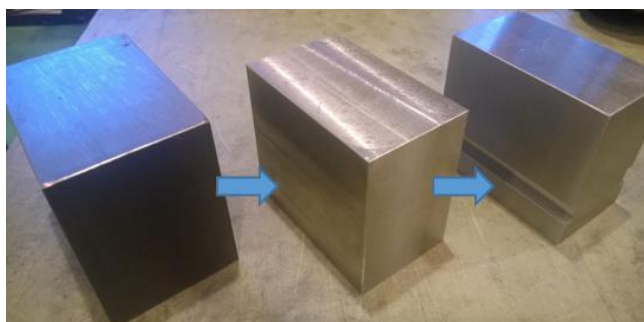
Jak již bylo zmíněno, použitým nástrojem byla fréza s kulovým čelem. Na základě statistického rozpočtu se dokončovalo celkem čtyřmi průměry nástroje: $D = 3 \text{ mm}$; $D = 4,9 \text{ mm}$; $D = 9,5 \text{ mm}$; $D = 14,1 \text{ mm}$; $D = 16 \text{ mm}$. I přes nekonvenční průměry některých fréz bylo nutné tato čísla zachovat na základě požadavku následujícího statického vyhodnocování. Proto došlo u nástrojů s průměrem 14,1 a 4,9 mm k vybroušení na požadovaný rozměr z nejbližšího vyššího konvenčního rozměru polotovaru (roubíku). Z důvodu přirozeného opotřebování byly nástroje obstarány ve větším počtu kusů od každého z výše uvedených průměrů.

Pro upnutí fréz $D = 3 - 9,5 \text{ mm}$ posloužila kleština ER 16 – L100 a pro frézy $D = 14,1 - 16 \text{ mm}$ kleština ER 25 – L100.



Obr. 25 – Přehled použitých nástrojů a upnutá monolitní fréza $D = 14,1$ mm

Polotovár vznikl nařezáním z ploché tyče 110x70 mm (materiál C45; ČSN 12 050). Následně proběhlo hrubování s přídavkem na dokončení 0,3 mm. Dokončovacím broušením se zajistila kolmost stran polotovaru. Finálním polotovarem byl tedy z-úhlováný kvádr o rozměrech 100x90x60 mm. V bocích polotovaru byla vyfrézována dvojice drážek z důvodu zajištění upnutí o dostatečné tuhosti.



Obr. 26 - Proces zpracování polotovaru

Upnutí obrobku bylo realizováno upínkami přímo na dynamometr, který byl zafixován pomocí šroubů ke stolu frézovacího centra.



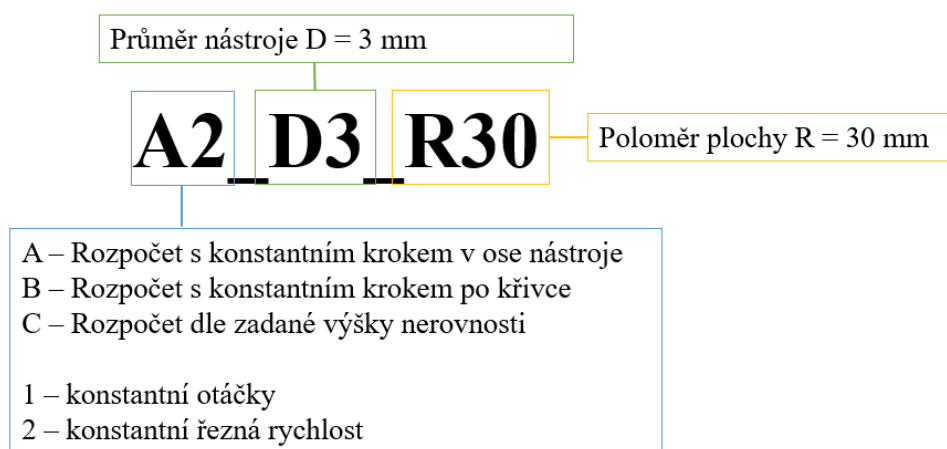
Obr. 27 - Upnutí polotovaru a dynamometr 5080 KISTLER

Již zmíněný dynamometr byl do obráběcí soustavy přidán z důvodu kontrolního měření řezných sil vznikajících při obrábění. Jedná se o statický tříložkový dynamometr typ 5080 od firmy KISTLER.

Další příslušenství představoval měřicí přístroj ZOLLER k naměření celkové délky vyloženého nástroje, posuvné měřítko a ruční lupa pro kontrolu opotřebení nástroje.

3.4 Popis NC programu pro dokončování

NC programy pro dokončování byly generovány na základě algoritmu vytvořeného v MS Visual Basic a poté přeneseny pomocí makra do softwaru Microsoft Excel. Pro vygenerování programu bylo nutné v Excelu zadat proměnné faktory (D , R , Frézovací strategie) dále pak požadavek na dodržení či nedodržení konstantní řezné rychlosti. Na základě uživatelem specifikovaného výběru software vygeneroval NC program, který je možné nahrát do obráběcího stroje. Program nesl název v násl. uspořádání:

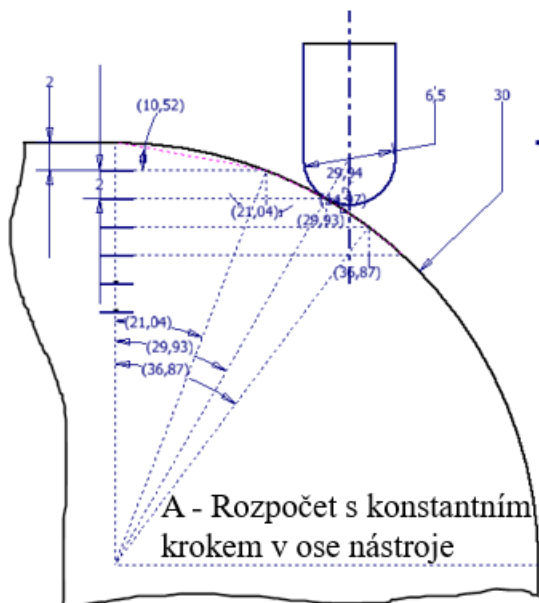


Obr. 28 - Rozbor názvu jednotlivých programů

Syntaxe tvorby NC programu je analytická s běžným programem. Začátek tvoří obecné funkce s nastavením posuvů, příjezdových a odjezdových vzdáleností. Poté následuje kontrola konstantní řezné rychlosti, výpočet otáček a samotné „tělo“ programu.

Pro výpočet jednotlivých drah nástroje bylo využito obecné rovnice kružnice $(x - m)^2 + (y - n)^2 = r^2$. Tato rovnice byla využita pro výpočet pozice nástroje ve směru X . Rovnici by bylo možné použít i pro zjištění pozice Z , avšak pro zjednodušení, byla pozice Z vyjádřena v tomto případě ze známých hodnot rádiusu a hodnot zadaných uživatelem. Do programu byl také zahrnut výpočet korekcí, kde bylo využito goniometrických funkcí. Pro představu je na obrázku níže znázorněn rozklad drah pro strategii s konstantním krokem v ose nástroje.

Syntaxe programu byla pro trojici používaných strategií sestavená analogicky, nicméně vyjádření pozice nástroje X a Z bylo uzpůsobeno základnímu principu dokončovací strategie.



Obr. 29 - Znáznornění principu výpočtu drah nástroje při frézovací strategii A

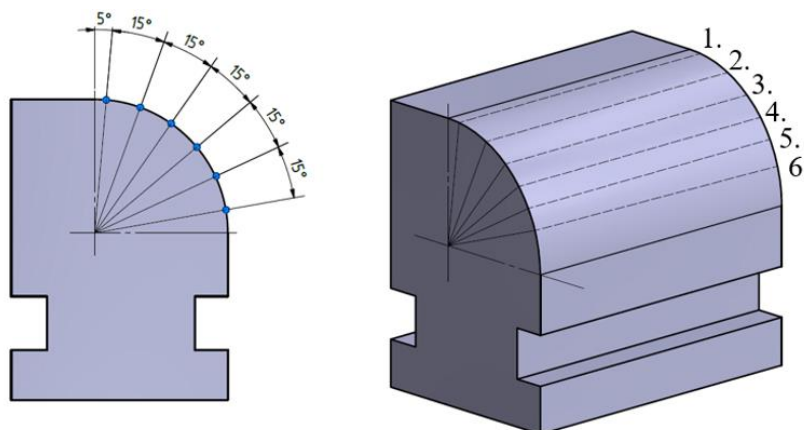
3.5 Popis průběhu experimentu

Místem pro realizaci experimentu se staly halové laboratoře ZČU Fakulty strojní. Samotný experiment započal 12. 2. 2018. Pro získání potřebných dat a realizaci statistického vyhodnocení bylo nutné obrobit a dokončit šedesát rádiusových ploch na čtyřiceti polotovarech. Plán experimentu byl řazen sestupně od nejmenšího průměru nástroje po největší.



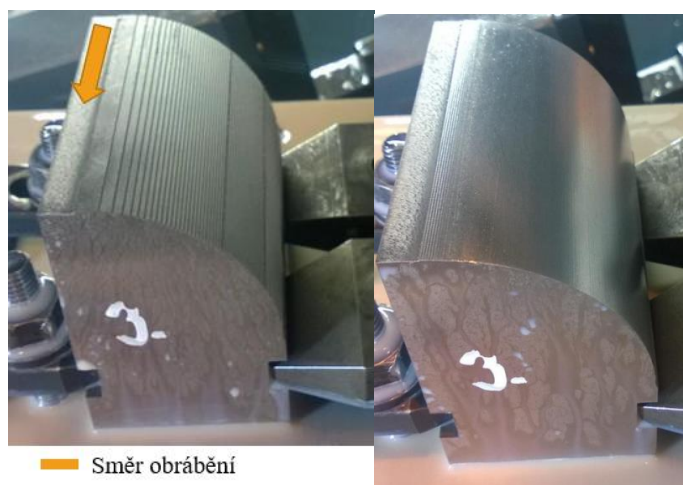
Obr. 30 - Soustava pro měření řezných sil (Zleva: zesilovač signálu, digitalizační karta, SW: Dynoware)

Při dokončovacím obrábění byl proveden náměr řezných sil. Z důvodu rovnoměrného pokrytí dokončené plochy a získání představy o průběhu řezných sil při dokončování byly řezné síly zaznamenávány v šesti vodorovných měřeních na jeden vzorek. Protože dokončované rádiusy mají různý poloměr, bylo vhodnější plochu rozdělit pomocí stupňů. Měření řezných sil se opakovalo vždy po stanovené hodnotě úhlu (pro první měření 5° a pro další po 15° stupních) postupu nástroje rádiusem. Kontrolu stupňů obstarával algoritmus implementovaný do NC programu, který vždy když bylo na řadě měření řezných sil, zastavil stroj. Jak již bylo zmíněno, u každého obráběného kusu byl také zaznamenáván celkový čas dokončování.



Obr. 31 - Schéma náměru řezných sil

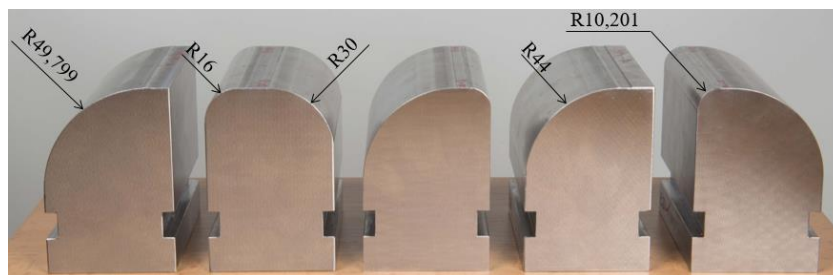
Celkový obráběcí proces se skládal z následujících kroků. Polotovár byl nejprve vyhrubován pomocí čelní válčové frézy a pomocí kulového nástroje osazeného břitovým plátkem předdokončen. Poté následovala výroba drážky čelní válčovou frézou z důvodu eliminace obrábění špičkou kulové frézy. Hrubovací a předdokončovací proces je v mé práci jediným případem, kde byl pro generování drah nástroje využit CAM software SOLIDCAM. Z důvodu požadavku na trvanlivost hrubovacího a předdokončovacího nástroje se při těchto operacích aktivně chladilo. Dokončovací obrábění probíhalo bez chlazení. Na Obr. 32 je vidět vyhrubovaný a předdokončený obrobek.



Obr. 32 - Vyhrubovaný a předdokončený polotovár

Prvním nástrojem pro dokončování byla monolitní fréza s kulovým čelem $D = 3 \text{ mm}$. Vzhledem k absenci upínače, který by svým tvarem umožňoval přístup nástroje k celé délce poloměru rádiusu, bylo nutné omezit krok nástroje v ose Z, aby nedošlo ke kolizi kleštiny s obrobkem. Hodnotu vyložení z důvodu zachování tuhosti soustavy SNO nebylo možné zvětšit. Stejný problém nastal i při dokončování nástrojem o průměru $D = 4,9 \text{ mm}$.

V průběhu obrábění bylo také zjištěno, že dynamometr je oproti obrobku natočen o $0,1^\circ$. S touto nepřesností bude nutné při případném vyhodnocování řezných sil uvažovat. Při dvou měřeních došlo také k překročení stanoveného rozsahu očekávaných řezných sil. Tato skutečnost nastala u frézovací strategie A (konstantní krok v ose nástroje) vlivem velkého kroku a_e a to pouze při prvním řezu v téměř horizontální ploše rádiusu. V průběhu experimentu se některé programy maximálně jednou opakovaly. Opakování bylo záměrem a požadavkem statistiky. Veškeré vyráběné rádiusy jsou znázorněny na Obr. 33



Obr. 33 - Dokončené rádiusové plochy

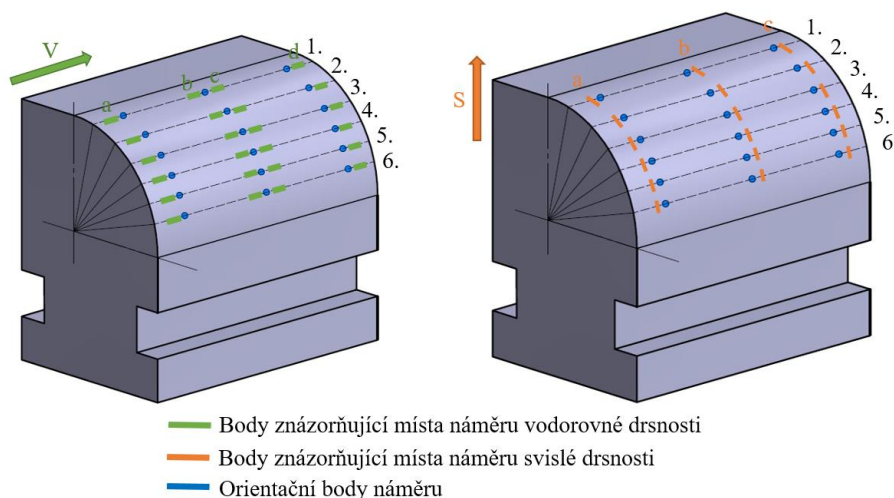
4 Práce s dokončenými výrobky

4.1 Měření drsnosti dokončeného povrchu

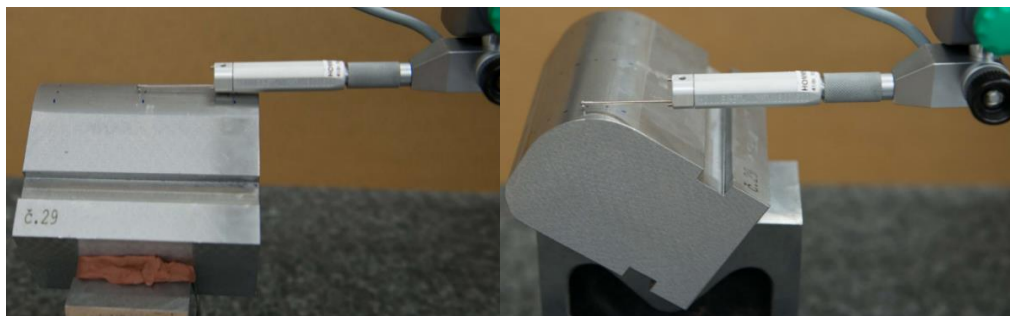
Po obrobení a náměru řezných sil následovalo měření drsnosti dokončených ploch. Měření bylo realizováno na profiloměru HOMMEL ETAMIC T8000. Dokončeného povrchu se dotýkal diamantový hrot o poloměru špičky $R_s = 2 \mu\text{m}$. Výchozí podklad pro stanovení měřicích podmínek představoval výňatek z norem DIN EN ISO 4288;1998 a DIN EN ISO 3274;1998. Na základě těchto norem byly zvoleny jednotlivé parametry měřicího procesu potřebné pro získání zjišťovaných hodnot R_a a R_z .

Pro získání představy o kvalitě povrchu dokončené plochy byla vytvořena síť bodů. Body byly vyznačeny na povrchu rádiusu ve stejném rozmezí úhlů, pro které bylo v průběhu experimentu provedeno měření řezných sil. Svislá vzdálenost jednotlivých bodů byla volena opět pomocí úhlového rozdělení plochy. Záměrem bylo pokrytí rádiusové plochy tak, aby došlo vytvoření představy o stavu dokončeného povrchu. Drsnost se tedy měřila přírůstkově po prvních pěti a následně každých patnácti stupních při sestupném průchodu rádiusem. Celkem tedy vzniklo 6 kontrolovaných přímk, kdy na každé přímkce byla vynesena trojice orientačních bodů.

V jednotlivých přímkách bylo třeba v každém bodě zjistit drsnost ve směru vodorovném a ve směru svislém. Ve vodorovném směru se v každé oblasti provedly celkem čtyři náměry. Ve svislém směru pak náměry tři. Měření bylo provedeno v těsné blízkosti orientačních bodů vždy zleva doprava. Označený rádius připravený pro měření drsnosti je znázorněn na Obr. 34



Obr. 34 - Znázornění měření drsnosti



Obr. 35 - Ukázka náměru vodorovné a svislé drsnosti

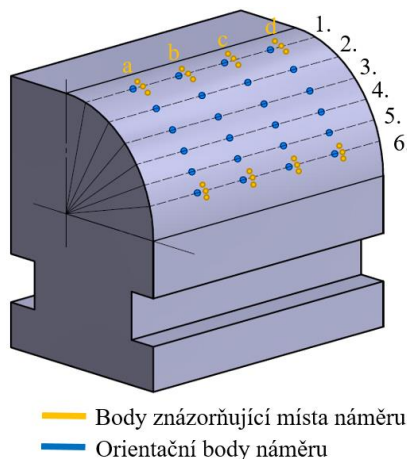
4.2 Měření tvarové přesnosti

Jednotlivé vzorky byly také proměřeny pomocí 3D souřadnicového stroje CMM Carl Zeiss Prismo 7 Navigator. Pomocí dat získaných z tohoto stroje a následném vyhodnocení bylo možné vytvořit představu také o skutečném tvaru dokončené rádiusové plochy.



Obr. 36 - CMM Carl Zeiss Prismo 7 Navigator [17]

Pro měření tvarové přesnosti byla využita obdobná síť bodů jako u měření drsnosti, s tím rozdílem, že v případě tvarové přesnosti se na každé měřící přímce nacházeli čtyři orientační body. Body byly po přímkách rovnoměrně rozmístěny. Měřící hlava stroje se zkoumané plochy dotkla celkem třikrát v okolí každého bodu. Na obrázku níže je znázorněna měřící síť využitá pro tvarovou přesnost. Pro přehlednost obrázku jsou měřící body znázorněny pouze u přímek č. 1 a 6. Ve skutečnosti však byly analogickým způsobem proměřeny i přímky č. 2–5.



- Body znázorňující místa náměru
- Orientační body náměru

Obr. 37 - Znázornění měření tvarové přesnosti

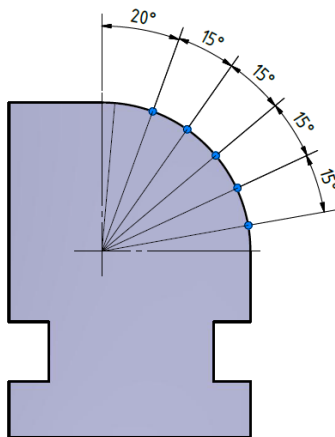
5 Vyhodnocení naměřených dat z technologického hlediska

Vzhledem ke značnému množství sledovaných faktorů bylo nutné k celkovému vyhodnocení přistoupit pomocí rozdělení této kapitoly do tří oblastí. Každá oblast přistupuje k hodnocení na základě odlišných faktorů. Jednotlivé oblasti obsahovaly buď porovnávání vztahu mezi dvojicí vybraných faktorů, nebo popis vztahu, resp. vlivu faktorů vzhledem k naměřeným hodnotám. K popisu těchto vztahů a vlivů bylo využito naměřených parametrů drsnosti, tvarové přesnosti, a tam, kde to bylo relevantní i času dokončování a řezných sil. Pro připomenutí zopakují, že sledovanými proměnnými faktory byl průměr nástroje D , poloměr obráběné plochy R a trojice frézovacích strategií (Rozpočet s konstantním krokem v ose nástroje, rozpočet s konstantním krokem po křivce a rozpočet dle zadané výšky nerovnosti). Sledované konstantní faktory tvořila řezná rychlost $v_c = 80 \text{ m/min}$, a otáčky $n \text{ [min}^{-1}\text{]}$.

Jedním ze základních prostředků pro vyhodnocení byla dvojice parametrů Ra a Rz . Tyto parametry byly měřeny ve vodorovném a svislé směru. Pro vyhodnocování však bude použito pouze svislých náměrů u obou parametrů. Hodnota vodorovných parametrů byla ovlivněna posuvem a bude tedy sloužit pouze jako informativní. Náměry ve vodorovném směru jsou obsaženy v elektronické příloze diplomové práce.

Dalším způsobem vyhodnocení použitého v určitých oblastech bylo vyhodnocení pomocí dosažené tvarové přesnosti. Pro získání představy o tvarové přesnosti rádiusových ploch byla skutečná (naměřená) plocha porovnána s ideální plochou, tedy plochou přímo z CAD softwaru. Jinými slovy byl zjišťován odstup skutečného bodu od modelu.

Pro správné pochopení způsobu vyhodnocování je nutné zmínit skutečnost, že grafy použité v následujících kapitolách neobsahují první hodnotu náměru (tedy 5°) viz Obr. 38. Tato hodnota byla zanedbána záměrně z důvodu nemožnosti dodržení konstantní řezné rychlosti v tomto bodě. Požadavek na konstantní řeznou rychlost nebyl umožněn limitem otáček stroje. Vzhledem k tomu, že dokončování s konstantní řeznou rychlostí představuje jeden z podstatných faktorů této práce, je nutné se při vyhodnocování zaměřit pouze na místa (body), kde byla $v_c = \textit{konst.}$ dodržena. Vybrané grafy včetně 1. hodnoty jsou k dispozici v příloze této práce.



Obr. 38 - Vyhodnocovaná oblast po zanedbání 1. bodu

Jak již bylo zmíněno v předchozím textu, v průběhu experimentu byly měřeny řezné síly. Řezné síly však nepředstavují základní faktory, ze kterých se skládá cíl této diplomové práce. Z tohoto důvodu nejsou řezné síly zahrnuty do každé oblasti týkající se vyhodnocení. Jsou použity pouze jako podpůrné prostředky vyhodnocení v oblastech, kde to bylo uznáno za vhodné. (stejně jako

časové zhodnocení). V případě potřeby a realizace dalšího zkoumání jsou získané náměry opět uvedeny v elektronické příloze práce.

5.1 Určení vlivu konstantní řezné rychlosti a konstantních otáček při dokončování

První z celkových tří oblastí zhodnocení se zabývá porovnáním nastavených řezných podmínek při dokončování. Tím je rozuměno dokončování s konstantní řeznou rychlostí (A2, B2, C2) a dokončování s konstantními otáčkami (A1, B1, C1).

5.1.1 Určení vlivu zkoumané oblasti pomocí drsnosti povrchu Ra , Rz

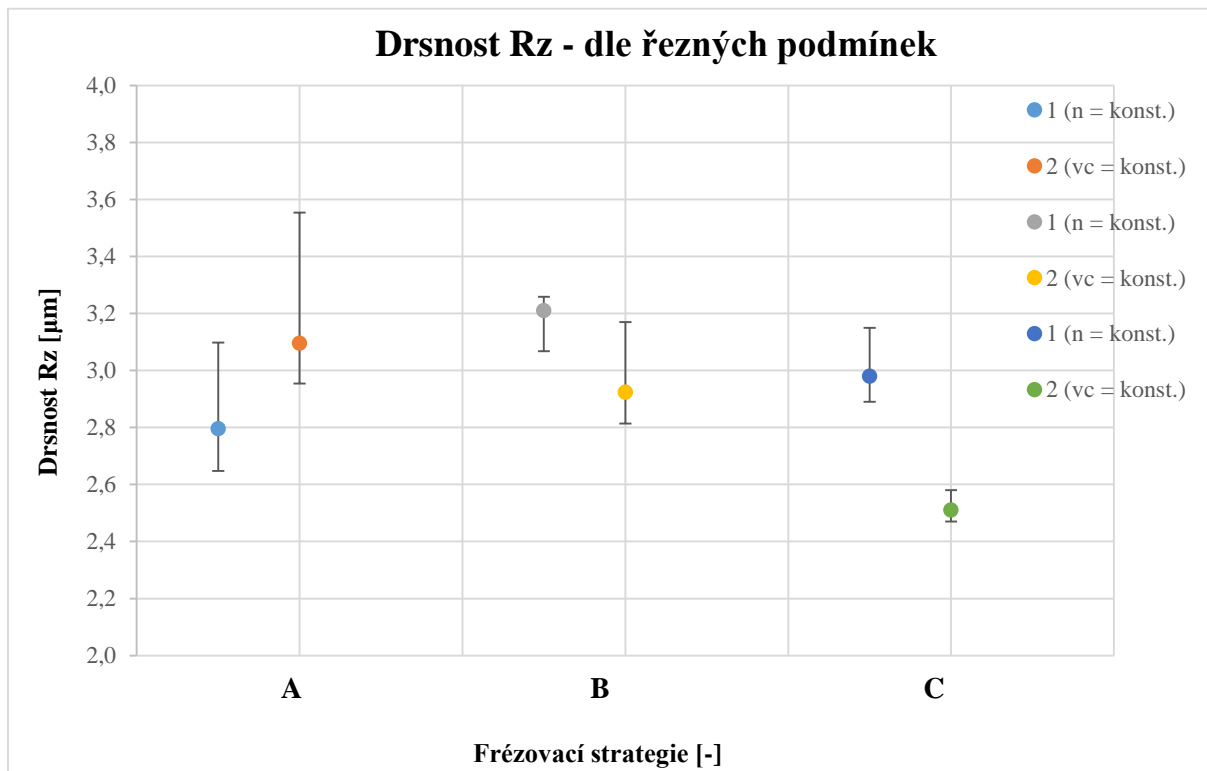
Tento vliv byl nejprve vyhodnocen pomocí parametrů drsnosti. Pro vyhodnocení dvou zmiňovaných způsobů nastavení řezných podmínek bylo třeba zkoumané parametry seskupit do jednotlivých tabulek, podle toho, zda bylo dokončení provedeno s konstantní řeznou rychlostí, nebo s konstantními otáčkami. Dále pak také dle toho, jaká strategie rozpočtu drah byla použita, neboť tato proměnná je se zkoumanou úzce spjatá. Pro maximální hodnoty drsnosti z jednotlivých náměrů byl v následujících tabulkách vypočten aritmetický průměr (nejprve ve sloupcích a poté ze sloupcových hodnot průměr celkový), minimální a maximální hodnota a maximální odchylka do plusu a maximální odchylka do mínusu viz ukázka v tabulkách č. 2 a č. 3. Tabulky se zabývají hodnotou Rz pro strategii s konstantním krokem v ose nástroje (A). S hodnotami pro zbývající strategie a druhý parametr Ra bylo pracováno analogickým způsobem.

Tab. 2 - Rz - konstantní otáčky

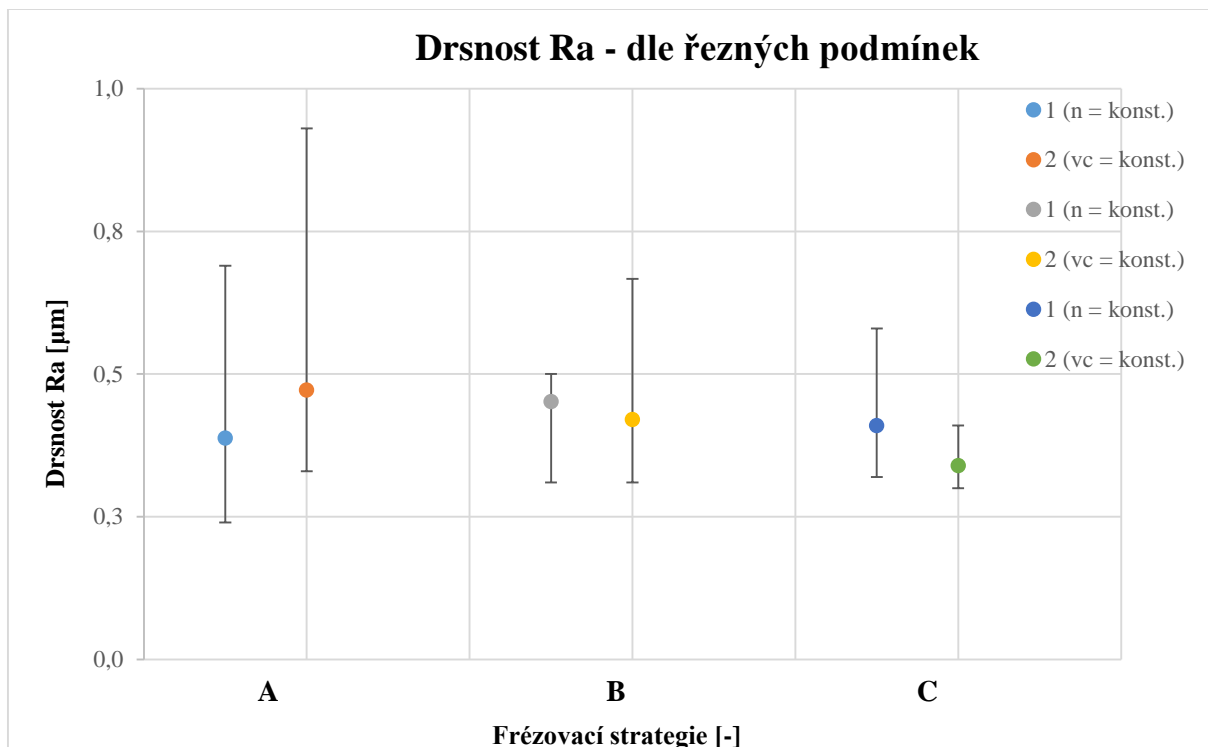
Konst. n [min ⁻¹]	Rz [μm]					
	A1	6,8	2,7	2,5	2,3	1,6
A1	9,5	4,3	3,8	3,4	2,7	
A1	3,4	3,5	2,6	2,4	1,8	
A1	3,4	2,4	2,6	2,3	2,1	
A1	2,2	1,8	2,1	2	1,6	
A1	2,4	1,7	1,5	1,2	1,5	
A1	2,4	2,1	3	1,8	2	
A1	6,5	3,4	3,4	2,9	2,3	
A1	2	2,7	3,7	4,2	1,3	
A1	6,5	2,1	1,5	1	0,9	
Průměr	4,51	2,67	2,67	2,35	1,78	2,80
Min.	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

Tab. 3 - Rz - konstantní řezná rychlost

Konst. vc[m/min]	Rz [μm]					
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



Obr. 39 - Graf znázorňující drsnost Rz - dle řezných podmínek

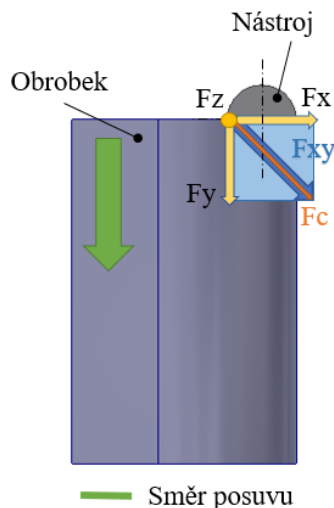


Obr. 40 - Graf znázorňující drsnost Ra - dle řezných podmínek

Na základě dat vyobrazených ve dvojici grafů (**Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.**, Obr. 39) je n a první pohled patrné, že dokončování s konstantní řeznou rychlostí je značně ovlivněno frézovacími strategiemi, zatímco dokončování s konstantními otáčkami je způsobem rozpočtu drah nástroje ovlivněno mnohem méně. Zvolením vhodné strategie rozpočtu drah nástroje lze při dokončování s konstantní řeznou rychlostí dosáhnout povrchu $Rz\ 2,6\ \mu\text{m}$ (resp. $Ra\ 0,4\ \mu\text{m}$), což je pro dokončovací frézování velmi dobrá hodnota.

5.1.2 Určení vlivu zkoumané oblasti pomocí řezných sil

Tato oblast obsahuje vyhodnocení vlivu konstantní řezné rychlosti a konstantních otáček při dokončování pomocí naměřených řezných sil. V případě konstantní řezné rychlosti dochází v průběhu dokončování rádiusové plochy k změně otáček stroje. Tato skutečnost má jednoznačný vliv na obráběcí proces a způsob, jak jí lze popsat je právě vyhodnocení pomocí řezných sil. Z tohoto důvodu bylo zhodnocení pomocí řezných sil do této oblasti zařazeno. Jak již bylo popsáno v průběhu experimentu, měřila se trojice řezných sil F_x , F_y a F_z (působící směrem do obrobku), které budou následně vyhodnoceny. Z řezných sil F_x a F_y byl vytvořen vektorový součin v rovině xy ($F_{xy} = \sqrt{F_x^2 + F_y^2}$) znázorňující odtlačení nástroje od obrobku. Poté byl vytvořen vektorový součin pro celkovou řeznou sílu ($F_c = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2}$). Pro názornost je na Obr. 41 uveden směr řezných sil.



Obr. 41 - Orientace řezných sil a vektorových součinů při dokončování (Pohled shora)

K vyhodnocení řezných sil bylo přistoupeno následovně. Jednotlivé vzorky byly seřazeny dle dokončovacích strategií společně s veškerými zaznamenanými náměry. Naměřené hodnoty řezných sil byly nejprve zprůměrovány ve sloupcích - podle stupněmi vyjádřených oblastí, ve kterých se měření na rádiusové ploše provádělo. (1. hodnota měření – 5° byla opět zanedbána s výše popsaného důvodu). Následovalo opětovné zprůměrování po celém zkoumaném úhlovém rozpětí rádiusu, čímž byl získán celkový průměr pro danou strategii, který byl dále s ostatními celkovými průměry porovnáván. Pro znázornění popsaných informací byla vytvořena ukázková tabulka pro strategii A1, dvojice tabulek a sloupcový graf.

Tab. 4 - Ukázka vyhodnocení řezných sil

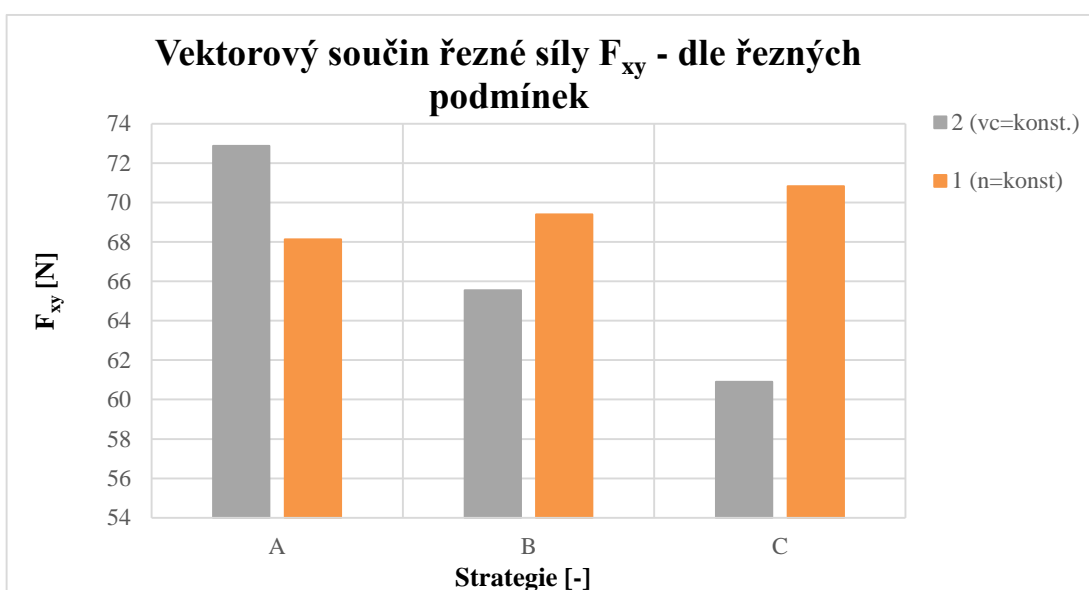
Průměr nástroje	Rádus plochy	Strategie	20°	20,1°	20,2°	20,3°
3	30	A1	105,4	101,2	98,4	115,2
4,9	44	A1	112,6	108,5	106,7	108,4
4,9	16	A1	124,1	116,6	112,5	115,5
9,5	49,799	A1	83,8	87,8	87,6	85,8
9,5	10,2019	A1	80,1	75,0	70,7	72,5
9,5	30	A1	127,5	127,8	128,5	126,4
9,5	30	A1	129,8	130,3	133,4	131,7
14,1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

Tab. 5 – F_{xy} - konstantní otáčky

	Strategie $n = konst.$		
	A1	B1	C1
F_{xy} [N]	68,1	69,4	70,8

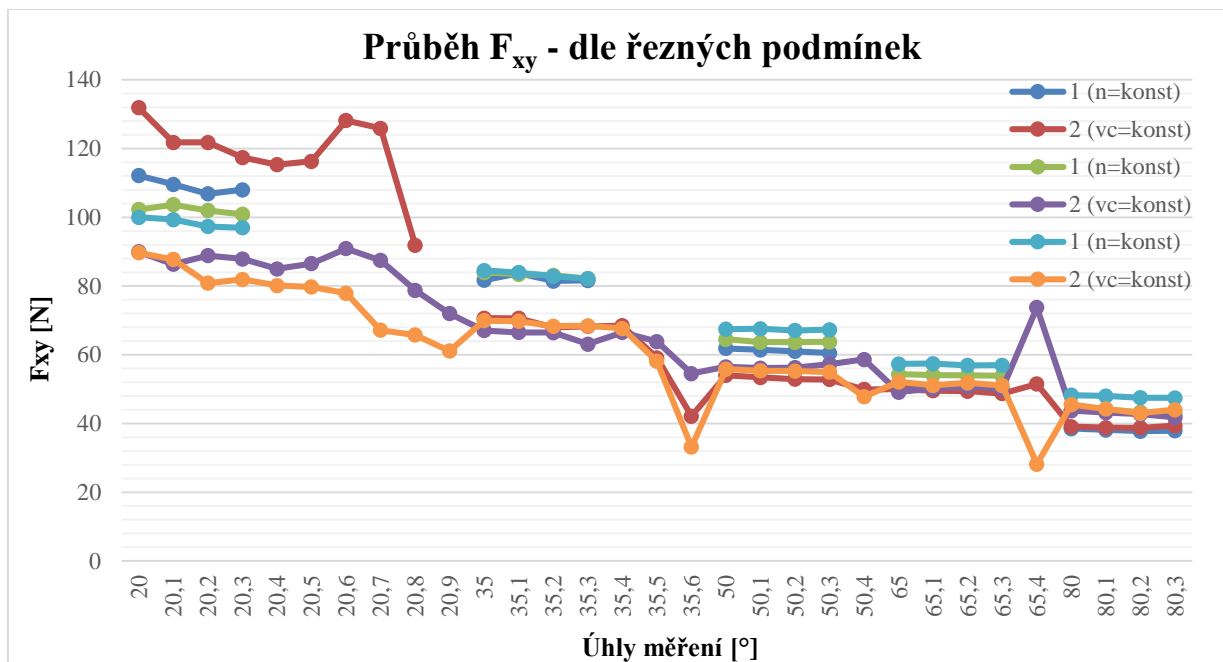
Tab. 6 – F_{xy} - konstantní řezná rychlost

	Strategie $v_c = konst.$		
	A2	B2	C2
F_{xy} [N]	72,9	65,5	60,9



Obr. 42 - Graf znázorňující dosahované hodnoty F_{xy}

Při pohledu do tabulek a grafu, které z nich byly vytvořeny, je patrné následující. Při dokončování s konstantními otáčkami je vidět, že řezné síly nabývají přibližně stejných hodnot u všech třech realizovaných frézovacích strategií. Pokud je nastaveno dokončování s konstantní řeznou rychlostí pak je mezi strategiemi A až C vidět znatelný rozdíl. Výslednou skutečnost z grafu znázorňující dosahované hodnoty řezných sil lze popsat těmito slovy. Dokončování s konstantními otáčkami představuje z hlediska řezných sil proces rovnoměrnější, avšak průměrné dosahované hodnoty sil jsou kromě strategie A vyšší, než při dokončování s konstantní řeznou rychlostí. V případě 2. způsobu dokončování jsou v řezných silách značné rozdíly, ale použitím vhodné dokončovací strategie je možné docílit řezných sil se značně nižší hodnotou. Tento závěr reflektuje rovněž graf na Obr. 39 zabývající se drsností povrchu a také následující graf znázorňující průběh součinu řezných sil. V grafu níže je porovnáván čistě způsob nastavení řezných podmínek, jednotlivé strategie zde nejsou rozlišovány.

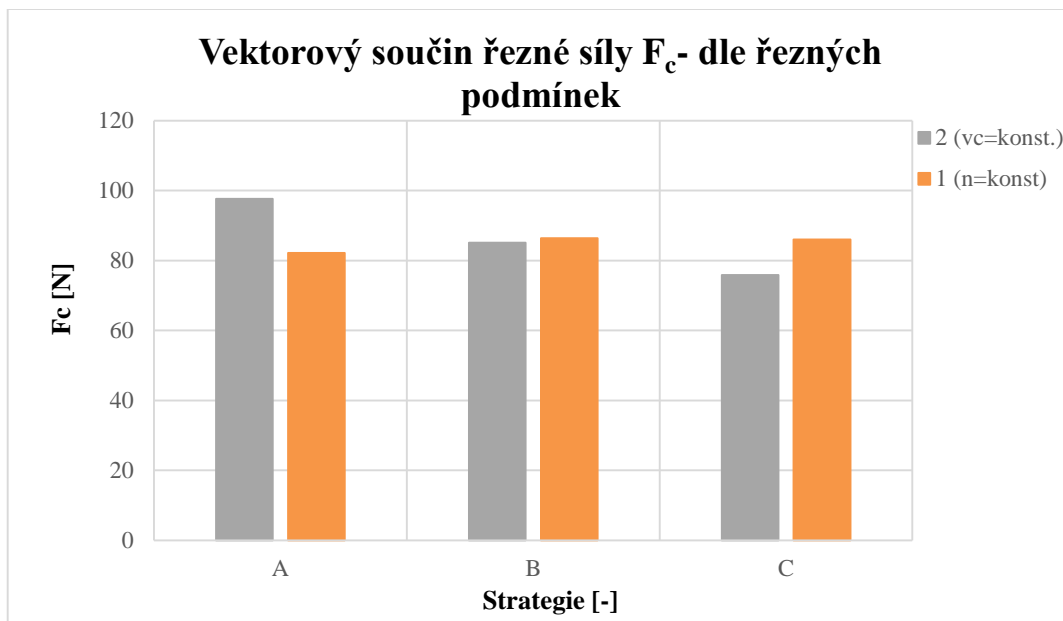


Obr. 43 - Graf znázorňující průběh vektorového součinnu řezných sil F_x , F_y

Další vyhodnocovanou řeznou silou byla celková síla F_c . Tato síla je vektorem a je orientována do prostoru. Opět byla analogickým způsobem vytvořena tabulka a dvojice grafů.

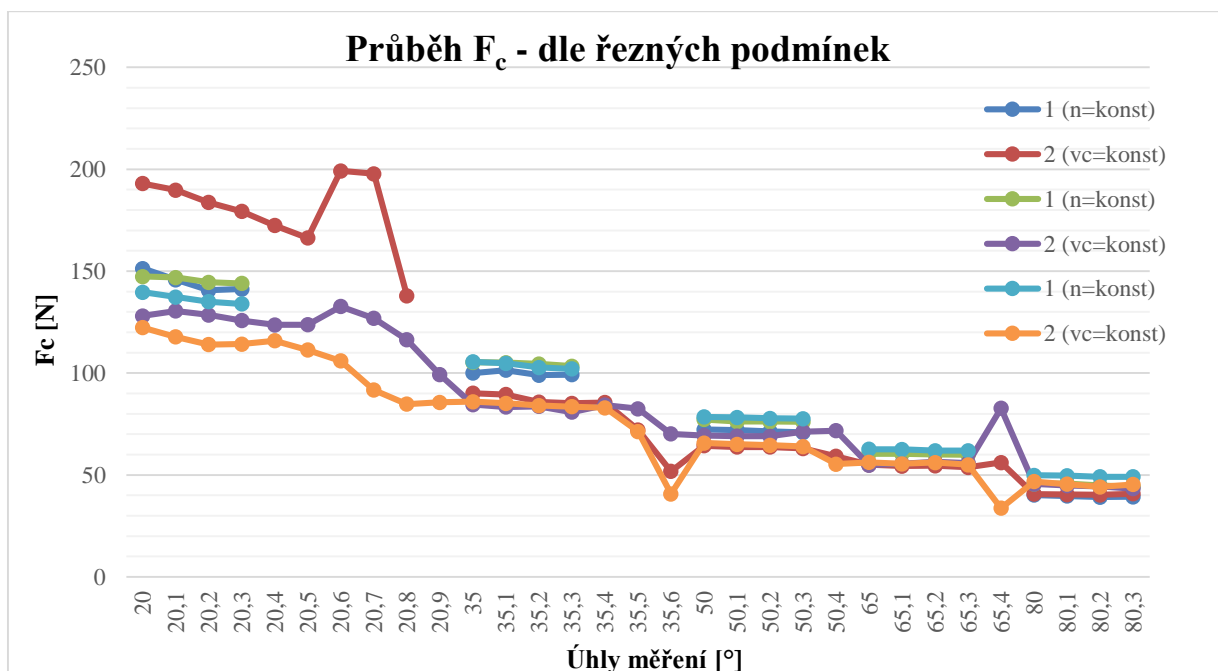
Tab. 7 – Vektor řezné síly F_c , - konstantní otáčky a konstantní řezná rychlost

	Strategie $n = konst.$		
	A1	B1	C1
F_c [N]	82,2	86,4	86,0
	Strategie $v_c = konst.$		
	A2	B2	C2
F_c [N]	97,6	85,1	75,8



Obr. 44 - Graf znázorňující dosahované hodnoty F_{xy}

Pro konstantní otáčky jsou průměrné hodnoty opět velmi vyvážené. Pro hodnoty dokončování s konstantní řeznou rychlostí mají rovněž „sestupný“ charakter s předchozím grafem, nicméně v případě vektorového součinu u síly F_c rozptýl hodnot u trojice strategií není zdaleka tak znatelný jako u sil působících v rovině F_{xy} . Graf znázorňující průběh zkoumané řezné síly má analogický průběh jako graf pro vektorový součin F_{xy} . Lze tedy vyvodit závěr, že celková síla F_c má pro konstantní řeznou rychlost větší vliv. V grafu je porovnáván čistě způsob nastavení řezných podmínek, jednotlivé strategie zde nejsou rozlišovány.



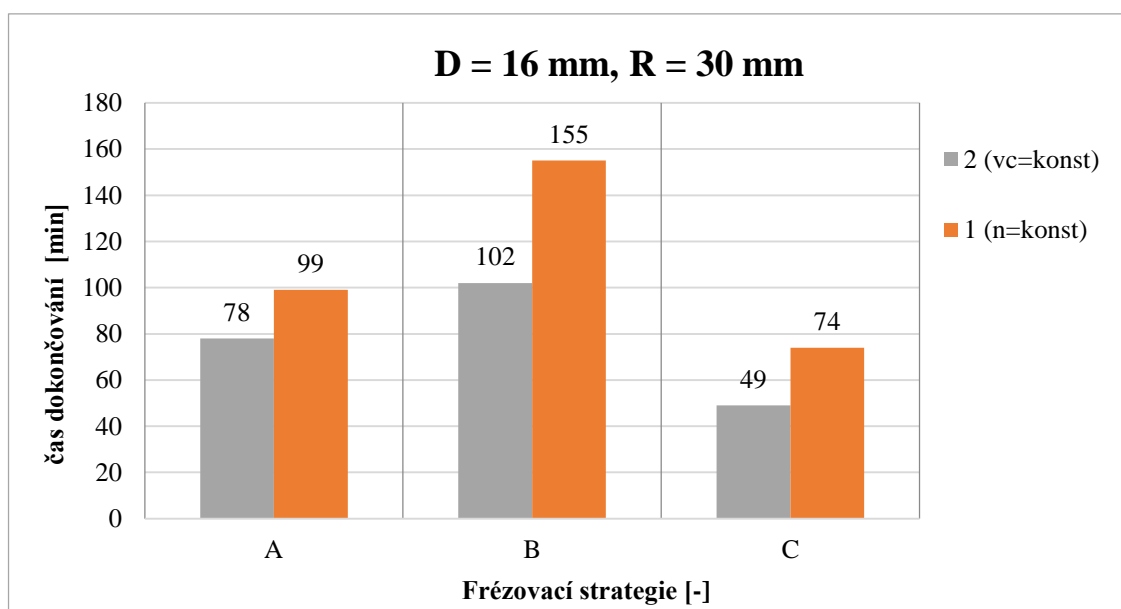
Obr. 45 - Graf znázorňující průběh řezné síly F_c

Výše uvedené grafy slouží pouze pro porovnání řezných sil lišících se ve způsobu nastavení řezných podmínek. Grafy znázorňující průběh hodnot F_{xy} rozčleněné dle použité strategie dokončování jsou uvedeny v příloze diplomové práce.

5.1.3 Časové zhodnocení frézovacích strategií s konst. n a konst. v_c

Cílem následujícího časového zhodnocení bylo zjistit, zda je efektivnější dokončování s dodržení konstantní řezné rychlosti, nebo s konstantními otáčkami. Pro správné porovnání jednotlivých obráběcích časů bylo nutné plán experimentu rozdělit a sjednotit data do oblastí vždy na základě stejného průměru nástroje a poloměru rádiusu. Vzniklo tedy celkem 9 oblastí naplněných daty. Při porovnání frézovacích strategií s příslušným nastavením řezných podmínek vyšly v každé oblasti jako časově méně náročnější strategie s konstantní řeznou rychlostí (viz legenda grafu č. 2 $v_c = konst$). Časové odchylky se pohybovali v rozsahu od 3 do 69 minut v závislosti na průměru nástroje a dokončovaném poloměru rádiusové plochy. Na níže uvedeném grafu tvoří časová úspora mezi konstantní řeznou rychlostí a konstantními otáčkami přibližně 34 % u strategie B (Konstantní krok po křivce) a 33,8 % u strategie C (Rozpočet dle zadané výšky nerovnosti). Časová úspora při dokončování ostatních vzorků je znázorněna v Tab. 8. Vypočtené úspory jsou vždy vztažené k dokončování s konstantními otáčkami, z toho důvodu jsou uváděny jako minusové. Frézovací strategií s největšími časovými rozdíly lze označit strategie B a C.

Příklad grafu je uveden na Obr. 46. Grafy pro zbývající kombinace průměru nástroje a poloměru dokončené plochy byly vytvořeny analogickým způsobem.



Obr. 46 - Příklad grafu znázorňující časové srovnání dokončovacích strategií a úsporu při dokončování s $v_c = konst$.

Tab. 8 - Přehled časové úspory u jednotlivých kombinací $\varnothing D$ a R v procentech

	Úspora času fréz. strategií s $v_c = konst$ oproti $n = konst$ [%]		
	A2	B2	C2
$D = 3 \text{ mm}, R = 30 \text{ mm}$	-14,3	-30,7	-31,4
$D = 4,9 \text{ mm}, R = 16 \text{ mm}$	-11,1	-28,6	-26,7
$D = 4,9 \text{ mm}, R = 44 \text{ mm}$	-17,0	-29,3	-30,0
$D = 9,5 \text{ mm}, R = 10,201 \text{ mm}$	-19,0	-30,3	-28,6
$D = 9,5 \text{ mm}, R = 30 \text{ mm}$	-18,3	-31,3	-32,1
$D = 9,5 \text{ mm}, R = 49,799 \text{ mm}$	-19,8	-30,7	-33,0
$D = 14,1 \text{ mm}, R = 16 \text{ mm}$	-19,1	-33,6	-33,3
$D = 14,1 \text{ mm}, R = 44 \text{ mm}$	-19,5	-34,2	-33,3

5.1.4 Úspora v peněžních jednotkách na základě strojní hodinové sazby stroje

Cílem této části zhodnocení je vyčíslení časové úspory z předchozí podkapitoly v peněžních jednotkách. Jedná se pouze o přibližný přepočít časových jednotek na jednotky peněžní pomocí hodinové sazby použitého stroje (frézovacího centra).

Tuto podkapitulu nelze pokládat za plnohodnotné technicko - ekonomické zhodnocení. Vzhledem k tomu, že záměr této práce je spíše experimentálního charakteru, nežli charakteru racionalizačního nebyla podmínka technicko - ekonomického zhodnocení zahrnuta do zadání diplomové práce. Následující přepočít slouží pouze k vytvoření předběžné představy o potenciální úspoře peněžních jednotek při dokončování s konstantní řeznou rychlostí. V níže uvedené tabulce je znázorněna jednotlivá časová úspora v minutách a v peněžních jednotkách vůči „konvenčnímu“ způsobu dokončování, tedy dokončování s konst. otáčkami.

Tab. 9 - Přehled časové úspory pro jednotlivé kombinace ØD a R v minutách

Frézovací strategie	Úspora času fréz. Strategii s $v_c = \text{konst}$ oproti $n = \text{konst}$ [min]					
	A2		B2		C2	
	Úspora čas [min]	Úspora p.j. [Kč]	Úspora čas [min]	Úspora p.j. [Kč]	Úspora čas [min]	Úspora p.j. [Kč]
D = 3 mm, R = 30 mm	-3,0	-70	-10,0	-233,3	-11,0	-256,6
D = 4,9 mm, R = 16 mm	-2,0	-46,66	-8,0	-186,6	-6,0	-140
D = 4,9 mm, R = 44 mm	-8,0	-186,66	-22,0	-513,33	-18,0	-420
D = 9,5 mm, R = 10,201 mm	-4,0	-93,33	-9,7	-226,3	-6,0	-140
D = 9,5 mm, R = 30 mm	-11,0	-256,66	-30,0	-700	-18,0	-420
D = 9,5 mm, R = 49,799 mm	-20,0	-466,6	-47,0	-1096,6	-29,0	-676,66
D = 14,1 mm, R = 16 mm	-9,0	-210	-24,5	-571,6	-13,0	-303,33
D = 14,1 mm, R = 44 mm	-25,0	-583,3	-69,0	-1610	-32,0	-746,66
D = 16 mm, R = 30 mm	-21,0	-490	-53,0	-1236,66	-25,0	-583,33

Strojní hodinová sazba stroje DMU 40 eVolinear je 1400 Kč/hod. [7] Vzhledem k tomu, že v Tab. 9 je čas udáván v minutách bylo nutné sazbu přepočítat na minuty, tj. 23,3 Kč/min. Veškeré vzorky jsou ze stejného materiálu a byly dokončeny na jednom pracovišti stejným strojem, při zachování stejného posuvu a radiálního kroku nástroje. Jak je patrné z Tab. 9, vzorky byly sjednoceny dle průměru nástroje a poloměru plochy, aby předmětem porovnání byla pouze frézovací strategie. Pro dosažení požadovaného výsledku v peněžních jednotkách bylo nutné vynásobit strojní minutovou sazbu časem dokončování pro jednotlivé skupiny průměru nástroje a poloměru rádiusové plochy, tedy zjištění úspory v každém řádku tabulky.

Obdržené výsledky vyjádřené v peněžních jednotkách odrážejí ušetření při dokončování s konstantní řeznou rychlostí pro každou z výše uvedených kombinací průměru nástroje a poloměru rádiusové plochy. V případě budoucí aplikace dokončovacího frézování s konstantní řeznou rychlostí může tabulka č. 9 posloužit jako přibližná informace o úspoře nákladů při využití jedné ze zkoumaných kombinací průměru nástroje a poloměru plochy.

V tabulce č.Tab. 10 je vyčíslená celková úspora při využití konstantní řezné rychlosti. Z této tabulky je možné vycházet však pouze za předpokladu, že by byl v budoucnu opakován pouze experiment identického obsahu zkoumaných faktorů.

Tab. 10 – Celková časová úspora stroje vyčíslená v peněžních jednotkách

Frézovací strategie $v_c = konst.$	A2	B2	C2
Úspora peněžních jednotek při použití frézovací strategie s $v_c = konst.$ [Kč]	-2403,3	-6374,67	-3686,67

Největší rozdíl je patrný u strategie B. (Rozpočet s konstantním krokem po křivce) Tento výsledek je dán tím, že strategie B se ukázala jako nejpomalejší strategie v provedeném experimentu (Což je detailněji popsáno v následující oblasti vyhodnocení). Na závěr lze říci, že dokončování s konstantní řeznou rychlostí se ukázalo jako výhodnější jak z pohledu časového, tak i z pohledu finančního.

5.2 Určení vlivu frézovacích strategií

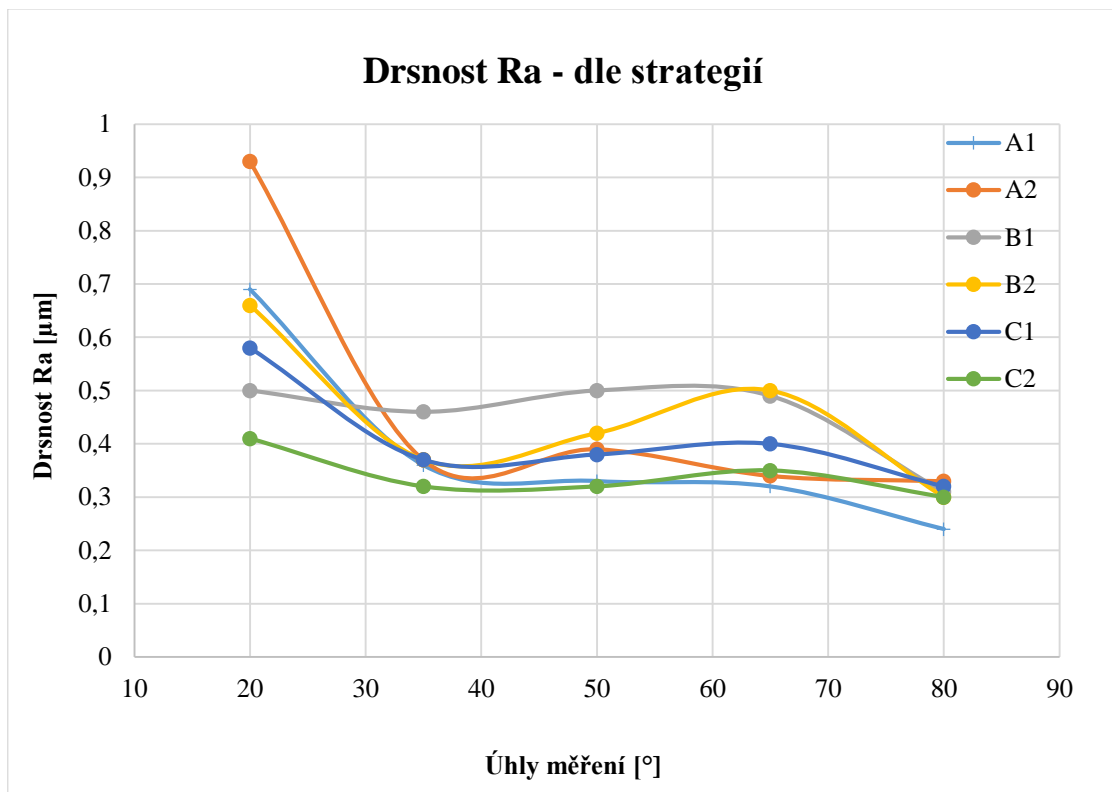
Ve druhé oblasti hodnocení následuje srovnání použitých dokončovacích strategií lišících se rozpočtem drah nástroje. (A - Rozpočet s konstantním krokem v ose nástroje, B - rozpočet s konstantním krokem po křivce a C - rozpočet dle zadané výšky nerovnosti). Do předchozí oblasti vyhodnocení byly frézovací strategie zapojeny pouze okrajově ve spojitosti s konstantními řeznými podmínkami. V této oblasti bude na jednotlivé strategie pohlíženo spíše na základě rozpočtu drah nástroje a vlivu rozpočtu na hodnocené faktory.

5.2.1 Drsnost povrchu R_a , R_z

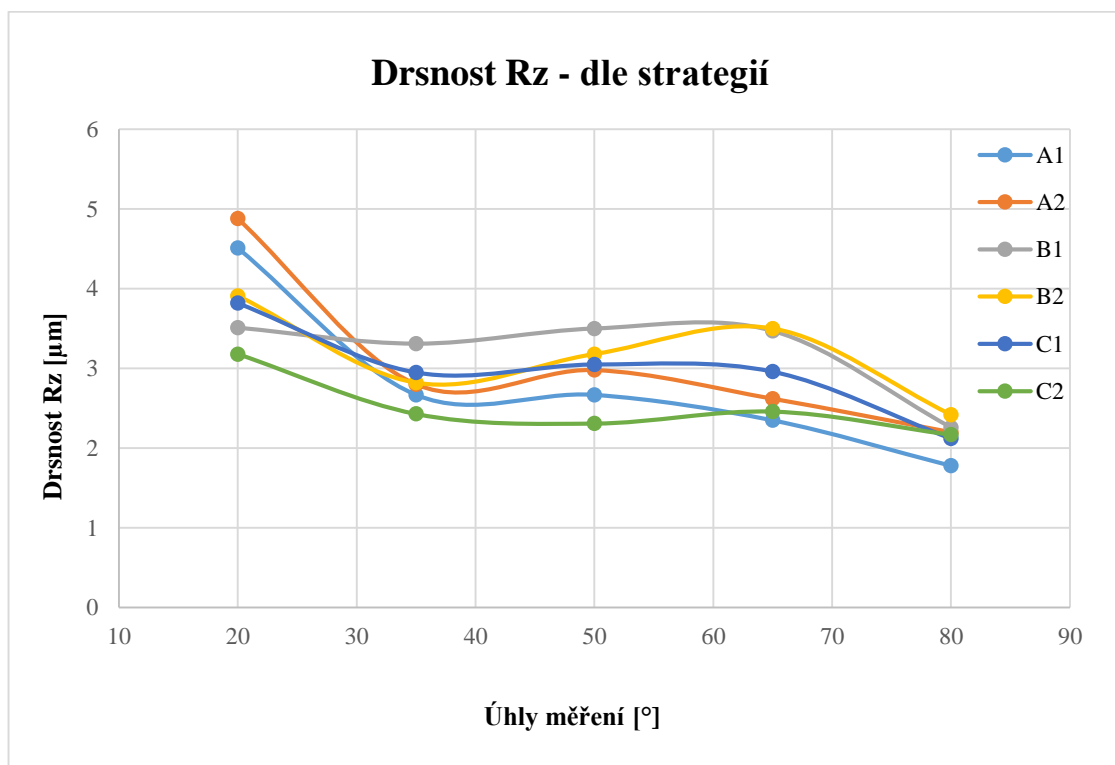
Cílem této podkapitoly je zjistit, jakou strategií lze dosáhnout nejen kvalitního povrchu, ale také co nejrovnoměrnějšího průběhu hodnot drsnosti po zkoumané rádiusové ploše.

Z níže uvedených grafů je patrný vývoj jednotlivých parametrů drsnosti v analyzovaných bodech rádiusové plochy. Analogickým způsobem jako v kapitole 5.1.1 byly vybrány opět nejvyšší hodnoty drsnosti, které byly zprůměrovány nejprve ve sloupcích a poté ze sloupcových průměrů na průměr celkový, který byl použit pro bod grafu. V této podkapitole však byly strategie porovnávány nikoli podle nastavení konstantní řezné rychlosti, nebo konstantních otáček, ale podle principu rozpočtu drah nástroje. Z tohoto důvodu jsou v následujících grafech strategie s číslem 1 (konstantními otáčkami) i s číslem 2. (konstantní řeznou rychlostí)

Na základě informací plynoucích z dvojice grafů lze říci, že strategie vyznačující se nejrovnoměrnějším průběhem jsou strategie B1 a C2. Pro ostatní strategie je charakteristický značný rozptyl parametrů mezi začátkem a koncem rádiusu, což je nevyhovující.

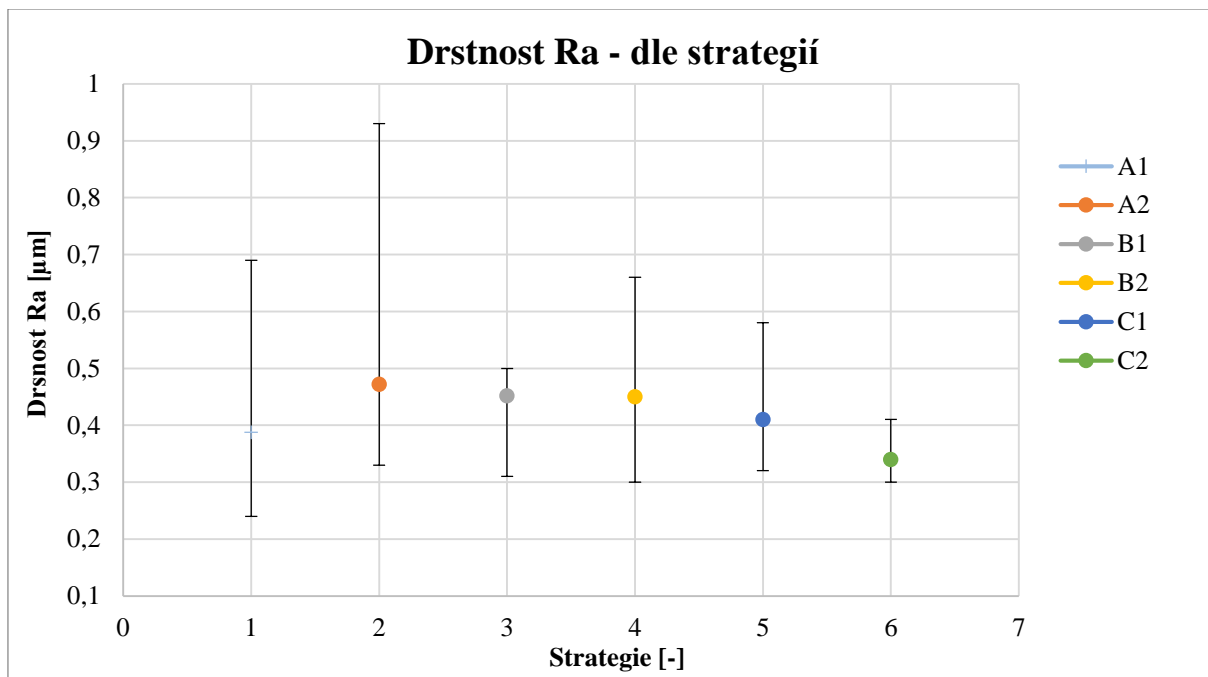


Obr. 47 - Graf znázorňující průběh parametru Ra

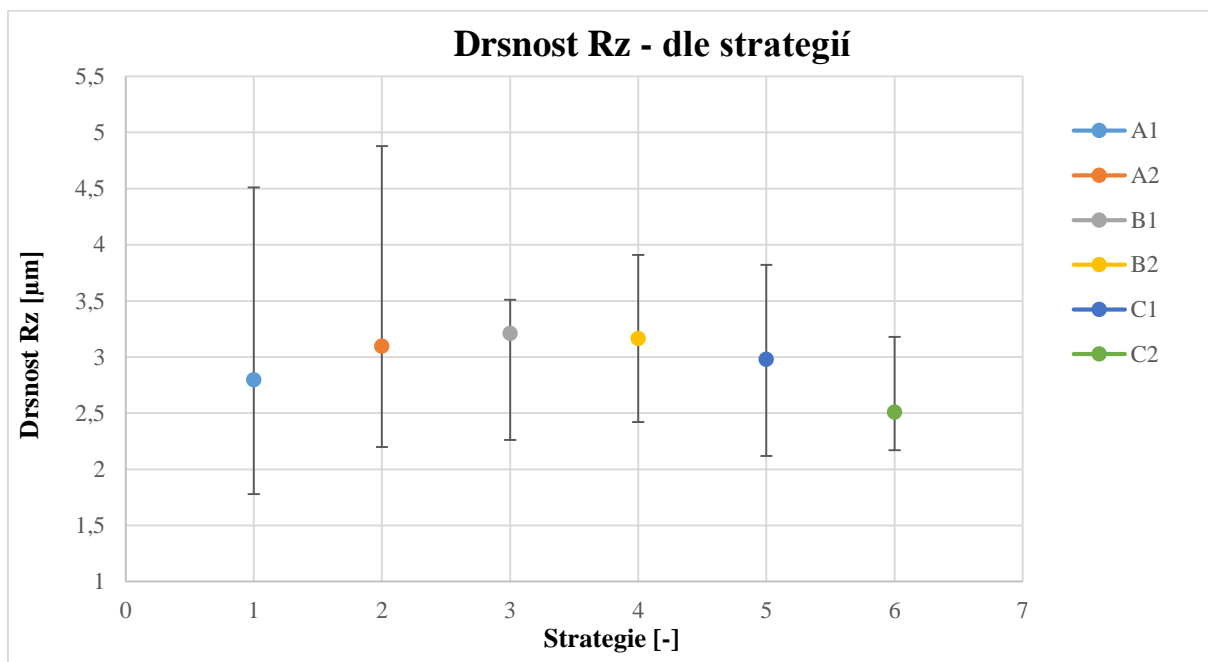


Obr. 48 - Graf znázorňující průběh parametru Rz

Pro zjištění rozsahu hodnot drsnosti pro jednotlivé strategie byly z těchto grafů vytvořeny grafy znázorňující průměrnou hodnotu drsnosti pro jednotlivé strategie a rozptyl maximálních a minimálních naměřených hodnot. V následujících grafech osa x tedy namísto úhlů znázorňuje jednotlivé strategie.



Obr. 49 - Graf znázorňující průměr a rozptyl parametru Ra



Obr. 50 - Graf znázorňující průměr a rozptyl parametru Rz

Na základě těchto grafů lze vyvodit následující závěr. Za vhodné strategie pro dokončovací frézování rádiusových ploch lze považovat strategie B (rozpočet s konstantním krokem po křivce) a C (rozpočet dle zadané výšky nerovnosti). Strategie C nabídla při zachování konstantní řezné rychlosti (C2) kvalitnější a rovnoměrnější povrch v porovnání s 2. nejlepší strategií B1. Naopak jako strategii nevhodnou pro dokončování rádiusové plochy z hlediska kvality povrchu lze označit strategii A (rozpočet s konstantním krokem v ose nástroje). Tato strategie sice v případě grafu na Obr. 49 vykazuje relativně kvalitnější povrch než v případě drsnosti Rz, nicméně dosahuje stále horších kvalit než zmiňované strategie B1, C2 a průběh hodnot drsnosti u strategie A je ve srovnání s B1 a C2 značně nerovnoměrný. Grafy znázorňující vodorovnou drsnost jsou v příloze práce.

5.2.2 Tvarová přesnost

Tvarová přesnost dokončených vzorků byla zjišťována pomocí metody odstupe bodu od modelu. Při náměrech se tedy v předem stanovené síti bodů viz Obr. 37 měřila jejich skutečná vzdálenost vzhledem k ideální rádiusové ploše reprezentované 3D CAD modelem.

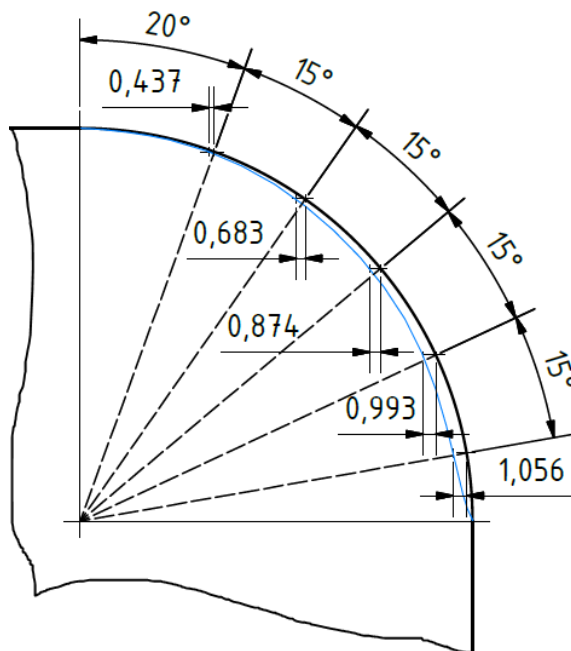
Vyhodnocení tvarové přesnosti předcházelo seřazení a zprůměrování naměřených dat. Tato oblast zhodnocení se zabývá dokončovacími strategiemi, proto byly jednotlivé náměry řazeny dle strategií. Nejprve byl vypočten průměr tak, aby každou dráhu, ve které se měřilo, reprezentovala jedna průměrná hodnota. Tyto hodnoty pak byly shromážděny v tabulce, kde následovalo opětovné zprůměrování hodnot náměrů v jednotlivých úhlech rádiusové plochy. (Hodnoty ve sloupcích) S touto finální hodnotou již bylo možné pracovat v grafu. Ukázka tabulky, kterou bylo nutné vytvořit pro veškeré provedené strategie je zde.

Tab. 11 - Ukázka tabulky hodnotící odstup bodu od modelu pro strategii A1

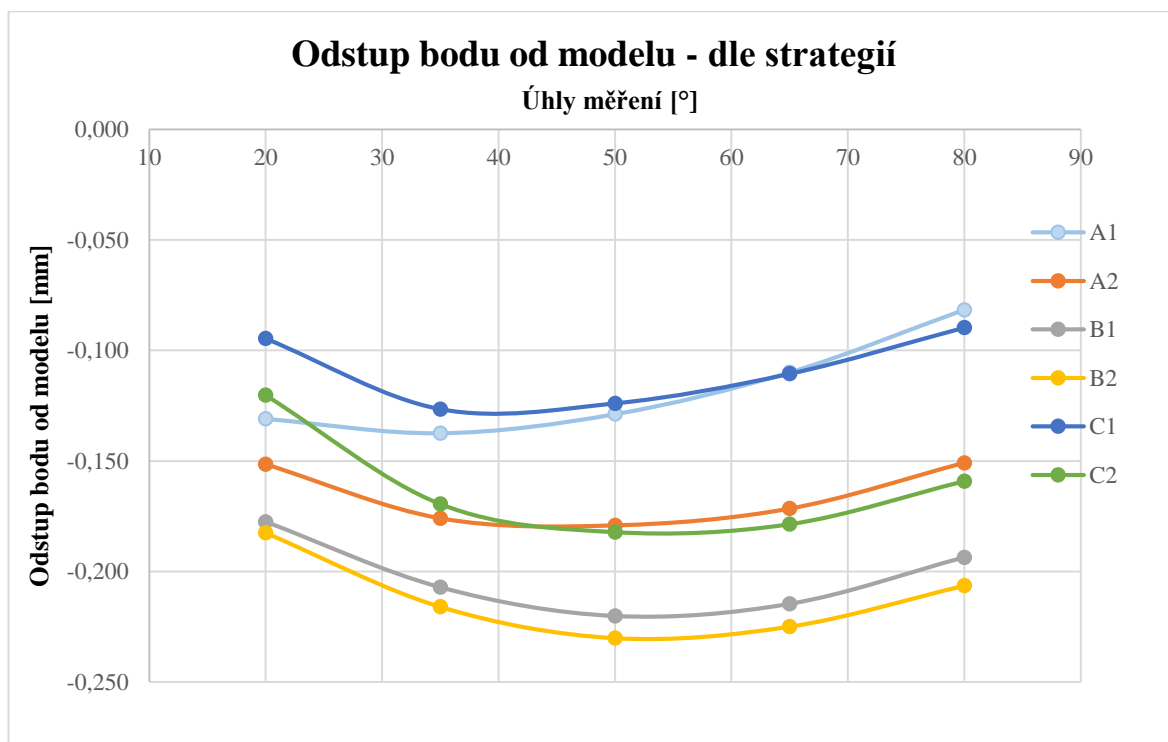
Průměr nástroje	Rádus plochy	Strategie	Průměr odstup 20°	Průměr odstup 35°	Průměr odstup 50°	Průměr odstup 65°	Průměr odstup 80°	
3	30	B2	-0,384	-0,414	-0,398	-0,352	-0,240	
4,9	16	B2	-0,007	-0,032	-0,050	-0,064	-0,071	
4,9	44	B2	-0,025	-0,057	-0,071	-0,080	-0,097	
9,5	30	B2	-0,414	-0,435	-0,424	-0,382	-0,315	
9,5	30	B2	-0,365	-0,335	-0,284	-0,206	-0,120	
9,5	10,201	B2	0,052	0,051	0,045	0,037	0,017	
9,5	49,799	B2	-0,437	-0,683	-0,874	-0,993	-1,056	
14,1	16	B2	-0,004	-0,022	-0,037	-0,048	-0,050	
14,1	44	B2	-0,004	-0,027	-0,043	-0,055	-0,067	
16	30	B2	-0,237	-0,206	-0,165	-0,107	-0,065	
Průměr			-0,183	-0,216	-0,230	-0,225	-0,206	-0,212
Min			-0,437	-0,683	-0,874	-0,993	-1,056	-0,230
Max			0,052	0,051	0,045	0,037	0,017	-0,183
ch+			-0,130	-0,165	-0,185	-0,188	-0,189	0,029
ch-			-0,255	-0,467	-0,644	-0,768	-0,850	0,018

Pro názornější popsání metodiky hodnocení odstupe bodu od modelu byl pro modře zvýrazněné hodnoty odstupe vytvořen příklad, ve kterém je demonstrována odchylka skutečného tvaru

rádiusu (modrá) od tvaru ideálního. Z důvodu přehlednosti byl zvolen vzorek s největším naměřeným odstupem bodu od modelu z celého provedeného experimentu.

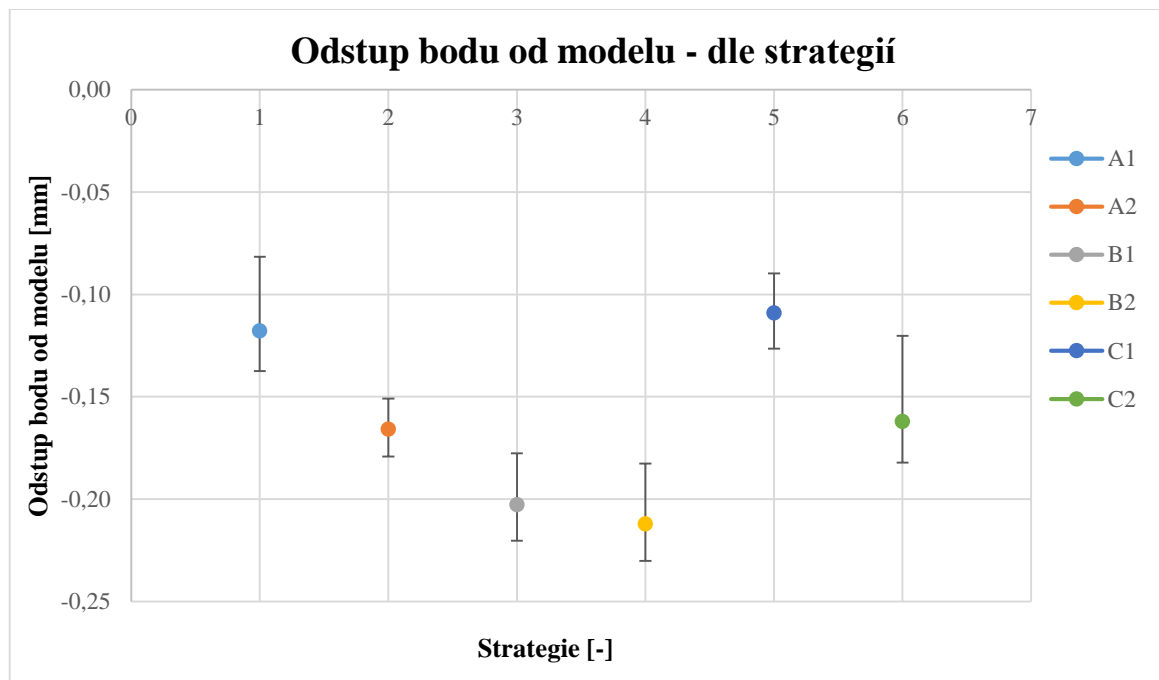


Obr. 51 - Skutečná a ideální plocha rádiusu $R = 49,799$



Obr. 52 – Odstup bodu od modelu u jednotlivých dokončovacích strategií

Jak je patrné z výše uvedeného grafu žádný skutečný povrch nedosahuje nulových odstupů, resp. ideálních hodnot. Největší hodnota odstupu byla naměřena v padesáti stupních rádiusové plochy a to pro strategii B2.



Obr. 53 - Průměr a rozptyl odstupu bodu od modelu u dokončovacích strategií

Odhylku od ideálního stavu (od nuly) lze dodatečně korigovat např. korekcemi nástroje. V tomto zkoumaném případě je však důležitý rozptyl u jednotlivých strategií znázorněný na Obr. 53. Rozptyl pro každou strategii je stěžejní pro případné tolerované rozměry ve výkresové dokumentaci. Z grafu znázorňujícího rozptyl hodnot u dané strategie je patrné následující. V případě strategie A dochází při zachování konstantní řezné rychlosti ke značnému snížení rozsahu odstupu bodu od modelu. U strategie C je tomu naopak. V případě strategií B jsou odstupy při obou způsobech nastavení řezných podmínek téměř totožné. Nicméně je vidět, že i přes největší počet drah u strategie B (Konstantní krok po křivce) není zárukou dodržení přesného povrchu.

5.3 Určení vlivu průměru nástroje a poloměru rádiusu ve vztahu k dokončované ploše

Jak již název napovídá, tahle oblast hodnocení je určena ke zkoumání průměrů nástrojů, se kterými byly v realizovaném experimentu dokončeny plochy s daným poloměrem rádiusu. Cílem tedy bude zjistit, zda mezi dvojicí proměnných faktorů existuje nějaký vztah či nikoli. Pro posouzení bude využito následujících hodnotících kritérií.

5.3.1 Drsnost povrchu R_a, R_z

Prvním z hodnotících kritérií je kvalita dokončeného povrchu. V předchozí kapitole bylo zjištěno, že vhodnými strategiemi pro dokončování rádiusových ploch z hlediska drsnosti povrchu jsou strategie C2 a B1. Na základě tohoto výsledku bylo určení vlivu průměru nástroje ve vztahu k poloměru dokončované plochy primárně prováděno z hodnot drsnosti naměřených právě u těchto dvou strategií.

Následující tabulka je uspořádána podle průměru nástroje. Ke každému průměru jsou připojeny poloměry ploch, které byly s daným průměrem dokončeny a také hodnoty naměřené drsnosti. Z celkem 5ti náměrů (tedy absencí 1. bodu) bylo třeba vybrat jednu hodnotu, se kterou se bude dále pracovat. Vzhledem k tomu, že hodnotícím kritériem je drsnost povrchu, byla vybrána

vždy nejvyšší hodnota z naměřených maxim. Z maximálních hodnot byl poté proveden aritmetický průměr, který pro určení závislosti při technickém zhodnocení postačí.

Tab. 12 - Vliv průměru nástroje na kvalitu dokončované plochy - parametr Ra

Pr.nástroje D [mm]	R.plochy [mm]	Strategie	Ra [μm]					Ra - max. [μm]	Průměr [μm]
3	30	B1	0,8	0,6	0,6	0,6	0,3	0,8	0,8
3	30	C2	0,8	0,5	0,3	0,4	0,2	0,8	
4,9	16	C2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,625
4,9	16	B1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	
4,9	44	B1	1,2	1	0,6	0,9	0,9	1,2	
4,9	44	C2	0,9	0,6	0,6	0,7	0,8	0,9	
9,5	10,201	B1	0,9	0,7	1	0,7	0,5	1	0,525
9,5	10,201	C2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	
9,5	30	C2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	
9,5	30	B1	0,2	0,2	0,1	0,2	0,1	0,2	
9,5	30	B1	0,3	0,2	0,2	0,2	0,1	0,3	
9,5	30	C2	0,6	0,3	0,4	0,4	0,2	0,6	
9,5	49,799	B1	0,4	0,8	1,4	1	0,3	1,4	
9,5	49,799	C2	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	
14,1	16	B1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1	0,2	0,375
14,1	16	C2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	
14,1	44	C2	0,5	0,5	0,5	0,6	0,5	0,6	
14,1	44	B1	0,5	0,5	0,5	0,5	0,4	0,5	
16	30	C2	0,2	0,2	0,3	0,3	0,2	0,3	0,35
16	30	B1	0,3	0,2	0,2	0,4	0,2	0,4	

Tab. 13 - Vliv průměru nástroje na kvalitu dokončované plochy - parametr Rz

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	

Zprůměrované hodnoty se pro oba dva zkoumané parametry drsnosti vyvíjely stejným způsobem. Pro menší průměry nástroje ($D = 3\text{mm}$, $D = 4,9\text{mm}$) vycházela vyšší drsnost než pro větší průměry. Z toho plyne následující závislost: Se zvětšujícím průměrem nástroje dostáváme nižší hodnoty drsnosti – tedy kvalitnější povrch. Tuto závislost lze také podpořit faktem, že nástroj většího poloměru má větší rozsah efektivních průměrů, jinými slovy se dokáže více přizpůsobit dokončovanému poloměru a zajistit tak povrch dosahující vyšší kvality.

5.3.2 Porovnání skutečných parametrů drsnosti Ra , Rz s teoretickými Ra_t , Rz_t

Díky tomuto porovnání bude možné demonstrovat podobnost průběhu teoretické hodnoty drsnosti a skutečné naměřené hodnoty na základě rozsahu průměrů nástrojů. Cílem této podkapitoly bude stanovit přibližné odchylky mezi teoretickými hodnotami a skutečností. Pro výpočet teoretické drsnosti bylo třeba nadefinovat vhodný rozsah teoretických průměrů ($D_t = 3 - 16 \text{ mm}$). Rozsah byl zvolen tak, aby zahrnoval veškeré skutečné průměry použité v experimentu.

5.3.2.1 Vzorce pro výpočet teoretické hodnoty drsnosti Ra , Rz

Při výpočtu teoretické hodnoty drsnosti u dokončovacího frézování se vychází z předpokladu, že drsnost povrchu je tvořena nástrojem s nenulovým poloměrem špičky. Vzhledem k prakticky používaným rozsahům posuvu lze říci, že v praxi převažuje skutečnost, že stopy po nástroji jsou tvořeny obloukem ostří, tzv. oblouková reprodukce. Z této skutečnosti vychází i výpočet teoretické hodnoty drsnosti parametru Ra pro jemné frézování. [18]

$$Ra_t = \frac{10^3 * r_\epsilon^2 * (2 * \alpha_A - \sin 2 * \alpha_A)}{f} \quad 1.1$$

$$\alpha_A = \arccos * \left[\frac{r_\epsilon}{f} * \left(\arcsin \frac{f}{2 * r_\epsilon} + \frac{f}{4 * r_\epsilon^2} * \sqrt{4 * r_\epsilon^2 - f^2} \right) \right] \quad 1.2$$

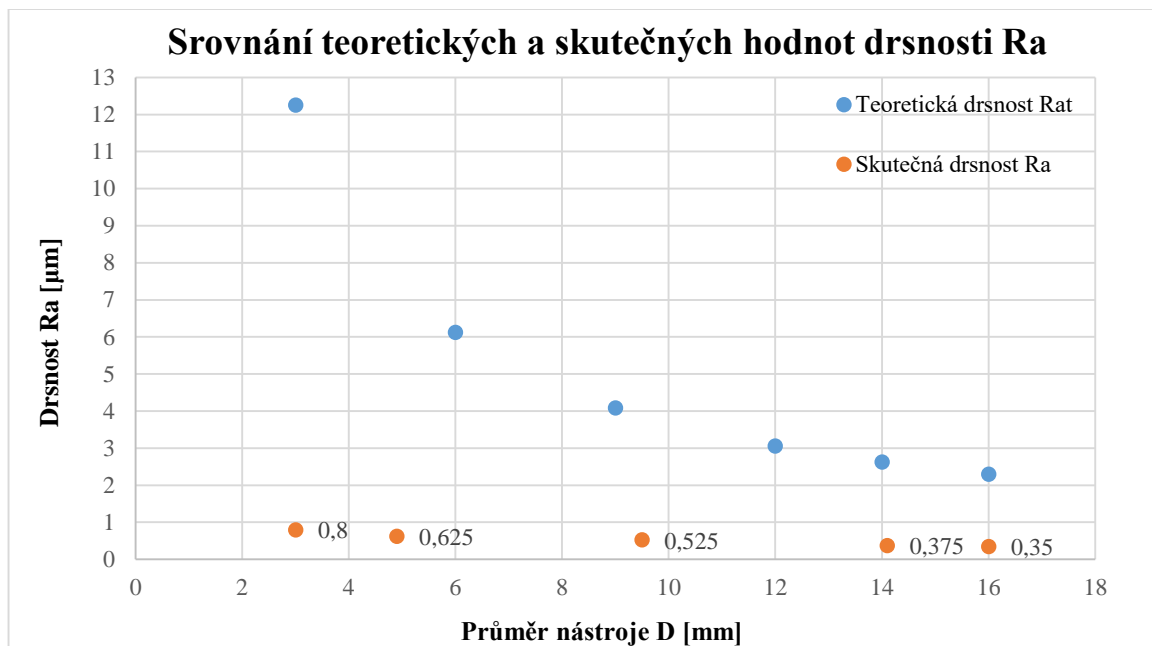
$$r_\epsilon = \frac{D}{2} \quad 1.3$$

Pro teoretický výpočet parametru Rz platí vztah: [18]

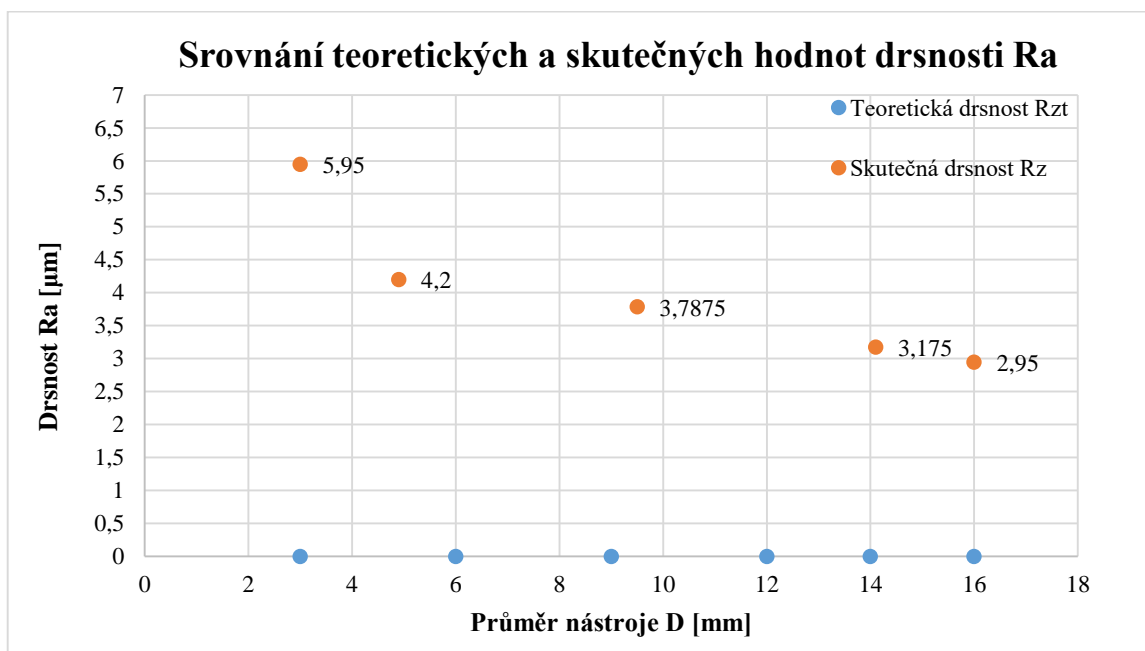
$$Rz_t = r_\epsilon * \left(1 - \sqrt{1 - \frac{a_e^2}{4 * r_\epsilon^2}} \right) \quad 1.4$$

$$r_\epsilon = \frac{D}{2} \quad 1.3$$

Po dosazení potřebných hodnot byly spočteny následující hodnoty teoretické drsnosti. Vypočtená data drsnosti pro teoretické průměry nástrojů a naměřená data drsnosti pro skutečné průměry nástrojů jsou společně znázorněny v grafech.



Obr. 54 - Srovnání teoretických a skutečných hodnot drsnosti Ra



Obr. 55 - Srovnání teoretických a skutečných hodnot drsnosti Rz

V případě prvního grafu je patrný značný pokles teoretických hodnot R_{at} vzhledem k růstu průměru nástroje. Tedy – čím větší průměr nástroje, tím lepší kvalita povrchu. Skutečné hodnoty Ra se vyvíjejí stejným způsobem a lze pro ně na základě výše uvedeného grafu aplikovat stejný závěr s tím rozdílem, že pokles není zdaleka tak intenzivní jako u hodnot teoretických.

Průběh skutečných hodnot druhého zkoumaného parametru, parametru Rz byl obdobný jako u hodnoty Ra. Naopak teoretické hodnoty parametru R_{zt} vyšly několika násobně menší než skutečné naměřené hodnoty. Pro vyvrácení chybného výpočtu byla použita dvojice odlišných vzorců rovněž určující teoretickou hodnotu parametru Rz, U obou ale vyšla stejná hodnota jako u prvotně použité rovnice č. 1.14. Vzniklým problémem může být nesprávně odvozený vzorec,

nebo jeho nevhodná aplikace na zkoumanou problematiku. Řešení tohoto problému může být jedním z bodů dalšího zkoumání v tomto oboru.

Na základě předchozího odstavce lze tedy za relevantní informace považovat pouze data z prvního grafu. Teoretické hodnoty parametru Ra jsou vzhledem k tomu, že se jedná o dokončovací operaci velmi vysoké. Je možné je tedy použít pouze pro predikci a vývoj drsnosti vzhledem k průměru nástroje. Teoretický výpočet je nutné chápat s určitou rezervou, nerespektuje totiž některé vlivy, které se na drsnosti mohou podílet, a také neuvažuje s poloměrem dokončovaného rádiusu.

5.3.3 Vliv poloměru dokončované plochy na kvalitu povrchu

Dalším důležitým bodem vyhodnocovaným v této oblasti je vliv poloměru dokončované plochy na kvalitu povrchu. V prvním případě pro popsání této závislosti poslouží opět tabulka vytvořená podobným způsobem jako tabulky Tab. 12, 13 s tím rozdílem, že jsou zde jednotlivé nástroje rozděleny podle poloměru dokončovaných ploch a průměrná hodnota je počítána pouze pro skupinu shodných poloměrů dokončených nástrojem konkrétního průměru. Vzhledem k tomu, že se hodnota Ra vyvíjela analogickým způsobem, vkládám zde pouze tabulku s hodnotou Rz .

Tab. 14 - Vliv poloměru plochy její kvalitu - parametr Rz

Pr. nástroje D [mm]	R.plochy [mm]	Strategie	Rz [μ m]					Rz - max. [μ m]	Průměr [μ m]
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	5,75
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	2

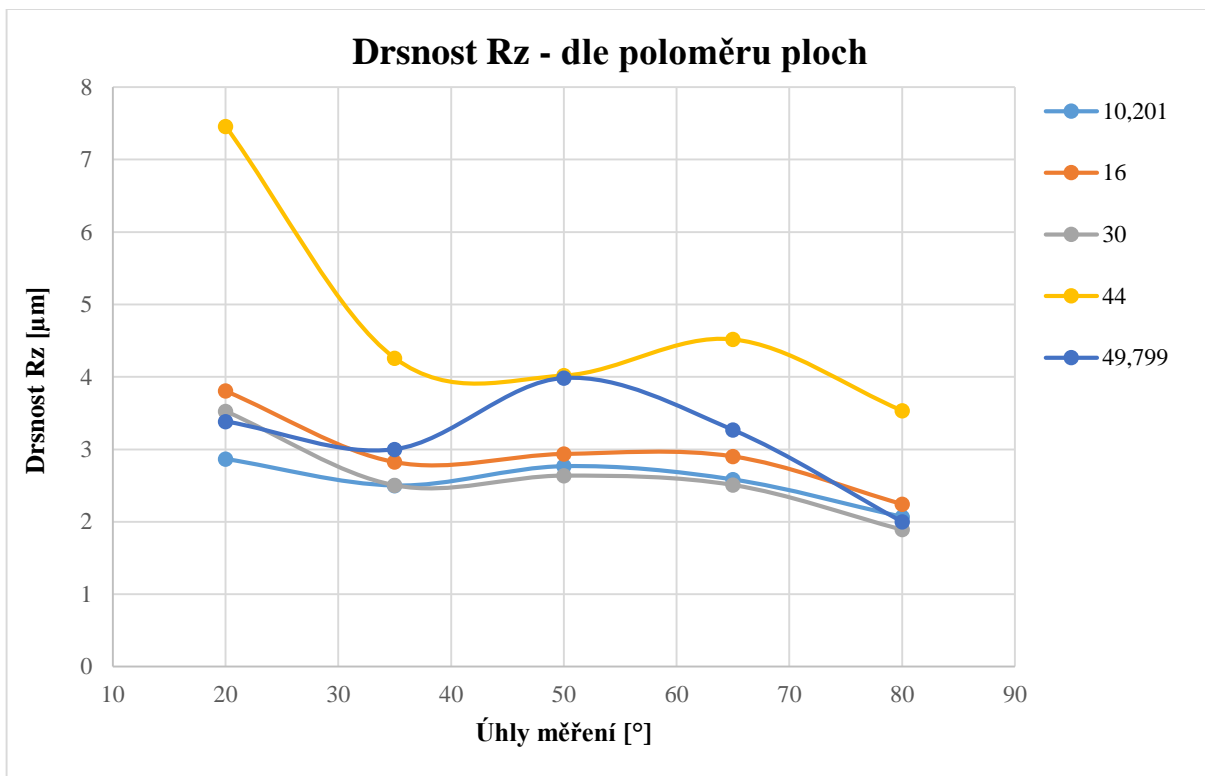
14,1	16	C2	1,5	1,7	1,6	1,5	1,5	1,7	
14,1	44	C2	3,9	3,1	2,8	3,5	3	3,9	4,35
14,1	44	B1	4,8	3	2,9	2,7	2,3	4,8	
16	30	C2	1,8	2,1	2,3	2,7	1,9	2,7	2,95
16	30	B1	2,3	1,8	2	3,2	1,5	3,2	

Předpokládaným výsledkem tohoto úseku zhodnocení bylo, že se zvyšujícím se poloměrem rádiusu se zvyšuje i drsnost – tedy zhoršuje kvalita povrchu. Tento výsledek avšak nebyl zcela potvrzen. Při dokončování rádiusu o poloměru $R = 10,201$ mm byla zprůměrovaná hodnota drsnosti větší, než průměrná hodnota při dokončování rádiusu téměř trojnásobného poloměru ($R = 30$ mm). Vzhledem k tomu, že oba poloměry byly obráběny stejným průměrem nástroje, je tedy možné průměr nástroje zanedbat. S určitou pravděpodobností lze říci, že se nejedná ani o chybu měření, což lze dokázat tím, že pro hodnotu R_a byl výsledek analogický viz výňatek z Tab. 15

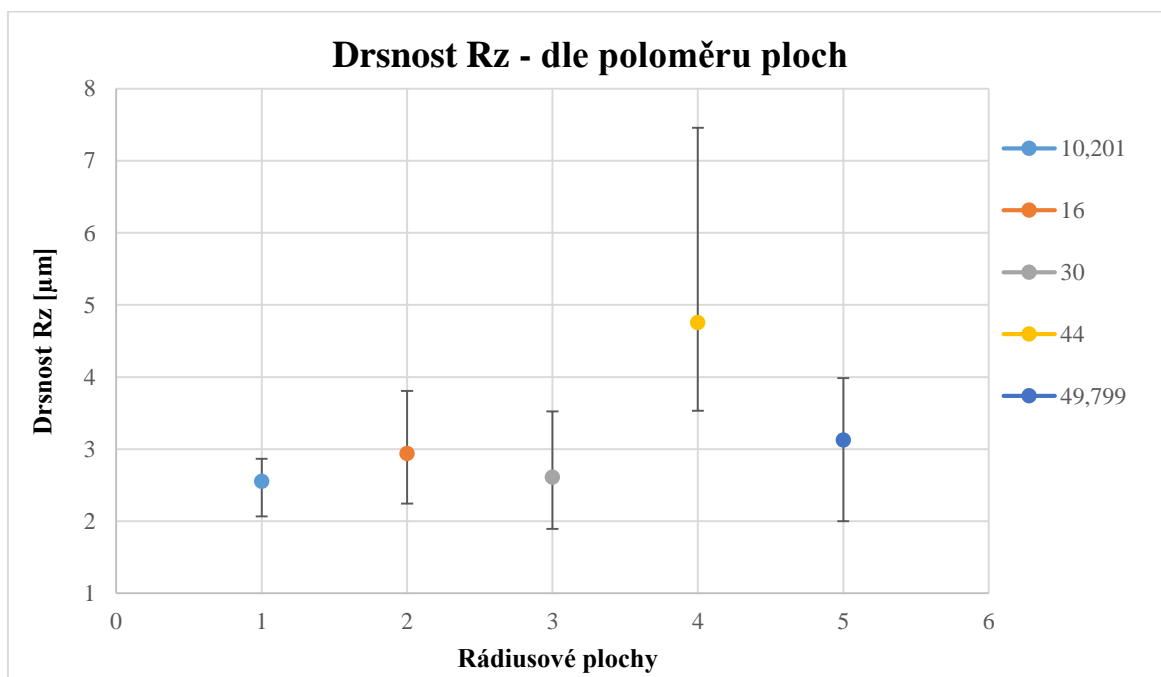
Tab. 15 - Vliv poloměru plochy její kvalitu - parametr R_a (Výňatek)

Pr.nástroje D [mm]	R.plochy [mm]	Strategie	Ra [μ m]					Ra - max. [μ m]	Průměr [μ m]
9,5	10,201	B1	0,9	0,7	1	0,7	0,5	1	0,6
9,5	10,201	C2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	
9,5	30	C2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,325
9,5	30	B1	0,2	0,2	0,1	0,2	0,1	0,2	
9,5	30	B1	0,3	0,2	0,2	0,2	0,1	0,3	
9,5	30	C2	0,6	0,3	0,4	0,4	0,2	0,6	
9,5	49,799	B1	0,4	0,8	1,4	1	0,3	1,4	0,85
9,5	49,799	C2	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	

Dalším způsobem, jak je možné zkoumat vliv poloměru dokončované plochy na kvalitu povrchu, jsou níže uvedené grafy. Zde je třeba zmínit skutečnost, že v grafech jsou zahrnuty veškeré dokončovací strategie použité v experimentu. Jelikož křivky měly opět analogický průběh v obou parametrech, je zde použit graf znázorňující pouze drsnost R_z .



Obr. 56 - Graf znázorňující průběh parametru Rz



Obr. 57 - Graf znázorňující průměr a rozptyl parametru Rz

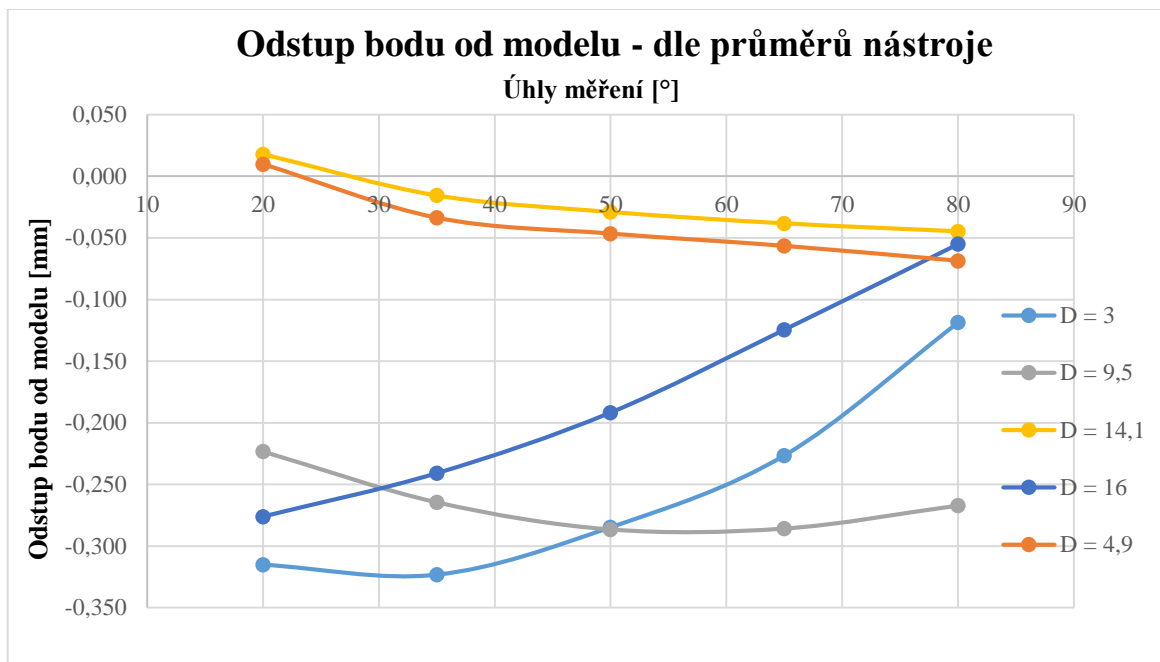
Informace plynoucí z dvojice grafů předběžný předpokládány výsledek opět vyvrací. Nejvyšší kvalita byla dosažena u $R = 10,201 \text{ mm}$, nicméně u $R = 44 \text{ mm}$ byl povrch kvalitativně horší než největší dokončovaný $R = 49,799 \text{ mm}$. Grafy na rozdíl od zprůměrovaných dat v tabulce také poskytují informace o rovnoměrnosti průběhu hodnot drsnosti. Na základě posouzení průběhu křivek, lze tedy vyčíst následující skutečnost. Se zvyšující se hodnotou poloměru rádiusové plochy dochází ke zhoršení rovnoměrnosti kvality povrchu.

5.3.4 Tvarová přesnost

V této oblasti bylo hodnoceno, jaký vliv má průměr nástroje na tvarovou přesnost dokončených rádiusových ploch. Naměřená data byla opět zprůměrována (analogickým způsobem jako při hodnocení frézovacích strategií) a seřazena dle průměru nástroje. Z celkových průměrných hodnot odstupe bodu od modelu byla opět vytvořena tabulka a graf.

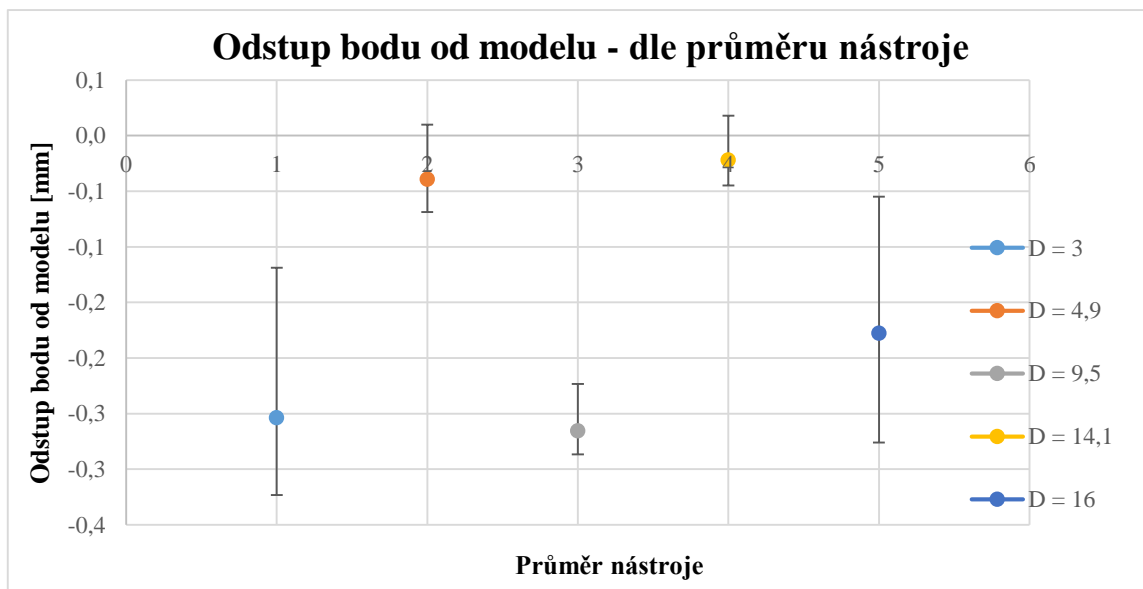
Tab. 16 - Ukázka tabulky hodnotící odstup bodu od modelu pro $\varnothing D = 14,1$ mm

Průměr nástroje	Rádius plochy	Strategie	Průměr odstup 20°	Průměr odstup 35°	Průměr odstup 50°	Průměr odstup 65°	Průměr odstup 80°	
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	-0,022
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



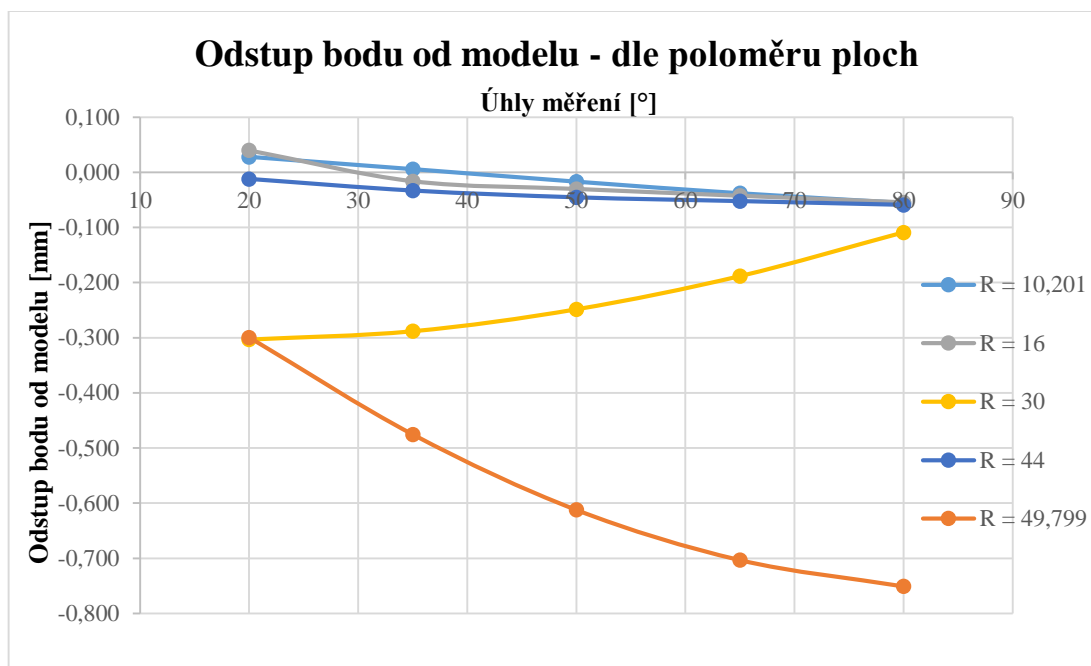
Obr. 58 - Graf znázorňující odstup bodu od modelu u jednotlivých průměrů nástroje

Závislost mezi tvarovou přesností a průměrem nástroje se pomocí výše uvedených grafů nepodařilo najít. Jak lze vyčíst z grafu, minimální hodnoty odstupu od ideální plochy lze dosáhnout jak s relativně malým průměrem nástroje ($D = 4,9 \text{ mm}$) tak i s průměrem téměř trojnásobně větším ($D = 14,1 \text{ mm}$). Co se týká rovnoměrnosti odstupů bodů pro jednotlivé průměry, opět v grafu nefiguruje žádný společný znak. Rovnoměrný povrch z hlediska tvarové přesnosti je možno dosáhnout použitím nástroje malého i velkého průměru, stejně tak povrch nerovnoměrného charakteru. ($D = 3 \text{ mm}$, $D = 16 \text{ mm}$). Pro názornější představu byl umístěn graf znázorňující rozptyly odstupu bodů pro jednotlivé průměry nástroje.

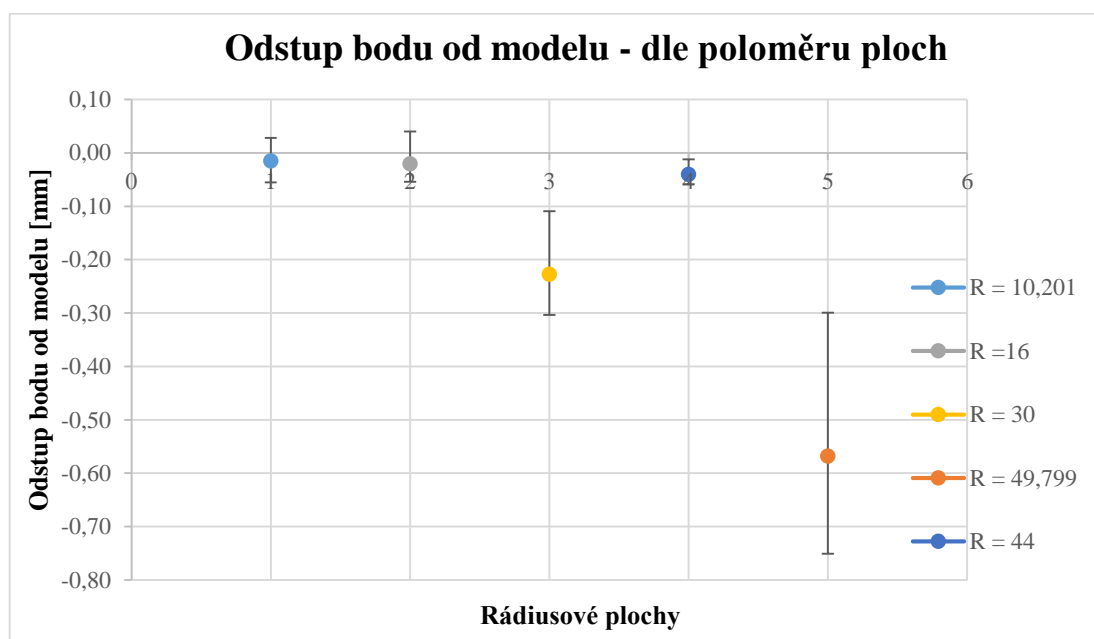


Obr. 59 - Graf znázorňující průměr a rozptyl pro jednotlivé průměry nástroje

Poslední dvojice grafů umístěná do této kapitoly popisuje odstup bodu od modelu na základě poloměru rádiusové plochy. Opět jsou zde umístěny pouze finální grafy, neboť byly vytvořeny analogickým způsobem jako grafy předchozí.



Obr. 60 - Odstup bodu od modelu u jednotlivých poloměřů rádiusových ploch



Obr. 61 - Průměr a rozptyl odstupe bodu od modelu u dokončovacích rádiusů

Na základě poslední dvojice grafů v této kapitole lze konstatovat skutečnost, že nejkvalitnější povrch z hlediska tvarové přesnosti byl dosažen u rádiusu o poloměru 44 milimetrů. Naopak graf s nejhorší dosaženou tvarovou přesností je rádius pouze o několik milimetrů větší $R = 49,799 \text{ mm}$. U tohoto rádiusu byl zjištěn rozptyl téměř 0,5 mm. Příčinou tohoto výsledku může být buď chyba výroby, nebo chyba měření. Z toho důvodu tedy nelze tvrdit, že s rostoucím poloměrem rádiusové plochy klesá její tvarová přesnost.

6 Vyhodnocení naměřených dat z hlediska statistiky

Jak již bylo zmíněno v kapitole 3.2, úlohou statistiky v této diplomové práci je doplnění a podpora předcházejícího technologického zhodnocení. Pro statistické vyhodnocení bylo nutné zvolit hladinu významnosti α . Hladina významnosti byla $\alpha = 0,05 \rightarrow 5\%$. Tato hodnota byla následně porovnávána se skutečnou vypočítanou hladinou významnosti p následujícím způsobem.

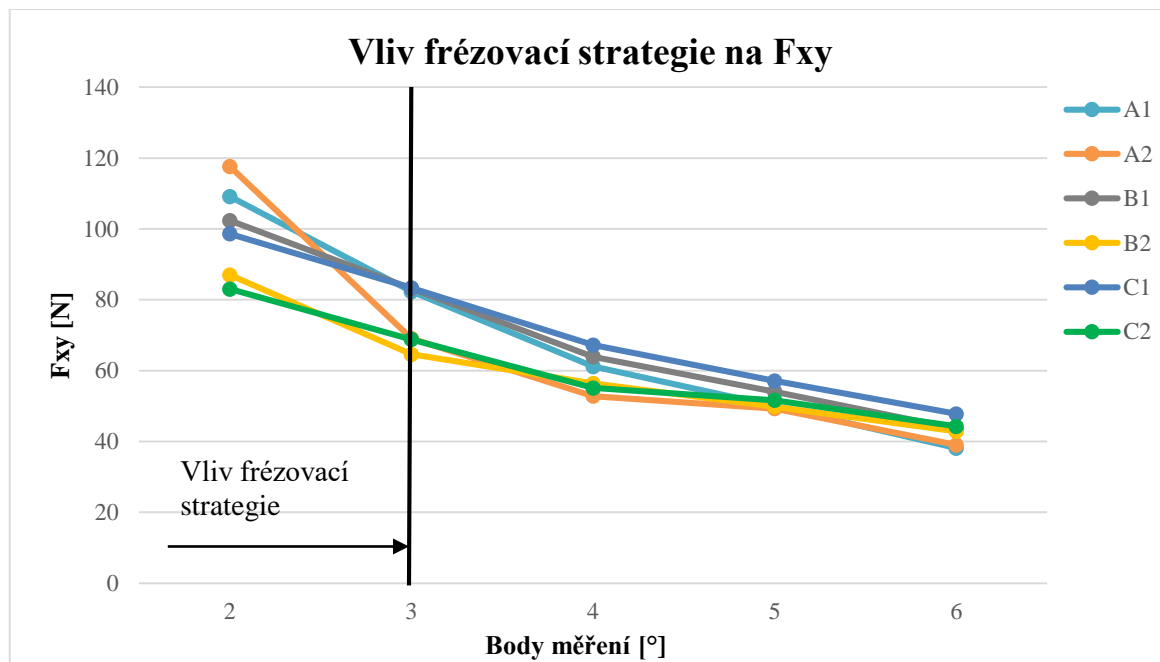
Tab. 17 - Znázornění způsobu volby hypotézy

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

První řádek tabulky říká, že pokud bude skutečná hladina významnosti menší než zvolená hladina významnosti α , přijímám nulovou hypotézu a nulovou zamítám. Vzhledem k tomu, že tato diplomová práce zjišťovala vlivy mezi jednotlivými faktory, je využito pouze prvního řádku v tabulce, ve kterém je negativní tvrzení zamítnuto. Jinými slovy, v následujících řádcích jsou popsány pouze faktory, mezi kterými byla na základě statistického vyhodnocení prokázána závislost.

Jako první byl vyhodnocován vliv frézovacích strategií na výslednou kvalitu povrchu popsanou dvojicí parametrů drsnosti Ra , Rz . Na základě výsledků statistiky se ukázalo, že změna strategie rozpočtu drah nástroje statisticky významně neovlivňuje dokončený povrch. Nicméně tento výsledek nelze z reálného pohledu a ani z pohledu technologického vyhodnocení brát za akceptovatelný. Na základě dat obsažených v předchozí kapitole je evidentní, že kvalita povrchu je rozpočtem dokončovací strategie značně spjata a ovlivněna.

Dalším zkoumaným faktorem byl vliv frézovacích strategií na řezné síly F_x , F_y a z nich vytvořený vektorový součin F_{xy} . Ovlivnění řezných sil frézovacími strategiemi bylo posuzováno separátně, to znamená, že pro každý bod měření ve směru sestupu nástroje rádiusovou plochou, resp. z horizontální strany rádiusu na stranu vertikální. Zde je nutné poznamenat, že statistika pracovala s kompletním stupňovitým pokrytím rádiusu, tedy i s 1. náměrem v pěti stupních, který byl pro technologické vyhodnocení vyloučen. Nicméně veškerá data byla před vyhodnocením vyfiltrována od hrubých chyb a odlehlých hodnot pomocí Grubsova testu. I přes to, z důvodu zachování jednotného systému vyhodnocení byla první hodnota náměru z níže uvedených grafů vyfiltrována. Na základě statistické analýzy byl zjištěn následující výsledek. Řezné síly jsou ovlivňovány frézovacími strategiemi až do 35° rádiusové plochy.



Obr. 62 - Statistický vliv frézovací strategie na vektorový součin F_{xy}

Zjištěný závěr je možné do jisté míry ztotožnit s grafy uvedenými v technologickém vyhodnocení diplomové práce. V grafech znázorněných na Obr. 47 a Obr. 48 je patrný podobný rozptyl resp. průběh hodnot drsnosti jako na zde použitém grafu. Tento graf tedy může sloužit jako jedna z možných příčin charakteristického průběhu hodnot drsnosti. Frézovací strategie ovlivňují hodnoty řezných sil do 35° rádiusové plochy, vyšší hodnoty řezných sil do 35° rádiusové plochy tedy mohou být příčinou vyšších hodnot drsnosti u některých frézovacích strategií na Obr. 47 a Obr. 48.

Statické vyhodnocení bylo dále směřováno na vyhodnocení vlivu průměru nástroje a poloměru rádiusu dokončené plochy. Z analýzy rozptylu vyplývá, že tyto proměnné mají statisticky významný vliv na hodnotu drsnosti R_z . Vzhledem k tomu že hodnota zanedbaných, nebo konstantních proměnných je prakticky nulová je zřejmé, že tyto dvě proměnné mají dominantní vliv.

Tab. 18 - Znázornění vlivu průměru nástroje a poloměru rádiusu na parametr R_z

Effect	Univariate Tests of Significance for $R_z - S$ [μm] (ANOVA) Sigma-restricted parameterization Effective hypothesis decomposition				
	SS	Degr. of Freedom	MS	F	p
Intercept		0			
průměr nástroje	10,09212	3	3,36404	2,78558	0,049826
rádius plochy	36,84163	3	12,28054	10,16887	0,000022
Error	62,79836	52	1,20766		

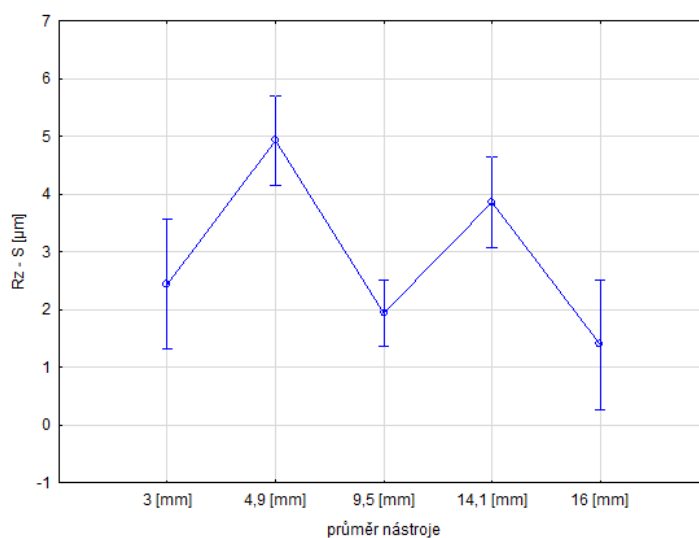
Ve druhém případě byl hodnocen vliv poloměru rádiusové plochy na parametr R_z . V případě poloměru rádiusu jsou závěry z Scheffeho testu následující. Scheffeho test znázorňuje statisticky významný podíl mezi jednotlivými proměnnými. Na základě testu v tomto případě je patrné, že statisticky významný rozdíl je mezi rádiusovou plochou $R = 44 \text{ mm}$ a ostatními poloměry. S největší pravděpodobností se zde však jedná opět o chybu měření z důvodu, který

je popsán v kapitole 5.3.4 ve spojitosti se zjištěným odstupem bodu od modelu u rádiusu $R = 44 \text{ mm}$.

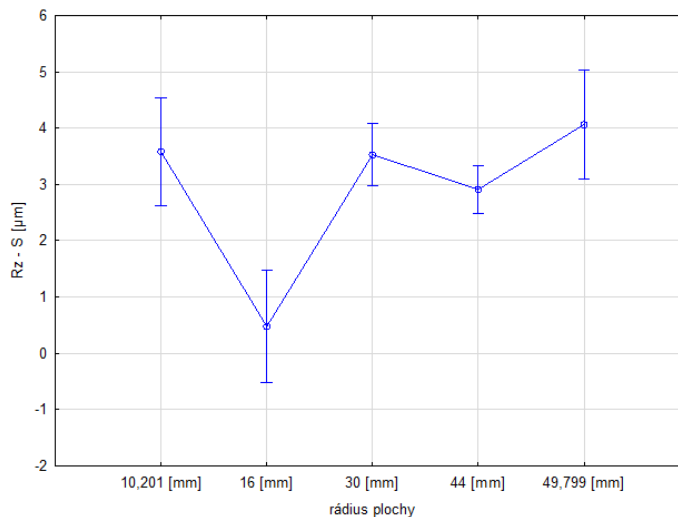
Tab. 19 - Scheffeho test pro vliv poloměru rádiusu na R_z

Cell No.	Scheffe test; variable $R_z - S [\mu\text{m}]$ (ANOVA) Probabilities for Post Hoc Tests Error: Between MS = 1,2077, df = 52,000					
	rádius plochy	{1} 2,6072	{2} 1,9554	{3} 2,5453	{4} 4,3918	{5} 3,0925
1	10,201 [mm]		0,841606	0,999970	0,044220	0,963860
2	16 [mm]	0,841606		0,681029	0,000088	0,380494
3	30 [mm]	0,999970	0,681029		0,000750	0,878285
4	44 [mm]	0,044220	0,000088	0,000750		0,247643
5	49,799 [mm]	0,963860	0,380494	0,878285	0,247643	

Na základě níže uvedených grafů je patrné, že hodnota parametru R_z mírně klesá s rostoucím průměrem nástroje. Tento závěr byl dosažen i v případě technologického zhodnocení. V případě závislosti R_z na poloměru obráběné plochy dochází k poklesu pro poloměr $R = 16 \text{ mm}$, zatímco ostatní plochy vykazují rovnoměrné rozložení. Je tedy patrné, že rádius plochy nezpůsobuje významnou změnu parametru R_z .



Obr. 63 - Vliv průměru nástroje na parametr R_z



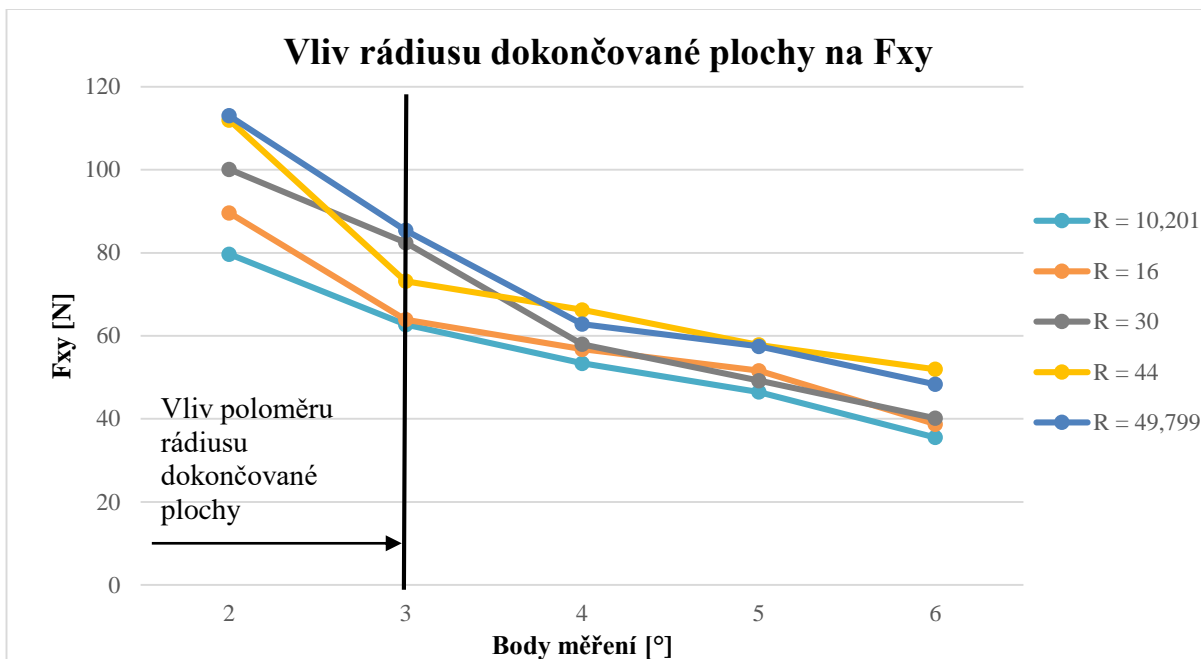
Obr. 64 - Vliv poloměru rádiusové plochy na parametr Rz

V případě parametru Ra bylo zjištěno, že na hodnotu Ra ve svislém směru má dominantní podíl pouze rádius plochy. Při změně poloměru rádiusu je tedy velmi pravděpodobná změna parametru Ra . Vzájemná interakce u nástrojů zjištěna nebyla, zatímco v případě poloměru dokončované plochy u $R = 44 \text{ mm}$. To znamená stejný závěr, jako pro předchozí zkoumaný parametr Rz .

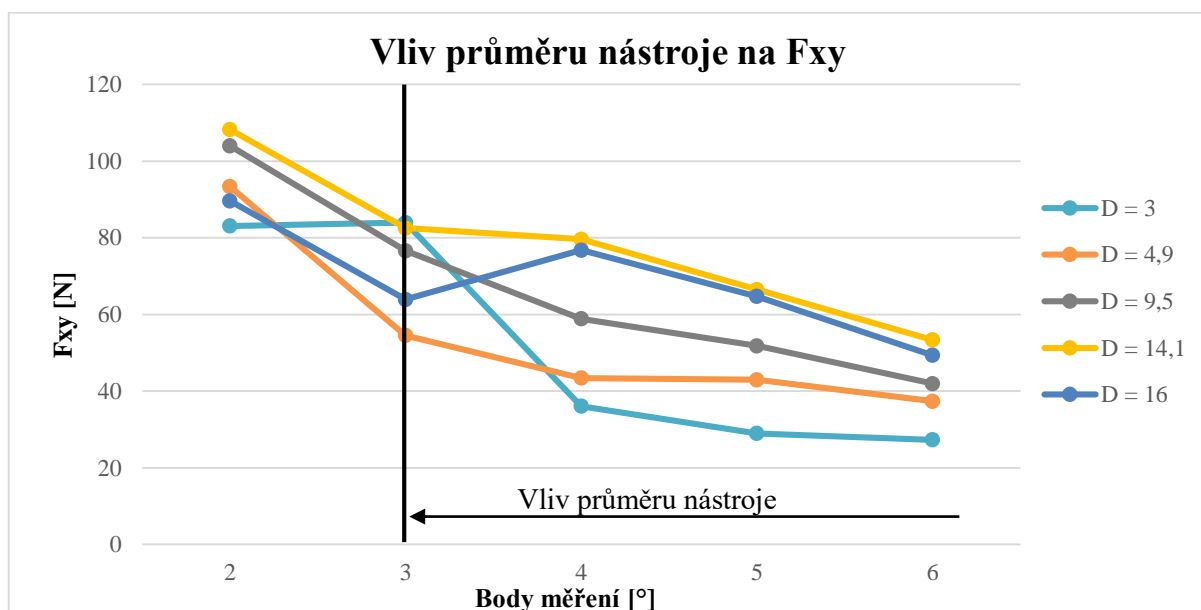
Tab. 20 - Scheffeho test pro vliv poloměru rádiusu na Ra

Scheffe test; variable Ra - S [µm] (ANOVA) Probabilities for Post Hoc Tests Error: Between MS = ,04436, df = 52,000						
Cell No.	rádius plochy	{1} ,33056	{2} ,23917	{3} ,31028	{4} ,84556	{5} ,48333
1	10,201 [mm]		0,943485	0,999747	0,000491	0,811580
2	16 [mm]	0,943485		0,921502	0,000000	0,266231
3	30 [mm]	0,999747	0,921502		0,000000	0,524453
4	44 [mm]	0,000491	0,000000	0,000000		0,028201
5	49,799 [mm]	0,811580	0,266231	0,524453	0,028201	

Zajímavý statistický závěr vyplynul také ze zkoumání vlivu průměru nástroje a rádiusu plochy na řeznou sílu (resp. vektorový součin F_{xy}). Vliv průměru a rádiusu byl zkoumán analogickým způsobem jako v předchozím případě, tedy po jednotlivých stupních sestupu nástroje rádiusem. Na základě statistických dat se ukázalo, že do 35ti° rádiusové plochy má převládající vliv na hodnotu F_{xy} poloměr rádiusové plochy, zatímco v hodnotě 35° a víc převažuje vliv průměru nástroje. Opět byly analogickým způsobem jako u Obr. 62 sestrojeny grafy popisující zjištěný analytický závěr.



Obr. 65 - Statistický vliv rádiusu dokončované plochy na vektorový součin F_{xy}



Obr. 66 - Statistický vliv průměru nástroje na vektorový součin F_{xy}

U výše uvedené dvojice grafů lze rovněž konstatovat možnou spojitost s technologickým vyhodnocením, tentokrát s dvojicí grafů na Obr. 56 a Obr. 59. Poloměr $R = 44$ mm má v grafu znázorňující statistický vliv rádiusu na F_{xy} podobný průběh jako v případě grafu na Obr. 56. Z toho lze usuzovat následující. Do 35° , tedy při vyšších otáčkách nástroje má převládající vliv na hodnotu F_{xy} rádius plochy, což se může a s největší pravděpodobností bude projevovat na kvalitě dokončené plochy ať odstupů bodu, nebo drsnosti.

Statistický výsledek vlivu průměru nástroje může posloužit jako možná odpověď na značný rozptyl hodnot odstupů bodu od modelu u průměru nástroje $D = 3$ mm a $D = 16$ mm na Obr. 59. Je možné, že za tento rozptyl mohl skok v průběhu řezné síly F_{xy} na Obr. 66, která je ovlivněna právě průměrem nástroje.

7 Celkové zhodnocení

Následující kapitola shrnuje dosažené výsledky podrobně popsané v kapitole 5 a 6. Úvodem považují za důležité zopakovat, jak k dosažení těchto výsledků došlo.

Z názvu diplomové práce vyplývá, že jejím úkolem bylo určení vlivu poloměru, resp. průměru nástroje na kvalitu dokončované rádiusové plochy. Jak se ale v průběhu práce ukázalo, tento vliv nebyl zdaleka jediným, který byl zkoumán. K vlivu průměru nástroje a rádiusové ploše se přidala ještě trojice frézovacích strategií a způsob nastavení řezných podmínek při dokončovacím frézování. Těmito faktory se bylo nutné také zabývat, protože úzce souvisí s procesem dokončování a mohou tedy mít vliv na dosažené kvalitativní parametry. Pro popsání vlivu jednotlivých faktorů na finální výrobek byla použita kvalita povrchu resp. parametry drsnosti Ra , Rz . Nicméně, jak se předpokládalo a v experimentu potvrdilo, není to jen kvalita povrchu, kterou tyto faktory ovlivňují. V průběhu experimentu se ukázali např. značné časové rozdíly mezi dokončováním s konstantními otáčkami a dokončováním s konstantní řeznou rychlostí, dále také rozdíly v řezných silách a v dosažené tvarové přesnosti vyrobených vzorků. Celkem tedy byly v diplomové práci zkoumány čtyři základní skupiny vstupních faktorů, které byly vyhodnoceny pomocí trojice skupin vyhodnocovacích parametrů.

Pro popsání a představení veškerých používaných faktorů, parametrů a dalších relevantních informací byla v první polovině práce provedena teoretická rešerše. Tato rešerše vycházela z analýzy současného stavu v oblasti dokončovacích frézování a poskytla tak přibližný směr pro další zkoumání. Teoretická rešerše popisuje např. používané dokončovací strategie, inovativní princip dokončování s konstantní řeznou rychlostí a parametry drsnosti použité pro vyhodnocení. Po teoretické části následovala část experimentální. V této části byla stručně popsána tvorba plánu experimentu, jeho samotný průběh a použité pomůcky. Na základě statistiky bylo nutné dokončení celkem šedesáti rádiusů stanovených poloměrů. U jednotlivých vzorků byly měřeny řezné síly a čas dokončování. K odebrání přebytečného materiálu bylo využito nástrojů s kulovým čelem pevně stanovených průměrů. Dokončovalo se konstantními otáčkami, nebo konstantní řeznou rychlostí vždy v kombinaci s určitou frézovací strategií. Po provedeném experimentu následovalo proměření vzorků z hlediska tvarové přesnosti a drsnosti povrchu. Proměření bylo získána data určující další směr práce.

Jako první bylo provedeno vyhodnocení z technologického hlediska. Vzhledem k množství dat bylo toto vyhodnocení rozděleno do tří oblastí. Každá oblast hodnotila určitý vstupní faktor (faktory) pomocí stanovených vyhodnocovacích parametrů. Z jednotlivých oblastí plynou následující poznatky. Jako první byl zkoumán rozdíl při dokončování s konstantní řeznou rychlostí a s konstantními otáčkami. První podkapitolu této oblasti představovalo porovnání z hlediska kvality dokončeného povrchu. Použité grafy ukázaly následující. Dokončování s konstantní řeznou rychlostí je značně ovlivněno volbou rozpočtu dokončovací strategie. Při volbě vhodné strategie rozpočtu drah nástroje lze docílit kvalitnějšího povrchu než při dokončování s konstantními otáčkami. Pokud bylo nastaveno dokončování s konstantními otáčkami, povrch dosahoval horší kvality, nicméně jeho průběh byl rovnoměrnější. Tento výsledek posléze potvrdilo i zhodnocení pomocí řezných sil. Znatelné rozdíly byly také zaznamenány v dokončovacích časech, kdy dokončování s konstantní řeznou rychlostí představuje efektivnější proces z hlediska časového a tedy i finančního. Po vyhodnocení řezných sil u zkoumané dvojice způsobů vyšel jako silově rovnoměrnější způsob obrábění s konstantními otáčkami, nicméně volbou vhodné frézovací strategie při obrábění s konstantní řeznou rychlostí lze dosáhnout menších řezných sil než při prvním způsobu nastavení řezných podmínek. Potvrdil se tedy stejný závěr jako při vyhodnocení dle kvality dokončeného povrchu.

Předmětem zhodnocení druhé oblasti byly použité frézovací strategie. Z hlediska kvality povrchu se jako nejvhodnější strategie pro dokončování ukázala strategie C2 (Rozpočet dle zadané výšky nerovnosti) s konst řeznou rychlostí a strategie B1 (Rozpočet s konstantním krokem po křivce) s konstantními otáčkami. Z hlediska tvarové přesnosti vykazovala nejlepší výsledky strategie A2 (Rozpočet s konst. krokem v ose nástroje). Tato strategie však nenabízela uspokojivé výsledky z hlediska kvality povrchu díky charakteristickému rozpočtu drah nástroje, který se pro dokončování rádiusových ploch příliš nehodí. Nicméně strategie B (Rozpočet s konstantním krokem po křivce) dokazuje skutečnost, že strategie s největším počtem drah nemusí mít „automaticky“ nejkvalitnější povrch.

Poslední oblast byla zaměřena na určení vlivu průměru nástroje a poloměru rádiusu ve vztahu k dokončované ploše. Vyhodnocením drsnosti dosažené při použití různých průměrů nástroje vyplynula tato závislost. Čím větší průměr nástroje, tím lepší kvalita povrchu dokončené rádiusové plochy. V případě rostoucího poloměru rádiusové plochy však nebyla skutečnost zhoršení kvality povrchu potvrzena. Dalším zjištěným poznatkem bylo, že s rostoucím poloměrem rádiusu dochází ke zhoršení rovnoměrnosti kvality povrchu na zkoumané ploše. Součástí této oblasti byla podkapitola porovnávající teoretické a skutečné hodnoty drsnosti. Pro oba posuzované parametry drsnosti (R_a , R_z) byl mezi teoretickými a naměřenými hodnotami zjištěn značný rozdíl. Nicméně, v případě parametru R_a se hodnoty skutečné a teoretické drsnosti vyvíjely stejným způsobem a došlo k potvrzení závěru zjištěného předchozím zkoumáním vlivu průměru nástroje na drsnost, tedy – se zvětšujícím se průměrem nástroje, je možné při správném nastavení ostatních parametrů získat kvalitnější povrch. V případě parametru R_z bohužel stejný závěr dosažen nebyl z důvodu nereálných teoretických výsledků. Tato chyba je způsobena patrně nevhodně odvozeným vzorcem, nebo jeho chybnou aplikací na oblast dokončovacího frézování kulovým nástrojem. Jak již bylo zmíněno v předchozích kapitolách, zjištění této chyby však není předmětem této diplomové práce.

Následující kapitola se zabývala vyhodnocením z pohledu statistiky. Závěry vyvozené ze statistiky se v některých případech ztotožňovali s technologickým vyhodnocením, v některých případech nikoli. Nicméně statistika v určitých oblastech zhodnocení posloužila k objasnění například charakteristických průběhů grafů v kapitole 5. Dokázáním možné spojitosti mezi jednotlivými faktory zúžila tak oblast pro další zkoumání.

Vytvořené grafy pro průběhy řezných sil, jak ve statistickém, tak v technologickém vyhodnocení reflektují také následující závěr. Použití konstantní řezné rychlosti při dokončování by mohlo mít největší výhody při menších úhlech sklonu plochy a tedy v oblastech obrábění menším efektivním průměrem. Pro hodnoty větších sklonů se obě technologie (tedy konstantní řezná rychlost a konstantní otáčky) k sobě přibližují hodnotami řezných parametrů a díky tomu dosahují i identických kvalitativních výsledků. K této skutečnosti přispěla i matematicko-statistická analýza, která dokázala, že některé faktory ovlivňující řezné síly působí pouze do určité oblasti rádiusu.

Tato práce ve své podstatě kombinuje realitu (technologický proces a zhodnocení), která je doplněna matematickým modelem v podobně statistické analýzy. Tato práce ve svém průběhu aplikace statistických dat posloužila i jako odrazový můstek pro budoucí kombinace statistiky a technologie v ohledu exaktnějšího užití a způsobu formulování výstupních dat z experimentu pro následnou statistickou analýzu. Jinými slovy pomohla definovat směr v oblasti aplikace statistického pohledu s pohledem reálným.

8 Závěr

Tato diplomové práce vznikla za účelem prohloubení poznání v oblasti dokončovacího frézování. Jsou zde zkombinovány běžné vlivy, které se při dokončovacím obrábění projevují. Tyto vlivy jsou hodnoceny pomocí parametrů, které jsou pro dokončování rovněž charakteristické. Část dokončovacího obrábění byla realizována pomocí inovativní metody v podobě dodržení konstantní řezné rychlosti. Tato práce tedy může sloužit jako demonstrace toho, co s sebou tato metoda dokončování přináší.

Oblast tvarového frézování svým rozsahem představuje značný prostor budoucího zkoumání, čemuž nasvědčuje i dlouhodobě probíhající projekt na Katedře technologie obrábění, Fakulty strojní. Obsah této diplomové práce pokrývá pouze část výzkumu dané části výše zmiňovaného projektu. Stejně tak přináší odpovědi na otázky stanovené zadáním a cíli diplomové práce. Nicméně svoji podstatou bezesporu přispívá k objasnění dalších potřebných informací.

Citovaná literatura

1. doc. Ing. ŘEHOŘ, Jan. *Skripta - Teorie obrábění*. Plzeň : autor neznámý, 2006.
2. Ing. VYŠATA Ph.D., Jiří. *Moderní technologie - MTC - část obrábění*. [E-Book předmětu KTO/MTC] Plzeň : autor neznámý.
3. Leonardo technology. *Laserové značení SOLARIS*. [Online] [Citace: 27. Říjen 2017.] <http://www.lt.cz/produkty/laserove-znaceni/vlaknovy-laser/e-solarmark-fls>.
4. NC stroje. *ELUC*. [Online] [Citace: 20. Říjen 2017.] <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1353>.
5. PAVELEK, MICHAL. *ANALÝZA MODERNÍCH TECHNOLOGIÍ FRÉZOVÁNÍ*. [Bakalářská práce] Brno : autor neznámý, 2009.
6. JAIN, Prakhar a DUVEDI, Ravinder Kumar. 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. *PhD Thesis*. [Online] 2016. [Citace: 20. Říjen 2017.] <http://tudr.thapar.edu:8080/jspui/bitstream/10266/4079/5/4079.pdf>.
7. Bc. ANDRLÍK, Jiří. Návrh strategie dokončování tvarových ploch. [Online] 2017. [Citace: 30. Zář 2017.]
8. E - Katalog nástrojů. *Iscar Cutting Tools*. [Online] [Citace: 1. Listopad 2017.] <https://www.iscar.com/eCatalog/Family.aspx?fnum=2868&mapp=ML&app=71&GFSTYP=M>.
9. CoroMill 300. *Sandvik Coromant*. [Online] [Citace: 3. Prosinec 2017.] https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/products/coromill_300/Pages/Product-details.aspx.
10. Bc. MATULA, Lukáš. Jakost povrchu při frézování kulovou frézou na nakloněných plochách. [Online] 2014. [Citace: 10. Listopad 2017.] <http://docplayer.cz/19159934-Jakost-povrchu-pri-frezovani-kulovou-frezou-na-naklonenych-plochach-bc-lukas-matula.html>.
11. Ing. POSPĚCH Ph.D., Zdeněk. *Drsnost povrchu*. Plzeň : autor neznámý.
12. Bc. FÜGNER, Tomáš. Výroba přesných volných ploch frézováním. [Online] 2016. [Citace: 19. Říjen 2017.] https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/66560/F2-DP-2016-Fugner-Tomas-Diplomova-prace_Fugner.pdf?sequence=-1.
13. Grumant, s.r.o. Upínání obrobků. *grumant.cz*. [Online] [Citace: 28. Prosinec 2017.] <http://www.grumant.cz/produkty/nastroje-pro-obrabeni/upinani-obrobku>.
14. Ing. GOMBÁR Ph.D., Miroslav. *Plánovanie experimentov (DoE) ako nástroj efektívneho výskumu technologických procesov*. [Prezentace]
15. Ing. SKLENÍČKA, Josef. *Příspěvek k experimentálnímu stanovení modelu silového zatížení*. [Disertační práce] Plzeň : autor neznámý, 2017.
16. DMG Mori. *DMU 40 eVo linear*. [Online] [Citace: 18. Březen 2018.] <https://en.dmgmori.com/products/machines/milling/5-axis-milling/dmu-evo/dmu-40-evo-linear>.
17. MSI Viking. *ZEISS PRISMO navigator Bridge-Type CMM*. [Online] [Citace: 5. Květen 2018.] <https://www.msi-viking.com/ZEISS-PRISMO-navigator-Bridge-Type-CMM>.

18. Ing. POTÁČEL, 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>.
19. Tumlikovo. *Drsnost obrobeneho povrchu*. [Online] 24. Březen 2011. [Citace: 28. Říjen 2017.] <http://www.tumlikovo.cz/drsnost-obrobeneho-povrchu/>.
20. MLAĐENOVIĆ, C. The influence of milling strategies on roughness of complex surfaces. *Journal of Production Engineering*. [Online] 17. Leden 2014. [Citace: 17. Listopad 2017.] <http://www.jpe.ftn.uns.ac.rs/papers/2014/no1/10-Mladjenovic.pdf>.
21. VIJAYARAGHAVAN, Athulan. Improving endmilling surface finish by workpiece rotation and adaptive toolpath spacing. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. [Online] 17. Květen 2008. [Citace: 17. Listopad 2017.] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0890695508001454?via%3Dihub>.
22. Tvarové frézování. *Iscar*. [Online] [Citace: 8. Prosinec 2017.] <https://www.iscar.com/eCatalog/Item.aspx?cat=3106536&fnum=3702&mapp=ML&GFSTYP=M&srch=1>.
23. Bc. MÁČALA, Adam. Vliv strategie obrábění na jakost povrchu při CNC frézování. [Online] 2011. [Citace: 6. Prosinec 2017.] http://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/15496/m%E1%20ala_2011_dp.pdf?sequence=1.
24. Ing. HNÁTÍK, Jan. *Moderní technologie*. [Přednášky předmětu KTO/MTC] Plzeň : autor neznámý, 2016.
25. Ing. KROFT, Luboš. *Automatizace tvorby NC programů 2*. [Přednášky ANC2] Plzeň : autor neznámý, 2017.

Přílohy diplomové práce

Vliv průměru nástroje na kvalitu dokončení rádiusové plochy

PŘÍLOHA č. 1 – Kompletní plán provedeného experimentu

PŘÍLOHA č. 2 – Ukázka grafů vodorovné drsnosti – dle strategií

PŘÍLOHA č. 3 – Ukázka grafů vodorovné drsnosti – dle průměru nástrojů a poloměru plochy

PŘÍLOHA č. 4 – Ukázka grafů vektorového součinu řezných síl F_x, F_y

Vzhledem k množství dat jsou veškerá data včetně naměřených hodnot, tabulek a provedených grafů jsou přiloženy v elektronické podobě na CD přiloženému k diplomové práci.

PŘÍLOHA č. 1 – Kompletní plán provedeného experimentu

Skut. pořadí	Datum	Pořadí	Průměr nástroje	Rádus plochy	Strategie	Číslo polotovaru	Název naměřených dat řezných sil	Název programu	Poznámky
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
2	13.2.	25	3	30	C1	80	C1_D3_R30_(1 až 6)	C1_Dn3_Rpl30_13_02	Program zkrácen do z-27, 3. záznam sil nekompletní
3	13.2.	47	3	30	B1	6	B1_D3_R30_(1 až 6)	B1_Dn3_Rpl30_13_02	Program zkrácen do z-27
4	13.2.	32	3	30	B2	7	B2_D3_R30_(1 až 6)	B2_Dn3_Rpl30_13_02	Program zkrácen do z-27
5	13.2.	2	3	30	A1	9	A1_D3_R30_(1 až 6)	A1_Dn3_Rpl30_13_02	Program zkrácen do z-27
6	13.2.	21	3	30	C2	11	C2_D3_R30_(1 až 6)	C2_Dn3_Rpl30_13_02	Program zkrácen do z-27
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
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
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
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
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
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

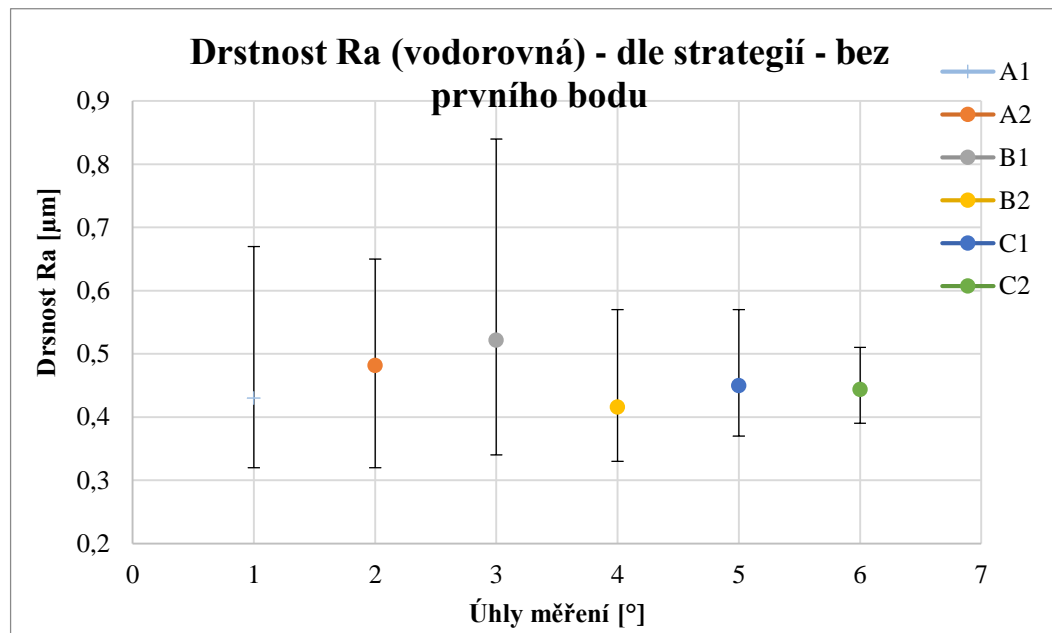
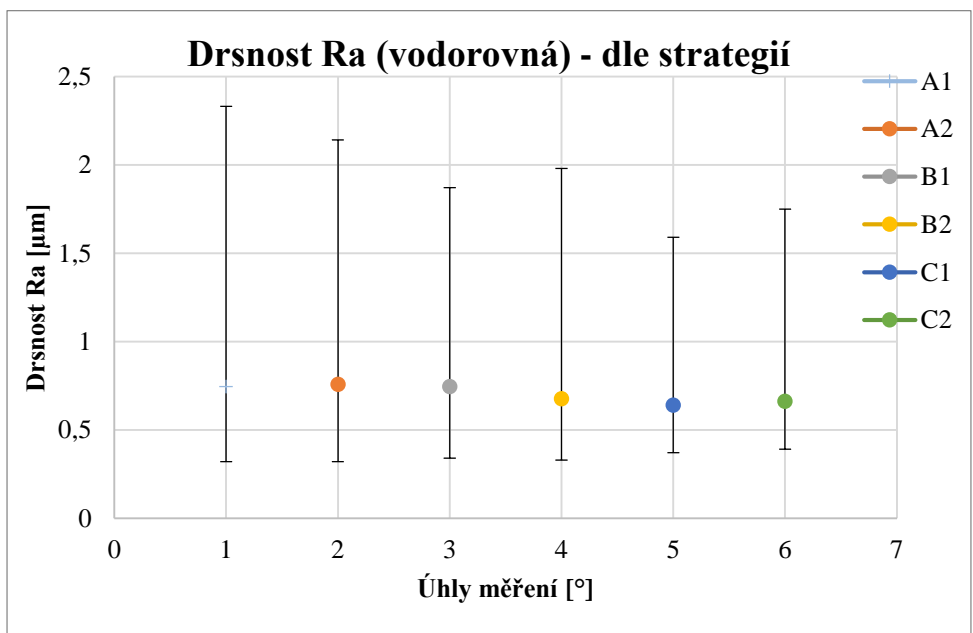
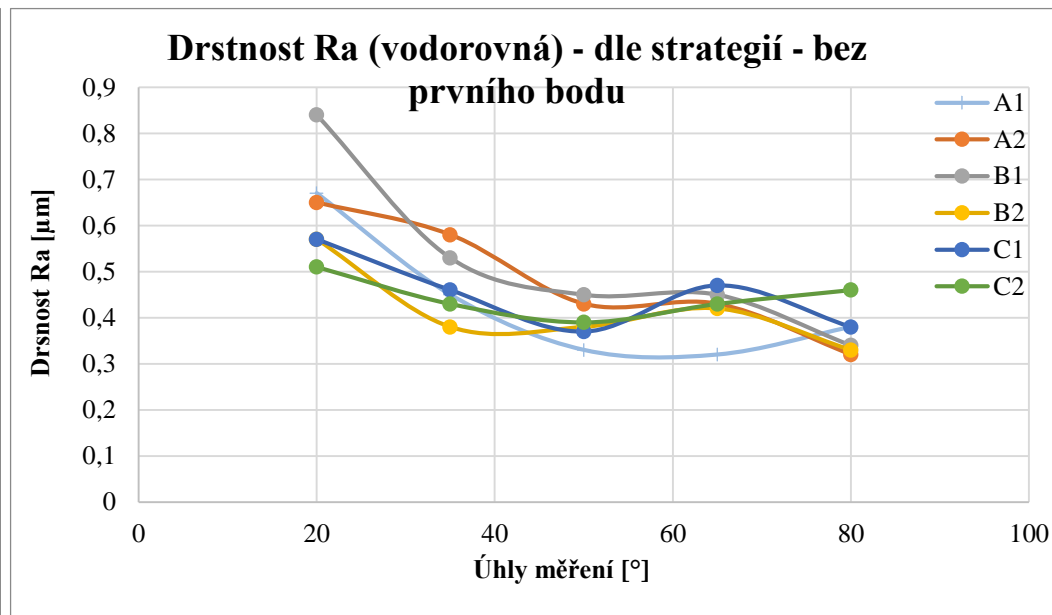
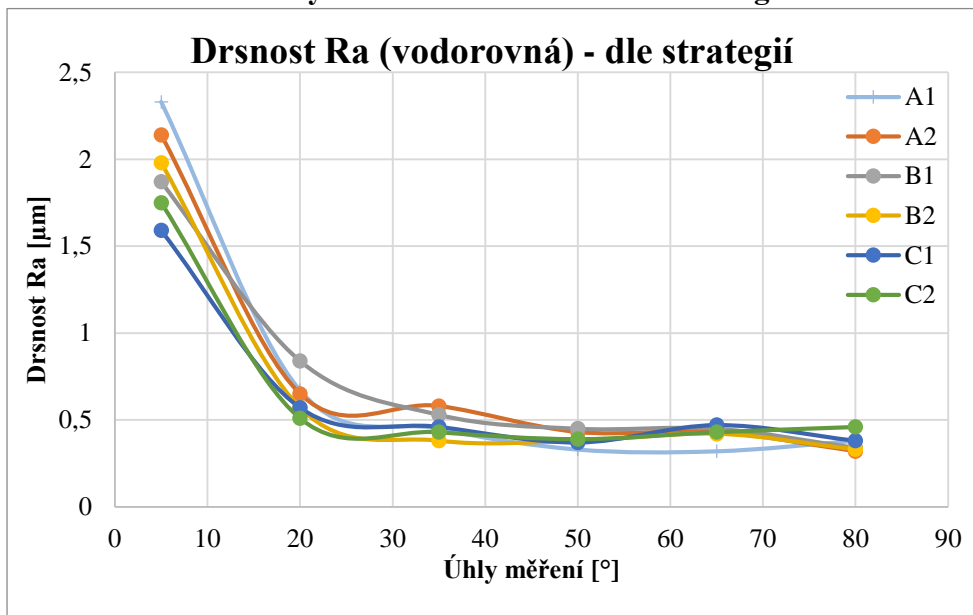
13	14.2.	39	4,9	44	A2	17	A2_D4,9_R44_(1 až 6)	A2_Dn4,9_Rpl44_13_02	Program zkrácen do z-44,1
14	14.2.	41	4,9	16	A2	12	A2_D4,9_R16_(1 až 6)	A2_Dn4,9_Rpl16_13_02	Program zkrácen do z-44,1
15	14.2.	19	4,9	44	C2	19	C2_D4,9_R44_(1 až 6)	C2_Dn4,9_Rpl44_13_02	Program zkrácen do z-44,1
16	14.2.	51	4,9	44	A1	21	A1_D4,9_R44_(1 až 6)	A1_Dn4,9_Rpl44_13_02	Program zkrácen do z-44,1
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
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
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	
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	15.2.	58	9,5	30	B2	25	B2_D9,5_R30_(1 až 6)	B2_Dn9,5_Rpl30_14_02	
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	
23	15.2.	54	9,5	30	C1	29	C1_D9,5_R30_(1 až 6)	C1_Dn9,5_Rpl30_14_02	
24	15.2.	55	9,5	30	B2	31	B2_D9,5_R30_(1a až 6a)	B2_Dn9,5_Rpl30_14_02	opakovaně
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	
26	15.2.	15	9,5	30	C2	33	C2_D9,5_R30_(1 až 6)	C2_Dn9,5_Rpl30_14_02	
27	15.2.	23	9,5	30	A1	35	A1_D9,5_R30_(1 až 6)	A1_Dn9,5_Rpl30_14_02	

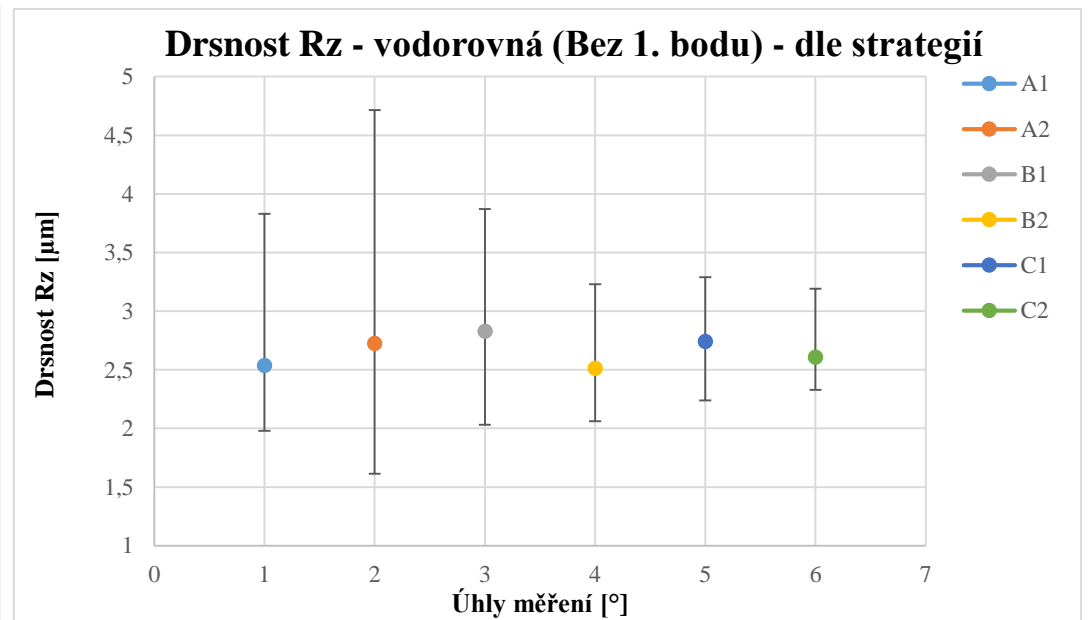
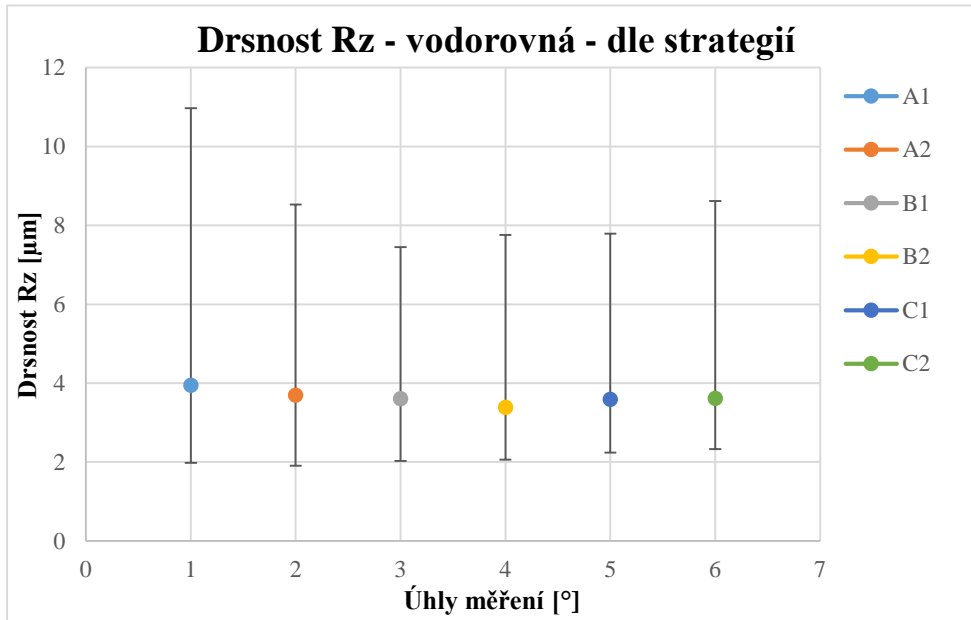
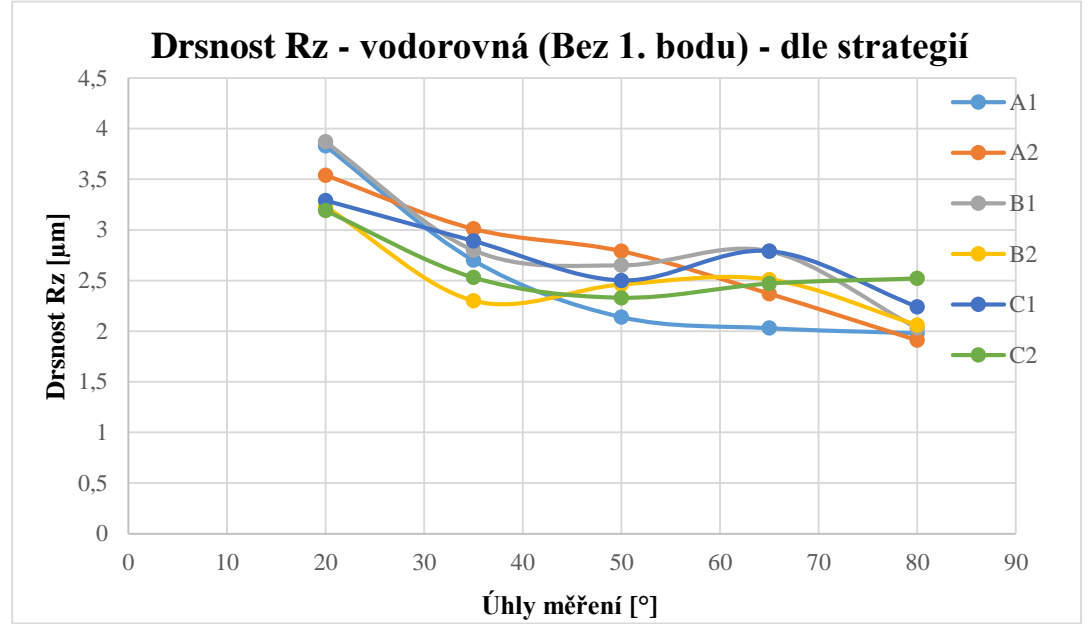
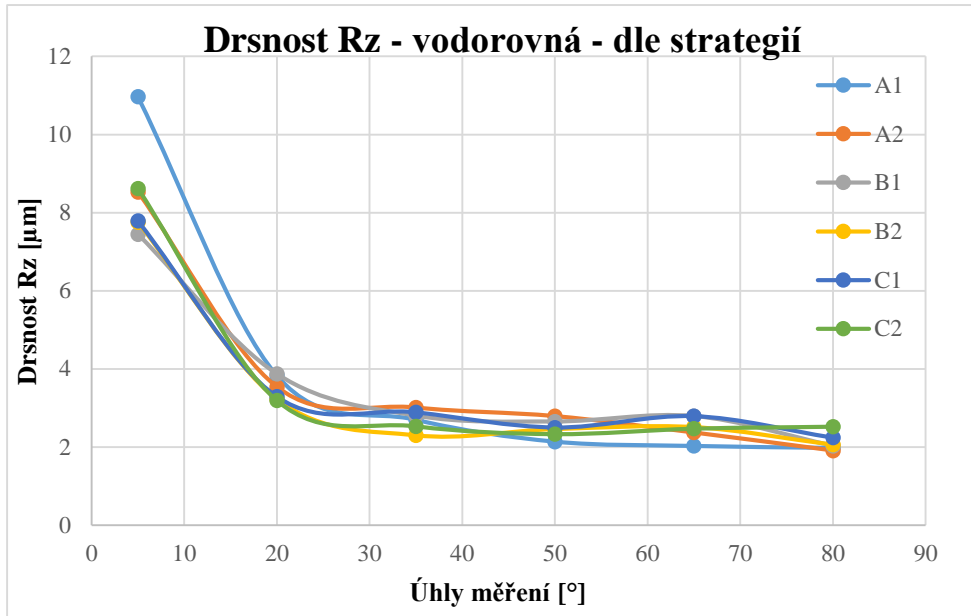
28	15.2.	48	9,5	30	A1	37	A1_D9,5_R30_(1a až 6a)	A1_Dn9,5_Rpl30_14_02	opakovaně
29	15.2.	37	9,5	10,201	B2	14	B2_D9,5_R10,201_(1 až 6)	B2_Dn9,5_Rpl10,201_14_02	
30	15.2.	38	9,5	30	B1	49	B1_D9,5_R30_(1 až 6)	B1_Dn9,5_Rpl30_14_02	
31	16.2.	60	9,5	30	A2	39	A2_D9,5_R30_(1 až 6)	A2_Dn9,5_Rpl30_14_02	
32	16.2.	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
33	16.2.	9	9,5	30	C1	41	C1_D9,5_R30_(1a až 6a)	C1_Dn9,5_Rpl30_14_02	opakovaně
34	16.2.	10	9,5	30	B1	43	B1_D9,5_R30_(1a až 6a)	B1_Dn9,5_Rpl30_14_02	opakovaně
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
36	20.2.	34	9,5	30	C2	45	C2_D9,5_R30_(1a až 6a)	C2_Dn9,5_Rpl30_14_02	opakovaně
37	20.2.	26	9,5	30	A2	47	A2_D9,5_R30_(1a až 6a)	A2_Dn9,5_Rpl30_14_02	opakovaně
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
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	
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	
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
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	

43	20.2.	17	14,1	16	A2	36	A2_D14,1_R16_(1 až 6)	A2_Dn14,1_Rpl16_16_02	
44	20.2.	6	14,1	16	B2	32	B2_D14,1_R16_(1 až 6)	B2_Dn14,1_Rpl16_16_02	
45	20.2.	30	14,1	44	C1	51	C1_D14,1_R44_(1 až 6)	C1_Dn14,1_Rpl44_16_02	
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
47	21.2.	7	14,1	16	C1	26	C1_D14,1_R16_(1 až 6)	C1_Dn14,1_Rpl16_16_02	
48	21.2.	36	14,1	16	B1	30	B1_D14,1_R16_(1 až 6)	B1_Dn14,1_Rpl16_16_02	
49	21.2.	49	14,1	44	C2	55	C2_D14,1_R44_(1 až 6)	C2_Dn14,1_Rpl44_16_02	
50	21.2.	29	14,1	16	C2	34	C2_D14,1_R16_(1 až 6)	C2_Dn14,1_Rpl16_16_02	
51	21.2.	22	14,1	44	B1	57	B1_D14,1_R44_(1 až 6)	B1_Dn14,1_Rpl44_16_02	
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
53	22.2.	4	14,1	16	A1	48	A1_D14,1_R16_(1 až 6)	A1_Dn14,1_Rpl16_16_02	
54	22.2.	35	14,1	44	B2	61	B2_D14,1_R44_(1 až 6)	B2_Dn14,1_Rpl44_16_02	
55	22.2.	24	16	30	B2	63	B2_D16_R30_(1 až 6)	B2_Dn16_Rpl30_16_02	
56	22.2.	31	16	30	C1	65	C1_D16_R30_(1 až 6)	C1_Dn16_Rpl30_16_02	
57	22.2.	12	16	30	A2	67	A2_D16_R30_(1 až 6)	A2_Dn16_Rpl30_16_02	

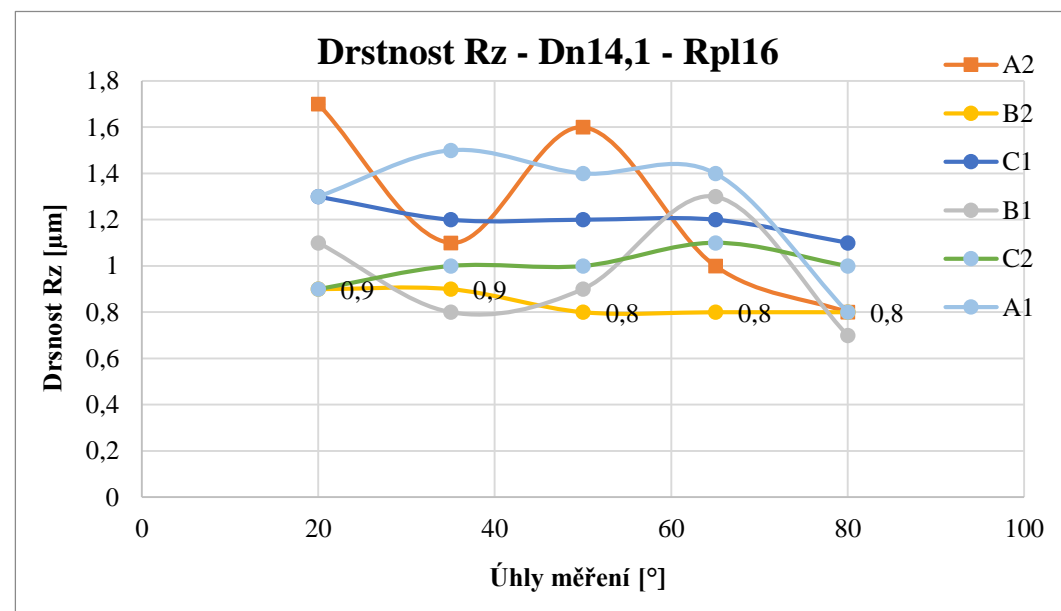
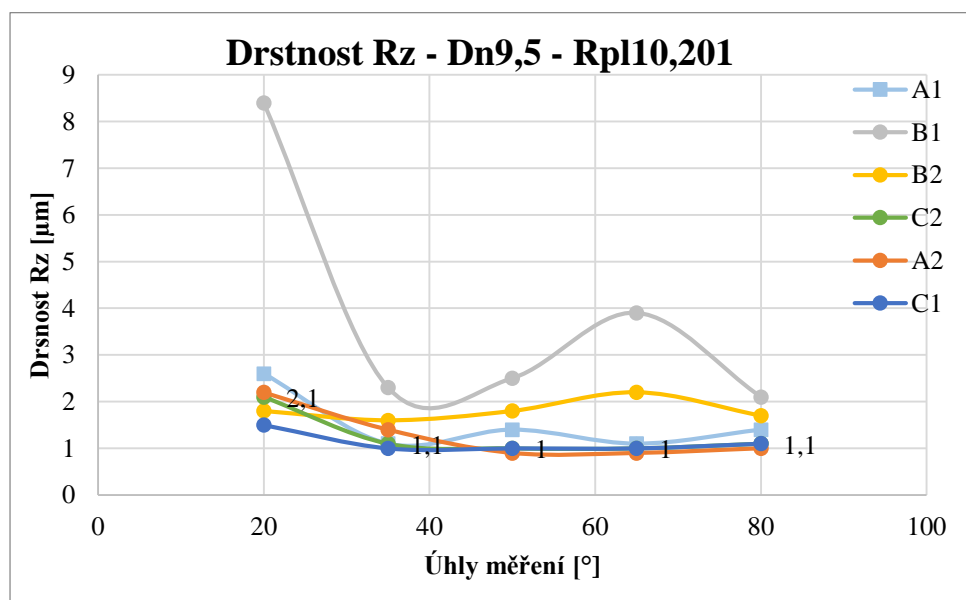
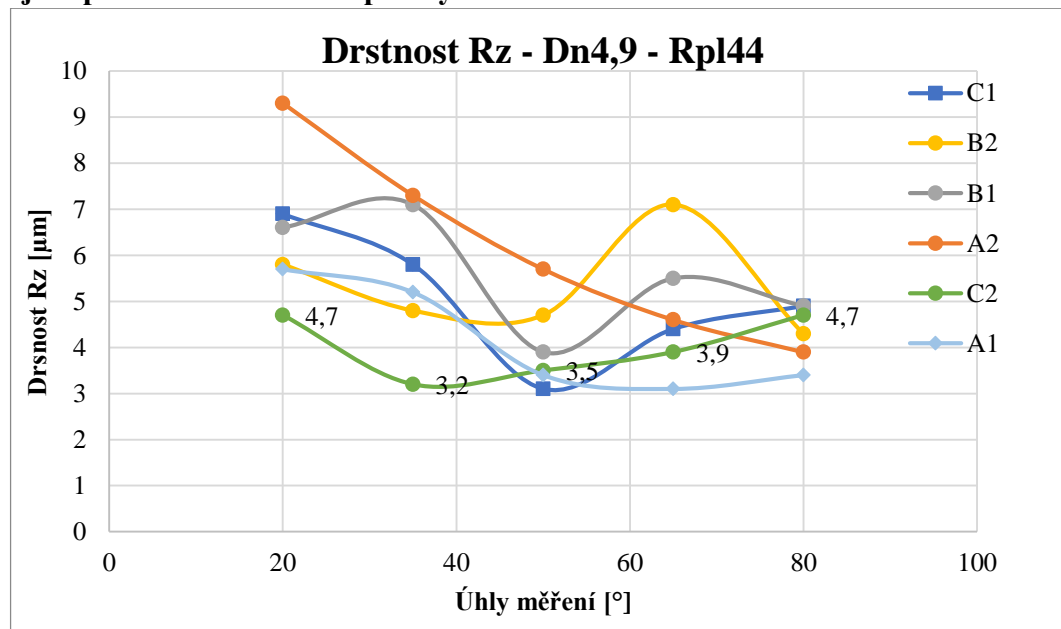
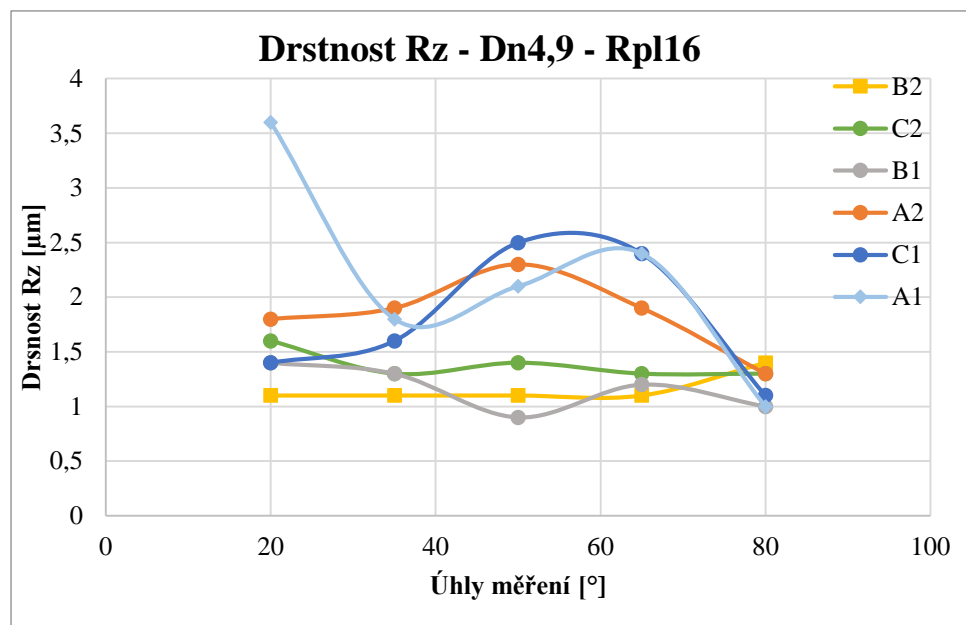
58	22.2.	33	16	30	A1	71	A1_D16_R30_(1 až 6)	A1_Dn16_Rpl30_16_02	
59	23.2.	42	16	30	C2	69	C2_D16_R30_(1 až 6)	C2_Dn16_Rpl30_16_02	
60	23.2.	13	16	30	B1	73	B1_D16_R30_(1 až 6)	B1_Dn16_Rpl30_16_02	

PŘÍLOHA č. 2 – Grafy vodorovné drsnosti – dle strategií

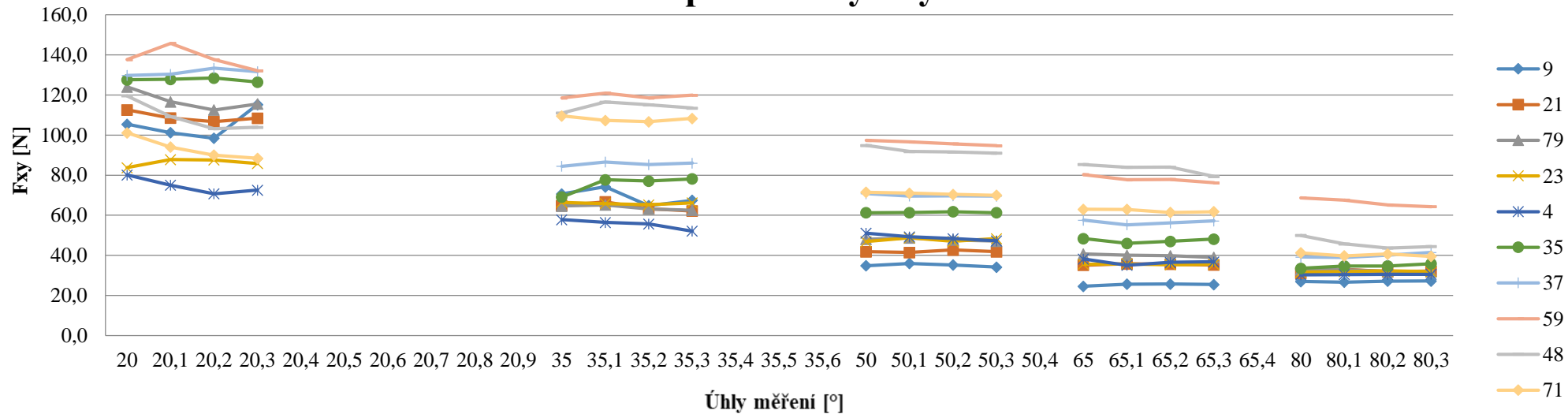




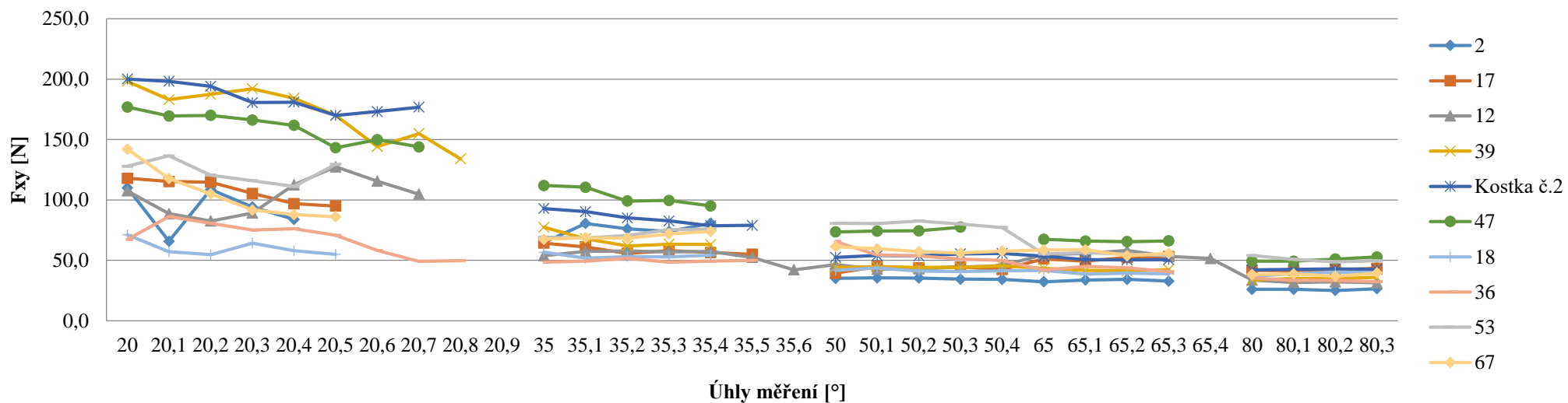
PŘÍLOHA č. 3 – Ukázka grafů vodorovné drsnosti – dle průměru nástrojů a poloměru rádiusové plochy



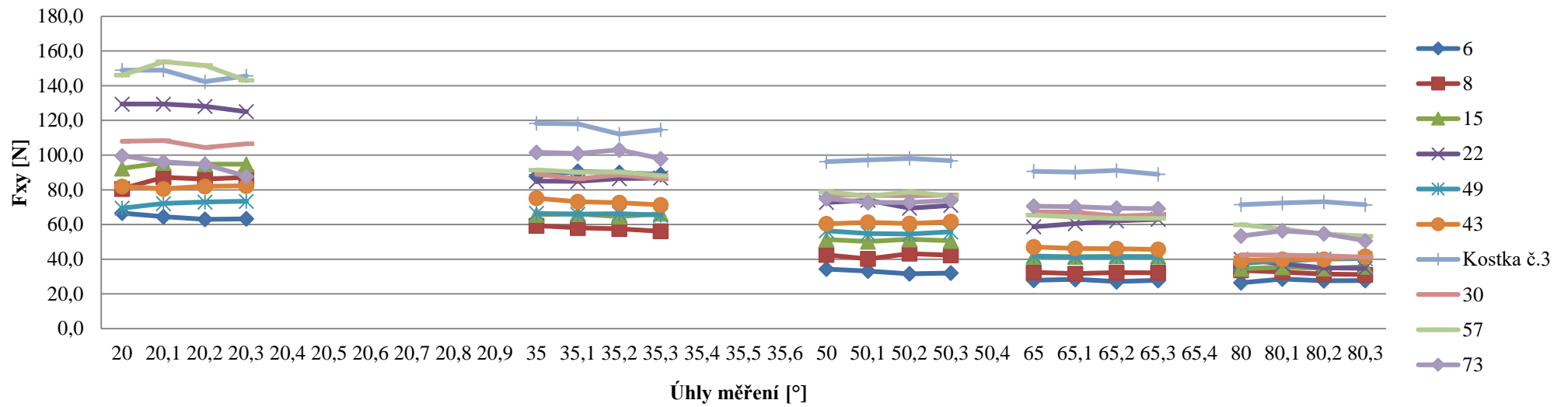
A1 - průběh síly Fxy



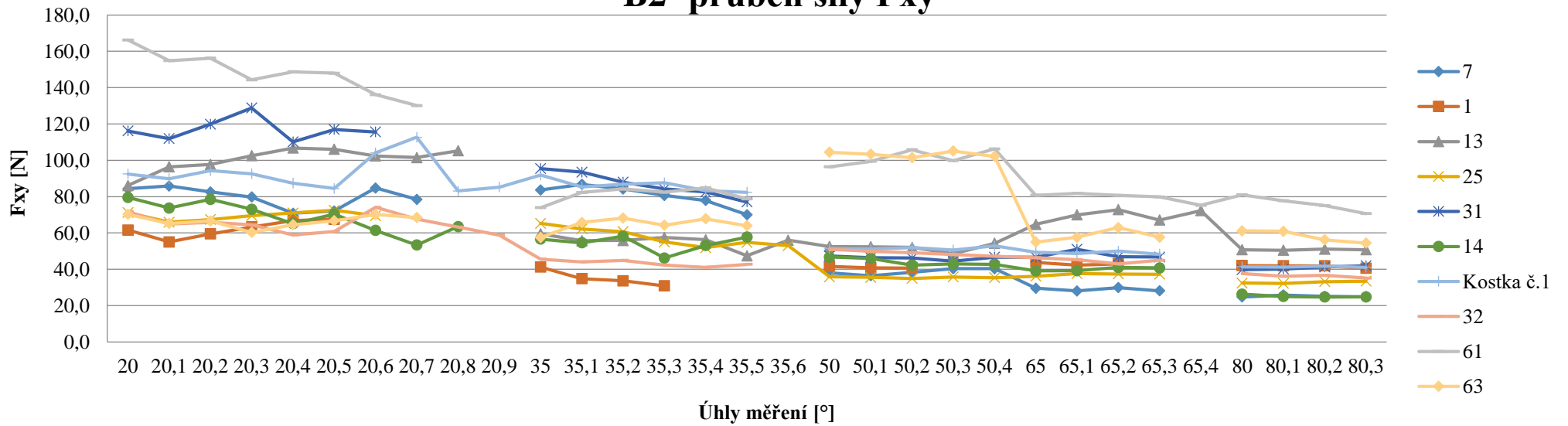
A2 - průběh síly Fxy



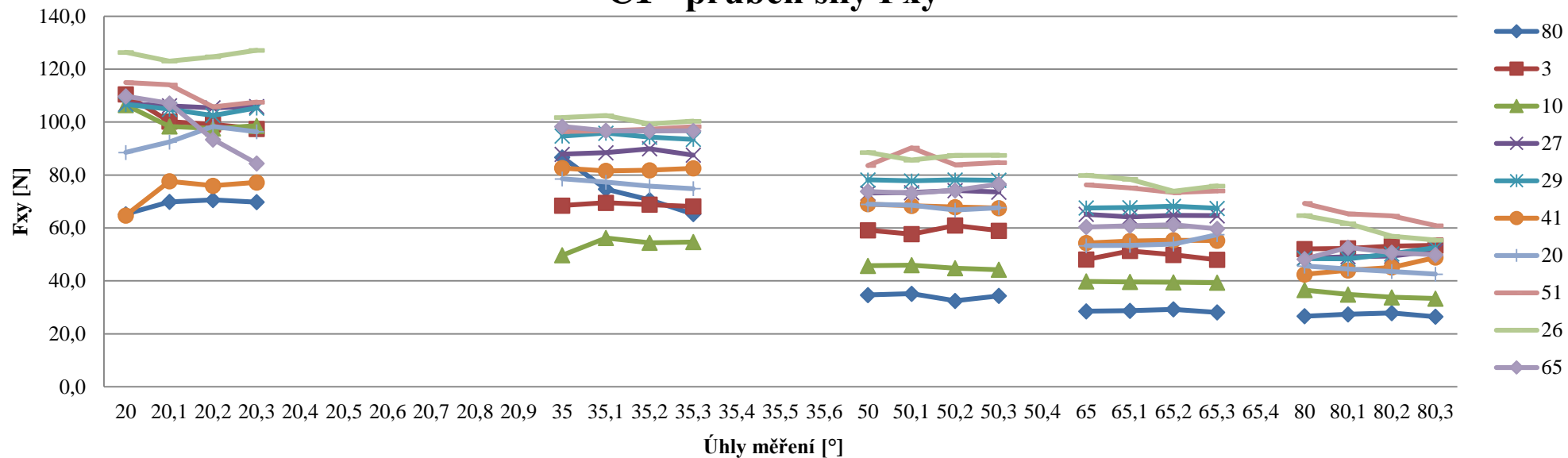
B1 - průběh síly Fxy



B2- průběh síly Fxy



C1 - průběh síly Fxy



C2 - průběh síly Fxy

