

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: N 2301      Strojní Inženýrství  
Studijní zaměření: Strojírenská technologie – technologie obrábění

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Vliv změny řezné rychlosti na tvarovou přesnost dokončené plochy

Autor:                    **Bc. Ondřej JÁSEK**  
Vedoucí práce:      **Ing. Jan Hnátík, PhD.**

Akademický rok 2017/2018

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta strojní

Akademický rok: 2017/2018

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Ondřej JÁSEK**

Osobní číslo: **S16N0089P**

Studijní program: **N2301 Strojní inženýrství**

Studijní obor: **Strojírenská technologie - technologie obrábění**

Název tématu: **Vliv změny řezné rychlosti na tvarovou přesnost dokončené plochy**

Zadávací katedra: **Katedra technologie obrábění**

### Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Úvod
2. Analýza současného stavu řešené problematiky
3. Návr řešení problematiky
4. Návrh, technické řešení a vyhodnocení experimentálního ověření navržených variant
5. Technické hodnocení navržených variant
6. Zhodnocení a závěr

Rozsah grafických prací: **dle potřeby**  
Rozsah kvalifikační práce: **50 - 70 stran**  
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná**

Seznam odborné literatury:

- **JANDEČKA, K. , ČESÁNEK, J. , KOŽMÍN, P. : Programování NC strojů. Plzeň: ZČU, 2000. ISBN 80-7082-694-4**
- **SADÍLEK, M., CAM systémy v obrábění I. 1. Vyd. Ostrava :VŠB TU Ostrava, 2008, 153 s., ISBN 978-248-1821-4.**
- **VRABEC, M., MÁDL,J.: NC programování v obrábění. Praha : ČVUT, 2004. ISBN 80-01-03045-8**
- **ŠTULPA, M.: CNC obráběcí stroje a jejich programování1. Praha, 2006. ISBN 80-7300-207-8.**
- **MAREK, J. a kol.: Konstrukce CNC obráběcích strojů. Praha, MM publishing, 2010, Vyd. 2., přeprac. a rozš. ISBN: 978-80-254-7980-3**
- **Interní podklady ZČU-KTO**

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Jan Hnátík, Ph.D.**  
Katedra technologie obrábění  
Konzultant diplomové práce: **Ing. Luboš Kroft**  
Katedra technologie obrábění

Datum zadání diplomové práce: **16. října 2017**  
Termín odevzdání diplomové práce: **21. května 2018**



Doc. Ing. Milan Edl, Ph.D.  
děkan



Doc. Ing. Jan Řehoř, Ph.D.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 18. října 2017

## **Prohlášení o autorství**

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

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

V Plzni dne: .....

.....

podpis autora

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval Ing. Janu Hnátíkovi, Ph.D. za vedení této diplomové práce a Ing. Luboši Kroftovi za cenné odborné rady při jejím zpracování. Dále děkuji Ing. Miroslavu Gombárovi, PhD. za pomoc ve statistické oblasti práce.

# ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

<b>AUTOR</b>	Příjmení Jásek	Jméno Ondřej		
<b>STUDIJNÍ OBOR</b>	N2301 „Strojírenská technologie – technologie obrábění“			
<b>VEDOUCÍ PRÁCE</b>	Příjmení (včetně titulů) Ing. Jan Hnátík, PhD.	Jméno Jan		
<b>PRACOVIŠTĚ</b>	ZČU - FST - KTO			
<b>DRUH PRÁCE</b>	<b>DIPLOMOVÁ</b>	<del>BAKALÁŘSKÁ</del>	Nehodící se <b>škrtněte</b>	
<b>NÁZEV PRÁCE</b>	Vliv změny řezné rychlosti na tvarovou přesnost dokončené plochy			

<b>FAKULTA</b>	strojní	<b>KATEDRA</b>	KTO	<b>ROK ODEVZD.</b>	2018
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

**POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)**

<b>CELKEM</b>	81	<b>TEXTOVÁ ČÁST</b>	62	<b>GRAFICKÁ ČÁST</b>	19
---------------	----	---------------------	----	----------------------	----

<b>STRUČNÝ POPIS</b>	Tato diplomová práce je zaměřena na dokončování šikmých ploch frézováním. Pojednává o frézovacích strategiích a cílem je zjištění vlivu velikosti konstantní řezné rychlosti na tvarovou přesnost obrobené plochy. Hodnocení bylo provedeno na základě drsnosti povrchu, řezných sil a rozměrové přesnosti.
<b>KLÍČOVÁ SLOVA</b>	Dokončovací frézování; tvarové frézování; CAM; konstantní řezná rychlost; rozměrová přesnost; vliv změny otáček

## SUMMARY OF DIPLOMA SHEET

<b>AUTHOR</b>	Surname Jásek	Name Ondřej	
<b>FIELD OF STUDY</b>	N 2301 “ Mechanical Engineering - Machining Technology“		
<b>SUPERVISOR</b>	Surname (Inclusive of Degrees) Ing. Jan Hnátík, PhD.	Name Jan	
<b>INSTITUTION</b>	ZČU - FST - KTO		
<b>TYPE OF WORK</b>	<b>DIPLOMA</b>	<del><b>BACHELOR</b></del>	<b>Delete when not applicable</b>
<b>TITLE OF THE WORK</b>	The effect of variable cutting speed on profile accuracy of finished surface		

<b>FACULTY</b>	Mechanical Engineering	<b>DEPARTMENT</b>	KTO	<b>SUBMITTED IN</b>	2018
----------------	------------------------	-------------------	-----	---------------------	------

### NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

<b>TOTALLY</b>	81	<b>TEXT PART</b>	62	<b>GRAPHICAL PART</b>	19
----------------	----	------------------	----	-----------------------	----

<b>BRIEF DESCRIPTION</b>	<p>This diploma thesis is focused on finishing milling of oblique surfaces. Deal about milling strategies and the aim is find the effect of size of constant cutting speed on profile accuracy of machined surface. Examine was executed on the basis of the surface roughness, cutting forces and profile accuracy.</p>
<b>KEY WORDS</b>	<p>Finishing milling; profile milling; CAM; constant cutting speed; dimensional accuracy; the effect of changes in revolution per minute</p>

## **Obsah**

<b>Seznam obrázků .....</b>	<b>9</b>
<b>Seznam grafů .....</b>	<b>10</b>
<b>Seznam tabulek.....</b>	<b>11</b>
<b>Seznam použitých symbolů a zkratek .....</b>	<b>12</b>
<b>1 Úvod.....</b>	<b>14</b>
1.1 Cíle.....	14
<b>2 Analýza současného stavu .....</b>	<b>15</b>
2.1 Literární řešerše .....	15
2.2 Frézování [1] [2] [3] .....	17
2.3 Frézování tvarových ploch [4].....	17
2.3.1 Konvenční metody [5].....	17
2.3.2 NC/CNC frézovací stroje [1] [9] .....	18
2.4 CAD/CAM [9] [10] .....	19
2.5 Strategie .....	20
2.5.1 Dokončovací strategie [12] [13] [14] [15] .....	20
2.5.2 Možnosti pohybu nástroje [17] [18].....	25
2.6 Vliv řezné rychlosti na různé aspekty obrábění [19] [20] .....	30
Řezný odpor .....	31
Řezné síly .....	31
Stabilita řezu.....	31
Vliv na otupení (otěr) břitu.....	31
<b>3 Návrh řešení.....</b>	<b>33</b>
3.1 Statisticky plánovaný experiment .....	33
3.2 Příprava experimentu .....	34
3.2.1 Polotovár .....	34
3.2.2 Programování .....	35
3.2.3 Stroj [21] .....	36
3.2.4 Nástroje .....	37
3.2.5 Sestava k měření řezných sil .....	37
3.2.6 Ostatní pomůcky .....	38
3.3 Realizace experimentu .....	38
3.3.1 Hrubování a předdokončení .....	39



3.3.2 Dokončování a záznam sil.....	40
3.4 Získávání dat .....	41
3.4.1 Měření parametrů drsnosti .....	41
3.4.2 Měření rozměrové přesnosti.....	43
<b>4 Technologické hodnocení.....</b>	<b>44</b>
4.1 Z hlediska řezných sil.....	44
4.2 Z hlediska jakosti povrchu .....	48
4.3 Z hlediska přesnosti dokončené plochy.....	50
<b>5 Statistické vyhodnocení.....</b>	<b>53</b>
5.1 Hodnocení vlivu faktorů na síly $F_{xy}$ a $F_c$ .....	54
5.2 Hodnocení vlivu faktorů na parametry $R_a$ a $R_z$ .....	56
<b>6 Shrnutí práce a dosažených výsledků.....</b>	<b>59</b>
<b>7 Závěr.....</b>	<b>60</b>
<b>Citovaná literatura .....</b>	<b>61</b>

## Seznam obrázků

OBRÁZEK 1- A) STOPKOVÁ TVAROVÁ FRÉZA [6]; B) SLOŽENÉ NÁSTRČNÉ TVAROVÉ FRÉZY [7] ; C) STOPKOVÁ ÚHLOVÁ FRÉZA [8].....	18
OBRÁZEK 2-SCHÉMA PROCESU VÝROBY ZA POUŽITÍ CAD/CAM SYSTÉMŮ [11] .....	20
OBRÁZEK 3-KOPÍROVACÍ ZPŮSOB DOKONČOVÁNÍ [15] .....	21
OBRÁZEK 4-POROVNÁNÍ KONSTANTNÍHO ROZPOČTU V OSE Z NA DVOU RŮZNÝCH SKLONECH..	22
OBRÁZEK 5--ROZPOČET DRAH DLE KONSTANT 3D.....	23
OBRÁZEK 6-ŠROUBOVÉ ROZLOŽENÍ DRAH [14].....	24
OBRÁZEK 7-POROVNÁNÍ NĚKTERÝCH STRATEGIÍ: A) METODA ZIG - ZAG ; B) ŘÁDKOVACÍ METODA S JEDNOSMĚRNÝM POSUVEM ; C) STRATEGIE KONSTANT 3D ; D) METODA OBRÁBĚNÍ PO SPIRÁLE [16].....	25
OBRÁZEK 7-KOPÍROVACÍ ZPŮSOB (VERTIKÁLNÍ DRÁHY) [17]].....	26
OBRÁZEK 9- KOPÍROVACÍ ZPŮSOB OBRÁBĚNÍ (TYP 1) [17] .....	27
OBRÁZEK 10-ÚBĚR MATERIÁLU PŘI POHYBU NÁSTROJE VZHŮRU (TYP 3) [17] .....	27
OBRÁZEK 10-ŘÁDKOVACÍ ZPŮSOB [17].....	28
OBRÁZEK 12-ZÁBĚROVÉ PODMÍNKY ŘÁDKOVACÍHO ZPŮSOBU (TYP 5) [17].....	28
OBRÁZEK 13-NESOUSLEDNÝ ÚBĚR KULOVÉ FRÉZY (TYP 7) [17] .....	29

OBRÁZEK 14-ZÁBĚROVÉ KŘIVKY A EFEKTIVNÍ PRŮMĚR NÁSTROJE PŘI DOKONČOVÁNÍ ŠIKMÉ PLOCHY KULOVOU FRÉZOU.....	30
OBRÁZEK 15 - PŘEDDOKONČENÝ POLOTOVAR.....	35
OBRÁZEK 16 - UKÁZKA PROGRAMU V SW EXCEL .....	36
OBRÁZEK 17 - FRÉZOVACÍ CENTRUM DMU 40 EVO LINEAR [21] .....	37
OBRÁZEK 18 - SESTAVA PRO ZÁZNAM ŘEZNÝCH SIL .....	38
OBRÁZEK 19 - UPEVNĚNÍ DYNAMOMETRU A POLOTOVARU.....	39
OBRÁZEK 20 - OBROBEK PO VYHRUBOVÁNÍ (SKLON PLOCHY $A=50^\circ$ ) .....	40
OBRÁZEK 21 - ČÁSTEČNĚ DOKONČENÝ OBROBEK (SKLON ŠIKMÉ PLOCHY $A=75^\circ$ ).....	41
OBRÁZEK 22 - ROZLEŽENÍ BODŮ A NÁMĚRŮ SE ZNAČENÍM PLOCH A PŘECHODŮ .....	42
OBRÁZEK 23 - UKÁZKA MĚŘENÍ PARAMETRŮ DRSNOSTI V KOLMÉM SMĚRU.....	43
OBRÁZEK 24-MĚŘICÍ PŘÍSTROJ CMM CARL ZEISS PRISMO 7 NAVIGATOR [22].....	44

## Seznam grafů

GRAF 1-VLIV ŘEZNÉ RYCHLOSTI NA SOUČINITEL PĚCHOVÁNÍ.....	30
GRAF 2-ZÁVISLOST ŘEZNÉHO ODPORU $K_c$ NA ŘEZNÉ RYCHLOSTI $V_c$ .....	31
GRAF 3-ZÁVISLOST INTENZITY OTUPENÍ NA ŘEZNÉ RYCHLOSTI POTAŽMO TEPLOTĚ.....	32
GRAF 4-ZÁZNAM ŘEZNÉ SÍLY $F_x$ (SKLON PLOCHY $A=25^\circ$ ; PŘECHOD Z $V_c=100$ NA Z $V_c=125,05$ ) .....	45
GRAF 5-ZÁVISLOST $F_c$ NA DÉLCE OBROBENÉ PLOCHY (STRATEGIE A).....	46
GRAF 6-ZÁVISLOST $F_c$ NA DÉLCE OBROBENÉ PLOCHY (STRATEGIE B) .....	47
GRAF 7-ZÁVISLOST VELIKOSTI KONSTANTNÍ ŘEZNÉ RYCHLOSTI NA PARAMETRU $R_a$ PRO STRATEGII A.....	49
GRAF 8-ZÁVISLOST VELIKOSTI KONSTANTNÍ ŘEZNÉ RYCHLOSTI NA PARAMETRU $R_a$ PRO STRATEGII B .....	50
GRAF 9 –ODSTUP BODŮ OD MODELU – STRATEGIE A .....	51
GRAF 10-ODSTUP BODŮ OD MODELU – STRATEGIE B .....	52
GRAF 11 „UTÍKAJÍCÍ“ BODY NA PLOŠE S $V_c=175\text{M}/\text{MIN}$ .....	53
GRAF 12-SOUHRNÝ VLIV ŘEZNÉ RYCHLOSTI NA $F_c$ .....	55
GRAF 13-VLIV STRATEGIE A SKLONU PLOCHY NA $F_c$ .....	56
GRAF 14-SOUHRNÝ VLIV ŘEZNÉ RYCHLOSTI NA $R_z$ .....	57
GRAF 15-VLIV STRATEGIE A SKLONU PLOCHY NA $R_z$ .....	58

## Seznam tabulek

TABULKA 1 – ZVOLENÉ A VYPOČTENÉ FAKTORY VSTUPUJÍCÍ DO EXPERIMENTU .....	34
TABULKA 2-PRŮMĚRY NAMĚŘENÝCH SIL $F_c$ , SEŘAZENY PODLE VZORKŮ STRATEGIE A A UŽITÝCH RYCHLOSTÍ .....	46
TABULKA 3- PRŮMĚRY NAMĚŘENÝCH SIL $F_{xy}$ , SEŘAZENY PODLE VZORKŮ STRATEGIE B A UŽITÝCH RYCHLOSTÍ .....	47
TABULKA 4- MAXIMÁLNÍ HODNOTY DRSNOSTÍ $R_a$ A $R_z$ , SEŘAZENY PODLE VZORKŮ STRATEGIE A A UŽITÝCH RYCHLOSTÍ.....	48
TABULKA 5- MAXIMÁLNÍ HODNOTY DRSNOSTÍ $R_a$ A $R_z$ , SEŘAZENY PODLE VZORKŮ STRATEGIE B A UŽITÝCH RYCHLOSTÍ.....	49
TABULKA 6-PRŮMĚRNÉ HODNOTY ODSUPU BODŮ OD MODELU U JEDNOTLIVÝCH VZORKŮ STRATEGIE A V ZÁVISLOSTI NA POUŽITÉ $v_c$ .....	51
TABULKA 7-PRŮMĚRNÉ HODNOTY ODSUPU BODŮ OD MODELU U JEDNOTLIVÝCH VZORKŮ STRATEGIE B V ZÁVISLOSTI NA POUŽITÉ $v_c$ .....	52
TABULKA 8-VÝZNAMNOST FAKTORŮ NA $F_c$ DLE METODY ANOVA.....	54
TABULKA 9-VÝZNAMNÉ FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ $F_c$ .....	55
TABULKA 10-VÝZNAMNOST FAKTORŮ NA $R_z$ DLE METODY ANOVA .....	57
TABULKA 11-VÝZNAMNÉ FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ $R_z$ .....	57

## Seznam použitých symbolů a zkratek

NC	Numerical control – číslicově řízený
CNC	Computer numerical control – počítačově řízený
CAD	Computed aided design – počítačová podpora konstrukce
CAM	Computed aided manufacturing – počítačová podpora výroby
CAx	Souhrné označení softwarů podporujících výrobní podnik
$v_c$ [m/min]	Řezná rychlost
$v_f$ [mm/min]	Posuvová rychlost
$\alpha$ [°]	Úhel sklonu plochy
Ra [ $\mu$ m]	Průměrná aritmetická odchylna profilu drsnosti
Rz [ $\mu$ m]	Nejvyšší výška profilu drsnosti
X,Y,Z	Osy souřadného systému stroje
A,B,C	Značení rotace kolem os X,Y,Z
ATP data	Typ výstupních data z CAM systému
CL data	Cutter Location data - výstupní data z CAM systému
$\varnothing D_e$ [mm]	Efektivní průměr nástroje
$\varnothing D$ [mm]	Průměr nástroje
OMNÓ	Oblast primární plastické deformace
$\lambda$	Součinitel přechování
f [mm]	Posuv
$f_z$	Posuv na zub
$a_e$ [mm]	Radiální krok nástroje (radiální hloubka řezu)
$a_p$ [mm]	Axiální krok nástroje (axiální hloubka řezu)
$k_c$ [Mpa]	Řezný odpor
$F_x, F_y, F_z$ [N]	Řezné síly ve směru x, y, z
$F_{xy}$ [N]	Síla udávající odtlačení nástroje

$F_c$  [N]

Celková řezná síla

SW

software

# 1 Úvod

Obrábění, jakožto dosažení tvaru odebráním materiálu, bylo svým způsobem využíváno již v pravěku. S růstem lidského poznání rostla i schopnost poznávat a zpracovávat materiály, z nichž začaly vznikat výrobky. Postupně se začaly vymýšlet stroje, jenž měly ulehčit lidskou činnost a zvětšit možnosti produkce. Stroje se neustále vylepšovaly a ani dnes nedochází k poklesu pokroku.

Rozvoj výpočetní techniky v dnešní době exponenciálně roste a společně s nástupem robotiky přímo úměrně ovlivňují technické i jiné obory, které jsou s těmito trendy úzce spjaty. Ukázkou je stále více šířící se pojem Průmysl 4.0, ve kterém by se měla eliminovat lidská činnost, a člověk by měl zastupovat především pozici pozorovatele. V důsledku těchto pokroků, vzrůstá tvarová náročnost výrobků, tedy i obrobků a požadavky na ně kladené.

Před příchodem NC a CNC strojů se výroba přesných tvarových ploch realizovala konvenčními metodami obrábění velmi obtížně a některé tvary byli nedosažitelné. Právě s nástupem a rozvojem počítačově řízených strojů se rozšířili možnosti obrábění složitých tvarů. Tento vzestup byl rychle zachycen okolím a požadavky na složitost a přesnost dílů vyráběných obráběním byli stále náročnější.

V dnešní době se tento rozvoj promítá především v rozšiřování možností CAD/CAM systémů, díky nimž (ve spojení se strojem, který má tři nebo více řízených os) programátor dosahuje efektivnějších výsledků, především, budeme – li uvažovat frézovací operace. Jelikož konkurenceschopnost ve strojírenství je stále náročnější, stávají se tyto CAx softwary nedílnou součástí mnoha výrobních podniků. Používají se nejen k řízení víceosých obráběcích center a modelování výrobků, ale rovněž slouží jako pomoc při výrobě laserem, vodním paprskem, a například 3D tiskem jehož popularita v posledních letech enormně vzrostla, ale stále se obráběcím centřům nevyrovná ve výkonu. CAx systémy také dokáží simulovat celý proces včetně pohybu konkrétního stroje. Také umožňují například kontrolovat a hodnotit pohyb operátora z hlediska namáhání pohybového aparátu nebo měřit časové náročnosti různých procesů či pohybů.

Dokončovací operace jsou z hlediska produktivity práce málo ekonomické. Dochází k úběru malého množství materiálu, které je v poměru k hrubovacím operacím zdlouhavé. Je však potřeba dosáhnout předepsané jakosti povrchu a tvarové přesnosti. Velikost přiblížení se k optimálním podmínkám ovlivňuje velkou mírou také povaha výroby. Čím více součástí vyrábíme za stejných podmínek, tím více se zúročí náklady spojené právě s náročnější výrobou NC programu a s činnostmi s tím spojené, jako například volba nástroje a materiálu.

## 1.1 Cíle

Ačkoli má programátor stále větší možnosti využití sofistikovaných systémů, v případě dokončování, které je z hlediska výsledků zcela primární záležitostí, mají tyto programy jisté rezervy. Dalším faktem je, že velmi významný vliv mají také řezné podmínky. Neméně důležité jsou použité strategie, nástroj a především obráběný materiál.

Cíle této diplomové práce vycházejí z problematiky zefektivňování dokončovacích strategií pro složité prostorové tvary řešené na katedře technologie obrábění. Tato problematika byla již řešena z několika hledisek a nyní se intenzivně pracuje na použití konstantní řezné rychlosti pro dokončovací frézování těchto ploch. Jedním z dílčích cílů bylo zjištění vlivu změny řezné rychlosti na tvarovou přesnost dokončené plochy. Tímto tématem se zabývá tato diplomová práce.

Podstatou bude změna velikosti konstantní řezné rychlosti a její otestování vlivu pomocí zvolených strategií při dokončování kulovou frézou o zvoleném poloměru. Jelikož cílem je zjistit vliv změny  $v_c$ , bude tento parametr měněn v určitém rozsahu. Další skutečností je vhodnost jednotlivých strategií pro různé plochy. Proto reprezentantem tvarové plochy bude plocha šikmá, jejíž úhel bude opět měněn v daném rozsahu.

## 2 Analýza současného stavu

### 2.1 Literární rešerše

Aby bylo možné přistoupit k dané problematice korektně, je nezbytné prostudovat již vytvořené práce, které s tématem souvisejí. Z tohoto důvodu byla na základě klíčových slov provedena literární rešerše. Níže jsou popsány některé z děl, jenž tematicky souvisí z touto prací.

**2.1.1 MÁČALA, Adam. Vliv strategie obrábění na jakost povrchu při CNC frézování. [Online] 2011. [Citace: 20. Listopad 2017.] [http://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/15496/m%E1%20ala\\_2011\\_dp.pdf?sequence=1](http://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/15496/m%E1%20ala_2011_dp.pdf?sequence=1)**

Tato práce se zabývala zkoumáním vlivu nastavení řezných podmínek na drsnost obrobeného povrchu při CNC frézování. V teoretické části je pojednáno o problematice frézování, CNC obrábění a také jakosti obrobeného povrchu. V praktické části byl navrhnout a vytvořen model s různými tvarovými plochami, pro jehož výrobu byly použity materiály Necuron 651 a také dural AW 5083. Následně proběhlo obrábění kulovými nástroji s různými průměry a řeznými podmínkami na CNC frézce AZK HWT C-442. K programování byl využit CAM systém s názvem CAMExpres. Po obrábění následovalo vyhodnocování drsnosti obrobené plochy v závislosti na těchto parametrech: průměr frézy, radiální krok a strategie scallop height. Všechny tři parametry byly vyhodnoceny jako přímo úměrné drsnosti povrchu.

**2.1.2 MARTINEK, Michal. Vliv řezných podmínek na kvalitu povrchu obrobené plochy u CNC frézování. [Online] 2012. [Citace: 25. Listopad 2017.] [http://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/23044/martinek\\_2012\\_dp.pdf?sequence=1](http://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/23044/martinek_2012_dp.pdf?sequence=1)**

Cílem diplomové práce je nejprve vymezit teoretickou koncepci frézování a následně prakticky frézování aplikovat. Teoretická část je zaměřena obecně na frézování a obrábění s pomocí číslicově řízených strojů. Dále je uvedena problematika týkající se vyhodnocování

struktury povrchu. Cílem praktické části je nalézt vliv řezných podmínek z hlediska hodnot parametru drsnosti povrchu. Polotovary jsou tvořeny šikmými plochami o sklonech 15 a 85 stupňů a jako materiál byla použita nástrojová ocel ČSN 19 573. Byly použity dvě strategie, jež byly vytvořeny v programu Powermill od firmy Delcam. Celý experiment probíhal za konstantních otáček a tedy i za konstantní řezné rychlosti  $v_c = 200$  m/min. Pro daný případ bylo zjištěno, že velký vliv na výslednou drsnost povrchu má krok do boku nástroje. Méně už pak geometrie nástroje a posuvová rychlost

**2.1.3 Bc. MATULA, Lukáš. Jakost povrchu při frézování kulovou frézou na nakloněných plochách. [Online] 2014. [Citace: 1. Prosinec 2017.] <http://docplayer.cz/19159934-Jakost-povrchu-pri-frezovani-kulovou-frezou-na-naklonenych-plochach-bc-lukas-matula.html>.**

V dané diplomové práci je v teoretické části popsána problematika frézování, používaných nástrojů a možnosti vyhodnocování drsnosti povrchu. V praktické části byl vytvořen model s nakloněnými plochami v programu CATIA v5. Použitý materiál nese označení EN AW 7022. K vytvoření programu byl použit CAM z rodiny NX 8.5. Cílem bylo testovat různé kombinace šířek záběru, sklonů ploch a nástrojů s následným vyhodnocením parametrů  $R_a$  a  $R_z$ . Výsledkem bylo zjištění, že velký vliv na výslednou drsnost povrchu má šířka záběru a částečně i sklon obráběné plochy. Dále se při použití velkých šířek záběru (nad 15 procent z průměru nástroje) se kvalita povrchu značně zhoršuje, pokud se použilo větších průměrů fréz. Dále bylo zjištěno, že parametr  $R_z$  se neshoduje se zadanou hodnotou a se zvětšujícím úhlem sklonu plochy se tato chyba zvětšuje.

**2.1.4 Bc. Andrlík, Jiří. Návrh strategie dokončování tvarových ploch. [Online] 2016. [Citace: 10. Prosinec 2017.] <https://portal.zcu.cz/portal/studium/prohlizeni>.**

Diplomová práce vznikla v minulém roce v projektu na ZČU. Cílem byl návrh strategií pro dokončování tvarových ploch. Navržené strategie byly porovnány z hlediska řezných sil, kvality obrobenej plochy, přesnosti a strojních časů. Experiment byl proveden na nakloněných plochách v rozmezí 0 – 90 stupňů a testované strategie byly kombinovány s konstantními otáčkami a s konstantní řeznou rychlostí. Na základě výsledku experimentu, jež potvrdil jako nejvýhodnější strategii s rozpočtem dle tvaru plochy společně s konstantní řeznou rychlostí, bylo vhodné danou problematiku rozvinout. Tato práce je tedy základem mé diplomové práce, jelikož z výsledků vycházím a dále na práci p. Andrlíka navazuji, přičemž budu rozvíjet myšlenku konstantní řezné rychlosti, jejíž vliv budu dále testovat.

## Shrnutí

Všechny práce se zabývají dokončováním tvarových ploch frézováním za použití kulového nástroje. Většina experimentů byla vyhodnocena především na základě drsnosti povrchu a použité materiály byly rozmanité. Strategie a celkový rozpočet drah byly použity z jednotlivých CAM systémů, jako je například Powermill nebo nadstavba programu NX8.5. Zároveň bylo použito konstantních otáček, případně pouze jedné konstantní řezné rychlosti, jež tedy nebyly na jednotlivých kontrolních plochách měněny, a nešlo zcela jednoznačně



určit vliv řezné rychlosti. Z toho vyplývá, že je nutné tuto problematiku prozkoumat hlouběji a navrhnout experiment odlišně.

## 2.2 Frézování [1] [2] [3]

Frézování je metoda obrábění, při které hlavní pohyb vykonává nástroj. Materiál je z polotovaru odebrán ve formě třísek pomocí vícebřitého nástroje. Dokončování složitých tvarových ploch je dnes nejčastěji prováděno na CNC strojích či obráběcích centrech, kde posuvovou rychlost vykonává nástroj nebo se jedná o kombinaci pohybů nástroje a obrobku. Dříve posuvový pohyb vykonával především polotovar, a to kolmo k ose nástroje.

Základní rozdělení frézování :

- Čelní
- Obvodové
- Okružní
- Planetové

Čelní a obvodové frézování se stále hojně využívá při dokončování rovinných ploch. Nejčastěji se využívají frézy čelní válcové, popřípadě frézy tvarové. Obě metody, eventuálně jejich kombinace je velice výhodná z hlediska hospodárnosti úběru materiálu z obrobku. To je nesporná výhoda těchto dvou způsobů, a proto se nasazují i na moderních CNC strojích, pokud je tato možnost dovolena tvarem výrobku.

Okružní frézování je metoda, která dnes bývá nahrazována právě planetovým frézováním, které je složitější na řízení, protože je nutné zajistit pohyb po kružnici kruhovou interpolací. Obě metody slouží k obrábění rotačních ploch. Frézování okružní se používá k obrábění dlouhých tyčí nebo závitů. Nástrojem je frézovací hlava osazena několika břity, jenž se otáčí. Posuv může konat obrobek či nástroj. Oproti tomu se planetové frézování provádí bokem i čelem válcové frézy. Způsob je určen spíše pro kratší obrobky, ale výhodou je univerzálnost použití.

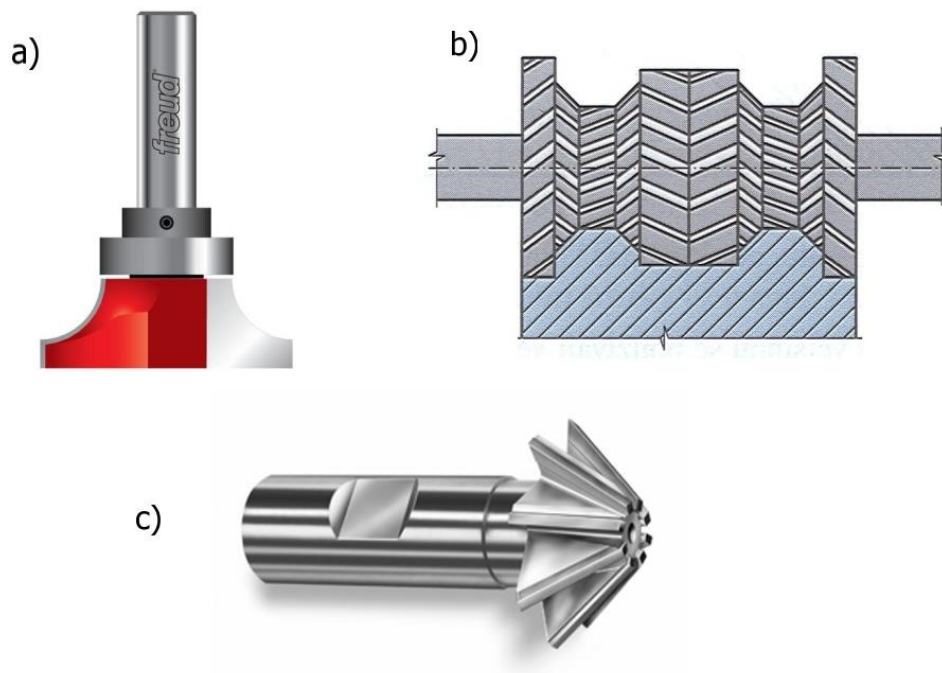
## 2.3 Frézování tvarových ploch [4]

Tvarové plochy lze obrábět na konvenčních strojích nebo na NC/CNC řízených strojích. Složitost výrobků vzrostla a nyní dokážeme na moderních strojích, které mají 2,3,5 nebo i více řízených os vyrábět tvary, které konvenčně vyrobit nelze. Je však důležité tyto "překonané" metody znát, jelikož můžeme například lépe využít kapacitu strojů a celý strojový park. V mnoha případech lze jednodušší tvary vyrobit konvenčně a lze tak ulehčit vytíženým obráběcím centřům.

### 2.3.1 Konvenční metody [5]

Tyto metody se dělí dle použitého nástroje, kterými je tvarová plocha obráběna. Jedná se o tvarové nebo úhlové frézy. Princip spočívá v odebrání materiálu nástrojem, který má negativní tvar požadované plochy. Některé nástroje jsou normalizované, ale často se nechávají vyrobit právě pro daný tvar výrobku. To se vyplatí zejména pro velkosériovou

výrobu. Úhlové frézy se používají zejména při výrobě tvarových drážek, například ribinových. Dalším příkladem úhlové frézy je srážecí hran. Metody se dále dělí opět dle nástrojů. Ty mohou být stopkové, nástrčné nebo odvalovací. Odvalovací metoda se stále používá při výrobě ozubených kol. Rozšířené možnosti obrábění na konvenčních strojích představují přípravky a příslušenství v podobě dělicích strojů a otočných či naklápěcích stolů. To zvětšuje rozsah obráběcích možností tvarových ploch, Příklad tvarových a úhlových fréz je na obrázku 1.



Obrázek 1- a) stopková tvarová fréza [6]; b) složené nástrčné tvarové frézy [7] ; c) stopková úhlová fréza [8]

Pro větší série se začal používat kopírovací způsob, jenž spočíval v kopírování šablony palcem. Šablona měla tvar shodný s požadovaným tvarem součásti.

### 2.3.2 NC/CNC frézovací stroje [1] [9]

Z důvodu nutnosti produkce složitých tvarů, které bylo potřeba vyrábět s určitou přesností a hlavně co nejrychleji s důrazem na náklady jednoho kusu byli vyvinuty číslicově řízené stroje, které posunuli výrobní možnosti předchozích strojů. Příklad NC, případně CNC strojů přinesl další výhody, jako je například opakovatelnost výroby, případně její automatizace. Tento pokrok byl velmi přínosný z hlediska úspory času při seřizování stroje. S tím je spojená také větší možnost kontroly a modifikace jednotlivých programů. Nevýhodou je vysoká pořizovací cena, ačkoliv náklady spojené s pořízením postupem času klesají. Pomineme – li CAM systémy, existují dva základní druhy programování. První typ je absolutní programování, což znamená, že tvar a cílový bod je zadáván čísly vztaženými k danému nulovému bodu. Druhý způsob je přírůstkový, to znamená programování souřadnic cílového bodu vzhledem k předcházejícímu cílovému bodu.

Pro obrábění tvarových ploch se nejčastěji využívají stroje se třemi nebo více řízenými osami. To znamená, že všechny řízené osy lze řídit současně a tak je možné dosáhnout požadované

plochy. K určení jednotlivých os a smyslu otáčení včetně znamének slouží popis pohybů nástroje dle normy ISO. Tímto způsobem je jednoznačně určen souřadnicový systém stroje a obrobku a vztah mezi těmito souřadnými systémy. Dle pravidla pravé ruky palec ukazuje směr kladné osy X, kladný směr osy Y je definován ukazováčkem a prostředníček ohnut o 90 stupňů směřuje ve směru kladné osy Z. Rotace kolem os X, Y, Z se označuje A, B, C a kladný smysl se řídí pravidlem pravé ruky pro rotace, tudíž směřuje – li palec ve směru dané osy, ohnuté prsty značí směr rotace.

Stroj s plynulým řízením pěti os je vhodný pro nejnáročnější obráběcí operace. Zejména má význam pro výrobu turbínových lopatek, zápusťek apod. Plynulým řízením pěti os se také může ušetřit čas, jelikož jedním nástrojem a jeho naklápěním dokážeme nahradit nástroje, kterými by se na tříosém stroji obrábět muselo. Například k sražení hrany by se musel využít srážeč nebo jiná metoda, kupříkladu řádkování kulovou frézou. Při využití pětiosého stroje lze použít jednoduchou čelní válcovou frézu. Tyto stroje často dokáží kombinovat soustružení a frézování, případně i jiné technologie. Nazýváme je obráběcí centra.

## 2.4 CAD/CAM [9] [10]

S nástupem počítačové techniky se začalo programovat ručním psaním většinou ISO kódu, ať už za použití lineární nebo kruhové interpolace. Dalším krokem je pomoc v podobě dílenského programování, jejímž představitelem je SW Dialog, jehož výrobcem je HEIDEMHAIN. Tyto systémy umožňují ruční programování, ale také obsahují algoritmy, které programování urychlují a usnadňují. Další výhodou je grafické zobrazení psaného kódu. Systémy tohoto typu se stále hojně využívají pro programování jednodušších součástí, a to většinou přímo na stroji. Další úroveň, která umožňuje víceosé obrábění složitých součástí a nabízí technologovi škálu předdefinovaných strategií, jsou právě CAD/CAM systémy.

CAD: Computer aided design neboli počítačová podpora konstruování. Software určený primárně pro konstruktéry, ve kterém se vytvoří model požadované součásti. Následně se model předává technologovi.

CAM: Computer aided manufacturing neboli počítačová podpora výroby je nástroj technologa ve kterém lze programovat CNC stroje. Data jenž vystupují z CAM systému jsou soubory ATP nebo CL.

Postprocessor: Nutný aparát, který převádí ATP nebo CL data do kódu, kterému rozumí daný řídicí systém výrobního stroje. Výrobce postprocesorů může být odlišný s výrobcem CAM systému, případně si za pomoci dostupných nástrojů může postprocessor naprogramovat sám technolog. Určuje se tedy dle řídicího systému stroje.

Vznik CAM systémů zapříčinil rozvoj leteckém a automobilovém průmyslu, kde započalo první využívání. Například systém UNISURF pro výrobu karoserií, který vyvinula firma Renault v roce 1971.

Programování pomocí CAD/CAM se uplatňuje také zejména kvůli možnosti převzetí digitálního výkresu od konstruktéra ve 2D nebo 3D modelu, což vede ke zrychlení průběhu

zakázky. Ovšem tyto systémy mají přes své nesporné výhody i nevýhody. Ty spočívají v pochopení principu a ve znalosti ovládání daného softwaru. Naopak výhodou je, že u náročných výrobků lze provést simulaci obrábění, včetně použitých nástrojů, držáků a mnohdy také s konkrétním modelem stroje, na kterém bude součást skutečně vyhotovována. To nejen že zmenšuje zmetkovitost výroby, ale také je jedním z výstupů této simulace skutečný čas potřebný na práci stroje. Tak lze například porovnávat více variant s použitými různými strategiemi z ekonomického hlediska. Jelikož výrobní časy jsou jedním ze základních nákladů započtených do výrobku, například v podobě mezd.

To, co je možné programovat ručně v CNC, lze vytvořit také v CAM systémech. Nečiní to žádné komplikace a naopak bývá kladem úspora času. Z toho plyne, že jsou vhodné pro všechny druhy výroby. U kusové produkce se uplatňuje možnost programování složitých tvarů. U sériové výroby je výhoda možnosti simulace, a tak precizně odladit program a zkrátit časy na minimum. Oproti tomu u některých výrobků je velice obtížné a dokonce nemožné použít ruční programování, například pro složité tvary zápustek pro vstřikovací formy.



Obrázek 2-Schéma procesu výroby za použití CAD/CAM systémů [11]

## 2.5 Strategie

V následujícím odstavci jsou vybrány strategie používané při 3 –osém obrábění. Tyto strategie a případně jejich modifikace často využívá řada softwarů používaných při dokončování tvarových ploch.

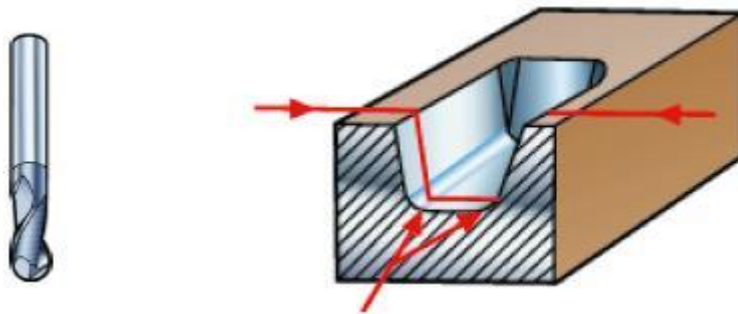
### 2.5.1 Dokončovací strategie [12] [13] [14] [15]

Při dokončování se dnes nejčastěji používá kopírovací nebo konturovací způsob, případně strategie, které jsou založeny na kombinaci těchto dvou základních pohybů. Složité tvarové plochy se dokončují především kulovou frézou. Následně budou popsány vybrané nejčastější

dokončovací operace. Řada těchto operací, jejich kombinace a další jsou následně využívány v různých CAM systémech. Ti si však algoritmus rozpočtu jednotlivých drah mohou přizpůsobovat.

**Konturování:** Též strategie řádkování, které je v praxi hojně využíváno a hodí se jak pro hrubování, tak pro dokončování. S rovinou XY jsou vedené rovnoběžné řezy, které následují povrch ve směru osy Z. Kroky křivek a jejich úhel se nastavuje ve směru horizontálním. Také lze použít dráhy kolmé.

**Kopírování:** Tato strategie je ve většině případů nahrazována, jelikož nese záporné aspekty, jenž mají vliv na dokončenou plochu. Při této metodě často dochází ke změnám stoupajících a klesajících povrchů a tím se mění řezné síly a tudíž celková stabilita. Dále nastává problém při přechodech mezi strmými plochami, kde může docházet ke kontaktu velké styčné plochy a následným vibracím. Navzdory negativním vlivům je však pro některé složité tvary dále využívána, a nebo se uplatňuje v kombinaci s konturováním, případně s dalšími metodami.

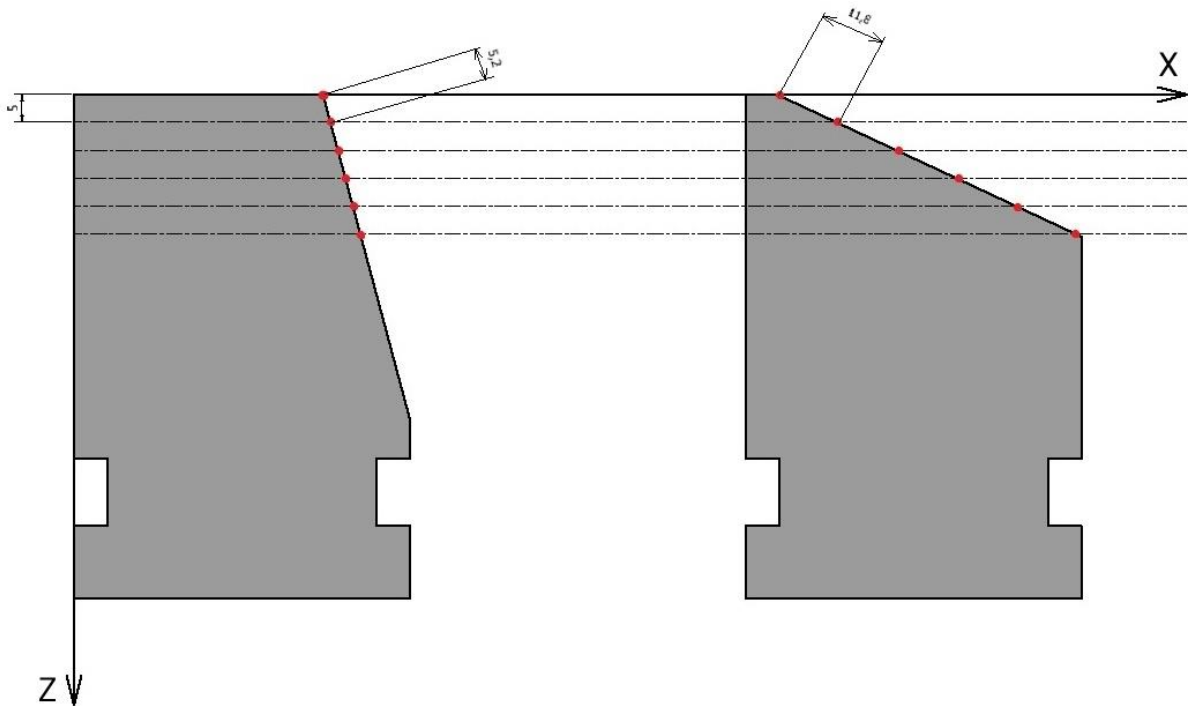


Obrázek 3-Kopírovací způsob dokončování [15]

### Rozpočet s konstantním krokem v ose (Z)

Tato strategie, také často nazývána konstant Z je typický představitel konturového obrábění, ke kterému dochází v rovině XY. Strategie využívá konstantní hodnoty v zadané ose (nejčastěji v ose Z), která je měněna skokem. Dle této konstantní vzdálenosti je vytvořen rastr drah na obráběné ploše, ostatní souřadnice se dle souřadnice zadané dopočtou. Vhodnost této strategie vyplývá z principu. Pokud je obráběná plocha kolmá na osu, ve které probíhá rozpočet nebo je sklon vůči této ose blízký devadesáti stupňům, tak strategie selhává. V tomto případě jsou dráhy generovány daleko od sebe nebo nejsou vytvořeny vůbec. Pokud by byla použita souřadnice Z pro rozpočet v ose, bylo by vhodné obrábět plochy kolmé nebo strmé. Metodu lze použít na vnější i vnitřní plochy. Omezením může být nastavení CAM systému.

Při aplikaci této strategie na šikmou plochu je vliv sklonu vidět na obrázku 2. Při obrábění plochy stejného rozměru je při stejném kroku rozpočtu v ose Z vlivem úhlu rozdílný počet a vzdálenost drah, což může mít negativní dopad na výslednou plochu.

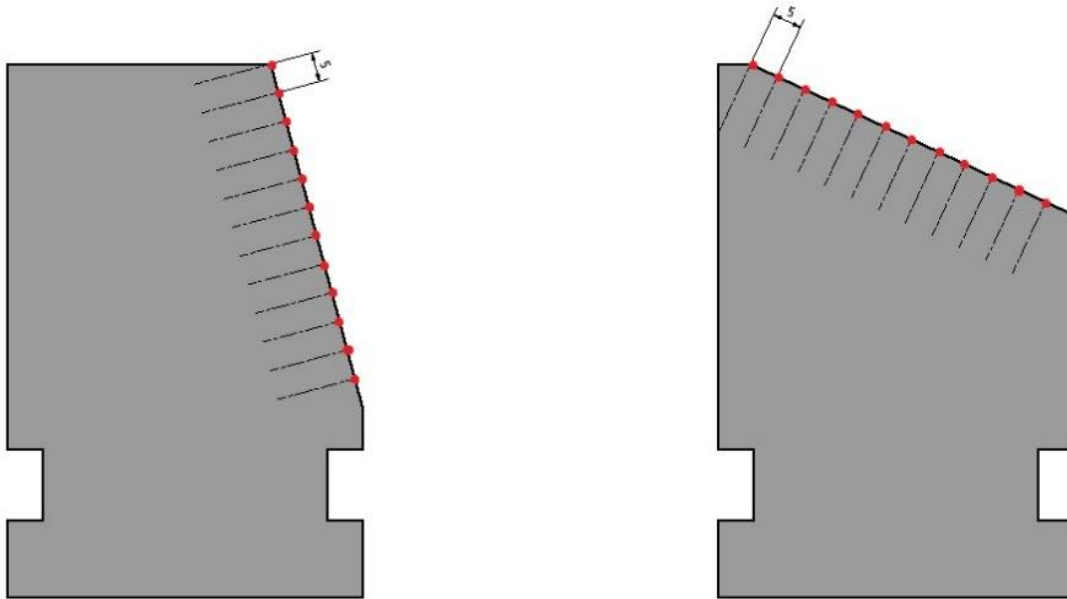


Obrázek 4-Porovnání konstantního rozpočtu v ose Z na dvou různých sklonech

### Rozpočet s konstantním krokem po křivce

Metoda často nazývána též konstant 3D. Křivky jsou generovány v zadané vzdálenosti a rozpočet je konstantní podle plochy, která bude obráběna. Aplikace této strategie je možné omezit hranicemi nebo ji lze aplikovat na celou součást. V porovnání s předchozí strategií nese rozpočet po křivce výhodu v podobě nezávislosti na sklonu plochy.

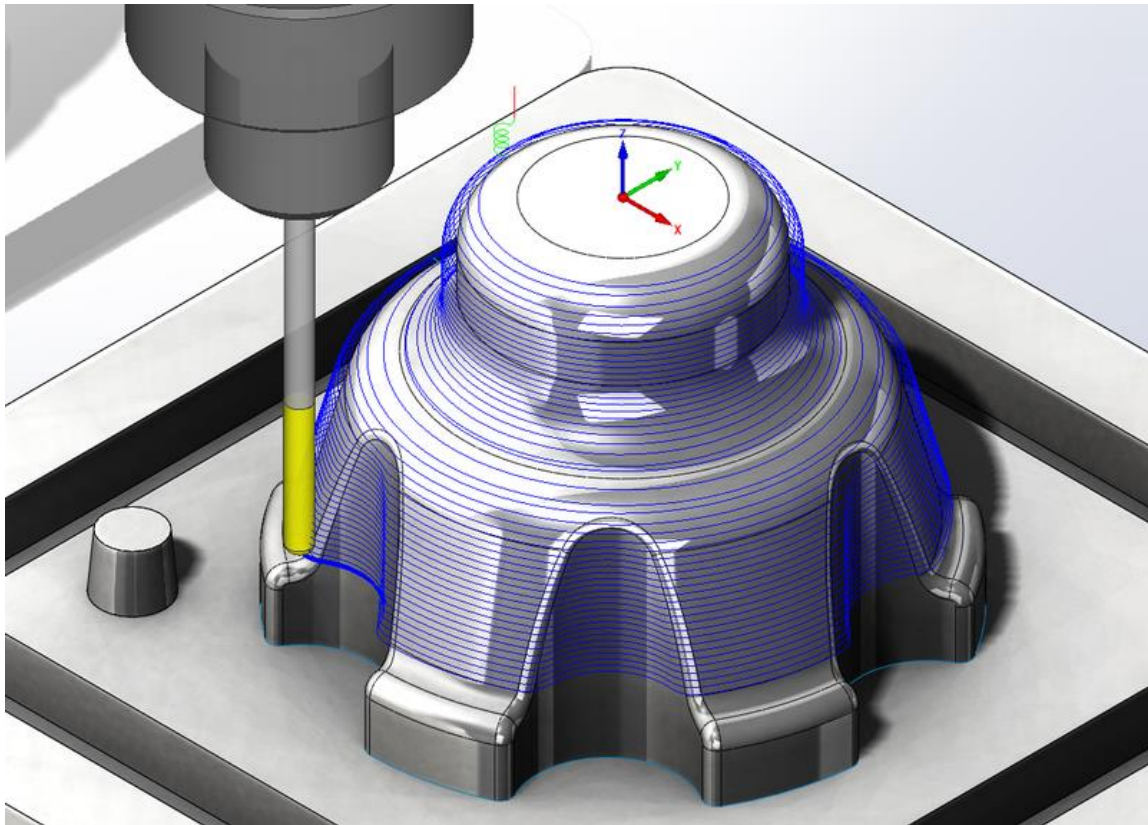
Aplikací této metody na šikmou plochu vzniknou dráhy, jenž se řídí právě dle daného úhlu sklonu. Mají tedy konstantní vzdálenost drah bez ohledu na sklon.



Obrázek 5--Rozpočet drah dle konstant 3D

### Šroubovice

Strategie, která má tvar šroubovice, se také používá v kombinaci s dalšími metodami. Příkladem může být kombinace s konstantním Z, přičemž se jednotlivé křivky spojí ve spirálu a jenž má konstantní odstup v Z. Typicky se však používá pro sestup do kapes. Lze nastavit stoupání šroubovice a počet chodů do boku.



Obrázek 6-Šroubové rozložení drah [14]

### Scallop high

Metoda rozpočtu drah na základě maximální výšky „nedokončeného“ povrchu. Dle zvolené hodnoty výšky neobrobené zbytkové části po průjezdu frézy, je dopočten rozstup jednotlivých drah. V případě použití na šikmé ploše by se rozpočet velmi blížil strategii s konstantním krokem po křivce.

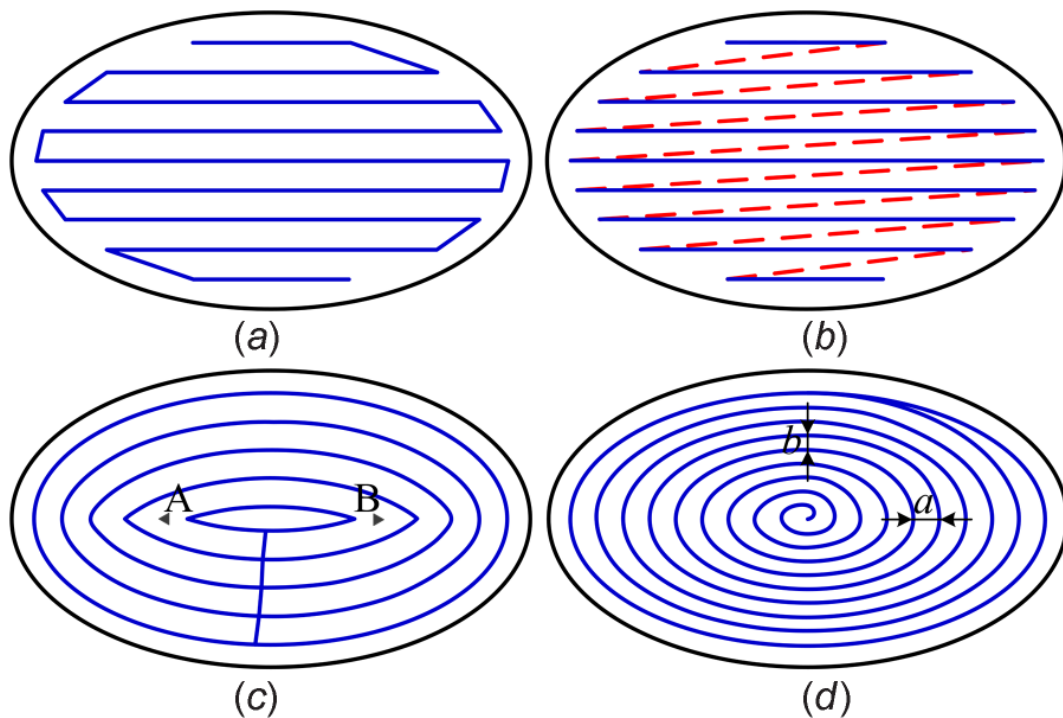
### Spirála

Dráha této strategie vypadá jako spirála. Strategii lze aplikovat na různé druhy ploch, ale efektivně se využívá pro mělké zakřivené plochy, kruhové plochy. Často se tato varianta obrábění kombinuje s dalšími a vytvářejí nové strategie. Obecně však křivka tvaru spirály má střed a pohyb je vykonáván buďto ke středu spirály nebo opačně.

### Zig – zag

Strategie přejezdů drah nástrojem, která kombinuje jednotlivé směry. Hojně se využívá při hrubovacích operacích, ale není vyloučeno ani použití v operacích dokončovacích. Jelikož eliminuje ztrátové přejezdy, které jsou typické pro metody jednosměrného i obousměrného přejezdu, kdy dochází k obrábění pouze v rovinách rastru drah. Pro dokončování se však příliš nehodí, především pokud požadujeme určitou jakost povrchu. Změna souslednosti, která při této metodě nastává, je z hlediska jakosti povrchu nežádoucí, jelikož jsou viditelné stopy po obrábění. Ovšem z hlediska času je to metoda produktivní a není-li potřeba precizního povrchu, je tato metoda použitelná.



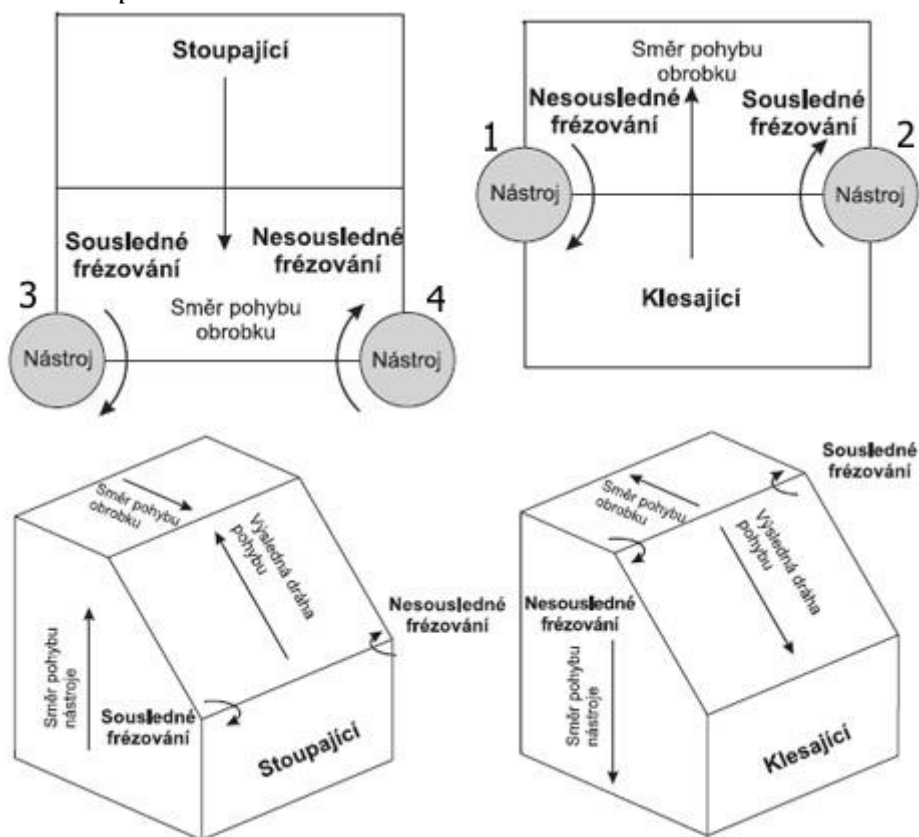


Obrázek 7-Porovnání některých strategií: a) Metoda zig - zag ; b) Řádkovací metoda s jednosměrným posuvem ; c) Strategie konstant 3D ; d) Metoda obrábění po spirále [16]

### 2.5.2 Možnosti pohybu nástroje [17] [18]

Smysl otáčení frézy a posuvu vytváří další dělení frézovacích operací na sousledné a nesousledné, případně souměrné a nesouměrné. Druh tohoto obrábění je důležitý z hlediska kvality dokončeného povrchu, přičemž je snaha o aplikaci především sousledného frézování. Při obrábění tvarové plochy kulovou frézou je více možností směru pohybu nástroje. Realizace vybraného směru a smyslu otáčení má vliv na souslednost či nesouslednost a tedy i na povrch obrobku. Příkladem je obrábění šikmé plochy kulovou frézou, jenž je vidět na obrázku 7. Budeme-li uvažovat pravý smysl otáčení nástroje, který vykonává posuv, dostáváme čtyři základní varianty pohybu nástroje pro každou metodu (kopírovací a řádkovací).

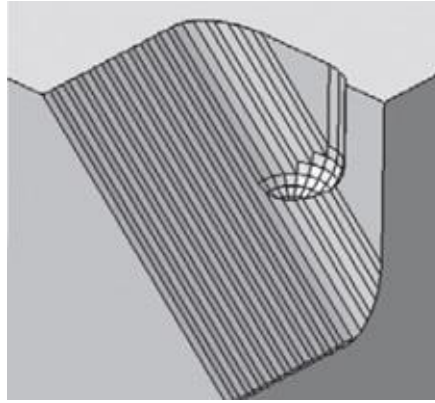
### 2.5.2.1 Kopírovací způsob



Obrázek 8-Kopírovací způsob (vertikální dráhy) [17]

#### 1. Posuv nástroje dolů a přísuv doprava

Nástroj se po obrábění šikmině pohybuje kopírovacím způsobem shora dolů, přičemž jednotlivé dráhy jsou obráběny zleva doprava. Tímto pohybem se vpravo od osy nástroje obrábí nesousledně a v levé části od osy nástroje dochází k obrábění souslednému. Bude-li však uvažován dostatečně malý přírůstek, jenž je při dokončování volen, bude v záběru pouze pravá část a obrábění proběhne nesousledně, což je z hlediska povrchu nežádoucí. Na obrázku 8 je vidět záběr kulové frézy při tomto pohybu, přičemž je nutné si uvědomit klesající řeznou rychlost směrem k ose nástroje. Tento i další obrázky užití v této kapitole jsou ilustrativní a zobrazují kulovou frézu při záběru do plného materiálu, což se nepoužívá. Nic méně díky tomu lze snáze pochopit záběrové podmínky.



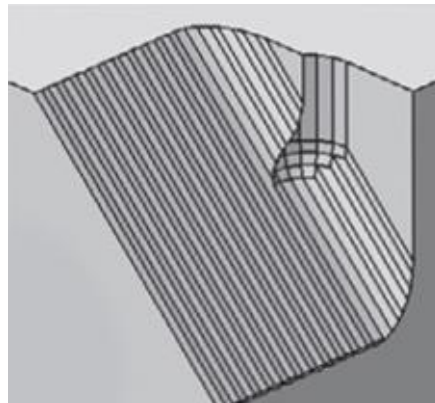
Obrázek 9- kopírovací způsob obrábění (typ 1) [17]

## 2. Posuv nástroje dolů a přísuv doleva

Jak je patrné z obrázku číslo 7, průběh bude probíhat obdobně jako v prvním případě, avšak obrátí se smysl souslednosti díky změně směru přísuvu. Jednotlivé dráhy budou obráběny zprava doleva a to způsobí, že dokončovaný povrch bude obráběn sousledně.

## 3. Posuv nástroje nahoru a přísuv doprava

Tento způsob je z hlediska souslednosti totožný s variantou dvě, tedy na pravé straně od osy nástroje dochází k souslednému odebrání materiálu. Ovšem jak je vidět na obrázku 9, dochází zde ke změně polohy řezné části nástroje, z toho plyne změna záběrových podmínek, což může vést ke zvětšení efektivního průměru frézy.

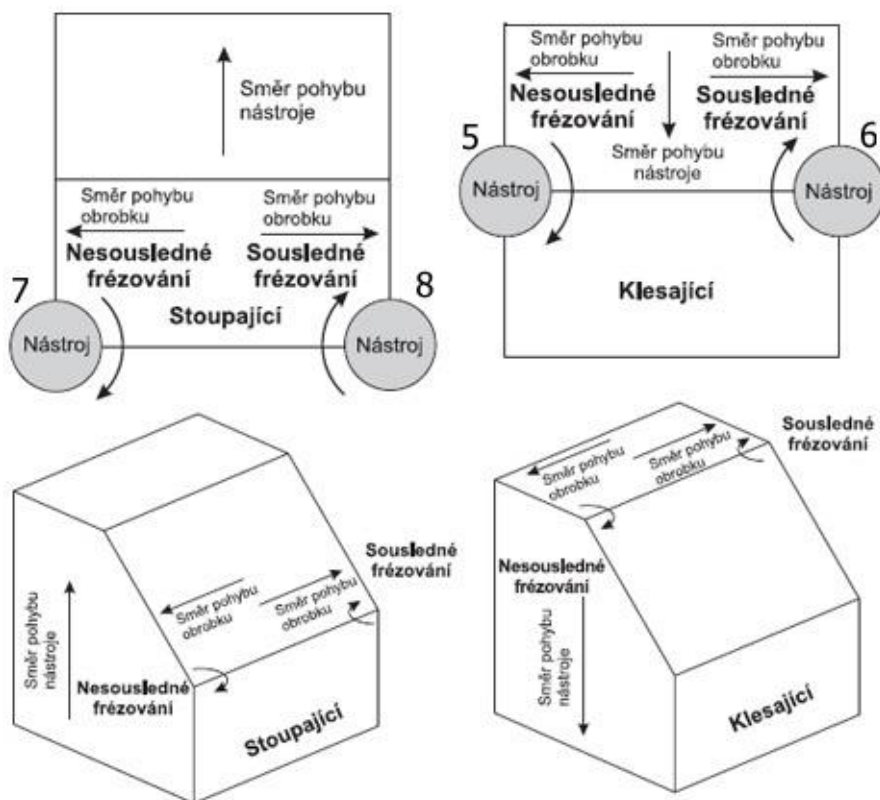


Obrázek 10-Úběr materiálu při pohybu nástroje vzhůru (typ 3) [17]

## 4. Posuv nástroje nahoru a přísuv doleva

Kulová fréza se pohybuje po šikmé ploše směrem vzhůru a obrábění jednotlivých drah probíhá zprava doleva. U tohoto typu dochází k nesouslednému úběru a z toho plyne, že tato metoda není příliš vhodná pro dokončovací operace.

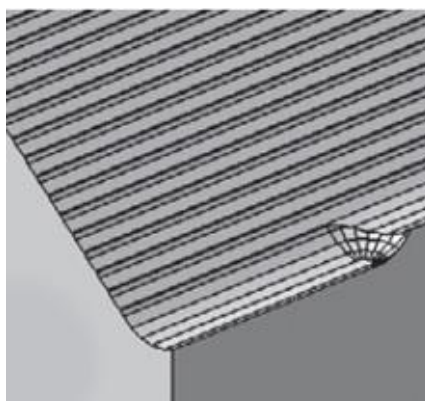
### 2.5.2.2 Řádkovací způsob



Obrázek 11-řádkovací způsob [17]

## 5. Posuv doprava a přísuv dolů

Nyní dochází ke změně strategie pohybu nástroje, který bude obrábět řádkováním z levé strany obrobku na stranu pravou. Přísuv je vykonáván od spodní hrany polotovaru směrem k hraně horní. V tomto případě dochází především k obrábění nesouslednému. Při použití této metody je opět nutné dbát na záběrové podmínky, jichž je možno vidět na obrázku níže, a s nimi spojené vlivy na dokončovaný povrch.



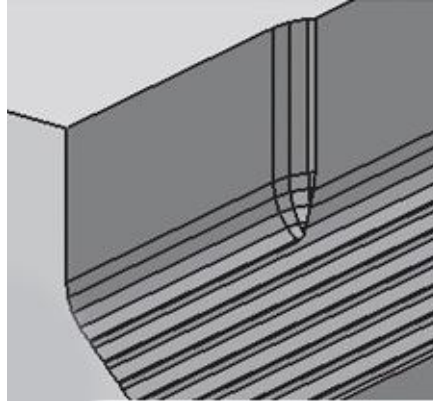
Obrázek 12-Záběrové podmínky řádkovacího způsobu (typ 5) [17]

## 6. Posuv doleva a přísuv dolů

Tento sled pohybů se vyznačuje sousledným úběrem, a proto tento pohyb nástroje po obrobku bude pravděpodobně použit v experimentu této práce.

#### 7. Posuv doprava a přísuv nahoru

Metoda pohybu nástroje, u které je posuv realizován vodorovně přísuv je realizován směrem nahoru. Dokončovaný povrch bude vytvářen nesousledně.



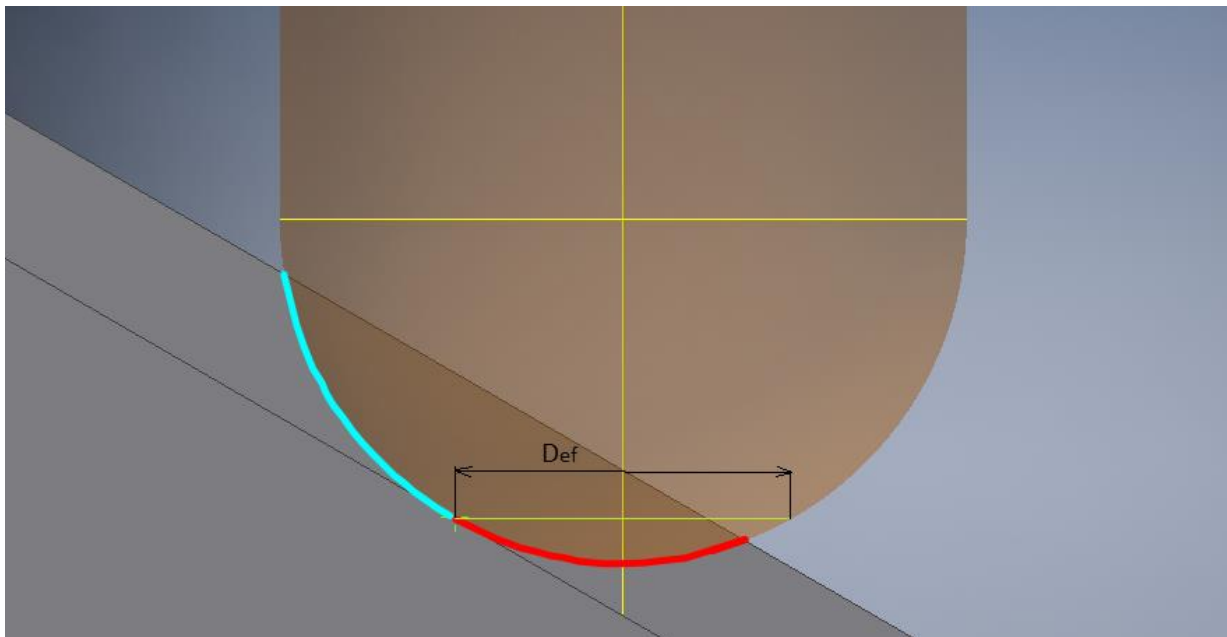
Obrázek 13-Nesousledný úběr kulové frézy (typ 7) [17]

#### 8. Posuv doleva a přísuv nahoru

Nástroj se pohybuje z pravého dolního rohu do levého posuvovou rychlostí. Přísuv je po řádcích směrem ke svrchní ploše obrobku. Z obrázku 10 vyplívá typ pohybu, který je sousledný.

##### 2.5.2.3 Záběrové podmínky

Jak již bylo zmíněno výše, neméně důležité je věnování pozornosti řezné části nástroje. Při nevhodně zvolené metodě může docházet k obrábění osou nástroje, jak je vidět na obrázku 8. V ose je však řezná rychlost frézy rovna nule a je tedy žádoucí se úběru tohoto typu vyhnout. Toho lze dosáhnout například nakloněním nástroje. Vyklonění této osy, případně stolu, je proveditelné pouze na strojích, které mají pět (případně čtyři) řízené osy. Tuto možnost dnes nabízí široká škála softwarů podporujících obrábění, samozřejmě v kombinaci s relevantním obráběcím strojem nebo centrem. Nakloněním nástroje také lze dosáhnout rovnoměrnějšího a zároveň nižšího opotřebení nástroje, než dochází při frézování bez naklonění. Obzvláště pokud obrábíme sérii stejných ploch, tedy pokud je nástroj namáhán jen v daném místě. Ovšem Tato práce se zabývá obráběním ve třech osách a naklonění je tedy irelevantní. Jedním z podstatných rozměrů plynoucích ze záběrových podmínek je efektivní průměr frézy  $D_{ef}$ . Efektivní průměr nástroje je rozměr, na kterém dochází ke styku kulové frézy s materiálem obrobku. V tomto místě dochází ke zmenšení řezného průměru oproti definovanému a to má za následek pokles řezné rychlosti obrábění, jenž s tímto rozměrem souvisí. Názorně jej lze shlédnout na obrázku 13. Ačkoliv při 3 – osém obrábění nelze nastavit vyklonění nástroje, bude zkoumána škála sklonů šikmých ploch, na kterých bude docházet ke změně místa dotyku a rovněž efektivní průměr bude vlivem změny úhlu měněn.

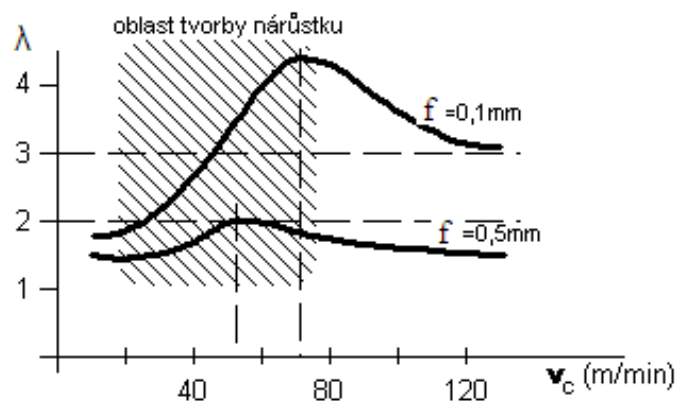


Obrázek 14-Záběrové křivky a efektivní průměr nástroje při dokončování šikmé plochy kulovou frézou

## 2.6 Vliv řezné rychlosti na různé aspekty obrábění [19] [20]

Zvýšením řezné rychlosti dochází ke zmenšení oblasti primární plastické deformace, která bývá značena OMNÓ. Důvodem je rostoucí deformační rychlost, díky které dochází ke snížení plasticity kovu. Avšak vlivem zvyšování řezné rychlosti dochází také ke zvýšení teploty a z toho plyne zmírnění dopadu  $v_c$  na plasticitu kovu.

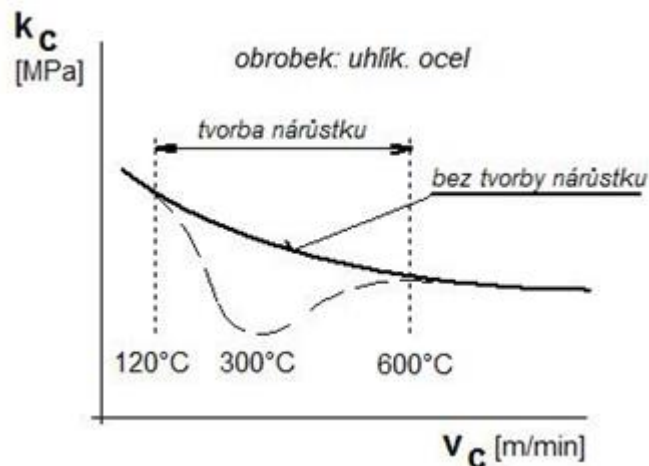
Zároveň s růstem řezné rychlosti klesá součinitel přechování  $\lambda$ . Výjimkou je oblast tvoření nárůstku v oblasti sekundární plastické deformace, zde součinitel přechování při zvyšování řezné rychlosti dočasně roste. Zde však hraje roli také úhly čela. Tvorba nárůstku je nežádoucí a zvýšením  $v_c$  se lze jeho vzniku vyhnout. Průběh je znázorněn na diagramu níže.



Graf 1-Vliv řezné rychlosti na součinitel přechování

## Řezný odpor

Vezmeme-li v potaz řezný odpor  $k_c$ , lze obecně konstatovat, že hodnota řezného odporu s rostoucí řeznou rychlostí klesá. Je to zapříčiněno stoupající teplotou, jelikož stoupá plasticita kovu. Avšak opět je nutné dbát na ostatní parametry, především vlivu skutečné geometrie břitu a součinitele tření, které způsobují již zmíněný nežádoucí nárůstek. Závislost je graficky znázorněna v grafu 2.



Graf 2-Závislost řezného odporu  $k_c$  na řezné rychlosti  $v_c$

## Řezné síly

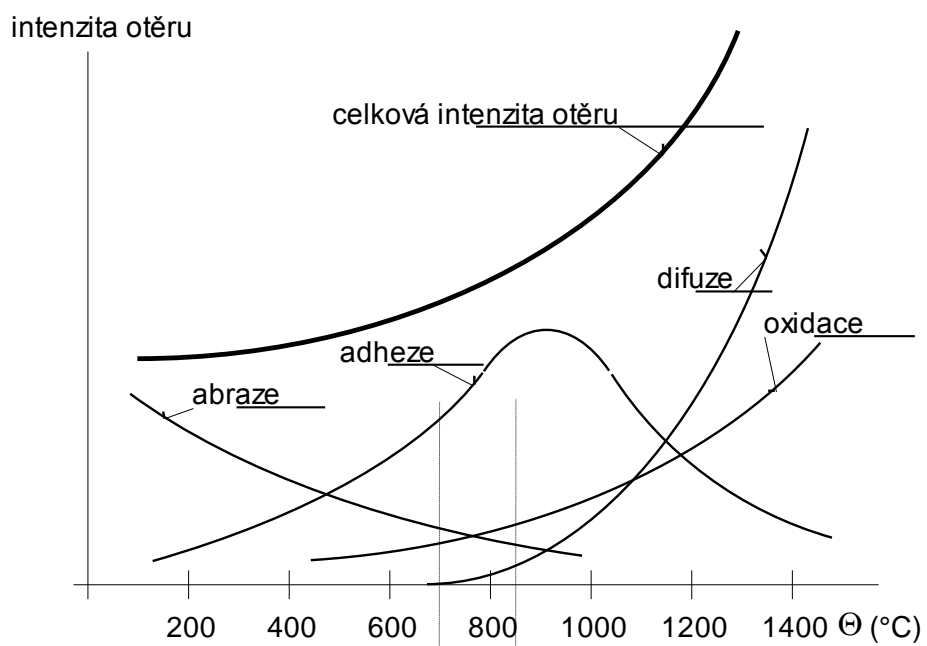
Vliv řezné rychlosti na řezné síly je obdobný jako vliv na řezný odpor. Důležitým aspektem je však také obráběný materiál, především jeho plastické vlastnosti. U křehkých materiálů nedochází k odpeňovacím procesům a pokles sil je malý. Jedná-li se o tvárný materiál, zvýšením rychlosti a tedy i teploty v řezu nastane zvýšení plasticity a tedy zmenšení řezných sil. Tohoto jevu se začalo využívat v praxi zavedením moderní technologie HSC, neboli vysokorychlostní obrábění. Avšak touto metodou se nadále zabývat nebudu.

## Stabilita řezu

Vliv na stabilitu řezu je opět nepravidelný vlivem nárůstku, deformační rychlosti a teplotou. Stabilita samozřejmě klesá v oblasti tvorby nárůstku. To je další důvod, proč je nárůstek záporný činitel.

## Vliv na otupení (otěr) břitu

Otupování břitu je také úzce spjata s řeznou rychlostí  $v_c$ . Jednak se mění místo největšího otupení a zároveň vlivem především stoupající teploty spjatou s rostoucí  $v_c$  stoupá celková intenzita otupení. Ovšem pokud by na čele docházelo ke vzniku stabilního nárůstku, intenzita otupení by klesla, jelikož by nárůstek chránil břit. Obecně má ale intenzita otupení rostoucí charakter viz obrázky a řezná rychlost má oproti ostatním parametrům nejvýraznější vliv. Proto je také řezná rychlost jedním z hlavních parametrů určujících trvanlivost břitu, především Taylorovu konstantu.



Graf 3-Závislost intenzity otupení na řzné rychlosti potažmo teplotě



### 3 Návrh řešení

Na základě stanovených cílů práce byl navrhnout a realizován experiment, jímž budou ověřeny jednotlivé aspekty vlivu řezné rychlosti. Nejprve je nutné stanovit konstantní a proměnné faktory, jenž budou do experimentu vstupovat. Ačkoliv bude experiment realizován konstantní řeznou rychlostí, tento faktor bude proměnný, jelikož právě  $v_c$  je primárním vstupem a zkoumanou veličinou. Dalším proměnným faktorem bude strategie, aby mohlo dojít k porovnání a otestování  $v_c$  při různém rozpočtu drah. Třetí hlavní proměnnou bude sklon obráběné plochy  $\alpha$ , a to proto, že šikmá plocha bude mít vliv na efektivní průměr řezné části nástroje a v neposlední řadě na rozpočet drah jenž byl popsán v teoretické části mé práce. Vzhledem k budoucímu porovnávání jednotlivých strategií jsou podstatné také konstantní faktory. Prvním z nich je axiální krok nástroje  $a_p=0,2\text{mm}$  a radiální krok nástroje  $a_e=0,1\text{mm}$ . Další konstantní parametr je posuv na zub  $f_z$ , který bude dle otáček  $n$ , efektivního průměru  $D_{ef}$  a počtu zubů  $z$  přepočten na posuvovou rychlost u každého sklonu a použité rychlosti. Další konstantou bude velikost průměru frézovacího nástroje  $D$  a s tím související počet zubů  $z$ . Obráběn bude jediný druh materiálu, a to ocel C45 neboli ČSN 12050.1. Důvodem nasazení tohoto materiálu je to, že je stanoven jako etalon pro obrobitelnost ocelí.

#### 3.1 Statisticky plánovaný experiment

K vytvoření plánu byla použita metoda statistického plánování experimentu (DOE). Ten slouží k určení hodnot jednotlivých faktorů dle zvoleného modelu a především k určení počtu pokusů jenž budou ze statistického hlediska postačující. Slouží tedy ke snížení počtu pokusů a také je to způsob jak zjistit vliv více faktorů současně. Základní model pro experimenty v technických oborech je centrální plán. Volba plánu je založena na základě typů proměnných parametrů. Faktory  $v_c$  a  $\alpha$  jsou intervalového typu, oproti tomu je faktor strategie nominální proměnná. Nejprve byly stanoveny rozsahy proměnných faktorů jenž do plánu vstupují a následně se rozpočetly na základě zvoleného plánu. Plán se volí s ohledem na druh a požadavky experimentu. Pro technické obory se často využívá centrální kompozitní plán, jenž je použit také v této práci a z požadavku na větší počet faktorů řezné rychlosti byl použit kubický výpočtový model. To je model, jenž dokáže uvažovat s polynomy 3. řádu, u něhož se očekává nelineární průběh. Tím je také zajištěna ortogonalita plánu, jenž bude důležitá pro následné vyhodnocování. Stanovené jednotlivé hodnoty proměnných faktorů jsou shrnuty v následující tabulce. Plán je jednou z příloh práce.

Proměnné faktory								
Strategie	A - konstantní krok v ose			B - Konstantní krok po křivce				
Úhel sklonu plochy [°]	$\alpha=$	25	50	75				
Řezná rychlost [m/min]	$v_c=$	100	125,05	150,025	175	199,975	224,95	250
Konstantní faktory								
Posuv na zub [mm]	$f_z=$	0,1						
Radiální krok rozpočtu drah (rad. Hloubka řezu) [mm]	$a_e=$	0,1						
Průměr frézy [mm]	$D=$	16						
Počet zubů [mm]	$z=$	4						

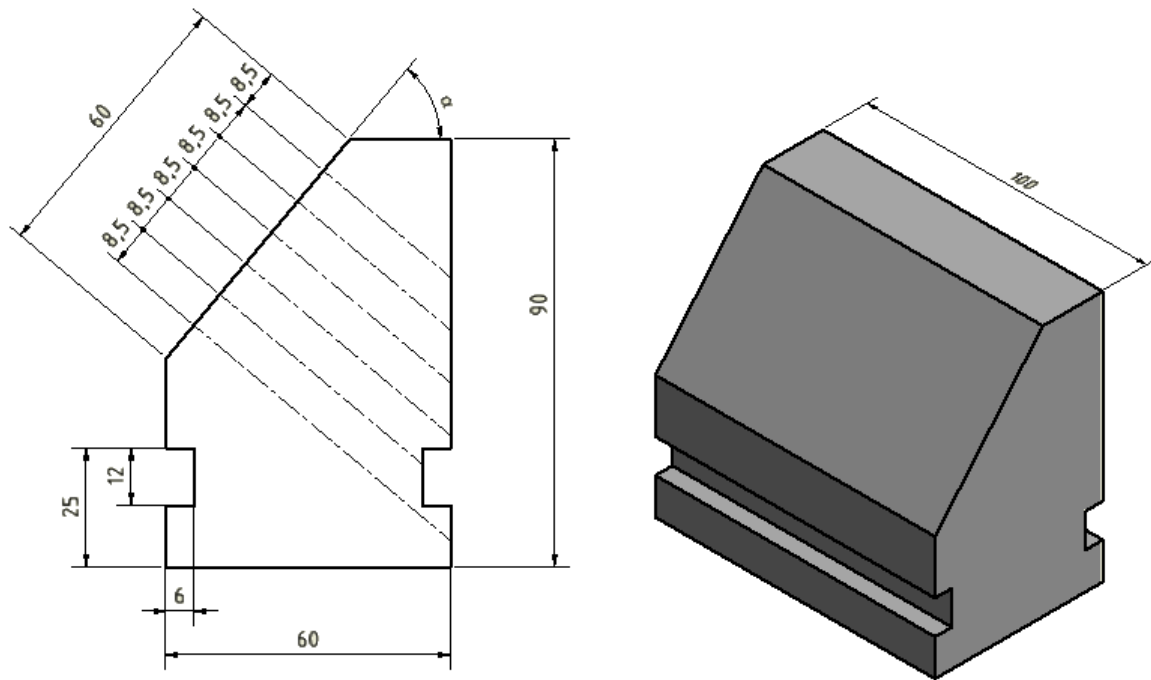
Tabulka 1 – Zvolené a vypočtené faktory vstupující do experimentu

Realizace experimentu bude tedy provedena na třech různých sklonech, přičemž každý sklon bude obroben sedmi řeznými rychlostmi. Strategie budou nasazeny dvě. První je rozpočet s konstantním krokem v ose nástroje označena jako strategie A, jenž byla popsána v teoretické sekci 2.4.1. Druhou strategií je rozpočet s konstantním krokem po křivce označena jako strategie B, která je rovněž popsána v sekci 2.4.1. Bylo uvažováno o nasazení třetí strategie s názvem scallop high, avšak nakonec tak učiněno nebylo z důvodu velmi podobného rozpočtu v porovnání se strategií konstantního kroku po křivce. To je způsobeno použitím šikminy jakožto tvarové plochy. Nástrojem bude kulová fréza o průměru 16 mm se čtyřmi zuby. Konstantní posuv na zub  $f_z = 0,1$  mm. Konstantní axiální krok byl zvolen pro obě strategie stejný, a to  $a_e = 0,1$  mm, aby bylo možné jejich srovnání. Dokončování bude provedeno bez užití chladicí kapaliny.

## 3.2 Příprava experimentu

### 3.2.1 Polotovary

Na základě plánu experimentu byly navrženy polotovary. Těmi jsou kvádry o rozměrech 60x100x90, jenž jsou broušeny, z důvodu zvýšení přesnosti a zajištění kolmosti. To je důležité pro následné měření. Tyto polotovary budou dále hrubovány a předdokončeny před samotným experimentem do výsledné podoby. Na jedné šikmé ploše o délce 60 mm bude možné otestovat všechny velikosti navržených rychlostí. Jednotlivé rychlosti budou měněny po úsecích o délce 8,5 mm. Z toho plyne, že pro každou strategii bude potřeba vyrobit 3 polotovary. Celý experiment se ovšem zopakuje a výsledný počet obrobků je tedy 12. Polotovar je navržen s ohledem na to, aby mohl být upnut na dynamometr a zároveň dle pracovního prostoru užitého stroje. Dynamometr i použitý obráběcí stroj budou popsány v dalších kapitolách. Výsledný návrh obrobku s nastíněním jednotlivých úseků lze vidět na obrázku 12.



Obrázek 15 - Předdokončený Polotovár

### 3.2.2 Programování

Výroba programu byla rozdělena do dvou částí. V první části je využit CAD systém SOLIDWORKS a následně jeho nadstavba CAM systém SOLIDCAM. V tomto programu byl vytvořen model součásti a následně na něj byla nasazena technologie. Nejdříve se vytvořil program hrubování metodou iMachining jímž SOLIDCAM disponuje a následně program předdokončení. Technologie předdokončování byla zařazena z důvodu konstantního přídavku na dokončování. To je podstatný krok pro budoucí vyhodnocování, jelikož nekonstantní přídavky by mohli negativně ovlivnit měřené veličiny. Aby tento krok mohl být realizován, byl program vytvořen na stroj s možností řízení 5-ti os. To ovšem nemění koncepci práce, čímž jsou dokončovací strategie na 3-osý stroj.

V druhé fázi byl program vytvořen „ručně“ za pomoci softwaru EXCEL. CAM systémy samozřejmě obsahují a umožňují použití testovaných strategií, avšak u těchto softwarů není zcela jasné, jakým způsobem daný CAM rozpočítává jednotlivé dráhy. Je velmi pravděpodobné, že různé systémy obsahují vlastní úpravu drah, jenž je uživateli skryta. Tento fakt by mohl vnést chyby do následného měření, protože by nebyla zřejmá přesná poloha vytvořených drah. To je hlavním důvodem vytvoření programu ručně. Jelikož se jednotlivé strategie programují na šikmou plochu, není vytvoření rozpočtu a následného NC kódu příliš složité, je však nutné uvědomit si programované body a znát již zmíněné principy strategií. Za použití goniometrických funkcí byli v programu EXCEL vytvořeny tři tabulky rozpočtů pro každou strategii, celkem bylo tedy vyhotoveno šest tabulek čítajících stovky řádků v nichž jsou obsaženy body středu nástroje plynoucí z principu strategií, otáčky stroje, posuvová rychlost a podstatné je shrnuto v NC kódu. Programované body leží v rovině XZ, protože v ose Y dochází k realizaci posuvu a hodnoty v této ose jsou měněny v závislosti na rezné rychlosti. Z toho plyne, že jednotlivé dráhy mají charakter přímky. Správnost

naprogramovaných bodů byla ověřena v CAD systému. NC kód byl následně upraven v textovém editoru z důvodu stanovení nástrojů a nastavení pozastavení programu, aby bylo zřejmé, v jakém momentu má dojít k záznamu z měření na dynamometru. Ukázkou postupu tvoření kódu lze vidět na obrázku níže.

Souřadnice x	Souřadnice z	Délka přepony (pro vc)	Rychlost vc	Otáčky	Posuv. Rychlost	NC Program
9,002946094	-0,749537704	0	100	4707,408479	941,4816958	L X9,0029 Z-0,7495 FMAX TOOL CALL Z S4707 F941 CALL LBL1
9,217396786	-0,849537704	0,236620158	100	4707,408479	941,4816958	L X9,2174 Z-0,8495 FMAX TOOL CALL Z S4707 F941 CALL LBL1
16,29426962	-4,149537704	8,045085383	100	4707,408479	941,4816958	L X16,2943 Z-4,1495 FMAX TOOL CALL Z S4707 F941 CALL LBL1
16,50872032	-4,249537704	8,281705541	100	4707,408479	941,4816958	L X16,5087 Z-4,2495 FMAX TOOL CALL Z S4707 F941 CALL LBL1
16,72317101	-4,349537704	8,518325699	125,05	5886,614303	1177,322861	L X16,7232 Z-4,3495 FMAX TOOL CALL Z S5887 F1177 CALL LBL1
16,9376217	-4,449537704	8,754945858	125,05	5886,614303	1177,322861	L X16,9376 Z-4,4495 FMAX TOOL CALL Z S5887 F1177 CALL LBL1

Obrázek 16 - Ukázka programu v SW excel

### 3.2.3 Stroj [21]

Obráběcí stroj neboli frézovací centrum DMU 40 eVo linear byl použit na přípravu experimentu a také na experiment samotný. Výrobce je firma DMG MORI a stroj disponuje možností řízení 5-ti os současně. Maximální rozsah pohyby os X a Y je 400 mm, u osy Z je to 375 mm. Průměr pracovního stolu je 480 mm a maximální povolená hmotnost obrobku je 250 kg. Otáčky vřetene lze nastavit až na hodnotu 24 000 ot/min. Řídícím systémem je u tohoto stroje HEIDENHAIN. Toto centrum umožňuje také vnější chlazení nebo průtok chladícího média vnitřkem nástroje, pokud je k tomu určen. Tento stroj je ve výzkumném institutu dostupný a svými parametry plně vyhovuje.



Obrázek 17 - Frézovací centrum DMU 40 eVo linear [21]

### 3.2.4 Nástroje

Monolitní kulová stopková fréza se čtyřmi zuby o průměru 16 mm je nástroj, jenž byl vybrán pro dokončovací operace. Avšak k dosažení potřebného tvaru před započítím dokončování jsou potřeba další nástroje. Nejdříve se bokem čelní válcové frézy o průměru 16 mm vyhrubuje tvar a následně se naklopením stolu a použitím čelní nástrčné frézy o průměru 50 mm s vyměnitelnými břitovými destičkami ze slinutého karbidu předdokončí tvar pro dosažení konstantního přídávku, jenž byl stanoven na 0,2 mm.

### 3.2.5 Sestava k měření řezných sil

Záznam řezných sil bude realizován pomocí obrobkového dynamometru od firmy KISTLER. Ten bude upnut na pracovním stole stroje a na základě piezoelektrického jevu bude vzniklý signál přenesen do osmi kanálového zesilovače. Následně bude signál digitalizován v digitalizační kartě a zpracován na klasickém notebooku v programu DynoWare od stejného výrobce jako je dynamometr. Velikost zesílení bude nastavena po zkušebních záznamech prvních drah. Toto nastavení rozsahu je důležité, aby byl záznam dostatečně jemný a zároveň aby nepřekročil zvolený rozsah sil.



Zesilovač

Digitalizační karta

Notebook s SW

Obrázek 18 - Sestava pro záznam řezných sil

### 3.2.6 Ostatní pomůcky

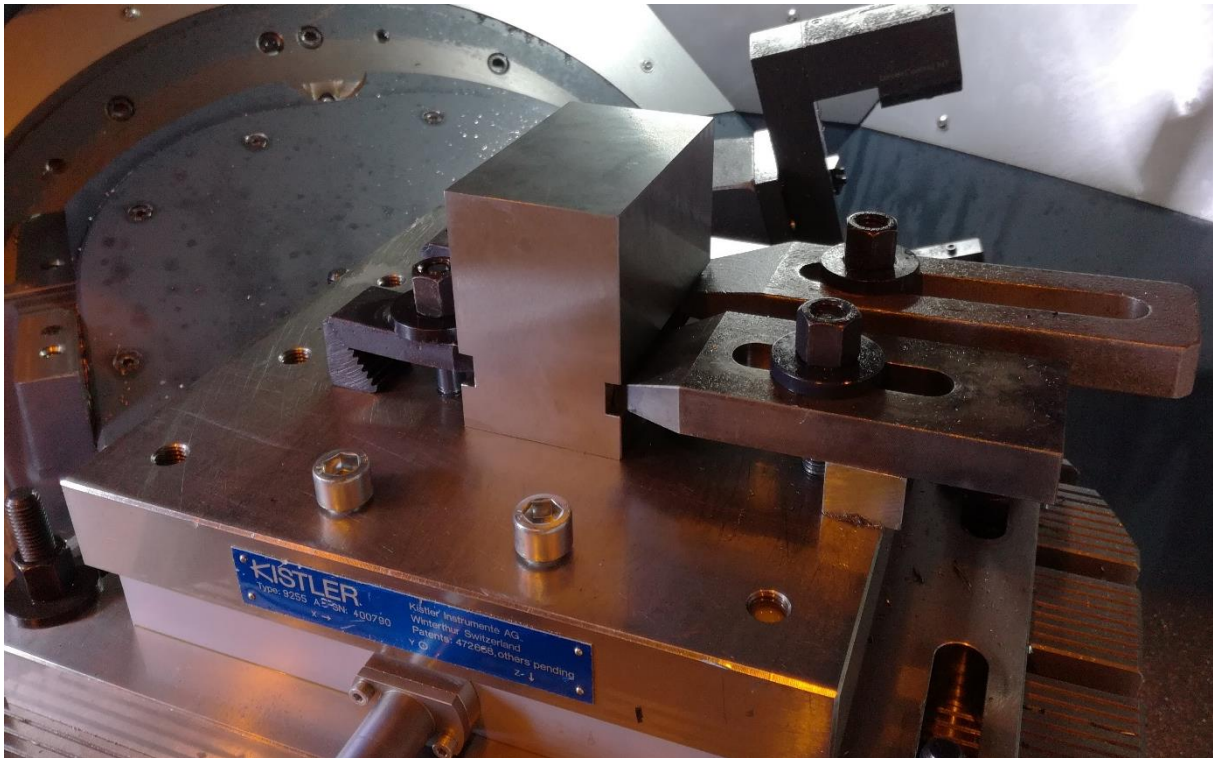
Před upnutím nástroje do stroje bude nutné zjištění jeho vyložení v kleštině. To bude realizováno na měřícím přístroji ZOLLER.

## 3.3 Realizace experimentu

Experiment byl realizován v institutu RTI, jenž je součástí fakulty na ZČU v Plzni.

Nejprve bylo nutné připevnit dynamometr na pracovní stůl stroje a následně jej vyrovnat. Uchycení bylo provedeno pomocí čtyř šroubů. Dále se k dynamometru připevnil kabel k přenosu signálu vedoucí k sestavě pro měření řezných sil. Tato příprava byla provedena pouze jednou, protože všech 12 ploch bylo obrobena bez nutnosti vyjmutí dynamometru, což by mělo eliminovat negativní vliv z opětovného nastavení. Poté se pomocí upínek připevnil broušený polotovar.

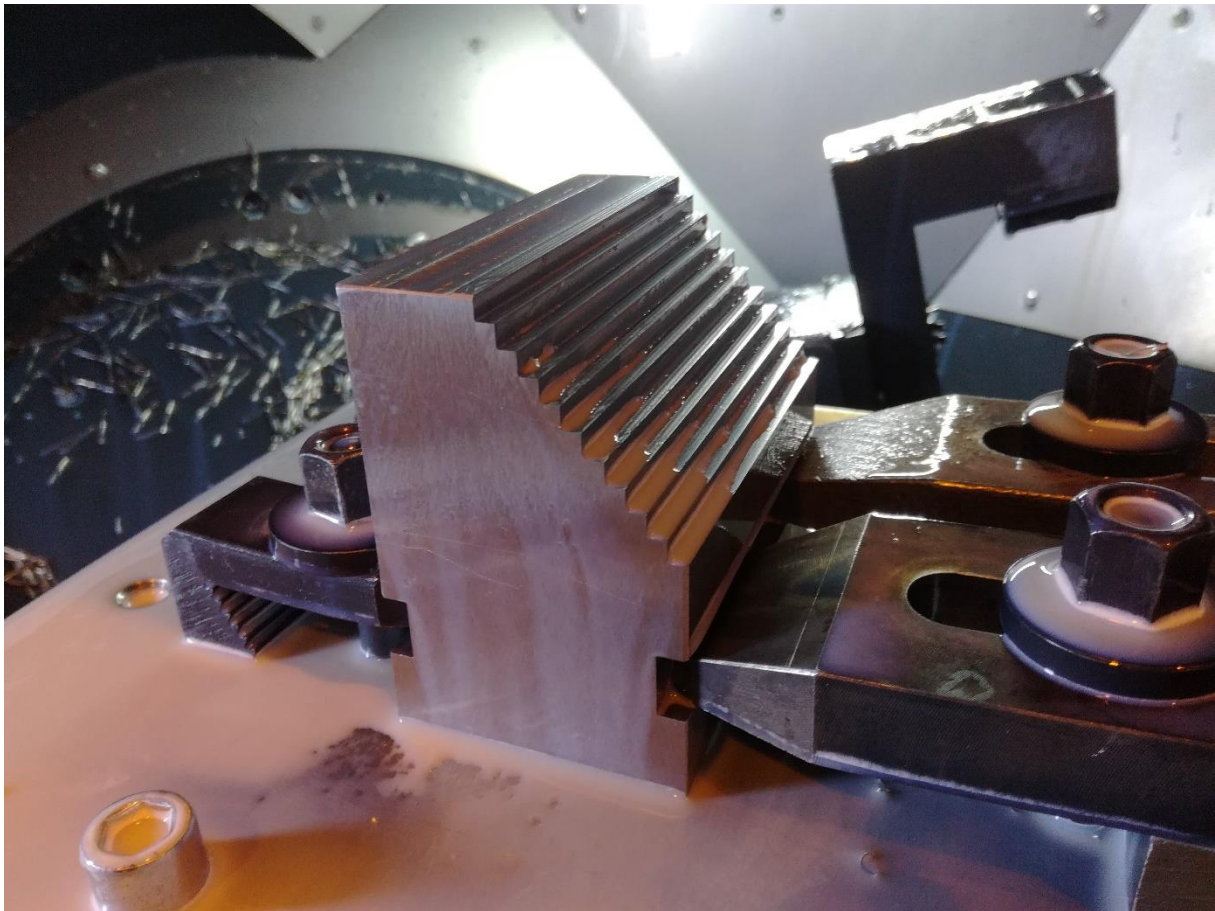
Testování bylo provedeno vzestupně dle úhlu sklonu šikmé plochy, přičemž strategie A a B byli střídány.



Obrázek 19 - Upevnění dynamometru a polotovaru

### 3.3.1 Hrubování a předdokončení

Dle sklonu plochy a použité strategie se do řídicího systému stroje nahrál příslušný program vytvořený v CAM systému SOLIDCAM. Pomocí dotykové sondy s dotykem kulového tvaru byl určen nulový bod polotovaru. Nejdříve tedy probíhalo hrubování monolitní čelní válcovou frézou o průměru 16 mm. Z důvodu produktivity obrábění bylo nasazeno frézování bokem nástroje. Po vyhrubování následoval proces předdokončení. Toho bylo docíleno natočením stolu a použitím čelní frézy o průměru 50mm s vyměnitelnými břitovými destičkami. Proto bylo docíleno konstantního přídávku na dokončení, což je podstatné, aby nedocházelo vlivem nekonstantního přídávku k ovlivnění měření řezných sil. Při hrubování a předdokončování docházelo k intenzivnímu chlazení, aby bylo možné použít vyšší řezné podmínky a k zajištění delší trvanlivosti nástrojů vzhledem k tomu, že budou použity na všech polotovarech. Na obrázku 17 lze vidět obrobek se sklonem plochy 50° po vyhrubování.



Obrázek 20 - Obrobek po vyhrubování (sklon plochy  $\alpha=50^\circ$ )

### 3.3.2 Dokončování a záznam sil

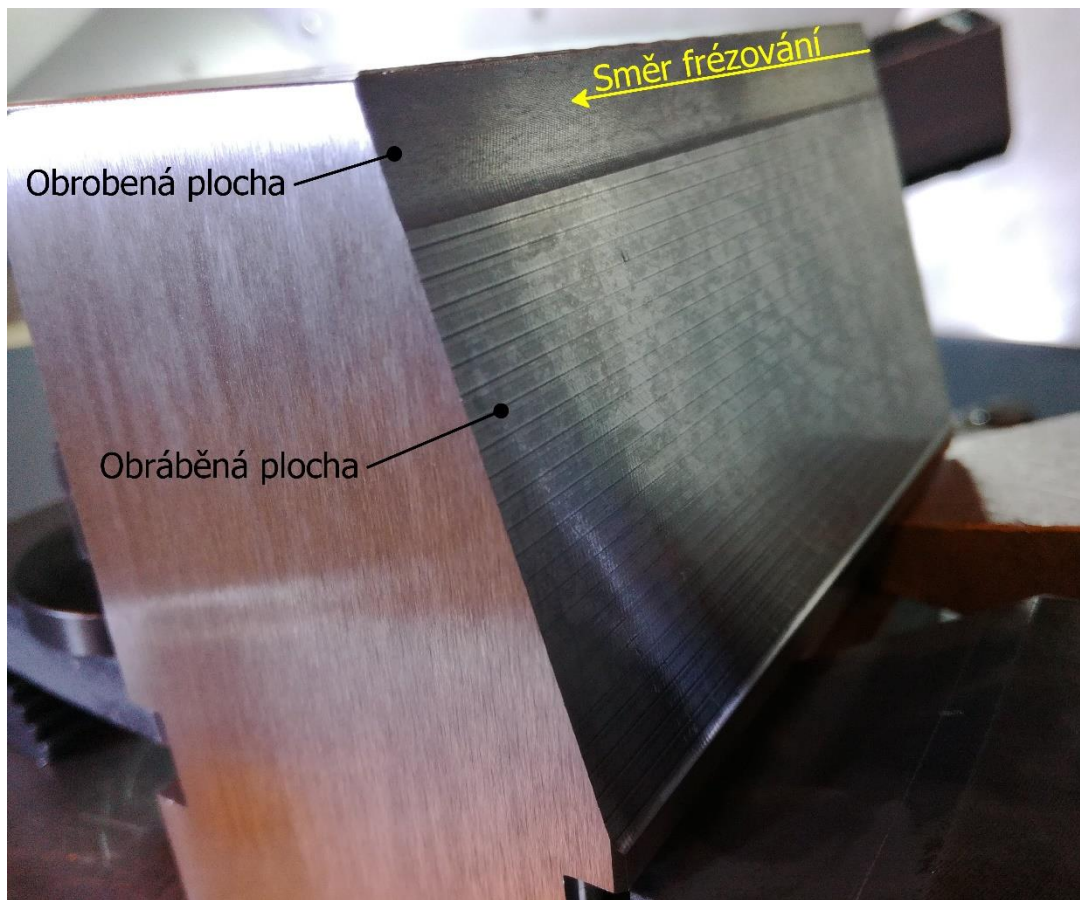
Obdobně jako u předchozích operací, byl nejprve importován program. Nyní se však jedná o program, jehož dráhy byly naprogramovány „ručně“. Dokončování bylo provedeno jedním nástrojem, jímž byla fréza s kulovým čelem o průměru 16 mm. Jak bylo již zmíněno, každou řeznou rychlostí byla obráběna plocha o délce 8,5 mm. Frézování probíhalo sousledně, přičemž posuv nástroje probíhal zprava doleva, a přísuv shora dolů viz popis v teoretické části práce v sekci 2.4.2.2, typ pohybu číslo 6.

Jednotlivé požadované složky řezných sil jsou  $F_x$ ,  $F_y$ , a  $F_z$ . Rozsah velikosti řezných sil byl stanoven dle zkušebního záznamu prvních obráběných drah a byl stanoven na 200 N. Dále byl dle posuvové rychlosti spočten čas jednoho přejezdu pro stanovení délky záznamu. Tento čas musel být stanoven pro každou  $v_c$  a následně sečten tak, aby bylo zaznamenáno minimálně 8 přejezdů. Měření sil bylo vždy zapnuto čtyři dráhy před změnou  $v_c$  a ukončeno nejméně čtyři dráhy po této změně. Tím je zajištěn záznam sil všech sedmi testovaných řezných rychlostí a zároveň záznam jednotlivých přechodů změn  $v_c$ . Zajištění správného měření bylo docíleno nastavením NC programu, v němž byly umístěny příkazy M30 (Konec programu) právě čtyři dráhy před změnou řezné rychlosti.

Dokončování probíhalo bezproblémově. Komplikace nastala při obrábění šikmé plochy se sklonem  $75^\circ$ . Při dokončování posledního úseku dané plochy muselo být frézování ukončeno dříve, jelikož by došlo ke kolizi nástroje s upínkami, jež drželi obrobek. K dokončení



posledního úseku chybělo cca 4mm. Avšak tento nedostatek by neměl mít dopad na další postup práce, tedy náměr a vyhodnocení dat, jelikož podstatná data lze získat z přechodu mezi jednotlivými plochami.



Obrázek 21 - Částečně dokončený obrobek (sklon šikmé plochy  $\alpha=75^\circ$ )

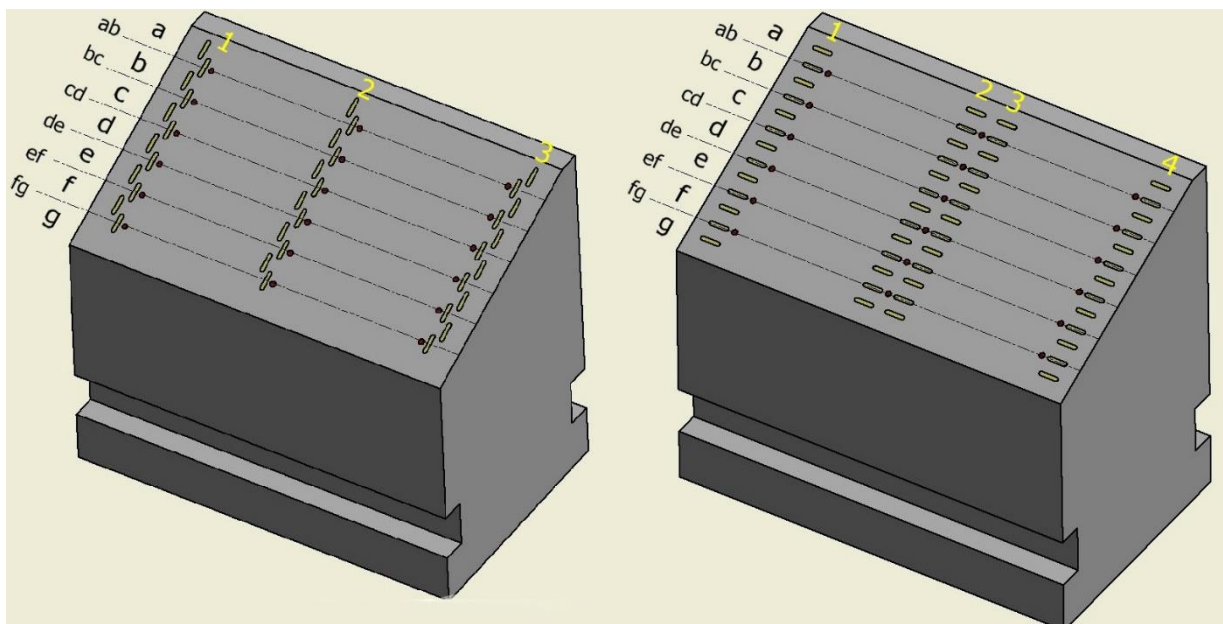
### 3.4 Získávání dat

Dalším krokem bylo získání potřebných dat pro vyhodnocení vlivu  $v_c$  a zjištění přesnosti jednotlivých metod. Nejprve byly měřeny parametry drsnosti povrchu a následně byly vzorky změřeny na 3D souřadnicovém měřicím přístroji, kde se zjišťovala přesnost obrobení.

#### 3.4.1 Měření parametrů drsnosti

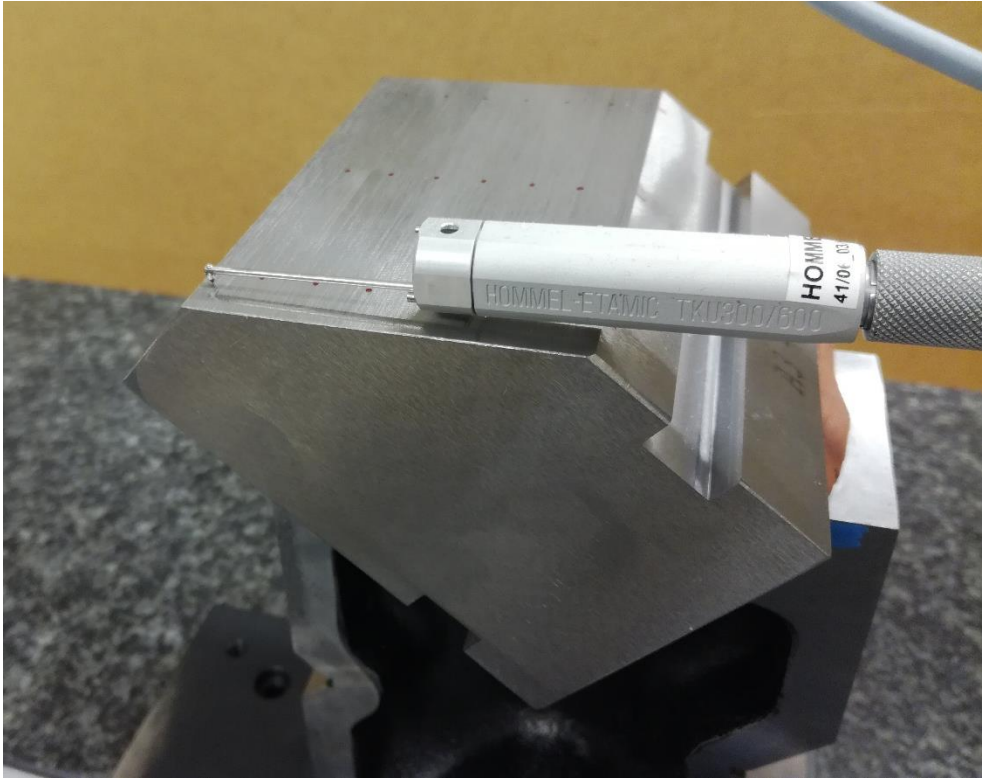
Metodika měření a volba podmínek pro měření byla stanovena dle norem ISO 4288:1998 a ISO 3274:1998. Jelikož frézovaný profil je periodický, bylo nastavení provedeno dle střední vzdálenosti rýh elementů drsnosti  $R_{sm}$ . Filtr měření byl zvolen Gaussův dle ČSN ISO 16610-21. Parametry drsnosti byly měřeny ve směru kolmém na směr obrábění a také ve směru vodorovném se směrem jednotlivých drah. Pro měření v kolmém směru se hodnota  $R_{sm}$  pohybovala kolem hodnoty 0,06 mm a tak byla mezní vlnová délka nastavena na hodnotu  $\lambda_c=0,25$  mm. Pro náměry v druhém směru se hodnota  $R_{sm}$  pohybovala kolem hodnoty 0,2 mm a tak bylo nastaveno  $\lambda_c=0,8$ .

Jelikož je na každém vzorku (obrobené šikmé ploše) sedm dílčích ploch rozdělených jednotlivými řeznými rychlostmi, byly provedeny náměry v jednotlivých plochách, ale také ve všech šesti přechodech. Každá plocha a přechod byli měřeny na třech místech ve směru kolmém a na čtyřech ve směru vodorovném. K orientaci na ploše sloužila předem vytvořená síť bodů, v jejichž blízkosti byly náměry provedeny. Body byly umístěny v přechodu mezi použitými rychlostmi 10mm od bočních hran a také v polovině plochy vzorku, tedy 50 mm od boční hrany. Rozložení náměrů se značením je zobrazeno na obrázku níže. Jeden vzorek čítal 91 náměrů vyjma vzorků se sklonem plochy  $75^\circ$ , protože poslední plocha obráběna rychlostí  $250 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$  nebyla obrobena celá, a z toho důvodu nebylo možné samotnou plochu změřit. Ovšem přechod z předchozí plochy změřen byl, což by mělo poskytnout dostatečné informace. Vzorky s tímto sklonem mají tedy o 3 kolmé a 4 rovnoběžné měření méně a celkem čítají 84 náměrů.



Obrázek 22 - Rozložení bodů a náměrů se značením ploch a přechodů

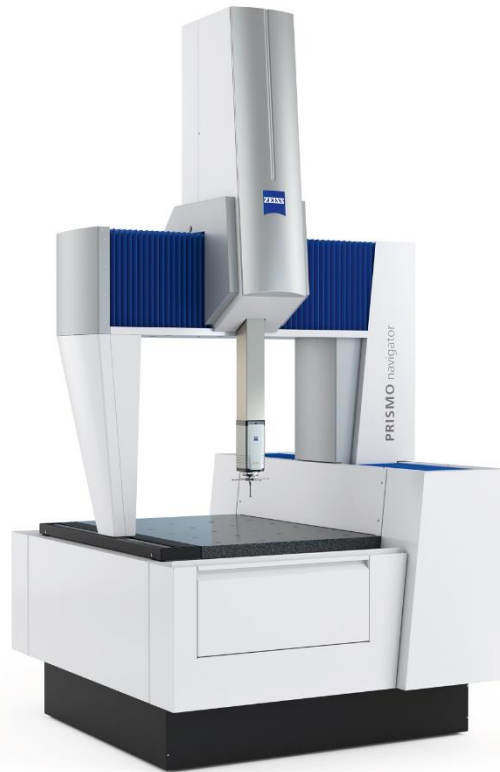
Parametry byly měřeny na profiloměru/drsnoměru HOMMEL ETAMIC T8000, jenž je umístěn v metrologické laboratoři na ZČU v Plzni. Hodnoty drsností byly měřeny diamantovým hrotem s radiusem špičky  $0,2 \mu\text{m}$ . Délka dráhy vykonané hrotem při měření byla vždy 4,8 mm. Data byla označena a uložena v textových souborech, jenž budou sloužit pro následné vyhodnocení.



Obrázek 23 - Ukázka měření parametrů drsnosti v kolmém směru

### 3.4.2 Měření rozměrové přesnosti

Přesnost obrobené plochy byla měřena na 3D souřadnicovém měřicím stroji CMM Carl Zeiss Prismo 7 Navigator. Tento měřicí přístroj je umístěn v laboratoři dílenské metrologie na ZČU v Plzni. K měření byla použita metoda odstupu bodů od modelu. To znamená, že byly vytvořeny teoretické ideální plochy (modely) jednotlivých sklonů obrobených vzorků. K těmto modelům ploch byly vztaženy jednotlivé body změřené na reálných vzorcích. Měření probíhalo dle pomocné sítě bodů na kontrolovaných plochách, přičemž tato síť byla použita též při měření parametrů drsnosti. Náměry byly provedeny vždy dva nad vyznačeným bodem a dva pod, tedy po přechodu rychlostí. Vzdálenost mezi náměry je 0,75mm. Měření proběhlo ve třech řezech a každý vzorek tedy čítal 72 změřených bodů.



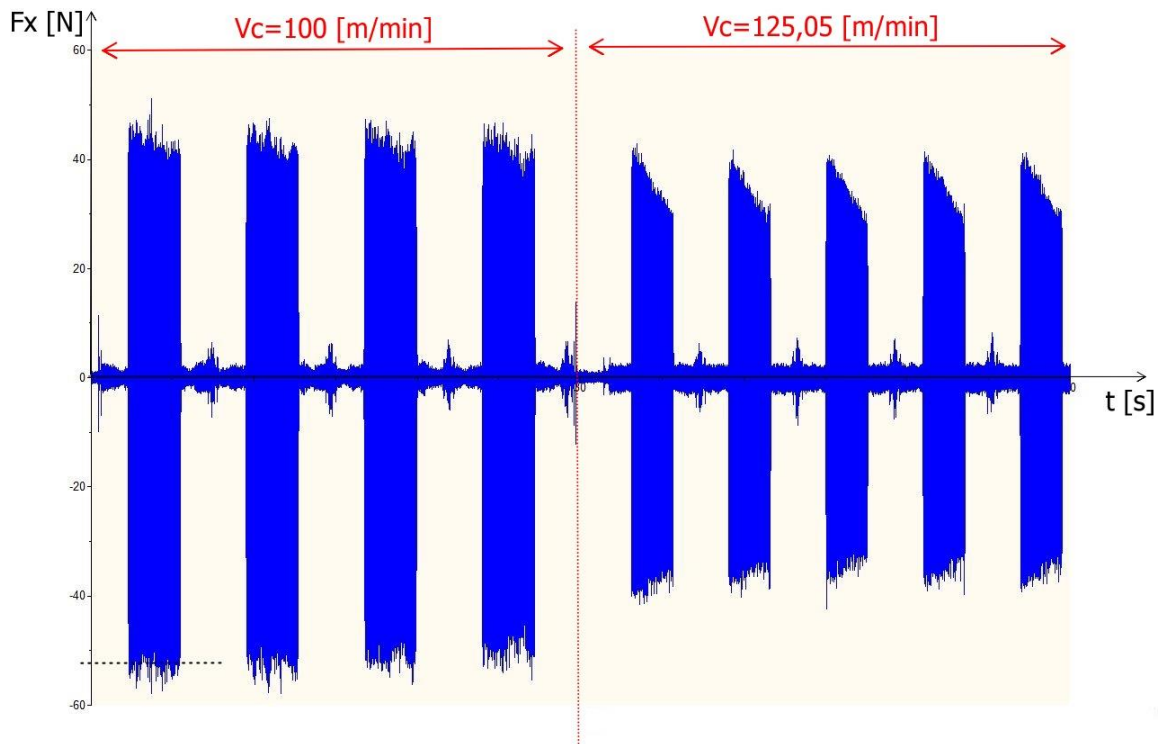
Obrázek 24-Měřicí přístroj CMM Carl Zeiss Prismo 7 Navigator [22]

## 4 Technologické hodnocení

V této kapitole bude provedeno zhodnocení naměřených výsledků ze tří hledisek. Dojde k posouzení vlivu změny konstantní řezné rychlosti na složky řezných sil, kvalitu povrchu a na přesnost dokončené plochy. Vliv konstantní  $v_c$  bude v každém z hledisek porovnán pro obě testované strategie a také pro jednotlivé sklony šikmých ploch. Polotovary byly označeny dle strategie, sklonu plochy a dle pořadí provedení. Například A\_Skl\_25a znamená, že byl vzorek obroben strategií A, sklon plochy je  $25^\circ$  a označení „a“ znamená opakovaný pokus.

### 4.1 Z hlediska řezných sil

Výstupem z měření dynamometrem je grafická závislost sil na čase obrábění. Záznam sil probíhal vždy 4 dráhy před změnou. Dále proběhlo zpracování pomocí Matlabu. V tomto SW byly řezné síly zpracovány na hodnotu, která odpovídá cca 90% maxim. Díky tomu se eliminovaly špičky záznamu. Tyto hodnoty byly následně předmětem technologického hodnocení. Níže je pro představu uveden záznam řezné síly  $F_x$ , v němž je symbolicky nastíněno proložení největších hodnot střední přímkou u první dráhy. Tento náměr byl proveden na šikmé ploše se sklonem  $\alpha=25^\circ$  při přechodu z  $v_c=100$  na  $v_c=125$ .



Graf 4-Záznam řezné síly  $F_x$  (sklon plochy  $\alpha=25^\circ$ ; přechod z  $v_c=100$  na  $v_c=125,05$ )

Z grafu je patrné, že mezi jednotlivými dráhami, při kterých docházelo k obrábění, jsou přejezdy z jednoho řezu do následujícího. V těchto částech k obrábění nedocházelo, avšak určitá velikost sil zde naměřena byla. To je způsobeno vibracemi stroje a byl to jeden z důvodů rozdělení drah do jednotlivých segmentů, aby nedocházelo k ovlivnění hodnot. Po prvních čtyřech drahách je v místě nájezdu na další dráhu vidět jistá špička o velikosti 15N, jenž je způsobena změnou otáček stroje.

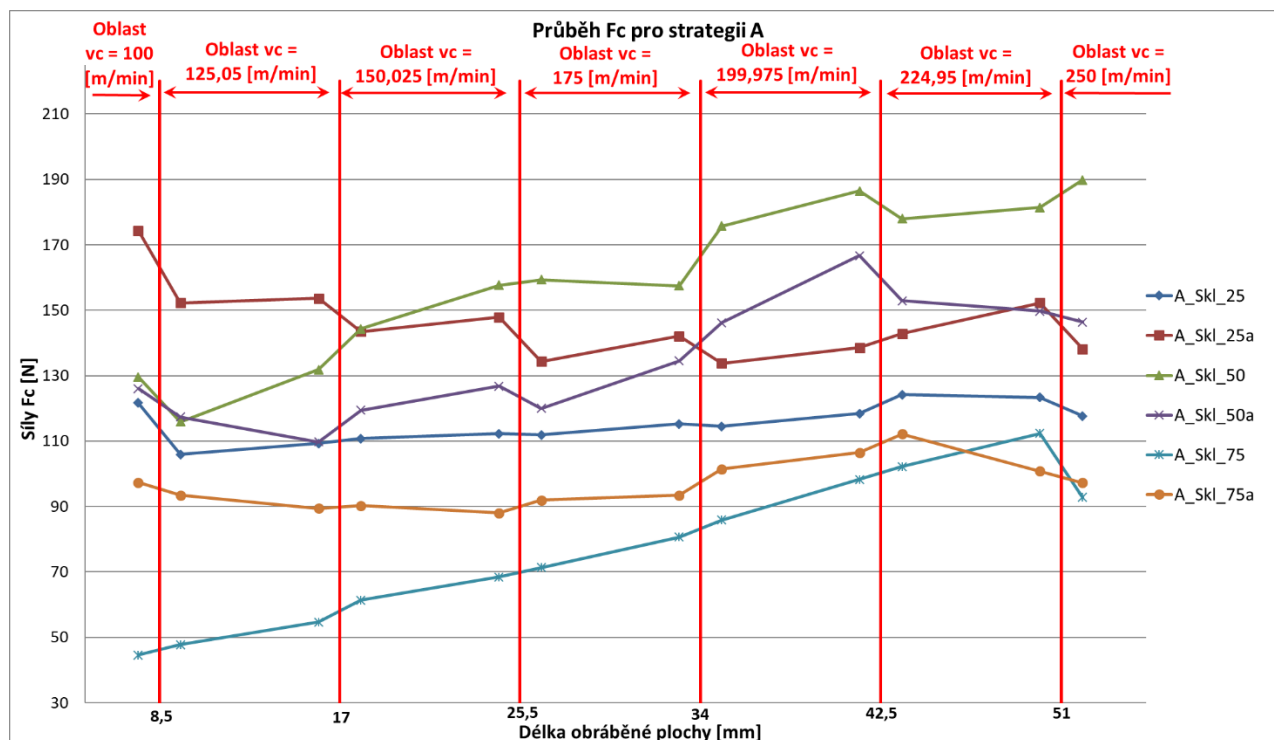
Celkem bylo provedeno 72 záznamů, jenž byly zpracovány dle popisu výše. Z jednotlivých složek sil byly nejprve vypočteny síly  $F_{xy}$  dle vektorového součtu, které se zaznamenaly do tabulky. Tato síla udává odtlačení nástroje od obrobku. Dále byla spočtena celková řezná síla  $F_c$  podle vzorce:

$$F_c = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2}$$

Následně byly pro každou sadu náměrů vypočteny aritmetické průměry sloužící pro následné grafické zpracování. Použití aritmetického průměru bylo umožněno z důvodu velmi podobných dat pro jednotlivé dráhy spojené s hodnotou  $v_c$ . Hodnoty sil byly zapsány do tabulek. Níže jsou zobrazeny tabulky využitě pro použité grafy, ostatní tabulky byly vloženy do příloh. Vytvořené grafy zobrazují závislost řezných sil  $F_{xy}$  a  $F_c$  na délce obrobek plochy. Jelikož jednotlivým délkám dokončovaných ploch jsou přiřazeny konstantní řezné rychlosti, lze dle grafů vyvodit závěry pro zhodnocení vlivu  $v_c$  na řezné síly. Ostatní grafy jsou také součástí přílohy.

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

Tabulka 2-Průměry naměřených sil  $F_c$ , seřazeny podle vzorků strategie A a užitých rychlostí



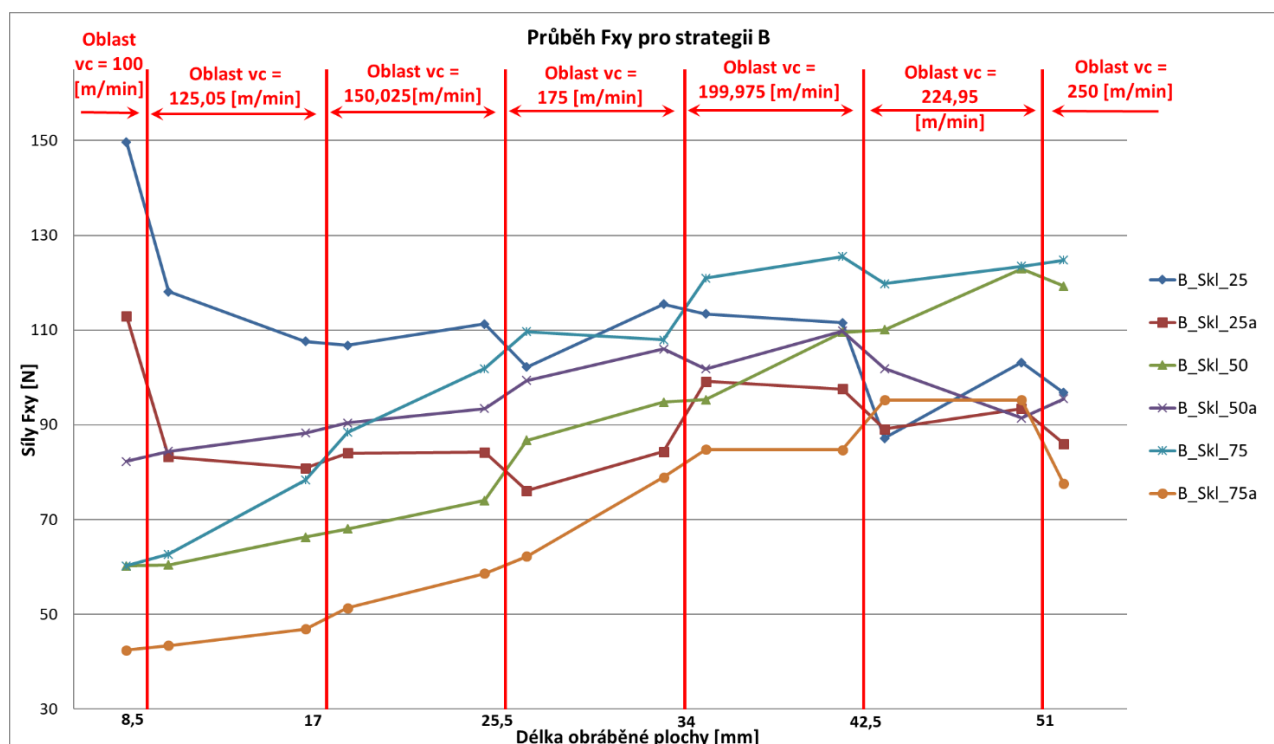
Graf 5-Závislost  $F_c$  na délce obroběné plochy (strategie A)

Graf znázorňuje průběh sil  $F_c$  pro strategii A, avšak charakter průběhu pro síly  $F_{xy}$  stejné strategie je velmi podobný a proto je zobrazen pouze jeden. Vzorky se sklonem  $\alpha=25^\circ$  dosahují vysokých hodnot řezných sil při použití nejnižší řezné rychlosti a na dalších plochách již  $F_{xy}$  a  $F_c$  pouze kolísá v celkovém rozmezí do 15N a nejeví známky ovlivnění velikostí  $v_c$ . Toto "narovnání sil" může být způsobeno malým efektivním průměrem nástroje a tedy vysokými otáčkami stroje. Vzorky se sklonem plochy  $50^\circ$  vykazují růst řezných sil (vyjma oblastí s rychlostí 100m/min, jenž evidentně není rychlost, jenž by za daných podmínek měla být užitá) a celkem vykazují rozdíl na ploše až 50N pro  $F_{xy}$  a 70N pro  $F_c$ .

Řezné síly u vzorku se sklonem 75°, jsou celkově nižší a jejich průběh se téměř lineárně zvyšuje vlivem zvýšení řezné rychlosti. Lze tedy konstatovat, že průběh sil u strategie A je evidentně nejvíce ovlivněn sklonem obrobeneé plochy. Vliv velikosti řezné rychlosti na  $F_{xy}$  a  $F_c$  je také patrný a velikost sil s rostoucí  $v_c$  spíše roste a to až do  $v_c = 224,95$ , ale pouze ve spojení s daným sklonem. Nelze tedy zcela objektivně definovat samotný vliv řezné rychlosti.

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

Tabulka 3- Průměry naměřených sil  $F_{xy}$ , seřazeny podle vzorků strategie B a užitých rychlostí



Graf 6-Závislost  $F_c$  na délce obrobeneé plochy (strategie B)

Strategie B má obdobné výsledky řezných sil  $F_{xy}$  jako strategie A. Vzorky se sklonem 20 stupnu mají nejvyšší hodnoty sil pro první užitou rychlost 100m/min a při rychlosti 125,05m/min klesne a další vliv  $v_c$  není zcela patrný. U ostatních sklonů dochází k jistému nárůstu sil vlivem zvýšení  $v_c$ . Sklon plochy zde evidentně ovlivňuje "startovací" hodnoty.

Řezná síla  $F_c$  je u vzorku B\_Skl\_25 (graf je součástí přílohy) patrně ovlivněna otupením nástroje, jenž byl na tento vzorek použit. Bude-li tento vzorek pomínut, charakter ostatních křivek jednotlivých vzorků vykazuje takřka lineární růst  $F_c$  se zvyšující se řeznou rychlostí. Avšak opět je velikost  $F_c$  ovlivněna sklonem plochy a to výrazně. Rozdíl mezi vzorky se sklonem 25 a 75 je průměrně cca 100N.

Vliv strategie není zcela patrný, ačkoli v souvislosti se sklonem ploch dochází u strategie A k výraznému převýšení sil  $F_c$  i  $F_{xy}$  sklonu 20 sklonem 50. Toto převýšení není u strategie B tak velké.

Závěrem je, že jistý vliv řezné rychlosti na  $F_{xy}$  a  $F_c$  patrný je, a to takový, že s rostoucí  $v_c$  rostou také síly, ale daleko větší vliv má sklon plochy, případně ve spojení s použitou strategií.

## 4.2 Z hlediska jakosti povrchu

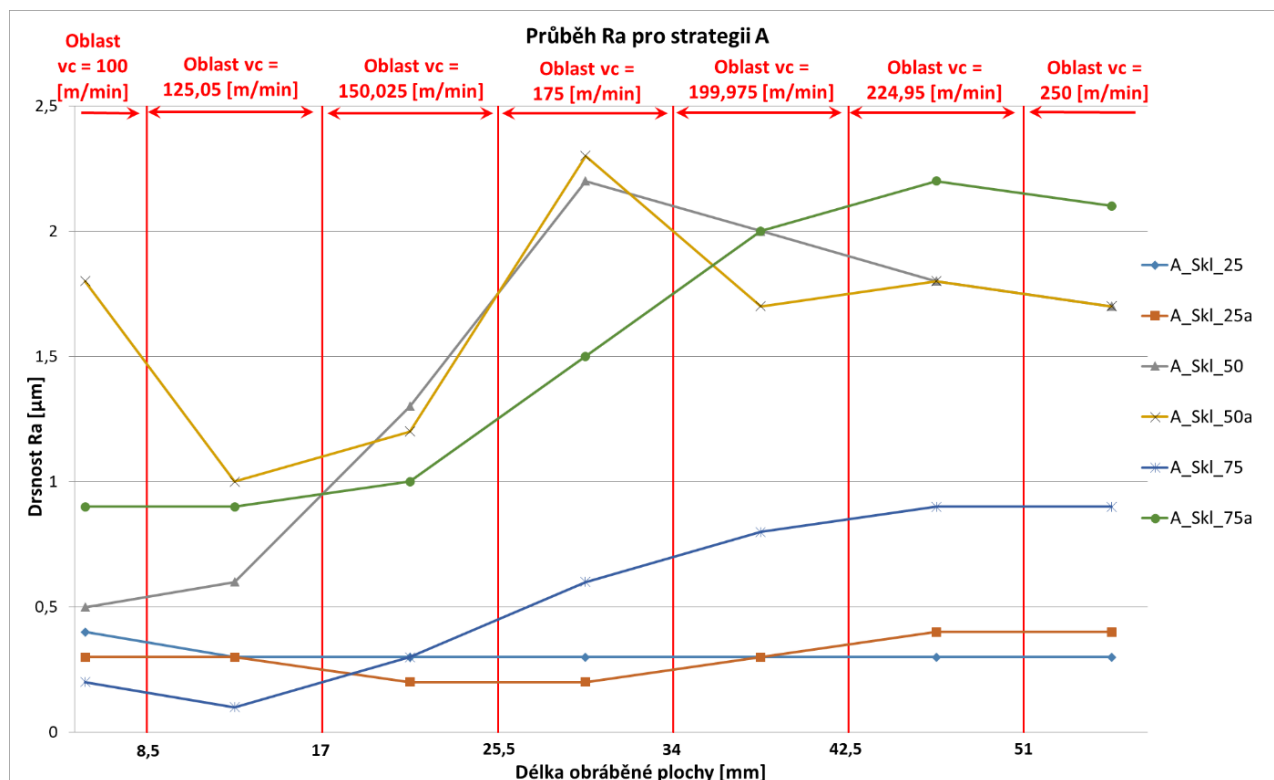
Jelikož je zkoumaný povrch periodický, byla kvalita hodnocena na základě dvou parametrů drsnosti povrchu. Těmito parametry je střední aritmetická úchylka profilu  $R_a$  a výška nerovnosti profilu určená z deseti bodů  $R_z$ . Celkový počet náměrů na jednom vzorku byl 49 kolmých na směr obrábění (svislých) a 52 rovnoběžných na směr obrábění (vodorovných) vyjma obrobků se sklonem  $75^\circ$  viz odstavec 3.3.1.

Naměřené hodnoty daných parametrů byly exportovány v textovém souboru a následně přeneseny do programu EXCEL, ve kterém byli vytvořeny tabulky a grafy sloužící ke zhodnocení. Vodorovné náměry neměly dostatečnou vypovídací schopnost, a tak byly hodnoceny pouze náměry ve směru kolmém na směr obrábění. Dále se vyfiltrovaly maximální hodnoty náměrů jednotlivých parametrů, z nichž byly vytvořeny grafy, jenž znázorňují závislost parametrů drsnosti povrchu  $R_a$  a  $R_z$  na délce obrobkové plochy. Pro obě strategie A a B byly grafy zhotoveny zvlášť. Obdobně jako u grafů řezných sil lze dle délky plochy stanovit použité řezné rychlosti. Hodnoty maximálních drsností jsou zobrazeny v následujících tabulkách.

Strategie A	A_Skl_25		A_Skl_25a		A_Skl_50		A_Skl_50a		A_Skl_75		A_Skl_75a	
$v_c$ [m/min]	$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_z$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_z$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_z$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_z$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_z$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_z$ [ $\mu\text{m}$ ]
100	0,4	3,4	0,3	2,4	0,5	5	1,8	9,1	0,2	1,9	0,9	4,8
125,05	0,3	2,8	0,3	2,3	0,6	5,2	1	8,6	0,1	1,6	0,9	4,9
150,025	0,3	2,3	0,2	2,6	1,3	9,2	1,2	9,4	0,3	2,4	1	6,1
175	0,3	2,2	0,2	2,2	2,2	12,9	2,3	14,4	0,6	3,7	1,5	8
199,975	0,3	2,5	0,3	2,6	2	12,4	1,7	12,8	0,8	3,9	2	9,6
224,95	0,3	2	0,4	3,8	1,8	13,3	1,8	11,2	0,9	5,4	2,2	11,3
250	0,3	2,2	0,4	4,6	1,7	9,8	1,7	11,4	0,9	6,3	2,1	10,8

Tabulka 4- Maximální hodnoty drsností  $R_a$  a  $R_z$ , seřazeny podle vzorků strategie A a užitých rychlostí



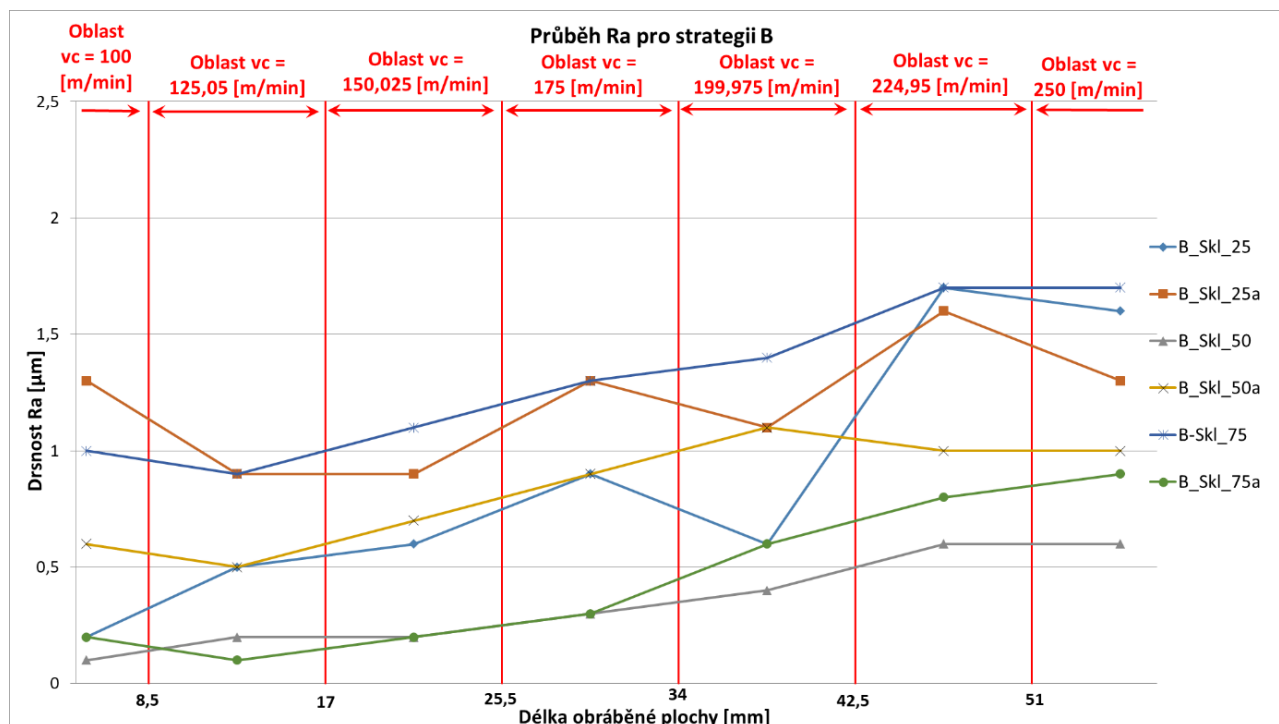


Graf 7-Závislost velikosti konstantní řezné rychlosti na parametru Ra pro strategii A

Z uvedeného grafu plyne, že u vzorku se sklonem 50° se jeví hranice přechodu mezi 150,025 a 175 m/min jako ovlivňující oproti předchozím rychlostem a to až dvojnásobně. Tento jev se však vyskytuje pouze u tohoto sklonu a u opakovaného měření vzorku se sklonem 75°, kde je ale přechod posunut na rozmezí 175 -199m/min. U sklonu 25 je průběh takřka lineární a neměnný. U strategie A je tedy patrné, že změna rychlosti ovlivňuje daný parametr drsnosti pouze v závislosti na sklonu obráběné plochy. Nelze tedy zcela objektivně zhodnotit pouze vliv  $v_c$ , jelikož charakter průběhu je evidentně více závislý na sklonu obráběné plochy.

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

Tabulka 5- Maximální hodnoty drsností Ra a Rz, seřazené podle vzorků strategie B a užitých rychlostí



Graf 8-Závislost velikosti konstantní řezné rychlosti na parametru Ra pro strategii B

Závislost průběhu drsnosti u strategie B je evidentně rovnoměrnější oproti strategii A, což je způsobeno právě použitým rozpočtem drah. Jednotlivé přímky se zde blíží lineárnímu charakteru, a lze konstatovat, že se zvyšující se  $v_c$  se zvětšuje parametr Ra a tudíž dochází ke zhoršení jakosti povrchu. Průměrné zvýšení je přibližně 0,1 - 0,2 mikronu na přechod. Celkově 0,7 mikronu na plochu. Sklon plochy má vliv daleko menší než u strategie A a následkem tohoto jevu jsou u strategie B výsledky porovnatelnější než u předchozí metody. Změny v opakovaných vzorcích jsou pravděpodobně způsobeny otupením nástroje. Rychlost 224,95 m/min se jeví jako hraniční, jelikož následující rychlostí se drsnost povrchu u jednotlivých vzorků takřka nezměnila, nelze ji však prohlásit za přelomovou, jelikož není zcela patrné, co by následovalo při dalším zvětšování  $v_c$ .

Průběh křivek v závislosti na parametru Rz byl u jednotlivých strategií velice podobný průběhu Ra (samozřejmě s rozdílnou škálou hodnot na ose Y), a tedy i závěry plynoucí z rozboru parametru Ra platí rovněž pro parametr Rz. Grafy závislosti  $v_c$  na Rz jsou dostupné v příloze.

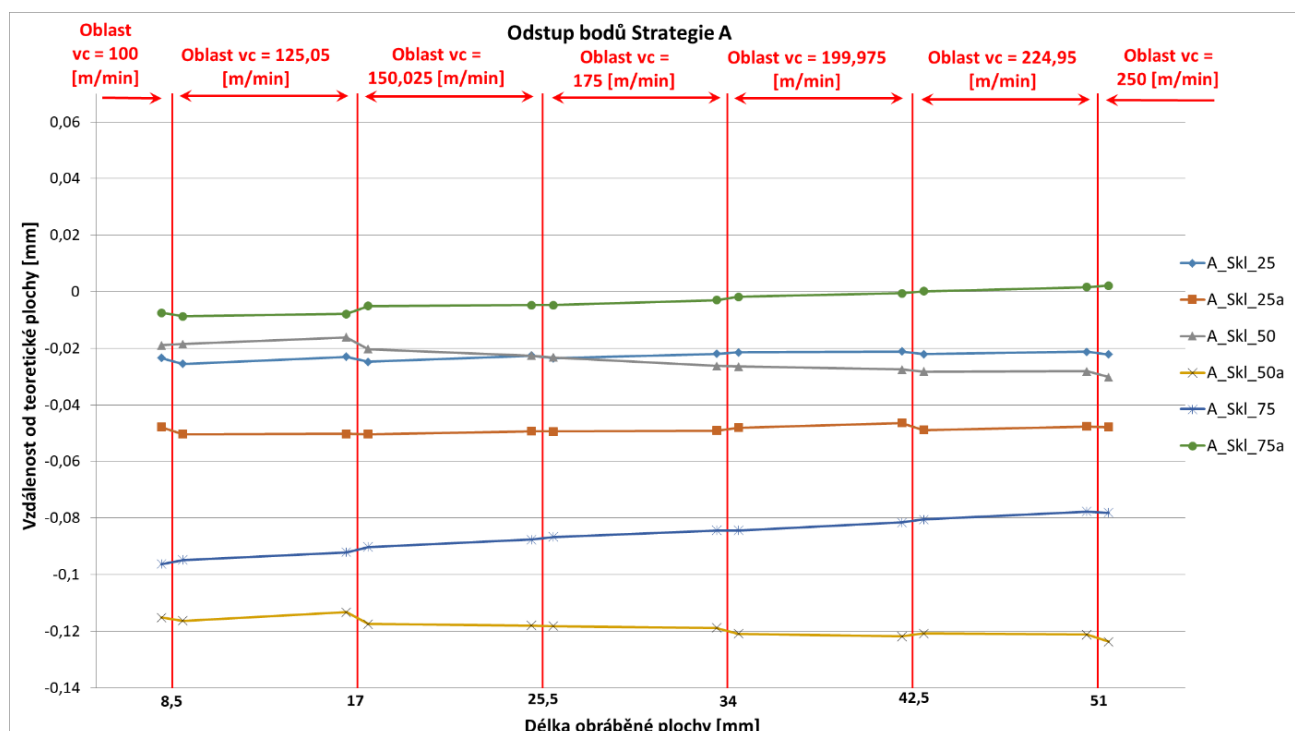
### 4.3 Z hlediska přesnosti dokončené plochy

Naměřené hodnoty byly nejprve exportovány a přeneseny do tabulek v programu EXCEL, ve kterém se dále pracovalo. Jelikož byly body dílčích ploch měřeny ve třech řezech, bylo nejprve nutné uspořádat data každého vzorku dle jednotlivých řezů. Následně byly dva blízké body na ploše jedné řezné rychlosti zprůměrovány, jelikož jejich rozdíl byl v řádech tisícín a následné hodnocení by obsahovalo velké množství bodů. Poté byly vytvořeny průměrné hodnoty v dílčích plochách jenž se obráběly jednou řeznou rychlostí, aby bylo možné jejich porovnání. Takto upravená data a jejich výsledné hodnocení je založeno na grafech jenž

zobrazují závislost vzdálenosti bodu od modelu na délce plochy. Grafické znázornění vychází z průměrných hodnot zobrazených v následujících tabulkách.

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

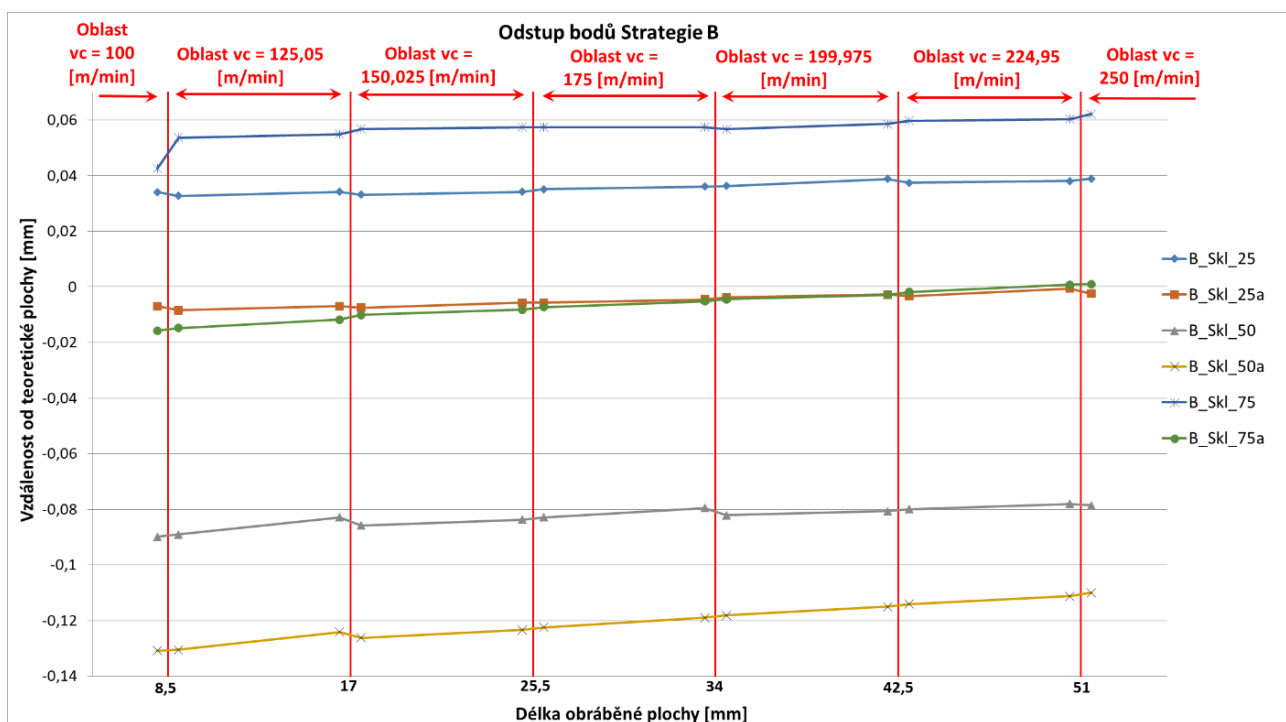
Tabulka 6-Průměrné hodnoty odstupů bodů od modelu u jednotlivých vzorků strategie A v závislosti na použité  $v_c$



Graf 9 –Odstup bodů od modelu – strategie A

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

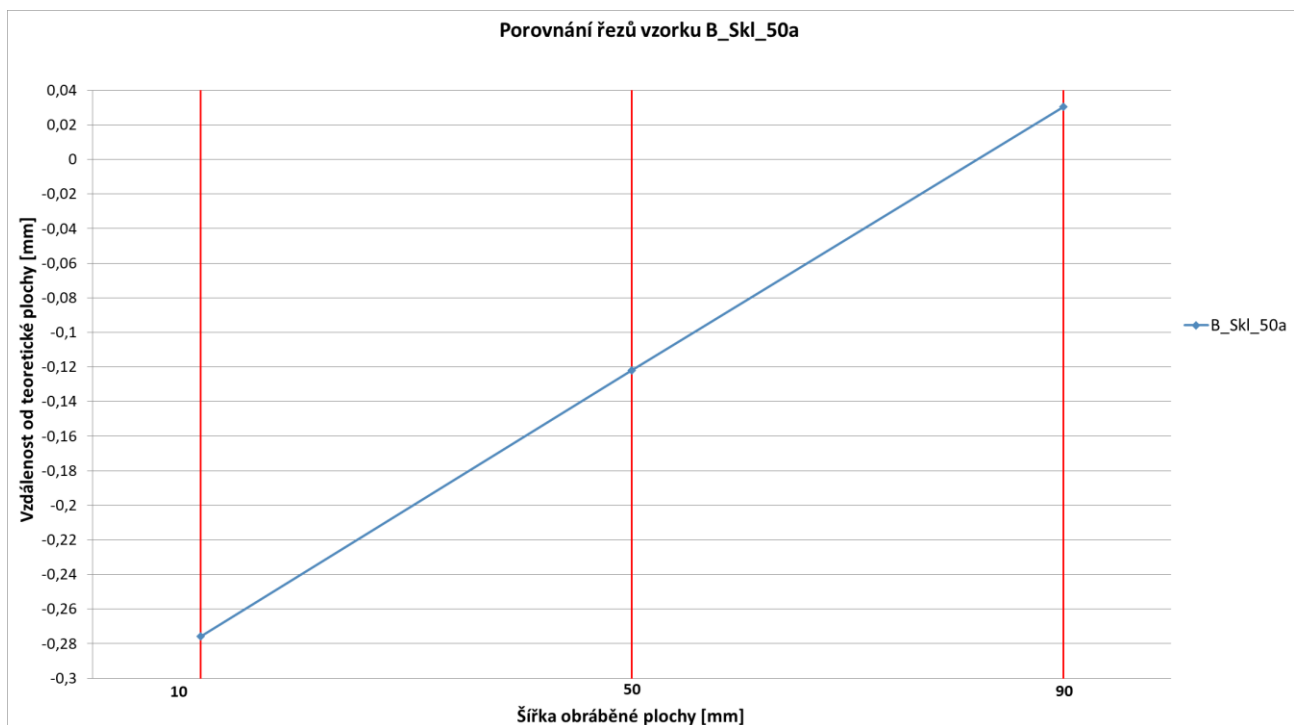
Tabulka 7-Průměrné hodnoty odstupe bodů od modelu u jednotlivých vzorků strategie B v závislosti na použité  $v_c$



Graf 10-Odstup bodů od modelu – strategie B

Průběh naměřených dat, jenž znázorňuje vzdálenost bodů naměřených na jednotlivých obrobcích od ideální plochy, je znázorněn v grafech výše. Vzorky se sklonem ploch  $25^\circ$  vykazují průměrně nejmenší odstup od modelu a také nejmenší rozptyl na ploše, jenž se pohybuje v řádech 0,001 mm. Oproti tomu vzorky se sklonem  $\alpha=50^\circ$  dosahují průměrného odstupe na ploše až 0,13mm a rozptyl hodnot na ploše je o řád vyšší než u sklonu  $25^\circ$ . Při porovnání strategií lze konstatovat, že strategie A vykazuje takřka výhradně záporné hodnoty

naměřených bodů, což znamená, že vzorky jsou ve skutečnosti menší, než by měly být. Strategie B vykazuje i kladné body, avšak absolutní hodnoty vzdáleností bodů obou strategií jsou podobné. Nelze tedy konstatovat, která z použitých strategií má větší vliv na přesnost, případně dosahuje lepších výsledků. Strategie A i B vykazují velice podobné výsledky a to rovněž pro zkoumané sklony. Z charakteru měřených bodů tedy vyplývá, že vliv velikosti konstantní řezné rychlosti na tvarovou přesnost dokončené plochy je minimální, takřka nulová a tuto závislost nelze určit. Daleko větší vliv má sklon obráběné plochy.



Graf 11 „Utíkající“ body na ploše s  $v_c=175\text{m/min}$

Ovšem byl zjištěn fakt, že s rostoucí šířkou plochy se snižuje vzdálenost naměřených bodů od modelové plochy. Tento jev je patrný při porovnání jednotlivých řezů. Toto vychýlení může být způsobeno nepřesností v ustavení obrobku vůči stroji. Největší rozdíl byl zaznamenán u vzorku se sklonem plochy 50 stupňů, u nějž se v počátku obrábění blížil odstup k hodnotě  $-0,28\text{mm}$  a na straně výjezdu ležely body ve vzdálenosti  $0,03\text{mm}$  od modelu. Tento vzorek s označením B\_Skl\_50a je opakované měření dané plochy a odstup v řezech je znázorněn v grafu č.8. Obrobení tohoto vzorku bylo provedeno se stejným nástrojem jako vzorek B\_Skl\_50 a odstup tedy může být umocněn opotřebením nástroje. Nicméně tento jev nemá vliv na předešlé hodnocení, jelikož se vykytoval u všech vzorků.

## 5 Statistické vyhodnocení

Na základě zvolených faktorů a zvoleného plánu včetně výpočtového modelu plánovaného experimentu bylo provedeno statistické vyhodnocení naměřených hodnot, jenž by mělo podpořit hodnocení technologické. Byla provedena analýza rozptylu (ANOVA), která umožňuje provádět vícenásobné porovnávání středních hodnot. To znamená, že zjišťuje vliv vstupů ( $v_c$ ,  $\alpha$ , strategie) na výstupy ( $R_y$ ,  $R_z$ , Odstup bodů,  $F_{xy}$ ,  $F_c$ ). Podmínky použití jsou

vhodné typy proměnných faktorů, ortogonalita plánu experimentu a normální (Gaussovo) rozdělení. Strategie je nominální parametr a  $v_c$  a  $\alpha$  jsou již přesně definovány a lze je prohlásit za parametr ordinální. Ortogonalita plánu byla zajištěna již v plánovacím procesu. Lze tedy přistoupit k samotnému testování. Analýza rozptylu pracuje na základě stanovených hypotéz na jejichž úsudku bude stanovena významnost jednotlivých parametrů. Nulová hypotéza  $H_0$  říká, že mezi testovanými soubory dat není žádný rozdíl a tedy nemají žádný vliv z pohledu statistiky. Alternativní hypotéza  $H_1$  popírá hypotézu nulovou, tedy říká, že alespoň jedna střední hodnota se liší od ostatních. Úkolem usouzení je rozhodnout, zda přijmeme nebo zamítneme určitou hypotézu. Druhým krokem je určení hladiny významnosti  $\alpha$  neboli chyby prvního druhu. Tato hodnota se volí a její hodnota připouští určitou procentuální chybu v testování. Pro technické obory se obvykle volí hodnota  $\alpha=5\%$  a proto byla také zvolena pro následující testy. Dále bylo vypočteno testovací kritérium F, jímž se spočetla kritická hladina významnosti P. Na základě srovnání zvolené a spočtené hladiny významnosti mohou nastat tyto varianty:

$$p < 0,05 \Rightarrow H_0 \text{ zamítneme} \\ H_1 \text{ přijmeme}$$

$$p \geq 0,05 \Rightarrow H_0 \text{ přijmeme} \\ H_1 \text{ zamítneme}$$

Pomocí této analýzy se zjistí, zda jsou dané faktory statisticky významné vzhledem k danému výstupu. Tímto způsobem byla testována výstupní data parametrů drsnosti a sil.

## 5.1 Hodnocení vlivu faktorů na síly $F_{xy}$ a $F_c$

Hodnocení bylo provedeno separátně pro síly  $F_{xy}$  a  $F_c$ . Nejprve byl hodnocen vliv parametrů na velikost síly  $F_c$ . Vypočtená hladina významnosti byla stanovena na hodnotu  $p=0,998\%$  (tabulka níže).

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

Tabulka 8-Významnost faktorů na  $F_c$  dle metody ANOVA

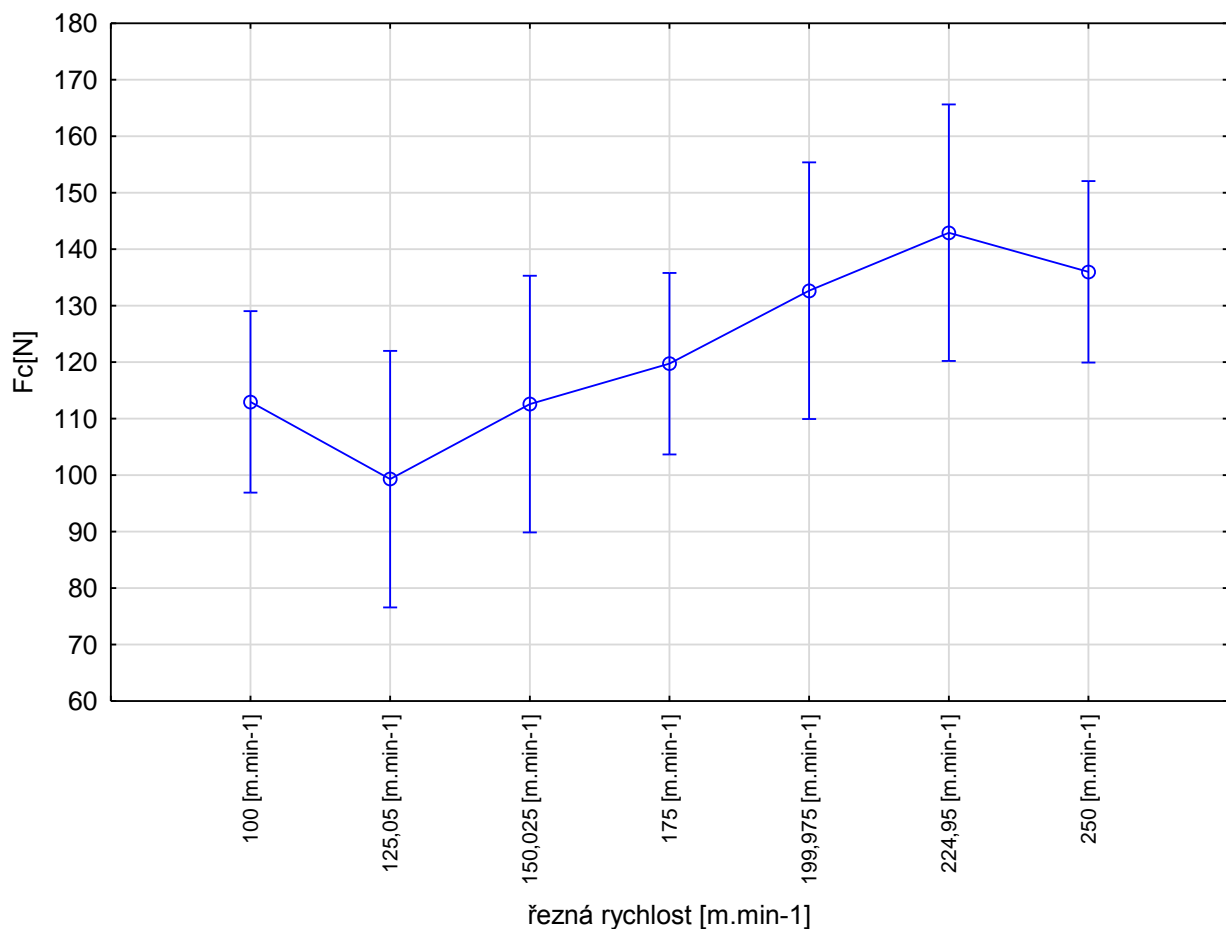
Při porovnání spočtené hladiny významnosti s hladinou zvolenou vyjde, že  $p < \alpha$ . Na tomto základě lze přijmout alternativní hypotézu. Z analýzy tedy plyne, že vliv některých parametrů je z hlediska statistiky významný. V následující tabulce jsou zvýrazněny významné parametry.

Effect	Univariate Tests of Significance for Fc[N] (ANOVA.sta) Sigma-restricted parameterization Effective hypothesis decomposition				
	SS	Degr. of Freedom	MS	F	p
Intercept	799683,4	1	799683,4	1140,387	0,000000

řezná rychlost [m.min-1]	10311,3	6	1718,5	2,451	0,065548
sklon [°]	33253,8	2	16626,9	23,711	0,000009
strategie	992,0	1	992,0	1,415	0,249746
řezná rychlost [m.min-1]*sklon [°]	9563,5	12	797,0	1,137	0,391619
řezná rychlost [m.min-1]*strategie	739,6	6	123,3	0,176	0,979994
sklon [°]*strategie	17707,2	2	8853,6	12,626	0,000375
řezná rychlost [m.min-1]*sklon [°]*strategie	2757,9	12	229,8	0,328	0,973187
Error	12622,3	18	701,2		

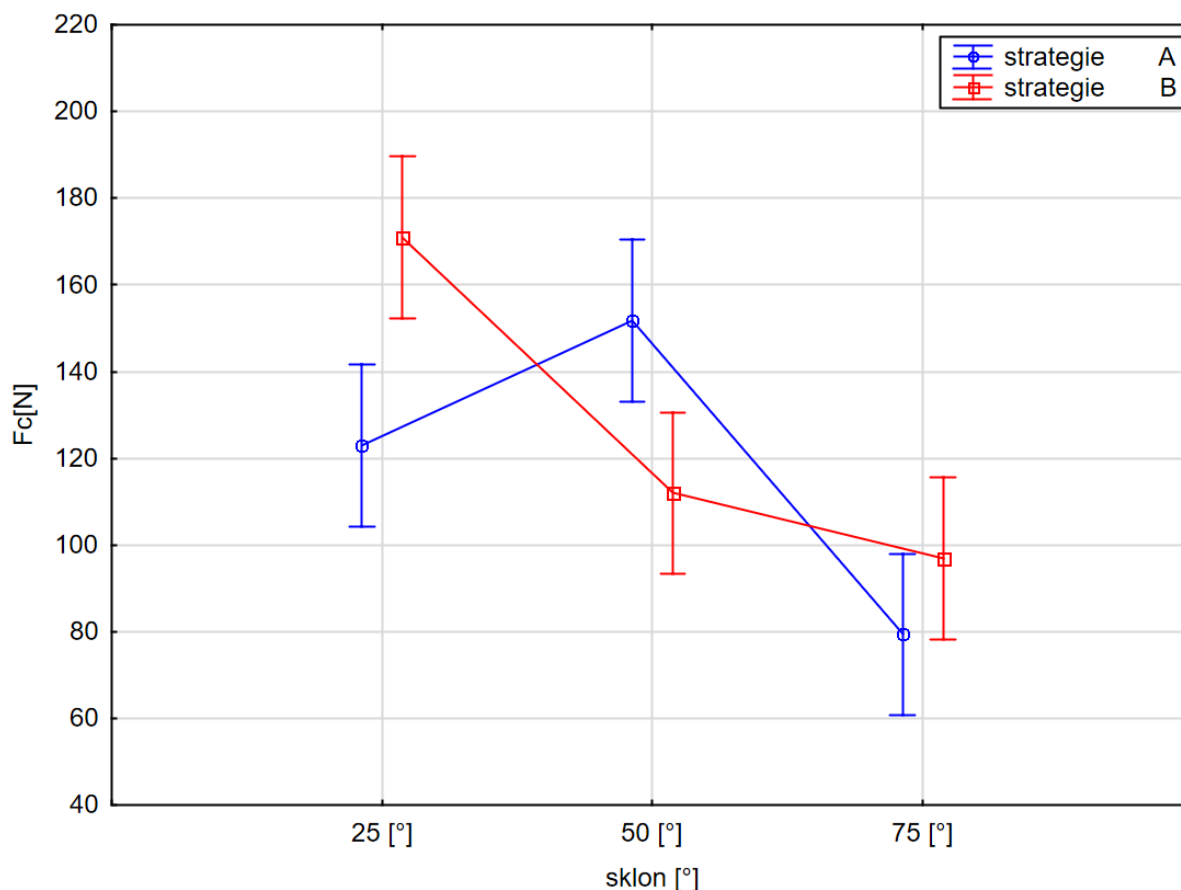
Tabulka 9-Významné faktory ovlivňující  $F_c$

Z tabulky je patrné, že vliv mají „zanedbané“, neboli spíše konstantní faktory, jako je například obráběný materiál,  $f_z$ ,  $a_p$ ,  $a_e$ , nástroj, apod. To je ovšem nevyhnutelné, jelikož z technologického hlediska by bylo nemožné hodnotit všechny vlivy současně. Nic méně významnými faktory jsou také sklon plochy a strategie v souvislosti s použitým sklonem. Ačkoli řezná rychlost v tomto případě vyšla jako statisticky nevýznamná, z následujícího grafu a také na základě technologického hodnocení je patrné že jistý vliv má, a to takový, že s rostoucí  $v_c$  roste síla  $F_c$  a to především v oblasti 125,05 – 224,95m/min.



Graf 12-Souhrnný vliv řezné rychlosti na  $F_c$

Následující graf zobrazuje současný vliv strategie a sklonu plochy. Je patrné, že větší vliv má sklon obráběné plochy, avšak strategie u sklonu plochy 50 ° vykazují rozdílné výsledky, což koresponduje s technologickým hodnocením.



Graf 13-Vliv strategie a sklonu plochy na Fc

Při hodnocení vlivu na výstup  $F_{xy}$  byla vypočtená hladina významnosti  $P=28\%$ . Z toho plyne, že je větší než stanovená hladina  $\alpha=5\%$  a vliv zkoumaných faktorů na  $F_{xy}$  je z pohledu statistiky nevýznamný.

## 5.2 Hodnocení vlivu faktorů na parametry Ra a Rz

Hodnocení bylo provedeno separátně pro parametr drsnosti Ra a Rz ve směru kolmém na směr obrábění.

Nejprve byl zhodnocen vliv na parametr Rz. Analýzou rozptylu byla zjištěna hladina významnosti  $p=3,48\%$ . Z toho vyplývá, že některé faktory jsou statisticky významné. Výsledky analýzy jsou zobrazeny v následujících tabulkách, jenž zobrazují celkovou vypočtenou hladinu významnosti, a také významnost jednotlivých faktorů.

Dependent Variable	Test of SS Whole Model vs. SS Residual (ANOVA.sta)										
	Multiple R	Multiple R2	Adjusted R2	SS Model	df Model	MS Model	SS Residual	df Residual	MS Residual	F	p



Rz - S	0,91390 6	0,83522 3	0,45989 9	607,599 8	41	14,8195 1	119,870 0	18	6,65944 4	2,22533 7	0,03478 2
--------	--------------	--------------	--------------	--------------	----	--------------	--------------	----	--------------	--------------	--------------

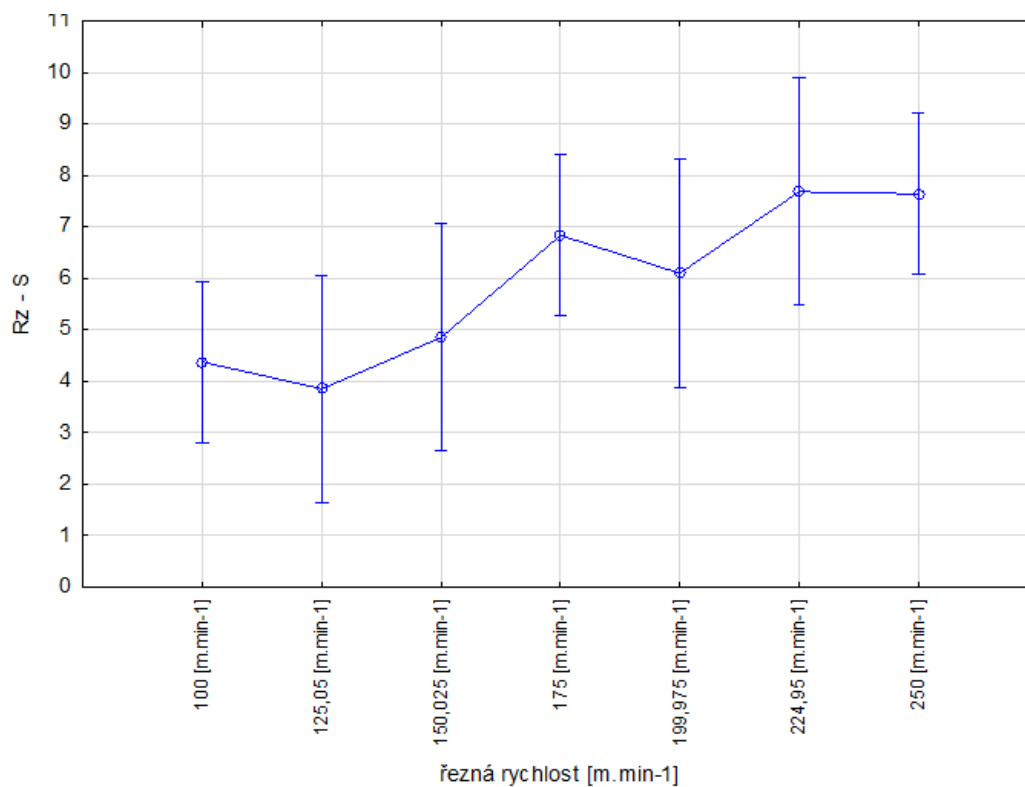
Tabulka 10-Významnost faktorů na Rz dle metody ANOVA

Effect	Univariate Tests of Significance for Rz - S (ANOVA.sta) Sigma-restricted parameterization Effective hypothesis decomposition				
	SS	Degr. of Freedom	MS	F	p
Intercept	1863,758	1	1863,758	279,8668	0,000000
řezná rychlost [m.min-1]	125,073	6	20,846	3,1302	0,027898
sklon [°]	40,585	2	20,292	3,0472	0,072481
strategie	1,443	1	1,443	0,2166	0,647191
řezná rychlost [m.min-1]*sklon [°]	36,295	12	3,025	0,4542	0,916762
řezná rychlost [m.min-1]*strategie	8,413	6	1,402	0,2106	0,968751
sklon [°]*strategie	317,240	2	158,620	23,8188	0,000009
řezná rychlost [m.min-1]*sklon [°]*strategie	70,395	12	5,866	0,8809	0,579278
Error	119,870	18	6,659		

Tabulka 11-Významné faktory ovlivňující Rz

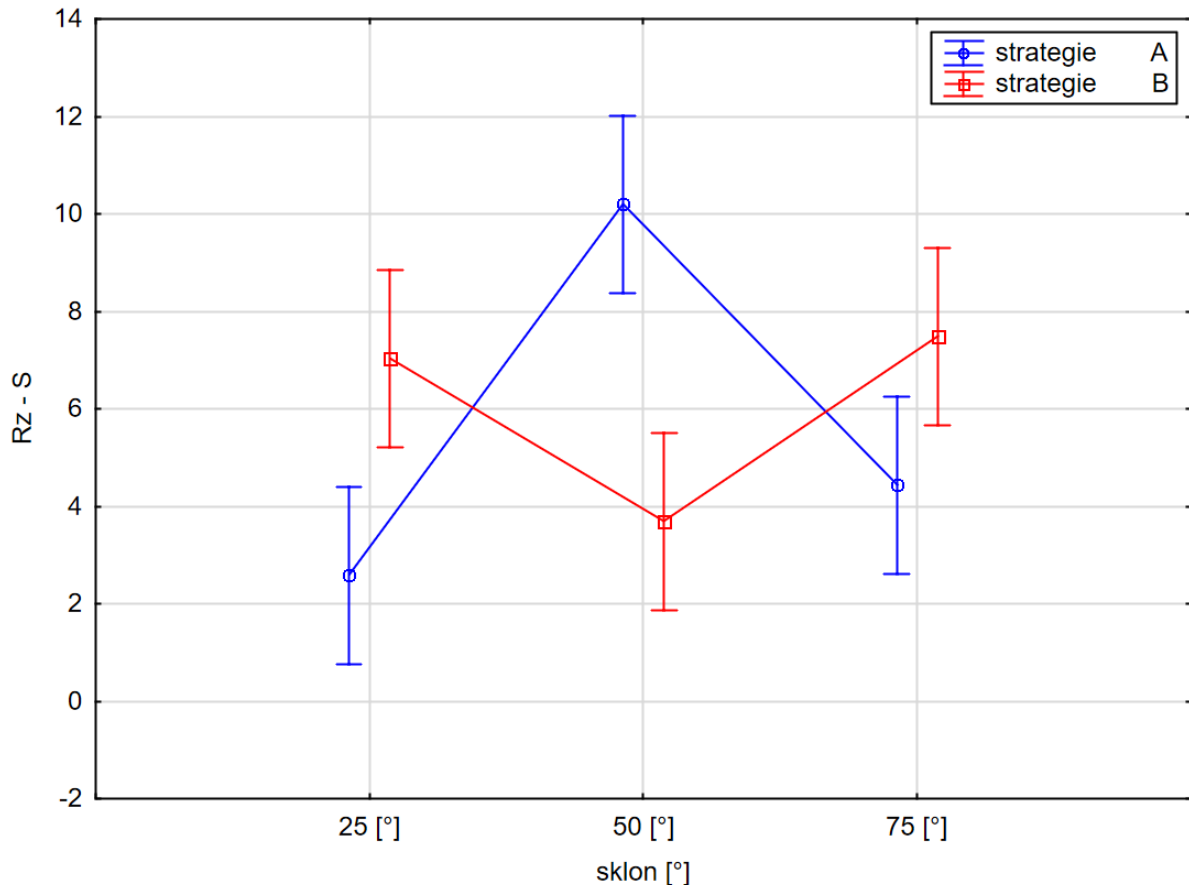
Z výsledků v tabulce vyplývá, že vliv mají opět zvolené konstanty. Avšak dalšími významnými faktory jsou sklon plochy v souvislosti s použitou strategií a také řezná rychlost.

Graf výše zobrazuje vliv  $v_c$  na Rz. Z grafu je patrný růst drsnosti s rostoucí řeznou rychlostí. Pokles z rychlosti 175m/min na 199,975m/min je způsoben strategií A, jejíž graf je zobrazen



Graf 14-Souhrnný vliv řezné rychlosti na Rz

v technologickém hodnocení parametrů drsnosti. Tato strategie je totiž ovlivněna sklonem obrobenej plochy a tím pádem ovlivňuje i tento graf protože zahrnuje obě použité strategie. Tento vliv je také vidět v grafu 15, přičemž zobrazuje závislost Rz na sklonu plochy pro jednotlivé strategie. Lze tedy konstatovat, že drsnost povrchu je ovlivněna strategií v závislosti na sklonu plochy a zároveň řeznou rychlostí, při jejímž zvýšení se zvyšuje také Rz. Vliv strategie A je pravděpodobně způsoben principem rozpočtu drah.



Graf 15-Vliv strategie a sklonu plochy na Rz

Parametr Ra byl taktéž analyzován metodou ANOVA. Vypočtená významnost vyšla  $p=9,6\%$ . Z definovanou hladinou významnosti jsou parametry statisticky nevýznamné.

## 6 Shrnutí práce a dosažených výsledků

Cílem této práce, jak vychází z názvu, bylo zjistit vliv řezné rychlosti na tvarovou přesnost dokončené plochy, přičemž byly testovány dvě obráběcí strategie a tři sklony ploch obrobku. Podstatou bylo dokončování tvarových ploch frézovacími strategiemi za použití metody konstantní řezné rychlosti, jejíž velikost byla na dílčích plochách obrobku měněna. Celá problematika práce se tedy týkala dokončování tvarových plochy frézováním a opírá se především o frézování na strojích se třemi řízenými osami. Z toho důvodu bylo možné obrábět šikmé plochy, které reprezentovaly plochy tvarové. S tímto faktem byly také svázány použité strategie, jimiž byly rozpočet s konstantním krokem v ose nástroje a rozpočet s konstantním krokem po křivce. Tyto strategie byly popsány v teoretické části práce a dále byly hodnoceny vlivy, které vnáší do procesu dokončování.

Před zahájením experimentu byly v teoretické části kromě strategií také probrány možnosti pohybu nástroje při obrábění šikmé plochy a následně byly shrnuty poznatky z teorie obrábění, jenž se týkaly právě řezné rychlosti.

Následně byl naplánován experiment na základě statisticky plánovaných experimentů (DoE). Tím byl minimalizován počet pokusů, jenž byl postačující pro zjištění interakcí jednotlivých proměnných parametrů na parametry výstupní. Stanovené proměnné parametry byly tedy sedm řezných rychlostí, tři sklony ploch a dvě strategie rozpočtu drah. Tyto parametry byly hlavním předmětem hodnocení. Experiment byl proveden jedním průměrem nástroje  $D=16\text{mm}$ . Nástroj byl monolitní kulová stopková fréza se čtyřmi zuby. Při dokončování byly měřeny řezné síly, jenž byly jedním ze zkoumaných výstupů. Dalšími výstupy podle nichž bylo provedeno hodnocení byly parametry drsnosti  $R_a$  a  $R_z$  a také rozměrová přesnost.

Nejprve byl vliv ovlivňujících faktorů hodnocen z hlediska technologického. Naměřená data byla pro každý měřený parametr nejdříve upravena a následně bylo vytvořeno grafické zobrazení pro lepší znázornění vlivů. První byly hodnoceny vlivy na řezné síly. Z naměřených dat vyplynulo, že jistý vliv řezné rychlosti na  $F_{xy}$  a  $F_c$  patrný je, a to takový, že s rostoucí  $v_c$  rostou také síly, ale daleko větší vliv má sklon plochy, případně sklon ve spojení s použitou strategií.

Následně byl zhodnocen vliv faktorů na parametry drsností. Na základě naměřených dat bylo konstatováno, že vliv na oba parametry je takřka stejný. Na jakost povrchu se nejvíce projevila použitá strategie. Strategie A vykazovala velkou závislost jakosti povrchu na sklonu obrobené plochy. Tento jev vyplynul z principu rozpočtu drah. U strategie B byl vliv sklonu plochy takřka eliminován a s rostoucí řeznou rychlostí rostla velikost parametrů drsnosti povrchu takřka lineárně. Průměrné zvýšení bylo přibližně 0,1 mikronu na přechod.

Ve třetí části technologického hodnocení byl hodnocen vliv na tvarovou přesnost dokončené plochy. Data získaná ze 3D měřicího stroje byla zhodnocena a výsledkem bylo, že vliv strategie na přesnost plochy nelze nijak charakterizovat. Ovšem velký vliv měl opět sklon obrobené plochy. Především sklon  $\alpha=50^\circ$  vykazoval průměrný odstup měřených bodů 0,12mm na ploše jednoho vzorku. Vliv řezné rychlosti byl nepatrný a nelze konstatovat rostoucí či klesající průběh.

Po technologickém hodnocení následovalo hodnocení statistické. Byl využit navržený plán experimentu pomocí něž byla provedena analýza rozptylu (metoda ANOVA). Hodnocenými výstupy byly řezné síly a parametry drsnosti. Z analýzy vyplynulo, že statisticky významně je ovlivněna síla  $F_c$  a parametr drsnosti  $R_z$ . U hodnocení řezné síly  $F_c$  byly ovlivňujícími faktory konstantní parametry (parametry zvoleny jako konstanty:  $f_z$ ,  $D$ ,  $a$ ), sklon plochy a strategie společně se sklonem. U analýzy vlivu na  $R_z$  byly ovlivňujícími parametry konstantní parametry, řezná rychlost a strategie společně se sklonem.

Jelikož statistické hodnocení velice úzce koresponduje s hodnocením technologickým, jsou získaná data a závěry z nich získané pravděpodobně správné a lze konstatovat, že řezná rychlost ovlivňuje drsnost povrchu a částečně řezné síly, avšak tvarovou přesnost dokončené plochy vliv takřka nemá. Celkově má větší vliv sklon plochy, případně sklon zároveň s použitou strategií.

## **7 Závěr**

Tato práce popisuje vliv velikosti řezné rychlosti, sklonu obráběné plochy a dvou strategií na velikost řezných sil, parametrů drsnosti a tvarovou přesnost dokončené plochy. Výsledky, metody a poznatky mohou sloužit jako podklad pro další prohlubování dokončovacích metod, jimiž se zabývá projekt katedry KTO na Západočeské Univerzitě v Plzni. Tato práce je jednou z řady dalších, jenž danou problematiku dokončování řešily, aktuálně řeší nebo pravděpodobně řešit budou.

## Citovaná literatura

1. **Doc. Ing. Anton Humár, CSc.** TECHNOLOGIE I : TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ – 1. část : Odbor technologie obrábění. *VUT v Brně , Ústav strojírenské technologie.* [Online] 2003. [Citace: 10. 11 2017.] [http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI\\_TO-1cast.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI_TO-1cast.pdf).
2. **Střední průmyslová škola, Ostrava - Vítkovice, příspěvková organizace.** [Online] [Citace: 22. 10 2017.] [https://www.spszenegrova.cz/texty/texty/STT/STT2-10\\_Frezovani\\_RAJ.pdf](https://www.spszenegrova.cz/texty/texty/STT/STT2-10_Frezovani_RAJ.pdf).
3. **Vaňák, Mgr. Antonín.** Technologie Frézování pracovní listy: STŘEDNÍ ŠKOLA ŽELEZNIČNÍ, TECHNICKÁ A SLUŽEB, ŠUMPERK. *STŘEDNÍ ŠKOLA ŽELEZNIČNÍ, TECHNICKÁ A SLUŽEB, ŠUMPERK.* [Online] [Citace: 22. 10 2017.] [http://www.sszts.cz/stary\\_web/stary\\_web/esf/TEC\\_fr.pdf](http://www.sszts.cz/stary_web/stary_web/esf/TEC_fr.pdf). CZ.04.1.03/3.1.15.2/0091.
4. **KOCMAN K., PROKOP J.** *Technologie obrábění. 2.vyd.* Brno : Akademické nakladatelství CERM, 2005. ISBN 80-214-3068-0.
5. **Frézování tvarových ploch: COPTEL Internetový portál.** *COPTEL Internetový portál.* [Online] [Citace: 3. 11 2017.] <https://coptkm.cz/portal/reposit.php?action=0&id=24567&revision=-1&instance=2>. CZ.1.07/1.1.08/03.0009.
6. **Frézy: Nástroje Brno.** *Nástroje Brno.* [Online] [Citace: 15. 11 2017.] <http://www.nastroje-brno.cz/stopkova-freza-na-drevo-radiusova-vydata-spodni-freud-r-6-3-d-12-5-s-8.html>.
7. **Frézování: Třískové obrábění: ELUC.** *ELUC.* [Online] [Citace: 15. 11 2017.] <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1824>.
8. **Frézy: Nástroje pro frézování: NÁŘADÍ A NÁSTROJE s.r.o.** *NÁŘADÍ A NÁSTROJE s.r.o.* [Online] [Citace: 15. 11 2017.] [http://naradinastrojeuh.cz/nastroje\\_frezovani.php](http://naradinastrojeuh.cz/nastroje_frezovani.php).
9. **Štulpa, Ing. Miloslav.** *CNC Programování obráběcích strojů, první vydání.* Praha : Grada Publishing, a.s., 2015. ISBN 978-80-247-5269-3.
10. **Computer-aided manufacturing: WIKIPEDIA The Free Encyclopedia.** *WIKIPEDIA.COM.* [Online] [Citace: 8. 1 2018.] [https://en.wikipedia.org/wiki/Computer-aided\\_manufacturing?oldid=288291818](https://en.wikipedia.org/wiki/Computer-aided_manufacturing?oldid=288291818).
11. **CAD/CAM software: Hypertherm.** *Hypertherm.* [Online] [Citace: 8. 1 2018.] <https://www.hypertherm.com/learn/cutting-education/understanding-cadcam-software>.
12. **Střední průmyslová škola, Třebešín, Praha 10.** *Průmyslovka Třebešín.* [Online] [Citace: 5. 12 2017.] [http://www.trebesin.cz/projekty/OPPA/dokumenty/3\\_Ks\\_3\\_axis\\_surfcam.pdf](http://www.trebesin.cz/projekty/OPPA/dokumenty/3_Ks_3_axis_surfcam.pdf).

13. Sadílek, Ing. Marek. Vyspělé strategie ve 3D frézování: digitovarna.cz. *digitovarna.cz*. [Online] [Citace: 5. 12 2017.] <http://www.digitovarna.cz/clanek-84/vyspele-strategie-ve-3d-frezovani.html>.
14. HSM dokončovací strategie: Produkty: InventorCAM. *InventorCAM*. [Online] [Citace: 5. 12 2017.] <http://www.inventorcam.com/cz/produkty/hsrhsm-3d-vysokorychlostni-frezovani/hsm-dokoncovani/>.
15. Hlavní stránka: Znalosti a zkušenosti: Frézování: Přehled aplikací: Tvarové frézování: Konturování nebo kopírovací frézování?: SANDVIK Coromant. *SANDVIK Coromant*. [Online] [Citace: 5. 12 2017.] [https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/milling/application\\_overview/profile\\_milling/contouring\\_or\\_copy\\_milling/pages/default.aspx](https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/milling/application_overview/profile_milling/contouring_or_copy_milling/pages/default.aspx).
16. Nuodi Huang, Thomas Kurfess. Aggressive Spiral Toolpaths for Pocket Machining Based on Medial Axis Transformation: THE AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. *THE AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS*. [Online] [Citace: 10. 12 2017.] <http://manufacturingscience.asmedigitalcollection.asme.org/article.aspx?articleid=2598958>.
17. Vliv nastavení parametru CAM: CAD.CZ. *CAD.CZ*. [Online] [Citace: 8. 1 2018.] <https://www.cad.cz/strojirenstvi/38-strojirenstvi/1424-vliv-nastaveni-parametru-cam.html>.
18. Prof. Peter Pokorný, PhD., Ing. Rudolf Zaujec. Digitální knihovna Západočeské univerzity v Plzni. *otik.uk.zcu.cz*. [Online] [Citace: 8. 1 2018.] <https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/11025/16131/1/Pokorny.pdf>.
19. doc. Ing. Řehoř, Jan. *Skripta - Teorie obrábění*. Plzeň : autor neznámý, 2006.
20. Články: Vliv vybraných parametrů procesu na řezné síly při HSC: MMSpektrum. *MMSpektrum*. [Online] [Citace: 8. 1 2018.] <https://www.mmspektrum.com/clanek/vliv-vybranych-parametru-procesu-na-rezne-sily-pri-hsc.html>.
21. DMU 40 eVo linear: DMU eVo Series: 5 Axis Milling: Milling: Machines: Products: DMG MORI. *DMG MORI*. [Online] [Citace: 20. 3 2018.] <https://en.dmgmori.com/products/machines/milling/5-axis-milling/dmu-evo/dmu-40-evo-linear>.
22. Home: FILTERS: Product Category: CMMs-Coordinate Measuring: ZEISS PRISMO navigator Bridge-Type CMM: MSI-Viking Gage, LLC. *MSI-Viking Gage, LLC*. [Online] [Citace: 4. 5 2018.] <https://www.msi-viking.com/ZEISS-PRISMO-navigator-Bridge-Type-CMM>.
23. HSM Finishing Strategies: SolidCAM. *SolidCAM*. [Online] [Citace: 5. 12 2017.] <http://www.isolidcam.com/pt/solucoes-cam/hsm-maquinacao-3-eixos/hsm-finishing/>.

## **Přílohy diplomové práce**

### **Vliv změny řezné rychlosti na tvarovou přesnost dokončené plochy**

PŘÍLOHA č. 1 – Hrubování – seřizovací dokumentace

PŘÍLOHA č. 2 – Tabulky a grafy strategie A pro  $F_{xy}$  a strategie B pro  $F_c$


PŘÍLOHA č. 3 – Grafy svislé drsnosti Rz pro strategii A a B

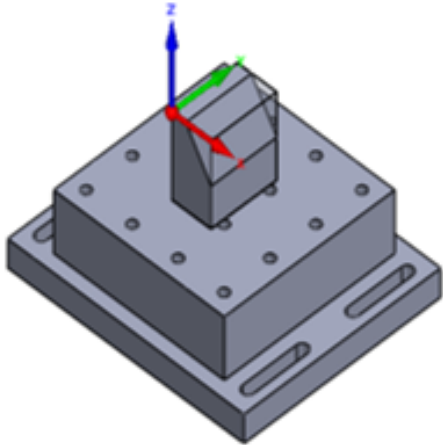
PŘÍLOHA č. 4 – Plán experimentu

PŘÍLOHA č. 5 – Kompletní tabulka hodnot odstupů bodů od modelu




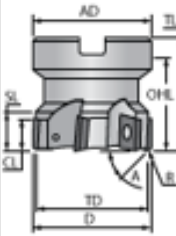
PŘÍLOHA č. 6 – Tabulka hodnot  $F_{xy}$  a  $F_c$  navazující na plán experimentu

**PŘÍLOHA č. 1 – Hrubování – seřizovací dokumentace**

Úterý, Květen, 17, 2018	<b>SESTAVA_POLOTOVAR_A50</b>	
-------------------------	------------------------------	---

Jednotky	mm	
Typ obrobku	Frézování	
CNC-řízení	M5_H530_DMU40eVo_ZAPADOCESKA_UN	
Adaptér nástroje	HSK63	
Obráběný materiál	CSN 12 050.1 (C45 - 1.0503)	

Model	D:\RTI\SolidCAM\Test_A3\Polotovar\A25\Sestava_polotovar.SLDASM
Adresář	D:\RTI\SolidCAM\Test_A3\Polotovar\A50
Název projektu	SESTAVA_POLOTOVAR_A50

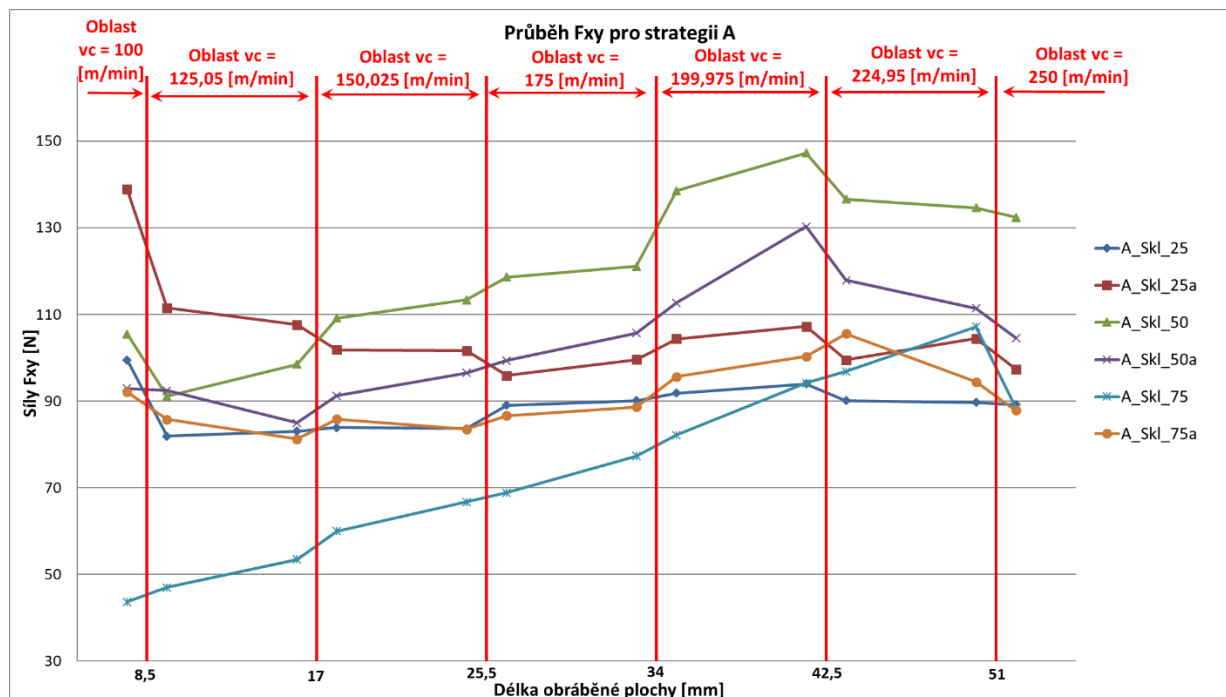
<p><b>32-Spindle_Y-1A</b> HYDRO Iscar 25x120 Fr D16 r0.2 L32 z4 - SEH 422825</p>  <p><b>Toroidní fréza</b></p>		<p>Fr D16 r0.2 L32 z4 - SEH 422825</p> <table style="width: 100%; border: none;"> <tr> <td style="width: 33%;">D: 16 mm</td> <td style="width: 33%;">TL: 92 mm</td> <td style="width: 33%;">H 32 D 32</td> </tr> <tr> <td>R: 0.2 mm</td> <td>OHL: 45 mm</td> <td>Počet zubů: 4</td> </tr> <tr> <td>AD: 15.8</td> <td>CL: 32 mm</td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td>SL: 32 mm</td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td>H: 165 mm</td> <td></td> </tr> </table>	D: 16 mm	TL: 92 mm	H 32 D 32	R: 0.2 mm	OHL: 45 mm	Počet zubů: 4	AD: 15.8	CL: 32 mm			SL: 32 mm			H: 165 mm	
D: 16 mm	TL: 92 mm	H 32 D 32															
R: 0.2 mm	OHL: 45 mm	Počet zubů: 4															
AD: 15.8	CL: 32 mm																
	SL: 32 mm																
	H: 165 mm																
<p><b>127-Spindle_Y-1B</b> TRN D22 L60 Fr D50 r0.8 L10 z7 (OSG) - PSE11R050M22-7</p>  <p><b>Čelní fréza</b></p>		<p>Fr D50 r0.8 L10 z7 (OSG) - PSE11R050M22-7</p> <table style="width: 100%; border: none;"> <tr> <td style="width: 33%;">D: 50 mm</td> <td style="width: 33%;">TL: 39.95 mm</td> <td style="width: 33%;">H 127 D 127</td> </tr> <tr> <td>R: 0.8 mm</td> <td>OHL: 39.95 mm</td> <td>Počet zubů: 7</td> </tr> <tr> <td>TD: 50 mm</td> <td>CL: 10 mm</td> <td></td> </tr> <tr> <td>A: 0</td> <td>SL: 10 mm</td> <td></td> </tr> <tr> <td>AD: 49</td> <td>H: 89.95 mm</td> <td></td> </tr> </table>	D: 50 mm	TL: 39.95 mm	H 127 D 127	R: 0.8 mm	OHL: 39.95 mm	Počet zubů: 7	TD: 50 mm	CL: 10 mm		A: 0	SL: 10 mm		AD: 49	H: 89.95 mm	
D: 50 mm	TL: 39.95 mm	H 127 D 127															
R: 0.8 mm	OHL: 39.95 mm	Počet zubů: 7															
TD: 50 mm	CL: 10 mm																
A: 0	SL: 10 mm																
AD: 49	H: 89.95 mm																



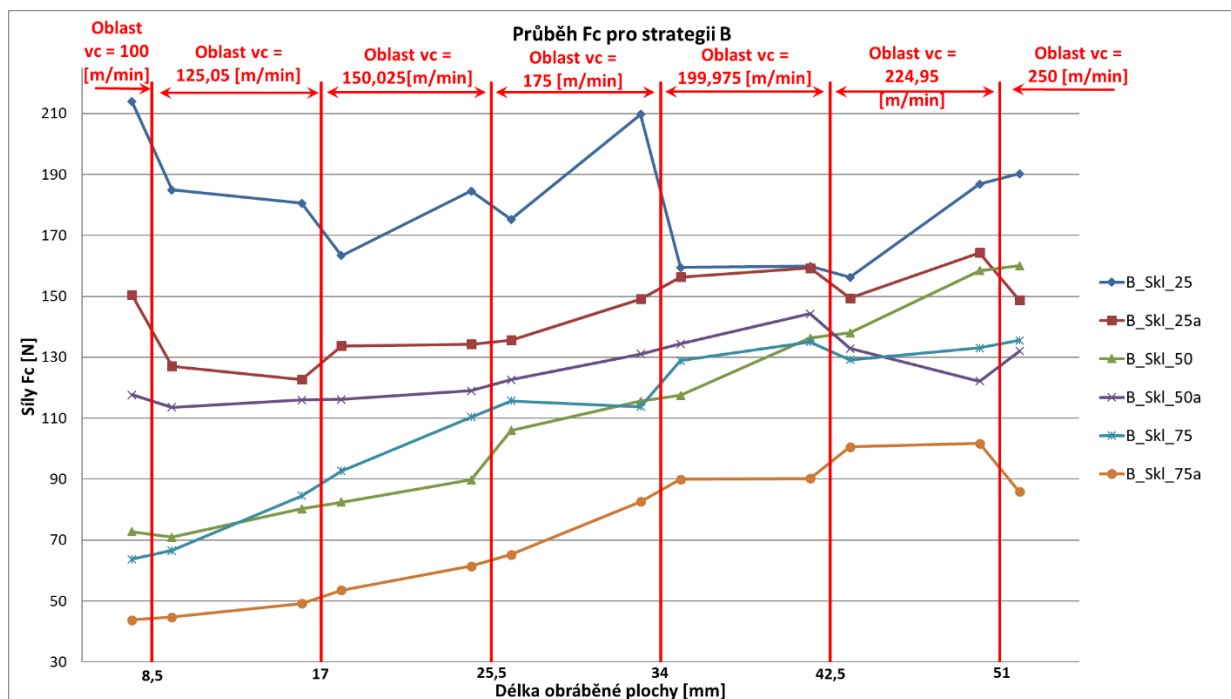
#	Název operace (Typ Operace) <Transformace>					
	Nul. Bod		Otáčky Dok.	Posuv XY/Posuv	Posuv Z/Posuv pro Dok.	Čas
	Číslo nástroje		Chlazení nástroje			
	Popis					
	X Min	X Max	Y Min	Y Max	Z Min	Z Max
1	<b>hrubovani (3D iMachining) &lt;&gt;</b>					
	Nulový bod 1 (1- Poloha)		3301	4252	80000	0:01:52
	32-Spindle_Y-1A		Chlazení vřetene/hlavv:Skurz nástroj			
	23.243	68.916	-10.895	110.878	-41.205	2.5
2	<b>dokonceni horni plochy (Kontura) &lt;&gt;</b>					
	Nulový bod 1 (1- Poloha)		230	500	500	0:00:34
	32-Spindle_Y-1A		Chlazení vřetene/hlavv:Skurz nástroj			
	-7.927	13.683	-9.6	109.6	0	2
3	<b>F_kontura3 (Kontura) &lt;&gt;</b>					
	Nulový bod 1 (2- Poloha)		250	0.15	0.15	0:00:25
	127-Spindle_Y-1B		Chlazení vřetene/hlavv:Proud vzduchu vřetenem			
	-63.797	54.323	-130	130	-38.189	20.381
<b>Celkový čas:</b>					<b>0:02:51</b>	

**PŘÍLOHA č. 2 – Tabulky a grafy strategie A pro  $F_{xy}$  a strategie B pro  $F_c$**

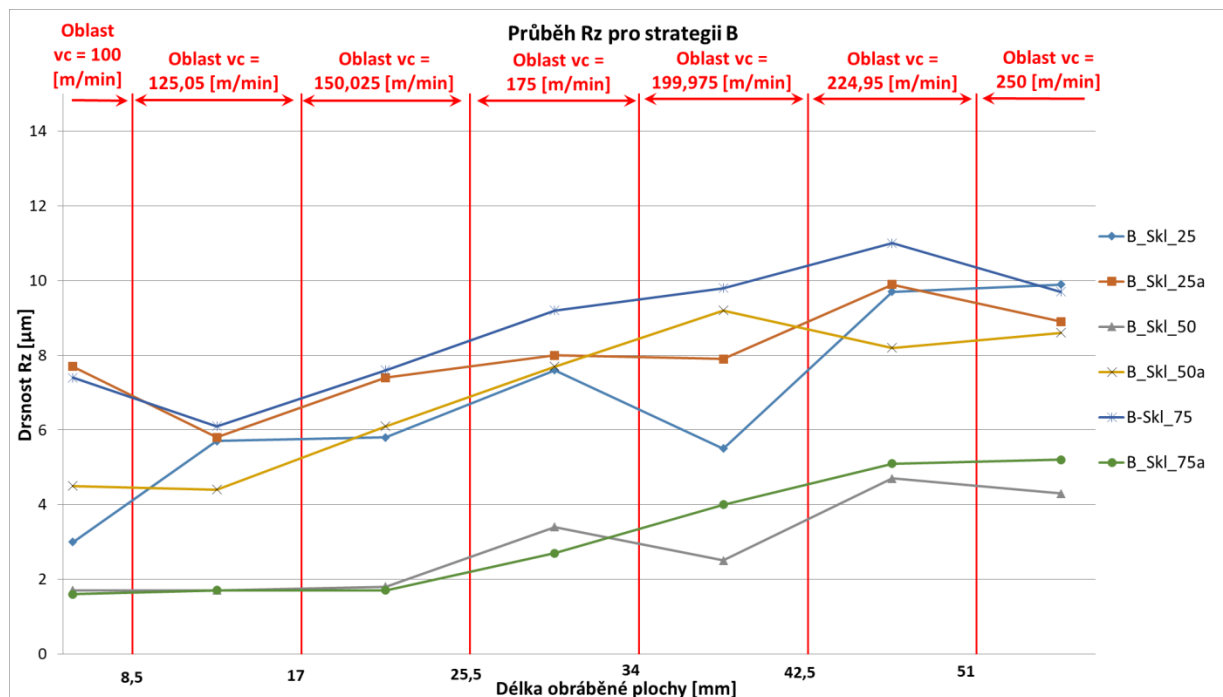
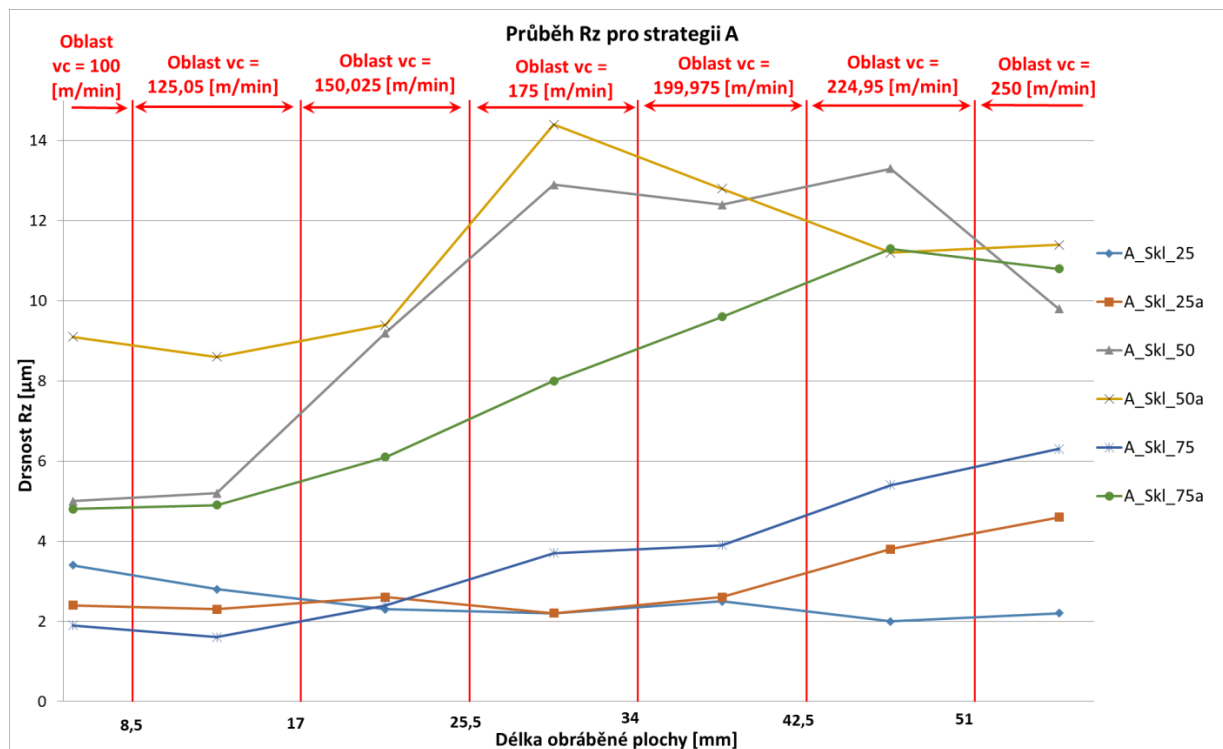
$v_c$ [m/min]	$F_{xy}$ [N]	A_Skl_25	A_Skl_25a	A_Skl_50	A_Skl_50a	A_Skl_75	A_Skl_75a
$v_c=100$	Nad přechodem	99,53	138,91	105,50	92,91	43,64	92,10
$v_c=125,05$	Pod přechodem	81,94	111,47	91,13	92,42	47,00	85,80
	Nad přechodem	83,07	107,63	98,53	84,95	53,49	81,25
$v_c=150,025$	Pod přechodem	83,94	101,83	109,18	91,27	59,97	85,82
	Nad přechodem	83,62	101,64	113,35	96,48	66,71	83,52
$v_c=175$	Pod přechodem	89,07	95,92	118,64	99,35	68,86	86,63
	Nad přechodem	90,10	99,59	121,08	105,67	77,30	88,63
$v_c=199,975$	Pod přechodem	91,82	104,33	138,56	112,67	82,18	95,65
	Nad přechodem	94,00	107,23	147,27	130,29	94,17	100,32
$v_c=224,95$	Pod přechodem	90,11	99,48	136,60	117,88	96,82	105,55
	Nad přechodem	89,72	104,46	134,63	111,40	107,15	94,44
$v_c=250$	Pod přechodem	89,20	97,35	132,41	104,59	88,47	87,82



$v_c$ [m/min]	$F_c$ [N]	B_Skl_25	B_Skl_25a	B_Skl_50	B_Skl_50a	B_Skl_75	B_Skl_75a
$v_c=100$	Nad přechodem	213,89	150,39	72,72	117,64	63,72	43,78
$v_c=125,05$	Pod přechodem	184,93	127,07	70,98	113,60	66,54	44,72
	Nad přechodem	180,53	122,72	80,20	115,98	84,48	49,16
$v_c=150,025$	Pod přechodem	163,39	133,76	82,44	116,18	92,66	53,57
	Nad přechodem	184,54	134,25	89,78	119,03	110,32	61,41
$v_c=175$	Pod přechodem	175,19	135,60	105,97	122,60	115,63	65,22
	Nad přechodem	209,70	149,14	115,59	131,07	113,75	82,59
$v_c=199,975$	Pod přechodem	159,47	156,36	117,52	134,38	128,90	89,98
	Nad přechodem	159,87	159,22	136,26	144,22	135,02	90,27
$v_c=224,95$	Pod přechodem	156,26	149,37	138,01	132,82	129,12	100,59
	Nad přechodem	186,83	164,33	158,43	122,15	133,01	101,73
$v_c=250$	Pod přechodem	190,20	148,75	160,05	131,99	135,48	85,85



### PŘÍLOHA č. 3 – Grafy svislé drsnosti Rz pro strategii A a B



#### PŘÍLOHA č. 4 – Plán experimentu

ID	Skutečné pořadí	Run	režná rychlost	sklon	strategie	kostka	Záznam sil
1	1	46	100	25	A	1	A_Dn16_Skl_25_1 - náměry 1-4
2	8	47	100	25	A	2	A_Dn16_Skl_25a_1 - náměry 1-4
3	2	6	125,05	25	A	1	A_Dn16_Skl_25_1 - náměry 5-9 a A_Dn16_Skl_25_2 - náměry 1-4
4	3	27	150,025	25	A	1	A_Dn16_Skl_25_2 - náměry 5-9 a A_Dn16_Skl_25_3 - náměry 1-4
10	4	26	175	25	A	1	A_Dn16_Skl_25_3 - náměry 5-9 a A_Dn16_Skl_25_4 - náměry 1-4
9	11	44	175	25	A	2	A_Dn16_Skl_25_3a - náměry 5-9 a A_Dn16_Skl_25_4a - náměry 1-4
5	5	29	199,975	25	A	1	A_Dn16_Skl_25_4 - náměry 5-9 a A_Dn16_Skl_25_5 - náměry 1-4
6	6	25	224,95	25	A	1	A_Dn16_Skl_25_5 - náměry 5-9 a A_Dn16_Skl_25_6 - náměry 1-4
7	7	5	250	25	A	1	A_Dn16_Skl_25_6 - náměry 5-9
8	14	45	250	25	A	2	A_Dn16_Skl_25_6a - náměry 5-9
32	15	19	100	25	B	3	B_Dn16_Skl_25_1 - náměry 1-4
31	22	30	100	25	B	4	B_Dn16_Skl_25a_1 - náměry 1-4
33	16	15	125,05	25	B	3	B_Dn16_Skl_25_1 - náměry 5-9 a B_Dn16_Skl_25_2 - náměry 1-4
34	17	12	150,025	25	B	3	B_Dn16_Skl_25_2 - náměry 5-9 a B_Dn16_Skl_25_3 - náměry 1-4
39	18	38	175	25	B	3	B_Dn16_Skl_25_3 - náměry 5-9 a B_Dn16_Skl_25_4 - náměry 1-4
40	25	57	175	25	B	4	B_Dn16_Skl_25_3a - náměry 5-9 a B_Dn16_Skl_25_4a - náměry 1-4

35	19	23	199,975	25	B	3	B_Dn16_Skl_25_4 - náměry 5-9 a B_Dn16_Skl_25_5 - náměry 1-4
36	20	20	224,95	25	B	3	B_Dn16_Skl_25_5 - náměry 5-9 a B_Dn16_Skl_25_6 - náměry 1-4
37	21	11	250	25	B	3	B_Dn16_Skl_25_6 - náměry 5-9
38	28	49	250	25	B	4	B_Dn16_Skl_25_6a - náměry 5-9
11	29	9	100	50	A	5	A_Dn16_Skl_50_1 - náměry 1-4
12	36	55	100	50	A	6	A_Dn16_Skl_50a_1 - náměry 1-4
13	30	7	125,05	50	A	5	A_Dn16_Skl_50_1 - náměry 5-9 a A_Dn16_Skl_50_2 - náměry 1-4
14	31	43	150,025	50	A	5	A_Dn16_Skl_50_2 - náměry 5-9 a A_Dn16_Skl_50_3 - náměry 1-4
20	32	32	175	50	A	5	A_Dn16_Skl_50_3 - náměry 5-9 a A_Dn16_Skl_50_4 - náměry 1-4
19	39	60	175	50	A	6	A_Dn16_Skl_50_3a - náměry 5-9 a A_Dn16_Skl_50_4a - náměry 1-4
15	33	17	199,975	50	A	5	A_Dn16_Skl_50_4 - náměry 5-9 a A_Dn16_Skl_50_5 - náměry 1-4
16	34	51	224,95	50	A	5	A_Dn16_Skl_50_5 - náměry 5-9 a A_Dn16_Skl_50_6 - náměry 1-4
18	35	1	250	50	A	5	A_Dn16_Skl_50_6 - náměry 5-9
17	42	14	250	50	A	6	A_Dn16_Skl_50_6a - náměry 5-9
41	43	13	100	50	B	7	B_Dn16_Skl_50_1 - náměry 1-4
42	50	39	100	50	B	8	B_Dn16_Skl_50a_1 - náměry 1-4
43	44	18	125,05	50	B	7	B_Dn16_Skl_50_1 - náměry 5-9 a B_Dn16_Skl_50_2 - náměry 1-4
44	45	16	150,025	50	B	7	B_Dn16_Skl_50_2 - náměry 5-9 a B_Dn16_Skl_50_3 - náměry 1-4
49	46	24	175	50	B	7	B_Dn16_Skl_50_3 - náměry 5-9 a B_Dn16_Skl_50_4 - náměry 1-4
50	53	33	175	50	B	8	B_Dn16_Skl_50_3a - náměry 5-9 a B_Dn16_Skl_50_4a - náměry 1-4

45	47	58	199,975	50	B	7	B_Dn16_Skl_50_4 - náměry 5-9 a B_Dn16_Skl_50_5 - náměry 1-4
46	48	42	224,95	50	B	7	B_Dn16_Skl_50_5 - náměry 5-9 a B_Dn16_Skl_50_6 - náměry 1-4
48	49	48	250	50	B	7	B_Dn16_Skl_50_6 - náměry 5-9
47	56	52	250	50	B	8	B_Dn16_Skl_50_6a - náměry 5-9
22	57	3	100	75	A	9	A_Dn16_Skl_75_1 - náměry 1-4
21	64	4	100	75	A	10	A_Dn16_Skl_75a_1 - náměry 1-4
23	58	34	125,05	75	A	9	A_Dn16_Skl_75_1 - náměry 5-9 a A_Dn16_Skl_75_2 - náměry 1-4
24	59	50	150,025	75	A	9	A_Dn16_Skl_75_2 - náměry 5-9 a A_Dn16_Skl_75_3 - náměry 1-4
30	60	10	175	75	A	9	A_Dn16_Skl_75_3 - náměry 5-9 a A_Dn16_Skl_75_4 - náměry 1-4
29	67	53	175	75	A	10	A_Dn16_Skl_75_3a - náměry 5-9 a A_Dn16_Skl_75_4a - náměry 1-4
25	61	8	199,975	75	A	9	A_Dn16_Skl_75_4 - náměry 5-9 a A_Dn16_Skl_75_5 - náměry 1-4
26	62	22	224,95	75	A	9	A_Dn16_Skl_75_5 - náměry 5-9 a A_Dn16_Skl_75_6 - náměry 1-4
27	63	2	250	75	A	9	A_Dn16_Skl_75_6 - náměry 5-9
28	70	28	250	75	A	10	A_Dn16_Skl_75_6a - náměry 5-9
51	71	36	100	75	B	11	B_Dn16_Skl_75_1 - náměry 1-4
52	78	40	100	75	B	12	B_Dn16_Skl_75a_1 - náměry 1-4
53	72	21	125,05	75	B	11	B_Dn16_Skl_75_1 - náměry 5-9 a B_Dn16_Skl_75_2 - náměry 1-4
54	73	41	150,025	75	B	11	B_Dn16_Skl_75_2 - náměry 5-9 a B_Dn16_Skl_75_3 - náměry 1-4
59	74	31	175	75	B	11	B_Dn16_Skl_75_3 - náměry 5-9 a B_Dn16_Skl_75_4 - náměry 1-4
60	81	56	175	75	B	12	B_Dn16_Skl_75_3a - náměry 5-9 a B_Dn16_Skl_75_4a - náměry 1-4

55	75	59	199,975	75	B	11	B_Dn16_Skl_75_4 - náměry 5-9 a B_Dn16_Skl_75_5 - náměry 1-4
56	76	54	224,95	75	B	11	B_Dn16_Skl_75_5 - náměry 5-9 a B_Dn16_Skl_75_6 - náměry 1-4
58	77	35	250	75	B	11	B_Dn16_Skl_75_6 - náměry 5-9
57	84	37	250	75	B	12	B_Dn16_Skl_75_6a - náměry 5-9



**PŘÍLOHA č. 5 – Kompletní tabulka hodnot odstupe bodů od modelu**

řez 1	vc=100			vc=125,05						vc=150,025					
	Nad přechodem		průměr	Pod přechodem		průměr	Nad přechodem		průměr	Pod přechodem		průměr	Nad přechodem		průměr
A_Skl_25	-0,0265	-0,0273	<b>-0,0269</b>	-0,0289	-0,0287	<b>-0,0288</b>	-0,0266	-0,0263	<b>-0,0265</b>	-0,0280	-0,0285	<b>-0,0283</b>	-0,0256	-0,0259	<b>-0,0258</b>
A_Skl_25a	-0,0837	-0,0842	<b>-0,0840</b>	-0,0862	-0,0867	<b>-0,0864</b>	-0,0855	-0,0868	<b>-0,0861</b>	-0,0864	-0,0859	<b>-0,0861</b>	-0,0853	-0,0855	<b>-0,0854</b>
A_Skl_50	-0,0473	-0,0469	<b>-0,0471</b>	-0,0471	-0,0465	<b>-0,0468</b>	-0,0407	-0,0488	<b>-0,0448</b>	-0,0483	-0,0481	<b>-0,0482</b>	-0,0509	-0,0510	<b>-0,0509</b>
A_Skl_50a	-0,2439	-0,2438	<b>-0,2439</b>	-0,2443	-0,2458	<b>-0,2450</b>	-0,2377	-0,2458	<b>-0,2418</b>	-0,2465	-0,2461	<b>-0,2463</b>	-0,2463	-0,2474	<b>-0,2468</b>
A_Skl_75	-0,1420	-0,1418	<b>-0,1419</b>	-0,1411	-0,1402	<b>-0,1406</b>	-0,1377	-0,1382	<b>-0,1380</b>	-0,1366	-0,1358	<b>-0,1362</b>	-0,1332	-0,1338	<b>-0,1335</b>
A_Skl_75a	-0,0024	-0,0027	<b>-0,0026</b>	-0,0024	-0,0037	<b>-0,0031</b>	-0,0029	-0,0035	<b>-0,0032</b>	0,0003	-0,0009	<b>-0,0003</b>	0,0007	0,0002	<b>0,0004</b>
	Nad přechodem		průměr	Pod přechodem		průměr	Nad přechodem		průměr	Pod přechodem		průměr	Nad přechodem		průměr
B_Skl_25	0,0364	0,0356	<b>0,0360</b>	0,0346	0,0347	<b>0,0346</b>	0,0365	0,0358	<b>0,0361</b>	0,0353	0,0355	<b>0,0354</b>	0,0375	0,0358	<b>0,0366</b>
B_Skl_25a	-0,0291	-0,0305	<b>-0,0298</b>	-0,0312	-0,0318	<b>-0,0315</b>	-0,0297	-0,0305	<b>-0,0301</b>	-0,0300	-0,0304	<b>-0,0302</b>	-0,0277	-0,0292	<b>-0,0285</b>
B_Skl_50	-0,1819	-0,1818	<b>-0,1819</b>	-0,1812	-0,1808	<b>-0,1810</b>	-0,1710	-0,1788	<b>-0,1749</b>	-0,1785	-0,1775	<b>-0,1780</b>	-0,1751	-0,1762	<b>-0,1756</b>
B_Skl_50a	-0,2845	-0,2847	<b>-0,2846</b>	-0,2842	-0,2841	<b>-0,2842</b>	-0,2733	-0,2820	<b>-0,2777</b>	-0,2798	-0,2794	<b>-0,2796</b>	-0,2772	-0,2771	<b>-0,2771</b>
B_Skl_75	0,0760	0,0755	<b>0,0758</b>	0,0861	0,0857	<b>0,0859</b>	0,0886	0,0871	<b>0,0879</b>	0,0894	0,0895	<b>0,0894</b>	0,0902	0,0901	<b>0,0902</b>
B_Skl_75a	0,0050	0,0048	<b>0,0049</b>	0,0058	0,0062	<b>0,0060</b>	0,0095	0,0089	<b>0,0092</b>	0,0100	0,0110	<b>0,0105</b>	0,0124	0,0120	<b>0,0122</b>
řez 1	vc=175						vc=199,975								
	Pod přechodem		průměr	Nad přechodem		průměr	Pod přechodem		průměr	Nad přechodem		průměr			
A_Skl_25	-0,0272	-0,0267	<b>-0,0270</b>	-0,0236	-0,0259	<b>-0,0247</b>	-0,0247	-0,0245	<b>-0,0246</b>	-0,0243	-0,0251	<b>-0,0247</b>			
A_Skl_25a	-0,0859	-0,0852	<b>-0,0855</b>	-0,0850	-0,0847	<b>-0,0849</b>	-0,0839	-0,0839	<b>-0,0839</b>	-0,0786	-0,0829	<b>-0,0808</b>			
A_Skl_50	-0,0509	-0,0516	<b>-0,0513</b>	-0,0534	-0,0519	<b>-0,0526</b>	-0,0552	-0,0531	<b>-0,0541</b>	-0,0534	-0,0563	<b>-0,0548</b>			
A_Skl_50a	-0,2468	-0,2468	<b>-0,2468</b>	-0,2482	-0,2462	<b>-0,2472</b>	-0,2503	-0,2501	<b>-0,2502</b>	-0,2505	-0,2526	<b>-0,2516</b>			
A_Skl_75	-0,1330	-0,1329	<b>-0,1329</b>	-0,1306	-0,1305	<b>-0,1306</b>	-0,1305	-0,1302	<b>-0,1304</b>	-0,1274	-0,1281	<b>-0,1278</b>			
A_Skl_75a	0,0006	0,0001	<b>0,0003</b>	0,0022	0,0018	<b>0,0020</b>	0,0033	0,0033	<b>0,0033</b>	0,0054	0,0035	<b>0,0044</b>			

	Pod přechodem		průměr	Nad přechodem		průměr	Pod přechodem		průměr	Nad přechodem		průměr
B_Skl_25	0,0370	0,0377	<b>0,0373</b>	0,0395	0,0383	<b>0,0389</b>	0,0386	0,0388	<b>0,0387</b>	0,0408	0,0428	<b>0,0418</b>
B_Skl_25a	-0,0282	-0,0283	<b>-0,0283</b>	-0,0272	-0,0272	<b>-0,0272</b>	-0,0263	-0,0268	<b>-0,0266</b>	-0,0254	-0,0261	<b>-0,0257</b>
B_Skl_50	-0,1752	-0,1750	<b>-0,1751</b>	-0,1674	-0,1689	<b>-0,1681</b>	-0,1743	-0,1740	<b>-0,1741</b>	-0,1722	-0,1727	<b>-0,1725</b>
B_Skl_50a	-0,2764	-0,2752	<b>-0,2758</b>	-0,2736	-0,2719	<b>-0,2727</b>	-0,2715	-0,2716	<b>-0,2715</b>	-0,2678	-0,2680	<b>-0,2679</b>
B_Skl_75	0,0898	0,0916	<b>0,0907</b>	0,0903	0,0909	<b>0,0906</b>	0,0898	0,0901	<b>0,0900</b>	0,0921	0,0922	<b>0,0922</b>
B_Skl_75a	0,0129	0,0141	<b>0,0135</b>	0,0156	0,0157	<b>0,0156</b>	0,0164	0,0164	<b>0,0164</b>	0,0186	0,0175	<b>0,0180</b>
řez 1	<b>vc=224,95</b>						<b>vc=250</b>					
	Pod přechodem		průměr	Nad přechodem		průměr	Pod přechodem		průměr	Nad přechodem		průměr
A_Skl_25	-0,0253	-0,0249	<b>-0,0251</b>	-0,0237	-0,0251	<b>-0,0244</b>	-0,0255	-0,0249	<b>-0,0252</b>			
A_Skl_25a	-0,0844	-0,0841	<b>-0,0843</b>	-0,0828	-0,0833	<b>-0,0831</b>	-0,0832	-0,0842	<b>-0,0837</b>			
A_Skl_50	-0,0564	-0,0551	<b>-0,0557</b>	-0,0547	-0,0564	<b>-0,0555</b>	-0,0595	-0,0584	<b>-0,0590</b>			
A_Skl_50a	-0,2492	-0,2493	<b>-0,2493</b>	-0,2510	-0,2513	<b>-0,2511</b>	-0,2519	-0,2537	<b>-0,2528</b>			
A_Skl_75	-0,1273	-0,1260	<b>-0,1266</b>	-0,1227	-0,1240	<b>-0,1234</b>	-0,1251	-0,1231	<b>-0,1241</b>			
A_Skl_75a	0,0045	0,0049	<b>0,0047</b>	0,0077	0,0058	<b>0,0067</b>	0,0067	0,0068	<b>0,0068</b>			
	Pod přechodem		průměr	Nad přechodem		průměr	Pod přechodem		průměr	Nad přechodem		průměr
B_Skl_25	0,0397	0,0391	<b>0,0394</b>	0,0398	0,0408	<b>0,0403</b>	0,0414	0,0410	<b>0,0412</b>			
B_Skl_25a	-0,0261	-0,0266	<b>-0,0263</b>	-0,0238	-0,0264	<b>-0,0251</b>	-0,0251	-0,0258	<b>-0,0255</b>			
B_Skl_50	-0,1723	-0,1714	<b>-0,1719</b>	-0,1685	-0,1699	<b>-0,1692</b>	-0,1702	-0,1702	<b>-0,1702</b>			
B_Skl_50a	-0,2673	-0,2667	<b>-0,2670</b>	-0,2642	-0,2635	<b>-0,2639</b>	-0,2632	-0,2629	<b>-0,2631</b>			
B_Skl_75	0,0927	0,0913	<b>0,0920</b>	0,0916	0,0929	<b>0,0922</b>	0,0931	0,0973	<b>0,0952</b>			
B_Skl_75a	0,0196	0,0188	<b>0,0192</b>	0,0226	0,0217	<b>0,0222</b>	0,0240	0,0219	<b>0,0230</b>			

řez 2	vc=100			vc=125,05						vc=150,025					
	Nad přechodem		průměr	Pod přechodem		průměr	Nad přechodem		průměr	Pod přechodem		průměr	Nad přechodem		průměr
A_Skl_25	-0,0230	-0,0240	<b>-0,0235</b>	-0,0256	-0,0257	<b>-0,0257</b>	-0,0225	-0,0231	<b>-0,0228</b>	-0,0244	-0,0251	<b>-0,0248</b>	-0,0224	-0,0220	<b>-0,0222</b>
A_Skl_25a	-0,0465	-0,0484	<b>-0,0474</b>	-0,0501	-0,0505	<b>-0,0503</b>	-0,0496	-0,0508	<b>-0,0502</b>	-0,0510	-0,0503	<b>-0,0506</b>	-0,0485	-0,0501	<b>-0,0493</b>
A_Skl_50	-0,0191	-0,0182	<b>-0,0186</b>	-0,0181	-0,0185	<b>-0,0183</b>	-0,0117	-0,0195	<b>-0,0156</b>	-0,0197	-0,0200	<b>-0,0199</b>	-0,0230	-0,0212	<b>-0,0221</b>
A_Skl_50a	-0,1150	-0,1156	<b>-0,1153</b>	-0,1167	-0,1161	<b>-0,1164</b>	-0,1112	-0,1167	<b>-0,1139</b>	-0,1177	-0,1167	<b>-0,1172</b>	-0,1171	-0,1179	<b>-0,1175</b>
A_Skl_75	-0,0981	-0,0981	<b>-0,0981</b>	-0,0970	-0,0960	<b>-0,0965</b>	-0,0937	-0,0937	<b>-0,0937</b>	-0,0922	-0,0911	<b>-0,0916</b>	-0,0884	-0,0892	<b>-0,0888</b>
A_Skl_75a	-0,0066	-0,0070	<b>-0,0068</b>	-0,0086	-0,0101	<b>-0,0094</b>	-0,0079	-0,0083	<b>-0,0081</b>	-0,0049	-0,0057	<b>-0,0053</b>	-0,0043	-0,0049	<b>-0,0046</b>
	Nad přechodem		průměr	Pod přechodem		průměr	Nad přechodem		průměr	Pod přechodem		průměr	Nad přechodem		průměr
B_Skl_25	0,0343	0,0338	<b>0,0341</b>	0,0329	0,0327	<b>0,0328</b>	0,0345	0,0340	<b>0,0342</b>	0,0329	0,0330	<b>0,0330</b>	0,0347	0,0334	<b>0,0340</b>
B_Skl_25a	-0,0066	-0,0075	<b>-0,0071</b>	-0,0091	-0,0079	<b>-0,0085</b>	-0,0062	-0,0064	<b>-0,0063</b>	-0,0075	-0,0072	<b>-0,0073</b>	-0,0052	-0,0056	<b>-0,0054</b>
B_Skl_50	-0,0895	-0,0899	<b>-0,0897</b>	-0,0893	-0,0888	<b>-0,0890</b>	-0,0790	-0,0864	<b>-0,0827</b>	-0,0861	-0,0853	<b>-0,0857</b>	-0,0826	-0,0844	<b>-0,0835</b>
B_Skl_50a	-0,1302	-0,1303	<b>-0,1302</b>	-0,1299	-0,1297	<b>-0,1298</b>	-0,1208	-0,1276	<b>-0,1242</b>	-0,1263	-0,1251	<b>-0,1257</b>	-0,1226	-0,1223	<b>-0,1224</b>
B_Skl_75	0,0407	0,0403	<b>0,0405</b>	0,0518	0,0516	<b>0,0517</b>	0,0542	0,0521	<b>0,0532</b>	0,0541	0,0563	<b>0,0552</b>	0,0561	0,0567	<b>0,0564</b>
B_Skl_75a	-0,0151	-0,0162	<b>-0,0156</b>	-0,0151	-0,0147	<b>-0,0149</b>	-0,0119	-0,0123	<b>-0,0121</b>	-0,0108	-0,0096	<b>-0,0102</b>	-0,0085	-0,0087	<b>-0,0086</b>
řez 2	vc=175						vc=199,975								
	Pod přechodem		průměr	Nad přechodem		průměr	Pod přechodem		průměr	Nad přechodem		průměr			
A_Skl_25	-0,0237	-0,0233	<b>-0,0235</b>	-0,0218	-0,0228	<b>-0,0223</b>	-0,0217	-0,0211	<b>-0,0214</b>	-0,0201	-0,0218	<b>-0,0209</b>			
A_Skl_25a	-0,0493	-0,0494	<b>-0,0494</b>	-0,0492	-0,0489	<b>-0,0491</b>	-0,0477	-0,0485	<b>-0,0481</b>	-0,0471	-0,0473	<b>-0,0472</b>			
A_Skl_50	-0,0226	-0,0226	<b>-0,0226</b>	-0,0259	-0,0248	<b>-0,0253</b>	-0,0263	-0,0265	<b>-0,0264</b>	-0,0272	-0,0284	<b>-0,0278</b>			
A_Skl_50a	-0,1186	-0,1182	<b>-0,1184</b>	-0,1185	-0,1187	<b>-0,1186</b>	-0,1209	-0,1210	<b>-0,1210</b>	-0,1211	-0,1210	<b>-0,1210</b>			
A_Skl_75	-0,0886	-0,0874	<b>-0,0880</b>	-0,0846	-0,0856	<b>-0,0851</b>	-0,0854	-0,0853	<b>-0,0854</b>	-0,0813	-0,0832	<b>-0,0822</b>			
A_Skl_75a	-0,0060	-0,0047	<b>-0,0054</b>	-0,0032	-0,0032	<b>-0,0032</b>	-0,0023	-0,0018	<b>-0,0021</b>	0,0003	-0,0005	<b>-0,0001</b>			
	Pod přechodem		průměr	Nad přechodem		průměr	Pod přechodem		průměr	Nad přechodem		průměr			



A_Skl_50	0,0087	0,0093	<b>0,0090</b>	0,0097	0,0091	<b>0,0094</b>	0,0154	0,0084	<b>0,0119</b>	0,0078	0,0065	<b>0,0072</b>	0,0053	0,0054	<b>0,0053</b>
A_Skl_50a	0,0139	0,0130	<b>0,0135</b>	0,0125	0,0124	<b>0,0125</b>	0,0198	0,0115	<b>0,0157</b>	0,0108	0,0109	<b>0,0108</b>	0,0113	0,0093	<b>0,0103</b>
A_Skl_75	-0,0493	-0,0488	<b>-0,0491</b>	-0,0480	-0,0470	<b>-0,0475</b>	-0,0448	-0,0448	<b>-0,0448</b>	-0,0433	-0,0425	<b>-0,0429</b>	-0,0400	-0,0410	<b>-0,0405</b>
A_Skl_75a	-0,0126	-0,0138	<b>-0,0132</b>	-0,0128	-0,0144	<b>-0,0136</b>	-0,0123	-0,0122	<b>-0,0123</b>	-0,0091	-0,0100	<b>-0,0096</b>	-0,0098	-0,0101	<b>-0,0099</b>
	Nad přechodem		<b>průměr</b>	Pod přechodem		<b>průměr</b>	Nad přechodem		<b>průměr</b>	Pod přechodem		<b>průměr</b>	Nad přechodem		<b>průměr</b>
B_Skl_25	0,0321	0,0320	<b>0,0321</b>	0,0307	0,0305	<b>0,0306</b>	0,0323	0,0319	<b>0,0321</b>	0,0310	0,0313	<b>0,0312</b>	0,0325	0,0315	<b>0,0320</b>
B_Skl_25a	0,0171	0,0150	<b>0,0161</b>	0,0144	0,0150	<b>0,0147</b>	0,0155	0,0154	<b>0,0155</b>	0,0154	0,0146	<b>0,0150</b>	0,0170	0,0164	<b>0,0167</b>
B_Skl_50	0,0022	0,0017	<b>0,0019</b>	0,0029	0,0028	<b>0,0028</b>	0,0132	0,0051	<b>0,0091</b>	0,0061	0,0066	<b>0,0063</b>	0,0085	0,0076	<b>0,0081</b>
B_Skl_50a	0,0221	0,0229	<b>0,0225</b>	0,0223	0,0228	<b>0,0226</b>	0,0345	0,0248	<b>0,0296</b>	0,0268	0,0267	<b>0,0268</b>	0,0292	0,0297	<b>0,0294</b>
B_Skl_75	0,0109	0,0119	<b>0,0114</b>	0,0235	0,0230	<b>0,0232</b>	0,0244	0,0231	<b>0,0237</b>	0,0248	0,0262	<b>0,0255</b>	0,0257	0,0254	<b>0,0256</b>
B_Skl_75a	-0,0362	-0,0365	<b>-0,0364</b>	-0,0358	-0,0352	<b>-0,0355</b>	-0,0321	-0,0327	<b>-0,0324</b>	-0,0311	-0,0303	<b>-0,0307</b>	-0,0270	-0,0293	<b>-0,0281</b>
řez 3	vc=175						vc=199,975								
	Pod přechodem		<b>průměr</b>	Nad přechodem		<b>průměr</b>	Pod přechodem		<b>průměr</b>	Nad přechodem		<b>průměr</b>			
A_Skl_25	-0,0206	-0,0201	<b>-0,0203</b>	-0,0182	-0,0196	<b>-0,0189</b>	-0,0187	-0,0179	<b>-0,0183</b>	-0,0171	-0,0187	<b>-0,0179</b>			
A_Skl_25a	-0,0130	-0,0137	<b>-0,0133</b>	-0,0133	-0,0135	<b>-0,0134</b>	-0,0123	-0,0121	<b>-0,0122</b>	-0,0106	-0,0119	<b>-0,0112</b>			
A_Skl_50	0,0026	0,0057	<b>0,0042</b>	-0,0028	0,0009	<b>-0,0009</b>	0,0002	0,0020	<b>0,0011</b>	-0,0002	0,0002	<b>0,0000</b>			
A_Skl_50a	0,0104	0,0106	<b>0,0105</b>	0,0087	0,0097	<b>0,0092</b>	0,0078	0,0087	<b>0,0083</b>	0,0081	0,0059	<b>0,0070</b>			
A_Skl_75	-0,0396	-0,0388	<b>-0,0392</b>	-0,0373	-0,0378	<b>-0,0375</b>	-0,0373	-0,0379	<b>-0,0376</b>	-0,0338	-0,0361	<b>-0,0349</b>			
A_Skl_75a	-0,0088	-0,0095	<b>-0,0091</b>	-0,0075	-0,0081	<b>-0,0078</b>	-0,0062	-0,0075	<b>-0,0068</b>	-0,0052	-0,0066	<b>-0,0059</b>			
	Pod přechodem		<b>průměr</b>	Nad přechodem		<b>průměr</b>	Pod přechodem		<b>průměr</b>	Nad přechodem		<b>průměr</b>			
B_Skl_25	0,0324	0,0330	<b>0,0327</b>	0,0338	0,0331	<b>0,0334</b>	0,0335	0,0341	<b>0,0338</b>	0,0358	0,0354	<b>0,0356</b>			
B_Skl_25a	0,0168	0,0170	<b>0,0169</b>	0,0185	0,0179	<b>0,0182</b>	0,0186	0,0190	<b>0,0188</b>	0,0203	0,0202	<b>0,0203</b>			
B_Skl_50	0,0087	0,0097	<b>0,0092</b>	0,0112	0,0108	<b>0,0110</b>	0,0100	0,0101	<b>0,0101</b>	0,0118	0,0115	<b>0,0117</b>			
B_Skl_50a	0,0296	0,0311	<b>0,0304</b>	0,0357	0,0339	<b>0,0348</b>	0,0338	0,0346	<b>0,0342</b>	0,0375	0,0375	<b>0,0375</b>			

B_Skl_75	0,0257	0,0257	<b>0,0257</b>	0,0261	0,0253	<b>0,0257</b>	0,0238	0,0254	<b>0,0246</b>	0,0281	0,0247	<b>0,0264</b>
B_Skl_75a	-0,0285	-0,0277	<b>-0,0281</b>	-0,0260	-0,0259	<b>-0,0260</b>	-0,0254	-0,0251	<b>-0,0253</b>	-0,0232	-0,0237	<b>-0,0235</b>
řez 3	<b>vc=224,95</b>						<b>vc=250</b>					
	Pod přechodem		<b>průměr</b>	Nad přechodem		<b>průměr</b>	Pod přechodem		<b>průměr</b>			
A_Skl_25	-0,0192	-0,0188	<b>-0,0190</b>	-0,0181	-0,0184	<b>-0,0182</b>	-0,0189	-0,0193	<b>-0,0191</b>			
A_Skl_25a	-0,0142	-0,0130	<b>-0,0136</b>	-0,0116	-0,0128	<b>-0,0122</b>	-0,0125	-0,0121	<b>-0,0123</b>			
A_Skl_50	-0,0010	-0,0004	<b>-0,0007</b>	0,0007	-0,0005	<b>0,0001</b>	-0,0022	-0,0016	<b>-0,0019</b>			
A_Skl_50a	0,0086	0,0070	<b>0,0078</b>	0,0079	0,0077	<b>0,0078</b>	0,0058	0,0051	<b>0,0055</b>			
A_Skl_75	-0,0335	-0,0338	<b>-0,0337</b>	-0,0303	-0,0315	<b>-0,0309</b>	-0,0313	-0,0312	<b>-0,0312</b>			
A_Skl_75a	-0,0038	-0,0051	<b>-0,0044</b>	-0,0025	-0,0039	<b>-0,0032</b>	-0,0030	-0,0022	<b>-0,0026</b>			
	Pod přechodem		<b>průměr</b>	Nad přechodem		<b>průměr</b>	Pod přechodem		<b>průměr</b>			
B_Skl_25	0,0353	0,0350	<b>0,0351</b>	0,0362	0,0358	<b>0,0360</b>	0,0363	0,0363	<b>0,0363</b>			
B_Skl_25a	0,0191	0,0199	<b>0,0195</b>	0,0239	0,0202	<b>0,0221</b>	0,0218	0,0203	<b>0,0210</b>			
B_Skl_50	0,0123	0,0125	<b>0,0124</b>	0,0139	0,0132	<b>0,0136</b>	0,0136	0,0133	<b>0,0134</b>			
B_Skl_50a	0,0381	0,0384	<b>0,0383</b>	0,0413	0,0410	<b>0,0411</b>	0,0423	0,0433	<b>0,0428</b>			
B_Skl_75	0,0272	0,0276	<b>0,0274</b>	0,0284	0,0289	<b>0,0287</b>	0,0296	0,0296	<b>0,0296</b>			
B_Skl_75a	-0,0229	-0,0224	<b>-0,0226</b>	-0,0184	-0,0206	<b>-0,0195</b>	-0,0208	-0,0205	<b>-0,0206</b>			

**PŘÍLOHA č. 6 – Tabulka hodnot  $F_{xy}$  a  $F_z$  navazující na plán experimentu**

Vc	sklon	Str.	Řezná síla $F_{xy}$ - začátek měřené plochy					Řezná síla $F_{xy}$ - konec měřené plochy				Řezná síla $F_c$ - začátek měřené plochy					Řezná síla $F_c$ - konec měřené plochy			
100	25	A						101,9	99,9	99,1	97,2						124,3	122,0	122,0	118,5
100	25a	A						137,3	140,0	138,4	139,9						172,2	176,1	173,5	175,5
125,05	25	A	81,6	82,7	80,9	83,1	81,4	83,4	83,7	82,1	83,1	106,9	107,0	104,5	106,1	105,2	108,2	109,7	109,5	109,6
150,025	25	A	83,1	84,1	83,9	84,9	83,7	83,7	83,7	83,2	83,9	111,0	110,8	109,8	111,6	110,6	111,4	112,6	112,0	113,0
175	25	A	88,8	88,7	90,0	88,7	89,1	89,2	90,4	90,6	90,2	111,2	111,1	113,2	112,1	111,9	114,4	115,7	115,4	115,5
175	25a	A	94,9	96,6	95,4	97,2	95,5	98,1	98,9	100,0	101,4	133,2	135,2	132,7	137,5	133,3	138,4	139,8	144,3	145,8
199,975	25	A	91,7	92,1	92,4	91,4	91,6	93,1	94,8	94,4	93,7	112,0	115,5	117,0	116,0	111,7	114,9	120,4	120,6	117,7
224,95	25	A	90,8	90,3	90,4	89,0	90,1	90,1	88,9	90,0	89,9	123,7	126,0	120,6	122,3	128,6	124,7	117,4	125,5	126,0
250	25	A	89,1	87,9	87,6	92,5	88,9					117,5	116,8	110,2	125,7	117,9				
250	25a	A	94,1	97,9	96,1	98,8	100,0					128,9	145,3	131,5	142,2	143,2				
100	25	B						144,0	146,8	157,4	150,6						207,9	211,6	221,0	215,0
100	25a	B						79,5	82,5	85,9	83,3						150,5	151,8	149,2	150,0
125,05	25	B	120,2	112,1	119,3	117,3	121,6	105,1	108,6	109,0	107,7	187,8	178,7	185,3	186,9	186,0	174,7	185,0	180,4	181,9
150,025	25	B	116,3	109,1	99,8	104,6	103,9	108,7	109,8	110,9	115,7	178,0	169,8	151,9	163,2	154,0	181,2	185,5	184,5	186,9
175	25	B	101,2	104,3	102,6	101,8	101,1	112,5	112,2	117,5	119,8	178,5	176,3	177,5	174,2	169,5	203,4	206,8	213,4	215,2
175	25a	B	75,2	77,5	74,8	76,5	76,3	87,5	80,7	81,6	87,5	132,7	136,3	137,4	134,9	136,8	152,7	143,9	146,2	153,8
199,975	25	B	110,2	118,0	116,5	110,7	111,7	109,0	113,1	112,8	111,2	159,1	163,3	161,6	157,2	156,2	157,3	164,5	161,7	155,9
224,95	25	B	92,0	85,0	84,3	88,2	86,5	105,4	95,8	111,7	99,6	166,2	155,6	156,7	157,3	145,5	181,9	179,7	196,0	189,8
250	25	B	94,5	92,8	97,3	101,8	97,4					192,5	187,3	188,7	190,8	191,7				
250	25a	B	89,6	84,2	87,1	83,4	85,8					149,5	142,1	151,9	140,1	160,1				
100	50	A						104,9	106,5	104,6	105,9						128,9	130,2	128,0	131,1
100	50a	A						92,3	93,9	92,0	93,4						124,9	126,5	127,1	125,8
125,05	50	A	89,7	91,3	91,8	91,1	91,8	97,3	99,2	98,9	98,7	114,9	116,1	115,5	115,7	117,5	130,3	132,5	131,9	132,5

150,025	50	A	110,8	108,1	107,3	111,0	108,7	113,1	111,3	114,5	114,4	143,2	142,9	143,7	144,7	146,9	151,7	159,3	159,8	159,7
175	50	A	115,4	116,6	119,6	121,8	119,7	120,7	119,9	121,9	121,8	157,6	156,7	158,9	164,1	159,1	159,2	157,8	156,9	156,0
175	50a	A	95,7	99,1	97,5	103,5	101,0	105,9	104,6	105,3	106,9	116,3	119,9	115,8	123,8	124,1	134,3	133,2	135,0	135,6
199,975	50	A	141,7	133,4	136,5	141,7	139,6	145,5	146,8	147,2	149,6	178,4	170,2	175,4	179,4	175,1	184,8	185,2	187,7	188,0
224,95	50	A	136,2	138,3	136,3	138,7	133,4	137,7	134,8	132,6	133,4	179,1	177,3	177,1	179,2	177,2	186,5	179,8	180,1	179,2
250	50	A	137,7	134,1	130,1	131,0	129,1					195,8	190,2	188,3	188,7	185,9				
250	50a	A	104,7	104,1	105,4	104,6	104,1					146,5	145,6	148,2	146,5	145,0				
100	50	B						59,6	60,2	60,5	60,7						71,6	72,4	73,7	73,2
100	50a	B						83,5	83,4	81,7	80,6						119,3	118,3	116,9	116,1
125,05	50	B	60,1	60,1	60,3	60,7	60,9	66,0	66,5	66,2	66,5	70,2	70,3	72,2	70,9	71,2	81,2	79,9	79,7	79,9
150,025	50	B	66,0	71,4	67,7	66,8	68,3	73,5	74,0	72,9	75,6	80,4	86,3	82,4	79,9	83,2	88,1	90,1	88,3	92,6
175	50	B	85,6	87,0	87,1	86,9	86,9	93,9	94,5	95,4	95,3	105,5	106,1	105,6	105,6	107,1	115,0	115,4	114,8	117,2
175	50a	B	99,0	99,2	99,8	98,8	99,9	106,7	106,2	103,7	107,5	122,4	121,0	122,4	124,9	122,3	132,1	129,9	129,1	133,1
199,975	50	B	96,8	94,7	94,7	95,5	94,6	108,9	107,3	110,8	111,1	121,0	117,1	116,3	117,1	116,1	135,5	133,8	139,4	136,3
224,95	50	B	107,6	107,9	109,2	113,3	112,4	121,4	122,0	125,2	123,3	134,5	134,6	136,2	143,3	141,4	155,1	158,5	158,0	162,1
250	50	B	120,1	117,5	119,1	120,0	119,9					158,6	158,9	159,3	162,9	160,6				
250	50a	B	97,1	94,1	92,8	96,2	97,3					135,8	131,4	128,4	131,0	133,3				
100	75	A						42,4	43,2	44,4	44,6						43,1	44,1	45,5	45,7
100	75a	A						88,3	91,8	94,1	94,2						93,4	97,5	99,1	99,3
125,05	75	A	45,6	46,9	47,3	47,7	47,4	53,0	53,8	53,6	53,6	46,4	47,7	48,2	48,5	48,2	54,1	55,0	54,8	54,7
150,025	75	A	59,7	58,4	60,2	60,3	61,2	65,3	69,4	66,2	66,0	61,0	59,8	61,6	61,7	62,6	66,9	71,0	68,1	67,7
175	75	A	66,6	67,2	69,1	72,4	69,0	77,1	76,3	78,0	77,7	68,9	69,6	71,8	74,8	71,9	80,5	79,6	81,5	81,1
175	75a	A	87,9	87,5	86,2	85,8	85,7	90,2	87,4	88,9	88,0	93,2	92,8	91,4	91,0	91,1	95,3	92,3	93,6	92,6
199,975	75	A	83,2	82,2	81,6	82,2	81,7	93,5	94,2	94,7	94,2	87,0	85,8	85,4	86,2	85,0	97,6	98,2	98,9	98,3
224,95	75	A	96,5	95,3	96,7	96,8	98,8	105,4	105,6	109,7	107,9	101,6	100,3	102,4	102,2	104,3	110,6	111,4	114,9	112,7
250	75	A	96,4	86,2	85,2	86,6	87,9					101,3	90,6	89,3	90,6	92,1				
250	75a	A	85,5	85,0	87,0	88,6	92,9					95,6	94,6	96,5	98,5	101,3				



100	75	B						48,2	59,2	66,3	67,2						51,9	62,9	69,7	70,4
100	75a	B						43,1	40,8	44,4	41,4						44,4	42,2	45,7	42,9
125,05	75	B	63,4	62,3	62,0	63,2	62,5	77,8	78,9	78,5	78,1	67,1	66,0	66,1	67,1	66,4	83,9	85,5	84,5	84,1
150,025	75	B	87,2	89,5	87,5	89,8	87,9	102,3	101,1	102,2	101,9	91,3	93,4	91,8	94,2	92,5	110,3	108,5	111,7	110,7
175	75	B	110,1	110,5	107,6	111,0	109,0	108,2	107,7	107,9	108,0	116,8	116,4	113,7	116,8	114,5	113,9	113,7	113,6	113,8
175	75a	B	62,9	61,7	62,0	62,5	61,9	79,3	77,3	79,6	79,4	66,0	64,8	65,1	65,3	65,0	82,9	80,9	83,3	83,3
199,975	75	B	121,1	117,0	121,8	121,5	123,4	123,6	125,1	126,5	127,0	129,0	124,3	129,0	129,3	132,9	132,4	134,3	137,1	136,2
224,95	75	B	118,8	121,8	120,5	117,4	120,5	122,8	122,3	124,3	124,4	127,6	130,4	129,8	127,8	129,9	132,8	131,9	134,2	133,1
250	75	B	125,3	121,5	121,7	124,2	131,0					135,7	132,8	132,5	134,0	142,4				
250	75a	B	77,8	75,4	75,5	79,1	80,0					85,6	84,3	83,0	87,8	88,5				