

Jakost povrchu při frézování kulovou frézou na nakloněných plochách

Bc. Lukáš Matula

Bakalářská práce
2014



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Lukáš Matula**
Osobní číslo: **T12502**
Studijní program: **N3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Výrobní inženýrství**
Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Jakost povrchu při frézování kulovou frézou na nakloněných plochách**

Zásady pro vypracování:

- 1) Literární rešerše na téma frézování, frézovací nástroje, stroje a jakost povrchu
- 2) Vyhodnocení dosavadního stavu výzkumu v oblasti predikce jakosti povrchu při frézování kulovou frézou
- 3) Návrh experimentu a vytvoření part programu pro obrábění na tříosé CNC frézce
- 4) Měření parametrů drsnosti obrobenej plochy kulovou frézou
- 5) Statistické vyhodnocení dat a stanovení modelu jakosti povrchu v závislosti na technologických parametrech procesu a sklonu obráběné plochy

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

KOCMAN, Karel. Technologické procesy obrábění. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011, 330 s. ISBN 978-80-7204-722-2.

LUKOVICS, Imrich. Konstrukční materiály a technologie. 1. vyd. Brno: VUT, 1992, 273 s. ISBN 8021403993.

BENARDOS, P. G.; VOSNIAKOS, G.-C. Predicting surface roughness in machining: a review. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2003, 43.8. 833-844.

SMID, Peter. CNC programming handbook: a comprehensive guide to practical CNC programming. 3rd ed. New York, NY: Industrial Press, c2008, xx, 540 s. ISBN 978-0-8311-3347-4.

DILLINGER, Josef. A KOL. Moderní strojírenství pro školu i praxi. 1. Praha: Europa-Sobotáles, 2007, 612 s. ISBN 978-80-86706-19-1.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Ondřej Bílek, Ph.D.**

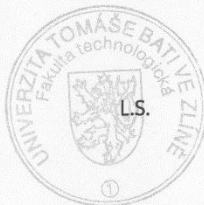
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce: **10. února 2014**

Termín odevzdání diplomové práce: **12. května 2014**

Ve Zlíně dne 10. února 2014


doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.
děkan




prof. Ing. Berenika Hausnerová, Ph.D.
ředitel ústavu

Příjmení a jméno: Matula Lukáš.

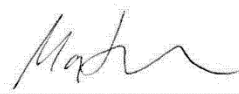
Obor: Výrobní inženýrství

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby ¹⁾;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3 ²⁾;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně 20.3.2014


.....

¹⁾ zákon č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, § 47 Zveřejňování závěrečných prací:

(1) Vysoká škola nevdělečně zveřejňuje disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce, u kterých proběhla obhajoba, včetně posudků oponentů a výsledku obhajoby prostřednictvím databáze kvalifikačních prací, kterou spravuje. Způsob zveřejnění stanoví vnitřní předpis vysoké školy.

(2) Disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce odevzdané uchazečem k obhajobě musí být též nejméně pět pracovních dnů před konáním obhajoby zveřejněny k nahlížení veřejnosti v místě určeném vnitřním předpisem vysoké školy nebo není-li tak určeno, v místě pracoviště vysoké školy, kde se má konat obhajoba práce. Každý si může ze zveřejněné práce pořizovat na své náklady výpisy, opisy nebo rozmnoženiny.

(3) Platí, že odevzdáním práce autor souhlasí se zveřejněním své práce podle tohoto zákona, bez ohledu na výsledek obhajoby.

²⁾ zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 35 odst. 3:

(3) Do práva autorského také nezasahuje škola nebo školské či vzdělávací zařízení, užije-li nikoli za účelem přímého nebo nepřímého hospodářského nebo obchodního prospěchu k výuce nebo k vlastní potřebě dílo vytvořené žákem nebo studentem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či vzdělávacímu zařízení (školní dílo).

³⁾ zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 60 Školní dílo:

(1) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení mají za obvyklých podmínek právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla (§ 35 odst. 3). Odpírá-li autor takového díla udělit svolení bez vážného důvodu, mohou se tyto osoby domáhat nahrazení chybějícího projevu jeho vůle u soudu. Ustanovení § 35 odst. 3 zůstává nedotčeno.

(2) Není-li sjednáno jinak, může autor školního díla své dílo užít či poskytnout jinému licenci, není-li to v rozporu s oprávněnými zájmy školy nebo školského či vzdělávacího zařízení.

(3) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení jsou oprávněny požadovat, aby jim autor školního díla z výdělku jím dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence podle odstavce 2 přiměřeně přispěl na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložily, a to podle okolností až do jejich skutečné výše; přitom se přihlédne k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

ABSTRAKT

V dané diplomové práci je teoreticky popsána problematika frézování, frézovacích nástrojů a následná praktická aplikace. Teoretická část se zabývá frézováním, frézovacími nástroji, frézovacími stroji a vyhodnocením drsnosti povrchu. Praktická část se skládá z vytvoření modelu s nakloněnými plochami, určení strategií obrábění a následné obrábění na CNC stroji. Po zhotovení výrobků byly získány data drsností povrchu pro statické vyhodnocení kvality jednotlivých obrobků.

Klíčová slova:

Frézování, frézky, frézovací nástroje, CNC frézování, nakloněné plochy, jakost povrchu

ABSTRACT

In the thesis, the issue of milling, milling tools and subsequent practical application is theoretically defined. The theoretical part deals with milling, milling tools and milling machinery and evaluation of surface roughness. The practical part consists of creating a model with inclined surfaces, determination of machining strategies and subsequent machining on CNC machinery. Once the products had been made, the surface roughness data has been obtained for static quality evaluation of each machined surfaces.

Keywords:

Milling, milling machinery, milling tools, CNC milling, inclined surfaces, surface quality

Poděkování

Chtěl bych poděkovat Ing. Ondřeji Bílkovi, Ph.D., který byl vedoucím mé diplomové práce, za vedení, poskytnuté studijní materiály, neocenitelné rady v oblasti frézování, ochotu a za vynaložený čas. Za pomoc při samotné realizaci praktické části taky Ing. Jiřímu Šálkovi.

Prohlašuji, že odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

Ve Zlíně 1. 5. 2014

.....

Podpis Diplomata

OBSAH

ÚVOD	10
I TEORETICKÁ ČÁST	11
1 KONVENČNÍ OBRÁBĚNÍ - POJMY A DEFINICE	12
1.1 ROZDĚLENÍ METOD OBRÁBĚNÍ.....	13
1.2 OBROBEK	13
1.3 ŘEZNÝ NÁSTROJ	14
1.4 POHYBY PŘI OBRÁBĚNÍ.....	16
2 FRÉZOVÁNÍ	18
2.1 DRUHY FRÉZOVÁNÍ	18
2.1.1 Obvodové frézování	18
2.1.1.1 Sousedné frézování	19
2.1.1.2 Nesousedné frézování	19
2.1.2 Čelní frézování	21
2.1.3 Speciální druhy frézování	22
2.2 ŘEZNÉ PODMÍNKY (PARAMETRY OBRÁBĚNÍ)	22
2.3 FRÉZOVÁNÍ SPOJENÝCH PLOCH ŠIKMÝCH	24
2.3.1 Frézování nakloněných ploch úhlovou frézou	25
2.3.2 Frézování nakloněných ploch podle orýsování.....	25
2.3.3 Frézování nakloněných ploch pomocí podložek.....	26
2.3.4 Frézování nakloněných ploch pomocí sklopného svěráku.....	27
2.3.5 Frézování nakloněných ploch vykloněním vřetena frézovací hlavy.....	27
2.3.6 Frézování nakloněných ploch kulovou frézou	28
3 FRÉZOVACÍ STROJE	29
3.1 ROZDĚLENÍ FRÉZOVACÍCH STROJŮ	29
3.2 CNC STROJE (FRÉZKY)	30
3.2.1 Rozdělení CNC strojů	31
3.2.2 2,5osé obrábění	31
3.2.3 3osé obrábění	31
4 FRÉZOVACÍ NÁSTROJE	32
4.1 ROZDĚLENÍ.....	32
4.1.1 Rozdělení podle ploch funkčních částí	32
4.1.2 Rozdělení podle způsobu upnutí	34
4.1.3 Rozdělení podle smyslu otáčení	35
4.1.4 Rozdělení podle způsobu výroby zubů	36
4.1.5 Rozdělení podle počtu dílu.....	37
4.1.6 Další rozdělení frézovacích nástrojů.....	37
4.2 MATERIÁLY FRÉZ	39
4.2.1 Nástrojová ocel.....	39
4.2.2 Slinuté karbidy	42
4.2.3 Cermety	44
4.2.4 Řezná keramika	45
4.2.5 Supertvrdé řezné materiály	45
5 JAKOST POVRCHU	47

5.1	VLASTNOSTI TEXTURY POVRCHU	47
5.2	HODNOCENÍ TEXTURY POVRCHU	49
5.2.1	Parametry textury povrchu	51
5.3	MĚŘENÍ TEXTURY POVRCHU DOTYKOVOU METODOU	54
6	SHRnutí TEORETICKÉ A CÍLE PRAKTICKÉ ČÁSTI DP	56
II	PRAKTICKÁ ČÁST	57
7	VYHODNOCENÍ DOSAVADNÍHO STAVU VÝZKUMU V OBLASTI JAKOSTI POVRCHU PŘI FRÉZOVÁNÍ KULOVOU FRÉZOU	58
8	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	61
8.1	PODMÍNKY EXPERIMENTU	61
8.1.1	CNC frézka HWT C-442	61
8.1.2	Použité frézovací nástroje	62
8.1.3	Obráběný materiál	66
8.1.4	Přístroj pro měření drsnosti Mitutoyo SJ – 301	66
8.1.5	Sklopný dílenský svěrák	67
8.2	KONSTRUKCE (CAD) A PROGRAMOVÁNÍ (CAM)	68
8.2.1	Použité programy	68
8.2.2	Vytvoření 3D modelů a výkresové dokumentace	69
8.3	CNC FRÉZOVÁNÍ	72
8.3.1	Hrubovací operace	72
8.3.2	Semi - finish operace	73
8.3.3	Dokončovací operace	74
8.3.3.1	Základní dokončovací operace	75
8.3.3.2	Srovnávací dokončovací operace	77
9	MĚŘENÍ A ZPRACOVÁNÍ VÝSLEDKŮ	80
9.1	VYHODNOCOVACÍ VELIČINY A ZPŮSOB ZPRACOVÁNÍ NAMĚŘENÝCH DAT	81
9.2	STATISTICKÉ VYHODNOCENÍ HODNOT PARAMETRŮ DRSNOSTI R_a	83
9.3	STATISTICKÉ VYHODNOCENÍ HODNOT PARAMETRŮ DRSNOSTI R_z	87
9.4	VLIV SKLONU PLOCHY NA PARAMETRY DRSNOSTI POVRCHU R_a	91
9.5	VLIV SKLONU PLOCHY NA PARAMETRY DRSNOSTI POVRCHU R_z	95
9.6	DALŠÍ MĚŘENÝ PARAMETR DRSNOSTI POVRCHU	100
9.7	STATISTICKÉ VYHODNOCENÍ HODNOT PARAMETRŮ DRSNOSTI R_a A R_z PRO SROVNÁVACÍ OBRÁBĚNÍ	102
9.8	GRAFICKÉ VYHODNOCENÍ SROVNÁVACÍCH OBRÁBĚNÍ	103
9.9	VLIV NÁSTROJE NA PARAMETRY DRSNOSTI POVRCHU R_a	107
	SHRnutí PRAKTICKÉ ČÁSTI A DISKUZE VÝSLEDKŮ	113
	ZÁVĚR	115
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	117
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	119
	SEZNAM OBRÁZKŮ	122
	SEZNAM TABULEK	125
	SEZNAM PŘÍLOH	127

ÚVOD

Ve strojírenském průmyslu prioritní roli hraje obrábění. Pomocí frézování, soustružení, vrtání a dalších operací můžeme vyrobit z polotovaru hotový výrobek, který má požadované rozměry, tvar a jakost povrchu obráběných ploch podle přání zákazníka. Do jedné třetiny všech operací, které jsou prováděny na součástech, patří obrábění. Hlavní cíle konstruktérů, designérů, technologů a projektantů jsou, aby výsledná součást byla nejvíce ekonomická a hospodárná. Ze začátku byly používány konvenční obráběcí stroje, kde pro jejich správnou funkci záleželo hlavně na lidském faktoru, který při volbě parametrů obrábění, nástrojů vycházel ze svých zkušeností a poznatků z minulosti, které následně použil na obráběcím stroji.

V současné době je směr vývojového trendu ve strojírenství v oblasti obráběcích strojů, které jsou dány použitelností výpočetní techniky pro řízení strojů. Předpoklady pro dosažení nejlepších technologických vlastností při obráběcích operacích. Výpočetní technikou je nahrazen lidský element řídicím systémem počítače. Vybavení obráběcího stroje je CNC řídicí systém, který je schopen opakovaně dosáhnout tvarové, rozměrové přesnosti i u tvarově složitých výrobků. Při výrobě složitých součástí se používá obrábění ve více osách, které je standardně řešeno použitím CAM systémů, které umožňují v efektivním strojním čase splnit náročné požadavky zákazníků. Z důvodu současného trendu, kdy je potřeba neustálého zvyšování produktivity výroby se zavádí ve firmách pojem tzv. „štíhlá výroba“. Štíhlá výroba je úplná automatizace výrobních linek, kdy je lidský faktor nahrazen CNC obráběcími centry s manipulatory a roboty. Tento trend je možný pouze v hromadné výrobě.

V teoretické části se zabývám obecně frézováním (princip, metody frézování, stroje, frézovací nástroje). Následně problematikou, která se zabývá vyhodnocením drsnosti povrchu obrobených ploch, kde jsou uvedeny základní parametry struktury povrchu s pravidly pro hodnocení povrchu.

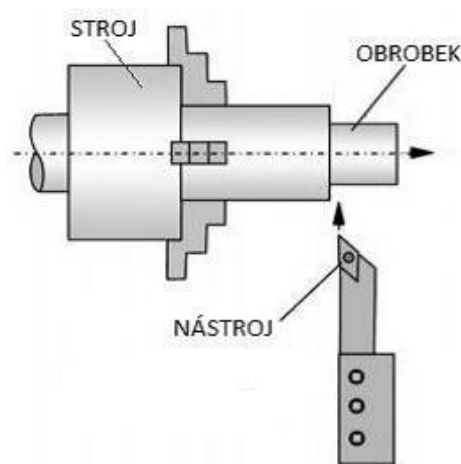
Praktická část je zaměřena na vytvoření 3D modelu, obráběcích strategií a následného vygenerování NC kódu. Následně byly obrobeny všechny plochy se zvolenými metodami obrábění a na obrobených plochách byla změřena drsnost povrchu. Naměřené data byly statisticky vyhodnoceny a výsledky porovnány.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 KONVENČNÍ OBRÁBĚNÍ - POJMY A DEFINICE

Obrábění je technologický proces, při kterém dochází k vytvoření povrchu obrobku určitého tvaru, rozměru a jakosti. Odebráním částic materiálu pomocí účinků mechanických, elektrických, chemických a případně jejich kombinacemi. Odebrání částic lze nazvat, jako řezání nebo taky řezný proces. Řezání je obrábění, kde dochází k úběru materiálu ve tvaru třísky břitem (ostřím, řeznou hranou) řezného nástroje. Podle způsobu, kterým lze dělit materiál, rozdělujeme řezný proces na kontinuální (soustružení, vrtání, vyvrtávání), diskontinuální (hoblování, obrážení) a cyklický (frézování, broušení). Proces je realizován v soustavě obrábění (SNOP). Soustava je složena ze čtyř částí. V některých případech se uvažují pouze tři části, kde je vynechán přípravek. [1]

- Obráběcí stroj
- Řezný nástroj
- Obrodek
- Přípravek



Obr. 1 Soustava stroj – nástroj – obrodek

Obrodek je objekt obráběcího procesu. Z geometrického hlediska lze popsat rozměry a tvary jednotlivých ploch. Přídavek je vrstva materiálu mezi obráběnou a obrobenou plochou obrobku, kterou je potřeba obráběním odstranit. Odebraná vrstva je součástí přídavku přikloněná k ploše řezu, která je odebrána břitem ve formě třísky. Tříska je odebíraná vrstva materiálu obrobku.

1.1 Rozdělení metod obrábění

Metody lze dělit podle různých kritérií.

Podle charakteru vykonané práce:

- **Ruční** (Práce vytvořena člověkem pomocí ručních nástrojů např. řezání, sekání, rovnání, pilování. Patří sem taky práce vykonávané ručními ovládacími stroji. Kvalita a produktivita je závislá na zručnosti pracovníka. Produktivita je vzhledem ke stavu techniky na nízké úrovni.)
- **Strojní** (K obrábění je zapotřebí energie, která je dodávána obvykle v elektrické formě k obráběcímu stroji, kde se mění v energii mechanickou, využívanou pro realizaci obráběcího procesu.)

Podle charakteristických znaků břitové geometrie nástroje:

- obrábění s definovanou geometrií břitu (soustružení, frézování, vrtání, vyhrubování, vystružování, vyvrtávání, hoblování a obrážení, protahování)
- obrábění s nedefinovanou geometrií (broušení, honování, lapování)
- nekonvenční metody obrábění (elektroerozivní, chemické, ultrazvukem, laserem, vodním paprskem)
- úpravy obrobených ploch (válečkování, leštění, hlazení, brokování)

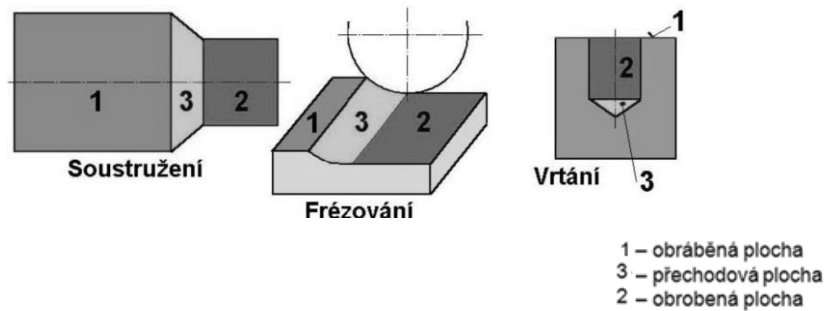
Podle charakteru záběru řezání:

- plynulé řezání (řezný klín je po celou dobu řezání stále v záběru)
- přerušované řezání (řezný klín střídavě vchází do záběru a vychází ze záběru, typickým příkladem takového řezání je frézování) [2]

1.2 Obrobek

Při obráběcím procesu lze charakterizovat z geometrického hlediska 3 základní plochy:

- obráběná plocha (jde o část povrchu obrobku, z níž bude odebírán materiál)
- obrobená plocha (je získaná jako výsledek řezného procesu, určena svými rozměry, tvarem, polohou a vlastnostmi povrchové vrstvy.)
- přechodová plocha (vzniká působením ostří nástroje během procesu nebo otáčky nástroje během samotného řezného procesu)

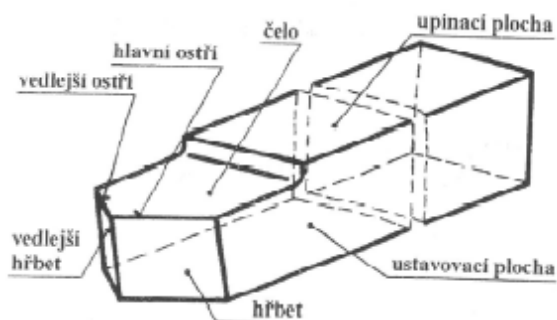


Obr. 2 Základní plochy na obrobku [3]

Obecně lze chápat, že obrobená plocha je soubor technologických faktorů, které vznikají na základě vstupních parametrů výrobního stroje, řezného nástroje, obrobku, přípravků a hlavně za daných řezných parametrů procesu. Nesmíme zapomenout, že technologické vlivy na parametry obrobené plochy lze rozdělit taky na systematicky konstantní (chyba v seřízení stroje, odchylkou rozměru a tvaru nástroje), systematicky proměnné (opotřebení, únava nástroje za působení tepelné deformace prvků obráběcího ústrojí), náhodné (nesprávná volba materiálu, nesprávný výpočet přídavku na obrábění). [2]

1.3 Řezný nástroj

Je aktivní prvek při obrábění, který se skládá z dvou částí (řezná část a upínací část). Řezná část (břit) má tvar klínu ohraničeného plochou čela (odchází tříška) a plochou hřbetu. Průsečnice ploch čela a hřbetu je ostří (hlavní a vedlejší ostří). Nástroj je upínán za upínací část (stopka) nástroje, která je tvořena upínací plochou, boční plochou a ložnou plochou (základna). [3]

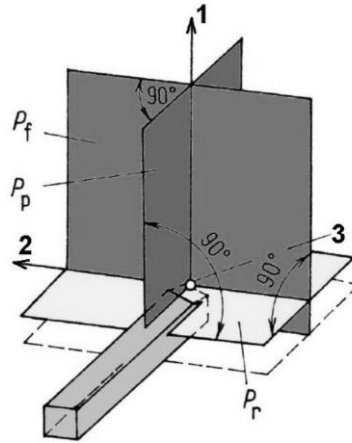


Obr. 3 Nástroj – základní pojmy [1]

Nástrojové roviny a úhly

Nástrojové roviny a úhly jsou důležité pro konstrukci, výrobu, kontrolu a ostření. Roviny, které jsou obsaženy na nástroji, se nazývají nástrojové roviny. Úhly jsou nepostradatelným parametrem pro zjištění geometrické polohy hřbetu, čela, ostří. Nástrojové úhly

jsme schopni zjistit v nástrojové souřadnicové soustavě. Pracovní úhly se určují v pracovní souřadnicové soustavě. Základní definice rovin a grafická znázornění jsou upřesněny na obrázku 4 pro soustružnický nůž. [2]



Obr. 4 Roviny nástroje [3]

Nástrojová rovina základní P_r je rovina procházející uvažovaným bodem ostří a je kolmá na předpokládaný směr hlavního řezného pohybu.

Nástrojová rovina hlavního ostří P_f je rovina procházející uvažovaným bodem ostří, leží v ní vektor posuvového pohybu v_f a je kolmá na rovinu základní P_r .

Nástrojová rovina ortogonální P_p je rovina procházející uvažovaným bodem ostří, kolmá na nástrojovou rovinu základní P_r a na nástrojovou rovinu boční P_f .

Geometrie břítu

V ortogonální rovině:

úhel hřbetu α – úhel mezi tečnou rovinou plochy hřbetu a rovinou P_f

úhel břítu β – úhel mezi tečnou rovinou plochy čela s tečnou rovinou plochy hřbetu

úhel čela γ – úhel mezi tečnou rovinou plochy čela a roviny P_f

– může nabývat kladné ($+\gamma$) nebo záporné ($-\gamma$) hodnoty

$$\alpha + \beta + \gamma = 90^\circ \quad (1)$$

úhel řezu δ – úhel mezi tečnou rovinou plochy čela a roviny P_f

$$\alpha + \beta = \delta \quad (2)$$

V základní rovině:

úhel nastavení hlavního ostří κ – úhel mezi rovinou P_f a směrem posuvu nástroje

úhel nastavení vedlejšího ostří κ' – úhel mezi rovinou $P_{f'}$ a směrem posuvu nástroje

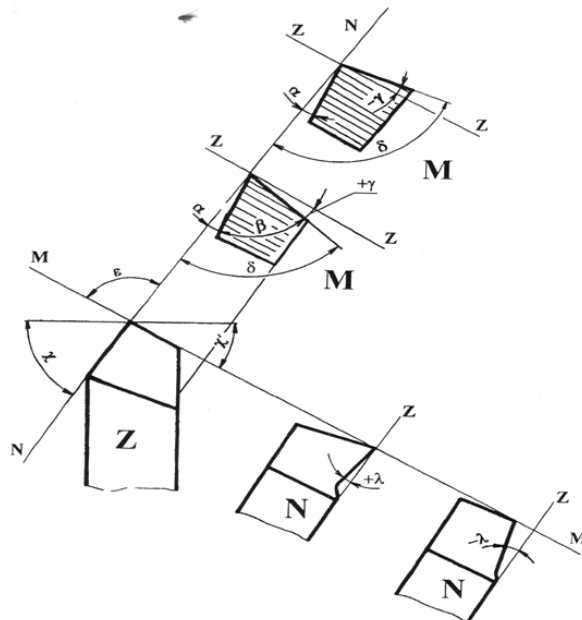
úhel špičky nástroje ε – úhel mezi rovinou P_f a $P_{f'}$

$$\kappa + \kappa' + \varepsilon = 180^\circ \quad (3)$$

V rovině hlavního ostří:

úhel sklonu ostří λ – úhel mezi tečnou přímkou ostří a rovinou Z

– může nabývat kladné ($+\lambda$) nebo záporné ($-\lambda$) hodnoty [1]



Obr. 5 Úhly nástroje [1]

1.4 Pohyby při obrábění

Hlavní řezný pohyb je pohyb mezi obrobkem a nástrojem, který vykonává obráběcí stroj. Směr hlavního řezného pohybu je definován jako směr okamžitého hlavního pohybu uvažovaného bodu ostří. Při frézování jde o rotační pohyb obrobku, při hoblování je to přímočarý pohyb obrobku.

Vedlejší řezný pohyb je realizován jako další pohyb mezi nástrojem a obrobkem. Směr jeho pohybu je kolmý na hlavní řezný pohyb obráběcího stroje. Vedlejší řezný pohyb je nazýván jako posuv. U některých způsobů obrábění tento pohyb není.

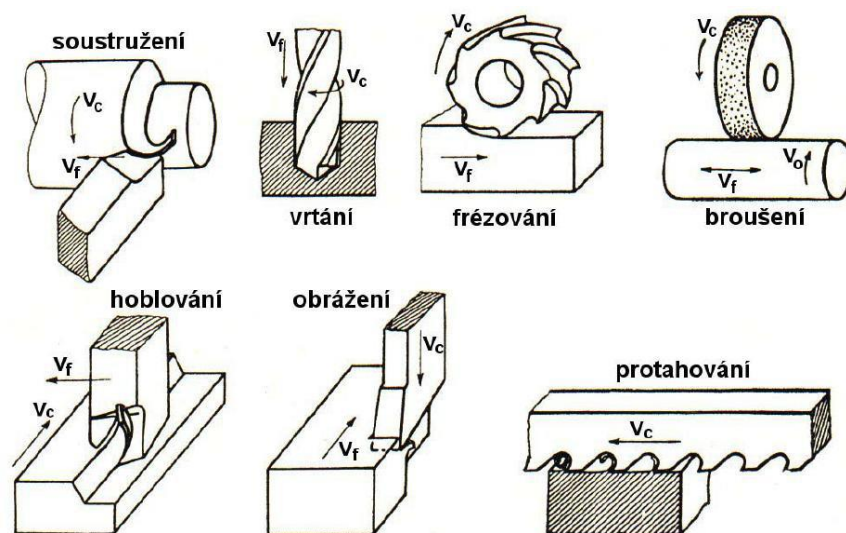
Výsledný řezný pohyb je vycházející pohyb ze současného hlavního a posuvového pohybu. Je dán vektorovým součtem obou pohybů.

Řezná rychlost v_c je daná jako okamžitá rychlost hlavního řezného pohybu uvažovaného ostří vzhledem k obrobku.

Posuvová rychlost v_f je určena jako okamžitá rychlost posuvového pohybu v uvažovaném bodě ostří.

Přísuv je velikost přisunového pohybu, kterým se nastavuje nástroj do pracovní polohy na požadovanou šířku záběru a_p .

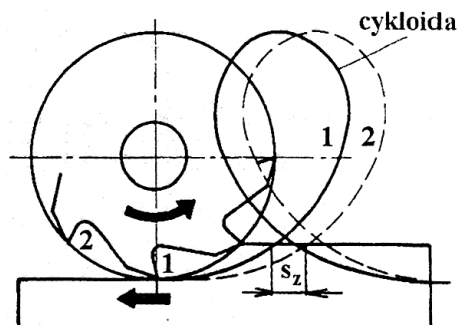
Hloubka řezu je záběr ostří měřený kolmo na směr posuvového pohybu. Obvykle se jedná o vzdálenost mezi obráběnou a obrobenou plochou. [1]



Obr. 6 Hlavní a posuvový pohyb u metod obrábění [2]

2 FRÉZOVÁNÍ

Jde o třískovou obráběcí metodu, kdy se obrábějí rovinné, tvarované plochy kolmé k jedné (vodorovné) rovině nebo zcela obecné plochy materiálu otáčejícím se vícebřitým nástrojem válcového tvaru. Při otáčení frézy (hlavní řezný pohyb) dochází k vzájemnému posouvání ve směru kolmém k ose rotace (vedlejší řezný pohyb) k úběru materiálu. Řezný proces je přerušovaný, každý zub frézy odřezává krátké třísky proměnné tloušťky. Velkou výhodou této metody je poměrně velká výkonnost při velké kvalitě obrobenej plochy. [4]



Obr. 7 Frézování

2.1 Druhy frézování

Frézování lze dělit podle různých hledisek:

- tvaru frézované plochy (frézování rovin, drážek, profilů nebo obecných ploch)
- směru pohybu posuvů vzhledem ke směru rotace frézy (frézování sousledné, nesousledné)
- vzájemné polohy nástroje a obrobku (frézování čelní, obvodové)

2.1.1 Obvodové frézování

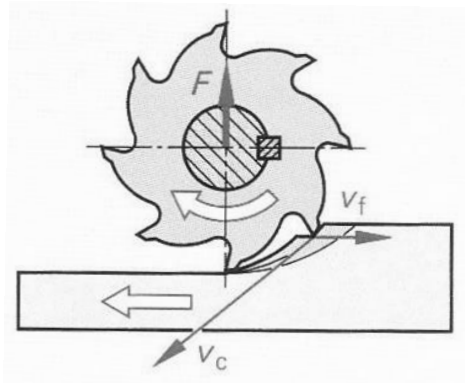
Válcové frézování se převážně uplatňuje při práci s válcovou a tvarovou frézou. Zuby frézy jsou vytvořeny jen po obvodu nástroje. Hloubka odebírané vrstvy se nastavuje kolmo na osu frézy a na směr posuvu. Odebíraná plocha je rovnoběžná s osou otáčení frézy. Šířka válcových fréz je vždy větší než jejich průměr. V závislosti na kinematice obráběcího procesu se rozlišuje frézování sousledné a nesousledné. [2]

2.1.1.1 Sousedné frézování

U sousledného obvodového frézování má posuv a řezný pohyb stejný směr. Proces začíná nárazem břitu do materiálu a průřez třísky se mění od maximální hodnoty do nulové. Fréza je od výrobku odtlačována. Při obrábění klesá i výsledná řezná síla, proto jsou zde kladeny menší nároky na upnutí. Kvalita obrobené plochy ve srovnání s nesousledným frézováním je lepší. Další výhoda spočívá v delší trvanlivosti nástroje a výkon při nesousledném frézování je vyšší cca o 40 až 50 % než při sousledném frézování při stejně dané trvanlivosti nástroje. Tuto metodu lze provádět jen na upravených strojích, které jsou opatřeny posuvovými mechanismy bez vůle. Většinou se využívá na obrábění odlitku nebo válcových polotovarů, které nesmějí být obrobeny nesousledným frézováním.

Tab. 1 Sousedné frézování

Výhody	Nevýhody
<ul style="list-style-type: none"> • vyšší trvanlivost břitu • menší potřebný řezný výkon • jednodušší upnutí • menší riziko ke chvění 	<ul style="list-style-type: none"> • posuvové mechanismy bez vůle



Obr. 8 Sousedné frézování [4]

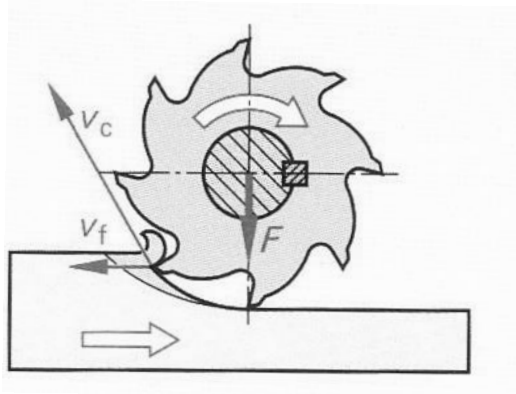
2.1.1.2 Nesousledné frézování

Při nesousledném obvodovém frézování zvětšuje posuv řeznou rychlost, protože směr otáčející se frézy není totožný se směrem posuvu. Nástroj se otáčí proti směru posuvu. Před vniknutím břitu do materiálu klouže břit po povrchu a hřbet je opotřebován. Tříška začne vznikat až při dosažení určitého tlaku, při určité hloubce řezu. U této metody se postupně zvětšuje tloušťka třísky, kdy břit vniká do materiálu s nulovou tloušťkou. Při samotném

procesu roste celková řezná síla, která má tendenci obrobek zvednout, proto jsou kladeny větší nároky na upnutí obrobku. Ke zvednutí většinou dochází uprostřed velkého zahloubení s tenkým dnem. Tato metoda je využívána pro obrábění odlitků i válcových polotovárů, kde nehrozí k vylomení břitu na tvrdém povrchu. [5]

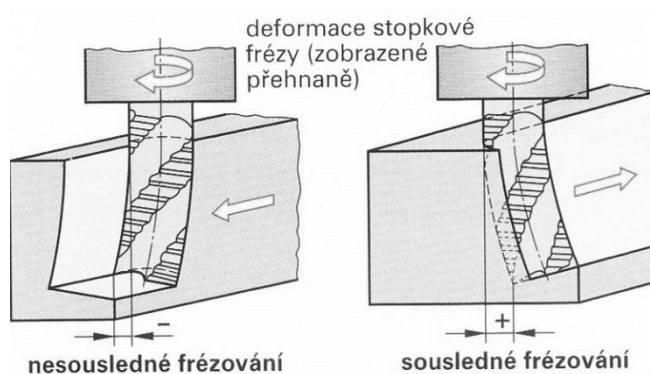
Tab. 2 Nesousledné frézování

Výhody	Nevýhody
<ul style="list-style-type: none"> • menší opotřebení šroubů a matice • trvanlivost nástroje nezávisí na okujích, písčitém povrchu obrobku • menší řezný výkon 	<ul style="list-style-type: none"> • větší nároky na upnutí obrobku



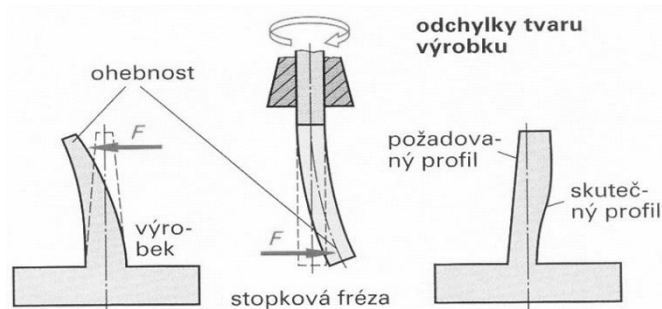
Obr. 9 Nesousledné frézování [4]

Řezné síly při nesousledném frézování mají tendenci se k obrobku přitahovat a při sousledném frézování naopak od obrobku odtlačovat. Tyto odtlačující síly mají velký význam na výsledné přesnosti výrobku tím více, čím menší je tuhost obrobku popřípadě tuhost nástroje nebo jeho upnutí ve stroji.



Obr. 10 Ohýbání stopkové frézy při obrábění [4]

Elastické změny tvaru obrobku i nástroje se po vyjetí frézy ze záběru vrátí zpět a v důsledku menších odběrů neodpovídá tvar výrobku nastaveným hloubkám řezu. Při profilovém frézování mění řezné síly elasticky tvar stopkových fréz i tenkostěnných obrobků. Důsledkem mohou být nepřesnosti tvarové i rozměrové. K podobným nepřesnostem dochází, když se po vyfrézování ztuhne povrchová vrstva z jedné strany změni rovnováha sil vnitřního pnutí a obrobek se po následném uvolnění upínacích přípravků prohne. [5]



Obr. 11 Vznik odchylek tvarů elastickými deformacemi frézy [4]

2.1.2 Čelní frézování

Při čelním frézování je osa nástroje kolmo k obráběné ploše. Nástroj odebírá materiál břity na čelní ploše, ale i současně břity na obvodu. Velikost odebírané třísky nabývá hodnot od minima do maxima podle daného průměru frézy a šířky obráběné plochy. Výhodou této metody je velká výkonnost s porovnáním se sousledným a nesousledným frézováním, protože při obrábění současně zabírá více zubů, proto se většinou volí větší posuvy stolu. Při použití poměru B/d lze čelní frézování dělit na dva způsoby.

$$\frac{\text{šířky frézované plochy } (B)}{\text{průměru frézy } (D)} \quad (4)$$

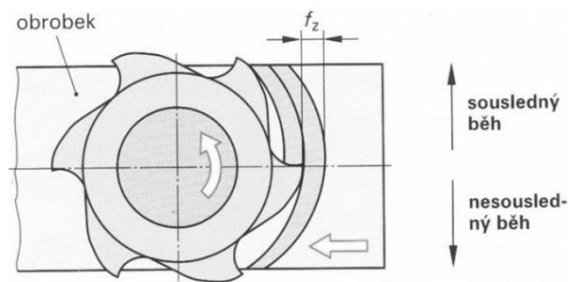
Symetrické

- plocha materiálu je obrobena na jeden posuv
- průměr frézy je větší než šířka obrobku

Nesymentrické

- průměr frézy je menší než šířka materiálu
- plocha materiálu je obrobena na více posuvů

S ohledem na problematiku sousledného a nesousledného frézování se při symetrické poloze nástroje vůči obrobku účinky posouvých sil ve směru posuvu vyrovnávají. [2]

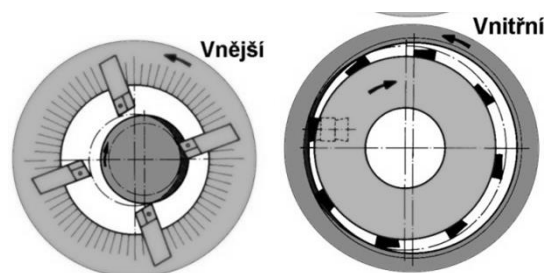


Obr. 12 Nesousedné a sousledné čelní frézování [4]

2.1.3 Speciální druhy frézování

Okružní frézování

Tento druh frézování je používán pro obrábění dlouhých válcových tyčí a při výrobě vnitřních a vnějších závitů na obrobku. Nástroj (frézovací hlava) je osazen více noži. Při frézování tyčí se nástroj otáčí a zároveň posouvá. Při řezání závitů se pouze otáčí a následující pohyby k vytvoření závitů vykonává obrobek.



Obr. 13 Okružní frézování [6]

Planetové frézování

Nachází uplatnění převážně u číslicově řízených strojů a obráběcích center, které musí být vybaveny kruhovou interpolací dráhy nástroje, která musí být po kružnici. Tento posuv po kružnici nám umožňuje frézovat celé rotační plochy nebo jenom jejich části. Možnosti využití jsou u vnitřních závitů, kruhových zaoblení, vnějších válcových výstupků a větších otvorů. [6]

2.2 Řezné podmínky (parametry obrábění)

Hlavní rotační pohyb u všech druhů frézování koná nástroj, posuvový pohyb je většinou přímočarý a koná ho obrobek, u okružního a planetového frézování může být i rotační a konat ho může obrobek nebo nástroj. Řezná rychlost v_c se určuje v závislosti na materiálu

obráběného obrobku a na materiálu frézy. Jsou respektovány doporučené rychlosti pro hrubovací a dokončovací operace. Řezná rychlost se vypočítá ze vztahu. (5)

$$v_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} [m \cdot \min^{-1}] \quad (5)$$

kde: D – průměr nástroje [mm]

n – otáčky nástroje [\min^{-1}]

v_c – řezná rychlost [$m \cdot \min^{-1}$]

Základní veličinou posuvového pohybu je posuv na zub f_z [mm]. Je to délka dráhy obrobku za dobu záběru zubu. Z posuvu na zub f_z lze vypočítat posuv na otáčku f_n , jako délka dráhy, kterou ujede obrobek po dobu jedné otáčky frézy.

$$f_n = f_z \cdot z [mm] \quad (6)$$

kde: f_z – posuv na zub [mm]

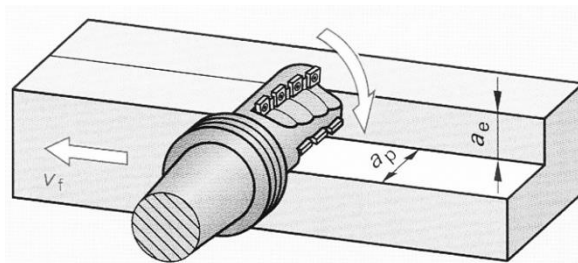
z – počet břitů na nástroji [-]

Posuvová rychlost (v_f) je určena vztahem z posuvu na jednu otáčku, počtu břitů frézy a otáček nástroje. [2]

$$v_f = f_n \cdot n \quad (7)$$

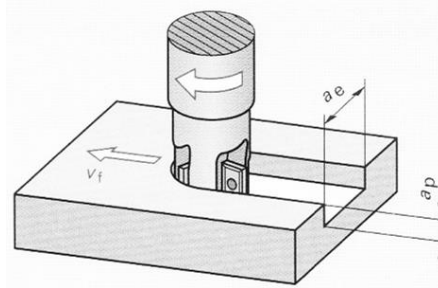
$$v_f = f_z \cdot z \cdot n [mm \cdot \min^{-1}] \quad (8)$$

Šířka řezu, šířka frézování nebo šířka záběru charakterizuje šířku odřezávaného materiálu ve směru kolmém k ose posuvu frézy. Při obvodovém frézování označujeme šířku řezu a_p , jako nastavenou radiální hloubku záběru obvodové nebo kotoučové frézy.



Obr. 14 Hloubka řezu a_p při obvodovém frézování [4]

Hloubka řezu a_p se charakterizuje při frézování ploch nebo drážek obráběných stopkovou frézou, jako axiální (ve směru osy) hloubka řezu (záběru). Hloubka řezu má velký vliv na následný objem odfrézovaného materiálu.



Obr. 15 Hloubka řezu a_p a šířka záběru a_e [4]

Velikost úběru materiálu Q udává objem odebraného materiálu za minutu a je mírou výkonnosti a hospodárnosti obrábění.

$$Q = a_e \cdot a_p \cdot v_f \left[\frac{\text{cm}^3}{\text{min}} \right] \quad (9)$$

Dalším důležitým vztahem při určování parametrů obrábění je správně zvolena frézka podle kapacity výkonu motoru (vřetene).

$$P_c = \frac{a_e \cdot a_p \cdot v_f \cdot k_c}{60 \cdot 10^6} [\text{kW}] \quad (10)$$

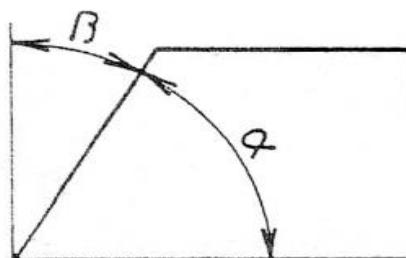
kde: k_c – měrná řezná síla [$\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$]

Výkon motoru:

$$P_{mot} = \frac{P_c}{\eta} [\text{kW}] \quad (11)$$

2.3 Frézování spojených ploch šikmých

Nakloněné (šikmé) roviny jsou takové plochy, které svírají jiný úhel než pravý. Před frézováním těchto nakloněných rovin většinou předchází obrábění pravoúhlých ploch. Každá šikmá plocha je určena úhlem sklonu, což je úhel odklonu šikmé plochy od vodorovné roviny. Tento úhel označujeme jako α nebo lze vyjádřit i doplňkový úhel do 90° β (úhel šikmé plochy od svislé roviny).



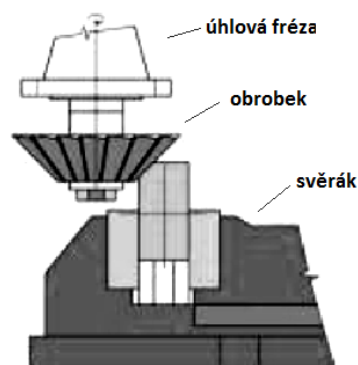
Obr. 16 Úhly šikmých ploch

Rozdílné tvary šikmých ploch lze frézovat 5 základními způsoby, kde správné použití jednotlivých způsobů je závislé na více faktorech.

- na velikosti obrobku
- na počtu vyráběných součástí
- na umístění šikmé plochy na obrobku
- na velikosti šikmé plochy
- na tuhosti obrobku a celé technologické soustavy – stroj, nástroj, obrobek

2.3.1 Frézování nakloněných ploch úhlovou frézou

Úhlové frézy rozdělujeme na jednostranné nebo oboustranné. Oboustranné dále můžeme dělit na souměrné a nesouměrné. Pro obrábění nakloněných spojených ploch používáme jen frézy oboustranné. Hlavní nevýhodou úhlové frézy je, že má jen krátký břit, proto se používají na úzké šikmé plochy o určitém úhlu sklonu, který musí být totožný s úhlem sklonu břitu frézy. Používané stroje jsou většinou rovinné frézky a jejich součástí musí být nastavení rovnoběžné polohy s podélným směrem posuvu stolu frézky. Při použití svislé frézky jsou úhly sklonu břitu a úhel frézované plochy současně doplňkové. Při frézování na vodorovné frézce jsou tyto úhly totožné. [7]

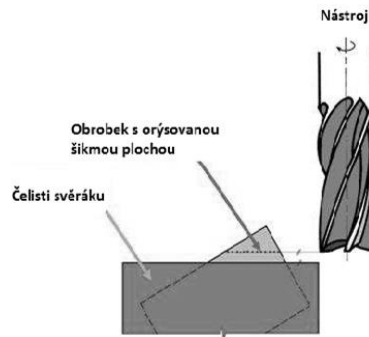


Obr. 17 Úhlová fréza [7]

2.3.2 Frézování nakloněných ploch podle orýsování

Základním znakem frézování nakloněných ploch podle orýsování je, že obrobek je ustanoven pomocí orýsování. Upevnění obrobku do svěráku je provedeno tak, aby ryska byla rovnoběžná s čelistmi svěráku a vodorovnou plochou upínacího stolu frézky. Po ustanovení obrobku se musí hrana podložky s rýskou překrývat. Kontrolu správné polohy provádíme pomocí hrotu výškoměrného nádrhu. Po kontrole ustavení podložku z čelisti odejmeme

a můžeme obrobit žádanou plochu. Je-li nakloněná plocha dobře ofrézovaná, polovina důlků na součásti zůstane. Oblast využití této metody je jen v kusové výrobě, kde není kladen velký důraz na přesnost frézované plochy. Provádíme na svislých a rovinných frézkách.



Obr. 18 Frézování podle orýsování [7]

2.3.3 Frézování nakloněných ploch pomocí podložek

Pro tento způsob frézování jsou potřeba speciálně zhotoveny úhlové podložky, které jsou vkládány do svěráku nebo upevněny přímo na stůl frézky pomocí upínek a šroubů. Pro správné upnutí a dotažení je potřeba podložku poklepat, která zaručuje požadovanou polohu obrobku. Velkou výhodou je, že lze frézovat šikmé plochy válcovými i čelními frézami. Operace jsou prováděny na svislých frézkách. Oblasti využití jsou v sériové i velkosériové výrobě, z důvodu rychlosti upnutí obrobku. Různé typy úhlových podložek jsou jako součást příslušenství frézek a rozdělujeme podložky na dvě základní skupiny.

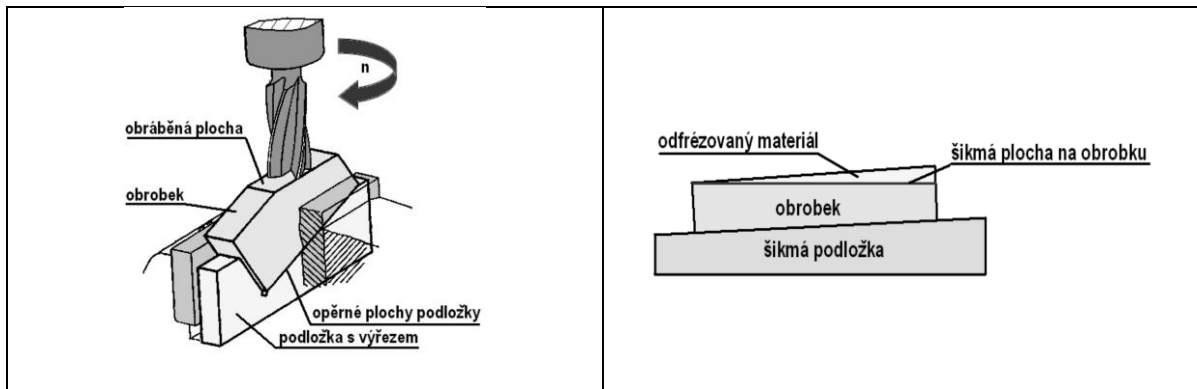
a) Šikmá podložka s výřezem

Podložka je vyrobena s patřičným výřezem šikmé plochy a vkládána mezi svěrák, kde je vložen obrobek do výřezu. Celá sestava je řádně upnutu ve svěráku a doklepnuta. Jednotlivými průchody frézujeme nakloněnou plochu součásti. Umožňuje rychlé a přesné ustanovení menších rozměrů (šířky) ve svěráku a operace jsou prováděny na svislých, rovinných frézkách. Uplatnění je v sériové výrobě, protože pro každou součást by nebyla výroba ekonomická a bylo by zapotřebí velkého množství těchto tvarově upravených podložek. [7]

a) Šikmá podložka bez výřezu

Je používáno, kde nejde provést upnutí do svěráku a slouží k ustanovení součásti na stole svislé frézky. Samotné upnutí je provedeno pomocí nejméně tří upínek, šroubů a podložek. V průběhu frézování měníme polohu upínek vůči poloze frézy. Využívá se pro zhotovení nakloněných dlouhých ploch o malém úhlu sklonu. Používané druhy fréz jsou většinou

čelní válcové. Pro správnou velikost frézy volíme průměr takový, aby byl nezbytně velký pro odfrézování celé šířky plochy.



Obr. 19 Frézování nakloněných ploch pomocí podložek [7]

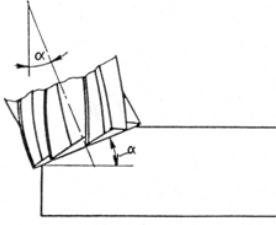
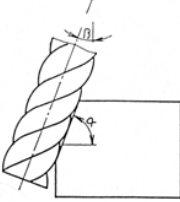
2.3.4 Frézování nakloněných ploch pomocí sklopného svěráku

Nevýhodou tohoto způsobu frézování je, že můžeme obrábět jen na svislých frézkách, protože sklopná upínací jednotka svěráku by na vodorovné frézce neprošla pod upínacím trnem válcové frézy. Výškový rozměr svěráku je poměrně vysoký, proto používáme pro součásti menších rozměrů a konstrukce nedosahuje dostatečné tuhosti upnutí. Sklopné svěráky patří ke zvláštnímu příslušenství frézek, rozsah natočení svěráku bývá v rozsahu 0 až 44° na obě strany, rozsah vyklonění bývá -30 až +60°.

2.3.5 Frézování nakloněných ploch vykloněním vřetena frézovací hlavy

Frézování se provádí ve většině případů na svislých frézkách se svislým vřetenem. Výhoda spočívá, že vřeteník je uložen otočně a možné vychýlení je na obě strany až do 45° (úhel vyklonění odečítáme na úhlové stupnici). Pro frézování jsou používány válcové a čelní frézy, kde odebíráme materiál šikmé plochy posuvem. Důraz je kladen na správné upnutí součásti, protože obráběná plocha není rovnoběžná s plochou stolu frézky, proto musí být upínací zařízení (svěrák) upevněno tak, aby jeho upínací plochy čelistí byly kolmé na příčný posuv stolu frézky. Úhel sklonu vytvářené plochy může být v rozmezí 0 až 90° a úhel svislého vřetene frézky můžeme měnit jen maximálně o 45°, platí zde proto tyto dvě zásady. [7]

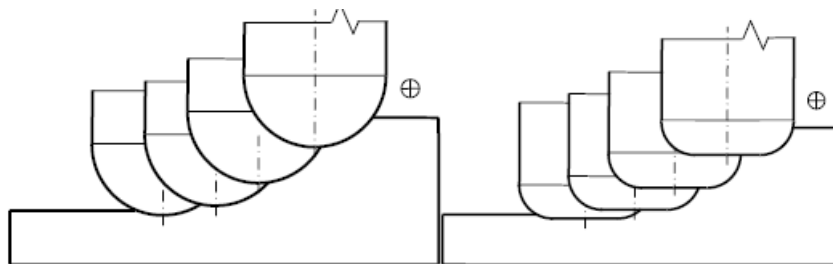
Tab. 3 Vyklonění vřetenové hlavy

$\alpha > 45^\circ$	$\alpha < 45^\circ$
vykloní vřetenovou hlavu o tento úhel frézujeme čelní plochou válcové frézy	vykloníme vřetenovou hlavu o úhel $\beta=90-\alpha$ frézujeme válcovou plochou stopkové frézy
	

2.3.6 Frézování nakloněných ploch kulovou frézou

Tento způsob obrábění nakloněných ploch se používá pro složitější obecné, tvarové plochy (frézování kapes, dutin, kontur). Veškeré uplatnění nachází při CNC 3osém frézování. Princip této metody je založen na předem správně zvolené kulové nebo stopkové frézy s rádiusem v rohu, která obrábí tvarovou plochu po malých hloubkách řezu.

Při obrábění tvarové plochy frézou dochází vlivem velikosti hloubky řezu (kroku přejezdů), radiusu nástroje a zakřivení povrchu ke vzniku výstupků na obrobeném povrchu. Proto čím větší jsou tyto hodnoty, tím se na materiálu objevují výstupky a kvalita obrobené plochy nemusí být dostačující. V softwarech pro vytvoření CNC programu je možné nastavit individuálně hloubku řezu nebo lze zadat předem požadovanou drsnost povrchu a software je schopen spočítat, s jakou hloubkou řezu musí obrábění provádět. Mezi hlavní nevýhody této metody může být dlouhý strojní čas. Na tuto problematiku byly dělány různé výzkumy a bylo zjištěno, že neexistuje nejvýhodnější strategie pro obrábění kapes různých tvarů a druhů vybrání. U experimentů nebyla zvažovaná kvalita obrobené plochy, přesnost výroby a trvanlivost nástroje. [8]



Obr. 20 Obrábění kulovou frézou a frézou toroidní [8]

3 FRÉZOVACÍ STROJE

Univerzální frézky jsou zapotřebí při výrobě náradí, forem a při zhotovení prototypů nebo malých sérií. Frézovací stroje nazýváme frézky, jsou vyráběny a dodávány v širokém počtu typů, velikostí, často taky s rozsáhlým speciálním příslušenstvím. Velikost potřebné frézky je určena délkou upínací plochy stolu a velikostí vřetene pro upnutí nástroje. Další technické parametry stroje jsou maximální délka pohybu vřetene nebo stolu, velikost otáček vřetene, rozsah posuvů, výkon elektromotoru pro otáčení vřetena. Frézky lze rozdělit do základních skupin podle základních typů a podle řízení pracovního cyklu.

3.1 Rozdělení frézovacích strojů

- Konzolové

Jsou používány nejčastěji jako vodorovné (horizontální), svislé (vertikální) a univerzální. Po konzole, která se posouvá po vedení stojanu stroje, se pohybuje pracovní stůl. Konzola má svislý pohyb stolu a stůl má příčný a podélný posuv. Pomocí šroubů a matic se uskutečňuje pohyb obrobku ve třech osách.

- Stolové

Stolové frézky neobsahují konzolu a obvykle mají příčný a podélný stůl. Pohyb ve svislém směru pro nastavení nástroje vzhledem k obrobku je zajištěn přemísťováním vřeteníku po vedení stroje. Výhodou stolových frézek je, že můžeme kvalitně a produktivně obrábět i rozměrnější (těžší) součásti. Jsou vyráběny ve vodorovném a svislém provedení.

- Rovinné

Rovinné frézky se používají k opracování velkých a těžkých obrobků. Jsou vhodné pro obrábění vodorovných, svislých a šikmých ploch na těžkých obrobcích. Váhu obrobku a řezné síly nesou tuhé lože stroje, které zaručují přesný pohyb podélných saní. Absence svislého posuvu konzolového stolu nahrazuje svislý pohyb vřeteníku na svislém stojanu nebo pohyb příčnicku na stojanech. Příčný posuv zajišťuje pohyb vertikálního vřeteníku. Vřeteníky jsou na sobě nezávislé a také mají samostatný motor s převodovkou.

- Speciální

Kopírovací frézky dělíme na mechanické, hydraulické a elektrokontaktní. Kopírování se provádí ve vodorovných nebo svislých souřadnicích, poloautomaticky nebo automaticky. Další speciální frézky jsou frézky na ozubení, na závity, na vačky a pantografické. [1]

Podle pracovního cyklu

- Ovládané ručně

Manuálně ovládané frézky se všemi posuvy se používají při obrábění jednoduchých výrobků a v opravářských dílnách.

- Řízené programově

Tyto stroje mohou mít pracovní vřeteník s vodorovnou nebo svislou osou. Lze u těchto strojů předem programovat smysl, rychlost a délku posuvu ve všech osách (x, y, z) nebo rychlost otáčení vřetene. Je možné programově měnit nástroj, kdy obráběcí centra mají zásobník na 10 až 60 nástrojů. Pohyb všech suportů je realizován pomocí elektrohydraulických pohonů přes kuličkové šrouby. Pohyblivé části strojů jsou uloženy valivě bez vůle.

3.2 CNC stroje (frézky)

Číslicově řízené stroje se liší v mnoha aspektech od konvenčních strojů např. požadovaná přesnost tvarů, rozměrů, dosažená drsnost obrobené plochy, bezproblémový chod stroje, jednoduchá obsluha, odebrání třísek. CNC stroje mají charakteristické parametry.

- optimální pracovní režim
- vysoká tuhost, přesnost provedení s velkou životností a přesností vodících ploch
- přesné polohování samotných strojních součástí za pomoci odměřovacích členů a servomechanizmů pro polohovací obvody
- snadná a plně automatická výměna nástrojů
- stabilní teplotní pole
- na stroji nejsou žádné ovládací prvky, stroj je ovládaný z panelu
- automatický odvod třísky [8]

Tab. 4 Výhody a nevýhody CNC strojů

Výhody	Nevýhody
<ul style="list-style-type: none"> • velká produktivita výroby • zvýšená přesnost výrobků • zkrácení strojního času • větší využití stroje • optimalizace pracovních podmínek • úspora výrobních a skladových ploch 	<ul style="list-style-type: none"> • vyšší cena výrobků • zvýšené nároky na technologickou přípravu • zvýšené nároky na kvalifikaci obsluhy • zvýšené nároky na organizaci

3.2.1 Rozdělení CNC strojů

CNC stroje se rozdělují podle množství operací, které se na nich dají dělat nebo podle počtu současně řízených os.

Tab. 5 Rozdělení CNC strojů

Pro jeden druh operace	CNC soustruhy
	CNC frézky
	CNC vrtačky, vyvrtávačky
Pro více druhů operací na jedno upnutí	Obráběcí centra určené pro výrobu rotačních hřídelových obrobků
	Obráběcí centra určené pro výrobu výrobků skříňového typu
	Obráběcí centra pro obrábění jak rotačních tak obecných součástí
Podle počtu současně řízených os	1 osé (CNC vrtačky)
	2 osé (CNC soustruhy)
	3 osé (CNC frézovačky)
	4 a více osé (obráběcí centra)

3.2.2 2,5osé obrábění

Zde můžeme řídit současně dvě souřadné osy v různých pracovních rovinách a třetí osu v dalším kroku. Je možné nastavit parametry řezného procesu, které jsou posuv, otáčky nebo volba nástroje. Trajektorie nástroje se nachází vždy mezi dvěma rovinami, které jsou definované body po přímkové nebo kruhové dráze. Tuto metodu řízení nástroje lze uplatnit u následujících technologií (frézování pravoúhlých a rovinných tvarů, vrtání, závitování, sražení hran). V současnosti se tato metoda objevuje u jednoduchých CNC strojů.

3.2.3 3osé obrábění

U této metody obrábění můžeme řídit současně osy X, Y, Z a další parametry obráběcího procesu, které jsou posuv, otáčky, volba nástroje, korekce. Nástroj se pohybuje mezi dvěma prostorově definovanými body po kruhové, spirálové nebo přímkové dráze. Patří mezi nepoužívanější způsob určený pro frézování tvaru rovinných a obecných, vrtání, závitování nebo k sražení hran. V současné době nabízí výrobci těchto strojů různé výrobní modifikace, které zvyšují produktivitu a rozšiřují technologické možnosti strojů. [9]

4 FRÉZOVACÍ NÁSTROJE

Frézovací nástroj nazýváme většinou jako fréza, ve výjimečných případech můžeme mluvit o frézovacích hlavách. Fréza je vícebřítý někdy i tvarově složitý nástroj, který má břity uspořádány na válcové, kuželové nebo jiné tvarové ploše. U čelních fréz jsou břity i na čele frézy. Vzhledem k velkému rozsahu této obráběcí technologie v praxi se frézovací nástroje rozdělují do mnoha skupin. Třídění a rozlišení vychází z mnoha aspektů uvedených v normách, zejména podle obráběcí charakteristiky a možného využití v praxi.

4.1 Rozdělení

4.1.1 Rozdělení podle ploch funkčních částí

a) Válcová

Má břity na válcové ploše tedy pouze na obvodě a zuby jsou většinou v levé šroubovici. Jsou určeny pro frézování rovinných ploch rovnoběžných s osou nástroje. Při hrubování mohou být opatřeny drážkami pro dělení třísek, které způsobují vyšší výkon obrábění a snížení rezného odporu. Dělení třísek je vhodné při úběru velkých přídavků u hrubování, kde se nebere ohled na jakost obrobené plochy. Válcové frézy jsou většinou nástrčné.

b) Čelní válcová

Zde se nachází zuby na obvodě, ale i na jedné čelní ploše frézy. Na čelní ploše jsou zuby frézy rovné a na válcové ploše jsou v pravé šroubovici. Břity jsou vyráběny frézováním. Rozdělujeme čelní válcové frézy podle způsobu upnutí na frézy stopkové, které jsou vyrobeny většinou z jednoho dílu s upínací částí pro upnutí, nebo na klasické nástrčné. Do této oblasti je možné zařadit i frézy drážkovací, pomocí nich vyrábíme většinou drážky pro pero. Frézy určeny pro „T“ drážky se používají s využitím kotoučové frézy. Při výrobě drážky nejprve vyfrézujeme drážku kotoučovou frézou a následný tvar „T“ frézou.

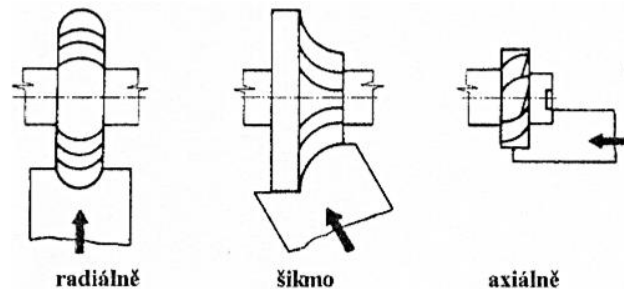
c) Kotoučové frézy a pily

Obvykle mají břity na válcovém povrchu i obou čelních plochách, kdy každá strana představuje čelní frézu. Šroubovice zubů na obvodě jsou střídavě v pravé a levé šroubovici. Výhodou těchto nástrojů je, že mají stejnoměrný záběr a lepší odvod třísky. Tříska se působením sklonu zubu odvádí od boku obráběné drážky. Možnost využití je na výrobu drážek, zářezů a různých vybrání. Požadavkem pro správnou funkci nástroje je, aby šířka byla vždy po přestření stejná. K odstranění této nevýhody se používají dělené frézy, u kterých

se daná šířka vymezuje pomocí ocelových vložek. Zvláštním případem kotoučových fréz jsou pilové kotouče. Jsou to kotoučové frézy, které se používají k prořezávání úzkých drážek (vybrání) nebo k dělení tyčového materiálu.

d) Tvarové frézy

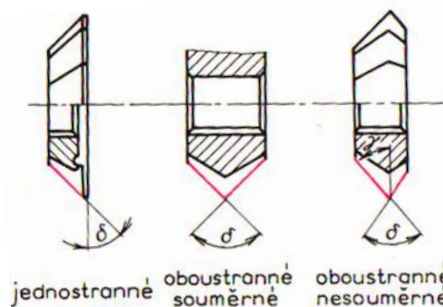
Slouží k obrábění tvarových ploch, které podle profilu zubů jsou úhlové, závitové, zaoblovací nebo na ozubení. Charakteristickým znakem tvarových fréz je stálé zachování tvaru a geometrie hřbetu (úhel hřbetu) i po mnoho násobném ostření. Ostření je prováděno jen pouze na čele a dosáhneme ho metodou podsoustružením nebo podbroušením tvaru zubu, při kterém brusný kotouč obrábí hřbet po dráze tvořící Archimédovu spirálu. Nástrojem pro podsoustružení je tvarový nůž, u kterého je pohyb řízen vačkou na speciálních strojích. Podsoustružování se může provádět radiálně, axiálně nebo šikmo.



Obr. 21 Tvarové frézy [7]

e) Úhlové frézy

Používají se pro frézování úhlových profilů. Normalizované jednostranné úhlové frézy se používají při výrobě zubových mezer u fréz. Oboustranné souměrné frézy s úhlem v rozsahu 30° až 90° jsou určeny pro obrábění vrubů, zkosených hran pro svary a pro obrábění zubů podtáčecích fréz. Zato pro obrábění mezer ve šroubovici jsou určeny nesouměrné úhlové frézy. [10]



Obr. 22 Úhlové frézy [7]

4.1.2 Rozdělení podle způsobu upnutí

Upínací systém je velmi důležitá část, protože tvoří spojení mezi nástrojem a strojem. Při nevhodném upnutí se mohou objevit odchylky a nepřesnosti opracovaných ploch. Nástroj musí být taky dostatečně upnut, abychom zamezili házení a tím nevznikali na povrchu obroběných ploch nežádoucí stopy po fríze. V současné době existují velké množství upnutí, které jsou normalizovány podle daných norem.

Mezi hlavní požadavky na upínací systém patří.

- souosost frézy a vřetene, která zajišťuje chod bez házení
- opakující se přesnost upnutí při výměně nástrojů
- pevnost proti axiálním silám i proti protočení
- využití pro vysoké otáčky

Strmý kužel

Velkou výhodou tohoto upnutí je lehké nasazení a snadné uvolnění z důvodu velkého sklonu, ale není samosvorný jako Morse kužel. Proto k jejich unášení tedy neslouží kuželovitá plocha, ale výřezy na každém kuželu. Tyto výřezy zapadají do unášecích kamenů na vřetenu stroje. Velkým nedostatkem je nízká tuhost uložení a nepřesná axiální poloha. Velké využití tohoto uložení stále zůstává, protože velké množství frézek (strojů) používá pouze toto upnutí.

Morse kužel

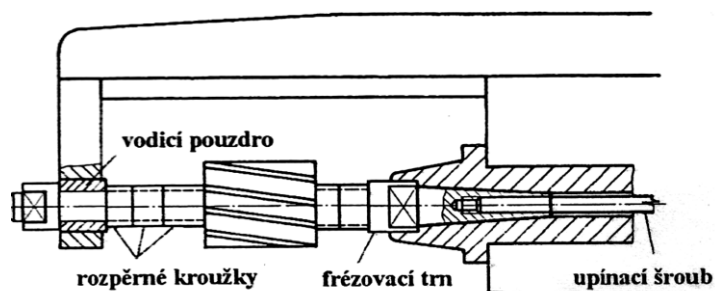
Jde o velmi přesný způsob upnutí. Jeho využití je u vřeten frézek, vrtaček, soustruhů nebo dělicích přístrojů. Princip spočívá ve vložení kuželového zakončení nástroje do stejně tvarově upraveného otvoru v upínací hlavě stroje. Nástroj tedy drží třením a je navíc samosvorný. Proto nelze vyjmout tahem, ale je zapotřebí poklepnutí na jeho druhý konec. Výhodou je snadná vyměnitelnost nástroje a uchycení je neustále udržováno ve středu osy otáčení.

Upínací kužel HSK

Splňují požadavky na spolehlivé, přesné upnutí frézy než strmý kužel. Čelní doraz ustavuje polohu nástroje a upínací rozpěrný trn s kuželovou rozpínací dutinou vycentruje a následně fixuje dutou stopku nástroje.

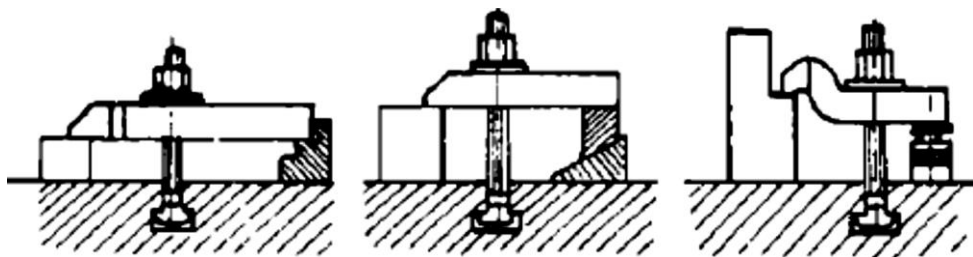
Frézovací trny

Slouží k upínání válcových i kotoučových fréz často také celých sad u obvodového frézování na horizontálních frézkách. Točivý moment stroje je přenášen pomocí pera a vymezení polohy nástroje je uskutečněno pomocí kroužků. Fréza je upnuta, co neblíže k vřetení stroje, aby nedocházelo k průhybu trnu při velkých řezných silách. Nepoháněný konec trnu je uložen v ložisku podpěrného ramena. Frézovací trny lze použít pro nástrčné frézy (mají podélnou nebo příčnou drážku) a pro stopkové válcové frézy (používá se kleštinové upínací pouzdro).



Obr. 23 Frézovací trn [6]

V neposlední řadě by měl být kladen důraz na vhodné, pevné a bezpečné upnutí obrobku. Při nedostatečném upnutí může dojít trvalému poškození nástroje i stroje. Při obráběcím procesu vznikají velké řezné síly, které se snaží obrobek uvolnit, v horších případech vysunout z upnutí. V kusové a malosériové výrobě se obráběný materiál upíná do klasických strojních svěráků (upínek) a šroubů na stůl. V sériové výrobě jsou používány různé druhy upínek, opěrek, přípravků, kde s jejich pomocí docílíme přímé upnutí na drážky stolu. [6]

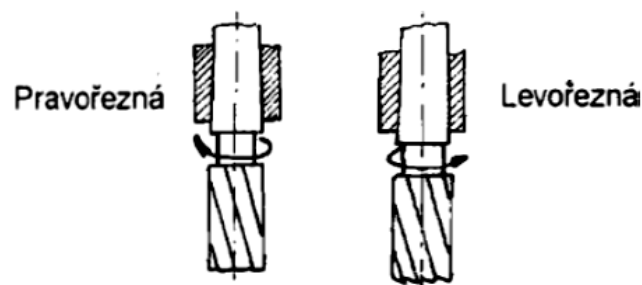


Obr. 24 Upnutí pomocí upínek [6]

4.1.3 Rozdělení podle smyslu otáčení

Podle smyslu otáčení dělíme frézy na pravořezné a levořezné. Pravořezná fréza se točí ve směru pohybu hodinových ručiček, pokud se díváme od vřeteníku a levořezná se otáčí opačně. Pravořezné frézy mají břity v levých šroubovicích, levořezné v pravých šroubovi-

cích, aby axiální řezný tlak směřoval vždy do vřetene (do stojanu frézky). Levotočivý a pravotočivý stroj posuzujeme stejně, jako bychom se dívali směrem od vřetene tedy od stojanu. Frézovací hlavy složené z více fréz mají výhodu, že jedna fréza má pravou, druhá levou šroubovici. Tímto uspořádáním zanikají vzniklé axiální síly, které vznikají při obrábění. [3]



Obr. 25 Smysl otáčení fréz [3]

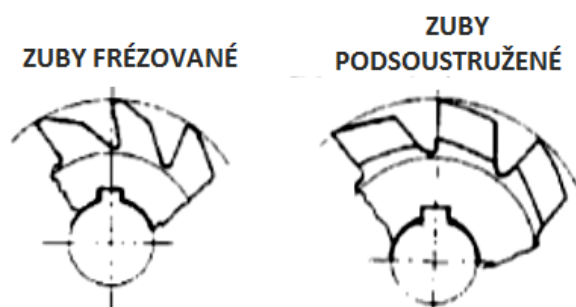
4.1.4 Rozdělení podle způsobu výroby zubů

Podle způsobu výroby tvaru zubu rozlišujeme do dvou skupin.

- zuby frézované
- zuby podsoustružené

Frézované frézy ostříme na hřbetě a pouze ve zvláštních případech se přibrušují i na čela. Z toho důvodu se zuby zmenšují a ztrácejí svůj tvar a tím pádem se zmenšuje i průměr frézky. U frézovaných zubů je rovinná plocha tvořena čelem a hřbetem, kde úzká fazetka (v rozmezích od 0,5 do 2 mm) zpevňuje břit. Používají se obrábění jednodušších tvarů.

Podsoustružené frézy mají vytvořenou hřbetní plochu jako část Archimédovy spirály, proto čelo zubu je rovinnou plochou (úhel řezu se volí 75 až 90°). Fréza je ostřena jen na čele z toho vyplývá, že profil zubů je neměnný, lze tedy využít značnou část tloušťky zubu. Možnost využití je většinou u tvarových fréz, které jsou výrobně nákladné. [3]



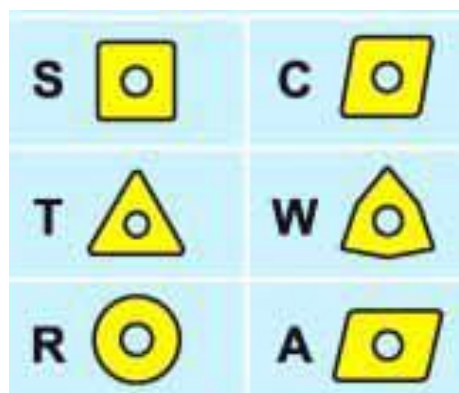
Obr. 26 Způsoby výroby zubů fréz [3]

4.1.5 Rozdělení podle počtu dílu

Celistvá fréza je taková, kde těleso i zuby jsou z jednoho kusu materiálu. Materiál nástrojů je většinou rychlořezná ocel, proto použití fréz s velkým průměrem nebo délkou není velmi hospodárný (finančně náročný).

Složené fréza vznikne spojením několika nástrčných fréz na společný upínací trn. Lze používat na obrábění jedné i více ploch najednou, proto se tedy snižuje strojní čas a je zvýšena produktivita práce. Umožňuje lepší využití výkonu frézky, protože najednou můžeme obrábět i velmi široké plochy nebo několik obrobků vedle sebe.

Frézy s vyměnitelnými břitovými destičkami jsou současný směr vývoje frézovacích nástrojů. Předem zvolena tvarová břitová destička je upnuta mechanicky, připájením nebo přivařením na tělo nástroje. Tělo nástroje je zpravidla méně materiálově kvalitní než břit. Jde o velice hospodárnou a ekonomickou volbu frézy, protože se nemusí měnit celá fréz jen břitová destička. Břitové destičky jsou převážně vyráběny ze slinutých karbidů, které jsou povlakovány, což umožňuje použití pro všechny práce včetně rychlostního a tvrdého frézování a také pro frézování na sucho. [3]



Obr. 27 Břitové destičky [4]

4.1.6 Další rozdělení frézovacích nástrojů

Mezi další rozdělení fréz patří podle počtu zubů. Pokud chceme docílit klidného chodu obrábění, volíme počet zubů takový, aby současně řezaly nejméně dva zuby.

Vzhledem k průměru frézy a počtu zubů lze rozdělit frézy na následující skupiny.

- jednozubé
- polohrubozubé
- hrubozubé

Podle tvaru zubů vztažených k ose rotující frézy se rozdělují na dvě skupiny.

- Frézy s přímými zuby
- Frézy se zuby ve tvaru šroubovice

Pro zabezpečení plynulého a klidnějšího chodu frézy se používají frézy se zuby ve tvaru šroubovice, protože vnikají do záběru postupně. Sklon šroubovice je v rozmezí 10° až 45° (ve výjimečných případech i více). [3]

Tab. 6 Přehled frézovacích nástrojů [6]

Stopkové	Válcová čelní	
	Drážkovací pro „T“ drážky	
	Kulová	
Nástrčné	Válcová	
	Kotoučová	
	Úhlová	

4.2 Materiály fréz

Na správnou volbu materiálu nástroje je kladen velký důraz, protože finální výstupy řezného procesu závisí významně na vlastnostech řezných částí nástroje, který je konstruovaný z příslušného nástrojového materiálu. Nástroj je v obráběcím procesu nejzatíženější člen, proto při volbě je hlavní požadavek na dobrou a spolehlivou práci. Namáhání, které působí na nástroj, může být ohyb nebo tlak, doprovázen vysokými teplotami, které značně zatěžují nástroj. Působením difuze, adheze a abraze vzniká otěr řezných ploch, kterým musí nástroj odolávat. Celkový souhrn vlastností řezného materiálu, které určují vhodnost k danému způsobu obrábění, nazýváme řezivost. Z těchto hledisek je potřeba materiál vysokých parametrů, ale i na úkor vysoké ceny. [2]

Požadované vlastnosti řezného materiálu jsou.

- tvrdost a pevnost
- odolnost proti opotřebení
- řezivost
- houževnatost
- vysoká pevnost v ohybu
- kalitelnost a prokalitelnost

4.2.1 Nástrojová ocel

Odlišný způsob namáhání (tepelné, mechanické) řezných částí nástroje vyžaduje rozdílné fyzikální i mechanické vlastnosti nástrojových ocelí. Nástrojové oceli mají široký rozsah výběru materiálu podle různých chemických složení, tepelného zpracování nebo množství legujících prvků.

Základní rozdělení nástrojových ocelí.

- **Legované nástrojové oceli** (na vlastnosti ocelí má největší vliv obsah uhlíku, který je v rozsahu od 0,5 do 1,5 %C)
- **Nelegované nástrojové oceli** (vlastnost ocelí určují legující karbidotvorné prvky Cr, W, V, Mo, které vytváří tvrdé až do vysokých teplot stálé karbidy)
- **Rychlořezné oceli** (vysoce legovaná nástrojová ocel, obsahuje velké množství wolframu)

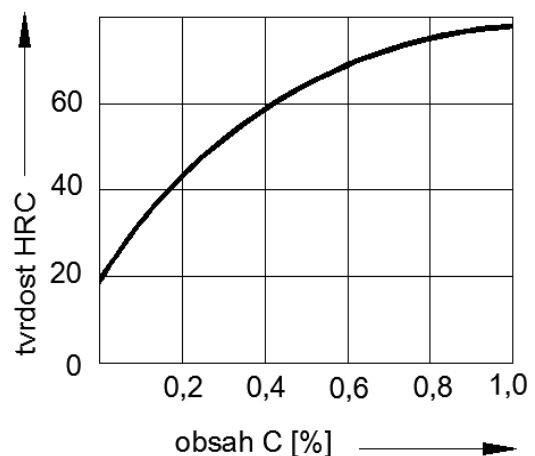
Nástrojové oceli		
Druh	Základní číselná značka	Význam 3. a 4. číslice
Nelegované	19 0xx	Vyjadřuje střední obsah uhlíku
	19 1xx	
	19 2xx	
Legované	19 3xx	Oceli manganové, křemikové a vanadové
	19 4xx	Oceli chromové
	19 5xx	Oceli chrommolybdenové
	19 6xx	Oceli niklové
	19 7xx	Oceli wolframové
	19 8xx	Oceli rychlořezné
	19 9xx	Volné

Obr. 28 Nástrojové oceli

Nelegované nástrojové oceli

Na konečné vlastnosti má největší vliv obsah uhlíku, kdy materiál obsahuje 0,7 až 1,5% C a dalších prvků, jako jsou mangan a křemík. Při stoupajícím obsahu množství uhlíku stoupá tvrdost (do určité míry snižuje houževnatost), zvyšuje se řezivost a odolnost proti opotřebení. Nevýhodou velkého množství uhlíku je zároveň zhoršující se zakalitelnost. Po tepelném zpracování lze získat tvrdost oceli 62 až 64 HRC, kdy do 1% C tvrdost stoupá, při vyšším obsahu uhlíku se tvrdost výrazně nemění. Zvyšuje se obsah cementitu, který zvyšuje řezivost. Nedostatky uhlíkových ocelí jsou rychlý pokles trvanlivosti, řezivosti s poklesem tvrdosti a nedostatečný výkon pro obrábění s vyšší v_c . Proto v současné době jsou často nahrazovány legovanými nástrojovými oceli. [11]

- Oceli velmi houževnaté do 0,7 % C
- Oceli houževnaté 0,8 až 0,9 % C
- Oceli houževnaté tvrdé 0,95 až 1,2 % C
- Oceli tvrdé 1,25 až 1,35 % C
- Oceli velmi tvrdé nad 1,4 % C



Obr. 29 Tvrdost legovaných NO [11]

Legované nástrojové oceli

Karbidotvorné prvky Cr, W, V, Mo patří mezi hlavní legující prvky, které vytvářejí tvrdé až do vysokých teplot stálé karbidy. Mezi další legující nekarbidové prvky patří nikl, křemík a kobalt. Legované oceli nachází své uplatnění u téměř většiny druhů řezných, stříhacích, tvářecích a dalších speciálních nástrojů. Hlavní výhodou proti uhlíkovým ocelím je větší prokalitelnost a větší odolnost proti popouštění. Proto má za následky snížení deformací, ale zvýšené nároky na tepelné zpracování. Tepelná odolnost břitů je v rozmezí 250°C až 350°C a řezná rychlost $v_c = 15-25$ m/min. Na základě provozních podmínek se nástrojové legované oceli rozdělují na skupiny. [2]

- legované nástrojové oceli pro práci za tepla
- legované nástrojové oceli pro práci za studena

Jednotlivé legující prvky mají odlišné vlastnosti.

Tab. 7 Vlastnosti legujících prvků

Chrom (Cr)	zvyšuje mechanické vlastnosti a odolnost proti korozi
Wolfram (W)	zlepšuje prokalitelnost, odolnost proti ztrátě pevnosti při popouštění, odolnost proti opotřebení, vyvolává vytvrzení
Molybden (Mo)	zvyšuje tvrdost, houževnatost a odolnost proti kyselinám
Kobalt (Co)	zvyšuje tvrdost, odolnost proti otěru, zvýšeným teplotám
Vanadium (V)	zvětšuje se prokalitelnost, odolnost proti ztrátě pevnosti při popouštění, vyvolává vytvrzení
Titan (Ti)	používá se jako povlak pro zvýšení kluzných vlastností

Rychlořezné oceli

Rychlořezné oceli tvoří samostatnou skupinu legovaných nástrojových ocelí, které obsahují velké množství wolframu. Proto by mohli být řazeny do wolframových ocelí, ale svou odlišitelností jsou však zařazeny do samostatné skupiny. Přísady jsou karbidotvorné prvky W, Co, Cr, Mo, V a nekarbidotvorný prvek Co. Obsah uhlíku je pod 1% s tvrdostí materiálu kolem 80 až 83 HRA při teplotním zatížení 600°C, což dovoluje 2 až 3 násobné zvýšení řezné rychlosti s porovnáním uhlíkovou nástrojovou ocelí. Podle obsahu legujících prvků je využití RO na řezné nástroje pro obrábění ocelí, ocelí na odlitky s vysokou tvrdostí, pevností popřípadě na obrábění těžkoobrobitelných materiálů. Přednost je vysoká lomová pevnost a střední odolnost proti opotřebení. Pro optimální řezný proces je důležité správné

zvolení pracovního prostředí tj. řezná emulze a olej. Rychlořezná ocel snáší teplotu břítu 500 – 700°C a možnost využití pro řeznou rychlost $v_c = 25 - 50$ m/min. [11]

Tab. 8 Vlastnosti prvků v RO

Prvek	Snižuje	Zvyšuje
C	houževnatost	odolnost proti opotřebení
Mn	rychlost kalení	hloubku prokalení a sklon k přehřátí
Si	-	pevnost při vyšší teplotě
Cr	deformaci při kalení. rychlost kalení	pevnost a prokalitelnost
Ni	tvrdost, rychlost kalení	pevnost za vyšších teplot, houževnatost, prokalitelnost
Mo	-	řeznou schopnost, odolnost proti opotřebení při vyšších teplotách
V	pokles tvrdosti při popouštění	jemnost zrna
Co	-	rychlost chlazení, stálost a tvrdost za tepla

4.2.2 Slinuté karbidy

Metoda pro výrobu slinutých karbidů se nazývá prášková metalurgie. SK jsou vyrobeny z různých karbidů těžkých kovů a kovového pojiva. Mezi nejpoužívanější karbidy patří karbidu wolframu (WC), karbidu tantalu (TaC), karbidu titanu (TiC) a jako pojivo je používaný kobalt (Co). Slinutý karbid lze chápat v podstatě jako směs o 2 a více fází (nejsou slitinou), kde konečné vlastnosti určuje množství jednotlivých fází. Mezi nevýhody patří, že není možné další tepelné zpracování nástrojů (břitových destiček). Hlavní znaky SK jsou vysoká pevnost, tvrdost, odolnost proti korozi i otěru. Mezi nevýhody lze zařadit špatná elektrická a tepelná vodivost. Pro velkou tvrdost je možné jen v minimální míře rozměrově a tvarově upravovat. Slinuté karbidy nachází uplatnění u broušení, lapování nebo elektroerozivního obrábění. Pracovní teplota nástrojů je 800 – 1000°C a v současné době je tento materiál velmi používaný, kvůli své velké produktivitě práce z důvodu možnosti zvyšování řezné rychlosti. Kvůli cenové úspoře se vyrábějí nástroje z SK ve tvaru normalizovaných břitových destiček, které jsou upnuty na tělo nástroje (mechanicky, přivařeny, připájeny). Břitové destičky mají více ostří, proto lze pootočením využít více ostří a po opotřebení všech stran se destička vyřazuje.

Základní rozdělení slinutých karbidů je.

- nepovlakové slinuté karbidy
- povlakové slinuté karbidy

Nepovlakové slinuté karbidy

Slinuté karbidy se podle ČSN ISO 516 (22 0801) rozdělují podle složení a oblasti použití do tří skupin

1) SK typu P (WC, TiC, Co)

Je určeno pro obrábění materiálu, který tvoří dlouhou třísku jako např. uhlíkové oceli, slitinové oceli a feritické korozivzdorné oceli. Proces obrábění je doprovázen vysokými řeznými silami, které mají za důsledek velké opotřebení nástroje na čele (výmol). Tato skupina obsahuje velké množství TiC a TaC. Nevýhodnou vlastností karbidu titanu a tuhých roztoků na bázi TiC je jejich vyšší křehkost a nižší odolnost proti abrazi. Barevné označení nástrojů je modrá barva.

2) SK typu M (WC, TiC, TaC, Co)

Určeno pro universální použití a použití pro obrábění materiálu, které tvoří dlouhou a střední třísku (patří tady lité oceli, austenitické korozivzdorné oceli a tvárné litiny). Z důvodu vysoké houževnatosti se tato třída SK používá pro těžké hrubovací operace a přerušované řezy, ale dochází i k vydrolení ostří. Řezné síly dosahují středních a vysokých hodnot. Barevné označení je žlutá barva.

3) SK typu K (WC, Co)

Využití pro obrábění železných kovů (s krátkou, drobivou třískou) a neželezných kovů. Mezi tyto materiály můžeme zařadit šedou litinu, měď, bronz, hliník a nekovové materiály. Při procesu obrábění jsou řezné síly většinou nízké a převládá abrazivní a adhezivní opotřebení. Není vhodné pro obrábění s dlouhou třískou, která více zatěžuje čelo nástroje. Barevné označení nástrojů je červená.

Povlakové slinuté karbidy

Hlavní předpoklad řezných nástrojů je, aby slinuté karbidy vykazovaly, co největší otěruvzdornost a současně vyšší houževnatost. Tento předpoklad splňují břitové destičky ze SK s tvrdými povlaky karbidu např. karbid titanu (TiC), nitrid titanu (TiN) popřípadě oxid hlinitý (Al_3O_2).

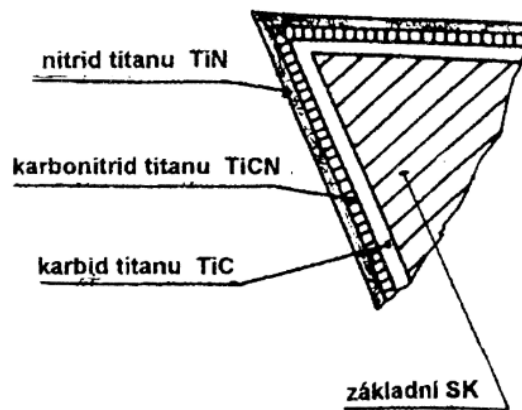
Povlaky lze rozdělit na dvě základní skupiny.

- jednovrstvé (nejčastěji TiC, TiCN, TiN, tloušťka až 13 μ m)
- vícevrstvé (složeny z dvou, tří a více vrstev)

Při skládání vícevrstvých povlaků je první nanášena vrstva s dobrou přilnavostí k podkladu, která musí mít nižší odolnost proti opotřebení. Jako poslední je nanášena vrstva, která musí mít dobrou přilnavost k předchozí vrstvě a zároveň vysokou tvrdost a odolnost proti opotřebení. [12]

Kladení vrstev od podkladu k povrchu bývá v tomto pořadí.

- TiC – Al₂O₃
- TiC – TiN
- TiC – TiCN – TiN
- TiC – Al₂O₃ – TiN

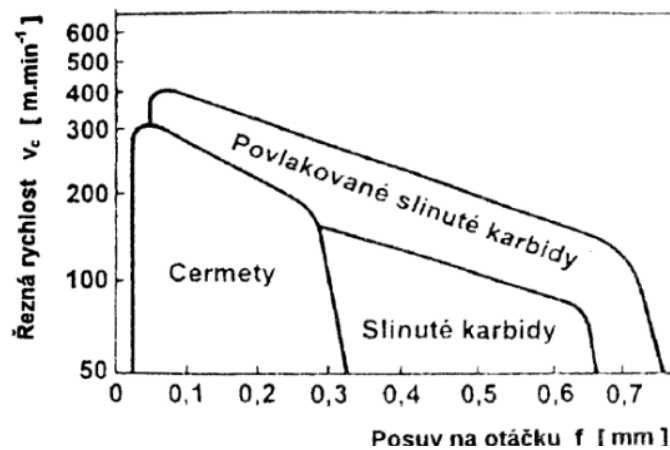


Obr. 30 Třívrstvý povlak břítu [12]

Povlakové slinuté karbidy nachází uplatnění především u základních metod obrábění (soustružení, vrtání a frézování) těžkoobrobitelných materiálů. Až 75% soustružnických operací a cca 40 % frézování je prováděno pomocí nástrojů s povlakovými slinutými karbidy.

4.2.3 Cermety

Cermety jsou vyráběny práškovou metalurgií a skládají se z tvrdých částic (TiC, TiN, TiCN, TaN) spojených pomocí kovových pojiv (Ni, Mo, Co). Název cermet vznikl spojením počátečních písmen slov CERamic/METal. Velká tvrdost tohoto materiálu je způsobena většinou obsahem karbidu titanu (TiC), který způsobuje vysokou odolnost proti deformaci. Porovnáním se SK nejsou tak houževnaté, proto nacházejí uplatnění u dokončovacích operací (jemné soustružení) až do řezných rychlostí 360 m/min. Tvrdost cermetu je srovnatelná se SK, odolnost proti teplotním šokům je nižší, z důvodu je omezeno používání přívodu řezné kapaliny. Uplatnění nachází ve formě břitových destiček pro obrábění ocelí, litých ocelí, litin nebo neželezných kovů, při vyšších řezných rychlostech. [12]



Obr. 31 Oblasti řezných podmínek při soustružení

4.2.4 Řezná keramika

Nástroje z řezné keramiky tvoří rozsáhlou skupinu materiálů a lze je rozdělit do tří základních skupin podle chemického složení, fyzikálních vlastností a použití.

- 1) čistá keramika (bílá)
 - obsahuje až 99,9% kysličníku hlinitého Al_2O_3
- 2) směsná keramika (černá)
 - obsahuje vedle korundu Al_2O_3 přísadu 20-40% karbidu titanu TiC
- 3) keramické materiály na bázi nitridu křemičitého

Základní stavební složkou řezné keramiky na bázi kysličníku hlinitého je korund (Al_2O_3), který patří k nejtvrdějším materiálům. Hlavní nevýhodou je křehkost, proto jsou přidávány prvky nikl, molybden, chrom, karbid titanu, které zvyšují houževnatost.

Řezivost řezné keramiky je daná tvrdostí korundu i přimísených karbidů. Mezi výhody patří vysoká trvanlivost břitů a snáší teplotu na břitů 1200°C při řezné rychlosti 300 až 1600m/min. Hlavní využití keramických nástrojů je při obrábění šedé litiny, tvárné litiny, cementačních, nástrojových a rychlořezných ocelí a slitin odolných proti žáru.

Nástroje se vyrábějí ve tvaru břitových destiček práškovou metalurgií rovnou slinováním lisovaných prášků do tvaru destičky. Po následném otupení všech řezných hran (6 až 8) neostříme, ale následně se destičky vyřazují. [2]

4.2.5 Supertvrdé řezné materiály

Do této skupiny supertvrдых řezných nástrojů, které jsou v současné době ve světě používány, patří dva typy syntetických řezných materiálů.

- polykrystalický kubický nitrid boru (PKNB)
- polykrystalický diamant (PD)

U těchto materiálů ukáže teprve neblíží budoucnost, v jakém rozsahu bude použití těchto materiálů při jejich výborných řezných vlastnostech s využitím CNC strojů. Mezi hlavní nevýhody v aktuální době patří jejich velká pořizovací cena. Kubický nitrid boru a diamant patří v současné době mezi nejtvrďší materiály. Mezi supertvrdé materiály lze zařadit i diamantové prášky, diamantové brousící pasty, prášky kubického nitridu bóru. Brousící kotouče obsahující tyto tvrdé částice nebo ořvnače s práškovými komponenty KNB (diamantu). [2]

Polykrystalický kubický nitrid boru (PKNB)

PKNB patří mezi zvláště tvrdý řezný materiál, kdy jeho tvrdost se blíží k tvrdosti diamantu. Při výrobě se spojují kubické krystaly bóru s keramickým nebo kovovým pojivem za vysokých teplot a tlaků. Výsledná struktura je neuspořádaná s velmi hustou polykrystalickou strukturou. Podle struktury je velmi podobný syntetickému diamantu. Mezi hlavní výhody patří vysoká tvrdost i při dosáhnutí teplot až 2000°C, dále odolnost proti abrazivnímu opotřebení a při obrábění vykazuje dobrou chemickou stabilitu. PKNB je používán jako segment řezné části vyměnitelných břitových destiček vyrobených ze slinutých karbidů. Další možnost je vyrobení monolitické vyměnitelné destičky z polykrystalického kubického nitridu bóru. Uplatnění se nachází při obrábění (soustružení) tvrdých, žáruvzdorných materiálů, nástrojů zkalených nástrojových ocelí a slitin kobaltu (niklu).

Polykrystalický diamant (PD)

Přírodní monokrystalický diamant je považován za nejtvrďší materiál, ale tvrdost syntetického polykrystalického diamantu (PD) je téměř shodná. Výroba je založena na slinování jemných krystalů diamantu za vysokých teplot a tlaků, kdy uspořádání krystalů je náhodné a nevytváří místa, která by mohla být zdrojem lomu. Z PD se vyrábí malé břitové destičky, které jsou upevněny na vyměnitelné destičky ze slinutých karbidů, co zaručuje dostatečnou odolnost proti tepelným a rázovým šokům. Použití se nachází při obrábění neželezných kovů, sklolaminátu (nekovový materiál), materiálů plněných abrazivními plnidly, skla nebo grafitu. Jde většinou o materiály, jejichž teplota tavení leží pod 700°C. Perspektivní je využití v obrábění dřevěných materiálů. Diamant se vyznačuje nízkou teplotní stálostí, při překročení teploty 650°C se mění na grafit. [12]

5 JAKOST POVRCHU

Mezi hlavní požadavky technologie je dodržování požadované jakosti výrobku. Jakost lze popsat jako rozměrovou přesnost. Daná charakteristika výrobku je důležitá, ale lze ji chápat v širším rozměru, kde patří geometrická, rozměrová přesnost a charakteristika povrchové vrstvy. Nazýváme ji texturou povrchu, která se projevuje drsností, vlnitostí nebo změnou v materiálu, objevující se při technologických operacích pod povrchem materiálu. Při hodnocení těchto změn vyjadřujeme hodnotu zbytkového napětí. Každá součást po technologické operaci má svůj rozměr, tvar a drsnost, což se rovná jakost. Na jakosti se projevuje přesnost strojních součástí, hlučnost, ztráty vzniklé třením, přestup tepla, odolnost proti korozi. Na každé součásti jde naměřit a následně vyhodnotit průběh povrchových nerovností, kde patří výška vrcholů (prohlubní), rozteče jednotlivých bodů profilu nebo tvar nerovností.

Případné změny opracované plochy vzniklé při výrobním procesu jsou.

- povrch je deformován plasticky kvůli mechanickým a tepelným účinkům
- dochází k rekrystalizaci
- změna tvrdosti povrchové vrstvy
- vznikají mikro a makrotrhliny
- zbytkové napětí v povrchové vrstvě [13]

5.1 Vlastnosti textury povrchu

Povrch součástí a části strojů mají funkční charakteristiku, která ve velké míře závisí na vlastnostech povrchu. Správná volba a dodržení daných požadavků ovlivňuje při vyhotovení výrobku provozní vlastnosti povrchu, spolehlivost a životnost mechanismů (konstrukcí). Hodnocení charakteru povrchu vychází z profilové metody, která hodnotí z profilu povrchu čáry.

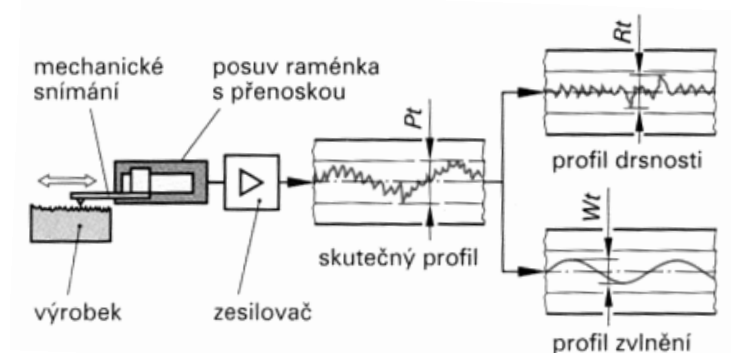
Geometrické požadavky na výrobu GPS (Geometrical Product Specification) zahrnuté v normách ČSN EN ISO 4285 – 4288 se zabývají strukturou povrchu, definicí, termíny, parametry struktury povrchu a pravidly pro posouzení této plochy.

Skutečný povrch výrobku vykazuje oproti struktuře uvedené na výkresu odchylky, závislé na výrobním postupu. Sejmутý primární profil je profil s nejmenšími detaily. Naměřený pomocí velmi přesného diamantového hrotu nebo laseru. Primární profil je výchozím základem pro určení nerovnosti různých řádů. Křivku lze složit z křivek různých vlnových

délek. Pro určení profilu prvního řádu (křivka s největší vlnovou délkou) se jemnější vlnění vyšších řádů prokládáno čarou tak, abychom jsme uchovali střední hodnotu. Střední čára probíhající středem vrcholů a prohlubní, kdy součet ploch ohraničených profilem nerovnosti nad touto čarou je roven součtu ploch pod touto čarou. Měření se provádí na místech plochy, kde je předpokládáno největší zvlnění a největší drsnost. Na předem viditelných poškozených ploch nemá smysl měření povrchu provádět.

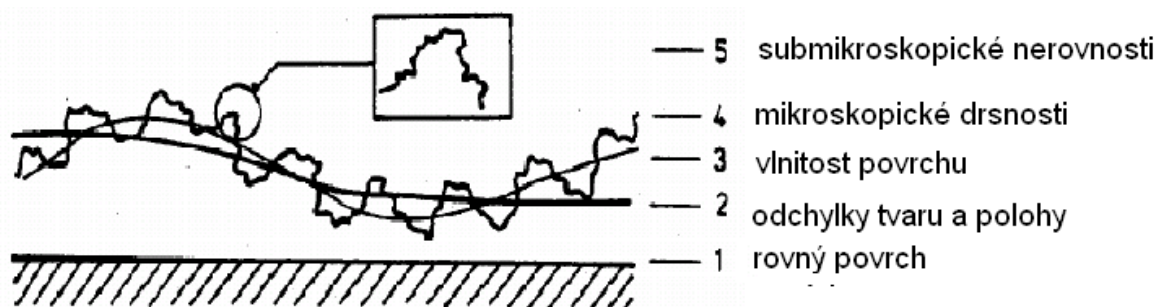
Snímací přenoska mění pohyb diamantového hrotu na elektrický signál, z kterého se určují parametry povrchu.

- hloubka Pt
- hloubka vln Wt
- hloubka drsnosti Rt [4]



Obr. 32 Princip měření drsnosti povrchu [4]

Pásmové propusti rozdělí elektrický signál odpovídajícímu primárnímu profilu na základní části. Sejmутý primární profil se člení podle velikosti rozteče příslušných nerovností na části (vlnitost, drsnost), které je možné jednotlivě dostat odfiltrováním nízkých nebo vysokých kmitočtů.



Obr. 33 Primární profil povrchu

Tvar povrchu

Obecný tvar povrchu při vyloučení drsnosti a vlnitosti. Tyto úchytky mohou být způsobeny nedostatečnou tuhostí, špatnou přímostí vodících ploch nebo teplem vzniklým během výrobního procesu, které může způsobit deformaci obrobeneé plochy. Odchytkou tvaru je myšleno posouzení odchytky jednoho tvarového prvku od ideálního geometrického tvaru. Mezi hlavní zdroje odchylek patří.

- obráběcí stroj (nepřesnost chodu, vibrace a pružné deformace stroje)
- nástroj (posuv, opotřebení, geometrie)
- prostředí (změna okolní teploty, chvění přenášené ze strojů)
- obrobek (zbytkové napětí, tepelné ovlivnění, nehomogenita materiálu)

Vlnitost

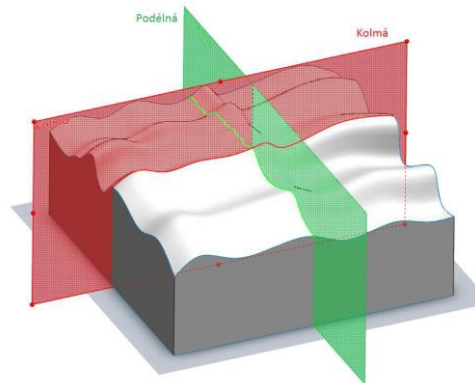
Je ta část textury, na které je nanesena (vytvořena) drsnost. Jde o souhrn periodických a neperiodických výstupků a prohlubních. To může být způsobeno chvěním, deformací obrobku a zpevněním materiálu (je spíše považována za vliv stroje, např. nevyváženosti brousícího kotouče, nepřesností vodících částí nebo malou tuhostí).

Drsnost

Jsou nepravidelnosti na povrchu, které jsou výsledkem výrobního procesu při vzájemném relativním pohybu mezi nástrojem a obrobkem. Povrch je také ovlivněn mechanismem tvoření třísky, což se projevuje například vytrháváním částic materiálu a to ovlivňuje náhodný charakter povrchu. Problém hodnocení nerovnosti povrchu (drsnosti) je většinou řešen redukcí do roviny řezu rovinou kolmou k povrchu. V rovině řezu je získán profil, který je základním zdrojem informací pro posuzování textury povrchu. [4]

5.2 Hodnocení textury povrchu

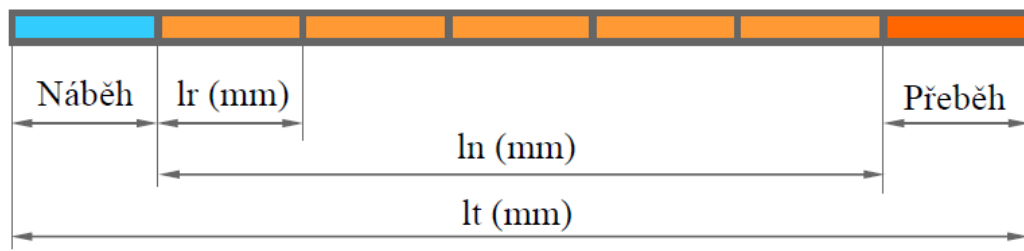
Hodnoty drsností se určují od základního povrchu, kterým je v prostoru patřičně posunutý a to v řezu kolmém na základní. Na obrobeneém povrchu to jsou nejčastěji poměrně pravidelně a směrově uspořádané stopy (rýhy) zanechávané řezným nástrojem. U některých metod obrábění, např. frézování, hoblování, soustružení není drsnost povrchu stejná ve všech směrech. Proto rozdělujeme drsnost na dva druhy příčnou drsnost (drsnost ve směru kolmém na řezný pohyb) a drsnost podélnou (drsnost ve směru řezného pohybu).



Obr. 34 Kolmá a podélná drsnost

Schéma měřicí dráhy snímače

- Délka zdvihu lt (mm) měřicího zařízení je délka větší než vyhodnocovaná délka, protože musíme uvažovat určitou délku náběhu a přeběhu měřicího snímače. Většinou se velikost délky náběhu a přeběhu rovná délce základní.
- Vyhodnocovaná délka ln (mm) je délka ve směru osy X, použitá pro posouzení vyhodnocovaného profilu. Může obsahovat jednu nebo několik základních délek.
- Základní délka lr (mm) je délka ve směru osy X, která slouží pro rozpoznání nerovností, které určují profil metodou nejmenších čtverců. Číselně se rovná vlnové délce profilového filtru drsnosti. [13]



Obr. 35 Měřicí dráha snímače

Vyhodnocovaná délka ln (mm)

$$ln = n \cdot lr \text{ (mm)} \quad (12)$$

Délka zdvihu lt (mm)

$$lt = ln + 2 \cdot lr \text{ (mm)} \quad (13)$$

5.2.1 Parametry textury povrchu

Rozdělení parametrů textury povrchu je.

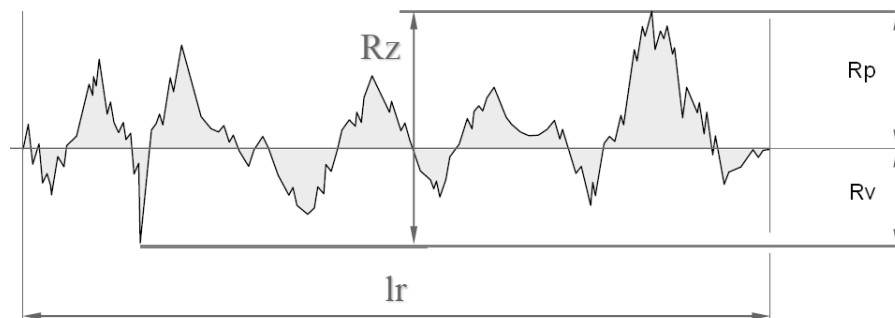
A) Amplitudové parametry

Amplitudové (výškové) parametry pomocí, kterým určujeme pouze velikosti vrcholů nebo prohlubní bez ohledu na rozteč.

Největší výška výstupků profilu drsnosti (R_p) je výška (Z_p) nejvyššího výstupku profilu drsnosti v rozsahu základní délky ve směru osy z.

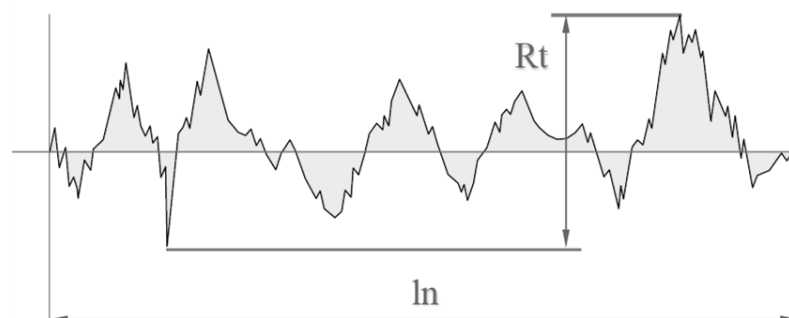
Největší hloubka prohlubně profilu drsnosti (R_v) je hloubka (Z_v) nejnižší prohlubně profilu drsnosti v rozsahu základní délky.

Největší výška profilu drsnosti (R_z) je součet výšky (Z_p) nejvyššího výstupku profilu a hloubky (Z_v) nejnižší prohlubně profilu drsnosti v rozsahu základní délky.



Obr. 36 Největší výška profilu drsnosti (R_z)

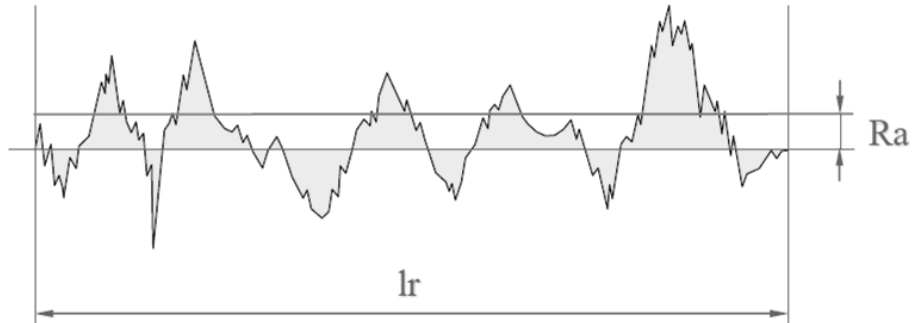
Celková výška profilu drsnosti (R_t) je součet výšky (Z_p) nejvyššího výstupku profilu a hloubky (Z_v) nejnižší prohlubně profilu drsnosti v rozsahu vyhodnocované délky.



Obr. 37 Celková výška profilu drsnosti (R_t)

Střední aritmetická odchylka profilu R_a je nejčastějším hodnotícím kritériem drsnosti povrchu. Avšak tato hodnota parametru R_a nedává 100% informace o tvaru nepravidelnosti povrchu. Jde totiž o střední aritmetickou hodnotu absolutních odchylek profilu v rozsahu základní délky. Je vyjádřena vztahem.

$$Ra = \frac{1}{lr} \int_0^{lr} |Z(x)| dx \quad (\mu m) \quad (14)$$



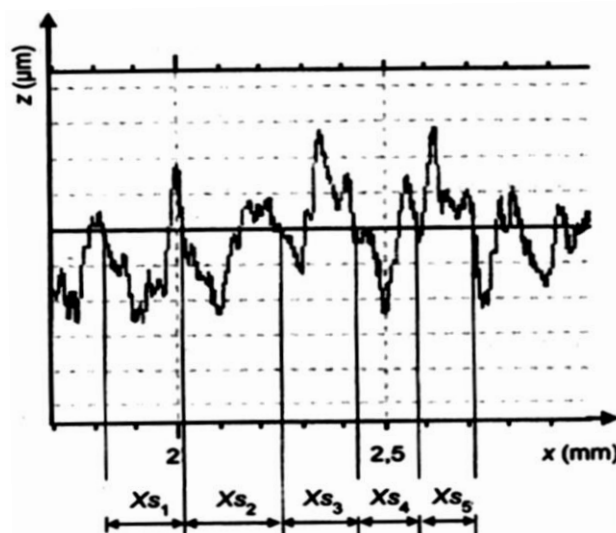
Obr. 38 Střední aritmetická odchylka profilu Ra

Průměrná kvadratická úchylka posuzovaného profilu drsnosti (Rq) je průměrná kvadratická hodnota pořadnic $Z(x)$ v rozsahu základní délky.

$$Rq = \sqrt{\frac{1}{lr} \int_0^{lr} |Z^2(x)| dx} \quad (\mu m) \quad (15)$$

B) Plošné a objemové parametry

Průměrná šířka prvků profilu drsnosti (Rsm) je aritmetický průměr šířek (Xs) prvků profilu drsnosti v rozsahu základní délky

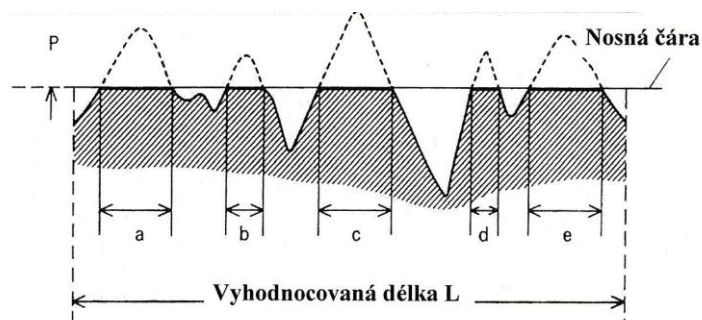


Obr. 39 Průměrná šířka prvků profilu drsnosti (Rsm)

$$Rsm = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m x \cdot s_i \quad (\mu m) \quad (16)$$

Materiálový poměr profilu drsnosti (nosný podíl) R_{mr} je poměr vyjadřovaný v procentech délky nosné plochy v kterékoliv hloubce profilu k celkové délce profilu. Jedná se o nejdůležitější parametr v inženýrské praxi, kdy jeho využití je dotykovou plochou při vzájemném pohybu dvou součástí. Tento materiálový poměr je pouze poměr délek nikoliv poměr ploch. [13]

$$R_{mr} = \frac{a + b + c + d + e}{ln} \cdot 100 (\%) \quad (16)$$

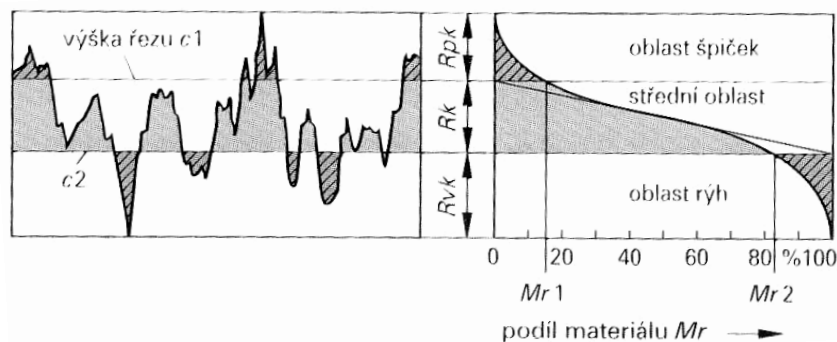


Obr. 40 Materiálový poměr profilu drsnosti R_{mr}

Křivka podílu materiálu (Abbottova křivka) udává podíl materiálu ve zdrsňené vrstvě v závislosti na její výšce v oblasti řezu. Materiálovou křivku lze rozdělit na tři oblasti určitých veličinami.

- výška špiček R_{pk} (měla by být co nejnižší, aby se snížilo tření v ložiskách)
- výška střední oblasti R_p (velký přírůstek podílu materiálu zabezpečuje spolehlivé udržení potřebného na třecích plochách)
- hloubka oblasti rýh R_{vk} (oblast úzkých rýh by měla stačit na udržení mazacího oleje)

Veličiny M_{r1} a M_{r2} udávají materiálový podíl na hranicích středních oblastí. [4]



Obr. 41 Podíl materiálu v oblasti drsnosti povrchu [4]

C) Hybridní parametry

Hodnocení textury, kde určujeme kombinaci amplitudy a rozteče např. sklony, zakřivení.

- kvadratický sklon povrchu (Sdq)
- aritmetický průměr zakřivení výstupků povrchu (Ssc)
- poměrná rozvinutá styková plocha (Sdr)

D) Funkční parametry

Skupina parametrů charakterizující funkční aspekty povrchu především mazání a broušení. Jsou speciálně určeny při kontrole v automobilním průmyslu.

- hloubka drsnosti jádra (Sk)
- redukovaná výška výstupku drsnosti (Spk)
- redukovaná hloubka prohlubní (Svk) [13]

5.3 Měření textury povrchu dotykovou metodou

Dotyková metoda je pro hodnocení povrchu nejčastější kvůli její snadné obsluze, rychlosti měření a přímého čtení výsledků. Její výhodou je možnost převádět analogový záznam do digitální formy. Většinou jde o přenosné zařízení s malými rozměry snímače. Naměřené data lze srovnávat s hodnoty pro jiné metody měření. K nevýhodám patří vliv tlaku hrotu snímače na měřený povrch. Dochází k elastické možná až plastické deformaci v povrchové vrstvě, ve výjimečných případech dojde, že snímací hrot poškodí měřený povrch. Pro hodnocení jsou taková poškození nevhodná, ale i pro přesnost naměřených výsledků. Tato dotyková metoda je využívána v dílnách, ale často i na obráběcích strojích.

Měřicí dotykový přístroj, který zkoumá povrch snímacím hrotem a získává úchylny ve formě profilu povrchu, je schopen naměřené parametry profilu zaznamenat. Měřicí smyčka, která tvoří uzavřený řetězec, zahrnující všechny mechanické části, propojující měřený objekt a snímací hrot. Snímaný objekt musí být dostatečně upnut a snímač musí být vhodně umístěn na měřený povrch. Vlastní měření trvá pouze několik sekund podle rychlosti posuvu a snímání délky. Příprava na měření bývá v podstatě delší, protože musíme nastavit snímač na hodnocený odpich a nastavit výchozí polohu. Na přístroji se musí nastavit odpovídající pracovní podmínky.

- měřicí rozsah
- snímaná délka
- typ filtru

- základní délka filtru [13]

Vyhodnocovací délka drsnosti pro měření by měli být nastavena jako pětinašobek základní délky a s dráhou náběhu a doběhu snímače.

Tab. 9 Základní délky drsnosti

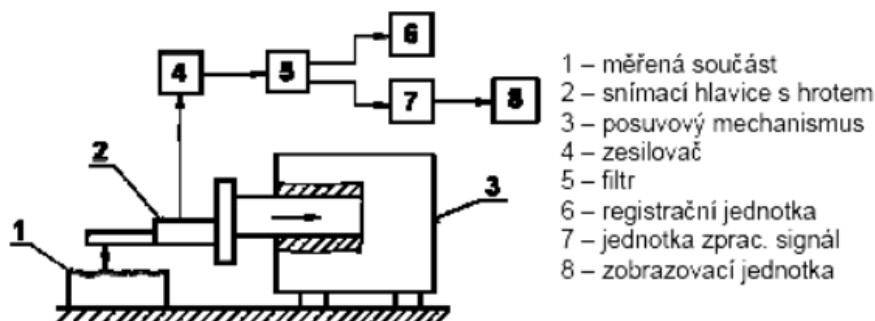
Ra (mm)	Základní délka drsnosti lr (mm)	Vyhodnocovaná délka drsnosti ln (mm)
0,006-0,02	0,08	0,4
0,02-01	0,25	1,25
0,1-2	0,8	4
2-10	2,5	12,5
10-80	8	40

Nejčastěji používané přístroje pro vyhodnocení:

profilograf – dotykový přístroj, u něhož je výsledkem měření grafický záznam profilu

profilometr – přístroj vyhodnocující automaticky některé z normalizovaných charakteristik drsnosti povrchu

pofiloměr – kombinovaný přístroj profilometr-profilograf a jednak obecně dotykový přístroj na měření drsnosti povrchu[4]



Obr. 42 Princip měření profilometrem

6 SHRUTÍ TEORETICKÉ A CÍLE PRAKTICKÉ ČÁSTI DP

Teoretická část diplomové práce je zaměřena převážně na třískové obrábění, kde je podrobněji rozepsána metoda frézování. Princip frézování je detailně popsán a jsou vysvětleny jednotlivé metody frézování, které budou potřeba v praktické části s důrazem na frézování nakloněných ploch. Se samotným obráběním jsou spojeny i jednotlivé druhy nástrojů, proto jsou rozděleny frézovací nástroje podle jednotlivých kritérií a podle materiálů z kterých se vyrábějí. Pro praktickou část bylo nutné zpracování problematiky drsnosti povrchu a s tím spojené vyhodnocovací parametry, požadavky na měření a měřicí metody.

Cílem praktické části je detailní zpracování dosavadního výzkumu v oblasti predikce jakosti povrchu při frézování kulovou frézou a následná praktická zkouška. Základem praktické analýzy je vytvoření 3D modelů součástí v programu Catia v5r19 a následné vytvoření CNC programů s danými řeznými podmínkami, které budou vytvořeny v programu NX 8.5. Po vytvoření programů bude provedeno samotné frézování součástí pěti různými nástroji na univerzitní CNC frézce HWT – 442. Obrobené součásti s různými řeznými podmínkami budou změřeny pomocí drsnoměru, kde vyhodnocovací parametry drsnosti povrchu budou R_a a R_z . Naměřené data budou řádně statisticky zpracovány a vyhodnoceny.

II. PRAKTICKÁ ČÁST

7 VYHODNOCENÍ DOSAVADNÍHO STAVU VÝZKUMU V OBLASTI JAKOSTI POVRCHU PŘI FRÉZOVÁNÍ KULOVOU FRÉZOU

Drsnost povrchu ovlivňuje několik funkčních parametrů, které jsou namáhání, tření, přenos tepla, odraz světla, únavová pevnost, odolnost proti korozi a použití vhodného maziva. Při jednotlivých výzkumech byl vyhodnocován parametr Ra , který se spočítá jako aritmetický průměr profilu drsnosti. Poskytuje nám omezené informace o obrobeném povrchu, ale je široce používán v běžných výrobních postupech. Je doprovázen většinou maximální výškou profilu Rz , která je závislá na Ra a proto jsou používány ve většině výzkumů na tuto problematiku. Výzkum na metodiku predikce drsnosti povrchu obsahuje různé přístupy na tuto problematiku. Patří sem kinematické modely, experimentální výzkum a analýza, implementace umělé inteligence a přístupů, které používají navržené experimenty.

Rozsah nedávných studií je založen na znalostech frézování kulovou frézou, která je nezbytně nutná pro dokončovací operace šikmých a vodorovných ploch. Přesto tomuto problému nevěnují výzkumníci dostatečnou pozornost a jen několik modelů drsnosti povrchu, které jsou vhodné pro výrobní praxi. Výzkum drsnosti povrchu je klíčovým faktorem pro strojírenský průmysl, protože můžeme zlepšit výrobní proces a zároveň snížit náklady na výrobu.

Kinematický model

Kinematický model založený na teorii obrábění vypočítal J. Peterka. Model je vytvořen pro šikmé a vodorovné povrchy na základě empirických rovnic parametrů Rz , profilu obrobeného povrchu daným průměrem nástroje, úhlem šikmé plochy, hloubkou řezu a posuvem na zub. Hodnoty Ra a Rz jsou závisle proměnné, proto je model dostatečný pro výrobní proces. Parametr Ra je možné zjistit pomocí hodnoty Rz . Tato závislost se dá určit pomocí rovnice. [20]

$$Ra \cong Rz / (3 - 5) \quad (17)$$

Model od G. Quintana

Další model vytvořený pomocí Artificial Neural Networks (ANN) umožňuje předvídat drsnost povrchu s velkým počtem vstupních parametrů. Model vytvořený G. Quintana bere

na vědomí parametry procesu, použití řezných kapalin, materiálových vlastností a dynamicky proměnné podmínky, jako jsou opotřebení nástroje, vibrace. [21]

$$Ra = \frac{2}{a_e} \left[R^2 \cdot \cos^{-1} \left[\frac{\sqrt{R^2 - \frac{a_e^2}{4}}}{2 \cdot R} + \frac{R}{a_e} \cdot \sin^{-1} \left[\frac{a_e}{2 \cdot R} \right] \right] - \left[\frac{R^2}{a_e} \cdot \sin^{-1} \left[\frac{a_e}{2 \cdot R} \right] + \sqrt{\frac{R^2 - \frac{a_e^2}{4}}{2}} \right] \right. \\ \left. \cdot \sqrt{-\frac{2 \cdot R^3}{a_e} \cdot \sin^{-1} \left[\frac{a_e}{2 \cdot R} \right] + 2 \cdot R^2 - R \cdot \sqrt{R^2 - \frac{a_e^2}{4}}} - \left[-\frac{R^2}{a_e} \cdot \sin^{-1} \left[\frac{a_e}{2 \cdot R} \right] + R - \sqrt{\frac{R^2 - \frac{a_e^2}{4}}{2}} \right]^2 \right] \quad (18)$$

Kde:

R – poloměr nástroje (mm)

a_e – šířka záběru (mm)

Model od J. Hossain a N. Ahmad

Další model drsnosti povrchu byl vytvořen J. Hossain a N. Ahmad. Výsledný model ANFIS byl navržen, aby byl vhodný pro 3 osé frézování hliníkového materiálu. Studie považuje za nezávislou proměnnou sklon obráběné plochy, rychlost vřetene, rychlost posuvu, radiální hloubku řezu a posuv na zub. Byl vytvořen následující model. [22]

$$Ra = C \cdot v^k \cdot a_p^l \cdot f^m \quad (19)$$

Kde:

C – modelová konstanta (-)

k, l, m – parametry modelu (-)

v – řezná rychlost (m/min)

f – posuv (mm/min)

a_p – hloubka řezu (mm)

Model od Tangjitsitcharoen a Senjuntichali

Výzkumy Tangjitsitcharoen a Senjuntichali mají jiný přístup k drsnosti povrchu modelu a je použita vícenásobná regresní analýza. Procesní parametry se dynamicky mění. Model se skládá z poměru axiální a radiální síly, které vznikají při obrábění kulovou frézou, rychlostí vřetene, rychlostí posuvu, hloubkou řezu a z průměru nástroje. Model je schopen před-

povědět parametry Ra a Rz samostatně na základě obecné exponenciální funkce pro uhlíkovou ocel C45E v obecné formě. [23]

$$Ra = C_1 \cdot v^o \cdot a_p^r \cdot f^p \cdot D^q \cdot \left(\frac{Fx}{Fz}\right)^s \quad (20)$$

Kde:

C_1, o, r, p, q, s – regresní koeficienty modelu (-)

v – řezná rychlost (m/min)

f – posuv (mm/min)

a_p – hloubka řezu (mm)

D – průměr nástroje (mm)

Fx – tangenciální síla (N)

Fz – osová síla (N)

Tyto studie zjistily, že drsnost povrchu klesá s rostoucí řeznou rychlostí. Navíc posuv je označen jako hlavní přispěvatel do drsnosti povrchu. Je však třeba zdůraznit, že obecný model drsnosti povrchu není jasně identifikován. Jednotlivé modely popisují chování v úzké oblasti frézování kulovou frézou, pokud jde o konkrétní parametry procesu, materiálových vlastností obrobku a dalších technologických parametrů.

8 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Experiment bude realizován v univerzitní dílně, kde bude využita CNC frézka. Bude rozdělen na samotné vytvoření 3D modelů a obráběcích strategií, které budou nahrány do CNC stroje. Experiment se skládá ze dvou částí. V první části budeme měnit technologické podmínky a následně vyhodnocovat změnu kvality povrchu s měnícím se sklonem obráběné plochy, šířkou záběru a průměrem frézy. V druhé části budou srovnávány měnící se parametry obrábění, kterou jsou řezná rychlost, posuvová rychlost a metoda frézování.

8.1 Podmínky experimentu

Pro samotnou realizaci experimentu je potřeba CNC stroj, frézovací nástroje, obráběný materiál a drsnoměr, který slouží k závěrečnému měření kvality obrobené plochy. Bude potřeba pět kulových fréz, které se od sebe liší svým průměrem a dva polotovary o rozměrech 210x60x60mm z materiálu s označením EN AW 7022 – CERTAL.

8.1.1 CNC frézka HWT C-442

Frézka HWT je portálově řízená frézka. Základní provedení stroje s pracovním prostorem X, Y:400 mm Z:200 mm umožňuje obrábět nejčastěji se vyskytující rozměry obrobků. Pojezdy jsou poháněny krokovými motory s kuličkovými šrouby. Každá osa obsahuje optické kalibry pro definici referenčních bodů, které zabezpečují opakovaný nájezd do požadovaného místa i po vypnutí stroje. Vřeteník je osazen motorem 1000 W s plynule nastavitelnými otáčkami 2000-25000 ot/min. Použití frézky je především vhodné pro výrobu frézovaných plastů, dřeva, hliníku nebo pro výrobu elektrod. V základním příslušenství obsahuje osvětlení nástroje a pracovního prostoru, kompenzaci tepelné dilatace vřeteníku, odsávací hubicí a úplné zakrytování. Mezi největší výhodu patří přesné obrábění a zajímavý poměr cena výkon. [14]

Tab. 10 Technické parametry CNC HWT C-442 [14]

Obráběcí prostor (X×Y×Z)	400 mm × 400 mm × 200 mm
Velikost upínací plochy (X×Y)	500 mm × 500 mm, 8 mm T-drážky
Programovatelná rychlost posuvu	max. 3 m/min
Programovatelný krok	0,00625 mm
Otáčky vřetene	2000-25000 ot./min
Max. upínací průměr nástroje	10 mm
Motor vřetene	1000 W univerzální
Řídící jednotka	PC
Napájení	230 V/50 Hz
Příkon	2300 VA
Vnější rozměry (š×h×v)	1200 mm × 1000 mm × 1400 mm
Hmotnost	410 kg
Materiál obrobku	grafit, plasty, dřevo, barevné kovy
Max. hmotnost obrobku	20 kg



Obr. 43 CNC frézka HWT C-442

8.1.2 Použité frézovací nástroje

Pro obrábění byly použity kulové (rádiusové) frézovací nástroje od firmy Seco Tools. Tyto kulové frézy patří do řady Jabro Solid². Jabro Solid² je řada nových monolitických karbidových fréz pro aplikace ve všeobecném obrábění, které zajišťují flexibilitu, rychlost a nízké náklady. Katalogové označení nástrojů začíná číslovkou JS. Společnost Seco Tools vyrábí karbid pro své výrobky na základě důkladného výzkumu a výsledků laboratorních zkoušek i praktických testů, protože kvalitní karbid zaručuje dlouhou životnost nástrojů. Mezi důležité faktory nástrojů patří i kvalitní povlak. Použité nástroje jsou povlakovány

technologíí PVD s přesnějším označením firmy Mega - T a Siron - A. Povlaky představují ochranu řezné hrany před opotřebením. Teplota může během obrábění dosahovat až 900°C. Izolační vlastnosti povlaku představují ochranu základního materiálu a tvrdost vrstvy je vyšší než tvrdost karbidu. Výrobce při použití povlaků zaručuje snížení tření nástroje, které následně snižuje opotřebením a optimalizuje odvod třísky.

Firma používá pro monolitické stopkové frézy následující katalogové značení, z kterého je možno získat veškeré parametry nástroje. [15]









Obr. 44 Označení fréz od firmy Seco Tools [15]

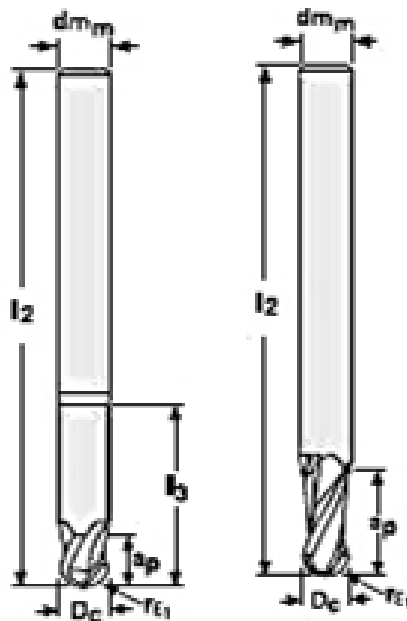
Pro frézování bylo použito šest nástrojů, z toho pět fréz bylo kulových pro dokončovací obrábění ploch a jedna toroidní fréza pro přípravu polotovaru (hrubování) a pro finální přípravu (semi - finish) obrobku, před samotným použitím kulových fréz. V tabulce můžeme shlédnout výčet nástrojů s kódovým označením firmy Seco Tools.

Tab. 11 Použité frézovací nástroje

Č.	Značení	Použití
1.	JS532030D1B.0Z2-SIRA	Dokončování
2.	JS532040F1B.0Z2-SIRA	Dokončování
3.	JS532050G3B.0Z2-SIRA	Dokončování
4.	JS532060E3B.0Z2-SIRA	Dokončování
5.	JS532080D1B.0Z2-SIRA	Dokončování
6.	421080R100Z2-MEGA-T	Hrubování, Semi - finish

Tab. 12 Parametry použitých nástrojů [15]

					
Úhel čela 10°	Úhel sklonu 30°	Plný rádius	Břit až do středu $z_n=1$	Radiální a postupné fr.	Válcová stopka



Obr. 45 Kótování fréz

Byly použity různé typy kulových fréz, které se lišily nejen svým průměrem, který byl od 3mm do 8mm, ale velikostí břitových částí.

Tab. 13 Rozměry použitých nástrojů [15]

č.	D_c	dm_m	l_2	l_3	a_p	r_{e1}	z_n	stopka
1.	3	3	40	-	6	1,5	2	válcová
2.	4	6	50	-	8	2	2	válcová
3.	5	6	75	35	5	2,5	2	válcová
4.	6	6	90	42	6	3	2	válcová

5.	8	8	60	-	16	4	2	válcová
6.	8	8	65	30	10	1	2	válcová

D_c – obráběný průměr (mm)

dm_m – montážní průměr ze strany stroje (mm)

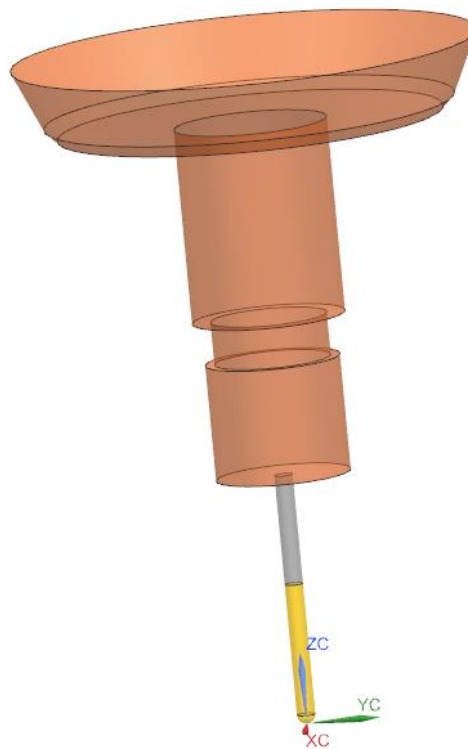
l_2 – celková délka břitového nástroje (mm)

l_3 – délka nástroje (mm)

$r_{\varepsilon 1}$ – rohový rádius (mm)

z_n – celkový počet břitů nástroje (-) [15]

Všechny nástroje byly uloženy do nástrojové databáze programu NX 8.5 se všemi parametry a rozměry pro následnou kontrolu kolize nástroje s obrobkem při spuštění verifikace a pro vytvoření NC kódu. Z důvodu, že všechny nástroje mají válcovou stopku, byly na stroj upnuty pomocí kleštin podle daného montážního průměru ze strany stroje.



Obr. 46 Schéma nástroje v NX 8.5

8.1.3 Obráběný materiál

Pro obrábění byl použit materiál dodaný firmou Feropol s označením EN AW 7022 – CERTAL (označení DIN 3.4345, ISO AlZn5Mg3Cu) v rozměrech 210 x 60 x 60 mm.

Jde o materiál, který se používá ve vytvrzeném stavu (stav T651) a materiál bývá válcovaný. Má střední odolnost proti korozi a svařitelnosti. Je velmi dobře obrobitelný, lešitelný a dá se dobře eloxovat. [16]

Tab. 14 Vlastnosti obráběného materiálu [16]

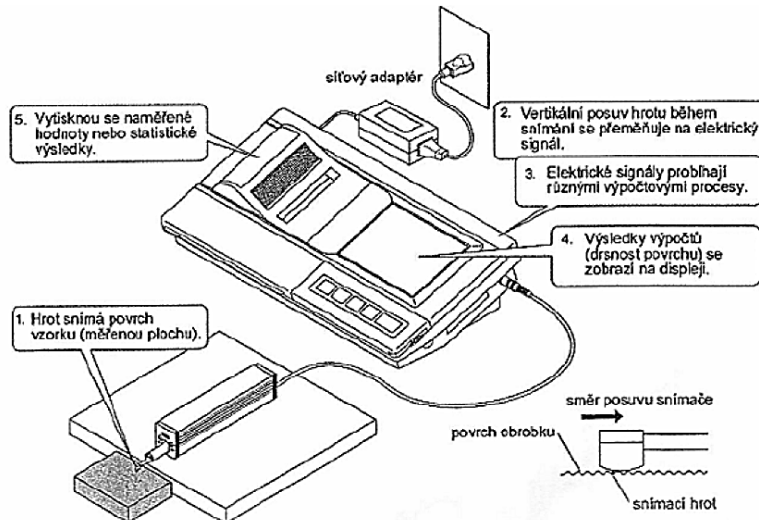
Mechanické vlastnosti ¹⁾		typické hodnoty
Mez kluzu $R_{0,2}$	[MPa]	400 – 495
Pevnost v tahu R_m	[MPa]	490 – 555
Tažnost A_{50}	[%]	6 – 9
Tvrдость HBW	[2,5/62,5]	165 – 170

Fyzikální vlastnosti ¹⁾		typické hodnoty
Objemová hmotnost	[g/cm ³]	2,76
Modul pružnosti	[GPa]	72
Elektrická vodivost	[mΩ · mm ²]	18 – 22
Koeficient tepelné roztažnosti	[K ⁻¹ · 10 ⁻⁶]	23,6
Tepelná vodivost	[W/m · K]	120 – 150
Specifická tepelná kapacita	[J/kg · K]	862

8.1.4 Přístroj pro měření drsnosti Mitutoyo SJ – 301

Pro měření drsnosti byl použit přístroj od firmy Mitutoyo s označením SJ – 301. Jde o přenosný a robustný přístroj pro měření kvality povrchu, který je určen k měření drsnosti pro dílenské použití. Skládá se ze snímacího hrotu, kterým je možno měřit strukturu povrchu a charakterizovat ji pomocí řady parametrů podle předem zvolené národní nebo mezinárodní normy (přehled norem ČSN, DIN, ISO, ANSI A JIS). Přístroj má rozsah posuvu v ose X až 12,5 mm a zdvih je v rozsahu ose Z 350 μm, který umožňuje měření až 37 parametrů. Pro správnost měření musí být zajištěna správná poloha snímacího hrotu vůči obrobku. Hrot musí být nastaven, aby posuv při měření byl rovnoběžný s povrchem obrobku.

Jednotlivé výsledky měření se zobrazují digitálně nebo graficky na dotek citlivé ovládací obrazovce. Pro případné vytištění průběhu měření, lze použít vestavěnou tiskárnu, která vytiskne podmínky, profil měření a naměřené výsledky drsnosti. Snímací hrot přístroje zaznamenává i nejjemnější nepravidelnosti povrchu vzorku. Drsnost povrchu se vypočítá z vertikálního posuvu snímacího hrotu, ke kterému dochází, když snímací hrot přejíždí přes nepravidelnosti povrchu. [17]

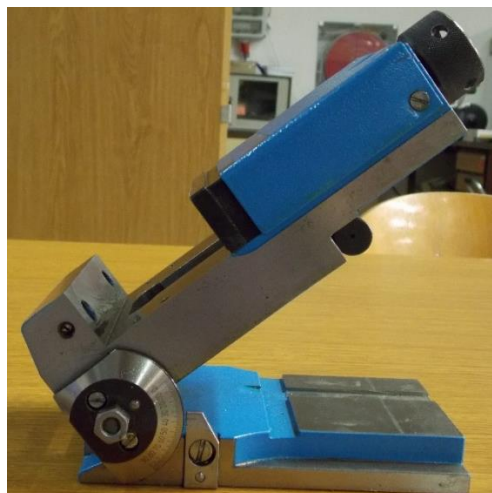


Obr. 47 Mitutoyo SJ – 301 [17]

8.1.5 Sklopný dílenský svěrák

Pro správnost měření drsnosti musí být zajištěna správná poloha snímacího hrotu vůči obrobku. Hrot musí být nastaven, aby posuv při měření byl rovnoběžný s povrchem obrobku, proto byl při měření použit dílenský sklopný svěrák. Pro rychlé nastavení potřebného úhlu nakloněné roviny a pro správnost měření.

Otočný svěrák obsahuje stupnici v rozsahu od 0 až 90 °, kde lze nastavit požadovaný úhel náklonu. Nejmenší dílek stupnice je jeden stupeň. Po nastavení daného úhlu je zapotřebí řádné dotažení stavěcího šroubu. Obrobek lze upínat mezi čelisti s rozsahem až 70mm, které jsou dotahovány pomocí otočného šroubu.



Obr. 48 Sklopný svěrák

8.2 Konstrukce (CAD) a programování (CAM)

8.2.1 Použité programy

Catia v5r19

Catia v5r19 je software pro 3D počítačové konstruování v oblastech CAD/CAM/CAE a nejrozšířenější CAx systém v automobilovém, lodním a leteckém průmyslu na světě. Catia v5r19 je systém, který je schopen pokrýt kompletní životní cyklus výrobku. Jde o konceptní návrh designu, přes vlastní konstrukci, analýzy, simulace a optimalizace až po tvorbu dokumentace a NC programů pro vlastní výrobu. Systém se vyznačuje značnou úrovní průmyslové univerzality, nachází uplatnění i v rozdílných oblastech strojírenství. Široké spektrum modulů, kterými Catia v5r19 disponuje, umožňuje vytvářet softwarové řešení sladěné s konkrétními podmínkami. Může to být např. automobilový či letecký průmysl, výroba spotřebního zboží a stejně tak i výroba obráběcích strojů.

Catia v5r19 je vyvíjena ve třech různých kvalitativních variantách - platformách, které jsou určeny pro uživatele s různou úrovní využívání CAD/CAM/CAE technologií.

Platforma P1 poskytuje soubor softwarových modulů orientovaných na objemové modelování na bázi features a je vhodným startovacím řešením pro nové uživatele systému.

Platforma P2 zahrnuje rozšířený soubor konfigurací a aplikačních modulů založených na hybridní modelovací technologii s doporučením pro produktově a technologicky orientovaný vývojový proces a pro výrobce s nejvyššími požadavky na komplexní elektronickou definici výrobků a technologií.

Platforma P3 přináší vysokou úroveň specifické funkční výbavy zvláštním zákazníkům, tak úsekům s rozsáhlých průmyslových komplexů. [18]

Tab. 15 Struktura aplikací [18]

Mechanická konstrukce	Inženýrské analýzy	NC obrábění
Vnitřní zařízení a systémy	Syntéza produktu	Návrh průmyslového závodu
Tvarování a styling	Infrastruktura systému	Podpora výrobních technologií

NX 8.5 CAM

NX CAM je součástí komplexního CAD/CAM systému NX a umožňuje komplexní obrábění součástí v operacích frézování, vrtání, soustružení, drátové řezání a obrábění na obráběcích centrech. Systém umožňuje také používat sestavy pro definici obráběných nebo upínacích prvků. Integrace do CAD/CAM systému NX zabezpečuje asociativitu obrobeneho modelu vzhledem ke geometrickým i technologickým změnám. Synchronní technologie NX CAM používá nástroje pro editaci CAD modelu v univerzálních formátech načteného bez historie modelování, což je vhodné při zohlednění tolerancí modelu, zjednodušování stěn nebo zaslepení či odstranění neobráběných tvarů. Pro snadné a intuitivní ovládání patří také kontextová grafická nápověda v dialogových oknech obráběcích operací a používání šablon k uchování dalšímu použití již hotových metod (geometrie, nastavení operací a výběru nástrojů). Samozřejmostí je hlídání kolizí se zbytkovým materiálem obrobku, držáky nástrojů a upínacími prvky. Pro složitější obráběcí aplikace lze také simulovat proces obrábění včetně kinematiky CNC obráběcího stroje. Strojní čas vypočtený na základě definovaných technologických parametrů slouží pro cenové kalkulace, kapacitní propočty a výpočty spotřeby nástrojů. Všechny konfigurace produktu obsahují modul pro tvorbu a úpravu postprocesorů (modul pro ověření dráhy nástroje, standardní překladače pro CAD data, knihovnu nástrojů, obráběných materiálů a řezných podmínek, generování dílenské dokumentace, modul pro práci se sestavami). [19]

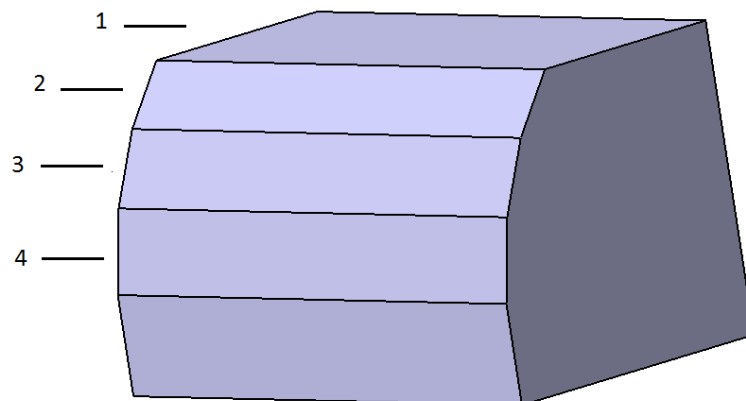
8.2.2 Vytvoření 3D modelů a výkresové dokumentace

Základní rozměr obou obrobků byl zvolen tak, aby bylo možno v programu NX zadat přídavek na dokončení 1mm na horizontální a vertikální plochy, protože předem připravené materiály měly jmenovitý rozměr 105x60x60. Proto rozměry součástí na výkresech jsou 105x59x59mm. Geometrie nakloněných ploch byla zvolena podle možností polotovaru a požadované potřebné délce pro měření drsností, délka jednotlivých segmentů byla navržena na velikost 15mm. Byly vytvořeny dvě součásti s označením UTB_01_obrobek_catia (viz. Příloha P I) a UTB_02_obrobek_catia (viz. Příloha P II), na kterých se nacházejí různé velikosti úhlů nakloněných ploch. Počet vytvořených úhlů na obou obrobcích je sedm, kdy obrobek_1 obsahuje čtyři úhly a obrobek_2 obsahuje tři úhly. Rozměrové rozmezí nakloněných ploch využívá celý první kvadrant, kdy nejmenší úkos je 0° a největší 75°. Obrábění plochy s úhlem 90°, kdy se vlastně jedná o vertikální plochu, nebylo provedeno, protože není určena pro použité strategie frézování.

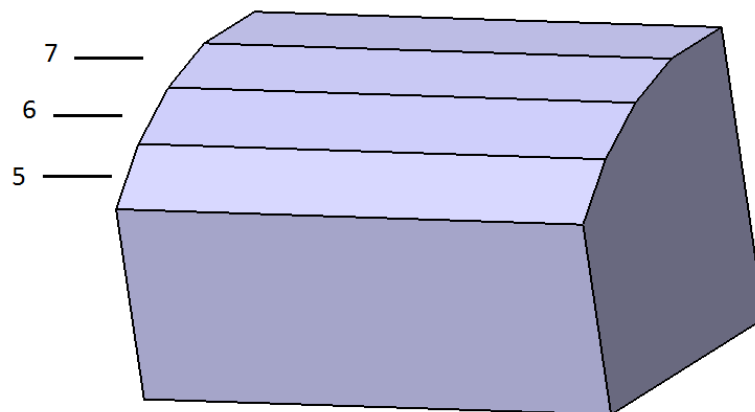
Tab. 16 Seznam použitých úhlů na součástech

obrobek_1				obrobek_2		
1	2	3	4	5	6	7
0°	50°	62,5°	75°	12,5°	25°	37,5°

K samotnému vymodelování obrobků bylo nejprve nutné použití příkazu PAD (vysunutí), kdy byl vytvořen polotovár s rozměry 105x59x59mm. Pomocí příkazu POCKET (vyříznutí) byly vytvořeny dané nakloněné roviny s předem definovanými rozměry. Na obr. 49 a obr. 50 můžeme vidět, reálné vymodelované součásti v programu Catia v5r19. Vytvořená výkresová dokumentace je vložena v příloze PI a PII.



Obr. 49 Úhly na obrobku 1

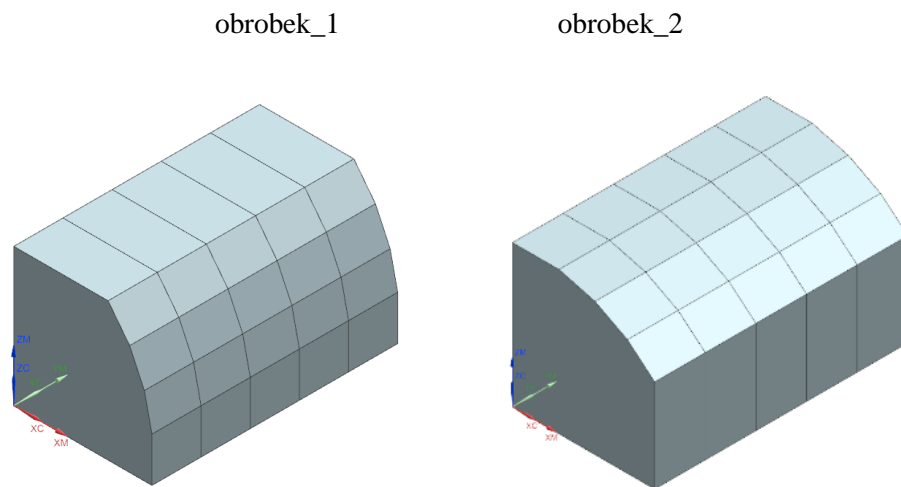


Obr. 50 Úhly na obrobku 2

Musela být brána v potaz předpokládaná velikost boční stěny pro následné upnutí do svěráku hlavně u obrobek_1. Navrhovaný rozměr boční upínací stěny byl 10mm, takže u obrobku byla rezerva jen 9 mm pro další následné zpracování.

Pro vytvoření programů a následných NC kódů byl použit software NX 8.5, do kterého byly nahrány jednotlivé předem vytvořené 3D modely z programu Catia v5r19.

Modely jsou rozděleny na 5 stejných segmentů v délce 21mm, protože celková délka součástí je 105mm.

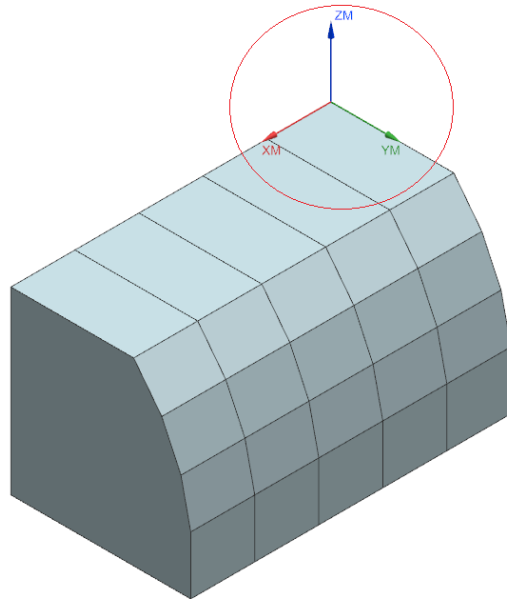


Obr. 51 Vytvoření segmentů

Dalším krokem v programu byl určení nulových bodů a geometrie polotovaru.

Nulový bod (MCS Mill) byl nastaven na horní vodorovné ploše v rohu, pro snadné nastavení nulového bodu na CNC stroji. V osách X a Y byl nulový bod nastaven pomocí jemného dotyku nástroje o stěnu, který byl zaručen tenkým kouskem papíru. Do stroje byla zapsána polovička průměru nástroje s odpovídajícím znamínkem. Poloha Z byla nastavována pomocí přesného úchylkoměru, kdy nástroj najel na dosedací plochu úchylkoměru, než stupnice ukazovala 0. Do stroje byla zapsána hodnota výšky měřidla, která byla 60mm.

Geometrie polotovaru (Workpiece) byla nastavena u obou modelů, jenom osách Z a Y s velikostí 1mm, z důvodu velikosti reálného polotovaru, který je 105x60x60mm. V ose X nebylo potřeba brát ohled na další navýšení velikosti polotovaru, protože úběr materiálu v této ose nebude.



Obr. 52 Nulový bod (MCS Mill)

8.3 CNC frézování

Pro samotné vytvoření obrobků musí být nejdříve vytvořena hrubovací operace pro odstranění velkého množství materiálu. Další používaná strategie byla vytvořena operace semi – finish, která byla provedena před každou dokončovací operací.

8.3.1 Hrubovací operace

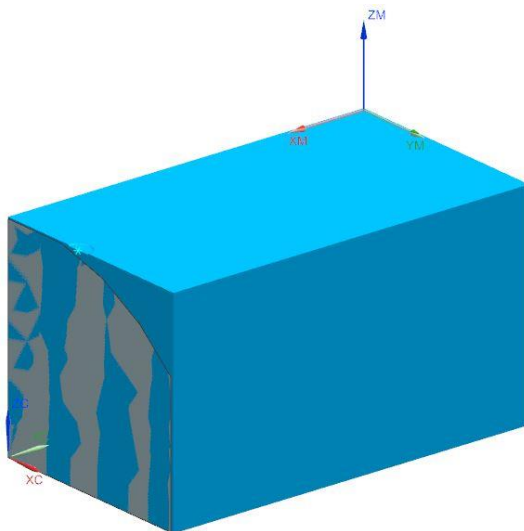
Pro hrubování výrobků jsem použil obráběcí metodu cavity mill, která se používá pro odstranění velkého množství materiálu. Tato metoda je ideální pro hrubování dílů (odlitky, výkovky). Operace cavity mill odstraňuje materiál na rovinných úrovních, které jsou kolmé k pevné ose nástroje. Část geometrie může být rovinná nebo tvarovaná.

Pro hrubovací operace byl použit nástroj č. 6 (toroidní fréza s průměr 8mm a vnějším zaoblením 1mm). V nastavovacím okně v záložce path settings jsem nastavil parametry obrábění Tabulka 17. Metoda byla zvolena mill - rouch (hrubování), která nechává přídavek na dokončení 1mm. Cut pattern (druh řezu) bylo použito pro rychlejší obrábění zig zag, co je obrábění bez přebytečných přejezdů nástroje. Výstupem je part program (CNC program) s označením UTB_01_obrobek_hrubovani_8 a UTB_02_obrobek_hrubovani_8, který je součástí přílohy na CD ve složce Přílohy DP/CNC_programy.

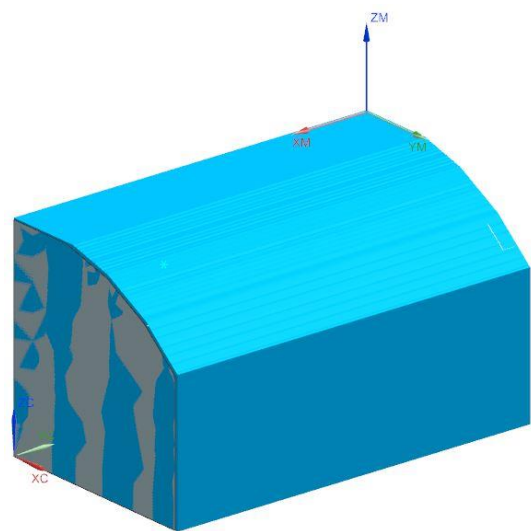
Tab. 17 Hrubovací operace

method	mill - rouch
cut pattern (druh řezu)	zig - zag
stepover (šířka záběru a_e)	75% x ØD
depth per cut (hloubka řezu a_p)	max. 0,3mm
cut (posuvová rychlost)	2000 mm/min
spindle Speed (otáčky)	15000 ot/min

Obrobek před hrubováním



Obrobek po hrubování



Obr. 53 Hrubovací operace

8.3.2 Semi - finish operace

Semi - finish operace byla použita mezi hrubováním a dokončováním. Po každé výměně nástroje byla tato operace znovu provedena, aby byla zaručena vždy stejná počáteční kvalita obráběné plochy. Pro semi - finish operaci jsem použil obráběcí metodu contour area. Tato operace se používá k snižování a odfrézování mělkých (v rozmezí 0 – 30°) nebo horizontálních ploch. Tento podtyp operace se běžně používá pro polo-dokončování a dokončování.

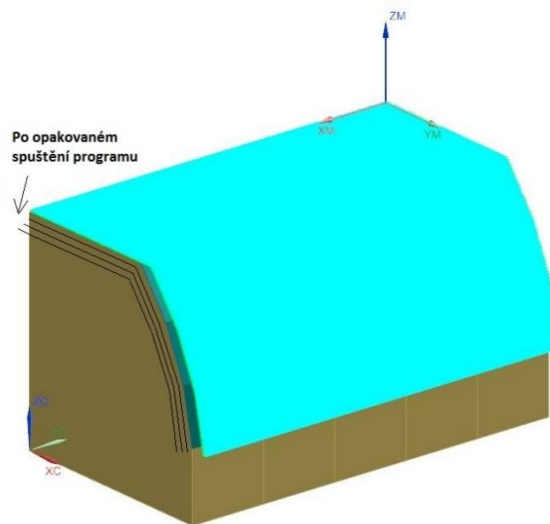
Pro semi - finish operace byl použit nástroj č. 6 (toroidní fréza s průměrem 8 mm a vnějším zaoblením 1mm). V nastavovacím okně v záložce path settings a drive method jsem nast-

vil parametry obrábění Tabulka 18. Method byla zvolena mill semi - finish (polo-dokončování), která nechává přídavek 0,25mm na dokončení. V záložce drive method bylo nastaveno cut pattern (druh řezu) – zig zag, cut direction – climb cut.

Výstupem je part program (CNC program) s označením UTB_01_obrobek_semifinish_8 a UTB_02_obrobek_semifinish_8, který je součástí přílohy na CD ve složce Přílohy DP/CNC_programy

Tab. 18 Před dokončovací operace

method	mill semi-finish
cut pattern (druh řezu)	zig zag
cut direction (druh frézování)	climb cut (sousedné)
stepover (šířka záběru a_e)	5% x ØD
stepover applied (boční krok)	on part
cut (posuvová rychlost)	2000 mm/min
spindle Speed (otáčky)	15000 ot/min



Obr. 54 Semi - finish operace

8.3.3 Dokončovací operace

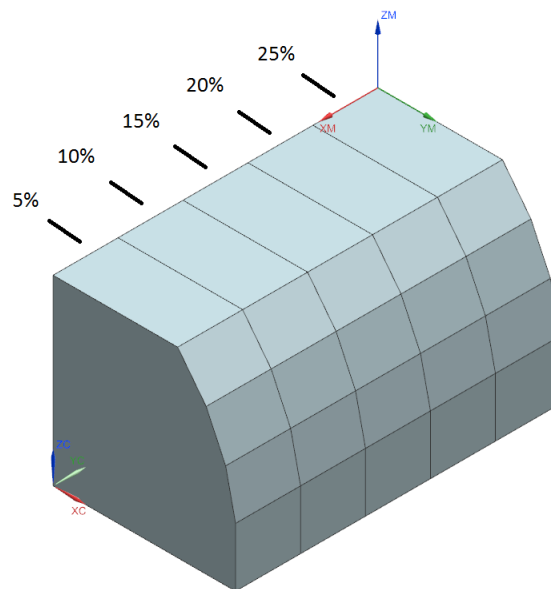
Pro dokončovací operace byl už předem rozdělený každý obrobek rozdělen na pět stejných segmentů se základní délkou 21mm. Na každém segmentu byly pokaždé použity jiné řezné počáteční podmínky. Dokončovací operace byly rozděleny do dvou skupin.

- základní dokončovací operace
- srovnávací dokončovací operace

8.3.3.1 Základní dokončovací operace

Pro základní dokončovací operaci byla stejně jako v semi - finish operaci použita metoda obrábění contour area, která je určena na dokončování mělkých a horizontálních ploch.

Princip obrábění a následného měření drsnosti povrchu je založen na tom, že na každém segmentu je jiná šířka záběru v procentech průměru nástroje od 5% až do 25%. Na toto obrábění bylo použito všech pět kulových fréz z Tabulky 13. Vždy byl pokaždé v programu NX 8.5 nahrazen nástroj za jiný a vygenerován program pro daný průměr nástroje. Na obrázku můžeme vidět, na kterém segmentu byla vždy použita daná šířka záběru.



Obr. 55 Použité šířky záběru a_e

Posuvová rychlost byla pro každý nástroj nastavena konstantně $v_f = 2000 \text{ mm/min}$ a řezná rychlost byla pro každý nástroj vypočítána. Vypočítané otáčky stroje byly následně ručně nastaveny na obráběcím centru. Výpočet otáček byl proveden za předpokladu, že maximální použitelné otáčky stroje 20000 ot/min. , byly použity pro nejmenší frézu průměru 3 mm . Pomocí vzorce (5) byla vypočtena řezná rychlost pro otáčky 20000 ot/min. a průměr nástroje 3 mm . Výsledná řezná rychlost byla zjištěna $v_c = 188,5 \text{ m/min.}$

$$v_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} = \frac{\pi \cdot 3 \cdot 20000}{1000} = 188,5 \text{ [m} \cdot \text{min}^{-1}\text{]}$$

Následně bylo vypočteno pro všechny další průměry nástroje otáčky stroje, při konstantní řezné rychlosti 188,5 m/min a zaokrouhleny na celá čísla.

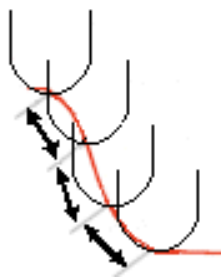
Tab. 19 Použité řezné podmínky

Průměr nástroje (mm)	Otáčky stroje (ot/min)	Řezná rychlost (m/min)
3	20000	188,5
4	15000	188,5
5	12000	188,5
6	10000	188,5
8	7500	188,5

V nastavovacím okně area milling jsem nastavil následující parametry.

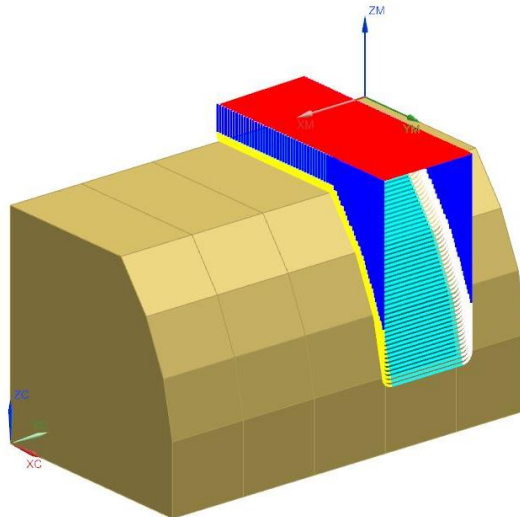
- cut pattern (druh řezu) – zig
- cut direction (druh frézování) – climb cut (sousedné frézování)
- stepover (šířka záběru) v % tool flat (průměru nástroje) podle daného segmentu
- stepover applied (boční krok) - on part

Stepover applied on part znamená, že nástroj se posouvá v zadané šířce záběru podle tvaru obráběné plochy.



Obr. 56 Význam stepover applied on part

Na obrázku můžeme vidět vygenerované trasy nástroje pro průměr 3mm, při obrábění obrobku 1 a šířce záběru 20% procent.



Obr. 57 Základní dokončovací operace

V následující tabulce můžeme porovnat obráběcí časy jednotlivých segmentů, kde jsou různé šířky záběru v procentech průměru nástroje. Časy jsou získány z programu NX 8.5 pro kulovou frézu průměru 3mm. Obráběcí doba je vytvořena programem, ale reálné časy obrábění na stroji neodpovídají vždy skutečnosti, protože stroj nejede konstantní rychlostí, ale vždy se zrychlením a brzdí před dojezdem. Vždy jsou 1,5 až 2 krát větší než vypočítá software, ale pro názornou ukázkou uvádím délky jednotlivých cyklů z programu NX 8.5.

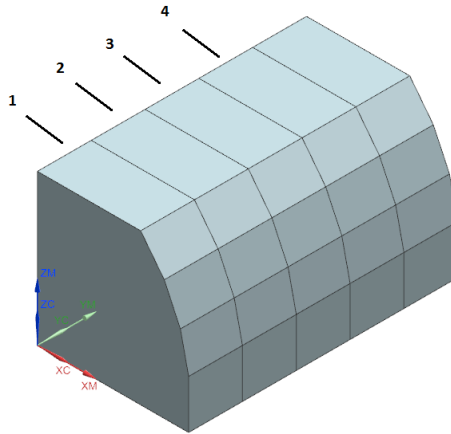
Tab. 20 Časy obrábění podle NX 8.5

Obrobek_1 (kulová fréza Ø3mm)	
šířka záběru (% x ØD)	čas obrábění (s)
5%	483
10%	246
15%	164
20%	122
25%	95

8.3.3.2 Srovnávací dokončovací operace

Pro srovnávací dokončovací operaci byla stejně jako v předchozím případě použita metoda obrábění contour area, která je určena na dokončování mělkých a horizontálních ploch.

Princip obrábění a následného měření drsnosti povrchu je založen na tom, že na každém segmentu jsou jiné parametry obrábění pro následné porovnání výsledků se základní dokončovací operace. Obrábění bylo provedeno jen jedním rozměrem nástroje a to byl nástroj s průměrem 5mm (kulová válcová fréza s průměrem 5 mm). Před vlastním dokončováním byla stejně jako vždy použita semi – finish operace pro zabezpečení stejné kvality obráběné plochy. Na obrázku můžeme vidět, jak jsou označeny jednotlivé segmenty.



Obr. 58 Porovnávací dok. operace

1. Segment – sousledné frézování

U segmentu 1 byl změněn parametr cut direction (druh frézování) z nesousledného na sousledné. Bude porovnávána drsnost povrchu při obrábění stejným nástrojem a za stejných podmínek s nesousledným frézováním.

- otáčky - 12000 ot/min
- posuvová rychlost – 2000 mm/min
- cut pattern – zig
- **cut direction – conventional cut (nesousledné frézování)**
- stepover – 10% tool flat
- stepover applied – on part

2. Segment – vliv scallop height

U segmentu 3 byl změněn parametr stepover (šířka záběru a_e) z % tool flat na scallop. Scallop je maximální výška nerovností, která vznikne na povrchu po obrobení. Software podle zadané velikosti určí šířku záběru, aby nebyla překročena maximální velikost nerov-

ností. Budou porovnávány výšky nerovností, které vzniknou na obrobené ploše se zadanou maximální hodnotou scallop v programu.

- otáčky - 12000 ot/min
- posuvová rychlost – 2000 mm/min
- cut pattern – zig
- cut direction – climb cut (sousedné frézování)
- **stepover (scallop) – maximum scallop height 0,01mm**
- stepover applied – on part

3. Segment – vliv posuvové rychlosti

U segmentu 3 byla změněna velikost posuvové rychlosti z 2000 mm/min na 1000 mm/min. Bude porovnávána drsnost povrchu při obrábění stejným nástrojem a za stejných podmínek při dvojnásobném zmenšení posuvové rychlosti.

- otáčky - 12000 ot/min
- **posuvová rychlost – 1000mm/min**
- cut pattern – zig
- cut direction – climb cut (sousedné frézování)
- stepover – 10% tool flat
- stepover applied – on part

4. Segment – vliv řezné rychlosti

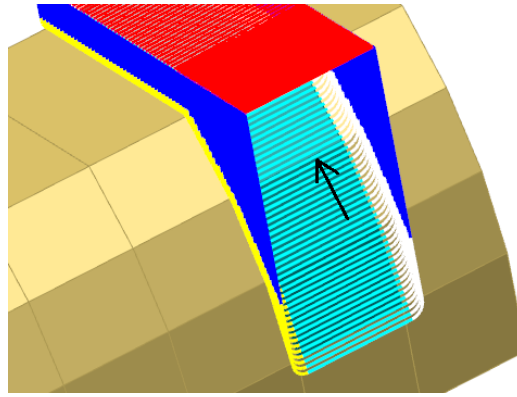
U segmentu 4 byly změněny otáčky z 12000 ot/min na 6000 ot/min. Bude porovnávána drsnost povrchu při obrábění stejným nástrojem a za stejných podmínek při dvojnásobném zmenšení otáček.

Otáčky - 6000 ot/min

- posuvová rychlost – 2000 mm/min
- cut pattern – zig
- cut direction – climb cut (sousedné frézování)
- stepover – 10% tool flat
- stepover applied – on part

9 MĚŘENÍ A ZPRACOVÁNÍ VÝSLEDKŮ

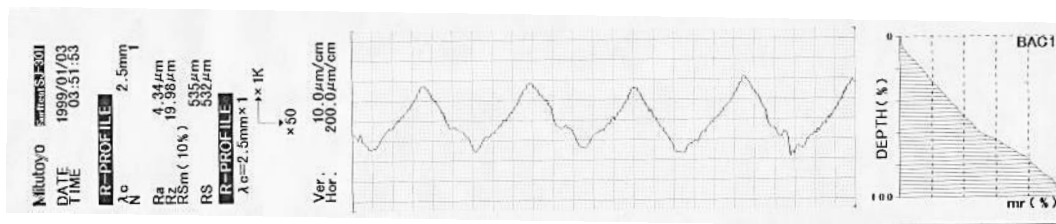
Měření bylo provedeno ve směru s největším předpokládaným parametrem drsnosti. Při obrábění konstantního sklonu plochy a při zvolených obráběcích metodách je největší předpokládaná drsnost povrchu v příčném směru na pohyb nástroje.



Obr. 59 Vektor měření parametrů drsnosti

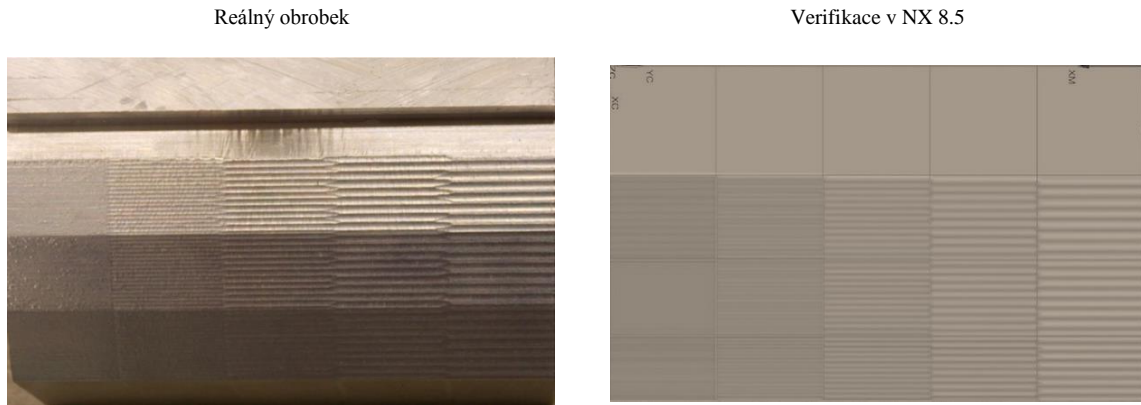
Po obrobení byl obrobek upnut do sklopného svěráku, na kterém byla nastavena hodnota úhlu dané plochy, která měla být měřena. Měřilo se podle normy ČSN EN ISO 4288.

Pomocí drsnoměru Mitutoyo SJ-301 byly získány data, které byly zpracovány a vyhodnoceny v programu Excel. Veličiny charakterizující kvalitu povrchu obrobené plochy jsem po konzultaci s vedoucím práce zvolil jako nejvhodnější parametry Ra a Rz . Následně byly tyto parametry statisticky vyhodnoceny a vznikly odhady pro interpretaci kvality povrchu. Měření bylo prováděno na několika specifikovaných místech obrobené plochy zkušebního obrobku a pro statistickou analýzu se dále pracuje s odhadem střední hodnoty. Každá měřená plocha se liší svojí charakteristikou a to úhlem sklonu roviny, použitým průměrem nástroje a šířkou záběru. Všechny tyto charakteristické plochy byly vždy měřeny celkem 10 krát. Na obrázku 59 můžeme vidět ukázkou ze záznamu měření při porovnávacím obrábění s nástrojem $\varnothing 5\text{mm}$, sklonem plochy 0° , šířkou záběru $a_e=5\% \cdot \varnothing \text{Dmm}$ a posuvovou rychlostí 1000 m/min (naměřená data jsou uvedena v příloze na CD/Přílohy DP/Naměřená_data).



Obr. 60 Záznam o měření na drsnoměru s nástrojem $\varnothing 5\text{mm}$

Na obrázku 61 lze vidět ukázkou kvality obrobené plochy po frézování ploch u reálného obrobku a pro srovnání u verifikace v programu NX 8.5. Jednotlivé sklony ploch a odstupňované segmenty s odlišnou šířkou záběru.



Obr. 61 Ukázka obrobené plochy

9.1 Vyhodnocovací veličiny a způsob zpracování naměřených dat

Jako základní charakterizující veličiny pro posouzení kvality povrchu obrobené plochy byly zvoleny parametry Ra a Rz .

- Ra (Střední aritmetická odchylka profilu)
- Rz (Největší výška profilu drsnosti v rozsahu základní délky)

Následně tyto hodnoty byly statisticky vyhodnoceny a zpracovány pomocí programu Excel. Na základě naměřených parametrů kvality povrchu obrobené plochy na zkušebních obrobkách se stanoví odhad střední hodnoty, odhad směrodatné odchylky a variační koeficient.

Odhad střední hodnoty

Pro odhad teoretické střední hodnoty základního souboru používáme aritmetický průměr \bar{x} , který lze empiricky vypočítat pro výběrový soubor s použitím konečného počtu n jedinců náhodně vybraných ze základního souboru. Aritmetický průměr nemusí být skutečně se vyskytující obměnou dané proměnné.

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \quad (20)$$

kde: \bar{x} – odhad střední hodnoty

x_i – i -tá hodnota měřené veličiny

n – počet měření

Odhad směrodatné odchylky

Směrodatná odchylka určuje, jak moc jsou hodnoty rozptýleny či odchýleny od průměru hodnot. Jedná se o kvadratický průměr odchylek hodnot znaku od jejich aritmetického průměru. Je-li směrodatná odchylka malá, jsou si prvky souboru většinou navzájem podobné. Naopak velká směrodatná odchylka poukazuje na velké vzájemné odlišnosti.

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{x})^2} \quad (21)$$

kde: s – odhad směrodatné odchylky

\bar{x} – odhad střední hodnoty

x_i – i -tá hodnota měřené veličiny

n – počet měření

Variační koeficient

Variační koeficient udává, z kolika procent se podílí směrodatná odchylka na aritmetickém průměru a je užitečnou mírou relativního rozptýlení dat. Používá se převážně při statistické kontrole kvality laboratorních testů. Pokud jsou hodnoty variačního koeficientu do 15%, mluvíme o malé variabilitě. Odhad střední hodnoty lze považovat za typickou hodnotu datového souboru.

$$V = \frac{s}{\bar{x}} \cdot 100\% \quad (22)$$

kde: V – variační koeficient

s – odhad směrodatné odchylky

\bar{x} – odhad střední hodnoty

9.2 Statistické vyhodnocení hodnot parametrů drsnosti Ra

V tabulce 21 je zapsán bodový odhad střední hodnoty drsnosti Ra v mikrometrech z 10 měření na každé ploše s nástrojem $\varnothing 3\text{mm}$. Nejnižší hodnota drsnosti $Ra=1,88\mu\text{m}$ byla naměřena při úhlu 0° a šířce záběru $a_e=5\%.\varnothing D$ a nejvyšší hodnota $Ra=15,05\mu\text{m}$ při úhlu $62,5^\circ$ a šířce záběru $a_e=25\%.\varnothing D$. Při použití těchto řezných parametrů a daného nástroje se s rostoucí šířkou záběru a sklonem ploch hodnoty drsnosti Ra zvyšují.

Tab. 21 Odhad střední hodnoty parametru drsnosti Ra pro nástroj $\varnothing 3\text{mm}$

nástroj $\varnothing 3\text{mm}$	0°	$12,5^\circ$	25°	$37,5^\circ$	50°	$62,5^\circ$	75°
$Ra (\mu\text{m})$							
$a_e=5\%.\varnothing D$	1,88	2,25	2,54	2,74	3,90	4,18	3,79
$a_e=10\%.\varnothing D$	2,70	3,70	3,47	3,63	3,92	4,41	6,11
$a_e=15\%.\varnothing D$	3,31	4,38	4,98	5,11	6,43	6,38	8,47
$a_e=20\%.\varnothing D$	7,57	7,60	7,60	7,68	7,93	9,25	10,68
$a_e=25\%.\varnothing D$	11,16	11,70	12,33	12,42	13,82	15,05	14,73

V tabulce 22 jsou zapsány hodnoty směrodatné odchylky a variačního koeficientu pro hodnoty drsnosti Ra pro všechny úhly, šířky záběrů s nástrojem $\varnothing 3\text{mm}$. Z tabulky je možné zjistit, že hodnoty směrodatné odchylky a variačního koeficientu jsou nízké. Z toho usoudit, že odhad střední hodnoty může být použit dál pro prezentaci výsledků.

Tab. 22 Směrodatná odchylka a variační koef. pro nástroj $\varnothing 3\text{mm}$ (Ra)

nástroj $\varnothing 3\text{mm}$		0°	$12,5^\circ$	25°	$37,5^\circ$	50°	$62,5^\circ$	75°
$a_e=5\%.\varnothing D$	s (μm)	0,14	0,08	0,30	0,08	0,13	0,61	0,32
	V (%)	7,62	3,43	11,63	3,03	3,44	14,66	8,31
$a_e=10\%.\varnothing D$	s (μm)	0,10	0,33	0,14	0,12	0,17	0,24	0,20
	V (%)	3,67	8,83	3,95	3,29	4,33	5,40	3,27
$a_e=15\%.\varnothing D$	s (μm)	0,26	0,27	0,43	0,24	0,10	0,14	0,38
	V (%)	7,84	6,14	8,55	4,60	1,58	2,20	4,47
$a_e=20\%.\varnothing D$	s (μm)	0,43	0,32	0,36	0,18	0,27	0,22	0,63
	V (%)	5,70	4,28	4,70	2,32	3,41	2,43	5,90
$a_e=25\%.\varnothing D$	s (μm)	0,36	0,24	0,47	0,36	0,31	0,80	0,59
	V (%)	3,21	2,01	3,82	2,46	2,24	5,32	4,01

V tabulce 23 je zapsán bodový odhad střední hodnoty drsnosti Ra v mikrometrech z 10 měření na každé ploše s nástrojem $\varnothing 4\text{mm}$. Nejnižší hodnota drsnosti $Ra=1,28\mu\text{m}$ byla naměřena při úhlu 0° a šířce záběru $a_e=5\%.\varnothing D$ a nejvyšší hodnota $Ra=15,36\mu\text{m}$ při úhlu $37,5^\circ$ a šířce záběru $a_e=25\%.\varnothing D$. Při použití těchto řezných parametrů a daného nástroje se s rostoucí šířkou záběru a sklonem ploch hodnoty drsnosti Ra zvyšují.

Tab. 23 Odhad střední hodnoty parametru drsnosti Ra pro nástroj $\varnothing 4\text{mm}$

nástroj $\varnothing 4\text{mm}$	0°	12,5°	25°	37,5°	50°	62,5°	75°
Ra (μm)							
$a_e=5\%.\varnothing D$	1,28	2,01	2,16	2,04	1,95	2,60	3,08
$a_e=10\%.\varnothing D$	2,83	3,98	4,63	4,19	4,45	4,65	5,88
$a_e=15\%.\varnothing D$	5,62	6,30	6,24	6,56	6,78	7,03	8,35
$a_e=20\%.\varnothing D$	9,17	9,83	10,02	9,84	9,81	9,93	11,14
$a_e=25\%.\varnothing D$	13,10	14,24	15,10	15,36	15,05	15,08	15,04

V tabulce 24 jsou zapsány hodnoty směrodatné odchylky a variačního koeficientu pro hodnoty drsnosti Ra pro všechny úhly, šířky záběrů u nástroje $\varnothing 4\text{mm}$. Z tabulky je možné zjistit, že hodnoty směrodatné odchylky a variačního koeficientu jsou nízké. Z toho usoudit, že odhad střední hodnoty může být použit dál pro prezentaci výsledků.

Tab. 24 Směrodatná odchylka a variační koef. pro nástroj $\varnothing 4\text{mm}$ (Ra)

nástroj $\varnothing 4\text{mm}$		0°	12,5°	25°	37,5°	50°	62,5°	75°
$a_e=5\%.\varnothing D$	s (μm)	0,02	0,16	0,17	0,20	0,21	0,09	0,23
	V (%)	1,81	8,16	8,02	9,77	11,00	3,44	7,48
$a_e=10\%.\varnothing D$	s (μm)	0,07	0,08	0,29	0,17	0,24	0,14	0,23
	V (%)	2,32	2,02	6,23	3,96	5,32	3,01	3,96
$a_e=15\%.\varnothing D$	s (μm)	0,39	0,39	0,28	0,11	0,12	0,26	0,16
	V (%)	6,68	6,25	4,48	1,62	1,82	3,67	1,96
$a_e=20\%.\varnothing D$	s (μm)	0,36	0,29	0,18	0,08	0,19	0,26	0,21
	V (%)	3,91	2,93	1,83	0,77	1,89	2,63	1,89
$a_e=25\%.\varnothing D$	s (μm)	0,19	0,48	0,22	0,33	0,40	0,30	0,68
	V (%)	1,42	3,40	1,45	2,15	2,69	1,98	4,49

V tabulce 25 je zapsán bodový odhad střední hodnoty drsnosti Ra v mikrometrech z 10 měření na každé ploše s nástrojem $\varnothing 5\text{mm}$. Nejnížší hodnota drsnosti $Ra=2,14\mu\text{m}$ byla naměřena při úhlu 0° a šířce záběru $a_e=5\%.\varnothing D$ a nejvyšší hodnota $Ra=23,28\mu\text{m}$ při úhlu 75° a šířce záběru $a_e=25\%.\varnothing D$. Při použití těchto rezných parametrů a daného nástroje se s rostoucí šířkou záběru a sklonem ploch hodnoty drsnosti Ra zvyšují.

Tab. 25 Odhad střední hodnoty parametru drsnosti Ra pro nástroj $\varnothing 5\text{mm}$

nástroj $\varnothing 5\text{mm}$	0°	12,5°	25°	37,5°	50°	62,5°	75°
Ra (μm)							
$a_e=5\%.\varnothing D$	2,14	2,58	2,29	2,22	2,80	3,07	4,38
$a_e=10\%.\varnothing D$	4,07	4,52	4,07	3,96	4,70	4,94	5,65
$a_e=15\%.\varnothing D$	7,35	8,27	7,26	7,21	8,43	9,83	11,88
$a_e=20\%.\varnothing D$	8,68	9,94	10,57	10,59	12,73	13,20	16,62
$a_e=25\%.\varnothing D$	19,55	20,01	20,18	19,45	20,36	20,94	23,28

V tabulce 26 jsou zapsány hodnoty směrodatné odchylky a variačního koeficientu pro hodnoty drsnosti Ra pro všechny úhly, šířky záběrů u nástroje $\varnothing 5\text{mm}$. Z tabulky je možné zjistit, že hodnoty směrodatné odchylky a variačního koeficientu jsou nízké. Z toho usoudit, že odhad střední hodnoty může být použit dál pro prezentaci výsledků.

Tab. 26 Směrodatná odchylka a variační koef. pro nástroj $\varnothing 5\text{mm}$ (Ra)

nástroj $\varnothing 5\text{mm}$		0°	12,5°	25°	37,5°	50°	62,5°	75°
$a_e=5\%.\varnothing D$	s (μm)	0,09	0,29	0,21	0,29	0,15	0,35	0,34
	V (%)	4,00	11,10	9,07	13,16	5,38	11,32	7,84
$a_e=10\%.\varnothing D$	s (μm)	0,36	0,17	0,27	0,25	0,21	0,21	0,40
	V (%)	8,80	3,80	6,69	6,32	4,40	4,15	7,01
$a_e=15\%.\varnothing D$	s (μm)	0,29	0,17	0,20	0,32	0,59	0,28	0,30
	V (%)	4,01	2,12	2,72	4,49	7,01	2,81	2,56
$a_e=20\%.\varnothing D$	s (μm)	0,18	0,28	0,31	0,27	0,56	0,37	0,44
	V (%)	2,09	2,84	2,94	2,58	4,43	2,83	2,64
$a_e=25\%.\varnothing D$	s (μm)	0,62	0,49	0,38	4,59	0,49	0,45	0,50
	V (%)	3,15	2,46	1,89	13,61	2,43	2,14	2,13

V tabulce 27 je zapsán bodový odhad střední hodnoty drsnosti Ra v mikrometrech z 10 měření na každé ploše s nástrojem $\varnothing 6\text{mm}$. Nejnižší hodnota drsnosti $Ra=1,73\mu\text{m}$ byla naměřena při úhlu $12,5^\circ$ a šířce záběru $a_e=5\%.\varnothing D$ a nejvyšší hodnota $Ra=23,63\mu\text{m}$ při úhlu $62,5^\circ$ a šířce záběru $a_e=25\%.\varnothing D$. Při použití těchto řezných parametrů a daného nástroje se s rostoucí šířkou záběru a sklonem ploch hodnoty drsnosti Ra zvyšují.

Tab. 27 Odhad střední hodnoty parametru drsnosti Ra pro nástroj $\varnothing 6\text{mm}$

nástroj $\varnothing 6\text{mm}$	0°	12,5°	25°	37,5°	50°	62,5°	75°
Ra (μm)							
$a_e=5\%.\varnothing D$	1,76	1,73	2,83	2,61	4,28	5,62	5,19
$a_e=10\%.\varnothing D$	4,53	4,22	5,30	5,47	6,76	8,32	9,65
$a_e=15\%.\varnothing D$	9,05	9,15	9,07	9,83	10,32	9,92	11,12
$a_e=20\%.\varnothing D$	11,88	13,04	14,39	15,86	17,00	19,29	21,28
$a_e=25\%.\varnothing D$	18,81	19,08	20,01	20,43	21,08	23,63	23,47

V tabulce 28 jsou zapsány hodnoty směrodatné odchylky a variačního koeficientu pro hodnoty drsnosti Ra pro všechny úhly, šířky záběrů u nástroje $\varnothing 6\text{mm}$. Z tabulky je možné zjistit, že hodnoty směrodatné odchylky a variačního koeficientu jsou nízké. Z toho usoudit, že odhad střední hodnoty může být použit dál pro prezentaci výsledků.

Tab. 28 Směrodatná odchylka a variační koef. pro nástroj \varnothing 6mm (R_a)

nástroj \varnothing 6mm		0°	12,5°	25°	37,5°	50°	62,5°	75°
$a_e=5\%.\varnothing D$	s (μm)	0,04	0,14	0,41	0,13	0,12	0,18	0,20
	V (%)	2,31	8,32	15,10	5,17	2,33	3,24	3,91
$a_e=10\%.\varnothing D$	s (μm)	0,34	0,24	0,42	0,17	0,37	0,25	0,29
	V (%)	7,40	5,65	8,02	3,18	5,49	3,05	2,96
$a_e=15\%.\varnothing D$	s (μm)	0,21	0,38	0,28	0,25	0,62	0,19	0,20
	V (%)	2,30	3,90	3,10	2,55	5,96	1,93	1,80
$a_e=20\%.\varnothing D$	s (μm)	0,29	0,09	0,59	0,36	0,18	0,43	0,67
	V (%)	2,46	0,70	4,10	2,29	1,05	2,20	3,13
$a_e=25\%.\varnothing D$	s (μm)	0,09	0,65	0,47	0,38	0,50	0,60	0,63
	V (%)	0,46	3,38	2,33	1,84	2,38	2,56	2,69

V tabulce 29 je zapsán bodový odhad střední hodnoty drsnosti R_a v mikrometrech z 10 měření na každé ploše s nástrojem \varnothing 8mm. Nejnižší hodnota drsnosti $R_a=1,82\mu\text{m}$ byla naměřena při úhlu 50° a šířce záběru $a_e=5\%.\varnothing D$ a nejvyšší hodnota $R_a=30,03\mu\text{m}$ při úhlu 75° a šířce záběru $a_e=25\%.\varnothing D$. Při použití těchto řezných parametrů a daného nástroje se s rostoucí šířkou záběru a sklonem ploch hodnoty drsnosti R_a zvyšují.

Tab. 29 Odhad střední hodnoty parametru drsnosti R_a pro nástroj \varnothing 8mm

nástroj \varnothing 8mm	0°	12,5°	25°	37,5°	50°	62,5°	75°
R_a (μm)							
$a_e=5\%.\varnothing D$	2,95	2,25	3,81	3,73	1,82	2,22	2,20
$a_e=10\%.\varnothing D$	4,98	4,77	5,59	5,52	4,40	5,87	6,42
$a_e=15\%.\varnothing D$	8,47	8,95	10,40	11,06	8,67	9,16	10,93
$a_e=20\%.\varnothing D$	14,85	15,45	17,05	17,17	17,26	18,41	18,59
$a_e=25\%.\varnothing D$	19,99	22,09	24,25	25,16	26,11	27,91	30,03

V tabulce 30 jsou zapsány hodnoty směrodatné odchylky a variačního koeficientu pro hodnoty drsnosti R_a pro všechny úhly, šířky záběrů u nástroje \varnothing 8mm. Z tabulky je možné zjistit, že hodnoty směrodatné odchylky a variačního koeficientu jsou nízké. Z toho usoudit, že odhad střední hodnoty může být použit dál pro prezentaci výsledků.

Tab. 30 Směrodatná odchylka a variační koef. pro nástroj \varnothing 8mm (R_a)

nástroj \varnothing 8mm		0°	12,5°	25°	37,5°	50°	62,5°	75°
$a_e=5\%.\varnothing D$	s (μm)	0,17	0,36	0,45	0,39	0,20	0,31	0,27
	V (%)	5,92	10,88	11,91	10,39	10,88	14,16	12,45
$a_e=10\%.\varnothing D$	s (μm)	0,23	0,32	0,26	0,29	1,14	0,10	0,12
	V (%)	4,53	6,70	4,72	5,21	10,86	1,66	1,92
$a_e=15\%.\varnothing D$	s (μm)	0,59	0,24	0,49	0,21	0,25	0,27	0,16
	V (%)	6,95	2,68	4,68	1,90	2,93	2,92	1,46
$a_e=20\%.\varnothing D$	s (μm)	0,34	0,32	0,19	0,43	0,19	0,33	0,32
	V (%)	2,27	2,08	1,13	2,50	1,09	1,79	1,75
$a_e=25\%.\varnothing D$	s (μm)	0,22	0,22	0,34	0,76	0,16	0,26	0,29
	V (%)	1,12	1,02	1,42	3,02	0,61	0,92	0,96

9.3 Statistické vyhodnocení hodnot parametrů drsnosti R_z

V tabulce 31 jsou uvedeny bodové odhady středních hodnot drsnosti R_z v mikrometrech z 10 měření na každé ploše s nástrojem $\varnothing 3\text{mm}$. Z tabulky zjistíme, že s rostoucí šířkou záběru a sklonem obráběné plochy hodnoty drsnosti R_z zvyšují. Největší vzniklá nerovnost $R_z=63,24\mu\text{m}$ byla naměřena u sklonu plochy 75° a šířce záběru $a_e=25\%.\varnothing D$ a nejnižší hodnota $R_z=10,96\mu\text{m}$ u sklonu plochy 0° a šířky záběru $a_e=5\%.\varnothing D$.

Tab. 31 Odhad střední hodnoty parametru drsnosti R_z pro nástroj $\varnothing 3\text{mm}$

nástroj $\varnothing 3\text{mm}$	0°	$12,5^\circ$	25°	$37,5^\circ$	50°	$62,5^\circ$	75°
$R_z (\mu\text{m})$							
$a_e=5\%.\varnothing D$	10,96	14,11	14,09	14,95	17,84	21,03	21,75
$a_e=10\%.\varnothing D$	15,26	18,28	18,15	18,74	24,91	25,91	31,32
$a_e=15\%.\varnothing D$	18,42	20,23	24,58	24,58	32,52	32,69	38,01
$a_e=20\%.\varnothing D$	32,96	35,50	41,52	41,11	42,98	45,03	52,16
$a_e=25\%.\varnothing D$	47,04	49,95	54,07	56,01	60,12	63,13	63,24

V tabulce 32 jsou zapsány hodnoty směrodatné odchyly a variačního koeficientu pro hodnoty drsnosti R_z pro všechny úhly, šířky záběrů u nástroje $\varnothing 3\text{mm}$. Z tabulky je možné zjistit, že hodnoty směrodatné odchyly a variačního koeficientu jsou nízké. Z toho usoudit, že odhad střední hodnoty může být použit dál pro prezentaci výsledků.

Tab. 32 Směrodatná odchylka a variační koef. pro nástroj $\varnothing 3\text{mm}$ (R_z)

nástroj $\varnothing 3\text{mm}$		0°	$12,5^\circ$	25°	$37,5^\circ$	50°	$62,5^\circ$	75°
$a_e=5\%.\varnothing D$	s (μm)	0,51	0,54	0,64	0,38	0,76	2,46	1,61
	V (%)	4,69	3,82	4,55	2,54	4,24	11,68	7,41
$a_e=10\%.\varnothing D$	s (μm)	1,13	0,60	1,63	0,25	0,28	3,65	0,67
	V (%)	7,39	3,26	8,95	1,32	1,11	14,10	2,13
$a_e=15\%.\varnothing D$	s (μm)	1,44	0,74	0,82	0,25	1,49	1,09	0,44
	V (%)	7,83	3,67	3,34	0,87	4,57	3,32	1,16
$a_e=20\%.\varnothing D$	s (μm)	1,15	0,71	1,39	0,29	0,33	3,02	2,23
	V (%)	3,48	2,00	3,36	0,70	0,76	6,71	4,28
$a_e=25\%.\varnothing D$	s (μm)	2,19	1,51	2,64	0,20	0,24	1,96	2,50
	V (%)	4,65	3,02	4,87	0,35	0,40	3,11	3,96

V tabulce 33 jsou uvedeny bodové odhady středních hodnot drsnosti R_z v mikrometrech z 10 měření na každé ploše s nástrojem $\varnothing 4\text{mm}$. Z tabulky zjistíme, že s rostoucí šířkou záběru a sklonem obráběné plochy hodnoty drsnosti R_z zvyšují. Největší vzniklá nerovnost $R_z=69,10\mu\text{m}$ byla naměřena u sklonu plochy 75° a šířce záběru $a_e=25\%.\varnothing D$ a nejnižší hodnota $R_z=8,97$ u sklonu plochy 0° a šířky záběru $a_e=5\%.\varnothing D$.

Tab. 33 Odhad střední hodnoty parametru drsnosti R_z pro nástroj $\varnothing 4\text{mm}$

nástroj $\varnothing 4\text{mm}$		0°	12,5°	25°	37,5°	50°	62,5°	75°
$R_z (\mu\text{m})$								
$a_e=5\%.\varnothing D$		8,97	11,64	13,12	11,86	15,06	19,32	17,75
$a_e=10\%.\varnothing D$		14,64	22,15	23,90	22,23	25,93	28,01	31,23
$a_e=15\%.\varnothing D$		27,13	27,87	29,68	27,74	30,03	33,10	38,02
$a_e=20\%.\varnothing D$		38,68	40,65	44,45	45,22	40,86	42,90	48,12
$a_e=25\%.\varnothing D$		55,51	62,02	63,57	64,26	64,34	68,55	69,10

V tabulce 34 jsou zapsány hodnoty směrodatné odchylky a variačního koeficientu pro hodnoty drsnosti R_z pro všechny úhly, šířky záběrů u nástroje $\varnothing 4\text{mm}$. Z tabulky je možné zjistit, že hodnoty směrodatné odchylky a variačního koeficientu jsou nízké. Z toho usoudit, že odhad střední hodnoty může být použit dál pro prezentaci výsledků.

Tab. 34 Směrodatná odchylka a variační koef. pro nástroj $\varnothing 4\text{mm}$ (R_z)

nástroj $\varnothing 4\text{mm}$		0°	12,5°	25°	37,5°	50°	62,5°	75°
$a_e=5\%.\varnothing D$	s (μm)	0,40	0,48	0,66	0,84	0,40	0,68	0,52
	V (%)	4,51	4,11	5,05	7,08	2,68	3,53	2,94
$a_e=10\%.\varnothing D$	s (μm)	0,22	1,08	0,72	0,34	0,23	0,27	1,04
	V (%)	1,49	4,89	3,00	1,52	0,90	0,96	3,34
$a_e=15\%.\varnothing D$	s (μm)	0,67	0,48	0,43	0,67	0,20	0,34	0,52
	V (%)	2,47	1,73	1,43	2,42	0,67	1,04	1,37
$a_e=20\%.\varnothing D$	s (μm)	0,39	0,69	1,31	0,48	0,86	0,61	0,28
	V (%)	1,01	1,70	2,96	1,06	2,10	1,43	0,59
$a_e=25\%.\varnothing D$	s (μm)	0,79	0,42	0,68	0,64	0,98	1,33	0,92
	V (%)	1,43	0,67	1,07	0,99	1,52	1,94	1,34

V tabulce 35 jsou uvedeny bodové odhady středních hodnot drsnosti R_z v mikrometrech z 10 měření na každé ploše s nástrojem $\varnothing 5\text{mm}$. Z tabulky zjistíme, že s rostoucí šířkou záběru a sklonem obráběné plochy hodnoty drsnosti R_z zvyšují. Největší vzniklá nerovnost $R_z=85,82\mu\text{m}$ byla naměřena u sklonu plochy 50° a šířce záběru $a_e=25\%.\varnothing D$ a nejnižší hodnota $R_z=10,70\mu\text{m}$ u sklonu plochy 0° a šířky záběru $a_e=5\%.\varnothing D$.

Tab. 35 Odhad střední hodnoty parametru drsnosti R_z pro nástroj $\varnothing 5\text{mm}$

nástroj $\varnothing 5\text{mm}$		0°	12,5°	25°	37,5°	50°	62,5°	75°
$R_z (\mu\text{m})$								
$a_e=5\%.\varnothing D$		10,70	12,64	12,54	14,91	12,87	18,19	20,50
$a_e=10\%.\varnothing D$		17,02	18,05	19,53	21,51	21,51	21,57	22,99
$a_e=15\%.\varnothing D$		35,57	39,89	31,59	34,11	39,94	41,04	44,22
$a_e=20\%.\varnothing D$		42,80	49,05	50,32	47,35	53,70	57,36	64,19
$a_e=25\%.\varnothing D$		79,42	82,20	80,14	84,81	85,82	83,76	85,78

V tabulce 36 jsou zapsány hodnoty směrodatné odchylky a variačního koeficientu pro hodnoty drsnosti R_z pro všechny úhly, šířky záběrů u nástroje $\varnothing 5\text{mm}$. Z tabulky je možné zjistit, že hodnoty směrodatné odchylky a variačního koeficientu jsou nízké. Z toho usoudit, že odhad střední hodnoty může být použit dál pro prezentaci výsledků.

Tab. 36 Směrodatná odchylka a variační koef. pro nástroj $\varnothing 5\text{mm}$ (R_z)

nástroj $\varnothing 5\text{mm}$		0°	12,5°	25°	37,5°	50°	62,5°	75°
$a_e=5\%.\varnothing D$	s (μm)	0,33	0,52	1,45	0,38	0,78	0,64	0,31
	V (%)	3,12	4,09	11,54	2,52	6,04	3,53	1,54
$a_e=10\%.\varnothing D$	s (μm)	0,24	0,15	1,29	0,80	0,61	0,42	0,59
	V (%)	1,43	0,84	6,60	3,72	2,84	1,93	2,58
$a_e=15\%.\varnothing D$	s (μm)	0,41	1,14	1,19	0,75	0,70	0,43	0,78
	V (%)	1,14	2,86	3,77	2,20	1,76	1,05	1,76
$a_e=20\%.\varnothing D$	s (μm)	0,51	0,39	0,51	0,23	0,98	1,08	0,44
	V (%)	1,20	0,80	1,01	0,49	1,83	1,89	0,68
$a_e=25\%.\varnothing D$	s (μm)	1,11	1,43	0,40	0,38	0,76	1,06	0,68
	V (%)	1,40	1,74	0,50	0,45	0,89	1,27	0,80

V tabulce 37 jsou uvedeny bodové odhady středních hodnot drsnosti R_z v mikrometrech z 10 měření na každé ploše s nástrojem $\varnothing 6\text{mm}$. Z tabulky zjistíme, že s rostoucí šířkou záběru a sklonem obráběné plochy hodnoty drsnosti R_z zvyšují. Největší vzniklá nerovnost $R_z=94,04\mu\text{m}$ byla naměřena u sklonu plochy 75° a šířce záběru $a_e=25\%.\varnothing D$ a nejnižší hodnota $R_z=9,53\mu\text{m}$ u sklonu plochy 12,5° a šířky záběru $a_e=5\%.\varnothing D$.

Tab. 37 Odhad střední hodnoty parametru drsnosti R_z pro nástroj $\varnothing 6\text{mm}$

nástroj $\varnothing 6\text{mm}$	0°	12,5°	25°	37,5°	50°	62,5°	75°
R_z (μm)							
$a_e=5\%.\varnothing D$	10,19	9,53	14,82	14,19	21,61	22,85	24,89
$a_e=10\%.\varnothing D$	18,87	20,05	25,09	26,22	33,68	37,73	40,00
$a_e=15\%.\varnothing D$	33,80	37,10	36,13	39,29	41,02	44,45	53,42
$a_e=20\%.\varnothing D$	57,30	53,83	58,93	62,39	61,90	63,99	68,01
$a_e=25\%.\varnothing D$	79,93	78,78	86,55	85,06	90,12	93,02	94,04

V tabulce 38 jsou zapsány hodnoty směrodatné odchylky a variačního koeficientu pro hodnoty drsnosti R_z pro všechny úhly, šířky záběrů u nástroje $\varnothing 6\text{mm}$. Z tabulky je možné zjistit, že hodnoty směrodatné odchylky a variačního koeficientu jsou nízké. Z toho usoudit, že odhad střední hodnoty může být použit dál pro prezentaci výsledků.

Tab. 38 Směrodatná odchylka a variační koef. pro nástroj $\varnothing 6\text{mm}$ (R_z)

nástroj $\varnothing 6\text{mm}$		0°	12,5°	25°	37,5°	50°	62,5°	75°
$a_e=5\%.\varnothing D$	s (μm)	0,16	0,48	0,36	0,58	0,99	0,30	0,37
	V (%)	1,57	5,04	2,41	4,09	4,58	1,33	1,48
$a_e=10\%.\varnothing D$	s (μm)	0,49	1,69	0,96	0,38	1,17	1,47	0,55
	V (%)	2,59	8,42	3,84	1,45	3,47	3,90	1,39
$a_e=15\%.\varnothing D$	s (μm)	4,03	1,97	0,82	0,67	0,21	1,43	0,92
	V (%)	11,91	5,32	2,27	1,70	0,52	3,21	1,72
$a_e=20\%.\varnothing D$	s (μm)	0,97	0,90	2,97	2,56	1,16	0,38	3,58
	V (%)	1,69	1,67	5,04	4,11	1,87	0,59	5,27
$a_e=25\%.\varnothing D$	s (μm)	0,30	0,66	2,57	0,35	0,48	0,29	0,34
	V (%)	0,37	0,84	2,96	0,41	0,53	0,31	0,37

V tabulce 39 jsou uvedeny bodové odhady středních hodnot drsnosti R_z v mikrometrech z 10 měření na každé ploše s nástrojem $\varnothing 8\text{mm}$. Z tabulky zjistíme, že s rostoucí šířkou záběru a sklonem obráběné plochy hodnoty drsnosti R_z zvyšují. Největší vzniklá nerovnost $R_z=97,99\mu\text{m}$ byla naměřena u sklonu plochy 75° a šířce záběru $a_e=25\%.\varnothing D$ a nejnižší hodnota $R_z=8,07\mu\text{m}$ u sklonu plochy 0° a šířky záběru $a_e=5\%.\varnothing D$.

Tab. 39 Odhad střední hodnoty parametru drsnosti R_z pro nástroj $\varnothing 8\text{mm}$

nástroj $\varnothing 8\text{mm}$	0°	12,5°	25°	37,5°	50°	62,5°	75°
R_z (μm)							
$a_e=5\%.\varnothing D$	8,07	10,21	14,97	14,73	10,02	12,06	11,61
$a_e=10\%.\varnothing D$	17,81	18,91	24,24	22,53	21,92	28,37	32,46
$a_e=15\%.\varnothing D$	36,97	36,67	40,29	41,22	42,26	46,15	47,83
$a_e=20\%.\varnothing D$	54,39	57,52	59,16	60,91	60,81	68,11	77,84
$a_e=25\%.\varnothing D$	82,10	90,87	87,48	88,63	89,76	91,90	97,99

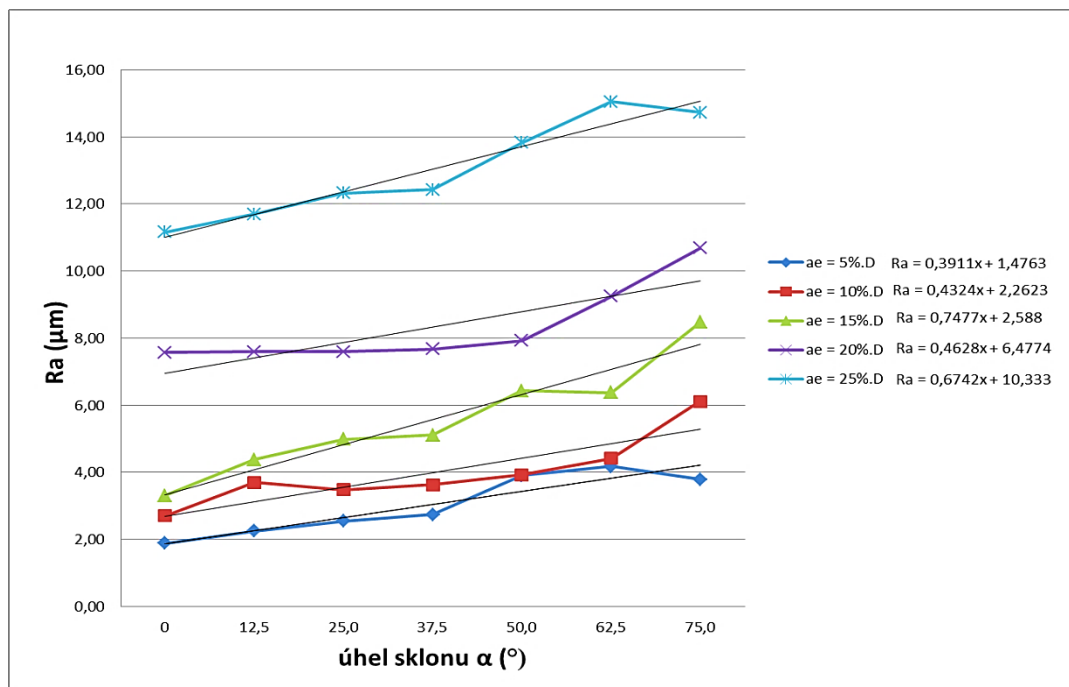
V tabulce 40 jsou zapsány hodnoty směrodatné odchylky a variačního koeficientu pro hodnoty drsnosti R_z pro všechny úhly, šířky záběrů u nástroje $\varnothing 8\text{mm}$. Z tabulky je možné zjistit, že hodnoty směrodatné odchylky a variačního koeficientu jsou nízké. Z toho usoudit, že odhad střední hodnoty může být použit dál pro prezentaci výsledků.

Tab. 40 Směrodatná odchylka a variační koef. pro nástroj $\varnothing 8\text{mm}$ (R_z)

nástroj $\varnothing 8\text{mm}$		0°	12,5°	25°	37,5°	50°	62,5°	75°
$a_e=5\%.\varnothing D$	s (μm)	0,50	0,44	0,98	0,59	0,37	0,57	0,47
	V (%)	6,16	4,26	6,53	4,02	3,67	4,70	4,01
$a_e=10\%.\varnothing D$	s (μm)	0,48	0,20	1,08	0,46	0,35	0,66	1,09
	V (%)	2,69	1,05	4,47	2,06	1,62	2,34	3,36
$a_e=15\%.\varnothing D$	s (μm)	0,67	0,30	0,49	0,41	0,40	0,47	0,59
	V (%)	1,81	0,83	1,22	1,00	0,94	1,01	1,24
$a_e=20\%.\varnothing D$	s (μm)	0,69	0,39	0,49	0,25	0,45	0,23	0,98
	V (%)	1,26	0,68	0,83	0,41	0,74	0,34	1,26
$a_e=25\%.\varnothing D$	s (μm)	0,32	3,90	0,50	0,30	0,45	0,58	0,37
	V (%)	0,39	4,29	0,57	0,34	0,50	0,63	0,38

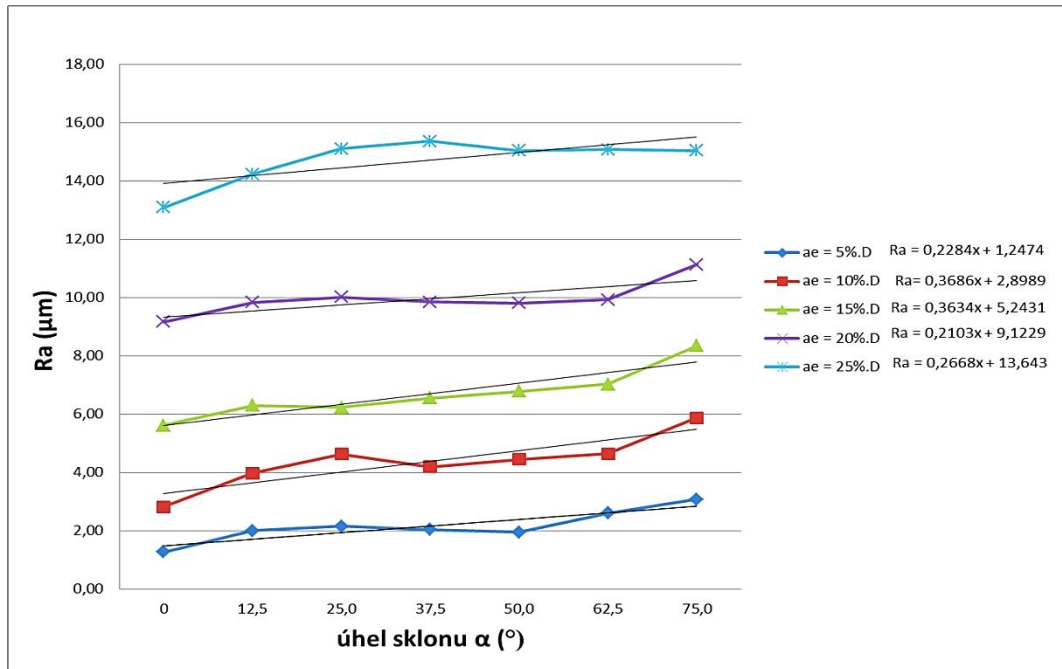
9.4 Vliv sklonu plochy na parametry drsnosti povrchu R_a

Na obrázku 62 je zobrazena závislost sklonu obráběné plochy na drsnost povrchu pro použitý nástroj $\varnothing 3\text{mm}$. Dále jsou barevně vyznačeny spojnice trendů jednotlivých šířek záběru a_e . Pro každou šířku záběru je vytvořen exponenciální model, z kterého je možné vypočítat předpokládanou drsnost povrchu R_a . Regresní model má tvar $R_a = a \cdot e^{b \cdot x}$. Z obrázku je možné vyhodnotit, že při zvětšujícím se sklonu plochy se drsnost R_a zdatelně nezvyšuje. Při vzrůstající šířce záběru se hodnoty R_a zvyšují.



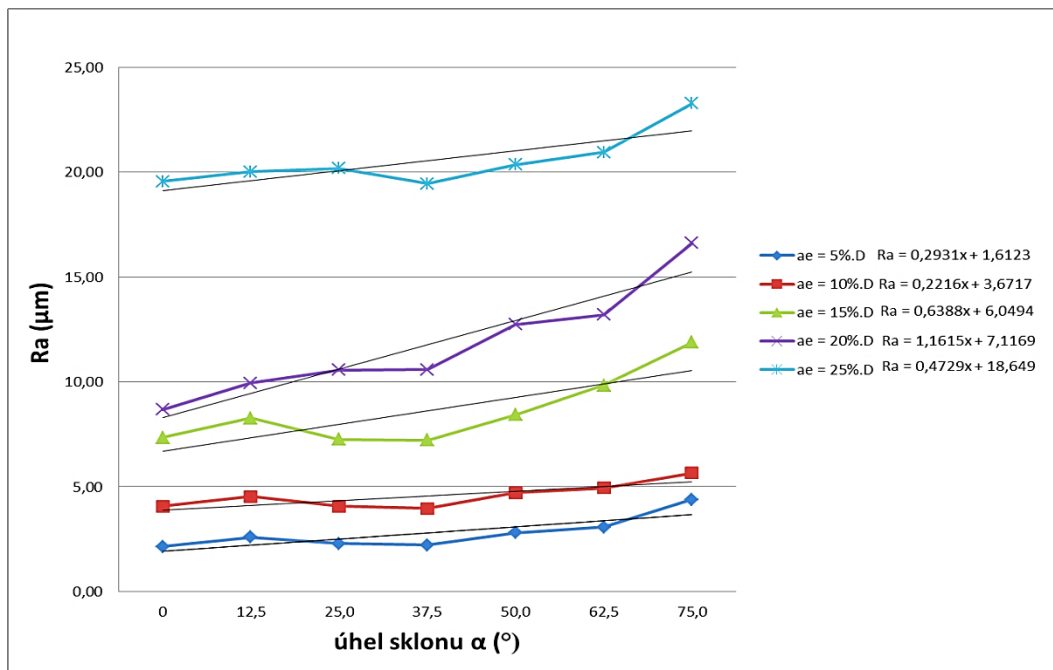
Obr. 62 Závislost drsnosti R_a na sklonu plochy pro nástroj $\varnothing 3\text{mm}$

Na obrázku 63 je zobrazena závislost sklonu obráběné plochy na drsnost povrchu pro použitý nástroj $\varnothing 4\text{mm}$. Dále jsou barevně vyznačeny spojnice trendů jednotlivých šířek záběru a_e . Pro každou šířku záběru je vytvořen exponenciální model, z kterého je možné vypočítat předpokládanou drsnost povrchu R_a . Regresní model má tvar $R_a = a \cdot e^{b \cdot x}$. Z obrázku je možné vyhodnotit, že při zvětšujícím se sklonu plochy se drsnost R_a zdatelně nezvyšuje. Při vzrůstající šířce záběru se hodnoty R_a zvyšují.



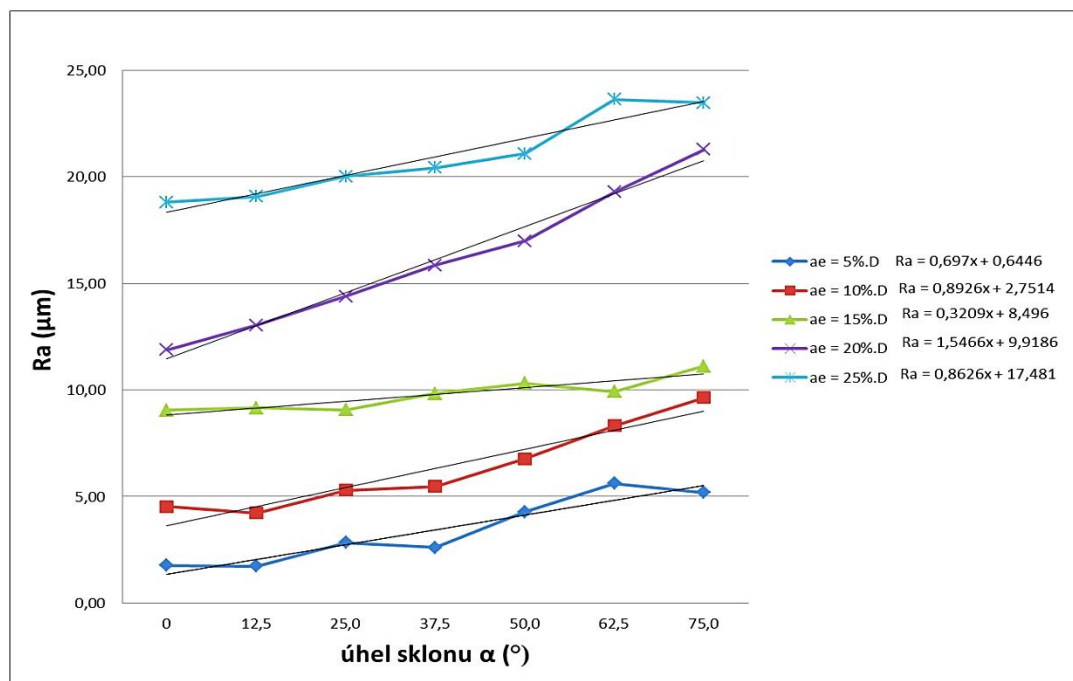
Obr. 63 Závislost drsnosti Ra na sklonu plochy pro nástroj Ø 4mm

Na obrázku 64 je zobrazena závislost sklonu obráběné plochy na drsnost povrchu pro použitý nástroj Ø5mm. Dále jsou barevně vyznačeny spojnice trendů jednotlivých šířek záběru a_e . Pro každou šířku záběru je vytvořen exponenciální model, z kterého je možné vypočítat předpokládanou drsnost povrchu Ra . Regresní model má tvar $Ra = a.e^{b \cdot x}$. Z obrázku je možné vyhodnotit, že při zvětšujícím se sklonu plochy se drsnost Ra ztelně nezvyšuje až na obrábění plochy se sklonem 75° . Při vzrůstající šířce záběru se hodnoty Ra zvyšují.



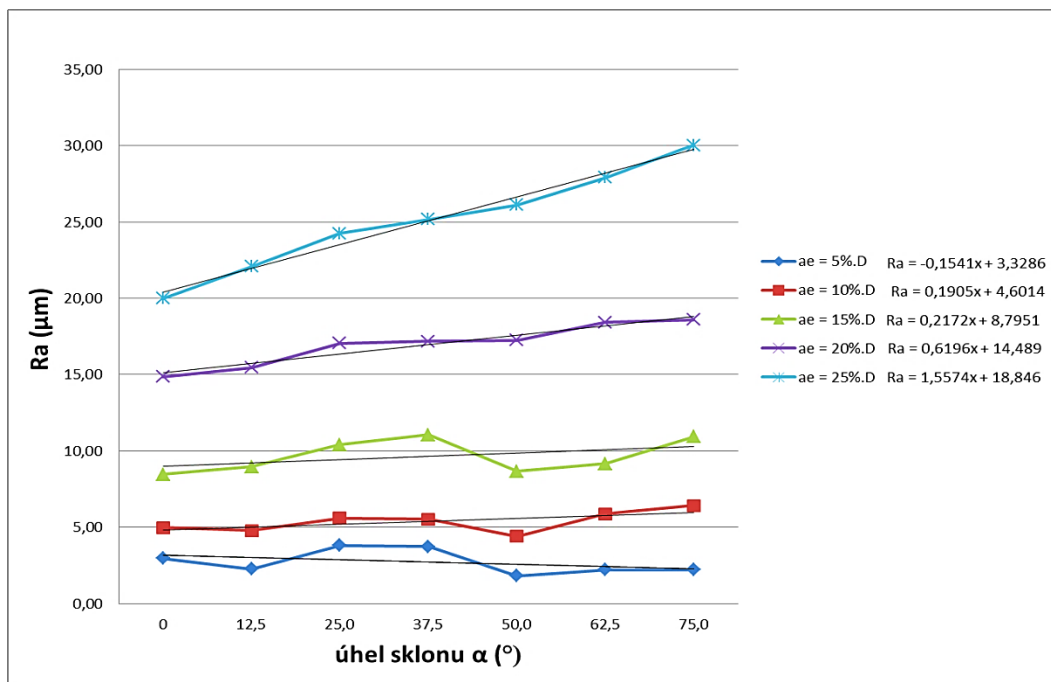
Obr. 64 Závislost drsnosti Ra na sklonu plochy pro nástroj Ø 5mm

Na obrázku 65 je zobrazena závislost sklonu obráběné plochy na drsnost povrchu pro použitý nástroj $\varnothing 6\text{mm}$. Dále jsou barevně vyznačeny spojnice trendů jednotlivých šířek záběru a_e . Pro každou šířku záběru je vytvořen exponenciální model, z kterého je možné vypočítat předpokládanou drsnost povrchu R_a . Regresní model má tvar $R_a = a \cdot e^{b \cdot x}$. Z obrázku je možné vyhodnotit, že při zvětšujícím se sklonu plochy se drsnost R_a zřetelně nezvyšuje až na obrábění s šířkou záběru $a_e=20\% \cdot \varnothing D$. Při vzrůstající šířce záběru se hodnoty R_a zvyšují.



Obr. 65 Závislost drsnosti R_a na sklonu plochy pro nástroj $\varnothing 6\text{mm}$

Na obrázku 66 je zobrazena závislost sklonu obráběné plochy na drsnost povrchu pro použitý nástroj $\varnothing 8\text{mm}$. Dále jsou barevně vyznačeny spojnice trendů jednotlivých šířek záběru a_e . Pro každou šířku záběru je vytvořen exponenciální model, z kterého je možné vypočítat předpokládanou drsnost povrchu R_a . Regresní model má tvar $R_a = a \cdot e^{b \cdot x}$. Z obrázku je možné vyhodnotit, že při zvětšujícím se sklonu plochy se drsnost R_a zřetelně nezvyšuje až na obrábění šířkou záběru $a_e=25\% \cdot \varnothing D$. Při vzrůstající šířce záběru se hodnoty R_a zvyšují.



Obr. 66 Závislost drsnosti Ra na sklonu plochy pro nástroj Ø 8mm

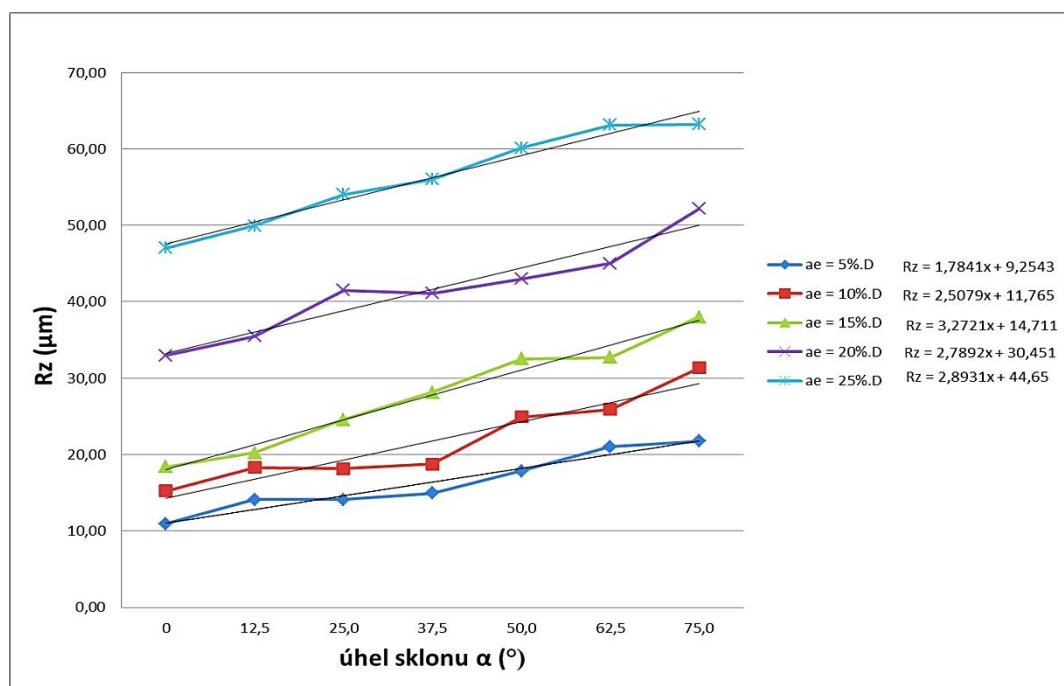
U všech regresních modelů byl použit exponenciální tvar $Ra = a \cdot e^{b \cdot x}$, protože při kontrole spolehlivosti, kterou charakterizuje koeficient determinace R^2 byla zjištěna hodnota vždy vyšší. Čím vyšší je hodnota koeficientu determinace, tím je lépe popsané chování modelu. V tabulce 41 jsou uvedené koeficienty determinace pro různé regresní analýzy u nástroje s průměrem 3mm.

Tab. 41 Koeficient determinace pro parametr Ra

R^2	$a_e=5\% \cdot \text{ØD}$	$a_e=10\% \cdot \text{ØD}$	$a_e=15\% \cdot \text{ØD}$	$a_e=20\% \cdot \text{ØD}$	$a_e=25\% \cdot \text{ØD}$
lineární regrese	0,8721	0,7659	0,9264	0,6967	0,9297
exponenciální regrese	0,8974	0,8176	0,9446	0,7161	0,9392
mocninová regrese	0,8866	0,7311	0,9216	0,4856	0,8553

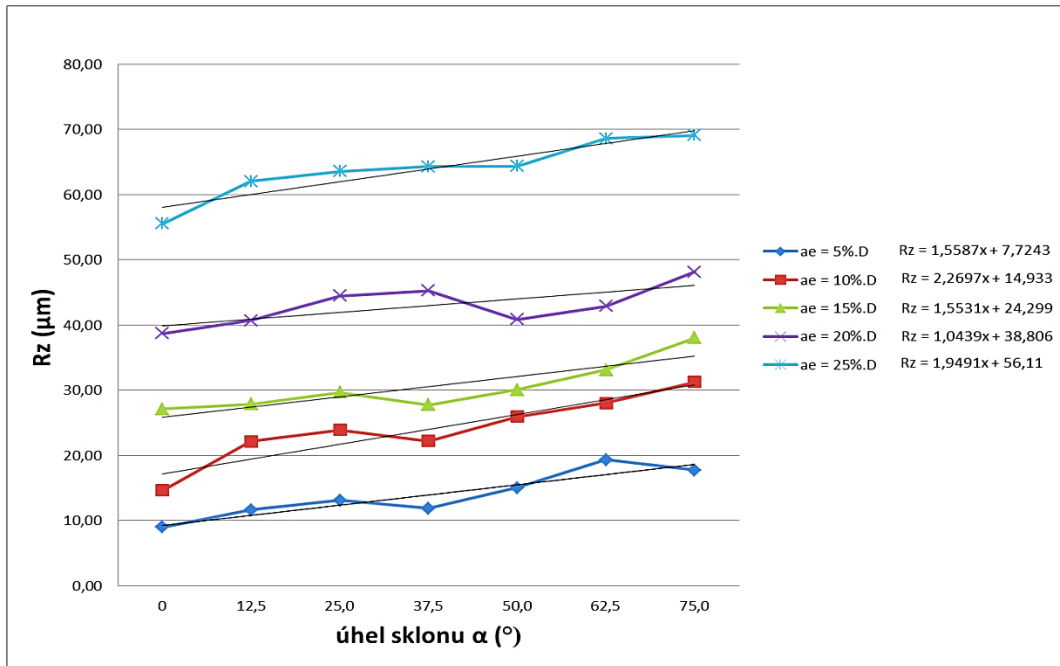
9.5 Vliv sklonu plochy na parametry drsnosti povrchu R_z

Na obrázku 67 je zobrazena závislost sklonu obráběné plochy na drsnost povrchu pro použitý nástroj $\varnothing 3\text{mm}$. Dále jsou barevně vyznačeny spojnice trendů jednotlivých šířek záběru a_e . Pro každou šířku záběru je vytvořen exponenciální model, z kterého je možné vypočítat předpokládanou drsnost povrchu R_z . Model má tvar $R_z = a \cdot e^{b \cdot x}$. Z obrázku je možné vyhodnotit, že při zvětšujícím se sklonu plochy se drsnost R_z zvyšuje. Při vzrůstající šířce záběru se hodnoty R_z zvyšují.



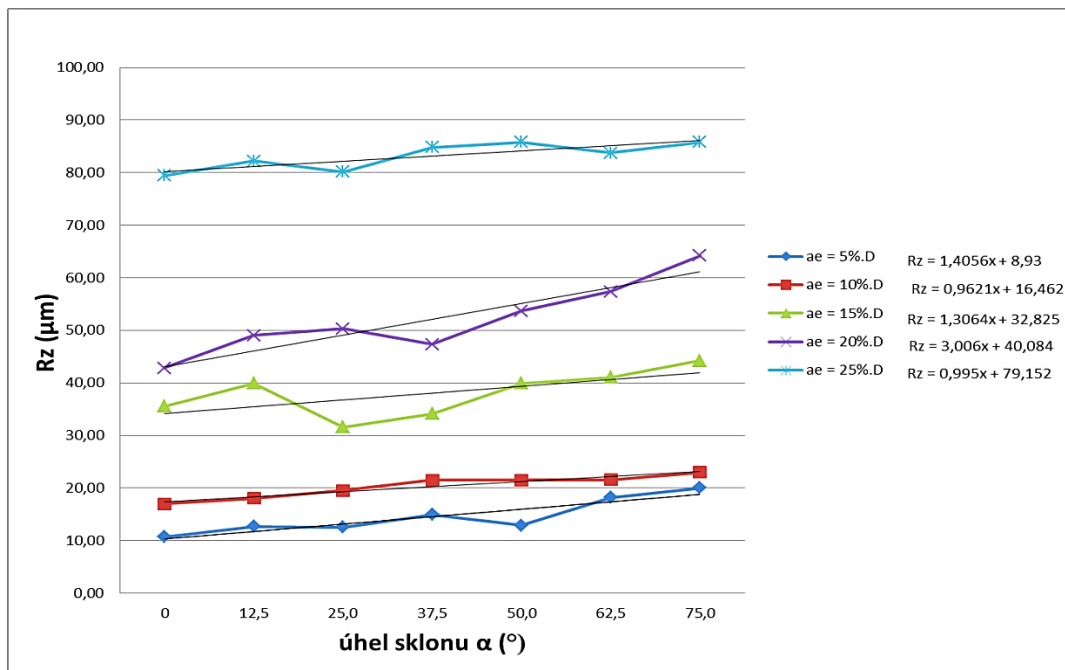
Obr. 67 Závislost drsnosti R_z na sklonu plochy pro nástroj $\varnothing 3\text{mm}$

Na obrázku 68 je zobrazena závislost sklonu obráběné plochy na drsnost povrchu pro použitý nástroj $\varnothing 4\text{mm}$. Dále jsou barevně vyznačeny spojnice trendů jednotlivých šířek záběru a_e . Pro každou šířku záběru je vytvořen exponenciální model, z kterého je možné vypočítat předpokládanou drsnost povrchu R_z . Model má tvar $R_z = a \cdot e^{b \cdot x}$. Z obrázku je možné vyhodnotit, že při zvětšujícím se sklonu plochy se drsnost R_z výrazně nezvyšuje. Při vzrůstající šířce záběru se hodnoty R_z zvyšují.



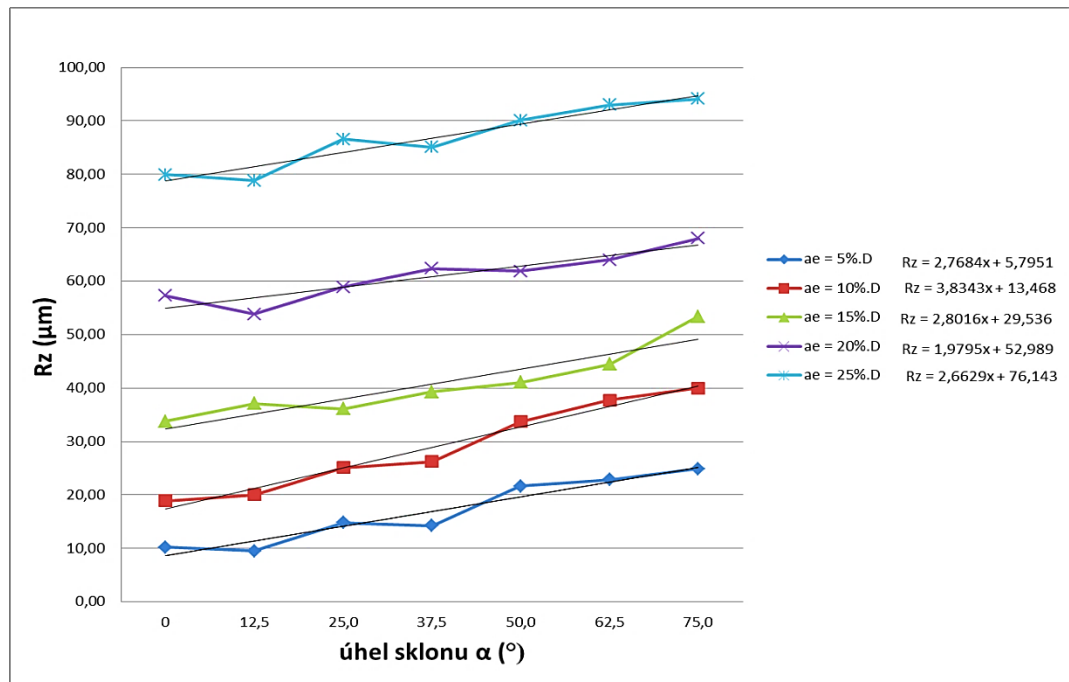
Obr. 68 Závislost drsnosti Rz na sklonu plochy pro nástroj Ø 4mm

Na obrázku 69 je zobrazena závislost sklonu obráběné plochy na drsnost povrchu pro použitý nástroj Ø5mm. Dále jsou barevně vyznačeny spojnice trendů jednotlivých šířek záběru a_e . Pro každou šířku záběru je vytvořen exponenciální model, z kterého je možné vypočítat předpokládanou drsnost povrchu R_z . Model má tvar $R_z = a \cdot e^{b \cdot x}$. Z obrázku je možné vyhodnotit, že při zvětšujícím se sklonu plochy se drsnost R_z výrazně nezvyšuje až na obrábění plochy se sklonem 75° . Při vzrůstající šířce záběru se hodnoty R_z zvyšují.



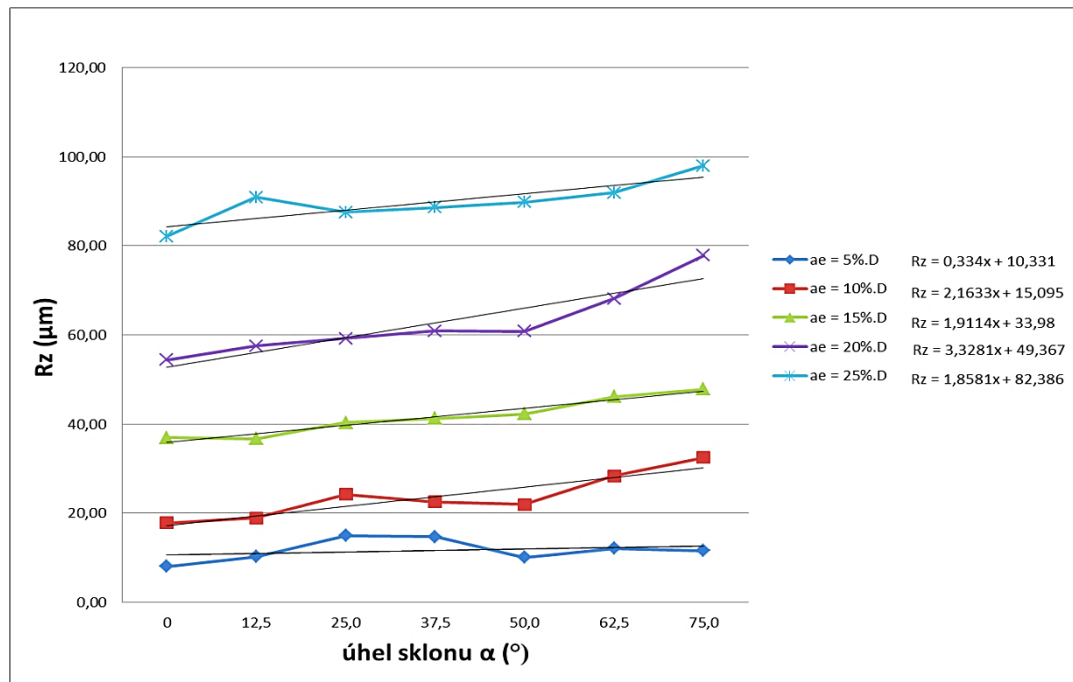
Obr. 69 Závislost drsnosti Rz na sklonu plochy pro nástroj Ø 5mm

Na obrázku 70 je zobrazena závislost sklonu obráběné plochy na drsnost povrchu pro použitý nástroj $\varnothing 6\text{mm}$. Dále jsou barevně vyznačeny spojnice trendů jednotlivých šířek záběru a_e . Pro každou šířku záběru je vytvořen exponenciální model, z kterého je možné vypočítat předpokládanou drsnost povrchu R_z . Model má tvar $R_z = a \cdot e^{b \cdot x}$. Z obrázku je možné vyhodnotit, že při zvětšujícím se sklonu plochy se drsnost R_z výrazně nezvyšuje. Při vzrůstající šířce záběru se hodnoty R_z zvyšují.



Obr. 70 Závislost drsnosti R_z na sklonu plochy pro nástroj $\varnothing 6\text{mm}$

Na obrázku 71 je zobrazena závislost sklonu obráběné plochy na drsnost povrchu pro použitý nástroj $\varnothing 8\text{mm}$. Dále jsou barevně vyznačeny spojnice trendů jednotlivých šířek záběru a_e . Pro každou šířku záběru je vytvořen exponenciální model, z kterého je možné vypočítat předpokládanou drsnost povrchu R_z . Model má tvar $R_z = a \cdot e^{b \cdot x}$. Z obrázku je možné vyhodnotit, že při zvětšujícím se sklonu plochy se drsnost R_z výrazně nezvyšuje. Při vzrůstající šířce záběru se hodnoty R_z zvyšují.



Obr. 71 Závislost drsnosti Rz na sklonu plochy pro nástroj Ø 8mm

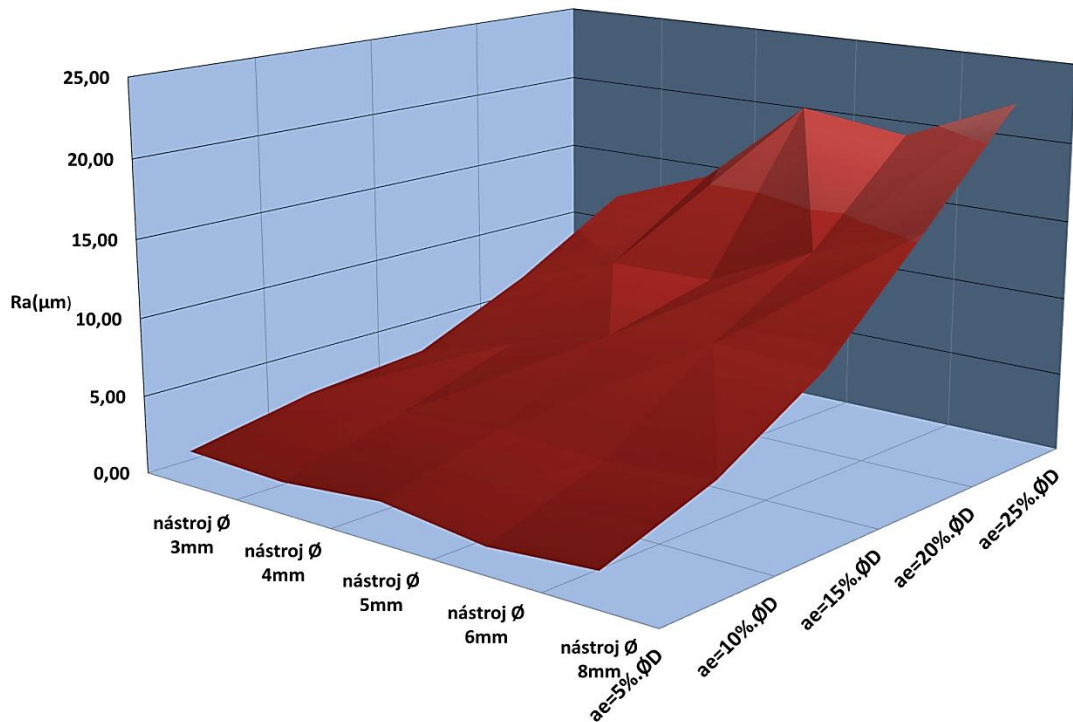
U všech regresních modelů byl použit exponenciální tvar $Rz = a \cdot e^{b \cdot x}$, protože při kontrole spolehlivosti, kterou charakterizuje koeficient determinace R^2 byla zjištěna hodnota vždy vyšší. V tabulce 42 jsou uvedené koeficienty determinace pro různé regresní analýzy u nástroje s průměrem 3mm.

Tab. 42 Koeficient determinace pro parametr Rz

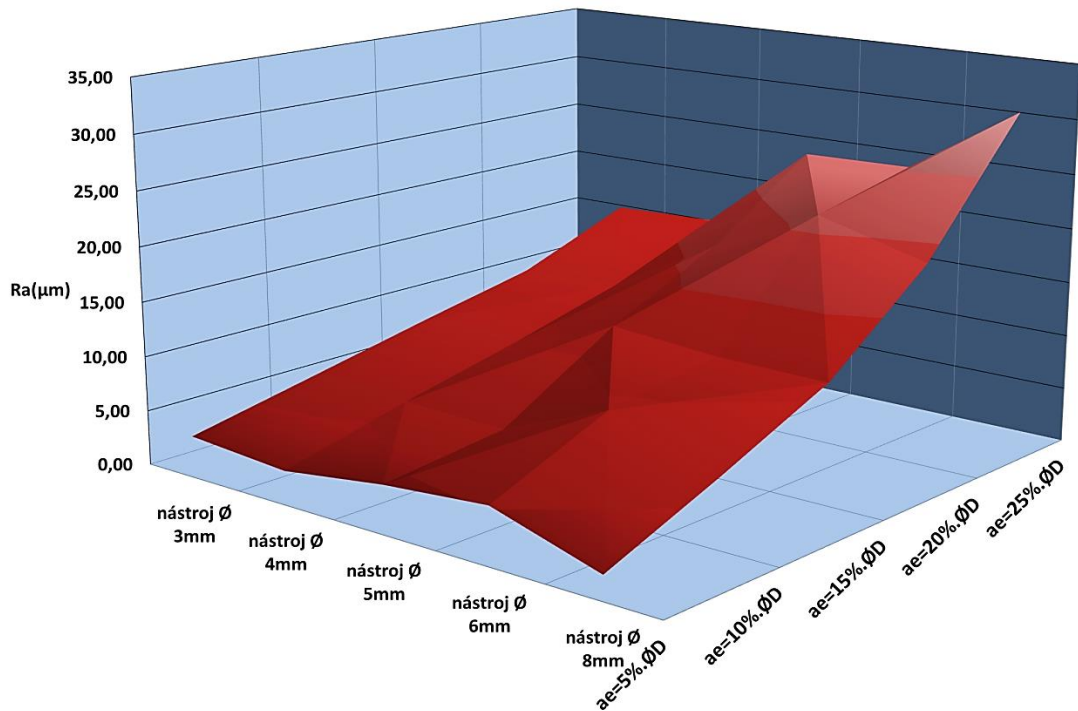
R^2	$a_e=5\% \cdot \text{ØD}$	$a_e=10\% \cdot \text{ØD}$	$a_e=15\% \cdot \text{ØD}$	$a_e=20\% \cdot \text{ØD}$	$a_e=25\% \cdot \text{ØD}$
lineární regrese	0,9441	0,9026	0,9793	0,9184	0,9746
exponenciální regrese	0,9459	0,9261	0,9814	0,9260	0,9862
mocninová regrese	0,8959	0,8069	0,9448	0,8941	0,9603

Na obrázcích 72 a 73 můžeme vidět povrchové grafy, kde je znázorněn vliv technologických parametrů na hodnotu Ra . Pro ukázkou jsem vybral jenom mezní sklony frézovaných nakloněných ploch. Byla vybrána plocha s úhlem $12,5^\circ$ a plocha s úhlem 75° . Z povrchových grafů jde usoudit, že rostoucí trend hodnoty Ra se zvyšujícím průměrem

nástroje a šířkou záběru u obou sklonů obráběné plochy je podobný a hodnota Ra roste se stejným trendem při změně sklonu plochy.



Obr. 72 Vliv technologických parametrů na Ra u plochy s úhlem $12,5^\circ$



Obr. 73 Vliv technologických parametrů na Ra u plochy s úhlem 75°

9.6 Další měřený parametr drsnosti povrchu

Nebyly měřeny jen hodnoty Ra a Rz , ale další měřený parametr drsnosti byl Rsm .

Rsm je průměrná šířka prvků profilu drsnosti. Jde o aritmetický průměr šířek (Xs) prvků profilu drsnosti v rozsahu základní délky. Jedná se o charakteristiku drsnosti v podélném směru povrchu.

$$Rsm = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m x_i \cdot s_i \quad (\mu m) \quad (23)$$

Tab. 43 Naměřené hodnoty drsnosti Rsm

stupně	0°	12,5°	25°	37,5°	50°	62,5°	75°
	Rsm						
ae	nástroj průměr 3mm						
5%.ØD	159	549	489	703	781	704	407
10%.ØD	284	427	387	445	615	677	472
15%.ØD	417	417	479	535	556	601	490
20%.ØD	628	627	633	631	646	766	612
25%.ØD	802	778	786	790	797	813	733
ae	nástroj průměr 4mm						
5%.ØD	328	646	613	454	743	493	482
10%.ØD	341	459	648	417	646	734	807
15%.ØD	630	619	639	622	676	690	672
20%.ØD	849	833	818	857	852	845	795
25%.ØD	1036	1065	1063	1048	1037	976	1086
ae	nástroj průměr 5mm						
5%.ØD	270	696	695	614	506	970	596
10%.ØD	535	516	572	696	679	567	767
15%.ØD	793	784	815	805	832	753	742
20%.ØD	1051	1036	1024	1059	1042	1086	906
25%.ØD	1290	1304	1311	1374	1251	1292	1211
ae	nástroj průměr 6mm						
5%.ØD	285	563	631	494	601	1059	971
10%.ØD	633	679	631	613	999	975	954
15%.ØD	944	949	950	972	990	955	940
20%.ØD	1266	1281	1285	1276	1307	1432	1360
25%.ØD	1586	1621	1589	1621	1558	1586	1658
ae	nástroj průměr 8mm						
5%.ØD	415	606	1152	1517	557	649	561
10%.ØD	835	811	848	1787	827	810	870
15%.ØD	1287	1246	1276	1335	1220	1276	1078
20%.ØD	1698	1633	1721	-	-	-	-
25%.ØD	-	-	-	-	-	-	-

V tabulce 43 jsou uvedeny bodové odhady středních hodnot drsnosti R_{sm} v mikrometrech z 10 měření pro všechny nástroje se všemi kombinacemi šířek záběrů a sklonů ploch. Při detailním prozkoumání tabulky lze zjistit, že v některých případech nemají hodnoty předpokládaný průběh (vývoj) a hodnoty při některých zvolených technologických podmínkách vyšly v nečekaném rozmezí. Při použití nástroje s průměrem 8mm s větší šířkou záběru 20% a 25% nebylo možné zjistit parametry drsnosti R_{sm} . Nezměřitelné hodnoty mohly vzniknout špatně nastavenou měřicí vyhodnocovací délkou, která byla nastavena u všech měření drsnosti, jako pěti násobek základní délky. Základní délka byla zvolena $l_r=2,5\text{mm}$, proto vyhodnocovací délka má hodnotu $l_n=12,5\text{mm}$. Větší základní délka pro měření podle normy ČSN EN ISO 4288, která by byla $l_r=8\text{mm}$, nemohla být zvolena, protože délka jednotlivých nakloněných ploch byla v rozmezí od 14 do 16 mm. Proto by nebylo možné s vyšší zadanou vyhodnocovací délkou provést měření. Naměřené hodnoty udávám do diplomové práce, protože byly změřeny, ale dále nejsou zpracovány a vyhodnocovány.

9.7 Statistické vyhodnocení hodnot parametrů drsnosti R_a a R_z pro srovnávací obrábění

V tabulce 44 jsou uvedeny bodové odhady středních hodnot drsnosti R_a v mikrometrech z 10 měření pro všechny plochy ze srovnávacího obrábění s nástrojem $\varnothing 5\text{mm}$.

Tab. 44 Odhad střední hodnoty parametru drsnosti R_a pro srovnávací obrábění

Srovnávání	0°	12,5°	25°	37,5°	50°	62,5°	75°
R_a (μm)							
sousledné frézování	3,26	4,09	3,64	3,46	4,05	4,36	4,60
vliv posuvové rychlosti	3,57	4,30	3,75	3,57	3,88	3,96	5,11
vliv řezné rychlosti	3,04	3,64	3,64	3,84	4,12	4,69	4,97

V tabulce 45 jsou zapsány hodnoty směrodatné odchylky a variačního koeficientu pro hodnoty drsnosti R_a pro všechny srovnávací obrábění, které byli provedeny. Z tabulky je možné zjistit, že hodnoty směrodatné odchylky a variačního koeficientu jsou nízké. Z toho je možné usoudit, že odhad střední hodnoty může být použit dál pro prezentaci výsledků.

Tab. 45 Směrodatná odch. a variační koef. pro srovnávací obrábění (R_a)

Srovnávání		0°	12,5°	25°	37,5°	50°	62,5°	75°
sousledné frézování	s (μm)	0,52	0,28	0,33	0,12	0,27	0,30	0,19
	V (%)	12,93	6,83	8,94	3,59	6,59	6,84	4,14
vliv posuvové rychlosti	s (μm)	0,17	0,20	0,25	0,11	0,33	0,13	0,17
	V (%)	4,74	4,62	6,68	3,22	8,45	3,29	3,34
vliv řezné rychlosti	s (μm)	0,20	0,25	0,25	0,24	0,40	0,31	0,29
	V (%)	6,59	6,85	6,84	6,24	9,80	6,62	5,78

V tabulce 46 jsou uvedeny bodové odhady středních hodnot drsnosti R_z v mikrometrech z 10 měření pro všechny plochy ze srovnávacího obrábění s nástrojem $\varnothing 5\text{mm}$.

Tab. 46 Odhad střední hodnoty parametru drsnosti R_z pro srovnávací obrábění

Srovnávání	0°	12,5°	25°	37,5°	50°	62,5°	75°
R_z (μm)							
sousledné frézování	15,89	16,29	17,95	17,64	17,97	20,09	21,97
vliv scallop height	12,77	14,00	16,15	18,05	18,37	19,66	20,27
vliv posuvové rychlosti	14,02	15,01	15,76	17,78	18,04	19,71	22,11
vliv řezné rychlosti	16,19	17,96	18,90	19,30	20,17	21,16	22,44

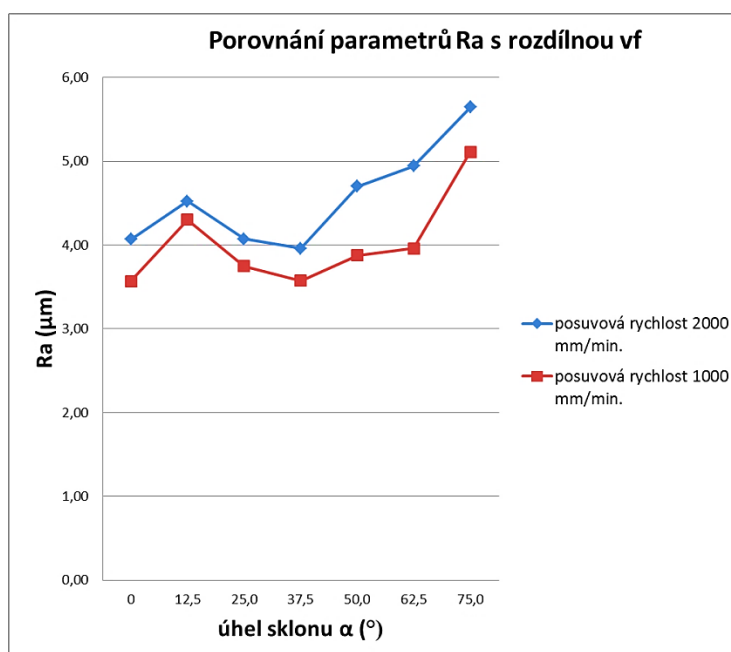
V tabulce 47 jsou zapsány hodnoty směrodatné odchylky a variačního koeficientu pro hodnoty drsnosti R_z pro všechny srovnávací obrábění, které byli provedeny. Z tabulky je možné zjistit, že hodnoty směrodatné odchylky a variačního koeficientu jsou nízké. Z toho usoudit, že odhad střední hodnoty může být použit dál pro prezentaci výsledků.

Tab. 47 Směrodatná odch. a variační koef. pro srovnávací obrábění (R_z)

Srovnávání		0°	12,5°	25°	37,5°	50°	62,5°	75°
sousledné frézování	s (μm)	0,74	0,28	0,51	0,25	0,29	0,17	0,33
	V (%)	4,64	1,70	2,83	1,44	1,59	0,86	1,51
vliv scallop height	s (μm)	0,31	0,38	0,68	0,29	0,21	0,18	0,43
	V (%)	2,43	2,74	4,21	1,62	1,12	0,89	2,10
vliv posuvové rychlosti	s (μm)	0,31	0,29	0,47	0,35	0,37	0,32	0,17
	V (%)	2,20	1,94	3,00	1,94	2,05	1,64	0,79
vliv řezné rychlosti	s (μm)	0,32	0,32	0,50	0,66	0,37	0,40	0,30
	V (%)	1,98	1,81	2,62	3,43	1,84	1,91	1,34

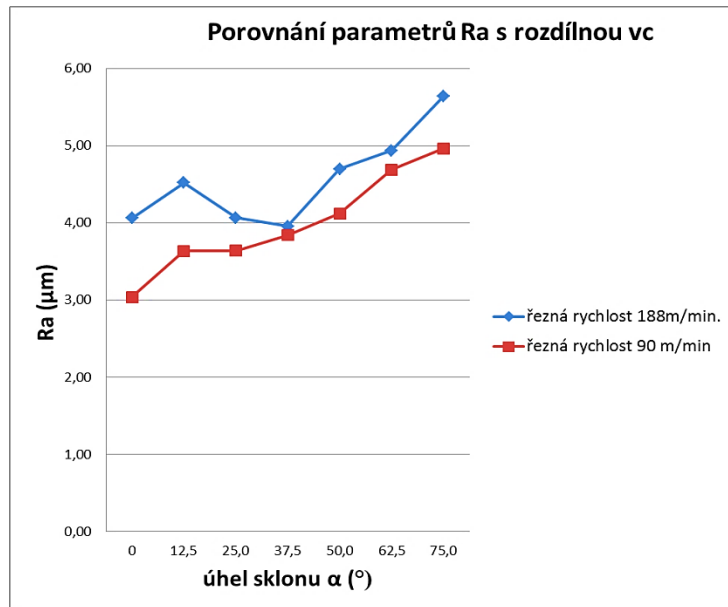
9.8 Grafické vyhodnocení srovnávacích obrábění

Na obrázku 74 je zobrazena závislost sklonu obráběné plochy na parametr povrchu R_a pro použitý nástroj s $\varnothing 5\text{mm}$. Dále jsou barevně vyznačeny spojnice trendů dvou různých posuvových rychlostí v_f . Z obrázku je možné vyhodnotit, že při větší posuvové rychlosti se drsnost R_a zvětšuje.



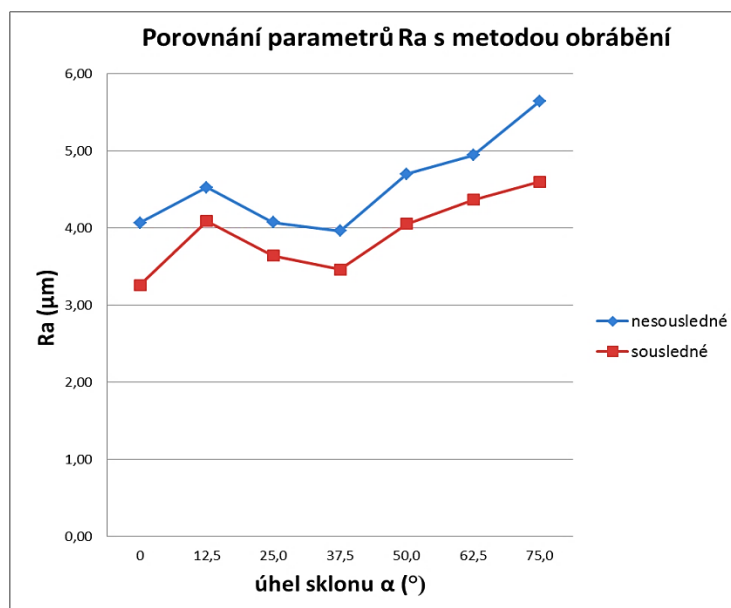
Obr. 74 Porovnání parametrů R_a s rozdílnou v_f

Na obrázku 75 je zobrazena závislost sklonu obráběné plochy na parametr povrchu Ra pro použitý nástroj s $\varnothing 5\text{mm}$. Dále jsou barevně vyznačena spojnice trendů dvou různých řezných rychlostí v_c . Z obrázku je možné vyhodnotit, že při větší řezné rychlosti je parametr drsnosti Ra nepatrně vyšší.



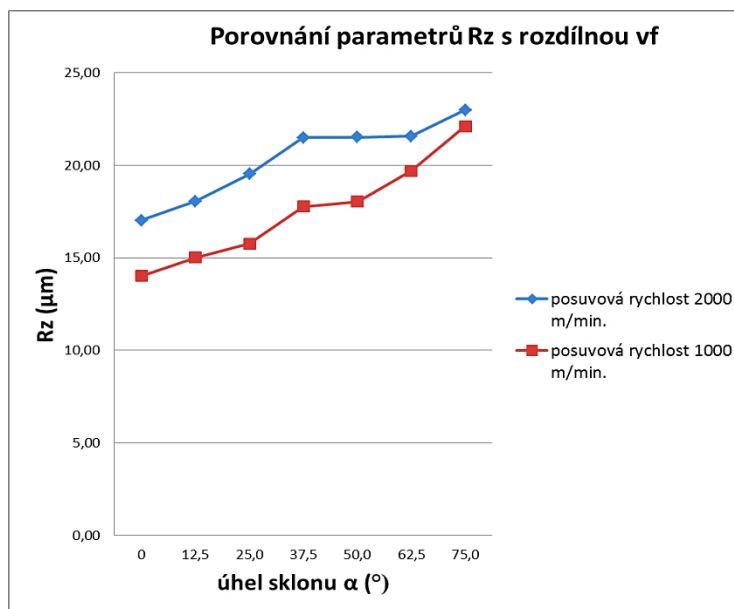
Obr. 75 Porovnání parametrů Ra s rozdílnou v_c

Na obrázku 76 je zobrazena závislost sklonu obráběné plochy na parametr povrchu Ra pro použitý nástroj s $\varnothing 5\text{mm}$. Dále jsou barevně vyznačeny spojnice trendů dvou různých metod obrábění. Z obrázku je možné vyhodnotit, že při nesousledné frézování je drsnost Ra větší.



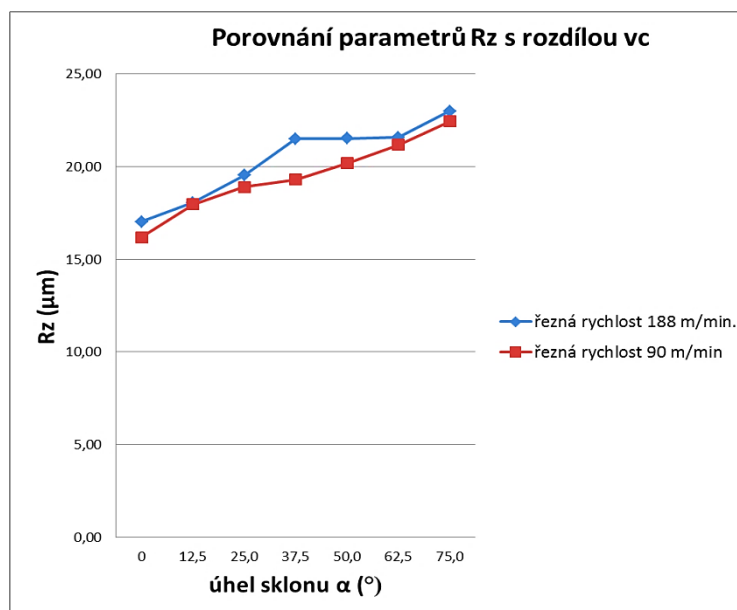
Obr. 76 Porovnání parametrů Ra s odlišnou strategií

Na obrázku 77 je zobrazena závislost sklonu obráběné plochy na parametr povrchu R_z pro použitý nástroj s $\varnothing 5\text{mm}$. Dále jsou barevně vyznačeny spojnice trendů dvou různých posuvových rychlostí v_f . Z obrázku je možné vyhodnotit, že při větší posuvové rychlosti je parametr R_z vyšší.



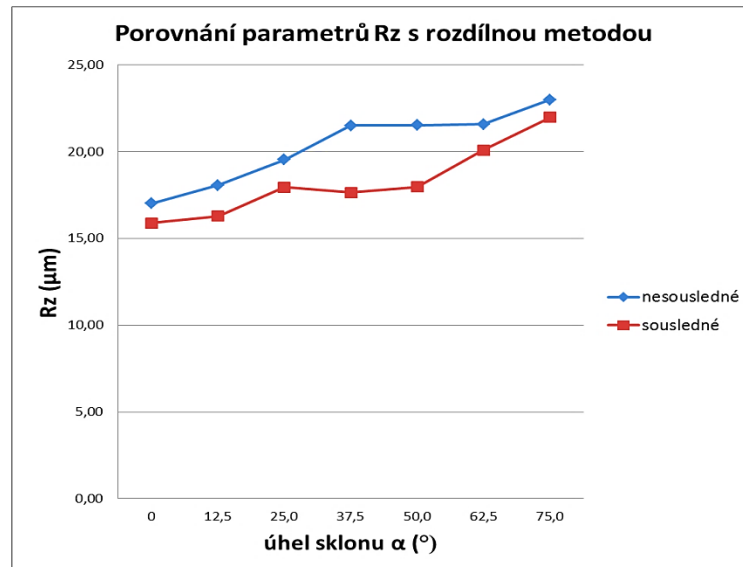
Obr. 77 Porovnání parametrů R_z s rozdílnou v_f

Na obrázku 78 je zobrazena závislost sklonu obráběné plochy na parametr drsnosti R_z pro použitý nástroj s $\varnothing 5\text{mm}$. Dále jsou barevně vyznačeny spojnice trendů dvou různých řezných rychlostí v_c . Z obrázku je možné vyhodnotit, že při větší řezné rychlosti je parametr drsnosti R_z nepatrně odlišný.



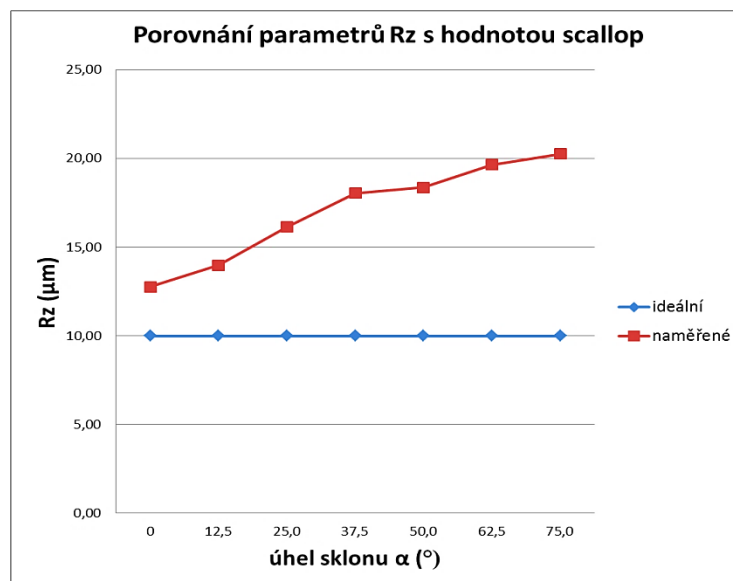
Obr. 78 Porovnání parametrů R_z s rozdílnou v_c

Na obrázku 79 je zobrazena závislost sklonu obráběné plochy na parametr drsnosti R_z pro použitý nástroj s $\varnothing 5\text{mm}$. Dále jsou barevně vyznačeny spojnice trendů dvou různých metod obrábění. Z obrázku je možné vyhodnotit, že pro nesousledné frézování je parametr drsnosti R_z větší.



Obr. 79 Porovnání parametrů R_z s odlišnou strategií

Na obrázku 80 je zobrazena závislost sklonu obráběné plochy na parametr drsnosti R_z pro použitý nástroj s $\varnothing 5\text{mm}$. Dále jsou barevně vyznačeny spojnice trendů ideálních hodnot podle hodnoty scallop a reálné naměřené. Z obrázku je možné vyhodnotit, že zadaná hodnota scallop se neshoduje s reálnými naměřenými hodnotami a s větším sklonem plochy se tato nepřesnost zvětšuje.

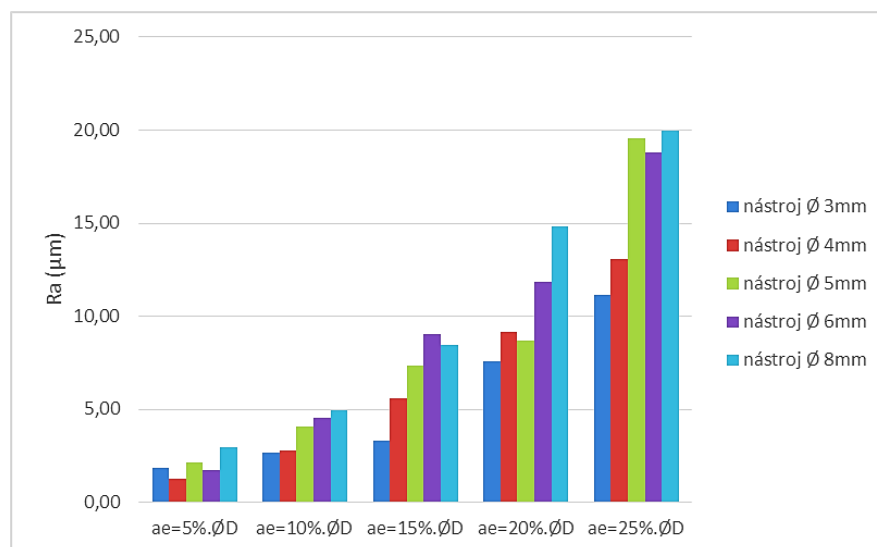


Obr. 80 Porovnání parametrů R_z s hodnotou scallop

9.9 Vliv nástroje na parametry drsnosti povrchu Ra

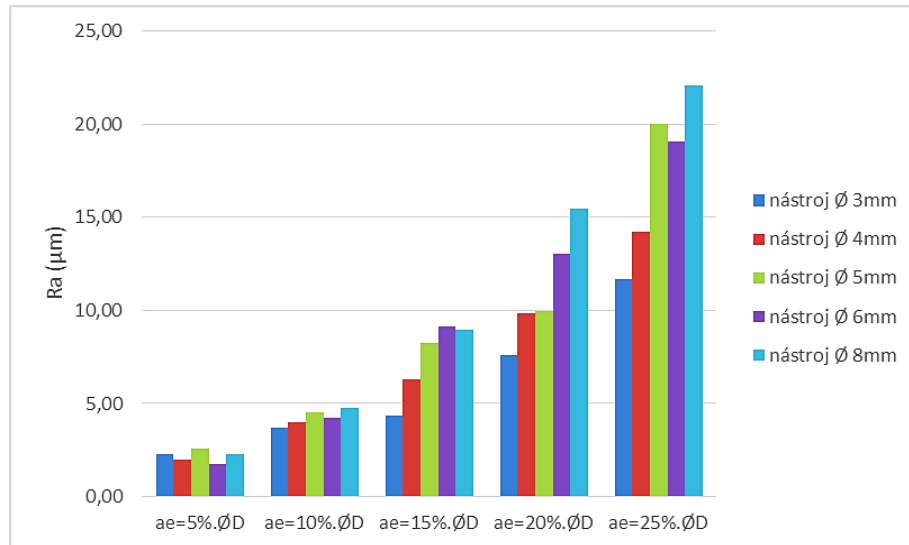
V následující kapitole budou porovnávány nástroje podle parametru drsnosti povrchu Ra . Zjistíme vliv volby nástroje na hodnoty Ra a můžeme porovnat jednotlivé nástroje při daném sklonu plochy a zadané šířce záběru. Pro toto grafické vyhodnocení byly zvoleny jenom hodnoty Ra , protože parametr drsnosti Rz je závisle proměnný s parametrem Ra viz. rovnice (17).

Na obrázku 81 jsou porovnány použité frézovací nástroje pro úhel sklonu plochy 0° . Na obrázku jsou znázorněny rozdíly hodnot drsnosti Ra mezi nástroji s danou šířkou záběru za stejných řezných podmínek. Při pohledu lze zjistit, že při šířce záběru $a_e=20\%.\text{ØD}$ a $a_e=25\%.\text{ØD}$ dochází už k velkým rozdílům parametrů Ra mezi nástroji při použití větších průměrů. Ovšem při šířkách záběru $a_e=5\%.\text{ØD}$ a $a_e=10\%.\text{ØD}$ jsou rozdíly nepatrné.



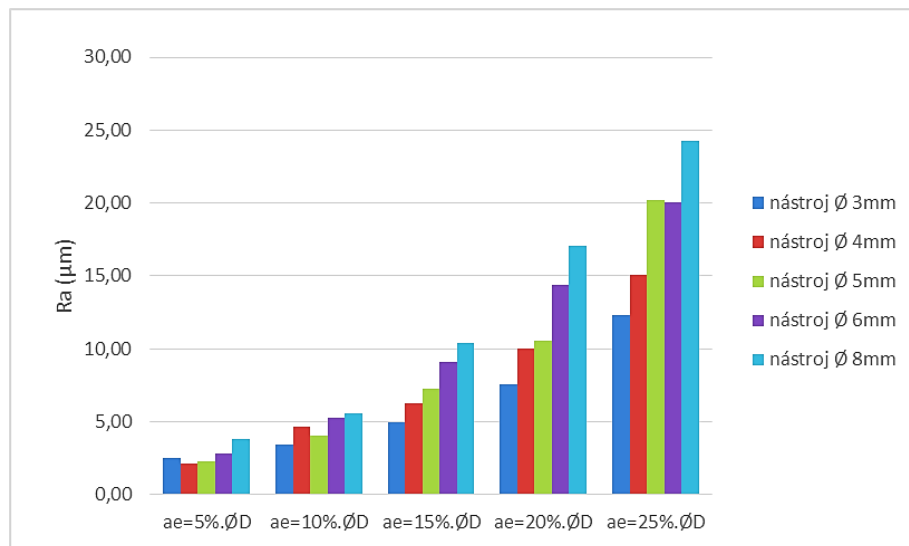
Obr. 81 Porovnání nástrojů pro úhel sklonu 0° hodnotou Ra

Na obrázku 82 jsou porovnány použité frézovací nástroje pro úhel sklonu plochy $12,5^\circ$. Na obrázku jsou znázorněny rozdíly hodnot drsnosti Ra mezi nástroji s danou šířkou záběru za stejných řezných podmínek. Při pohledu lze zjistit, že při šířce záběru $a_e=20\%.\text{ØD}$ a $a_e=25\%.\text{ØD}$ dochází už k velkým rozdílům drsnosti Ra mezi nástroji při použití větších průměrů. Ovšem při šířkách záběru $a_e=5\%.\text{ØD}$ a $a_e=10\%.\text{ØD}$ jsou rozdíly nepatrné.



Obr. 82 Porovnání nástrojů pro úhel sklonu $12,5^\circ$ hodnotou R_a

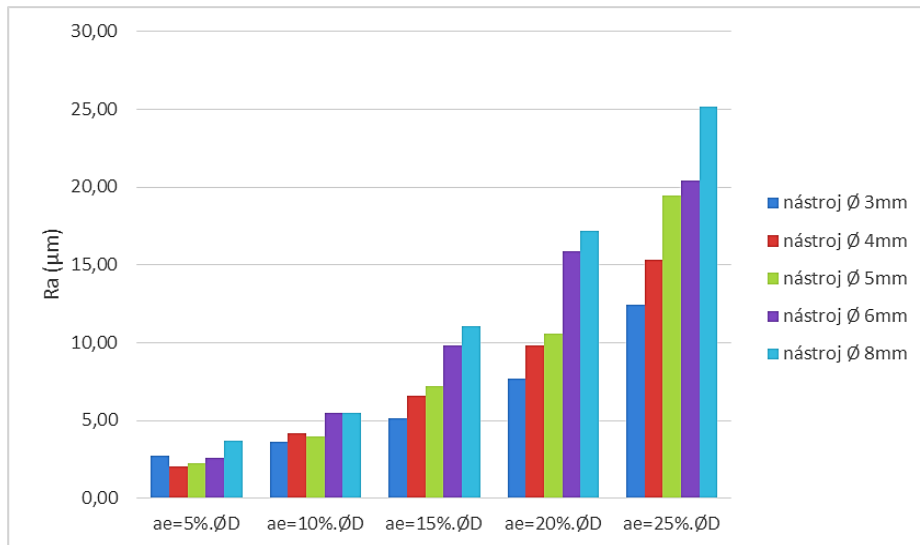
Na obrázku 83 jsou porovnány použité frézovací nástroje pro úhel sklonu plochy 25° . Na obrázku jsou znázorněny rozdíly drsnosti R_a mezi nástroji s danou šířkou záběru za stejných řezných podmínek. Při pohledu lze zjistit, že při šířce záběru $a_e=20\%.\varnothing D$ a $a_e=25\%.\varnothing D$ dochází už k velkým rozdílům drsnosti R_a mezi nástroji při použití větších průměrů. Ovšem při šířkách záběru $a_e=5\%.\varnothing D$ až $a_e=10\%.\varnothing D$ jsou rozdíly nepatrné.



Obr. 83 Porovnání nástrojů pro úhel sklonu 25° hodnotou R_a

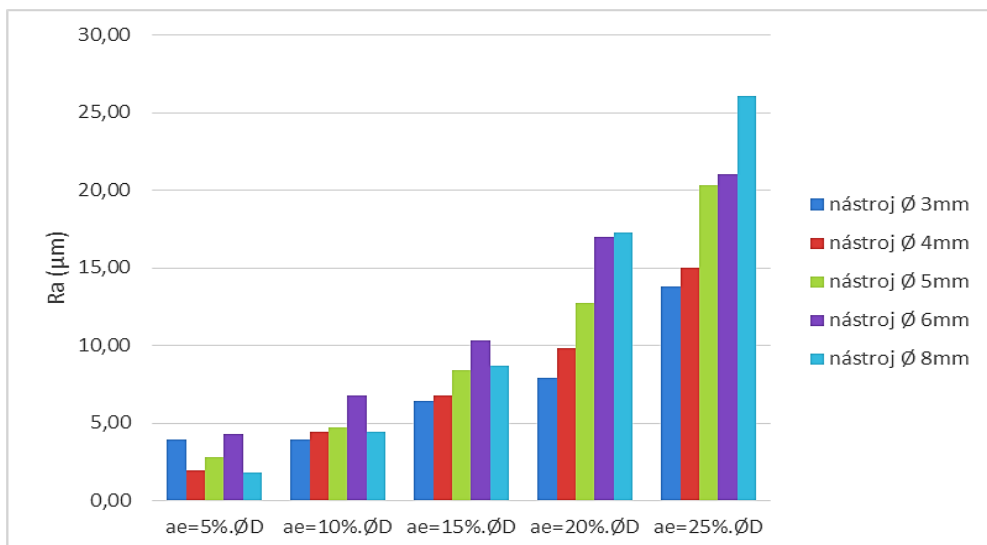
Na obrázku 84 jsou porovnány použité frézovací nástroje pro úhel sklonu plochy $37,5^\circ$. Na obrázku jsou znázorněny rozdíly drsnosti R_a mezi nástroji s danou šířkou záběru za stejných řezných podmínek. Při šířkách záběru $a_e=5\%.\varnothing D$ a $a_e=10\%.\varnothing D$ nedochází k velkým rozdílům hodnot drsnosti R_a . Lze pozorovat, že pro tento úhel sklonu u šířek záběru

$a_e=15\%.\text{ØD}$ až $a_e=25\%.\text{ØD}$ hodnota Ra relativně lineárně stoupá podle zvětšujícího průměru frézy.



Obr. 84 Porovnání nástrojů pro úhel sklonu $37,5^\circ$ hodnotou Ra

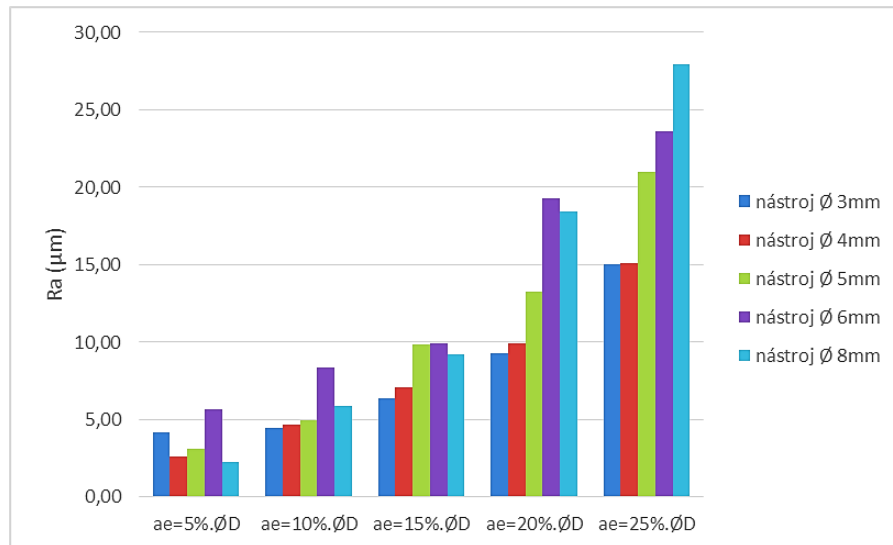
Na obrázku 85 jsou porovnány použité frézovací nástroje pro úhel sklonu plochy 50° . Na obrázku jsou znázorněny rozdíly drsnosti Ra mezi s danou šířkou záběru za stejných řezných podmínek. Při pohledu lze zjistit, že při šířce záběru $a_e=5\%.\text{ØD}$ dochází už k větším rozdílům drsnosti Ra . Lze pozorovat, jak u šířek záběru $a_e=15\%.\text{ØD}$ až $a_e=25\%.\text{ØD}$ hodnota Ra relativně lineárně stoupá, podle zvětšujícího průměru frézy, ale zároveň je potřeba si všimnout u nástroje $\text{Ø}6\text{mm}$, jak jsou jeho hodnoty Ra značně odlišné od ostatních.



Obr. 85 Porovnání nástrojů pro úhel sklonu 50° hodnotou Ra

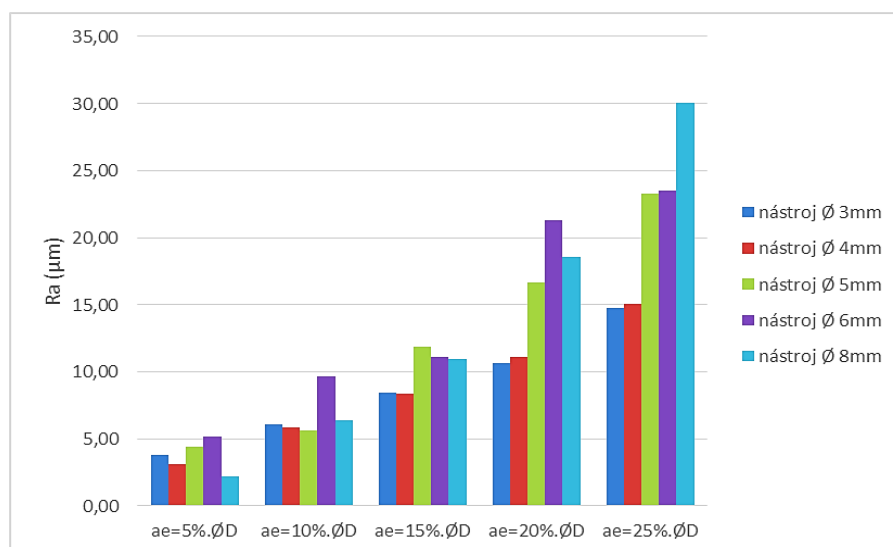
Na obrázku 86 jsou porovnány použité frézovací nástroje pro úhel sklonu plochy $62,5^\circ$. Na obrázku jsou znázorněny rozdíly drsnosti Ra mezi nástroji s danou šířkou záběru za stej-

ných řezných podmínkách. Při pohledu lze zjistit, že při šířce záběru $a_e=20\%.\text{ØD}$ a $a_e=25\%.\text{ØD}$ dochází už k velkým rozdílům drsnosti Ra mezi nástroji při použití větších průměrů. Je potřeba si všimnout u nástroje $\text{Ø}6\text{mm}$, jak jsou jeho hodnoty Ra značně odlišné od ostatních.



Obr. 86 Porovnání nástrojů pro úhel sklonu $62,5^\circ$ hodnotou Ra

Na obrázku 87 jsou porovnány použité frézovací nástroje pro úhel sklonu plochy 75° . Na obrázku jsou znázorněny rozdíly drsnosti Ra mezi nástroji s danou šířkou záběru za stejných řezných podmínkách. Při pohledu lze zjistit, že při šířce záběru $a_e=20\%.\text{ØD}$ a $a_e=25\%.\text{ØD}$ dochází už k velkým rozdílům drsnosti Ra mezi nástroji při použití větších průměrů. Ovšem při šířkách záběru $a_e=5\%.\text{ØD}$ až $a_e=15\%.\text{ØD}$ jsou rozdíly nepatrné.



Obr. 87 Porovnání nástrojů pro úhel sklonu 75° hodnotou Ra

Příklad

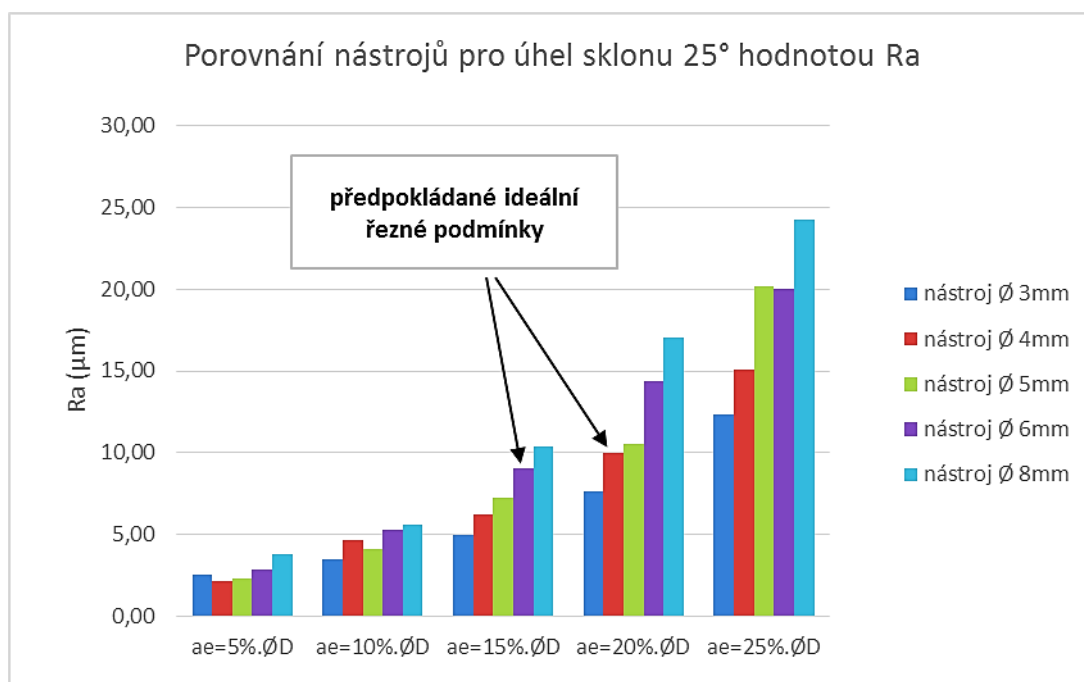
V následujícím příkladu je možné vidět ukázkou praktického využití v praxi zpracovaných hodnot, kde byl použit obrázek 83.

Zadání:

Je potřeba obráběním dostat plochu se sklonem 25° , aby výsledný parametr drsnosti povrchu nepřekročila hodnotu $Ra=10\ \mu\text{m}$. A zároveň obráběcí proces (strojní čas) byl co nejkratší a nejhospodárnější.

Z obrázku 81 je možné zjistit, že pro maximální požadovanou hodnotu Ra nelze použít ani jeden z nástrojů při zadané šířce záběru $a_e=25\% \cdot \text{ØD}$ z průměru nástroje. Nelze použít nástroj s průměrem 5 až 8 mm u šířky záběru $a_e=20\% \cdot \text{ØD}$ z průměru nástroje a nástroj s průměrem 8mm u šířky záběru $a_e=15\% \cdot \text{ØD}$ z průměru nástroje.

Ostatní varianty splňují požadovaný parametr drsnosti povrchu Ra . Nejhospodárnější řezný proces můžeme předpokládat u nástroje s průměrem 4 mm s použitou šířkou záběru $a_e=20\% \cdot \text{ØD}$ z průměru nástroje a u nástroje s průměrem 6mm s použitou šířkou záběru $a_e=15\% \cdot \text{ØD}$ z průměru nástroje. U ostatních možností je předpoklad, že bude strojní čas delší, i když výsledná drsnost povrchu bude lepší.



Obr. 88 Využití zpracovaných dat

Pro správnost těchto tvrzení byla provedena analýza obráběcích času v programu NX 8.5 na elementu se sklonem 25° při použití všech nástrojů a šířek záběru, které splňují zadání, aby parametr drsnosti povrchu nepřekročil $Ra=10\ \mu\text{m}$.

Tab. 48 Analýza strojních času

strojní čas (s)	$a_e=5\%.\varnothing D$	$a_e=10\%.\varnothing D$	$a_e=15\%.\varnothing D$	$a_e=20\%.\varnothing D$
nástroj $\varnothing 3\text{mm}$	120	61	40	30
nástroj $\varnothing 4\text{mm}$	92	46	31	22
nástroj $\varnothing 5\text{mm}$	75	38	25	
nástroj $\varnothing 6\text{mm}$	64	32	21	
nástroj $\varnothing 8\text{mm}$	50	24		

Z tabulky 48 je možné zjistit, že předešlé tvrzení o nejhospodárnějším řezném procesu byly správné.

Pro obrábění plochy s úhlem 25° , kdy drsnost povrchu nesmí překročit hodnotu $Ra=10\ \mu\text{m}$, bych použil nástroj s průměrem 4 mm a šířkou záběru $a_e=20\%.\varnothing D$ nebo nástroj s průměrem 6 mm a šířkou záběru $a_e=15\%.\varnothing D$. V obou případech se jedná o nejhospodárnější použití řezných podmínek, kdy časový rozdíl mezi nimi je nepatrný.

SHRNUTÍ PRAKTICKÉ ČÁSTI A DISKUZE VÝSLEDKŮ

V praktické části byly vytvořeny modely součástí v programu Catia v5r19. Následně byly navrženy strategie obrábění pro frézování kulovými frézami od průměru 3mm až 8mm, které se od sebe liší průměrem, délkou řezné a upínací části. Bylo vytvořeno na dvou modelech celkem 7 různých sklonů ploch a každý model byl rozdělen na pět segmentů, na kterých byla vždy použita jiná šířka záběru. Pro základní dokončovací operace byla zvolena obráběcí metoda contour area v programu NX8.5. Pro porovnávací dokončovací operace byla použita metoda obrábění contour area, ale měnily se jen parametry obrábění, které byly druh frézování, posuvová rychlost a řezná rychlost. Obrábění bylo prováděno na zkušebních vzorcích z materiálu EN AW 7022 – CERTAL. Jednotlivé kombinace úhlů ploch, šířek záběrů s použitím všech nástrojů byly změřeny pomocí drsnoměru Mitutoyo SJ – 301. Na každé ploše bylo naměřeno celkem deset hodnot Ra , deset hodnot Rz a další parametry jako Rsm . Z naměřených hodnot byl vypočítán odhad střední hodnoty, směrodatná odchylka a variační koeficient.

Pro různé kombinace sklonu ploch a šířek záběrů se odhady středních hodnot pohybují při použití nástroje s průměrem 3mm v rozmezí od $Ra=1,88 \mu\text{m}$ do $Ra=15,05 \mu\text{m}$ a $Rz=10,96 \mu\text{m}$ do $Rz=63,24 \mu\text{m}$, s průměrem 4mm v rozmezí od $Ra=1,28 \mu\text{m}$ do $Ra=15,36 \mu\text{m}$ a $Rz=8,97 \mu\text{m}$ do $Rz=69,10 \mu\text{m}$, s průměrem 5mm v rozmezí od $Ra=2,14 \mu\text{m}$ do $Ra=23,28 \mu\text{m}$ a od $Rz=10,7 \mu\text{m}$ do $Rz=85,78 \mu\text{m}$, s průměrem 6mm v rozmezí od $Ra=1,73 \mu\text{m}$ do $Ra=23,63 \mu\text{m}$ a od $Rz=9,53 \mu\text{m}$ do $Rz=94,04 \mu\text{m}$, s průměrem 8mm v rozmezí od $Ra=2,95 \mu\text{m}$ do $Ra=30,03 \mu\text{m}$ a $Rz=8,07 \mu\text{m}$ do $Rz=97,99 \mu\text{m}$.

Zároveň byly vypočteny hodnoty směrodatných odchylek pro parametry drsnosti Ra a Rz . Hodnoty směrodatných odchylek vycházely malé, proto lze usoudit, že prvky souboru si jsou většinou navzájem podobné. Hodnoty směrodatných odchylek vycházely nepatrně nižší u parametru Ra . Je to dáno tím, že drsnost Ra je průměrnou aritmetickou úchytkou posuzovaného profilu a tím jsou hodnoty menší než Rz . Hodnota Rz je součet výšky nejvyššího výstupku profilu a hloubky nejnižší prohlubně profilu. Je možné říct, že míra variability je pro hodnoty drsnosti Ra menší, než pro hodnoty drsnosti Rz . Následně byly vypočteny variační koeficienty, které nám udávají, z kolika procent se směrodatná odchylka podílí na odhadu střední hodnoty. Variační koeficient hodnot drsnosti Ra a Rz je maximálně 14,08 %, proto odhad střední hodnoty lze považovat za typickou hodnotu datového souboru.

Při pohledu na obrázky 62 až 71, které zobrazují závislost drsnosti Ra a Rz na sklonu obráběné plochy, je možné zjistit, že při zvětšujícím se sklonu plochy se drsnost Ra a Rz značně nezvyšuje. Při vzrůstající šířce záběru se hodnoty Ra a Rz výrazně zvyšují. Šířka záběru tedy nejvíce ovlivňuje kvalitu povrchu obrobeneé plochy. Pro všechny kombinace nástrojů a šířek záběru byly vytvořeny exponenciální modely, z kterých jde vypočítat odhad parametrů drsnosti.

Ze srovnávacího měření bylo vyhodnoceno, že pro sousledné frézování jsou naměřené parametry drsnosti Ra a Rz větší, takže druh frézování má vliv na kvalitu obrobeneé plochy. Při změně řezné rychlosti na poloviční hodnotu, byla kvalita obrobeneé plochy u parametru mírně nižší a u parametru Rz zůstaly hodnoty podobné. Při změně posuvové rychlosti na poloviční hodnotu se hodnoty Ra zmenšily a parametr Rz nepatrně zmenšil. Při porovnání zadané maximální požadované výšky nerovnosti scallop v programu NX8.5 a naměřených reálného parametrů Rz bylo zjištěno, že zadaná hodnota neodpovídá skutečnosti a s větším sklonem plochy se tato nepřesnost zvyšuje.

Při pohledu na obrázky 81 až 87, kde jsou porovnány všechny použité nástroje od průměru 3mm až do 8mm na dané nakloněné rovině, jde vyzorovat, že při zvětšení průměru nástroje se hodnoty drsnosti Ra úměrně zvětšují. Nepatrné vychýlené hodnoty vznikají u nástroje s průměrem 5mm a 6mm. Vysvětlují si to tím, že mají velkou celkovou délku a docházelo ke chvění nástroje. V důsledku toho se domnívám, že parametry drsnosti jsou proto vyšší a nemají stejný zvyšující trend jako ostatní použité nástroje. Na ukázkovém příkladu bylo znázorněno praktické použití těchto porovnání pro určení vhodných řezných podmínek. V tabulce 48 byla provedena analýza strojních časů na jednotlivých segmentech. Je možné vidět časové rozdíly na jednotlivých plochách, proto správná volba řezných parametrů hraje velký význam při volbě strategie obrábění.

ZÁVĚR

Diplomová práce řeší jakost povrchu při frézování kulovou frézou na nakloněných plochách. Mezi nejvýznamnější faktory ovlivňující výslednou jakost povrchu patří sklon obráběné plochy, šířka záběru, řezná rychlost, posuvová rychlost, správná volba nástroje, celková tuhost soustavy a volba vhodné obráběcí metody.

V praktické části byly navrženy modely součástí obrobek_1 a obrobek_2 pomocí programu Catia v5r19, na kterých byly testovány různé kombinace šířek záběru, sklonů ploch a nástrojů. Součásti byly z materiálu, který dodala firma Feropol s označením EN AW 7022 – CERTAL (označení DIN 3.4345, ISO AlZn5Mg3Cu) v rozměrech 210 x 60 x 60 mm. Pro každý nástroj a obrobek byly vytvořeny obráběcí programy, kdy celé obrábění bylo prováděno za stejné řezné a posuvové rychlosti. Každá součást byla rozdělena na 5 segmentů, kde byla měněna šířka záběru v rozmezí od $a_e=5\% \cdot \text{ØD}$ do $a_e=25\% \cdot \text{ØD}$. Před každou dokončovací operací byla použita frézovací strategie semi – finish, aby byla zaručena vždy stejná počáteční jakost povrchu. Dokončovací operace byly rozděleny na dvě podskupiny. Při základní dokončovací operaci bylo použito pět frézovacích nástrojů od průměru 3mm až do 8mm. Při porovnávací dokončovací operaci byl použit nástroj s průměrem 5mm a byla změněna řezná rychlost, posuvová rychlost, druh obrábění oproti základnímu dokončování. Tvorba obráběcí strategie a generování CNC kódu (příloha DP/NX_8.5 Přílohy, DP/CNC_programy) proběhla v programu NX 8.5 od firmy Siemens. Pro hrubovací operace byla použita obráběcí strategie cavity mill, pro dokončovací a semi - finish operace byla zvolena obráběcí strategie contour area. Praktická realizace práce byla prováděna na univerzitní tříosé CNC frézce HWT C-442. Jednotlivé obrobené povrchy byly změřeny pomocí dotykového drsnoměru s označením SJ – 301 od firmy Mitutoyo. Z hodnot charakterizující strukturu povrchu byl vybrán parametr Ra a parametr Rz . Na plochách se všemi kombinacemi úhlů sklonu plochy a šířek záběru při použití všech nástrojů bylo naměřeno 10 hodnot parametrů Ra a 10 hodnot parametrů Rz , které byly následně řádně statisticky zpracovány pomocí programu Excel.

Byly zkoumány hodnoty parametrů drsnosti Ra a Rz v závislosti na sklonu plochy s odlišnou šířkou záběru a_e , vliv nástroje na parametry drsnosti povrchu Ra a Rz , dále byla porovnána kvalita obrobené plochy při změně posuvové rychlosti, řezné rychlosti, druhu frézování a porovnání obrobené plochy s maximální zadanou výškou nerovnosti.

Při analýze výsledků je patrné, že velký vliv na výslednou drsnost povrchu má šířka záběru a částečně i sklon obráběné plochy. Dále je možné zjistit, že při použití velkých šířkách záběru nad 15 procent z průměru nástroje se kvalita výsledného povrchu při použití větších průměrů fréz značně zhoršuje. Při srovnávacích obráběních bylo zjištěno, že u sousledného frézování je jakost povrchu lepší, při použití poloviční rezné rychlosti jsou rozdíly v jakosti povrchu nepatrné a při použití poloviční posuvové rychlosti je jakost povrchu lepší. U porovnání zadané maximální výšky nerovnosti a skutečných hodnot bylo zjištěno, že parametr R_z se neshoduje se zadanou hodnotou a se zvětšujícím úhlem sklonu plochy se tato chyba zvětšuje.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] HLUCHÝ, M., HANĚK V. *Strojírenská technologie 2*. Praha: Scientia, 2001, 176 s. ISBN 80-718-3245-6.
- [2] KOČMAN, K. *Technologie obrábění*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2001, 270 s. ISBN 80-214-1996-2.
- [3] HUMÁR, A. *Technologie I*. [online]. Studijní podpora pro magisterskou formu studia VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2003, 138 s. [cit. 2013-11-30]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI_TO-1cast.pdf
- [4] DILLINGER, J. *Moderní strojírenství pro školu i praxi*. Vyd. 1. Praha: Europa-Sobotáles, 2007, 608 s. ISBN 978-80-86706-19-1.
- [5] MÁDL, J., BARCAL J. *Základy technologie II*. Vyd. 2. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2007, 55 s. ISBN 978-80-01-03733-1.
- [6] BRYCHTA J., BARCAL J. *Nové směry v progresivním obrábění*. Vyd. 2. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2007, 1 CD - R. ISBN 978-80-248-1505-3.
- [7] ŘASA J., GABRIEL V. *Strojírenská technologie 3.: Metody, stroje a nástroje pro obrábění*. Vyd. 2. Praha: Scientia, 2005, 256 s. ISBN 80-7183-337-1.
- [8] SADÍLEK, M., SADÍLKOVÁ Z. *Počítačová podpora procesu obrábění*. Vyd. 1. Ostrava: Fakulta strojní VŠB-TUO, 2012. ISBN 978-80-248-2770-4.
- [9] JANDEČKA, K. *Postprocesory a programování NC strojů*. Vyd. 1. Ústí nad Labem: UJEP, FVTM, 2007, 244 s. Knihnice strojírenské technologie. ISBN 978-80-7044-870-0.
- [10] BRLICA, V. *Technologické aspekty nástrojů pro obrábění dřeva*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 50s., 3 přílohy.
- [11] HLUCHÝ, M., KOLOUCH J. *Strojírenská technologie I. 3.*, přeprac. vyd. Praha: Scientia, 2002, 266 s. ISBN 80-718-3262-6.
- [12] HUMÁR, A., KOLOUCH J. *Materiály pro řezné nástroje. 3.*, přeprac. vyd. Praha: MM publishing, 2008, 235 s. ISBN 978-80-254-2250-2.
- [13] BUMBÁLEK, L. *Kontrola a měření*. Vyd. 1. Praha: Informatorium, 2009, 206 s. ISBN 978-80-7333-072-9.

- [14] AZK, *Frézka HWT*. [online]. [citace 24. Březen 2014]. Dostupné z WWW: http://www.azk.cz/line-c-profi.php?lang_cz
- [15] Seco Tools, *Tools catalog*. [online]. [citace 24. Březen 2014]. Dostupné z WWW: http://www.secotools.com/CorpWeb/Service_Support/machining_navigator/CEE/Czech/Final_LR_CZ_Jabro.pdf
- [16] Feropol, *Slitiny hliníku*. [online]. [citace 24. Březen 2014]. Dostupné z WWW: <http://www.feropol.cz/cz/product/slitiny-hliniku/1/0/>
- [17] Mitutoyo SJ – 301, Přístroj na měření drsnosti povrchu. *Návod k použití*.
- [18] Technodat: *Catia V5*. [online]. [citace 24. Březen 2014]. Dostupné z WWW: <http://www.technodat.cz/catia-v5>
- [19] AXIOM TECH s.r.o., *NX CAM*. [online]. [citace 24. Březen 2014]. Dostupné z WWW: <http://www.axiomtech.cz/24816-nx-cam>
- [20] J. PETERKA, *A new approach to calculation the arithmetical mean deviation of a profile during copy milling*, J. Mech. Eng. 50, 2004, 594-597s. ISSN 0039-2480
- [21] G. QUINTANA, M. L. GARCIA-ROMEU, J. CIURANA, *Surface roughness monitoring application based on artificial neural networks for ball-end milling operations*, Boston J. Intell. Manuf. 22, 2011, 607-617s. ISSN 0956-5515
- [22] J. S. HOSSAIN, N. AHMAD, *Surface Roughness Prediction Model for Ball End Milling Operation Using Artificial Intelligence*, Manag. Sci. Eng., 2012, 41-54s. ISSN 1913-0341
- [23] S. TANGJITSITCHAROEN, A. SENJUNTICHAJ, *In-process monitoring and prediction of surface roughness in ball-end milling process*, Vienna, Annals of DAAAM for 2010 & Proceedings of the 21st International DAAAM Symposium, 2010, 1389-1390s. ISSN 1726-9679

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

D	Průměr obrobku nebo nástroje [mm]
π	Ludolfovo číslo [mm]
n	Otáčky vřetene [min^{-1}]
v_c	Řezná rychlost [m/min]
v_f	Posuvová rychlost [mm/min]
α	Úhel čela [$^\circ$]
β	Úhel břitu [$^\circ$]
γ	Úhel čela [$^\circ$]
λ	Úhel sklonu hlavního ostří [$^\circ$]
δ	Úhel řezu [$^\circ$]
ε	Uhel špičky nástroje [-]
κ	Uhel nastavení hlavního ostří [-]
κ'	Uhel nastavení vedlejšího ostří [-]
F	Síla [N]
k_c	Měrná řezná síla [-]
z	Počet zubů frézy [-]
f_z	Posuv na zub [mm]
f_n	Posuv na otáčku [mm]
a_p	Axiální šířka záběru (hloubka řezu) [mm]
a_e	Radiální šířka záběru [mm]
P_c	Výkon [W]
η	Účinnost [-]
SK	Slinuté karbidy [-]
RO	Rychlořezná ocel [-]

PD	Polykrystalický diamant [-]
KNB	Kubický nitrid boru [-]
PKND	Polykrystalický kubický nitrid boru[-]
HRC	Tvrдость podle Rockwella [-]
C	Uhlík [-]
Co	Kobalt [-]
Mn	Mangan [-]
Ti	Titan [-]
W	Wolfram[-]
V	Vanad [-]
Si	Křemík [-]
Cr	Chrom [-]
Mo	Molybden [-]
Ni	Nikl [-]
P _r	Nástrojová rovina základní [-]
P _f	Nástrojová rovina hlavního ostří [-]
P _p	Nástrojová rovina ortogonální [-]
ČSN	Česká technická norma [-]
EN	Evropská norma [-]
ISO	International Organizationfor Standardization [-]
TiC	Karbid titanu [-]
TaC	Karbid tantalu [-]
WC	Karbid wolframu [-]
TiN	Nitrid titanu [-]
Al ₂ O ₃	Oxid hlinitý [-]
Ra	Střední aritmetická úchylka profilu [μm]

R_t	Celková výška profilu drsnosti [μm]
R_p	Největší výška výstupků profilu drsnosti [μm]
R_v	Největší hloubka prohlubně profilu drsnosti [μm]
R_z	Největší výška profilu drsnosti [μm]
R_q	Průměrná kvadratická úchylka posuzovaného profilu drsnosti [μm]
sm	Průměrná šířka prvků profilu drsnosti [μm]
R_{mr}	Materiálový poměr profilu drsnosti [%]
l_t	Délka zdvihu [mm]
l_n	Vyhodnocovaná délka [mm]
l_r	Základní délka mm]
CAD	Computer Aided Design [-]
CAM	Computer Aided Manufacturing [-]
CAE	Computer Aided Engineering [-]
CNC	Computer Numerical Control [-]
NC	Numeric Control [-]
PVD	Physical Vapour Deposition [-]
D_c	Obráběný průměr [mm]
dm_m	Montážní průměr ze strany stroje [mm]
l_2	Celková délka břitového nástroje [mm]
l_3	Délka nástroje [mm]
r_{el}	Rohový rádius [mm]
z_n	Celkový počet břitů nástroje [-]
\bar{x}	Odhad střední hodnoty [μm]
s	Odhad směrodatné odchylky [μm]
V	Variační koeficient [%]

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1</i> Soustava stroj – nástroj – obrobek.....	12
<i>Obr. 2</i> Základní plochy na obrobku [3].....	14
<i>Obr. 3</i> Nástroj – základní pojmy [1].....	14
<i>Obr. 4</i> Roviny nástroje [3].....	15
<i>Obr. 5</i> Úhly nástroje [1].....	16
<i>Obr. 6</i> Hlavní a posuvový pohyb u metod obrábění [2].....	17
<i>Obr. 7</i> Frézování.....	18
<i>Obr. 8</i> Sousedné frézování [4].....	19
<i>Obr. 9</i> Nesousedné frézování [4].....	20
<i>Obr. 10</i> Ohýbání stopkové frézy při obrábění [4].....	20
<i>Obr. 11</i> Vznik odchylek tvarů elastickými deformacemi frézy [4].....	21
<i>Obr. 12</i> Nesousedné a sousledné čelní frézování [4].....	22
<i>Obr. 13</i> Okružní frézování [6].....	22
<i>Obr. 14</i> Hloubka řezu a_p při obvodovém frézování [4].....	23
<i>Obr. 15</i> Hloubka řezu a_p a šířka záběru a_e [4].....	24
<i>Obr. 16</i> Úhly šikmých ploch.....	24
<i>Obr. 17</i> Úhlová fréza [7].....	25
<i>Obr. 18</i> Frézování podle orýsování [7].....	26
<i>Obr. 19</i> Frézování nakloněných ploch pomocí podložek [7].....	27
<i>Obr. 20</i> Obrábění kulovou frézou a frézou toroidní [8].....	28
<i>Obr. 21</i> Tvarové frézy [7].....	33
<i>Obr. 22</i> Úhlové frézy [7].....	33
<i>Obr. 23</i> Frézovací trn [6].....	35
<i>Obr. 24</i> Upnutí pomocí upínek [6].....	35
<i>Obr. 25</i> Smysl otáčení fréz [3].....	36
<i>Obr. 26</i> Způsoby výroby zubů fréz [3].....	36
<i>Obr. 27</i> Břitové destičky [4].....	37
<i>Obr. 28</i> Nástrojové oceli.....	40
<i>Obr. 29</i> Tvrdost legovaných NO [11].....	40
<i>Obr. 30</i> Třívrství povlak břitu [12].....	44
<i>Obr. 31</i> Oblasti řezných podmínek při soustružení.....	45
<i>Obr. 32</i> Princip měření drsnosti povrchu [4].....	48

<i>Obr. 33 Primární profil povrchu</i>	48
<i>Obr. 34 Kolmá a podélná drsnost</i>	50
<i>Obr. 35 Měřicí dráha snímače</i>	50
<i>Obr. 36 Největší výška profilu drsnosti (Rz)</i>	51
<i>Obr. 37 Celková výška profilu drsnosti (Rt)</i>	51
<i>Obr. 38 Střední aritmetická odchylka profilu Ra</i>	52
<i>Obr. 39 Průměrná šířka prvků profilu drsnosti (Rsm)</i>	52
<i>Obr. 40 Materiálový poměr profilu drsnosti Rmr</i>	53
<i>Obr. 41 Podíl materiálu v oblasti drsnosti povrchu [4]</i>	53
<i>Obr. 42 Princip měření profilometrem</i>	55
<i>Obr. 43 CNC frézka HWT C-442</i>	62
<i>Obr. 44 Označení fréz od firmy Seco Tools [15]</i>	63
<i>Obr. 45 Kótování fréz</i>	64
<i>Obr. 46 Schéma nástroje v NX 8.5</i>	65
<i>Obr. 47 Mitutoyo SJ – 301 [17]</i>	67
<i>Obr. 48 Sklopný svěrák</i>	67
<i>Obr. 49 Úhly na obrobku 1</i>	70
<i>Obr. 50 Úhly na obrobku 2</i>	70
<i>Obr. 51 Vytvoření segmentů</i>	71
<i>Obr. 52 Nulový bod (MCS Mill)</i>	72
<i>Obr. 53 Hrubovací operace</i>	73
<i>Obr. 54 Semi - finish operace</i>	74
<i>Obr. 55 Použité šířky záběru a_e</i>	75
<i>Obr. 56 Význam stepover applied on part</i>	76
<i>Obr. 57 Základní dokončovací operace</i>	77
<i>Obr. 58 Porovnávací dok. operace</i>	78
<i>Obr. 59 Vektor měření parametrů drsnosti</i>	80
<i>Obr. 60 Záznam o měření na drsnoměru s nástrojem $\varnothing 5\text{mm}$</i>	80
<i>Obr. 61 Ukázka obrobené plochy</i>	81
<i>Obr. 62 Závislost drsnosti Ra na sklonu plochy pro nástroj $\varnothing 3\text{mm}$</i>	91
<i>Obr. 63 Závislost drsnosti Ra na sklonu plochy pro nástroj $\varnothing 4\text{mm}$</i>	92
<i>Obr. 64 Závislost drsnosti Ra na sklonu plochy pro nástroj $\varnothing 5\text{mm}$</i>	92
<i>Obr. 65 Závislost drsnosti Ra na sklonu plochy pro nástroj $\varnothing 6\text{mm}$</i>	93

<i>Obr. 66 Závislost drsnosti Ra na sklonu plochy pro nástroj \varnothing 8mm.....</i>	94
<i>Obr. 67 Závislost drsnosti Rz na sklonu plochy pro nástroj \varnothing 3mm</i>	95
<i>Obr. 68 Závislost drsnosti Rz na sklonu plochy pro nástroj \varnothing 4mm</i>	96
<i>Obr. 69 Závislost drsnosti Rz na sklonu plochy pro nástroj \varnothing 5mm</i>	96
<i>Obr. 70 Závislost drsnosti Rz na sklonu plochy pro nástroj \varnothing 6mm</i>	97
<i>Obr. 71 Závislost drsnosti Rz na sklonu plochy pro nástroj \varnothing 8mm</i>	98
<i>Obr. 72 Vliv technologických parametrů na Ra u plochy s úhlem 12,5°</i>	99
<i>Obr. 73 Vliv technologických parametrů na Ra u plochy s úhlem 75°.....</i>	99
<i>Obr. 74 Porovnání parametrů Ra s rozdílnou v_f.....</i>	103
<i>Obr. 75 Porovnání parametrů Ra s rozdílnou v_c.....</i>	104
<i>Obr. 76 Porovnání parametrů Ra s odlišnou strategií</i>	104
<i>Obr. 77 Porovnání parametrů Rz s rozdílnou v_f.....</i>	105
<i>Obr. 78 Porovnání parametrů Rz s rozdílnou v_c</i>	105
<i>Obr. 79 Porovnání parametrů Rz s odlišnou strategií.....</i>	106
<i>Obr. 80 Porovnání parametrů Rz s hodnotou scallop</i>	106
<i>Obr. 81 Porovnání nástrojů pro úhel sklonu 0° hodnotou Ra.....</i>	107
<i>Obr. 82 Porovnání nástrojů pro úhel sklonu 12,5° hodnotou Ra.....</i>	108
<i>Obr. 83 Porovnání nástrojů pro úhel sklonu 25° hodnotou Ra.....</i>	108
<i>Obr. 84 Porovnání nástrojů pro úhel sklonu 37,5° hodnotou Ra.....</i>	109
<i>Obr. 85 Porovnání nástrojů pro úhel sklonu 50° hodnotou Ra.....</i>	109
<i>Obr. 86 Porovnání nástrojů pro úhel sklonu 62,5° hodnotou Ra.....</i>	110
<i>Obr. 87 Porovnání nástrojů pro úhel sklonu 75° hodnotou Ra.....</i>	110
<i>Obr. 88 Využití zpracovaných dat.....</i>	111

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1</i> Sousedné frézování	19
<i>Tab. 2</i> Nesousedné frézování	20
<i>Tab. 3</i> Vyklonění vřetenové hlavy	28
<i>Tab. 4</i> Výhody a nevýhody CNC strojů	30
<i>Tab. 5</i> Rozdělení CNC strojů	31
<i>Tab. 6</i> Přehled frézovacích nástrojů [6]	38
<i>Tab. 7</i> Vlastnosti legujících prvků	41
<i>Tab. 8</i> Vlastnosti prvků v RO	42
<i>Tab. 9</i> Základní délky drsnosti	55
<i>Tab. 10</i> Technické parametry CNC HWT C-442 [14]	62
<i>Tab. 11</i> Použité frézovací nástroje	63
<i>Tab. 12</i> Parametry použitých nástrojů [15]	64
<i>Tab. 13</i> Rozměry použitých nástrojů [15]	64
<i>Tab. 14</i> Vlastnosti obráběného materiálu [16]	66
<i>Tab. 15</i> Struktura aplikací [18]	68
<i>Tab. 16</i> Seznam použitých úhlů na součástech	70
<i>Tab. 17</i> Hrubovací operace	73
<i>Tab. 18</i> Před dokončovací operace	74
<i>Tab. 19</i> Použité řezné podmínky	76
<i>Tab. 20</i> Časy obrábění podle NX 8.5	77
<i>Tab. 21</i> Odhad střední hodnoty parametru drsnosti Ra pro nástroj Ø 3mm	83
<i>Tab. 22</i> Směrodatná odchylka a variační koef. pro nástroj Ø 3mm (Ra)	83
<i>Tab. 23</i> Odhad střední hodnoty parametru drsnosti Ra pro nástroj Ø 4mm	84
<i>Tab. 24</i> Směrodatná odchylka a variační koef. pro nástroj Ø 4mm (Ra)	84
<i>Tab. 25</i> Odhad střední hodnoty parametru drsnosti Ra pro nástroj Ø 5mm	84
<i>Tab. 26</i> Směrodatná odchylka a variační koef. pro nástroj Ø 5mm (Ra)	85
<i>Tab. 27</i> Odhad střední hodnoty parametru drsnosti Ra pro nástroj Ø 6mm	85
<i>Tab. 28</i> Směrodatná odchylka a variační koef. pro nástroj Ø 6mm (Ra)	86
<i>Tab. 29</i> Odhad střední hodnoty parametru drsnosti Ra pro nástroj Ø 8mm	86
<i>Tab. 30</i> Směrodatná odchylka a variační koef. pro nástroj Ø 8mm (Ra)	86
<i>Tab. 31</i> Odhad střední hodnoty parametru drsnosti Rz pro nástroj Ø 3mm	87
<i>Tab. 32</i> Směrodatná odchylka a variační koef. pro nástroj Ø 3mm (Rz)	87

<i>Tab. 33 Odhad střední hodnoty parametru drsnosti Rz pro nástroj Ø 4mm</i>	88
<i>Tab. 34 Směrodatná odchylka a variační koef. pro nástroj Ø 4mm (Rz)</i>	88
<i>Tab. 35 Odhad střední hodnoty parametru drsnosti Rz pro nástroj Ø 5mm</i>	88
<i>Tab. 36 Směrodatná odchylka a variační koef. pro nástroj Ø 5mm (Rz)</i>	89
<i>Tab. 37 Odhad střední hodnoty parametru drsnosti Rz pro nástroj Ø 6mm</i>	89
<i>Tab. 38 Směrodatná odchylka a variační koef. pro nástroj Ø 6mm (Rz)</i>	90
<i>Tab. 39 Odhad střední hodnoty parametru drsnosti Rz pro nástroj Ø 8mm</i>	90
<i>Tab. 40 Směrodatná odchylka a variační koef. pro nástroj Ø 8mm (Rz)</i>	90
<i>Tab. 41 Koeficient determinace pro parametr Ra</i>	94
<i>Tab. 42 Koeficient determinace pro parametr Rz</i>	98
<i>Tab. 43 Naměřené hodnoty drsnosti Rsm</i>	100
<i>Tab. 44 Odhad střední hodnoty parametru drsnosti Ra pro srovnávací obrábění</i>	102
<i>Tab. 45 Směrodatná odch. a variační koef. pro srovnávací obrábění (Ra)</i>	102
<i>Tab. 46 Odhad střední hodnoty parametru drsnosti Rz pro srovnávací obrábění</i>	102
<i>Tab. 47 Směrodatná odch. a variační koef. pro srovnávací obrábění (Rz)</i>	103
<i>Tab. 48 Analýza strojních času</i>	112

SEZNAM PŘÍLOH

PŘÍLOHA P I: UTB_01_OBROBEK_CATIA

PŘÍLOHA P II: UTB_02_OBROBEK_CATIA

Přílohy uvedené na CD:

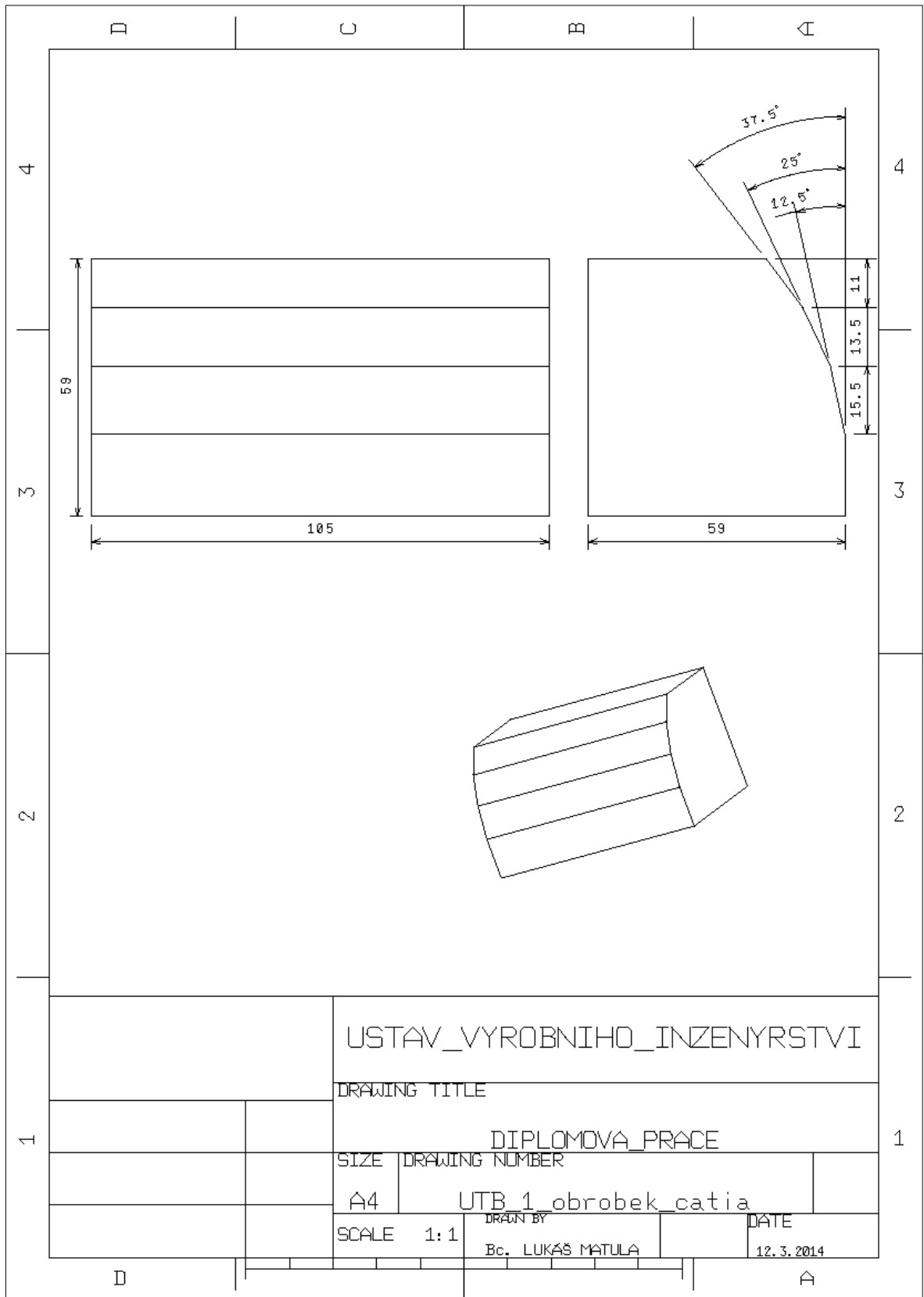
Přílohy DP/Modely_součásti – 3D modely součástí vytvořený v programu Catia V5

Přílohy DP/NX_8.5 – vytvořené programy pro jednotlivé nástroje

Přílohy DP/CNC_programy – vytvořené CNC programy pomocí postprocesoru z programu NX 8.5

Přílohy DP/Naměřená_data – naměřená data získaná pomocí drsnoměru Mitutoyo SJ – 301

PŘÍLOHA P I: UTB_01_OBROBEK_CATIA



PŘÍLOHA P II: UTB_02_OBROBEK_CATIA

