



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Habilitační práce

Modelování a optimalizace jakosti povrchu při frézování ploch se sklonem

**Modeling and Surface Quality Optimization for Milling of
Inclined Planes**

Autor: Ing. Ondřej Bílek, Ph. D.

Obor: Nástroje a procesy

Zlín, říjen 2018

© Ondřej Bílek

Vydala **Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně** v edici **Habilitační práce**.
Publikace byla vydána v roce 2018.

Klíčová slova: Frézování kulovým nástrojem, Plochy se sklonem, Procesní parametry, Jakost povrchu, Modelování, Optimalizace.

Key words: Milling by Ball Mill Cutter, Slope Surfaces, Process Parameters, Surface Quality, Modeling, Optimization.

Práce je dostupná v Knihovně UTB ve Zlíně.

ABSTRAKT

Habilitační práce se zabývá modelováním a optimalizací jakosti povrchu po frézování kulovým nástrojem v závislosti na procesních podmínkách, zahrnující sklon obráběné plochy, geometrii nástroje, řezné podmínky a další technologické parametry. Vedle základního analytického šetření a grafického zpracování trendu chování se využívají metody plánovaného experimentu s větším počtem vstupních proměnných a možnostmi optimálního nastavení. Na tuto část navazuje statistické zpracování dat pomocí vícerozměrné statistiky, jehož záměrem je posouzení míry podobnosti řezných parametrů. Další metodika, zpracování pomocí metod umělé inteligence, využívá sedm struktur umělých neuronových sítí a navrhuje optimální síť pro predikci jakosti povrchu po obrábění kulovou frézou.

ABSTRACT

Thesis deals with modeling and optimization of surface quality after ball-end milling in dependence on process parameters, including the slope of machined surface, tool geometry, cutting conditions and other technological parameters. In addition to the basic analytical survey and graphical processing of the behavioral trend, the methods of the planned experiment are used with a large number of input variables and are introduced optimal setting options. This part is followed by the statistical processing of data using multidimensional statistics, the aim of which is to determine the degree of similarity of the cutting parameters. Another methodology, based on Artificial Intelligence, uses seven artificial neural network structures and suggests an optimal surface prediction network for ball-end milling.

PODĚKOVÁNÍ

Touto cestou bych chtěl poděkovat všem, kdo mi v realizaci experimentů a zpracování dat vycházeli vstříc. Děkuji Ústavu výrobního inženýrství za vytvoření vhodných podmínek, především paní prof. Hausnerové, svému mentorovi prof. Lukovicsovi in memoriam, dále svým kolegům dr. Sámkovi, doc. Patovi, prof. Kocmanovi, doc. Sýkorové, doc. Hřibové a dalším za mnoho pomoci a rad. V neposlední řadě děkuji rodině, blízkým, Bohu a všem, kdo mě veřejně i skrytě podporují.

*„Snažte se dělat věci nejlépe na světě
a svět si vyšlape cestičku k Vaším dveřím.“*

Tomáš Baťa

OBSAH

1	ÚVOD.....	6
2	PŘEHLED AKTUÁLNÍHO STAVU ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY.....	9
	2.1 JAKOST POVRCHU PŘI FRÉZOVÁNÍ KULOVÝM NÁSTROJEM.....	9
	2.2 PREDIKČNÍ MODELY A METODY OPTIMALIZACE.....	13
3	ANALYTICKÝ ROZBOR.....	29
	3.1 VLIV ŘEZNÝCH PARAMETRŮ.....	30
	3.2 VLIV ŘEZNÉHO NÁSTROJE.....	36
	3.3 VLIV SKLONU PLOCHY.....	40
	3.4 VÝSLEDKY ANALYTICKÉHO ROZBORU.....	42
4	MODELOVÁNÍ POMOCÍ PLÁNOVANÉHO EXPERIMENTU.....	43
	4.1 HLAVNÍ A VEDLEJŠÍ ÚČINKY.....	48
	4.2 ANALÝZA ROZPTYLU.....	52
	4.3 OPTIMUM A OPTIMÁLNÍ PROVEDENÍ.....	61
	4.4 PŘÍNOS PLÁNOVANÉHO EXPERIMENTU.....	62
5	STATISTIKA PODOBNOSTI.....	64
	5.1 MĚLKÉ PLOCHY.....	64
	5.2 STRMÉ PLOCHY.....	71
	5.3 CHOWŮV TEST PRO MĚLKÉ A STRMÉ PLOCHY.....	74
	5.4 SHRUTÍ VÝSLEDKŮ STATISTIKY PODOBNOSTI.....	75
6	UMĚLÉ NEURONOVÉ SÍTĚ.....	76
	6.1 VERIFIKACE A POROVNÁNÍ ANN MODELŮ.....	78
	6.2 VYHODNOCENÍ ANN MODELU.....	87
7	PŘÍNOS PRÁCE PRO VĚDU A PRAXI.....	88
8	ZÁVĚR.....	90
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	93
	SEZNAM OBRÁZKŮ.....	106
	SEZNAM TABULEK.....	110
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	111

1 ÚVOD

Prudký rozvoj automatizace, robotizace, počítačových systémů, specializovaných softwarových aplikací a autonomních interagujících systémů je logickým důsledkem růstu ekonomiky a spotřeby v technologicky vyspělých zemích světa. Nejde jen o fragmentovanou oblast průmyslu, tento trend zasahuje ve stále větší míře i sféru výrobní. Právě strojírenská výroba mnohými považována nesprávně za dosluhující, začíná integrovat důležité prvky automatizace, hardwarových i softwarových řešení do svých výrobních celků.

V souvislosti s tímto trendem se hovoří o nástupu Industry 4.0¹, kterou je třeba chápat jako celospolečenskou změnu přinášející nové výrobní možnosti jak do oblastí tradičních obráběcích metod. Současně přináší nové technologie aditivní a hybridní výroby, významné především individualizací výrobků paradoxně v rámci masového měřítka výroby.

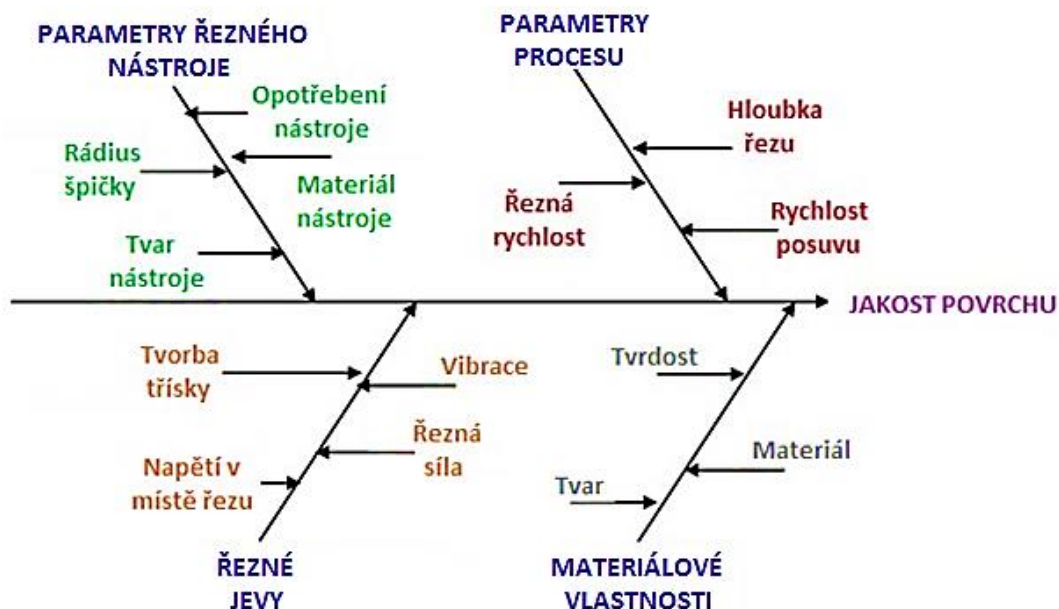
Změna je dána mnoha faktory, jestliže uvažujeme rostoucí tvarovou složitost, komplexnost součástí a současný důraz na spolehlivost, kvalitu a rychlost zhotovení, nenabízí se ani jiná řešení. Může vzniknout dojem, že lidský prvek ztrácí postupně svou pozici ve výrobním řetězci a je skutečností, že v dílenském a provozním prostředí je nahrazován systémy s menší chybovostí, která v důsledku vede k přesnosti, opakovatelnosti a predikci výroby. Změnu je tedy nutné brát jakou žádoucí. Naopak se objevují pracovní pozice dříve neznámé, pozice specialistů, kteří jsou multidisciplinárními odborníky, mající povědomí o návrhu, konstrukci, programování, řízení a optimalizaci těchto výrobních komplexů.

V lokálním i světovém pohledu výrobní komplexy zaměřené na přesné technologie výroby zahrnují CNC obráběcí stroje. V kontextu této práce stroje CNC (Computer Numerical Control) můžeme chápat jako označení automatizovaných výrobních strojů, pracujících podle navrženého programu. Nacházejí své nezastupitelné místo v pružné výrobě především nástrojů, určených pro sériovou výrobu, pro nástroje na zpracování plastů a pryže a obecných strojních součástí. Vlivy na kvalitu a spolehlivost výroby pomocí CNC strojů jsou v určité míře rovnocenné s vlivy působící na konvenčních obráběcí stroje, nicméně se přidávají další činitele, jako je korektnost vstupního programu a interpretace příkazů řídicí jednotkou stroje.

¹ Pojem *Industry 4.0* nebo také *Průmysl 4.0* je název v pořadí čtvrté průmyslové revoluce, s níž v roce 2013 přišel koncept dokumentu hannoverského strojírenského veletrhu a dává sjednocující charakter myšlenkám nastupující digitalizace ve strojírenství.

Je velmi pravděpodobné, že v brzké době CA podpůrné systémy s lidskými operátory budou překonány. Aktuálně jsou přímo nezbytným prvkem pro zhotovení komplexních součástí a pevnou složkou výrobního cyklu. CA (Computer Aided) systémy jsou ve své podstatě digitální portfolia výrobních softwarů, které automatizují plánování, návrh, konstrukci, programování, výrobu ale i logistický chod výroby. Kvalita programu pro dílčí CNC obráběcí stroj je vázána na hluboké znalosti a zkušenosti operátora a možnosti softwaru. To stále přináší nejistotu výsledku a nutnost hledání nových řešení.

Ve své vědecké činnosti se zaměřuji na využívání nových přístupů a zavádění inovativních metodik pro výzkum a popis rezného procesu. Většina dílčích prací je zaměřena do oblasti průmyslu zpracování plastů a pryže, a s tím spojenou výrobu nástrojů. Převážně se jedná o kusovou výrobu typizovaných forem, blíže jejich dutin, s důrazem na splnění kvalitativních a funkčních vlastností. Ve své činnosti si kladu za cíl predikovat výsledek rezného procesu před spuštěním stroje. Snažím se využívat pokročilých modelovacích postupů, původně vymezených pro jiné účely. Především jde o modelování pomocí umělé inteligence a využití počítačových statistických metod ve zpracování dat. Původně se vědecká a výzkumná činnost zaměřovala na broušící operace [17]-[16], které jsou operacemi s výraznými rezervami pro optimalizaci a úsporu v rámci celého technologického řetězce. Současným trendem je však snaha tyto dokončovací operace abrazivními nástroji buď zcela vyloučit, nebo alespoň minimalizovat jejich rozsah, pokud to jinak nejde.



Obr. 1.1: Činitelé, ovlivňující jakost obrobeného povrchu [9]

Orientuji se, a svou habilitační práci předkládám z výsledků poslední doby, které se zaměřují na zavádění nových přístupů modelování řezného procesu a okrajově i na optimalizaci parametrů při frézování nástrojem s polokulovým zakončením (dále uváděno jako kulová fréza) při obrábění skloněných ploch načisto. Vývoj v této oblasti ilustrují četné publikační výstupy [17]-[28], jež mají na zřeteli primární cíl, kterým je popis jakosti povrchu po obrábění a minimalizaci nutných pooperačních dokončovacích zásahů.

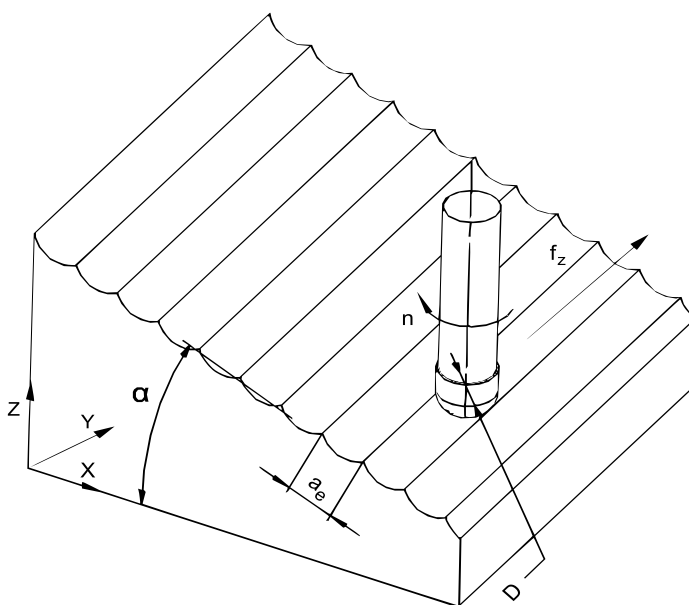
Predikce jakosti povrchu po frézování je úkol obtížný v mnoha rovinách. Důvodem je skutečnost, že jakost povrchu a s ní spojené hodnotící parametry jsou ovlivněny celou řadou vstupních faktorů, jejichž chování je mnohdy nelineární, nejen to, faktory jsou s větší nebo menší odezvou interagující navzájem. Schematicky tyto vlivy shrnuje Bernardos [9] do grafu tvaru rybí kosti na Obr. 1.1. Vedle primárního zájmu, je jakost povrchu důležitá pro plnění funkčních vlastností součásti a ovlivňuje mimo jiné trvanlivost, třecí vlastnosti, korozní odolnost a distribuci maziva, přenos tepla, odrazivost světla a únavovou pevnost, a v neposlední řadě vzhled a cenu součásti [8], [31], [32], [43], [48], [62], [64], [90], [91].

2 PŘEHLED AKTUÁLNÍHO STAVU ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

Jakost povrchu je široce rozšířený hodnoticí parametr kvality výrobků a je jedním z technologických požadavků. Následující část diskutuje jakost povrchu po frézování kulovou frézou, jež je využívána při víceosém dokončovacím obrábění. Kulový nástroj má smysl použít při frézování tvarových ploch se sklonem. Zamezí se tím známému jevu, kdy v blízkosti osy nástroje je výsledný vektor celkové rychlosti blízký nule a v takovém místě není materiál odebrán. Shrnuty jsou různé metodologie a strategie, které si kladou za cíl popis, predikci a optimalizaci povrchové drsnosti.

2.1 Jakost povrchu při frézování kulovým nástrojem






Frézování je konvenční technologií odebrání materiálu z obrobku ve formě třísek nástrojem s více břity. Hlavní rotační pohyb vykonává nástroj a třísky jsou periodicky formovány i podle počtu břitů nástroje. Výsledná jakost povrchu obrobene součásti sestává z řady elementárních povrchů, vytvořených jednotlivými reznými hranami. Topografie povrchu je výsledkem procesu odebrání materiálu v důsledku relativního pohybu nástroje a obrobku. Schéma (Obr. 2.1) ukazuje zjednodušený proces obrábění stopkovou frézou s kulovým čelem. Je možné odvodit, že jakost povrchu je významně závislá v tomto zjednodušení na geometrických charakteristikách frézy.



Obr. 2.1: Jakost povrchu po frézování kulovou frézou na skloněných plochách

Jak nejlépe dokládá Tabulka 2.1 určená normou DIN 4760 [44], topografie povrchu může být popsána víceřadou superpozicí geometrických úchylek ploch od nominálního povrchu.

Tabulka 2.1 Geometrické úchylky ploch podle DIN 4760 [44]

Nepravidelnosti povrchu	Příklad	Příčina odchylek
1. řádu: úchylky tvaru 	Nerovinnost Nekruhovitost	Chyba os stroje Vychýlení obrobku nebo nástroje Nedostatečné upnutí Deformace opotřebením nebo zpevněním
2. řádu: vlnitost 	Vlny	Vibrace stroje Nástroj/excentrické upnutí Porušení tvaru nástroje
3. řádu: drsnost 	Drážky Škrábance	Stav řezné hrany Posuvová rychlost Prísuv nástroje
4. řádu: drsnost 	Rýhy Záhyby Hřebeny	Proces tvorby třísky, tj.: Nárůstek Oddělování třísky Zauzlení třísek
Jakost povrchu 	Kombinace úchylek prvního až čtvrtého řádu	

V průmyslu, ve výrobě tvářecích nástrojů, tvarových dutin slévárenských a vstřikovacích forem především, je jakost povrchu charakterizována jako průměrná aritmetická úchylka profilu R_a . Parametr povrchové jakosti R_a je vypočítán z naměřeného profilu drsnosti jako aritmetický průměr absolutních hodnot nerovností $Z(x)$ na měřené délce l podle vztahu:

$$R_a = l^{-1} \int |Z(x)| dx \quad (\mu\text{m}) \quad (2.1)$$

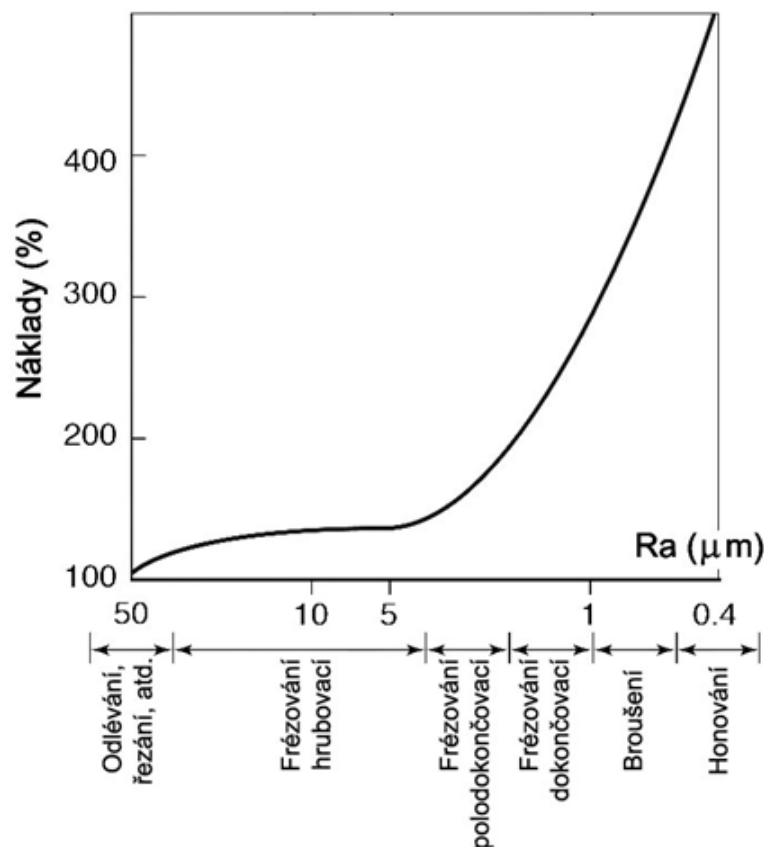
Parametr R_a je široce využíván ve výrobní praxi, přestože poskytuje jenom omezené informace o stavu a kvalitě obrobeného povrchu. Nejčastěji bývá tento parametr doprovázen měřením parametru R_z , který je současně závislou

proměnnou na Ra . Předchozím výzkumem bylo zjištěno, že pro výrobu technologiemi obrábění nástrojem s definovanou geometrií platí závislost [72]:

$$Ra \approx Rz / (3 - 5) \quad (\mu\text{m}) \quad (2.2)$$

Nejvyšší výška profilu Rz je průměrnou hodnotou součtu pěti nejvyšších vrcholků a pěti nejnižších údolí nerovností podél měřené délky profilu (podle ISO 4287:1997).

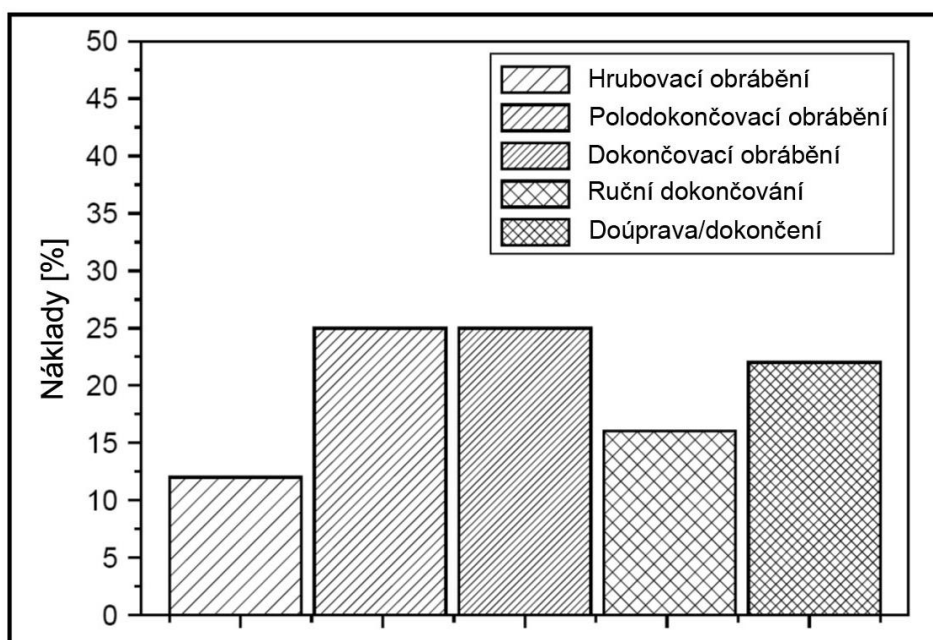
Velký vliv na pracnost obrábění má požadovaná přesnost rozměrů obrobených ploch. Použití různých metod obrábění zajistí odpovídající kvalitu, ale zdražuje výrobu. Přesnost rozměrů a jakost povrchu je proto třeba volit takovou, jaká přísluší funkci součásti (v případě volby menší přesnosti může dojít ke ztrátě funkčnosti součásti). Volba metody obrábění, a tím i přesnosti, významně ovlivňuje náklady na výrobu, jak ukazuje Obr. 2.2.



Obr. 2.2: Vliv jednotlivých technologických operací na poměrnou cenu výrobku [13]

Proto je důležité porozumět procesu tvorby nového povrchu v závislosti na procesních parametrech, aby se zajistila požadovaná kvalita výrobku

charakterizovaná parametry drsnosti povrchu současně s maximalizací produktivity. Nejde o jednoduchý úkol, vzhledem ke značnému množství závislých proměnných (viz. Obr. 1.1) a dalších obtížně kontrolovatelných faktorů, které mají na jakost povrchu vliv. Technologové výroby v případech dílenského obrábění obvykle volí konzervativní řezné podmínky, které snižující produktivitu, na druhou stranu ovšem zajistí požadovanou jakost a zamezí výrobě neshodných součástí. Ve výrobě forem a tvářecích nástrojů je běžnou praxí ruční dokončování povrchů pro zajištění požadované jakosti povrchu. Proces je časově náročný, mimoto je rovněž závislý na znalostech a zkušenostech pracovníka, což může vést k výrobě různých součástí ve stejné sérii. Časovou náročnost ručního procesu dokončování Quintana [75] kvantifikuje až na 15 %, ale nejen to, všechny dokončovací metody (jako je dokončovací frézování, strojní broušení, superfinišování, honování, lapování a ruční způsoby dokončování povrchů) jako celek mohou činit i více jak 50 % z celkové doby výroby vstřikovací formy.



Obr. 2.3: Podíl procesních nákladů na výrobu tvarových dutin forem [75]

Současným směrem v této oblasti je snaha minimalizovat dokončovací obrábění za pomoci abrazivních metod obrábění, a tím snížit náklady při současném zachování požadované jakosti. Prosazují se metody automatizace procesu (CAx systémy, CNC obrábění), robotizované manipulace a měření, bez účasti lidského faktoru, zanášejícího do výrobního procesu mnohdy hrubé výrobní chyby. Vyloučit nebo minimalizovat ruční metody broušení, leštění a dalších douprav povrchů jde cestou využívání rychlostních metod frézování (HSC) a

používáním tvrdých a supertvrdých nástrojových materiálů se sendvičovými povlaky.

Lze pozorovat vzrůstající trend využívání modelovacích přístupů pro predikci a následnou optimalizaci rezného procesu. Jde o logický a nutný krok, vzhledem k faktu, že obrábění je komplexní proces s mnoha působícími vlivy. Do budoucna můžeme tedy očekávat, že tyto modely budou sloužit jako základ pro adaptivní řízení autonomní výroby.

2.2 PREDIKČNÍ MODELY A METODY OPTIMALIZACE

Navzdory faktu, že proces obrábění je ovlivněn celou řadou činitelů souvisejících se vzájemným vztahem stroj - nástroj - obrobek - upínací přípravek [6], [40], [47], [62], [100], [109], aktuální modely procesu obrábění jsou schopny navrhnout nastavení vstupů, nejčastěji rezných podmínek, podle požadované jakosti povrchu [1], [29]. Metodika predikce jakosti povrchu zahrnuje různé přístupy řešení; od jednodušších, jako je stanovení kinematického model tvorby povrchu, experimentální vyšetřování a analýzu povrchu, implementaci umělé inteligence (AI) a také přístupy s využitím plánovaného experimentu. I přes množství metod a modelů výzkumy téměř bez výjimek popisují jakost povrchu jen pro specifický případ s limitujícími okrajovými podmínkami. Tím, že neexistuje univerzální model jakosti povrchu, je vyžadováno opakované stanovení modelu se změnou vstupů. Nevýhodou mnohých modelů jakosti povrchu je rovněž fakt, že jím navržené rezné podmínky mohou být udávány mimo pracovní rozsah stroje nebo naopak vyžadují vysokou citlivost nastavení. Nedávné studie se zaměřují na zkoumání rezného procesu dokončování stopkovou frézou s kulových zakončením čela nástroje pro dokončování šikmých a nepravidelných tvarových ploch [10], [11], [41], [59], [67]. Přesto jen málo výzkumníků se věnuje této problematice a není dostatek modelů jakosti povrchu vhodných pro aplikaci ve výrobní praxi.

Vztahem mezi jakostí povrchu a procesem obrábění se věnuje několik významných studií. Autoři Benardos a Vosniakos [9] stanovili nejenom graficky faktory, ovlivňující rezný proces (znova odkazují na Obr. 1.1), jejich velkým přínosem v oblasti predikce je shrnutí a klasifikace přístupů řešení. Jiné obecné rozdělení navrhuje Lu [64] ve své studii predikce drsnosti pomocí umělé inteligence s příspěvkem vibrací. Soustavně se rovněž vztahu frézování kulovou frézou, jakosti povrchu a stabilitě procesu věnuje Quintana [74]-[89]. Na základě těchto prací je možné shrnout výzkumné oblasti predikce jakosti povrchu do těchto skupin:

- a) Kinematické modely (vycházející z teorie obrábění)

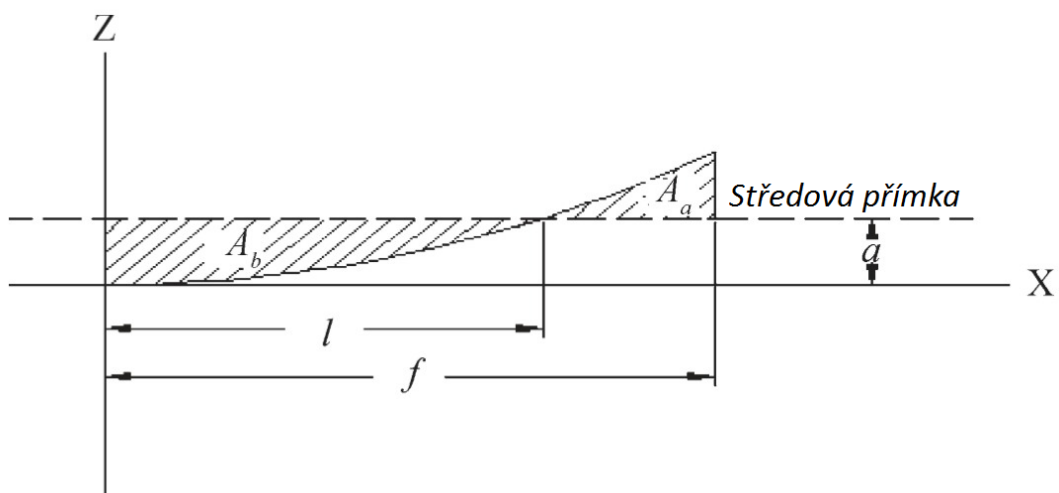
- b) Empirické modelování (experimentální analýza vlivů, regresní analýza)
- c) Metody plánovaného experimentu (DOE)
- d) Metody umělé inteligence (ANFIS, ANN)
- e) Pokročilé metody (GA, Fuzzy, Neuro-Fuzzy, Hybridní metody)

Během posledních dvou dekad někteří výzkumníci vytvořili možnosti optimalizačních technik, které již potvrdili svou užitečností i na poli optimalizace parametrů různých obráběcích procesů. Jde o techniky využívající genetické algoritmy (GA), simulované žíhání, umělé včelí kolonie, optimalizace mravenčími koloniemi, optimalizace částicových rojů, optimalizace založené na výuce a učení, a další.

Kategorie kinematických modelů je založena na teoretickém přístupu k modelování jakosti povrchu. Povrch po obrábění je predikován na základě teoretického řešení rezného procesu s ohledem na geometrii obráběcího nástroje a mechanismu tvorby třísky. Výchozí prací je Martellottiho [66] studie z roku 1941, charakterizující dráhu rezného nástroje při obvodovém frézování jako oblouky trochoidy v dokonale tuhém systému. Později Montgomery s Altintasem [2] navrhuje kinematický model obvodového frézování se zahrnutím excitovaných vibrací. Vlivu házení a posuvové rychlosti se věnuje Baek [5] ve své studii čelního frézování a vlivu na jakost povrchu. Arizmendi [3], [4] rozšiřuje kinematické modelování o predikci topografie povrchu metodou rovnoběžného posunutí osy a transformací s využitím Chebyshevových polynomů², a o rok později model rozšiřuje o účinky vibrací a vychýlení osy nástroje.

V případě modelu střední aritmetické jakosti povrchu Ra , obrábění frézou s kulovou reznou částí a sklonem obráběné plochy nebo vychýlením nástroje, model uvádí několik autorů. Kvantifikaci Ra jako podílu ploch nad a pod střednicí (Obr. 2.4) ve své práci využívá Hossain [52], [51].

² Tento postup představuje výhodu v porovnání s předchozími modely, protože nevyžaduje žádný výchozí bod k dosažení řešení.



Obr. 2.4 Kinematický model jakosti povrchu vzhledem ke středové přímce [52]

Legenda:

- a výška středové přímky (mm)
- A_a výšeč nad středovou přímkou (mm^2)
- A_b výšeč pod středovou přímkou (mm^2)
- l vzdálenost průsečíku (mm)
- f délka reprezentativního elementu (mm)

Výpočetní vztahy jsou uváděny pro ideální profil drsnosti se zahrnutím posuvu f_x a poloměru zaoblení nástroje R . Reprezentativní element délky f křivky nebo profilu povrchu je opakován po celé ploše a je symetrický vzhledem k ose Z s délkou $f = f_x / 2$. Teoretická hodnota střední aritmetické drsnosti Ra je dána podílem ploch jako:

$$Ra = \frac{A_a + A_b}{f}, \quad (2.3)$$

kde:

$$A_a = (f - l)(R - a) - \frac{R^2}{4} \left\{ (2\theta_f + \sin 2\theta_f) - (2\theta_l + \sin 2\theta_l) \right\} \quad (2.4)$$

$$A_b = (a - R)l + \frac{R^2}{4} (2\theta_l + \sin 2\theta_l) \quad (2.5)$$

$$a = R - \frac{R^2}{4f} (2\theta_f + \sin 2\theta_f) \quad (2.6)$$

$$l = \sqrt{2R \cdot a - a^2} \quad (2.7)$$

$$\theta_l = \sin^{-1} \frac{l}{R} \quad (2.8)$$

$$\theta_f = \sin^{-1} \frac{f}{R} \quad (2.9)$$

Pro horizontální plochy uvádí Sadílek [92] vztah (2.13). Vstupními parametry jsou poloměr zaoblení nástroje R a radiální hloubka řezu a_e . Quintana [81] uvádí kinematický model (2.11) se stejnými vstupními parametry, pomocí něž je schopen odfiltrovat složky zrychlení v jednotlivých osách při experimentálním měření. Tato data slouží jako jedna z mnoha vrstev umělé neuronové sítě pro sestavení finálního modelu jakosti povrchu s velmi dobrou shodou 98,053 %. Malé množství autorů sestavuje kinematický model jakosti povrchu pro obrábění ploch se sklonem nebo rovnocenně, se skloněnou osou nástroje. Jedním z nich je dříve zmiňovaný autor Quintana [74], který udává vztah (2.12). Druhým autorem kinematického modelu s uvažováním sklonu (2.10) je Peterka [72]. V obou případech je sestavený model funkcí poloměru zaoblení nástroje R , radiální hloubky řezu a_e a sklonu plochy α .

Je nutné zopakovat, že mechanické modely představují teoretickou predikci výsledné jakosti povrchu po obrábění. Frézování kulovou frézou je komplexním obráběcím procesem s parametry navzájem interagujícími a tyto modely nedávají přesnou predikci skutečného stavu povrchu po obrábění. Přesto se využívají k odhadu výsledné jakosti a slouží pro optimalizaci procesu v porovnání k experimentálním výsledkům.

Další linií výzkumů je vyšetření vlivů jednotlivých faktorů metodou experimentů a analýzou výsledků. Tento přístup je nejvíce konvenční, hlavní výhodou je snadnost provedení a vytěžení velmi dobrých výsledků. Při experimentech jsou analyzovány parametry a následně kvantifikovány výsledky, které nejvíce ovlivňují proces obrábění. Na druhé straně hraje významnou roli intuice a vhled řešitele do řešené problematiky. Metody jsou schopny stanovit trend chování pro sledované podmínky experimentů. Regresní analýza dat je nejvíce využívanou metodou sestavení modelu chování na základě naměřených dat. Nedostatkem této linie výzkumu je nízká nebo téměř žádná všeobecná platnost modelů, je tedy využívána převážně pro stanovení vztahů příčina – následek u celé řady činitelů obrábění.

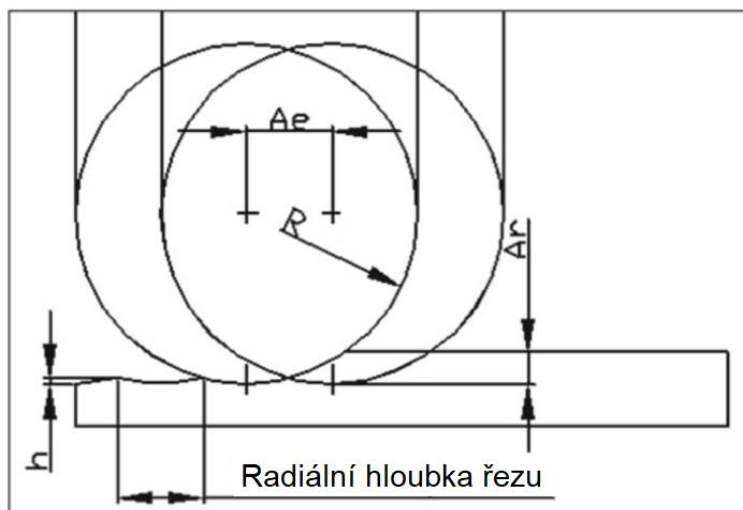
Uvádím v této části několik autorů, zaměřených na metodiku výzkumu pomocí experimentů. Baptista a Simoes [7] se zaměřují na analýzu 3 osého a pětiosého frézování tvarových ploch a vlivu radiální hloubky řezu a

vektoru posuvu na jakost povrchu. Výsledky výzkumu ukazují nižší hodnoty parametrů drsnosti při použití stopkových fréz nakloněných ve směru posuvu. Jiný Cokerův experiment [33] ultrazvukového měření popisuje systém provozního monitorování a měření jakosti povrchu. Systém přímým způsobem sleduje jakost povrchu, aniž by docházelo k ovlivnění procesní kapalinou a navržená kontrolní sestava je schopna zajistit konstantní jakost povrchu i během vzrůstajícího opotřebení nástroje. Další výzkum od Dinize [45] dává do souvislosti délku řezu, počet zubů, řezné síly a přiblížení řezného klínu k obrobku jako výsledek vlivu relativní vzdálenosti mezi obrobkem a nástrojem, společně s trvanlivostí, opotřebením nástroje a výslednou jakostí povrchu. Vztahem mezi vibracemi a nově vytvořeným povrchem se zabýval Heisel [49] při obvodovém frézování. Experimenty byly prováděny se známými vibračními charakteristikami a bylo ověřeno, že profil drsnosti je závislý na amplitudě, frekvenci a fázi relativního pohybu mezi obrobkem a řezným nástrojem. Další tým výzkumníků pod vedením Wojciechowskiewa [106] identifikuje sklon nástroje jako významný činitel vhodný pro optimalizaci a dosažení optimální jakosti povrchu. Vedle řezných podmínek je neméně důležitým parametrem při obrábění kulovým nástrojem vliv strategie. Výzkum [101] frézování hliníkové slitiny Al7075-T6 při různém sklonu osy nástroje potvrzuje, že nejhorší jakost povrchu při daných konstantních parametrech je v důsledku sousledného frézování bez náklonu osy, zatímco nejmenší parametry povrchové drsnosti R_z je dosaženo při nesousledném frézování skloněným nástrojem.

Třetí kategorií jsou metody plánovaného experimentu. Využívají systematické metodologie pro plánování experimentu a analýzu výsledků. Nejčastěji využívanou metodologií pro predikci jakosti povrchů jsou Taguchiho experimenty [97], [55], [65], jež tvoří složené navržené matice, a z anglického slovního spojení má metodologie zkratku DOE = Design of Experiments. Metoda optimalizace odezvové (responzní) plochy [70], v anglické literatuře označované jako metody RSM = Response Surface Methodology, je metodika nalezení optimálního nastavení významných faktorů s většinou postupným charakterem v tom smyslu, že se skládá z několika fází. Faktory, jež jsou v RSM vyčleněny za nejvíce podstatné, jsou použity pro sestavení polynomického modelu. Cíle nebo nezávislé proměnné jsou odezvou experimentu. Taguchiho experimenty jsou založeny na sérii plánovaných kroků, vedoucí k získání optimalizované, zlepšené veličiny, produktu nebo vede k pochopení procesu.

Mnozí výzkumníci se zaměřují na metodiku plánovaného experimentu především pro menší počet nutně realizovaných experimentů, možnost zahrnout širokou řadu vstupních parametrů procesu a zpracování výstupů se řídí statistickými metodami, jež jsou převážně zpracovávány za pomoci specializovaných softwarů. Plánované experimenty dávají odpovědi o míře vlivu

sledované veličiny a zpracovatelům jsou schopny sestavit základní model chování, který je dále optimalizován pomocí metod s využitím umělé inteligence. Pro úplnost uvádím některé z publikovaných modelů s uvedením hodnoty přesnosti. Je nutné i v těchto případech chápat modely jako platné pro úzce omezený interval vstupních parametrů procesu obrábění, daný jak materiálem obrobku, řeznými podmínkami, nástroji tak i strojnými a měřicími metodami.



Obr. 2.5: Jakost povrchu a výška nerovností po frézování [81]

Mechanické modely představuje jenom několik málo autorů. Jedním z nich je dříve uváděný Peterka [72], jehož model (2.10), uvedený v tabulce výše (Tabulka 2.2), je funkcí šířky záběru ae , poloměru kulového zakončení nástroje R a sklonu plochy α . Tento vztah umožňuje přímý výpočet parametru R_a pro podélné a příčné profily při frézování kulovou frézou na rovinných skloněných plochách. Dále upozorňuje na skutečnost, že nelze provádět kalkulaci modelů parametru drsnosti R_a pomocí přepočtových vztahů (2.2), jež je pro frézování chybný, nicméně pro jiné technologie s danou přesností použitelný. Významným autorem v této oblasti je Quintana [74], jež představuje ve svých člancích mechanické modely R_a pro plochy rovinné a se sklonem. Model (2.12) pro skloněné plochy ověřuje experimentálně pro různé průměry nástrojů. Výsledky ukazují poměrně dobrou shodu teoretického R_a s měřením, avšak teoretický výpočet výšky nerovností h v nezávislé rovnici (2.23), se v některých případech liší až o 75 %. Autor vysvětluje tuto neshodu dynamickým účinkem procesu frézování a současně příspěvkem tepelným.

Tabulka 2.2 Matematické vyjádření predikčních modelů parametru drsnosti Ra

Autor, rok	Matematické vyjádření modelu	Model (optimal.) / int. prav. / přesnost modelu R^2	Platnost modelu
(2.10) Peterka, 2004 [72]	$Ra = \frac{R^2 \cos \alpha}{a_e} \left\{ \begin{array}{l} \text{arc2} \left[\cos^{-1} \left(\frac{1}{2} \cos \sin^{-1} \frac{a_e}{2R \cos \alpha} + \frac{R \cos \alpha}{a_e} \arcsin^{-1} \frac{a_e}{2R \cos \alpha} \right) \right] - \\ - \sin 2 \left[\cos^{-1} \left(\frac{1}{2} \cos \sin^{-1} \frac{a_e}{2R \cos \alpha} + \frac{R \cos \alpha}{a_e} \arcsin^{-1} \frac{a_e}{2R \cos \alpha} \right) \right] \end{array} \right\} \times 1000$	Mech. / - / -	Plochy se sklonem
(2.11) Quintana, 2011 [81]	$Ra = \frac{2}{a_e} \left(R^2 \cos^{-1} \left(\frac{\sqrt{R^2 - \frac{a_e^2}{4}}}{2R} + \frac{R}{a_e} \sin^{-1} \left(\frac{a_e}{2R} \right) \right) - \left(\frac{R^2}{a_e} \sin^{-1} \left(\frac{a_e}{2R} \right) + \frac{\sqrt{R^2 - \frac{a_e^2}{4}}}{2} \right) \right) \times$ $\sqrt{\frac{2R^3}{a_e} \sin^{-1} \left(\frac{a_e}{2R} \right) + 2R^2 - R \sqrt{R^2 - \frac{a_e^2}{4}} - \left(\frac{R^2}{a_e} \sin^{-1} \left(\frac{a_e}{2R} \right) + R - \frac{\sqrt{R^2 - \frac{a_e^2}{4}}}{2} \right)^2}$	Mech. (ANN) / - / 0,98053	Rovinné plochy $D = 4 - 12$ mm $n = 6000 - 24000$ min ⁻¹ $f_z = 0,05 - 0,15$ mm $a_p = 0,1 - 0,29$ mm $a_e = 0,2 - 1$ mm

(2.12)
Quintana,
2010 [74]

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

Mech. / - / -

Plochy se
sklonem

(2.13) Sadílek, 2011, [92]	$Ra = \frac{R^2}{a_e} \times \left\{ \begin{array}{l} \text{arc2} \left[\arccos \left(\frac{1}{2} \cos \arcsin \frac{a_e}{2R} + \frac{R}{a_e} \arccos \frac{a_e}{2R} \right) \right] - \\ - \sin 2 \left[\arccos \left(\frac{1}{2} \cos \arcsin \frac{a_e}{2R} + \frac{R}{a_e} \arccos \frac{a_e}{2R} \right) \right] \end{array} \right\} \times 1000$	Mech / - / -	Rovinné plochy
(2.14) Baptista, 2000 [7]	$Ra = -0,781 - \frac{0,4676}{\log(a_e)} - \frac{1,2436}{\log(f_z)}$	DOE / - / -	$D = 10 \text{ mm}$ $n = 4200 \text{ min}^{-1}$ $f_z = 0,03 - 0,17$ mm $a_e = 0,063 - 0,70$ mm
(2.15) Suresh, 2005 [96]	$Ra = 0,2094 v_c^{-0,3814} \times v_f^{0,5359} \times \gamma^{0,1106} \times r_\epsilon^{0,1737}$	DOE / 99 % / 0,5228	$D = 20 \text{ mm}$ $v_c = 150 - 250$ min^{-1}
(2.16) Suresh, 2005 [96]	$Ra = 0,20924 - 0,0574 (\ln v_c + 0,793536)^2 + 0,0215 (\ln v_f + 3,5907)^2 +$ $+ 0,3506 (\ln \gamma + 0,4066)^2 + 0,2746 (\ln r_\epsilon + 0,394756)^2$	DOE (GA) / 99 % / 0,9305	$v_f = 200 - 400$ $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ $r_\epsilon = 0,4 - 1,2 \text{ mm}$
(2.17) Zhanjie, 2007 [111]	$Ra = 0,155785 n^{0,1079} \times v_f^{-0,0239} \times a_p^{-0,1914} \times a_e^{0,4304}$	DOE (ANN) / - / 0,973	$D = 20 \text{ mm}$ $n = 5000 - 10000$ min^{-1} $v_f = 1500 - 200$ $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ $a_p = 0,1 - 0,3 \text{ mm}$ $a_e = 1 - 3 \text{ mm}$
(2.18) Tangjitsitchar oen, 2010 [98]	$Ra = 7,5 \cdot 10^{-6} n^{0,964} \times f_z^{0,195} \times D^{2,69} \times a_p^{0,9717} \times \left(\frac{Fx}{Fz} \right)^{-2,6}$	DOE / 95 % / -	$D = 4 - 8 \text{ mm}$ $n = 8000 - 12000$ min^{-1} $a_p = 0,3 - 0,5 \text{ mm}$

(2.19) Tangjitsitchar oen, 2017 [99]	$Ra = e^{-6,55} n^{0,58} \times f_z^{0,54} \times a_p^{0,75} \times D^{0,46} \times \left(\frac{AFx}{AFz} \right)^{0,600}$	DOE / 95 % / 0,9282	$D = 6, 10 \text{ mm}$ $n = 8000-12000$ min^{-1} $f_z = 0,01 - 0,03$ mm $a_p = 0,5 - 0,9 \text{ mm}$
(2.20) Hossain, 2012 [53]	$Ra = 1,35355 + 0,0874799 \alpha + 0,00088798 6 n - 0,101501 v_f +$ $+ 7,92503 a_e - 6,14303 a_p - 0,00320667 \alpha^2 - 1,20701 \cdot 10^{-7} n^2 +$ $+ 0,00122325 v_f^2 + 9,91836 a_e^2 + 10,5552 a_p^2 + 8,53234 \cdot 10^{-6} \alpha \times n -$ $- 9,68995 \times 10^{-4} \alpha \times v_f + 0,1357 \alpha \times a_e + 0,00848098 \alpha \times a_p + 3,41726 \cdot 10^{-5} n \times v_f -$ $- 0,00576076 n \times a_e - 2,94529 \cdot 10^{-4} n \times a_p - 0,10186 v_f \times a_e + 0,0719970 v_f \times a_p -$ $- 12,5766 a_e \times a_p$	DOE / 95 % / -	Mat. obrobku: dural $D = 8 \text{ mm}$ $n = 380 - 1020$ min^{-1} $v_f = 22 - 68$ $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ $a_p = 0,2 - 0,6 \text{ mm}$ $a_e = 0,4 - 0,8 \text{ mm}$ $\alpha = 0 - 30^\circ$
(2.21) Hossain, 2012 [51]	$Ra = -1,98118 + 0,0499226 \alpha - 0,00933244 n + 1,30489 D - 0,0685035 v_f + 5,47377 a_e -$ $- 7,18853 a_p - 6,18471 \times 10^{-4} \alpha^2 + 8,00734 \times 10^{-6} n^2 - 0,077918 D^2 + 0,00131261 v_f^2 +$ $+ 1,33118 a_e^2 + 15,1453 a_p^2 - 4,29476 \times 10^{-5} \alpha \times n - 5,625 \times 10^{-4} \alpha \times D -$ $- 2,7217 \times 10^{-4} \alpha \times v_f + 0,06875 \alpha \times a_e + 0,0245833 \alpha \times a_p - 1,47734 \times 10^{-6} n \times D -$ $- 1,07861 \times 10^{-5} n \times v_f + 0,00327474 n \times a_e + 0,00716583 n \times a_p - 7,74847 \times 10^{-4} D \times v_f -$ $- 0,33125 D \times a_e + 0,254688 D \times a_p + 0,0050465 v_f \times a_e - 0,00104179 v_f \times a_p -$ $- 15,8125 a_e \times a_p$	DOE / 95 % / -	Mat. obrobku: 1.6511 $D = 6 - 10 \text{ mm}$ $n = 316 - 715 \text{ min}^{-1}$ $v_f = 22 - 44$ $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ $a_p = 0,1 - 0,3 \text{ mm}$ $a_e = 0,2 - 0,4 \text{ mm}$ $\alpha = 0 - 30^\circ$

(2.22) Jatti, 2013 [60]	$Ra = 9,01938 + 0,00194971 n - 0,0101682 v_f - 6,41036 a_p - 2,54626 \times 10^{-7} n^2 +$ $+ 4,08583 \times 10^{-6} v_f^2 + 5,92333 a_p^2 - 3,42857 \times 10^{-7} n \times v_f -$ $- 4,31429 \times 10^{-4} n \times a_p - 2 \times 10^{-4} v_f \times a_p$	DOE (GA) / 95 % / 0,9242	Mat. obrobku: Al-Si12 $D = 12 \text{ mm}$ $n = 1500 - 5000 \text{ min}^{-1}$ $v_f = 1000 - 2000 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ $a_p = 0,5 - 1,0 \text{ mm}$
(2.23) Hossain, 2014 [50]	$Ra = -7,62759 + 0,0566897 \alpha - 0,00440872 n + 1,4061 D + 0,0406257 v_f + 17,4175 a_e +$ $+ 0,634474 a_p - 9,76707 \times 10^{-4} \alpha^2 + 3,71762 \times 10^{-6} n^2 - 0,0711395 D^2 - 3,89929 \times 10^{-5} v_f^2 -$ $- 12,7482 a_e^2 + 0,205794 a_p^2 - 3,53292 \times 10^{-5} \alpha \times n - 0,00107917 \alpha \times D -$ $- 9,99419 \times 10^{-5} \alpha \times v_f + 0,07075 \alpha \times a_e - 4,16667 \times 10^{-4} \alpha \times a_p - 7,73033 \times 10^{-5} n \times D -$ $- 4,76623 \times 10^{-6} n \times v_f + 0,0047563 n \times a_e + 0,00407156 n \times a_p - 0,00263434 D \times v_f -$ $- 0,75875 D \times a_e + 0,247813 D \times a_p - 0,0321807 v_f \times a_e - 0,0144532 v_f \times a_p -$ $- 13,875 a_e \times a_p$	DOE / 95 % / -	Mat. obrobku: 1.2344 $D = 6 - 10 \text{ mm}$ $n = 316 - 715 \text{ min}^{-1}$ $v_f = 22 - 44 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ $a_p = 0,1 - 0,3 \text{ mm}$ $a_e = 0,2 - 0,4 \text{ mm}$ $\alpha = 0 - 30^\circ$

Vysvětlení parametrů a zkratk:

- D průměr nástroje (mm)
- v_c řzná rychlost (m/min)
- n otáčky (min^{-1})
- v_f posuvová rychlost (mm/min)
- f_z posuv na zub (mm)
- a_p axiální hloubka řezu (mm)

a_e	radiální hloubka řezu (mm)
r_ε	velikost bočního radiusu frézy (mm)
α	úhel sklonu plochy/nástroje ($^\circ$)
γ	úhel čela nástroje ($^\circ$)
F_x	tangenciální složka síly (N)
F_z	axiální složka síla (N)
AF_x	dynamická tangenciální složka síly (N)
AF_z	dynamická axiální složka síla (N)
DOE	plánovaný statistický experiment
Mech	mechanický model
ANN	umělá neuronová síť
GA	genetické algoritmy

Navrhuje sledovat proces pomocí metod příčina – následek s využitím ANN, GA, Fuzzy nebo expertních systémů. Neuronové sítě využívá o rok později ve své další studii [81]. V ní se zaměřuje na modelování Ra pro rovinné plochy. Deterministické parametry procesu frézování jsou pro chování Ra (2.11) uváděny v tabulce. Předpokládá, že výška nerovností h (Obr. 2.5) je dána:

$$h = R - \sqrt{\frac{4R^2 - a_e^2}{4}} \quad (\text{mm}) \quad (2.24)$$

Uváděné vztahy jsou vstupy pro modelování pomocí ANN, využívající dvouvrstvou síť s dopředním šířením (feed-forward), Levenberg-Marquardt učícím se algoritmem a jednou skrytou vrstvou, tvořenou 20 neurony. Celý model zahrnuje mimo jiné i vibrace, vliv chlazení a další činitele procesu frézování, a celkově provedl Quintana 250 experimentů. Uváděná vynikající míra shody mezi modelem a naměřenými daty ukazuje, že ANN pro zpracování a modelování dat je vhodným směrem. Sadílek a Čep [92] uvádějí jeden z posledních mechanických modelů Ra (2.13) pro rovinné plochy. Zdůrazňují nutnost frézovat mimo osu kulové frézy z důvodů nulové rezné rychlosti v blízkosti osy nástroje. Proto doporučují naklonit nástroj nebo plochu obrobku a využívat víceosé možnosti obrábění. Modelování navazuje na mechanický rovinný model Peterky. Je provedena substituce pro obrábění skloněným nástrojem, umožňující vypočítat teoretické hodnoty Ra . Model je ověřen experimentálně pro různé metody obrábění.

Následující matematické modely mají původ ve statistických metodách zpracování dat. Tyto modely jednotliví autoři dále využívají jako účelové funkce společně s procesními podmínkami pro optimalizační metody pomocí ANN, GA a další. Šířka záběru a posuv na zub jsou nezávislými proměnnými modelu (2.14) pro parametr drsnosti Ra autora Baptisty [7]. Model vznikl na základě využití DOE a vícenásobné lineární regrese. Autor ve svém příspěvku mimo jiné stanovuje výpočet doby obrábění hliníku pro dané technologické podmínky ve tvaru:

$$t_{as} = \frac{(921,94 / a_e) + 74,98}{f_z \times 310,8} \quad (\text{s}), \quad (2.25)$$

umožňující nalézt minimum odpovídající maximální výrobnosti. Uzavírá, že je vhodné používat 5-osé frézování namísto 3-osého, aby se náklonem osy nástroje dosáhlo lepší jakosti povrchu. Za vhodné považuje používat náklon osy nástroje $+15^\circ$ vůči obráběné ploše. Suresh [96] nabízí dva matematické modely Ra , jež

byly sestaveny z naměřených dat a vyhodnoceny pomocí RSM. Model prvního řádu (2.15) avšak nabízí omezenou popisnost, a proto je stanoven polynomický model druhého řádu (2.16) s koeficientem regrese $R^2 = 0,9305$. Rovnice je platná pro frézování rovinných ploch frézou s bočním rádiusem. Pro hledání optimální řezné geometrie nástroje a řezných podmínek za účelem dosažení co nejlepší jakosti povrchu využívá autor genetických algoritmů s velikostí populace 20 a maximálním počtem 500 generací.

Ve zpracování dat a modelování procesu frézování, jak jsem uváděl dříve, se pohybuje velmi málo výzkumnických týmů. Mnozí své výsledky postupně zpřesňují s využitím pokročilých metod optimalizace. Jedním z nich je autor Zhanjie [111], který na model (2.17) z vícenásobné regresní analýzy s velmi dobrou popisností aplikuje optimalizaci pomocí neuronové sítě typu RBF (radial basis function). Skládá se ze dvou vrstev neuronů, skryté a výstupní, kde skrytá vrstva je tvořena RBF neurony. Uzavírá se závěry, že přesto, že je RBF neuronová síť univerzálním aproximátorem, má silnější popisnou schopnost nelineárního chování než regresní analýza. Model může zahrnovat více faktorů procesu obrábění, avšak vyžaduje dostatek experimentálních měření pro sestavení sítě. Při dokončovacím frézování nerezové oceli X12CrNi18.8 (17 241) má největší vliv na jakost povrchu radiální hloubka řezu a_e při sousledném frézování.

Pozornost zaslouží autor Tangjitsitcharoen [98], udávající vícenásobný regresní model jakosti povrchu (2.18) se zahrnutím poměru řezných sil. Výlučnost přístupu umožňuje předvídat a kontrolovat jakost povrchu měřením složek řezných sil a tím adaptovat řezné podmínky během procesu obrábění pro dosažení požadované jakosti povrchu. Nikde v textu autor nevysvětluje, proč udávaná rovnice pro parametr Ra i Rz (níže) neodpovídá rozměrově. V posledním příspěvku [99] model zpřesňuje (2.19), zahrnuje poměr dynamických složek řezných sil a je dosaženo 92,82 % přesnosti modelu. Vedle modelu střední aritmetické drsnosti uvádí Rz model největší výšky nerovností ve tvaru:

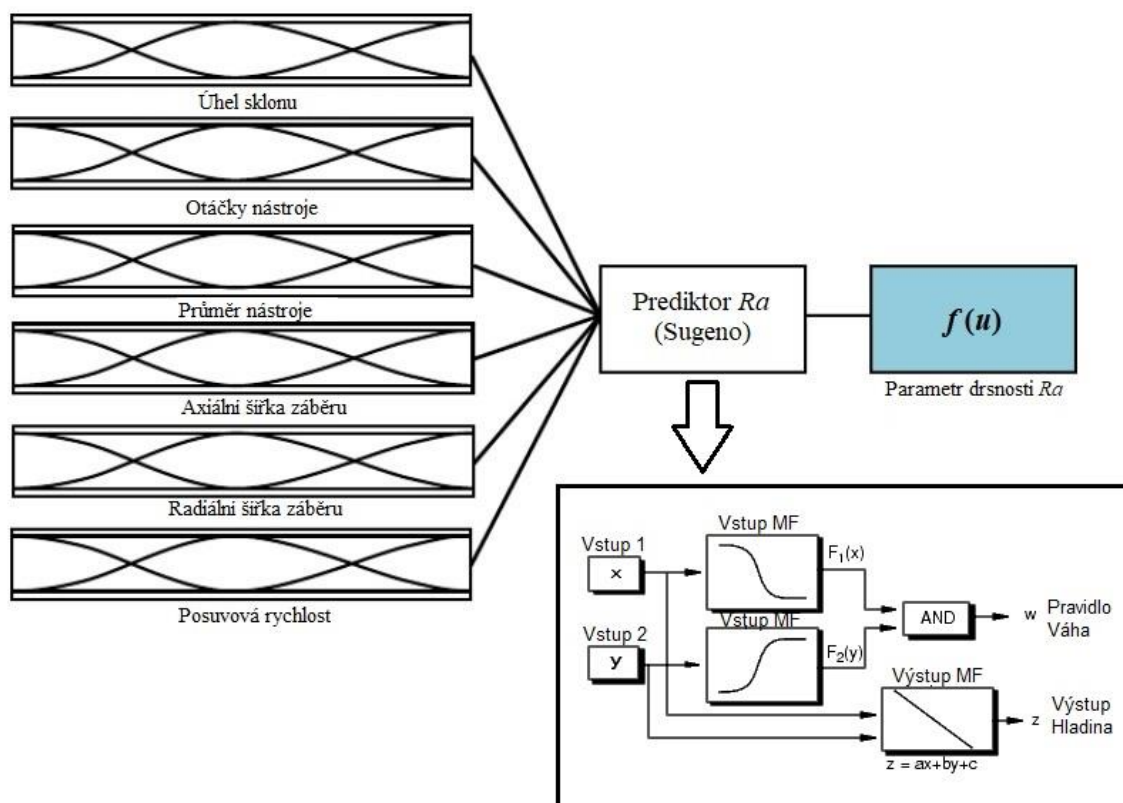
$$Rz = e^{-3,82} n^{0,40} \times f_z^{0,34} \times a_p^{0,64} \times D^{0,26} \times \left(\frac{AF_x}{AF_z} \right)^{0,806} \quad (\mu\text{m}). \quad (2.26)$$

Lze pozorovat, že metodika DOE může být aplikována na rozdílné materiály, přesto zůstává v platnosti, že korelace mezi řeznými parametry je silně závislá na materiálu, jež je obráběn a nelze stanovit jeden univerzálně platný model. Významnými příspěvky v této oblasti jsou Hossainovy modely [50] - [54], porovnávací hybridní systém ANFIS (adaptive neuro-fuzzy interference system), RSM modelování a teoretické výpočetní řešení pomocí rovnic (2.3)-(2.9). Autor ve svých prvních příspěvcích [52] a [53] sestavuje ANFIS model pro

dural, predikující jakost povrchu trénovacích dat s průměrným absolutním procentem chyby (MAPE) 0,003 %, avšak při ověření MAPE chyba vzrůstá na hodnotu 38,605 %. Poznamkám je, že úhel sklonu nástroje a otáčky nástroje mají velmi nízký koeficient korelace vůči Ra při obrábění duralu. Vzniká otázka, proč autor nepodává vysvětlení tohoto výsledku a model dále neupravuje bez nevýznamných proměnných, nadto pracuje se stejnou metodikou při obrábění oceli 1.6511 v dalším článku [51]. Počet vstupních proměnných je zvýšen o průměr nástroje D na šest. ANFIS model je výrazně přesnější s MAPE chybou 15,79 %, RSM optimalizace modelu (2.21) je kvantifikován chybou MAPE 23,78 %, zatímco výpočtové vztahy (2.3)-(2.9) jsou s MAPE chybou 27,1 %. Kontradikce k přechozím výsledkům autora je konstatování, že úhel sklonu s radiální hloubkou řezu má naopak pozitivní korelaci k Ra porovnáním Pearsonova korelačního koeficientu. Nekoherentnost může být zapříčiněna materiálovými vlastnostmi obráběného materiálu a především obrobiteľností. V prvním případě lehce obrobiteľné slitiny hliníku není sklon frézy/plochy důležitým faktorem. Materiál se obrábí snadno v jakémkoliv místě kontaktu nástroje s obrobkem. Obráběním v blízkosti osy může vést k vyvolání tlakového průběhu tváření nemající významný vliv na jakost povrchu. Při obrábění oceli 1.6511 (16 341) tento předpoklad nemůže platit, obrobiteľnost této středně legované chrom - nikl - molybdenové oceli je výrazně nižší vlivem vysoké houževnatosti a je silně závislá na místě kontaktu řezné hrany s obráběným materiálem.

V pozdější studii [50] autor navazuje na svůj předchozí výzkum při obrábění chrom - molybden - vanadiové oceli 1.2344 (19 554) aplikované při výrobě plastikářských nástrojů. Jako v předchozích případech využívá výpočetní stanovení, RSM (2.23), ANN a ANFIS pro predikci a stanovení modelu jakosti povrchu. Prediktor Ra pro šest vstupních proměnných je stejný a to Takagi-Sugeno-Kangova neboli také Sugenoova metoda fuzzy interference, charakteristická tím, že výstupní parametry funkce (MF v Obr. 2.6) jsou buď lineární, nebo konstantní. Test korelace mezi Ra a vstupními parametry proběhl se stejným výsledkem jako u 1.6511. Všechny modely vykazují MAPE chybu do 20 %, ANFIS stanovuje model s nejnižší MAPE chybou 13,17 % a v porovnání k ANN modelu s více vrstvou feed-forward neuronovou sítí je o 3,65 % přesnější.

Jattiho [60] model (2.22) využívá RSM s Box Behnken metodou s trojúrovňovým faktoriálním návrhem a s dalšími středovými, jež je na výstupu polynomem 2. řádu a slouží jako vstup pro GA optimalizaci. Model pracuje s průměrnou chybou 5,9 %, maximální chybou 12,84 % pro obrábění ne příliš vhodné slitiny Al-Si12, používané zvláště pro slévárenské účely.



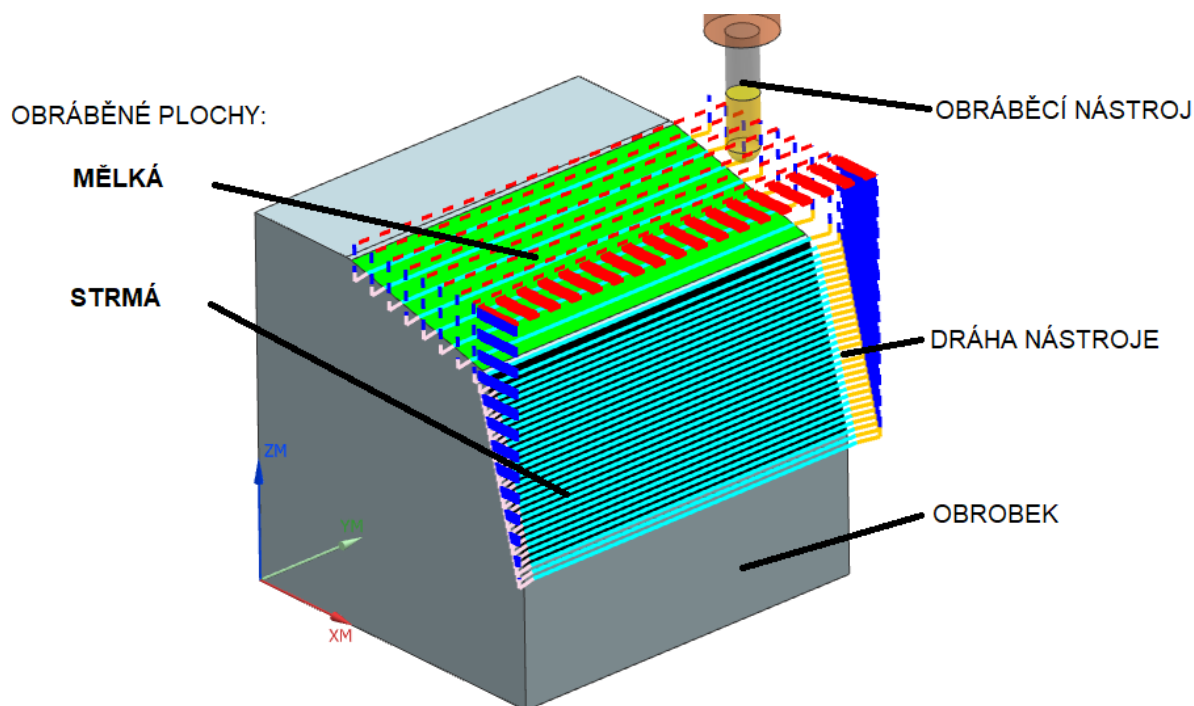
Obr. 2.6: Model ANFIS s šesti vstupy a Sugeno prediktorem [50],[105]

Teoretický rozbor této kapitoly ukazuje na několik stěžejních směrů, kterými se výzkum v oblasti predikce, modelování a optimalizace řezného procesu vydává. Podobně i další kapitoly mého výzkumu se snaží přispívat k rozvoji v této oblasti. Zaměřuji se na výzkum jakosti povrchu po frézování kulovou frézou různě skloněných ploch pro materiály využívané pro nástroje plastikářského průmyslu, v tomto případě jde o ocel s označením 1.2379 (19 573) a hliníkové slitiny AW 7022, používané jako materiál pro výrobu vulkanizačních forem.

Na základě rešerše volím několik přístupů. Tím nejzákladnějším je analytický rozpor, kde pomocí experimentů a analýzy výsledků hodnotím trend jednotlivých parametrů s ohledem na jakost povrchu a identifikuji významné vstupní vlivy. Dále se zaměřuji na pokročilou statistickou analýzu naměřených dat za pomoci metod plánovaného experimentu a rovněž za pomoci statistiky podobnosti. Závěrem sestavuji několik modelů za pomoci umělých neuronových sítí, jež ověřuji se skutečností.

3 ANALYTICKÝ ROZBOR

Ve výrobní praxi je výsledná jakost předepsána požadavkem technologa a je nutné ji dodržet. K dosažení cíle vede více výrobních metod, a proto se splnění řídí kritérii maximální výrobnosti a minimálních nákladů. Při dokončovacím frézování jde o vyšetření vhodné kombinace řezných podmínek z hlediska sledovaných parametrů drsnosti. Analytický rozbor naměřených dat v závislosti na vstupních parametrech procesu je jednou ze základních metodik, jež umožňuje identifikovat významné vlivy a trendy chování. Využívá se statistických metod a grafického zpracování dat, obvykle daných stanovením aritmetického průměru, směrodatné odchylky a variačního rozpětí. Analytický rozbor je základní metodikou, na které staví pokročilejší metody predikce a optimalizace dat. Přestože jde o jednu z nejjednodušších metod rozboru naměřených dat, je metoda citlivá na správném výběru vstupních parametrů experimentu, rozsahu měření, strojů a měřicích zařízení a vyžaduje široké znalostní povědomí experimentátora o technologických procesech.

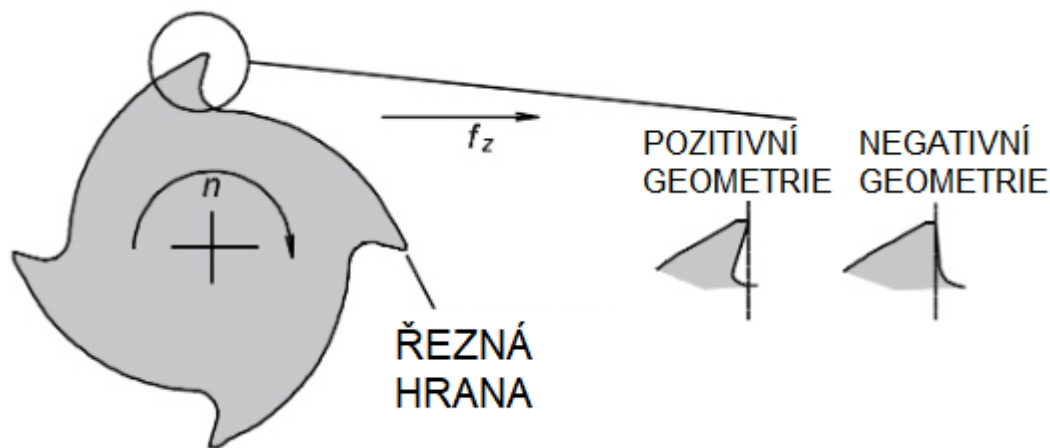


Obr. 3.1: Klasifikace ploch obráběného segmentu a strategie obrábění

Dříve zde uváděné studie identifikují značný počet technologických parametrů, jež ovlivňují výslednou jakost povrchu po frézování kulovou (kopírovací) frézou. Pro analytický rozbor se doporučuje provést výběr nejvýznamnějších vlivů, vzhledem k tomu, že úměrně s počtem vstupních parametrů roste objem

prováděných experimentů. Záměrem je zjistit odezvu jakosti povrchu při změně řezných parametrů: šířky záběru a_e , posuvu na zub f_z , sklonu obráběné plochy α , vlivu nástroje: geometrii dané úhlem čela γ , průměrem D a posouzení spotřeby času jako strojního času T . Pro minimalizaci nežádoucích vlivů se při programování využívá CAM softwarů s tolerancí interpolace křivkové dráhy $\pm 0,01$ mm, experimenty jsou realizovány na automatizovaných CNC obráběcích strojích podobně, jako probíhá frézování tvarových částí forem, nástrojů a součástí. Nástrojem při obrábění je stopková kulová monolitní fréza ze slinutých karbidů s PVD povlakem a pokud není uvedeno jinak, obráběným materiálem je ledeburická ocel 1.2379 (19 573) s 63 HRC. Schéma experimentů je znázorněno na obrázku (Obr. 3.1). Tvarové plochy součástí je možné klasifikovat do dvou kategorií. Plochy mělké jsou charakterizovány intervalem úhlu sklonu α vůči horizontální upínací ploše stolu ($0^\circ - 30^\circ$), zvoleno je 15° , strmé plochy leží v intervalu úhlu sklonu α vůči upínací ploše stolu ($30^\circ - 90^\circ$), zvoleno je 75° .

Zatímco geometrické parametry řezného nástroje zůstávají konstantní, označuje pozitivní geometrii nástroje kulové frézy (viz. Obr. 3.2) nástroj s úhlem čela $\gamma = +12^\circ$ a negativní geometrii nástroj s úhlem čela $\gamma = -4^\circ$.

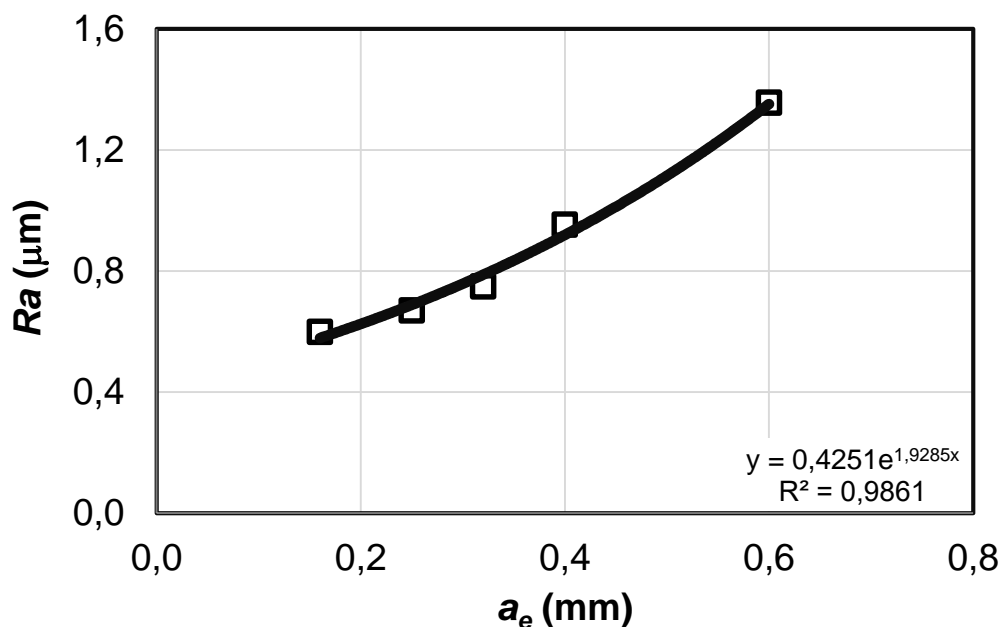


Obr. 3.2: Pozitivní a negativní geometrie řezného nástroje

3.1 VLIV ŘEZNÝCH PARAMETRŮ

Radiální hloubka řezu a_e je identifikována literaturou i analytickým rozбором jako parametr s nejvýznamnějším vlivem na výslednou jakost povrchu při frézování kulovým nástrojem. Jestliže parametr a_e vzrůstá, což znamená, že rozteč mezi paralelními řezy se zvětšuje, to pochopitelně vede ke zhoršení jakosti povrchu. Jak můžeme pozorovat v grafu (Obr. 3.3) je průběh chování parametru drsnosti Ra exponenciální a vhodnou aplikací matematického modelu lze snadno predikovat hodnoty, jež nemohou být měřeny. Nejen to, zpětně umožňuje

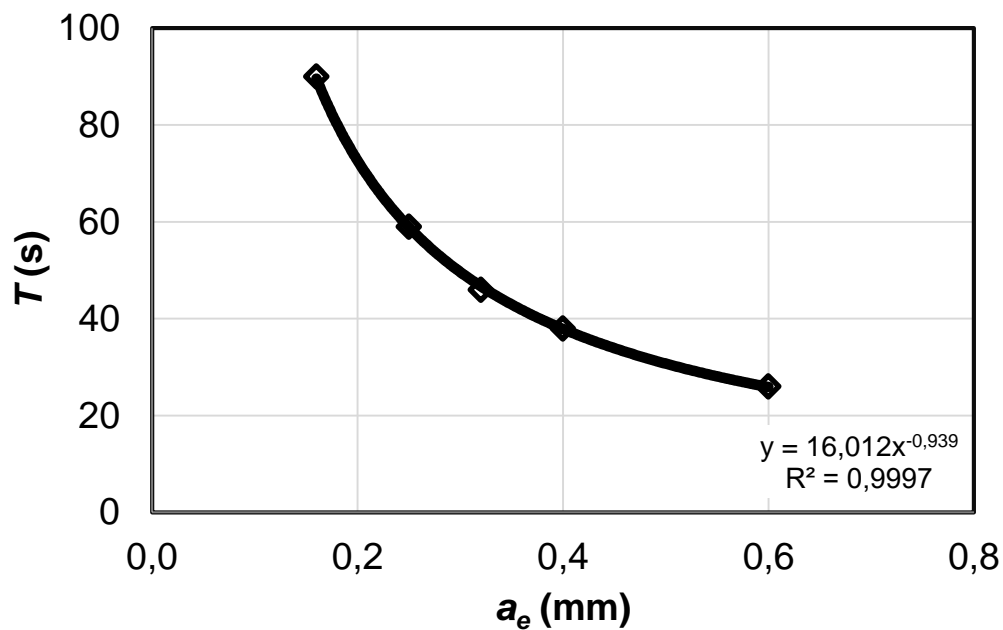
kvantifikovat limitní hodnoty parametrů a_e tak, aby se dosáhlo požadované jakosti povrchu. Častým omezujícím kritériem je doba, po kterou je nástroj v záběru, zde označený jako strojní čas T . Parametr T má přímou spojitost s trvanlivostí nástroje a jeho opotřebením; současně je spojen s náklady na provoz stroje při obrábění plošně rozměrných součástí. Jak lze pozorovat v grafu na Obr. 3.4, chování má exponenciální charakter, se vzrůstající radiální hloubkou řezu má klesající tendenci.



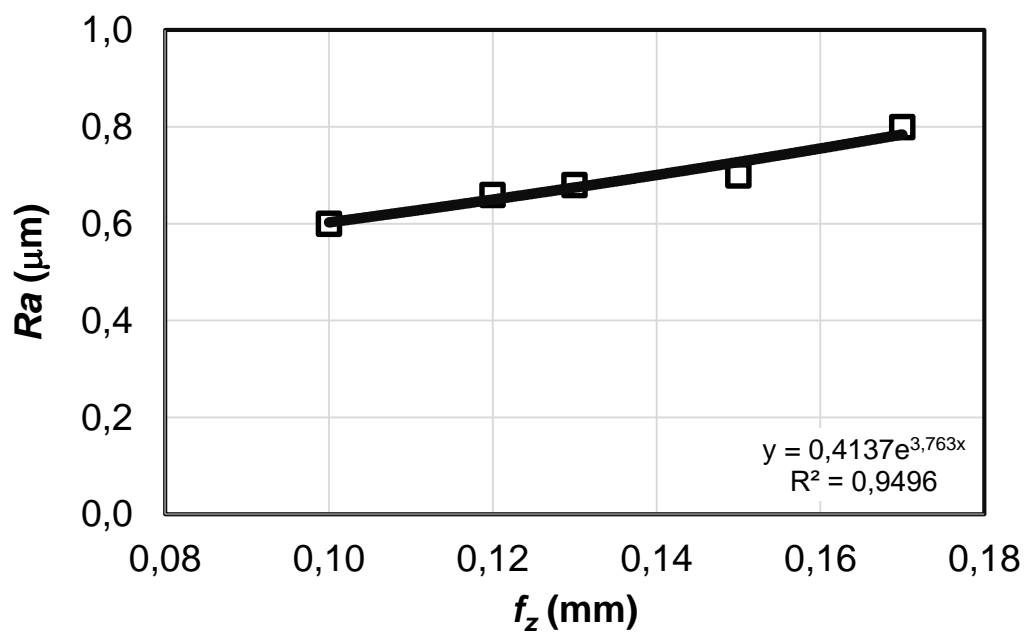
Obr. 3.3: Vliv změny radiální hloubky řezu a_e na parametr drsnosti Ra (podmínky: $D = 12 \text{ mm}$, $f_z = 0,1 \text{ mm}$, pozitivní geom., mělká plocha, $S = 530 \text{ mm}^2$)

Lze stanovit, že se vzrůstajícím posuvem na zub f_z se parametr drsnosti Ra (Obr. 3.5) exponenciálně zvětšuje, pozorujeme zhoršení jakosti povrchu, nicméně se obrábí rychleji a strojní čas T klesá (Obr. 3.6). Je nutné poznamenat, že vliv parametru f_z není srovnatelně výrazný jako v předchozím případě, povšimneme-li si, že změna Ra je jen v úzkém intervalu hodnot. Přesto právě z důvodů úspory času při obrábění se volí vyšší posuvy se zachováním tolerované jakosti povrchu.

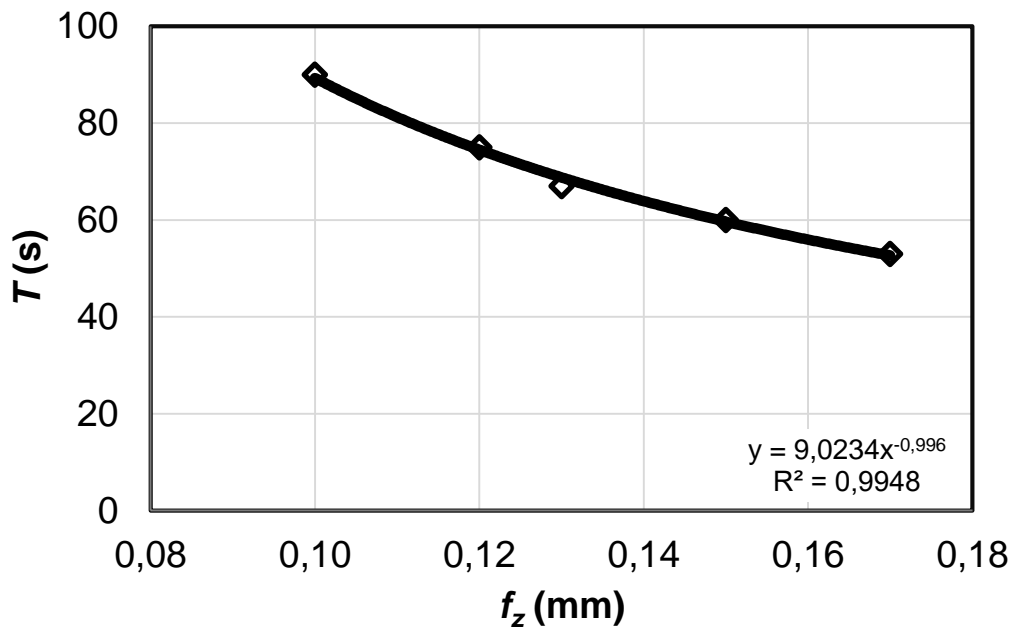
Řezná rychlost nástroje je hlavním řezným parametrem a hlavní složkou celkové rychlosti. Je patrná nevýrazná změna jakosti povrchu se změnou řezné rychlosti, jak nejlépe demonstruje měření parametru Ra (Obr. 3.7). Nedoporučuji věnovat pozornost parametru řezné rychlosti v_c i z důvodů regulace otáček a vyplývajícího požadavku okamžité změny při procesu frézování, což je obtížně realizovatelné.



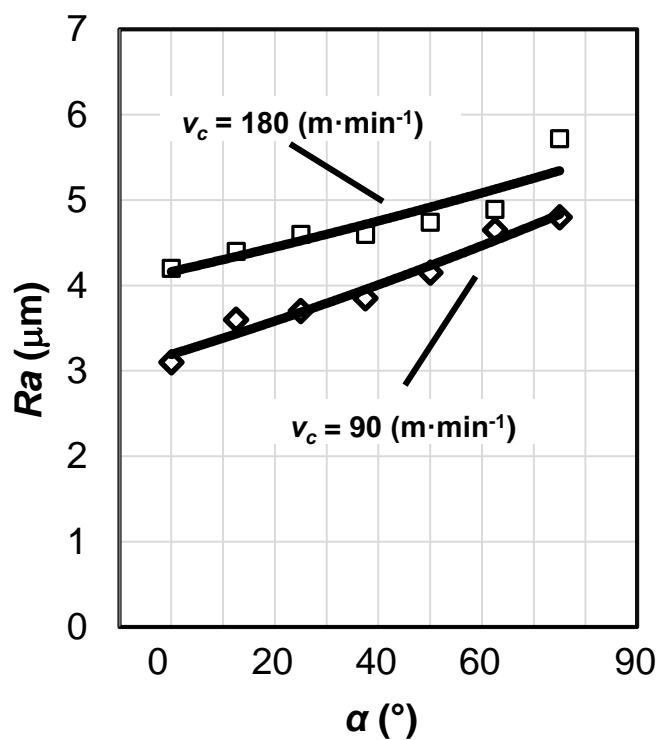
Obr. 3.4: Vliv změny radiální hloubky řezu a_e na strojní čas T
 (podmínky: $D = 12$ mm, $f_z = 0,1$ mm, pozitivní geom., mělká plocha, $S = 530$ mm²)



Obr. 3.5: Vliv změny posuvu na zub f_z na parametr drsnosti R_a
 (podmínky: $D = 12$ mm, $a_e = 0,16$ mm, pozitivní geom., mělká plocha, $S = 530$ mm²)

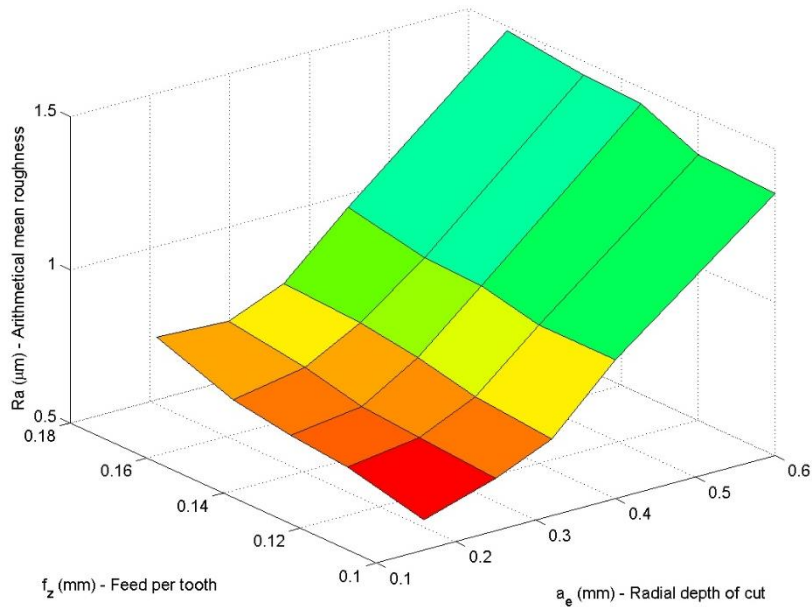


Obr. 3.6: Vliv změny posuvu na zub f_z na strojní čas T
 (podmínky: $D = 12$ mm, $a_e = 0,16$ mm, pozitivní geom., mělká plocha, $S = 530$ mm²)

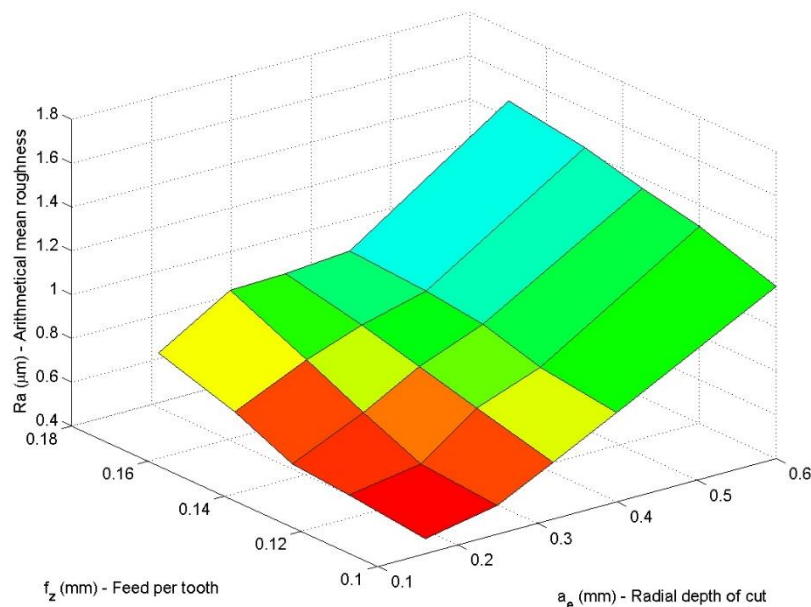


Obr. 3.7: Vliv řezné rychlosti a sklonu plochy α na parametr drsnosti Ra [68]
 (AW 7022, $D = 5$ mm, $a_e = 10\% \cdot D$, $v_f = 2000$ mm/min)

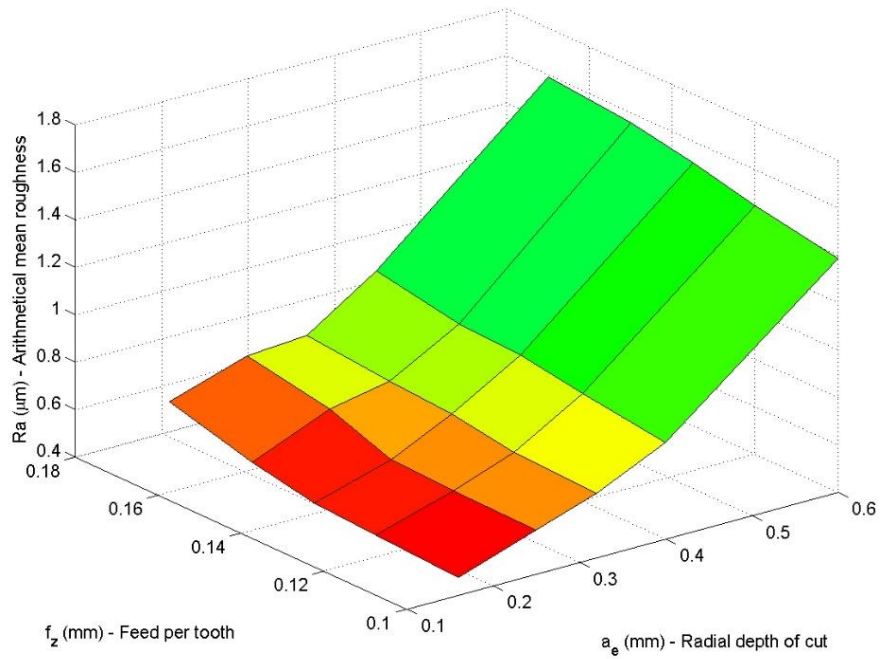
Vyloučením parametru řezné rychlosti umožní výsledky významných parametrů graficky zpracovat do prostorových grafů (Obr. 3.8 - Obr. 3.11). Jakost povrchu R_a se zhoršuje při stejných podmínkách na strmých plochách od 30° výše, což může být dáno nestabilitou procesu obrábění, vibracemi a deformací nástroje vlivem změny působícího vektoru řezných odporů.



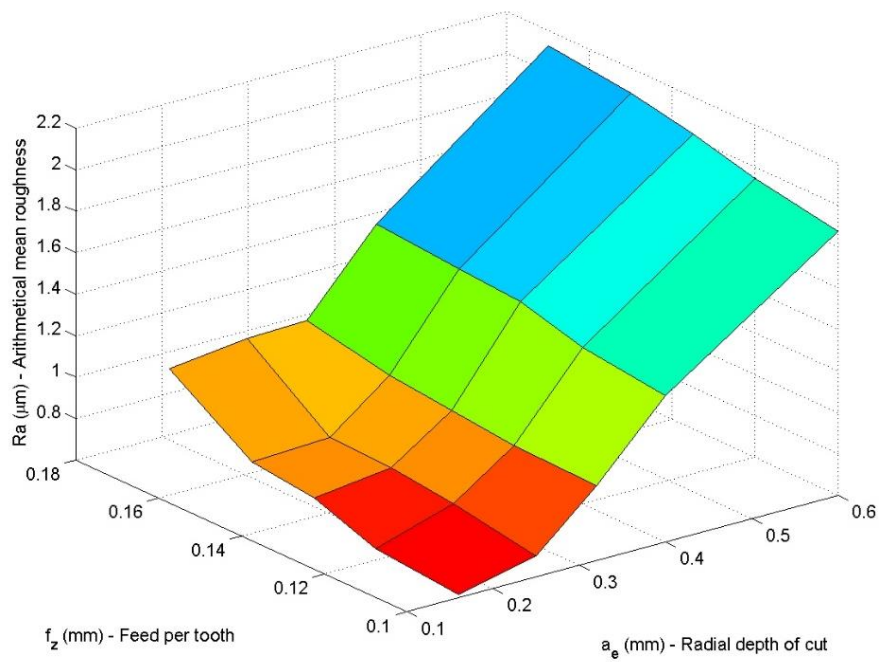
Obr. 3.8: Vliv řezných parametrů f_z , a_e na jakost povrchu R_a (mělké plochy, pozitivní geom.)



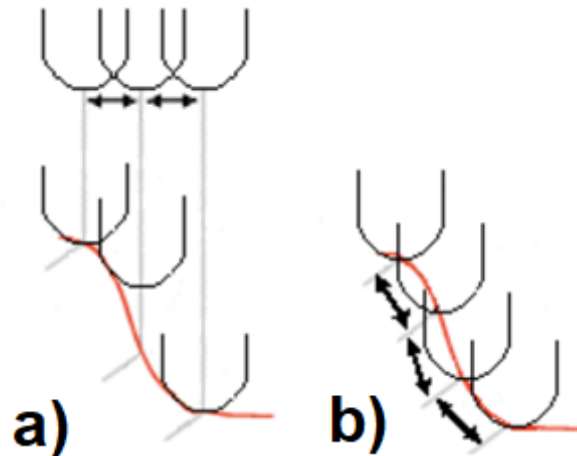
Obr. 3.9: Vliv řezných parametrů f_z , a_e na jakost povrchu R_a (strmé plochy, pozitivní geom.)



Obr. 3.10: Vliv řezných parametrů f_z , a_e na jakost povrchu R_a (mělké plochy, negativní geom.)



Obr. 3.11: Vliv řezných parametrů f_z , a_e na jakost povrchu R_a (strmé plochy, negativní geom.)



Obr. 3.12: Konstantní šířka záběru (a) a adaptivní šířka záběru (b) při obrábění ploch s proměnlivým sklonem [93]

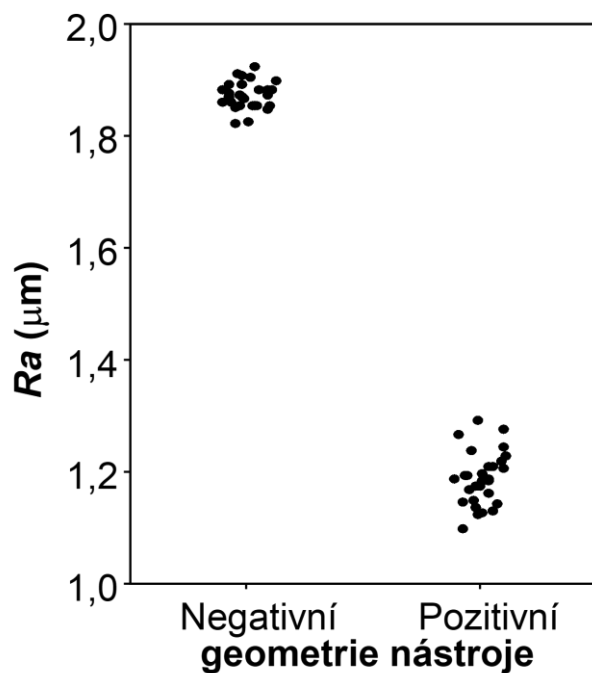
Pokrokem při CNC programování výroby tvarově komplexních součástí je možnost definování radiální hloubky řezu adaptivně vzhledem ke sklonu obráběné plochy (Obr. 3.12). V CAM systémech je označována jako maximální výška nerovností – Scallop Height [58] a koreluje s největší výškou základního profilu P_z po frézování kulovou frézou a rovněž s parametrem drsnosti R_z . Uplatňuje se všude tam, kde jsou obráběny plochy s výraznou změnou strmosti. Programátor zadává požadovanou velikost nerovností po obrábění a software generuje dráhu nástroje tak, že přizpůsobuje šířku záběru sklonu obráběné plochy.

3.2 VLIV ŘEZNÉHO NÁSTROJE

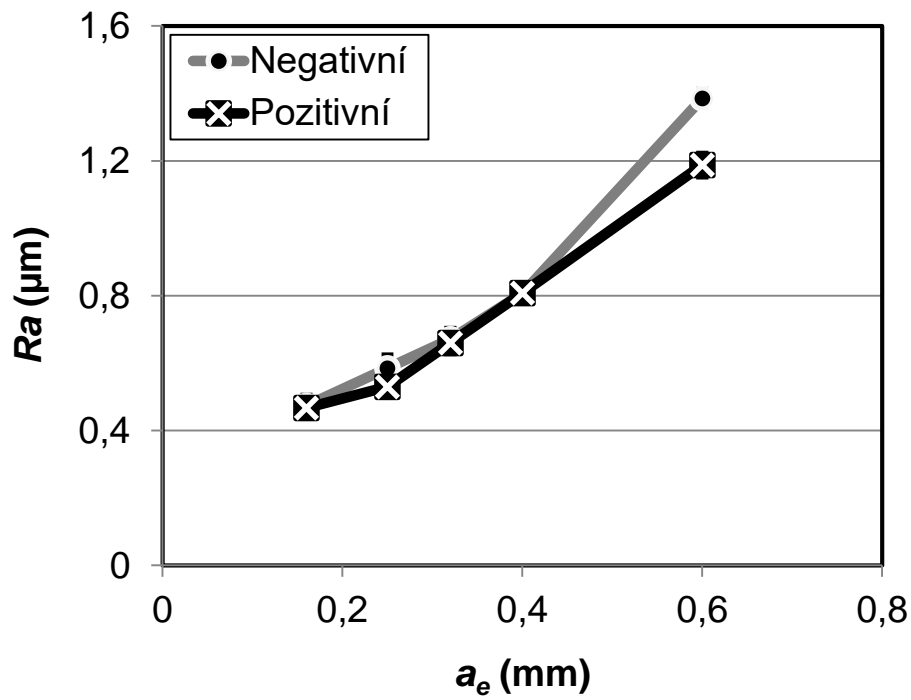
Analýza dat nedává jednoznačnou odpověď v případě hodnocení vlivu geometrie nástroje na jakost povrchu. Z Obr. 3.13 je patrný rozdíl v jakosti povrchu v případě frézování nástrojem s negativním a pozitivním úhlem čela γ (nástroj je schematicky uveden na Obr. 3.2). Rozdíl v hodnotách R_a je větší než 50 %, proto nelze nástroje zaměňovat anebo sloučit hodnoty měření. Tento vliv je možné pozorovat při frézování s extrémnějšími řeznými podmínkami, v případě $a_e > 0,4$ mm anebo $f_z > 0,15$ mm; vliv je nevýznamný při hodnotách pod těmito úrovněmi.

Trend průběhu jakosti povrchu R_a v závislosti na a_e nebo f_z (Obr. 3.14 - Obr. 3.15) je srovnatelný. Pozitivní geometrie nástroje lépe materiál odděluje, je větší mezizubová mezera a tříska může lépe odcházet z místa řezu, oddělený materiál nemá tendenci se hromadit. Výsledkem je lepší jakost povrchu. Volba nástroje s negativní geometrií může při zvýšených řezných podmínkách naopak vést ke zhoršení jakosti povrchu. Výhodou je břit s větší tuhostí, jež je příčinou zvýšené

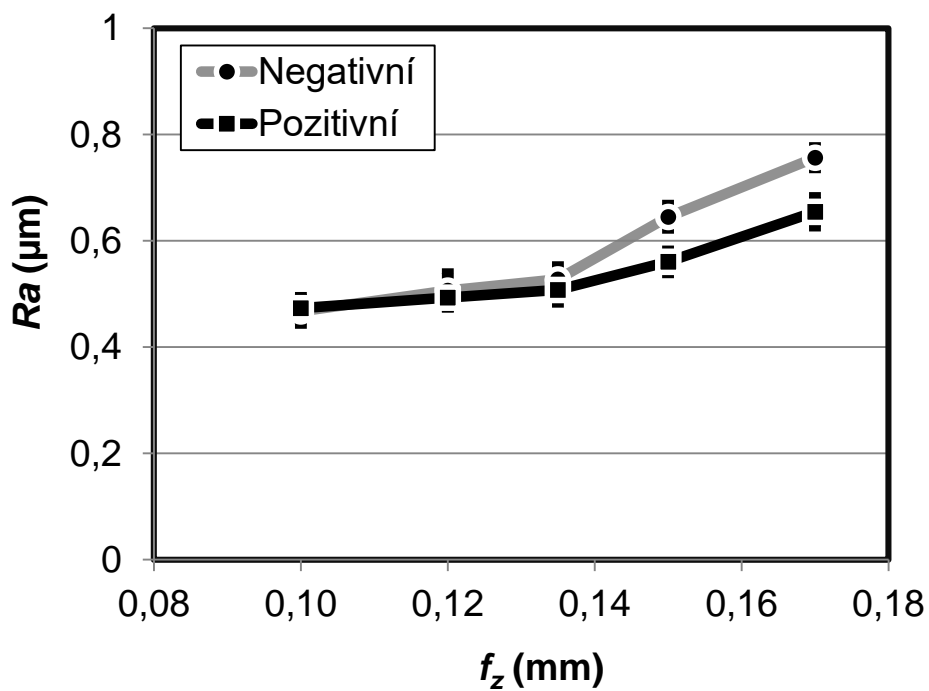
trvanlivosti nástroje, a proto lze nástroje s negativní geometrií doporučit pro operace hrubovací a dohrubovací.



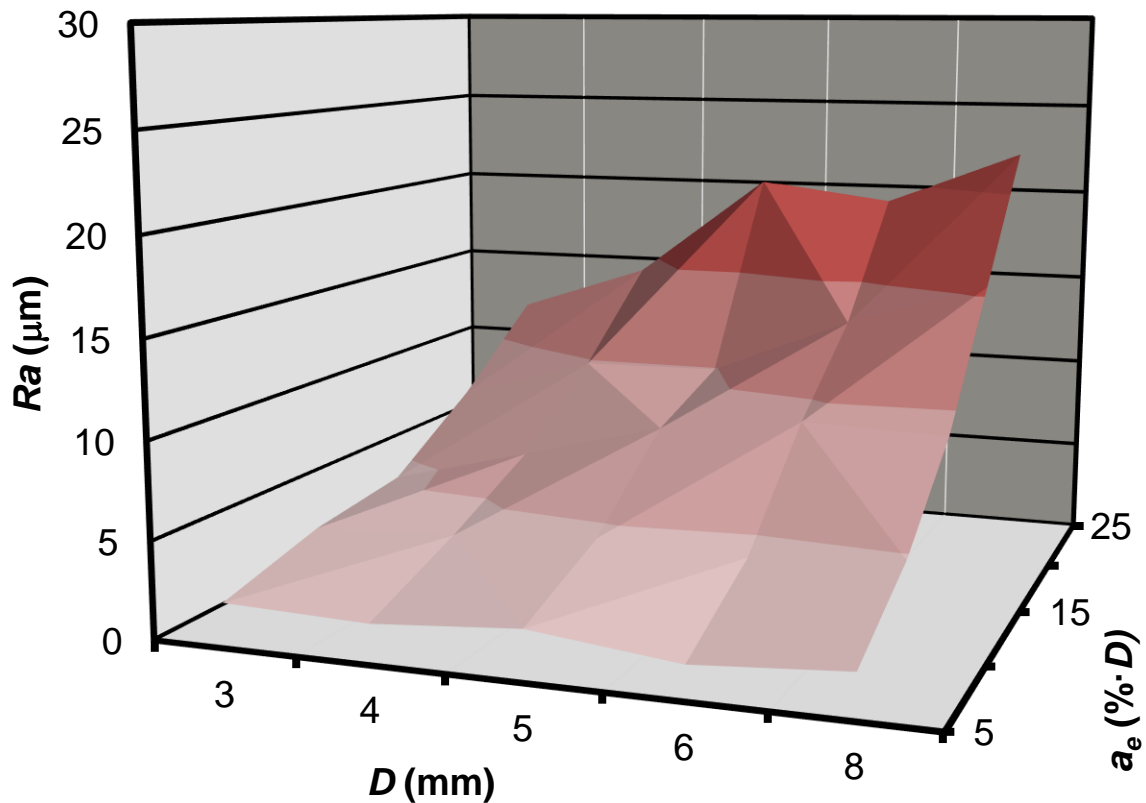
Obr. 3.13: Individuální Ra měření po frézování nástrojem s negativní a pozitivní geometrií ($a_e = 0,6 \text{ mm}$, $f_z = 0,1 \text{ mm}$, strmé plochy)



Obr. 3.14: Vliv radiální hloubky řezu a_e na Ra pro pozitivní a negativní geometrii ($f_z = 0,1$ mm, strmé plochy)

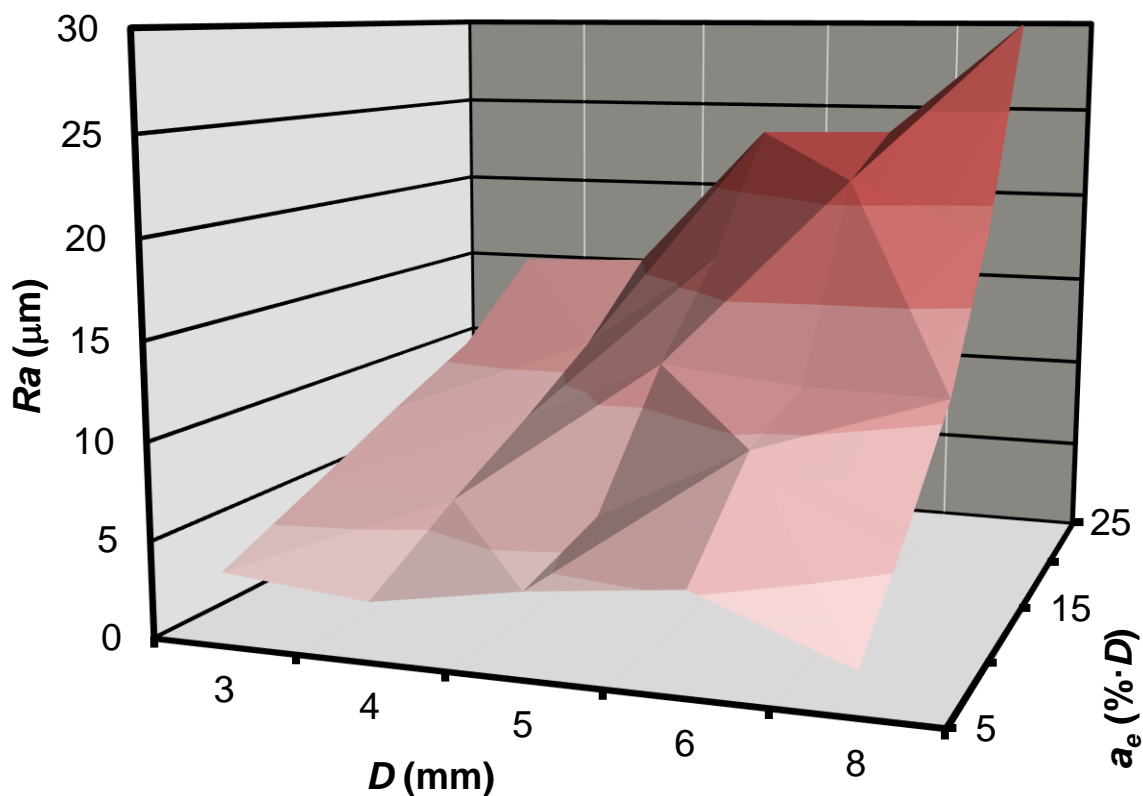


Obr. 3.15: Vliv posuvu na zub f_z na Ra pro pozitivní a negativní geometrii ($a_e = 0,16$ mm, strmé plochy)



Obr. 3.16: Vliv technologických parametrů na Ra pro mělké plochy (AW 7022)

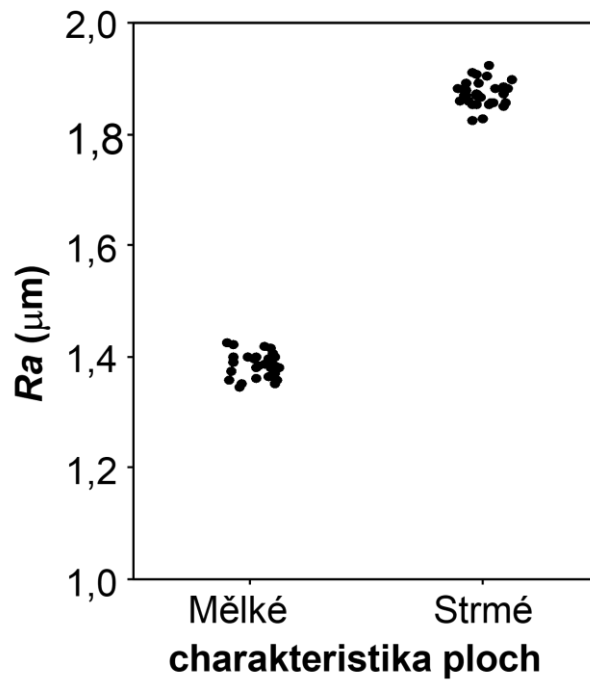
Jestliže je skloněná plocha obráběna kulovou frézou s rozdílným průměrem, lze z grafických zpracování dat usoudit, že při nízkých řezných podmínkách volba průměru nemá významný vliv na jakost povrchu. V prostorových grafech pro strmé a mělké plochy (Obr. 3.16 - Obr. 3.17) je radiální hloubka řezu definována pro účely porovnání procentem průměru nástroje. Platí tedy: $a_e = \% \cdot \text{Ø}D$, kde procentuální hodnota určuje velikost výseče záběru nástroje v radiální rovině. Doporučuje se volit při obrábění skloněných a tvarových ploch s malou šířkou záběru větší průměr kulové frézy, jež dovolí obrábět stejnou plochu se stejným jakostním výsledkem nicméně s nižším strojním časem. Významnější vliv má průměr nástroje při obrábění s radiální hloubkou řezu větší než $20 \% \cdot D$; při volbě větších průměrů nástroje proces obrábění kulovou frézou přestává být dokončovacím procesem obrábění.



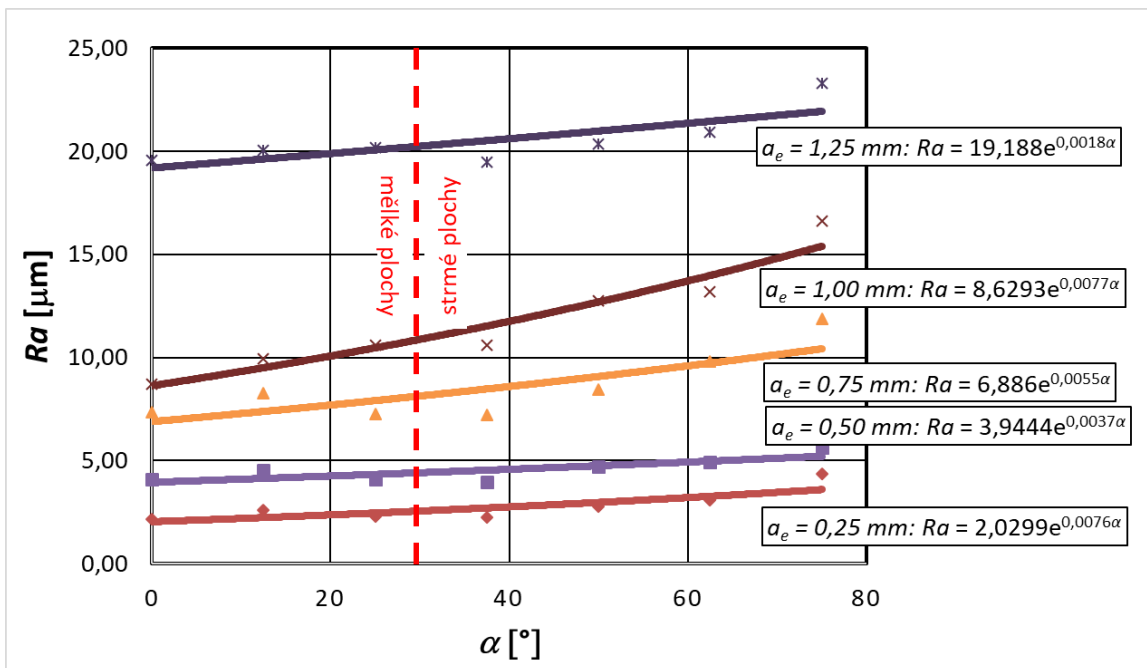
Obr. 3.17: Vliv technologických parametrů na Ra pro strmé plochy (AW 7022)

3.3 VLIV SKLONU PLOCHY

Z předchozích grafů (Obr. 3.8 - Obr. 3.11) je patrné, že při frézování ploch kulovým nástrojem s mírným sklonem, označované jako mělké, se dosahuje za stejných technologických podmínek lepší jakosti povrchu než v případě ploch s větší strmostí. Markantní rozdíly jsou podobně jako v předchozích případech, kdy jsou nastaveny zvýšené řezné podmínky, jak demonstruje graf na Obr. 3.18. Trend chování v závislosti na úhlu sklonu plochy je exponenciální (Obr. 3.19), avšak v oblasti 0° - 90° jen mírně rostoucí. Roli hraje změna působících vektorů řezných odporů při změně úhlu sklonu, malá tuhost nástroje v bočních směrech, vibrace a další dynamické jevy obrábění. Tyto výsledky však nepřikládám k tomuto výzkumu, jsou předmětem mých jiných odborných příspěvků, například studie tuhosti stopkových frézy [28].



Obr. 3.18: Individuální Ra měření po frézování mělkých a strmých ploch ($a_e = 0,6 \text{ mm}$, $f_z = 0,1 \text{ mm}$, negativní geom.)



Obr. 3.19: Vliv sklonu plochy α a radiální hloubky řezu na drsnost Ra (AW 7022, $D = 5 \text{ mm}$)

3.4 VÝSLEDKY ANALYTICKÉHO ROZBORU

Analytický rozbor dat je silným nástrojem a byl využit pro základní analýzu vlivu a trendu chování na výslednou jakost povrchu při frézování kulovým nástrojem, tak jak uvádím v předchozích kapitolách. Identifikován byl významný vliv řezných parametrů a_e, f_z , což potvrzuje literatura; menší vliv je u parametrů D a α . Experimenty byly prováděny na dvou materiálech (1.2379 a AW 7022) s rozdílnou obrobiteľnosťou, naproti tomu se stejným trendem chování. Variabilita naměřených dat činila maximálně 6,21 %.

Rozbor navazuje a pokračuje v dalších kapitolách modelováním jakosti povrchu za pomoci pokročilých metod zpracování dat a optimalizace s využitím metody plánovaného experimentu, vícerozměrné statistiky a aplikací umělých neuronových sítí na získaná data měření.

4 MODELOVÁNÍ POMOCÍ PLÁNOVANÉHO EXPERIMENTU

Obecně se metody plánování experimentu „Design of Experiments“ (DOE) využívají k získání informací o procesu na základě navrženého experimentu. Pro stanovení parametrů procesu se nemusí proměřovat všechny možné kombinace možností, což šetří čas i prostředky při experimentech. Na druhou stranu vyžaduje zvýšené požadavky na přesnost při stanovování výstupních parametrů s minimálním rozptylem.

Vzhledem k uvedeným skutečnostem je provedeno vyhodnocení dat při frézování skloněných ploch. DOE umožňuje analyzovat více vstupních parametrů v jednom cyklu. Proto jsou vstupními veličinami vedle sklonu plochy α , radiální hloubky řezu a , posuvové rychlosti v_f , ale také i délka vysunutí nástroje l nad/pod doporučenou úroveň kleštiny. Zahrnutí tohoto parametru může dát odpověď, jak významně ovlivňuje upnutí a délka nástroje výslednou jakost povrchu. Měřenými parametry povrchové drsnosti je parametr Ra , Rz a Rmr , kromě těchto parametrů je pomocí dynamometrického měření sledována velikost složek řezných sil, zde označovanou je $F3$ řezná složka, $F2$ posuvová složka a $F1$ pasivní složka.

Pro daný počet pěti vstupních faktorů je využito speciální metody ortogonálního pole o velikosti 4^2 , kde každý parametr obsahoval čtyři hladiny, tak jak je možno vidět v následující tabulce (Tabulka 4.1).

Tabulka 4.1 Vstupní faktory a hladiny experimentu

Vstupní faktory		Hladina 1	Hladina 2	Hladina 3	Hladina 4
Symbol	Význam (jednotka)				
l	Vysunutí nástroje (mm)	-2	0	2	5
a	Radiální hloubka řezu ($\% \times \varnothing D$)	2	5	10	15
D	Průměr nástroje (mm)	3	5	6	8
α	Sklon plochy ($^\circ$)	5	10	15	25
v_f	Posuvová rychlost (mm/min)	1600	1700	1900	2000

Parametry drsnosti Ra , Rz a Rmr jsou měřeny podle normy ISO 4287 [38] a ISO 4288 [39] ve směru největší drsnosti ve směru kolmém na vektor posuvové rychlosti. Měření jsou prováděna opakovaně, statisticky vyhodnocena a

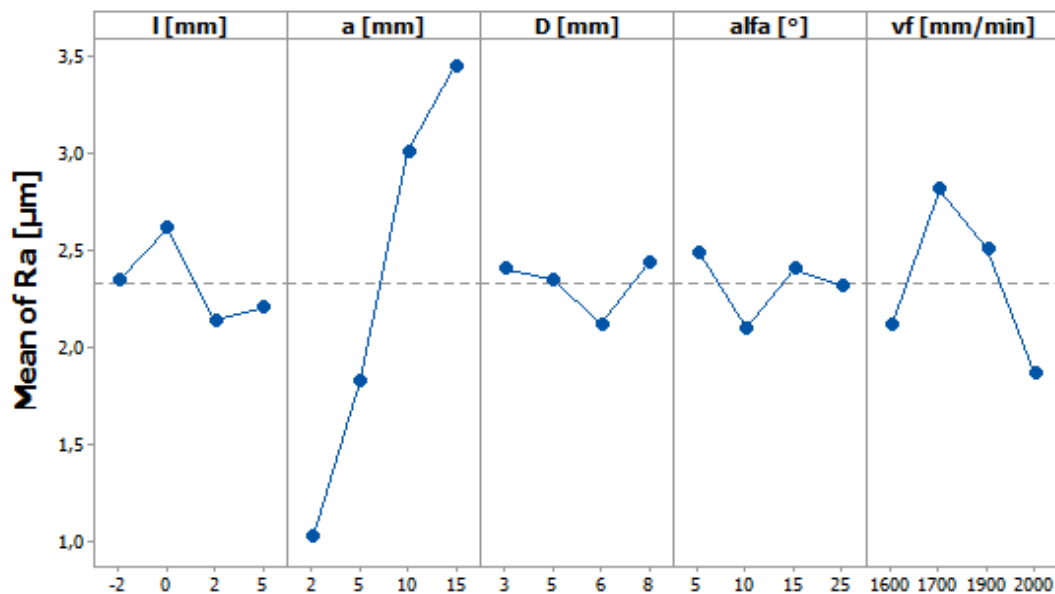
kvantifikováno je variační rozpětí, které v žádném z měření nepřesahuje 10 %. Data jsou podobným způsobem statisticky zpracována i při měření složek řezných sil pomocí tenzometrického dynamometru s převodníkem Spider 8 a počítačovým softwarem Connes Spider se zapisovací frekvencí 50 Hz. Takto získané údaje jsou následně zavedeny do Taguchiho pole a zpracovány v programu Minitab 17 (Tabulka 4.2).

Tabulka 4.2 Plán experimentu a výsledky v Taguchiho poli L16 (4²)

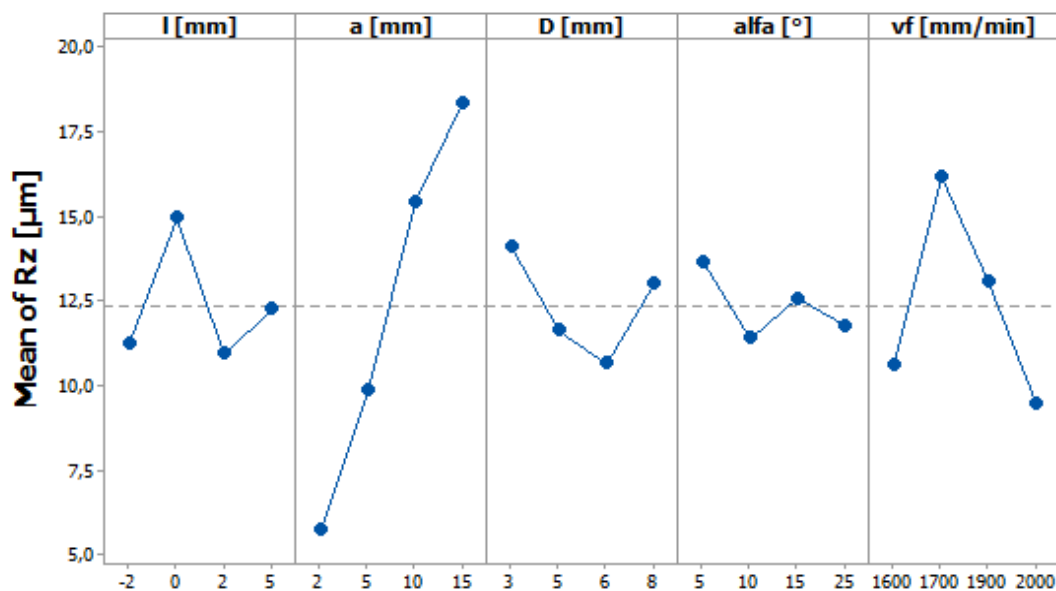
<i>l</i>	<i>a</i>	<i>D</i>	<i>α</i>	<i>v_f</i>	<i>F1</i>	<i>F2</i>	<i>F3</i>	<i>Ra</i>	<i>Rz</i>	<i>Rmr</i>
(mm)	(%· <i>D</i>)	(mm)	(°)	(mm/min)	(N)	(N)	(N)	(mm)	(mm)	(%)
-2	2	3	5	1600	1,18	1,52	2,88	1,07	5,96	42,29
-2	5	5	10	1700	1,05	4,80	13,78	2,13	10,90	31,08
-2	10	6	15	1900	5,91	13,28	23,93	3,08	13,55	25,32
-2	15	8	25	2000	24,22	14,93	38,56	3,11	14,48	12,82
0	2	5	15	2000	0,95	2,71	8,49	0,95	4,99	44,30
0	5	3	25	1900	1,54	4,27	10,99	2,37	14,34	22,60
0	10	8	5	1700	1,79	15,99	30,58	4,05	23,83	19,70
0	15	6	10	1600	4,08	14,52	25,35	3,09	16,58	41,88
2	2	6	25	1700	4,84	4,34	14,15	1,10	5,88	44,75
2	5	8	15	1600	4,06	10,14	20,15	1,62	7,56	28,81
2	10	3	10	2000	0,91	6,38	15,27	2,21	11,94	44,11
2	15	5	5	1900	1,35	8,86	13,28	3,63	18,26	19,22
5	2	8	10	1900	0,90	4,28	15,17	0,96	6,04	26,00
5	5	6	5	2000	3,24	9,72	12,82	1,20	6,48	45,73
5	10	5	25	1600	4,26	3,29	5,72	2,69	12,32	26,40
5	15	3	15	1700	1,31	5,35	9,65	3,97	24,05	28,00

Průměrné hodnoty citlivosti signálu k šumu pěti vstupních parametrů pro různé hladiny jsou uváděny v grafech na Obr. 4.1 pro parametr *Ra*, Obr. 4.2 pro povrchovou drsnost *Rz* a pro materiálový podíl drsnosti *Rmr* na Obr. 4.3. Bezpochyby nejsilnější efekt na všechny sledované výstupní parametry drsnosti má radiální hloubka řezu *a*. Se vzrůstající radiální hloubkou řezu se významně zvyšuje parametr *Ra* a *Rz*, naopak hodnota materiálového podílu *Rmr* výrazně klesá. Ostatní vstupní parametry vykazují kolísavé chování, pro *Ra* se parametry *l*, *a* a *D* nacházejí v úzkém pásmu rozptylu kolem střední hodnoty. Podobně se chovají tyto parametry i v případě *Rz* avšak s větším rozptylem, což je dáno závislostí parametru na *Ra*. Chování hlavních efektů pro *Rmr* vykazuje odlišné chování od sledovaných parametrů *Ra*, *Rz* vzhledem k tomu, že jde o procentuální podíl zastoupení výškových změn povrchu. Posuvová rychlost pro všechny

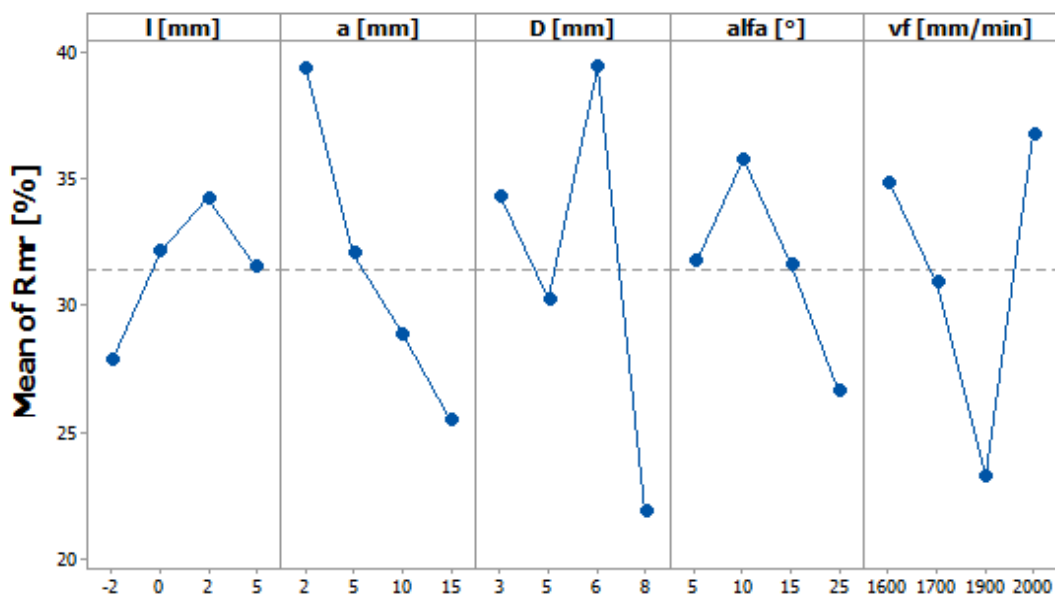
parametry drsnosti má taktéž funkční závislost, až na výjimky lze říci, že se vzrůstající posuvovou rychlostí klesají parametry sledovaných drsností. V uváděných grafech na obrázcích níže lze poprvé pozorovat zřejmou nepravidelnost chování, které je odlišné od teoretického předpokladu, nicméně vzhledem k rozptýlu hodnot ji lze považovat za nevýznamnou.



Obr. 4.1: Průběh hlavních účinků vstupních parametrů pro Ra

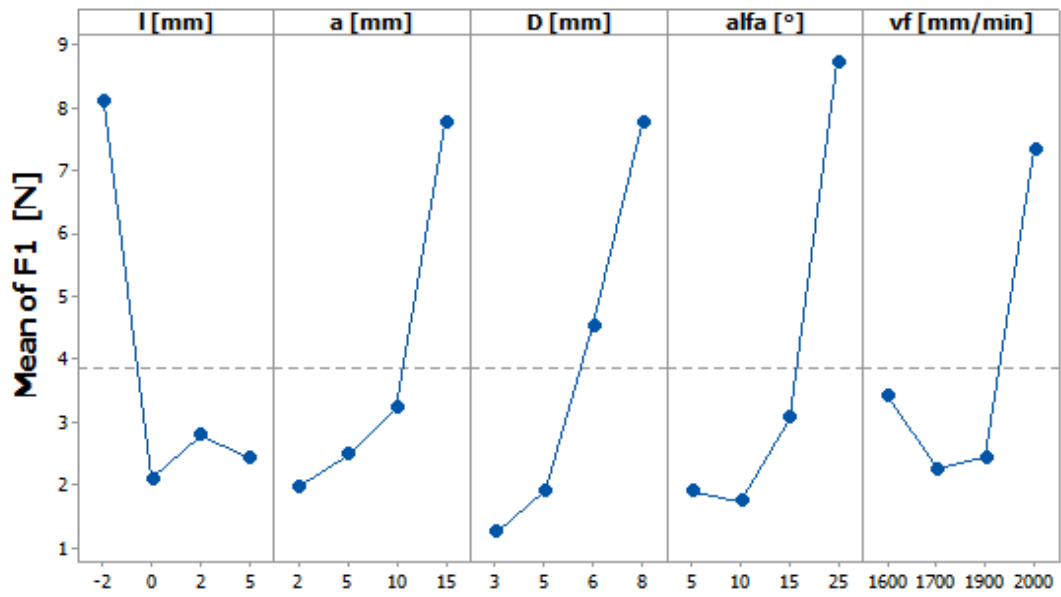


Obr. 4.2 Průběh hlavních účinků vstupních parametrů pro Rz

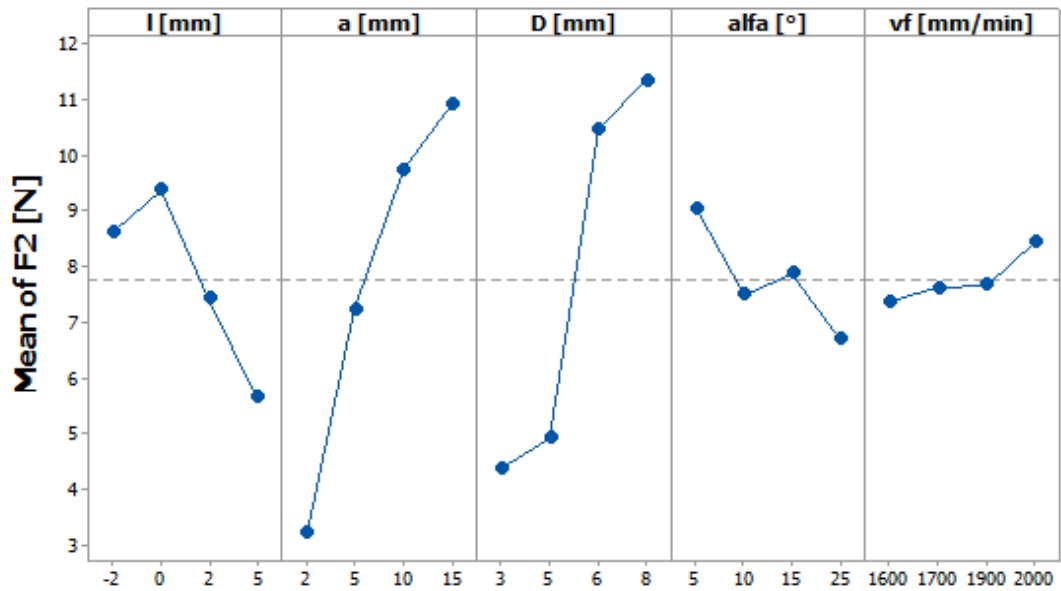


Obr. 4.3: Průběh hlavních účinků vstupních parametrů pro Rmr

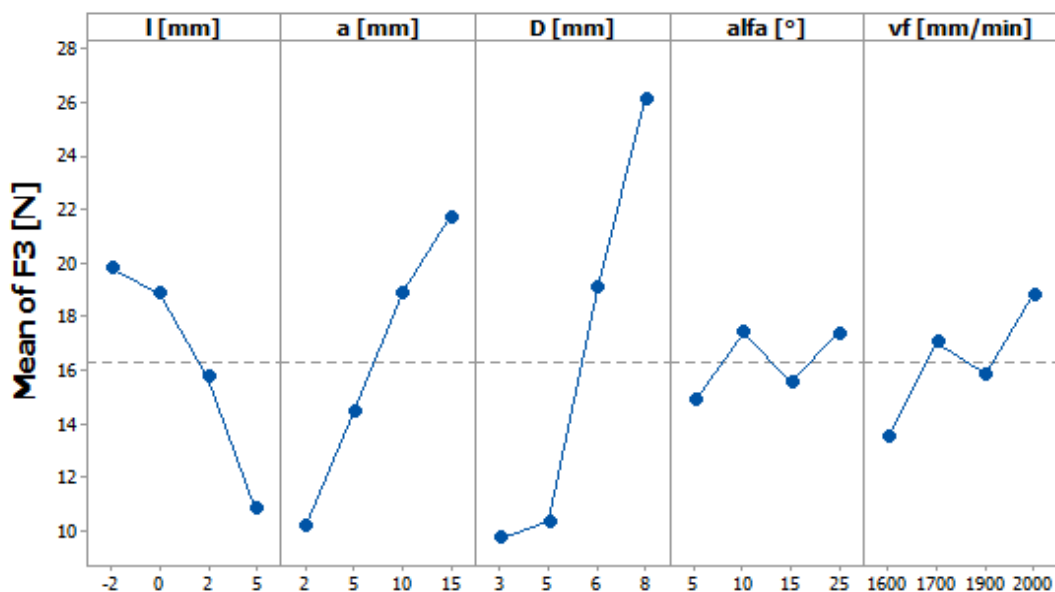
Podle průběhů v grafech na Obr. 4.4 až Obr. 4.6 se složky řezných sil až na výjimky shodují s praxí, kde celková řezná síla a její složky stoupají se zvyšováním posuvové rychlosti a se vzrůstající hloubkou řezu. Anomálií je chování pasivní složky F_1 , pro hodnoty posuvu 1700 a 1900 mm/min. Křivka chování zaznamenává v tomto rozsahu pokles, přesto při 2000 mm/min je trend opět vzrůstající. Pokles v daném rozsahu je přisuzován samotnému měření a vyhodnocení průměrné hodnoty řezných sil. Hodnota byla odečtena jako střední hodnota z periodického průběhu ve chvíli, kdy nástroj byl v řezu. Ve všech případech byl zanedbán účinek vstupu nástroje do materiálu a také krajní oblast, kdy nástroj vyjíždí z obráběného materiálu. Jde o hodnotu v řádech jednotek newtonů, což se blíží hranici rozlišitelnosti měřicího systému. Stejně tak si lze povšimnout, že samotný rozdíl mezi výsledky měření pro F_1 je v řádech desetin až jednotek N.



Obr. 4.4: Průběh hlavních účinků vstupních parametrů na složku řezné síly F1



Obr. 4.5 Průběh hlavních účinků vstupních parametrů na složku řezné síly F2



Obr. 4.6: Průběh hlavních účinků vstupních parametrů na složku řezné síly F_3

4.1 HLAVNÍ A VEDLEJŠÍ ÚČINKY

Na základě experimentů a jejich hodnot transformovaných na poměr signál-šum jsou určeny hlavní účinky (Tabulka 4.3) a pořadí jejich významnosti podle faktorů.

Tabulka 4.3 Pořadí účinků podle faktoru

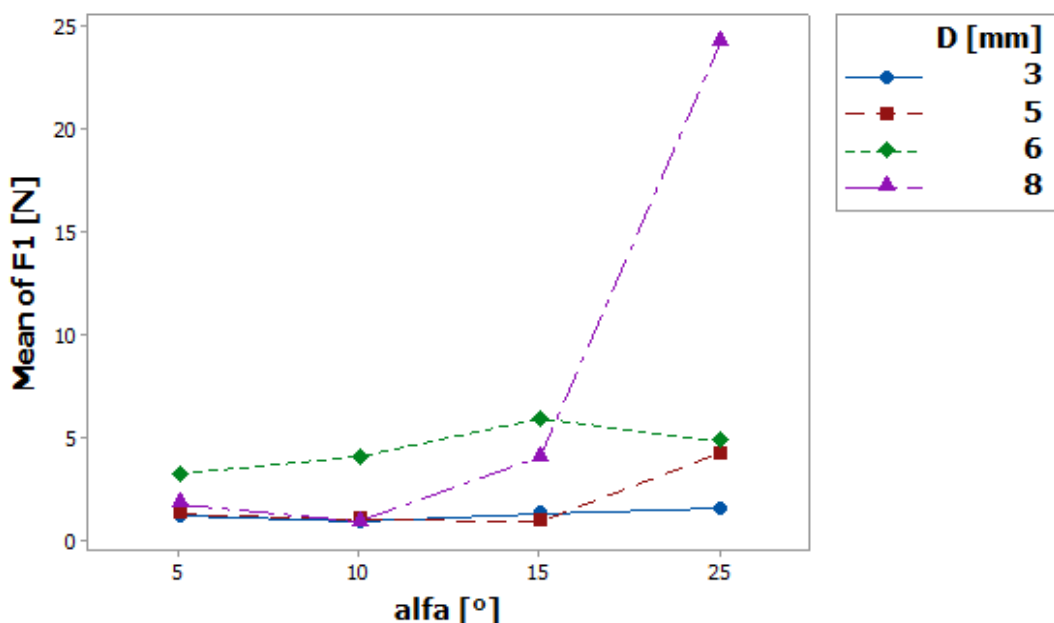
Úroveň	1	2	3	4	5
F_1	α	D	l	a	v_f
F_2	a	D	l	v_f	α
F_3	D	a	v_f	l	α
R_a	a	v_f	l	D	α
R_z	a	v_f	l	D	α
R_{mr}	D	a	v_f	α	l

Složky sil jsou podle prvních dvou úrovní ovlivňovány především volbou nástroje a jeho průměrem D , radiální hloubkou řezu a anebo úhlem sklonu obráběné plochy α . Mění se pořadí významnosti, přesto lze výstup přijmout bez podstatných výhrad. Hlavní řezná složka F_3 je největší složkou celkové výslednice sil a její velikost ovlivňuje průměr nástroje D , nejmenší vliv má naopak sklon obráběné plochy α , což je přisuzováno tomu, že jde o frézování

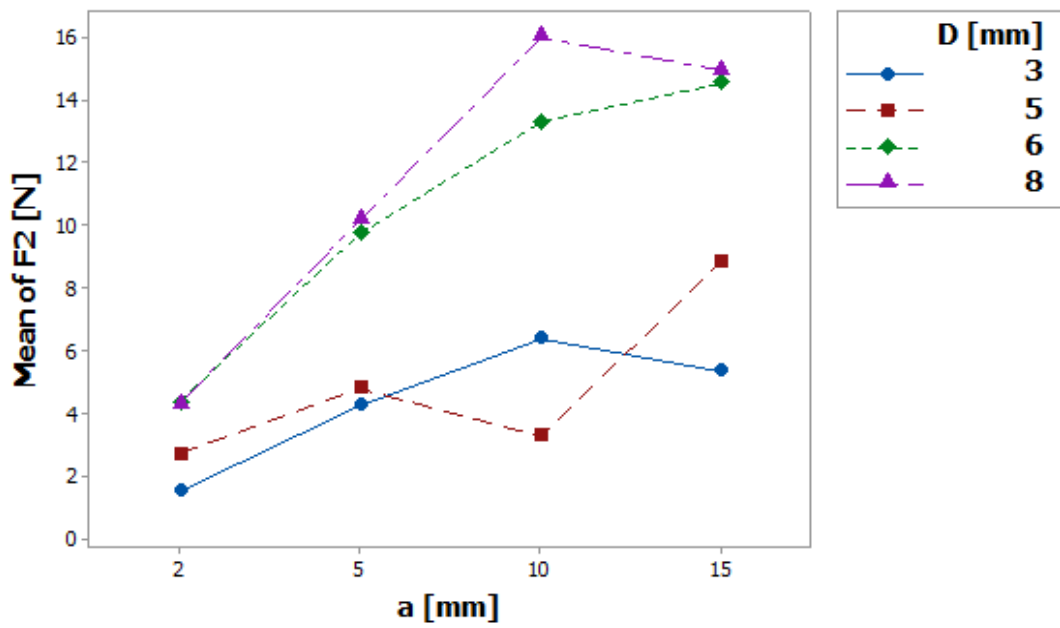
načisto, kde průřez třísky se změnou sklonu se výrazně nemění. Posuvová složka F_2 je ovlivněna především velikostí třísky a , a též jako u předchozí složky F_3 nehraje významnou roli sklon plochy α . Na druhou stranu velikost pasivní složky síly F_1 ovlivňuje geometrie, v tomto případě jde parametr sklonu plochy α - řezné podmínky mají vliv nejmenší a posuvová složka tvoří zanedbatelný příspěvek k celkové hodnotě F_1 .

Výškové parametry drsnosti R_a , R_z jsou vzájemně závislé parametry, které se určují ze stejného profilu drsnosti. Proto mají i stejné pořadí významnosti, které je možné pozorovat v tabulce (Tabulka 4.3). Materiálový podíl R_{mr} je významně ovlivněn nástrojem (průměr frézy D) a šířkou záběru a . Jde primárně o proměnné, které mají vliv na frekvenční charakteristiky profilu drsnosti, a dá se říci, že určitým způsobem mají vliv na míru pravidelnosti pohybu při obrábění a tvorbu nového povrchu. Experiment odhalil, že vysunutí nástroje a s ním spojená tuhost nástroje nemá významný vliv na nosný podíl povrchu.

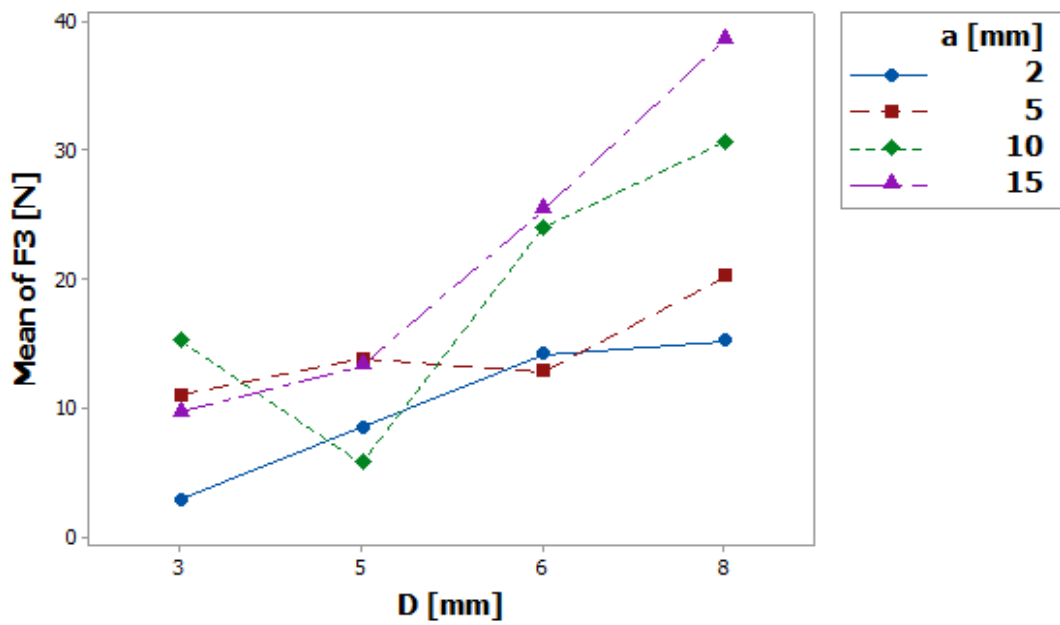
Níže jsou dány do grafické souvislosti dva nejvýznamnější účinky na daný faktor (Obr. 4.7 - Obr. 4.12). Umožněno je zkoumání neočekávaného chování hlavních účinků, které je v globálním pohledu uvedeno výše.



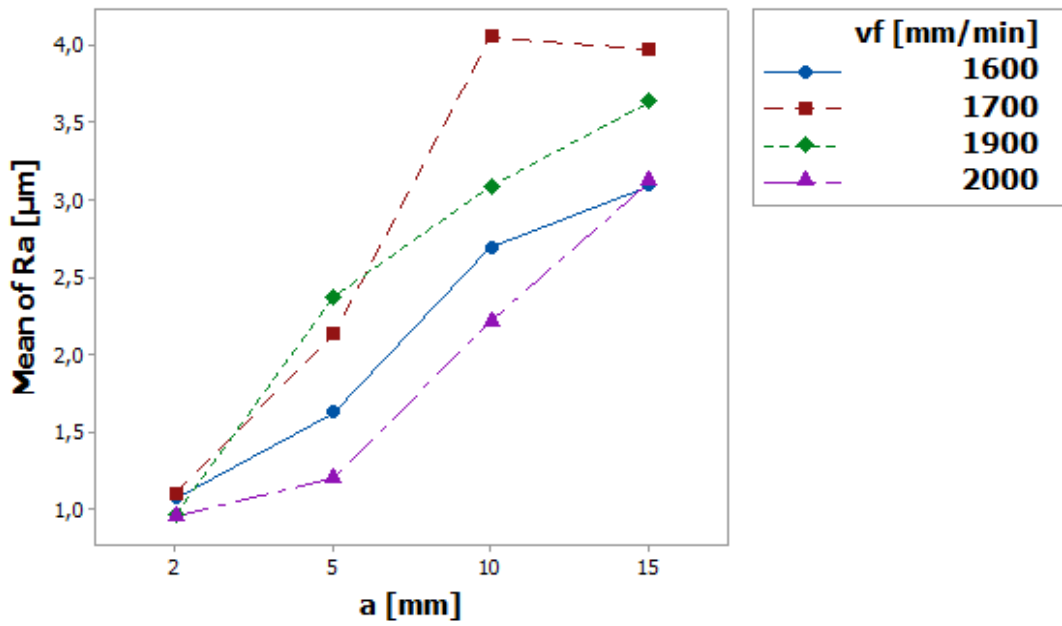
Obr. 4.7: Průběh F_1 v závislosti na sklonu α a průměru nástroje D



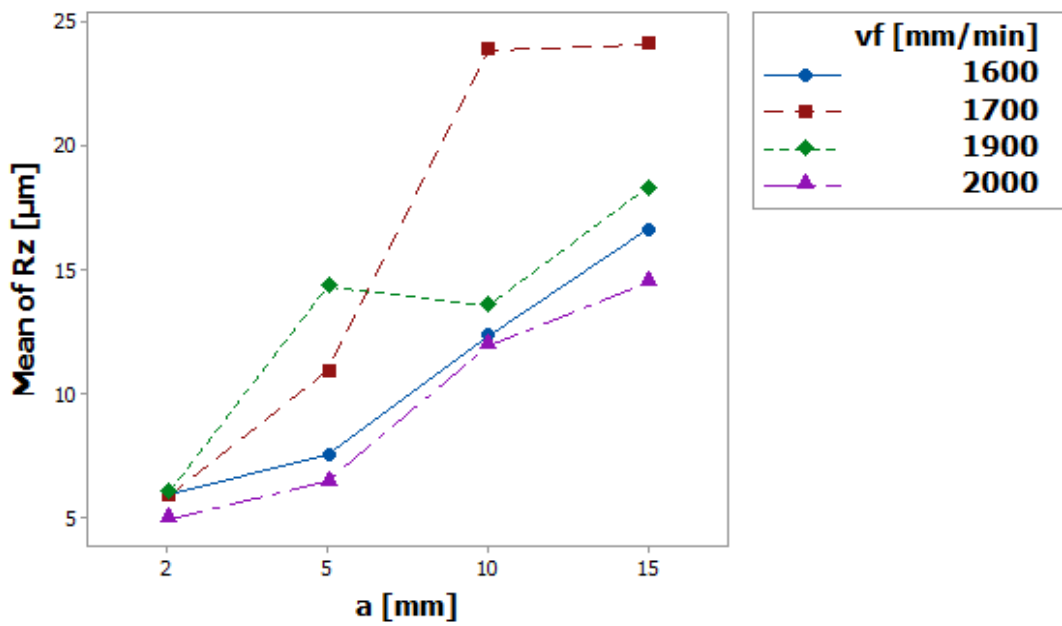
Obr. 4.8: Průběh F2 v závislosti na radiální hloubce a a průměru nástroje D



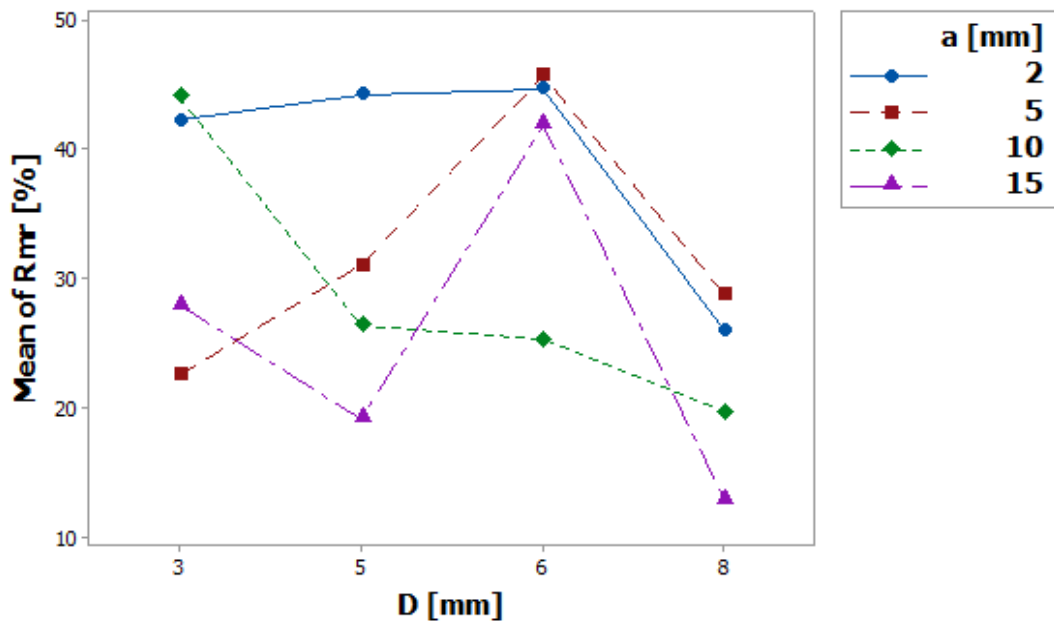
Obr. 4.9: Průběh F3 v závislosti na průměru nástroje D a radiální hloubce a



Obr. 4.10: Průběh Ra v závislosti na radiální hloubce a a posuvové rychlosti v_f



Obr. 4.11 Průběh Rz v závislosti na radiální hloubce a a posuvové rychlosti v_f



Obr. 4.12: Průběh R_{mr} v závislosti na průměru nástroje D a radiální hloubce a

Jestliže je naše pozornost zaměřena na odhalení odlišností v jednotlivých průbězích, může nás zaujmout extrém v chování $F1$ na Obr. 4.7 u nástroje $D = 8$ mm a při sklonu plochy $\alpha = 25^\circ$, kde síla vzroste až pětinasobně v porovnání s jinými nástroji ale i sklonem. Z pohledu vyhodnocení dat pomocí Taguchiho metody může jít jen o jedno měření zatížené hrubou chybou, které však v celkovém zpracování mění přesnost analýzy a všech jeho modelů. Jednou z nevýhod této metody je poměrně obtížné logické posouzení zpracovatelem, zda jde o chybné nebo nesprávně provedené měření. Pro tento fakt hovoří i chování faktoru R_{mr} , kde z grafických průběhů na Obr. 4.12 je obtížné nalézt jedno řešení, shrnuté v univerzálním matematickém popisu. Parametr R_{mr} není společný s parametry R_a , R_z . Definuje míru velikosti povrchu v požadované výšce řezu $R_{mr}(c)$ na základě součtu materiálových přímků $Ml(c)$. Nepopisuje pravidelnost chování na rozdíl od parametrů R_a , R_z , ale procentuální podíl vzhledem k celkovému materiálovému podílu („umělý záběh“) a vychází z průběhu křivky materiálového podílu. Proto jsou naměřené hodnoty R_{mr} v dané výšce řezu (c) zatíženy velkou chybou a ta se odráží v celkovém vyhodnocení v Obr. 4.12.

4.2 ANALÝZA ROZPTYLU

Pomocí programu Minitab v17 byla provedena regresní analýza získaných dat. Zkoumané modely parametrů drsnosti mají tento matematický popis:

$$\begin{aligned}
Ra = & -132,3 + 1,186 \times l - 0,2673 \times a - 1,12 \times D + 0,2034 \times \alpha + \\
& + 0,1537 \times v_f - 0,02027 \times l \times l - 0,009731 \times a \times a + 0,031 \times D \times D - \\
& - 0,007986 \times \alpha \times \alpha - 0,00043 \times v_f \times v_f + 0,008198 \times l \times a - \\
& - 0,02412 \times l \times D + 0,000322 \times l \times \alpha - 0,000455 \times l \times v_f + \\
& + 0,1055 \times a \times D
\end{aligned}$$

(4.1)

$$\begin{aligned}
Rz = & -1093 - 6,655 \times l - 4,392 \times a - 12,22 \times D + \\
& + 2,969 \times \alpha + 1,27 \times v_f - 0,2364 \times l \times l - 0,03933 \times a \times a + \\
& + 0,4521 \times D \times D - 0,09995 \times \alpha \times \alpha - 0,000354 \times v_f \times v_f + \\
& + 0,1586 \times l \times a - 0,2741 \times l \times D + 0,06168 \times l \times \alpha + 0,005308 \times l \times v_f + \\
& + 1,063 \times a \times D
\end{aligned}$$

(4.2)

$$\begin{aligned}
Rmr = & 787,5 + 77 \times l - 3,967 \times a + 5,807 \times D - 1,966 \times \alpha - \\
& - 0,7266 \times v_f - 0,3287 \times l \times l + 0,1515 \times a \times a - 1,241 \times D \times D - \\
& - 0,001615 \times \alpha \times \alpha + 0,000188 \times v_f \times v_f - 1,661 \times l \times a - \\
& - 2,854 \times l \times D - 0,1902 \times l \times \alpha - 0,02451 \times l \times v_f - 0,08906 \times a \times D
\end{aligned}$$

(4.3)

Změna technologických podmínek ovlivňuje nejen jakost obrobeneho povrchu, ale také má odezvu ve změně velikosti složek řezných sil. Na základě měření a zpracování dat bylo možné stanovit následující modely chování složek řezných sil $F1$, $F2$, $F3$ v závislosti na vstupních podmínkách. Jde o tyto vztahy:

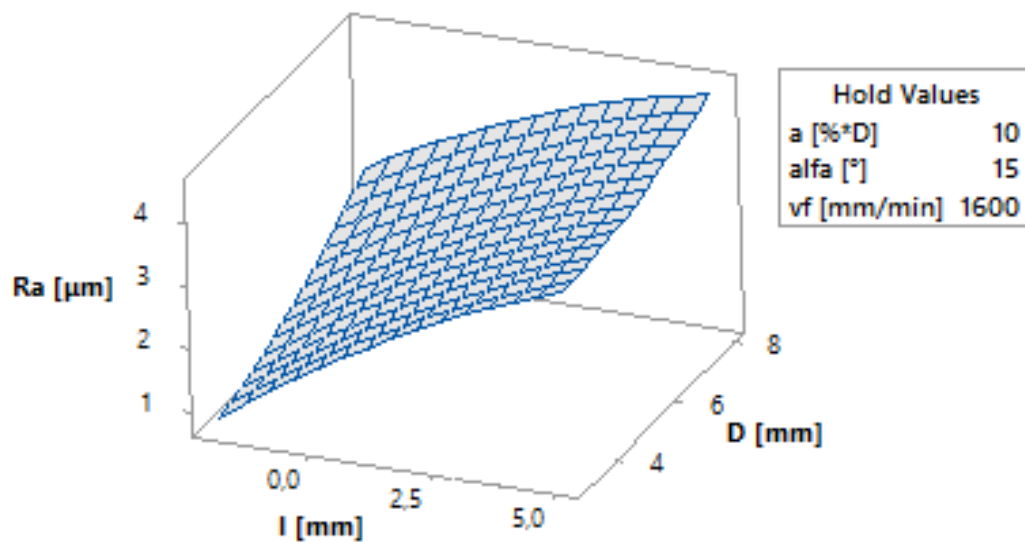
$$\begin{aligned}
F1 = & 723,5 + 6,262 \times l + 3,091 \times a + 4,676 \times D - 2,631 \times \alpha - 0,8251 \times v_f + \\
& + 0,3703 \times l \times l + 0,04891 \times a \times a + 0,1402 \times D \times D + 0,09669 \times \alpha \times \alpha + \\
& + 0,00023 \times v_f \times v_f - 0,1173 \times l \times a - 0,3208 \times l \times D - 0,08298 \times l \times \alpha - \\
& - 0,003354 \times l \times v_f - 0,6796 \times a \times D
\end{aligned}$$

(4.4)

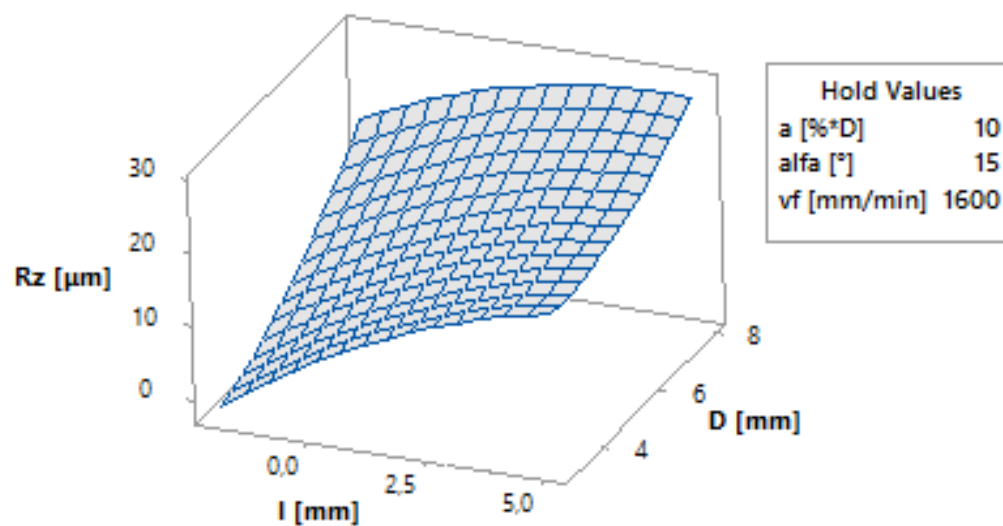
$$\begin{aligned}
F2 = & -234,7 + 57,21 \times l - 0,9853 \times a - 2,722 \times D - 1,141 \times \alpha + 0,3358 \times v_f - \\
& - 0,1289 \times l \times l - 0,04077 \times a \times a - 0,2247 \times D \times D + 0,002265 \times \alpha \times \alpha - \\
& - 0,0001 \times v_f \times v_f - 0,7271 \times l \times a - 0,8157 \times l \times D - 0,3018 \times l \times \alpha - \\
& - 0,02336 \times l \times v_f + 0,3002 \times a \times D
\end{aligned}
\tag{4.5}$$

$$\begin{aligned}
F3 = & -223,8 + 9,101 \times l - 0,1207 \times a - 5,212 \times D + 0,5791 \times \alpha + 0,2861 \times v_f - \\
& - 0,1428 \times l \times l - 0,02723 \times a \times a - 0,5221 \times D \times D + 0,02473 \times \alpha \times \alpha - \\
& - 0,000083 \times v_f \times v_f - 0,4749 \times l \times a - 1,026 \times l \times D - 0,03602 \times l \times \alpha - \\
& - 0,00026 \times l \times v_f + 0,1932 \times a \times D
\end{aligned}
\tag{4.6}$$

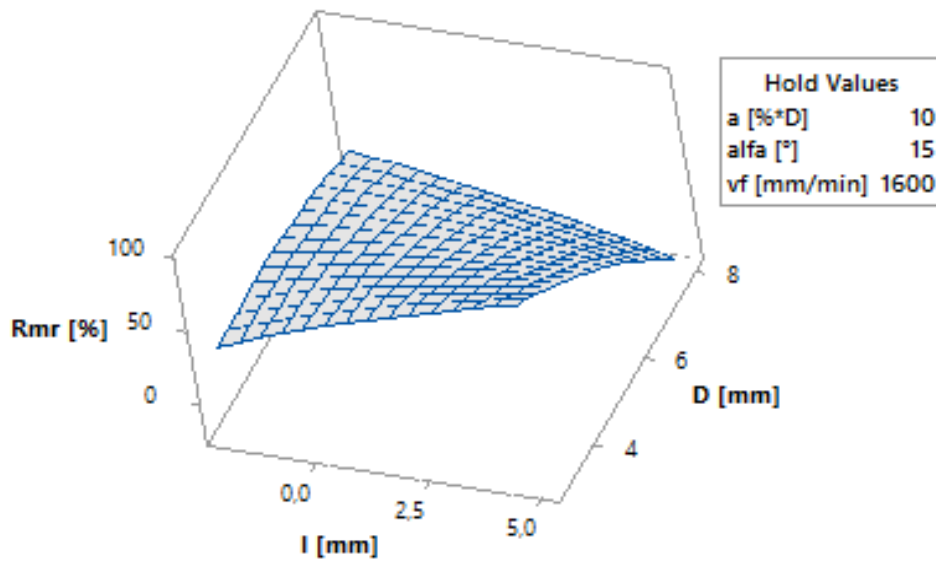
Efektivita predikovaných modelů (4.1) - (4.6) byla porovnáována vůči naměřeným datům. Nebyly zaznamenány metodologické chyby při zpracování a výsledky se pohybují v očekávaném rozmezí. Průměrná chyba modelů dosahovala téměř 125 % v maximu a některé z navržených modelů neměly splněnu podmínku ortogonality. Proto nelze považovat modely za zcela dostatečné pro popis procesu, přestože se například jednotlivé statistické parametry jako R-sq = 97,16 %; R-sq(adj) = 97,16 % a celková přesnost rovnice modelu (4.5) byla dostatečná s hodnotou R-sq(pred) = 86,73 %. Pro úplnost je dále uváděn grafický vztah vstupních parametrů na sledovaných faktorech v prostorových (Obr. 4.13 - Obr. 4.18) a vrstevnicových (Obr. 4.19 - Obr. 4.24) diagramech. Demonstrovány jsou tak možnosti software Minitab a možnosti Taguchiho metody plánování a zpracování naměřených dat.



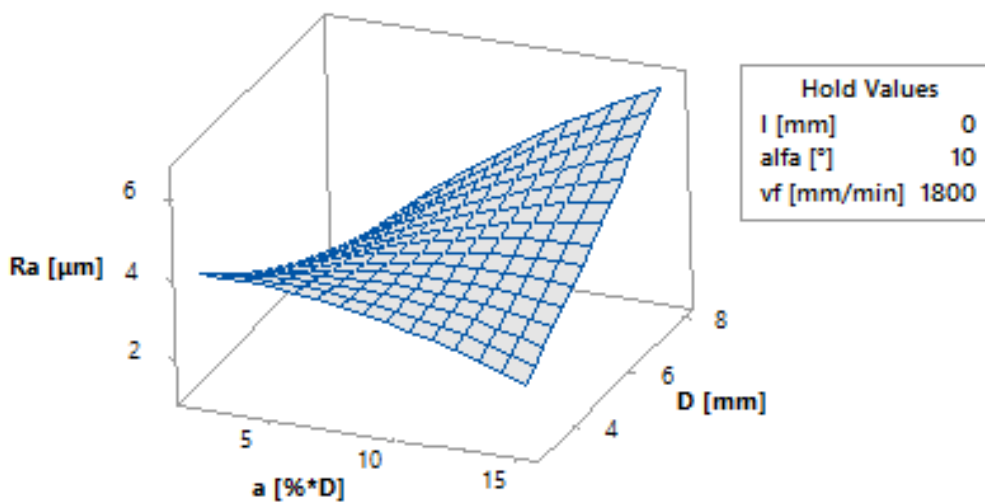
Obr. 4.13: Graf závislosti Ra na průměru nástroje D a délce vysunutí nástroje l



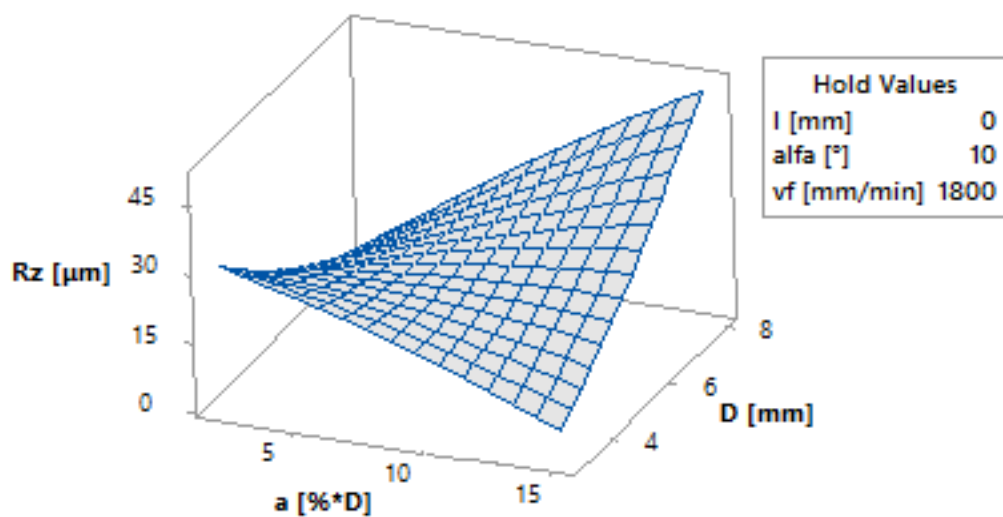
Obr. 4.14: Graf závislosti Rz na průměru nástroje D a délce vysunutí nástroje l



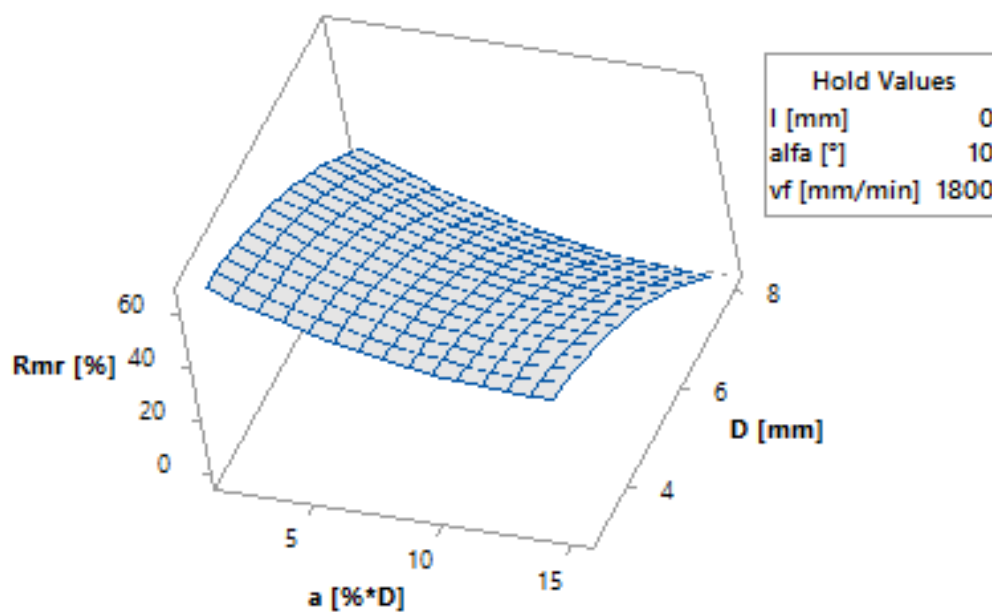
Obr. 4.15: Graf závislosti R_{mr} na průměru nástroje D a délce vysunutí nástroje l



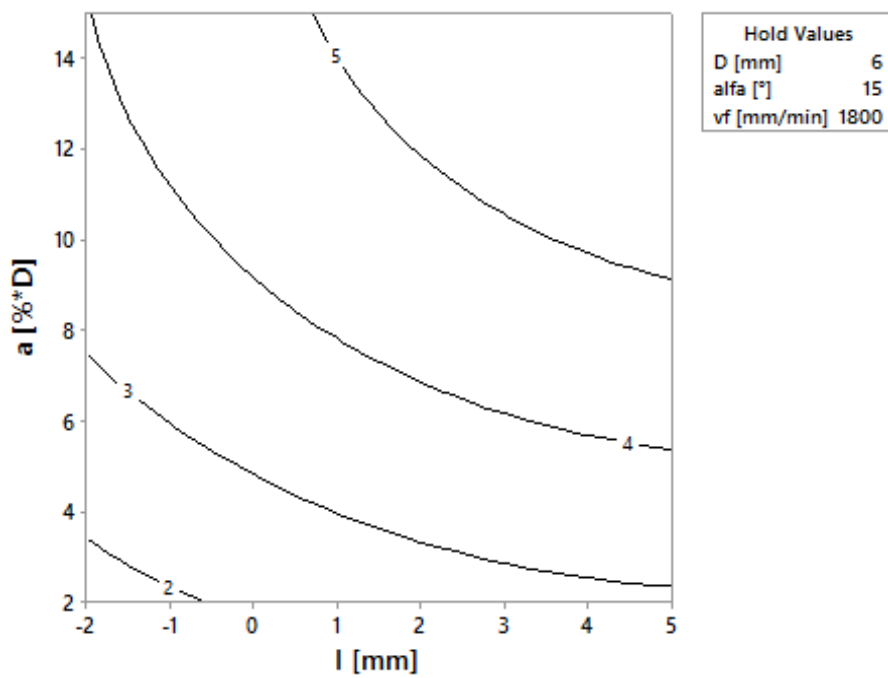
Obr. 4.16: Graf závislosti R_a na průměru nástroje D a radiální hloubce řezu a



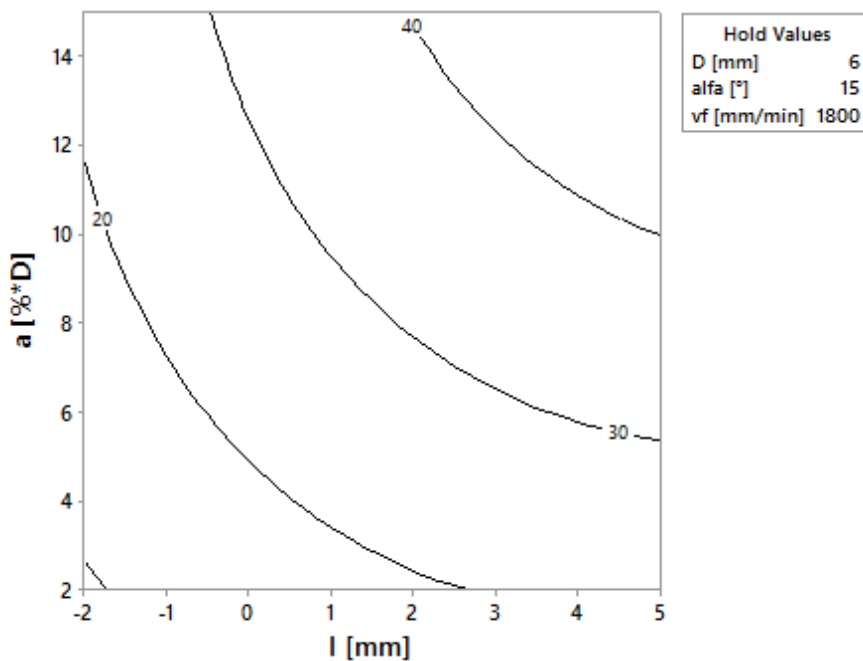
Obr. 4.17: Graf závislosti R_z na průměru nástroje D a radiální hloubce řezu a



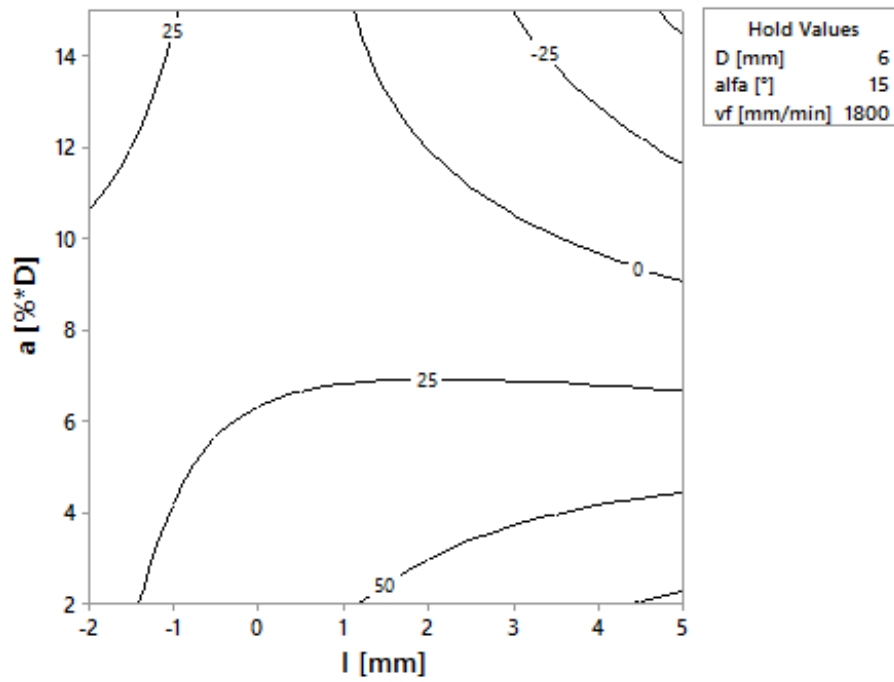
Obr. 4.18: Graf závislosti R_{mr} na průměru nástroje D a radiální hloubce řezu a



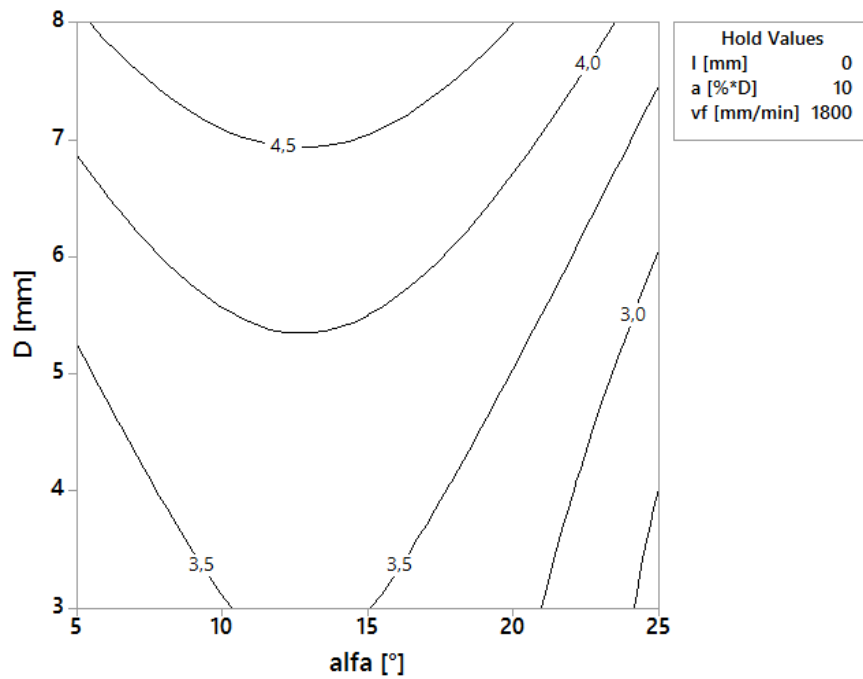
Obr. 4.19: Vrstevnicový graf závislosti R_a na radiální hloubce a a délce vysunutí nástroje l



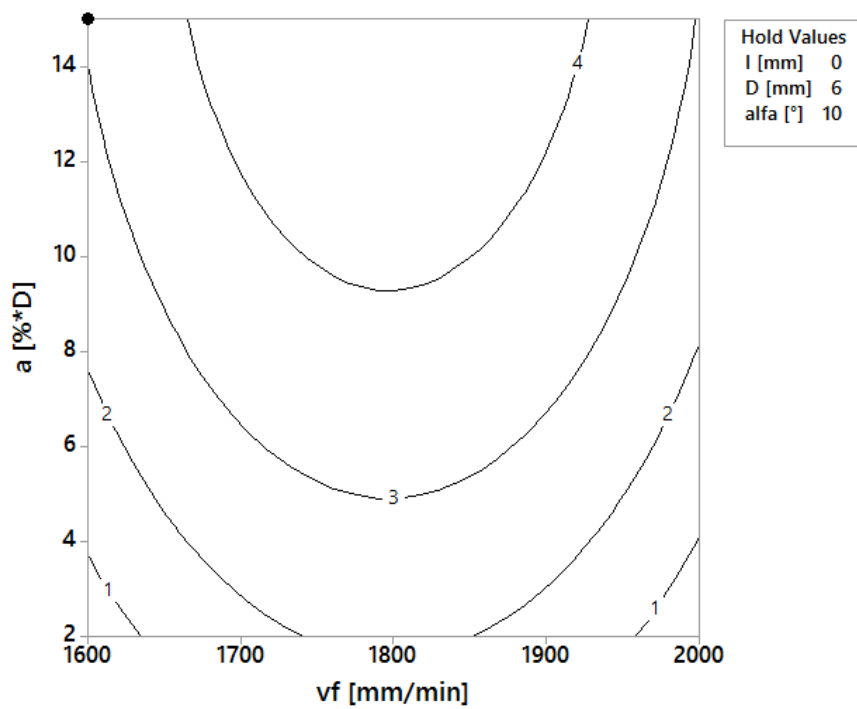
Obr. 4.20: Vrstevnicový graf závislosti R_z na radiální hloubce a a délce vysunutí nástroje l



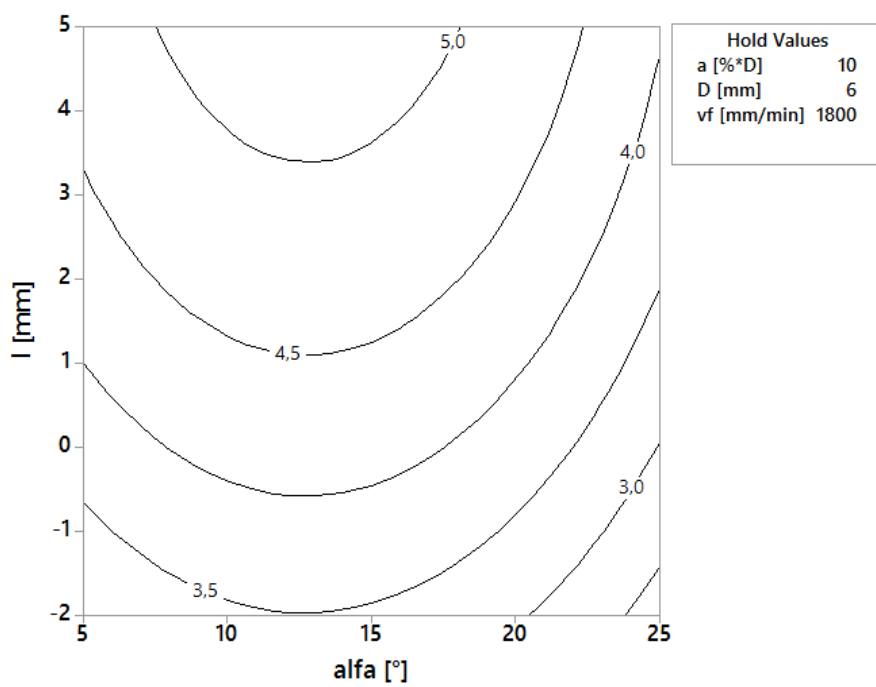
Obr. 4.21: Vrstevníkový graf závislosti R_{mr} na radiální hloubce a a délce vysunutí nástroje l



Obr. 4.22: Vrstevníkový graf závislosti R_a na průměru nástroje D a sklonu plochy α



Obr. 4.23: Vrstevnicový graf závislosti R_a na radiální hloubce řezu a a posuvové rychlosti v_f



Obr. 4.24: Vrstevnicový graf závislosti R_a na délce vysunutí nástroje l a sklonu plochy α

4.3 OPTIMUM A OPTIMÁLNÍ PROVEDENÍ

Program Minitab dovoluje optimalizovat až 25 sledovaných odezev. Se zvyšujícím se počtem je však proces optimalizace komplikovanější. V této části je pozornost zaměřena na optimalizaci metodou RSM (Response Surface Methodology), kde požadavky na sledované parametry musí vyhovovat podmínkám daným požadavky níže uváděným (Tabulka 4.4).

Tabulka 4.4 Kritéria optimalizace metodou RSM

Odezva	Cíl	Nejnižší mez	Optimum	Váha
Ra (μm)	Minimum	0,95	4,0	10
Rz (μm)	Minimum	4,99	24,0	10
Rmr (%)	Minimum	12,82	45,7	10
$F3$ (N)	Minimum	2,88	38,5	1
$F2$ (N)	Minimum	1,52	15,9	1
$F1$ (N)	Minimum	0,90	24,2	1

Výsledek optimalizace RSM je zjištěn tzv. sdruženou vhodností (Composite Desirability), která představuje vážený geometrický průměr jednotlivých vhodností odezev v intervalu $\langle 0, 1 \rangle$, přičemž převedením hodnoty sdružené vhodnosti na procentuální hodnotu je získána přesnost získané optimalizace. Sdružená vhodnost je ve zpracování výsledků níže označena symbolem D^* , přičemž hodnota reprezentuje ideální stav. Indikace, že jedna nebo více odezev je mimo akceptovatelnou oblast, je dáno tím, že se sdružená vhodnost více přibližuje nule.

Na grafu optimalizace odezvy parametrů v procesu obrábění skloněných ploch Obr. 4.25 černé svíslé čáry reprezentují aktuální nastavení vstupních faktorů. Horizontální modré čáry představují aktuální hodnotu sledované odezvy. Šedivá oblast v grafu označuje oblast nulové sdružené vhodnosti.

Na základě výsledků optimalizace v grafu na Obr. 4.25 a tabulce (Tabulka 4.5) je touto metodou navrženo optimální řešení. Doporučuje se pro získání optimální jakosti povrchu současně s nízkou energetickou náročností obráběcího procesu, dané silovým působením, nastavit následující řezné podmínky: radiální hloubku řezu 2 mm a posuvovou rychlost 1660,61 mm/min. Podmínkou je obrábění nástrojem o průměru 6,3838 mm, což vyžaduje výrobu takového nástroje a finančně zatíží proces obrábění. Pozastavím se také nad úhlem α , jež při $9,4444^\circ$ dosahuje daným nástrojem a při daných podmínkách výhodné jakosti povrchu a minimálních složek řezných sil. Při obrábění proměnných ploch jde o řešení limitující, vyžadující nutnost opakovaného optimalizačního procesu vždy pro

individuální posuzovanou skloněnou plochu. Ostatní řešení nejsou reálná pro výsledky odhadů v záporných oblastech. Není reálné ani nastavení úhlu α s rozlišitelností na čtyři desetinná místa.

Tabulka 4.5 Navrhovaná řešení optimalizace metodou RSM

Řešení	a (% · ØD)	D (mm)	α (°)	v_f (mm/min)	Rmr (%)	Rz (µm)	Ra (µm)
1	2	6,4	9,4	1661	0,64	4,66	0,95
2	15	4,6	21,4	1991	-12,45	5,32	1,33
3	2	8,0	5,2	1609	17,75	-2,33	-1,38
4	2	8,0	5,0	1990	26,91	2,39	0,31
5	2	7,7	5,0	1614	20,63	-2,29	-1,37

Řešení	$F3$ (N)	$F2$ (N)	$F1$ (N)	D^* (-)
1	-1,13	-3,26	1,63	1,00
2	10,62	11,68	20,64	0,86
3	18,79	15,02	15,54	0,84
4	5,10	8,34	1,81	0,83
5	18,84	14,68	15,78	0,82

D^* Sdružená vhodnost

4.4 PŘÍNOS PLÁNOVANÉHO EXPERIMENTU

Pro modelování inženýrských procesů jsou metody plánovaného experimentu přínosem. Ve své studii jsem se věnoval nejvíce efektivní Taguchiho metodě a RSM optimalizaci, která namísto plného provedení 1024 experimentů vyžadovala provést méně než 1,6 % experimentů. Je nutné uvést i omezení metody, nepočítající s interakcemi vyššího řádu, zahrnuty jsou jen hlavní efekty a uvažována je jen dvoufaktorová interakce, jak lze pozorovat v získaných matematických modelech (4.1)-(4.6).

Optimal		a [mm]	D [mm]	alfa [°]	vf [mm/m]
D: 0,9990	High	15,0	8,0	25,0	2000,0
	Cur	[2,0]	[6,3838]	[9,4444]	[1660,6061]
	Low	2,0	3,0	5,0	1600,0

Predict

Composite
Desirability
D: 0,9990

Rmr [%]
Minimum
y = 0,6362
d = 1,0000

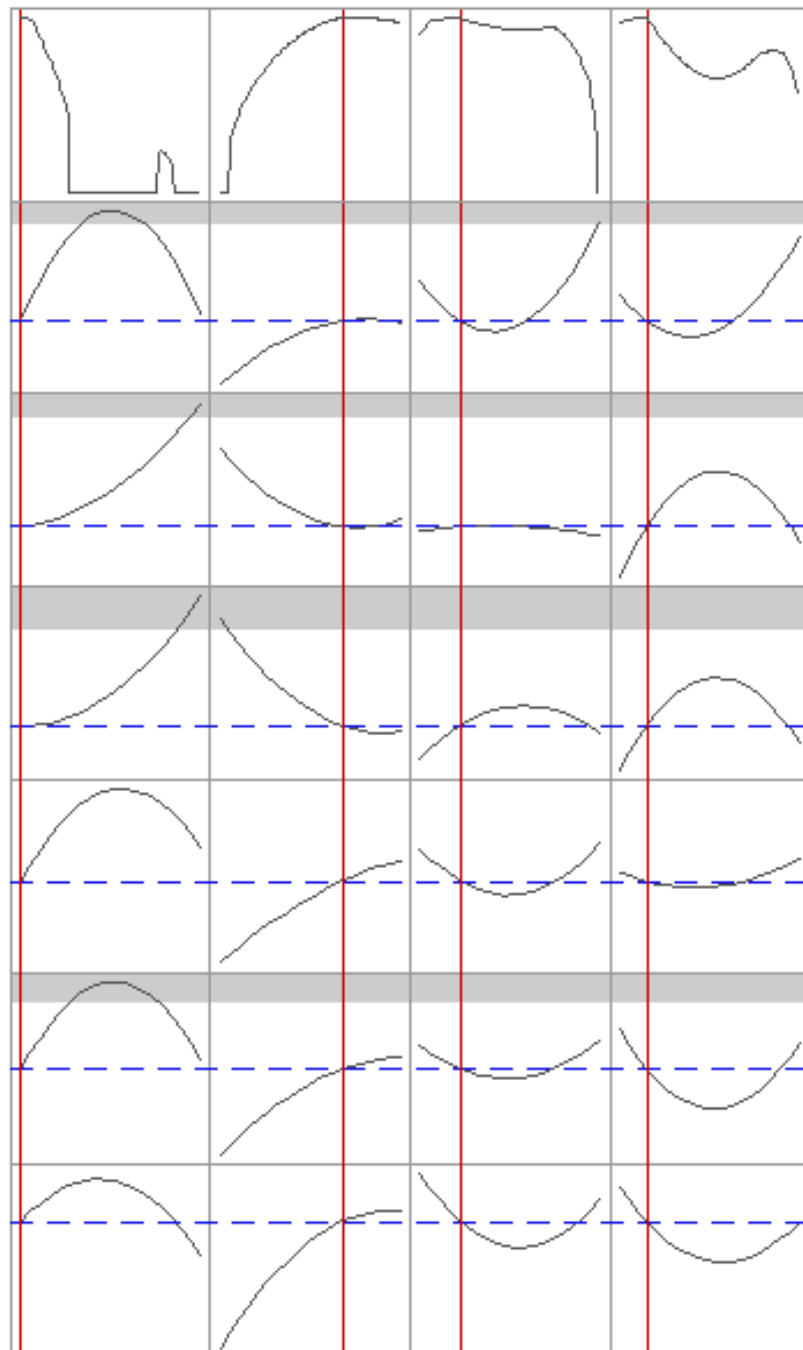
Rz [µm]
Minimum
y = 4,6639
d = 1,0000

Ra [µm]
Minimum
y = 0,9459
d = 1,0000

F3 [N]
Minimum
y = -1,1321
d = 1,0000

F2 [N]
Minimum
y = -3,2621
d = 1,0000

F1 [N]
Minimum
y = 1,6268
d = 0,96883



Obr. 4.25: Optimalizační křivky

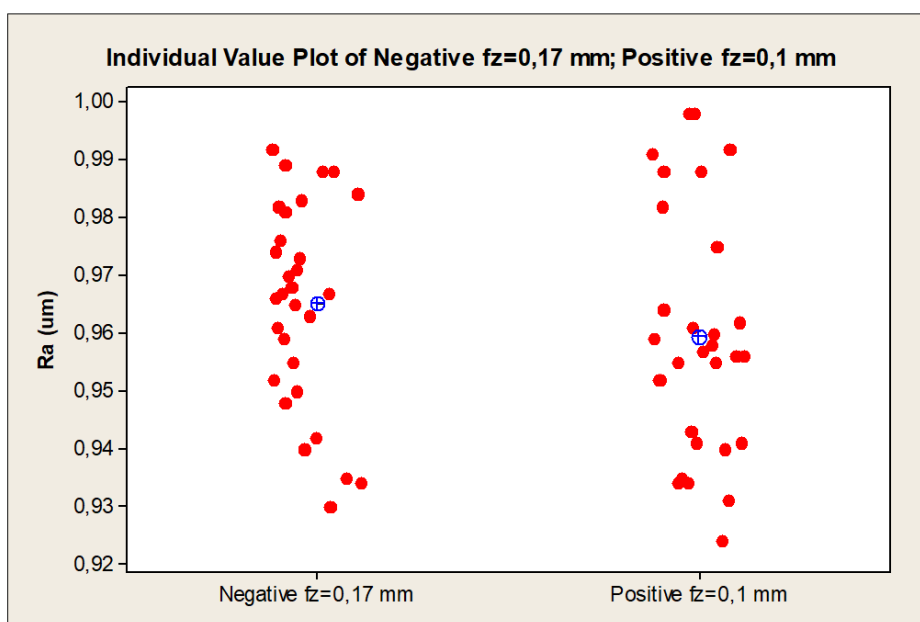
5 STATISTIKA PODOBNOSTI

Řezný nástroj, jeho geometrie a opotřebení má bezesporu vliv na výslednou jakost povrchu. Otázkou je, jaká je míra vlivu geometrie nástroje na jakost povrchu při obrábění ploch s výrazným sklonem. Řešení se nabízí v použití víceparametrových statistických metod a dendrogramů s vyhodnocením lineárních regresních modelů. Výstupem těchto metod jsou grafy, které demonstrují pravděpodobnost podobnosti Ra parametrů drsnosti pro pozitivní a negativní geometrii nástroje (Obr. 3.2) při obrábění mělkých a strmých ploch.

Uváděny jsou dále výsledky frézování s radiální hloubkou řezu $a_e = 0,4$ mm. Ostatní měření vykazovala obdobné chování, a proto zde nejsou uváděna.

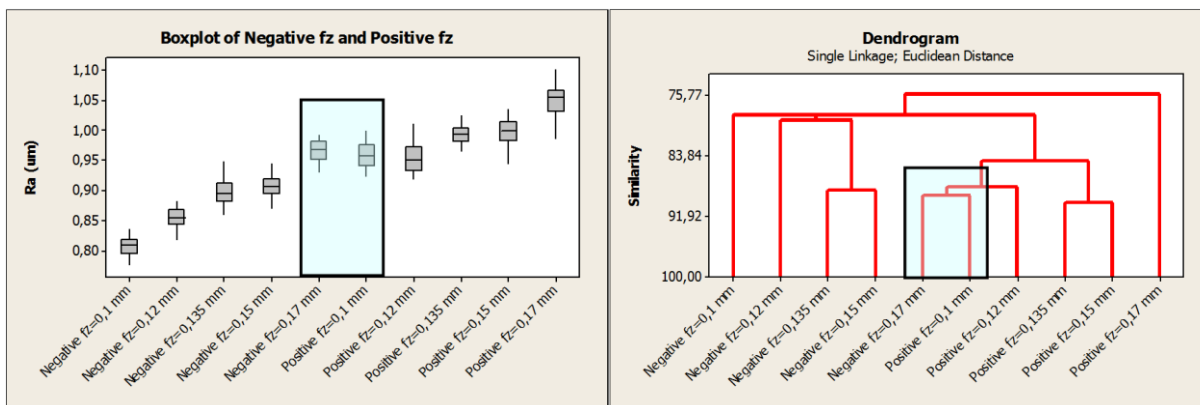
5.1 MĚLKÉ PLOCHY

V diagramu (Obr. 5.1) je naznačen vznik problému. Naměřená data parametru Ra jsou zdánlivě podobná i pro různé řezné podmínky a nástroje. Například při $f_z = 0,17$ mm při negativní geometrii a $f_z = 0,1$ mm geometrii pozitivní není možné statisticky s využitím odpovídajících testů zamítnout rovnost středních hodnot vyjádřenými aritmetickými průměry.



Obr. 5.1: Podobnost naměřeného souboru dat

Tento problém potom může vést k závěru, že „nezáleží“ na geometrii (pozitivní, negativní) nástroje při frézování mělkých ploch, což je, jak bude uvedeno dále, chybná hypotéza.



Obr. 5.2: Parametr Ra mělkých ploch pro pozitivní a negativní geometrii nástroje (vlevo) a analýza podobnosti dat (vpravo)

V dendrogramu (Obr. 5.2) je vyznačena podobnost výsledků Ra jak pro pozitivní, tak i negativní geometrii. Zmiňovaná $f_z = 0,17$ mm při negativní geometrii a $f_z = 0,1$ mm geometrie pozitivní je označena rámečkem. Z dendrogramu plyne, že podobnost hodnot Ra jak pro pozitivní, tak i negativní geometrii při různých hodnotách f_z je vysoká (tj. blíží se k hodnotě 80 %). To znamená, že se obecně zdá, že z hlediska parametru Ra a posuvu f_z není markantní rozdíl mezi tím, zda je použit nástroj s pozitivní, či negativní geometrií.

Tabulka 5.1 Statistické parametry jakosti povrchu and test normality

Podmínky:	Negativní, $f_z = 0,17$ mm	Pozitivní, $f_z = 0,1$ mm
Průměr:	0,9651	0,9594
Spodní mez:	0,9585	0,9515
Horní mez:	0,9716	0,9673
Rozptyl:	0,0003	0,0004
Směr. odchylka:	0,0176	0,0211
Šikmost:	-0,3802	0,3871
Odchylka od 0:	Nevýznamná	Nevýznamná
Špičatost:	2,1906	2,1753
Odchylka od 3:	Nevýznamná	Nevýznamná
Normalita:	Přijata	Přijata
Vypočtený:	1,2025	1,2388
Teoretický:	5,9915	5,9915
Pravděpodobnost:	0,5481	0,5383

Tabulka 5.2 Vybočující body a hodnocení autokorelace v parametrech Ra do 4. řádu

Podmínky:	Negativní, $f_z = 0,17$ mm	Pozitivní, $f_z = 0,1$ mm
Homogenita:	Přijata	Přijata
Počet vybočujících bodů:	0	0
Spodní mez:	0,8946	0,8920
Horní mez:	1,0314	1,0130
Řád autokorelace 1		
Pravděpodobnost:	0,2949	0,1609
Závěr:	Nevýznamný	Nevýznamný
Řád autokorelace 2		
Pravděpodobnost:	0,3700	0,4328
Závěr:	Nevýznamný	Nevýznamný
Řád autokorelace 3		
Pravděpodobnost:	0,0370	0,2590
Závěr:	Nevýznamný	Nevýznamný
Řád autokorelace 4		
Pravděpodobnost:	0,0817	0,2782
Závěr:	Nevýznamný	Nevýznamný

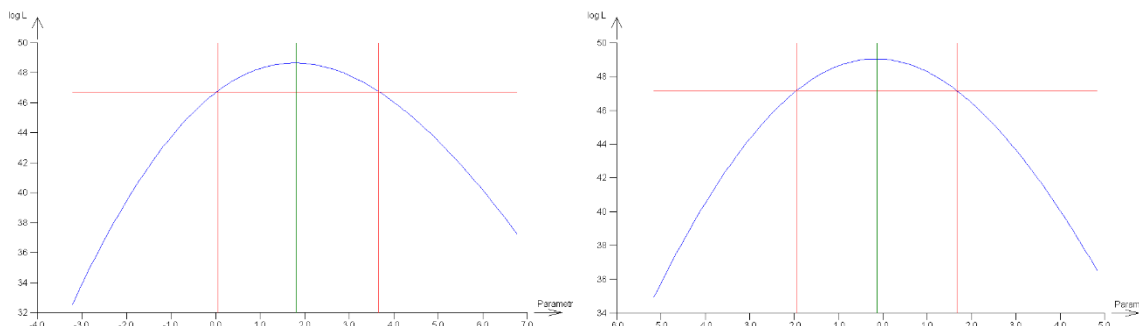
Je možné konstatovat, že naměřené hodnoty parametru Ra pro geometrii pozitivní i negativní pro výše definované hodnoty f_z pocházejí z normálního rozdělení, neobsahují vybočující zkreslující hodnoty Ra a nevykazují autokorelaci až do 4. řádu.

Dále je proveden test požadavku transformace dat, která by měla vést ke stabilizaci případného rozptylu hodnot parametru Ra , resp. k jeho symetrizaci.

Tabulka 5.3 Parametry Box Coxovy transformace

Podmínky:	Negativní, $f_z = 0,17$ mm	Pozitivní, $f_z = 0,1$ mm
Optimální parametr:	1,7810	-0,1600
Dolní mez parametru:	0,0661	-1,9439
Horní mez parametru:	3,6340	1,6742
Věrohodnost bez transformace:	48,2831	48,2831
Věrohodnost s transformací:	48,6521	49,0544
Oprávněnost transformace:	Ne	Ne

Pravděpodobnost:	60,968 %	78,564 %
Zvolený parametr:	-0,1600	-0,1600
Věrohodnost:	46,2950	49,0544
Opravený průměr:	0,9629	0,9571



Obr. 5.3: Graf maximální věrohodnosti funkce pro parametr Ra negativní geometrie $f_z = 0,17$ mm (vlevo) a pozitivní geometrie $f_z = 0,1$ mm (vpravo)

Z grafu logaritmu věrohodnostní funkce (Obr. 5.3) je patrné, že interval parametru λ , který byl sestrojen pro $1-\alpha = 0,95$ zahrnuje hodnotu 1, z čehož plyne, že Box Coxova transformace není významná, což plyne i z výše uvedené tabulky (Tabulka 5.3).

Tabulka 5.4 Mocinná transformace

Podmínky:	Negativní, $f_z = 0,17$ mm	Pozitivní, $f_z = 0,1$ mm
Optimální parametr:	-0,2664	0,2572
Zvolený parametr:	-0,2664	0,2572
Oprávněnost transformace:	No	No
Opravený průměr:	0,9672	0,9570

Mocinná transformace není významná, což plyne z tabulky výše (Tabulka 5.4).

Tabulka 5.5 Střední hodnoty parametru Ra (μm)

Podmínky:	Negativní, $f_z = 0,17$ mm	Pozitivní, $f_z = 0,1$ mm
Aritmetický průměr	0,9651	0,9594
Medián	0,9670	0,9565

Retransformovaný průměr Box Coxovou transformací	0,9629	0,9571
Retransformovaný průměr mocninou transformací	0,9672	0,9570

Z výše uvedené tabulky (Tabulka 5.5) je zřejmé, že střední hodnoty se začínají lišit na třetím desetinném místě, z tohoto důvodu bude dále využit jako charakteristická hodnota odhad aritmetického průměru.

Dále je využita teorie hypotéz, konkrétně F-testu a oboustranného t-testu pro hodnocení odhadů aritmetických průměrů parametru Ra získaných nástroji s pozitivní a negativní geometrií pro výše uvedené hodnoty f_z posuvu.

Sestavení hypotéz: F-test

$$H_0: \sigma^2_{Ra \text{ negativní } f_z = 0,17 \text{ mm}} = \sigma^2_{Ra \text{ pozitivní } f_z = 0,1 \text{ mm}}$$

H_a : NON,

kde $1 - \alpha = 0,95$

Tabulka 5.6 Test shody rozptylů

Poměr rozptylů:	1,4317
Počet stupňů volnosti:	29
Kritická hodnota:	1,8328
Závěr:	Rozptyly jsou shodné
Pravděpodobnost:	0,1565

Na základě výše uvedených hodnot lze konstatovat, že není možné zamítnout H_0 o rovnosti rozptylu parametru Ra pro pozitivní a negativní geometrii s výše uvedenými hodnotami f_z .

Sestavení hypotézy pro oboustranný t-test

$$H_0: \mu_{Ra \text{ negativní } f_z = 0,17 \text{ mm}} = \mu_{Ra \text{ pozitivní } f_z = 0,1 \text{ mm}}$$

$$H_a: \mu_{Ra \text{ negativní } f_z = 0,17 \text{ mm}} \neq \mu_{Ra \text{ pozitivní } f_z = 0,1 \text{ mm}}$$

kde $1 - \alpha = 0,95$.

Tabulka 5.7 Test shody průměrů pro shodné rozptyly

T-statistika:	1,1354
Počet stupňů volnosti:	58
Kritická hodnota:	2,0017
Závěr:	Průměry jsou shodné
Pravděpodobnost:	0,2609

Na základě výše uvedených hodnot (Tabulka 5.7) lze konstatovat, že nemůže být zamítnuta H_0 o rovnosti průměrů parametru Ra pro pozitivní a negativní geometrii s výše uvedenými hodnotami f_z .

Prakticky to znamená, že hodnoty Ra pro pozitivní a negativní geometrii nástroje pro daná f_z neodhalí vliv geometrie nástroje a posuvu. Lze tedy vyvodit, že při frézování mělkých ploch není geometrie nástroje důležitá. Z tohoto důvodu je postupováno cestou regresní analýzy a hledán je odhad parametrů lineární regrese. Z nich následně je provedeno testování shody pomocí tzv. Chowovy metody.

Tabulka 5.8 Odhady regresních parametrů

Podmínky:	Negativní, $f_z = 0,17$ mm		Pozitivní, $f_z = 0,1$ mm	
Proměnná:	b_0	b_1	b_0	b_1
Odhad:	0,5839	2,2442	0,8008	1,4043
Směrodatná odchylka:	0,0268	0,1957	0,0392	0,2857
Závěr:	Významný	Významný	Významný	Významný
Pravděpodobnost:	0,0002	0,0014	0,0003	0,0161
Spodní mez:	0,4985	1,6215	0,6761	0,4952
Horní mez:	0,6693	2,8669	0,9255	2,3134

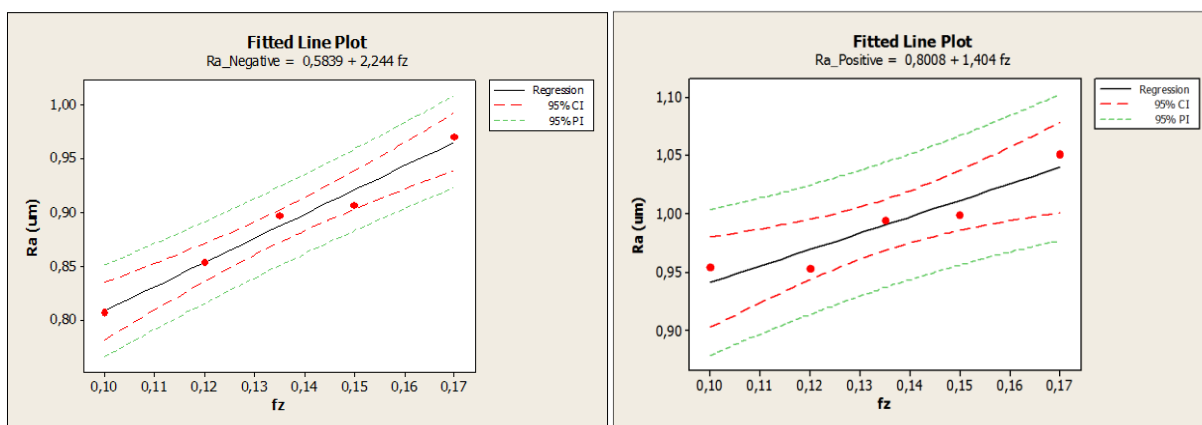
Tabulka 5.9 Statistické charakteristiky regrese

Geometrie nástroje:	Negativní	Pozitivní
Vícenásobný korelační koeficient:	0,9888	0,9432
Koeficient determinace:	0,9777	0,8896
Predikovaný korelační koeficient:	0,9037	0,3115
Střední kvadratická chyba predikce:	0,0001	0,0006
Akaikeho informační kritérium:	-44,0828	-40,2987
Reziduální součet čtverců:	0,0003	0,0007
Průměr absolutních reziduí:	0,0063	0,0113
Reziduální směr, odchylka:	0,0105	0,0154
Reziduální rozptyl:	0,0001	0,0002
Šikmost reziduí:	0,4125	0,0700
Špičatost reziduí:	2,3703	1,2841

Tabulka 5.10 Testování regresního tripletu

Geometrie nástroje:	Negativní	Pozitivní
Fisher-Snedecorův test významnosti modelu		
Hodnota kritéria F:	131,5488	24,1668
Kvantil F (1-alfa, m-1, n-m):	10,1280	10,1280
Pravděpodobnost:	0,0014	0,0161
Závěr:	Model je významný	
Scottovo kritérium multikolinearity		
Hodnota kritéria SC:	-0,3940	-0,8029
Závěr:	Model je korektní	
Cook-Weisbergův test heteroskedasticity		
Hodnota kritéria CW:	0,2077	0,0245
Kvantil $\chi^2(1-\alpha,1)$:	3,8415	3,8415
Pravděpodobnost:	0,6486	0,8756
Závěr:	Rezidua vykazují homoskedasticitu	
Jarque-Berrův test normality		
Hodnota kritéria JB:	0,4263	0,6713
Kvantil $\chi^2(1-\alpha,2)$:	5,9915	5,9915
Pravděpodobnost:	0,8080	0,7149
Závěr:	Rezidua mají normální rozdělení	
Waldův test autokorelace		
Hodnota kritéria WA:	1,4571	1,5031
Kvantil $\chi^2(1-\alpha,1)$:	3,8415	3,8415
Pravděpodobnost:	0,2274	0,2202
Závěr:	Autokorelace je nevýznamná	

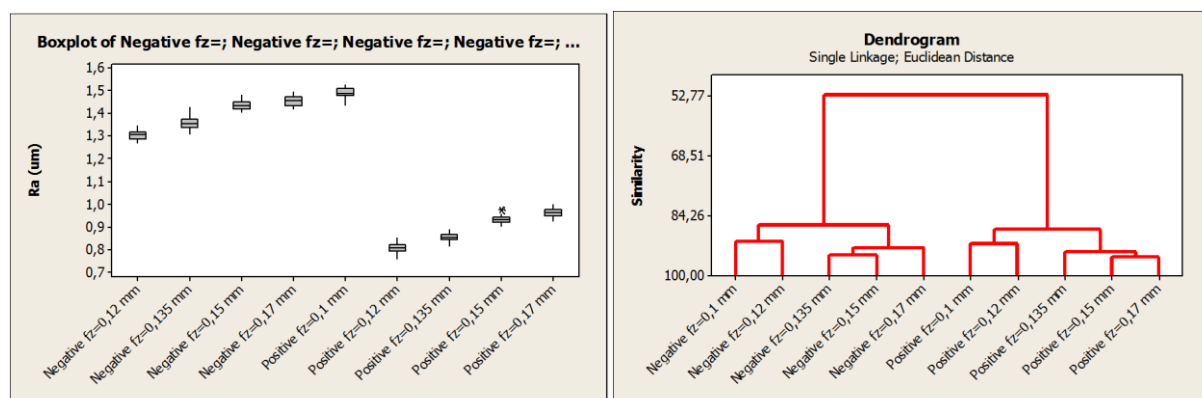
Jak je prezentováno v tabulkách výše (Tabulka 5.8 - Tabulka 5.10), je možná říci, že modely pro pozitivní a negativní geometrii jsou významné a korektní, rezidua vykazují homoskedasticitu a mají normální rozdělení, a autokorelace je nevýznamná.



Obr. 5.4: Lineární regrese pro negativní (vlevo) a pozitivní (vpravo) geometrii nástroje

5.2 STRMÉ PLOCHY

V případě strmých ploch je možné říci, že není obtížné najít rozdíly při obrábění s nástrojem s pozitivní nebo negativní geometrií. Je výrazný rozdíl v měřeném parametru Ra tak jak je ukázáno v krabicových diagramech a dendrogramech (viz. Obr. 5.5)



Obr. 5.5: Jakost povrchu strmých ploch pro pozitivní a negativní geometrii nástroje (vlevo) a analýza podobnosti dat (vpravo)

Přesto je důležité použít stejnou metodiku jako u mělkých ploch, pal je dále navrhnout regresní model a provedeno jeho otestování. Výsledky jsou uváděny v následujících tabulkách (Tabulka 5.11 - Tabulka 5.13).

Tabulka 5.11 Odhady regresních parametrů

Podmínky:	Negativní, $f_z = 0,17$ mm		Pozitivní, $f_z = 0,1$ mm	
	b_0	b_1	b_0	b_1
Proměnná:				
Odhad:	1,0351	1,0351	1,0351	1,0351
Směrodatná odchylka:	2,7758	2,7758	2,7758	2,7758
Závěr:	Významný	Významný	Významný	Významný
Pravděpodobnost:	1,0351	1,0351	1,0351	1,0351
Spodní mez:	2,7758	2,7758	2,7758	2,7758
Horní mez:	0,5438	0,5438	0,5438	0,5438

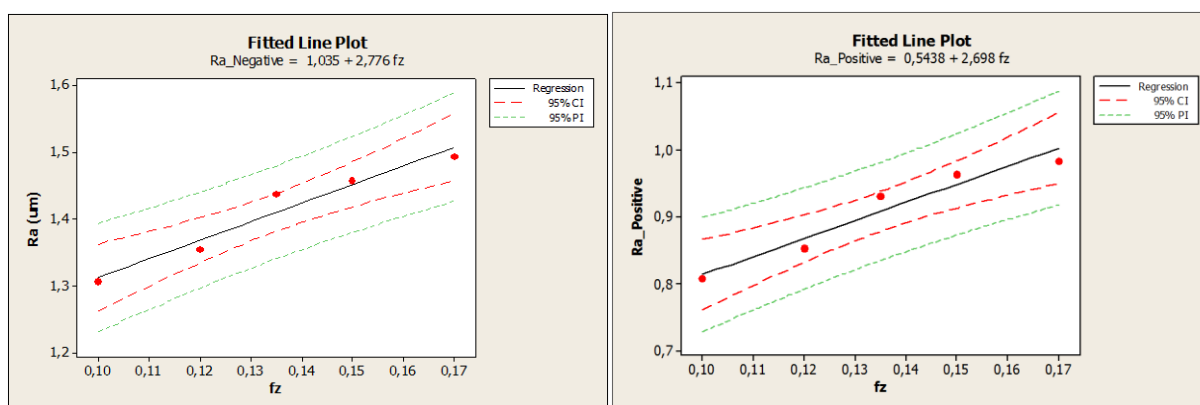
Tabulka 5.12 Statistické charakteristiky regrese

Geometrie nástroje:	Negativní	Pozitivní
Vícenásobný korelační koeficient:	0,9742	0,9699
Koeficient determinace:	0,9491	0,9407
Predikovaný korelační koeficient:	0,7446	0,6580
Střední kvadratická chyba predikce:	0,0006	0,0008
Akaikeho informační kritérium:	-37,6828	-37,1635
Reziduální součet čtverců:	0,0012	0,0013
Průměr absolutních reziduí:	0,0133	0,0153
Reziduální směr, odchylka:	0,0200	0,0210
Reziduální rozptyl:	0,0004	0,0004
Šikmost reziduí:	0,6906	0,1022
Špičatost reziduí:	2,2222	1,4030

Tabulka 5.13 Testování regresního tripletu

Geometrie nástroje:	Negativní	Pozitivní
Fisher-Snedecorův test významnosti modelu		
Hodnota kritéria F:	55,9576	47,6605
Kvantil F (1-alfa, m-1, n-m):	10,1280	10,1280
Pravděpodobnost:	0,0049	0,0062
Závěr:	Model je významný	
Scottovo kritérium multikolinearity		
Hodnota kritéria SC:	-0,6152	-0,2248
Závěr:	Model je korektní	
Cook-Weisbergův test heteroskedasticity		
Hodnota kritéria CW:	0,0145	0,1034
Kvantil $\chi^2(1-\alpha,1)$:	3,8415	3,8415

Pravděpodobnost:	0,9041	0,7478
Závěr:	Rezidua vykazují homoskedasticitu	
Jarque-Berrův test normality		
Hodnota kritéria JB:	0,7015	0,6165
Kvantil $\chi^2(1-\alpha,2)$:	5,9915	5,9915
Pravděpodobnost:	0,7042	0,7347
Závěr:	Rezidua mají normální rozdělení	
Waldův test autokorelace		
Hodnota kritéria WA:	0,0853	0,0453
Kvantil $\chi^2(1-\alpha,1)$:	3,8415	3,8415
Pravděpodobnost:	0,7702	0,8314
Závěr:	Autokorelace je nevýznamná	



Obr. 5.6: Lineární regrese pro negativní (vlevo) a pozitivní (vpravo) geometrii nástroje

Tak jak je uváděno v předchozích tabulkách, je možné říci, že parametry vícenásobné korelace, koeficienty determinace a predikované koeficienty korelace jsou významné, šikmost a špičatost reziduí je blízko normálnímu rozdělení.

Z regresního tripletu na Obr. 5.6 a ve zjištěných regresních rovnicích (5.1) a (5.2) je možné říci, že regresní model je významný a korektní, rezidua indikují homoskedasticitu a není žádná autokorelace v datech.

5.3 CHOWŮV TEST PRO MĚLKÉ A STRMÉ PLOCHY

V případě mělkých ploch jsou uvažovány následující regresní rovnice:

$$Ra_{\text{negativní}} = 0,5839 + 2,244 \cdot f_z \quad (5.1)$$

$$Ra_{\text{pozitivní}} = 0,8008 + 1,404 \cdot f_z \quad (5.2)$$

Je uvažována nulová a alternativní hypotéza Chowova testu:

$$H_0: \beta_{Ra_{\text{negativní}}} = \beta_{Ra_{\text{pozitivní}}}$$

$$H_a: \beta_{Ra_{\text{negativní}}} \neq \beta_{Ra_{\text{pozitivní}}}$$

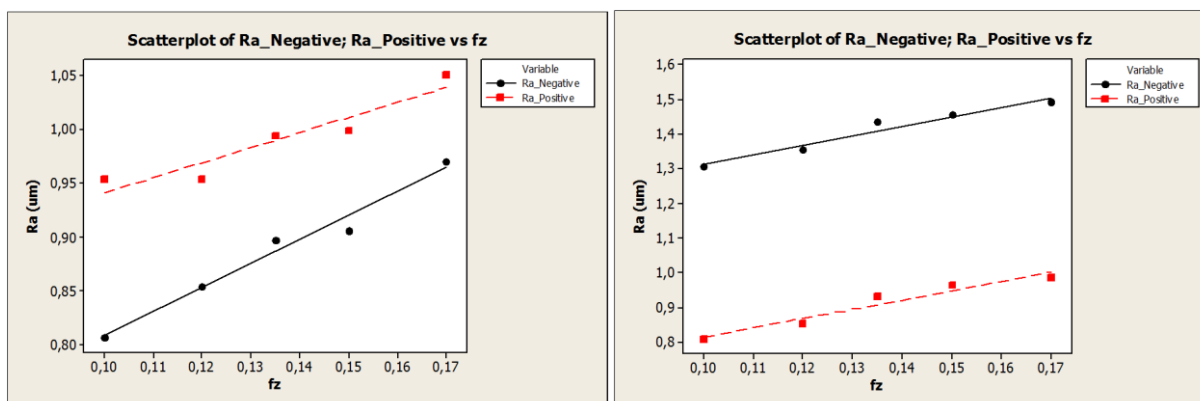
na konfidenční úrovni $1 - \alpha = 0,95$.

Kritérium testu pro případ homoskedasticity a počtu stupňů volnosti:

RSC negativní =	$333,0823 \cdot 10^{-5}$
RSC pozitivní =	$709,9652 \cdot 10^{-5}$
RSC pozitivní + negativní =	$2884,3041 \cdot 10^{-5}$
Fch =	80,02
F0,95 (m=2, n-2*m=6) =	5,14

Je možné konstatovat, že $F_{0,95} = 5,14 < F_{ch} = 80,02$, a proto je možné zamítnout nulovou hypotézu, že regresní rovnice (5.1) a (5.2) jsou si rovny, a rozdíly Ra pro mělké plochy jsou pouze náhodné.

Prakticky je možné říci, že je významný rozdíl mezi nástroji s pozitivní a negativní geometrií při frézování mělkých ploch.



Obr. 5.7: Korelace jakosti povrchu pro mělké plochy (vlevo) a strmé plochy (vpravo)

V případě strmých ploch jsou uvažovány tyto regresní rovnice:

$$Ra_{\text{negativní}} = 1,035 + 2,776 \cdot f_z \quad (5.3)$$

$$Ra_{\text{pozitivní}} = 0,5438 + 2,698 \cdot f_z \quad (5.4)$$

Podobně jako v případě mělkých ploch je uvažována nulová a alternativní hypotéza Chowova testu:

$$H_0: \beta_{Ra_{\text{negativní}}} = \beta_{Ra_{\text{pozitivní}}}$$

$$H_a: \beta_{Ra_{\text{negativní}}} \neq \beta_{Ra_{\text{pozitivní}}}$$

na konfidenční úrovni $1 - \alpha = 0,95$

Kritérium testu pro případ homoskedasticity:

RSC negativní =	$119,7982 \cdot 10^{-5}$
RSC pozitivní =	$132,9087 \cdot 10^{-5}$
RSC pozitivní + negativní =	$63176,1319 \cdot 10^{-5}$
Fchtest =	169,65
F0,95 (m=2, n-2*m=6) =	5,14

Je možné konstatovat, že $F_{0,95} = 5,14 < F_{ch} = 169,65$, a proto je možné zamítnout nulovou hypotézu, že regresní rovnice (5.3) a (5.4) jsou si rovny, a rozdíly Ra pro strmé plochy jsou pouze náhodné.

Prakticky je možné říci, že je významný rozdíl mezi nástroji s pozitivní a negativní geometrií při frézování strmých ploch.

5.4 SHRNU TÍ VÝSLEDKŮ STATISTIKY PODOBNOSTI

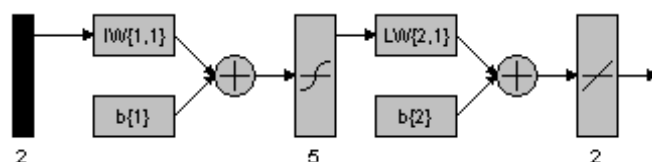
Vyhodnocování dat pro případ frézování strmých a mělkých ploch pomocí lineárních regresních modelů, jejich důkazů a dendrogramů se podařilo prokázat, že data charakterizující parametr Ra v případě mělkých ploch jsou statisticky významně odlišná pro pozitivní a negativní geometrii nástroje, zatímco prostřednictvím dendrogramů nebo příslušného t-testu tato hypotéza nemůže být potvrzena. Lineární regresní modely byly testovány pomocí regresních tripletů společně s Chowovou metodou na 95% hladině spolehlivosti. Lze konstatovat, že geometrie nástroje je statisticky významná pro stanovení Ra na mělkých plochách.

V případě strmých ploch vyhodnocení pomocí dendrogramů jasně prokázalo rozdílnost z hlediska Ra pro různé rezné podmínky a podobné výsledky byly získány i při použití regresních tripletů a Chowovy metody.

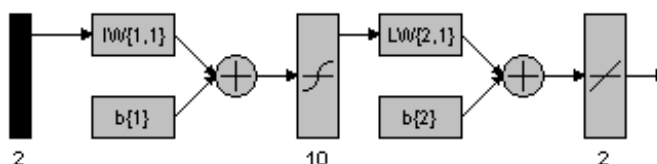
6 UMĚLÉ NEURONOVÉ SÍTĚ

Návrh modelu vychází z předchozích analýz a definice problému, tím jsou na jedné straně vstupní parametry řezného procesu (a_e, f_z) a na druhé straně jsou dva požadované parametry (Ra, Rz). V tomto případě je vedle parametru drsnosti Ra uvažován stejně tak měřený komplementární parametr maximální výšky nerovností Rz . Model tedy obsahuje dva vstupy a dva výstupy. Experimentálně zjištěná data jsou zpracovávána softwarem Matlab, kde probíhají výpočty. Na základě dřívějších statistických analýz bylo zjištěno silné zašumění dat, proto byl použit model umělé neuronové sítě ANN (Artificial Neural Networks), který je schopen si poradit s vícerozměrností a silným nelineárním chováním.

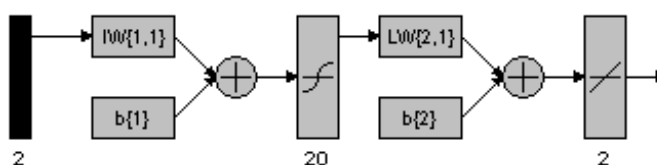
Pro nalezení optimálního řešení jsou v modulu Neural Network Toolbox programu Matlab použity rozdílné struktury MFFNN (Multilayer Feed-Forward Neural Networks). Je testováno sedm umělých neuronových sítí, jež jsou dále označovány jako net1 – net7. Zjednodušená schémata jsou uvedena na obrázcích níže (Obr. 6.1 - Obr. 6.7)



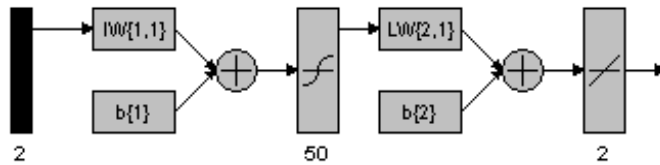
Obr. 6.1: Zjednodušená struktura modelu net1



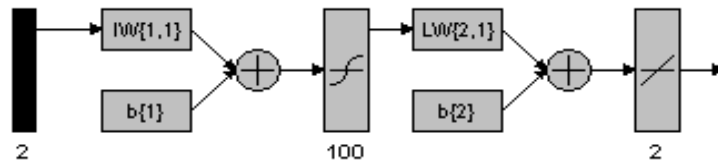
Obr. 6.2: Zjednodušená struktura modelu net2



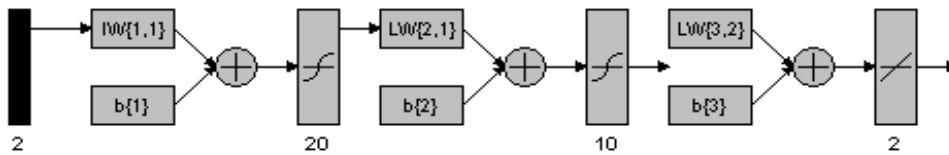
Obr. 6.3: Zjednodušená struktura modelu net3



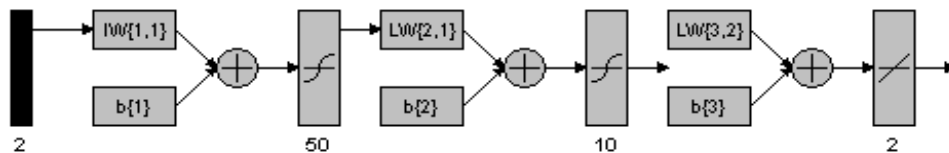
Obr. 6.4: Zjednodušená struktura modelu net4



Obr. 6.5: Zjednodušená struktura modelu net5



Obr. 6.6: Zjednodušená struktura modelu net6



Obr. 6.7: Zjednodušená struktura modelu net7

Testované struktury jsou uvedeny v tabulce níže (Tabulka 6.1), kde NN symbolizuje počet neuronů, TF je zkratkou pro transferovou funkci, T je symbolem pro hyperbolickou tangenti funkci a L je funkcí lineární.

Tabulka 6.1 Testované struktury neuronových sítí

	Vstupní vrstva		Skrytá vrstva 1		Skrytá vrstva 2		Výstupní vrstva	
	NN	TF	NN	TF	NN	TF	NN	TF
net1	2	-	5	T	-	-	2	L
net2	2	-	10	T	-	-	2	L
net3	2	-	20	T	-	-	2	L

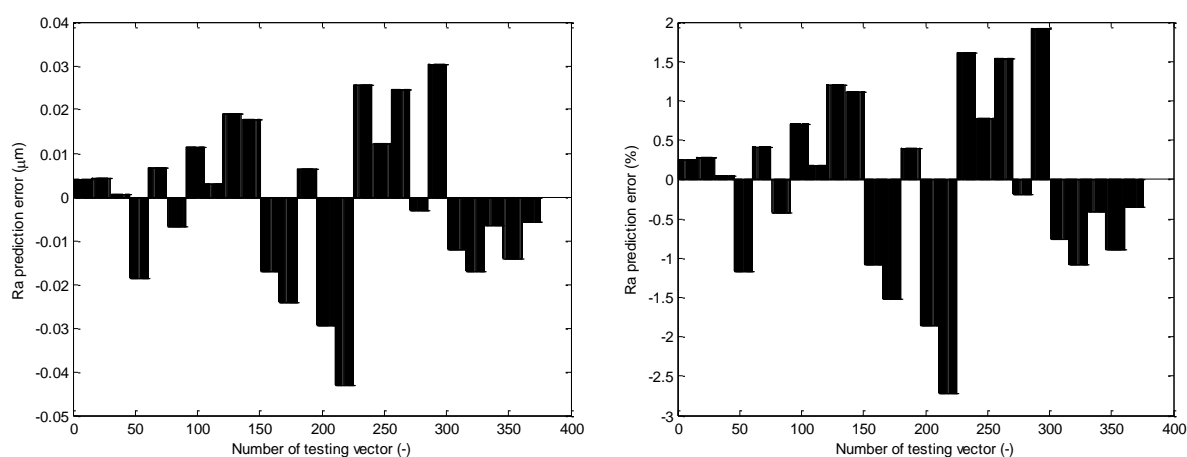
net4	2	-	50	T	-	-	2	L
net5	2	-	100	T	-	-	2	L
net6	2	-	20	T	10	T	2	L
net7	2	-	50	T	10	T	2	L

Experimentální data jsou transformována do intervalu $\langle -1, 1 \rangle$. Následně jsou umělé neuronové sítě trénovány na transformovaných naměřených datech s využitím Levenberg-Marquart algoritmu. Veškerá výstupní data jsou v konečném kroku re-transformována zpět před ověřením vzhledem k reálným experimentálním datům. Pro automatizaci procesu zpracování a výpočtů jsou vytvořeny dávkové programy s použitím Matlab programovacích standardů (M-files).

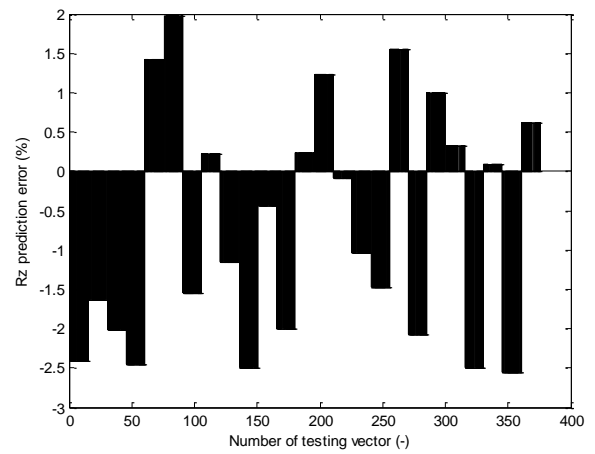
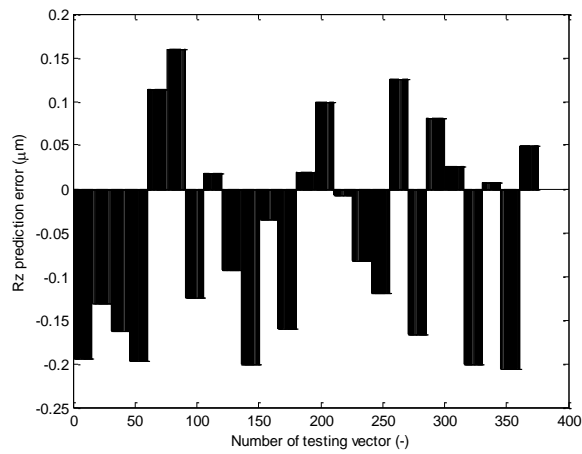
6.1 VERIFIKACE A POROVNÁNÍ ANN MODELŮ

Připravené modely jsou testovány na nových experimentálních datech. Tato data slouží pro ověření schopnosti predikovat výslednou jakost povrchu po frézování. Opakování experimentálního frézování si zachovává stejné podmínky, tak jak je uvedeno v dřívější kapitole.

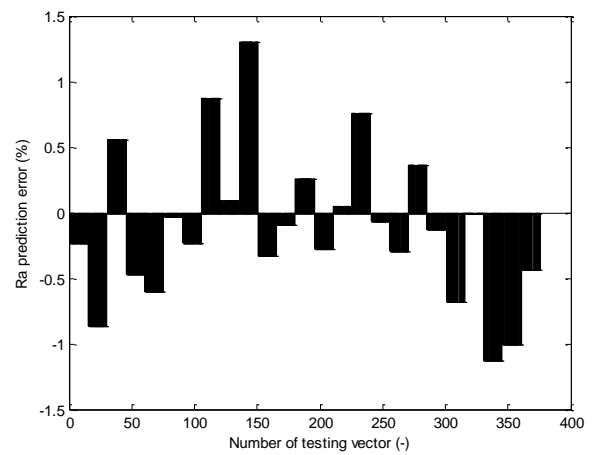
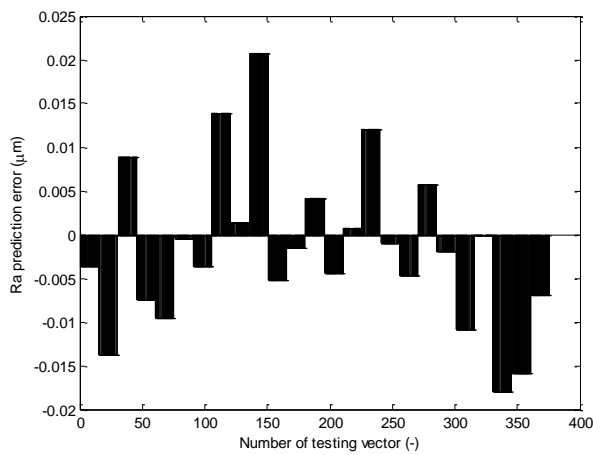
Rozdíl mezi naměřenými daty a výstupem modelu je vyjádřený v mikrometrech a procentech pro všech sedm testovaných umělých neuronových sítí. Výsledky jsou zobrazeny v grafech na obrázcích (Obr. 6.8 - Obr. 6.21).



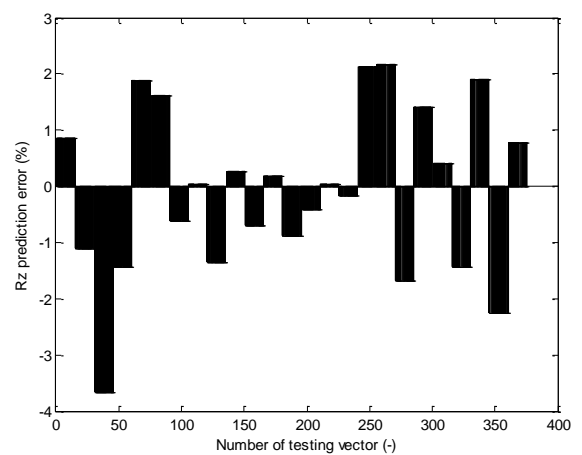
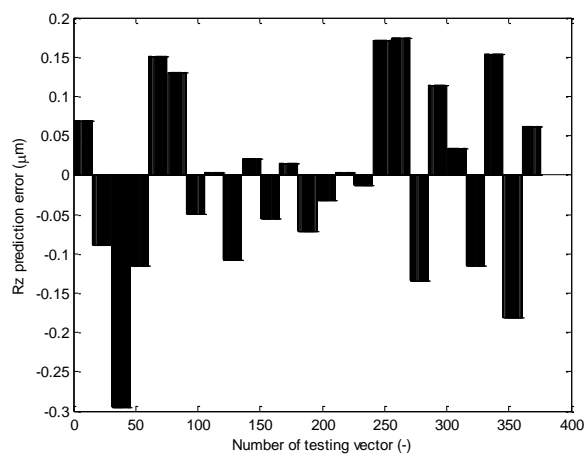
Obr. 6.8: Chyba ANN modelu net1 pro Ra v μm (vlevo) a % (vpravo)



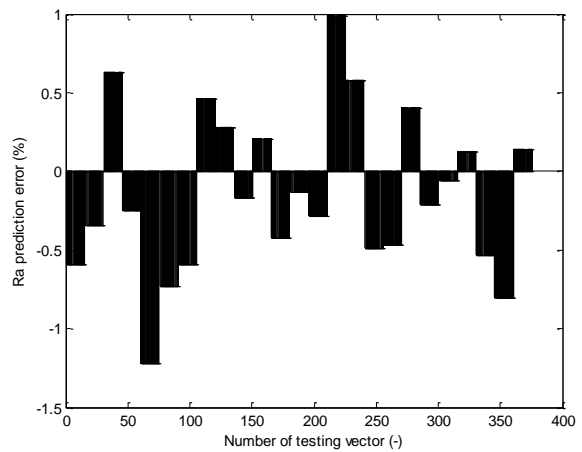
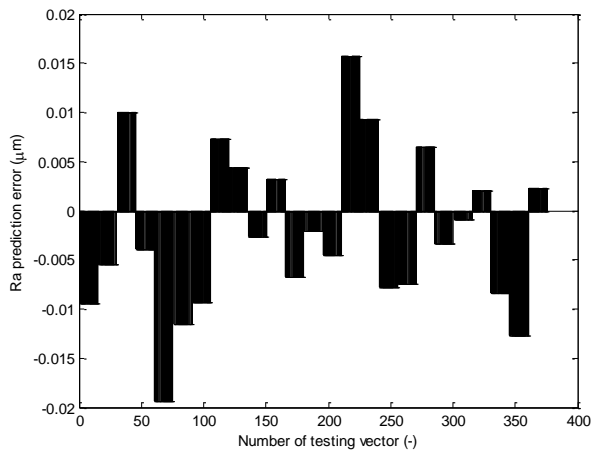
Obr. 6.9: Chyba ANN modelu net1 pro Rz v μm (vlevo) a % (vpravo)



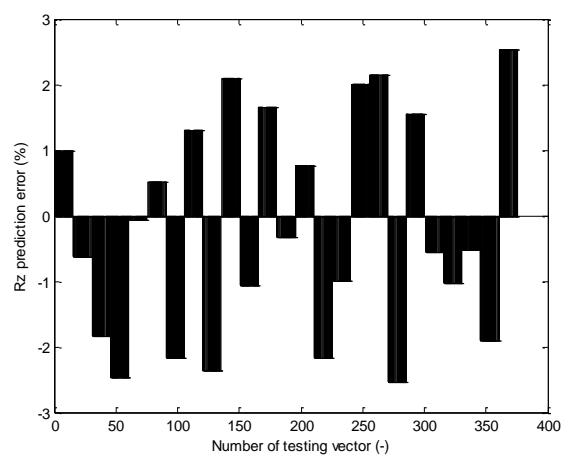
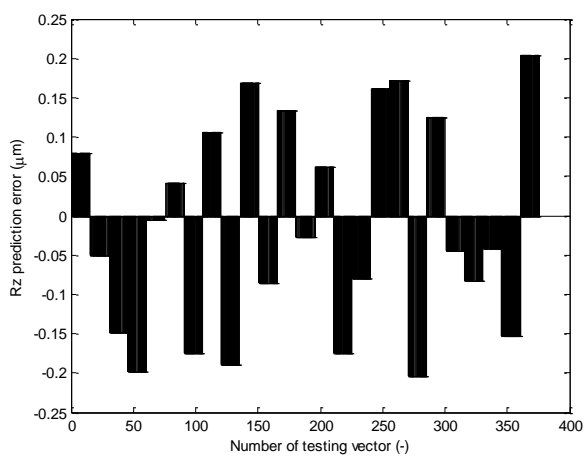
Obr. 6.10: Chyba ANN modelu net2 pro Ra v μm (vlevo) a % (vpravo)



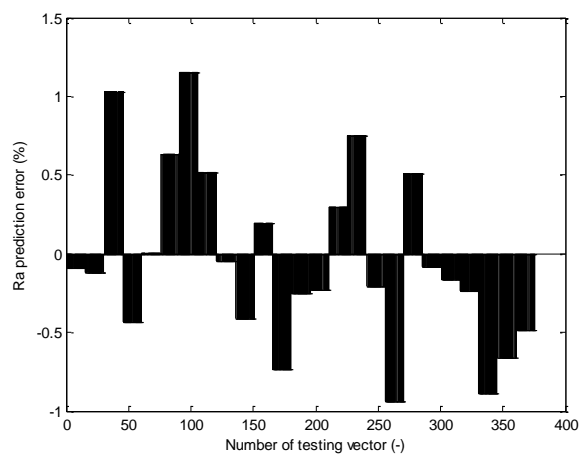
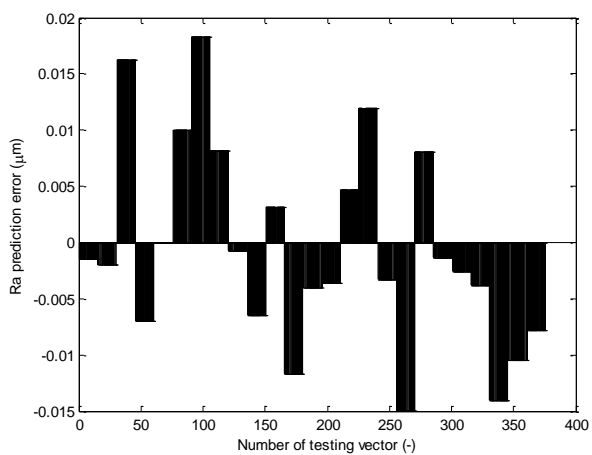
Obr. 6.11: Chyba ANN modelu net2 pro Rz v μm (vlevo) a % (vpravo)



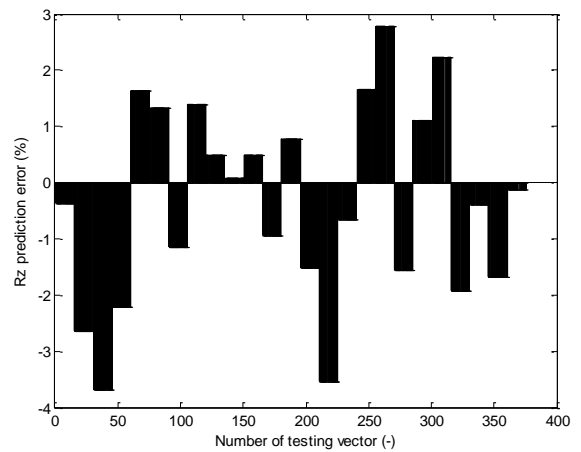
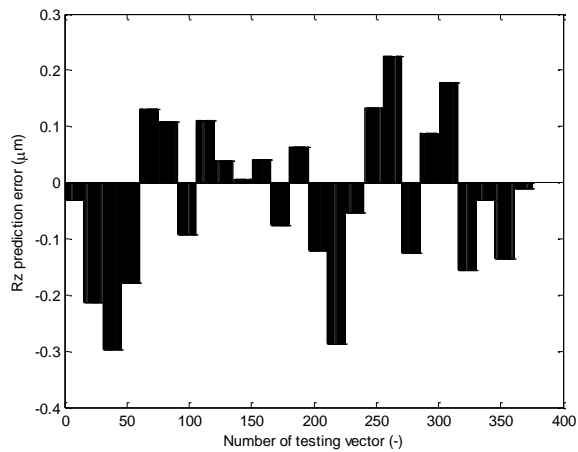
Obr. 6.12: Chyba ANN modelu net3 pro Ra v μm (vlevo) a % (vpravo)



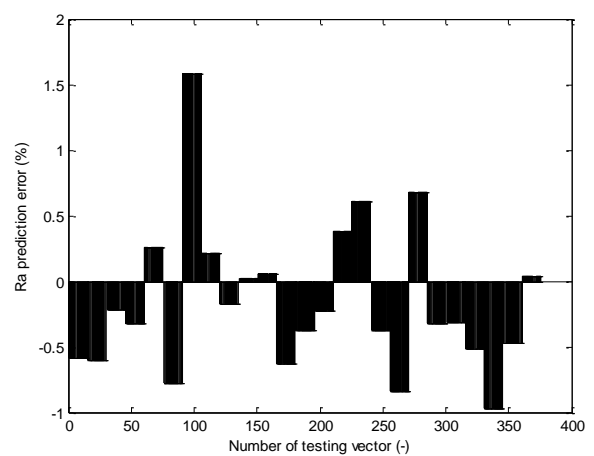
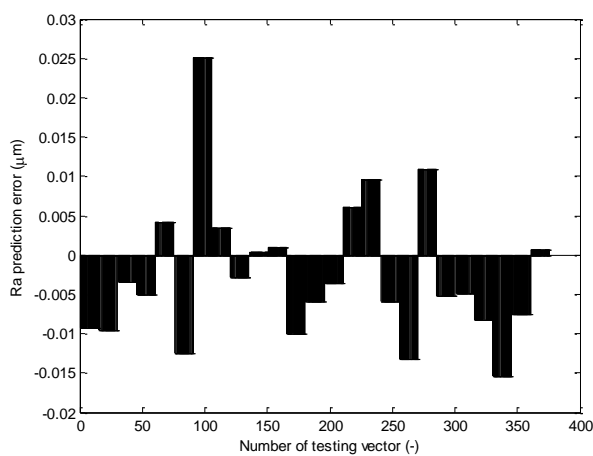
Obr. 6.13: Chyba ANN modelu net3 pro Rz v μm (vlevo) a % (vpravo)



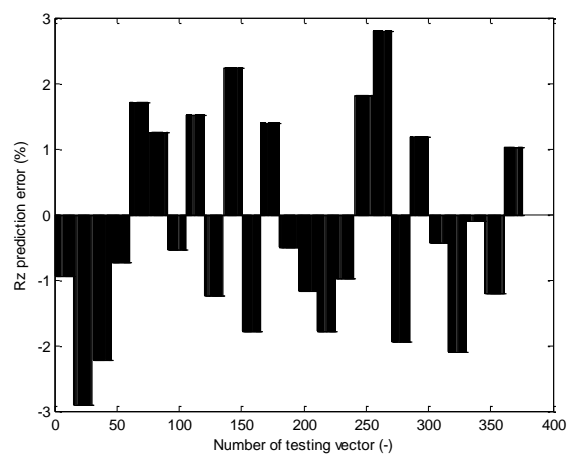
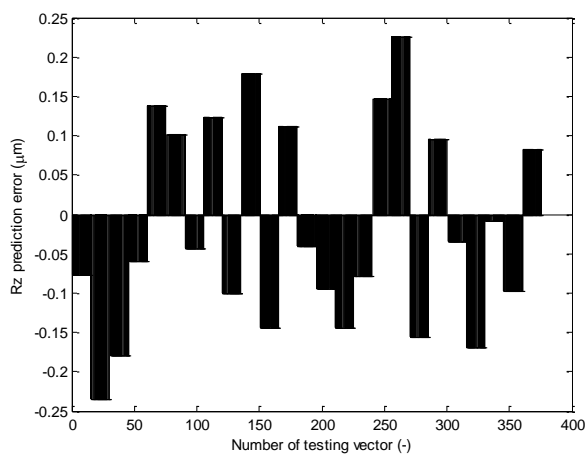
Obr. 6.14: Chyba ANN modelu net4 pro Ra v μm (vlevo) a % (vpravo)



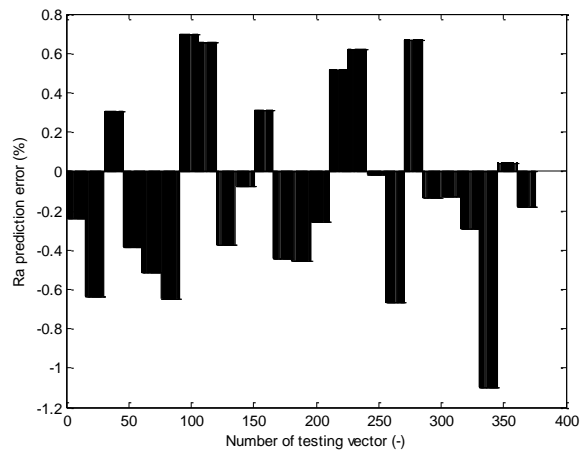
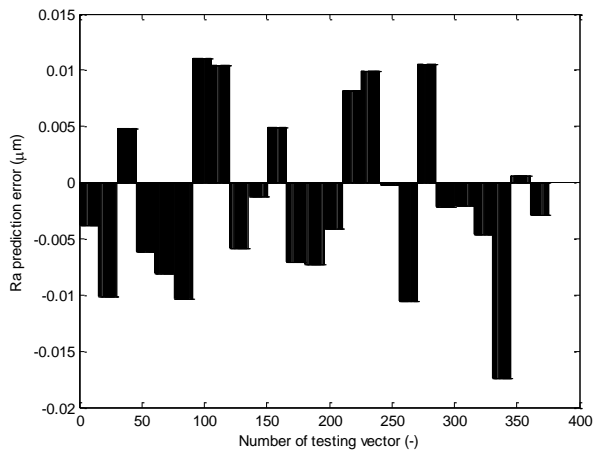
Obr. 6.15: Chyba ANN modelu net4 pro Rz v μm (vlevo) a % (vpravo)



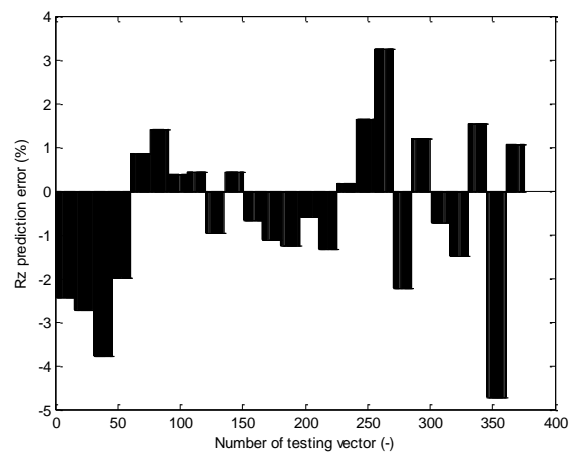
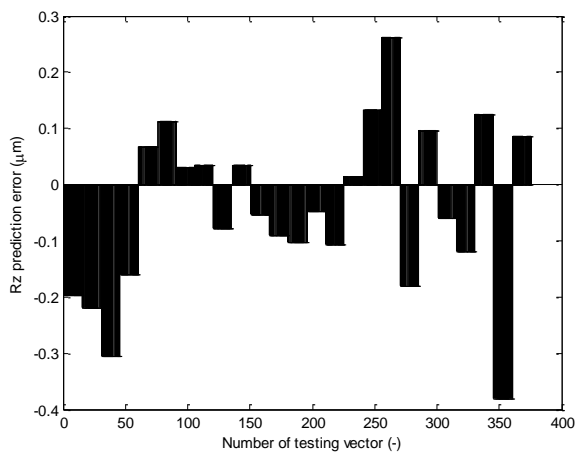
Obr. 6.16: Chyba ANN modelu net5 pro Ra v μm (vlevo) a % (vpravo)



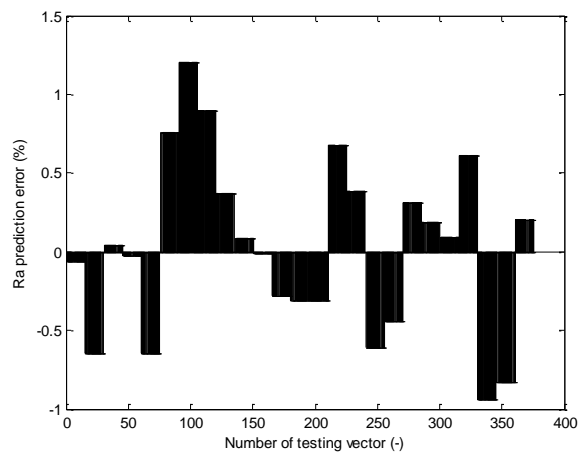
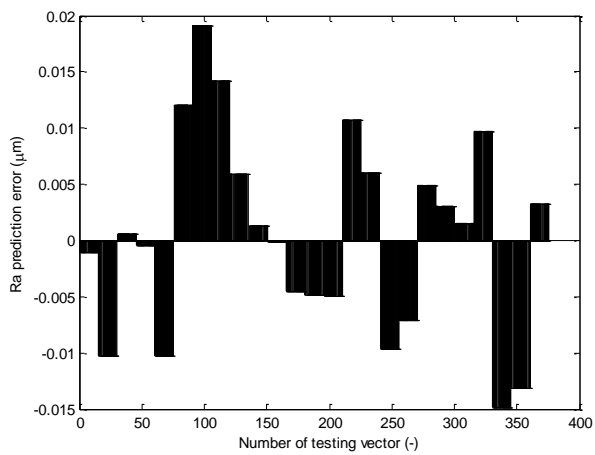
Obr. 6.17: Chyba ANN modelu net5 pro Rz v μm (vlevo) a % (vpravo)



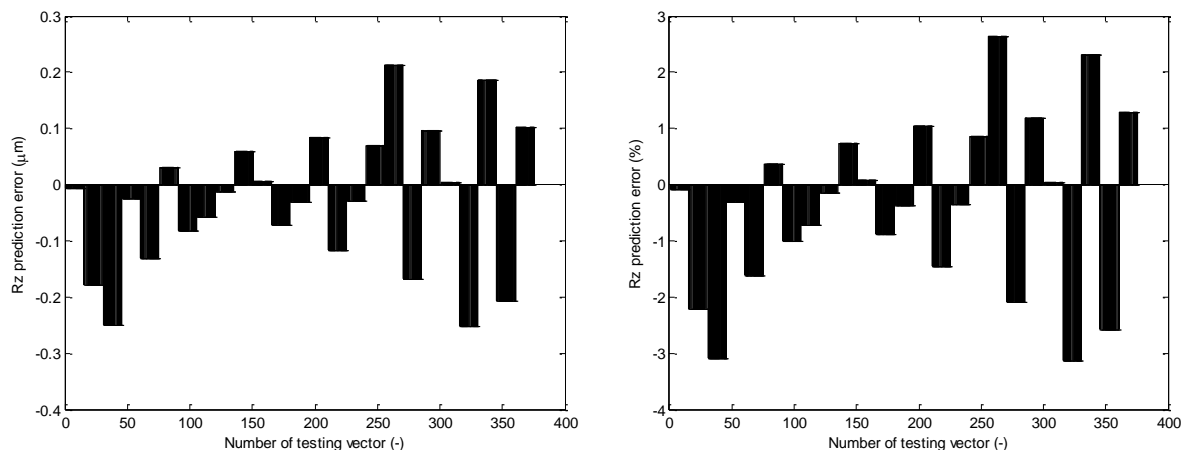
Obr. 6.18: Chyba ANN modelu net6 pro Ra v μm (vlevo) a % (vpravo)



Obr. 6.19: Chyba ANN modelu net6 pro Rz v μm (vlevo) a % (vpravo)



Obr. 6.20: Chyba ANN modelu net7 pro Ra v μm (vlevo) a % (vpravo)



Obr. 6.21: Chyba ANN modelu net7 pro Rz v μm (vlevo) a % (vpravo)

Za účelem číselného vyjádření přesnosti shody jsou definovány u všech prediktorů následující kritéria. Průměrné absolutní hodnoty rozdílů predikce pro Ra jsou J_{Ra} a pro Rz J_{Rz} ,

$$J_{Ra} = \frac{\sum_{i=1}^n |t(i) - y(i)|}{n} \quad (6.1)$$

$$J_{Rz} = \frac{\sum_{i=1}^n |t(i) - y(i)|}{n} \quad (6.2)$$

kde n je počet měření, t označuje cílovou (naměřenou) hodnotu a y je predikovaná hodnota (výstup z ANN modelu).

Protože je také důležité sledovat extrémy v predikční nepřesnosti, je udávána maximální predikční chyba pro Ra E_{Ra} a pro Rz jde o E_{Rz} .

Výsledky daných parametrů uvádí Tabulka 6.2.

Tabulka 6.2 Porovnání prediktorů

ANN model	J_{Ra} (μm)	J_{Rz} (μm)	E_{Ra} (μm)	E_{Rz} (μm)
net1	0,0145	0,1112	0,0431	0,2061
net2	0,0071	0,0946	0,0207	0,2951

net3	0,0070	0,1165	0,0194	0,2044
net4	0,0070	0,1171	0,0183	0,2963
net5	0,0073	0,1143	0,0251	0,2343
net6	0,0066	0,1238	0,0174	0,3815
net7	0,0069	0,0986	0,0192	0,2522

Z výsledků je patrné, že nalezení univerzálního modelu je vzhledem k rozdílným výsledkům obtížné. Sestavené ANN modely splňují daná kritéria různou mírou, takže lze nalézt čtyři optimální modely. Proto je dále uvažována vícenásobná rozhodovací metoda, která každému z kritérií přiřadí stejnou váhu. Jednotlivým modelům/kritériím je přiřazeno ordinální číslo, kde nejnižší součet bodů nalezne optimum. Jak je možné vidět v tabulce (Tabulka 6.3), nejlepší skóre dosahuje ANN model sítě net7.

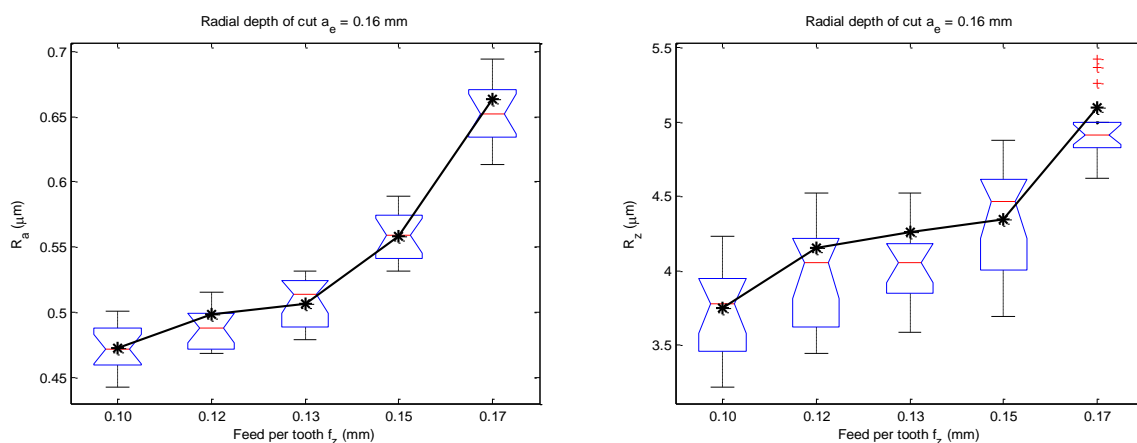
Tabulka 6.3 Rozhodovací váhová metoda

ANN model	$J_{Ra} (-)$	$J_{Rz} (-)$	$E_{Ra} (-)$	$E_{Rz} (-)$	Σ
net1	7	3	7	2	19
net2	5	1	5	5	16
net3	3	5	4	1	13
net4	3	6	2	6	17
net5	6	4	6	3	19
net6	1	7	1	7	16
net7	2	2	3	4	11

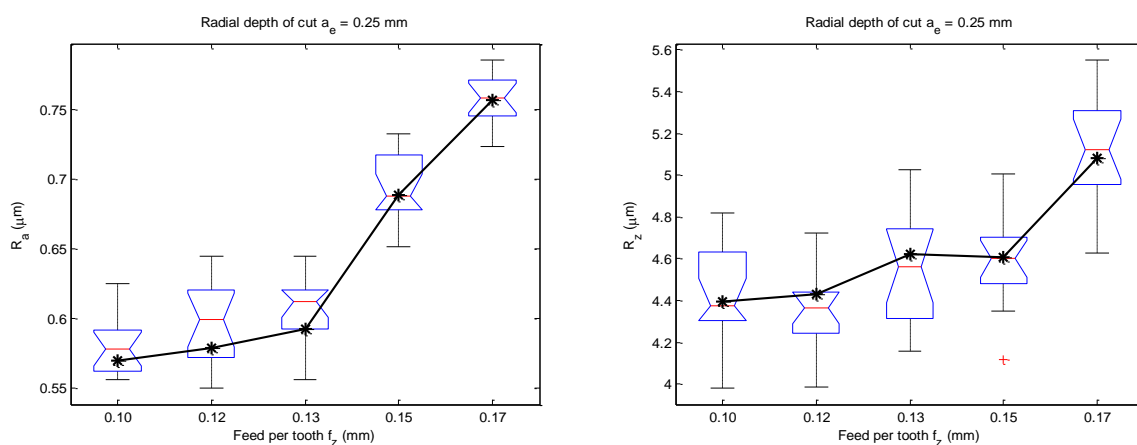
V uváděných krabicových diagramech (Obr. 6.22 - Obr. 6.26) je možné vidět naměřené hodnoty parametrů drsnosti Ra a Rz (cílová data). Prostřední čára v poli se symbolem x představuje medián. Hranice boxů představují první a třetí kvartily, což je 50 % všech naměřených hodnot. Oblast mezi prvním a třetím

kvartilem označuje rozmezím mezi kvartily (IQR). Extrémní hodnoty (1,5 x mezikvartilového rozsahu) jsou mezní linie, což je 25 % nejnižších a nejvyšších hodnot. Body, které jsou umístěny ve vzdálenosti větší než 1,5 x IQR od střední jsou zobrazeny jako +. Tyto body představují odlehlá měření.

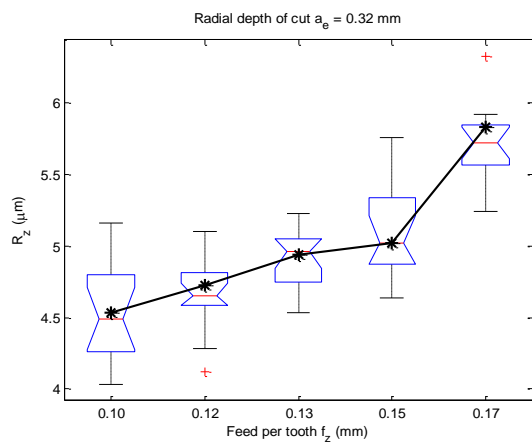
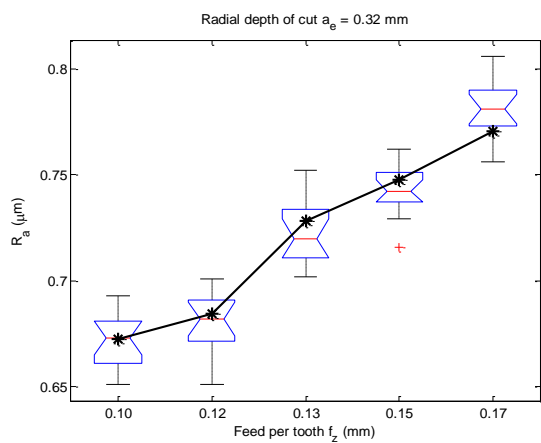
Predikované hodnoty R_a a R_z jsou znázorněny hvězdičkami a jsou navzájem proloženy čarou. V grafech jsou uváděna srovnání naměřených dat a predikovaných hodnot pro ANN model net7.



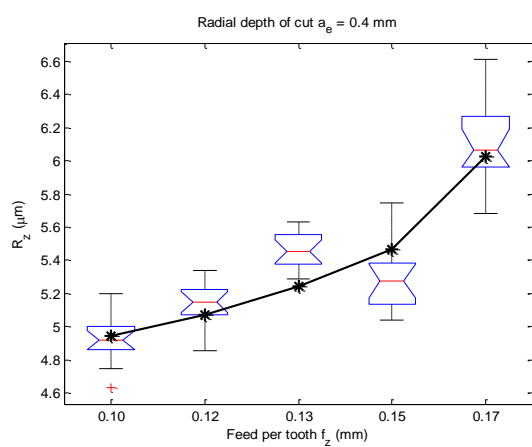
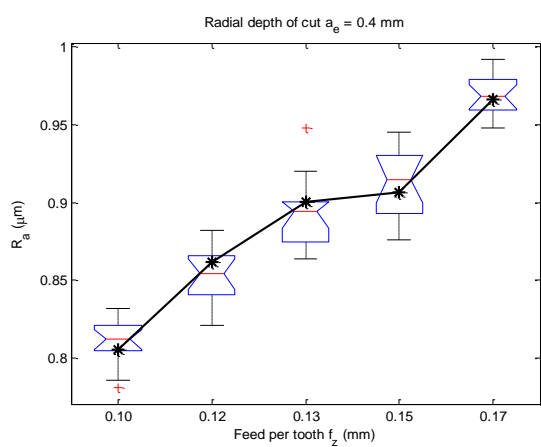
Obr. 6.22: Predikce a naměřená data R_a , R_z pro net7, $a_e=0,16$ mm



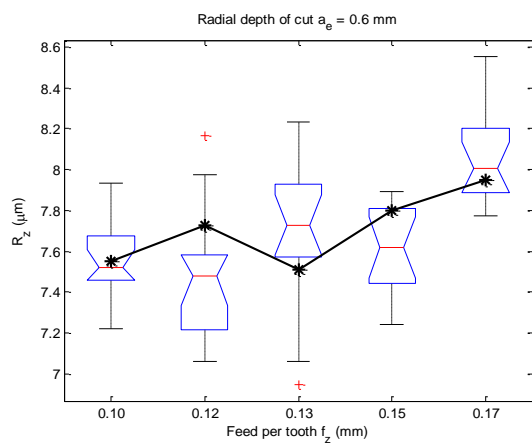
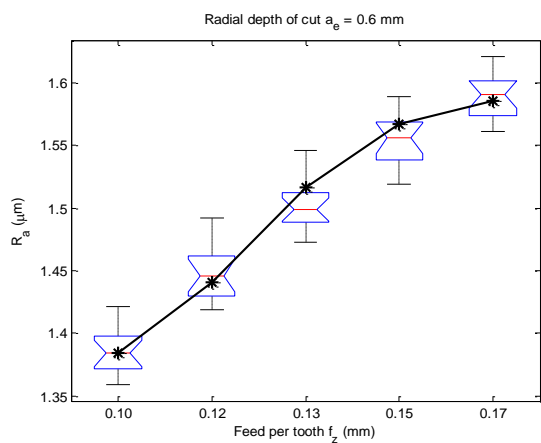
Obr. 6.23: Predikce a naměřená data R_a , R_z pro net7, $a_e=0,25$ mm



Obr. 6.24: Predikce a naměřená data R_a , R_z pro net7, $a_e=0,32$ mm



Obr. 6.25: Predikce a naměřená data R_a , R_z pro net7, $a_e=0,40$ mm



Obr. 6.26: Predikce a naměřená data R_a , R_z pro net7, $a_e=0,60$ mm

6.2 VYHODNOCENÍ ANN MODELU

Z výše uvedených výsledků na obrázcích (Obr. 6.8 - Obr. 6.26) a v tabulce (Tabulka 6.3) poskytuje ANN model net7 uspokojivé výsledky. Maximální chyba predikce R_a a byla 0,0192 μm a 0,2522 μm pro R_z . Chyba predikce v procentech dosahuje nanejvýš 1,2 % pro R_a a 3,1 % pro R_z . Jde tedy o velmi dobrý výsledek. Průměrná hodnota chyby predikce byla 0,0069 μm pro R_a a 0,0986 μm pro R_z .

Na druhu stranu je třeba zmínit i ostatní prediktory - například ANN model net6 je vynikajícím modelem pro predikci R_a . Model dosahuje nejlepších výsledků podle kritérií J_{Ra} a E_{Ra} , ale současně je vzhledem k dosažené přesnosti špatný prediktorem R_z . Nejnižším průměrným rozdílem predikce J_{Rz} je dosaženo u modelu net2 s jednou skrytou vrstvou, dále pak model net3 je nositelem nejnižší hodnoty E_{Rz} .

Z uvedených výsledků lze odvozovat, že návrh modelů prediktorů technologického procesu jakým je frézování, je komplexní a ve všech případech musí být ANN modely verifikovány s výsledky experimentálních měření, pro zaručení jistoty a vhodnosti prediktorů. Navrhovaný prediktor na principu MFFNN může být považován za optimální pro získání popisu jakosti povrchu při CNC frézování. Kromě toho prediktor umožňuje predikci chování mimo oblast měřených dat.

7 PŘÍNOS PRÁCE PRO VĚDU A PRAXI

Modelování, predikci a optimalizaci jakosti povrchů skloněných a tvarových ploch po obrábění se věnuje pouze malé procento výzkumů. Na základě rešeršního rozboru lze pozorovat, že predikce jakosti povrchu mnohých teoretických modelů je zatížena výraznou chybou a aplikace je možná jen v omezeném rozsahu procesních, blíže též rezných podmínek. Navzdory tomuto faktu lze vysledovat vzrůstající využívání nových metod pro zpracování dat inženýrských procesů s využitím pokročilé statistiky, plánování experimentů a umělé inteligence.

Ve své habilitační práci jsem se proto zaměřil na tyto aktuální trendy a aplikoval jsem je pro modelování a optimalizaci procesu dokončovacího obrábění skloněných povrchů kulovou frézou. Nejdůležitější jsou výsledky při frézování ledeburické oceli 1.2379 (19 573), využívané jako materiál pro výrobu komplexních nástrojů a náradí, a dále hliníkové slitiny AW 7022, která nachází uplatnění při výrobě vulkanizačních forem. Z rozboru výsledků se potvrzují trendy chování sledovaných faktorů. Mezi významné identifikované faktory se řadí radiální hloubka řezu, jež v kombinaci s ostatními technologickými parametry má významný vliv na jakost povrchu. Tento výzkum by byl nedostatečný bez provedení několika rozborů a stanovení matematických modelů jak pomocí základních statistických metod a regresních závislostí. Práce přináší nové vědecké poznatky pro výše uváděné materiály. Vytvořil jsem a validoval čtyři modely pro mělké a strmé plochy za pomoci vícerozměrné statistiky a jejích metod. Dále také jsem naměřená data zpracoval do modelů nelineárních, tvořených umělými neuronovými sítěmi. Celkově jde o sedm modelů, sítí, kdy nejlepší navržená struktura sítě po verifikaci pracuje s maximální chybou 1,2 %. Vzhledem k vývoji v oblasti strojírenské výroby a prudkému zavádění automatizace se dá očekávat zvýšený zájem o dokončování povrchů frézováním na CNC strojích s konvenčním a hybridním způsobem výroby, a současně ve větší míře zavádění prvků adaptivního řízení, za účelem dosažení optimální jakosti povrchu regulací rezných parametrů během procesu obrábění.

Poznatky zjištěné v habilitační práci a vědeckém výzkumu přispívají k rozvoji a posunu v této oblasti strojírenské technologie. Výstupy nacházejí uplatnění při zpřesnění adaptivního řízení procesu výroby, k udržení požadované jakosti povrchu po obrábění. Komerčně dostupná řešení přicházejí od výrobců CNC obráběcích center, jež modely aplikují přímo do řídicího systému stroje. Navrhují několik ANN modelů jakosti povrchu s validací a doporučením jejich použití. Práce je vědeckým příspěvkem, identifikujícím významné činitele procesu obrábění a charakterizující vhodné metodologie pro aplikaci modelování a optimalizace jakosti povrchu. V řízení výrobního procesu se ve větší míře

předpokládá uplatňování metod umělé inteligence (ANN, hybridní modelování), stejně jako v ostatních nevýrobních sférách, nahrazujících lidský element naučeným a okamžitě se adaptujícím systémem. Současně jsou výstupy a metodologie výzkumu zprostředkovávány studentům ve výuce odborných předmětů strojírenské technologie (Strojírenská technologie I a II) a strojního programování obráběcích strojů (předmět CAM). Některé z výstupů jsou též uvedeny v knižní podobě [13], která je určena pro odbornou veřejnost i pedagogickou praxi.

8 ZÁVĚR

Požadavkem současného výrobního segmentu v oblasti strojírenské výroby je konkurenceschopnost v rámci celosvětového trhu, potřeba být produktivní, flexibilní a současně snižovat náklady na výrobu. Navzájem protikladné požadavky kvantity jsou dále následovány pochopitelnými požadavky kvalitativními, jež kladou na technologii výroby enormní nároky. Bez podrobného studia procesních vlivů, moderních metod řízení, precizních prediktivních modelů a optimalizace není možné pochopit technologický řetězec a zavádět progresivní výrobu. Společnými jmenovateli úspěšných výrobních podniků, i těch domácích ve Zlínském kraji, je zejména vysoký stupeň automatizace výroby, zaváděním CAx počítačových systémů, CNC číslicově řízených obráběcích strojů, víceosého automatizovaného obrábění, robotizace nejen v oblasti manipulace, výroba s využíváním HSC a HFM technologií a adaptivní metody řízení a logistiky.

Dvěma hlavními praktickými problémy výrobního procesu je zejména správná identifikace parametrů, které ovlivňují kvalitu výrobků a splnění technologických specifikací a maximalizace produktivity výrobního systému v rámci dostupných zdrojů. V technologii obrábění jde o problém s obtížným řešením, jehož rozhodovací proces je zatížen vysokým stupněm komplexnosti a mírou vzájemné interakce velkého počtu faktorů. Překonání problémů je postaveno na znalostech v daném oboru a expertízách. Výzkumníci navrhují modely pro simulace chování obráběcího procesu, je sledován vztah mezi příčinou a následkem současně mezi různými parametry procesu. Technologické pokroky, především spojené s rozvojem techniky a počítačů, umožňují v této oblasti sestavení stále přesnějších prediktivních modelů.

Dosahovat kvalitního povrchu výrobků je významné nejen z estetického ale především funkčního hlediska. Mechanismus tvorby nového povrchu při obrábění, zahrnuje závislé procesní parametry s mnoha náhodnými působícími faktory, a je téměř vždy v rozporu k přímému a jednoduchému řešení. Jakost povrchu je, a i do budoucna stále bude, důležitým hodnotícím indexem kvality povrchu výrobků a technickým předpisem v oblasti strojírenské výroby, jež musí výrobek splňovat. Důvodem, proč věnovat pozornost jakosti povrchu, je skutečnost, že jakost a stav povrchové vrstvy má vliv na tribologické, korozivní, únavové a elektrické vlastnosti povrchu. Proto jsem zaměřil svou výzkumnou a publikační činnost na toto důležité téma.

Vymezení poznatků, jež mohou přispět k lepšímu pochopení problematiky dokončování povrchů skloněných ploch při frézování kulovým nástrojem, se snaží přispět i tato habilitační práce. Bez podrobného studia dosavadního stavu vývoje a výzkumu v oblasti modelování a optimalizace procesu frézování

skloněných a tvarových ploch nelze naplňovat stále náročnější požadavky průmyslu. Dosavadní praxe předkládá několik modelů jakosti povrchu, jež lze aplikovat pro adaptivní řízení procesu výroby, optimální nastavení a predikci chování v závislosti na vstupních parametrech procesu. Rozbor ukazuje, že metodika modelování a optimalizace procesů přejímá způsoby zpracování z jiných i vzdálených oborů (např. sociální vědy, přírodní jevy, atd.). Stále více se uplatňují metody modelování a optimalizace za pomoci plánovaných experimentů a pokročilých statistických vyhodnocení, umělé inteligence a hybridních optimalizačních metod. V rešeršní části jsem se snažil postihnout a analyzovat celou oblast dosavadního výzkumu v oblasti modelování a optimalizace jakosti povrchu po frézování kulovou frézou. Pro praktickou aplikaci se však nenabízí dostatek validních modelů jakosti povrchu po frézování skloněných a tvarových ploch. Shrnutí uvádím v tabulce (Tabulka 2.2) s uvedením jejich matematických interpretací (2.10) – (2.23). Nelze opomenout ani kinematické modely jakosti povrchu, založené na teorii obrábění, které přes svou nízkou popisnost jsou základem pro pokročilé analýzy a validaci nových přístupů. Kinematické modely, stejně jako základní statistická analýza, identifikují také hlavní účinky, jež jsou pro tvorbu nového povrchu po obrábění významné. Svě nezastupitelné místo ve zpracování dat a predikci chování mají bezesporu umělé neuronové sítě. Jednou z jejich předností je možnost zpracovávat data pro velké množství vstupních i výstupních parametrů.

Současným trendem je zpracování dat, predikce chování a optimalizace pomocí soft computing³, které tvoří pozoruhodnou paralelu mezi schopnostmi lidské mysli přemýšlet a učit se. Jde o netradiční přístupy v řešení obtížných problémů, zahrnující techniky fuzzy logiky, umělých neuronových sítí (ANN), genetických algoritmů (GA), pravděpodobnostního uvažování a hybridních přístupů (kombinace ANN, fuzzy logiky a GA). Je to správná cesta na poli predikce jakosti povrchu, uvážíme-li, že metody soft computingu pracují s neurčitostí a ovlivnitelnou mírou tolerance pro nepřesnost a stochastiku vlivů procesu obrábění. V případě frézování, jak uvádí Chandrasekaran [57], se budou více nasazovat systémy typu ANFIS (adaptive neurofuzzy interference system), genetického programování (GP), fuzzy logika a optimalizace částicových rojů (particle swarm optimization) pro predikci jakosti povrchu ale i opotřebení nástroje, řezných sil a optimalizaci procesu frézování. Metodám soft computingu se dostává pozornosti výzkumníků pro jejich potenciál vyrovnat se s vysokou nelinearitou, vícerozměrností a neurčitým komplexním chováním inženýrských

³ Pozn.: Soft computing nemá český ekvivalent.

procesů. Na druhou stranu chybí možnost kontroly metodiky predikce a systém se chová jako uzavřená černá skříňka.

Technologie obrábění povrchů frézováním neztrácí svou důležitost ani jako dokončovací operace. Při dokončovacím frézování se dosahuje stupně přesnosti až IT 7 (Ra 0,8 μm) s běžně dostupnými nástrojovými a strojními možnostmi. Snahou je minimalizovat až zamezit následné dokončování povrchů pomocí broušení, jež do povrchové vrstvy zanáší nežádoucí teplotní a napěťové stavy (reziduální napětí). Nejenom to, při replikaci povrchů polymerních součástí ze stěny formy se zjišťuje, že vzhledem k morfologii makromolekulárních řetězců není opodstatněné pro zvýšené požadavky na jakost povrchu. Od určité hranice, zjistil Čop [35], dané např. u vstřikování materiálu ABS (Magnum 3453) nelze dosáhnout povrchové jakosti Ra výrobku nižší než 0,1 μm , přestože jakost povrchu tvarové dutiny je výrazně lepší. Stejně tak Staněk [94], [95] potvrzuje tato tvrzení jak pro termoplastové tak elastomerové spotřební výrobky. Vysoké požadavky na dokončovací operace bez výraznějšího efektu na povrch polymerní součásti zdražují a prodlužují výrobu nástroje. Frézování přestává být zanedbávanou technologií a s příchodem moderních modelovacích a optimalizačních technik je možné odstranit nejistotu výsledku.

Popisované tematické se autor uvažuje věnovat i v budoucnosti se zaměřením na zpřesnění a rozšíření modelů jakosti o více vstupních parametrů. Dalším souvisejícím výhledem v oblasti výzkumu je optimalizace G-kódu. Je opomíjeným faktorem při výrobě na CNC strojích, avšak mající podstatný vliv jakost, přesnost a efektivitu výroby komplexních nástrojů a součástí.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] AGARWAL, Nitin. Surface Roughness Modeling with Machining Parameters (Speed, Feed & Depth of Cut) in CNC Milling. *MIT International journal of mechanical Engineering*, 2012, Vol. 2, No. 1, pp 55-61.
- [2] ALTINTAS, Y. and MONTGOMERY, D. Mechanism of cutting force and surface generation in dynamic milling. *Journal of Engineering for Industry*, 1991, Vol. 113, No.2, pp. 160-168.
- [3] ARIZMENDI, M., et al. Model development for the prediction of surface topography generated by ball-end mills taking into account the tool parallel axis offset. Experimental validation. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 2008, Vol. 57, No.1, pp. 101-104.
- [4] ARIZMENDI, Miguel, et al. Effect of tool setting error on the topography of surfaces machined by peripheral milling. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2009, Vol. 49, No. 1, pp. 36-52.
- [5] BAEK, Dae Kyun, KO, Tae Jo and KIM, Hee Sool. Optimization of feedrate in a face milling operation using a surface roughness model. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2001, Vol. 41, No.3, pp. 451-462.
- [6] BALÁZS, Mikó. Study on tolerance of shape and orientation in case of shoulder milling. In : W. ZEBALA, I. Manková (ed.), *Development in machining technology*. Vol. 5. Cracow : Cracow University of Technology, 2015. p. 136–150. ISBN 9788372428448.
- [7] BAPTISTA, R. and SIMOES, JF Antune. Three and five axes milling of sculptured surfaces. *Journal of materials processing technology*, 2000, Vol. 103, No. 3, pp. 398-403.
- [8] BASSACH, P., QUINTANA, G., FERRER, I. and CIURANA, J. Studying the relation between corrosion and surface roughness. In : MARCOS, M AND SALGUERO, J (ed.), *AIP Conference Proceedings*. USA : AMER INST PHYSICS, 2012. p. 319–327. AIP Conference Proceedings. ISBN 9780735410176.
- [9] BENARDOS, P. G. and VOSNIAKOS, G. C. Predicting surface roughness in machining: A review. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2003. Vol. 43, no. 8, p. 833–844. DOI 10.1016/S0890-6955(03)00059-2.
- [10] BEŇO, Jozef, MAŇKOVÁ, Ildikó, DRAGANOVSKÁ, Dagmar and IŽOL, Peter. Sampling Based Assessment of the Free-Form Milling Strategies. *Key Engineering Materials* [online]. February 2016. Vol. 686, p. 51–56. [Accessed 15 March 2017].

- DOI 10.4028/www.scientific.net/KEM.686.51. Available from:
<http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84959288092&partnerID=tZOtx3y1>
- [11] BEŇO, Jozef, MAŇKOVÁ, Ildikó, IŽOL, Peter and VRABEL', Marek. An approach to the evaluation of multivariate data during ball end milling free-form surface fragments. *Measurement* [online]. 2016. Vol. 84, p. 7–20. DOI 10.1016/j.measurement.2016.01.043. Available from:
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263224116000683>.
- [12] BEŇO, Jozef, MIKÓ, Balázs, MAŇKOVÁ, Ildikó and VRABEL', Marek. Influence of Tool Path Orientation on the Surface Roughness when End Ball Milling Rounded Surfaces. *Key Engineering Materials* [online]. October 2013. Vol. 581, p. 329–334. [Accessed 16 February 2016]. DOI 10.4028/www.scientific.net/KEM.581.329. Available from:
http://apps.webofknowledge.com/full_record.do?product=UA&search_mode=GeneralSearch&qid=4&SID=P1tAbA2WfLmQaMOR2Fi&page=1&doc=1.
- [13] BÍLEK, Ondřej a Imrich LUKOVICS. *Výrobní inženýrství a technologie*. Zlín: Univerzita Tomáše Bati, 2014, 173 s. ISBN 978-80-7454-471-2.
- [14] BÍLEK, Ondřej, JAVOŘÍK, Jakub and SÁMEK, David. Statistical analysis of surface roughness in grinding of titanium. In : *Proceedings Latest Trends on Systems. Rhodes : Europment*, 2014, p. 184-188. ISBN 978-1-61804-243-9.
- [15] BÍLEK, Ondřej and LUKOVICS, Imrich. Simulation of Grinding Process. In : *Proceedings: International Multidisciplinary Conference 2011*. Nyiregyháza : Bessenyei Publishing House, 2011, p. 49-54. ISBN 978-615-5097-18-8.
- [16] BÍLEK, Ondřej, LUKOVICS, Imrich, SÁMEK, David. FEM application for productive highspeed grinding. In : *Development in Machining Technology*. Cracow : Cracow University of Technology, 2011, p. 128-136. ISBN 978-83-7242-640-6.
- [17] BÍLEK, Ondřej and SÁMEK, David. Neural networks in modeling of CNC milling of moderate slope surfaces. In : *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 285. Heidelberg : Springer-Verlag Berlin, 2014, p. 75-83. ISSN 2194-5357. ISBN 978-3-319-06739-1.
- [18] BÍLEK, Ondřej and SÁMEK, David. Study of CNC Milling Methods Used in Casting Pattern Production. In : *Development in Machining Technology*. Cracow, Polsko : Cracow University of Technology, 2013, p. 119-129. ISBN 978-83-7242-697-0.

- [19] BÍLEK, Ondřej and VAŠINA, Martin. CNC milling and manufacturing of groove shapes for light reflection measurement. *Manufacturing Technology*, 2014, Vol. 14, No. 4, pp. 516-522. ISSN 1213-2489.
- [20] BÍLEK, Ondřej and VAŠINA, Martin. Influence of machined surface shape on light absorption. *MM Science Journal*, 2017, Vol. 2017, No. JUNE, pp. 1851-1854. ISSN 1803-1269.
- [21] BÍLEK, Ondřej, FOJTL, Ladislav, PATA, Vladimír and ČOP, Jiří. Supramolecular structure of polymers and its effect on surface quality of injection molded parts using various surface quality of cavities. *Manufacturing Technology*, 2016, Vol. 16, No. 5, pp. 874-879. ISSN 1213-2489.
- [22] BÍLEK, Ondřej, JAVOŘÍK, Jakub and LUKOVICS, Imrich. Manufacturing technology of prosthetic parts: 3-axis CNC milling of master model. *International Journal of Mechanics*, 2015, Vol. 9, pp. 105-111. ISSN 1998-4448.
- [23] BÍLEK, Ondřej, LUKOVICS, Imrich and ROKYTA, Luboš. The Effect of CO2 Cooling on the Mean Roughness of Machined Surfaces in case of Polymers and Metals. In : *13th International Conference on Tools*. Miskolc : University of Miskolc, 2012, pp. 197-202. ISBN 978-963-9988-35-4.
- [24] BÍLEK, Ondřej, LUKOVICS, Imrich, PETŘÍK, Václav, PECHÁČEK, Miroslav, KOLÁŘ, David, MATULA, Lukáš and STRUŠKA, Ondřej. The Effect of Abrasive Conditions on the Surface Roughness and Cutting Forces in case of Polymers and Metals. In : *PLASTKO 2012*. Zlín : Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2012, pp. 266-270. ISBN 978-80-7454-137-7.
- [25] BÍLEK, Ondřej, PÁČ, Jiří, LUKOVICS, Imrich and ČOP, Jiří. CNC Machining: An Overview of Available CAM Processors. In : *Development in Machining Technology*. Cracow : Cracow University of Technology, 2014, pp. 75-89. ISBN 978-83-7242-765-6.
- [26] BÍLEK, Ondřej, RUSNÁKOVÁ, Soňa and ŽALUDEK, Milan. Cutting-tool performance in the end milling of carbon-fiber-reinforced plastics. *Materiali in Tehnologije*, 2016, Vol. 50, No. 5, pp. 819-822. ISSN 1580-2949.
- [27] BÍLEK, Ondřej, SÁMEK, David and ŠUBA, Oldřich. Investigation of Surface Roughness while Ball Milling Process. *Key Engineering Materials* [online]. October 2013. Vol. 581, p. 335–340. [Accessed 26 October 2017]. DOI 10.4028/www.scientific.net/KEM.581.335. Available from: http://apps.webofknowledge.com/full_record.do?product=UA&search_m

ode=OneClickSearch&qid=8&SID=N1qULLkenIELavBxEtL&page=1&doc=5.

- [28] BÍLEK, Ondřej, SMETKA, Pavel and BAŽUROVÁ, Jitka. Deflection of complex geometry cutting tools. *Manufacturing Technology*, 2017, Vol. 17, No. 6, s. 830-836. ISSN 1213-2489.
- [29] BUJ-CORRAL, Irene, VIVANCOS-CALVET, Joan and DOMINGUEZ-FERNANDEZ, Alejandro. Surface topography in ball-end milling processes as a function of feed per tooth and radial depth of cut. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2012. Vol. 53, no. 1, p. 151–159. DOI 10.1016/j.ijmachtools.2011.10.006.
- [30] BUSTILLO, Andres, DÍEZ-PASTOR, José Francisco, QUINTANA, Guillem and GARCÍA-OSORIO, César. Avoiding neural network fine tuning by using ensemble learning: Application to ball-end milling operations. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2011. Vol. 57, no. 5–8, p. 521–532. DOI 10.1007/s00170-011-3300-z.
- [31] CEPOVA, L., SOKOVA, D., MALOTOVA, S., GAPINSKI, B. and CEP, R. Evaluation of cutting forces and surface roughness after machining of selected materials. *Manufacturing Technology*. 2016. Vol. 16, no. 1, p. 45–48.
- [32] CERNY, Jakub, MANAS, David, HOLIK, Zdenek, OVSÍK, Martin, BEDNARIK, Martin, MIZERA, Ales, MANAS, Miroslav and STANEK, Michal. Methods of design of ergonomics parts. *International Journal of Mathematics and Computers in Simulation* [online]. 2013. Vol. 7, no. 1, p. 17–24. Available from:
<http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84872163627&partnerID=tZOtx3y1>.
- [33] COKER, Scott A. and SHIN, Yung C. In-process control of surface roughness due to tool wear using a new ultrasonic system. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 1996, Vol. 36, No. 3, pp. 411-422.
- [34] ČOP, Jiří, FOJTL, Ladislav, BÍLEK, Ondřej and PATA, Vladimír. Influence of finishing operations and melt flow index on surface quality of injection molded parts. *Manufacturing Technology*, 2016, Vol. 16, No. 2, pp. 334-338. ISSN 1213-2489.
- [35] ČOP, Jiří. *Výzkum vlivu technologických podmínek na jakost plastikářského nástroje a polymerních výrobků*. 2016, 137 s. Dostupné také z: <http://hdl.handle.net/10563/39327>
- [36] ČSN EN ISO 2517-2. *Geometrické specifikace produktu (GPS) - Textura povrchu: Plocha - Část 2: Termíny, definice a parametry textury povrchu*.

- Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a a státní zkušebnictví, 2012. 52 s. Třídící znak 01 4451.
- [37] ČSN EN ISO 8785. *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Nedokonalosti povrchu - Termíny, definice a parametry*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a a státní zkušebnictví, 2000. 24 s. Třídící znak 01 4456.
- [38] ČSN ISO 4287. *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Struktura povrchu: Profilová metoda - Termíny, definice a parametry struktury povrchu*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a a státní zkušebnictví, 1999. 24 s. Třídící znak 01 4450.
- [39] ČSN ISO 4288. *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Struktura povrchu: Profilová metoda - Pravidla a postupy pro posuzování struktury povrchu*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a a státní zkušebnictví, 1999. 24 s. Třídící znak 01 4450.
- [40] DAYMI, A, BOUJELBENE, M, LINARES, J M, BAYRAKTAR, E and AMARA, A Ben. Influence of workpiece inclination angle on the surface roughness in ball end milling of the titanium alloy Ti-6Al-4V. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*. 2009. Vol. 35, no. 1, p. 79–86.
- [41] DE SOUZA, Adriano Fagali, DINIZ, Anselmo Eduardo, RODRIGUES, Alessandro Roger and COELHO, Reginaldo Teixeira. Investigating the cutting phenomena in free-form milling using a ball-end cutting tool for die and mold manufacturing. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2014. Vol. 71, no. 9–12, p. 1565–1577. DOI 10.1007/s00170-013-5579-4.
- [42] DHOKIA, Vimal G., KUMAR, Sanjeev, VICHARE, Parag and NEWMAN, Stephen T. An intelligent approach for the prediction of surface roughness in ball-end machining of polypropylene. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 2008. Vol. 24, no. 6, p. 835–842. DOI 10.1016/j.rcim.2008.03.019.
- [43] DÍEZ-PASTOR, José Francisco, BUSTILLO, Andres, QUINTANA, Guillem and GARCÍA-OSORIO, César. Boosting Projections to improve surface roughness prediction in high-torque milling operations. *Soft Computing*. 2012. Vol. 16, no. 8, p. 1427–1437. DOI 10.1007/s00500-012-0846-0.
- [44] DIN 4760:1982-06. *Form deviations; Concepts; Classification system (Gestaltabweichungen; Begriffe, Ordnungssystem)*. Berlin: Deutsches Institut für Normung e. V., 1982. 3 p.
- [45] DINIZ, Anselmo Eduardo and CALDEIRANI FILHO, José. Influence of the relative positions of tool and workpiece on tool life, tool wear and

- surface finish in the face milling process. *Wear*, 1999, Vol. 232, No. 1, pp. 67-75.
- [46] FAN, Jianhua. Cutting speed modelling in ball nose milling applications. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2014. Vol. 73, no. 1–4, p. 161–171. DOI 10.1007/s00170-014-5672-3.
- [47] FELHŐ, Csaba, KARPUSCHEWSKI, Bernhard and KUNDRÁK, János. Surface Roughness Modelling in Face Milling. *Procedia CIRP* [online]. 2015. Vol. 31, p. 136–141. [Accessed 16 February 2017]. DOI 10.1016/j.procir.2015.03.075. Available from: http://apps.webofknowledge.com/full_record.do?product=UA&search_mode=GeneralSearch&qid=14&SID=P1tAbA2WfLmQaMOR2Fi&page=1&doc=1.
- [48] FIALA, Z., JAROS, A., SEDLAK, J., KOLAR, L. and BLAZKOVA, V. Effect of spindle unit extrusion on stability of machining process. *Manufacturing Technology*. 2015. Vol. 15, no. 3, p. 329–333.
- [49] HEISEL, Uwe and MILBERG, Joachim. Vibrations and surface generation in slab milling. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 1994, Vol. 43, No. 1, pp. 337-340.
- [50] HOSSAIN, Md Shahriar Jahan and AHMAD, Nafis. Surface roughness prediction modelling for commercial dies using ANFIS, ANN and RSM. *International Journal of Industrial and Systems Engineering*, 2014, Vol. 16, No. 2, pp. 156-183.
- [51] HOSSAIN, S. J. and AHMAD, Nafis. Surface roughness prediction modeling for AISI 4340 after ball end mill operation using artificial intelligence. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 2012, Vol. 3, No.5, pp. 1-10.
- [52] HOSSAIN, SHAHRIAR JAHAN and AHMAD, NAFIS. Artificial intelligence based surface roughness prediction modeling for three dimensional end milling. *International Journal of Advanced Science and Technology*, 2012, Vol. 45, pp. 1-18.
- [53] HOSSAIN, Shahriar Jahan and AHMAD, Nafis. Surface Roughness Prediction Model for Ball End Milling Operation Using Artificial Intelligence. *Management Science and Engineering*, 2012, Vol. 6, No. 2, pp 41-54.
- [54] HOSSAIN, Shahriar Jahan and LIAO, Warren. Cutting Parameter Optimization for End Milling Operation Using Advanced Metaheuristic Algorithms. *International Journal of Advanced Robotics and Automation*. 2017. Vol. 2, no. 1, p. 1–12.
- [55] HRICOVA, Julia and NAPRSTKOVA, Natasa. Surface roughness optimization in milling aluminium alloy by using the Taguchi's design of

- experiment. *Manufacturing Technology* [online]. 2015. Vol. 15, no. 4, p. 541–546. Available from: <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84949221230&partnerID=tZOtx3y1>.
- [56] CHAHAL, Mandeep, SINGH, Vikram, GARG, Rohit and KUMAR, Sudhir. Surface Roughness Optimization Techniques of CNC Milling : A Review. *International Journal of Scientific and Engineering Research*. 2012. Vol. 3, no. 12, p. 1–17.
- [57] CHANDRASEKARAN, M., MURALIDHAR, M., KRISHNA, C. Murali and DIXIT, U. S. Application of soft computing techniques in machining performance prediction and optimization: A literature review. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2010. Vol. 46, no. 5–8, p. 445–464. DOI 10.1007/s00170-009-2104-x.
- [58] CHEN, Jenq Shyong, HUANG, Yung Kuo and CHEN, Mao Son. A study of the surface scallop generating mechanism in the ball-end milling process. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2005. Vol. 45, no. 9, p. 1077–1084. DOI 10.1016/j.ijmachtools.2004.11.019.
- [59] IZOL, Peter, FABIAN, Michal, KOPAS, Melichar, FEDORKO, Gabriel and FABIANOVA, Jana. Evaluation of surface milling strategies using selected elements of machined shapes of forging die cavities. *Manufacturing Technology* [online]. 2014. Vol. 14, no. 2, p. 178–186. Available from: <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84907333351&partnerID=tZOtx3y1>
- [60] JATTI, VijayKumar S., SEKHAR, Ravi and PATIL, R. K. Study of ball nose end milling of LM6 Al alloy: Surface roughness optimisation using genetic algorithm. *International Journal of Engineering and Technology*. 2013. Vol. 5, no. 3, pp. 2859–2865.
- [61] KADIRGAMA, K., NOOR, M. M. and ABD ALLA, Ahmed N. Response ant colony optimization of end milling surface roughness. *Sensors*. 2010. Vol. 10, no. 3, p. 2054–2063. DOI 10.3390/s100302054.
- [62] KHORASANI, A Mahyar and YAZDI, M Reza Soleymani. Analysis of machining parameters effects on surface roughness : a review Mir Saeed Safizadeh. *International Journal of Computational Materials Science and Surface Engineering*. 2012. Vol. 5, no. 1, p. 68–84. DOI 10.1504/IJCMSSE.2012.049055.
- [63] KOČMAN, Karel. *Technologické procesy obrábění*. Akademické nakladatelství CERM, 330 s. 2011.
- [64] LU, Chen. Study on prediction of surface quality in machining process. *Journal of Materials Processing Technology*. 2008. Vol. 205, no. 1–3, p. 439–450. DOI 10.1016/j.jmatprotec.2007.11.270.

- [65] MAGHSOODLOO, Saeed, OZDEMIR, Guttekin, JORDAN, Victoria and HUANG, Chen-Hsiu. Strengths and Limitations of Taguchi's Contributions to Quality, Manufacturing, and Process Engineering. *Journal of Manufacturing Systems* [online]. 2004. Vol. 23, no. 2, p. 73–126. DOI 10.1016/S0278-6125(05)00004-X. Available from: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S027861250500004X>
- [66] MARTELLOTTI, M. E. An analysis of the milling process. *trans. ASME*, 1941, Vol. 63, No. 8, pp. 677-700.
- [67] MATRAS, A. and KOWALCZYK, R. Analysis of machining accuracy during free form surface milling simulation for different milling strategies. In : ROMANIUK, Ryszard S. (ed.), *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering* [online]. SPIE, 25 November 2014. p. 929019. [Accessed 15 March 2016]. ISBN 9781628413694. Available from: <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84922970415&partnerID=tZOtx3y1>.
- [68] MATULA, Lukáš. *Jakost povrchu při frézování kulovou frézou na nakloněných plochách*. Zlín, 2013. Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta technologická, Ústav výrobního inženýrství. Ondřej Bílek.
- [69] MIKÓ, Balázs and BEŇO, Jozef. Effect of the Working Diameter to the Surface Quality in Free-Form Surface Milling. *Key Engineering Materials* [online]. October 2013. Vol. 581, p. 372–377. doi 10.4028/www.scientific.net/KEM.581.372.
- [70] MYERS, Raymond H. Response surface methodology--current status and future directions. *Journal of Quality Technology*, 1999, Vol. 31, No. 1, pp 30.
- [71] NOVAK-MARCINCIN, Jozef and NOVAKOVA-MARCINCINOVA, Ludmila. Advanced Techniques for NC Programs Preparation. *Applied Mechanics and Materials* [online]. August 2013. Vol. 389, p. 726–729. [Accessed 21 August 2017]. DOI 10.4028/www.scientific.net/AMM.389.726. Available from: <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84884757693&partnerID=tZOtx3y1>
- [72] PETERKA, Jozef. A New Approach to Calculating the Arithmetical Mean Deviation of a Profile during Copy Milling, *Journal of Mechanical Engineering*, Vol. 50, No. 12, 2004, pp. 594–597.
- [73] QUINSAT, Y., SABOURIN, L. and LARTIGUE, C. Surface topography in ball end milling process: Description of a 3D surface roughness

- parameter. *Journal of Materials Processing Technology*. 2008. Vol. 195, no. 1–3, p. 135–143. DOI 10.1016/j.jmatprotec.2007.04.129.
- [74] QUINTANA G., GARCIA-ROMEU, M. L. and CIURANA, J. Surface roughness monitoring application based on artificial neural networks for ball-end milling operations, *J. Intell. Manuf.* Vol. 22, 2010, pp. 607-617.
- [75] QUINTANA I BADOSA, GUILLEM, et al. *Stability lobes diagram identification and surface roughness monitoring in milling processes*. Ph. D. Thesis. Universitat de Girona, 2010, ISBN 9788469348567.
- [76] QUINTANA, G, CIURANA, J and G-ROMEU, M L. Decision support tool for blank selection in workshop machining processes. *Engineering Computations*. 2008. Vol. 25, no. 1–2, p. 140–154. DOI 10.1108/02644400810855959.
- [77] QUINTANA, G, CIURANA, J, TEIXIDOR, D and FERRER, I. Experimental introduction to forced and self-excited vibrations in milling processes and identification of stability lobes diagrams. In : MARCOS, M (ed.), *Materials Science Forum* [online]. SWITZERLAND : TRANS TECH PUBLICATIONS LTD, 2011. p. 24–32. *Materials Science Forum*. ISBN 9783037852064. Available from:
<http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-80052227411&partnerID=40&md5=bc2d10fc011697ca3c515ef02eb0d72b>
- [78] QUINTANA, G., CAMPA, F. J., CIURANA, J. and LÓPEZ DE LACALLE, L.N. Productivity improvement through chatter-free milling in workshops. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture* [online]. 2011. Vol. 225, no. 7, p. 1163–1174. DOI 10.1177/2041297510393621. Available from:
<http://pib.sagepub.com/lookup/doi/10.1177/2041297510393621>
- [79] QUINTANA, G., CIURANA, J. and RIBATALLADA, J. Modelling Power Consumption in Ball-End Milling Operations. *Materials and Manufacturing Processes*. 2011. Vol. 26, no. 5, p. 746–756. DOI 10.1080/10426910903536824.
- [80] QUINTANA, G., CIURANA, J. De and RIBATALLADA, J. Surface Roughness Generation and Material Removal Rate in Ball End Milling Operations. *Materials and Manufacturing Processes*. 2010. Vol. 25, no. 6, p. 386–398. DOI 10.1080/15394450902996601.
- [81] QUINTANA, G., GARCIA-ROMEU and M.L., CIURANA, J. Surface roughness monitoring application based on artificial neural networks for ball-end milling operations, *Journal of Intelligent Manufacturing*, Vol. 22, No. 4, 2011, pp. 607–617, doi: 10.1007/s10845-009-0323-5.

- [82] QUINTANA, G., GARCÍA-ROMEU, Maria Luisa and CIURANA, Joaquim. Cutting Tool Selection through Tool Wear, Cost, Power Consumption and Surface Roughness Analyses. In : MARCOS, M AND SALGUERO, J (ed.), *Advanced Materials Research* [online]. SWITZERLAND : TRANS TECH PUBLICATIONS LTD, 2012. p. 55–60. *Advanced Materials Research*. ISBN 978-3-03785-359-7. Available from: <http://www.scientific.net/AMR.498.55>
- [83] QUINTANA, Guillem and CIURANA, Joaquim. Cost estimation support tool for vertical high speed machines based on product characteristics and productivity requirements. *International Journal of Production Economics*. 2011. Vol. 134, no. 1, p. 188–195. DOI 10.1016/j.ijpe.2011.06.013.
- [84] QUINTANA, Guillem and CIURANA, Joaquim. Chatter in machining processes: A review. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2011. Vol. 51, no. 5, p. 363–376. DOI 10.1016/j.ijmachtools.2011.01.001.
- [85] QUINTANA, Guillem, BUSTILLO, Andres and CIURANA, Joaquim. Prediction, monitoring and control of surface roughness in high-torque milling machine operations. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing* [online]. 2012. Vol. 25, no. 12, p. 1129–1138. DOI 10.1080/0951192X.2012.684717. Available from: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/0951192X.2012.684717>
- [86] QUINTANA, Guillem, CIURANA, Joaquim and TEIXIDOR, Daniel. A new experimental methodology for identification of stability lobes diagram in milling operations. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2008. Vol. 48, no. 15, p. 1637–1645. DOI 10.1016/j.ijmachtools.2008.07.006.
- [87] QUINTANA, Guillem, CIURANA, Joaquim, FERRER, Inés and RODRÍGUEZ, Ciro A. Sound mapping for identification of stability lobe diagrams in milling processes. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2009. Vol. 49, no. 3–4, p. 203–211. DOI 10.1016/j.ijmachtools.2008.11.008.
- [88] QUINTANA, Guillem, RUDOLF, Thomas, CIURANA, Joaquim and BRECHER, Christian. Using kernel data in machine tools for the indirect evaluation of surface roughness in vertical milling operations. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 2011. Vol. 27, no. 6, p. 1011–1018. DOI 10.1016/j.rcim.2011.05.005.
- [89] QUINTANA, Guillem, RUDOLF, Thomas, CIURANA, Joaquim and BRECHER, Christian. Surface roughness prediction through internal kernel information and external accelerometers using artificial neural

- networks. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2011. Vol. 25, no. 11, p. 2877–2886. DOI 10.1007/s12206-011-0806-0.
- [90] RAO, R. Venkata and KALYANKAR, V. D. Optimization of modern machining processes using advanced optimization techniques: A review. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2014. Vol. 73, no. 5–8, p. 1159–1188. DOI 10.1007/s00170-014-5894-4.
- [91] REDDY, N. S. K. and RAO, P. V. Selection of optimum tool geometry and cutting conditions using a surface roughness prediction model for end milling. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2005. Vol. 26, p. 1202–1210. DOI 10.1007/s00170-004-2110-y.
- [92] SADÍLEK, M., ČEP, R., BUDAK, I. and SOKOVIĆ, M. Aspects of using tool axis inclination angle, *Strojnicki Vestnik/Journal of Mechanical Engineering*, Vol. 57, No. 9, 2011, pp. 681–688, doi: 10.5545/sv-jme.2010.205.
- [93] *Siemens Documentation: NX 10.0.3 Help*. [online]. ©2017 [viewed 2017-06-12] Available from:
https://docs.plm.automation.siemens.com/tdoc/nx/10.0.3/nx_help
- [94] STANĚK, Michal, MAŇAS, David, MAŇAS, Miroslav, KYAS, Kamil, ŠENKEŘÍK, Vojtěch, ŠKROBÁK, Adam and NAVRÁTIL, Jan. Rubber Injection Molding Influenced by Mold Surface Roughness. In : *13th International Conference on Applied Informatics and Communications (AIC'13)*. 2013, s. 103-106. ISSN 1790-5117. ISBN 978-960-474-316-2.
- [95] STANĚK, Michal, MAŇAS, Miroslav, MAŇAS, David and DRGA, Tomáš. Influence of Surface Quality on Fluidity of Elastomers. *Chemická listy*, 2007, roč. 101, č. S, s. 38-39. ISSN 0009-2770.
- [96] SURESH KUMAR REDDY, N. and VENKATESWARA RAO, P. A Genetic Algorithmic Approach for Optimization of Surface Roughness Prediction Model in Dry Milling, *Machining Science and Technology*, Vol. 9, No. 1, 2005, pp. 63–84, doi: 10.1081/MST-200051263.
- [97] TAGUCHI, Genichi and CARIAPA, V. *Taguchi on Robust Technology Development*. 1992, ASME Press. ISBN 978-0791800287.
- [98] TANGJITSITCHAROEN S. and SENJUNTICHAJ, A. In-process monitoring and prediction of surface roughness in ball-end milling process, In: *B. Katalinic (Ed.), Annals of DAAAM for 2010 & Proceedings of the 21st International DAAAM Symposium*, Vienna, 2010, pp. 1389-1390.
- [99] TANGJITSITCHAROEN, S., THESNIYOM, P. and RATANAKUAKANGWAN, S. Prediction of surface roughness in ball-end milling process by utilizing dynamic cutting force ratio. *Journal of*

- Intelligent Manufacturing* [online]. 2017. Vol. 28, no. 1, pp. 13–21. DOI 10.1007/s10845-014-0958-8.
- [100] TEIXIDOR, Daniel, QUINTANA, Guillem and DE CIURANA, Joaquim. Experimental introduction to surface roughness parameters measurement. In : ALVAREZ, M AND BATISTA, M AND MARCOS, M (ed.), *Materials Science Forum*. SWITZERLAND : TRANS TECH PUBLICATIONS LTD, 2013. p. 63–71. ISBN 9783037857052.
- [101] VAKONDIOS, Dimitrios, Panagiotis KYRATIS, Suleyman YALDIZ and Aristomenis ANTONIADIS, 2012. Influence of milling strategy on the surface roughness in ball end milling of the aluminum alloy Al7075-T6. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation* [online]. B.m.: Elsevier Ltd, Vol. 45, No. 6, pp. 1480–1488. ISSN 02632241. doi:10.1016/j.measurement.2012.03.001
- [102] VARGA, G. and DUDAS, I. Modelling and examinations of dry machining processes. In : *Proceedings of the IASTED International Conference on Modelling, Simulation, and Optimization*. 2004.
- [103] VASILKO, Karol. New experimental dependence of machining. *Manufacturing Technology* [online]. 2014. Vol. 14, no. 1, p. 111–116. Available from: <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84901587992&partnerID=tZOtx3y1>
- [104] VAŠINA, Martin, BÍLEK, Ondřej. Effect of machined surface shape on sound reflection. *Manufacturing Technology*, 2016, Vol. 16, No. 4, pp. 830-834. ISSN 1213-2489.
- [105] *What Is Sugeno-Type Fuzzy Inference? - MATLAB & Simulink* [online]. [Accessed 24 June 2017]. Dostupné z: <https://www.mathworks.com/help/fuzzy/what-is-sugeno-type-fuzzy-inference.html>
- [106] WOJCIECHOWSKI, Szymon, Paweł TWARDOWSKI and Michał WIECZOROWSKI, 2014. Surface texture analysis after ball end milling with various surface inclination of hardened steel. *Metrology and Measurement Systems* [online]. Vol. 21, No. 1, pp. 145–156. ISSN 08608229. doi:10.2478/mms-2014-0014.
- [107] ZAIN, Azlan Mohd, HARON, Habibollah and SHARIF, Safian. Prediction of surface roughness in the end milling machining using Artificial Neural Network. *Expert Systems with Applications* [online]. 2010. Vol. 37, no. 2, p. 1755–1768. DOI 10.1016/j.eswa.2009.07.033. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.eswa.2009.07.033>
- [108] ZĘBALA, Wojciech and PLAZA, Malgorzata. Comparative study of 3- and 5-axis CNC centers for free-form machining of difficult-to-cut

- material. *International Journal of Production Economics* [online]. December 2014. Vol. 158, p. 345–358. [Accessed 2 February 2017]. DOI 10.1016/j.ijpe.2014.08.006. Available from: <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84913546429&partnerID=tZOtx3y1>
- [109] ZEBALA, Wojciech. The Influence of Tool Stiffness on the Dimensional Accuracy in Titanium Alloy Milling. *Key Engineering Materials* [online]. February 2016. Vol. 686, no. 1, p. 108–113. DOI 10.4028/www.scientific.net/KEM.686.108. Available from: <http://www.scientific.net/KEM.686.108>
- [110] ZEROUDI, Nasreddine and FONTAINE, Michaël. Prediction of machined surface geometry based on analytical modelling of ball-end milling. *Procedia CIRP* [online]. 2012. Vol. 1, no. 1, p. 108–113. DOI 10.1016/j.procir.2012.04.017. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.procir.2012.04.017>
- [111] ZHANJIE, L I, BING, Y A N and MEILI, Tian. Prediction of Surface Roughness of Difficult-to-cut Material by HSM Based on RBF Neural Network. In : *Proceedings of the 6th International Conference on Instrumentation, Measurement, Circuits & Systems*. Hangzhou, 2007. pp. 48–51.

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1.1: Činitelé, ovlivňující jakost obrobeného povrchu [9]	7
Obr. 2.1: Jakost povrchu po frézování kulovou frézou na skloněných plochách .9	
Obr. 2.2: Vliv jednotlivých technologických operací na poměrnou cenu výrobku [13].....	11
Obr. 2.3: Podíl procesních nákladů na výrobu tvarových dutin forem [75]	12
Obr. 2.4 Kinematický model jakosti povrchu vzhledem ke středové přímce [52]	15
Obr. 2.5: Jakost povrchu a výška nerovností po frézování [81].....	18
Obr. 2.6: Model ANFIS s šesti vstupy a Sugeno prediktorem [50],[105]	28
Obr. 3.1: Klasifikace ploch obráběného segmentu a strategie obrábění	29
Obr. 3.2: Pozitivní a negativní geometrie řezného nástroje	30
Obr. 3.3: Vliv změny radiální hloubky řezu a_e na parametr drsnosti R_a (podmínky: $D = 12$ mm, $f_z = 0,1$ mm, pozitivní geom., mělká plocha, $S = 530$ mm ²).....	31
Obr. 3.4: Vliv změny radiální hloubky řezu a_e na strojní čas T (podmínky: $D = 12$ mm, $f_z = 0,1$ mm, pozitivní geom., mělká plocha, $S = 530$ mm ²).....	32
Obr. 3.5: Vliv změny posuvu na zub f_z na parametr drsnosti R_a (podmínky: $D = 12$ mm, $a_e = 0,16$ mm, pozitivní geom., mělká plocha, $S = 530$ mm ²)	32
Obr. 3.6: Vliv změny posuvu na zub f_z na strojní čas T (podmínky: $D = 12$ mm, $a_e = 0,16$ mm, pozitivní geom., mělká plocha, $S = 530$ mm ²).....	33
Obr. 3.7: Vliv řezné rychlosti a sklonu plochy α na parametr drsnosti R_a [68] (AW 7022, $D = 5$ mm, $a_e = 10 \% \cdot D$, $v_f = 2000$ mm/min)	33
Obr. 3.8: Vliv řezných parametrů f_z , a_e na jakost povrchu R_a (mělké plochy, pozitivní geom.).....	34
Obr. 3.9: Vliv řezných parametrů f_z , a_e na jakost povrchu R_a (strmé plochy, pozitivní geom.).....	34
Obr. 3.10: Vliv řezných parametrů f_z , a_e na jakost povrchu R_a (mělké plochy, negativní geom.)	35
Obr. 3.11: Vliv řezných parametrů f_z , a_e na jakost povrchu R_a (strmé plochy, negativní geom.)	35
Obr. 3.12: Konstantní šířka záběru (a) a adaptivní šířka záběru (b) při obrábění ploch s proměnlivým sklonem [93].....	36

Obr. 3.13: Individuální Ra měření po frézování nástrojem s negativní a pozitivní geometrií ($a_e = 0,6$ mm, $f_z = 0,1$ mm, strmé plochy)	37
Obr. 3.14: Vliv radiální hloubky řezu a_e na Ra pro pozitivní a negativní geometrii ($f_z = 0,1$ mm, strmé plochy).....	38
Obr. 3.15: Vliv posuvu na zub f_z na Ra pro pozitivní a negativní geometrii ($a_e = 0,16$ mm, strmé plochy)	38
Obr. 3.16: Vliv technologických parametrů na Ra pro mělké plochy (AW 7022)	39
Obr. 3.17: Vliv technologických parametrů na Ra pro strmé plochy (AW 7022)	40
Obr. 3.18: Individuální Ra měření po frézování mělkých a strmých ploch ($a_e = 0,6$ mm, $f_z = 0,1$ mm, negativní geom.)	41
Obr. 3.19: Vliv sklonu plochy α a radiální hloubky řezu na drsnost Ra (AW 7022, $D = 5$ mm)	41
Obr. 4.1: Průběh hlavních účinků vstupních parametrů pro Ra	45
Obr. 4.2 Průběh hlavních účinků vstupních parametrů pro Rz.....	45
Obr. 4.3: Průběh hlavních účinků vstupních parametrů pro Rmr	46
Obr. 4.4: Průběh hlavních účinků vstupních parametrů na složku řezné síly F1	47
Obr. 4.5 Průběh hlavních účinků vstupních parametrů na složku řezné síly F2	47
Obr. 4.6: Průběh hlavních účinků vstupních parametrů na složku řezné síly F3	48
Obr. 4.7: Průběh F1 v závislosti na sklonu α a průměru nástroje D.....	49
Obr. 4.8: Průběh F2 v závislosti na radiální hloubce a a průměru nástroje D....	50
Obr. 4.9: Průběh F3 v závislosti na průměru nástroje D a radiální hloubce a	50
Obr. 4.10: Průběh Ra v závislosti na radiální hloubce a a posuvové rychlosti v_f	51
Obr. 4.11 Průběh Rz v závislosti na radiální hloubce a a posuvové rychlosti v_f	51
Obr. 4.12: Průběh Rmr v závislosti na průměru nástroje D a radiální hloubce a	52
Obr. 4.13: Graf závislosti Ra na průměru nástroje D a délce vysunutí nástroje l	55
Obr. 4.14: Graf závislosti Rz na průměru nástroje D a délce vysunutí nástroje l	55
Obr. 4.15: Graf závislosti Rmr na průměru nástroje D a délce vysunutí nástroje l	56
Obr. 4.16: Graf závislosti Ra na průměru nástroje D a radiální hloubce řezu a .	56
Obr. 4.17: Graf závislosti Rz na průměru nástroje D a radiální hloubce řezu a .	57

Obr. 4.18: Graf závislosti R_{mr} na průměru nástroje D a radiální hloubce řezu a	57
Obr. 4.19: Vrstevnicový graf závislosti R_a na radiální hloubce a a délce vysunutí nástroje l	58
Obr. 4.20: Vrstevnicový graf závislosti R_z na radiální hloubce a a délce vysunutí nástroje l	58
Obr. 4.21: Vrstevnicový graf závislosti R_{mr} na radiální hloubce a a délce vysunutí nástroje l	59
Obr. 4.22: Vrstevnicový graf závislosti R_a na průměru nástroje D a sklonu plochy α	59
Obr. 4.23: Vrstevnicový graf závislosti R_a na radiální hloubce řezu a a posuvové rychlosti v_f	60
Obr. 4.24: Vrstevnicový graf závislosti R_a na délce vysunutí nástroje l a sklonu plochy α	60
Obr. 4.25: Optimalizační křivky.....	63
Obr. 5.1: Podobnost naměřeného souboru dat	64
Obr. 5.2: Parametr R_a mělkých ploch pro pozitivní a negativní geometrii nástroje (vlevo) a analýza podobnosti dat (vpravo)	65
Obr. 5.3: Graf maximální věrohodnosti funkce pro parametr R_a negativní geometrie $f_z = 0,17$ mm (vlevo) a pozitivní geometrie $f_z = 0,1$ mm (vpravo)	67
Obr. 5.4: Lineární regrese pro negativní (vlevo) a pozitivní (vpravo) geometrii nástroje.....	71
Obr. 5.5: Jakost povrchu strmých ploch pro pozitivní a negativní geometrii nástroje (vlevo) a analýza podobnosti dat (vpravo)	71
Obr. 5.6: Lineární regrese pro negativní (vlevo) a pozitivní (vpravo) geometrii nástroje.....	73
Obr. 5.7: Korelace jakosti povrchu pro mělké plochy (vlevo) a strmé plochy (vpravo).....	74
Obr. 6.1: Zjednodušená struktura modelu net1	76
Obr. 6.2: Zjednodušená struktura modelu net2	76
Obr. 6.3: Zjednodušená struktura modelu net3	76
Obr. 6.4: Zjednodušená struktura modelu net4	77
Obr. 6.5: Zjednodušená struktura modelu net5	77
Obr. 6.6: Zjednodušená struktura modelu net6	77
Obr. 6.7: Zjednodušená struktura modelu net7	77

Obr. 6.8: Chyba ANN modelu net1 pro Ra v μm (vlevo) a % (vpravo)	78
Obr. 6.9: Chyba ANN modelu net1 pro Rz v μm (vlevo) a % (vpravo)	79
Obr. 6.10: Chyba ANN modelu net2 pro Ra v μm (vlevo) a % (vpravo)	79
Obr. 6.11: Chyba ANN modelu net2 pro Rz v μm (vlevo) a % (vpravo)	79
Obr. 6.12: Chyba ANN modelu net3 pro Ra v μm (vlevo) a % (vpravo)	80
Obr. 6.13: Chyba ANN modelu net3 pro Rz v μm (vlevo) a % (vpravo)	80
Obr. 6.14: Chyba ANN modelu net4 pro Ra v μm (vlevo) a % (vpravo)	80
Obr. 6.15: Chyba ANN modelu net4 pro Rz v μm (vlevo) a % (vpravo)	81
Obr. 6.16: Chyba ANN modelu net5 pro Ra v μm (vlevo) a % (vpravo)	81
Obr. 6.17: Chyba ANN modelu net5 pro Rz v μm (vlevo) a % (vpravo)	81
Obr. 6.18: Chyba ANN modelu net6 pro Ra v μm (vlevo) a % (vpravo)	82
Obr. 6.19: Chyba ANN modelu net6 pro Rz v μm (vlevo) a % (vpravo)	82
Obr. 6.20: Chyba ANN modelu net7 pro Ra v μm (vlevo) a % (vpravo)	82
Obr. 6.21: Chyba ANN modelu net7 pro Rz v μm (vlevo) a % (vpravo)	83
Obr. 6.22: Predikce a naměřená data Ra, Rz pro net7, $a_e=0,16$ mm	85
Obr. 6.23: Predikce a naměřená data Ra, Rz pro net7, $a_e=0,25$ mm	85
Obr. 6.24: Predikce a naměřená data Ra, Rz pro net7, $a_e=0,32$ mm	86
Obr. 6.25: Predikce a naměřená data Ra, Rz pro net7, $a_e=0,40$ mm	86
Obr. 6.26: Predikce a naměřená data Ra, Rz pro net7, $a_e=0,60$ mm	86

SEZNAM TABULEK

Tabulka 2.1 Geometrické úchylky ploch podle DIN 4760 [44].....	10
Tabulka 2.2 Matematické vyjádření predikčních modelů parametru drsnosti R_a	19
Tabulka 4.1 Vstupní faktory a hladiny experimentu.....	43
Tabulka 4.2 Plán experimentu a výsledky v Taguchiho poli $L_{16}(4^2)$	44
Tabulka 4.3 Pořadí účinků podle faktoru	48
Tabulka 4.4 Kritéria optimalizace metodou RSM.....	61
Tabulka 4.5 Navrhovaná řešení optimalizace metodou RSM.....	62
Tabulka 5.1 Statistické parametry jakosti povrchu and test normality	65
Tabulka 5.2 Vybočující body a hodnocení autokorelace v parametrech R_a do 4. řádu	66
Tabulka 5.3 Parametry Box Coxovy transformace	66
Tabulka 5.4 Mocninná transformace	67
Tabulka 5.5 Střední hodnoty parametru R_a (μm).....	67
Tabulka 5.6 Test shody rozptylů	68
Tabulka 5.7 Test shody průměrů pro shodné rozptyly.....	68
Tabulka 5.8 Odhady regresních parametrů	69
Tabulka 5.9 Statistické charakteristiky regrese	69
Tabulka 5.10 Testování regresního tripletu.....	70
Tabulka 5.11 Odhady regresních parametrů	72
Tabulka 5.12 Statistické charakteristiky regrese	72
Tabulka 5.13 Testování regresního tripletu.....	72
Tabulka 6.1 Testované struktury neuronových sítí	77
Tabulka 6.2 Porovnání prediktorů.....	83
Tabulka 6.3 Rozhodovací váhová metoda	84

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

a	radiální hloubka řezu (mm)
a_e	radiální hloubka řezu (mm)
AF_x	dynamická tangenciální složka síly (N)
AF_z	dynamická axiální složka síla (N)
ANN	Artificial Neural Network, umělá neuronová síť
a_p	axiální hloubka řezu (mm)
A_r	axiální hloubka řezu (mm)
CAM	Computer Aided Manufacturing
CAX	Computer Aided
CNC	Computer Numerical Control
D	průměr řezné části nástroje (mm)
D^*	Composite Desirability (pro RSM), sdružená vhodnost
DOE	plánovaný statistický experiment
E_{Ra}	maximální predikční chyba ANN modelu pro Ra (μm)
E_{Rz}	maximální predikční chyba ANN modelu pro Rz (μm)
F_1	řezná složka síly (N)
F_2	posuvová složka síly (N)
F_3	pasivní složka síly (N)
F_x	tangenciální složka síly (N)
F_z	axiální složka síla (N)
f_z	posuv na zub (mm)
GA	genetické algoritmy
h	výška nerovností (mm)
J_{Ra}	průměrná absolutní hodnota rozdílů ANN modelu pro Ra (μm)
J_{Rz}	průměrná absolutní hodnota rozdílů ANN modelu pro Rz (μm)
l	vysunutí nástroje (mm)
Mech	mechanický model
n	otáčky (min^{-1})
n	počet měření (-)
PVD	Physical Vapour Deposition
HSC	High Speed Cutting
HFM	High Feed Machining
GP	Genetic Programming
P_z	Nejvyšší výška základního profilu (μm)
r_ε	velikost bočního radiusu frézy (mm)
Ra	průměrná aritmetická úchylka profilu (μm)
Rmr	materiálový podíl drsnosti profilu (%)
Rsm	průměrná šířka prvků profilu drsnosti (μm)

RSM	Responce Surface Methodology
R_z	nejvyšší výška profilu drsnosti (μm)
S	obráběná plocha (mm^2)
t	cílová veličina (μm)
v_c	řezná rychlost (m/min)
v_f	posuvová rychlost (mm/min)
α	úhel sklonu plochy/nástroje ($^\circ$)
γ	úhel čela nástroje ($^\circ$)