



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Disertační práce

Vliv řezných podmínek na dokončování obecných ploch soudečkovými nástroji

Effect of cutting conditions on the finishing of freeform surfaces with barrel tools

Autor: **Ing. Cyril Hořava**

Studijní program: P3909 / Procesní inženýrství

Školitel: Ing. Martin Řezníček, Ph.D.

Oponenti: prof. Ing. Robert Čep, Ph.D.
prof. Dr. Ing. Vladimír Pata
doc. Ing. Martin Novák, Ph.D.

Zlín, červen 2025

© Cyril Hořava

Vydala **Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně** v edici **Disertační práce**.
Publikace byla vydána v roce 2025.

Klíčová slova: drsnost povrchu, řezné síly, obecné plochy, soudečkové nástroje, řezné podmínky

Key words: surface roughness, cutting forces, freeform surfaces, barrel tools, cutting conditions

Práce je dostupná v Knihovně UTB ve Zlíně.

Poděkování:

Rád bych touto cestou poděkoval všem, kteří mi byli během studia oporou. Hlavně svému školiteli, Ing. Martinu Řezníčkovi, Ph.D., za jeho cenné rady a příkladné vedení, kterého se zhostil.

Dále chci poděkovat prof. Dr. Ing. Vladimírovi Patovi za jeho ochotu pomoci při vyhodnocování drsností a při zpracování získaných dat.

Mé díky také patří doc. Ing. Aleši Mizerovi, Ph.D. a Ing. Pavlu Stokláskovi, Ph.D. za ochotu poskytnout měřicí přístroje, jejich zkušenosti a čas při měření a vyhodnocení.

Tato disertační práce byla spolufinancována z projektů Interní Grantové Agentury Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně IGA/FT/2023/005 a IGA/FT/2024/003.

ABSTRAKT

Tato práce se zaměřuje na analýzu a praktické využití soudečkových nástrojů při obrábění, s důrazem na jejich specifické vlastnosti a výhody ale i nevýhody, které to přináší. Hlavní důraz je kladen na zkoumání vlivu řezných podmínek na silové zatížení a kvalitu obráběných povrchů. Tyto parametry byly analyzovány z hlediska jejich vlivu na efektivitu procesu, kvalitu výsledného produktu a možnosti optimalizace.

V úvodních kapitolách jsou představeny základní principy obrábění volných ploch, zahrnující charakteristiky obrobků, používané nástroje a strategie frézování. Pozornost je věnována i popsání geometrických a funkčních vlastností soudečkových fréz a jejich vlivu na proces obrábění. Součástí teoretické části je také přehled aktuálního výzkumu v oblasti obrábění volných ploch. Tento přehled zahrnuje analýzu aktuální literatury a vědeckých článků, které se věnují specifickým výzvám a přínosům při nasazení soudečkových nástrojů. Rešerše byla provedena za účelem identifikace nejnovějších trendů, metodologií a inovací v současném výzkumu, což poskytuje pevný základ pro zhodnocení aktuálního stavu technologií a určení směrů pro výzkum, který bude představen v této práci.

Experimentální část práce obsahuje popis návrhu a metodiky měření, podrobné výsledky měření, která byla provedena během obrábění volných ploch s využitím dvou typů soudečkových nástrojů. V těchto experimentech byly systematicky variovány řezné podmínky, konkrétně posuv na zub a přídavek na obrobení. Část práce je věnována i zkoumání vlivu dalších parametrů, které je možné variovat pro dosažení požadovaných výsledků. Cílem je stanovit závislosti těchto proměnných na výsledcích řezných sil a parametrech drsnosti. Měření tak zahrnovala sledování řezných sil v průběhu obrábění a hodnocení výsledné charakteristiky povrchu. Cílem bylo získat komplexní a mezi sebou srovnatelné informace o chování nástroje při frézování za různých podmínek. Výsledky experimentů umožnily identifikovat klíčové faktory ovlivňující efektivitu obrábění a zároveň poskytly praktická doporučení pro zlepšení procesů.

Tento výzkum přináší významný přínos jak k hlubšímu pochopení problematiky obrábění volných ploch soudečkovými nástroji, tak k jejich praktickým aplikacím v průmyslovém prostředí. Díky získaným poznatkům lze optimalizovat výrobní postupy, zlepšit kvalitu výsledných povrchů a snížit provozní náklady. Poznatky z této práce mohou být využity k vývoji nových technologických postupů, což umožní efektivnější využití soudečkových nástrojů při obrábění složitých povrchů. Práce tak poskytuje cenný podklad nejen pro další vědecký výzkum, ale i pro průmyslové aplikace v oblasti obrábění, protože popisuje, jakého silové zatížení bude dosaženo při zvolených podmínkách obrábění. To stejné pak popisuje z hlediska drsnosti povrchu.

ABSTRACT

This dissertation focuses on the analysis and practical use of barrel tools in machining, emphasising their specific properties and the advantages and disadvantages that this brings. The main emphasis is on investigating the influence of cutting conditions on the force load and the quality of machined surfaces. These parameters were analysed in terms of their impact on the efficiency of the process, the quality of the resulting product and the possibilities of optimisation.

The introductory chapters present the basic principles of free surface machining, including the characteristics of the workpieces, the tools used and the milling strategies. Attention is also paid to describing barrel cutters' geometric and functional properties and their influence on machining. The theoretical part also includes an overview of current research in free-surface machining. This overview consists of an analysis of current literature and scientific articles that address specific challenges and benefits of using barrel tools. The research was conducted to identify the latest trends, methodologies and innovations in the current study, which provides a solid basis for assessing the current state of technology and determining the research directions presented in this work.

The experimental part of the work contains a description of the design and measurement methodology and detailed results of measurements performed during the machining of free surfaces using two types of barrel tools. In these experiments, cutting conditions were systematically varied, namely feed per tooth and machining allowance. Part of the work is also devoted to investigating the influence of other parameters that can be varied to achieve the desired results. The aim is to determine the dependence of these variables on the results of cutting forces and roughness parameters. The measurements thus included monitoring cutting forces during machining and evaluating the resulting surface characteristics. The aim was to obtain comprehensive and comparable information about the tool's behaviour during milling under different conditions. The results of the experiments made it possible to identify key factors affecting the machining efficiency and, at the same time, provided practical recommendations for process improvement.

This research significantly benefits a deeper understanding of machining free surfaces with barrel tools and their practical applications in an industrial environment. Thanks to the knowledge gained, optimising production processes, improving the quality of the resulting surfaces, and reducing operating costs is possible. The knowledge from this work can be used to develop new technological processes, enabling more effective use of barrel tools in machining complex surfaces. The work thus provides a valuable basis for further scientific research and industrial applications in machining. Because it describes what force load will be achieved under selected machining conditions and regarding surface roughness.

ÚVOD

Soudečkové stopkové frézy byly poprvé představeny před 25 lety a od té doby se stále častěji uplatňují jako nástroje pro pokročilé obrábění složitých geometrických tvarů. Hlavním rysem těchto fréz je jejich unikátní geometrie, která využívá velký rádius na řezné hraně. Tento specifický design umožňuje lepší kontakt nástroje s obráběným povrchem a zároveň zajišťuje vyšší přesnost při práci na složitých tvarových plochách. Název „soudečkové“ frézy vznikl díky tomu, že tvar jejich břitů připomíná sud (anglicky „barrel“), což vedlo také k alternativnímu označení „barelové“ frézy.

Původně byla aplikace těchto fréz omezena na několik specifických oblastí, zejména na 3D tvarové obrábění složitých forem, komponent pro turbíny a další součásti s vysokou náročností na přesnost a povrchovou kvalitu. V té době byla hlavní překážkou pro širší použití soudečkových fréz složitost programování CNC strojů. V kombinaci s tehdejšími možnostmi CAM softwarů a nedostatkem v návrzích strategií pro 5osé obrábění tak byly soudečkové frézy spíše nástrojem pro specializované aplikace než běžnou volbou.

V posledních letech však pokroky v oblasti 5osého obrábění a moderních CAM systémů významně rozšířily možnosti využití soudečkových fréz. Nové softwarové algoritmy umožňují přesné a efektivní programování, čímž odstraňují dřívější omezení. Díky těmto technologickým zlepšením se soudečkové frézy staly důležitým nástrojem pro mnoho dalších aplikací, kde je kladen důraz na vysokou přesnost a kvalitu povrchu.

Zatímco běžné nástroje s konvenční geometrií jsou primárně určeny pro hrubování a vysoký úběr materiálu, soudečkové frézy se specializují na polodokončovací a dokončovací operace, kde je úběr materiálu menší, ale požadavky na přesnost vyšší. Ve srovnání s tradičními kulovými frézami nabízí soudečkové frézy několik zásadních výhod. Díky svému tvaru umožňují teoreticky přesné určení kontaktu mezi hlavním břitem nástroje a obráběným povrchem. To pomáhá eliminovat opakované obrábění již hotového tvaru, což snižuje riziko chyb a přispívá k vyšší efektivitě obrábění. Dále soudečkový tvar nástroje pomáhá zkrátit vyložení frézy, což je důležitý faktor pro stabilitu a výkon nástroje.

Soudečkové frézy se ukazují jako velmi efektivní nástroj pro 3D tvarové frézování. Jejich unikátní geometrie, schopnost zpracovat složité 3D povrchy a efektivní integrace do moderních obráběcích strategií z nich činí nástroj, který nachází stále širší uplatnění napříč průmyslovými odvětvími. Tomu pomáhá i stávající pokrok v CAM softwarech které dříve bránily jejich širšímu využití, avšak dnešní pokročilé softwarové nástroje tuto bariéru odstranily. Rostoucí popularita 5osých obráběcích strojů v kombinaci s pokroky v CAM technologiích dramaticky zvýšila dostupnost a atraktivitu těchto nástrojů. Je tak žádoucí věnovat pozornost tomu, jak tyto nástroje interagují s obrobkem. [1]

OBSAH

ÚVOD	6
1. SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY	10
1.1 Teorie obrábění volných ploch.....	10
1.1.1 3osé obrábění volných ploch.....	11
1.1.2 Víceosé obrábění volných ploch	12
1.2 Výzkum obrábění volných ploch	14
1.2.1 Generování drah nástroje	14
1.2.2 Orientace nástroje.....	15
1.2.3 Výběr geometrie nástroje	16
2. TECHNOLOGIE FRÉZOVÁNÍ	17
2.1 Řezné podmínky	17
2.2 Kinematika řezného pohybu při frézování	18
2.2.1 Nesousledné frézování	18
2.2.2 Sousledné frézování	18
3. SOUDEČKOVÉ FRÉZY	19
3.1 Rozdělení soudečkových fréz.....	19
3.1.1 Tupý kónický tvar	19
3.1.2 Rovný tvar	19
3.1.3 Kónický tvar.....	20
3.1.4 Tangenciální tvar.....	20
3.2 Výhody použití soudečkových fréz.....	21
4. ANALÝZA SIL PŘI OBRÁBĚNÍ	22
4.1 Terminologie řezných sil.....	22
4.2 Vlivy působící na velikost řezných sil	24
4.2.1 Obráběný materiál.....	24
4.2.2 Posuv	24
4.2.3 Hloubka řezu	24
4.2.4 Štíhlostní poměr řezání	25
4.2.5 Úhel čela.....	25

4.2.6	Úhel nastavení	25
4.2.7	Řezná rychlost	25
4.2.8	Nástrojový materiál	25
4.2.9	Chladicí a mazací prostředky	25
4.2.10	Opotřebení břitu nástroje	26
5.	JAKOST POVRCHU	27
5.1	Textura povrchu	27
5.1.1	Drsnost	27
	CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE	29
	METODY ZPRACOVÁNÍ VÝSLEDKŮ	30
6.	PŘÍPRAVA A REALIZACE EXPERIMENTŮ	31
6.1	Použité nástroje	31
6.1.1	Kónický tvar	31
6.1.2	Tangenciální tvar	32
6.2	Materiál	34
6.3	Použitá zařízení	35
6.3.1	DMU 50	35
6.3.2	Dynamometr	36
6.3.1	Mikroskop	36
6.3.2	3D optický profilometr	37
6.3.3	3D skener	38
6.3.4	3D souřadnicový stroj	38
6.4	Zkušební vzorky	39
6.4.1	Postup obrábění při vyhodnocování drsnosti	40
6.4.2	Měření řezných sil	45
7.	VÝSLEDKY	46
7.1	Tangenciální nástroje	46
7.1.1	Řezné síly	48
7.1.2	Drsnost	52
7.1.3	Vyhodnocení tangenciálních nástrojů	67

7.2	Kónické nástroje.....	70
7.2.1	Řezné síly.....	72
7.2.2	Drsnost	76
7.2.3	Vyhodnocení kónických nástrojů.....	93
7.3	Porovnání s kulovou frézou.....	96
7.3.1	Vyhodnocení porovnávací studie.....	108
7.4	Analýza vlivu řezné rychlosti.....	109
7.4.1	Silové zatížení	110
7.4.2	Vliv na drsnost	111
7.4.3	Vyhodnocení vlivu řezné rychlosti	116
7.5	Vliv maximálního kroku	118
7.5.1	Vliv maximálního kroku na řezné síly.....	120
7.5.2	Vliv maximálního kroku na drsnost.....	126
7.5.3	Vliv maximálního kroku na přesnost.....	130
7.5.4	Vyhodnocení vlivu maximálního kroku	134
8.	DISKUZE VÝSLEDKŮ.....	135
9.	PŘÍNOS PRO VĚDU A PRAXI.....	138
10.	ZÁVĚR.....	139
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	140
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	148
	SEZNAM OBRÁZKŮ	150
	SEZNAM TABULEK.....	153
	PUBLIKAČNÍ AKTIVITY AUTORA.....	155
	ODBORNÝ ŽIVOTOPIS AUTORA	156

1. SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

Volné plochy mohou být pravidelné plochy (např. rovinné, polygonální, rotační, sférické a asférické plochy) nebo plochy nepravidelných tvarů (zborčené přímkové plochy a nesnadno definovatelné plochy) anebo plochy sestávající z dílčích elementů tvarově pravidelných nebo nepravidelných (prostorových těles, prohlubní, žlábků). [1] Volně tvarované povrchy, někdy také nazývány „vytvárané“ povrchy, jsou široce používány v letectví, automobilismu a plastikářském průmyslu při výrobě dutin forem.

Volné plochy jsou obvykle navrženy tak, aby splnily nebo zlepšily estetické a/nebo funkční požadavky. Definice volných nebo tvarovaných povrchů jsou spíše intuitivní než formální. [2] Často jsou definovány jako povrchy obsahující jeden nebo více nerovinných nekvadratických povrchů, obecně reprezentovaných parametrickými a/nebo mozaikovými modely. [3] S rozvojem CAD softwarů a technologie 3D skenování je stále snadnější navrhnout komplexní volný tvar, to ale také znesnadňuje rychlé a přesné obrobení takového složitého povrchu. [4]

1.1 Teorie obrábění volných ploch

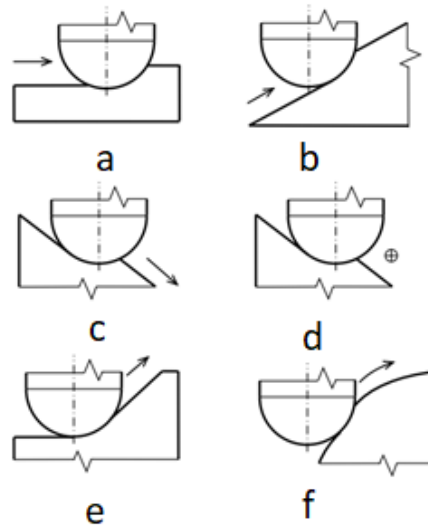
Frézování pomocí počítačového číslicového řízení (CNC) je považována za nejúčinnější, nejproduktivnější a nejflexibilnější způsob výroby těchto povrchů. Výroba volných ploch CNC stroji je realizována přímo na těchto strojích nebo je zprostředkovaně použit jako tvářecí nástroj (forma, zápustka, lisovací nástroj), který byl CNC technologií vyroben. [5] 3osé a 5osé CNC stroje jsou nejpoužívanější při obrábění volných ploch. U 5osých strojů lze plynule a současně ovládat pět pohybů. Tři translační pohyby a dva rotační pohyby jsou buď aplikovány na nástrojový držák nebo stůl stroje nebo obojí. Ve srovnání s 3osými stroji mohou 5osé stroje vyrábět složité povrchy s lepší kvalitou a účinností. 3osé stroje jsou používány hlavně pro jejich cenovou dostupnost. Tuhost je také lepší u 3osých strojů, protože nemají další stupně volnosti, které by způsobovaly snížení tuhosti stroje. [6]

Výroba volných ploch 3osým obráběním kulovou frézou a 5osé kulovou, či soudečkovou frézou, se dostává stále více do popředí. Výhodou použití kulových fréz je snadné ovládání orientace nástroje a mohou obrábět nejsložitější povrchy. Nevýhoda kulových fréz je, že musí mít husté dráhy nástroje generovány tak, aby splnily požadavek přesnosti obrábění. Jejich výhodou je však nízká cena. Soudečkové frézy jsou druhem fréz, které mají výhody kulových fréz a díky jejich tvaru nepotřebují tak husté dráhy nástroje. Jejich cena je však daleko vyšší. [7]

Kvůli možné vysoké geometrické složitosti a požadavkům na obrábění se nedá určit univerzální postup, jelikož strategie se může lišit i v různých oblastech jedné plochy. [8] Níže tak budou popsány obecná doporučení pro obrábění volných ploch.

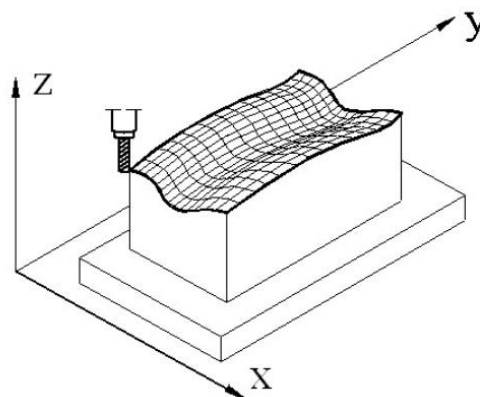
1.1.1 3osé obrábění volných ploch

Běžnou obráběcí technologií je 3D – prostorové frézování nepravidelných ploch, k němuž se využívá CNC obráběcí stroj (frézovací centrum), pracující ve 3 přímkových osách X, Y, Z. Pohyb nástroje, probíhá souběžně v těchto třech osách. Příklady obrábění kulovou frézou s naznačením směru posuvu nástroje je možné vidět na Obr. 1.1. [9]



Obr. 1.1: Typické příklady obrábění volného tvaru kulovou frézou [9]

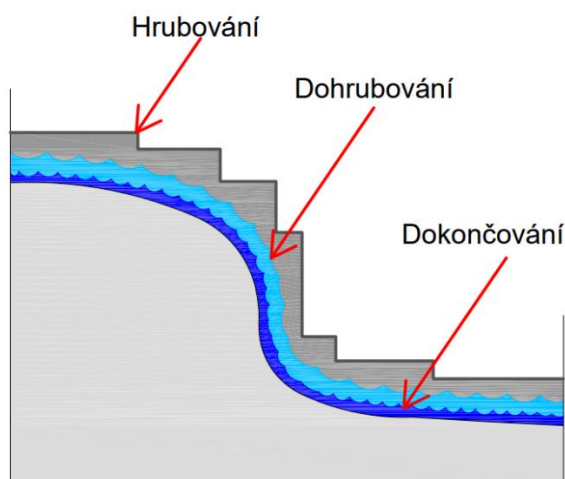
Příklad „a“ znázorňuje obrábění rovny plochy bez naklonění kulové frézy. Tento postup je značně nevýhodný, neboť v ose rotace je nulová řezná rychlost a nástroj v tomto bodě neobrábí, což vede k vyšší drsnosti obráběného povrchu. Příklady „b, c, d“ reprezentují obrábění ploch šikmých. Jedná se o vhodnější varianty, jelikož nutně nemusí docházet ke kontaktu osy rotace a obrobené plochy. Obdobně to platí i pro příklady „e, f“, jen s rozdílem, že se jedná o plochy křivkové. [9] Na Obr. 1.2. je znázorněna kinematika takového způsobu obrábění.



Obr. 1.2: 3osé obrábění [10]

Typickým pracovním postupem při frézování volných ploch 3osým frézováním je odebrání velkého množství materiálu pomocí nástroje o velkém průměru na

počátku výrobního procesu (hrubování). Následují obráběcí cykly s nástroji menších průměrů, při kterých je z obrobku odebráno stále menší množství materiálu (dohrubování a dokončování). Na závěr jsou použity dokončovací strategie obrábění, během nichž je tento stejnoměrně zbylý materiál odebrán z obrobku až k dosažení cílového tvaru součásti. Poslední etapou obráběcího postupu je odebrání tzv. zbytkového materiálu tedy dokončování, nazývané také doobrobení. Jedná se nejčastěji o odstranění materiálů zbylého v rozích, který nemohl být odebrán z důvodů velkého průměru frézy, nebo špatného přístupu nástroje. Tento postup je znázorněn na Obr. 1.3. [9]



Obr. 1.3. Zajištění stále tloušťky odebíraného materiálu [9]

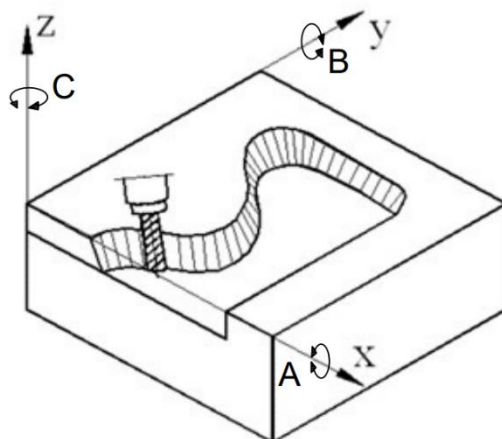
O 3osém obrábění volných ploch kulovými frézami bylo napsáno velké množství článků. Většinou se jedná o možnosti optimalizace drah nástroje. Např. Vu, et.al [11] ve své práci navrhli nový optimalizační postup obrábění volných ploch založený na zefektivnění obráběcích intervalů. Podobně postupovali i Wei, et. al [12], jejich přístup využíval nekonstantní vzdálenost předchozí dráhy nástroje což zaručovalo pohyb frézy v neobrobené oblasti povrchu součásti. Dalšími, kdo se této problematice věnoval byli Mgherony a Miko [13], ti při svém výzkumu soustředěném na simulaci zabírajícího průměru kulové frézy při 3osém frézování zjistili, že změna zabírajícího průměru vede ke změně řezné rychlosti, a to ke změně zamýšlené drsnosti povrchu. Z tohoto důvodu by tato změna měla být kompenzována tak, aby byla zachována drsnost povrchu.

1.1.2 Víceosé obrábění volných ploch

Víceosým frézováním se rozumí technologie frézování s použitím více jak tří os. V obecném podvědomí známé jako obrábění ve více jak 3osách současně, avšak pro definici víceosého obrábění současný pohyb ve zmiňovaných osách není podmínkou. Nejběžněji je takto označována technologie 5osého frézování, ale může být jim také frézování 4osé. Lze je provádět na tzv. víceosých CNC obráběcích strojích – víceosých frézovacích centrech. [6]

5osé frézování je velice progresivní technologie CNC obrábění tvarových ploch. Při 5osém plynulém frézování se nástroj může pohybovat současně v pěti

osách. Je možné obrábět plochu s jakoukoli orientací. To lze realizovat plynulým natáčením vřetená, natáčením obrobku, nebo rozdělením natáčení mezi vřeteník a obrobek. Obrábění pomocí souvislých (plynulých nebo také kontinuálních) 5 os umožňuje současný pohyb lineárních i rotačních os obráběcího stroje. 5osým simultánním frézováním, lze docílit kvalitnějšího obrobení tvarového dílce při využití efektivního rádiusu nástroje, znázorněno na Obr. 1.4. Touto metodou se docílí lepší drsnost povrchu, zvýší se přesnost obrobené plochy a v neposlední řadě se zkracuje celkový čas obrábění.[6, 9]

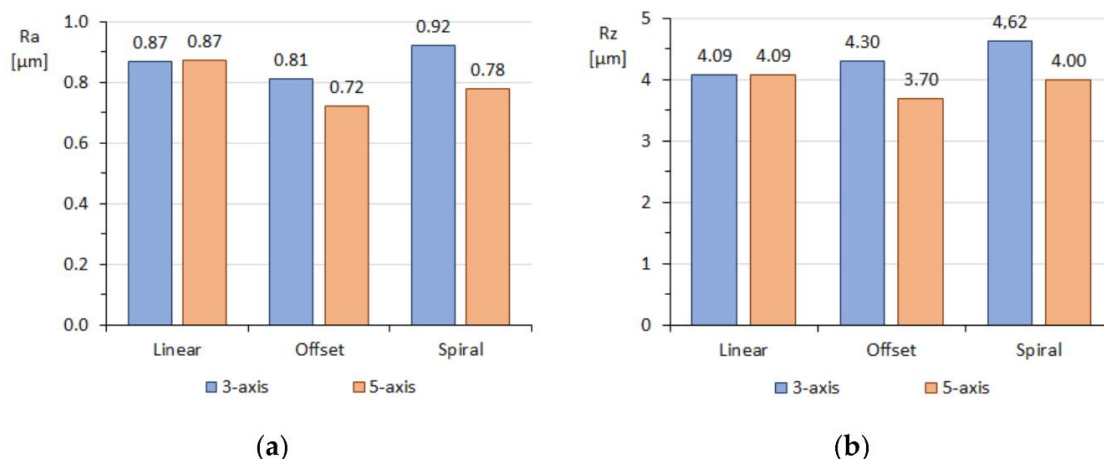


Obr. 1.4: 5osé frézování válcovou frézou [10]

Při 5osém simultánním frézování volných ploch je nejvhodnější obrábění stopkovou frézou s rádiusem. V rozích lze kontinuálně regulovat naklápění nástroje s respektováním obráběného povrchu. [9]

Šířka řezu nástroje je generována pro specifickou výšku výstupků (drsnosti ve směru kolmém na posuv) s ohledem na co nejnižší hustotu jednotlivých drah nástroje. Standardní procedury pro 3osé frézování jsou pak nahrazovány mnohem dokonalejšími speciálními moduly CAM systémů pro 5osé frézování, které dosahují vysoké kvality povrchu, použitím nejvhodnější strategie obrábění. [9]

O obrábění volných ploch 5osým frézováním byla napsána řada článků. Grešová a spol. [14] provedli porovnávací studii obrábění volných ploch 3osým a 5osým obráběním kulovou frézou. Při jejich výzkumu použili 3 strategie obrábění u kterých porovnávali odchylky ve tvaru a drsnost povrchu. Z jejich výsledků (Obr. 1.5) lze usuzovat, že 5osým obráběním lze dosáhnout nižší drsnosti povrchu.



Obr. 1.5: Porovnání drsností povrchů [14]

1.2 Výzkum obrábění volných ploch

V minulosti byly vyvinuty různé metodiky a počítačové nástroje pro zlepšení efektivity a kvality obrábění volných ploch.

V současnosti je v oblasti obrábění volných ploch kladen důraz na tři primární aspekty:

- generování drah nástroje,
- orientace nástroje při obrábění,
- výběr geometrie nástroje. [3]

1.2.1 Generování drah nástroje

Při obrábění plochy volného tvaru je obecně nutné generovat dráhy nástroje s vysokou hustotou přejezdů, aby byl splněn požadavek na přesnost a jakost povrchu. To vede k dlouhé výrobní době a vysokým nákladům, které výrobu prodražují. [7]

Správné vygenerování a navržení drah nástroje je tak důležitou součástí obrábění volných tvarů. Při plánování drah nástroje se uplatňují obecná pravidla tak, aby se dosáhlo optimálního času obrábění a kvality povrchu. Optimální dráha nástroje je taková, při které je minimalizován čas obrábění, na obrobku nezůstává neobrobený materiál a zanechává minimální nerovnosti na povrchu. Minimální nerovnosti však nemusí nutně znamenat lepší dráhu nástroje, protože toho je dosaženo za cenu prodloužení doby obrábění. Minimálního času obrábění bude dosaženo při maximální možné hodnotě nerovností. [3]

Problematika generování drah nástroje se dá rozdělit do dvou kategorií:

- topologie drah nástroje,
- parametry dráhy.

Topologie je definována vzorem, po kterém se fréza pohybuje, aby vytvořila povrch. Parametry jsou definovány krokem na straně nástroje mezi po sobě jdoucími drahami a krokem nástroje vpřed v každé dráze. [3] Každé generování dráhy nástroje se provádí výběrem topologie a parametrů dráhy. [3, 15]

V této oblasti bylo provedeno mnoho výzkumů a bylo vyvinuto mnoho nových technik generování dráhy nástroje pro řešení různých problémů v 5osém obrábění. Některé z typických řešení problémů jsou:

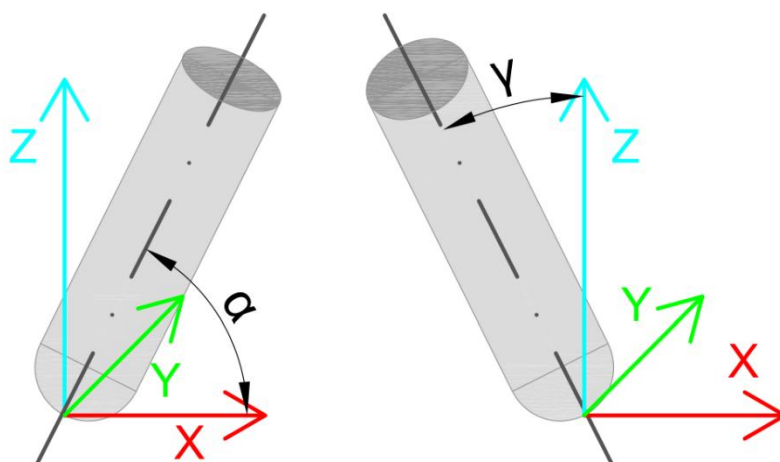
- jak zkrátit dobu simulace a skutečného obrábění,
- obrábění složených povrchů a neparametrických povrchů,
- inovativní techniky vedoucí ke snížení obráběcích a investičních nákladů.

[3]

Použité strategie mají velký vliv na výsledky obrábění a v konečném důsledku i na ekonomické aspekty výroby. Výběrem vhodných kombinací strategií obrábění je možné snížit výrobní časy, ovlivnit rozměrovou přesnost obrábění, zlepšit kvalitu povrchu a v neposlední řadě zvýšit životnost nástrojů. Pohyby nástroje během výroby složitých ploch se tak stávají klíčovou otázkou pro každý systém sloužící pro tvorbu CNC programů. [16]

1.2.2 Orientace nástroje

Jak bylo zmíněno, výhodou při 5osém obrábění je, že osa nástroje může mít dva rotační pohyby navíc ke třem translačním pohybům. Tyto dva rotační pohyby jsou definovány úhlem náklonu α k ose X a náklonem γ k ose Z (jak je ukázáno na Obr. 1.6). Rotace v těchto osách umožňují obrábění oblastí, které jsou pro 3osé obrábění nepřístupné.



Obr. 1.6: Naklápění nástroje při 5osém frézování [17]

Nalezení optimální orientace nástroje pro 5osé obrábění je však složitější než při 3osém obrábění. Povrch součásti by měl být bez stop po nástroji, zatímco rychlost úběru materiálu by měla být maximální a orientace by se měla plynule měnit v po sobě jdoucích krocích. [3] A jelikož orientace nástroje přímo ovlivňuje efektivitu obrábění je nutné orientaci vhodně zvolit. [18]

Hlavním cílem při řešení orientace nástroje je vybrat parametry orientace v každém bodě tak, aby bylo možné dosáhnout minimální doby obrábění (maximální rychlosti úběru materiálu). Přičemž výsledný povrch je v určených tolerancích. Tomuto se věnovali např. Sadílek a jeho tým [19] ti provedli studii s cílem zvýšení produktivity obrábění volných ploch. Jako i u jiných výzkumů

konstatovali, že sklon nástroje má vliv na přesnost tvaru a drsnost povrchu. Dalším jejich výsledkem bylo, že 5osé frézování dosahuje největší přesnosti.

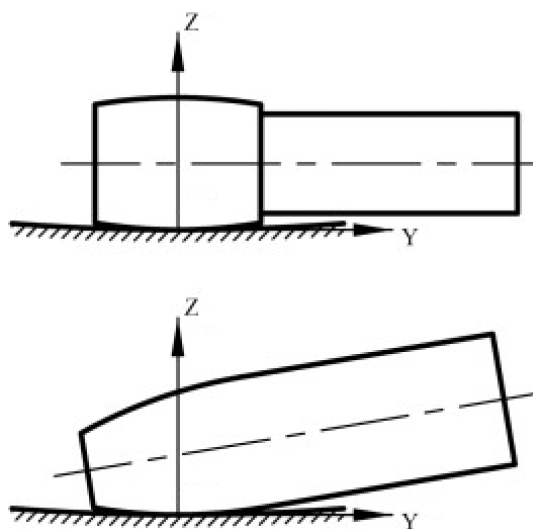
S rozvojem techniky geometrického modelování je možné produkovat stále složitější plochy. Z hlediska obrábění, není většinou možné obrobít celou plochu s jednou orientací nástroje a bývá nutné náklon měnit. Řada výzkumů se věnovala vývoji různých algoritmů, které mají sloužit k optimalizaci obrábění. Bez optimalizace je obtížné, nebo dokonce nemožné, vyprodukovat vysoce kvalitní povrch. [20] Attene a jeho tým [21] navrhli hierarchickou segmentaci sítě na základě základního tvaru. Jejich algoritmus představuje flexibilní automatický způsob rozdělení povrchu a nevyžaduje síť prvků, čímž zvyšuje efektivitu. Dalšími, kdo se orientaci nástroje věnovali, byli Katz a kolektiv [22], kteří navrhli obdobné řešení.

1.2.3 Výběr geometrie nástroje

Stejně jako v předchozích případech je i u výběru geometrie nástroje cílem minimalizace času obrábění, a tak maximalizace zisku, že nejlepším způsobem, jak minimalizovat čas obrábění, je vybrat co největší nástroj spolu s minimálním počtem výměn nástroje.

Geometrie nástroje je definována dvěma hlavními parametry: typ a velikost nástroje. Výběr typu nástroje do značné míry závisí na geometrii povrchu a zkušenostech programátora.

Celá problematika se dá shrnout následovně: z dostupných fréz se vybere taková, která dokáže obrobít danou plochu v minimálním čase bez kolizí a v rámci tolerancí. Obr. 1.7 zobrazuje, jak se liší náklon nástroje při obrábění stejné plochy. Výběr vhodného nástroje je tak nutný i z důvodu možnosti natáčení stroje. [23]



Obr. 1.7: Rozdíl v geometriích nástrojů [23]

Výběru vhodné geometrie nástroje se věnovali např. Käsemöller a jeho tým [24], ti navrhli svůj algoritmus pro výběr vhodného nástroje. Jejich výsledky ukázaly že optimalizací výběru je možné zkrátit výrobní čas o 20 - 40 %.

2. TECHNOLOGIE FRÉZOVÁNÍ

Frézování je jednou z nejběžnějších metod obrábění, která disponuje vysokou kvalitou a vysokou výkonností obrábění. Obvykle je používána k výrobě dílů, které nejsou osově symetrické a mají mnoho prvků, jako jsou díry, štěrby, kapsy a trojrozměrné povrchové obrysy. Dalším využitím může být výroba nástrojů pro jiné procesy, ozubení apod. Frézování je obráběcí metoda, při které se materiál obrobku odebírá břity otáčejícího se nástroje. Posuv nejčastěji koná součást, převážně ve směru kolmém k ose nástroje. U moderních frézovacích strojů jsou posuvné pohyby plynule měnitelné a mohou se realizovat ve všech směrech (obráběcí centra, víceosé CNC frézky). Řezný proces je přerušovaný, každý zub frézy odřezává krátké třísky proměnné tloušťky. [25, 26]

2.1 Řezné podmínky

Volba řezných podmínek je závislá na vlastnostech nástroje, stroje, obrobku, prostředí (materiál řezného nástroje, druh stroje a obráběného materiálu, chlazení apod.) a na požadovaných vlastnostech obrobku (přesnost rozměrů a tvaru, drsnost obrobeného povrchu, ovlivnění povrchové vrstvy obrobené plochy apod.). [26]

K základním řezným podmínkám patří:

- řezná rychlost (v_c)

Je obvodovou rychlostí frézy. Udává se v metrech za minutu (m/min^{-1}). Řezná rychlost je důležitým faktorem při určování dalších parametrů obrábění, jako je teplota, příkon, životnost nástroje atd. [27].

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

kde: D – průměr nástroje [mm]
 n – otáčky nástroje [min^{-1}]

- posuv na zub (f_z)

Je definován jako vzdálenost, kterou urazí jeden zub nástroje za jednu otáčku nástroje. [27]

$$f_z = \frac{f_{ot}}{z} [mm/zub] \quad (2)$$

kde: z – efektivní počet zubů [-]
 n – otáčky nástroje [ot/min^{-1}]
 f_{ot} – posuv na otáčku [mm/ot^{-1}]

- Přísuv

Je pohyb, kterým se nástroj nastavuje do pracovní polohy na určitou hloubku řezu a_p , resp. a_e .

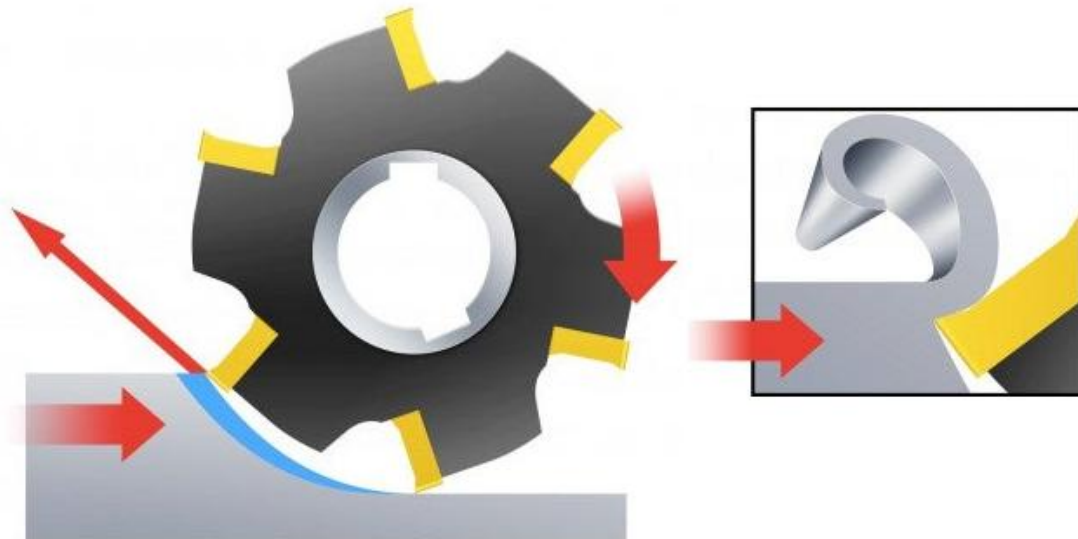
2.2 Kinematika řezného pohybu při frézování

Hlavním pohybem při frézování je rotace nástroje (frézy). Pohyb vedlejší vykonává obrobek umístěný obvykle na stole frézky, jedná se obvykle o přímočarý pohyb. [26]

Frézování se rozděluje podle smyslu otáčení frézy vůči směru pohybu obrobku na nesousledné a sousledné.

2.2.1 Nesousledné frézování

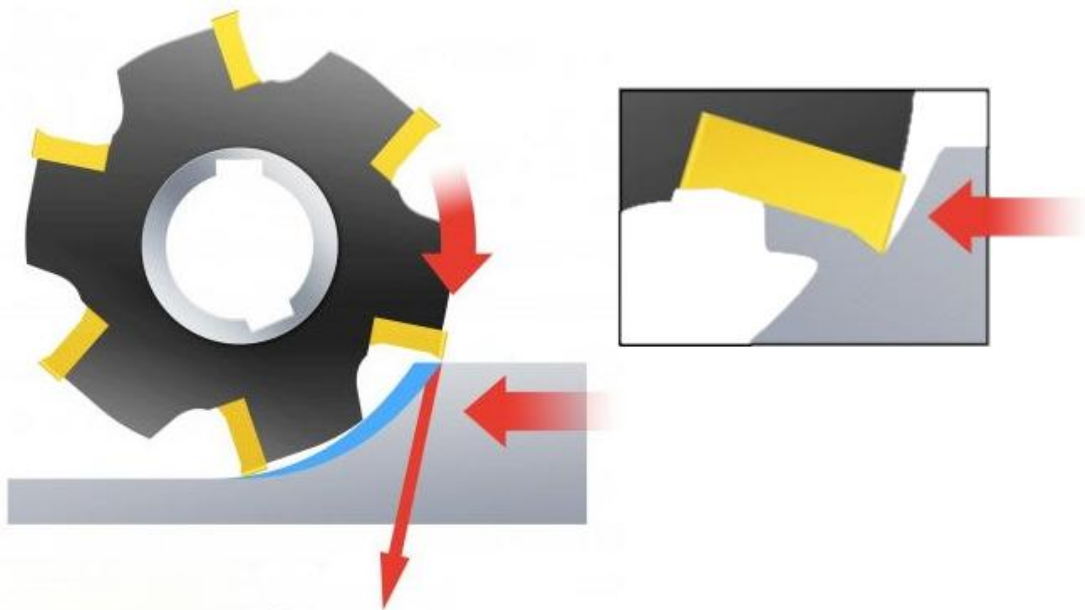
Při nesousledném frézování (Obr. 2.1) se obrobek posouvá opačným směrem, než jakým se otáčí nástroj. Tloušťka třísky se od nulové hodnoty zvyšuje až ke svému maximu, které je na konci záběru daného zubu. Při nesousledném frézování vznikají velké řezné síly, které působí směrem vzhůru a mají tendenci vytrhávat obráběný materiál z upnutí. Na začátku řezu nástroj prokluzuje. Jakost povrchu hotových ploch je horší a trvanlivost nástrojů je nižší než u sousledného frézování. [26, 28]



Obr. 2.1: Nesousledné frézování [29]

2.2.2 Sousledné frézování

Pro sousledné frézování (Obr. 2.2) je charakteristické, že se osa frézy otáčí stejným směrem, jakým se posouvá obrobek. Na začátku záběru je tloušťka třísky maximální a postupně se snižuje až k nule. To má za následek, že řezné síly přitlačují obrobek ke stolu frézky. Nedochozí ke kluznému efektu, avšak je způsobeno rázové namáhání břitu. Přínosem je menší sklon ke kmitání a tvoření nárůstků. Při sousledném frézování se dosahuje menších drsností povrchů v porovnání s nesousledným frézováním. [26, 28]



Obr. 2.2: Sousedné frézování [29]

3. SOUDEČKOVÉ FRÉZY

Klasický válcový tvar stopkových fréz je u soudečkových fréz nahrazen rádiusem o velké hodnotě. Tato změna umožňuje efektivnější obrábění, protože zajišťuje větší kontaktní plochu a tím snižuje nutný počet drah nástroje pro dokončení povrchu.

3.1 Rozdělení soudečkových fréz

Se stále se zvětšujícími možnostmi 5osých CNC obráběcích strojů a špičkových CAM softwarů se začaly produkovat soudečkové frézy rozličných tvarů, které najdou uplatnění při rozmanitých specifických problémech při programování a následné výrobě součástí.

Základní konstrukce nástroje je vždy stejná. Jde o segment kruhu, čili oblouk, který tvoří řeznou hranu. Tím je zajištěna větší flexibilita kontaktní plochy. [30]

3.1.1 Tupý kónický tvar

Vhodná pro polodokončování, tam kde jsou přítomny rušivé kontury (Obr. 3.1).



Obr. 3.1: Tupý kónický tvar [31]

3.1.2 Rovný tvar

Vhodná pro volně přístupné plochy, bez rušivých kontur (Obr. 3.2).



Obr. 3.2: Rovný tvar [31]

3.1.3 Kónický tvar

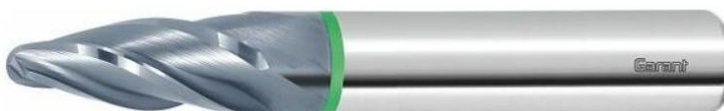
Vhodná pro plochy s rušivými konturami a pro velké plochy. Díky geometrii čelní plochy také vhodná pro polodokončování (Obr. 3.3).



Obr. 3.3: Kónický tvar soudečkové frézy [31]

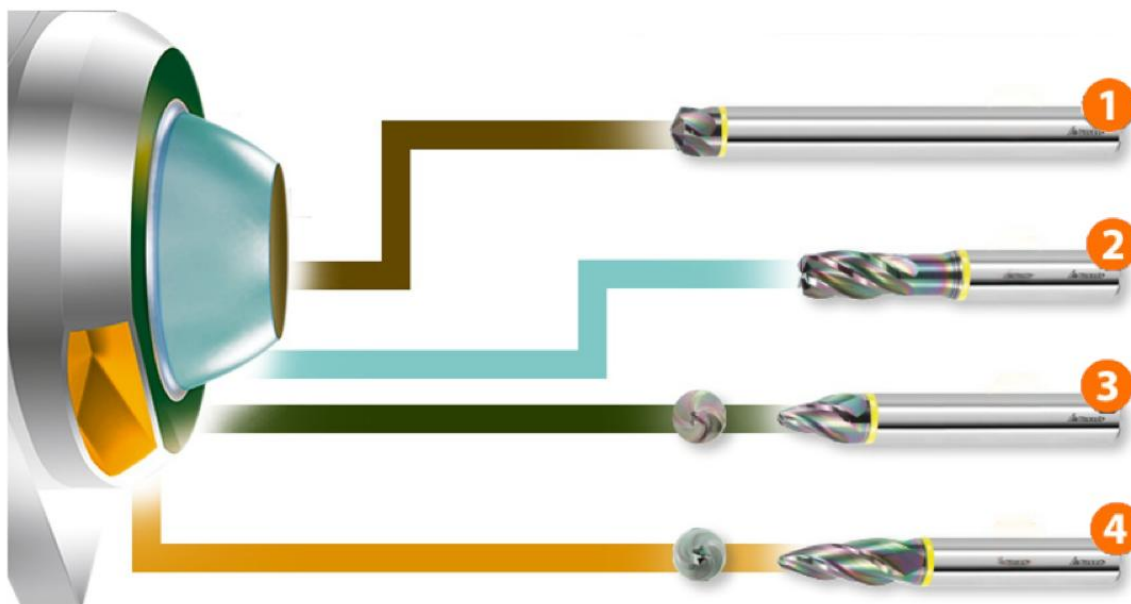
3.1.4 Tangenciální tvar

Vhodná pro hluboké, těžko přístupné dutiny (Obr. 3.4).



Obr. 3.4: Tangenciální tvar [31]

Různé soudečkové frézy jsou vhodné pro různá použití. Obr. 3.5 Znárodnuje nástroje a plochy, pro které jsou tyto nástroje vhodné.



Obr. 3.5: Použití soudečkových fréz [32]

Výrobce k jednotlivým nástrojům uvádí následující vhodné použití:

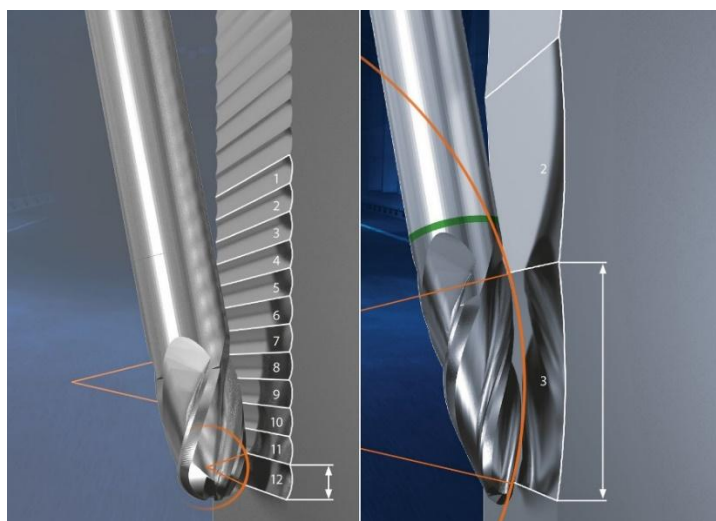
1. Vhodné pro polo-dokončovací práce a povrchy s výraznými konturami.
2. Pro volně dostupné povrchy bez výrazných kontur.
3. Pro povrchy s výraznými konturami a velké plochy.
4. Pro hluboké, těžko přístupné dutiny. [32]

3.2 Výhody použití soudečkových fréz

Jak bylo uvedeno v úvodu, soudečkové frézy jsou v současné době hojně využívány pro obrábění složitých geometrií. Jejich výhody se dají shrnout do několika bodů:

- kratší doba obrábění díky velkému řádkování,
- vyšší kvalita povrchu,
- extrémní odolnost proti opotřebení,
- vyšší produktivita. [31]

Uvedené výhody jsou v porovnání s kulovými frézami, které soudečkové frézy již v mnoha případech nahrazují. Obr. 3.6 znázorňuje asi největší výhodu, a to je daleko větší hloubka řezu, kterou je možné dosáhnout se soudečkovou frézou. [31]



Obr. 3.6: Porovnání hloubky řezu kulové a soudečkové frézy [33]

Díky velké hloubce řezu u soudečkových fréz je celková délka dráhy nástroje mnohem kratší než u kulových fréz. To umožňuje mnohem větší produktivitu. Kulová fréza bude zároveň vystavena mnohem většímu opotřebení, protože její kontaktní plocha je menší, stále stejná a musí provést více projetí na obrobení součásti. [34]

4. ANALÝZA SIL PŘI OBRÁBĚNÍ

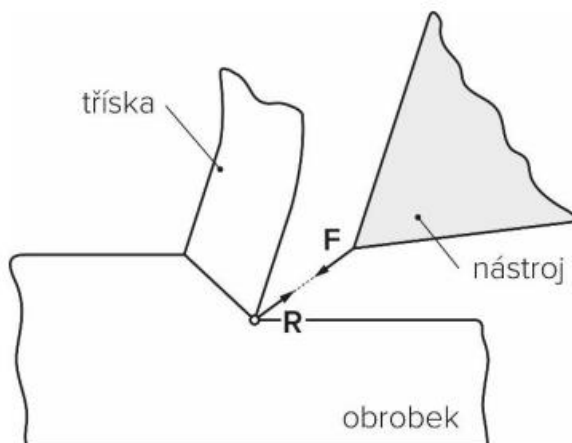
V obráběném materiálu vzniká při vnikání břitu řezného nástroje stav napjatosti, který v mezní situaci způsobuje jeho dělení. To je doprovázeno plastickými i elastickými deformacemi. Kromě těchto deformačních jevů se při dělení materiálu prosazují i silové jevy. Jejich znalost je nutná k vyváženému řezání, speciálně s ohledem na pozitivní průběh obrábění a stabilitu břitu. Znalost silových účinků je možné využít při:

- dimenzování, volbě či konstrukci obráběcího stroje,
- zajištění energetické účinnosti řezného procesu,
- posuzování tepelných jevů řezného procesu,
- hodnocení trvanlivosti (životnosti) řezného nástroje,
- posouzení celkové ekonomické bilance třískového obrábění,
- zajištění stability řezného procesu. [35]

4.1 Terminologie řezných sil

Silové působení mezi nástrojem a obrobkem je jednou ze základních charakteristik popisující stav a chování řezného procesu. Silové zatížení řezného nástroje vzniká působením vnitřního odporu materiálu obrobku proti vnikání břitu nástroje. Z pohledu terminologie je nutné rozlišit dva pojmy: odpor a síla. V teorii obrábění se síla spojená s vnitřním odporem materiálu proti vnikání břitu nástroje značí R . Síla, kterou řezný nástroj musí působit na obráběný materiál k překonání odporu materiálu a k realizaci řezného procesu, se značí F (Obr. 4.1). Vztah mezi silou F a odporem R vychází ze zákona akce a reakce [26, 36].

$$\vec{F} = \vec{R} \quad (3)$$



Obr. 4.1: Působení síly F a odporu R [26]

Výsledná síla F je složena ze sil nutných k realizaci stříhu materiálu, sil nutných k překonání tření na čelní ploše nástroje při odvodu třísky z místa řezu a sil nutných k překonání tření mezi hřbetem nástroje a obrobenou plochou.

U řezného nástroje lze výslednou sílu v obecném řezném procesu rozložit do tří složek: řezná síla F_c , posuvová síla F_f a pasivní síla F_p . Vztah těchto složek k výsledné síle F lze vyjádřit jako:

$$\bar{F} = \sqrt{\bar{F}_c^2 + \bar{F}_f^2 + \bar{F}_p^2} \quad (4)$$

Charakter řezných sil je obecně závislý na:

- technologii obrábění (frézování, soustružení, vrtání atd.),
- materiálu obrobku (chemické složení, struktura, tepelné zpracování atd.),
- řezných podmínkách (řezná rychlost v_c , posuvová rychlost v_f , šířka záběru apod.),
- geometrii nástroje,
- nástrojovém materiálu,
- opotřebení nástroje,
- řezném prostředí (chladicí a mazací kapalina).

Řezné síly jsou hlavním limitujícím prvkem výkonu obrábění, který přímo souvisí se spotřebou energie během řezného procesu. Řezný výkon při obrábění P_c je dán vztahem:

$$P_c = \frac{v_c \cdot F_c}{6 \cdot 10^4} \quad (3)$$

kde: F_c – řezná síla [N]
 v_c – řezná rychlost [m/min]

Obdobně lze vyjádřit výkon potřebný pro posuv P_f :

$$P_f = \frac{v_f \cdot F_f}{6 \cdot 10^7} \quad (4)$$

kde: F_f – posuvová síla [N]
 v_f – rychlost posuvu [m/min]

Silové zatížení řezného nástroje je důležitou součástí výzkumu a vývoje v oblasti obrábění. Velikost silového zatížení řezného nástroje je jedním z vhodných kritérií pro posouzení stupně obrobiteľnosti materiálu. Z hlediska technologie obrábění lze obrobiteľnost definovat jako souhrn vlastností souvisejících se schopností daného materiálu být zpracován některou z metod obrábění. Při obrábění těžko obrobiteľných materiálů se obecně objevuje vyšší silové zatížení řezného nástroje. Informace o charakteru silového zatížení jsou také důležité pro:

- konstrukci obráběcího stroje a řezného nástroje,
- volbu řezných podmínek a strategie obrábění,
- posouzení přesnosti obrábění,
- monitorování opotřebení řezného nástroje,
- analýzu vibrací obráběcího systému a jevů v oblasti řezu. [26, 36]

4.2 Vlivy působící na velikost řezných sil

Velikost řezné síly F je nejčastěji závislá na obráběném materiálu a řezných podmínkách.

Z pevnostního hlediska je zatížen obrobek i nástroj. Síla, která působí na ně musí být eliminována v upínacím ústrojí nástroje a obrobku a přejata tak do stroje. [37]

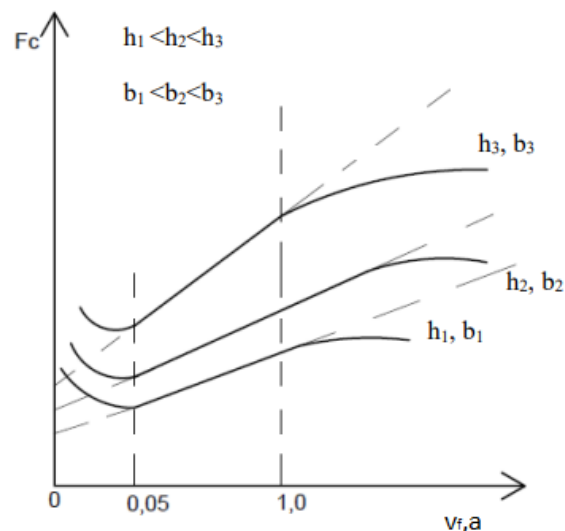
4.2.1 Obráběný materiál

Při obrábění odlišných druhů materiálů při konstantních podmínkách budou vyvolány rozdílné řezné síly. Za nejčastější příčinu se považují různé chemické a fyzikální vlastnosti těchto materiálů. Nárůst řezné síly může mít za důsledek rostoucí pevnost v tahu nebo nárůst tvrdosti. [37]

4.2.2 Posuv

Posuv v_f , nebo tloušťka řezu patří k veličinám, které mají určitý vliv na řeznou sílu. Při vyšších posuvech (přibližně od $s = 1$ mm/ot) se lineární průběh řezné síly odklání od daného směru.

Průběh křivek v grafu (Obr. 4.2) $F_c = f(v_f, a)$ je silně idealizován, neboť při velmi malých posuvech případně tloušťkách řezu nastává v závislosti na materiál obrobku přibližně $a \approx 0,05$ mm vzestup řezné síly jako důsledek narůstajícího vlivu zaoblení ostří. [37]



Obr. 4.2: Vliv posuvu na řeznou sílu [37]

4.2.3 Hloubka řezu

Při vzrůstající hloubce odřezávané vrstvy (a_p) stoupá řezná síla F_c rovnoměrně. V souřadném systému představuje přímkou, která prochází počátkem. Přímkou stoupají strměji nebo pozvolněji podle zvoleného posuvu. [37]

4.2.4 Štíhlostní poměr řezání

Pojem štíhlost řezu je podíl hloubky řezu a_p a posuv. Tento pojem lze vyjádřit tak, že malá hodnota G je vhodnější z hlediska řezných sil. Nejmenší řezná síla se dosahuje při čtvercovém průřezu, tj $G = 1$. Velký poměr naopak přináší zvýšení trvanlivosti nástroje. [37]

$$G = \frac{a_p}{v_f} \quad (5)$$

kde: a_p – hloubka řezu [mm]
 v_f – posuv [mm/min]

4.2.5 Úhel čela

Řezná síla roste, klesá-li úhel čela (γ) až do záporných hodnot. Jestliže roste v kladných hodnotách, může se to projevit poklesem řezné síly. Řezná síla se mění s každým jedním stupněm γ o 1 % pro ocel a ocel na odlitky. [37]

4.2.6 Úhel nastavení

Řeznou sílu F_c úhel nastavení ovlivňuje poměrně málo. Pro vázané obrábění, které se velmi často využívá v praxi, je minimum F_c při $\chi_r = 60^\circ$. Při volném řezání už řezná síla se vzrůstajícím úhlem nastavení nad 60° zůstává konstantní. [37]

4.2.7 Řezná rychlost

V dřívějších úvahách se usoudilo, že řezná rychlost nemá vliv na řezné síly. Nové výzkumy však ukazují, že opak je pravdou. V rozsahu od 100 až 600 $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$, se tvoří plynulá tříska, řezná síla s rostoucí rychlostí klesá. Řezná síla při snížení řezné rychlosti silně narůstá. [37]

4.2.8 Nástrojový materiál

Řezné síly poklesnou o 5 až 10 % při použití keramických břitových destiček oproti obrábění nástrojem ze slinutých karbidů. Při aplikaci rychlořezné oceli jako nástrojového materiálu vzroste síla o 5 % za shodných řezných podmínek. Hlavním důvodem je změna koeficientu tření mezi třískou a čelem nástroje, hřbetem a obrobenou plochou. [37]

4.2.9 Chladící a mazací prostředky

Řezná síla ve srovnání s obráběním za sucha může být výrazně snížena při použití mazacích a chladících kapalin. Vlastnosti a složení kapalin zde hrají výraznou roli. Lze počítat až s 15% poklesem řezné síly oproti obrábění za sucha. To platí zejména u rychlořezné oceli. U slinutého karbidu a řezné keramiky ne, protože se aplikují bez chlazení vzhledem k jejich náchylnosti k porušování křehkým lomem. [37]

4.2.10 Opotřebení břitu nástroje

Při obrábění dochází k opotřebení rezného nástroje v místech styku s třískou a obrobenou plochou. Vzniká tak na čele výmol a na hřbetě opotřebené plochy. Jejich rozměry se zvětšují, když je nástroj v záběru. Zvětšení rezné síly se projeví při nárůstu opotřebení. Výrazný vliv má opotřebení na hřbetu, kde se může rezná síla zvýšit o 30 až 50 %. [37]

5. JAKOST POVRCHU

Slovem jakost lze obecně označit přesnost geometrického tvaru, polohy a také drsnosti povrchu z hlediska technologie výroby. V povrchové vrstvě obrobenej součásti dochází k chemickým a fyzikálním změnám vlastností, které vznikly důsledkem procesu řezání. I tyto vlastnosti spadají do oblasti jakosti výrobku. [38]

5.1 Textura povrchu

Nerovnosti povrchu různých roztečí a velikostí tvoří prostorové útvary představující povrch součásti. K hodnocení povrchu je zapotřebí profil povrchu, který se získá řezem kolmým k měřenému povrchu. Měření je možné provést bezkontaktně nebo kontaktně. Takto vzniklý digitalizovaný profil je základ pro popis povrchu nenormalizovanými i normalizovanými parametry hodnocení. Kombinace vlnitosti, drsnosti a úchylek tvaru tvoří reálný povrch. [38, 39]

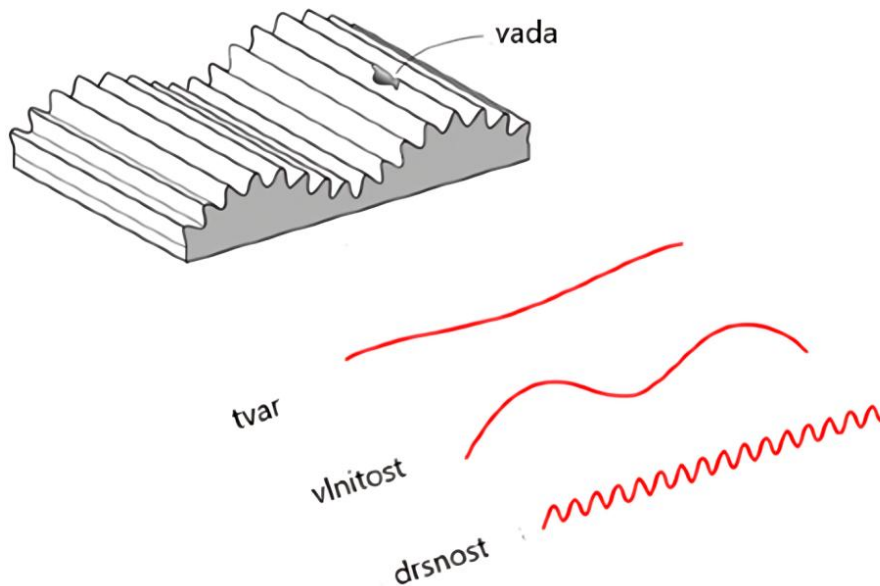
Posuzování nerovností povrchu součásti vyžaduje dva nezbytné pojmy: textura povrchu a nedokonalost povrchu. Nedokonalostmi povrchu se myslí trhliny, rýhy, staženiny, póry, mikrotrhliny, koroze. Tyto nedokonalosti jsou náhodně způsobené během skladování, výroby nebo během funkční doby povrchu. Do celkového hodnocení textury povrchu se však tyto nedokonalosti nezahrnují. [40]

Náhodné nebo opakované úchyly od geometrického tvaru tvoří texturu povrchu. Tyto úchyly tvoří trojrozměrnou topografii povrchu. [39, 40]

Nerovnosti vzniklé na povrchu dané součásti lze vyhodnocovat ze zobrazení ve 2D i 3D. Vyhodnocování ve 2D zobrazení znázorňuje profil z roviny řezu, která je kolmá k rovině povrchu. Zobrazení ve 3D je získáno zejména použitím bezdotykového způsobu vyhodnocování drsnosti povrchu. Nerovnost povrchu rozdělujeme na drsnost, vlnitost a tvar povrchu. [39, 40] Jednotlivé nerovnosti jsou zobrazeny na Obr. 5.1.

5.1.1 Drsnost

Pojmem drsnost se rozumí nejmenší nerovnosti (též označované jako mikronerovnosti), které vznikly ve výrobním procesu např. působením brousicího zrna nebo řezného nástroje. Drsnost je tedy obvykle důsledkem dokončovacích metod. Drsnost však bývá ovlivňována i hrubovacími operacemi.



Obr. 5.1. Textura povrchu [41]

Náhodný a periodický charakter uspořádání mají stopy, které jsou způsobeny řezným nástrojem. Vznikají tak i nejjemnější složky struktury povrchu – při obrábění tzv. odtrháváním mikročástic materiálu, působením malých vad na špičce nástroje nebo také působením zbytků nárůstků na břitě. [42, 43]

Vlnitost

Vlnitost je dána rozměrnějšími nerovnostmi, na kterých je navrstvena drsnost. Tyto nerovnosti vznikají deformací obrobku nebo jsou způsobeny kmitáním obrobku. Dalším možným vznikem rozměrnějších nerovností je pnutí v materiálu obrobku. Vlnitost je tedy tvořena nežádoucími vlastnostmi obráběcího stroje – nepřesnost vodících šroubů, nevyváženost broušícího kotouče nebo také nedostatečné tuhosti obráběcího stroje. Popsané vlivy jsou obecně označovány jako SNOP (stroj, nástroj, obrobek, přípravek). [38, 42]

Tvar

Největšími nerovnostmi profilu povrchu je definován tvar povrchu. Tyto nerovnosti však vznikají bez ohledu na vlnitost a drsnost. Nedostatečné tuhé upnutí obrobku nejčastěji iniciuje vznik úchylek tvaru. Dále tento vznik úchylek tvaru podporují nepřímosti vodících ploch obráběcích strojů nebo při vyšších teplotách řezání deformace součásti. [38] Je nutné si však uvědomit, že vznik všech tří typů nerovností se na povrchu nikdy neobjeví odděleně, vždy se objeví jejich kombinace. [40]

CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

Hlavním cílem disertační práce bylo provedení porovnávacích studií při použití soudečkových nástrojů pro obrábění volných (spline) ploch.

Použití volných ploch je často spojeno s jejich navržením pro součásti, které jsou značně subtilní (lopatky oběžných kol). Z tohoto důvodu je nutné zajistit, aby při jejich výrobě nedošlo k poškození vlivem velkého silového zatížení. Proto bude v práci řešeno, jak velké silové zatížení je generováno při nasazení soudečkových nástrojů.

Výsledná kvalita povrchu je jedním z klíčových parametrů, na základě, kterého se rozhoduje o použití výrobní technologie. Z tohoto důvodu je důležité zjistit, jak řezné podmínky ovlivňují dosažený povrch. Proto bude provedeno vyhodnocení vlivu řezných podmínek na kvalitu povrchu.

Jelikož jsou soudečkové nástroje alternativou pro kulové frézy bude součástí práce jejich porovnání při obrábění testovacích ploch.

V poslední části budou prozkoumány vybrané způsoby optimalizace procesu.

Všechny výsledky budou diskutovány ve vztahu použití těchto nástrojů při dokončovacím obrábění. Jednotlivé závěry budou formou doporučení pro aplikaci testovaných nástrojů založených na získaných výsledcích a jejich trendech.

Pro dosažení cílů práce byl navržen pracovní postup, který jde shrnout do následujících bodů:

1. Návrh vhodných ploch, které budou odpovídat volným plochám používaných v průmyslu, ať už při výrobě dutin forem nebo na oběžných kolách kompresorů či čerpadel.
2. Navržení obráběcích programů tak, aby byl vhodně využit potenciál soudečkových nástrojů (co největší kontaktní plocha).
3. Navržení podmínek pro experiment, zejména podmínek obrábění, tak, aby případně nedošlo k poškození nástrojů a nebyli překročeny doporučené hodnoty výrobců.
4. Provedení a vyhodnocení experimentů.
5. Popsání trendů výsledků a navržení doporučení pro nasazení soudečkových fréz.
6. Provedení srovnávacího experimentu kulovou frézou.
7. Popsání vybraných způsobů optimalizace procesu.

METODY ZPRACOVÁNÍ VÝSLEDKŮ

Návrh a realizace experimentů byly koncipovány tak, aby odpovídaly standardnímu postupu výroby součástek s volnou (spline) plochou. Každý výrobní krok ovlivňuje výslednou kvalitu povrchu, a proto bylo nezbytné zajistit konzistenci podmínek v průběhu celého experimentu. Výzkum byl navržen tak, aby umožnil získat relevantní data pro optimalizaci obrábění a definování doporučení pro použití soudečkových nástrojů. Detailní pracovní postup je dále rozepsán v následujících kapitolách.

Hlavní metodou pro prezentaci výsledků byl zvolen konturový graf, který nejlépe naplňuje cíl studie – navržení doporučení pro použití testovaných nástrojů. Aby bylo možné tato doporučení navrhnout, bylo měření pro každý testovaný nástroj provedeno v matici 3×3, což umožňuje analýzu vlivu různých kombinací parametrů na výslednou kvalitu povrchu i vzniklé silové zatížení. Výběr této maticové struktury vyšel z možnosti pokrytí značného experimentálního prostoru při zachování efektivity měření.

Druhou hlavní interpretační metodou je procentuální porovnání výsledků. Tento způsob prezentace umožňuje snadnější srovnání mezi různými nástroji a parametry, protože pomáhá identifikovat relativní změny a trendy v měřených veličinách.

Obrábění probíhalo za přesně definovaných a opakovatelných podmínek. Veškeré řezné parametry byly nastaveny na základě doporučení výrobců nástrojů tak, aby nepřekročily maximální povolené hodnoty. Tím byla zajištěna nejen bezpečnost experimentu, ale také jeho praktická využitelnost v reálných výrobních podmínkách.

Výsledky řezných sil jsou prezentovány jako průměr celkové řezné síly při použití soudečkových nástrojů. Ty byly určeny z pěti hodnot. Pro vyhodnocení drsnosti povrchu byla použita metoda řezu, tj. naskenovaná oblast byla analyzována pomocí deseti řezů, z nich byly následně určeny průměrné hodnoty daných parametrů.

Pro porovnání účinnosti soudečkových nástrojů byla do studie zahrnuta také kulová fréza, která představuje běžně používanou alternativu. V tomto případě byla použita metodika DOE (Design of Experiments), což umožnilo snížit počet potřebných měření a současně získat dostatečně reprezentativní data pro hodnocení vlivu řezných podmínek na kvalitu povrchu. Tento přístup umožňuje efektivní analýzu bez nutnosti rozsáhlých experimentálních sérií.

Zvolené metody tak zahrnují 3D modelování, návrh obráběcích strategií a jejich analýzu z hlediska zbytkového materiálu. Dále zahrnují obrábění testovací plochy se záznamem řezných sil, vyhodnocení přesnosti obrábění a následné vyhodnocení drsnosti povrchu. Statistické analýzy byly provedeny v softwaru Minitab.

6. PŘÍPRAVA A REALIZACE EXPERIMENTŮ

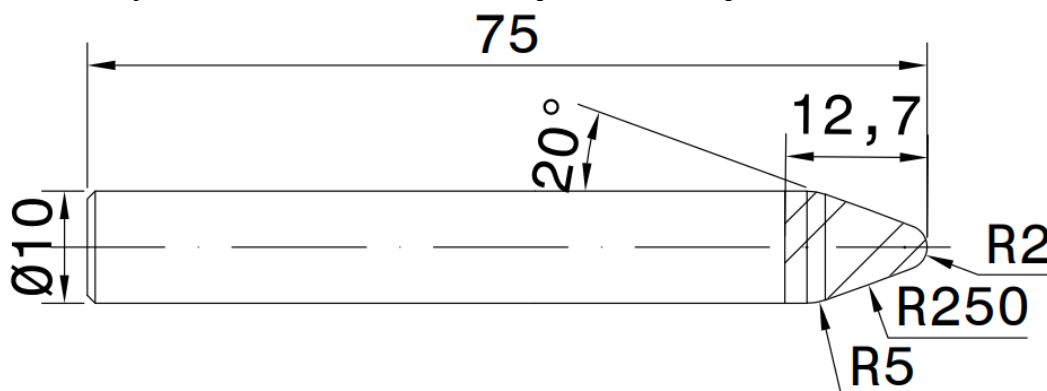
Příprava experimentů a jejich provedení se odvíjelo od charakteru použitých nástrojů. Soudečkové nástroje se nejčastěji uplatňují při obrábění obecných neboli volných (spline) ploch. Bylo tak nutné vytvořit plochy, které mají stejný charakter. Pro tyto plochy pak navrhnout strategii obrábění, při kterém budou vyhodnocovány řezné síly a dosažené drsnosti povrchů.

6.1 Použité nástroje

Jelikož se soudečkové nástroje v praxi uplatňují stále častěji, roste i počet výrobců, kteří je nabízejí v jejich portfoliu. Pro firmy je tak stále složitější vybrat vhodný nástroj. Tato práce je zaměřena na výzkum vlivu řezných podmínek dvou typů nástrojů. Kdy každý typ byl použit od dvou výrobců. Nástroje byly zakoupeny od firmy Seco a Hoffman Group. Konkrétní nástroje jsou detailně popsány v následujících kapitolách.

6.1.1 Kónický tvar

Kónický tvar soudečkových fréz je vhodný pro obrábění ploch s rušivými konturami a na velké plochy. Od firmy Seco byl použit nástroj s obchodním označením JH744100T2R2R250.0Z4 SIRA, je zobrazen na Obr. 6.1. Pro snazší orientaci ve výsledcích bude tento nástroj označován jako R250.



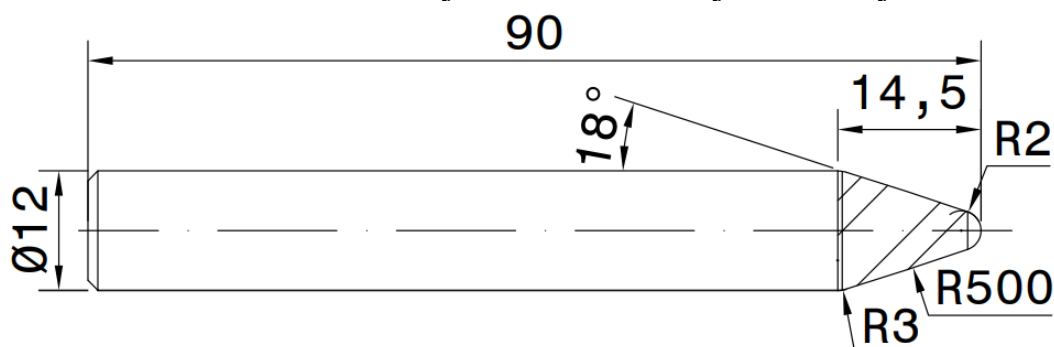
Obr. 6.1: Nástroj R250

Hlavní parametry nástroje R250 jsou uvedeny v Tab. 6.1.

Tab. 6.1: Parametry nástroje R250 [44]

Parametr	Hodnota	Jednotka
Počet zubů	4	[-]
Úhel sklonu šroubovice	20	[°]
Délka břitu	12,7	[mm]
Účinný poloměr	250	[mm]
Poloměr břitu	2	[mm]
Celková délka	75	[mm]
Průměr stopky	10	[mm]

Použitý nástroj od firmy Hoffman Group má označení 207532 12/500 a je zobrazen na Obr. 6.2. Tento nástroj bude označován jako nástroj R500.



Obr. 6.2: Nástroj R500

Hlavní parametry nástroje R500 jsou uvedeny v Tab. 6.2.

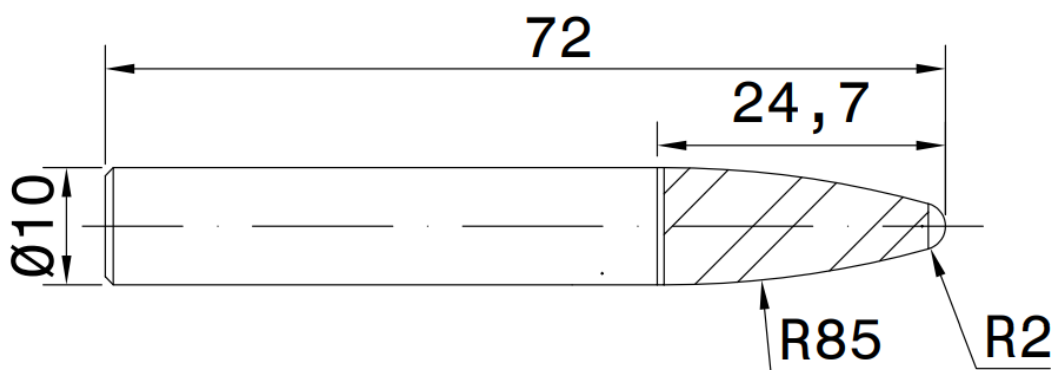
Tab. 6.2: Parametry nástroje R500 [45]

Parametr	Hodnota	Jednotka
Počet zubů	4	[-]
Úhel sklonu šroubovice	30	[°]
Délka břitu	14,5	[mm]
Účinný poloměr	500	[mm]
Poloměr břitu	2	[mm]
Celková délka	90	[mm]
Průměr stopky	12	[mm]

U použitých kónických nástrojů se vyskytují rozdíly v geometrii. Nejvýraznější je rozdíl v průměru nástroje. Od firem, které nástroje dodaly nebylo možné v této kategorii nástrojů získat nástroje shodného průměru, proto bylo rozhodnuto, že budou porovnány nástroje o rozdílném průměru. Jelikož se však jedná o konkurenční výrobce, je možné předpokládat, že v praxi by bylo postupováno stejně a bylo by rozhodováno mezi těmito nejvíce se podobajícími se nástroji.

6.1.2 Tangenciální tvar

Tangenciální tvar soudečkových fréz je vhodný na obrábění hlubokých a špatně přístupných dutin. Od firmy Seco byl použit nástroj s označením JH734100X2R2R85.0Z4 SIRA, je zobrazen na Obr. 6.3. Označení tohoto nástroje je R85.



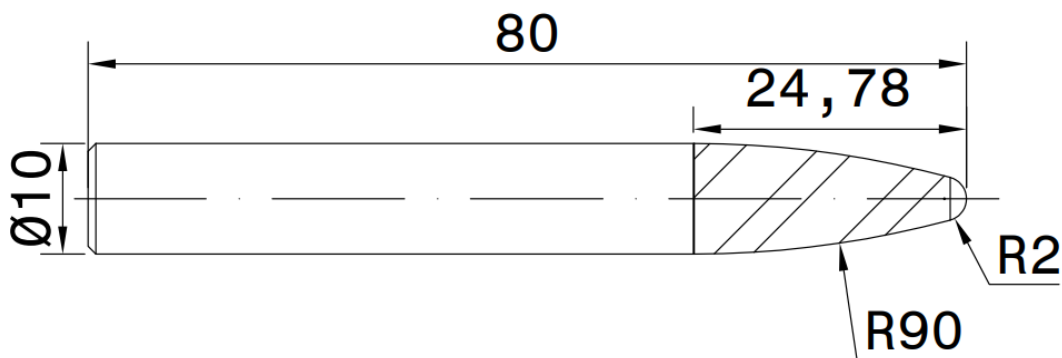
Obr. 6.3: Nástroj R85

Hlavní parametry nástroje R85 jsou uvedeny v Tab. 6.3

Tab. 6.3: Parametry nástroje R85 [46]

Parametr	Hodnota	Jednotka
Počet zubů	4	[-]
Úhel sklonu šroubovice	20	[°]
Délka břitu	22,3	[mm]
Účinný poloměr	85	[mm]
Poloměr břitu	2	[mm]
Celková délka	72	[mm]
Průměr stopky	10	[mm]

Od firmy Hoffman Group byl použit nástroj s označením 207525 10/90, který je zobrazen na Obr. 6.4. Nástroj bude označován R90.



Obr. 6.4: Nástroj R90

Hlavní parametry nástroje R90 jsou uvedeny v Tab. 6.4.

Tab. 6.4: Parametry nástroje R90 [47]

Parametr	Hodnota	Jednotka
Počet zubů	4	[-]
Úhel sklonu šroubovice	30	[°]
Délka břitu	24,5	[mm]
Účinný poloměr	90	[mm]
Poloměr břitu	2	[mm]
Celková délka	80	[mm]
Průměr stopky	10	[mm]

U tangenciálního tvaru bylo možné získat nástroje o shodném průměru. Rozdílné výsledky, které budou případně naměřeny, budou způsobeny drobnými rozdíly mezi nástroji (např. úhel sklonu šroubovice). Tyto rozdíly jsou způsobeny buď vlivem požadavků zákazníků, popřípadě zkušenostmi jednotlivých firem. Tato skutečnost jen zdůrazňuje potřebu provádět porovnávací experimenty, neboť i takto malé rozdíly mohou vést k výrazným změnám, které mohou rozhodnout o tom, který nástroj bude ve finále zakoupen.

6.2 Materiál

Pro testování byl zvolen materiál s označením W. NR. 1.1730. Jedná se o nelegovanou nástrojovou ocel s vynikající obrobitelností a dobrou houževnatostí jádra. Používá se pro netvrzené díly vstřikovacích forem (dutiny a rámy), ruční nářadí a části, které nevyžadují vysokou kvalitu povrchu. [48] Jeho chemické složení je uvedeno v Tab. 6.5 a jeho fyzikální vlastnosti pak v Tab. 6.6.

Tab. 6.5: Chemické složení oceli 1.1730 [48]

Prvek	Množství	Limitní množství	Jednotka
Uhlík	0,45	0,40-0,50	[%]
Mangan	0,70	0,60-0,80	[%]
Křemík	0,30	0,15-0,40	[%]
Fosfor	0,029	≤ 0,035	[%]
Síra	0,027	≤ 0,035	[%]

Tab. 6.6: Fyzikální vlastnosti oceli 1.1730 [49]

Vlastnost	Hodnota	Jednotka
Hustota	7,85	$\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$
Teplotní roztažnost	$11,65 \cdot 10^{-6}$	K^{-1}
Teplotní vodivost	49,4	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

Materiál byl zvolen jak pro jeho dobrou obrobitelnost, tak i proto, že se běžně používá v plastikářském průmyslu pro výrobu forem. Ty, jak bylo uvedeno dříve,

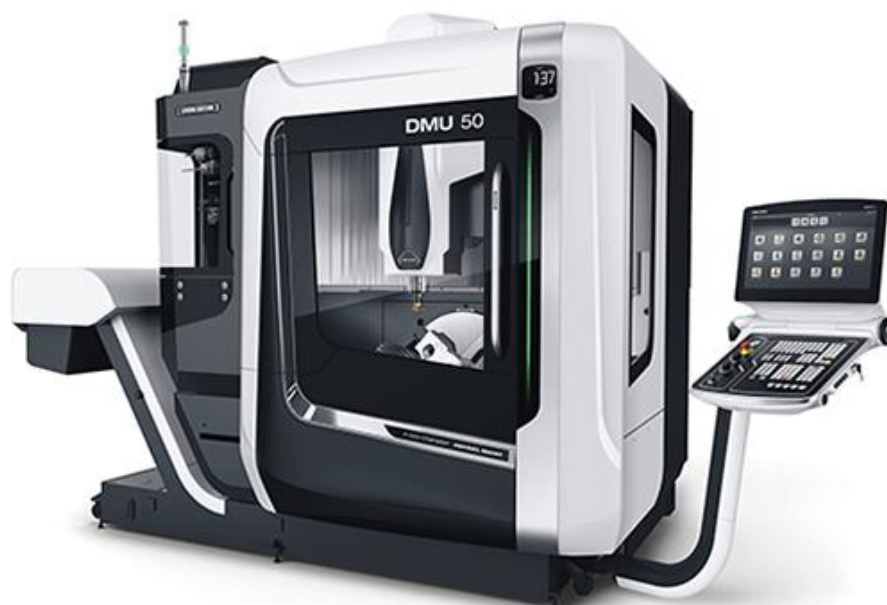
se stále ve větší míře neobejdou bez volných ploch zajišťující designovou a funkční stránku výrobku.

6.3 Použitá zařízení

Pro splnění cílů práce a zjištění vlivu řezných podmínek na silové zatížení obrobku a na výslednou drsnost povrchu bylo třeba využít následujících zařízení.

6.3.1 DMU 50

Obrábění bylo provedeno na obráběcím centru DMU 50 3rd Generation (Obr. 6.5) od firmy DMG MORI. Jedná se o univerzální obráběcí centrum pro 5osé simultánní obrábění. Při využití simultánního 5osého obrábění je maximální neurčitost umístění 6 μm . Obráběcí centrum používá řídicí systém Siemens Sinumerik 840 d sl / CELOS. [50] Hlavní technické údaje o stroji jsou uvedeny v Tab. 6.7.



Obr. 6.5: Obráběcí centrum DMU 50 [50]

Tab. 6.7: Parametry obráběcího centra DMU 50 [50]

Parametr	Hodnota	Jednotka
Max. pojezd v ose X	650	[mm]
Max. pojezd v ose Y	520	[mm]
Max. pojezd v ose Z	475	[mm]
Max. zatížení stolu	300	[kg]
Průměr stolu	360	[mm]
Zásobník nástrojů	30	[pozic]

6.3.2 Dynamometr

K měření řezných sil byl použit dynamometr od firmy Kistler s označením 9129AA (Obr. 6.6). Jde o vícesložkový dynamometr, jenž umožňuje měření tří složek výsledného vektoru síly a tří složek výsledného vektoru momentu. Tento typ dynamometru se vyznačuje velkým rozsahem měření, malou teplotní chybou a disponuje malými rozměry. Dynamometr je složen ze tříložkových snímačů síly, jež se nachází mezi krycí deskou a dvěma základními deskami. Každý snímač síly obsahuje tři krystalové kotouče, ze kterých je jeden citlivý na zatížení ve směru osy Y a zbývající dva jsou citlivé na smykovou sílu, buď v ose X, nebo v ose Z. Síly jsou měřeny téměř bez posunu a výstupy ze čtyř vestavěných snímačů sil se přenáší do devítipólové zásuvky. [51]



Obr. 6.6: Dynamometr Kistler 9129AA [51]

6.3.1 Mikroskop

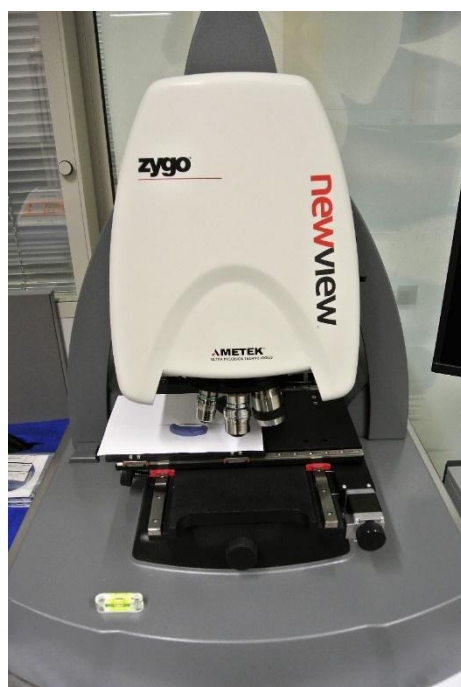
Pro prvotní zhodnocení dosažených povrchů byl použit Digitální mikroskop 5303-AF103 od firmy Insize (Obr. 6.7.). Mikroskop je vybaven automatickým vyvažováním bílé, s nastavitelností jasu a kontrastu. Mikroskop nabízí 20x~128x zvětšení. [52]



Obr. 6.7: Mikroskop Insize 5303-AF103

6.3.2 3D optický profilometr

Pro vyhodnocení drsnosti byl použit optický profilometr od firmy Zygo s označením NewView8000 (Obr. 6.8). Jde o výkonný interferometrický systém nové generace s technologií Coherence Scanning Interferometry, která používá mód vertikálního interferometrického skenování (Vertical Scanning Interferometry) i interferometrického skenování na základě fázového posuvu využitím bílého a monochromatického světla (Phase Shifting Interferometry). Díky kombinaci těchto metod je možné provádět měření na transparentních i netransparentních materiálech, jako jsou kovy, dielektrika (sklo, polymery, keramika), lze měřit jejich multivrstvy nebo jen reflexní kovové vrstvy na dielektrických materiálech, a to bez nutnosti volby módu měření. [53]



Obr. 6.8: Profilometr NewView 8000 [53]

6.3.3 3D skener

Vyhodnocení charakteru obrábění a jeho vlivu na povrch bylo provedeno pomocí 3D optického skeneru ATOS TripleScan II 5M od společnosti GOM. Skener využívá technologie proužkové projekce skenování s modrým světlem. Výsledkem každého měření skenerem jsou 3D souřadnice rozložené po celé ploše měřeného objektu, které jsou pak pomocí softwaru VMR převedeny do digitální podoby. To umožňuje srovnání reálných dat s CAD daty. Stroj byl použit v konfiguraci MV 100, tzn., že měřený objem je 100x75x70 mm se vzdáleností mezi naměřenými body 45,09 μm . [54]

6.3.4 3D souřadnicový stroj

Pro porovnání obrobených ploch, které vyžadovalo velkou přesnost, byl použit 3D souřadnicový stroj Contura G2 od firmy Zeiss. Jeho maximální odchylka při bodovém měření je 1,8 μm . [55]

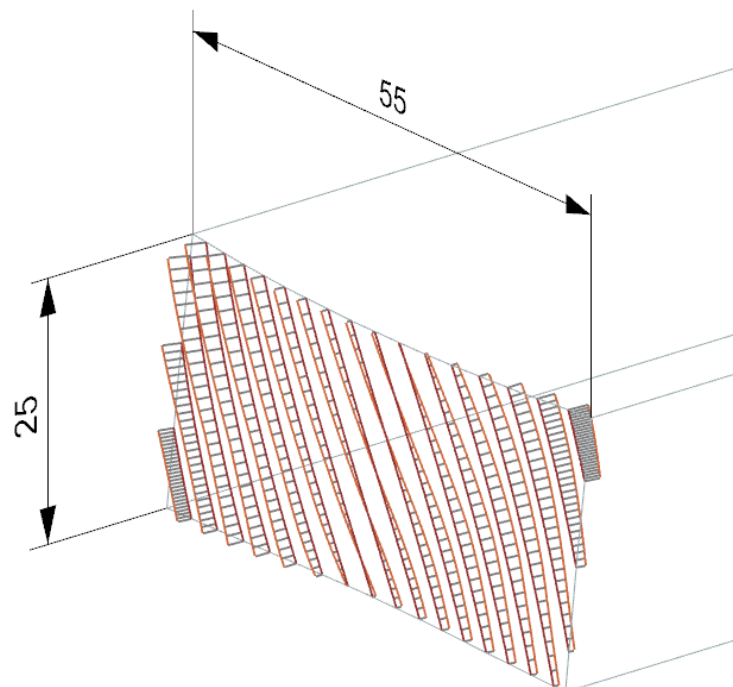
6.4 Zkušební vzorky

Pro tvorbu testovacích ploch byl použit program NX 1946 od firmy Siemens. Jedná se o CAD/CAM program umožňující provést vymodelování tvaru, naprogramování obráběcích drah a provedení analýzy obrábění.

Jelikož je cílem práce analýza dvou typů nástrojů, které díky rozdílným tvarům nacházejí uplatnění při různých obráběcích operacích, bylo nutné pro jednotlivé typy nástrojů vytvořit vhodnou geometrii.

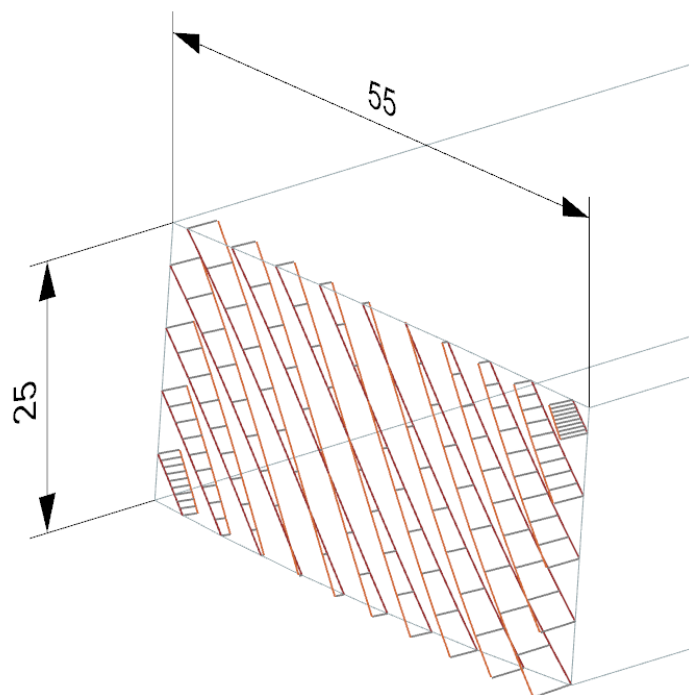
Generování testovacích ploch bylo provedeno navržením sítě bodů. Těmi byla následně proložena výsledná plocha. Tato plocha byla následně přenesena na model polotovaru. Zvoleným polotovarem byl hranol o průřezu 25x55 mm a délce 110 mm. Tvary těchto ploch jsou představeny níže.

Plocha A (Obr. 6.9) byla navržena pro obrábění nástroji s kónickým tvarem. S přihlédnutím k doporučenému použití testovaných nástrojů se na této ploše nachází zakřivení ve všech translačních osách.



Obr. 6.9: Plocha A

Plocha B (Obr. 6.10) byla navržena pro obrábění nástroji s tangenciálním tvarem. S přihlédnutím k doporučenému použití se jedná o tvarově jednodušší plochu. Stále však splňuje podmínky pro volné (spline) plochy.



Obr. 6.10: Plocha B

6.4.1 Postup obrábění při vyhodnocování drsnosti

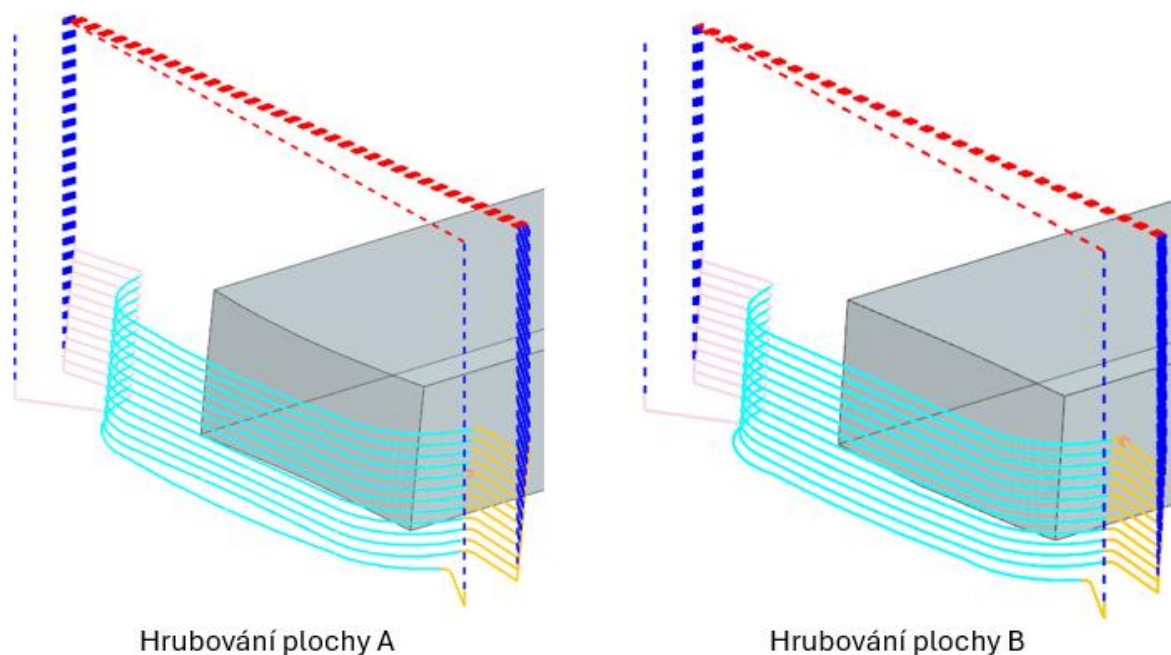
Obrábění soudečkovými nástroji je dokončovací operace. Aby bylo možné provést experimenty bylo třeba u všech vzorků provést hrubování, dohrubování a až poté bylo možné provést dokončení se soudečkovými nástroji.

Aby byly zajištěny stejné podmínky při všech experimentálních měření byl použitý polotovar upínán vždy stejně. K upnutí polotovaru byl použit svěrák od firmy Lang a jak je zobrazeno na Obr. 6.11 byl polotovar vždy upnut čelní plochou ve vzdálenosti 20 mm od čelistí.



Obr. 6.11: Upnutý polotovar

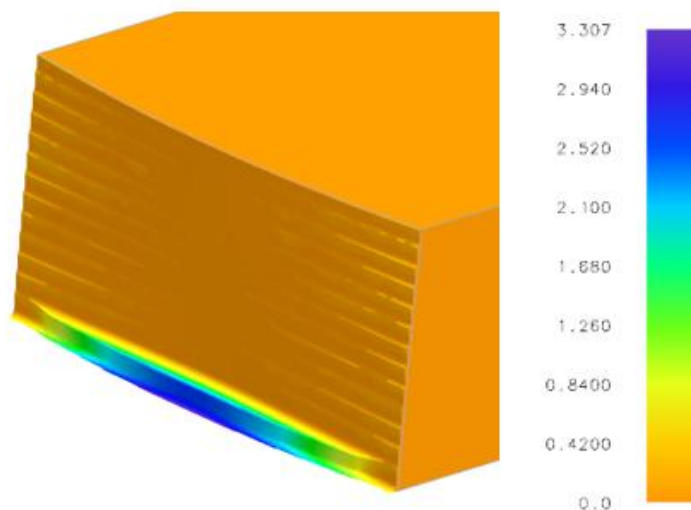
Výroba každé plochy za stanovených podmínek pro další testování zahrnovala použití 3osého hrubování. To je standartní postup u výroby, neboť cílem hrubování je odebrání co největšího množství materiálu za co nejkratší čas. Víceosé operace by v tomto případě vedly k nežádoucímu prodlužování času výroby. Jako hrubovací nástroj byla použita frézovací hlava s označením R217.69-1632.RE-10-5A. Jedná se o frézu o průměru 32 mm s 5 lůžky pro inserty. V ní byly použity inserty s označením XOMX10T308TR-ME07 MS2050 určené pro obrábění ocelí, obojí od firmy SECO. Na Obr. 6.12 je pak znázorněn průběh hrubování. Obě plochy vyžadovaly celkem 13 obráběcích drah, neboť výška jednoho řezu byla stanovena na 2 mm.



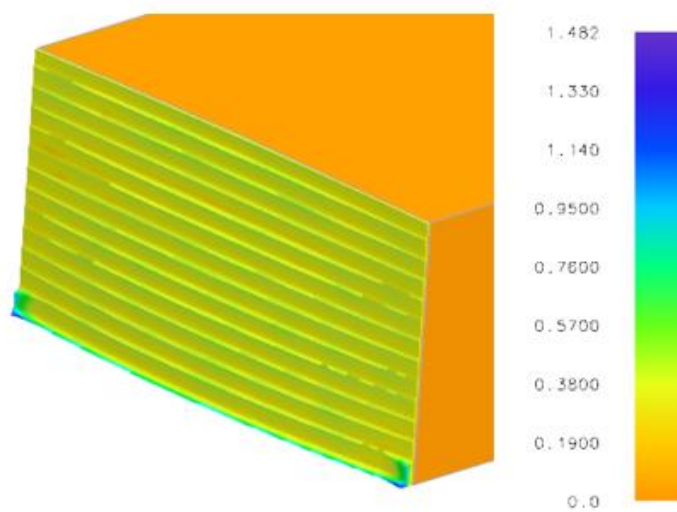
Obr. 6.12: Hrubování

Cílem experimentu bylo co nejvíce napodobit reálnou výrobu, která by probíhala v praxi. U hrubování tak byl nastaven zůstatek materiálu na 0,5 mm. Na Obr. 6.13 jsou zobrazeny analýzy zbytků materiálu po hrubování. U plochy A lze vidět, že bylo této hodnoty na většině plochy dosaženo. Výjimkou je spodní část plochy, kde nebylo možné, skrz nastavení (3osé obrábění) a geometrii plochy, přidavek obrobit. U plochy B bylo hrubování vlivem podfrézování, z hlediska zbytku materiálu, úspěšnější. Maximální zbytek materiálu dosáhl 1,5 mm. Ten se opět nachází u spodní části testovací plochy, kde nebyl možný přístup nástroje.

Jelikož by takto výrazné zbytky materiálu nespĺňovaly doporučené podmínky obrábění od výrobců soudečkových nástrojů a potenciálně by mohly vést k poškození nástrojů, bylo nutné provést další operaci.



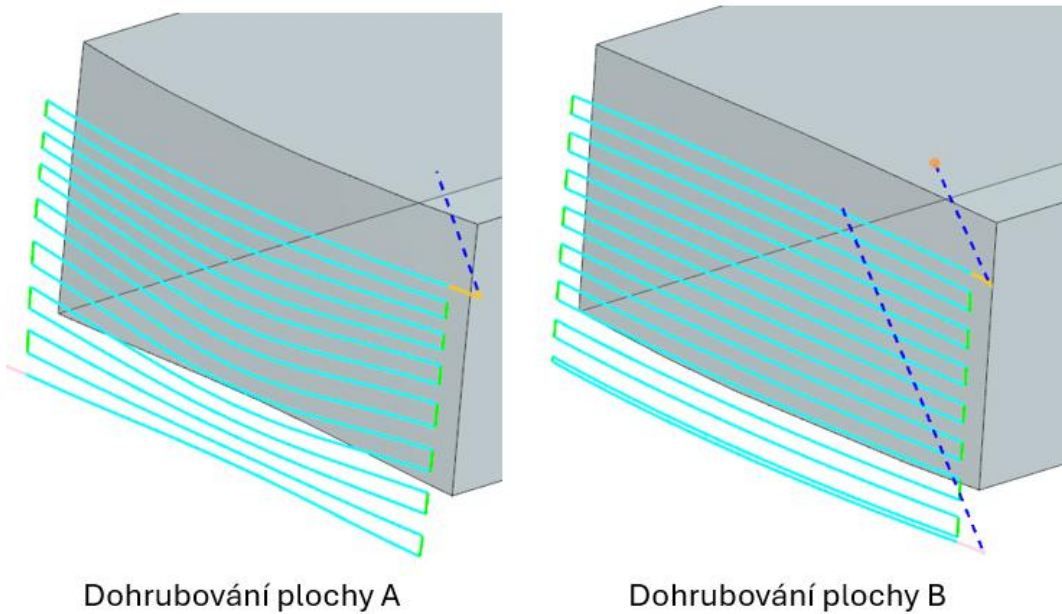
Analýza po hrubování plochy A



Analýza po hrubování plochy B

Obr. 6.13. Zbytek materiálu po hrubování

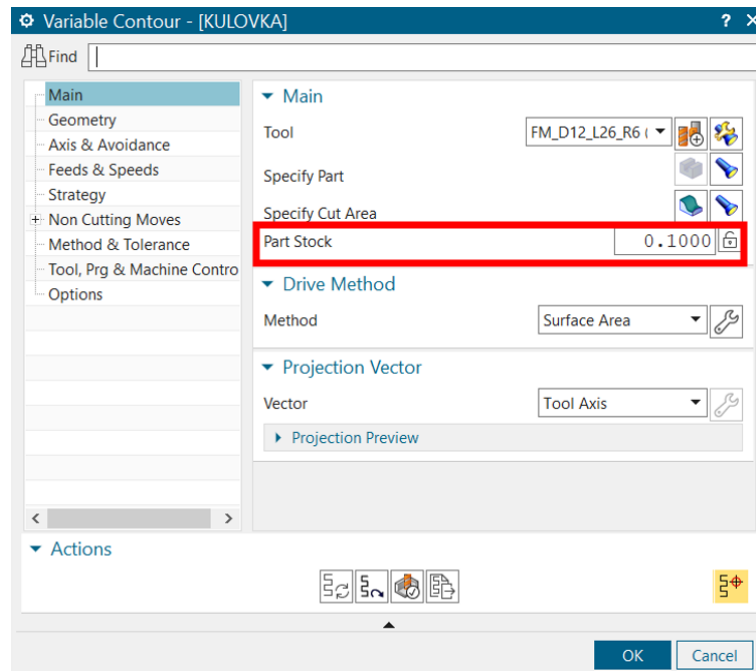
Následovalo tedy dohrubování, které bylo navrženo jako obrábění kulovou frézou. Použita byla dvoubřitá kulová fréza s označením JHB970120D2B.0Z2 SIRA od firmy SECO o průměru 12 mm. Jelikož se nejednalo o dokončovací operaci, nebylo zde cílem dosažení co nejkvalitnějšího povrchu, ale pouze sjednocení přídatku po celé ploše. Dráhy obrábění jsou zobrazeny na Obr. 6.14. Plocha A vyžadovala pro obrobení 15 drah, u plochy B to bylo drah 16.



Obr. 6.14: Dohrubování

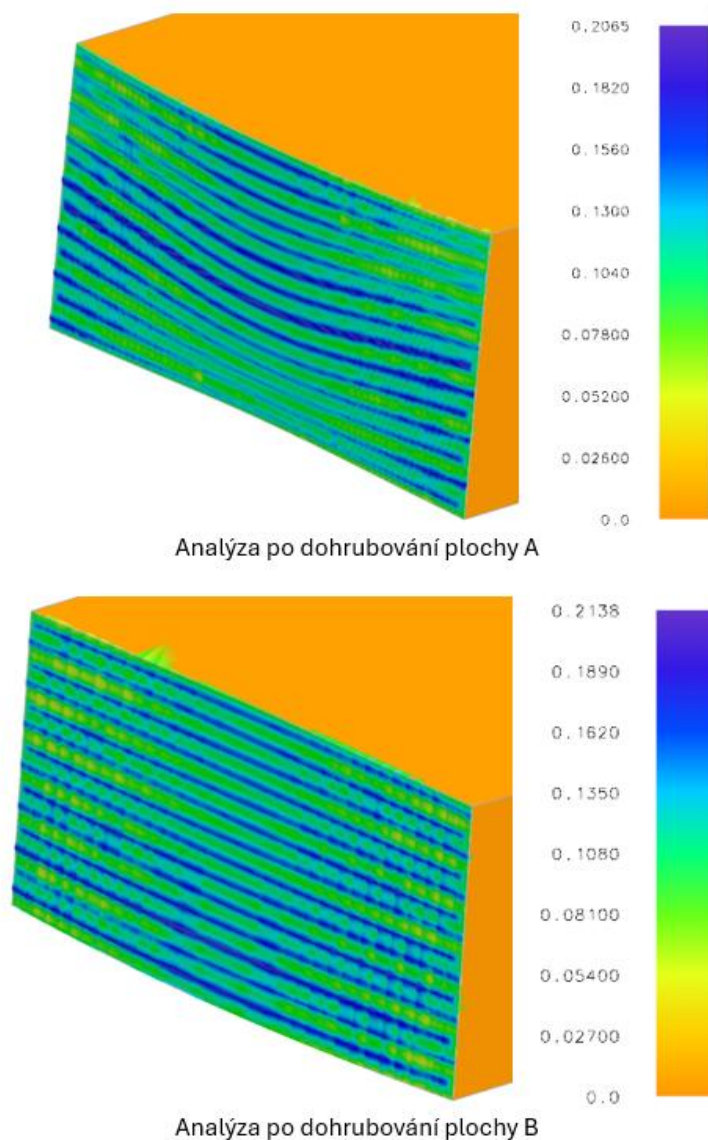
Jak vyplývá ze zobrazení na Obr. 6.14, byla zvolena strategie obrábění ZIG ZAG. Čili, že se střídá sousledné a nesousledné obrábění. Toto bylo opět voleno za účelem ušetření času a tím zvýšení efektivity obrábění. Odklon nástroj od plochy byl nastaven na hodnotu 30° .

Jelikož se jednalo o poslední operaci před použitím soudečkových nástrojů, bylo potřeba získat požadovaný přírůstek na obrábění pro soudečkové frézy. Toho bylo dosaženo nastavením přírůstku v nastavení operace v záložce Main, jak je ukázáno na Obr. 6.15.



Obr. 6.15. Nastavení přírůstku na povrchu

Cílem bylo dosažení co nejrovnoměrnějšího množství zbytkového materiálu na obráběné ploše. Jak je vidět na Obr. 6.16, byly po dohrubování patrné průjezdy nástroje. Stejně tak nebylo dosaženo úplné rovnoměrnosti na celé ploše. Její dosažení by bylo možné za cenu zhuštění drah nástroje a tím zabránění takto výrazných stop po nástroji. Po zhodnocení zbytkového materiálu ovšem bylo usouzeno, že je možné na takové ploše provést dokončování, neboť je možné se domnívat, že i v praxi by nebylo z časových důvodů žádoucí neúměrně prodlužovat přípravné operace.

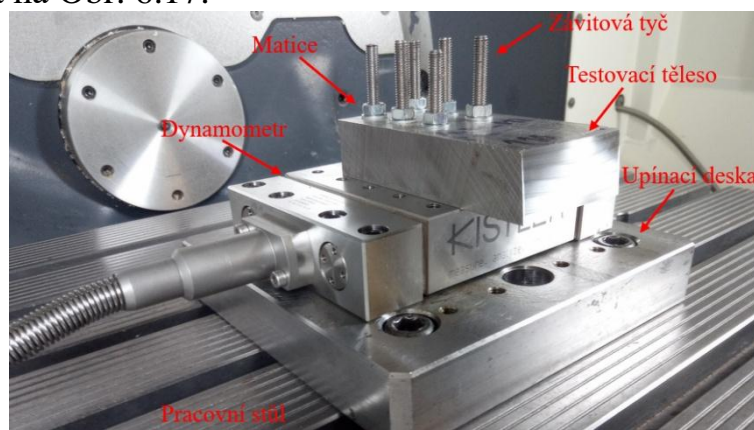


Obr. 6.16: Analýza zbytků materiálu po dohrubování

Po provedení testovacích obráběcích operací byla část testovacího tělesa s obrobenou plochou uříznuta pomocí pásové pily. Takto byl získán vzorek pro vyhodnocení drsnosti. Poté se celý proces opakoval, kromě obrábění se soudečkovým nástrojem, kde byly variovány podmínky obrábění.

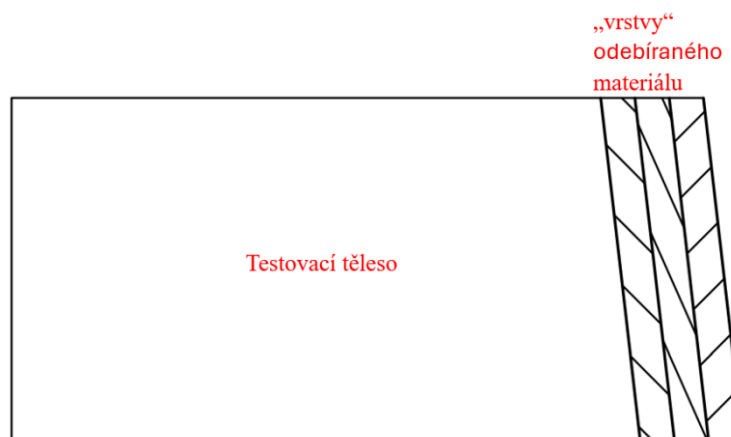
6.4.2 Měření řezných sil

Na rozdíl od postupu při vyhodnocování drsnosti povrchu byl postup u vyhodnocování řezných sil odlišný. Rozměry polotovaru zůstaly shodné, ale z důvodu potřeby upnutí k dynamometru do něj byly zhotoveny díry o průměru 6 mm, jež byly určeny pro závitové tyče, které byly zašroubovány do závitových otvorů v dynamometru. Na tyto tyče bylo nasazeno a pomocí matic upnuto testovací těleso. Tento způsob upnutí byl zvolen z důvodu vytvoření co nejlepší kontaktní plochy s dynamometrem. Také se jedná o dostatečně pevné upnutí, které zajistí, že u testovacího tělesa nebude docházet ke chvění, které by mohlo zkreslovat dosažené výsledky. Testovací těleso tak bylo upnuto k dynamometru, který byl přes upínací desku připevněn k pracovnímu stolu obráběcího stroje, jak je možno vidět na Obr. 6.17.

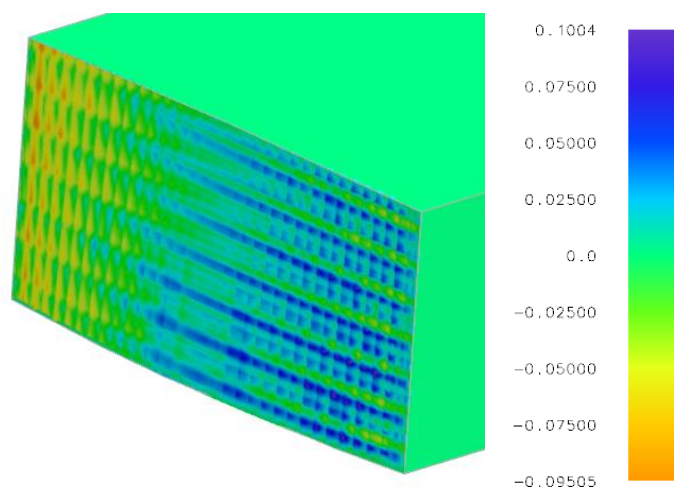


Obr. 6.17. Upnutý polotovar k dynamometru

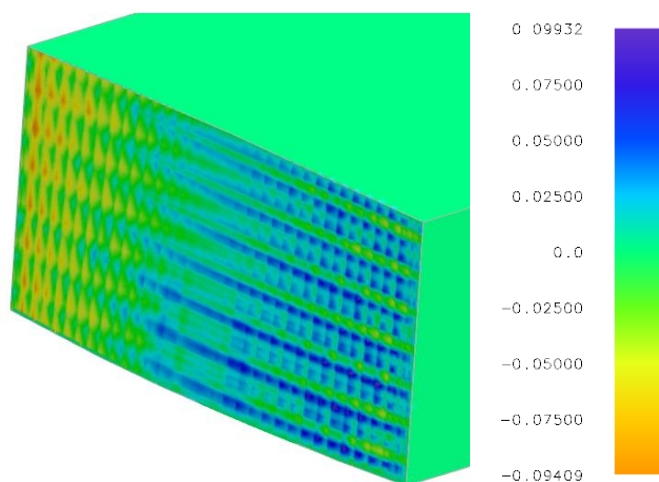
Při měření řezných sil nebylo nutné po každém obrábění oddělení obrobenej plochy pro následnou analýzu. Proto bylo zvoleno postupné odebrání „vrstev“ jak je znázorněno na Obr. 6.18. Takto bylo možné provést analýzu řezných sil více efektivně. Navíc tak byl zajištěn konstantní přírůstek na obrobení a případné nedostatky z předchozích operací, které by způsobovaly nestandardní zvýšení řezného odporu. Naměřené řezné síly tak odpovídají nastavenému přírůstku na obrobení.



Obr. 6.18. Schématické zobrazení obrábění



Analyza po dokončení nástrojem R85



Analyza po dokončení nástrojem R90

Obr. 7.2: Analýza zbytku materiálu po dokončení tangenciálními nástroji

Za účelem popsání vlivu řezných podmínek na obráběcí proces byly navrženy testovací podmínky. Ty jsou uvedeny v Tab. 7.1, byly voleny tak, aby dodržely doporučené hodnoty výrobcem.

Tab. 7.1: Podmínky měření u tangenciálních nástrojů

Zn.	Proměnná	Hodnota			Jednotky
a_d	přídavek na obrobení	0,05	0,1	0,15	[mm]
f_z	posuv na zub	0,04	0,06	0,08	[mm]
v_c	řezná rychlost	200			[m/min]

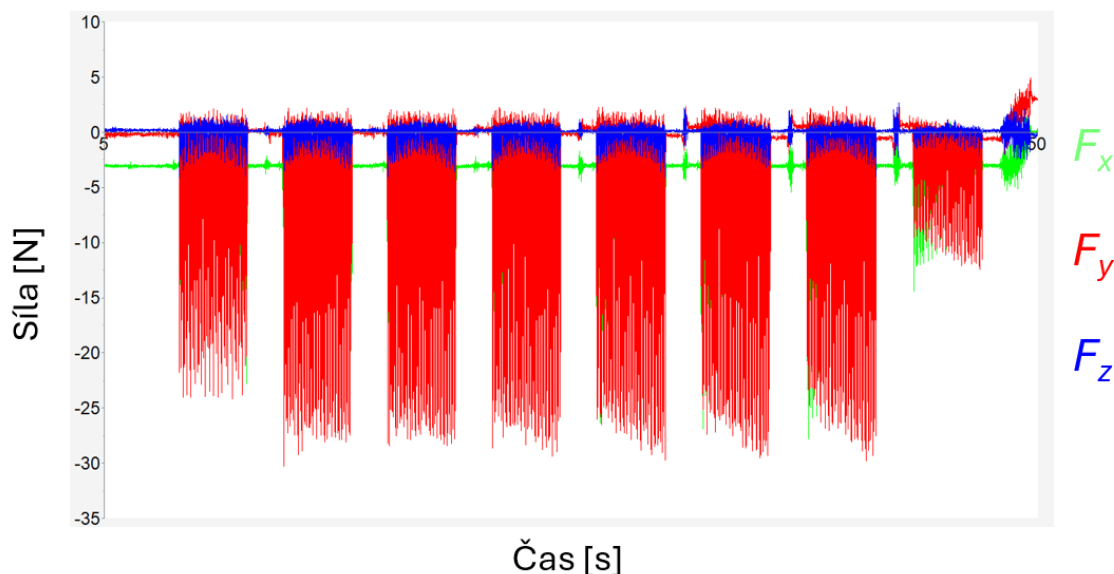
Z obráběcích drah a k nim navrženým řezným, vyplynula jedna skutečnost. Obrábění tangenciálními nástroji je vysoce časově efektivní. V Tab. 7.2 jsou uvedeny potřebné časy pro obrobení, které vycházející ze simulace. Ta při určování tohoto času bere v potaz použití 100 % pracovní rychlosti i použití maximálního rychloposuvu pro polohování. Při reálném nasazení by se tak mohly výrobní časy lišit. Díky shodným průměrům nástrojů, i jejich počtu zubů, jsou výrobní časy při daných posuvech identické.

Tab. 7.2: Časy obránění tangenciálními nástroji

Nástroj	Posuv na zub			Jednotky
	0,04	0,06	0,08	
R85	37	27	22	[s]
R90	37	27	22	[s]

7.1.1 Řezné síly

Řezné síly byly vyhodnoceny pomocí softwaru DynoWare od firmy Kistler. Na Obr. 7.3 je možné vidět, jak software silové zatížení působící na obrobek reprezentuje. Je možné si všimnout, že všechny řezné síly vykazují především záporné hodnoty. Tato skutečnost je způsobena orientačním systémem dynamometru, který nekorespondoval s orientačním systémem stroje.



Obr. 7.3: Reprezentace řezných sil v softwaru Dynoware

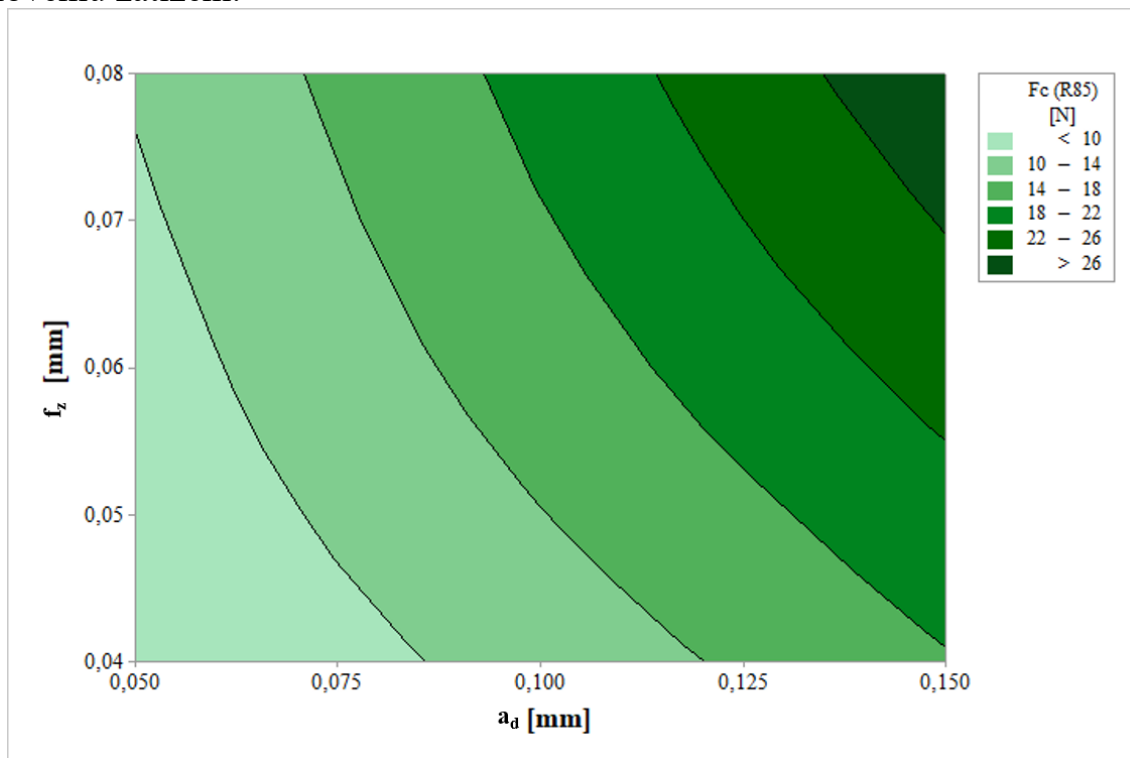
Řezné síly působí na obrobek ve 3 základních osách (X, Y a Z). Vzhledem k využití 5osého obrábění, a tím způsobeného naklápěním při obráběcím procesu, by vyhodnocování řezných sil v jednotlivých osách bylo značně problematické a proto pro účely tohoto experimentu byla vyhodnocována celková řezná síla, kterou je možné získat z následujícího vztahu:

$$\vec{F}_C = \sqrt{F_X^2 + F_Y^2 + F_Z^2} \quad (6)$$

Celkové řezné síly pak byly zaneseny do konturových grafů. Ty využívají interpolaci pro doplnění mezistupňů ve výsledcích. Představují tak optimální reprezentaci výsledků pro odečítání parametrů pro dosažení požadovaných výsledků.

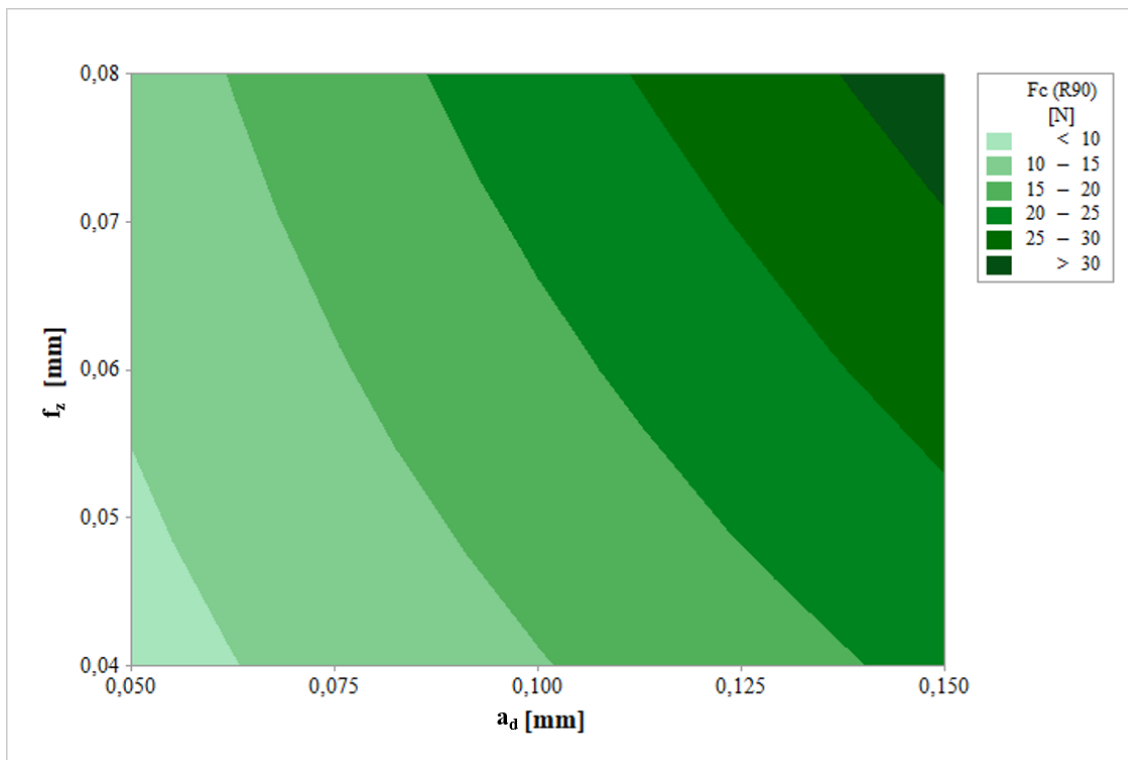
Z Obr. 7.4 je vidět, že závislost řezných sil je nejen na přídavku na obrábění, ale i na velikosti posuvu na zub. Projevil se tak synergický efekt proměnných. Z naklonění jednotlivých trendů ve svislém směru lze určit, že vliv přídavku na

obrobení je ten dominantní. Změna směrem k vyšším posuvům je pak méně výrazná. Zjištěná rozpětí se pohybují v malém rozmezí a samotná maximální oblast nepředstavuje žádné výrazné silové zatížení (26 N). Maximální rozmezí sil se navíc nachází v zóně, kde se potkávají nejvyšší hodnoty testovaných proměnných. Při použití nástroje je tak velmi snadné zabránit nežádoucímu silovému zatížení.



Obr. 7.4: Výsledky řezných sil nástroje R85

Obdobné trendy je pak možné pozorovat i u druhého použitého nástroje (Obr. 7.5) s tím rozdílem, že tento nástroj dosáhl obecně vyšších hodnot řezných sil. Průběhy jednotlivých intervalů mají však podobný průběh.



Obr. 7.5: Výsledky řezných sil pro nástroj R90

Vzhledem k tomu, že byly oba nástroje nové a před experimentem nebyly nikdy použity, je možné tento drobný rozdíl připsat rozdílné geometrii, která pramení z jiné hodnoty poloměru zaoblení profilu nástroje a stoupání úhlu šroubovice. Jak bylo napsáno výše, různí výrobci mají různé zkušenosti, které se mohou propsat i do broušení nástrojů. Nižší hodnoty řezných sil jsou obecně spojeny s nižší hodnotou úhlu břitu. Nástroj R85 tak možná nebude obrobek zatěžovat tak velkými řeznými silami, ale může mít nižší životnost. Rozdíly v silách jsou lépe patrné v Tab. 7.3, kde jsou uvedeny naměřené hodnoty včetně jejich směrodatných odchylek. Pod nimi se pak nachází spočítaný procentuální rozdíl sil naměřených při obrábění nástrojem R90 oproti nástroji R85.

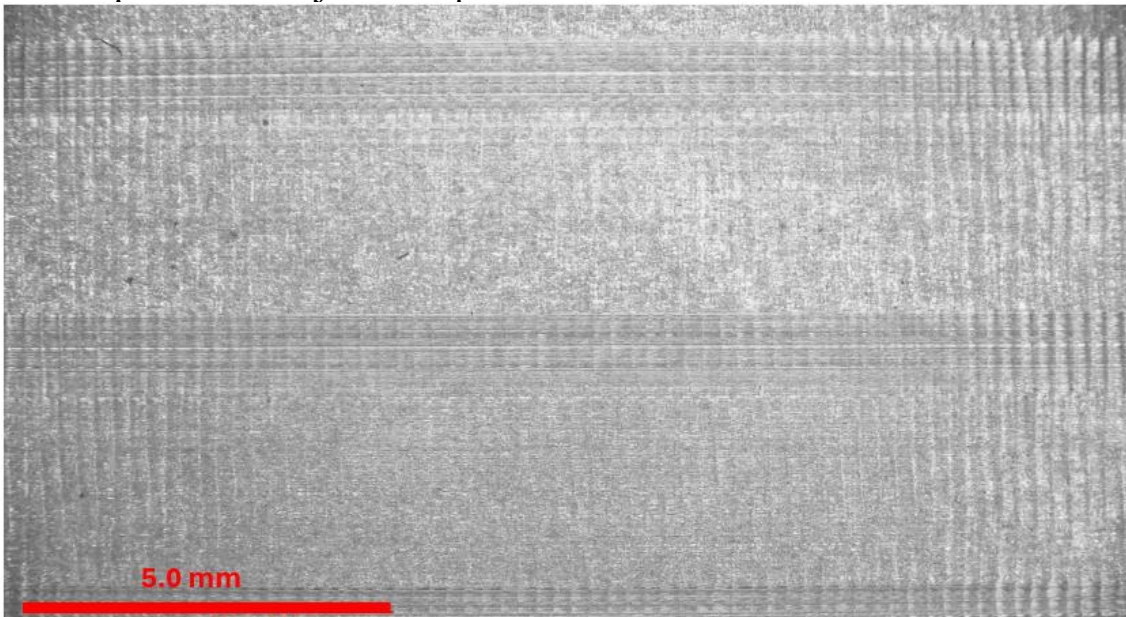
Tab. 7.3: Porovnání řezných sil tangenciálních nástrojů

f_z [mm]	a_d [mm]	0,05		0,1		0,15		
		\bar{x}	s	\bar{x}	s	\bar{x}	s	
0,04	R85	6,193	0,104	11,605	0,245	17,733	0,493	[N]
	R90	8,265	0,083	14,739	0,201	21,277	0,448	
	Rozdíl	33,44		27,01		19,98		[%]
0,06	R85	8,349	0,144	15,932	0,207	23,432	0,993	[N]
	R90	10,576	0,153	18,76	0,141	26,98	0,724	
	Rozdíl	26,67		17,75		15,14		[%]
0,08	R85	10,400	0,253	19,302	0,413	29,066	0,346	[N]
	R90	12,581	0,272	22,764	0,401	32,46	0,541	
	Rozdíl	20,98		17,93		11,68		[%]

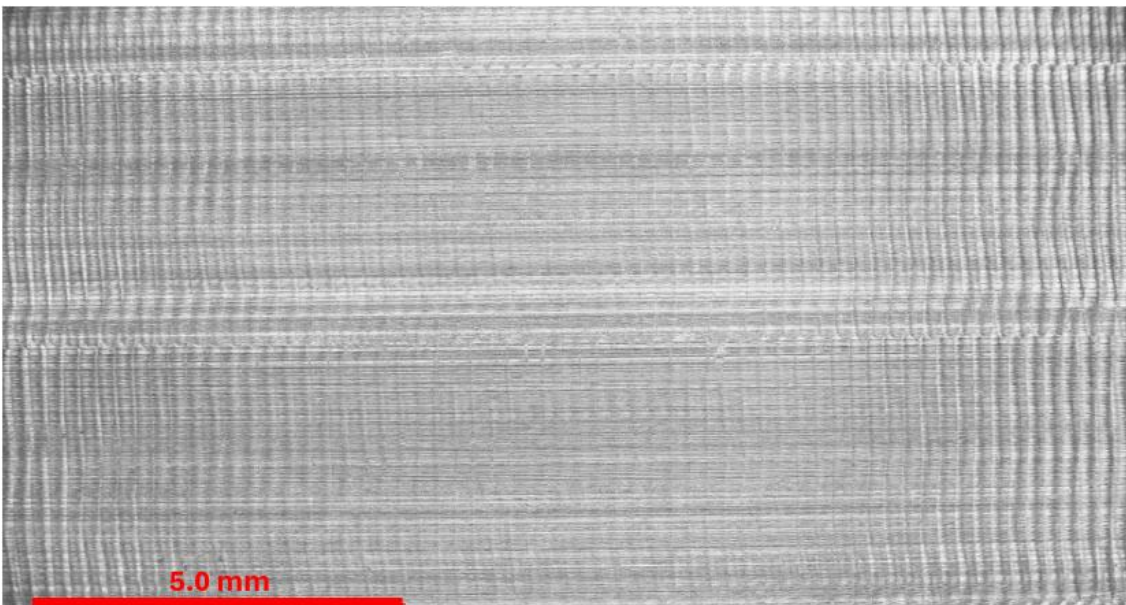
Z porovnání je patrné, že ve všech případech nástroj R90 dosáhnul vyšších hodnot řezných sil. Zajímavý je ovšem procentuální trend, kdy se vzrůstajícím přídatkem na obrábění rozdíl klesá a zároveň klesá i s rostoucím posuvem na zub. Rozdíl při nejmenším posuvu a nejmenším přídatku činil přes 30 %, zatímco u nejvyšších hodnot řezných podmínek dosahoval pouze 11 %. Dalším důležitým zjištěním je, že celkové řezné síly získané tímto experimentem vykazují poměrně malé hodnoty. Při obrábění subtilních výrobků s malou tloušťkou může vlivem řezných sil dojít k jejich poškození. Ukázalo se ovšem, že při dodržení doporučených řezných podmínek uváděných výrobcem, je při dokončovacích operacích soudečkovými nástroji zátěž minimální.

7.1.2 Drsnost

Prvním krokem při vyhodnocení povrchů bylo jejich vizuální zkoumání pod mikroskopem, na obrázcích je možné vidět povrchy získané při obrábění střední hodnotou posuvu a s nejmenším přídatkem na obrobku.



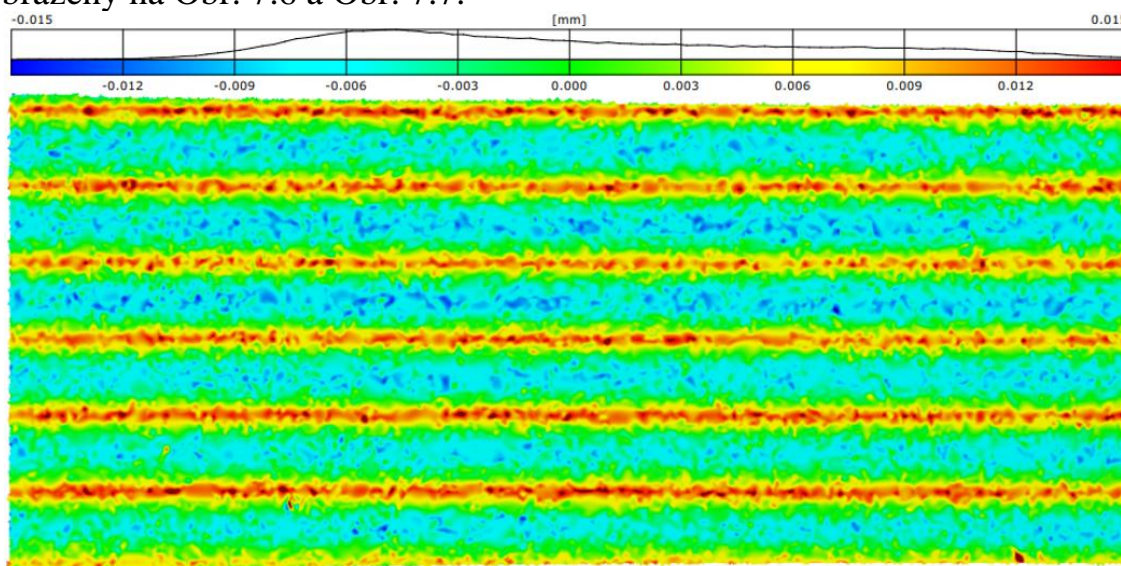
Obr. 7.6: Plocha obrobena nástrojem R85



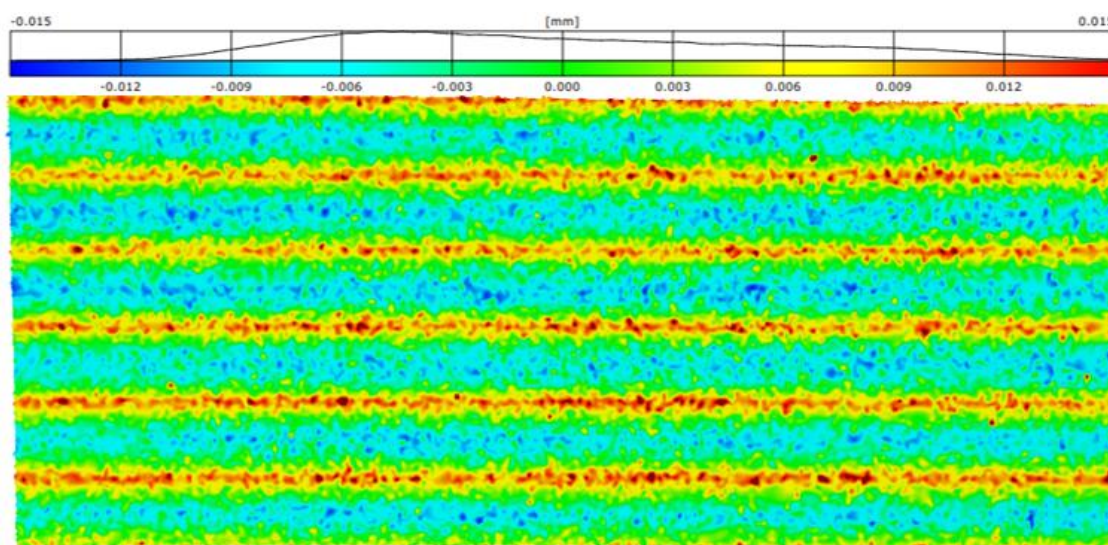
Obr. 7.7: Plocha obrobena nástrojem R90

Z vyhodnocení na mikroskopu vzešla domněnka, že obráběním soudečkovým nástrojem došlo ke vzniku heterogenního povrchu. To je patrnější povrchu na Obr. 7.6, který byl obroben nástrojem R85. V případě nástroje R90 není rozdíl na povrchu tak zřetelný. Zřejmě tak došlo v důsledku rozdílné řezné rychlosti po délce řezné délky nástroje. U špičky nástroje je řezná rychlost nižší v důsledku menšího průměru nástroje. Tento rozdíl mohl vést ke vzniku rozdílných typů povrchů na ploše obrobku.

Pro potvrzení domněnky bylo provedeno naskenování pomocí 3D skeneru. Na Obr. 7.8 a Obr. 7.9 jsou znázorněny skeny obrobků v porovnání s CAD daty. Čili se jedná o porovnání vytvořeného modelu (ideální stav) a výsledku dosaženého popsanými obráběcími postupy. Jedná se o stejné plochy, které jsou zobrazeny na Obr. 7.6 a Obr. 7.7.



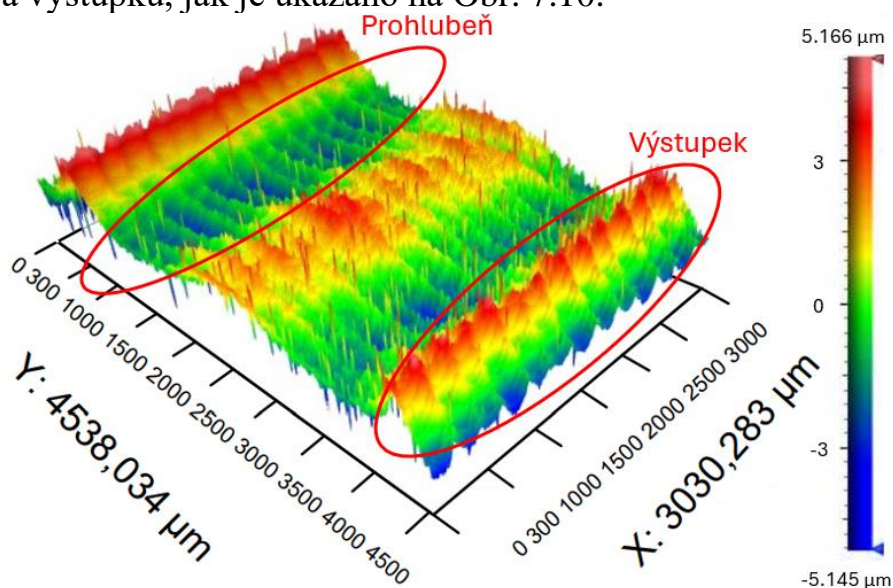
Obr. 7.8: Sken plochy obrobek R85



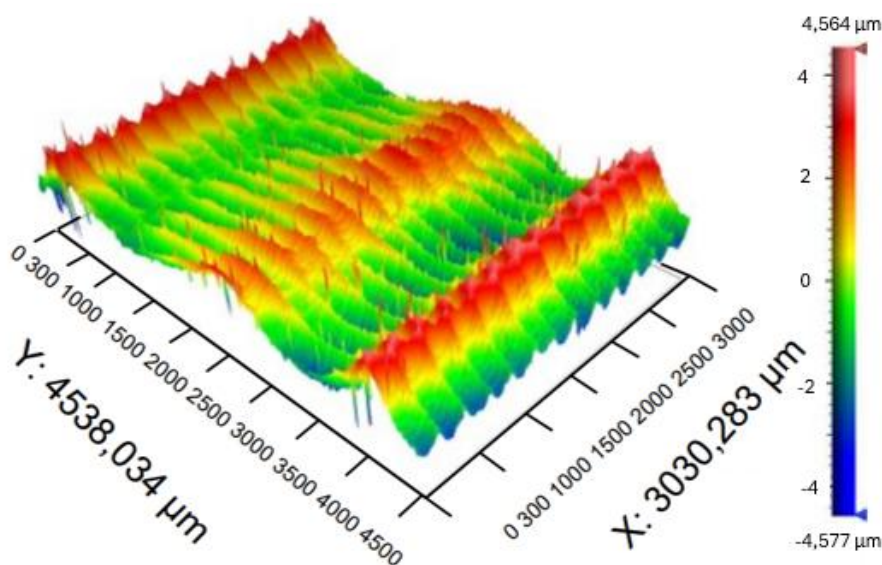
Obr. 7.9: Sken plochy obrobek R90

Z tohoto porovnání je patrné, že oba nástroje při obrábění vytvořily dvě rozlišitelné zóny na povrchu obrobku. Z vygenerovaného histogramu je patrné, že těmito nástroji byl získán povrch, který vykazuje větší procento povrchu, který je pod úrovní nominální hodnoty (CAD), což může představovat potenciální problém z hlediska přesnosti výroby. Při případných dokončovacích operacích (broušení) by mohlo dojít k odchýlení od požadovaných rozměrových tolerancí. V těchto případech by tak bylo nutné upravit požadovaný zbytek materiálu při dokončovacích operacích.

Drsnost byla vyhodnocována za použití 3D optického profilometru. Na Obr. 7.10 a Obr. 7.11 jsou znázorněny naskenované a vyhodnocované oblasti testovacích ploch. Opět jde o plochy obrobené za podmínek jako u předchozích ploch. Pro zjednodušení budou dvě získané oblasti označovány jako oblast prohlubně a výstupku, jak je ukázáno na Obr. 7.10.



Obr. 7.10: Vyhodnocovaná oblast plochy obrobená R85

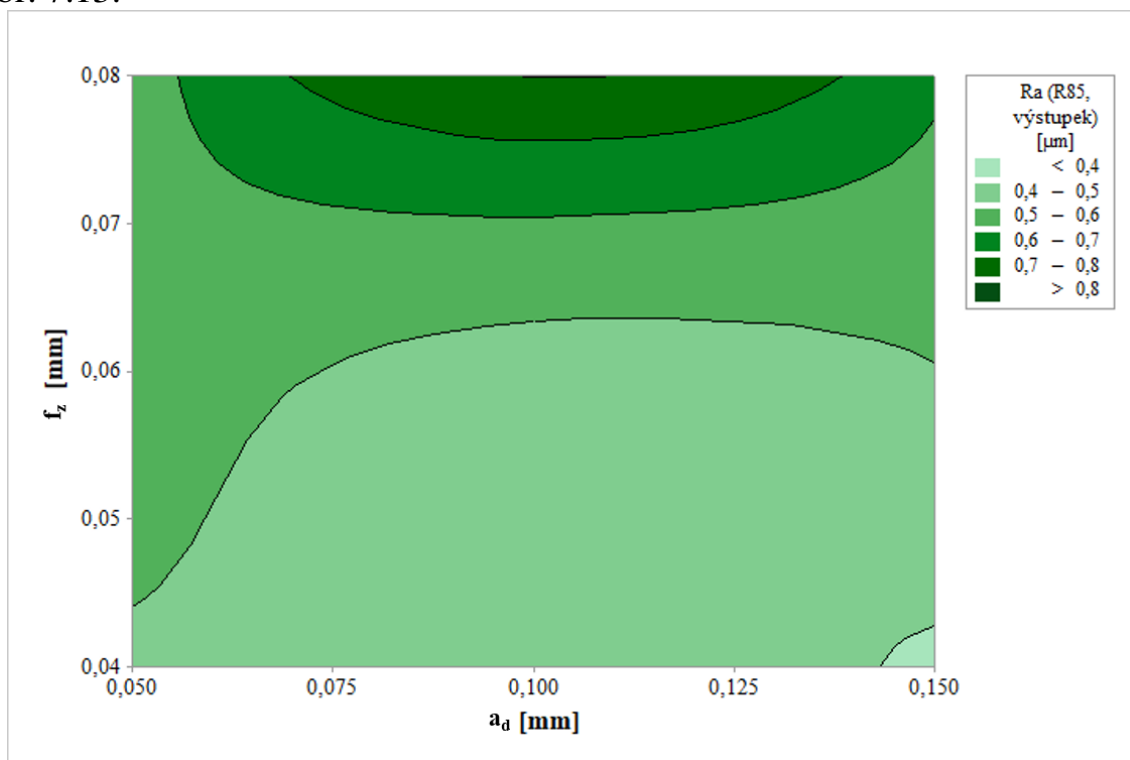


Obr. 7.11: Vyhodnocovaná oblast plochy obrobená R90

Z důvodu potvrzení vzniku heterogenního povrchu bylo třeba při vyhodnocování parametrů drsnosti přistoupit k vyhodnocování obou oblastí samostatně.

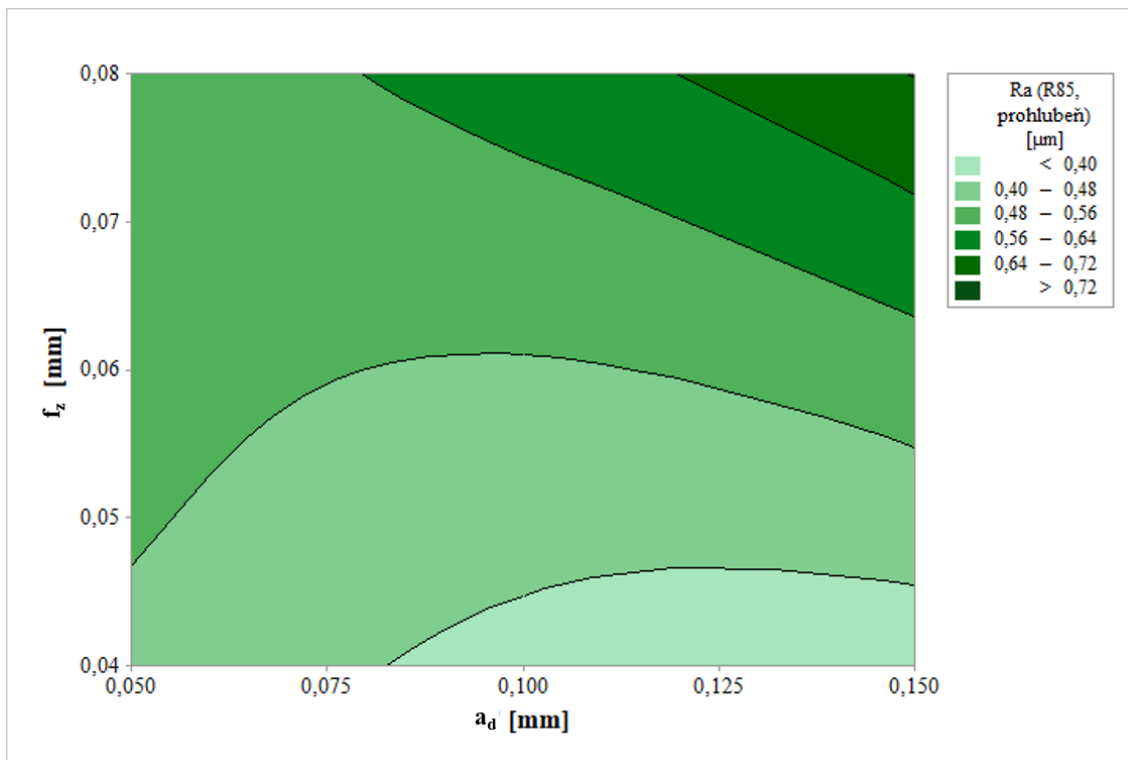
U drsnosti byly vyhodnocovány parametry Ra, Rz a Rsm. Jednotlivé parametry byly zaneseny do konturových grafů, aby jednoduchou formou popsaly výsledky a také z nich bylo možné odečíst jaké parametry nastavit pro dosažení požadované drsnosti.

První takový graf je znázorněn na Obr. 7.12., který zobrazuje parametr Ra změřený v oblasti výstupku při všech variantách řezných podmínek. Z tohoto obrázku je patrné, že vliv posuvu je výraznější, než vliv hloubky řezu. Drsnost se u povrchů obroběných se stejným přídatkem na obrábění liší nevýrazně. Lze tak usoudit, že pro dosažení lepších drsností je vhodnější volit úpravu posuvu, nikoli přídatku na obrobění. Parametr Ra změřený v oblasti prohlubně je zobrazen na Obr. 7.13.



Obr. 7.12: Ra – výstupek (obroběno R85)

V oblasti prohlubně (Obr. 7.13) parametr Ra vykazuje jiné trendy než v oblasti výstupku. Rozdíly jsou tak mezi oblastmi nejen ve velikostech hodnot drsností. Zde u střední hodnoty hloubky řezu (0,1 mm) došlo k propadu hodnot u všech použitých posuvů. Je tedy možné tvrdit, že v případě této oblasti hraje hloubka řezu výraznější roli a je nutné hledat kompromis mezi oblastí prohlubně a výstupku, aby oba splňovaly zadané parametry.



Obr. 7.13. Ra – prohlubeň (obrobena R85)

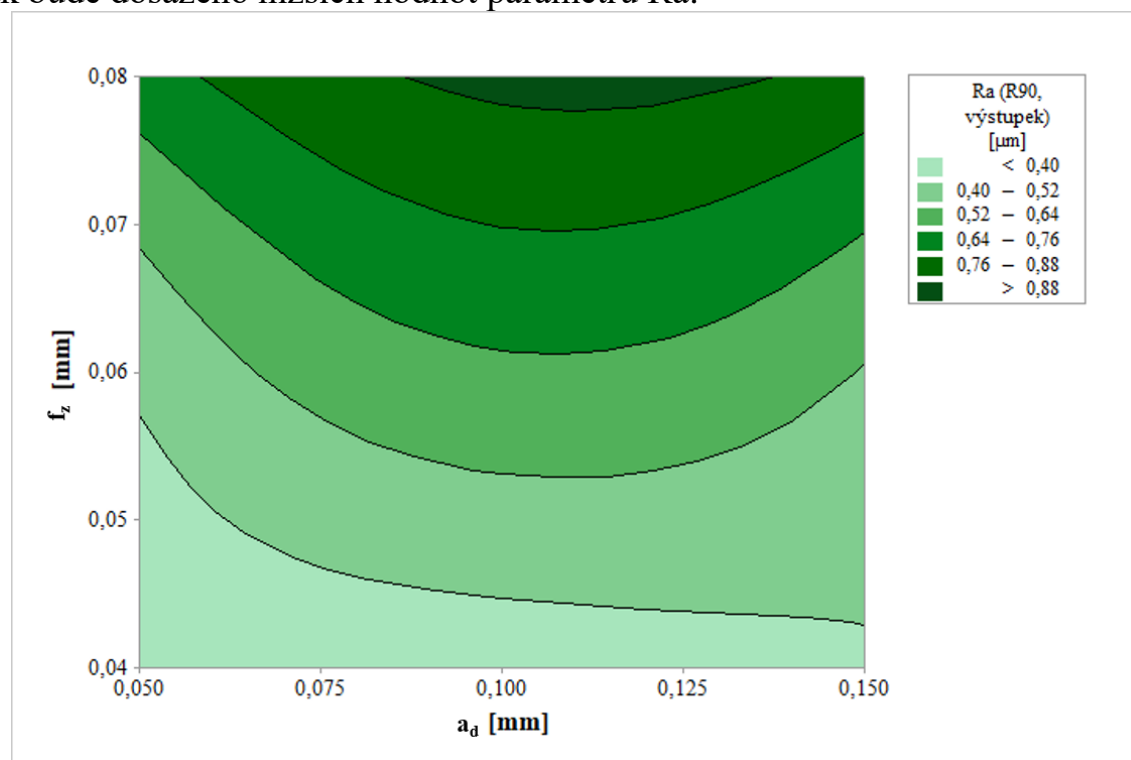
Konkrétní rozdíly hodnot jednotlivých oblastí jsou uvedeny v Tab. 7.4, kde jsou uvedeny také naměřené hodnoty včetně jejich zjištěných směrodatných odchylek. U výsledků je pro lepší přehlednost spočítán procentuální rozdíl oblasti výstupku oproti oblasti prohlubně, který ukazuje jak moc se obě oblasti v daném parametru liší.

Z porovnání vychází, že u oblasti prohlubně bylo dosaženo nižších hodnot parametru Ra ve většině případů. Zjištěné rozdíly variují od 1,5 – 25,6 %. Střední hodnota obou zkoumaných proměnných se jeví jako nejvhodnější pro získání nejméně rozdílných oblastí. Zjištěné rozdíly ovšem nevykazují žádný trend, který by specifikoval, jak se budou dané oblasti lišit.

Tab. 7.4: Porovnání parametru Ra dosaženého nástrojem R85

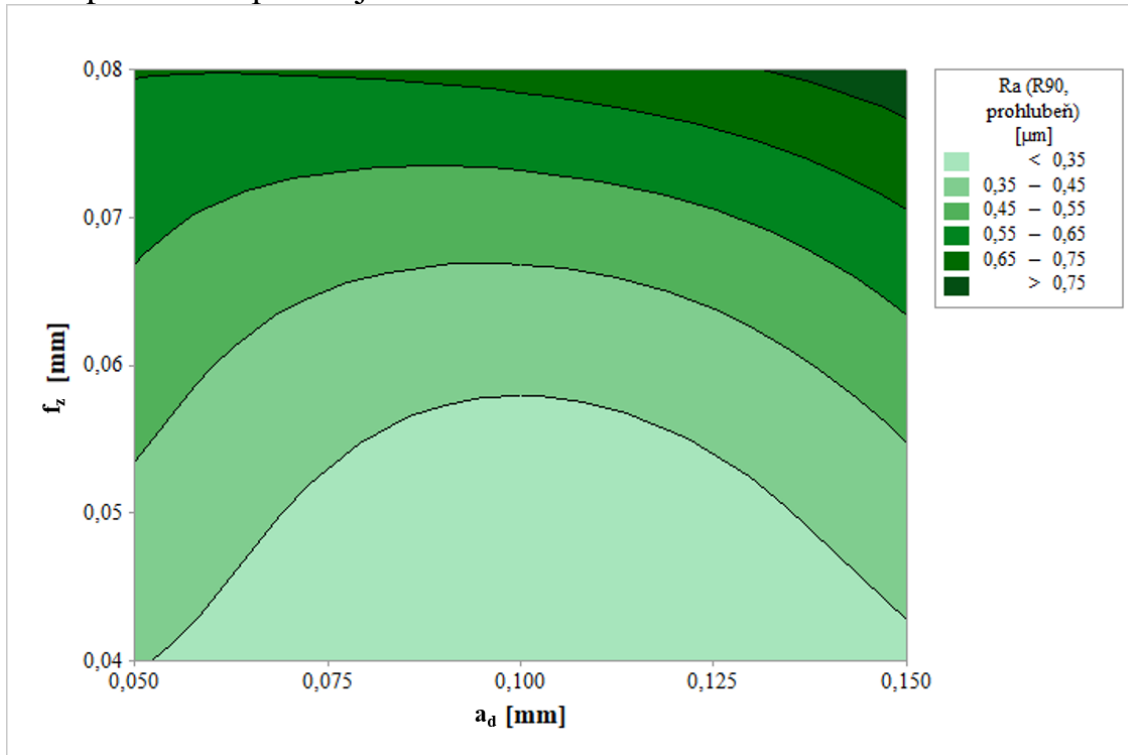
a_d [mm]		0,05		0,1		0,15		
f_z [mm]		\bar{x}	s	\bar{x}	s	\bar{x}	s	
	0,04	Výstupek	0,4770	0,0346	0,4658	0,0399	0,3850	0,0550
Prohlubeň		0,4527	0,0225	0,3802	0,0276	0,3559	0,0366	
	Rozdíl	-5,09		-18,38		-7,56		[%]
0,06	Výstupek	0,5560	0,0352	0,4674	0,0507	0,4966	0,0429	[μm]
	Prohlubeň	0,5152	0,0511	0,4746	0,0418	0,5272	0,0266	
	Rozdíl	-7,34		1,54		6,16		[%]
0,08	Výstupek	0,5491	0,1242	0,8029	0,0457	0,6192	0,0930	[μm]
	Prohlubeň	0,5221	0,0636	0,5972	0,0485	0,7232	0,0256	
	Rozdíl	-4,92		-25,62		16,8		[%]

Stejně bylo postupováno i v případě druhého nástroje. Získané hodnoty jsou zobrazeny na Obr. 7.14 a Obr. 7.15. Výsledky nástroje R90 vykazují větší pravidelnost v porovnání s nástrojem R85, ať už v oblasti prohlubně nebo výstupku. V oblasti výstupku jsou patrné více vodorovné trendy jednotlivých intervalů, které v krajních pozicích rostou. Vliv posuvu na zub byl tak dominantnější. Konvexní průběh hranic intervalů u vyšších posuvů naznačuje, že v oblasti střední hodnoty přídatku jsou nejlepší podmínky pro obrábění, neboť tak bude dosaženo nižších hodnot parametru Ra.



Obr. 7.14: Ra – výstupek (obrobena R90)

V oblasti prohlubně bylo, v porovnání s oblastí výstupku dosaženo nižších hodnot parametru R_a . Oproti této oblasti však má oblast prohlubně konkávní průběh hranic intervalů. Na rozdíl od oblasti výstupku zde tak v krajních podmínkách přídávku dochází při shodném posuvu k poklesu. To představuje potenciální problém při snaze dosáhnout co nejvíce shodné drsnosti na výsledné ploše. Výhodou ovšem je menší rozptyl hodnot. Krajní proměnné tak stále mohou vést k podobným výsledkům. Např. nejmenší hodnota přídávku a střední hodnota posuvu povedou k prolínajícím se intervalům.



Obr. 7.15: R_a – prohlubeň (obrobena R90)

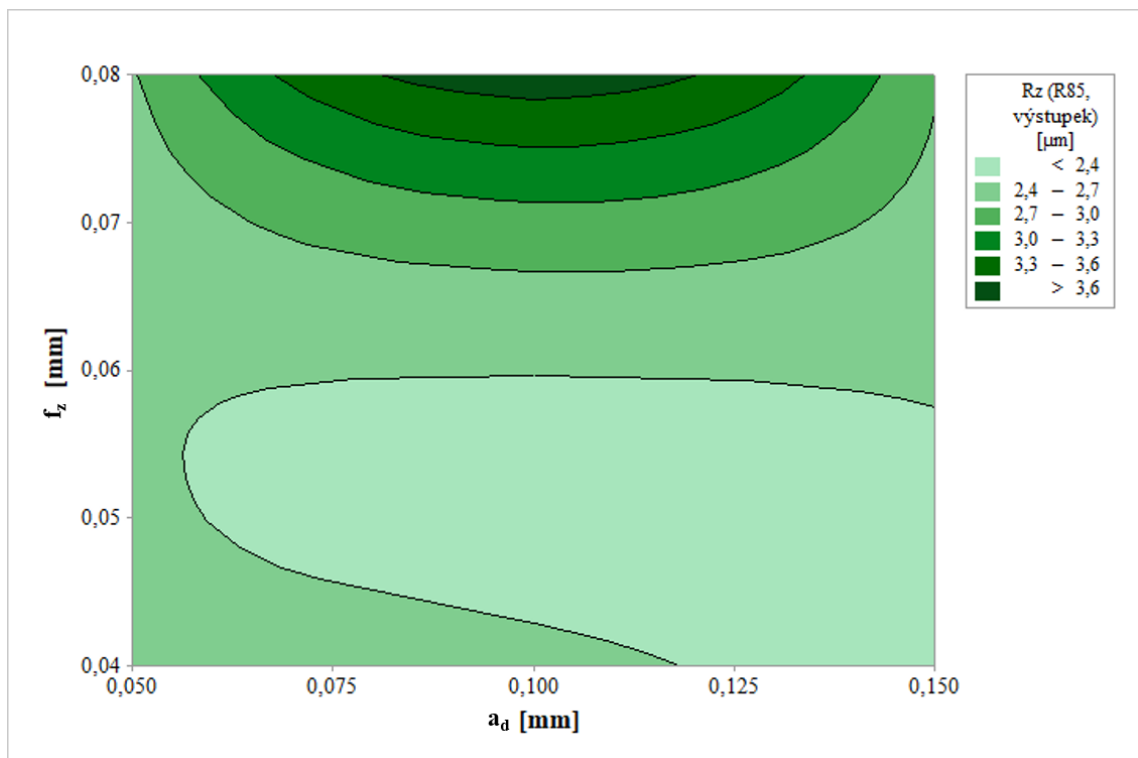
Z porovnání výsledků parametru R_a uvedeného v Tab. 7.5 je možné určit, že i v případě nástroje R90 je oblast prohlubně ta, která ve většině případů vykazuje nižší hodnoty parametru R_a . Oproti nástroji R85 však došlo k opačnému trendu z hlediska podmínek, při kterých dojde v oblasti prohlubně ke zhoršení povrchu oproti oblasti výstupku.

Z pohledu procentuálních rozdílů se na výsledcích projevil zmíněný v průběhu trendů. Střední hodnota přídávku na obrobení vykázala ty největší procentuální rozdíly. U středních hodnot proměnných je pak lehce přes 40 %. V závislosti na dalším zpracování to může představovat výrazný problém a pravděpodobně by muselo být přistoupeno k dokončovacím operacím.

Tab. 7.5: Porovnání parametru Ra dosaženého nástrojem R90

		0,05		0,1		0,15		
f_z [mm]	a_d [mm]	\bar{x}	s	\bar{x}	s	\bar{x}	s	
0,04	Výstupek	0,3360	0,0280	0,3339	0,0102	0,3958	0,0372	[μm]
	Prohlubeň	0,3553	0,0251	0,2885	0,0251	0,3331	0,0298	
Rozdíl		5,47		-13,6		-15,84		[%]
0,06	Výstupek	0,4253	0,0422	0,6189	0,0388	0,5134	0,0157	[μm]
	Prohlubeň	0,4985	0,1401	0,3692	0,0557	0,5080	0,0262	
Rozdíl		17,21		-40,35		-1,05		[%]
0,08	Výstupek	0,7089	0,0444	0,9075	0,0259	0,8380	0,0533	[μm]
	Prohlubeň	0,6551	0,0501	0,6833	0,0442	0,8077	0,0935	
Rozdíl		-7,59		-24,71		-3,62		[%]

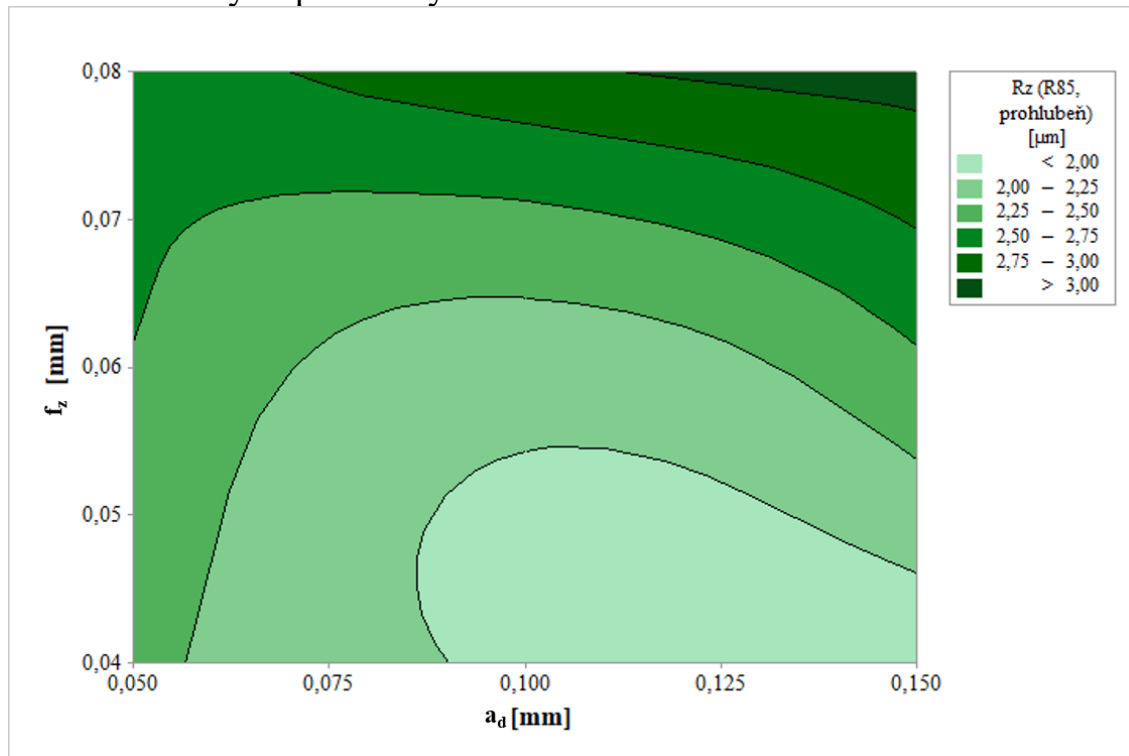
U parametru Rz vyhodnocovaného na plochách obrobeným nástrojem R85 (Obr. 7.16 a Obr. 7.17) je na první pohled nejvýraznější rozdíl v tom, že oblast výstupku dosahuje vyšších hodnot, obdobně jako u výsledků Ra. V oblasti výstupku jsou nejzajímavější průběhy dvou nejmenších intervalů. Ty pokrývají výraznou plochu grafu a zároveň v krajních podmínkách přídatku dosahují prakticky až k nejvyšší hodnotě posuvu. Zbývající intervaly jsou poté koncentrovány v malém rozpětí proměnných.



Obr. 7.16: Rz – výstupek (obrobena R85)

V oblasti prohlubně je rozložení jednotlivých intervalů více rovnoměrné. Přesto i zde dva nejmenší intervaly pokrývají značnou část grafu. Zajímavostí je, že

nejmenší přírůstek a posuv nemusí nutně vést k nejnižším zjištěným hodnotám parametru Rz. Tento výsledek zdůrazňuje důležitost vhodného zvolení řezných parametrů při obrábění. Menší posuv a přírůstek obvykle vedou k nižším hodnotám parametrů drsností, ukázalo se však, že v existují varianty podmínek, kdy toto neplatí. Trendy ostatních intervalů již mají očekávatelný průběh s rostoucími řeznými proměnnými.



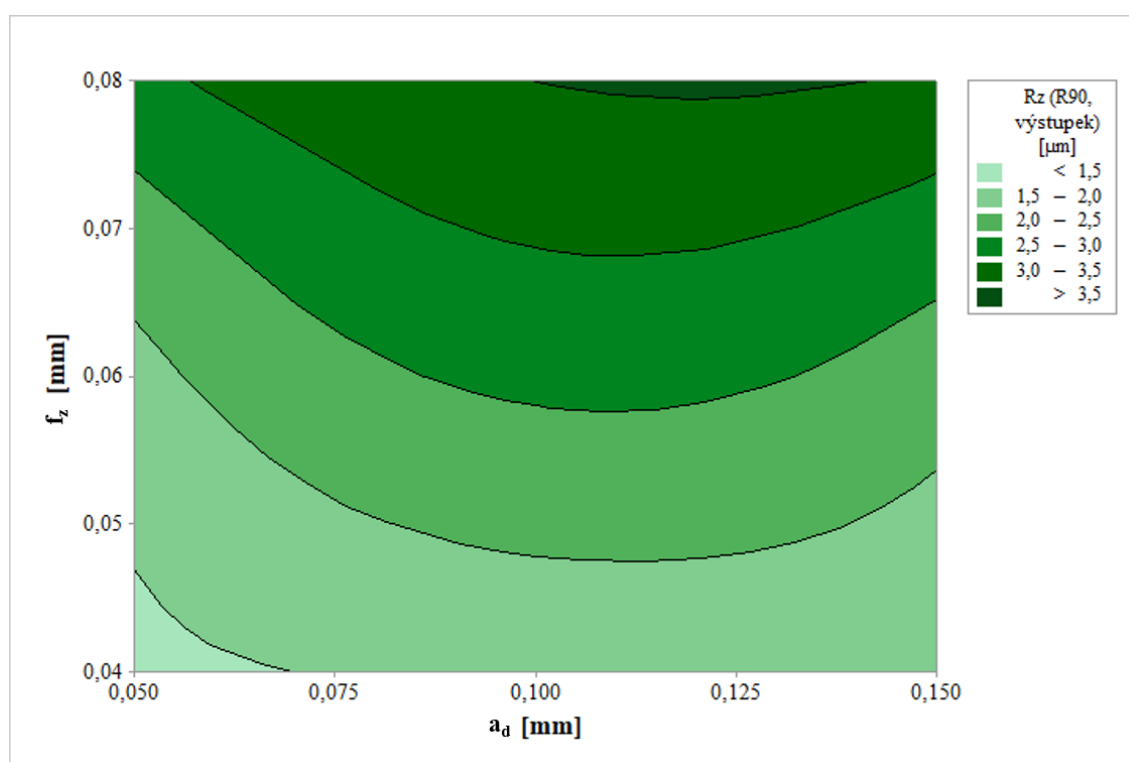
Obr. 7.17: Rz – prohlubeň (obrobena R85)

Z porovnání parametru Rz na dvou získaných oblastí uvedeného v Tab. 7.6 je vidět, že oblast výstupku dosáhla nižších hodnot pouze ve třech případech. U střední hodnoty posuvu je však tento rozdíl prakticky zanedbatelný. Pouze ve dvou případech je pak rozdíl natolik výrazný, že i s přihlédnutím ke směrodatné odchylce se dá konstatovat jednoznačné zhoršení povrchu z hlediska zkoumaného parametru. Parametr Rz je tak v tomto případě méně náchylný na výrazné rozdíly.

Tab. 7.6: Porovnání parametru Rz dosaženého nástrojem R85

a_d [mm]		0,05		0,1		0,15		
f_z [mm]		\bar{x}	s	\bar{x}	s	\bar{x}	s	
	0,04	Výstupek	2,538	0,2882	2,5029	0,3925	2,1037	0,3889
Prohlubeň		2,3096	0,1851	1,9469	0,3493	1,8006	0,2736	
	Rozdíl	-9		-22,21		-14,41		[%]
0,06	Výstupek	2,4341	0,3422	2,4101	0,2483	2,4399	0,2372	[μm]
	Prohlubeň	2,4907	0,2263	2,1149	0,2289	2,4533	0,2572	
	Rozdíl	2,33		-12,25		0,55		[%]
0,08	Výstupek	2,6741	0,5121	3,7666	0,3688	2,738	0,455	[μm]
	Prohlubeň	2,577	0,4602	2,9456	0,3255	3,0844	0,1775	
	Rozdíl	-3,63		-21,8		12,65		[%]

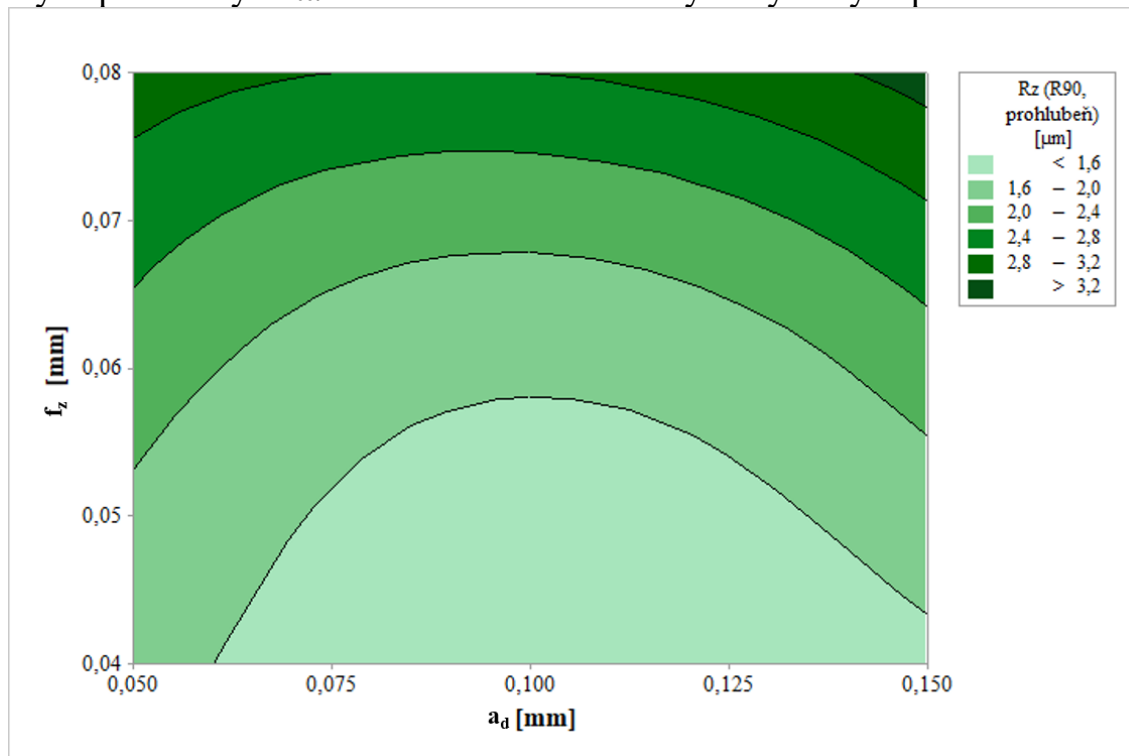
U nástroje R90 došlo k podobnému výsledku, kdy v oblasti výstupku (Obr. 7.18) bylo dosaženo jak vyšších hodnot, tak i většího rozptylu výsledků, než u oblasti prohlubně (Obr. 7.19). Pravděpodobně zde rozdílem řezné rychlosti způsobeným tvarem nástroje dochází v oblasti obrobene koncem ke vzniku výraznějších stop po nástroji, které se pak projevují zvýšením hodnot parametru Rz.



Obr. 7.18: Rz – výstupek (obrobena R90)

V oblasti prohlubně se trendy jednotlivých intervalů opět projevili v opozici proti oblasti výstupku. Stejně jako tomu bylo u parametru Ra. Obdobné trendy u

těchto parametrů u obou oblastí svědčí o rovnoměrné změně povrchu. Změnou řezných proměnných tak nedochází ke vzniku výrazných výstupků.



Obr. 7.19: Rz – prohlubeň (obrobena R90)

V Tab. 7.7 je pak vidět porovnání oblastí. Překvapivě působí zjištěné rozdíly u nejmenší hodnoty přídávku na obrobení. Při všech variantách posuvu zde bylo zjištěno, že oblast prohlubně je ta, kde Rz dosahuje vyšších hodnot. U střední hodnoty přídávku je tomu pak naopak a zde zjištěné rozdíly jsou ty nejvýraznější. V případě největšího přídávku je pak stále oblast přídávku ta horší, ale procentuální rozdíly ukazují na relativně nízké navýšení oproti oblasti prohlubně.

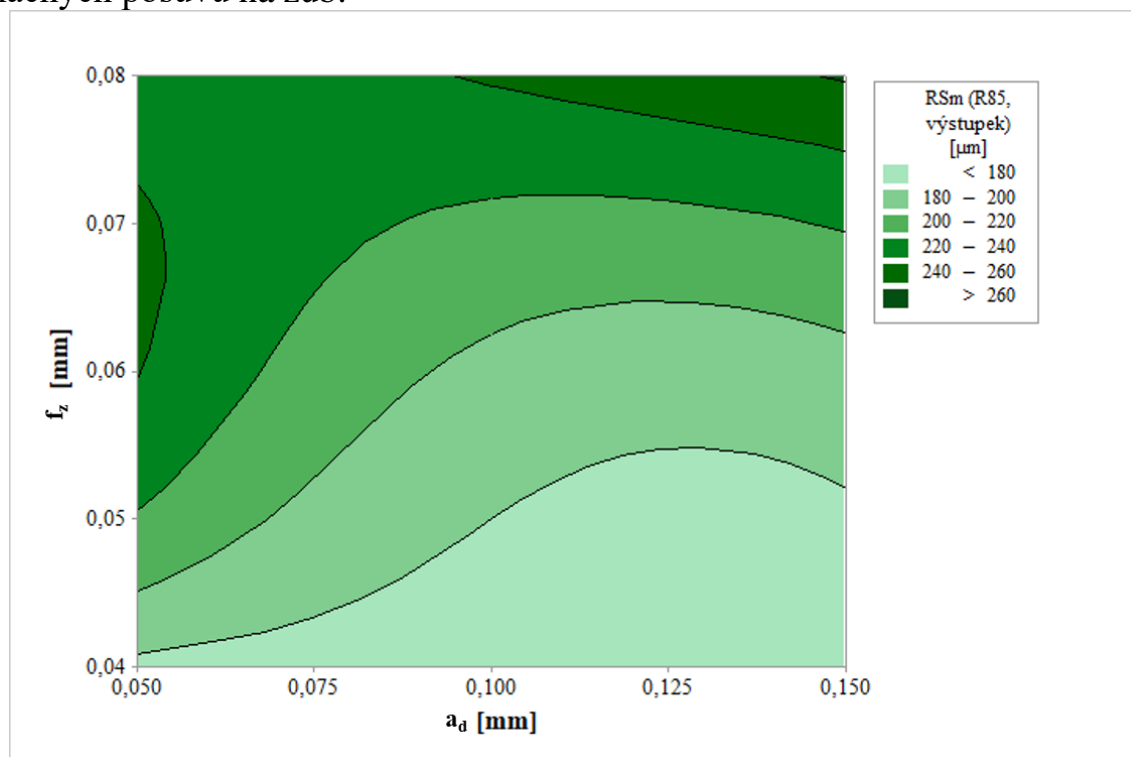
Tab. 7.7: Porovnání parametru Rz dosaženého nástrojem R90

f_z [mm]	a_d [mm]	0,05		0,1		0,15		
		\bar{x}	s	\bar{x}	s	\bar{x}	s	
0,04	Výstupek	1,414	0,0759	1,5991	0,1823	1,6732	0,1299	[μm]
	Prohlubeň	1,6766	0,1571	1,4305	0,1652	1,5182	0,0796	
	Rozdíl	18,57		-10,54		-9,26		[%]
0,06	Výstupek	1,8521	0,2263	2,5971	0,2793	2,2514	0,2512	[μm]
	Prohlubeň	2,213	0,5729	1,6622	0,2744	2,1972	0,1422	
	Rozdíl	19,49		-36		-2,41		[%]
0,08	Výstupek	2,8748	0,1417	3,503	0,1957	3,4437	0,3992	[μm]
	Prohlubeň	2,9979	0,2424	2,8	0,1447	3,3621	0,4042	
	Rozdíl	4,28		-20,07		-2,37		[%]

Vyhodnocení parametru RSm, neboli střední vzdálenosti rýh bylo zvoleno kvůli unikátní geometrii soudečkových nástrojů a jejich zjištěnému dopadu na povrch z hlediska vzniku heterogenity.

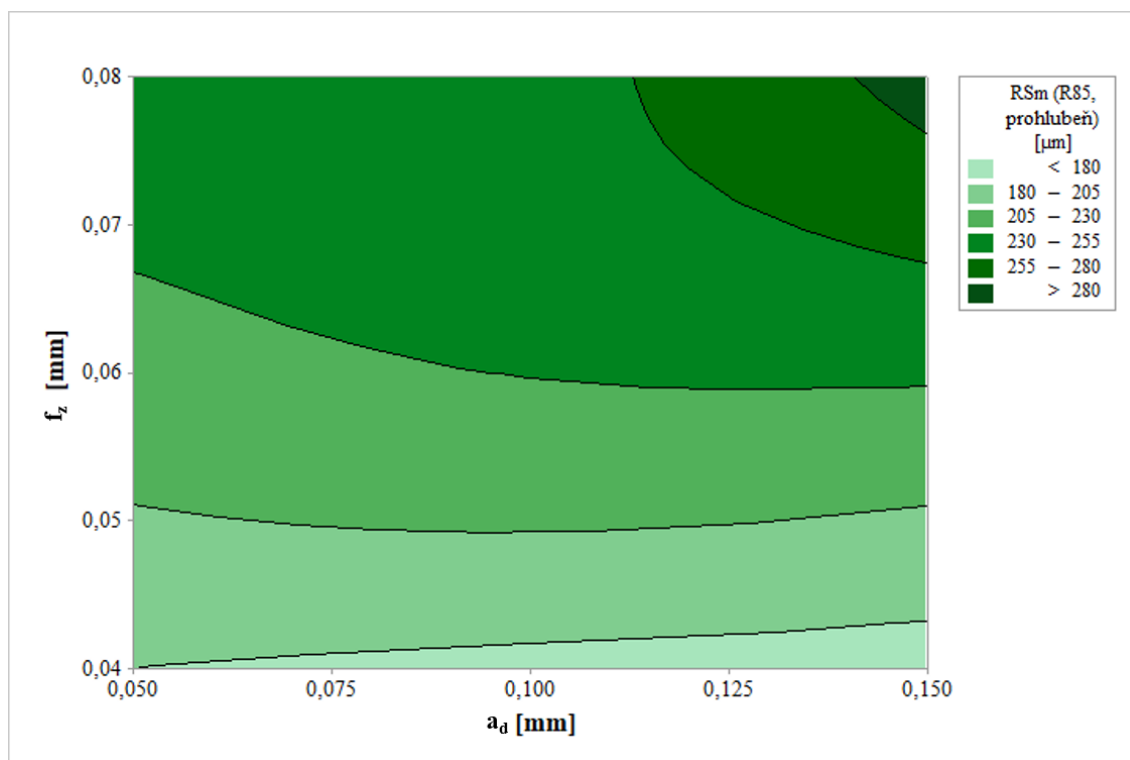
Pro parametr RSm platí, že jeho hodnota je do velké míry závislá na zvolené řezné rychlosti a posuvu. Parametr je tak vhodný pro vyhodnocení stability obrábění soudečkovým nástrojem, neboť jak bylo uvedeno výše, vlivem jejich geometrie dochází k obrábění postupně se měnícím průměrem nástroje.

Ze zobrazených výsledků pro nástroj R85 (Obr. 7.20 a Obr. 7.21) je možné vidět, že v oblasti výstupku poskytuje parametr RSm poměrně velkou oblast pro dosažení minimálních zjištěných hodnot. V rozsahu přídávku na obrobení od 0,1 mm do 0,15 mm je možné dosáhnout nižších zjištěných hodnot RSm i při využití značných posuvů na zub.



Obr. 7.20: RSm – výstupek (obrobena R85)

U oblasti prohlubně je na první pohled možné vidět, že zde bylo při maximálních řezných podmínkách dosaženo vyšší hodnoty v porovnání s výstupkem. Parametr RSm tak v případě nástroje R85 vykazuje rozdíl oproti dalším vyhodnocovaným parametrům, neboť u nich byla oblast výstupku ta, která vykazovala větší hodnoty.



Obr. 7.21: Rsm – prohlubeň (obrobena R85)

V Tab. 7.8 je pak porovnání oblastí pro parametr RSm u nástroje R85. Jak již ukázalo grafické zobrazení výsledků oblast prohlubně je ta, kde bylo dosaženo vyšších hodnot. Pravděpodobně se zde projevil vliv geometrie nástroje. Oblast prohlubně byla obrobena větším průměrem nástroje, a proto je vzdálenost rýh v tomto místě větší. Oblast výstupku se také projevila vyšší konzistentností, protože směrodatné odchylky zde dosahují poměrově nižších hodnot. Větší obráběcí průměr v této oblasti tak zajistil menší rozptyl výsledků parametru RSm.

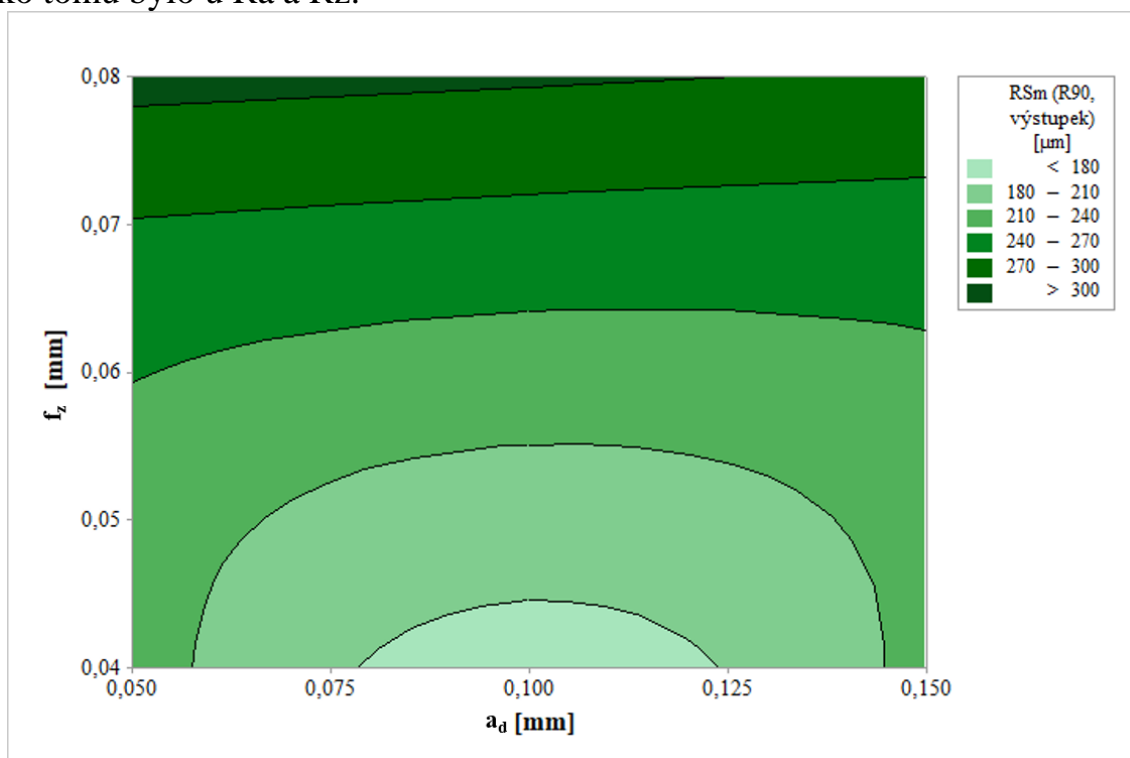
Tab. 7.8: Porovnání parametru RSm dosaženého nástrojem R85

		0,05		0,1		0,15		
f_z [mm]	a_d [mm]	\bar{x}	s	\bar{x}	s	\bar{x}	s	
0,04	Výstupek	175,44	31,36	170,00	35,56	172,79	34,11	[μm]
	Prohlubeň	179,87	18,22	173,78	29,37	169,41	23,69	
Rozdíl		2,53		2,22		-1,96		[%]
0,06	Výstupek	240,78	63,98	195,38	24,37	193,87	25,76	[μm]
	Prohlubeň	220,66	18,88	230,62	38,06	232,76	34,87	
Rozdíl		-8,36		18,04		20,06		[%]
0,08	Výstupek	224,49	33,72	242	32,25	261,84	36,10	[μm]
	Prohlubeň	241,58	24,45	247,33	23,71	290,59	31,11	
Rozdíl		7,61		2,2		10,98		[%]

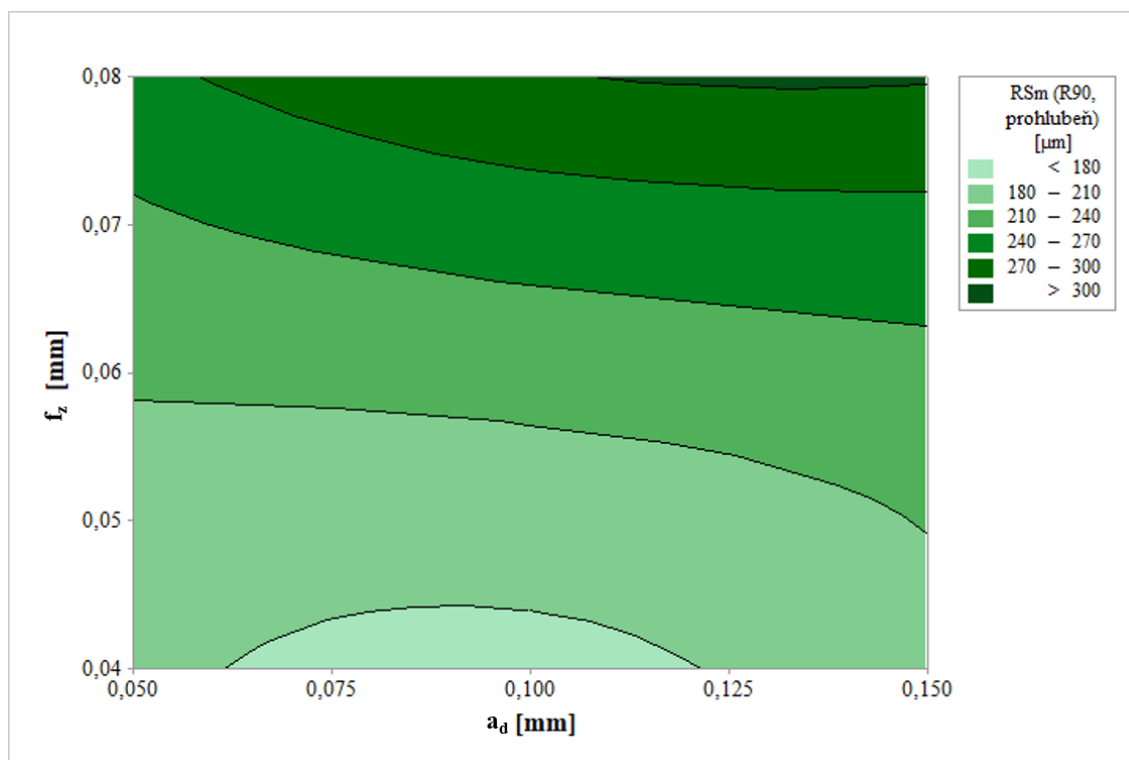
Pro nástroj R90 jsou výsledky parametru RSm uvedeny na Obr. 7.22 a Obr. 7.23. U výstupku, stejně jako u předchozích parametrů drsnosti, se vyskytuje

oblast grafu okolo střední hodnoty posuvu na obrobku, kde byly získány nejnižší hodnoty RSm. Ta však nezasahuje do minimální a maximální hodnoty přídávku na obrobení. Při vyšších hodnotách posuvu na zub se tato proměnná stává dominantní a vliv přídávku se stává zanedbatelný.

U oblasti prohlubně bylo dosaženo stejného rozptylu hodnot jako v oblasti výstupku. Jedná se o unikátní výsledek u tangenciálních nástrojů, protože u nástroje R85 a jeho výsledných parametrů rozdíly zjištěny byly. Zajímavé jsou i trendy jednotlivých intervalů, které u obou oblastí nevykazují tak značné rozdíly, jako tomu bylo u Ra a Rz.



Obr. 7.22: RSm – výstupek (obrobena R90)



Obr. 7.23: RSm – prohlubeň (obrobena R90)

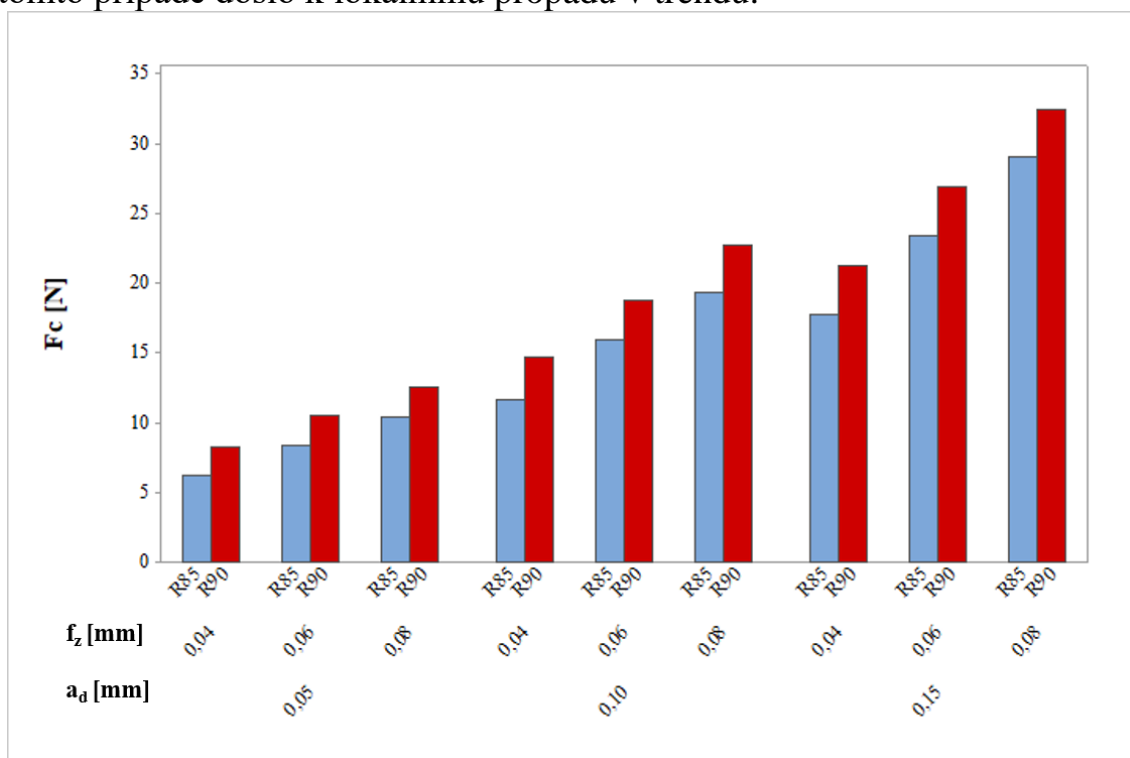
V Tab. 7.9 je uvedeno porovnání RSm pro nástroj R90. Nižší hodnoty parametru jsou ve většině případů v oblasti prohlubně. Procentuální rozdíly však nejsou nijak výrazné. Z tohoto důvodu se obě oblasti prakticky shodují ve zjištěném rozložení výsledků. Jelikož se výsledky prakticky neliší, a i tyto drobné rozdíly jsou pokryty zjištěnými odchylkami, je možné usoudit, že vliv změny obráběcího průměru tu pravděpodobně nebyl tak výrazný. U nástroje R90 tak pravděpodobně došlo k obrábění řeznou částí s menším gradientem průměru.

Tab. 7.9: Porovnání parametru RSm dosaženého nástrojem R90

		0,05		0,1		0,15		
f_z [mm]	a_d [mm]	\bar{x}	s	\bar{x}	s	\bar{x}	s	
0,04	Výstupek	225,55	22,52	168,75	6,23	220,22	23,26	[μm]
	Prohlubeň	186,93	15,42	173,07	22,37	200,97	22,07	
Rozdíl		-17,12		2,56		-8,74		[%]
0,06	Výstupek	241,47	26,02	225,92	18,63	234,04	15,24	[μm]
	Prohlubeň	213,49	25,40	220,42	13,94	231,48	10,03	
Rozdíl		-11,59		-2,43		-1,09		[%]
0,08	Výstupek	308,99	3,320	303,32	22,8	296,98	22,71	[μm]
	Prohlubeň	262,16	47,75	297,26	26,65	302,48	20,33	
Rozdíl		-15,16		-2		1,85		[%]

7.1.3 Vyhodnocení tangenciálních nástrojů

Z provedených experimentů vyplývá, že soudečkové tangenciální nástroje jsou schopny efektivního dokončovacího obrábění. Ta je způsobena značnou kontaktní plochou nástroje s obráběnou plochou. Větší kontaktní plocha by teoreticky mohla vést ke značným řezným silám. Provedená měření však ukázala, že řezné síly těmito nástroji způsobené dosahují pouze nízkých hodnot. Hlavní odlišností u použitých nástrojů byl jejich poloměr zaoblení. Toto zaoblení se tak jeví být důvod pro zjištěné rozdíly v řezných silách, které jsou zobrazeny na Obr. 7.24. Z těchto výsledků jsou patrné trendy růstu v závislosti jak na hloubce řezu, tak na velikosti posuvu. Zajímavý je pokles u nejvyššího přídávku a nejmenšího posuvu. Synergický efekt obou proměnných je z grafického zobrazení dobře patrný. Ale v tomto případě došlo k lokálnímu propadu v trendu.



Obr. 7.24: Porovnání řezných sil při použití nástrojů R85 a R90

Potenciální problém plynoucí z použití těchto nástrojů je vznik heterogenního povrchu. Tedy vznik dvou rozlišitelných oblastí, u kterých byla zjištěna rozdílná drsnost povrchu. Touto charakteristikou se prokázaly oba nástroje. Heterogenní povrch představuje komplikaci při optimalizaci výroby. Ze získaných výsledků je patrné, že oblasti se od sebe v závislosti na řezných proměnných mohou i výrazně lišit. Mezi těmito oblastmi nebyl nalezen žádný spolehlivý převod, kdy by např. při vyhodnocování drsnosti v praxi bylo možné řešit pouze jednu oblast. Souvisí to se složitou geometrií nástroje, která ale umožňuje onu velkou kontaktní plochu. Zvýšená efektivita obrábění je tak vykoupěna složitostí při definování požadované drsnosti povrchu, kdy bude muset být předepsána specifická oblast pro její změření.

Při porovnání dosažených drsností stojí za povšimnutí rozdílný trend hodnot parametru Ra v oblasti výstupku u použitých nástrojů (Obr. 7.12 a Obr. 7.14). Zatímco R85 vykazuje nejmenší hodnotu drsnosti pouze v malé výseči grafu, u R90 je tato oblast podstatně větší. Na druhou stranu další získané výsledky hodnot drsnosti mají mnohem užší rozptyly podmínek, při kterých je možné jich dosáhnout. Dalším zjištěním je fakt, že rozptyl dosažených parametru Ra je větší v případě nástroje R90, který i dosáhl vyšších hodnot při shodných podmínkách. Oba nástroje však při vhodných podmínkách mohou dosáhnout hodnot Ra menších než 0,4 μm .

Při porovnání oblastí prohlubně (Obr. 7.13 a Obr. 7.15) je možné pozorovat podobné výsledky jako v případě výstupku. Hlavně co se týče nástroje R90 a jeho rozptylu možných podmínek pro dosažení požadované drsnosti. Lze konstatovat, že optimalizace procesu pro dosažení lepších hodnot parametru Ra bude složitější u nástroje R90. Oblasti výstupku a prohlubně jdou, co se trendů týče, proti sobě. Například kombinace posuvu 0,06 mm a přídávku 0,1 mm povede k výrazně rozdílným hodnotám drsnosti. Zatímco u nástroje R85 je možné nalézt takové nastavení, kdy se hodnoty v oblasti výstupu a prohlubeň budou lišit pouze minimálně.

Obě získané plochy však vykazují vysokou kvalitu. Drsnost Ra kolem 0,4 μm bývá většinou dosažena broušením. U frézování bývá standardně dosahováno mnohem vyšších hodnot Ra (0,8 μm). Soudečkové frézy se tak jeví jako optimální pro obrábění volných ploch, neboť zkrátí výrobní čas a mohou ušetřit další výrobní náklady spojené s dokončovacími operacemi.

Při porovnání parametrů Rz pro oblast výstupku (Obr. 7.16 a Obr. 7.18) je možné pozorovat obdobné výsledky jako u parametru Ra. Nástroj R90 vykazoval větší pravidelnost v rozložení výsledků po všech použitých podmínkách. Nástroj R85 se jeví jako mající větší toleranci pro dosažení nízkých hodnot drsností v oblastech nižších posuvů, kdy při překročení těchto hodnot dochází k ztlačnějším změnám ve výsledcích. U nástroje se z křivosti jednotlivých oblastí dá usoudit, že vliv přídávku na obrobení je výraznější než u nástroje R85.

Porovnání hodnot parametru Rz v oblasti prohlubně (Obr. 7.17 a Obr. 7.19) opět vykazuje co už výsledky v oblasti výstupku u parametru Ra. Výsledky nástroje R90 jsou pravidelnější a symetričtěji rozděleny po všech hodnotách posuvu na zub. Nástroj R90 je tak vhodnější používat v oblastech vyšších posuvů, protože i když výsledná drsnost povrchu bude vyšší, jak by k tomu došlo i u nástroje R85, na rozdíl od něj však nástroj R90 nabízí širší pole pro dosažení požadovaných výsledků. Nástroj R85 je pak vhodný pro nižší posuvy, neboť oblasti nejnižších drsností jsou v porovnání s nástrojem R90 větší a dovolují i větší přídávky na obrábění.

Dosažené hodnoty parametru Rz svědčí o kvalitním řezném procesu. Obvyklý poměr Ra ku Rz se u obráběných ploch pohybuje v rozmezí 1:4 až 1:7. V případě ploch obrobených tangenciálními nástroji se tento poměr pohyboval u spodní

hranice tohoto rozmezí. Takto kvalitní povrch by již mohl být dostatečný např. pro dutiny forem.

Porovnání hodnot parametru RSm v oblasti výstupku (Obr. 7.20 a Obr. 7.22) ukázalo, že dva nejmenší intervaly u R85 pokrývají větší plochu grafu. Jeho nasazení v oblasti nižších posuvů by tak bylo vhodnější. Zároveň je možné využít růstových trendů směrem k větším přídávkům na obrobení. U nástroje R90 jsou dva nejmenší intervaly koncentrovány okolo střední hodnoty posuvu a nedovoluje použití vyšších hodnot posuvu. Na rozdíl od nástroje R85 však u vyšších hodnot posuvu vykazuje vodorovné rozložení dosažených výsledků.

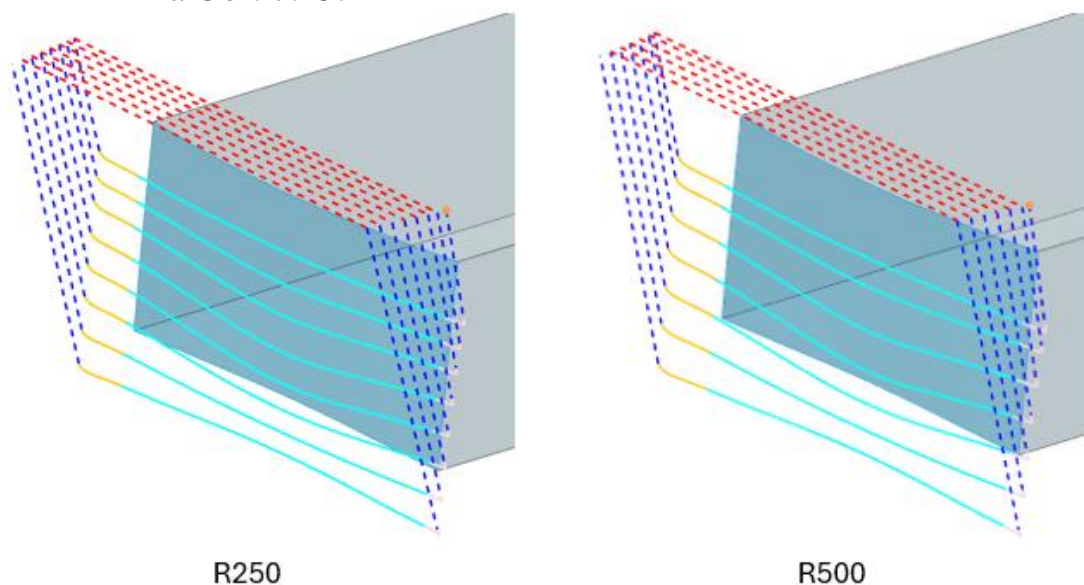
V oblasti prohlubně (Obr. 7.21 a Obr. 7.23) představují dva nejmenší intervaly vodorovné oblasti přes všechny použité přídávky na obrobení. Jejich nasazení by tak nebylo ovlivněno velikostí přídávku. Nevýhodou je, že by nedovolilo použití vyšších posuvů. Nástroj R90 stejně jako u ostatních parametrů vykázal pravidelnější rozložení intervalů.

Výsledky parametru RSm jsou jediné, u kterých jeho získané hodnoty odpovídají technologii frézování. Obvykle se hodnota RSm u frézování pohybuje v rozmezí 100-1000 μm . U obou nástrojů byly zjištěny hodnoty RSm ve spodní hranici tohoto rozmezí. Stále se tak jedná o velice kvalitní výsledky.

Z provedeného porovnání nástrojů lze konstatovat, že oba nástroje jsou vhodné pro obrábění volných (spline) ploch. Díky jejich geometrii, zajišťující větší kontaktní plochu, jsou schopny efektivního obrábění, které vede ke kvalitnímu povrchu. Z důvodu heterogenity povrchu však není vhodný pro nanášení povlaků. Rozdíly mezi jednotlivými oblastmi by potenciálně vedly k zvýraznění rozdílů mezi jednotlivými oblastmi.

7.2 Kónické nástroje

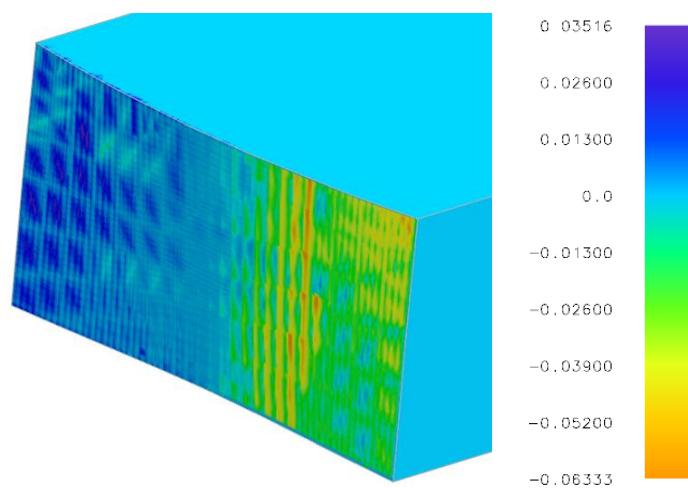
Testování kónických nástrojů probíhalo obdobně jako u nástrojů tangenciálních. Náklon osy nástrojů od osy Z byl u těchto ploch 0° . To bylo umožněno z důvodu rozdílné geometrie oproti nástrojům tangenciálním, neboť kónické nástroje mají kratší řeznou část. Pro obě operace byla v nastavení určena podmínka maximální výšky scallop na 0,1 mm. Vygenerované dráhy je pak možné vidět na Obr. 7.25.



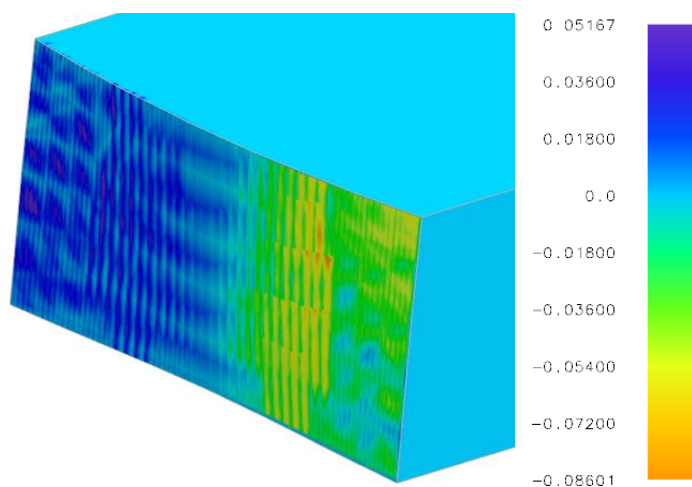
Obr. 7.25: Dráhy kónických nástrojů

Mezi obráběcími strategiemi je v tomto případě rozdíl v počtu potřebných drah, zatímco nástroj R250 při stejně nastavených podmínkách obrábění vyžadoval drah 8. S nástrojem R500 jich bylo zapotřebí 7. Rozdíl je možné připsat rozdílu v průměru nástrojů. Nástroj R500 s větším průměrem poskytuje větší kontaktní plochu a tím vyšší efektivitu.

Na Obr. 7.26. je pak zobrazena analýza zbytku obrábění po obrobení navrženou strategií.



Analýza po dokončení nástrojem R250



Analýza po dokončení nástrojem R500

Obr. 7.26: Analýza zbytku materiálu po dokončení kónickými nástroji

Stejně jako u nástrojů tangenciálních byly navržené podmínky obrábění voleny tak aby dodržely doporučení výrobců. Uvedeny jsou v Tab. 7.10. Cílem bylo opět popsat jaký budou mít vliv na vyhodnocované parametry.

Tab. 7.10: Podmínky měření u kónických nástrojů

Zn.	Proměnná	Hodnota			Jednotky
a_d	přídavek na obrobení	0,05	0,10	0,15	[mm]
f_z	posuv na zub	0,04	0,06	0,08	[mm]
v_c	řezná rychlost	200			[m/min]

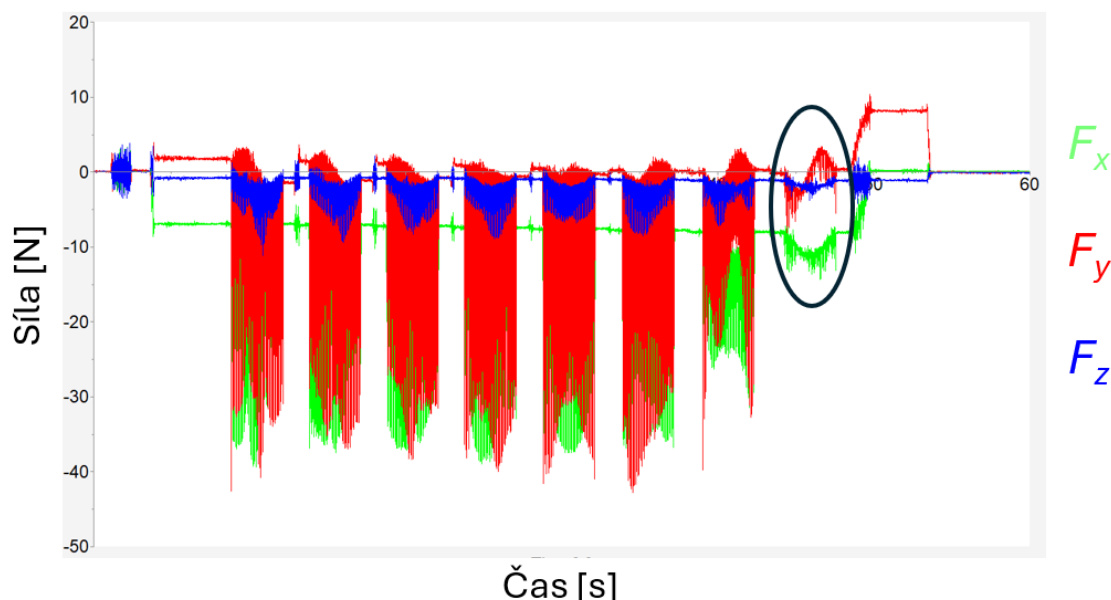
Rozdíl v geometrii, který vedl k odlišnému počtu obráběcích drah, se zákonitě propasal i do obráběcích časů. Oba nástroje jsou vysoce časově efektivní. S oběma nástroji bylo možné obrobít plochu o průřezu 25 x 55 mm v řádu sekund. Nástroj R500, u kterého bylo zapotřebí o jednu obráběcí dráhu méně, je z hlediska časové náročnosti vhodnější. Jedna obráběcí dráha navíc představuje 14,3% nárůst. Díky rozdílům mezi nástroji to však z hlediska časové náročnosti představuje 8,1 %, v případě nejmenšího posuvu 3,7 %, u střední hodnoty a 4,8 %, u nejvyšší.

Tab. 7.11. Časy obrábění kónickými nástroji

Nástroj	Posuv na zub			Jednotky
	0,04	0,06	0,08	[mm]
R250	40	28	22	[s]
R500	37	27	21	[s]

7.2.1 Řezné síly

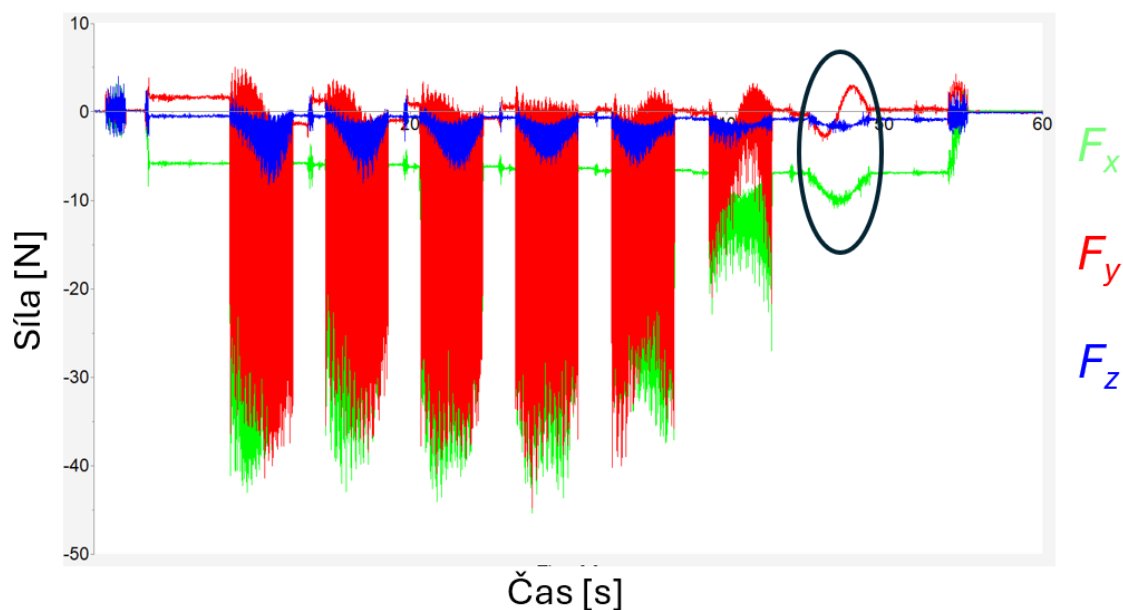
Vyhodnocení řezných sil probíhalo stejně jako v případě tangenciálních nástrojů. Na záznamu změřených sil, které jsou zobrazeny na Obr. 7.27 a Obr. 7.28, lze u nástroje R250 identifikovat 6 oblastí, kdy byl nástroj v plném kontaktu s obráběnou plochou. U nástroje R500 je takových oblastí 5. Poté u obou nástrojů klesly řezné síly přibližně na polovinu hodnot oproti plným záběrům. Kontaktní plocha nástroje s obrobkem se tedy zmenšila. Poslední obráběcí dráhy obou nástrojů (na obrázcích zvýrazněné) vedly k výrazně menšímu odebranému množství materiálu. Síly, které v této oblasti byly zaznamenány, jsou do velké míry pouze síly setrvačné způsobené natáčením obroku, jak je vidět z jejich průběhu.



Obr. 7.27: Řezné síly nástroje R250

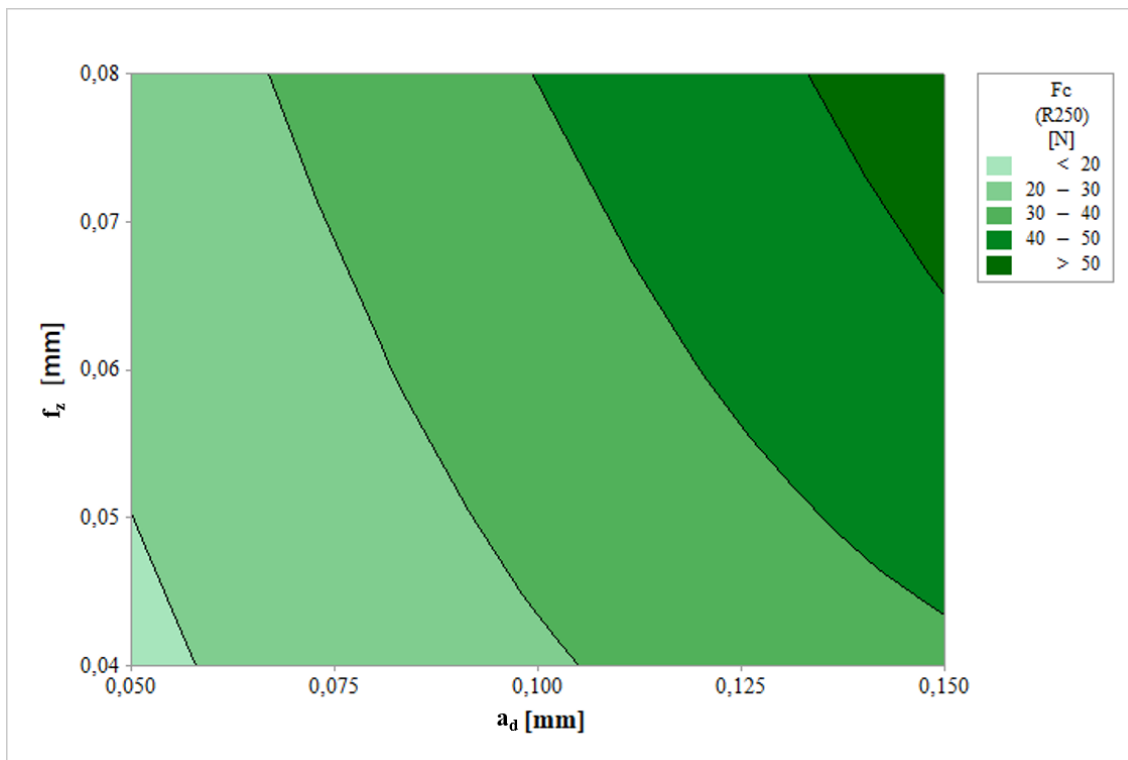
Tyto dráhy stále byly nutné pro kompletní obrobení, proto byly zahrnuty do porovnání efektivity obrábění. Jelikož by ale při vyhodnocování výsledků měly

negativní vliv na průměrné hodnoty řezných sil, byly z vyhodnocení řezných sil vyřazeny.



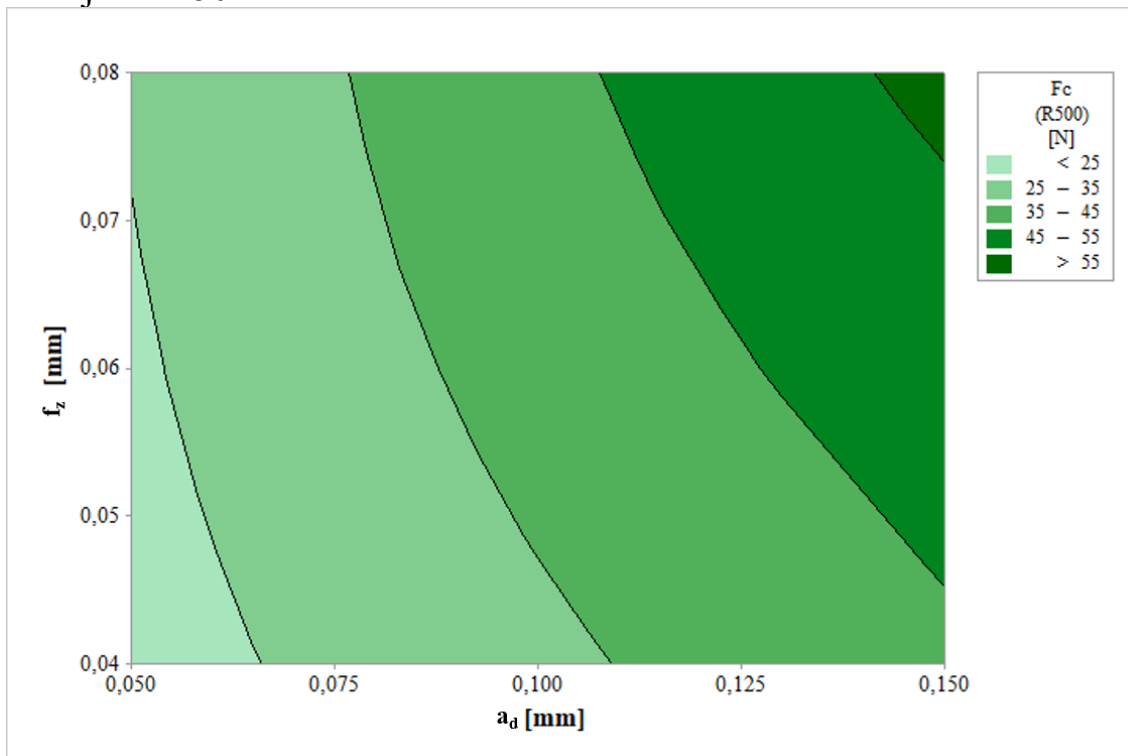
Obr. 7.28: Řezné síly nástroje R500

Vyhodnocené řezné síly byly opět zaneseny do konturových grafů, zobrazeny jsou na Obr. 7.29 a Obr. 7.30. Oba nástroje se vykazují shodnými trendy a to tak, že vliv posuvu není tak významný, jako vliv přídavku na obrábění. U obou nástrojů byl zjištěn stejný nárůst výsledků řezných sil. S rozdílem, že nástroj R500 dosáhl hodnot vyšších. Oproti nástrojům tangenciálním se nástroje kónické vykazují výrazně větším silovým zatížením obrobku. V porovnání s nimi dokázaly nástroje kónické obrobení plochy o stejném průřezu za nižší počet drah. K tomu došlo vlivem větší kontaktní plochy, přičemž z toho plynoucí větší odebíraný průřez materiálu vedl k většímu zatížení.



Obr. 7.29: Výsledky řezných sil nástroje R250

Mezi kónickými nástroji byl při shodných řezných podmínkách zjištěn rozdíl 5 N. Vzhledem k rozdílu v průměru, který je nejpravděpodobnější příčinou, je možné konstatovat, že nástroj R500 má větší kontaktní plochu v porovnání s nástrojem R250.



Obr. 7.30: Výsledky řezných sil nástroje R500

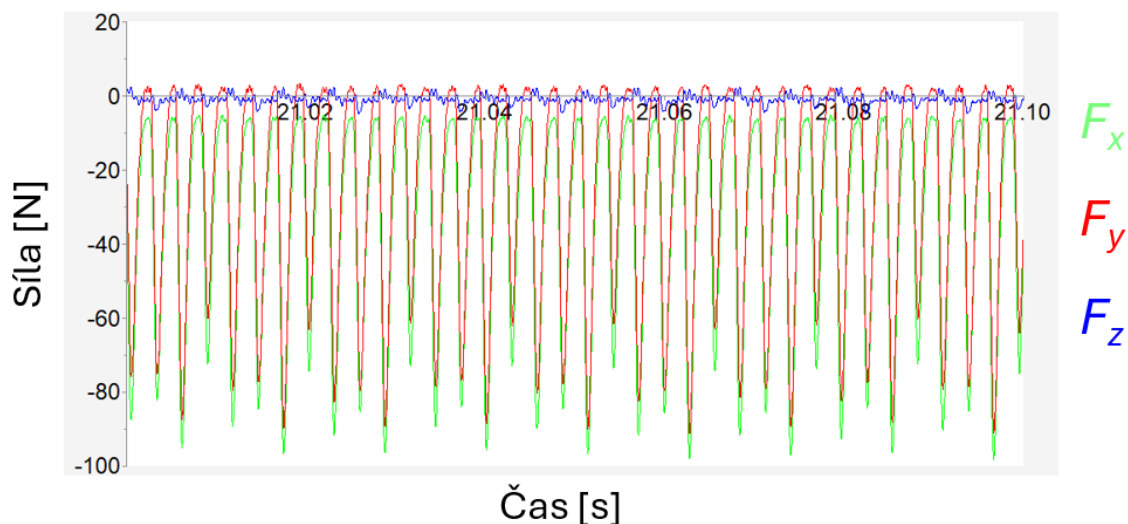
V Tab. 7.12 je pak ukázáno porovnání změřených řezných sil pro kónické nástroje. Ve všech případech to byl nástroj R500, který generoval větší silovou zátěž. Největší rozdíl byl zjištěn u použití nejnižších hodnot sledovaných proměnných. Ty pak postupně klesají s použitým posuvem na zub.

Zajímavým zjištěním jsou zjištěné rozdíly mezi směrodatnými odchylkami. Ty u nástroje R500 ve většině případů dosahují násobků hodnot v porovnání s nástrojem R250. Obrábění nástrojem R500 se tak jeví jako více nekonzistentní.

Tab. 7.12: Porovnání řezných sil kónických nástrojů

	a_d [mm]	0,05		0,1		0,15		
f _z [mm]		\bar{x}	s	\bar{x}	s	\bar{x}	s	
0,04	R250	18,151	1,016	29,006	1,042	38,121	2,089	[N]
	R500	20,991	2,239	32,957	2,858	43,469	5,644	
	Rozdíl	15,64		13,62		14,03		[%]
0,06	R85	21,624	1,599	34,728	1,642	48,012	2,620	[N]
	R90	23,689	1,079	38,304	3,349	49,826	5,893	
	Rozdíl	9,55		10,3		3,78		[%]
0,08	R85	24,663	1,200	40,213	1,64	54,793	2,999	[N]
	R90	25,759	1,631	42,609	5,026	57,458	6,028	
	Rozdíl	4,44		5,96		4,86		[%]

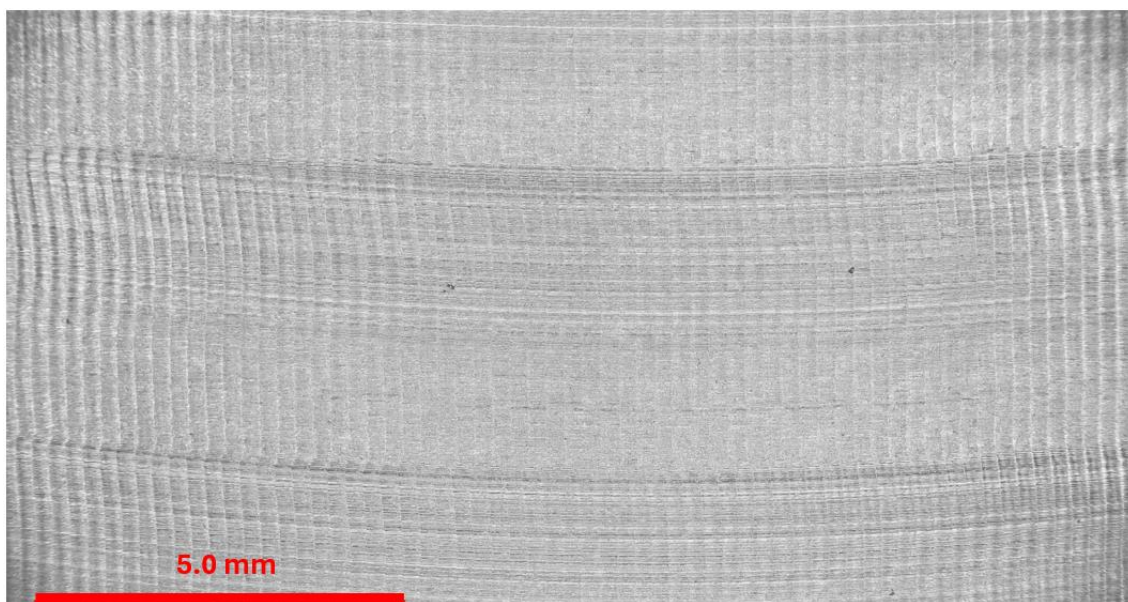
Z detailu průběhu řezných sil v procesu obrábění zobrazeném na Obr. 7.31, kde je zobrazena jedna desetina sekundy z obrábění, je možné vidět, že nástroj R500, resp. jeho zuby, nezatěžovaly obrobek rovnoměrně. Každý 4. záběr je v porovnání s ostatními výrazně menší co do změřených řezných sil. Všechny nástroje použité pro účely této práce byly nové. Je tak nepravděpodobné, že by tento rozdíl mohl být způsobený opotřebením nástroje. Rozdíl v záběrech tak s největší pravděpodobností plyne z výrobních tolerancí nástroje. Z hlediska použití se jedná o podstatné zjištění, neboť nerovnoměrné zatížení se může projevit chvěním a zkomplikovat tak přesnost výroby.



Obr. 7.31: Detail průběhu řezných sil při obrábění nástrojem R500

7.2.2 Drsnost

Prvním krokem při vyhodnocování povrchu získaného obráběním s kónickými nástroji bylo vyhodnocení pod mikroskopem. Na Obr. 7.32. a Obr. 7.33. jsou zobrazeny plochy získané při obrábění střední hodnotou posuvu a nejmenším přídávkem na obrábění. Na základě tohoto vyhodnocení opět vzešla domněnka, že získané plochy jsou heterogenní. Neboť na získaných snímcích jsou patrné různé oblasti.

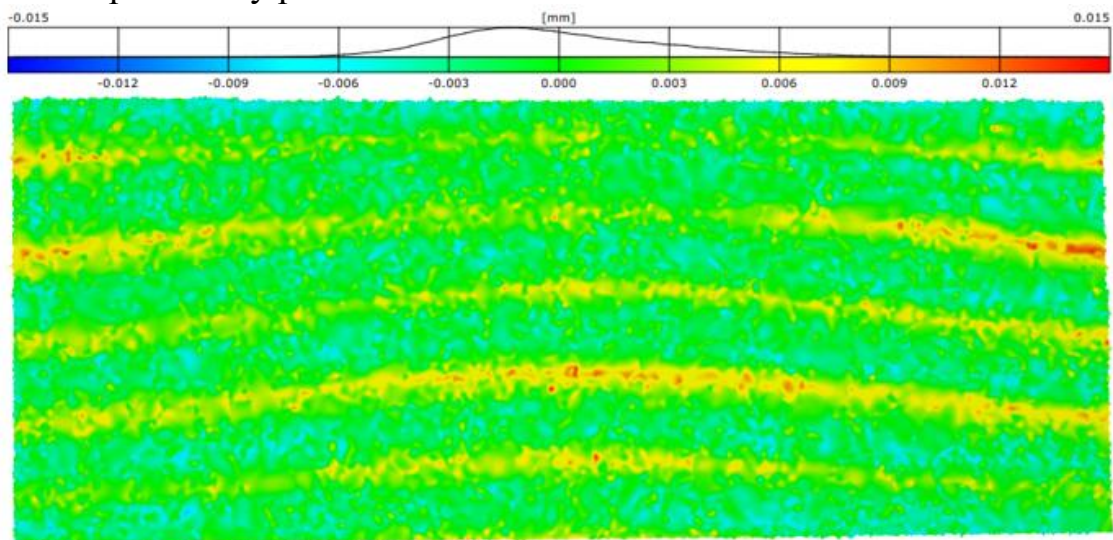


Obr. 7.32: Plocha obrobena R250

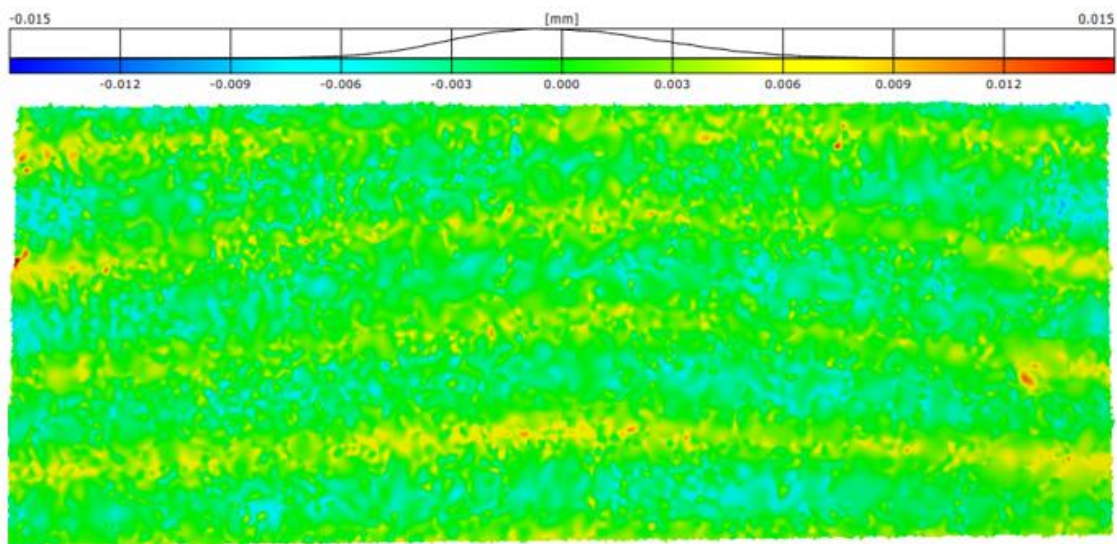


Obr. 7.33: Plocha obrobena R500

Pro potvrzení heterogenity byly vybrané plochy opět naskenovány na 3D skeneru a porovnány proti zhotovenému modelu. Na Obr. 7.34. a Obr. 7.35.



Obr. 7.34: 3D sken plochy obrobenny R250

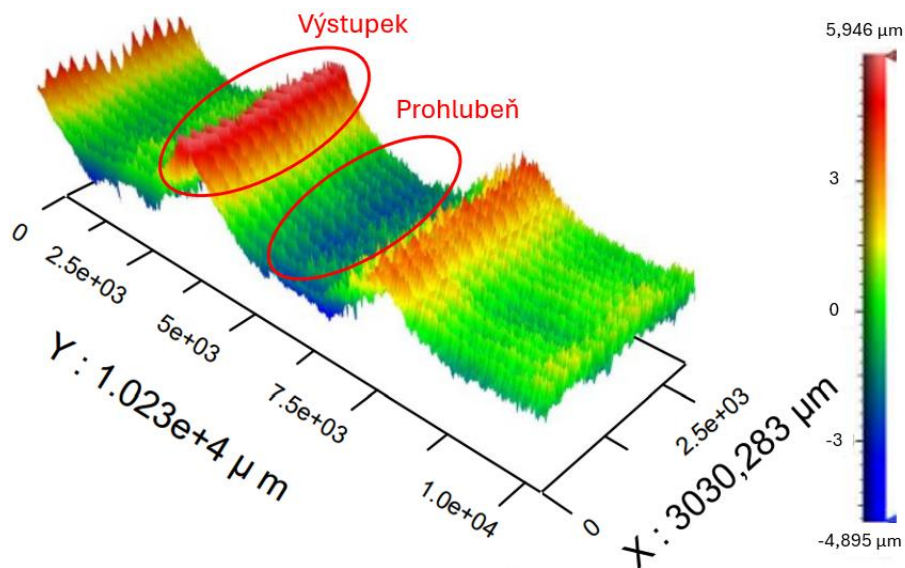


Obr. 7.35: 3D sken plochy obrobený R500

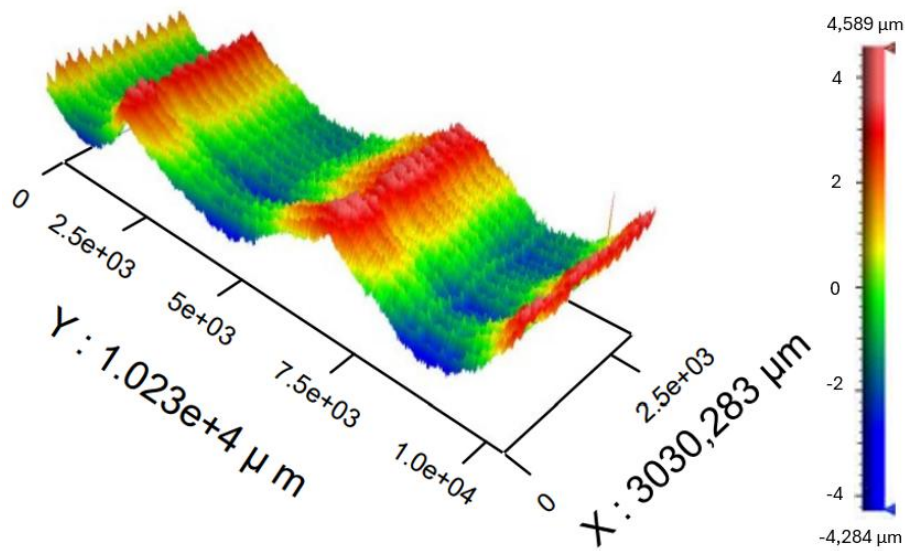
Na tomto porovnání je možné vidět, že na získaných plochách se opět nacházejí dvě odlišitelné oblasti. I v tomto případě tak bylo přistoupeno k vyhodnocování dvou obou. V porovnání s tangenciálními nástroji rozdíly mezi oblastmi výstupku a prohlubně nejsou tak výrazné a ani hranice mezi nimi nejsou tak ostré. Z histogramů ukazující rozložení prohlubní a výstupků je možné určit, že oproti tangenciálním nástrojům je u nástrojů kónických rozložení více rovnoměrné a jen mírně nakloněno doleva. Z toho lze usoudit, že kónické nástroje, resp. generování obráběcího programu, pro ně bylo úspěšnější s ohledem na dodržení jmenovitého rozměru. Tento rozdíl je možné připsat geometriím jednotlivých nástrojů. Použité kónické nástroje mají menší řeznou délku, a tak bylo pro použitý CAM software snazší vygenerovat takové dráhy, které budou přesněji kopírovat model volné plochy.

Toto potvrzuje doporučené rozdílné nasazení nástrojů. Kónické nástroje jsou vhodné pro použití na plochách s rušivými konturami, což plocha B, která pro ně byla navržena, splňuje. Tvarově se jedná o složitější plochu, a i přesto byly kónické nástroje lepší, co se dodržení nominálního rozměru týče.

Na Obr. 7.36 a Obr. 7.37 jsou pak ukázány skeny vyhodnocovaných oblastí ploch získaných při vyhodnocování parametrů drsnosti na optickém profilometru.



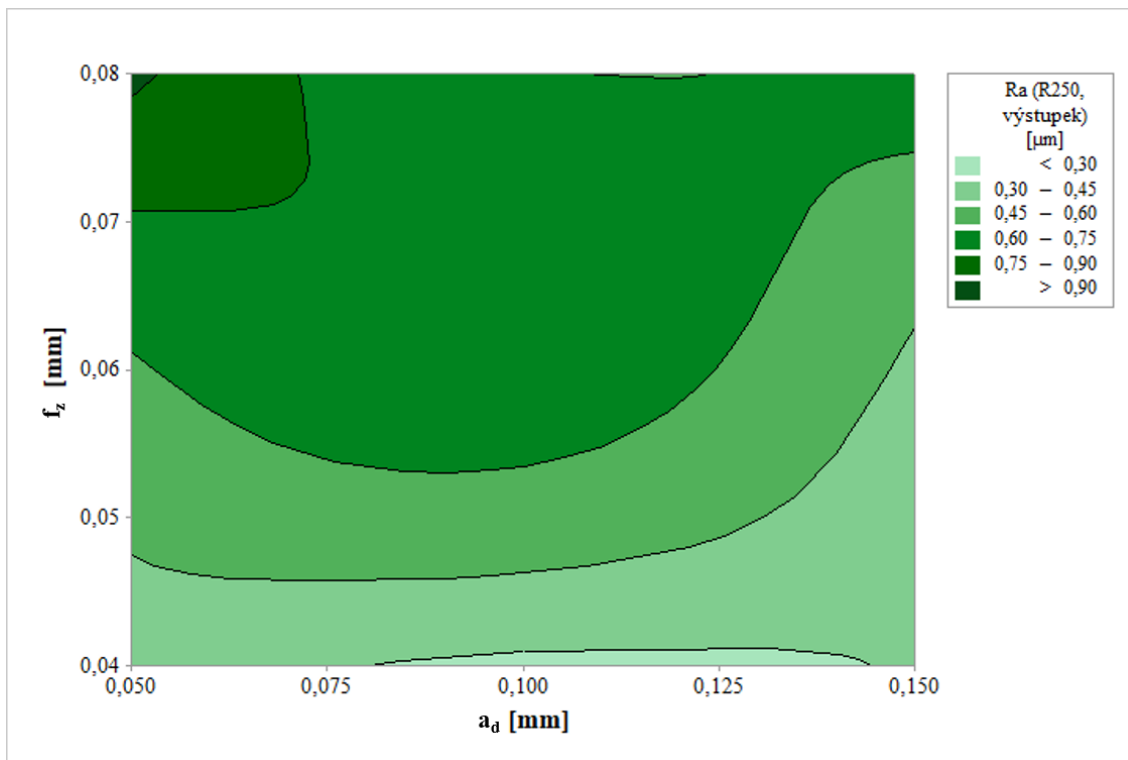
Obr. 7.36: Sken vyhodnocované oblasti obrobené R250



Obr. 7.37: Sken vyhodnocované oblasti obrobené R500

Získané parametry drsností pak byly opět převedeny do povrchových grafů. Na Obr. 7.38 a Obr. 7.39 jsou zobrazeny výsledky parametru Ra pro nástroj R250.

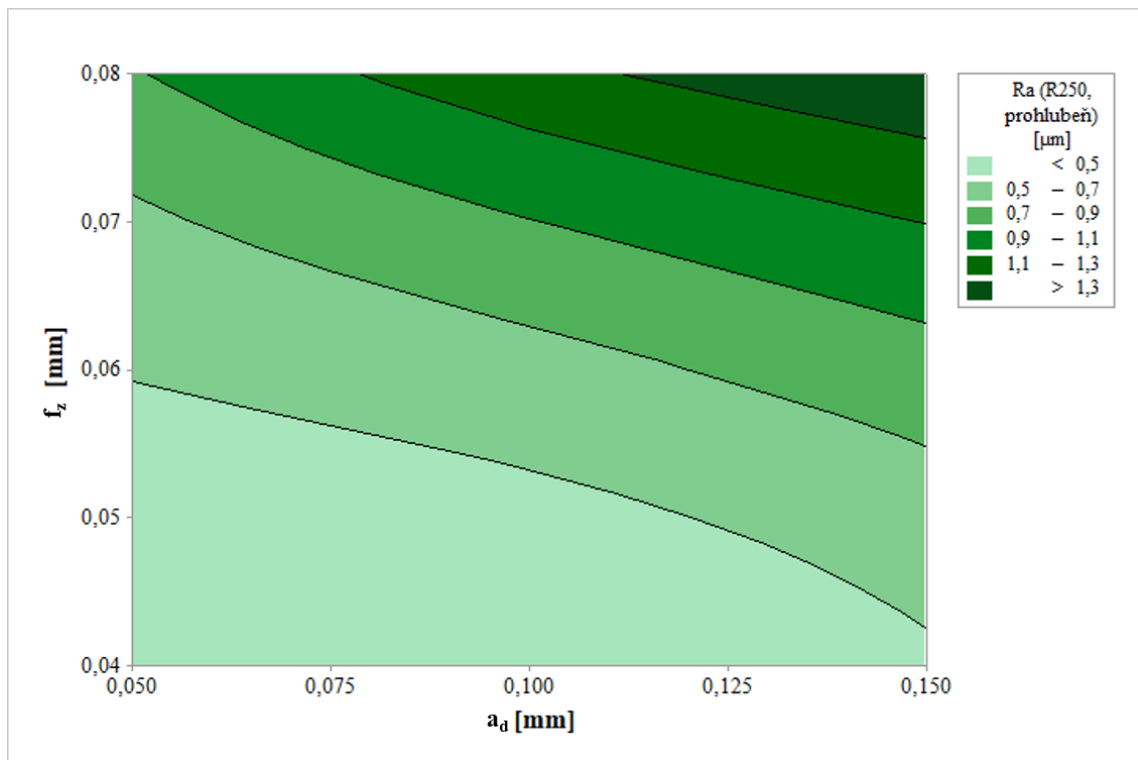
V oblasti výstupku je zjištěný rozsah hodnot parametru od 0,3 – 0,9 μm. Nejvyšší dosažené drsnosti byly získány při použití největšího použitého posuvu. Došlo k tomu však při nejnižších přídavicích na obrobení. Zbytek výsledků ukazuje, že získat drsnost povrchu v rozmezí 0,3 – 0,6 μm je možné i při největších přídavicích na obrobení s použitím i rychlejších posuvů, umožňující tak efektivní obrábění bez negativního vlivu na povrch.



Obr. 7.38: Ra – výstupek (obrobena R250)

Oblast prohlubně dosahuje vyšších hodnot a většího rozptylu zjištěných hodnot. V případě nástroje R250 se tak výrazně projevila změna obráběcího průměru po délce rezné části. Oblasti se tak od sebe výrazně odlišují.

U prohlubně je u parametru Ra možné pozorovat značně předvídatelné trendy. Drsnost stoupá, jak v závislosti na velikosti posuvu, tak přídavku. Ale závislosti se chovají předpovídajícím se způsobem, kdy je možné při větším přídavku dosáhnout lepších drsností snížením hodnoty posuvu. Vzájemná provázanost těchto dvou parametrů je dobře známá a bývá v praxi běžně používána. Jak se ovšem ukázalo u zatím prezentovaných výsledků, v případě soudečkových nástrojů se nemusí vždy jednat o spolehlivý postup pro dosažení optimálních drsností.



Obr. 7.39: Ra – prohlubeň (obrobena R250)

Problémovým aspektem jsou ovšem samotné dosažené hodnoty při použití nejvyšších hodnot posuvu, při kterých došlo k výraznému zhoršení kvality povrchu. K tomu došlo i v případě oblasti výstupku, zde se však liší hodnota přídatku na obrobení, která vedla k nejvyšším hodnotám parametru Ra. Optimalizace procesu tak, aby obě oblasti splňovaly případnou drsnost, bude značně problematická. Vhodné bude volit nižší posuvy, při kterých je možné dosáhnout větší shody v dosaženém parametru Ra. Protože velké rozdíly mezi oblastmi by si mohly vyžádat použití dalších operací, které by zbytečně prodlužovaly výrobu. Pro snazší porovnání obou oblastí byly získané výsledky převedeny do Tab. 7.13, kde kromě samotných výsledků a jejich směrodatných odchylek jsou uvedeny i procentuální rozdíly mezi výsledky.

Tab. 7.13: Porovnání parametru Ra dosaženého nástrojem R250

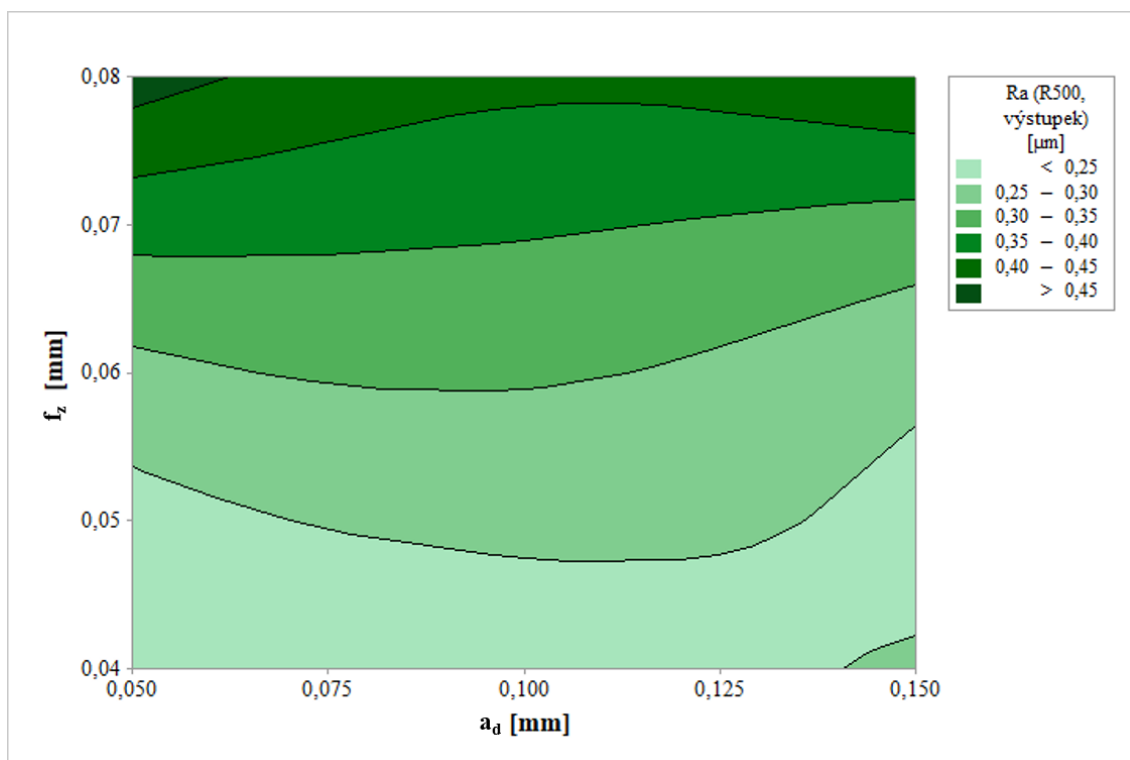
		0,05		0,1		0,15		
f_z [mm]	a_a [mm]	\bar{x}	s	\bar{x}	s	\bar{x}	s	
0,04	Výstupek	0,4017	0,0441	0,2692	0,0057	0,3135	0,028	[μm]
	Prohlubeň	0,3908	0,0213	0,3479	0,0345	0,4726	0,048	
	Rozdíl	-2,71		29,23		50,75		[%]
0,06	Výstupek	0,5842	0,0653	0,6819	0,143	0,4225	0,050	[μm]
	Prohlubeň	0,5095	0,0328	0,6321	0,1243	0,8191	0,186	
	Rozdíl	-12,79		-7,3		93,87		[%]
0,08	Výstupek	0,9336	0,1749	0,615	0,0249	0,6854	0,934	[μm]
	Prohlubeň	0,8859	0,0763	1,2363	0,2078	1,4648	0,886	
	Rozdíl	-5,11		101,02		113,71		[%]

Z tabulky je patrné, že při nastavených obráběcích podmínkách existují potenciální velké rozdíly mezi dosaženou hodnotou parametru Ra v získaných oblastech. Jako je tomu např. u maximálních hodnot posuvu a přídávku, kdy rozdíl dosáhl více jak 100 %. Na druhé straně spektra rozdíl dosáhl necelých 3 %.

Ukazuje se, že větších rozdílů je dosahováno spíše změnou přídávku na obrábění než se zvyšujícím se posuvem. Z toho plyne jasné doporučení, pokud by bylo cílem dosáhnout co nejjednoduššího povrchu, je žádoucí přizpůsobit přírůstek na obrobení.

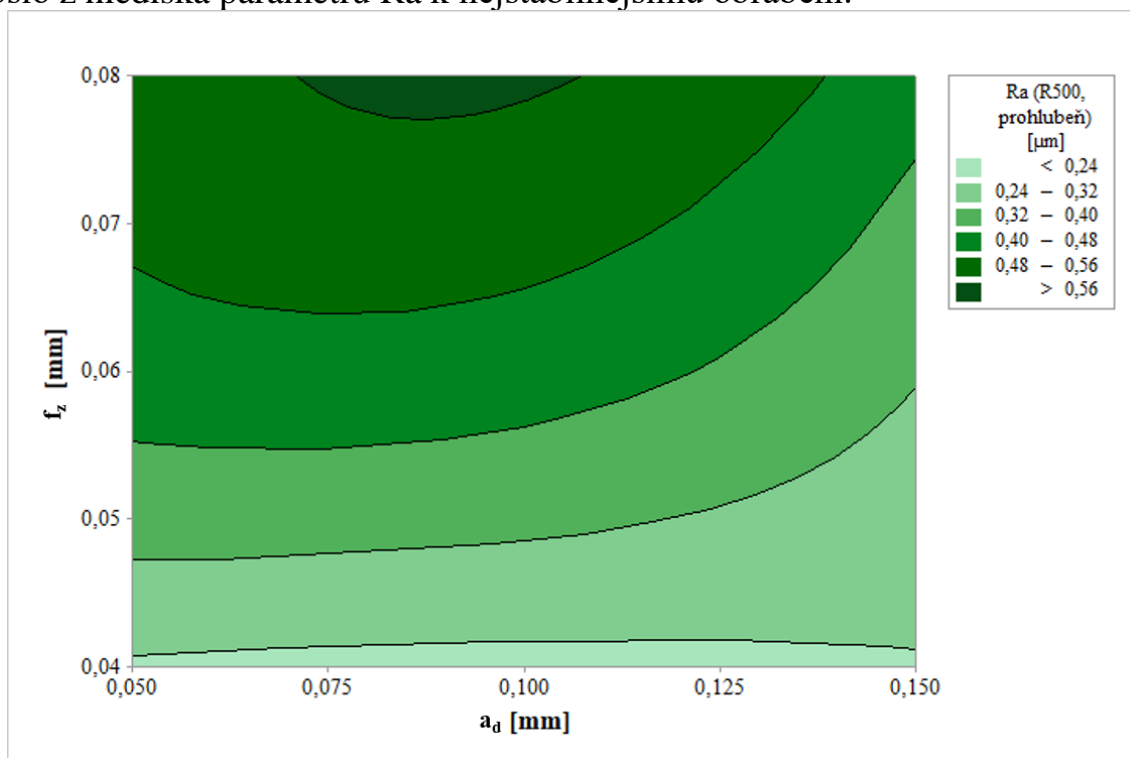
U nástroje R500 a parametru Ra (Obr. 7.40 a Obr. 7.41) nebyly změřeny mezi oblastí výstupku a prohlubně tak výrazné rozdíly jako u nástroje R250. Změřené drsnosti také nedosahovaly tak vysokých hodnot, např. nejvyšší hodnota v oblasti výstupku je poloviční oproti nástroji R250. A u prohlubně se nejnižší hodnota u R250 prakticky neliší od největší hodnoty u nástroje R500.

Obrábění nástrojem R500 se ukázalo jako velice kvalitní, neboť hodnoty parametru Ra se napříč všemi použitými řeznými podmínkami pohybovaly do 0,6 μm . Nejnižší dosažené hodnoty Ra 0,25 resp. 0,24 μm jsou na úrovni povrchu dosahované broušením. Znovu se tedy ukazuje, že použití soudečkových nástrojů může ušetřit případné dokončovací operace.



Obr. 7.40: Ra – výstupek (obrobena R500)

V porovnání s nástrojem R250 a i v porovnání s nástroji tangenciálními byly mezi dvěma vyhodnocovanými oblastmi velmi malé rozdíly. U nástroje R500 tak došlo z hlediska parametru Ra k nejstabilnějšímu obrábění.



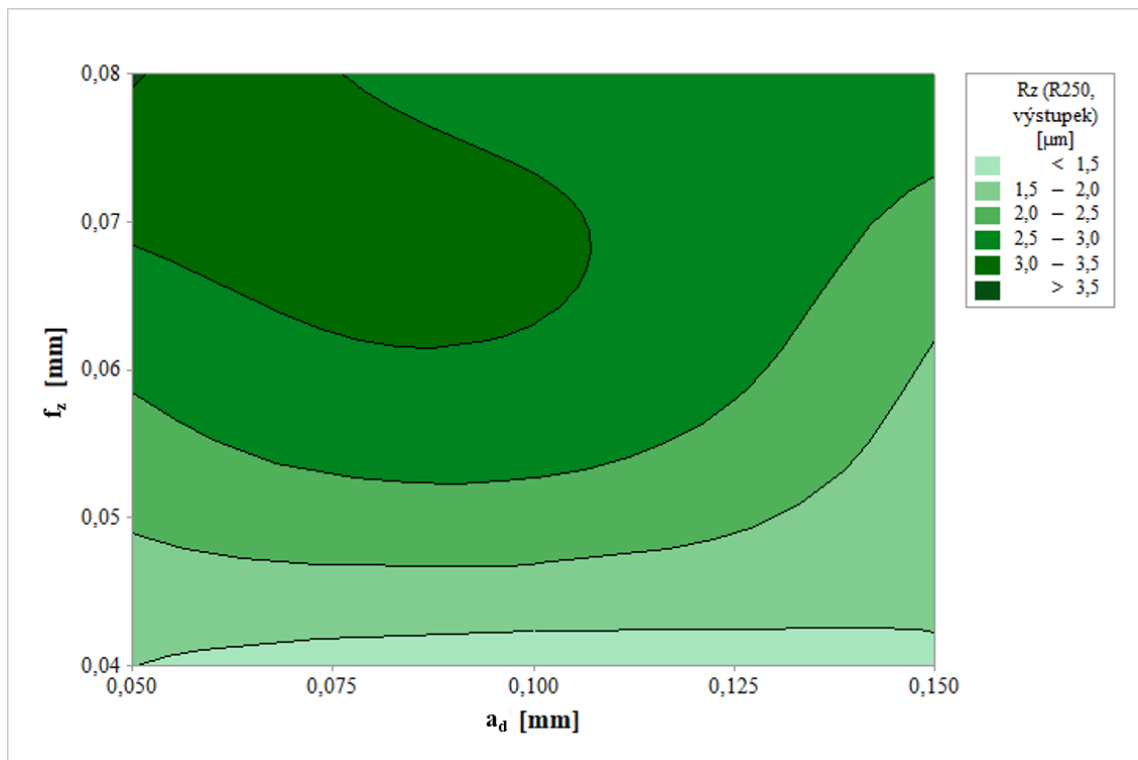
Obr. 7.41: Ra – prohlubeň (obrobena R500)

V Tab. 7.14 je pak uvedeno porovnání jednotlivých oblastí. Na rozdíl od nástroje R250 nedosahují procentuální rozdíly tak vysokých hodnot. Ty největší byly zjištěny při použití střední hodnoty posuvu, kde dosáhly desítek procent. Při použití nejvyšších hodnot proměnných byl mezi oblastí a výstupku zjištěn rozdíl necelých 4 %. S tím, že i při těchto podmínkách by výsledná hodnota Ra byla 0,4 μm je možné doporučit používání právě těchto podmínek.

Tab. 7.14: Porovnání parametru Ra dosaženého nástrojem R500

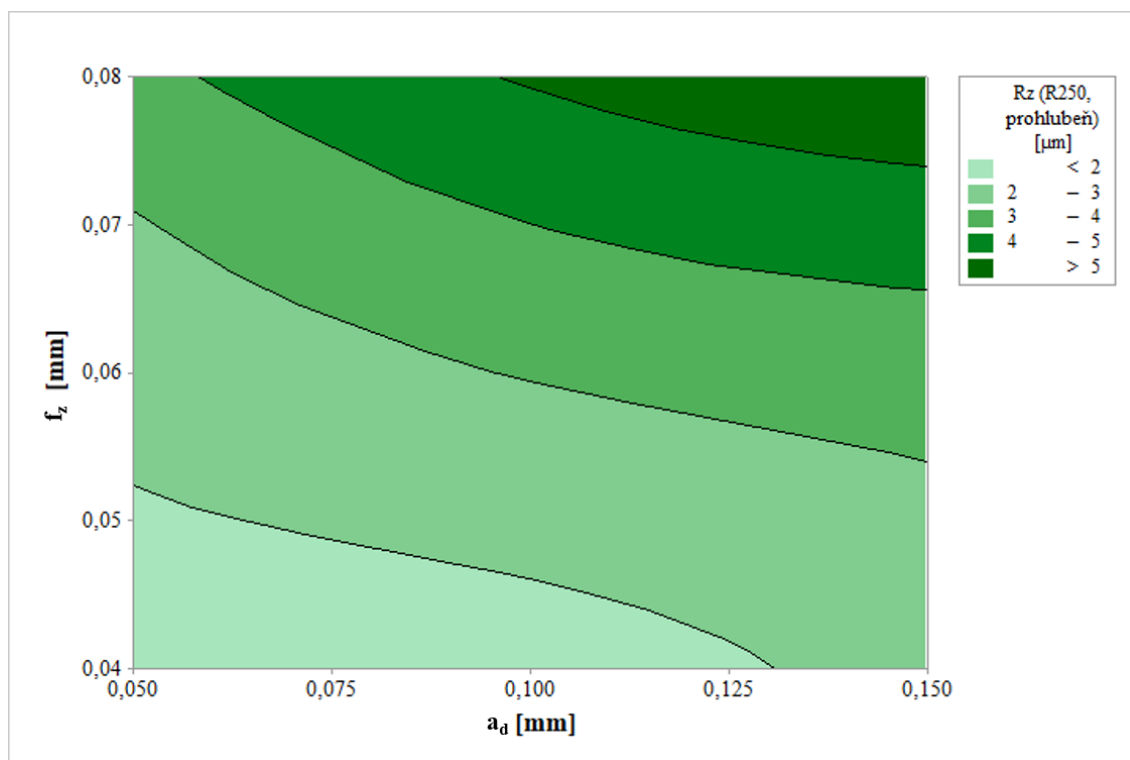
		0,05		0,1		0,15		
f_z [mm]	a_d [mm]	\bar{x}	s	\bar{x}	s	\bar{x}	s	
0,04	Výstupek	0,2035	0,0204	0,2213	0,0338	0,2582	0,0101	[μm]
	Prohlubeň	0,2295	0,0469	0,2183	0,0292	0,2352	0,0509	
Rozdíl		12,78		-1,36		-8,91		[%]
0,06	Výstupek	0,2880	0,0366	0,3052	0,0359	0,2642	0,0427	[μm]
	Prohlubeň	0,4377	0,0593	0,4341	0,0922	0,3255	0,047	
Rozdíl		51,98		42,23		23,2		[%]
0,08	Výstupek	0,4754	0,0359	0,4116	0,0688	0,4494	0,0607	[μm]
	Prohlubeň	0,5142	0,0528	0,5683	0,0712	0,4319	0,038	
Rozdíl		8,16		38,07		-3,89		[%]

U nástroje R250 a parametru Rz (Obr. 7.42 a Obr. 7.43) byly v oblasti výstupku zjištěny poměrně zajímavé trendy. Nejnižších hodnot bylo dosaženo při minimálním posuvu, bez vlivu přídatku na obrobení. Při pomalém posuvu tak zřejmě byl obráběcí proces dostatečně stabilní, aby povrch nevykazoval velké odchylky. Oblasti hodnot v rozpětí 1,5 – 2,5 μm pak překvapivě mají růstový trend s posuvem na zub při využití větších přídatků. Naopak nejvyšších hodnot bude dosaženo u nižších přídatků. Zřejmě tak, co se této oblasti a parametru týče, je vhodné u nástroje R250 volit právě tyto parametry.



Obr. 7.42: Rz – výstupek (obrobena R250)

Oblast prohlubně je opět charakteristická výrazně vyššími hodnotami oproti oblasti výstupku. Výhodou zde je, že oblasti nejnižších hodnot poskytují poměrně široké možnosti v nastavení rezných podmínek. Trendy oblastí, při kterých je možné dosáhnout požadovaných drsností, mají v prohlubni sestupné trendy v závislosti na použitém přídávku na obrobení. V případě této oblasti je tak synergický efekt obou parametrů více výrazný než u výstupku.



Obr. 7.43: R_z – prohlubeň (obrobena R250)

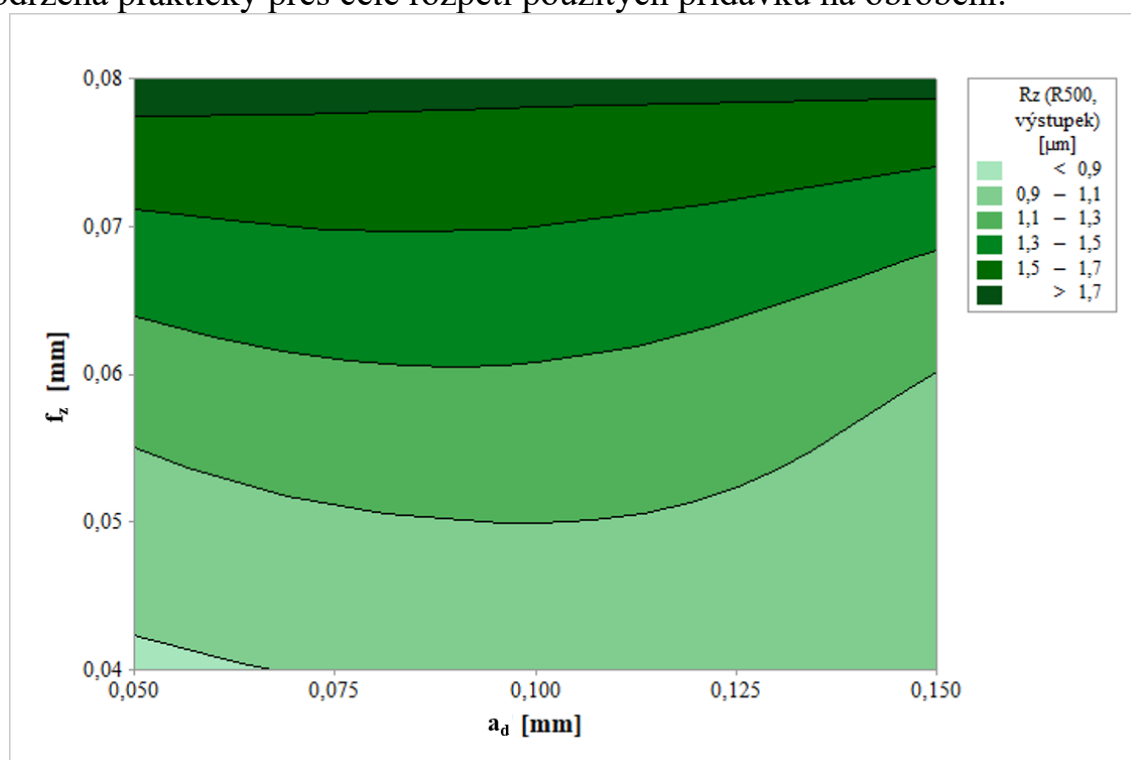
Při porovnání oblastí, které je uvedeno v Tab. 7.15, je vidět, že až na jednu výjimku, při střední hodnotě posuvu a nejnižší hodnotě přídatku na obrobení, byly ve všech případech v oblasti prohlubně změřeny vyšší hodnoty. Nejmenší zjištěný rozdíl je u středních hodnot zkoumaných parametrů. Neshodné trendy ve výsledcích obou oblastí vedly, hlavně v případě největšího přídatku na obrobení, k výrazným rozdílům.

Rozdíl 86,34 %, zjištěný u nejvyššího posuvu a přídatku 0,1 mm ukazuje, že s těmito podmínkami se obrábění dostalo na limit, při kterém je možné zaručit jen minimální rozdíly. Problém představují i výrazné směrodatné odchylky. Ukazují na kolísavý průběh obrábění. To znesnadňuje navrhnutí řezných podmínek za účelem dosažení požadovaného stupně kvality.

Tab. 7.15: Porovnání parametru Rz dosaženého nástrojem R250

f_z [mm]	a_d [mm]	0,05		0,1		0,15		
		\bar{x}	s	\bar{x}	s	\bar{x}	s	
0,04	Výstupek	1,5073	0,1358	1,2025	0,0512	1,4746	0,1647	[μm]
	Prohlubeň	1,7178	0,1242	1,641	0,2129	2,3761	0,3028	
	Rozdíl	13,97		36,47		61,14		[%]
0,06	Výstupek	2,577	0,4312	2,905	0,4536	1,9275	0,2045	[μm]
	Prohlubeň	2,3261	0,2414	3,0502	0,4499	3,4632	0,6185	
	Rozdíl	-9,74		5		79,67		[%]
0,08	Výstupek	3,5469	0,5636	2,7319	0,1445	2,8946	0,1463	[μm]
	Prohlubeň	3,7386	0,3295	5,0905	0,8397	5,8633	1,3305	
	Rozdíl	5,4		86,34		102,56		[%]

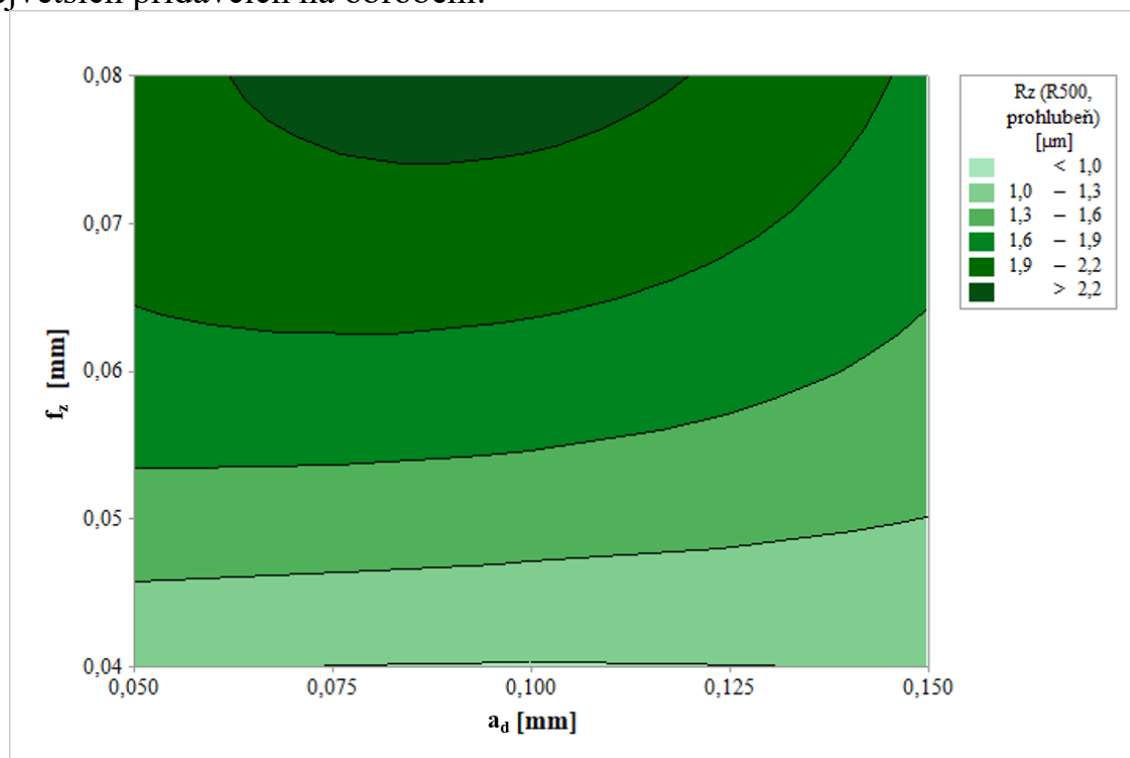
U nástroje R500 (Obr. 7.44 a Obr. 7.45) se v oblasti výstupu pohybuje rozptyl naměřených hodnot parametru Rz v rozmezí 0,9 – 1,7 μm . To svědčí o tom, že nebyly zjištěny žádné výrazné rýhy, které by znehodnocovali kvalitu povrchu. V oblasti prohlubně se opět proměnná posuvu na zub ukázala jako výraznější, neboť jednotlivé drsnosti mají prakticky vodorovný charakter růstu. A drsnost je dodržena prakticky přes celé rozpětí použitých přídavek na obrobení.



Obr. 7.44: Rz – výstupek (obrobena R500)

U prohlubně, bylo v porovnání s prohlubní, dosaženo vyšších hodnot parametru Rz, maximální hodnoty se pohybují nad 2,2 μm . Což koresponduje s výsledky parametru Ra, které se projeví obdobně. Trendy jednotlivých

drsností postupně rostou spolu s použitým posuvem na zub v místech maximálního přídávku na obrobení. Nejvyšší hodnoty tak nebyly dosaženy při největších přídávcích na obrobení.



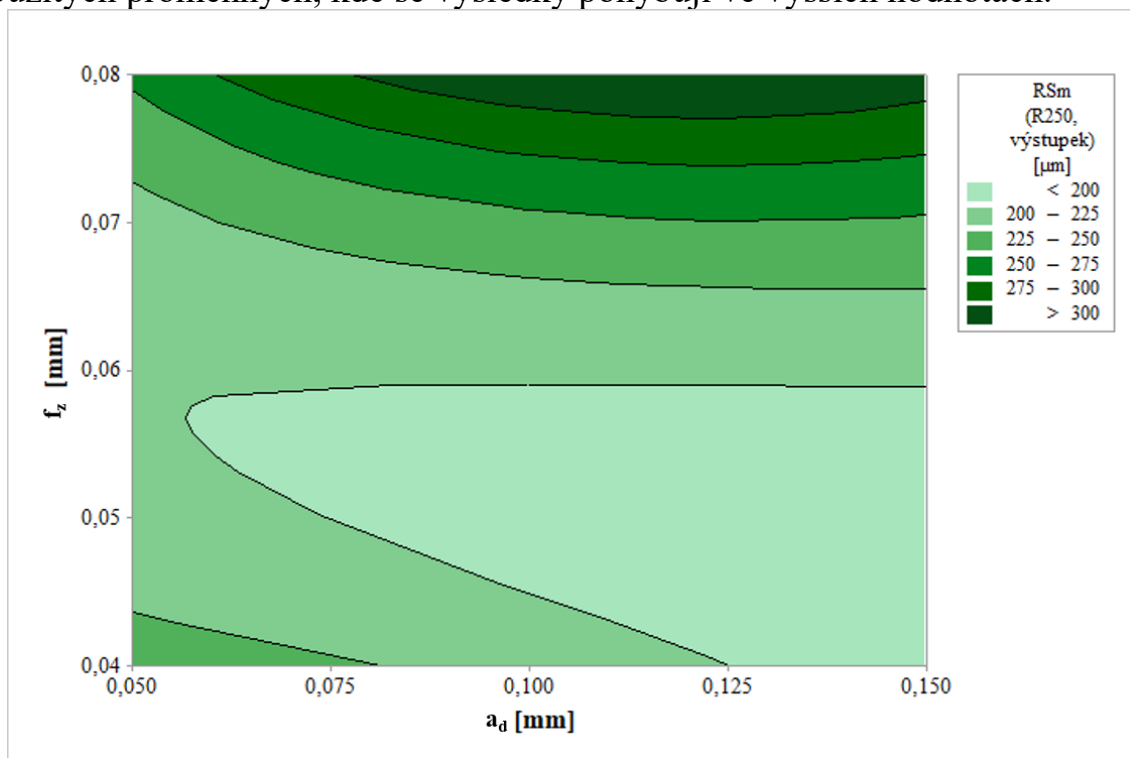
Obr. 7.45: Rz – prohlubeň (obrobena R500)

V Tab. 7.16 je pak ukázáno porovnání. U obou oblastí se neprojeví výrazné směrodatné odchylky. Ve dvou případech byla v oblasti výstupku zjištěna hodnota parametru Rz < 1 μm , což představuje velice kvalitní výsledek pro frézovací technologii. I poměr Ra:Rz vypovídá o velice kvalitním povrchu. Povrch bude odolný proti opotřebení což je výhoda jak pro dutiny forem, tak pro oběžná kola lopatek.

Tab. 7.16: Porovnání parametru Rz dosaženého nástrojem R500

f_z [mm]	a_d [mm]	0,05		0,1		0,15		
		\bar{x}	s	\bar{x}	s	\bar{x}	s	
0,04	Výstupek	0,8742	0,1157	0,9516	0,1539	1,0373	0,0363	[μm]
	Prohlubeň	1,0341	0,1775	0,9828	0,1282	1,0253	0,2028	
	Rozdíl	18,29		3,28		-1,16		[%]
0,06	Výstupek	1,206	0,1621	1,2841	0,1777	1,0963	0,143	[μm]
	Prohlubeň	1,7961	0,2052	1,7867	0,2433	1,52	0,2104	
	Rozdíl	48,93		39,14		38,65		[%]
0,08	Výstupek	1,787	0,1592	1,7513	0,2805	1,7638	0,181	[μm]
	Prohlubeň	2,083	0,2611	2,3075	0,2081	1,8293	0,191	
	Rozdíl	16,56		21,76		3,71		[%]

Výsledky parametru RSm jsou pro nástroj R250 zobrazeny na Obr. 7.46 a Obr. 7.47. Trendy v oblasti výstupku jsou poměrně zajímavé. Hodnoty menší jak 200 μm jsou ve spektru výsledků rozloženy se zmenšujícím se trendem směrem k nižším hodnotám přídatku na obrobení. Rozpětí hodnot 200–225 μm pak zabírá podstatnou část rozptylu posuvu na zub. Zbytek zjištěných intervalů je pak hustě rozložen mezi dvě nejvyšší hodnoty posuvu. Výjimkou je malá oblast u nejnižších použitých proměnných, kde se výsledky pohybují ve vyšších hodnotách.

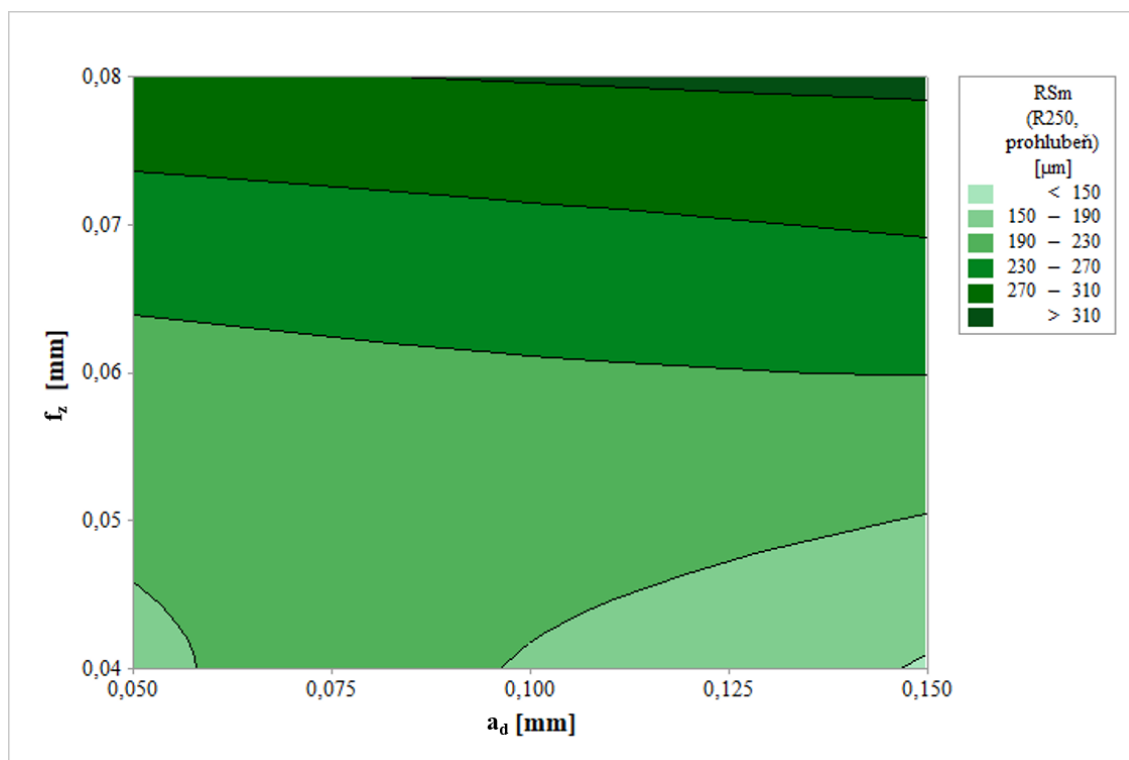


Obr. 7.46: RSm – výstupek (obrobeno R250)

U prohlubně se parametr RSm liší od ostatních parametrů tím, že sice zde také bylo dosaženo vyšších hodnot, byť pouze nepatrně. Ale nejnižší hodnota u prohlubně je výrazně nižší v porovnání s výstupkem.

Oblasti nejmenších drsností, stejně jako v případě výstupku, poskytují poměrně široké pole možných řezných podmínek, při kterých je možné jich dosáhnout. Vzhledem k vodorovnému rozdělení rozptylů parametru RSm po posuvu na zub je možné určit, že zde má tato proměnná výraznější efekt než přídatku na zub.

Oblast, kde bylo dosaženo hodnot menších než 150 μm , byla zjištěna v krajních podmínkách minimálního posuvu a maximálního přídatku na obrobení.



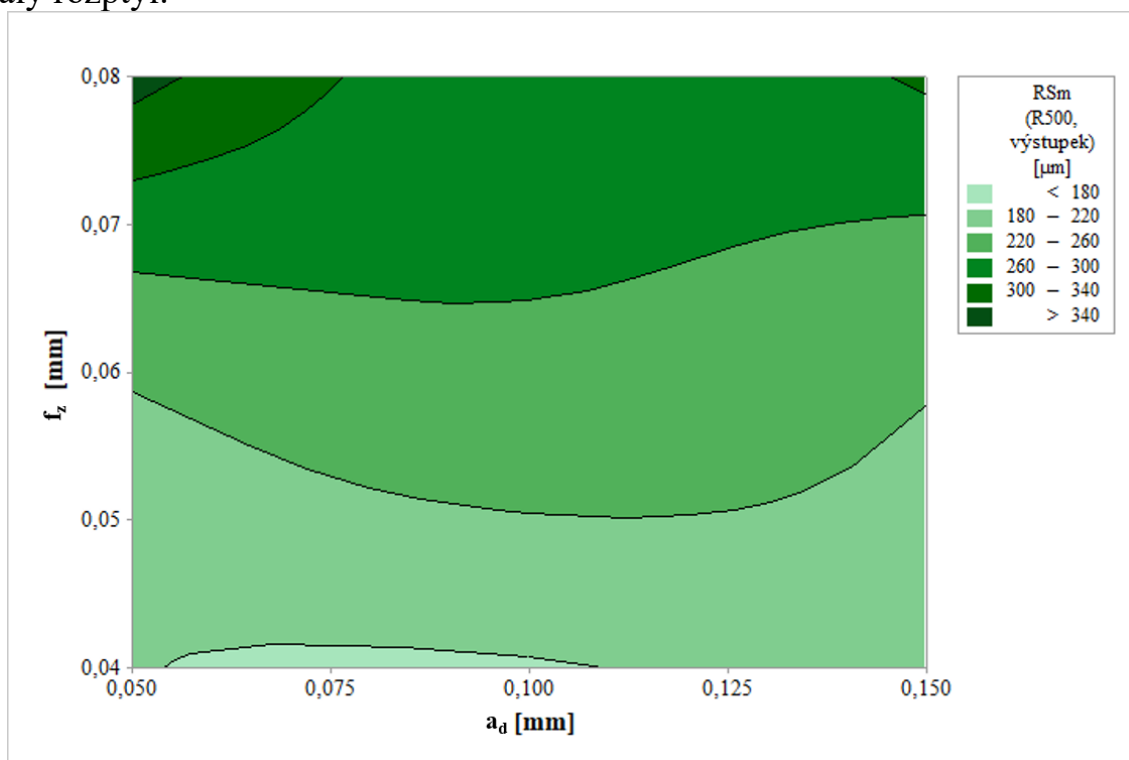
Obr. 7.47: RSm – prohlubeň (obrobena R250)

Z porovnání, které je uvedeno v Tab. 7.17, je možné určit, že parametr RSm byl, co se rozdílů zjištěného mezi dvěma vyhodnocovanými oblastmi, ten nejméně rozdílný. Vliv obrábění menším průměrem nástroje na vzdálenost trhlin tedy není tak výrazný a rozhodujícím faktorem jsou jiné parametry. Hlavní faktor ovlivňující, jaká oblast bude kvalitnější se jeví být posuv na zub, kdy s jeho růstem postupně rozdíl klesá a překlápí poměr mezi výsledky.

Tab. 7.17: Porovnání parametru RSm dosaženého nástrojem R250

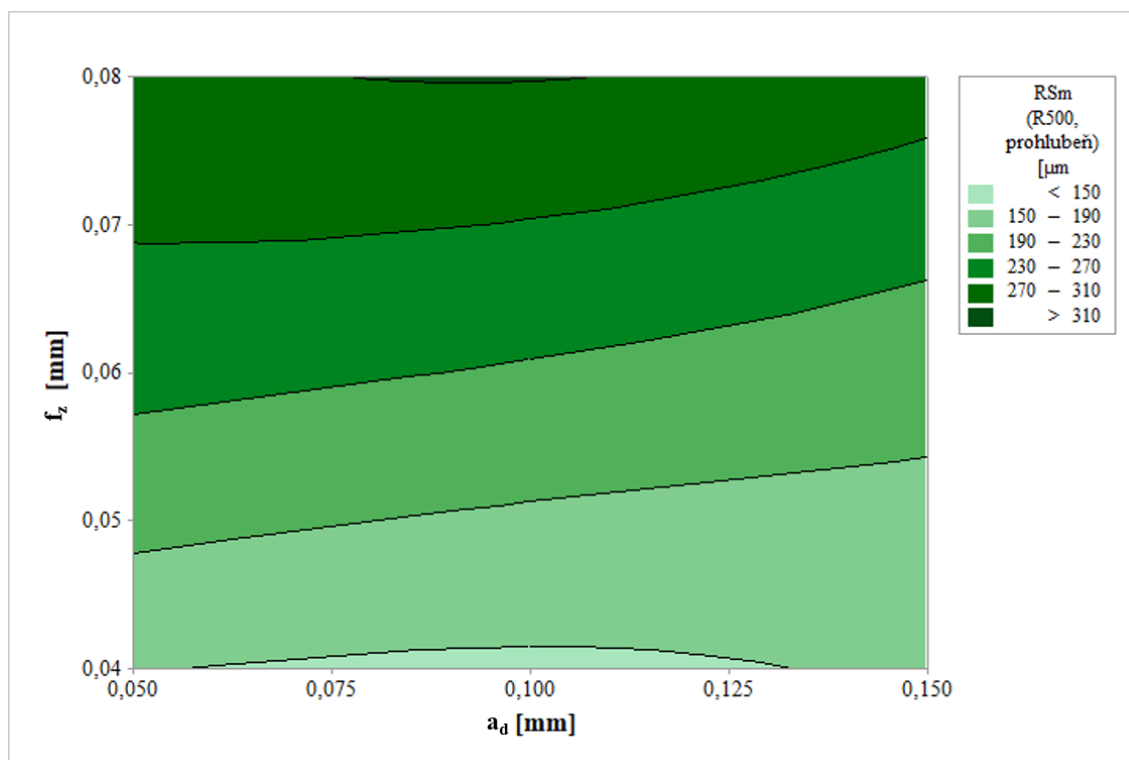
f_z [mm]	a_d [mm]	0,05		0,1		0,15		
		\bar{x}	s	\bar{x}	s	\bar{x}	s	
0,04	Výstupek	238,61	50,09	215,29	29,7	183	20,23	[μm]
	Prohlubeň	186,68	32,91	188,65	22,97	146,02	8,6	
	Rozdíl	-21,76		-12,37		-20,21		[%]
0,06	Výstupek	201,11	22,98	202,37	24,81	203,62	28,37	[μm]
	Prohlubeň	217,63	23,57	226,4	21,86	230,8	18,94	
	Rozdíl	8,21		11,87		13,35		[%]
0,08	Výstupek	255,41	30,18	320	13,57	313,8	5,66	[μm]
	Prohlubeň	303,66	26,14	312,51	25,55	316,78	15,21	
	Rozdíl	18,89		-2,34		0,95		[%]

Získané výsledky parametru RSm pro nástroj R500 jsou na Obr. 7.48 a Obr. 7.49. U výstupku je možné pozorovat vodorovné trendy, které ovšem vykazují místní extrém v závislosti na přídávku na obrobení. Intervaly reprezentující minimální maximální změřené hodnoty (<180 a >300) vytvoří v podstatě zanedbatelnou část plochy grafu. Z toho plyne, že ve většině případů bude dosaženo výsledků 180-300 μm . Což pro parametr RSm představuje poměrně malý rozptyl.



Obr. 7.48: RSm – výstupek (obrobena R500)

V oblasti prohlubně mají jednotlivé rozptyly vodorovné rozložení s mírným růstem k maximální hodnotě přídávku na obrobení. Výrazněji se tu tak projevil synergický efekt obou proměnných. Stále však platí, že vliv posuvu na zub je dominantní. Obdobně jako výsledek v případě výstupku zde nejmenší a největší interval tvoří prakticky zanedbatelnou část všech výsledků, omezující tak rozptyl potenciálně získaných výsledků.



Obr. 7.49: RSm – prohlubeň (obrobena R500)

Z porovnání parametru RSm dosaženého nástrojem R500 uvedeného v Tab. 7.18 je možné určit, že ve většině případů to je oblast výstupku, kde bylo dosaženo vyšších hodnot. To je v porovnání ostatních parametrů u nástroje R500 unikátní výsledek. Zajímavostí je i skutečnost, že nejvyšší hodnota nebyla změřena při nejnáročnějším obrábění. Velikost u nejvyšších hodnot proměnných se liší skoro o 50 μm oproti nejvyšší zjištěné hodnotě. S přihlédnutím k zjištěnému rozptylu je oblast výstupku ta, která je méně konzistentní.

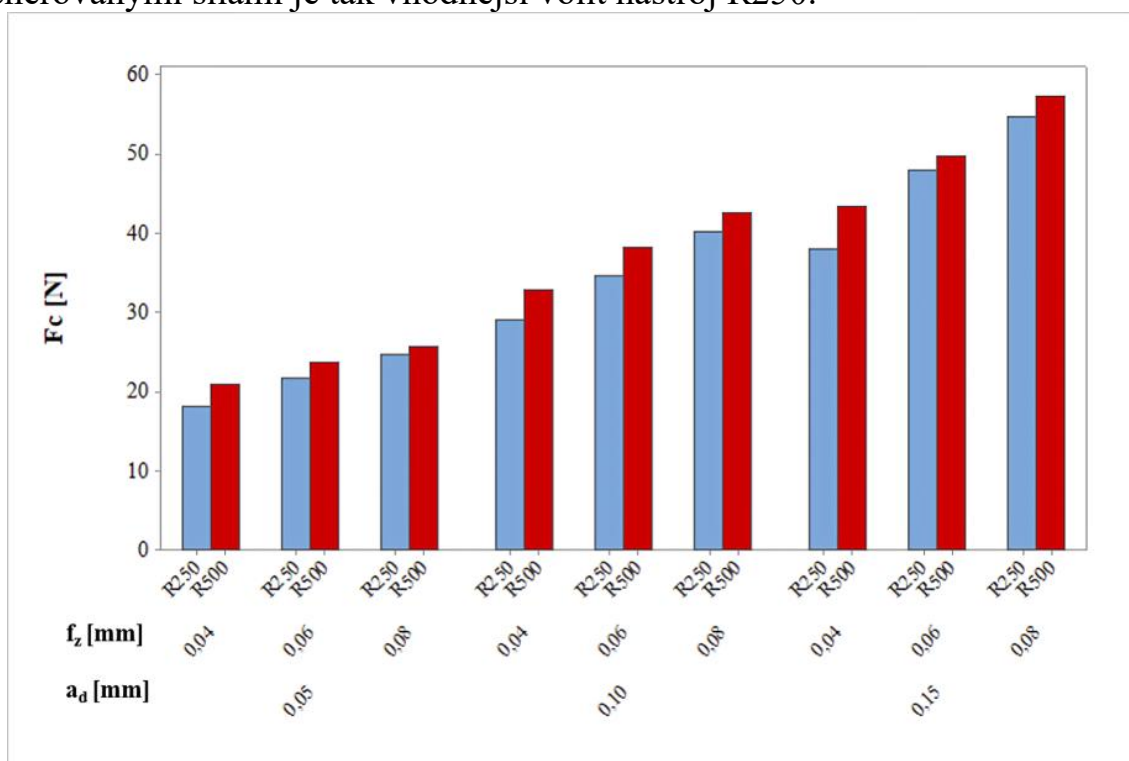
Tab. 7.18: Porovnání parametru RSm dosaženého nástrojem R500

	ad [mm]	0,05		0,1		0,15		
fz [mm]		\bar{x}	s	\bar{x}	s	\bar{x}	s	
0,04	Výstupek	181,91	17,95	176,54	20,94	211,43	26,43	[μm]
	Prohlubeň	152,33	11,44	143,79	8,86	156,83	13,88	
	Rozdíl	-16,26		-18,55		-25,82		[%]
0,06	Výstupek	225,69	21,05	249,13	46,35	224,95	31,45	[μm]
	Prohlubeň	240,56	0,97	226,39	18,3	207,76	26,04	
	Rozdíl	6,59		-9,13		-7,64		[%]
0,08	Výstupek	355,92	55,31	276,55	29,12	307,01	69,71	[μm]
	Prohlubeň	299,52	24,04	311,26	27,78	289,63	33,98	
	Rozdíl	-15,85		12,55		-5,66		[%]

7.2.3 Vyhodnocení kónických nástrojů

V případě kónických nástrojů lze jednoznačně doporučit jejich použití pro obrábění volných (spline) ploch s rušivými konturami. Efektivita obrábění je na vysoké úrovni. Plocha o výšce 25 mm byla obrobena 6 resp. 7 obráběcími drahami. Rozdíl v počtu obráběcích drah byl způsoben rozdílným obráběcím průměrem nástrojů R250 a R500. K porovnání těchto nástrojů bylo přistoupeno kvůli nemožnosti obstarání nástrojů o shodném průměru.

Vysoká efektivita obrábění je způsobena značnou kontaktní plochou nástroje a obráběné plochy. Potenciálně by toto mohlo vést k velkému silovému zatížení. Na Obr. 7.50. je zobrazeno porovnání průměrných hodnot řezných sil vygenerovaných kónickými nástroji. Z tohoto porovnání je vidět, že celkové řezné síly dosahují maximálně nižších desítek newtonů. Pro většinu aplikací tak celkové silové zatížení nebude představovat výrazný problém. Z porovnání řezných sil je patrné, že nástroj R500 jako ten, který generuje větší zatížení. K tomu u něj byl zjištěn větší rozptyl hodnot řezných sil. S ohledem na zatěžování obrobku generovanými silami je tak vhodnější volit nástroj R250.



Obr. 7.50: Porovnání řezných sil při použití nástrojů R250 a R500

V oblasti výstupku byly lepší výsledky parametru R_a dosaženy nástrojem R500. Rozptyl výsledků se pohyboval v rozmezí 0,25-0,45 μm , oproti tomu při obrábění nástrojem R250 bylo dosaženo i dvojnásobných hodnot. Úzké rozmezí výsledků ukazuje, že nástroj R500 je ten vhodnější. To potvrzují i průběhy intervalů, které byly popsány výše (Obr. 7.38. a Obr. 7.40.). Nástroj R250 má trendy těchto intervalů poměrně složité. Synergický efekt obráběcích proměnných

se zde místy projevoval více silně (v oblasti největšího přídávku na obrobení). Oproti tomu nástroj R500 má vodorovnější trendy.

V oblasti prohlubně se oba nástroje také projevíly jinak. Jejich intervaly (Obr. 7.39. Obr. 7.41.) mají výrazně jiné trendy. U nástroje R250 mají sestupnou tendenci směrem k většímu přídávku na obrobení. Narozdíl oproti oblasti výstupku u stejného nástroje. Intervaly u R500 pak rostou směrem k většímu průřezu materiálu. I tak ale nástroj R500 nedosáhl maximálních hodnot parametru Ra při nejnáročnějších podmínkách, což znamená možnost nasazení nástroje při náročných podmínkách bez výrazného negativního dopadu na povrch.

Nástrojem R500 byly dosaženy výrazně kvalitnější výsledky než nástrojem R250, u kterého byl zjištěn rozptyl výsledků v oblasti výstupku 0,27-0,93 μm , u prohlubně 0,36-1,47 μm . Napříč všemi zkoumanými proměnnými se tak oblast prohlubně výrazněji zhoršovala. Obdobně tomu bylo i u R500, 0,20-0,48 μm u výstupku a 0,22-0,57 μm u prohlubně však nejsou tak významný rozdíl. Z hlediska velikosti a rozptylu parametru Ra je tak nástroj R500 vhodnější volbou. Další nevýhodou nástroje R250 jsou pak jeho protichůdné trendy. S přihlédnutím k rozdílům mezi oblastmi to při většině podmínkách obrábění povede k výrazným rozdílům na povrchu obrobku. Použití nástroje R500 tak má další výhodu. Trendy jsou sice rozdílné, ale při využití většího přídávku na obrobení se rozdíly budou pohybovat pouze v setinách μm .

Parametr Rz se v oblasti výstupku do velké míry projevil podobnými trendy jako parametr Ra. Stejně tak byl poměr mezi nimi ve většině případů 1:4. To ukazuje, že změna řezných proměnných nevedla k nežádoucímu vzniku výrazných nerovností. Z toho plyne, že i u tohoto parametru měly intervaly u nástroje R250 růstový trend s přídávkem. Znesnadňující je tak jeho použití při náročnějších nasazeních. U druhého nástroje byly průběhy do jisté míry vodorovné, a tak vyřazující vliv přídávku na obrobení, což naopak náročné použití umožňuje.

V oblasti prohlubně se opět oba nástroje chovaly v návaznosti na parametr Ra. Ani v této oblasti tak nevznikaly nežádoucí prvky na povrchu. Klesající intervaly u nástroje R250 a rostoucí u R500 znovu potvrzují, že i typově shodné nástroje mohou vést k výrazně rozdílným výsledkům.

Parametr Rz v obou oblastech dodržel prakticky shodný poměr proti parametru Ra při odpovídajících podmínkách. To v případě nástroje znamenalo rozptyl u výstupku 1,2-3,55 μm a 1,64-5,86 μm u prohlubně pro nástroj R250. 0,87-1,79 μm a 0,98-2,31 μm u nástroje R500. I tak jsou rozptyly výsledků poměrově o něco menší než v případě parametru Ra. Z porovnání vychází jako vhodnější nástroj R500. Nejen kvůli zjištěnému rozptylu hodnot, ale i kvůli trendům.

V oblasti výstupku se u nástroje R250 parametr RSm rozložil po zkoumaných proměnných nestandardně. Většina kombinací vedla k dosažení dvou nejmenších intervalů. Výjimku představovala malá oblast u nejmenších proměnných. U nástroje R500 pak byly výsledky pravidelněji rozloženy. S tím, že hodnoty menší než 150 μm tvořily jen malou oblast u nejmenšího posuvu.

V oblasti prohlubně se u nástroje R250 zjištěné hodnoty rozložily dvěma způsoby. Při menších posuvech na zub převládá třetí interval, zatímco menší úseky se vyskytují u hraničních přídavků. Nejmenší oblast pak tvoří nepatrný trojúhelník u největšího přídavku. S rostoucím posuvem se rozložení stává pravidelnější a vykazuje klesající tendenci. Nástroj R500 vykazuje obdobné průběhy téměř v celém sledovaném rozsahu proměnných, avšak s rostoucí tendencí.

Nástrojem R250 byl získán rozptyl parmatru RSm 182-320 μm na výstupku a 146-317 μm na prohlubni. U R500 to bylo 177-356 μm a 144-311 μm . Nástroj R250 má výhodu v tom, že podstatná část proměnných vede k 2-3 nejmenším intervalům. Pokud nebude překročen střední posuv na zub, tak se výsledky nebudou výrazně lišit. Problematická je ovšem oblast výstupku, kde jsou zbylé intervaly hustě rozloženy při vyšších posuvech. To by představovalo zvyšování rozdílů mezi oblastmi, v závislosti na použití, či dalších operacích by to mohlo představovat komplikace. Intervaly RSm u nástroje R500 mají velice podobný procentuální nárůst napříč proměnnými. Při podobném průběhu intervalů, hlavně tedy v krajních oblastech přídavku, to znamená, že je při rozhodování o vhodných podmínkách najít takové, při kterých se bude oblast výstupku i prohlubně do jisté míry prolínat. Např. nejvyšší posuv a největší přídavek povede k intervalům 220-260 μm a 190-230 μm . S výhodou je tak možno využít většího přídavku pro co největší sjednocení RSm.

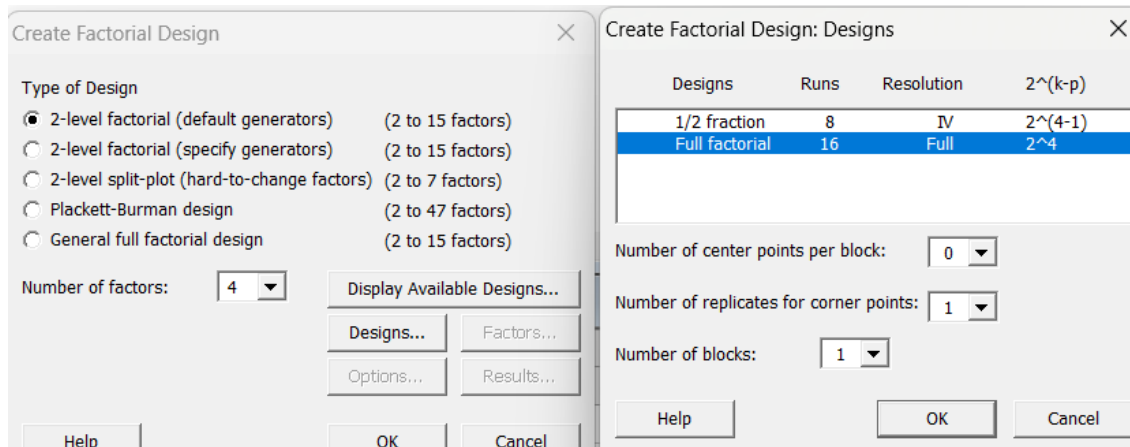
7.3 Porovnání s kulovou frézou

Jelikož jsou soudečkové frézy přímými konkurenty kulových fréz bylo rozhodnuto o provedení srovnávací studie s použitím kulové frézy o průměru 10 mm s označením JHB970100D2B.0Z2 SIRA od firmy SECO. Obráběna byla plocha A.

Za účelem nalezení statistické významnosti jednotlivých faktorů, které způsobují drsnost povrchu obrobené plochy (splinové plochy), byla použita metodika DOE, tedy design of experiment (plánování experimentu). Jako základní faktorový plán byl využit návrh 2^k, kde k byl zvolený počet faktorů, o jejichž statistické významnosti se mělo rozhodnout. Byl vytvořen faktorový plán (tabulka DOE), kde typ návrhu byl zvolen jako dvojúrovňový (-1, +1), -1 označuje minimální úroveň vyšetřovaného faktoru a +1 naopak označuje maximální úroveň faktoru, jenž je vyšetřován. Vyšetřované parametry jsou uvedeny v Tab. 7.19, samotný návrh experimentu je pak znázorněn na Obr. 7.51.

Tab. 7.19: Vyšetřované parametry

Zn.	Parametr	Jednotka
n [min ⁻¹]	otáčky vřetena	[min ⁻¹]
f _z [mm]	posuv na zub	[mm]
a _d [mm]	přídavek na obrobení	[mm]
m [-]	počet drah nástroje	[-]



Obr. 7.51: Navržení experimentů v softwaru Minitab

Při tvorbě faktorového plánu, který je uveden v Tab. 7.20, bylo využito randomizace úrovní jednotlivých faktorů. Plán se poskládal náhodně a tím byl odstraněn možný systematický vliv jednotlivých faktorů. Jako výstupní faktor, který je potom optimalizován na minimální hodnotu, resp. na hodnotu predikovanou, byl zvolen aritmetický průměr parametru Ra.

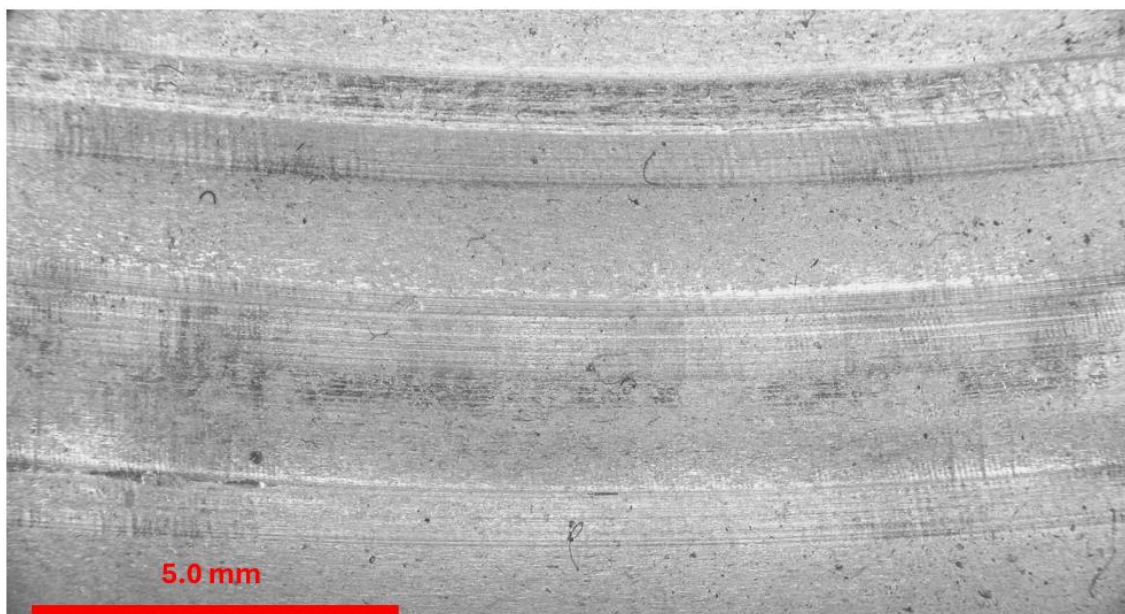
Tab. 7.20: Faktorový plán

Číslo měření	n [min ⁻¹]	f _z [mm]	a _d [mm]	m [-]
1	3185	0,04	0,05	28
2	1274	0,04	0,15	8
3	1274	0,08	0,05	8
4	3185	0,08	0,15	28
5	3185	0,04	0,05	8
6	1274	0,08	0,15	28
7	1274	0,04	0,05	8
8	3185	0,08	0,05	8
9	3185	0,04	0,15	8
10	3185	0,08	0,15	8
11	1274	0,08	0,05	28
12	1274	0,08	0,15	8
13	3185	0,08	0,05	28
14	1274	0,04	0,15	28
15	1274	0,04	0,05	28
16	3185	0,04	0,15	28

Parametry uvedené v Tab. 7.20 byly voleny na základě doporučených hodnot od výrobce nástroje, resp. jejich doporučeného rozptylu při bočním frézování pro obrábění ocelí. To se ovšem netýkalo parametru m (počet drah nástroje). Jeho minimální hodnota byla volena na základě potřebného počtu drah pro obrobení plochy soudečkovými nástroji, aby bylo možné porovnat jakých drsností bude dosaženo za stejné náročnosti obrábění, co do kontaktu nástroje a obrobku v porovnání se soudečkovými nástroji. Maximální hodnota parametru m byla zvolena jako čtyřnásobek této hodnoty, neboť z hlediska náročnosti výroby (opotřebení) by se jednalo o stejné znásobení a v takovém případě již nejsou kulové nástroje oproti soudečkovým nástrojům rentabilní kvůli obdobnému rozdílu v cenách nástrojů obou geometrií.

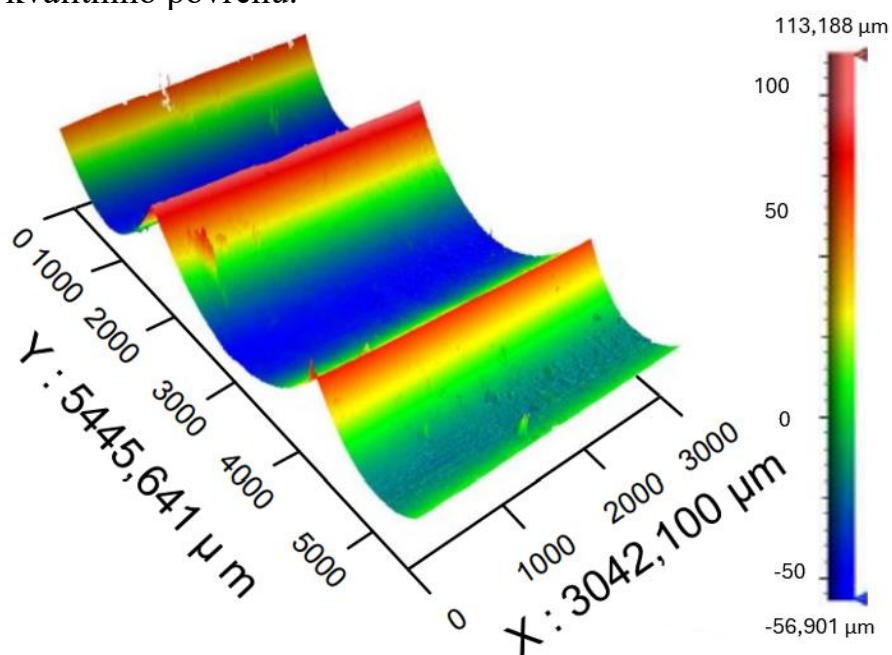
Srovnávací obrábění probíhalo obdobně jako u nástrojů soudečkových. Obrobek byl nejprve vyhrubován za stejných podmínek jako v případě předešlých operacích, dohrubování opět probíhalo kulovým nástrojem o průměru 12 mm, rovněž stejně jako u předchozích experimentů. Rozdíl nastal až s použitím kulové frézy o průměru 10 mm, která byla použita pro dokončování.

Na Obr. 7.52 a Obr. 7.54 je možné vidět zvětšené plochy získané při měření označené 5 a 1. V prvním případě bylo využito pouze 8 obráběcích drah ve druhém 32. Ostatní rezné podmínky se shodovaly, nejmenší použitý přídavek na obrábění, nejnižší posuv na zub a největší hodnota otáček vřetena. Čili nastavení, které by dle obecných doporučení mělo vést k nejnižší dosažené drsnosti povrchu.

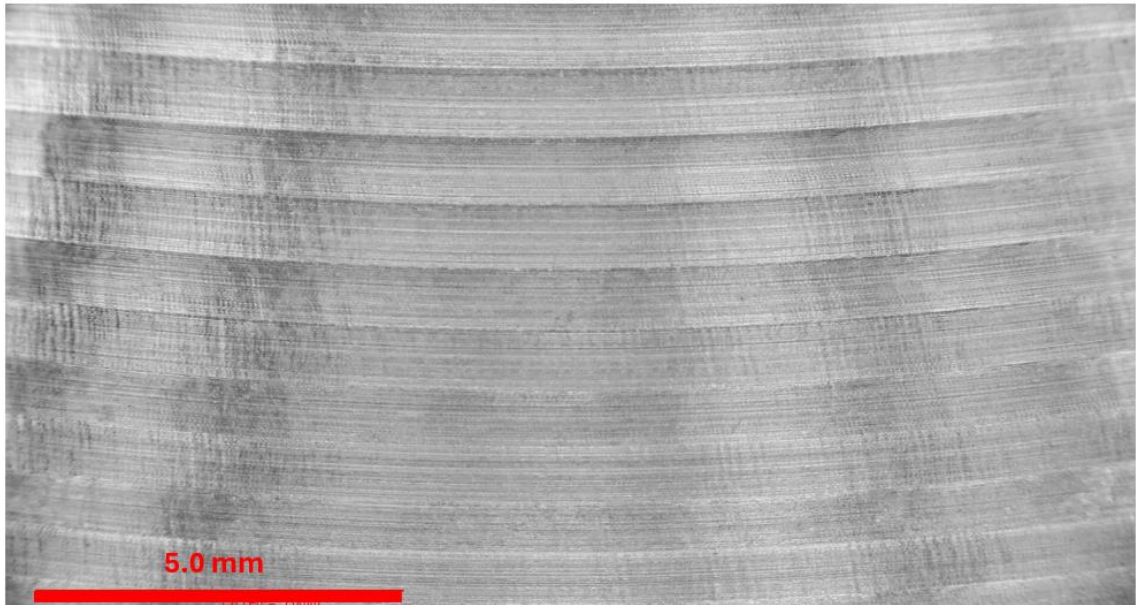


Obr. 7.52: Plocha získaná při 5. měření

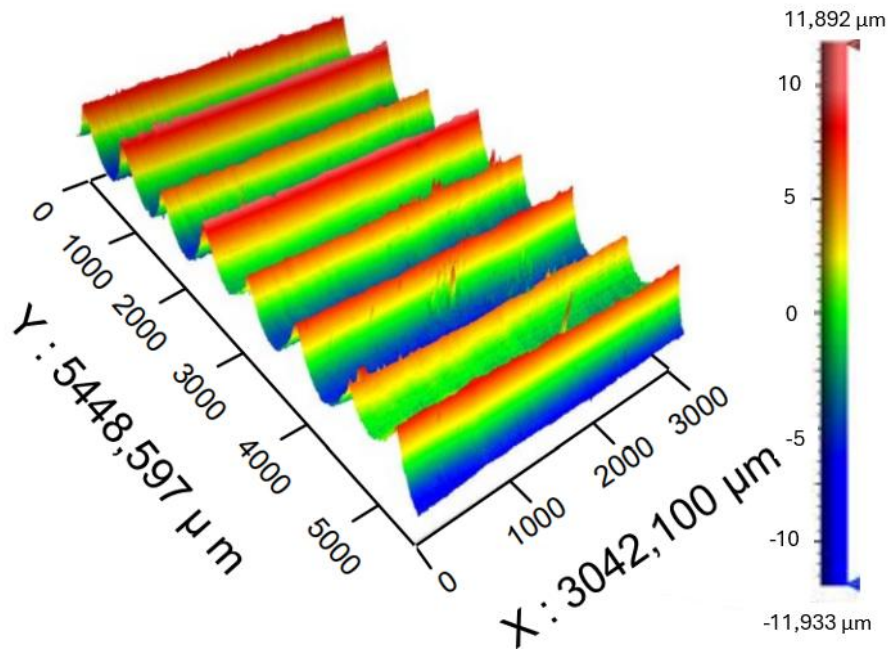
Na Obr. 7.53 a Obr. 7.55 jsou zobrazeny skeny vyhodnocovaných oblastí odpovídajících ploch získaných při vyhodnocování na optickém drsnoměru. Ty ukazují rozdílný charakter ploch. Nízký počet drah je výrazně nedostatečný k dosažení kvalitního povrchu.



Obr. 7.53: Vyhodnocovaná oblast plochy získané při 5. měření



Obr. 7.54: Plocha získaná při 1. měření



Obr. 7.55: Vyhodnocovaná oblast získaná při 1. měření

Z přiložených snímků a skenů ploch je možné odvodit hlavní nedostatek kulových fréz, a to je malá kontaktní plocha s obráběnou plochou. I při 32 obráběcích drahách vykazuje obrobena plocha vysoké drsnosti, jak vyplývá z Tab. 7.21, kde jsou uvedeny výsledky parametru Ra získaných na testovacích plochách.

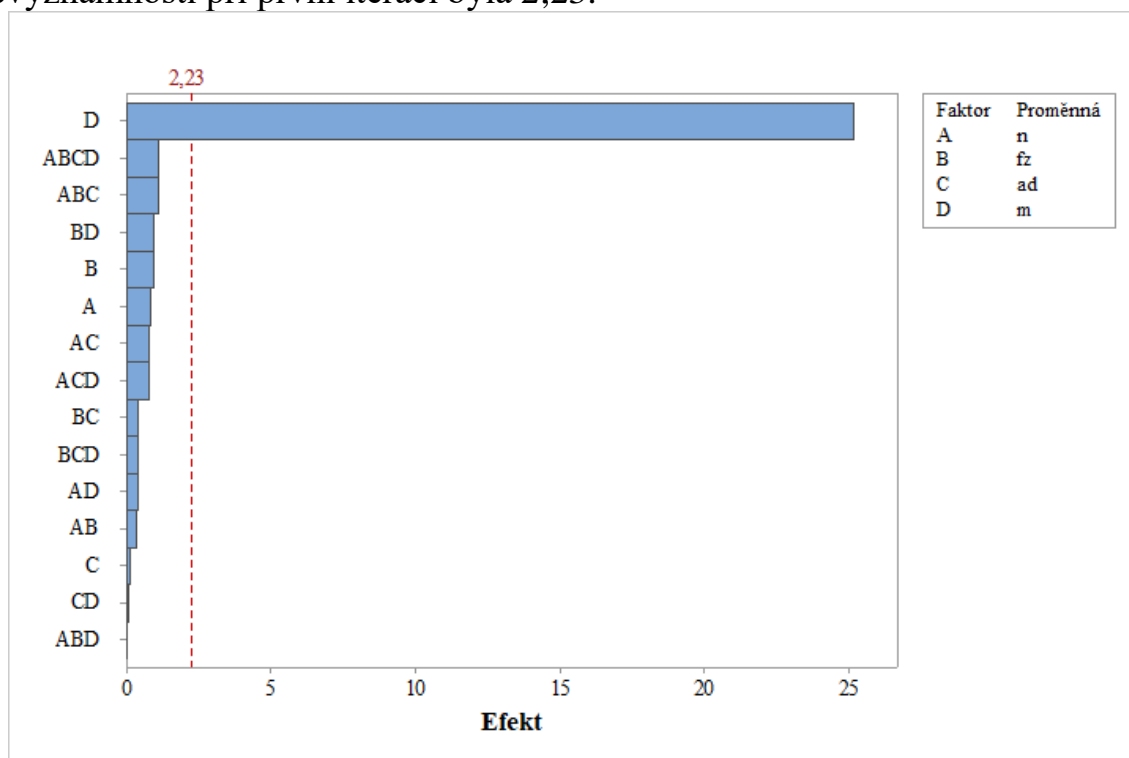
Tab. 7.21: Výsledky DOE

měření	Ra [μm]	měření	Ra [μm]
1	3,199	9	27,421
2	32,579	10	27,237
3	28,944	11	3,637
4	3,374	12	27,470
5	30,330	13	3,601
6	3,519	14	3,829
7	28,128	15	3,983
8	27,440	16	3,048

Konfidenční úroveň pro výpočet statistické významnosti jednotlivých faktorů byla volena 0,95 což znamená, že chyba 1. druhu (α) byla volena, tak jak je obvyklé, tj. 5 %.

Po proběhnutí první iterace (přiblížení) zobrazené na Obr. 7.56. bylo naprosto zřejmé, že nejvýznamnější faktor je faktor *m* a patrně faktor *n*. Z daného Paretova grafu jednoznačně vyplývá, že faktor *m* (počet drah) mnohonásobně přesahuje ostatní faktory.

Kritická hodnota, která určuje statistickou významnost od statistické nevýznamnosti při první iteraci byla 2,23.

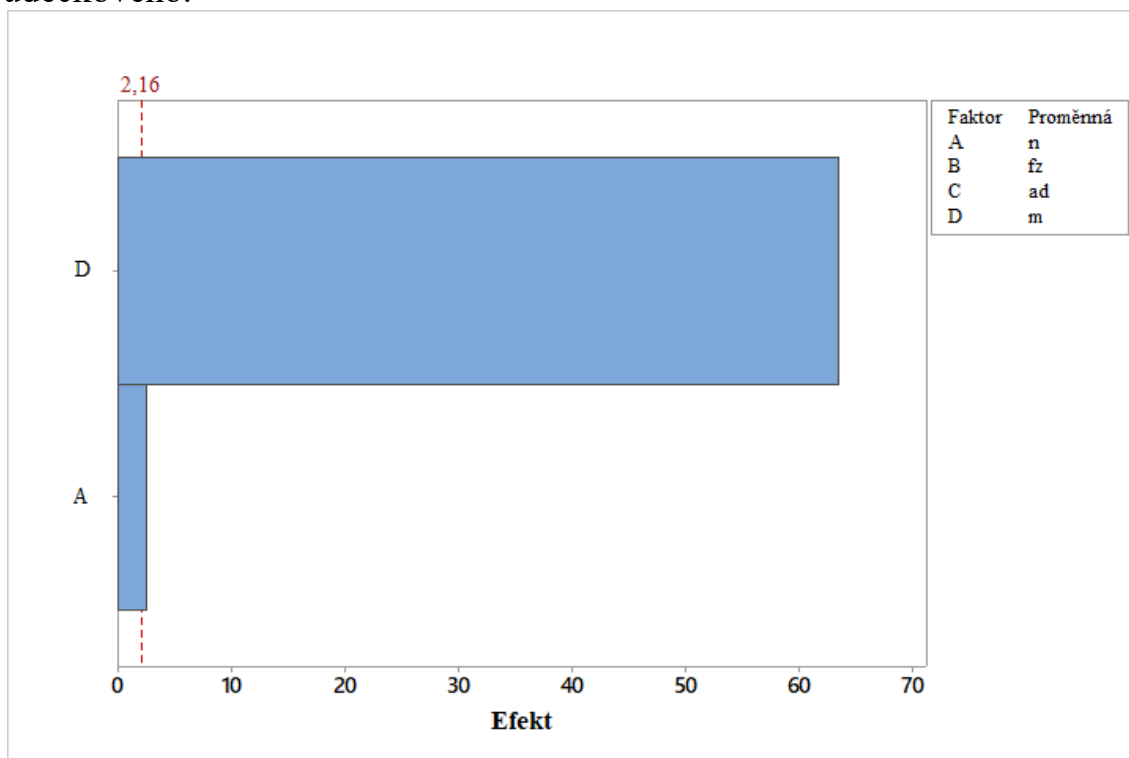


Obr. 7.56: 1. iterace DOE

Postupným odstraňováním statisticky nevýznamných faktorů a jejich kombinací došlo ke snižování kritické hodnoty a tím k postupnému nalezení statisticky významných faktorů.

Finální hodnota kritické hodnoty byla po odstranění šumu (statisticky nevýznamných faktorů a jejich kombinací) 2,16, čemuž odpovídaly dva statisticky významné faktory, a to faktor m a faktor n . Tedy, že z provedeného experimentu vyšly jako statisticky významné proměnné počet drah nástroje a otáčky vřetena.

Přičemž počet drah, jak vyplývá z Obr. 7.57, byl nejdůležitější. To je způsobeno nastavením samotného experimentu kdy minimální počet drah nástroje byl volen podle počtu potřebných drah pro obrobení plochy soudečkovými nástroji. Proto byl minimální počet drah nástroje kulové frézy volen podle nástroje soudečkového.



Obr. 7.57: Finální iterace DOE

Výsledkem je nalezený model (Obr. 7.58.), který má regresní charakter, pro něhož platí R -sq či R -sq (adj) lepší než 99 %, tomu odpovídají i příslušné hodnoty regresních koeficientů (Obr. 7.59.), u nichž jsou p hodnoty nižší než 0,05 což znamená, že jsou statisticky významné.

Model Summary for Transformed Response

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0,0660990	99,68%	99,63%	99,51%

Obr. 7.58: Regresní model

Term	Effect	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value
Constant		2,3055	0,0165	139,52	0,000
n	-0,0823	-0,0411	0,0165	-2,49	0,027
m	-2,0988	-1,0494	0,0165	-63,50	0,000

Obr. 7.59: Regresní koeficienty

Výsledkem tedy je regresní rovnice (Obr. 7.60.) se statisticky významnými parametry, což je m a n , jakožto funkce odezvy parametru R_a , resp. jeho logaritmu.

$$\ln(R_a) = 4,2904 - 0,000043 n - 0,10494 m$$

Obr. 7.60: Regresní rovnice

Při hledání optima, které bylo stanoveno jako minimální hodnota odezvy R_a , byly stanoveny optimalizované parametry $n=3185$ a $m=28$, tomu bude odpovídat optimalizovaný parametr R_a o velikosti 3,37.

Z toho plyne, že ani při počtu 32 drah kulového nástroje, což je čtyřnásobek oproti soudečkovému nástroji, není dosaženo ani vzdáleně kvality povrchu obrobeného soudečkovým nástrojem. Důležité je i zmínit časovou náročnost tohoto porovnání. V Tab. 7.22 jsou uvedeny potřebné časy pro obrobení v závislosti na použitých podmínkách, které mají na obráběcí dobu vliv. Z ní je patrné, že kdyby nastala varianta, že by byl získán povrch blízký se kvalitou soudečkovým nástrojům, použití kulové frézy je stále výrazně horší varianta kvůli požadovanému času na výrobu.

Tab. 7.22: Časová náročnost obrábění kulovou frézou

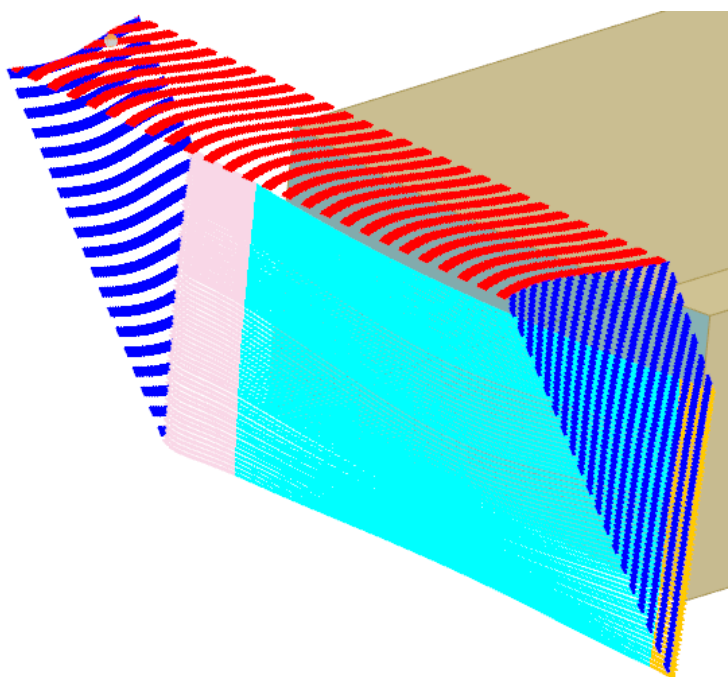
n [min^{-1}]	f_z [mm]	m [-]	čas [s]
1274	0,04	8	319
1274	0,04	28	979
1274	0,08	8	160
1274	0,08	28	490
3185	0,08	8	64
3185	0,08	28	196
3185	0,04	8	128
3185	0,04	28	392

Při podmínkách, které by byly ekonomicky vhodné tak nebylo možné dosáhnout srovnatelně kvalitního povrchu proti soudečkovým nástrojům. Stále je však možnost, že při vyšší časové dotaci by to možné bylo. Vznikla tak snaha o dosažení co nejkvalitnějšího povrchu pomocí kulové frézy. V podstatě pokus dosáhnout stejně kvalitního povrchu, pokud by časový rámec nebyl problém.

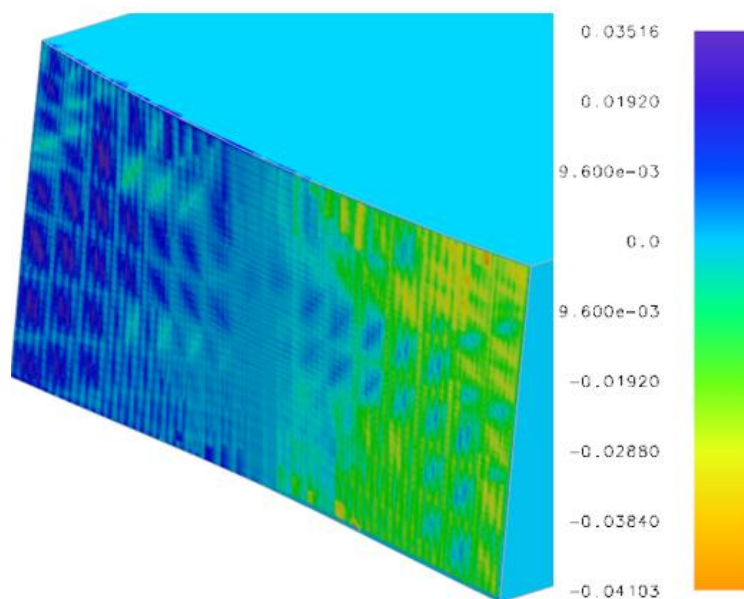
Byla navržena obráběcí strategie s využitím kulového nástroje, která nebrala v potaz čas obrábění. V programu NX, v nastavení operace byla určena maximální výška zbytkového materiálu na hodnotu 0,005 mm. Zároveň byla nastavena strategie pouze sousledného frézování, neboť to podle obecných

doporučení vede k lepší kvalitě povrchu. Použity byly nejvyšší přípustné otáčky a nejnižší doporučený posuv na zub. Výsledkem byla obráběcí strategie, která vyžadovala pro obrobení celé plochy 66 drah, což je více než 8násobek oproti potřebnému počtu drah u soudečkového nástroje. Její průběh je možné vidět na Obr. 7.61.

Takto navržená operace si vyžádala celkový čas obrábění 22 minut a 56 sekund. Už tento výsledek je vypovídající o tom, že v průmyslu by podobné nastavení způsobilo značné komplikace, protože se stále jedná o plochu 55 x 25 mm a takto výrazný časový úsek pro její dokončení by zbytečně prodražoval výrobu. Pozitivem byla ovšem provedená analýza zbytkového materiálu po obrobení, kterou je možné vidět na Obr. 7.62, kdy provedenou operací bylo dosaženo geometricky velmi přesného povrchu, který se vykazuje minimálními zbytky materiálu.

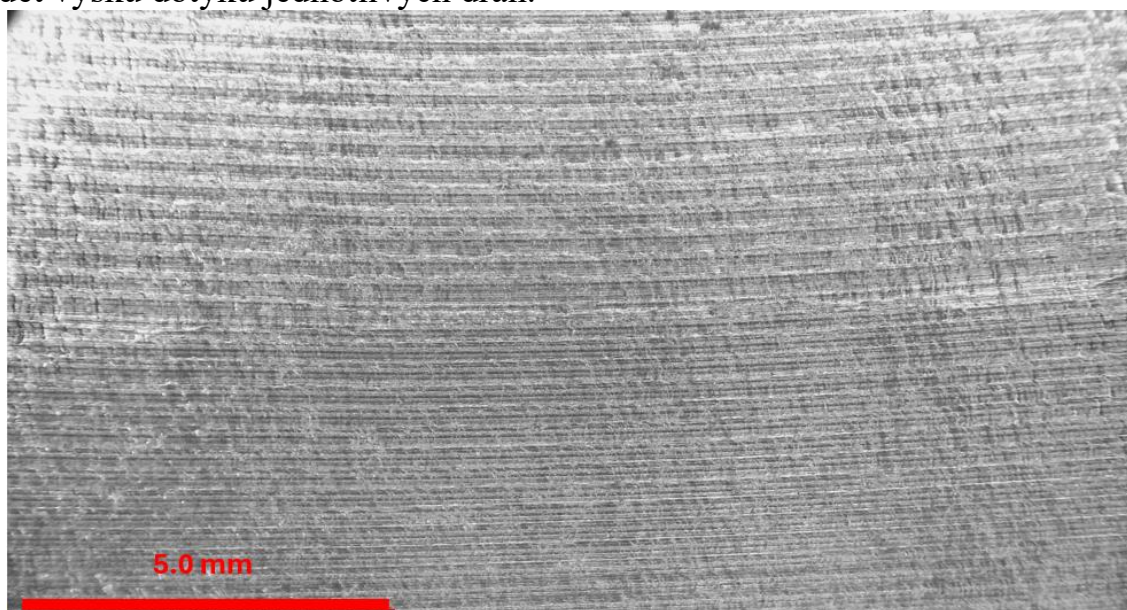


Obr. 7.61: Pokusná strategie obrábění plochy A



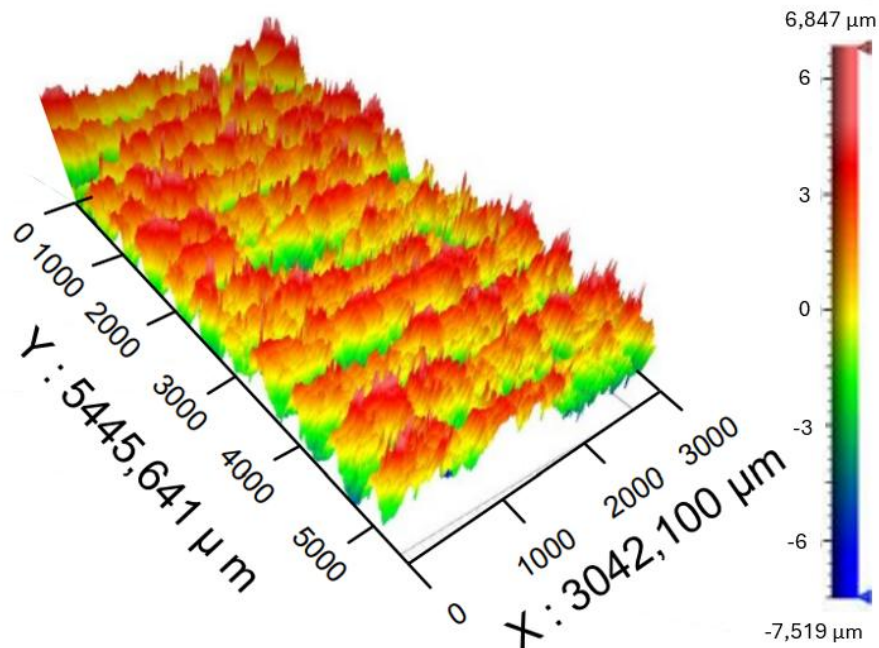
Obr. 7.62: Analýza pokusné strategie u plochy A

Na Obr. 7.63 a Obr. 7.64 je zobrazen zvětšený snímek pokusné plochy a její sken z měření drsnosti. Na snímku z mikroskopu jsou patrné husté dráhy nástroje. I když se kulový nástroj dotýká obráběné plochy teoreticky pouze bodově, z důvodu nastavení obráběcího programu, kdy software volí dráhu tak, aby rozdíl od nominálního rozměru byl do kladných i záporných hodnot, stejný. Je možné vidět výšku dotyků jednotlivých drah.



Obr. 7.63: Plocha A obrobena pokusnou strategií

Ze získaného skenu na optickém profilometru plyne, že při takto významné hustotě obráběcích drah byl získán povrch, který nevykazuje významné stopy po nástroji a jeho rozměrové přesnost tak bude na vysoké úrovni. Patrná je i heterogenita povrchu.



Obr. 7.64: Vyhodnocovaná oblast plochy A obrobená pokusnou strategií

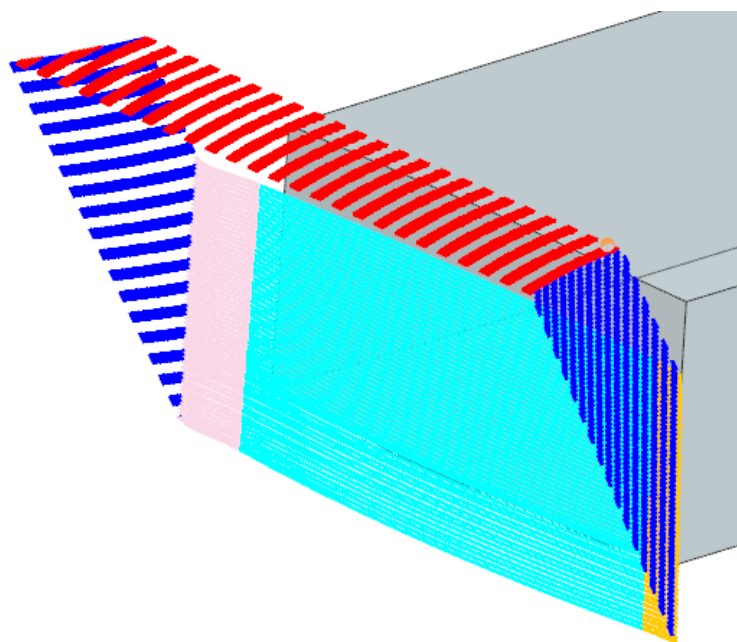
Výsledná drsnost, která je uvedena v Tab. 7.23, ukazuje, že ani při takto extrémně navržených podmínkách nebylo možné zajistit kvalitu povrchu podobnou se soudečkovými nástroji.

Tab. 7.23: Výsledná drsnost pokusné plochy

	\bar{x}	s
Ra [μm]	1,583	0,159
Rz [μm]	7,844	0,712
Rsm [μm]	268,42	67,88

Jelikož u plochy A nebylo v rámci optimalizačního obrábění pro dosažení optimálního parametru Ra dosaženo srovnatelných výsledků se soudečkovými nástroji, nebyl předpoklad, že by toho bylo v rámci rentabilních podmínek dosaženo u plochy B.

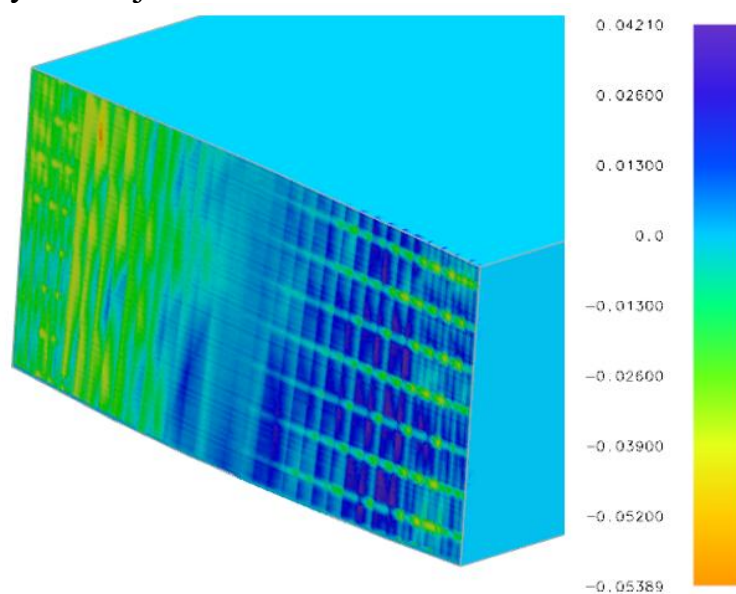
Bylo tak v případě srovnávacího obrábění s kulovou frézou přistoupeno hned k pokusné strategii obrábění. Její průběh je vidět na Obr. 7.65. Dokončení s kulovou frézou v případě plochy B vyžadovalo při shodném nastavení jako u plochy A 58 obráběcích drah. Časová náročnost byla 19 minut a 54 sekund.



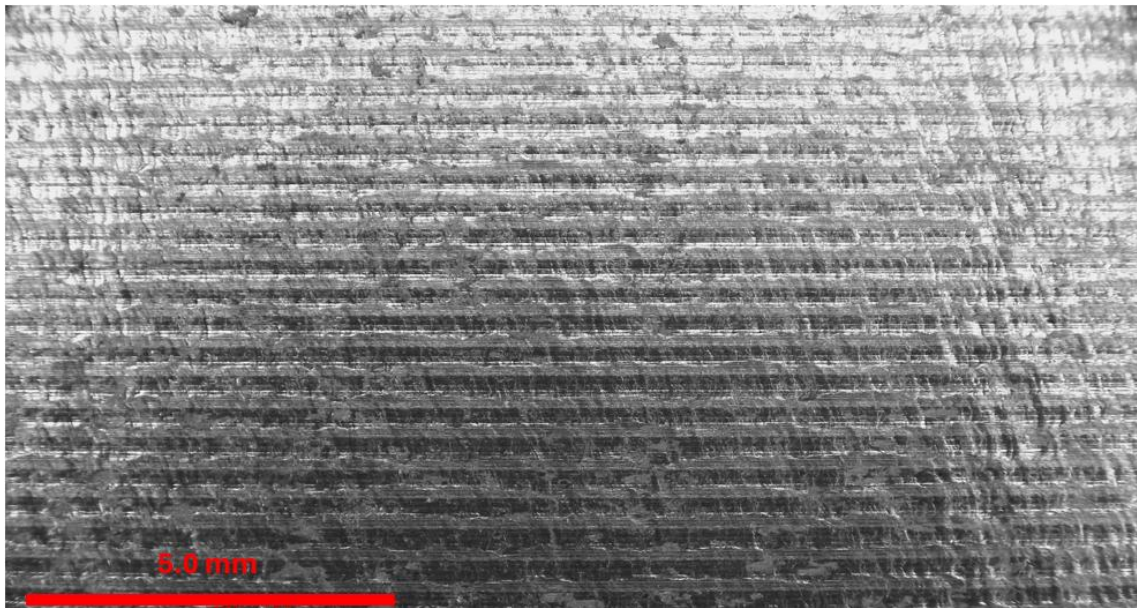
Obr. 7.65: Pokusná strategie obrábění plochy B

Na Obr. 7.66. je zobrazena provedená analýza zbytkového materiálu po obrábění. Jako u plochy A se tato strategie ukázala z hlediska zbytku materiálu jako velmi přesná. Stejně jako v předchozích případech by ovšem její nasazení představovalo obrovské časové náklady, a proto pravděpodobně používána nebude.

Na Obr. 7.67. je pak vidět, zvětšená pokusná plocha B. Oproti ploše A jsou patrnější širší stopy po nástroji. I když plocha A i B byly shodného průřezu (25x50 mm). Počet těchto drah byl odvozen z nastavené dovolené výšky zbytkového materiálu (0,05 mm). Jak bylo zmíněno v případě plochy B bylo vygenerováno 58 drah, v případě plochy A to bylo 66. Tento rozdíl ukazuje, že právě plocha A byla geometricky složitější.

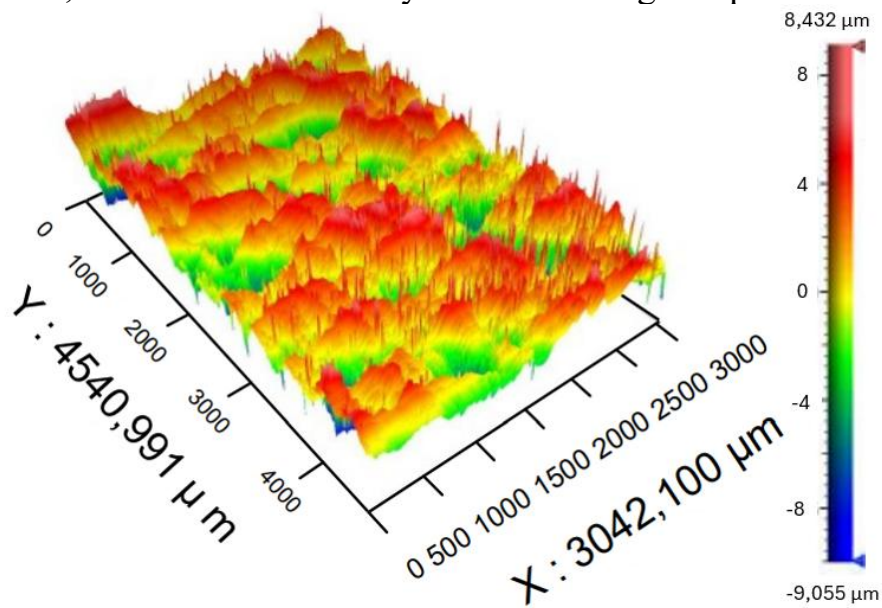


Obr. 7.66: Analýza pokusné strategie u plochy B



Obr. 7.67: Zvětšená plocha B obrobena pokusnou strategií

Po zhodnocení plochy na mikroskopu bylo přistoupeno k vyhodnocení na optickém profilometru. Z Obr. 7.68., kde je zobrazen sken vyhodnocované oblasti, je vidět, že tímto obráběním byl získán heterogenní povrch.



Obr. 7.68: Vyhodnocovaná oblast plochy B obrobena pokusnou strategií

Parametry drsnosti, které byly získány jsou uvedeny v Tab. 7.24. I v případě plochy B nebylo při obrábění kulovou frézou dosaženo tak kvalitní plochy jako v porovnání s obráběním soudečkovými nástroji.

Tab. 7.24: Výsledná drsnost pokusného obrábění plochy B

	\bar{x}	s
Ra [μm]	1,769	0,263
Rz [μm]	8,39	1,249
Rsm [μm]	265,99	49,30

7.3.1 Vyhodnocení porovnávací studie

Z provedených experimentů vychází jako závěr skutečnost, že kulové frézy nejsou schopny dosáhnout stejné kvality jako nástroje soudečkové. Ani v případě, kdy byly nasazeny obráběcí podmínky, které by vyžadovaly velkou časovou náročnost. Kulové frézy jsou sice výrazně levnější v porovnání se soudečkovými nástroji, ale kvůli jejich geometrii však obrábí teoreticky pouze bodovým dotykem. Silové zatížení je tak koncentrováno na malou část rezného nástroje a může docházet k rychlejšímu opotřebení. Opotřebení bude výraznější i na jeden vyrobený kus, protože kulový nástroj bude vyžadovat více obráběcích drah. Stejně tak bude vyšší i časová náročnost.

Jejich výhodou je ovšem získání homogenního povrchu. To může představovat výhodu např. při úpravách obrobených povrchů jako je nanášení povlaků.

7.4 Analýza vlivu řezné rychlosti

Hodnota řezné rychlosti, kterou bývá prováděno obrábění, bývá zpravidla stanovena výrobcem nástroje. Ten ji stanovuje na základě optimálních podmínek pro daný materiál (většinou jeho pevnost), specifikaci nástroje a případně druh obrábění. Tato hodnota však do jisté míry představuje pouze doporučení, které může a v praxi často bývá přizpůsobeno konkrétním podmínkám obráběcího procesu. Variování hodnot řezné rychlosti může mít významný vliv na efektivitu, kvalitu obráběného povrchu a životnost nástrojů. V praxi se tedy může ukázat, že i drobné úpravy řezné rychlosti mohou přinést zlepšení výkonu, optimalizaci výrobního procesu a snížení nákladů.

Z těchto důvodů budou v následující části práce představeny výsledky obrábění, u kterého bylo využito rozdílných řezných rychlostí. Konkrétně byly využity hodnoty o 15 % větší a menší oproti doporučené hodnotě od výrobce. Hodnota byla zvolena jako střední hodnota mezi doporučenými hodnotami od výrobce. Vyšší procentuální změna řezné rychlosti by již odpovídala doporučeným hodnotám pro obrábění materiálů s jinými vlastnostmi.

Experimenty byly provedeny s kónickým nástrojem R500, který byl zvolen, protože obrábění tímto nástrojem vedlo k nejkvalitnějším povrchům a vliv změny řezné rychlosti by tak měl být lépe zachytitelný. Obráběna byla plocha A.

V předchozí části práce byly zkoumány 3 hodnoty posuvu na zub a 3 hodnoty přídatku na obrobení při konstantní řezné rychlosti. Tyto podmínky byly stanoveny na základě doporučení výrobců nástrojů. Vznikly tak matice výsledků 3 x 3, které, převedeny do grafické formy, mohou složit jako optimalizační pro dosažení požadovaných výsledků.

Jelikož trendy dosažených výsledků již byly pospány a změna řezné rychlosti by poměrově měla vést k podobným průběhům, bylo rozhodnuto o optimalizaci měření. Z této pomyslné matice tak byly se změněnou hodnotou řezné rychlosti provedena jen rohová měření a jedno měření, které představuje střední hodnoty zkoumaných proměnných. To bude poskytovat dostatečnou vypovídající hodnotu vlivu řezné rychlosti na vyhodnocované parametry.

7.4.1 Silové zatížení

Nejprve budou prezentovány hodnoty naměřených řezných sil. Ty jsou uvedeny v Tab. 7.25 spolu s řeznými silami získanými se standardní hodnotou řezné rychlosti. V tabulce jsou rovněž uvedeny procentuální rozdíly mezi hodnotami naměřenými při řezných rychlostech 170 a 230 m/min. v porovnání s doporučenou hodnotou od výrobce.

Z porovnání výsledků je patrné, že jak snížení, tak zvýšení řezné rychlosti vede k nárůstu celkové řezné síly generované během obrábění. Všechny naměřené rozdíly se pohybují v rozmezí 15–25 %. Při zvýšení řezných rychlostí typicky dochází k poklesu řezných sil. To je primárně zapříčiněno zkracující se kontaktní dobou mezi nástrojem a obrokem, což vede ke snížení tření. Tento obvyklý trend má však limit, protože řezná rychlost stále musí umožnit správné formování třísky. V tomto případě se tak jeví, že limit byl překročen. Snižování řezné rychlosti potenciálně také vede ke zvyšování řezných sil. Obvyklou příčinou bývá delší deformace třísky, což vede ke zvýšení tření. Případně může příliš nízká hodnota řezné rychlosti vést k tvorbě nárůstku, který by zapříčinil růst řezných sil. To však v tomto případě patrně nenastalo, neboť celkový čas obrábění nebyl dostatečný.

Tab. 7.25: Vyhodnocení řezných sil při variující řezné rychlosti

a_d [mm]		0,05		0,1		0,15		
f_z [mm]	v_c [m/min]	\bar{x}	s	\bar{x}	s	\bar{x}	s	
0,04	170	25,456	1,456	-	-	53,206	6,518	[N]
	Rozdíl	21,27				22,4		[%]
	200	20,991	2,239	32,957	2,858	43,469	5,644	[N]
	Rozdíl	24,97				22,96		[%]
0,06	230	26,233	1,315	-	-	53,45	6,46	[N]
	170	-	-	48,441	4,635	-	-	[N]
	Rozdíl			26,46				[%]
	200	23,689	1,079	38,304	3,349	49,826	5,893	[N]
0,08	Rozdíl			25,31				[%]
	230	-	-	48	4,92	-	-	[N]
	170	32,776	1,741	-	-	67,808	7,916	[N]
	Rozdíl	27,24				18,01		[%]
0,08	200	25,759	1,631	42,609	5,026	57,458	6,028	[N]
	Rozdíl	24,91				15,88		[%]
	230	32,176	1,508	-	-	66,582	7,01	[N]

Zajímavým úkazem je pokles procentuálního rozdílu, ke kterému došlo v případě největšího posuvu a přídávku, kdy rozdíl mezi řeznými rychlostmi dosáhl 18 % resp. 16 %. Vliv posuvu a přídávku tedy ve vyšších hodnotách roste oproti řezné rychlosti.

V případě řezných sil se tak potvrdil významný vliv řezné rychlosti. To, že její změna vede k růstu silového zatížení v tomto případě potvrdily vhodnost dodržení doporučení výrobce.

Proti argumentem ovšem je, že ač zjištěné rozdíly dosahují i 25 %, v absolutních hodnotách se jedná o jednotky newtonů. V předchozí části již bylo ukázáno, že soudečkové nástroje při obrábění nezatěžují výrobek velkým silovým zatížením. Proto by jeho případné zvýšení nemuselo vést k negativním dopadům z hlediska případného poškození výrobku. Pokud by tak řezné síly nepředstavovaly problém je nutné vědět jaký vliv na povrch bude představovat změna řezné rychlosti to bude prozkoumáno v následující části.

7.4.2 Vliv na drsnost

Drsnost bude vyhodnocována stejně jako v případě řezných sil, tedy v porovnání s hodnotami získanými při obrábění doporučené hodnoty posuvu. V Tab. 7.26 je uvedeno porovnání parametru Ra v oblasti výstupku. V tabulce jsou opět uvedeny procentuální rozdíly, které ukazují o kolik se liší hodnota zjištěná při rychlosti 200 m/min od dvou dalších řezných rychlostí.

Tab. 7.26: Vyhodnocení parametru Ra (výstupek) při variující řezné rychlosti

		0,05		0,1		0,15		
f_z [mm]	a_d [mm]	\bar{x}	s	\bar{x}	s	\bar{x}	s	
0,04	170	0,163	0,05	-	-	0,228	0,068	[N]
	Rozdíl	-20,1				-11,63		[%]
	200	0,204	0,02	0,221	0,034	0,258	0,01	[N]
	Rozdíl	-11,27				-2,33		[%]
0,06	230	0,181	0,031	-	-	0,252	0,053	[N]
	170	-	-	0,307	0,111	-	-	[N]
	Rozdíl			0,66				[%]
	200	0,288	0,037	0,305	0,036	0,264	0,043	[N]
0,08	Rozdíl			10,82				[%]
	230	-	-	0,338	0,09	-	-	[N]
	170	0,367	0,091	-	-	0,469	0,163	[N]
	Rozdíl	-22,74				-4,26		[%]
0,08	200	0,475	0,036	0,412	0,069	0,449	0,061	[N]
	Rozdíl	-38,32				-14,48		[%]
	230	0,293	0,037	-	-	0,384	0,087	[N]

Z tabulky je patrné, že u parametru Ra v oblasti výstupku nastal opačný trend než u řezných sil. Jak vyšší, tak nižší hodnota řezné rychlosti vedla ke zlepšení kvality povrchu. V některých případech dost výrazně, například u největšího posuvu a nejmenšího přídávku na obrobení. Jediné podmínky, kde úpravou řezné rychlosti nedošlo ke zlepšení parametru Ra, byly střední hodnoty obou proměnných. Změna řezné rychlosti měla negativní dopad na spolehlivost řezného procesu. Ve všech případech totiž vedla k nárůstu směrodatné odchylky.

U nižší řezné rychlosti představují odchylky i více než 30 % průměru. Obdobně tomu je i v případě vyšší rychlosti. Výjimkou jsou výsledky s nejmenším přídatkem na obrobení. Takto výrazný rozptyl představuje potenciální problém pro predikci výsledků.

V případě oblasti prohlubně se vliv změny řezné rychlosti neprojevil tak výrazně jako v případě výstupku. Ke zlepšení parametru Ra došlo jen v polovině případů. A v těchto případech se jednalo maximálně o desetiprocentní zlepšení. V případě největších hodnot obráběcích parametrů vedla vyšší řezná rychlost jen k nepatrnému zlepšení, které by pravděpodobně nevyvážilo negativní dopady (opotřebení nástroje, větší řezné síly). Navíc je zjištěný rozdíl pokryt výraznou směrodatnou odchylkou. U nižší řezné rychlosti pak došlo k výraznému poklesu kvality povrchu skoro o 20 %, kde však stejně jako v případě zvýšení řezné rychlosti, je velkou směrodatnou odchylkou rozdíl prakticky pokryt. Z vypočítaných směrodatných odchylek vzešla ještě jedna skutečnost. U dvou nejnižších posuvů se změna řezné rychlosti projevila větší konzistencí výsledků. U nejvyššího posuvu se pak trend obrátil a změna řezné rychlosti vedla k více kolísavému procesu, který se projevili vyššími odchylkami.

Tab. 7.27: Vyhodnocení parametru Ra (prohlubeň) při variující řezné rychlosti

a_a [mm]		0,05		0,1		0,15		
f_z [mm]	v_c [m/min]	\bar{x}	s	\bar{x}	s	\bar{x}	s	
0,04	170	0,247	0,017	-	-	0,211	0,026	[N]
	Rozdíl	7,39				11,37		[%]
	200	0,23	0,047	0,218	0,029	0,235	0,051	[N]
	Rozdíl	10,43				1,28		[%]
0,06	230	0,254	0,041	-	-	0,238	0,028	[N]
	170	-	-	0,39	0,05	-	-	[N]
	Rozdíl			-10,14				[%]
	200	0,438	0,059	0,434	0,092	0,326	0,047	[N]
0,08	Rozdíl			-10,6				[%]
	230	-	-	0,388	0,036	-	-	[N]
	170	0,501	0,044	0	0	0,517	0,075	[N]
	Rozdíl	-2,53				19,68		[%]
0,08	200	0,514	0,053	0,568	0,071	0,432	0,038	[N]
	Rozdíl	-8,17				-1,39		[%]
	230	0,472	0,099	-	-	0,426	0,095	[N]

Výsledky parametru Rz v oblasti výstupku jsou uvedeny v Tab. 7.28. Vyšší řezná rychlost vedla ke zlepšení tohoto parametru ve třech případech. Snížení pak pouze ve dvou. Parametr Rz se jeví být silně ovlivněn přídatkem na obrobení. Při jeho nejmenší hodnotě došlo změnou řezných rychlostí k výrazným zlepšením. U výsledku se změnou řeznou rychlostí se také ukázal velký vliv na směrodatnou odchylku. Snížení řezné rychlosti vedlo ke kolísavým výsledkům. Všechny

odchyly dosahují 20–30 % z průměru. Obdobně jako tomu bylo u parametru Ra. Výsledky se zvýšenou řeznou rychlostí vykazaly větší spolehlivost (menší směrodatné odchyly) než s nižší řeznou rychlostí. V porovnání s doporučenou hodnotou však stále odchyly nabývají výrazně větších hodnot ve vztahu k jejich průměru. Zvýšení řezné rychlosti tak může vést k celkovému snížení, ale povrch je více nepravidelný.

Tab. 7.28: Vyhodnocení parametru Rz (výstupek) při variující řezné rychlosti

	a_d [mm]	0,05		0,1		0,15		
f_z [mm]	v_c [m/min]	\bar{x}	s	\bar{x}	s	\bar{x}	s	
0,04	170	0,75	0,205	-	-	1,028	0,292	[N]
	Rozdíl	-14,19				0,88		[%]
	200	0,874	0,116	0,952	0,154	1,037	0,036	[N]
	Rozdíl	-3,89				11,86		[%]
0,06	230	0,84	0,113	0	0	1,16	0,284	[N]
	170	-	-	1,325	0,338	-	-	[N]
	Rozdíl			3,19				[%]
	200	1,206	0,162	1,284	0,178	1,096	0,143	[N]
0,08	Rozdíl			7,32				[%]
	230	-	-	1,378	0,273	-	-	[N]
	170	1,487	0,303	-	-	1,835	0,397	[N]
	Rozdíl	-16,79				4,02		[%]
0,08	200	1,787	0,159	1,751	0,281	1,764	0,181	[N]
	Rozdíl	-27,48				-13,55		[%]
	230	1,296	0,118	-	-	1,525	0,292	[N]

V oblasti prohlubně (Tab. 7.29) je vliv větší řezné rychlosti při použití nejmenší hodnoty posuvu na zub negativní. Stejně je tomu i u nižší. Při vyšších hodnotách posuvů pak změna řezné rychlosti měla vliv kladný. Výjimkou je výrazné zhoršení parametru u nejvyšších řezných proměnných. Je to zároveň jediný výsledek, který vykázal výraznější změnu oproti doporučené hodnotě řezné rychlosti. Ostatní výsledky, ať už zlepšení nebo zhoršení, jsou kvůli nevýrazným rozdílům průměrných hodnot a odchylkám nedostatečné pro potvrzení vlivu.

Oproti jiným výsledkům tu změna řezné rychlosti nevedla k výrazným poměrovým nárůstům směrodatných odchylek. Dokonce to v několika případech vedlo ke zvýšení preciznosti obráběcího procesu. Nejvýrazněji je toto vidět u řezné rychlosti 170 m/min a nejnižšího posuvu.

Tab. 7.29: Vyhodnocení parametru Rz (prohlubeň) při variující řezné rychlosti

a_d [mm]		0,05		0,1		0,15		
f_z [mm]	v_c [m/min]	\bar{x}	s	\bar{x}	s	\bar{x}	s	
0,04	170	1,125	0,065	-	-	0,981	0,087	[N]
	Rozdíl	8,8				-4,29		[%]
	200	1,034	0,177	0,983	0,128	1,025	0,203	[N]
	Rozdíl	11,22				1,37		[%]
0,06	170	-	-	1,732	0,215	-	-	[N]
	Rozdíl			-3,08				[%]
	200	1,796	0,205	1,787	0,243	1,52	0,21	[N]
	Rozdíl			-10,74				[%]
0,08	170	2,025	0,148	-	-	2,208	0,261	[N]
	Rozdíl	-2,78				20,72		[%]
	200	2,083	0,261	2,308	0,208	1,829	0,191	[N]
	Rozdíl	-11,52				-3,94		[%]
	230	1,843	0,296	-	-	1,757	0,357	[N]

U parametru RSm v oblasti výstupku (Tab. 7.30) vedlo zvýšení řezné rychlosti ke snížení RSm ve všech případech. U nejnižší hodnoty posuvu se jedná o zlepšení, které je pokryto směrodatnou odchylkou a bylo tak možné doporučit při těchto podmínkách pro tuto oblast řeznou rychlost zvýšit. U středních hodnot posuvu se jedná o hraniční zlepšení. Zjištěný rozdíl sice není tak výrazný, ale z jeho směrodatné odchylky lze určit větší spolehlivost při těchto podmínkách. Obdobně se projevilo i snížení řezné rychlosti kdy bylo dosaženo zlepšení u všech měření. U nejvyšší hodnoty posuvu však došlo k velké nekonzistentnosti, a to u všech hodnot řezné rychlosti. Směrodatné odchylky jsou tak výrazné, že by bylo těžké predikovat výsledek, a proto by nebylo vhodné těchto podmínek dosahovat, pokud je cílem konkrétní hodnota RSm.

Tab. 7.30: Vyhodnocení parametru RSm (výstupek) při variující řezné rychlosti

	a_d [mm]	0,05		0,1		0,15		
f_z [mm]	v_c [m/min]	\bar{x}	s	\bar{x}	s	\bar{x}	s	
0,04	170	155,64	19,70	-	-	156,37	17,43	[N]
	Rozdíl	-14,44				-26,04		[%]
	200	181,91	17,95	176,54	20,94	211,43	26,43	[N]
	Rozdíl	-14,72				-16,89		[%]
0,06	230	155,13	14,55	-	-	175,71	22,95	[N]
	170	-	-	223,83	35,91	-	-	[N]
	Rozdíl			-10,15				[%]
	200	225,68	21,05	249,12	46,34	224,95	31,45	[N]
0,08	Rozdíl			-4,76				[%]
	230	-	-	237,27	9,80			[N]
	170	288,69	39,36	-	-	294,43	33,78	[N]
	Rozdíl	-18,89				-4,1		[%]
0,08	200	355,92	55,30	276,54	29,11	307,01	69,71	[N]
	Rozdíl	-31,1				-7,16		[%]
	230	245,24	70,05	-	-	285,02	40,00	[N]

V oblasti prohlubně (Tab. 7.31) nevedla změna řezné rychlosti k žádným výrazným změnám. Výjimkou je zvýšení řezné rychlosti u nejvyšších hodnot obráběcích parametrů, kde procentuální rozdíl průměrných hodnot dosáhl téměř 17 %. Vysoké směrodatné odchylky při těchto podmínkách však rozdíl činí jen nepatrný. Zvýšení řezné rychlosti tak nevedlo k žádné výrazné změně oproti doporučené hodnotě. Obdobně tomu je i v případě snížení řezné rychlosti. Ve většině případů to sice vedlo k mírnému zvýšení parametru. Jak ale plyne z procentuálních rozdílů, změna je prakticky nepatrná. Snížení řezné rychlosti se však ve většině případů pozitivně projevilo snížením rozptylu. Naopak její zvýšení mělo efekt opačný.

Tab. 7.31: Vyhodnocení parametru RSm (prohlubeň) při variující řezné rychlosti

	a_d [mm]	0,05		0,1		0,15		
f _z [mm]	v _c [m/min]	\bar{x}	s	\bar{x}	s	\bar{x}	s	
0,04	170	163,30	6,32	-	-	152,99	9,11	[N]
	Rozdíl	7,21				2,51		[%]
	200	152,33	11,44	143,78	8,86	156,83	13,87	[N]
	Rozdíl	-1,11				2,69		[%]
0,06	170	-	-	223,80	19,69	-	-	[N]
	Rozdíl			-1,14				[%]
	200	240,56	0,97	226,38	18,30	207,76	26,03	[N]
	Rozdíl			1,93				[%]
0,08	230	-	-	230,75	19,38	-	-	[N]
	170	310,86	22,42	-	-	297,98	30,98	[N]
	Rozdíl	3,79				2,88		[%]
	200	299,51	24,03	311,26	27,77	289,62	33,97	[N]
0,08	Rozdíl	-6,6				-16,91		[%]
	230	279,75	41,53	-	-	240,65	46,57	[N]

7.4.3 Vyhodnocení vlivu řezné rychlosti

Z provedeného porovnání je možné učinit několik závěrů. Změna řezné rychlosti má nezpochybnitelný vliv na řezné síly. Její zvýšení i snížení vedlo ve všech zkoumaných případech k růstu silového zatížení. Z tohoto důvodu se nejeví úprava řezné rychlosti jako vhodná. Větší řezné síly znamenají větší zatěžování jak obrobku, tak nástroje. Samotné zatěžování obrobku, vzhledem k hodnotám, které byly zjištěny, nebudou pravděpodobně představovat problém z hlediska případného poškození výrobku. Ale větší řezné síly mohou vést k většímu opotřebování nástroje, což vzhledem k pořizovací ceně je nežádoucí efekt.

Vliv řezné rychlosti na parametr Ra byl v oblasti výstupku veskrze pozitivní. Její snížení i zvýšení vedlo v některých případech i ke zlepšení o desítky procent. Mohlo by se tak zdát, že by bylo vhodné potencionálně snížit životnost nástroje s vidinou dosažení kvalitnějšího povrchu. Problém ovšem představuje oblast prohlubně. Zde nastala opačná situace a to, že změna řezné rychlosti vedla ke zvýšení parametru Ra. Rozdíly sice nebyly tak dramatické jako u výstupku, pořád by to ovšem znamenalo, že s použitím jiných řezných rychlostí by se zvyšoval rozdíl v parametru Ra mezi získanými oblastmi.

U parametru Rz byl vliv vyšší řezné rychlosti spíše sporný. Zlepšení nastalo jen ve 3 případech. Podobně tomu bylo i u snížení řezné rychlosti, tam šlo dokonce jen o dva případy. U prohlubně tomu bylo obdobně. Také se zde projevil

zajímavý fenomén, kdy při shodných podmínkách se jedna oblast zlepší a druhá zhorší.

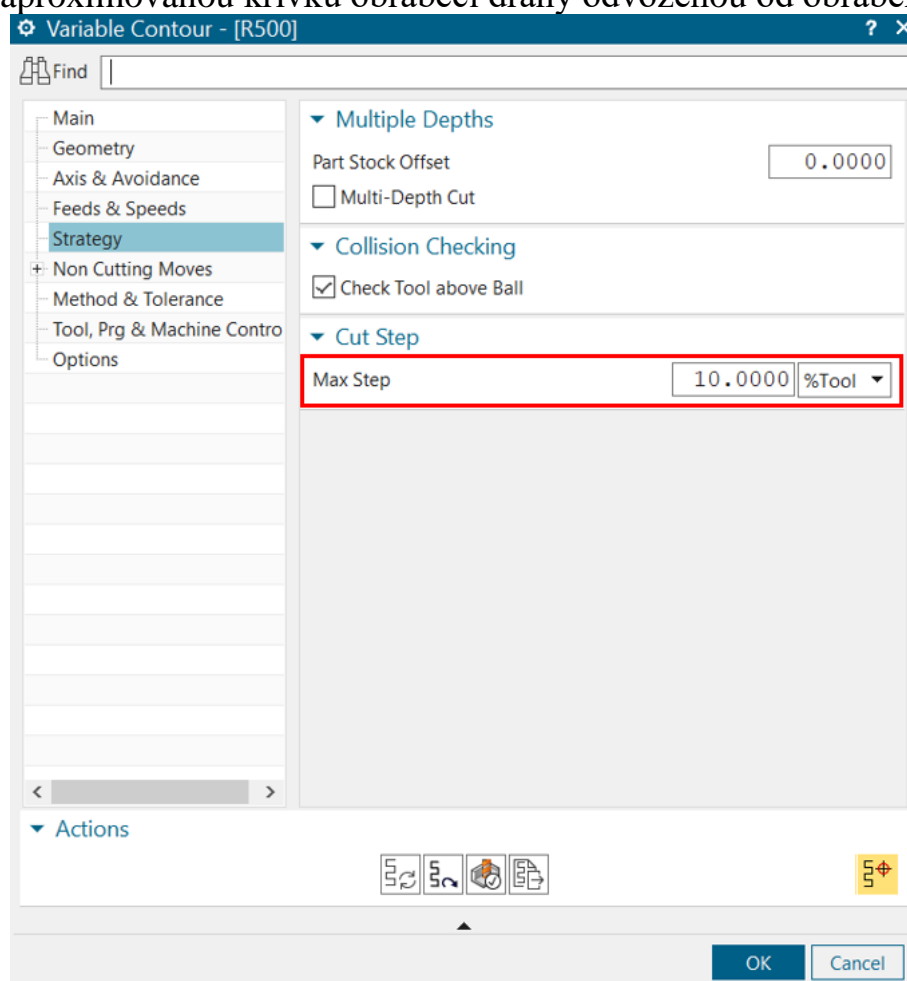
U parametru RSm, který už při doporučené hodnotě řezné rychlosti vykázal velké směrodatné odchylky, se změnou řezné rychlosti stal v mnoha případech ještě méně spolehlivý.

Optimalizace řezných parametrů pro soudečkové nástroje se již ukázal jako složitý úkol. Změna řezné rychlosti toto ještě komplikuje. Kvůli geometrii nástroje vznikají během obrábění dvě rozlišitelné oblasti na povrchu. Oblast výstupku, která je obrobena menším průměrem nástroje se ukázala jako citlivější na změnu řezné rychlosti. Nastavená řezná rychlost je totiž vztažena k průměru nástroje (v tomto případě 12 mm) a směrem ke špičce se tak snižuje. Teoreticky by zvýšení řezné rychlosti mělo vést ke zlepšení povrchu v oblasti výstupku. Protože by se špička nástroje měla svojí řeznou rychlostí více přiblížit k doporučené hodnotě. Snížení řezné rychlosti by pak mělo mít opačný efekt. Z toho plyne ona nekonzistentnost v oblasti výstupku. Ze získaných výsledků tak plyne, že i když by na části obrobene plochy mohl vzniknout kvalitnější povrch, bylo by to vykoupeno zhoršením v oblasti druhé a zvýšením silového zatížení. V tomto případě by tak ke změnám řezných sil nemělo být přistoupeno.

7.5 Vliv maximálního kroku

Cílem dokončovacích operací je obrobení povrchu s co možná nejlepší kvalitou povrchu. Už bylo ukázáno, že soudečkové nástroje jsou v tomto ohledu vysoce účinné. Dalším důležitým parametrem je časová náročnost. I v této problematice prokázaly soudečkové nástroje výraznou změnu k lepšímu v porovnání s kulovou frézou, ale vždy je možná optimalizace. Pokud ovšem, jak tomu bylo v případě této práce, doporučení výrobce nástrojů nedovolují nastavení více produktivnějších rezných podmínek, za účelem snížení výrobního času, je zde možnost softwarová.

Program NX umožňuje v nastavení strategie obrábění u operace Variable Contour nastavení maximálního kroku. Jak je ukázáno na Obr. 7.69. Tento parametr ovlivňuje hustotu řídících bodů. Jedná se o body, kterými software prokládá aproximovanou křivku obráběcí dráhy odvozenou od obráběné plochy.

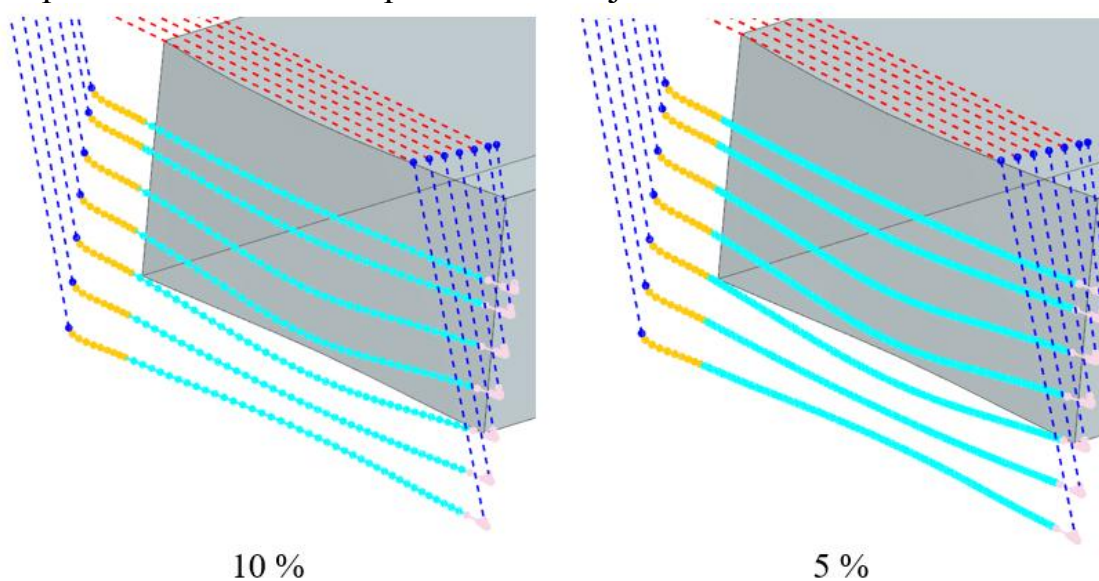


Obr. 7.69: Nastavení maximálního kroku

Výchozí nastavení této hodnoty je na hodnotu 10 % průměru obráběcího nástroje. Což je hodnota, se kterou byly provedeny všechny předchozí experimenty. Jedinou variovanou podmínkou bude právě hustota bodů. Vyhodnocováno bude obrábění plochy A nástrojem R500. Rezné podmínky budou u všech provedených měření shodné. Zvoleny byly střední hodnoty posuvu

na zub i přídávku. Tak bude možné vyhodnotit vliv maximálního kroku a z ní odvozené hustoty bodů.

Nastavení hustoty těchto bodů však může mít velký vliv na průběh operace. Nástroj při obrábění projede každým bodem, který se na nastavené trajektorii nachází. Mezi těmito body je nastavena přímka, kterou nástroj projede pracovním posuvem. Čím více je tak nastavených bodů, tím více změn nastává. Teoreticky to tak může vést ke zvýšení přesnosti výroby. Řídící bod představuje značku, ve které bude upravena následující dráha mezi body. To platí jak pro translační osy, tak pro osy rotace. Software tak má více možností pro úpravu kontaktu mezi nástrojem a obráběnou plochou. Na Obr. 7.70. je znázorněno porovnání hustoty bodů při nastavení 10 a 5 % průměru nástroje.



Obr. 7.70: Porovnání hustoty řídicích bodů

Prvním zjištěním u nastavení maximálního kroku bylo, že změna v nastavení parametru nevede vždy k změně ve vygenerovaném programu obrábění. V rámci softwaru jsou obráběcí dráhy navrženy tak, aby splnil několik parametrů. Ten základní, v případě operace Variable Contour, je dodržení maximální výšky zbytku materiálu, kdy v tomto konkrétním případě to byla hodnota 0,1 mm. Dalším je např. dovolené naklonění nástroje. To v případě použité operace nebylo omezeno, aby mohl být využit plný potenciál soudečkového nástroje. Kombinací těchto faktorů je pak výsledný program. Pokud by tak hodnota maximálního kroku obrábění vedla např. k vyššímu zbytku materiálu, tak se program nezmění.

Bylo tak přistoupeno ke zjištění, za jakých hodnot dojde ke změně v obráběcím programu. U vygenerovaných programů při hodnotách od 1-30 % maximálního kroku byla vyhodnocována délka programu. Toto rozpětí bylo zvoleno, protože při větších hodnotách maximálního kroku již prakticky nevykazoval vliv na délku programu.

Z provedeného porovnání byly získány intervaly hodnot parametru maximálního kroku, kdy se změní obráběcí program. Tyto jsou uvedeny v Tab. 7.32. Je vidět, že se zvyšující se velikostí kroku dochází k výraznému poklesu

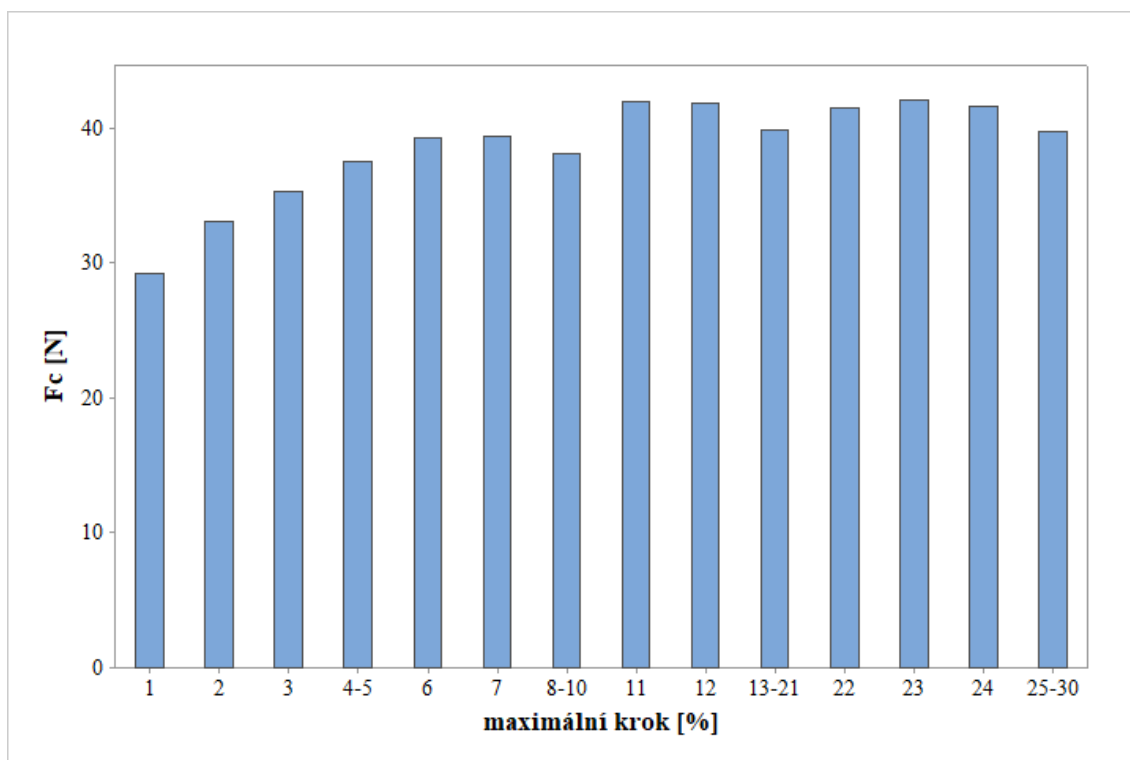
v počtu řádků programu. Mezi hodnotou 1 % a 2 % dojde téměřk 50% rozdílu. Postupně pak postupně klesají až k rozdílu pouze dvou řádků u nejvyšších nastavených kroků.

Tab. 7.32: Délky programů

Maximální krok	Počet řádků
1 %	2422
2 %	1300
3 %	866
4-5 %	740
6 %	528
7 %	464
8-10 %	460
11 %	442
12 %	350
13-21 %	322
22 %	316
23 %	300
24 %	280
25-30 %	278

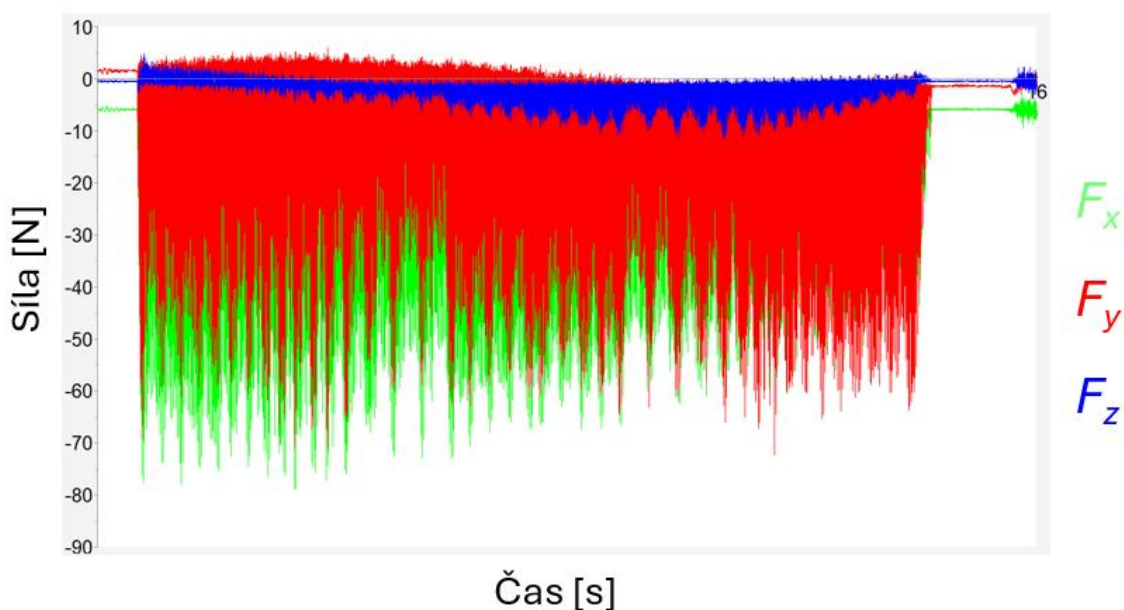
7.5.1 Vliv maximálního kroku na řezné síly

Bylo zjištěno, že maximální krok vede k výrazným změnám v délce programu, je nutné popsat, jaký vliv má tato skutečnost na sledované parametry. Na Obr. 7.71. jsou znázorněny hodnoty, kterých dosahovala celková řezná síla v závislosti na maximálním kroku. Je možné vidět, že průběh výsledků je do velké míry opačný v porovnání s počtem řádků a časem obrábění. Největší počet bodů (nejmenší dovolený krok) vedl k nejmenším řezným silám a ty postupně rostly až se v oblasti 8-10 % v podstatě ustálily.

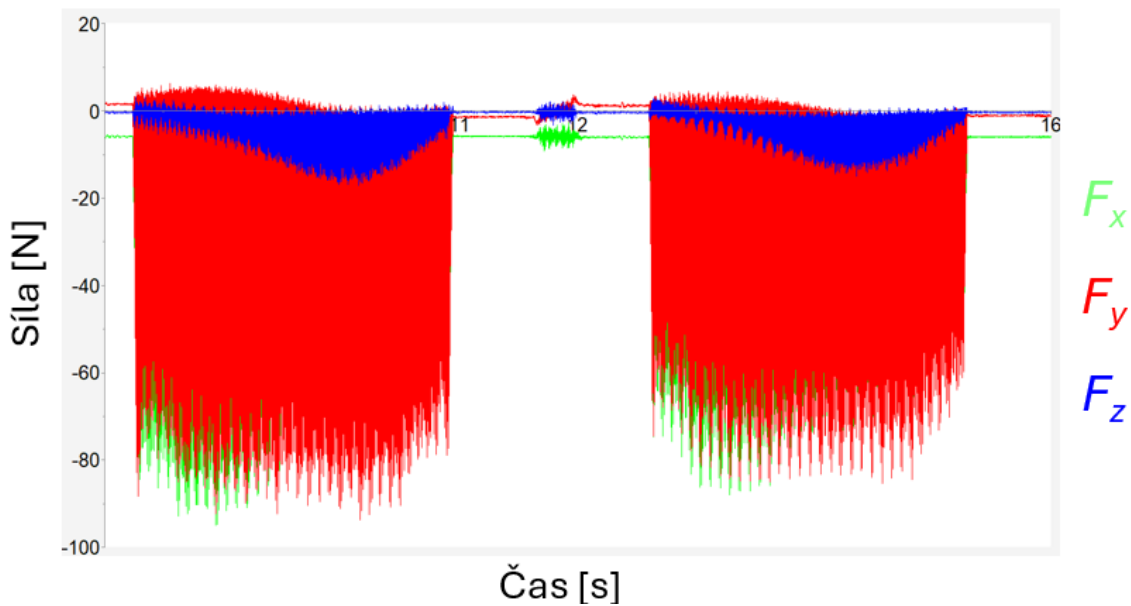


Obr. 7.71: Řezné síly v závislosti na hustotě bodů

Snížení maximálního kroku tak může vést ke snížení silového zatížení. Na Obr. 7.72 a Obr. 7.73 jsou ukázány průběhy změřených řezných sil první obráběcí dráhy při použití nejmenšího a největšího kroku. Z nich je vidět, že nejmenší krok skutečně vykazuje menší velikost zjištěných sil. Nejdůležitějším rozdílem je ovšem zjištěný rozdíl v časech. Obě zobrazení pokrývají stejný časovým rámcem 8-16 s z obráběcího procesu. Zatímco při nejmenším kroku toto rozmezí zabírá jednu obráběcí dráhu, u nejvyššího kroku to jsou dvě.



Obr. 7.72: Průběh řezných sil při nejmenším kroku



Obr. 7.73: Průběh sil při použití největšího kroku

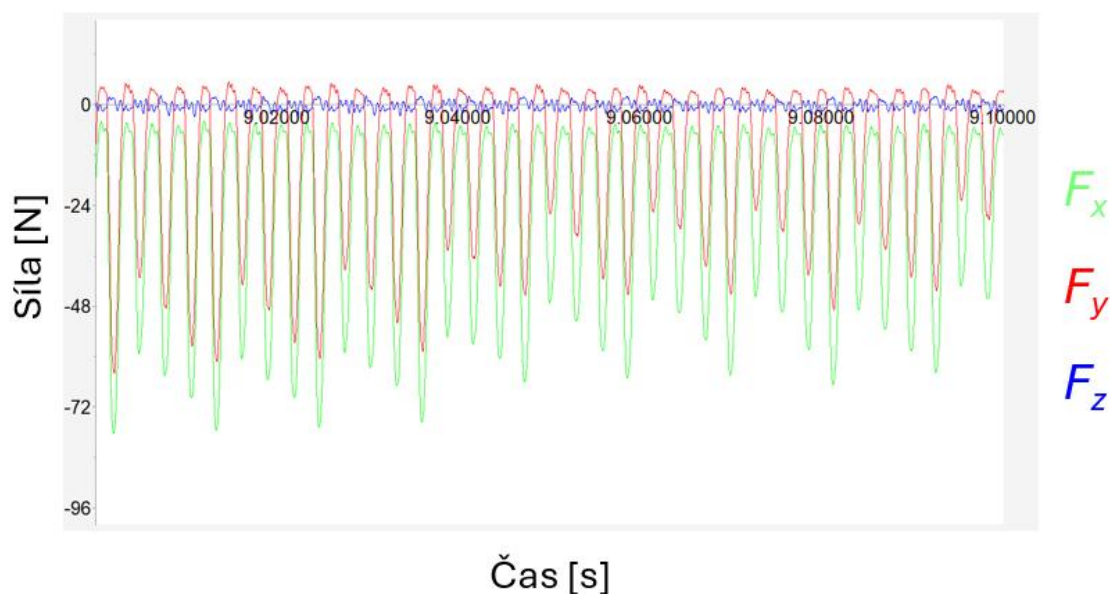
I přesto, že nebyl měněn posuv na zub ani řezná rychlost, vede změna maximálního kroku k výrazným změnám v časové náročnosti obrábění. Tato závislost je zobrazena v Tab. 7.33. Jsou zde uvedeny časy obrábění tak, jak byly zaznamenány v softwaru Dynoware od firmy Kistler. V těchto výsledcích tak není zahrnut čas najíždění nástroje a jeho odjezd do výchozí pozice. Z výsledků je patrný obdobný trend jako v případě počtu řádků programu. Tedy nejmenší dovolený krok vyžaduje největší časovou dotaci na provedení operace. Postupně se rozdíl snižuje, až se časová náročnost stabilizuje.

Tab. 7.33: Časy obrábění v závislosti na maximálním kroku

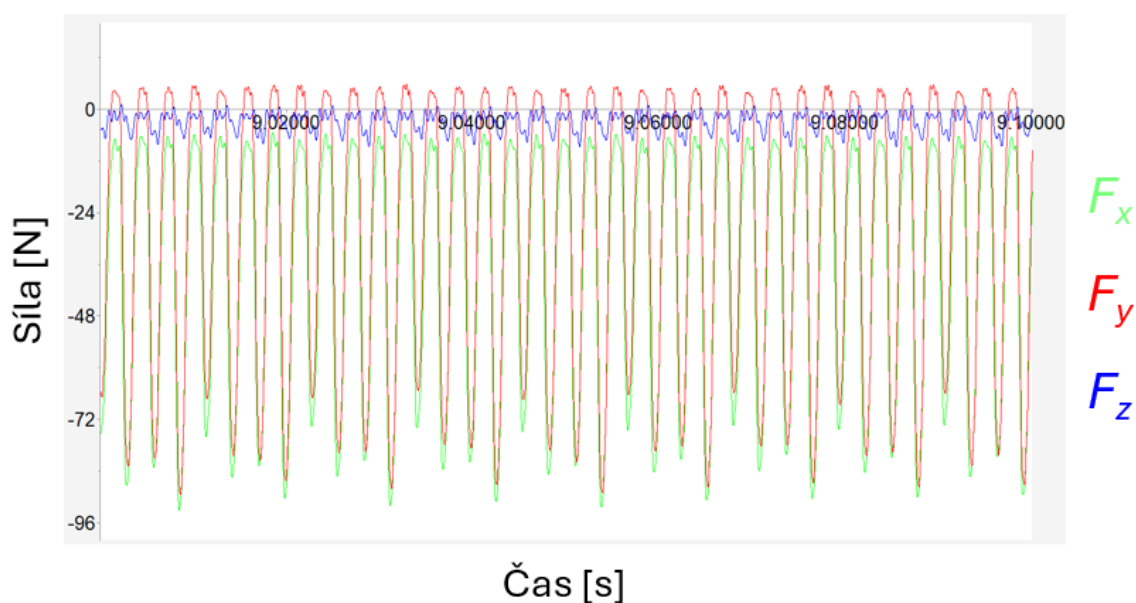
Maximální krok	Čas obrábění [s]
1 %	53,87
2 %	50,22
3 %	42,49
4-5 %	37,96
6 %	33,67
7 %	30,50
8-10 %	29,63
11 %	29,38
12 %	29,55
13-21 %	29,30
22 %	29,19
23 %	29,19
24 %	29,19
25-30 %	29,14

Při podrobnějším zkoumání záznamu řezných sil, jako je tomu na Obr. 7.74. a Obr. 7.75, kde je zobrazena 0,1 s z průběhu obrábění při použití největšího a

nejmenšího kroku. Je možné si všimnout, že za shodný časový úsek, dojde ke shodnému počtu záběrů (35). Záběry u nejmenšího kroku vykazují jen menší síly.



Obr. 7.74: Detail řezných sil při nejmenším kroku



Obr. 7.75: Detail řezných sil při největším kroku

Snížení hodnoty kroku tak má vliv jako případné snížení posuvu. Jak z hlediska času, tak řezných sil. Hodnota posuvu na zub i otáček však byla konstantní při všech experimentech s měněným maximálním krokem. Proto byla zjištěna shodná frekvence záběrů u maximálního i minimálního kroku. Ovlivnění je tak nepřímé.

Menší krok, a z něj plynoucí větší hustota řídicích bodů, tak působí jako obrábění delší dráhy při snížení posuvu. Maximální krok by však neměl mít vliv na délku, ani tvar ekvidistanty, která představuje obráběcí dráhu. Bylo tak přistoupeno k porovnání dráhy 2. řezu. Ze získaných programů byly vybrány řádky, které odpovídaly zvolenému řezu. Každý řádek se skládá z pěti souřadnic,

kteře odpovídatí třem translačníím osám a dvěma rotačníím osám (X, Y, Z, B a C). Ty určují, v jaké vzájemné poloze se bude nacházet nástroj a obrobek. Dráhu nástroje určují ony translační osy. Osy rotace pak určují, jak se obrobek natočí vůči nástroji. Pro porovnání dráhy tak stačí srovnání pouze lineárních os. V Tab. 7.34. jsou uvedeny první a poslední souřadnice řezů při vybraných velikostech maximálního kroku. Z porovnání je vidět, že se od sebe tyto souřadnice prakticky neliší. Začátek i konec řezu je tak totožný napříč použitými velikostmi kroku.

Tab. 7.34: První a poslední souřadnice 2. řezu

krok	První řádek			Poslední řádek		
	1 %	8-10 %	25-30 %	1 %	8-10 %	25-30 %
Osa						
X	34,579	34,579	34,578	-33,905	-33,905	-33,905
Y	-6,423	-6,431	-6,439	-2,785	-2,794	-2,803
Z	-9,416	-9,410	-9,404	-9,416	-9,410	-9,404

Jak bylo zjištěno výše. Maximální krok má výrazný vliv na samotnou délku programu. To se pochopitelně projeví i při zaměření na jeden řez. Mezi jednotlivými programy tak budou existovat výrazné změny v souřadnicích. Porovnání bylo provedeno určením délky úsečky určené ze souřadnicových bodů mezi sousedícími řádky. Tak bude možné porovnat jakou vzdálenost urazí nástroj v prostoru při 2. řezu. Toto porovnání je uvedeno v Tab. 7.35. Kromě sumy, která představuje součet všech spočítaných úseček, je uvedena i průměrná změna která byla zjištěna.

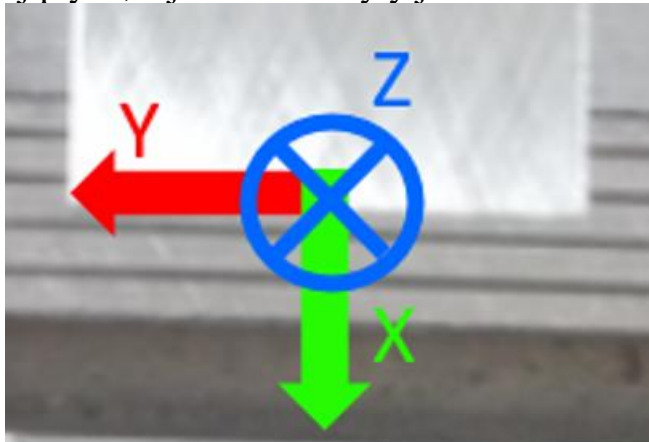
Tab. 7.35: Délka dráhy nástroje při 2. řezu

Maximální krok	Počet řádků [-]	Průměrná změna [mm]	Suma [mm]
1 %	338	0,22015	74,1900
8-10 %	58	1,30168	74,1958
25-30 %	30	2,55859	74,1992

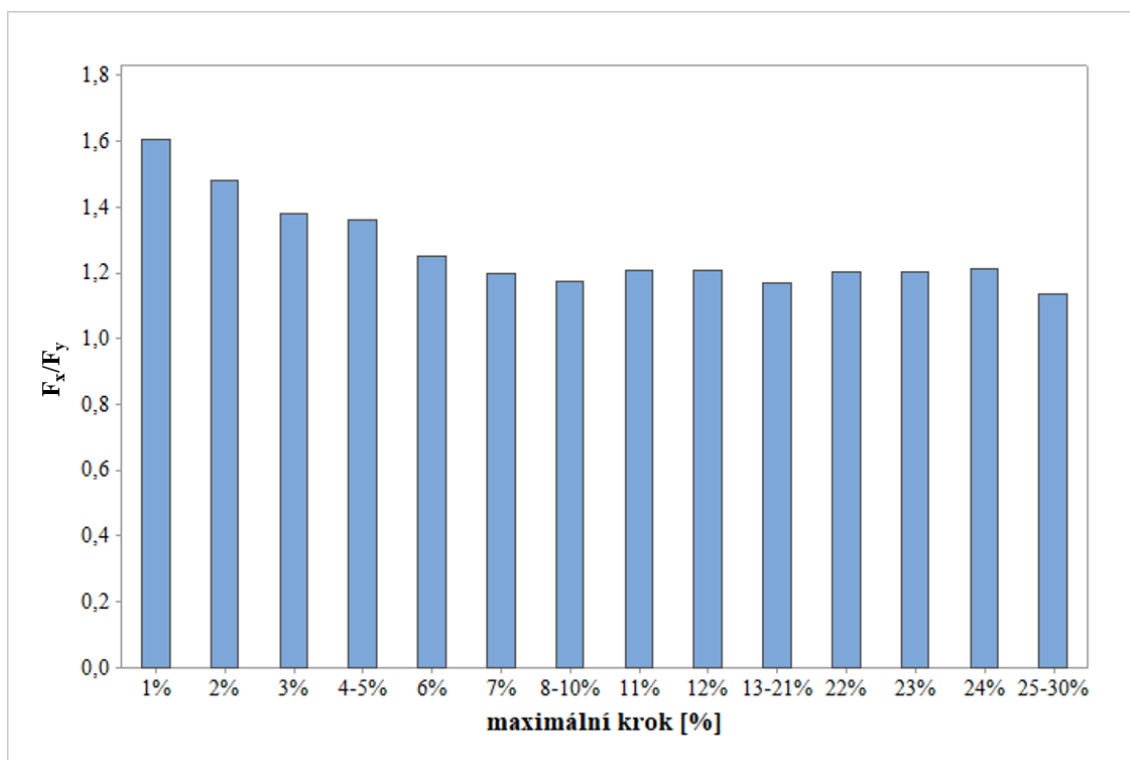
Z tohoto porovnání je vidět, že vzdálenost, kterou nástroj vykonává je ve všech případech prakticky stejná, s přihlédnutím k případné chybě při polohování stroje a zaokrouhlení u souřadnic. Jelikož je dráha stejná a podmínky posuvu i otáček byly shodné, je možným vysvětlením času limitace na straně stroje. Hustota řídicích bodů je při nejnižším kroku značně výrazná. Jak bylo napsáno výše, mezi nimi se nástroj pohybuje po přímce, na které se posouvá pracovním posuvem. V každém bodě pak dochází ke změně směru a případně i naklonění. Pohony posuvů stroje zodpovědné za dodržení nastavené rychlosti tak nejsou při průměrné změně směru 0,22 mm schopny dosáhnout nastavené rychlosti.

Nástroj provádí více menších kroků v rámci jedné dráhy, obráběcí čas je tak delší, protože jsou vykonávány jemnější obráběcí kroky. Vysvětluje to nižší silového zatížení, jak celkového, tak i poměrového, na Obr. 7.74 a Obr. 7.75 si je totiž možné všimnout, že poměr sil F_x a F_y je výrazně jiný. Zatímco u největšího

kroku se co do velikosti tyto síly liší minimálně tak u nejmenšího kroku je F_y výrazně menší oproti F_x . Byly tak zjištěny poměry těchto dvou složek a zaneseny do grafu, ten je zobrazen na Obr. 7.77, Obr. 7.76 pak zobrazuje orientační systém dynamometru. Z něj plyne, v jaké směru byly jednotlivé složky sil měřeny.



Obr. 7.76: Orientační systém dynamometru



Obr. 7.77: Poměr F_x/F_y v závislosti na maximálním kroku

Při zvyšování kroku klesá poměr mezi F_x a F_y . Z toho plyne, že při snížení hodnoty kroku nástroj méně „tlačí“ ve směru řezu. Výrazné snížení hodnoty maximálního kroku tak v případě použitého stroje naráží na jeho limity. Je nutné zdůraznit, že jiné obráběcí stroje mohou v závislosti na jejich konfiguraci poskytnout rozdílné výsledky. Ve zkoumaném případě je ovšem vliv nízké hodnoty kroku značně negativní z hlediska časového zatížení.

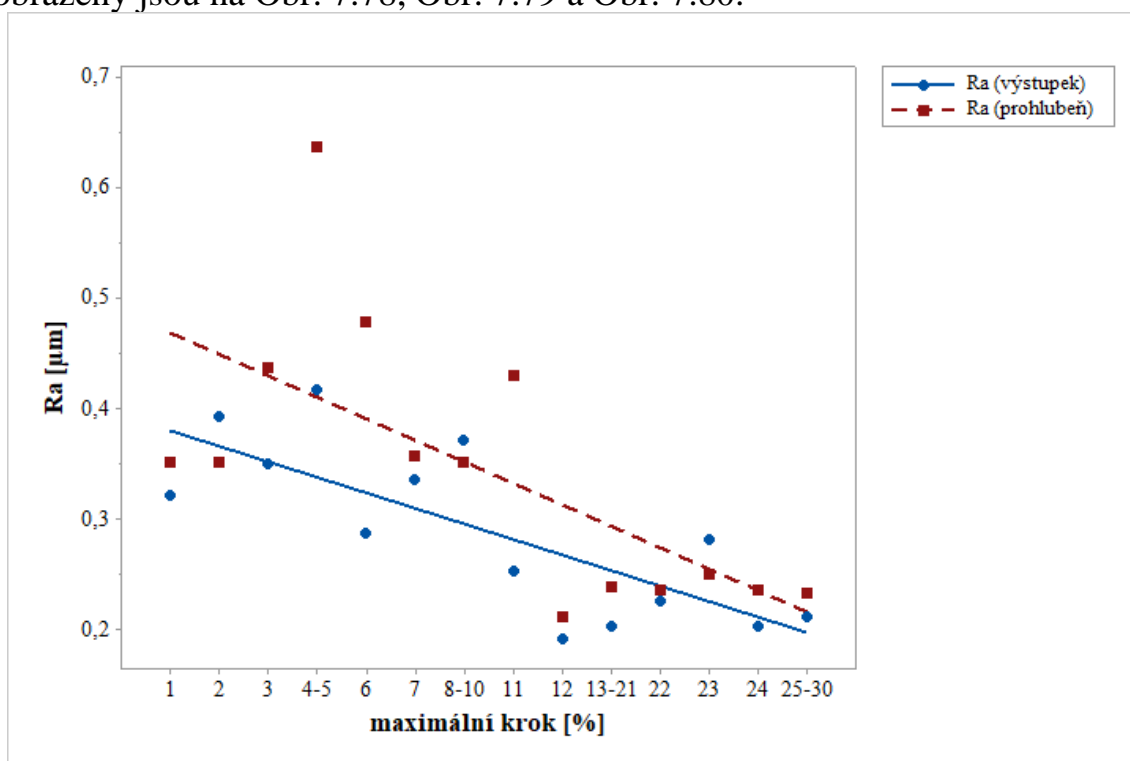
7.5.2 Vliv maximálního kroku na drsnost

Dosavadní výsledky ukázali, že maximální krok nástroje a z ní odvozená hustota řídicích bodů, má velký vliv na řezný proces. Je tak nutné zjistit, jak se tento vliv projeví na drsnosti povrchů. Proto byly plochy obrobené za popsáných podmínek zhodnoceny i z pohledu drsnosti. V Tab. 7.36. jsou uvedeny všechny výsledky parametrů, které byly vyhodnocovány i v předchozích případech.

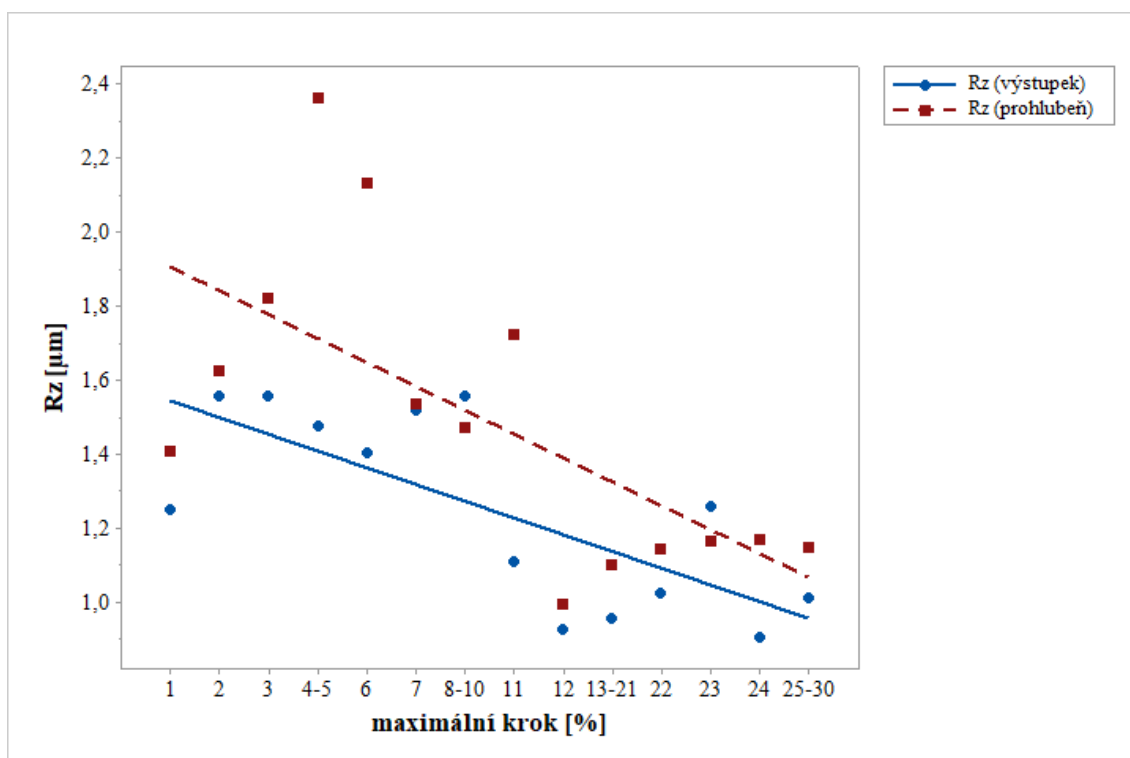
Tab. 7.36. Parametry drsnosti v závislosti na maximálním kroku

Max. krok [%]	Oblast	Ra [μm]		Rz [μm]		RSm [μm]	
		\bar{x}	s	\bar{x}	s	\bar{x}	s
1 %	Výstupek	0,321	0,030	1,252	0,109	333,26	101,89
	Prohlubeň	0,352	0,020	1,411	0,049	346,43	101,50
2 %	Výstupek	0,393	0,007	1,561	0,039	273,02	51,65
	Prohlubeň	0,351	0,013	1,626	0,079	186,98	26,23
3 %	Výstupek	0,349	0,044	1,561	0,193	252,57	38,95
	Prohlubeň	0,436	0,019	1,824	0,117	270,84	62,55
4-5 %	Výstupek	0,417	0,077	1,478	0,282	313,11	50,19
	Prohlubeň	0,637	0,028	2,363	0,095	389,66	67,52
6 %	Výstupek	0,287	0,025	1,406	0,128	209,66	57,27
	Prohlubeň	0,478	0,063	2,134	0,288	228,47	12,77
7 %	Výstupek	0,335	0,117	1,522	0,350	215,94	30,79
	Prohlubeň	0,356	0,051	1,539	0,196	210,81	37,58
8-10 %	Výstupek	0,371	0,132	1,560	0,413	232,44	24,95
	Prohlubeň	0,352	0,056	1,475	0,175	231,09	16,91
11 %	Výstupek	0,253	0,022	1,112	0,153	222,57	17,67
	Prohlubeň	0,430	0,071	1,723	0,213	227,86	22,59
12 %	Výstupek	0,191	0,027	0,928	0,143	157,62	19,99
	Prohlubeň	0,211	0,023	0,998	0,101	152,28	14,32
13-21 %	Výstupek	0,203	0,053	0,957	0,273	157,27	10,72
	Prohlubeň	0,239	0,020	1,103	0,117	153,57	16,66
22 %	Výstupek	0,225	0,046	1,027	0,339	163,90	30,22
	Prohlubeň	0,236	0,017	1,147	0,092	155,20	20,20
23 %	Výstupek	0,281	0,055	1,261	0,296	195,83	39,24
	Prohlubeň	0,250	0,022	1,169	0,126	149,36	14,30
24 %	Výstupek	0,203	0,064	0,909	0,362	195,59	31,88
	Prohlubeň	0,236	0,022	1,169	0,127	148,19	20,81
25-30 %	Výstupek	0,212	0,052	1,013	0,278	182,77	29,84
	Prohlubeň	0,234	0,023	1,148	0,140	152,54	21,86

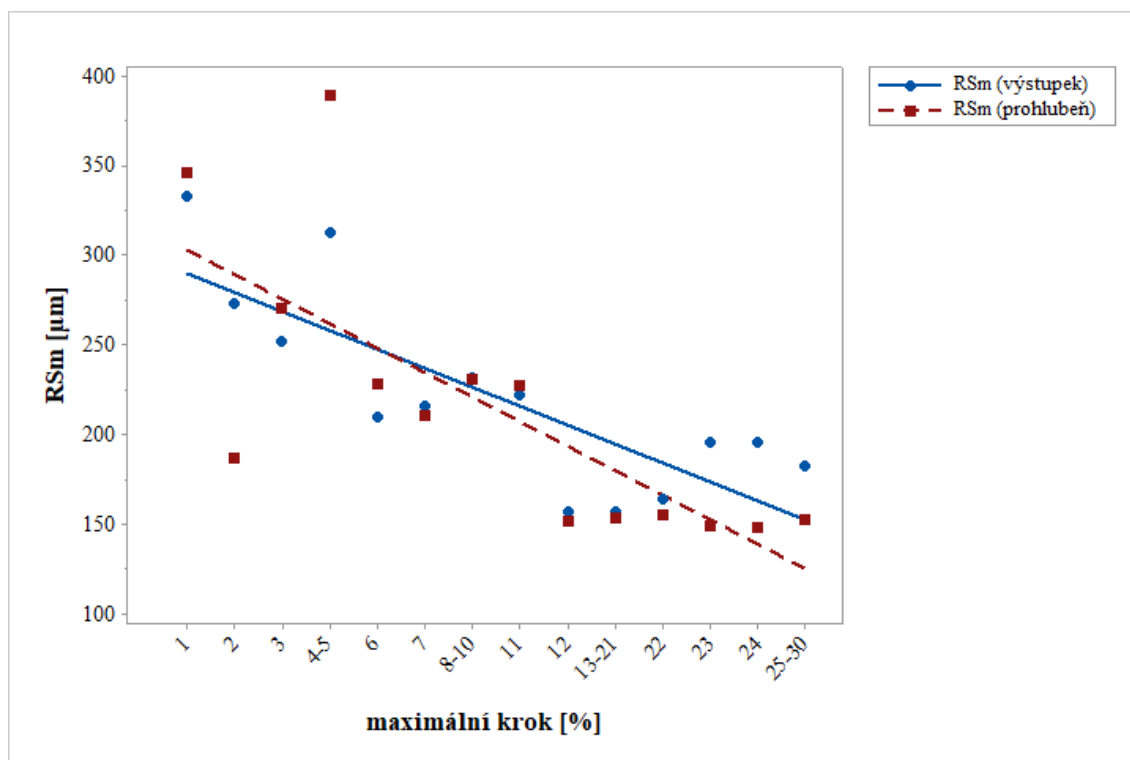
Pro větší přehlednost byla data zanesena do bodových grafů a proloženy. Zobrazeny jsou na Obr. 7.78, Obr. 7.79 a Obr. 7.80.



Obr. 7.78: Trendy parametru Ra při změně hustoty bodů



Obr. 7.79: Trendy parametru Rz při změně hustoty bodů



Obr. 7.80: Trendy parametru RSm při změně hustoty bodů

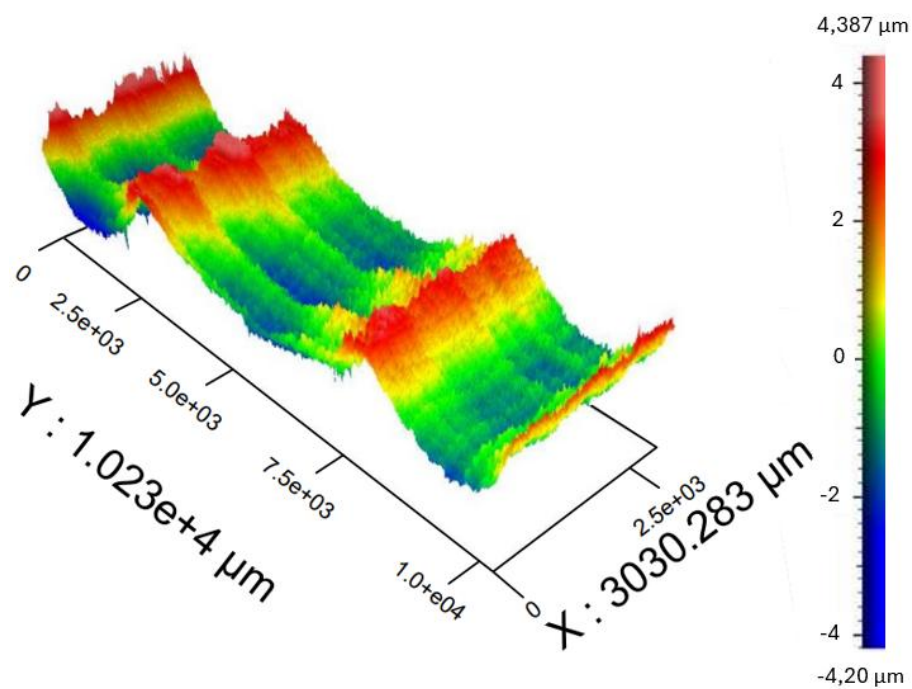
Ukázalo se, že všechny parametry vykazují sestupný trend u obou oblastí s rostoucím maximálním krokem. U parametru Ra je možné vidět, že je tento pokles dosti výrazný. Rozdíl mezi největším a nejmenším krokem dosahuje v obou oblastech 50 %. Je tak zřejmý výrazný vliv maximálního kroku. Díky rozdílným trendům u oblastí by potenciálně mohlo dojít i k jejich prolnutí. To by vedlo k tomu, že získaný povrch by již nevykazoval heterogenitu.

U hodnot parametru Rz je možné pozorovat obdobný sestupný trend. Rozdíl minima a maxima zde dosahuje přibližně poloviční hodnoty oproti parametru Ra. Stále je však možné konstatovat pozitivní vliv zvětšování maximálního kroku. Stejně, jako u Ra, je i zde teoretická možnost získání stejných drsností v obou oblastech.

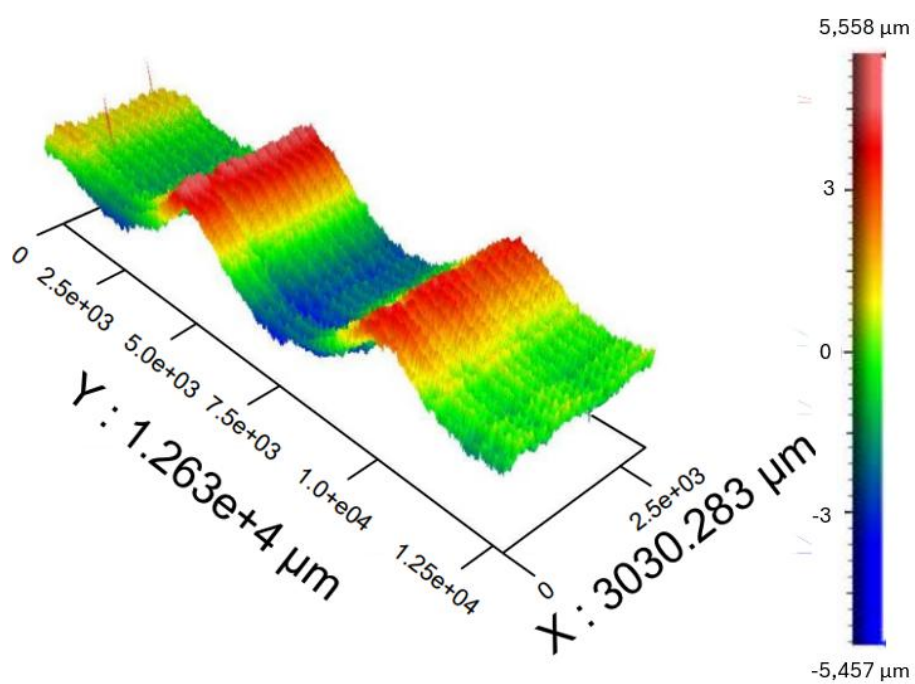
U RSm došlo napříč zkoumanými hodnotami k největšímu zlepšení. V oblasti prohlubně to bylo přes 100 %. Je však nutné brát v potaz zjištěné směrodatné odchylky. Dokonce došlo k prolnutí obou oblastí. To je pravděpodobně způsobeno velkým rozptylem hodnot u nejnižších kroků. Stále však platí, že obě oblasti vykazují sestup.

Zvýšení maximálního kroku tak může vést ke snížení všech sledovaných parametrů drsnosti. Ze získaných trendů lze odvodit, že by potenciálně mohly docílit dosažení homogenního povrchu a byla by tak vyřešena nevýhoda soudečkových fréz.

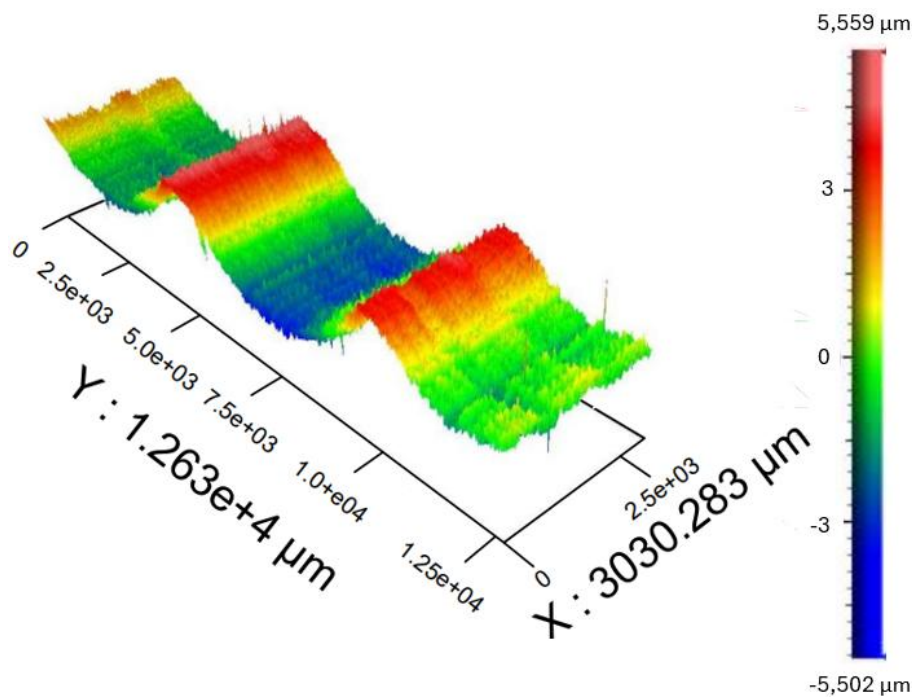
Proč tomu tak je mohou pomoci odhalit skeny povrchů vyhodnocovaných oblastí, které jsou zobrazeny na Obr. 7.81, Obr. 7.82 a Obr. 7.83. Ty zobrazují plochy obrobené při nejmenším, středním a největším použitém kroku.



Obr. 7.81: Sken vyhodnocované oblasti při kroku 1 %



Obr. 7.82: Sken vyhodnocované oblasti při kroku 8-10 %

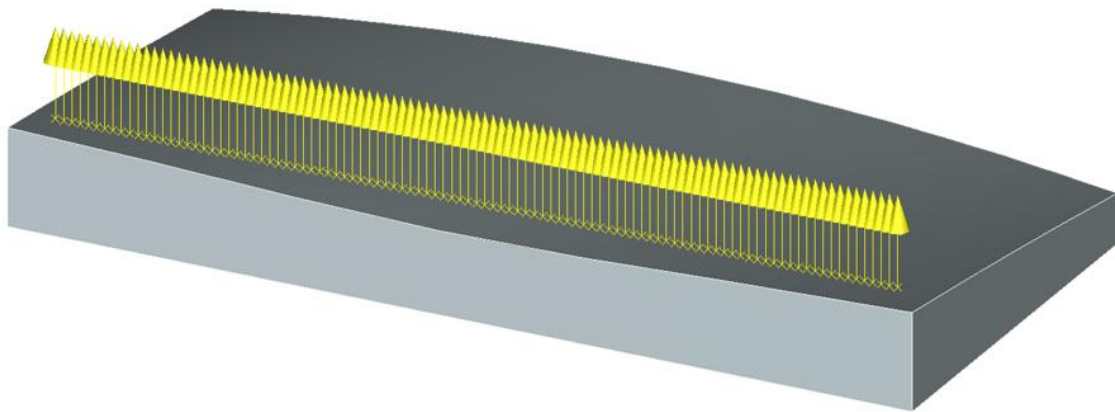


Obr. 7.83: Sken vyhodnocované oblasti při kroku 25-30 %

S postupným zvyšováním kroku je možné si všimnout, že se snižují stopy po nástroji. U nejnižšího kroku si je možné všimnout výrazných výstupků. To souvisí s prodlouženým časem obrábění. Časté přepolohování nástroje při nejnižším kroku zanechalo výrazné stopy. Ty se pak negativně projevily v drsnosti povrchu. Vyšší krok naopak umožnil rychlejší projetí nástroje. Vzhledem k použitému malému přídávku na obrobení nepředstavoval případný větší přírůstek problém a získaný povrch je tak více kvalitní.

7.5.3 Vliv maximálního kroku na přesnost

Zjištěné rozdíly v řezných silách a drsnostech vedla k domněnce, že úprava počtu bodů může vést k rozdílu v přesnosti obrábění. Jelikož nejmenší krok umožňuje častější naklápění nástroje za účelem dosažení optimálního kontaktu nástroje a plochy. Proto bylo provedeno porovnání pomocí 3D souřadnicového stroje od firmy Zeiss (Contura G2). S využitím softwaru Calypso 2019 byla navržena řada bodů, u kterých byly změřeny jejich souřadnice ve vztahu k nastavenému nulovému bodu. Tyto měřené body jsou zobrazeny na Obr. 7.84, jak je vidět měřené body nedosahovaly krajů zkušební tělesa. Takto bylo měření navrženo, protože hrany zkušebních těles byly sražené a neposkytovaly by tak spolehlivý výsledek pro porovnání.

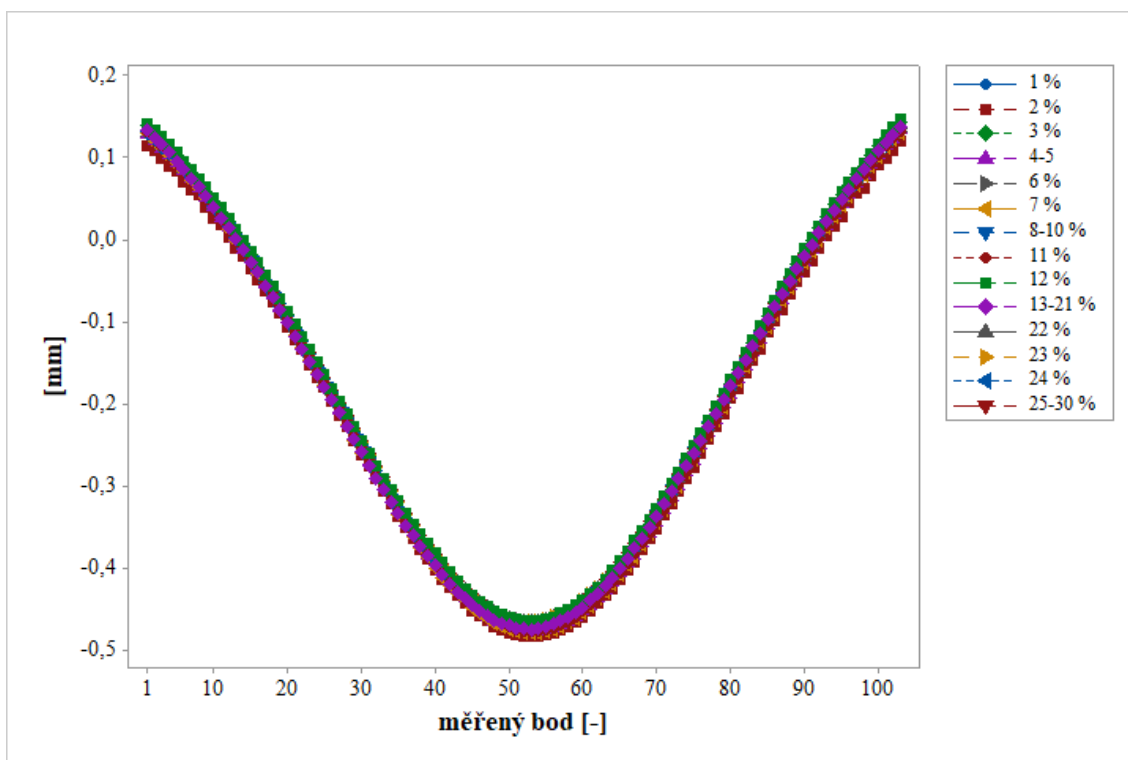


Obr. 7.84: Měřené body

Vzhledem k tomu, že testovací plochy byly odřezávány pomocí nepřesných technologií, které mohly způsobit jak rozdílnou výšku, tak i nepřesné uřezání bylo na každé měřené ploše provedeno srovnání měřicí roviny. Takto bylo zajištěno, že zjištěné rozdíly budou způsobeny pouze frézovacím procesem.

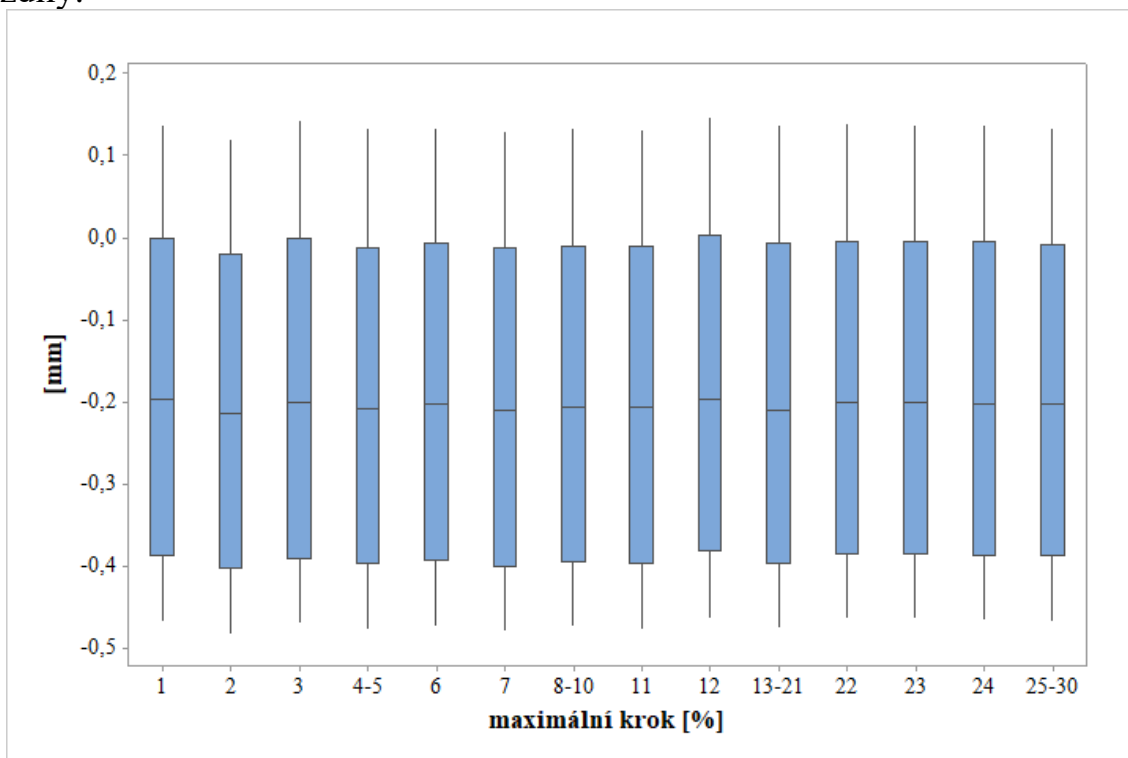
Výsledkem tak bylo 14 souborů dat. Kdy každý obsahoval 3 souřadnice pro všech 103 změřených bodů. Souřadnice Y byla ve všech případech shodná. Odpovídala vzdálenosti bodů od spodní hrany měřeného tělesa. V případě testovacího měření to byly 3 mm. Souřadnice X odpovídala směru měření jednotlivých bodů. S každým měřeným bodem se zvětšoval o nastavenou hodnotu 0,5 mm. Toto opět platilo pro všechna provedená měření. Jediná souřadnice, která může nést informaci o změně tvaru tělesa je tak souřadnice Z. Ta odpovídá výškovému rozdílu měřeného místa proti základní (nulové) rovině.

Vyhodnocována tak bude pouze tato souřadnice. Hodnoty byly zaneseny do bodového grafu (Obr. 7.85). Z něho je vidět, že dochází k velkému překrytí jednotlivých výsledků. To znamená, že k výrazným odchylkám v přesnosti tvaru nedošlo. Zvolené grafické porovnání však není dostatečné pro zhodnocení vlivu maximálního kroku na přesnost výrobku.



Obr. 7.85: Porovnání souřadnic osy Z

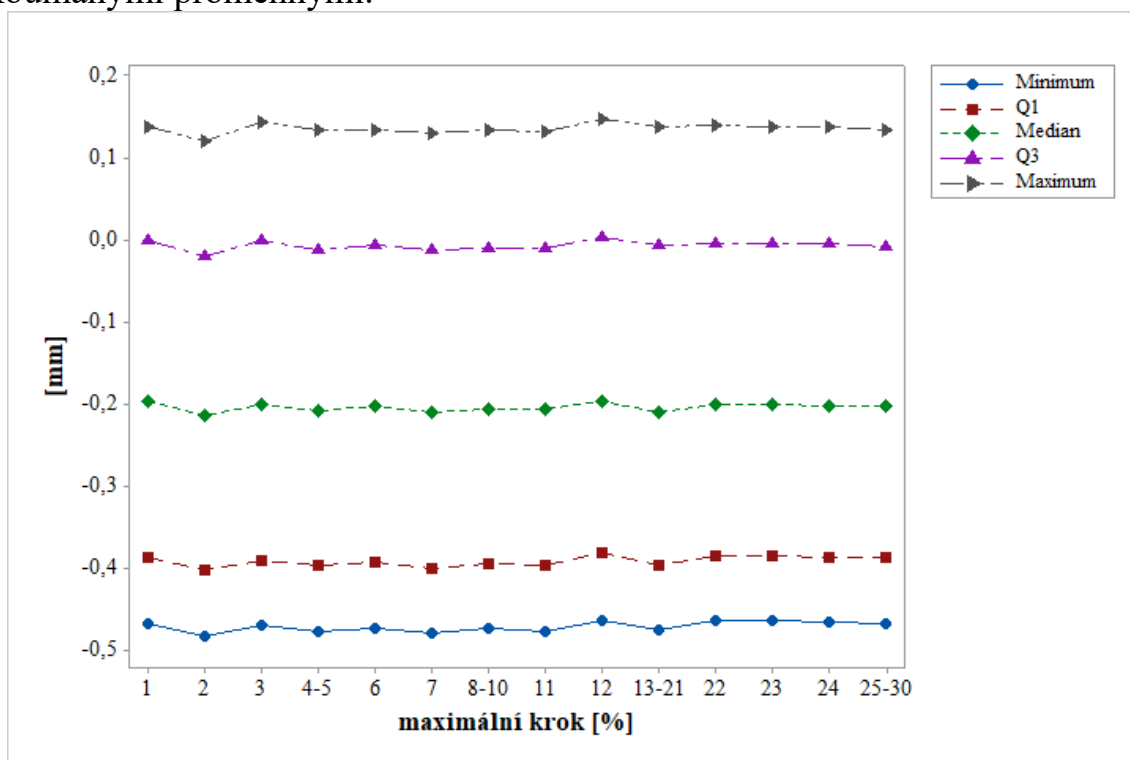
Jednotlivé soubory byly zaneseny do krabicových grafů. Z nich už je možné určit, jestli se nějaké soubory výrazně liší. Z porovnání jednotlivých souborů je na Obr. 7.86 je patrní, že mezi jednotlivými plochami existují jen nevýrazné rozdíly.



Obr. 7.86: Porovnání krabicových grafů

Krabicové grafy mimo jiného ukazují, jak se jednotlivé soubory liší v 5 kritických místech (minimum, Q1, medián, Q3 a maximum). Vzájemné porovnání těchto parametrů poskytuje dostatečné množství informací pro porovnání přesnosti obrábění.

Z každého souboru tak byly vybrány tyto hodnoty a vzájemně porovnány. Obr. 7.87 ukazuje, jak toto vzájemné porovnání vypadá. Je vidět, že vybrané parametry se v rámci všech souborů prakticky neliší. Jejich přesné porovnání bylo provedeno srovnáním zjištěného minima a maxima každé hodnoty napříč zkoumanými proměnnými.



Obr. 7.87: Porovnání vybraných parametrů

Ty jsou uvedeny v Tab. 7.37, včetně velikosti kroku, u kterého byla tato hodnota zjištěna a rozdíl mezi nimi.

Většina maximálních hodnot byly zjištěny u kroku 12 %. Výjimkou byl medián, jeho největší hodnota byla zjištěna u 1 %. Nejmenší hodnoty byly všechny byly zjištěny u 2% kroku.

Tab. 7.37: Maximum a minimum ze zkoumaných dat

	Minimum	Q1	Medián	Q3	Maximum	Jednotka
Max.	-0,4637	-0,3819	-0,1958	0,0032	0,1477	[mm]
	12 %	12 %	1 %	12 %	12 %	[-]
Min.	-0,4835	-0,4028	-0,2137	-0,0204	0,1198	[mm]
	2 %	2 %	2 %	2 %	2 %	[-]
Rozdíl	0,0198	0,0209	0,0179	0,0236	0,0279	[mm]

Rozdíly ukazují podstatnou věc. Jednotlivé plochy se v maximální zjištěné míře lišily pouze v řádech setin. Tento rozdíl navíc nepřesáhl 0,03 mm. Pokud budou uvažovány tolerance pro dutiny vstřikovacích forem. [56–58] Ty se typicky se pohybují $\pm 0,1$ mm u přesnějších to je $\pm 0,05$ mm. Nejpřísnější tolerance se pohybují $\pm 0,02$ mm. Navíc je třeba vzít v potaz přesnost výrobního stroje (DMU 50) a měřicího stroje (Contura G2).

Ukazuje se tak, že pokud vliv maximálního kroku na přesnost výroby existuje, je z technického hlediska minimální až zanedbatelný. To ovšem platí pro výsledky získané provedenými experimenty. Při jiné konfiguraci by vliv mohl být výraznější. Např. pokud by obráběná plocha byla co do tvaru složitější nebo při použití jiných nástrojů a strojů.

7.5.4 Vyhodnocení vlivu maximálního kroku

Cílem této části práce bylo porovnat, jaký vliv bude mít hustota bodů na již zkoumané parametry (řezné síly, drsnost) při obrábění. A vyhodnotit dosaženou přesnost při obrábění, popř. jak se od sebe plochy budou lišit. Zjistit tak jak velký vliv má hustota řídicích bodů na výslednou plochu. Pro odfiltrování všech ostatních vlivů byly experimenty provedeny za konstantních podmínek jedinou proměnou byla hustota řídicích bodů. Použita byla střední hodnota posuvu na zub a střední hodnota přídávku na dokončení.

Bylo zjištěno, že maximální krok má výrazný vliv na řezný proces. Jeho nižší hodnoty mají pozitivní vliv na silové zatížení. Dokonce byla zjištěna možnost změny poměru dvou nejdůležitějších složek sil.

Naopak tomu bylo u drsnosti, tam byl vliv opačný a lepší hodnoty jsou spojeny s větším krokem. To platí pro všechny zkoumané parametry. Byl zde objeven i potenciál pro dosažení homogenního povrchu, který by zasloužil hlubší prozkoumání.

Všechny pozitivní výsledky jsou ještě zdůrazněny tím, že nebyl zjištěn výrazný vliv na tvar obrobených ploch.

8. DISKUZE VÝSLEDKŮ

Tato disertační práce byla zaměřena na výzkum vlivu řezných podmínek na průběh obrábění a výslednou drsnost povrchu při použití tangenciálních a kónických soudečkových nástrojů. Pro tyto účely byly navrženy testovací plochy, které pak byly za variujících podmínek obráběny. Byly zkoumány dva typy nástrojů, kde každý je určen pro jinou aplikaci. Tomu odpovídaly i tvary použitých testovacích ploch. Testovací plochy představovaly tzv. volnou (spline) plochu.

Obrábění soudečkovými nástroji představuje efektivní způsob výroby volných ploch. Plochy o průřezu 25x55 mm byly jimi obrobena v řádech sekund. V závislosti na použití posuvu pak může být tento výrobní čas i výrazně zkrácen, ovšem s negativním dopadem na kvalitu povrchu.

Průběh obrábění byl vyhodnocován z pozice vzniklého silového zatížení. Vzhledem k použitému 5osému obrábění, které bylo nezbytné kvůli geometrii testovacích ploch, byla vyhodnocována celková řezná síla. Byl zjištěn synergický efekt zkoumaných proměnných, jako dominantnější se projevil přídavek na obrobek. Tangenciální nástroje generovaly nižší silové zatížení oproti nástrojům kónickým. Kónické nástroje způsobovaly v průměru o více než 100 % větší zatížení. Tvar plochy byl sice pro oba nástroje rozdílný, ale přídavek, který hraje největší roli, byl napříč testy shodný. U tangenciálních nástrojů se výsledky pohybovaly v rozmezí 6 - 29 N a 8 - 33 N pro nástroje R85, resp. R90. Pro kónické nástroje byly hodnoty v intervalech 18 - 55 N a 21 - 58 N u R250 a R500. Tyto rozpětí nepředstavují pro významnou většinu nasazení kritické hodnoty, při kterých by mohlo dojít k nežádoucím jevům způsobenými výrazným silovým zatížením. Díky značné kontaktní ploše je toto zatížení lépe rozloženo.

Patrně nejdůležitějším zjištěním v průběhu práce bylo, že použití tangenciálních i kónických soudečkových nástrojů způsobí vznik heterogenního povrchu. Čili, že na výsledné ploše se nachází dvě rozlišitelné oblasti, které vykazují rozdílné drsnosti i rozdílné trendy v závislosti na podmínkách měření. Toto bylo potvrzeno jak u tangenciálních, tak kónických nástrojů. Z tohoto důvodu bylo přistoupeno k vyhodnocování těchto oblastí odděleně. Vyhodnocovány byly parametry Ra, Rz a RSm. Oblasti na heterogenním povrchu se co do hodnot na nich zjištěných liší velmi variujícím způsobem.

U tangenciálních nástrojů a parametru Ra byly nižší hodnoty zjištěny v oblasti prohlubně v 6 z 9 případů u nástroje R85 a v 7 z 9 případů u R90. Pro Rz to byl shodný poměr pro nástroj R85. U nástroje R90 se poměr snížil na 6:3, k tomu došlo u nejmenšího přídavku a největšího posuvu. Poměr RSm vyšel 7:2 resp. 2:7 u obou nástrojů, jen v případě nástroje R85 to bylo ve prospěch výstupku a u R90 ve prospěch prohlubně.

Při obdobném srovnání kónických nástrojů se ukázalo, že u nástroje R500 byl poměr Ra 5:4 pro výstupek, u R250 to bylo 6:3. Poměr Rz byl 8:1 u obou nástrojů.

RSm se pak více přiblížilo k parametru Ra a poměry vyšly 5:4 u R250 a 2:7 u R500.

Nutno zdůraznit, že jednotlivé parametry se lišily v tom, za jakých podmínek bude daná oblast vykazovat nižší hodnoty. To že oblast prohlubně má v porovnání s výstupkem nižší zjištěný výsledek Ra ještě neznamená, že tomu tak bude i u dalších parametrů. Stejně tak může být rozdíl v oblastech pouze v jednotkách, ale i desítkách procent. Provedený rozsah měření neodhalil spolehlivý koeficient, který by na základě jedné oblasti určil hodnotu té druhé. Projevila se tak složitost návrhu vhodných řezných podmínek pro obrábění.

Zjištěná heterogenita povrchu a rozdíly mezi jednotlivými oblastmi mohou působit jako důvod pro zavrnutí používání soudečkových nástrojů. S jejich použitím je ale možné získat velice kvalitní povrchy. Jak ukazuje Tab. 8.1, kde jsou uvedeny zjištěné rozptyly parametrů drsnosti. Parametry Ra i Rz ukazují na získání vysoce kvalitních povrchů. Výsledky, jak bylo uvedeno výše, do velké míry odpovídají spíše povrchu broušenému. Nabízí se tak možnost vynechání případaných dokončovacích operací a ušetření nákladů na výrobu.

Tab. 8.1: Porovnání rozptylů drsností

		Ra [μm]	Rz [μm]	RSm [μm]
R85	Výstupek	0,386-0,803	2,104-3,767	170,00-261,84
	Prohlubeň	0,356-0,723	1,800-3,084	169,41-250,59
R90	Výstupek	0,334-0,908	1,414-3,503	168,75-308,99
	Prohlubeň	0,286-0,808	1,431-3,362	173,07-302,48
R250	Výstupek	0,269-0,934	1,203-3,547	182,99-320,00
	Prohlubeň	0,348-1,465	1,641-5,863	146,02-316,78
R500	Výstupek	0,204-0,475	0,874-1,787	176,54-355,92
	Prohlubeň	0,218-0,568	0,983-2,308	143,79-311,26

Výhody použití soudečkových fréz jsou nejlépe demonstrovány v porovnání s konvenční kulovou frézou, proto byla provedena porovnávací studie. Ta měla za cíl určit, jestli, a za jakých podmínek, bude konvenční kulová fréza schopna dosáhnout obdobných výsledků v porovnání se soudečkovými nástroji. Pro zkrácení doby měření zde byla využita metodika DOE. Ze získaných výsledků vyplývá, že ani čtyřnásobný počet drah oproti soudečkovým nástrojům nevedl k žádoucímu výsledku. I tak tyto operace vyžadovaly, v závislosti na podmínkách, výrazně vyšší časovou dotaci. K této studii pak byly přidány dvě testovací operace, kdy byly navrženy ty nejlepší možné podmínky. Ani při těchto extrémních podmínkách však kvalita povrchu nedosahovala těch nejhorších výsledků získaných soudečkovými nástroji. Na základě tohoto porovnání je možné konstatovat, že při obrábění obdobných ploch, které byly použity pro tuto práci není vhodné využívat kulové frézy.

U kónického nástroje R500 byla ověřena i možnost odchýlení řezných podmínek od doporučení výrobce, konkrétně řezná rychlost. Výsledky tohoto porovnání však ukázaly, že není vhodné řeznou rychlost variovat. Vyšší i nižší

hodnoty řezné rychlosti vedly k většímu silovému zatížení. Vliv na drsnost povrchu byl také potvrzen, ale s poněkud nejednoznačným výsledkem. Různé řezné rychlosti měly na vyhodnocované oblasti často protichůdný vliv. V oblasti výstupku se například hodnota parametru snížila, ale v oblasti prohlubně došlo k nárůstu. To způsobilo větší rozdíly mezi oblastmi při daných podmínkách. Z tohoto důvodu je změna řezné rychlosti nevhodný způsob optimalizace procesu.

Maximální krok se ukázal jako klíčový parametr pro optimalizaci procesu, protože má výrazný vliv na řezný proces. Jeho snížení může vést ke snížení silového zatížení, ovšem za cenu zvýšení časové náročnosti. Jeho zvýšení naopak ke snížení všech zkoumaných parametrů drsnosti. A potencionálně i k získání homogenního povrchu. Ať už by byl tento parametr optimalizován z jakéhokoliv důvodu, nebyl u něj zjištěn negativní vliv na přesnost výrobku. Vliv tohoto parametru by tak měl být podroben dalšímu zkoumání.

9. PŘÍNOS PRO VĚDU A PRAXI

Disertační práce přináší důležité poznatky pro využití soudečkových nástrojů v praxi, což je zásadní pro další rozvoj obráběcích procesů, zejména jejich efektivity. Na základě provedených analýz a z nich prezentovaných grafických zobrazení výsledků, je možné určit potřebné řezné podmínky k dosažení požadovaných výstupů. Tyto zahrnují nejen řezné síly, ale také klíčové parametry drsnosti povrchů. Zpracování dat umožňuje jasně pochopit, jak konkrétní nastavení ovlivňuje finální vlastnosti obráběného povrchu a tím přispívá k efektivnějšímu plánování výrobních procesů.

V práci byly popsány vybrané způsoby, jak lze obráběcí proces do jisté míry optimalizovat, a zkoumá, jaké konkrétní dopady mají různé přístupy na samotný proces výroby tak i na výsledný povrch. Popisuje nejen potenciální výhody a nevýhody použití soudečkových nástrojů, ale také nabízí konkrétní návrhy na zlepšení.

Jedním z nejdůležitějších přínosů této práce je popis vzniku heterogenního povrchu při použití soudečkových nástrojů. Tento fenomén má zásadní význam pro průmyslovou praxi, protože s sebou přináší nutnost specifikace místa, kde má být měřena drsnost povrchu. Protože jak ukázaly výsledky, případné nevhodné určení této oblasti, nebo její nedodržení, může vést k chybným závěrům ohledně kvality povrchu a tím i ke špatné interpretaci obráběcího procesu.

Pro vědeckou komunitu představuje tato práce rozšíření dosavadních studií soudečkových nástrojů a jejich využití při různorodých podmínkách. Detailní popsání vlivu klíčových parametrů, jako jsou posuv na zub nebo přídavek na obrobení, na řezné síly a drsnost povrchu a poskytuje obsáhlou databázi výsledků. Získané údaje mohou být nejen porovnány s výsledky jiných nástrojů, ale zároveň sloužit jako základ pro další experimenty, které by mohly zahrnovat například variace materiálů, geometrie nástrojů či odlišné technologické podmínky. Dojde tak k postupnému rozšiřování znalostní týkající se těchto nástrojů, což v konečném důsledku přispívá k lepšímu pochopení jejich vlivu na obráběné povrchy.

Celkově práce přináší významný přínos jak pro průmyslovou praxi, tak pro vědecké bádání, a otevírá nové možnosti pro optimalizaci a zlepšování obráběcích procesů.

10. ZÁVĚR

Práce se zabývala analýzou a praktickým využitím soudečkových nástrojů při obrábění volných ploch, přičemž hlavní pozornost byla věnována vlivu posuvu na zub a přídavku na obrobení na silové zatížení nástroje a výslednou kvalitu povrchu.

V teoretické části byly představeny základní pojmy související s použitými nástroji a technologiemi. To zahrnovalo přehled současných znalostí o obrábění volných ploch, včetně charakteristik soudečkových nástrojů a strategií frézování. Analýza odborné literatury identifikovala aktuální trendy, přičemž se ukázalo, že existuje omezené množství výzkumů zaměřených na jejich chování při různých řezných podmínkách a možnostech optimalizace procesů.

Vzhledem k unikátnosti geometrie použitých nástrojů byly navrženy testovací plochy, které byly obráběny dvěma typy soudečkových nástrojů za různých řezných podmínek. Experimenty byly provedeny s využitím metodiky za podmínek opakovatelnosti, která zahrnovala měření silového zatížení, analýzu kvality výsledného povrchu a vyhodnocení přesnosti obrobení.

V experimentální části byly představeny výsledky provedených obráběcích testů. Bylo zjištěno, že zvýšení posuvu na zub vede ke snížení časové náročnosti procesu, avšak zároveň ke zhoršení parametrů drsnosti povrchu. Naopak snížení přídavku na obrobení mělo pozitivní vliv, což se projevilo nižšími hodnotami drsnosti.

Při analýze silového zatížení bylo zjištěno, že volba nástroje a řezných podmínek má zásadní vliv na stabilitu procesu. Například nástroj R250 vykázal o 10 % nižší řezné síly ve srovnání s R500, což potvrzuje jeho vhodnost pro aplikace, kde je prioritou snížení mechanického namáhání na nástroj a obrobek.

Výsledky byly detailně analyzovány a diskutovány zejména s ohledem na rozdíly mezi jednotlivými nástroji a jejich využitelnost v praxi. Popsány byly trendy získaných parametrů a jejich souvislost s řeznými podmínkami, přičemž se ukázalo, že správná kombinace posuvu a přídavku na obrobení může významně ovlivnit nejen kvalitu povrchu, ale i celkovou efektivitu obrábění.

Pozornost byla věnována také možnostem optimalizace procesu, které zahrnují úpravu řezných strategií. Vzhledem k pozitivním výsledkům dosaženým při určitých kombinacích parametrů se nabízí prostor pro další výzkum zaměřený na využití těchto poznatků v průmyslové praxi.

Závěrem lze konstatovat, že soudečkové nástroje představují efektivní nástroj pro obrábění geometricky složitých ploch. Díky jejich specifické geometrii umožňují dosažení vysoké kvality povrchu, avšak jejich použití vyžaduje pečlivou volbu řezných parametrů. Jedním z klíčových omezení je heterogenita získaného povrchu, což klade vyšší nároky na optimalizaci procesu. Výsledky experimentů ukázaly, že správným nastavením parametrů lze dosáhnout nejen kvalitního povrchu, ale také snížení silového zatížení nástroje a zvýšení efektivity výroby.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

[1] SCOTT, P. J. a X. JIANG. Freeform surface characterisation: theory and practice. *Journal of Physics: Conference Series* [online]. 2014, 483(1), 012005 [vid. 2024-01-20]. ISSN 1742-6596. Dostupné z: doi:10.1088/1742-6596/483/1/012005

[2] CAMPBELL, Richard J. a Patrick J. FLYNN. A Survey Of Free-Form Object Representation and Recognition Techniques. *Computer Vision and Image Understanding* [online]. 2001, 81(2), 166–210 [vid. 2023-09-28]. ISSN 1077-3142. Dostupné z: doi:10.1006/CVIU.2000.0889

[3] LASEMI, Ali, Deyi XUE a Peihua GU. Recent development in CNC machining of freeform surfaces: A state-of-the-art review. *Computer-Aided Design* [online]. 2010, 42(7), 641–654 [vid. 2023-09-17]. ISSN 0010-4485. Dostupné z: doi:10.1016/J.CAD.2010.04.002

[4] ZHU, Jiang, Keisuke NOMURA, Tomohisa TANAKA a Yoshio SAITO. Tool Path Planning Assist System for Freeform Surface Machining. *Key Engineering Materials* [online]. 2010, 447–448, 321–325 [vid. 2023-10-17]. ISSN 1662-9795. Dostupné z: doi:10.4028/WWW.SCIENTIFIC.NET/KEM.447-448.321

[5] GREŠOVÁ, Zuzana, Peter IŽOL, Marek VRABEL', L'Uboš KAŠČÁK, Jozef BRINDZA a Michal DEMKO. Influence of Ball-End Milling Strategy on the Accuracy and Roughness of Free Form Surfaces. *Applied Sciences 2022, Vol. 12, Page 4421* [online]. 2022, 12(9), 4421 [vid. 2023-10-17]. ISSN 2076-3417. Dostupné z: doi:10.3390/APP12094421

[6] *Secrets of 5-Axis Machining PDF / PDF / Rotation Around A Fixed Axis / Machines* [online]. [vid. 2023-10-06]. Dostupné z: <https://www.scribd.com/document/452157161/Secrets-of-5-Axis-Machining-pdf>

[7] LUO, Ming, Dongqing YAN, Baohai WU a Dinghua ZHANG. Barrel cutter design and toolpath planning for high-efficiency machining of freeform surface. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. 2016, 85(9–12), 2495–2503 [vid. 2023-12-31]. ISSN 14333015. Dostupné z: doi:10.1007/S00170-015-8113-Z/METRICS

[8] LI, Yingguang, Chen Han LEE a James GAO. From computer-aided to intelligent machining: Recent advances in computer numerical control machining research. <http://dx.doi.org/10.1177/0954405414560622>

[online]. 2015, 229(7), 1087–1103 [vid. 2023-10-17]. ISSN 20412975. Dostupné z: doi:10.1177/0954405414560622

[9] SADÍLEK, Marek a Zuzana SADÍLKOVÁ. Vysoká škola báňská-Technická univerzita Ostrava POČÍTAČOVÁ PODPORA PROCESU OBRÁBĚNÍ učební text. 2012.

[10] *BONYOLULT FELÜLETEK TÖBBTENGELYŰ (3-5D) MEGMUNKÁLÁSA (Dr - ppt letölteni* [online]. [vid. 2023-10-06]. Dostupné z: <https://slideplayer.hu/slide/2182759/>

[11] VU, Duy Duc, Frédéric MONIES a Walter RUBIO. A new optimization tool path planning for 3-axis end milling of free-form surfaces based on efficient machining intervals. *AIP Conference Proceedings* [online]. 2018, 1960(1) [vid. 2023-11-18]. ISSN 15517616. Dostupné z: doi:10.1063/1.5034907/887408

[12] WEI, Eing Jer a Ming Chang LIN. Study on general analytical method for CNC machining the free-form surfaces. *Journal of Materials Processing Technology* [online]. 2005, 168(3), 408–413 [vid. 2023-11-18]. ISSN 0924-0136. Dostupné z: doi:10.1016/J.JMATPROTEC.2004.11.009

[13] MGHHERONY, Abdul Wahab a Balázs MIKÓ. Simulation of the Working Diameter in 3-Axis Ball-end Milling of Free Form Surface. *Tehnički vjesnik* [online]. 2022, 29(4), 1164–1170 [vid. 2023-11-26]. ISSN 1330-3651. Dostupné z: doi:10.17559/TV-20210719181212

[14] GREŠOVÁ, Zuzana, Peter IŽOL, Marek VRABEL', L'Uboš KAŠČÁK, Jozef BRINDZA a Michal DEMKO. Influence of Ball-End Milling Strategy on the Accuracy and Roughness of Free Form Surfaces. *Applied Sciences* 2022, Vol. 12, Page 4421 [online]. 2022, 12(9), 4421 [vid. 2023-11-18]. ISSN 2076-3417. Dostupné z: doi:10.3390/APP12094421

[15] *Sculptured Surface Machining: Theory and applications - Byoung K. Choi, Robert B. Jerard - Knihy Google* [online]. [vid. 2023-10-02]. Dostupné z: https://books.google.ro/books?hl=cs&lr=&id=KRUGCAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR9&ots=QN7gb1IKdf&sig=PtZiVfgBE-gf1eWniQyn7-1ooSs&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false

[16] *CAM systémy a výroba tvarových ploch* [online]. [vid. 2023-10-06]. Dostupné z: <https://www.cad.cz/strojirenstvi/38-strojirenstvi/2321-cam-systemy-a-vyroba-tvarovych-ploch.html>

[17] BOZ, Y., H. ERDIM a I. LAZOGLU. Modeling Cutting Forces for 5-Axis Machining of Sculptured Surfaces *. 2010.

[18] ZHAO, Jibin, Bo ZHONG, Qiang ZOU a Hongjun LIU. Tool orientation planning for five-axis CNC machining of open free-form surfaces. *Journal of Systems Science and Complexity* [online]. 2013, 26(5), 667–675 [vid. 2023-10-22]. ISSN 10096124. Dostupné z: doi:10.1007/S11424-013-3173-3/METRICS

[19] SADÍLEK, Marek, Zdeněk PORUBA, Lenka ČEPOVÁ a Michal ŠAJGALÍK. Increasing the Accuracy of Free-Form Surface Multiaxis Milling. *Materials 2021, Vol. 14, Page 25* [online]. 2020, 14(1), 25 [vid. 2023-11-26]. ISSN 1996-1944. Dostupné z: doi:10.3390/MA14010025

[20] WANG, Jun, Zhigang WANG, Weidong ZHU a Yingfeng JI. Recognition of freeform surface machining features. *Journal of Computing and Information Science in Engineering* [online]. 2010, 10(4) [vid. 2023-12-30]. ISSN 15309827. Dostupné z: doi:10.1115/1.3527075/398356

[21] ATTENE, Marco, Bianca FALCIDIENO a Michela SPAGNUOLO. Hierarchical mesh segmentation based on fitting primitives. *Visual Computer* [online]. 2006, 22(3), 181–193 [vid. 2023-12-30]. ISSN 01782789. Dostupné z: doi:10.1007/S00371-006-0375-X

[22] KATZ, Sagi a Ayellet TAL. Hierarchical mesh decomposition using fuzzy clustering and cuts. *ACM Transactions on Graphics (TOG)* [online]. 2003, 22(3), 954–961 [vid. 2023-12-30]. ISSN 07300301. Dostupné z: doi:10.1145/882262.882369

[23] MENG, Fan Jun, Zhi Tong CHEN, Ru Feng XU a Xun LI. Optimal barrel cutter selection for the CNC machining of blisk. *Computer-Aided Design* [online]. 2014, 53, 36–45 [vid. 2023-12-31]. ISSN 0010-4485. Dostupné z: doi:10.1016/J.CAD.2014.03.006

[24] KÄSEMODEL, Rodrigo Berretta, Adriano Fagali DE SOUZA, Rodrigo VOIGT, Igor BASSO a Alessandro Roger RODRIGUES. CAD/CAM interfaced algorithm reduces cutting force, roughness, and machining time in free-form milling. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. 2020, 107(3–4), 1883–1900 [vid. 2023-11-26]. ISSN 14333015. Dostupné z: doi:10.1007/S00170-020-05143-X/FIGURES/17

[25] *Milling Process, Defects, Equipment* [online]. [vid. 2023-09-28]. Dostupné z: <https://www.custompartnet.com/wu/milling>

[26] KOČMAN, Karel. *Technologické procesy obrábění*. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011.

[27] *Difference Between Feed Rate and Cutting Speed | RapidDirect Blog* [online]. [vid. 2023-09-28]. Dostupné z: <https://www.rapiddirect.com/blog/difference-between-feed-rate-and-cutting-speed/>

[28] *Turning, milling and grinding processes : Byrne, Patrick : Free Download, Borrow, and Streaming : Internet Archive* [online]. [vid. 2023-10-02]. Dostupné z: <https://archive.org/details/turningmillinggr0000byrn/page/n4/mode/1up>

[29] *Down milling vs. up milling* [online]. [vid. 2023-10-02]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/en-gb/knowledge/milling/down-milling-vs-up-milling>

[30] *Quickgrind Eliminator – Just another WordPress site* [online]. [vid. 2024-01-01]. Dostupné z: <https://www.barreltools.com/>

[31] *Solid carbide barrel milling cutter GARANT PPC | Hoffmann Group* [online]. [vid. 2023-10-06]. Dostupné z: <https://www.hoffmann-group.com/GB/en/houk/areas-of-application/machining/solid-carbide-barrel-milling-cutter-garant-ppc/e/68093/>

[32] *Solid carbide barrel milling cutter GARANT PPC | Hoffmann Group* [online]. [vid. 2024-01-01]. Dostupné z: <https://www.hoffmann-group.com/GB/en/houk/areas-of-application/machining/solid-carbide-barrel-milling-cutter-garant-ppc/e/68093/>

[33] *Parabolic Performance Cutting world première - PES Media* [online]. [vid. 2023-10-06]. Dostupné z: <https://www.pesmedia.com/parabolic-performance-cutting-world-premiere/>

[34] *Get With The Program: Barrel-cutter CAM strategies | Cutting Tool Engineering* [online]. [vid. 2023-10-06]. Dostupné z: <https://www.ctemag.com/news/articles/get-program-barrel-cutter-cam-strategies>

[35] BRYCHTA, Josef, Robert ČEP, Marek SADÍLEK, Lenka PETŘKOVSKÁ a Jana NOVÁKOVÁ. *Vysoká škola báňská-Technická univerzita Ostrava NOVÉ SMĚRY V PROGRESIVNÍM OBRÁBĚNÍ učební text*. 2007.

[36] FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. ISBN 80-214-2374-9.

[37] KOČMAN, Karel a Jaroslav PROKOP. *Technologie obrábění*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2005. ISBN 80-214-3068-0.

[38] *Měříte správně strukturu povrchu?* | *MM Průmyslové spektrum* [online]. [vid. 2023-10-05]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/merite-spravne-strukturu-povrchu>

[39] B46.1-2019, ASME. Surface Texture, Surface Roughness, Waviness and Lay; ASME B46.1-2009. *The American Society of Mechanical Engineers, An American National Standard* [online]. 2020, 144 [vid. 2023-10-05]. Dostupné z: <https://www.asme.org/codes-standards/find-codes-standards/b46-1-surface-texture>

[40] SVOBODA, Pavel, Jan BRANDEJS a Jiří DVOŘÁČEK. *Základy konstruování*. Vydání šesté. Brno: CERM, Akademické nakladatelství, 2015. ISBN 978-80-7204-921-9.

[41] *The definition of surface roughness - Adapa - adaptive moulds* [online]. [vid. 2023-10-03]. Dostupné z: <https://adapamoulds.com/the-definition-of-surface-roughness/>

[42] *Surface Waviness - an overview | ScienceDirect Topics* [online]. [vid. 2023-10-05]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/surface-waviness>

[43] GRZESIK, Wit. Surface Integrity. *Advanced Machining Processes of Metallic Materials* [online]. 2017, 533–561 [vid. 2023-10-05]. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-444-63711-6.00020-X

[44] *JH744100T2R2R250.0Z4 SIRA* / *Seco Tools* [online]. [vid. 2025-01-19]. Dostupné z: https://www.secotools.com/article/p_10044926?language=en

[45] *TK soudečková fréza, kónický tvar $\alpha/2 = 18^\circ$ PPC, TiAlN, $\varnothing f8$ DC / R2: 12/500mm* / *Hoffmann Group* [online]. [vid. 2025-01-19]. Dostupné z: <https://www.hoffmann-group.com/CZ/cs/hot/p/207532-12%402F500#productDetails>

[46] *JH734100X2R2R85.0Z4 SIRA* / *Seco Tools* [online]. [vid. 2025-01-19]. Dostupné z: https://www.secotools.com/article/p_10044785?language=en

[47] *TK soudečková fréza, tangenciální tvar PPC, TiAlN, øf8 DC / R2: 6/100mm | Hoffmann Group* [online]. [vid. 2025-01-19]. Dostupné z: <https://www.hoffmann-group.com/CZ/cs/hot/p/207525-6%402F100>

[48] *1.1730 tool steel at Meusburger* [online]. [vid. 2023-10-09]. Dostupné z: <https://www.meusburger.com/EN/US/material-grades/11730-tool-steel>

[49] *C45U/1.1730 - Sale of quality steels* [online]. [vid. 2023-10-09]. Dostupné z: <https://akrosta.pl/en/stale/1-1730c45u/>

[50] *DMU 50 3rd Generation - DMG MORI UK* [online]. [vid. 2023-10-15]. Dostupné z: https://uk.dmgmori.com/products/machines/milling/5-axis-milling/dmu/dmu-50?_gl=1*dn1h7o*_ga*MzQwODk4MDkyLjE2OTczOTQ1MzA.*_ga_XQ3E6CJXX5*MTY5NzY5NDUzMC4xLjEuMTY5NzY5NDUzNS4wLjAuMA..

[51] *Multicomponent dynamometers | Kistler* [online]. [vid. 2023-10-15]. Dostupné z: <https://www.kistler.com/US/en/cp/multicomponent-dynamometers-9129a/P0000606>

[52] *Digitální mikroskop 5303-AF103 Insize - INSIZE* [online]. [vid. 2025-01-19]. Dostupné z: <https://www.insz.eu/merici-mikroskopy/digitalni-mikroskop-5303-af103-insize/>

[53] *Měřicí, kontrolní a testovací stroje, měřidla, optické přístroje, snímače, měřící ústředny - Fakulta technologická* [online]. [vid. 2025-01-19]. Dostupné z: <https://ft.utb.cz/ustav-vyrobnihoinzenyrstvi/vedaavyzkum/pristrojovevybaveni/merici-kontrolni-a-testovaci-stroje>

[54] *ATOS Triple Scan Profesionální 3D optický skener 3D souřadnicové měření Skenování a inspekce Kontrola kvality výroby a reverzní inženýrství.* nedatováno.

[55] *ZEISS CONTURA - Spolehlivé zajištění kvality* [online]. [vid. 2025-01-19]. Dostupné z: <https://www.zeiss.cz/metrologie/produkty/systemy/souradnicove-merici-stroje/portalove-souradnicove-merici-stroje/contura-2019.html>

[56] *How to Determine Realistic Tolerances for Plastic Injection Molded Parts* [online]. nedatováno [vid. 2025-01-25]. Dostupné z: www.injectionmoldingdivision.org

[57] *Dimensional Tolerancing - Molded Dimensions Group* [online]. [vid. 2025-01-25]. Dostupné z: <https://moldedgroup.com/dimensional-tolerancing/>

[58] *Injection Molding Tolerances | The Ultimate Guide* [online]. [vid. 2025-01-25]. Dostupné z: <https://www.fictiv.com/articles/injection-molding-tolerances-an-in-depth-look>

[59] YANG, Yi Jun, Wei ZENG a Xiang Xu MENG. Conformal freeform surfaces. *Computer-Aided Design* [online]. 2016, 81, 48–60 [vid. 2025-03-24]. ISSN 0010-4485. Dostupné z: doi:10.1016/J.CAD.2016.09.003

[60] YI, Xianzhong, Weiguo MA, Haiying QI, Zesheng YAN a Deli GAO. Equivalent normal curvature approach milling model of machining freeform surfaces. *Chinese Journal of Mechanical Engineering (English Edition)* [online]. 2008, 21(3), 52–57 [vid. 2025-03-25]. ISSN 10009345. Dostupné z: doi:10.3901/CJME.2008.03.052

[61] VYBOISHCHIK, A. V. Modelling Topology of Freeform Surfaces with Ball-end Milling. *Procedia Engineering* [online]. 2016, 150, 761–767 [vid. 2025-03-25]. ISSN 18777058. Dostupné z: doi:10.1016/J.PROENG.2016.07.103

[62] CHEUNG, C. F., L. B. KONG, W. B. LEE a S. TO. Modelling and simulation of freeform surface generation in ultra-precision raster milling. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture* [online]. 2006, 220(11), 1787–1801 [vid. 2025-03-25]. ISSN 09544054. Dostupné z: doi:10.1243/09544054JEM548

[63] LIU, Shujie, Tong ZHAO a Hui ZHANG. Research on Modeling and Application of Milling Process Information of Blisk Blade. *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)* [online]. 2022, 13455 LNAI, 297–306 [vid. 2025-03-25]. ISSN 16113349. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-031-13844-7_29

[64] JIANG, Yufeng, Minglong GUO, Guocai DU a Zhaocheng WEI. Cutting dynamics research on the five-axis machining of thin curved surface with barrel-taper-ball milling cutter. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. 2024, 131(7–8), 3905–3919 [vid. 2025-03-25]. ISSN 14333015. Dostupné z: doi:10.1007/S00170-024-13234-2

[65] YAO, Chang Feng, Yun Qi SUN, Liang TAN, Min Chao CUI, Ding Hua ZHANG a Jun Xue REN. Investigation of control method on blade

shape accuracy of blisk in vibration finishing. *Advances in Manufacturing* [online]. 2024 [vid. 2025-03-25]. ISSN 21953597. Dostupné z: doi:10.1007/S40436-024-00505-0

[66] ULUĞ, Derya, Şükran KATMER, Çağlar YAVAŞ, Ulvi ŞEKER a Mustafa KURT. Effects of Cutting Parameters in Fine Milling Processes of Blisk. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing* [online]. 2024 [vid. 2025-03-25]. ISSN 20054602. Dostupné z: doi:10.1007/S12541-024-01148-8

[67] XU, Rufeng, Xun LI, Guangming ZHENG, Xiang CHENG a Yebing TIAN. A radius compensation method of barrel tool based on macro variables in five-axis flank machining of sculptured surfaces. *International Journal of Production Research* [online]. 2020, 58(8), 2335–2351 [vid. 2025-03-25]. ISSN 1366588X. Dostupné z: doi:10.1080/00207543.2019.1627437

[68] OLVERA, D., E. ARTETXE, M. LUO a G. URBIKAIN. 5-axis milling of complex parts with barrel-shape cutter: Cutting force model and experimental validation [online]. 2020, 48, 528–532 [vid. 2025-03-25]. ISSN 23519789. Dostupné z: doi:10.1016/J.PROMFG.2020.05.079

[69] URBIKAIN, Gorka, Egoitz ARTETXE a Luis Norberto LÓPEZ DE LACALLE. Numerical simulation of milling forces with barrel-shaped tools considering runout and tool inclination angles. *Applied Mathematical Modelling* [online]. 2017, 47, 619–636 [vid. 2025-03-25]. ISSN 0307904X. Dostupné z: doi:10.1016/J.APM.2017.03.001

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

3D	Tří-dimenzionální
CAM	Počítačem podporovaná výroba
HFM	Vysoko posuvové obrábění
CNC	Číslicové řízení počítačem
CAD	Počítačem podporované projektování
resp.	Respektive
v_c	Řezná rychlost
v_f	Posuvová rychlost
π	Ludolfovo číslo
D	Průměr nástroje
n	Otáčky nástroje
f_z	Posuv na zub
z	Efektivní počet zubů
f_{ot}	Posuv na otáčku
ot.	otáčky
a_p	Axiální hloubka řezu
a_e	Radiální hloubka řezu
F	Síla
R	Řezný odpor
F_c	Řezná síla
F_f	Posuvová síla
F_p	Pasivní síla
P_c	Řezný výkon při obrábění
P_f	Výkon potřebný pro posuv
v_f	Rychlost posuvu

s	Posuv
a	hloubka
G	Štíhlostní poměr
γ	Úhel čela
SNOP	Stroj, nástroj, obrobek, přípravek
Tab.	Tabulka
DOE	Plánování experimentu
TK	Tvrdokovový
PPC	Parabolické výkonné řezání
μm	mikrometr

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1.1: Typické příklady obrábění volného tvaru kulovou frézou [9]</i>	11
<i>Obr. 1.2: 3osé obrábění [10]</i>	11
<i>Obr. 1.3: Zajištění stále tloušťky odebíraného materiálu [9]</i>	12
<i>Obr. 1.4: 5osé frézování válcovou frézou [10]</i>	13
<i>Obr. 1.5: Porovnání drsností povrchů [14]</i>	14
<i>Obr. 1.6: Naklápění nástroje při 5osém frézování [17]</i>	15
<i>Obr. 1.7: Rozdíl v geometriích nástrojů [23]</i>	16
<i>Obr. 2.1: Nesousledné frézování [29]</i>	18
<i>Obr. 2.2: Sousledné frézování [29]</i>	19
<i>Obr. 3.1: Tupý kónický tvar [31]</i>	19
<i>Obr. 3.2: Rovný tvar [31]</i>	20
<i>Obr. 3.3: Kónický tvar soudečkové frézy [31]</i>	20
<i>Obr. 3.4: Tangenciální tvar [31]</i>	20
<i>Obr. 3.5: Použití soudečkových fréz [32]</i>	20
<i>Obr. 3.6: Porovnání hloubky řezu kulové a soudečkové frézy [33]</i>	21
<i>Obr. 4.1: Působení síly F a odporu R [26]</i>	22
<i>Obr. 4.2: Vliv posuvu na řeznou sílu [37]</i>	24
<i>Obr. 5.1: Textura povrchu [41]</i>	28
<i>Obr. 6.1: Nástroj R250</i>	31
<i>Obr. 6.2: Nástroj R500</i>	32
<i>Obr. 6.3: Nástroj R85</i>	33
<i>Obr. 6.4: Nástroj R90</i>	33
<i>Obr. 6.5: Obráběcí centrum DMU 50 [50]</i>	35
<i>Obr. 6.6: Dynamometr Kistler 9129AA [51]</i>	36
<i>Obr. 6.7: Mikroskop Insize 5303-AF103</i>	37
<i>Obr. 6.8: Profilometr NewView 8000 [53]</i>	38
<i>Obr. 6.9: Plocha A</i>	39
<i>Obr. 6.10: Plocha B</i>	40
<i>Obr. 6.11: Upnutý polotovar</i>	40
<i>Obr. 6.12: Hrubování</i>	41
<i>Obr. 6.13: Zbytek materiálu po hrubování</i>	42
<i>Obr. 6.14: Dohrubování</i>	43
<i>Obr. 6.15: Nastavení přídavku na povrchu</i>	43
<i>Obr. 6.16: Analýza zbytků materiálu po dohrubování</i>	44
<i>Obr. 6.17: Upnutý polotovar k dynamometru</i>	45
<i>Obr. 6.18: Schématické zobrazení obrábění</i>	45
<i>Obr. 7.1: Dráhy tangenciálních nástrojů</i>	46
<i>Obr. 7.2: Analýza zbytku materiálu po dokončení tangenciálními nástroji</i>	47
<i>Obr. 7.3: Reprezentace řezných sil v softwaru Dynoware</i>	48
<i>Obr. 7.4: Výsledky řezných sil nástroje R85</i>	49
<i>Obr. 7.5: Výsledky řezných sil pro nástroj R90</i>	50
<i>Obr. 7.6: Plocha obrobena nástrojem R85</i>	52

<i>Obr. 7.7: Plocha obrobena nástrojem R90</i>	52
<i>Obr. 7.8: Sken plochy obrobenny R85</i>	53
<i>Obr. 7.9: Sken plochy obrobenny R90</i>	53
<i>Obr. 7.10: Vyhodnocovaná oblast plochy obrobena R85</i>	54
<i>Obr. 7.11: Vyhodnocovaná oblast plochy obrobena R90</i>	54
<i>Obr. 7.12: Ra – výstupek (obrobena R85)</i>	55
<i>Obr. 7.13: Ra – prohlubeň (obrobena R85)</i>	56
<i>Obr. 7.14: Ra – výstupek (obrobena R90)</i>	57
<i>Obr. 7.15: Ra – prohlubeň (obrobena R90)</i>	58
<i>Obr. 7.16: Rz – výstupek (obrobena R85)</i>	59
<i>Obr. 7.17: Rz – prohlubeň (obrobena R85)</i>	60
<i>Obr. 7.18: Rz – výstupek (obrobena R90)</i>	61
<i>Obr. 7.19: Rz – prohlubeň (obrobena R90)</i>	62
<i>Obr. 7.20: RSm – výstupek (obrobena R85)</i>	63
<i>Obr. 7.21: Rsm – prohlubeň (obrobena R85)</i>	64
<i>Obr. 7.22: RSm – výstupek (obrobena R90)</i>	65
<i>Obr. 7.23: RSm – prohlubeň (obrobena R90)</i>	66
<i>Obr. 7.24: Porovnání řezných sil při použití nástrojů R85 a R90</i>	67
<i>Obr. 7.25: Dráhy kónických nástrojů</i>	70
<i>Obr. 7.26: Analýza zbytku materiálu po dokončení kónickými nástroji</i>	71
<i>Obr. 7.27: Řezné síly nástroje R250</i>	72
<i>Obr. 7.28: Řezné síly nástroje R500</i>	73
<i>Obr. 7.29: Výsledky řezných sil nástroje R250</i>	74
<i>Obr. 7.30: Výsledky řezných sil nástroje R500</i>	74
<i>Obr. 7.31: Detail průběhu řezných sil při obrábění nástrojem R500</i>	76
<i>Obr. 7.32: Plocha obrobena R250</i>	76
<i>Obr. 7.33: Plocha obrobena R500</i>	77
<i>Obr. 7.34: 3D sken plochy obrobenny R250</i>	77
<i>Obr. 7.35: 3D sken plochy obrobenny R500</i>	78
<i>Obr. 7.36: Sken vyhodnocované oblasti obrobena R250</i>	79
<i>Obr. 7.37: Sken vyhodnocované oblasti obrobena R500</i>	79
<i>Obr. 7.38: Ra – výstupek (obrobena R250)</i>	80
<i>Obr. 7.39: Ra – prohlubeň (obrobena R250)</i>	81
<i>Obr. 7.40: Ra – výstupek (obrobena R500)</i>	83
<i>Obr. 7.41: Ra – prohlubeň (obrobena R500)</i>	83
<i>Obr. 7.42: Rz – výstupek (obrobena R250)</i>	85
<i>Obr. 7.43: Rz – prohlubeň (obrobena R250)</i>	86
<i>Obr. 7.44: Rz – výstupek (obrobena R500)</i>	87
<i>Obr. 7.45: Rz – prohlubeň (obrobena R500)</i>	88
<i>Obr. 7.46: RSm – výstupek (obrobena R250)</i>	89
<i>Obr. 7.47: Rsm – prohlubeň (obrobena R250)</i>	90
<i>Obr. 7.48: RSm – výstupek (obrobena R500)</i>	91
<i>Obr. 7.49: RSm – prohlubeň (obrobena R500)</i>	92
<i>Obr. 7.50: Porovnání řezných sil při použití nástrojů R250 a R500</i>	93

<i>Obr. 7.51: Navržení experimentů v softwaru Minitab</i>	96
<i>Obr. 7.52: Plocha získaná při 5. měření</i>	98
<i>Obr. 7.53: Vyhodnocovaná oblast plochy získané při 5. měření</i>	98
<i>Obr. 7.54: Plocha získaná při 1. měření</i>	99
<i>Obr. 7.55: Vyhodnocovaná oblast získaná při 1. měření</i>	99
<i>Obr. 7.56: 1. iterace DOE</i>	100
<i>Obr. 7.57: Finální iterace DOE</i>	101
<i>Obr. 7.58: Regresní model</i>	101
<i>Obr. 7.59: Regresní koeficienty</i>	102
<i>Obr. 7.60: Regresní rovnice</i>	102
<i>Obr. 7.61: Pokusná strategie obrábění plochy A</i>	103
<i>Obr. 7.62: Analýza pokusné strategie u plochy A</i>	104
<i>Obr. 7.63: Plocha A obrobena pokusnou strategií</i>	104
<i>Obr. 7.64: Vyhodnocovaná oblast plochy A obrobená pokusnou strategií</i>	105
<i>Obr. 7.65: Pokusná strategie obrábění plochy B</i>	106
<i>Obr. 7.66: Analýza pokusné strategie u plochy B</i>	106
<i>Obr. 7.67: Zvětšená plocha B obrobena pokusnou strategií</i>	107
<i>Obr. 7.68: Vyhodnocovaná oblast plochy B obrobená pokusnou strategií</i>	107
<i>Obr. 7.69: Nastavení maximálního kroku</i>	118
<i>Obr. 7.70: Porovnání hustoty řídicích bodů</i>	119
<i>Obr. 7.71: Řezné síly v závislosti na hustotě bodů</i>	121
<i>Obr. 7.72: Průběh řezných sil při nejmenším kroku</i>	121
<i>Obr. 7.73: Průběh sil při použití největšího kroku</i>	122
<i>Obr. 7.74: Detail řezných sil při nejmenším kroku</i>	123
<i>Obr. 7.75: Detail řezných sil při největším kroku</i>	123
<i>Obr. 7.76: Orientační systém dynamometru</i>	125
<i>Obr. 7.77: Poměr F_x/F_y v závislosti na maximálním kroku</i>	125
<i>Obr. 7.78: Trendy parametru R_a při změně hustoty bodů</i>	127
<i>Obr. 7.79: Trendy parametru R_z při změně hustoty bodů</i>	127
<i>Obr. 7.80: Trendy parametru RSM při změně hustoty bodů</i>	128
<i>Obr. 7.81: Sken vyhodnocované oblasti při kroku 1 %</i>	129
<i>Obr. 7.82: Sken vyhodnocované oblasti při kroku 8-10 %</i>	129
<i>Obr. 7.83: Sken vyhodnocované oblasti při kroku 25-30 %</i>	130
<i>Obr. 7.84: Měřené body</i>	131
<i>Obr. 7.85: Porovnání souřadnic osy Z</i>	132
<i>Obr. 7.86: Porovnání krabicových grafů</i>	132
<i>Obr. 7.87: Porovnání vybraných parametrů</i>	133

SEZNAM TABULEK

Tab. 6.1: Parametry nástroje R250 [44]	31
Tab. 6.2: Parametry nástroje R500 [45]	32
Tab. 6.3: Parametry nástroje R85 [46]	33
Tab. 6.4: Parametry nástroje R90 [47]	34
Tab. 6.5: Chemické složení oceli 1.1730 [48]	34
Tab. 6.6: Fyzikální vlastnosti oceli 1.1730 [49]	34
Tab. 6.7: Parametry obráběcího centra DMU 50 [50]	35
Tab. 7.1: Podmínky měření u tangenciálních nástrojů	47
Tab. 7.2: Časy obránění tangenciálními nástroji	48
Tab. 7.3: Porovnání řezných sil tangenciálních nástrojů	51
Tab. 7.4: Porovnání parametru Ra dosaženého nástrojem R85	57
Tab. 7.5: Porovnání parametru Ra dosaženého nástrojem R90	59
Tab. 7.6: Porovnání parametru Rz dosaženého nástrojem R85	61
Tab. 7.7: Porovnání parametru Rz dosaženého nástrojem R90	62
Tab. 7.8: Porovnání parametru RSm dosaženého nástrojem R85	64
Tab. 7.9: Porovnání parametru RSm dosaženého nástrojem R90	66
Tab. 7.10: Podmínky měření u kónických nástrojů	71
Tab. 7.11: Časy obrábění kónickými nástroji	72
Tab. 7.12: Porovnání řezných sil kónických nástrojů	75
Tab. 7.13: Porovnání parametru Ra dosaženého nástrojem R250	82
Tab. 7.14: Porovnání parametru Ra dosaženého nástrojem R500	84
Tab. 7.15: Porovnání parametru Rz dosaženého nástrojem R250	87
Tab. 7.16: Porovnání parametru Rz dosaženého nástrojem R500	88
Tab. 7.17: Porovnání parametru RSm dosaženého nástrojem R250	90
Tab. 7.18: Porovnání parametru RSm dosaženého nástrojem R500	92
Tab. 7.19: Vyšetřované parametry	96
Tab. 7.20: Faktorový plán	97
Tab. 7.21: Výsledky DOE	100
Tab. 7.22: Časová náročnost obrábění kulovou frézou	102
Tab. 7.23: Výsledná drsnost pokusné plochy	105
Tab. 7.24: Výsledná drsnost pokusného obrábění plochy B	108
Tab. 7.25: Vyhodnocení řezných sil při variující řezné rychlosti	110
Tab. 7.26: Vyhodnocení parametru Ra (výstupek) při variující řezné rychlosti	111
Tab. 7.27: Vyhodnocení parametru Ra (prohlubeň) při variující řezné rychlosti	112
Tab. 7.28: Vyhodnocení parametru Rz (výstupek) při variující řezné rychlosti	113
Tab. 7.29: Vyhodnocení parametru Rz (prohlubeň) při variující řezné rychlosti	114
Tab. 7.30: Vyhodnocení parametru RSm (výstupek) při variující řezné rychlosti	115
Tab. 7.31: Vyhodnocení parametru RSm (prohlubeň) při variující řezné rychlosti	116
Tab. 7.32: Délky programů	120
Tab. 7.33: Časy obrábění v závislosti na maximálním kroku	122
Tab. 7.34: První a poslední souřadnice 2. řezu	124
Tab. 7.35: Délka dráhy nástroje při 2. řezu	124

<i>Tab. 7.36. Parametry drsnosti v závislosti na maximálním kroku</i>	126
<i>Tab. 7.37: Maximum a minimum ze zkoumaných dat</i>	133
<i>Tab. 8.1: Porovnání rozptylů drsností</i>	136

PUBLIKAČNÍ AKTIVITY AUTORA

Kvalifikační práce

1. Hořava, Cyril. Programování a CNC výroba [online]. Zlín, 2019 [cit. 2024-01-20]. Dostupné z: <https://theses.cz/id/amybtv/>. Bakalářská práce. Univerzita Tomáše bati ve Zlíně, Fakulta technologická. Vedoucí práce doc. Ing. Ondřej Bílek, Ph.D.
2. Hořava, Cyril. Realizace výroby součásti na CNC obráběcím centru DMU 50 [online]. Zlín, 2021 [cit. 2024-01-20]. Dostupné z: <https://theses.cz/id/k1idmg/>. Diplomová práce. Univerzita Tomáše bati ve Zlíně, Fakulta technologická. Vedoucí práce doc. Ing. Ondřej Bílek, Ph.D.

Publikace Web of Science

1. Hořava, Cyril, Martin Řezníček a Martin Ovsík. Influence of the number of inserts used for face milling on cutting forces and surface roughnesss. Materials [online]. 2024, vol. 17, iss. 24 [cit. 2025-03-23]. ISSN 1996-1944. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/1996-1944/17/24/6052>.
2. Řezníček, Martin, Cyril Hořava a Martin Ovsík. Percentage ratios of cutting forces during high-reed face milling. Materials [online]. 2023, vol. 16, iss. 1 [cit. 2025-03-23]. ISSN 1996-1944. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/1996-1944/16/1/384>.

Ostatní publikace

1. Řezníček, Martin a Cyril Hořava. The influence of the choice of machining strategy on production technology. Manufacturing Technology [online]. 2024, vol. 24, iss. 1, s. 117-130. [cit. 2025-03-23]. ISSN 1213-2489. Dostupné z: https://journalmt.com/artkey/mft-202401-0012_the-influence-of-the-choice-of-machining-strategy-on-production-technology.php.

ODBORNÝ ŽIVOTOPIS AUTORA



Cyril Hořava

Datum narození: 22.6. 1997 | **Místo narození:** Rozstání, Česko | **Státní příslušnost:** Česká republika |

Pohlaví: Muž | **Telefonní číslo:** (+420) 731898431 (Mobilní telefon) | **E-mailová adresa:** horacy00@seznam.cz |

Adresa: Rozstání 30, 798 62, Rozstání, Česko (Domů)

● VZDĚLÁNÍ A ODBORNÁ PŘÍPRAVA

2021 – AKTUÁLNÍ Zlín

DOKTORSKÝ STUDIJNÍ PROGRAM, PH.D. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Obor studia Nástroje a procesy | **Úroveň podle evropského rámce kvalifikací (EQF)** Úroveň EQF 8

2019 – 2021 Zlín, Česko

MAGISTERSKÝ STUDIJNÍ PROGRAM, ING. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Obor studia Výrobní inženýrství | **Úroveň podle evropského rámce kvalifikací (EQF)** Úroveň EQF 7

2016 – 2019 Zlín, Česko

BAKALÁŘSKÝ STUDIJNÍ PROGRAM, BC. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Obor studia Technologická zařízení | **Úroveň podle evropského rámce kvalifikací (EQF)** Úroveň EQF 6

2012 – 2016 Prostějov, Česko

STŘEDOŠKOLSKÉ VZDĚLÁNÍ Střední odborná škola průmyslová a Střední odborné učiliště strojírenské

Obor studia Mechanik seřizovač | **Úroveň podle evropského rámce kvalifikací (EQF)** Úroveň EQF 4

● ZNALOST JAZYKŮ

Mateřský jazyk/jazyky: **ČEŠTINA**

Další jazyk(y):

	POROZUMĚNÍ		MLUVENÝ PROJEV		PSANÍ
	Poslech	Čtení	Samostatný ústní projev	Mluvená komunikace	
ANGLIČTINA	B2	C1	C1	B2	B2

Úroveň: A1 a A2: uživatel základů jazyka (začátečník), B1 a B2: samostatný uživatel (mírně pokročilý), C1 a C2: zkušený uživatel (pokročilý)

● AKADEMICKÁ ČINNOST

28.8. 2023 – 28.10. 2023

Mezinárodní mobilita - odborná stáž

Technical University of Cluj-Napoca
Faculty of Industrial Engineering, Robotics and Production Management
Projekt: Erasmus +

Výuka odborných předmětů na FT UTB (UVI)

CAD NX I
CAD NX II
Počítačová podpora konstrukce
CAD II

Člen řešitelského kolektivu

IGA/FT/2025/002
IGA/FT/2024/003
IGA/FT/2023/005
IGA/FT/2022/002
IGA/FT/2021/005