

Vliv řezných podmínek na dokončování obecných ploch soudečkovými nástroji

Ing. Cyril Hořava, Ph.D.

Teze disertační práce



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Teze 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, Ph.D.**

Studijní program: P0788D270012 / Nástroje a procesy

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

Plná verze disertační práce je dostupná v Knihovně UTB ve Zlíně.

ISBN 978-80-7678-341-6

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 rezné 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.....	5
1. SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY	8
1.1 Teorie obrábění volných ploch	8
1.1.1 3osé obrábění volných ploch	9
1.1.2 Víceosé obrábění volných ploch.....	10
1.2 Výzkum obrábění volných ploch.....	12
1.2.1 Generování drah nástroje.....	12
1.2.2 Orientace nástroje	13
1.2.3 Výběr geometrie nástroje.....	14
CÍLE PRÁCE.....	15
METODY ZPRACOVÁNÍ VÝSLEDKŮ.....	16
2. PŘÍPRAVA A REALIZACE EXPERIMENTŮ	17
2.1 Použité nástroje	17
2.1.1 Kónický tvar	17
2.1.2 Tangenciální tvar	18
2.2 Materiál	20
2.3 Zkušební vzorky.....	21
3. VÝSLEDKY	23
3.1 Tangenciální nástroje.....	23
3.1.1 Řezné síly.....	24
3.1.2 Drsnost.....	25
3.1.3 Vyhodnocení tangenciálních nástrojů	27
3.2 Kónické nástroje	29
3.2.1 Řezné síly.....	30
3.2.2 Drsnost.....	30
3.2.3 Vyhodnocení kónických nástrojů	33
3.3 Porovnání s kulovou frézou	35
3.3.1 Vyhodnocení porovnávací studie	36
3.4 Vliv maximálního kroku	37

3.4.1	Vliv maximálního kroku na drsnost.....	38
3.4.2	Vliv maximálního kroku na přesnost.....	39
3.4.3	Vyhodnocení vlivu maximálního kroku	40
4.	DISKUZE VÝSLEDKŮ.....	41
5.	PŘÍNOS PRO VĚDU A PRAXI.....	44
6.	ZÁVĚR.....	45
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	46
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	52
	SEZNAM OBRÁZKŮ	54
	SEZNAM TABULEK.....	55
	PUBLIKAČNÍ AKTIVITY AUTORA.....	56
	ODBORNÝ ŽIVOTOPIS AUTORA	57

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 „vytvarované“ 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

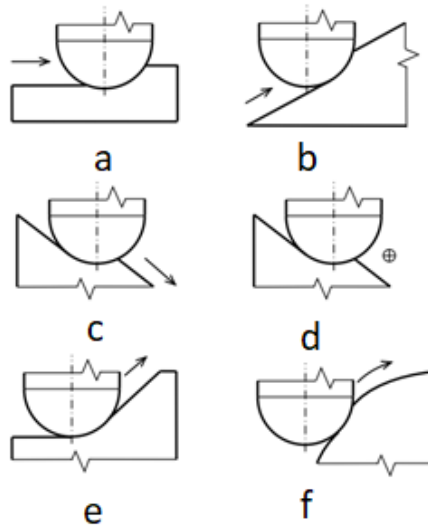
Frézování pomocí počítačového číslicového řízení (CNC) je považována za nejúčinnější, nejproduktivnější a nejflexibilnější způsob výroby těchto povrchů. Výroba volných ploch CNC stroji je realizována přímo na těchto strojích nebo je zprostředkovaně použit jako tvářecí nástroj (forma, zápustka, lisovací 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.

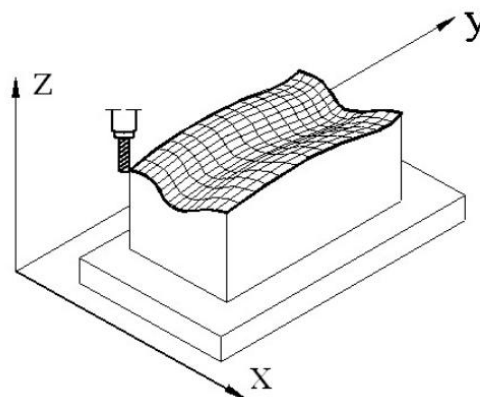
1.1.1 3osé obrábění volných ploch

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]

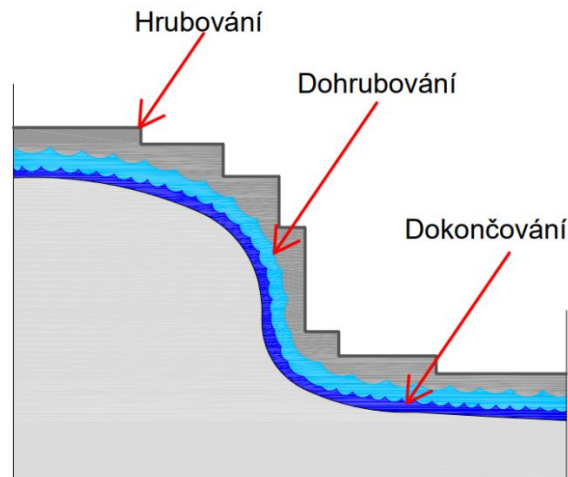
Příklad „a“ znázorňuje obrábění rovné plochy bez naklonění kulové frézy. Tento postup je značně nevýhodný, neboť v ose rotace je nulová řezná rychlost a nástroj v tomto bodě neobrábí, což vede k vyšší drsnosti obráběného povrchu. Příklady „b, c, d“ reprezentují obrábění ploch šikmých. Jedná se o vhodnější 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]

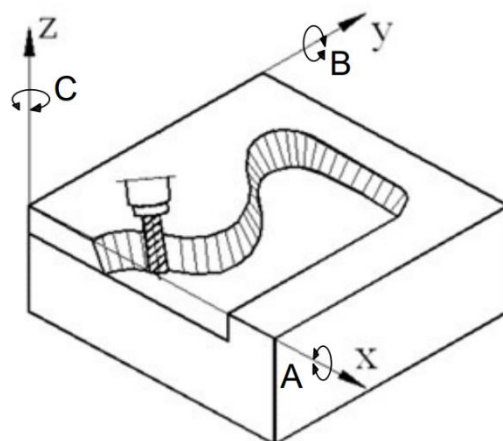
O 3osém obrábění volných ploch kulovými frézami bylo napsáno velké množství článků. Většinou se jedná o možnosti optimalizace drah nástroje. Např. Vu, et.al [11] ve své práci navrhli nový optimalizační postup obrábění volných ploch založený na zefektivnění obráběcích intervalů. Podobně postupovali i 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 vřetena, 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]

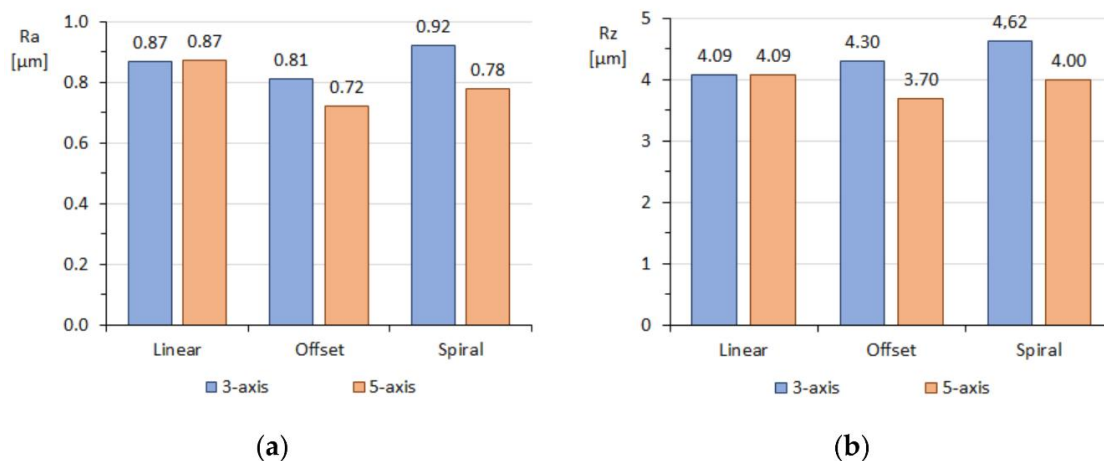


Obr. 1.4: 5osé frézování válcovou frézou [10]

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 dráh 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:

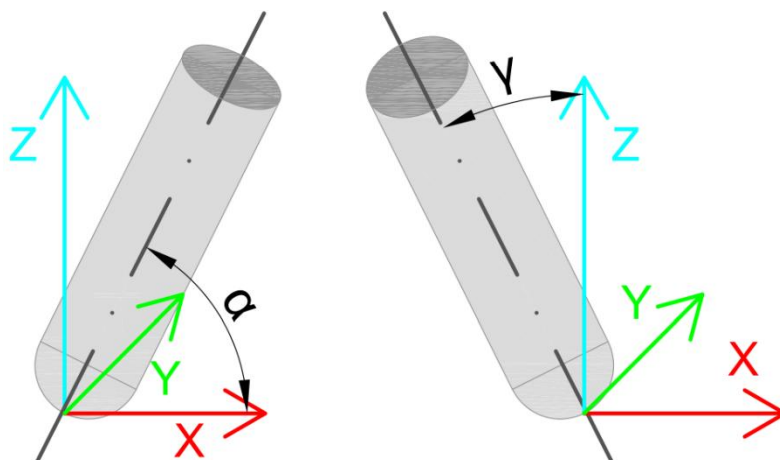
- jak zkrátit dobu simulace a skutečného obrábění,
- obrábění složených povrchů a neparametrických povrchů,
- inovativní techniky vedoucí ke snížení obráběcích a investičních nákladů.

[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.

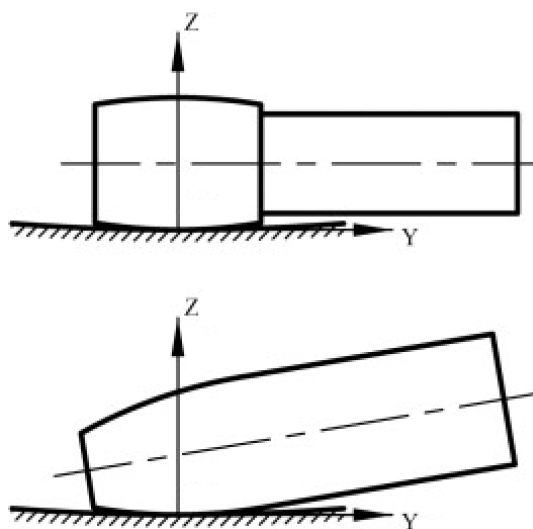
S rozvojem techniky geometrického modelování je možné produkovat stále složitější plochy. Z hlediska obrábění, není většinou možné obrobit celou plochu s jednou orientací nástroje a bývá nutné náklon měnit. Řada výzkumů se věnovala vývoji různých algoritmů, které mají sloužit k optimalizaci obrábění. 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 obrobit 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. Käsemödel 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 %.

CÍLE 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.

2. PŘÍPRAVA A REALIZACE EXPERIMENTŮ

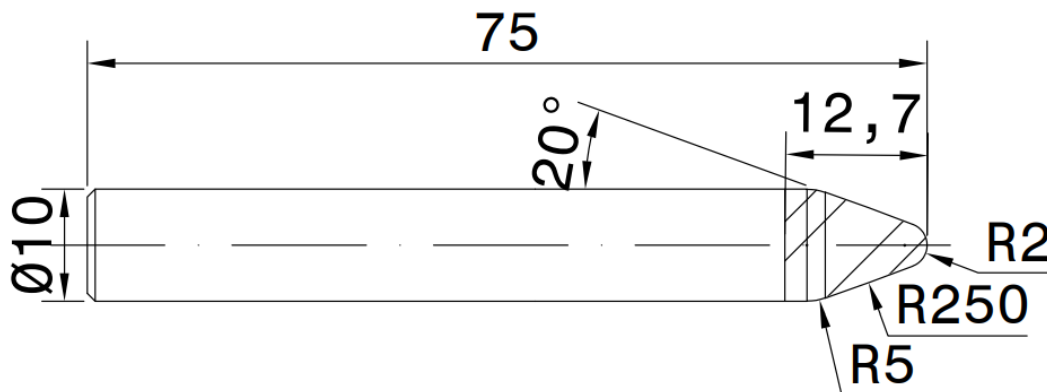
Příprava experimentů a jejich provedení se odvíjelo od charakteru použitých nástrojů. Soudečkové nástroje se nejčastěji uplatňují při obrábění obecných neboli volných (spline) ploch. Bylo tak nutné vytvořit plochy, které mají stejný charakter. Pro tyto plochy pak navrhnout strategii obrábění, při kterém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

2.1 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.

2.1.1 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. 2.1. Pro snazší orientaci ve výsledcích bude tento nástroj označován jako R250.



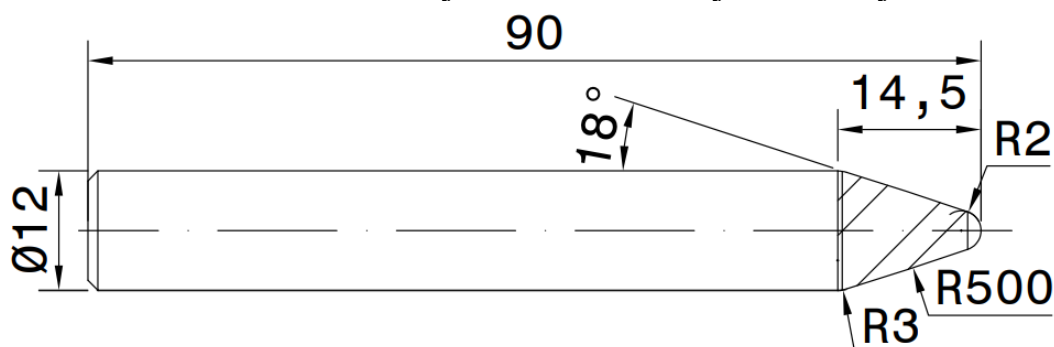
Obr. 2.1: Nástroj R250

Hlavní parametry nástroje R250 jsou uvedeny v Tab. 2.1.

Tab. 2.1: Parametry nástroje R250 [25]

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. 2.2. Tento nástroj bude označován jako nástroj R500.



Obr. 2.2: Nástroj R500

Hlavní parametry nástroje R500 jsou uvedeny v Tab. 2.2.

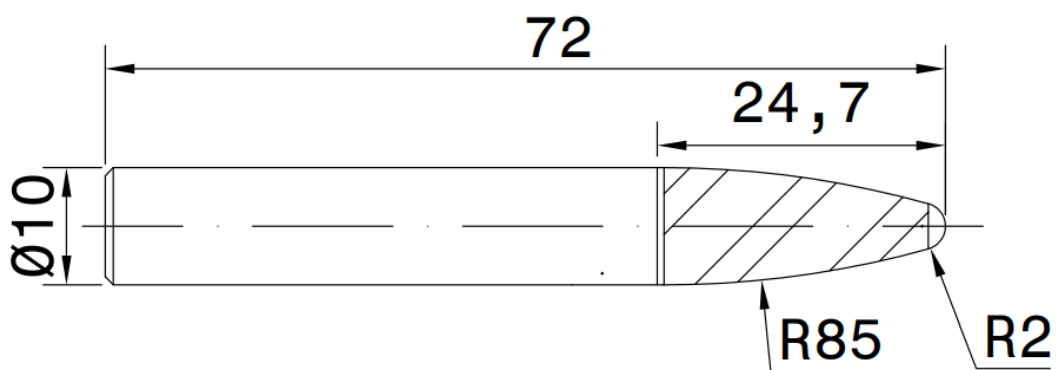
Tab. 2.2: Parametry nástroje R500 [26]

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.

2.1.2 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. 2.3. Označení tohoto nástroje je R85.



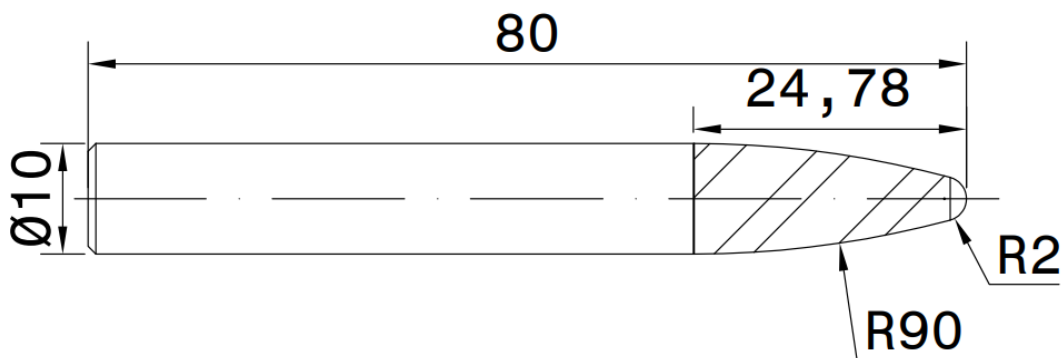
Obr. 2.3: Nástroj R85

Hlavní parametry nástroje R85 jsou uvedeny v Tab. 2.3

Tab. 2.3: Parametry nástroje R85 [27]

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. 2.4. Nástroj bude označován R90.



Obr. 2.4: Nástroj R90

Hlavní parametry nástroje R90 jsou uvedeny v Tab. 2.4.

Tab. 2.4: Parametry nástroje R90 [28]

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.

2.2 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. [29] Jeho chemické složení je uvedeno v Tab. 2.5 a jeho fyzikální vlastnosti pak v Tab. 2.6.

Tab. 2.5: Chemické složení oceli 1.1730 [29]

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. 2.6: Fyzikální vlastnosti oceli 1.1730 [30]

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.

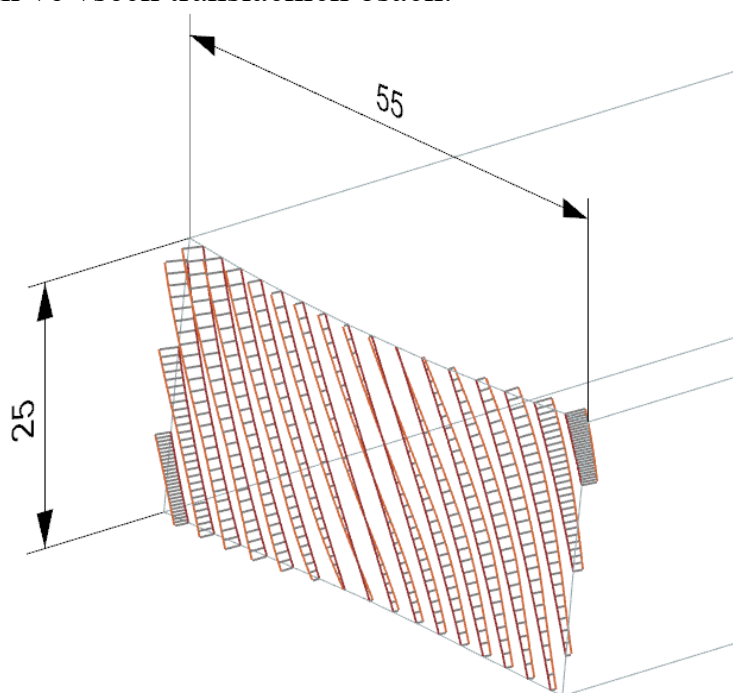
2.3 Zkušební vzorky

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.

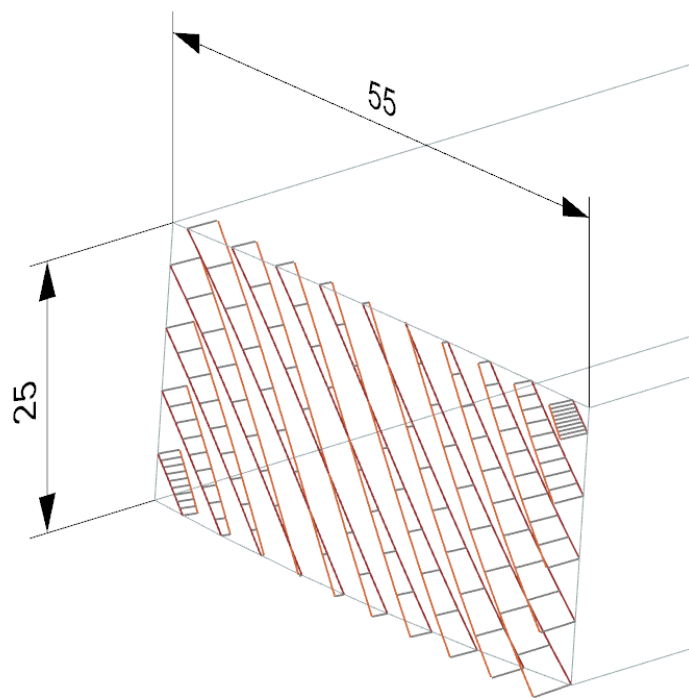
Generování testovacích ploch bylo provedeno navržením sítě bodů. Těmi byla následně proložena výsledná plocha. Tato plocha byla následně přenesena na model polotovaru. Zvoleným polotovarem byl hranol o průřezu 25x55 mm a délce 110 mm. Tvary těchto ploch jsou představeny níže.

Plocha A (Obr. 2.5) 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. 2.5: Plocha A

Plocha B (Obr. 2.6) 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. 2.6: Plocha B

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 (čelní plocha vzdálená 20 mm od čelistí). K upnutí polotovaru byl použit svěrák od firmy Lang.

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.

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.

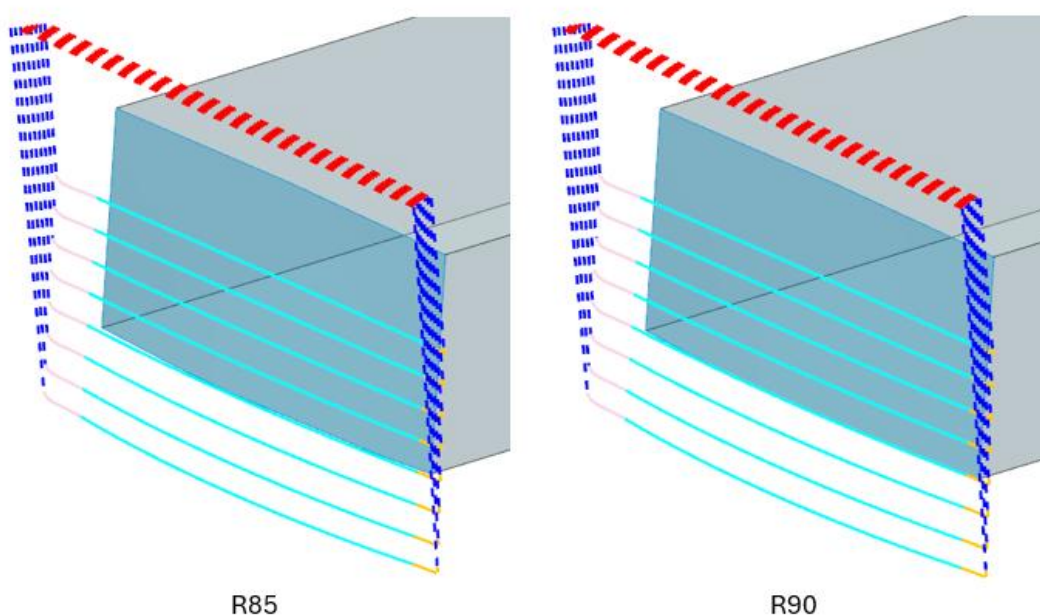
Při měření řezných sil nebylo nutné po každém obrábění oddělení obrobené plochy pro následnou analýzu. Proto bylo zvoleno postupné odebrání „vrstev“. Takto bylo možné provést analýzu řezných sil více efektivně. Navíc tak byl zajištěn konstantní přírůstek na obrobení a případné nedostatky z předchozích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

3. VÝSLEDKY

V následujících kapitolách budou prezentovány vybrané výsledky dosažené při provedených experimentech.

3.1 Tangenciální nástroje

Pro navrženou testovací geometrii byly navrženy strategie obrábění. Použitý software nabízí funkci swarf drive, která je určena pro generování drah soudečkových nástrojů. Náklon nástrojů od osy Z byl nastaven na 10 °. Tato hodnota se při simulacích ukázala jako nejvhodnější pro dosažení optimálních výsledků z hlediska zbytku materiálu. Pro obě operace byla v nastavení určena podmínka maximální výška scallop¹ na 0,1 mm. Na Obr. 3.1 je pak možné vidět porovnání vygenerovaných drah.



Obr. 3.1: Dráhy tangenciálních nástrojů

Z porovnání na Obr. 3.1 je patrné, že mezi nástroji, resp. drahami, které pro ně byly vygenerovány, neexistují prakticky žádné rozdíly. Oba nástroje potřebovaly pro obrobení 8 drah. Dráhy nástroje byly generovány tak, aby bylo použito pouze sousledné frézování. To bylo voleno z důvodu, že vede k lepší kvalitě povrchu a jelikož je obrábění soudečkovými nástroji dokončovací operací, kdy je žádoucí dosahovat co nejlepšího povrchu. Navíc přerušovaný proces řezání je možné lépe analyzovat.

Za účelem popsání vlivu rezných podmínek na obráběcí proces byly navrženy testovací podmínky. Ty jsou uvedeny v Tab. 3.1, byly voleny tak, aby dodržely doporučené hodnoty výrobcem.

¹ Maximum Scallop Height je vertikální vzdálenost mezi nejnižším a nejvyšším bodem přilehlých stop nástroje.

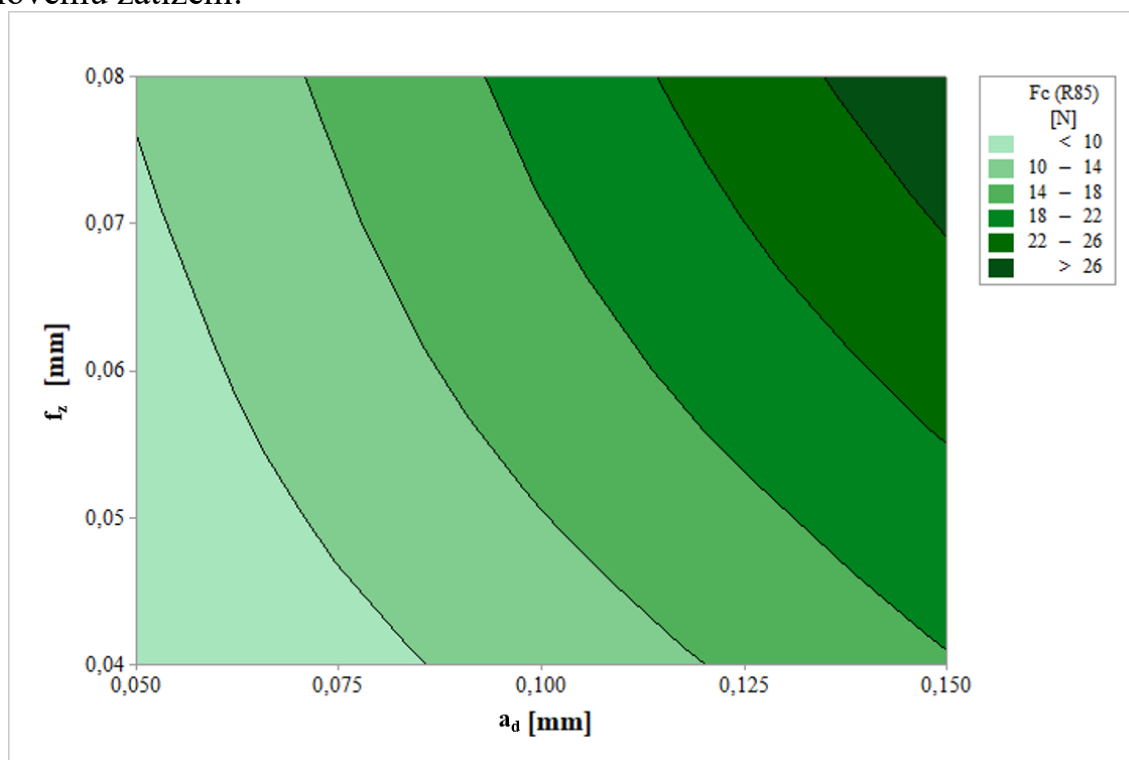
Tab. 3.1: Podmínky měření u tangenciálních nástrojů

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]

3.1.1 Řezné síly

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.

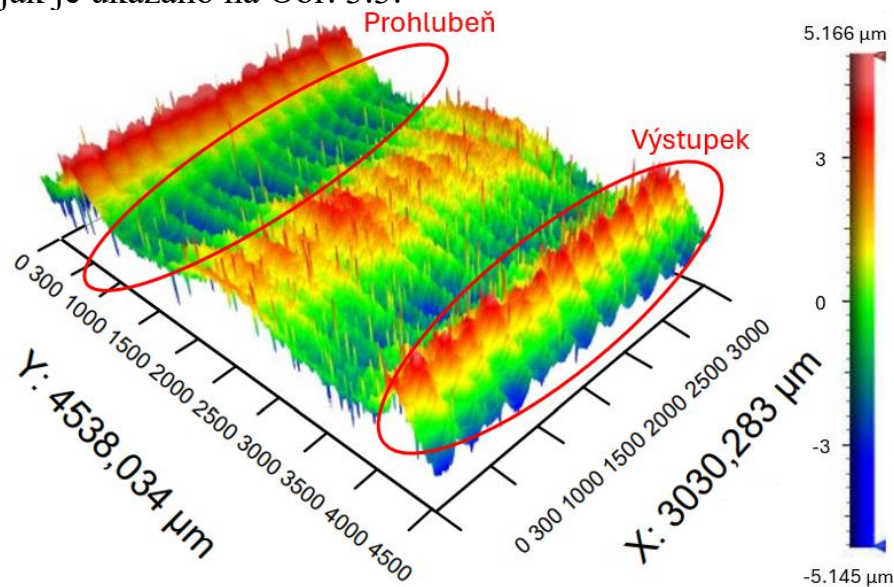
Z Obr. 3.2 je vidět, že závislost řezných sil je nejen na přídavku na obrábění, ale i na velikosti posuvu na zub. Projevil se tak synergický efekt proměnných. Z naklonění jednotlivých trendů ve svislém směru lze určit, že vliv přídavku na obrobení je ten dominantní. Změna směrem k vyšším posuvům je pak 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. 3.2: Výsledky řezných sil nástroje R85

3.1.2 Drsnost

Drsnost byla vyhodnocována za použití 3D optického profilometru. Na Obr. 3.3 je znázorněna naskenovaná a vyhodnocovaná oblast testovacích ploch. Pro zjednodušení budou dvě získané oblasti označovány jako oblast prohlubně a výstupku, jak je ukázáno na Obr. 3.3.

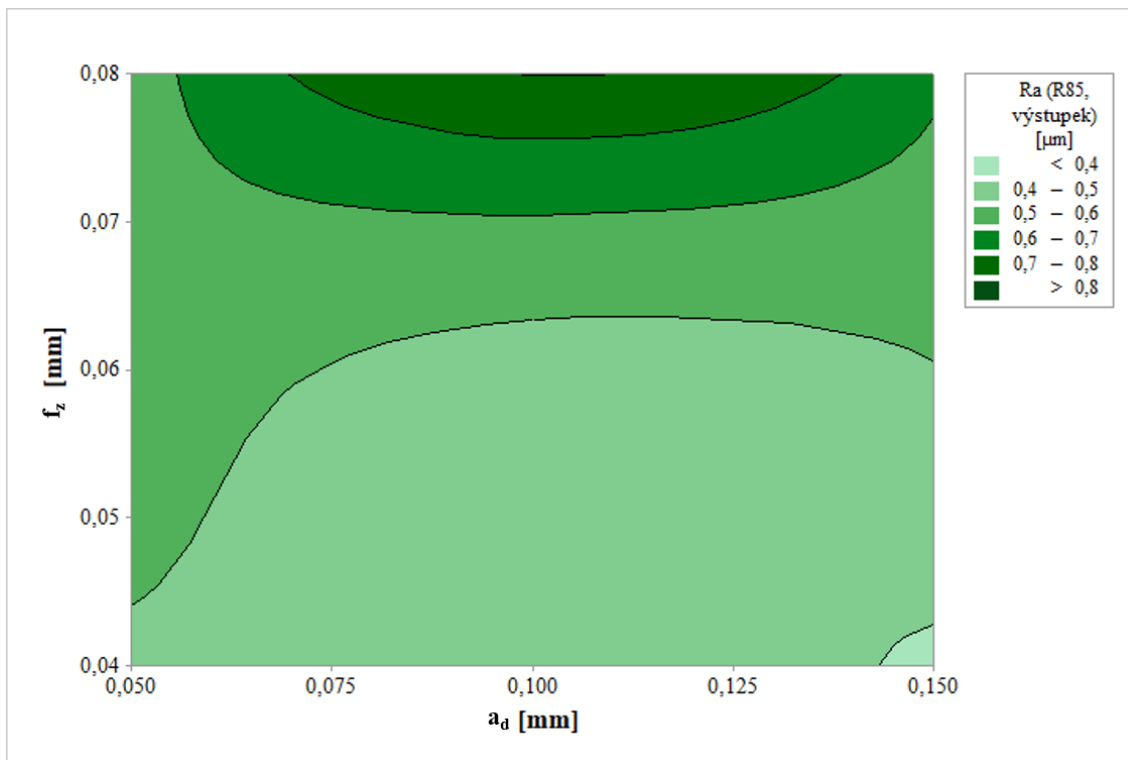


Obr. 3.3: Vyhodnocovaná oblast plochy obrobená R85

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

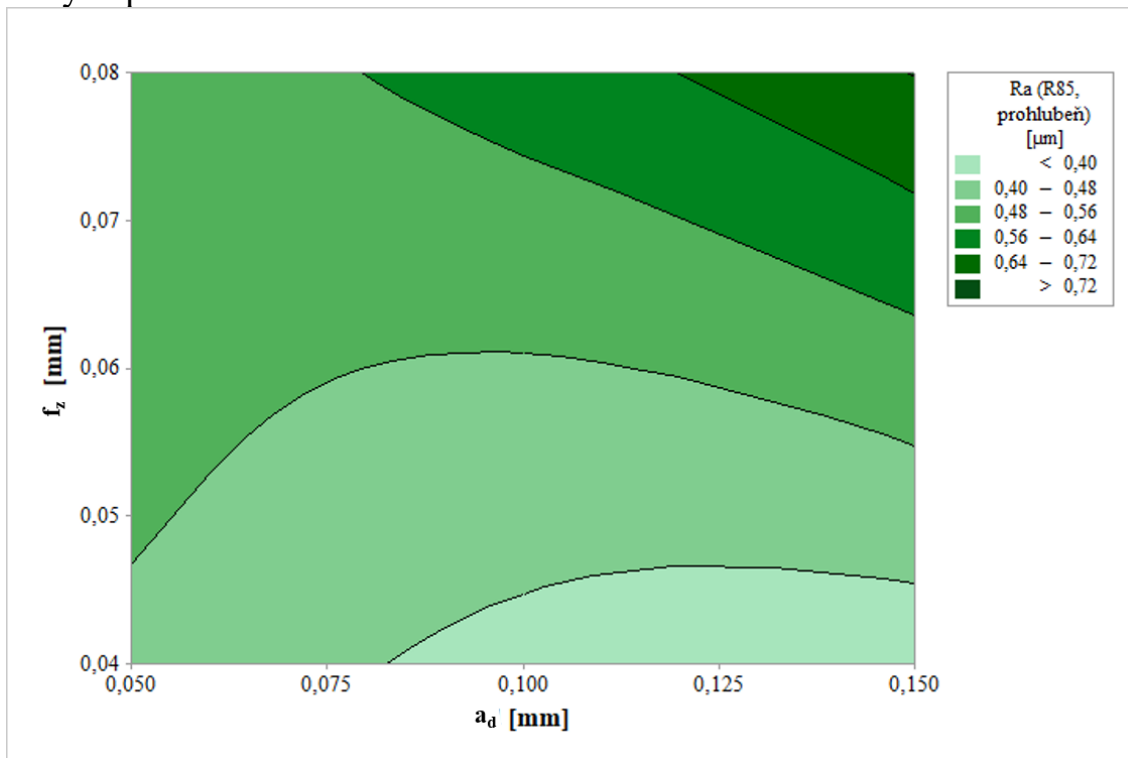
U drsnosti byly vyhodnocovány parametry Ra, Rz a Rsm. Jednotlivé parametry byly zaneseny do konturových grafů, aby jednoduchou formou popsaly výsledky a také z nich bylo možné odečíst jaké parametry nastavit pro dosažení požadované drsnosti.

První takový graf je znázorněn na Obr. 3.4., 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 obrobených se stejným přídatkem na obrábění liší nevýrazně. Lze tak usoudit, že pro dosažení lepších drsností je vhodnější volit úpravu posuvu, nikoli přídatku na obrobení.



Obr. 3.4: Ra – výstupek (obrobena R85)

V oblasti prohlubně (Obr. 3.5) 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.



Obr. 3.5. Ra – prohlubeň (obrobena R85)

3.1.3 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. 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.

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 R_a v oblasti výstupku u použitých nástrojů. 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 R_a je větší v případě nástroje R90, který i dosáhl vyšších hodnot při shodných podmínkách. Oba nástroje však při vhodných podmínkách mohou dosáhnout hodnot R_a menších než $0,4 \mu\text{m}$.

Při porovnání oblastí prohlubně 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 R_a bude složitější u nástroje R90. Oblasti výstupku a prohlubně jdou, co se trendů týče, proti sobě. Například kombinace posuvu $0,06 \text{ mm}$ a přídávku $0,1 \text{ mm}$ 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 R_a kolem $0,4 \mu\text{m}$ bývá většinou dosažena broušením. U frézování bývá standardně dosahováno mnohem vyšších hodnot R_a ($0,8 \mu\text{m}$). 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 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 zřetelnějším změnám ve výsledcích. U nástroje se z křivosti jednotlivých oblastí dá usoudit, že vliv přídatku na obrobení je výraznější než u nástroje R85.

Porovnání hodnot parametru Rz v oblasti prohlubně opět vykazuje co už výsledky v oblasti výstupku u parametru Ra. Výsledky nástroje R90 jsou pravidelnější a symetričtější 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 přídatky 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 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 přídatkům 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.

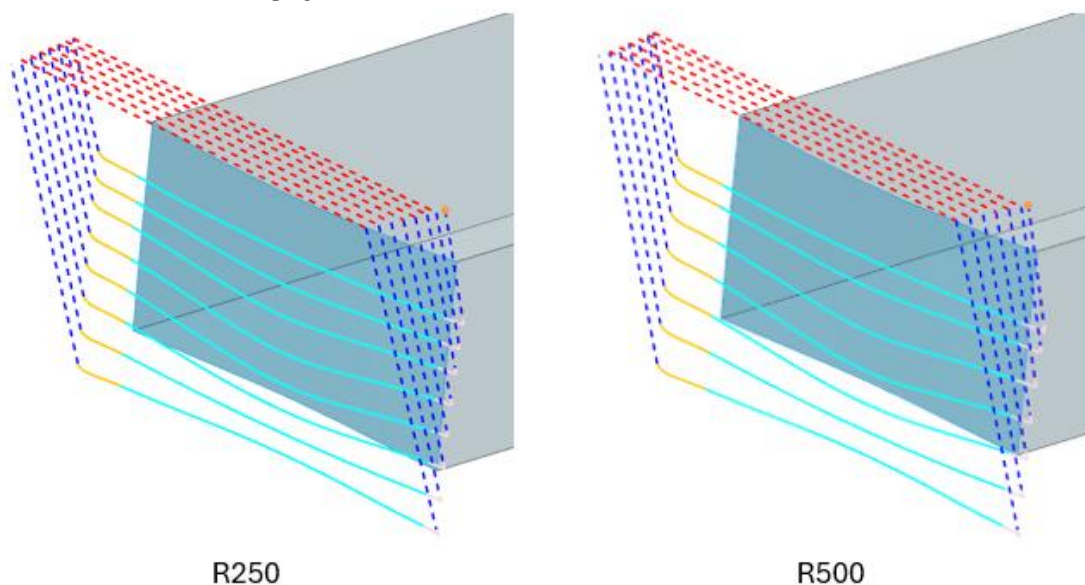
V oblasti prohlubně představují dva nejmenší intervaly vodorovné oblasti přes všechny použité přídatky na obrobení. Jejich nasazení by tak nebylo ovlivněno velikostí přídatku. Nevýhodou je, že by nedovolilo použití vyšších posuvů. Nástroj R90 stejně jako u ostatních parametrů vykázal pravidelnější rozložení 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.

3.2 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. 3.6.



Obr. 3.6: 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.

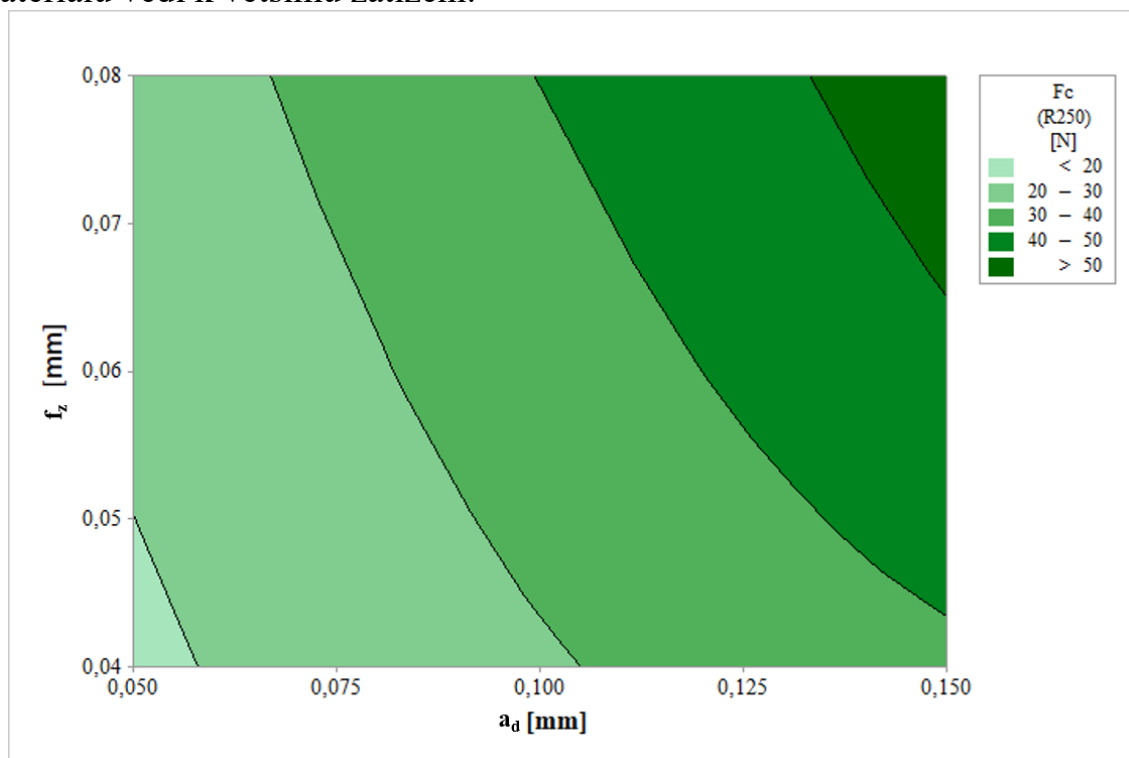
Stejně jako u nástrojů tangenciálních byly navržené podmínky obrábění voleny tak aby dodržely doporučení výrobců. Uvedeny jsou v Tab. 3.2. Cílem bylo opět popsat jaký budou mít vliv na vyhodnocované parametry.

Tab. 3.2: 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]

3.2.1 Řezné síly

Vyhodnocení řezných sil probíhalo stejně jako v případě tangenciálních nástrojů. Vyhodnocené řezné síly byly opět zaneseny do konturových grafů, zobrazeny jsou na Obr. 3.7. Oba nástroje se vykazují shodnými trendy a to tak, že vliv posuvu není tak významný, jako vliv přídatku 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.

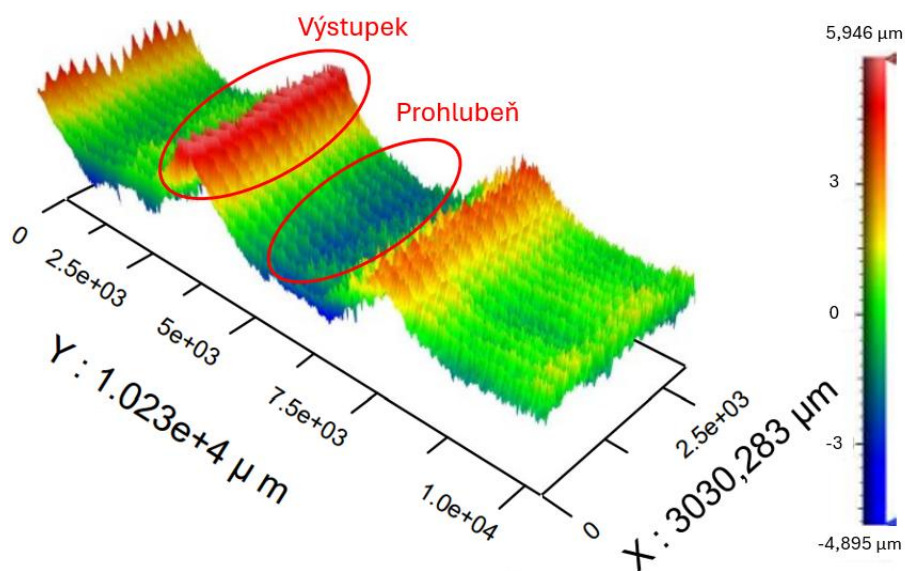


Obr. 3.7: Výsledky řezných sil nástroje R250

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.

3.2.2 Drsnost

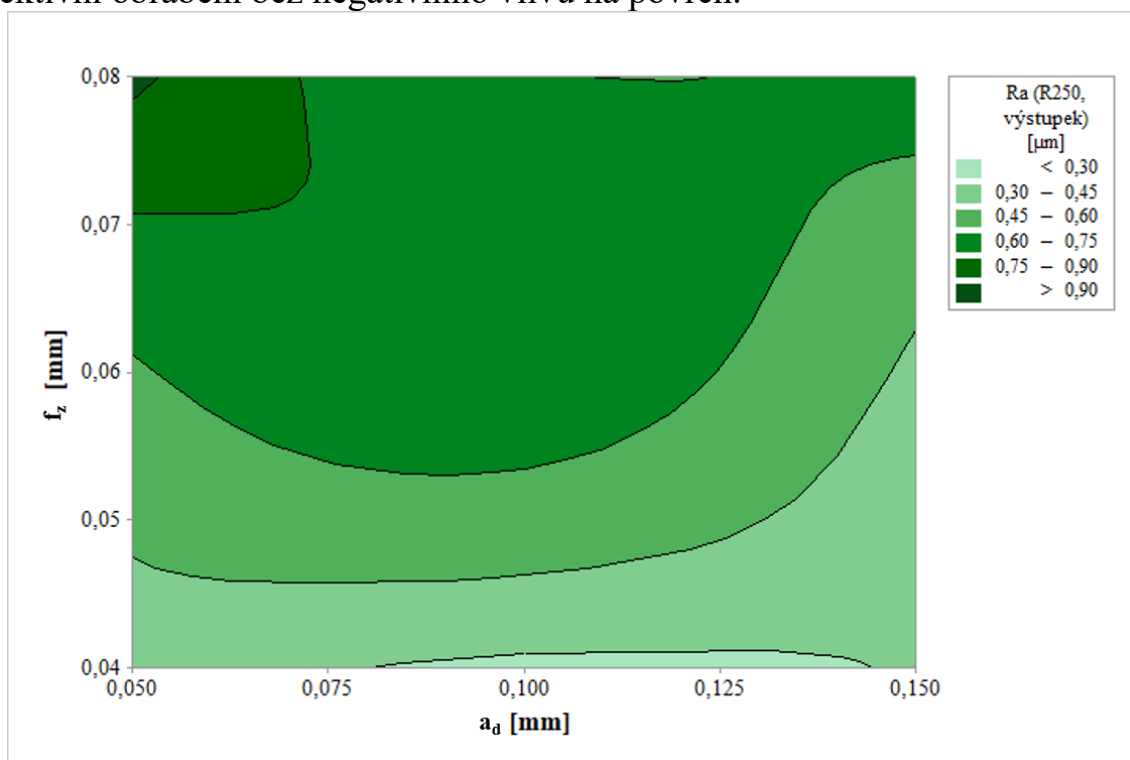
Na Obr. 3.8 je pak ukázán sken vyhodnocované oblasti ploch získaných při vyhodnocování parametrů drsnosti na optickém profilometru.



Obr. 3.8: Sken vyhodnocované oblasti obrobené R250

Získané parametry drsností pak byly opět převedeny do povrchových grafů. Na Obr. 3.9 a Obr. 3.10 jsou zobrazeny výsledky parametru Ra pro nástroj R250.

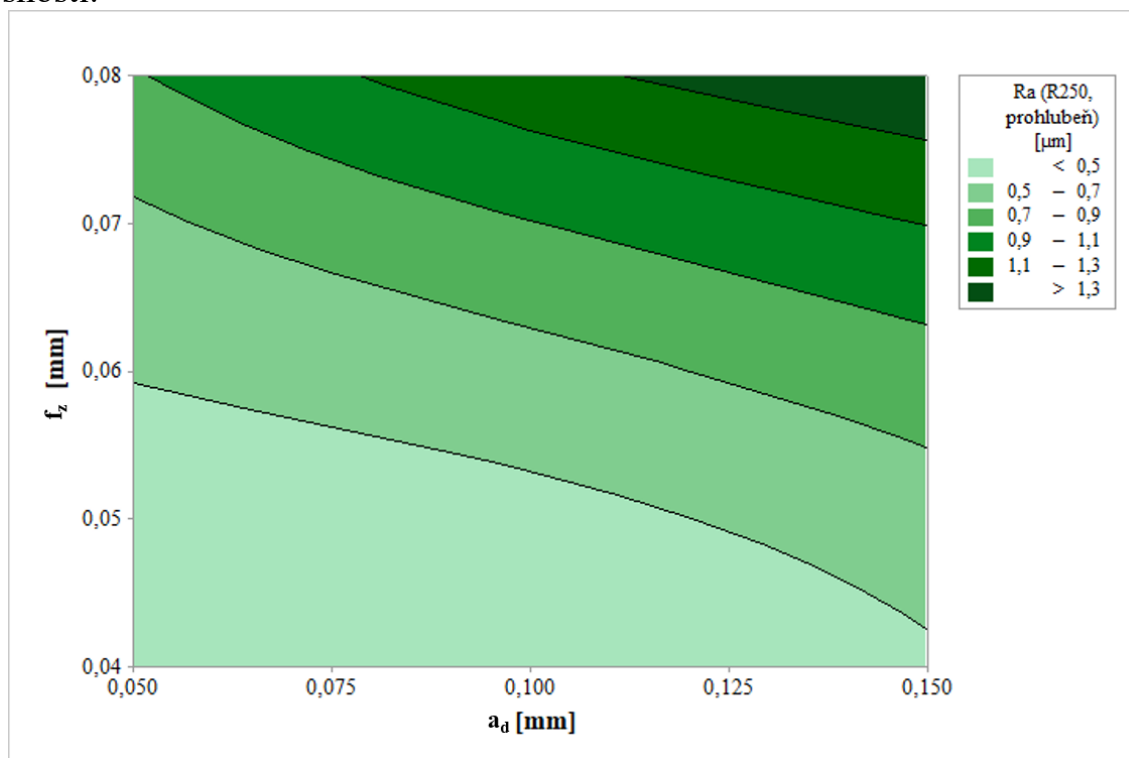
V oblasti výstupku je zjištěný rozsah hodnot parametru od 0,3 – 0,9 μm. Nejvyšší dosažené drsnosti byly získány při použití největšího použitého posuvu. Došlo k tomu však při nejnižších přídavicích na obrobení. Zbytek výsledků ukazuje, že získat drsnost povrchu v rozmezí 0,3 – 0,6 μm je možné i při největších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



Obr. 3.9: Ra – výstupek (obrobeno R250)

Oblast prohlubně dosahuje vyšších hodnot a většího rozptylu zjištěných hodnot. V případě nástroje R250 se tak výrazně projevila změna obráběcího průměru po délce řezné 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 přídávku. Ale závislosti se chovají předpovídajícím se způsobem, kdy je možné při větším přídávku 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. 3.10: 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 přídávku 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.

3.2.3 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. Z 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 parné, 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.

V oblasti výstupku byly lepší výsledky parametru Ra 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. 3.9). 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 projeví jinak. Jejich intervaly 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 rozdíl budou pohybovat pouze v setinách μm .

Parametr Rz se v oblasti výstupku do velké míry projevily 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 přídatkem. Znesnadňující je tak jeho použití při náročnějších nasazeních. U druhého nástroje byly průběhy do jisté míry vodorovné, a tak vyřazující vliv přídatku 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 přídatků. Nejmenší oblast pak tvoří nepatrný trojúhelník u největšího přídatku. 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 parametru 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.

3.3 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 obrobene plochy (splinové plochy), byla použita metodika DOE, tedy design of experiment (plánování experimentu). Jako základní faktorový plán byl využit návrh 2k, 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. 3.3, samotný návrh experimentu je pak znázorněn na **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.**

Tab. 3.3: 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	[-]

Při tvorbě faktorového plánu, 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.

Parametry 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.

I při 32 obráběcích drahách vykazuje obrobena plocha vysoké drsnosti, jak vyplývá z Tab. 3.4, kde jsou uvedeny výsledky parametru Ra získaných na testovacích plochách.

Tab. 3.4: 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

3.3.1 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 obrobenech povrchů jako je nanášení povlaků.

3.4 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 řezných podmínek, za účelem snížení výrobního času, je zde možnost softwarová.

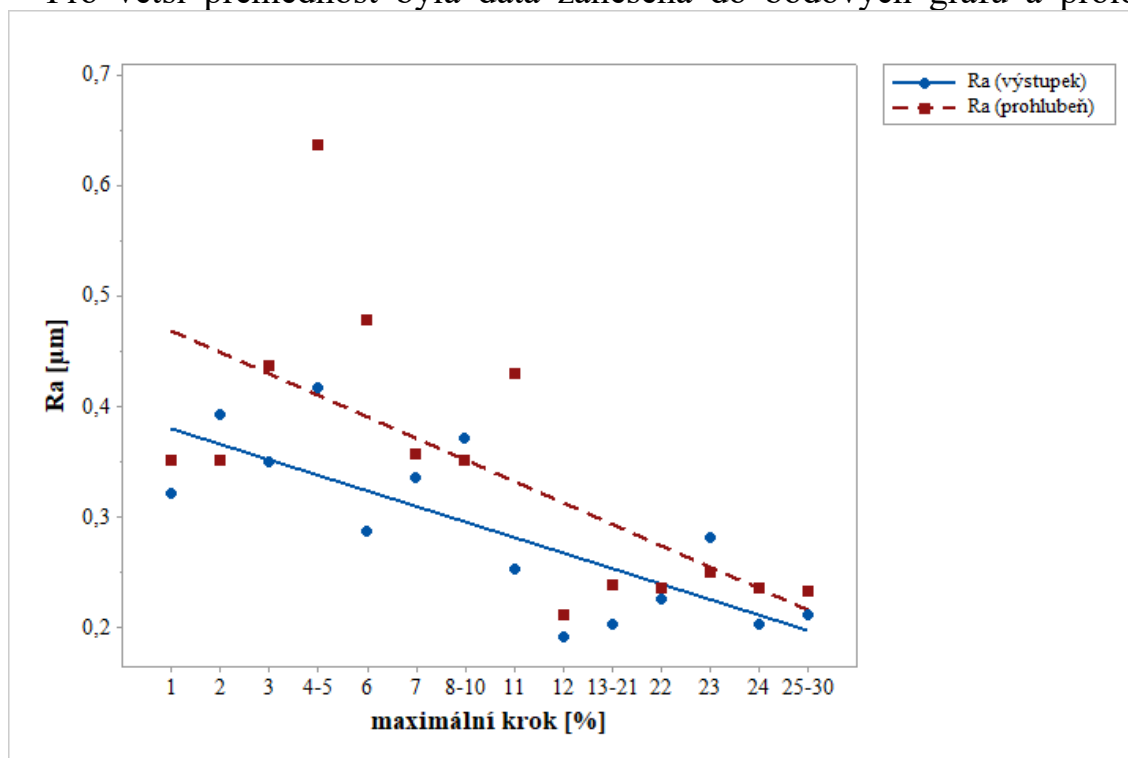
Program NX umožňuje v nastavení strategie obrábění u operace Variable Contour nastavení maximálního kroku. Tento parametr ovlivňuje hustotu řídicích bodů. Jedná se o body, kterými software prokládá aproximovanou křivku obráběcí dráhy odvozenou od obráběné plochy.

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. Řezné 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. Řídicí 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.

3.4.1 Vliv maximálního kroku na drsnost

Pro větší přehlednost byla data zanesena do bodových grafů a proloženy.



Obr. 3.11: Trendy parametru Ra 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.

3.4.2 Vliv maximálního kroku na přesnost

Zjištěné rozdíly v řezných silách a drsnostech vedla k domněnce, že úprava počtu bodů může vést k rozdílům 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.

Výsledkem bylo 14 souborů dat. 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 a to 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. Jejich přesné porovnání bylo provedeno srovnáním zjištěného minima a maxima každé hodnoty napříč zkoumanými proměnnými. Ty jsou uvedeny v Tab. 3.5, 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. 3.5: 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. [31–33] Ty se typicky se pohybují $\pm 0,1$ mm u přesnějších to je $\pm 0,05$ mm. Nejprísnější 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.

3.4.3 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 přídavku 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 nejméně výraznějších 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.

4. 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. 4.1, 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. 4.1: 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.

5. 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.

6. ZÁVĚR

Práce se zabývala analýzou a praktickým využitím soudečkových nástrojů při obrábění volných ploch, přičemž hlavní pozornost byla věnována vlivu posuvu na zub a přídávku 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 přídávku 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 přídávku 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] MGHERONY, 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-gfleWniQyn7-1ooSs&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](https://doi.org/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](https://doi.org/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](https://doi.org/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](https://doi.org/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](https://doi.org/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](https://doi.org/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] *JH744100T2R2R250.0Z4 SIRA* | *Seco Tools* [online]. [vid. 2025-01-19]. Dostupné z: https://www.secotools.com/article/p_10044926?language=en

[26] *TK soudečková fréza, kónický tvar $\alpha/2 = 18^\circ$ PPC, TiAlN, $\varnothing f8 D_C / R_2: 12/500mm$* | *Hoffmann Group* [online]. [vid. 2025-01-19]. Dostupné z: <https://www.hoffmann-group.com/CZ/cs/hot/p/207532-12%402F500#productDetails>

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

[28] *TK soudečková fréza, tangenciální tvar PPC, TiAlN, $\varnothing f8 D_C / R_2: 6/100mm$* | *Hoffmann Group* [online]. [vid. 2025-01-19]. Dostupné z: <https://www.hoffmann-group.com/CZ/cs/hot/p/207525-6%402F100>

[29] *1.1730 tool steel at Meusburger* [online]. [vid. 2023-10-09]. Dostupné z: <https://www.meusburger.com/EN/US/material-grades/11730-tool-steel>

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

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

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

[33] *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>

[34] 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

[35] 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

[36] 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

[37] 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

[38] 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

[39] 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

[40] 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

[41] 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

[42] 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

[43] 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

[44] 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>	9
<i>Obr. 1.2: 3osé obrábění [10]</i>	9
<i>Obr. 1.3: Zajištění stále tloušťky odebíraného materiálu [9]</i>	10
<i>Obr. 1.4: 5osé frézování válcovou frézou [10]</i>	11
<i>Obr. 1.5: Porovnání drsností povrchů [14]</i>	12
<i>Obr. 1.6: Naklápění nástroje při 5osém frézování [17]</i>	13
<i>Obr. 1.7: Rozdíl v geometriích nástrojů [23]</i>	14
<i>Obr. 2.1: Nástroj R250</i>	17
<i>Obr. 2.2: Nástroj R500</i>	18
<i>Obr. 2.3: Nástroj R85</i>	19
<i>Obr. 2.4: Nástroj R90</i>	19
<i>Obr. 2.5: Plocha A</i>	21
<i>Obr. 2.6: Plocha B</i>	22
<i>Obr. 3.1: Dráhy tangenciálních nástrojů</i>	23
<i>Obr. 3.2: Výsledky řezných sil nástroje R85</i>	24
<i>Obr. 3.3: Vyhodnocovaná oblast plochy obrobena R85</i>	25
<i>Obr. 3.4: Ra – výstupek (obrobena R85)</i>	26
<i>Obr. 3.5: Ra – prohlubeň (obrobena R85)</i>	26
<i>Obr. 3.6: Dráhy kónických nástrojů</i>	29
<i>Obr. 3.7: Výsledky řezných sil nástroje R250</i>	30
<i>Obr. 3.8: Sken vyhodnocované oblasti obrobena R250</i>	31
<i>Obr. 3.9: Ra – výstupek (obrobena R250)</i>	31
<i>Obr. 3.10: Ra – prohlubeň (obrobena R250)</i>	32
<i>Obr. 3.11: Trendy parametru Ra při změně hustoty bodů</i>	38

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 2.1: Parametry nástroje R250 [25]</i>	17
<i>Tab. 2.2: Parametry nástroje R500 [26]</i>	18
<i>Tab. 2.3: Parametry nástroje R85 [27]</i>	19
<i>Tab. 2.4: Parametry nástroje R90 [28]</i>	20
<i>Tab. 2.5: Chemické složení oceli 1.1730 [29]</i>	20
<i>Tab. 2.6: Fyzikální vlastnosti oceli 1.1730 [30]</i>	20
<i>Tab. 3.1: Podmínky měření u tangenciálních nástrojů</i>	24
<i>Tab. 3.2: Podmínky měření u kónických nástrojů</i>	29
<i>Tab. 3.3: Vyšetřované parametry</i>	35
<i>Tab. 3.4: Výsledky DOE</i>	36
<i>Tab. 3.5: Maximum a minimum ze zkoumaných dat</i>	39
<i>Tab. 4.1: Porovnání rozptylů drsností</i>	42

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. Řezníček, Martin, Cyril Hořava a Martin Ovsík. Percentage ratios of cutting forces during high-speed 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>.
2. Hořava, Cyril, Martin Řezníček a Martin Ovsík. Influence of the number of inserts used for face milling on cutting forces and surface roughness. *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>.

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

Ing. Cyril Hořava, Ph.D.

**Vliv řezných podmínek na dokončování obecných ploch
soudečkovými nástroji**

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

Teze disertační práce

Vydala Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně,
nám. T. G. Masaryka 5555, 760 01 Zlín.

Náklad: vyšlo elektronicky

Sazba: Cyril Hořava

Publikace neprošla jazykovou ani redakční úpravou.

Rok vydání 2025

Pořadí vydání: první

ISBN 978-80-7678-341-6

