

Vliv strategie obrábění na jakost povrchu při CNC frézování

Bc. Adam Máčala

Diplomová práce
2011



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická
Ústav výrobního inženýrství
akademický rok: 2010/2011

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Adam MÁČALA**
Osobní číslo: **T090576**
Studijní program: **N 3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Výrobní inženýrství**

Téma práce: **Vliv strategie obrábění na jakost povrchu při CNC frézování**

Zásady pro vypracování:

**Teoretická studie z oblasti CNC frézování a činitelů ovlivňujících jakost povrchu.
Návrh zkušebního modelu pro obrábění na frézce AZK HWT C-442 a vytvoření CAD modelu.
Definování řezných podmínek a frézování modelů při různých nastavení parametrů CAM systému.
Měření jakosti povrchu modelů a vyhodnocení výsledků.**

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

Dle doporučení vedoucího DP.

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Ondřej Bílek, Ph.D.

Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce:

14. února 2011

Termín odevzdání diplomové práce:

13. května 2011

Ve Zlíně dne 11. ledna 2011



doc. Ing. Petr Hlaváček, CSc.
děkan



doc. Ing. Miroslav Maňas, CSc.
ředitel ústavu

ABSTRAKT

Tato práce se zabývala zkoumáním vlivu nastavení řezných podmínek na drsnost obrobe- ného povrchu při CNC frézování. V teoretické části je pojednáno o problematice frézování, CNC obrábění a také jakosti obrobeného povrchu. V praktické části byl navrhnout a vytvo- řen model, jenž byl poté obráběn různými nástroji a řeznými podmínkami na CNC frézce AZK HWT C-442. Po obrábění následovalo vyhodnocování drsnosti obrobené plochy a statistické zpracování získaných dat.

Klíčová slova: CNC frézování, drsnost povrchu, řezné podmínky, plasty, kovy

ABSTRACT

This work is researching the effect of setting the cutting conditions on the roughness of the surface of the workpiece at CNC milling. The theoretical part is dealing with milling, CNC machining and surface finish quality. The practical part was designed and developed a model that was then machine with various tools and cutting parameters on CNC milling machine AZK HWT C-442. After machining followed by evaluation of machined surface and statistical processing of data.

Keywords: CNC milling, surface roughness, cutting conditions, plastics, metals

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

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

Ve Zlíně

.....

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

OBSAH

ÚVOD	9
I TEORETICKÁ ČÁST	10
1 TEORIE OBRÁBĚNÍ	11
2 FRÉZOVÁNÍ	12
2.1 TYPY FRÉZOVACÍCH OPERACÍ.....	12
2.1.1 Frézovací nástroje	14
2.1.1.1 Geometrie břítu frézy.....	16
2.1.1.2 Pohyby frézovacího nástroje.....	19
2.1.1.3 Další důležité veličiny u frézovacích operací	22
2.1.1.4 Utváření třísky při frézování.....	23
2.1.1.5 Řezné síly při frézování	24
2.1.2 Frézovací stroje	25
3 CNC FRÉZOVÁNÍ	26
3.1 ČÍSLICOVĚ ŘÍZENÉ OBRÁBĚCÍ STROJE	26
NC – stroje s klasickými řídicími systémy.....	26
3.1.1 Souřadné systémy číslícově řízených obráběcích strojů	27
3.1.2 Vztažné body u číslícově řízených strojů.....	28
3.1.3 Programování CNC strojů.....	29
3.1.3.1 Struktura programu	29
3.1.3.2 Zápis programu	30
3.1.3.3 Formy programování.....	30
3.1.3.4 Programovací jazyky.....	33
3.1.4 Druhy řízení CNC strojů	34
3.1.4.1 Systémy stavění souřadnic	34
3.1.4.2 Pravoúhlá řízení	35
3.1.4.3 Souvislá řízení.....	35
3.1.5 Nářadí v provozu NC strojů	36
3.1.6 Přesnost číslícově řízených obráběcích strojů.....	37
4 STAV POVRCHU OBROBKU	39
4.1 PARAMETRY CHARAKTERIZUJÍCÍ VÝŠKU PROFILU	39
4.1.1 Profily.....	39
4.1.2 Struktura povrchových ploch	45
4.1.2.1 Měření profilu povrchu	46
4.1.2.2 Závislost struktury povrchu na charakteristických hodnotách obrábění	46
4.1.2.3 Ovlivnění kvality a jakosti obrobené plochy při frézování.....	48
II PRAKTICKÁ ČÁST	51
5 TVORBA MODELU SOUČÁSTI	52
5.1 VOLBA GEOMETRIE A TVARU SOUČÁSTI.....	52
6 DEFINOVÁNÍ OBRÁBĚCÍ STRATEGIE	54

6.1	PROGRAMOVÁNÍ V CAM EXPRESS.....	54
6.2	VOLBA ŘEZNÝCH PODMÍNEK	56
6.2.1	Volba řezná strategie	58
6.3	PARAMETRY CNC FRÉZKY AZK HWT C -442	60
6.4	POUŽITÉ MATERIÁLY	60
6.4.1	Necuron 651	60
6.4.2	Dural AW 5083	61
7	NAMĚŘENÁ DATA	63
7.1	VYHODNOCOVANÉ VELIČINY.....	63
7.2	ZPRACOVÁNÍ NAMĚŘENÝCH DAT.....	63
7.3	SROVNÁNÍ KONKÁVNÍ A KONVEXNÍ PLOCHY	63
7.3.1	Časový vývoj Ra, Rz a Rsm	64
7.3.2	Kontrola na odlehlé hodnoty	69
7.4	VLIV PRŮMĚRU NÁSTROJE D NA PARAMETRY DRSNOSTI POVRCHU.....	71
7.5	VLIV RADIÁLNÍ HLOUBKY ŘEZU A_E NA PARAMETRY DRSNOSTI POVRCHU	81
7.6	VLIV PARAMETRU SH NA SLEDOVANÉ PARAMETRY DRSNOSTI POVRCHU	87
7.7	VLIV MATERIÁLU OBROBKU NA PARAMETRY DRSNOSTI POVRCHU.....	94
7.8	STROJNÍ ČAS.....	97
7.9	DATA ZÍSKANÁ Z DRSNOMĚRU MITUTOYO SJ-301	97
7.10	DATA ZÍSKANÁ Z PROGRAMU CAM EXPRESS.....	100
8	DISKUZE VÝSLEDKŮ	103
	ZÁVĚR	104
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	105
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	107
	SEZNAM OBRÁZKŮ	111
	SEZNAM TABULEK.....	116
	SEZNAM PŘÍLOH.....	118

ÚVOD

Výroba kovových součástí a nástrojů se v dřívější době po celá staletí soustředila pouze na oblast odlévání. Od 19. a zejména 20. století se prosadilo třískové obrábění, které umožnilo podstatně zvýšit přesnost, a tím také vyšší spolehlivost a širší užitnost součástí a jejich sestav. V dnešní době tvoří obrábění asi 40% průmyslové výroby, přičemž slévání je zastoupeno 30-ti procenty a zbylých 30% zaujímá technologie tváření. Ve strojírenské výrobě neustále rostou požadavky na tvarovou a rozměrovou přesnost a integritu povrchu výrobků. Neustále se hledají aplikace a výrobní postupy směřující ke zvyšování jakosti výrobků a taktéž ke zkracování výrobních cyklů, jejich mechanizaci a automatizaci. Ke splnění těchto požadavků vede stále větší zavádění CNC obráběcích strojů do oblasti průmyslové výroby. Bez využití moderních CAD/CAM systémů by nebylo možné dosahovat vysokých jakostí povrchových vrstev výrobků, kratších výrobních časů, zvýšené produktivity výroby apod.

Teoretická část této práce popisuje problematiku CNC obrábění, jakosti povrchových ploch obráběných součástí a také udává vlivy a veličiny vystupující v obráběcím procesu, jenž tuto jakost ovlivňují.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 TEORIE OBRÁBĚNÍ

Obrábění je technologický proces, při kterém je přebytečná část materiálu oddělována z obrobku ve formě třísky břitem řezného nástroje. Obrábění se uskutečňuje v soustavě stroj – nástroj – obrobek. Vlastní proces fyzikálně-mechanického oddělování materiálu obrobku se specifikuje jako řezání, respektive řezný proces. V závislosti na způsobu oddělování materiálu se rozlišuje řezný proces kontinuální (soustružení, vrtání, vyvrtávání), diskontinuální (hoblování, obrážení) a cyklický (frézování, broušení).

Jako obrobek se označuje obráběný nebo již částečně obrobený předmět. Předmět, který se bude teprve obrábět je polotovár. Předmět již zcela obrobený je výrobek. Obráběná plocha je část povrchu obrobku, ze které je odebírán materiál. Plocha vzniklá obráběním je obrobená plocha. Plocha vznikající těsně za břitem nástroje je řezná plocha.

Obrobená plocha představuje výstup obráběcího procesu a technologického hlediska je určena svými rozměry, tvarem, polohou, strukturou povrchu a vlastnostmi povrchové vrstvy. Obrobená plocha se identifikuje souborem parametrů vztažených k jmenovité ploše, k nimž patří úchylka rozměru (úchylka od jmenovité hodnoty rozměru), úchylka tvaru (úchylka přímosti, kruhovitosti, válcovitosti), úchylka polohy (úchylka rovnoběžnosti, kolmosti, sousostí), struktura povrchu (největší výška profilu R_z , průměrná aritmetická úchylka profilu R_a), vlastnosti povrchové vrstvy (druh a velikost napětí v povrchové vrstvě, trhliny a další povrchové vady). Parametry obrobené plochy souvisí s vlastnostmi obráběcího stroje, nástroje, obrobku, upínače a hodnotami řezných podmínek.

Technologické vlivy na parametry obrobené plochy v závislosti na jejich charakteru lze členit na systematicky konstantní (chyba v seřízení obráběcího stroje, úchylka rozměrů a tvaru nástroje), systematicky proměnné (opotřebení nástroje, tepelné deformace prvků obráběcího systému), náhodné (rozptýlení přídavků na obrábění, rozptýlení vlastností obráběného materiálu).

Velmi důležitým prvkem obráběcího systému je řezný nástroj, jenž je aktivním prvkem obrábění. Nástroj je tvořen z několika základních částí: těleso nástroje, stopka nástroje a osa nástroje. [4]

2 FRÉZOVÁNÍ

Frézování je metoda obrábění kovů, která se provádí dvěma na sebe vázanými pohyby: rotačním pohybem nástroje a posuvným pohybem obrobku. V současné době je již možné realizovat díky moderním obráběcím strojům posuvné pohyby plynule měnitelné ve všech směrech. Frézovací nástroj – fréza – má obvykle větší počet zubů a každý zub odebírá určité množství materiálu. Výhody současného frézování jsou ve vysokém výkonu obrábění, vynikající jakosti obrobeného povrchu, velké přesnosti rozměrů a flexibilitě při obrábění tvarově složitých obrobků. Frézování je stále univerzálnější metodou obrábění, což je důsledek stále rostoucí mnohostrannosti použití obráběcích strojů, řezných nástrojů a řídicích systémů. V dnešní době se již většina všech frézovacích operací uskutečňuje na obráběcích centrech. Frézovací operace se provádějí na nejrůznějších druzích strojů: od starších jednoúčelových frézek, až po současné víceosé CNC stroje. [15]

2.1 Typy frézovacích operací

Rovinné frézování čelní frézou – (Obr. 1) osa frézy stojí kolmo k pracovní ploše. Třísky jsou stejně silné a stroj pracuje v důsledku rovnoměrného namáhání klidně. Do tohoto procesu se zapojují břity umístěné na obvodu frézy za podpory vedlejších břitů umístěných na čele frézy. Fréza rotuje v rovině rovnoběžné se směrem radiálního posuvu obrobku. [15]

Tento typ frézování je rozšířenější než frézování válcové, neboť lepší podmínky upnutí frézy umožňují odebrat větší třísku za jednotku času a tím rychle provést frézování materiálu. Oproti válcovému frézování lze frézováním čelním obrábět větší plochy, popřípadě obrábět více ploch současně. Tento typ frézování je výkonnější také z důvodu, že při něm zabírá více zubů současně, což umožňuje volit větší posuv stolu.

Rovinné frézování válcovou frézou – (Obr. 1) osa frézy leží rovnoběžně s pracovní plochou, třísky mají kapkovitý tvar. Protože tloušťka třísek není stejná a u malých hloubek řezu zabírá vždy pouze jeden zub, jsou stroj i fréza namáhány přerušovaně. Frézovaná plocha je tudíž zvlněná. Toto přerušované namáhání lze zmenšit použitím fréz se šroubovými zuby. [5]

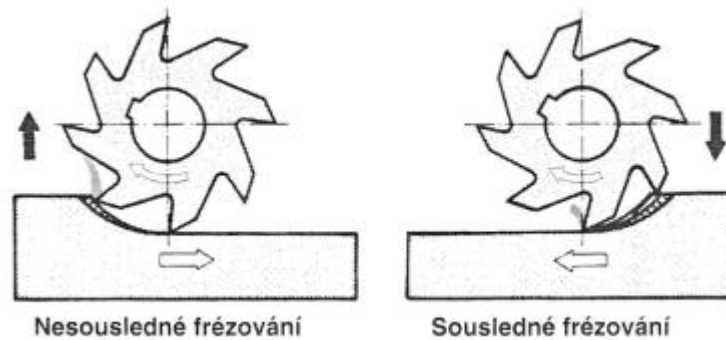


Obr. 1. Způsoby frézování [5]

Frézování sousledné – (Obr. 2) u tohoto typu frézování mají posuv a řezný pohyb stejný směr. Výhodou je lepší začátek řezu a delší trvanlivost nástroje, ve větších hloubkách řezu a výkonech. Sousledné frézování smí být prováděno pouze na frézkách se zařízením pro tento typ frézování. Válcované polotovary a odlitky se nesmí obrábět sousledným frézováním. Tloušťka třísky je největší na začátku obrábění a směrem ke konci klesá až na nulu. Řezné síly obvykle působí směrem dolů, do obrobku. [5]

Tento typ frézování přináší tyto aspekty: menší drsnost obrobeného povrchu, menší sklon ke chvění, menší sklon k tvorbě nárůstku, možnost použití jednodušších upínacích přípravků vzhledem k tomu, že je obrobek přitlačován směrem ke stolu řeznou silou, menší potřebný řezný výkon, vyšší trvanlivost břitů, což umožňuje použití vyšších řezných rychlostí a posuvů. Posuvový mechanismus stolu stroje musí být bez vůle, aby nedocházelo ke vtažování nástroje do obrobku, čímž by mohlo dojít k velkému zvětšení tloušťky třísky a následnému zničení břitu nástroje. [4]

Frézování nesousledné – (Obr. 2) posuv se provádí proti řeznému pohybu zubu. Tento postup lze používat u všech typů frézek. Na začátku řezu fréza prokluzuje na mírně stoupající řezné ploše, což způsobuje její rychlejší otupění. Řezný výkon je malý. Tloušťka třísky začíná nulovou hodnotou a ke konci záběru se zesiluje na maximum. U nesousledného frézování záběr zubů frézy při jejich vřezávání do materiálu obrobku nezávisí na hloubce řezu. [5]



Obr. 2. Sousledné a nesousledné frézování

Dalším jevem u sousledného frézování je to, že břit přichází do záběru náhle a obrábění začíná velkou tloušťkou třísky, čímž dochází k rázovému namáhání břitu nástroje. Taktéž se vyvíjí méně tepla a je minimální sklon ke zpevňování materiálu obrobku za studena. V průběhu obrábění může dojít k návaru či přilepení třísky na břit a k jejímu ulpívání zde až do okamžiku záběru. U frézování nesousledného může být tříska snadno vtažena mezi břit nástroje a obrobek a to může být příčinou lomu vyměnitelné břitové destičky. Tento nepříznivý jev by u sousledného frézování nemohl nastat, neboť by tříska byla z břitu odražena a nemohla by jej poškodit.

V praxi je dáována přednost souslednému frézování, pokud je toto umožněno obráběcím strojem, upínáním a obrobkem. [15]

2.1.1 Frézovací nástroje

Frézovacími nástroji se rozumí tzv. frézy (Obr. 3), což jsou vícebřité řezné nástroje z rychlořezné nástrojové oceli (nebo se vsazenými zuby ze slinutého karbidu, oxidové keramiky, či kubického nitridu bóru i diamantu). [5]

Vedle materiálového hlediska se frézy rozlišují také podle tvaru zubů na :

- *Frézy s frézovanými zuby*: mají rovné břity a používají se k obrábění rovinných ploch. Tyto typy fréz se ostří na hřbetě, čímž se mění profil zubu, což však neovlivňuje jejich použitelnost.
- *Podsoustružené frézy*: jejich hřbet je zhotovován spirálovým podsoustružením na speciálním soustruhu. Břity u těchto nástrojů jsou zakřivené a mají tvar obráběné plochy (např. boku zubu ozubeného kola). [5]

Dále se rozlišují frézy se zuby ve šroubovici (pravé či levé) a s přímými zuby.

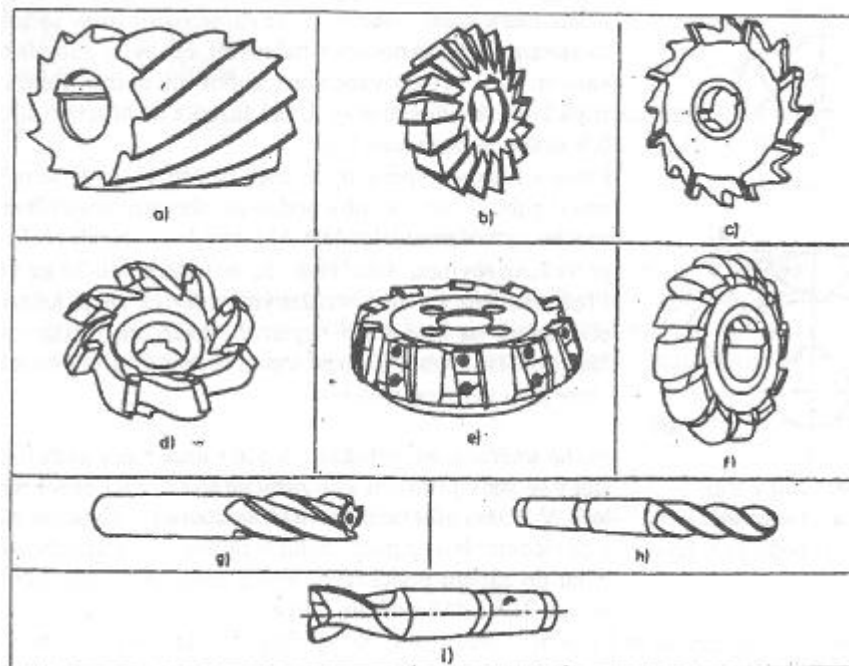
Frézy se zuby ve šroubovici mají při obrábění v záběru větší počet zubů, což vede k větší plynulosti záběru. Sklon šroubovice se volí 10 až 45° někdy i více.

Podle počtu zubů vzhledem k průměru frézy se tyto dále rozdělují na jemnozubé, polohrubozubé a hrubozubé. Počet zubů pro klidný chod frézy má být takový, aby současně řezaly alespoň dva zuby. [4]

Podle konstrukce se rozlišují frézy celistvé, jenž mají těleso a zuby z jednoho kusu rychlořezné oceli (popř. slinutého karbidu u malých nástrojů), dále frézy s vyměnitelnými břitovými destičkami z rychlořezné oceli nebo slinutého karbidu, frézy dělené a frézy sdružené, jenž jsou složeny ze sady fréz. V současné době se nejvíce využívají frézy s vyměnitelnými břitovými destičkami, jenž jsou mechanicky připevňovány k tělesu frézy.

Dalším kritériem dělení fréz je jejich způsob upnutí. Podle tohoto hlediska jsou rozděleny na frézy nástrčné a frézy s válcovou či kuželovou stopkou.

Podle smyslu otáčení (při pohledu do vřetena) se dělí frézy na pravořezné a levořezné. [4]



Obr. 3. Základní druhy fréz

Na předchozím obrázku jsou tyto typy fréz: a – válcová fréza, b – úhlová fréza, c - kotoučová fréza, d – čelní fréza, e – frézovací hlava, f – tvarová fréza, g – čelní válcová fréza, h – kopírovací fréza, i – drážkovací fréza.

2.1.1.1 Geometrie břítu frézy

Řezná část nástroje je jeho funkční částí a obsahuje prvky tvořící třísku. Řezná část obsahuje činnou část nástroje – břit. Břit je ohraničen hřbetem a čelem nástroje. Může být spojen jak s hlavním, tak i s vedlejším ostřím.

Každá s ploch povrchu řezné části nástroje se značí symbolem skládajícím se z písmene A a indexu řecké abecedy, který určuje druh plochy.

Čelo A_γ je plocha či souhrn ploch, po kterých odchází tříska.

Hřbet A_α je plocha nebo souhrn ploch, které při řezném procesu směřují k ploše obrobku. Průsečnice ploch čela a hřbetu se nazývá *ostří*. Nástrojové ostří je prvek řezné části nástroje, kterým se realizuje vlastní proces řezání. Řezná část nástroje mívá zpravidla hlavní a vedlejší ostří. *Nástrojové hlavní ostří S* je část ostří, začínající v bodě, kde nástrojový úhel nastavení hlavního ostří κ_r je roven nule. Slouží k vytvoření řezné (přechodové) plochy na obrobku. *Nástrojové vedlejší ostří S'* je část ostří, kde nástrojový úhel nastavení ostří κ_r je

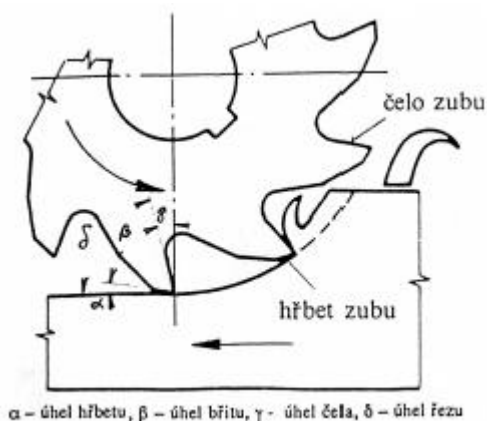
roven nule, ale ve směru od hlavního ostří. Vedlejší ostří provádí dokončovací práci na obrobené ploše, ale nezúčastňuje se při vytváření řezné plochy na obrobku.

Špička je část ostří, nacházející se na spojnici hlavního a vedlejšího ostří. Může být přímá nebo zaoblená. Zaoblené ostří je vytvořeno zaobleným přechodem mezi hřbetní čelní plochou nástroje. Přerušované ostří je ostří, které je přerušené a v důsledku toho nedochází ke vzniku nevhodně tvarované třísky. Používá se často u válcových fréz pro frézování rovinných ploch. [4]

Aby mohl břit odebírat třísky, musí k tomu být náležitě upraven. Každý ze zubů frézy má klínovité provedení zakončené břitem, tvořeným dvěma plochami – čelem a hřbetem – v jejichž průsečíku vznikne ostří, které má schopnost odřezávat třísky. Čím má břit ostřejší klín, tím snadněji vniká do materiálu. Hodnoty jednotlivých úhlů frézy závisí na druhu obráběného materiálu (Tab. 1) a u normalizovaných fréz mají danou hodnotu.

Tab. 1. Hodnoty úhlů čela a hřbetu frézy při obrábění různých materiálů

Obráběný materiál	Úhel čela γ (°)	Úhel hřbetu α (°)
ocel do pevnosti 600 MPa	12 - 20	5 - 8
ocel do pevnosti 850 MPa	8 - 12	4 - 6
šedá litina do tvrdosti 120 HB	6 - 10	5 - 6
šedá litina nad tvrdost 180 HB	4 - 20	3 - 5
měď	12 - 20	5 - 6
mosaz, bronz	0 - 12	4 - 8
lehké slitiny	15 - 30	8 - 12
plasty	0 - 15	4 - 6



α – úhel hřbetu, β – úhel břitu, γ – úhel čela, δ – úhel řezu

Obr. 4. Nástrojové úhly na fréze

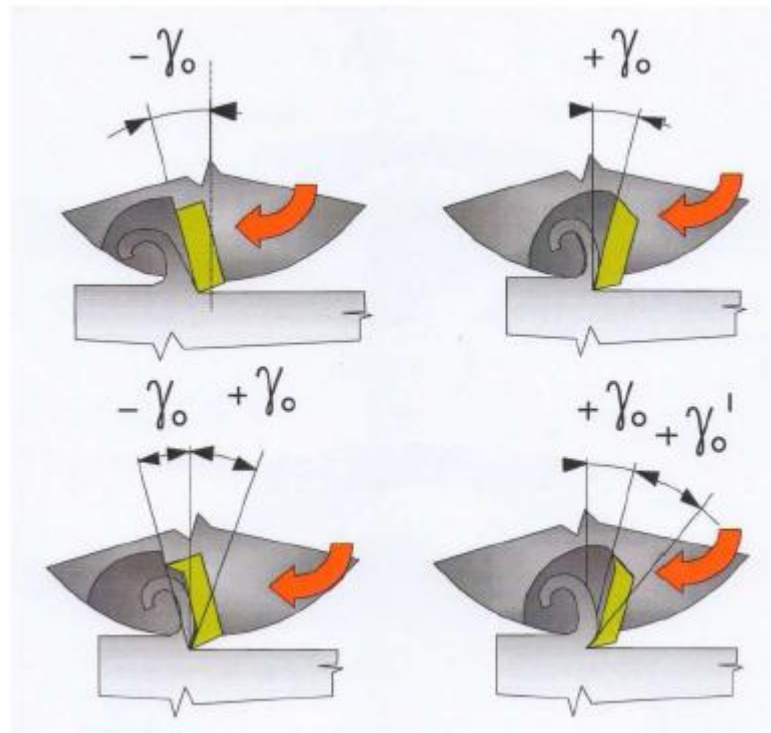
Základní úhly na zubu frézovacího nástroje (Obr. 4):

- *Úhel hřbetu α* - úhel mezi hřbetem zubu frézy a tečnou k obvodu nástroje (řeznou rovinou). Jeho úkolem je snižovat tření hřbetu zubu na obráběné ploše. Čím větší je hodnota úhlu, tím je tření menší. Jeho velikost je omezena, aby nedocházelo k přílišnému zeslabování zubu a tím snižování jeho pevnosti.
 - *Úhel břitu β* - úhel svíraný plochou čela a hřbetu. Čím je tento úhel menší, tím snadněji vniká nástroj do materiálu. Jeho hodnota je omezena pevností břitu. Pro frézování měkkých a málo pevných materiálů má úhel β menší hodnotu, pro tvrdé a pevné materiály musí být jeho velikost větší, aby snesl zatížení vyvolané velkým řezným odporem.
 - *Úhel čela γ* - úhel mezi plochou čela břitu a spojnicí špičky břitu se středem otáčecí frézy. Usnadňuje tvorbu třísky a vnikání břitu do materiálu obrobku. Jeho rostoucí hodnota zeslabuje břit frézy, proto je tabulkově omezena.
 - *Úhel řezu δ* - úhel svírající plocha čela a tečna k obvodu frézy. Je součtem úhlů hřbetu a břitu: $\delta = \alpha + \beta$.
 - *Úhel sklonu ostří λ* - úhel mezi osou otáčení frézy a tečnou k šroubovici břitu. Vyskytuje se u nástrojů s břity šikmými, šroubovitými, střídavými a šípovými.
 - *Úhel nastavení κ* - úhel mezi ostřím frézy a rovinou kolmou na osu jejího otáčení.
- [17]

Geometrie frézovacích nástrojů s vyměnitelnými destičkami podle úhlu čela (Obr. 5):

- a) *Negativní geometrie*: vhodná pro frézování ocelí, litin a těžko obrobitelných materiálů při větším zatížení břitů v hromadné výrobě.
- b) *Pozitivní geometrie*: pro litinové a ocelové součástky se sklonem ke chvění, pro součástky ze slitin hliníku a legované slitiny vytvářející snadno na čele břitu nárustek.

- c) *Pozitivně negativní geometrie*: pro frézování korozivzdorné oceli, litiny, mědi a jejích slitin, kdy v kombinaci s vhodným úhlem nastavení dovoluje plynulé odvedení dlouhých šroubovitých třísek. [17]



Obr. 5. Geometrie fréz s vyměnitelnými destičkami podle úhlu čela

2.1.1.2 Pohyby frézovacího nástroje

Frézovací nástroj – fréza – o průměru D se pohybuje při obrábění proti obrobku (Obr. 6). Pod pojmem *otáčky vřetene* n (1/min) rozumíme počet otáček za minutu, které koná fréza upnutá na vřeteni stroje. Tato hodnota však pouze málo vypovídá o tom, co se děje po obvodu frézy, kde břit odebírá třísku. [15]

Řezná rychlost v_c [m/min] označuje obvodovou rychlost, jakou opracovává břit obrobek. Jedná se o velmi důležitou veličinu, vztahující se k nástroji, která je součástí řezných podmínek a zajišťuje, že obrábění daným nástrojem bude probíhat co nejúčinněji. Otáčky vřetene, řezná rychlost a průměr frézy jsou v úzkém vzájemném vztahu. Výpočet řezné rychlosti se provádí podle vzorce:

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

kde D – průměr nástroje [mm]

n – otáčky vřetene [min^{-1}].

Posuvová rychlost v_f [m/min] je vztažena k vedlejšímu řeznému pohybu, který je většinou kolmý na hlavní řezný pohyb. Vedlejší řezný pohyb se nazývá posuv a značí se písmenem f . Posuv je přemístění nástroje vzhledem k obrobku ve směru posuvového pohybu. Toto přemístění se u frézovacích nástrojů může udávat jako posuv na jeden zub frézy f_z [mm]. Výpočet velikosti vedlejší řezné rychlosti se provádí podle vztahu:

$$v_f = 10^{-3} \cdot f \cdot n \quad [\text{m/min}] \quad (2)$$

kde n – otáčky vřetene [min^{-1}]

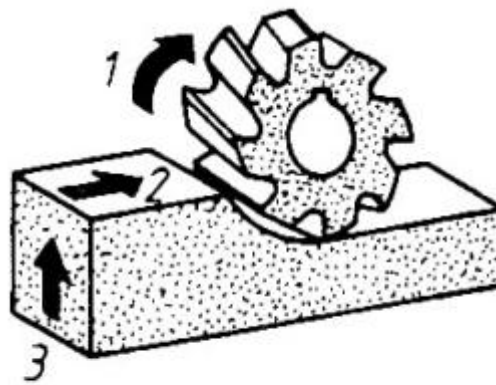
f – posuv [mm].

Výsledná rychlost řezného pohybu potom bude:

$$v_e = \sqrt{v_c^2 + v_f^2} \quad [\text{m/min}] \quad (3)$$

Výsledný řezný pohyb je tedy geometrickým součtem hlavního pohybu a posuvu. Rychlost posuvu je v porovnání s rychlostí hlavního pohybu zanedbatelná (asi tisíckrát menší) a na rychlost výsledného pohybu nemá podstatný vliv.

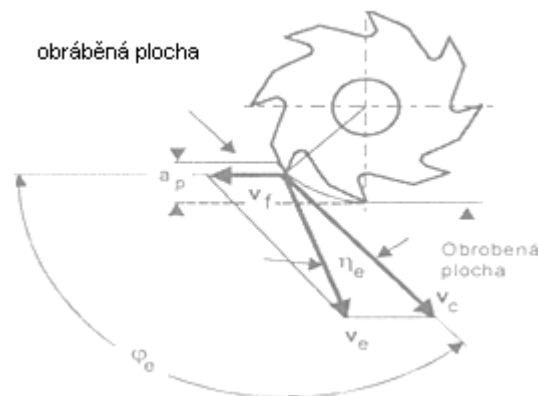
Přísuv je vzájemný pohyb mezi nástrojem a obrobkem. Zpravidla bývá kolmý na obráběnou plochu a umožňuje nastavení hloubky řezu. [15], [4]



frézování

Obr. 6. Řezné pohyby při frézování

Na obrázku je číslem 1 označen hlavní řezný pohyb, číslem 2 vedlejší řezný pohyb (posuv) a číslem 3 příisuv.



Obr. 7. Vektory řezných rychlostí při ne-sousledném frézování

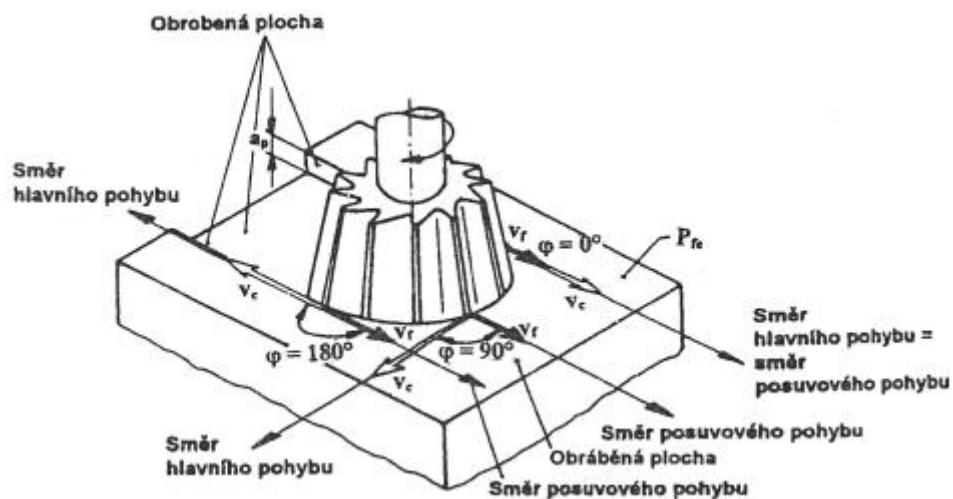
Dalšími kinematickými parametry u frézovacích operací jsou:

Posuv za minutu f_{\min} [mm/min], respektive rychlost posuvu v_f odpovídající relativní rychlosti osou nástroje a obrobkem (hovoříme též o posuvu stolu frézky). Další známou veličinou je *posuv na otáčku* f_n [mm/ot.], jenž má velký význam pro výpočet posuvu a pro určení schopnosti frézy při obrábění načisto. Tato veličina vyjadřuje délku dráhy, kterou urazil nástroj za jednu otáčku. *Posuv na zub* f_z [mm] je velmi důležitou hodnotou při proce-

su frézování. Protože je fréza vícebřitý nástroj, musí existovat hodnota, jejíž pomocí lze zajistit, aby každý břit obráběl za nejlepších možných podmínek. Výkon každého jednotlivého zubu (břitu) určuje mez výkonnosti nástroje. Posuv na zub odpovídá dráze, kterou urazí fréza v průběhu záběru jednoho zubu. Posuv na zub je roven taktéž dráze posuvu stolu frézky, kterou urazí stůl mezi záběry dvou za sebou jdoucích břitů. Může se tedy vyjádřit také vztahem počtu zubů nástroje z k posuvu stolu za minutu, či k posuvu za otáčku. Hodnota f_z je při frézovacích operacích rozhodující faktor pro objem odebraného materiálu jedním břitem, pro zatížení břitu, trvanlivost břitu a také stav obrobeneé plochy. Výpočet posuvu na zub se provádí podle vzorce:

$$f_z = \frac{v_f}{n \cdot z} \quad (4)$$

[15].



Obr. 8. Kinematika pohybů nástroje a obrobku

2.1.1.3 Další důležité veličiny u frézovacích operací

Axiální hloubka řezu a_p je axiální hodnota nastavení frézy při rovinném frézování čelní frézou, analogicky též radiální hloubka řezu při frézování kotoučovými frézami. Tato veličina podstatně ovlivňuje objem odebraného materiálu, a tedy i výkon obrábění.

Šířka frézované plochy a_e (nebo taktéž radiální hloubka řezu) určuje při rovinném frézování čelní frézou, jakou částí průměru obrábí nástroj plochu obrobku, při rovinném frézování válcovou frézou hloubku, do které proniká obvod nástroje pod povrch obrobku.

Další používanou veličinou u frézovacích operací je *objem odebraného materiálu za jednotku času* V . Tuto hodnotu lze vypočítat ze součinu hloubky řezu, šířky řezu a dráhy, jenž nástroj urazí za časovou jednotku. Tato veličina se též nazývá úběr materiálu za jednotku času a je vyjádřena v mm^3/min . [15]

2.1.1.4 Utváření třísky při frézování

Tato problematika má u frézovacích operací velký význam. Proto je zapotřebí za účelem dosažení dobrého výkonu obrábění, trvanlivosti břitu nástroje a výsledků obrábění určit hodnoty tloušťky třísky. Utváření třísky je ovlivněno délkou záběru nástroje – počínaje vniknutím břitu frézy do obrobku, až po jeho vyjetí z řezu. Tvar třísky se mění jak s postupem obrábění, tak s polohou frézy. Tyto faktory by měly být zohledněny při volbě postupu frézování.

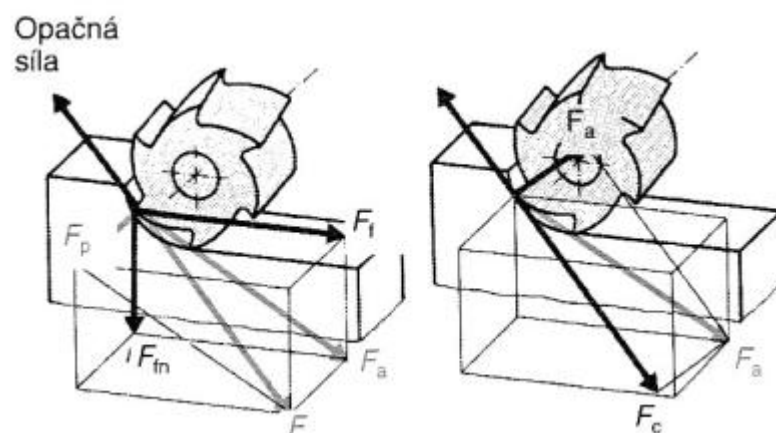
Maximální tloušťka třísky h_{max} se rovná vzdálenosti, kterou ujede stůl frézky mezi záběry dvou po sobě jdoucích břitů. Je to maximální tloušťka materiálu v radiálním směru, kterou musí břit na jeden záběr odebrat. Tato skutečnost je rozhodující při posuzování maximálního namáhání břitu. V závislosti na úhlu nastavení hlavního ostří frézy κ se mění i tloušťka třísky. Tento úhel je určován obráběnou plochou a pracovní rovinou hlavního ostří. U frézování jsou extrémními hodnotami úhly 45° a 90° , z nichž větší úhel při stejné hloubce řezu vytváří kratší třísku, avšak větší tloušťky, zatímco menší úhel tvoří delší, ale širší třísku (vztaženo k průřezu třísky). Čím je úhel nastavení hlavního ostří menší, tím je utvářená tříska tenčí a zabírá větší délku břitu. V tomto případě je namáhání jednotlivých břitů menší, což umožňuje zvýšení posuvu na zub frézy. Menší úhel nastavení hlavního ostří také znamená, že fréza při dané délce břitu může obrábět pouze při malých hloubkách řezu.

Tloušťka třísky nesmí klesnout pod určitou hodnotu, neboť průběh obrábění by byl nepříznivý. Posuv na zub by musel být zvýšen na odpovídající hodnotu, aby byl přizpůsoben správné tloušťce třísky. [15]

2.1.1.5 Řezné síly při frézování

Pro zajištění úspěšného průběhu frézovacích operací je nutné věnovat pozornost silám působícím při frézování (Obr. 9). Tak lze ověřit, zda vyhovuje příkon stroje nebo síly pro upínání obrobku. Jak směr tak i velikost složek řezných sil mohou značně kolísat v závislosti na faktorech ovlivňujících proces obrábění. Jsou to zejména postup způsobu frézování, materiál obrobku, poloha nástroje, tloušťka třísky, geometrie břitu, velikost a typ opotřebení břitu nástroje a řezné podmínky. Síly vyskytující se v průběhu procesu obrábění jsou většinou síly, vznikající na břitu při odebírání materiálu obrobku. Je možné říci, že se řezná síla skládá ze tří složek: tangenciální složka řezné síly F_c , normálová složka řezné síly F_{cn} a axiální složka řezné síly F_p . Tangenciální složka řezné síly působí ve směru otáčení frézy a má značný vliv na příkon stroje. Normálová a axiální složka řezné síly ovlivňují posunové a upínací síly. Velikost a směr složky řezné síly se určují podle zatížení každého jednotlivého zubu, který je v záběru. Tyto dílčí síly působí během rotace frézy různými směry.

Směr a velikost síly jsou ovlivňovány způsobem obrábění a zejména hloubkou řezu. Malá hloubka řezu při malém počtu zubů v záběru – což je typické pro rovinné frézování válčovou frézou – vyvolává řeznou sílu, jejíž směr působení je téměř shodný se směrem posuvu. Při větší hloubce řezu, a v případě, že je v záběru současně více zubů – často tomu tak je u rovinného frézování čelní frézou – se tangenciální složka řezné síly projeví jako síla působící kolmo ke směru posuvu. Různé podmínky řezného procesu tedy ovlivňují jak potřebný příkon stroje, tak i upnutí obrobku. [15]



Obr. 9. Síly na fréze a obrobku

2.1.2 Frézovací stroje

Frézovací operace se provádí na strojích zvaných frézky. Při frézovacích operacích vznikají proměnlivé řezné síly, což klade vysoké nároky na tuhost stroje bez vibrací. Frézky se dělí do těchto skupin: konzolové, stolové, rovinné a speciální. Dále jsou z hlediska řízení pracovního cyklu rozdělovány na ručně ovládané a programově řízené (tvrdá a pružná automatizace). [5]

3 CNC FRÉZOVÁNÍ

3.1 Číslicově řízené obráběcí stroje

NC – stroje s klasickými řídicími systémy

NC je zkratka výrazu Numerical Control, což znamená číslicové řízení. NC stroje jsou tedy řízeny čísly – numericky, číslicově. Vlastní programování se neprovádí na stroji, ale většinou v oddělení technické přípravy výroby na programovacím pracovišti. Zhotovený program se poté zavádí do řídicího systému pomocí čtení děrné pásky. Do řídicího systému stroje jsou postupně načítány údaje pro řízení stroje v jednom pracovním kroku. Každý z těchto kroků představuje jednu větu neboli blok programu. Tyto údaje jsou následně uloženy a zpracovány na řízení pohybů, či k vyvolání technologických funkcí (např. upnutí obrobku, start/stop vřetena atd.). Po vykonání jednoho kroku se přečte následující věta a původní údaje se zapomenou. Tento koloběh je ukončen přečtením informace o konci programu. NC stroje až na výjimky neumožňují editaci řídicích programů na stroji. [4], [5]

CNC – stroje s počítačovými řídicími systémy

CNC neboli Computerized Numerical Control – číslicové řízení počítačem – jsou dalším krokem ve vývoji NC strojů. Řídicí systémy u těchto strojů jsou vybaveny volně programovatelným počítačem, který se zadanými daty provádí výpočty a řídí stroj. Vlastnosti počítačového řídicího systému, jsou dány programem, jenž řídí činnost mikropočítače v jednotlivých režimech – tedy softwarově.

Na rozdíl od NC strojů není program čten a zpracováván z děrné pásky po jednotlivých větách, nýbrž je celý program zadán dříve, než se provádí první obrábění. Je zde také většinou umožněna grafická simulace na obrazovce, sloužící ke kontrole CNC programu před započítáním vlastního obrábění na CNC stroji. [4], [5]

DNC – počítačem monitorovaná a řízená síť NC strojů

DNC – Direct numerical control – přímé číslicové řízení skupiny NC strojů počítačem v reálném čase. Program stroje má číslicovou formu, přičemž nositelem informací je paměť PC. Systém přímého řízení redukuje náklady na údržbu a opravy řídicího systému. Nejde o přímou náhradu NC systému, i když počítač DNC systému může jeho funkci pře-

vzít. Hlavním úkolem DNC je uchovávat paměti programy podřízených NC strojů a ve vhodnou dobu je jim předat buď celé, nebo jednotlivě po blocích. [7], [4]

Výhody číslicově řízených strojů

Mezi hlavní výhody těchto strojů patří zvyšování kvality výrobků, vyšší produktivita práce a hospodárnost výroby. Výrobní čas je předem dán a tudíž není závislý na obsluze stroje. Další nespornou výhodou je možnost výroby součástí jejichž tvar je zadán matematickou funkcí a umožňují také zavedení nových typů strojů do výroby. Lze zde také rychle měnit výrobní programy. U těchto strojů odpadá výroba, skladování, údržba a obsluha různých rýsovacích, vrtacích a jiných přípravků. Dále lze zmenšit sklady náhradních dílů, protože požadovaná součást lze velmi rychle vyrobit pomocí programu uloženém na paměťovém médiu. Naproti tomu nevýhodou může být vysoká cena stroje, vyšší požadavky na údržbu, zvýšené nároky na technologickou přípravu a organizaci.

3.1.1 Souřadné systémy číslicově řízených obráběcích strojů

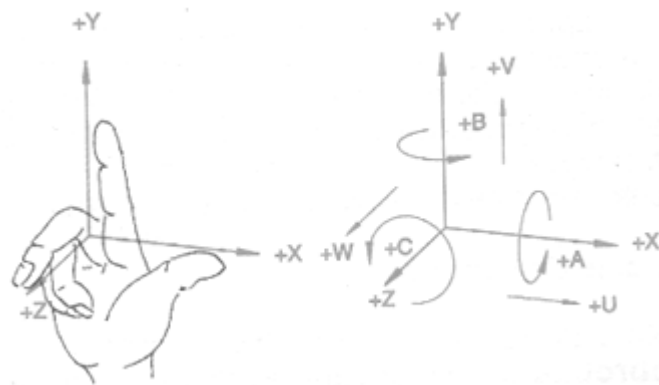
Abychom mohli CNC stroji ve formě čísel zadat pojezdové dráhy nástroje, je nutné určit jednoznačně souřadné osy pracovního prostoru stroje (Obr. 10). Základem definování os je pravoúhlá souřadná soustava s osami X, Y a Z, jenž se orientuje tak, aby souřadné osy byly rovnoběžné s vodíci plochami stroje. Souřadnicová soustava vychází od osy Z, která je rovnoběžná s osou hlavního vřeteně, případně kolmá k pracovní ploše stolu.

Orientace osy X je vodorovná a rovnoběžná s plochou upnutí obrobku. Osa Y doplňuje předešlé dvě osy na pravoúhlou souřadnicovou soustavu. Kladný smysl pohybu v určité ose je totožný se směrem vzdalování nástroje od obrobku.

Rovnoběžně s osami X, Y a Z jsou osy U, V a W, které se používají například pokud může u frézky s vertikálním vřetenem provádět příslušný pohyb jak stůl, tak i vřeteně.

Dále jsou určeny rotační pohyby A, B a C kolem os X, Y, Z, jejichž kladný smysl otáčení odpovídá smyslu otáčení hodinových ručiček při pohledu na danou osu v kladném směru.

[5]



Obr. 10. Pravoúhlá souřadná soustava a otočné osy

3.1.2 Vztažné body u číslicově řízených strojů

K tomu, aby bylo možné určit polohu nástroje a obrobku v souřadné soustavě stroje, slouží příslušné definované body na stroji, resp. v jeho pracovním prostoru (Obr.11). V závislosti na těchto bodech poté může být kontrolována např. poloha nástroje.

Nulový bod stroje (M) – určuje jej výrobce při konstrukci stroje. Výrobce stroj proměří a přezkouší. Tento bod je počátkem souřadnicové soustavy stroje a nemůže být uživatelem měněn. Nulový bod stroje je výchozím bodem pro všechny další souřadnicové systémy a vztažné body na stroji.

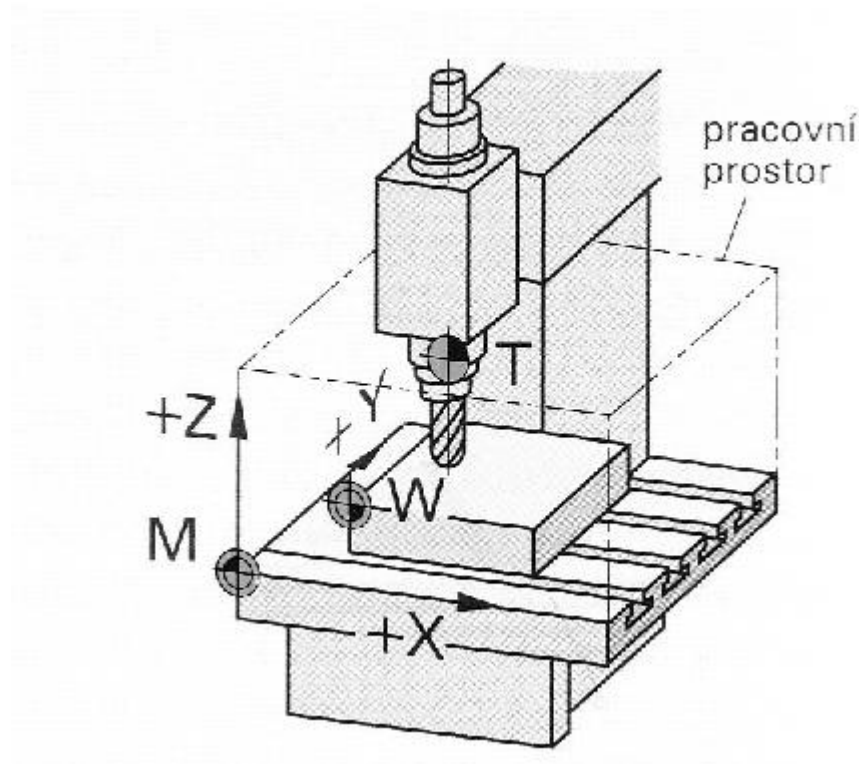
Nulový bod obrobku (W) – je volně volitelný programátorem a klade se na účelné místo (např. z kterého je obrobek zakótován). Konstruktor může ulehčit práci programátorovi tak, že např. obrobek zakótuje z jednoho místa (od měřicí základny), aby byly kóty přehledné. Tím se sníží možnost vzniku chyb při výpočtu souřadnic z kót na výkrese a ulehčí se práce.

Referenční bod (R) – je stanoven výrobcem a realizován koncovými spínači. Nástroj ve většině případů nemůže najet na nulový bod stroje. Proto je žádoucí stanovit referenční bod, na který lze najet přímo řízením, automaticky.

Vztažný bod suportu nebo vřetene (F) – u frézky je umístěn na čele vřetene a v ose její rotace. K bodu *F* se vztahují délkové korekce nástroje.

Bod nastavení nástroje (E) – bod na držáku nástroje, který se při upnutí ztotožní s bodem *F*. Je nutný pro zjištění korekcí nástroje na přístroji mimo stroj.

Referenční bod držáku nástroje (T) – leží v průsečíku osy a čelní plochy upínače. Tímto referenčním bodem, jehož poloha je uložena v paměti CNC systému, najíždí systém do referenčního bodu stroje. [2], [5]



Obr. 11. Polohy referenčních a vztažných bodů u frézky a její souřadný systém

3.1.3 Programování CNC strojů

3.1.3.1 Struktura programu

V programu pro číslkové řízení musí být obsaženy jak geometrické, tak technologické informace potřebné pro obrábění dané součásti. Informace geometrické v sobě zahrnují způsob pohybů nástroje, to znamená údaj o tom, zda se daný pohyb bude vykonávat posuvem, rychloposuvem, po přímce, či po kruhovém oblouku a dále udávají rozměry obrobku. Informace technologické stanovují technologii obrábění a slouží k informování o řezné rychlosti, otáčkách, posuvu, hloubce třísky atd. Informace pomocné jsou informace a povely

pro stroj pro určité pomocné funkce jako zapnutí chladicí kapaliny, směr otáček vřetene atd. Informace nutné k organizaci programu, jsou nutné pro vyvolání požadované posloupnosti jednotlivých bloků a slov programu (např. start/stop programu), dále pak začátek a konec bloku atd. [5], [2]

3.1.3.2 Zápís programu

Samotné programování se provádí v ISO kódu, přičemž každý blok je zapsán na samostatném řádku. Každý z bloků (věty) je očíslován kdy číslo věty, případně slovo N (number) např. N30 slouží k označení jednotlivé věty. Věty jsou poté zpracovány řízením v jejich dané posloupnosti.

Sestavení programu pro frézku se skládá z těchto činností:

- Určení pracovního postupu se zřetelem ke sdružení prvků programu do jednotlivých skupin, jenž se dají obrábět stejným nástrojem. Je žádoucí obrobít co nejvíce prvků minimálním počtem nástrojů.
- Určení počtu a sledu nástrojů, určení korekcí nástrojů.
- Určení upnutí obrobku a zajištění jeho stálé polohy.
- Volby řezných podmínek s ohledem na materiál obrobku i nástroje, určení charakteru operace (hrubování, dokončovací operace) a chlazení.
- Volba trajektorie jednotlivých nástrojů.
- Volba pracovních cyklů pro jednotlivé nástroje. Je nutné brát zřetel na změny řezných podmínek při postupně se měnícím úběru materiálu, změny posuvu v záběru i mimo něj a taktéž v závislosti na drsnosti povrchu u dokončovacích operací.
- Určení sledu jednotlivých pracovních cyklů jednotlivých nástrojů a zvolení míst pro výměnu nástrojů.
- Kontrola kolizí nástroje s obrobkem či s částmi stroje při rychloposuvu nástroje nebo při výměně nástroje. [1]

3.1.3.3 Formy programování

CNC programy mohou být sestavovány krok po kroku ručně přímo na NC stroji nebo s podporou počítače. Při programování s podporou počítače skládá programátor obrys ob-

robku jako obrysový řetězec z jednotlivých čárových segmentů (úseček, kruhových oblouků apod.). Potřebné výpočty při generování strojového NC programu provádí geometrický procesor. Vytvořený program je specifický pro daný řídicí systém.

Ruční programování – při ručním programování se v současnosti převážně používá kód ISO (G kód). V programech se používají mnemotechnické zkratky a zachovává se řádková struktura. Programátor u tohoto typu programování musí "ručně" sestavovat příslušné věty, kterými dává pokyny obráběcímu stroji a tím jej řídí. Je výhodné, pokud se náročnější programy vytváří mimo stroj na vhodném PC, které disponuje příslušným softwarem řídicího systému, v němž je možno program odsimulovat-odladit. Program se do stroje nahrává pomocí přenosného počítače, disketové jednotky nebo sítě. Ruční programování má tři základní fáze: přípravnou, realizační a kontrolní. Výstupem je poté NC program, seřizovací list, tabulka nástrojů, schéma upnutí, případně výroba součásti.

Programování dílenské – u tohoto typu programování se tvoří program přímo na NC stroji pomocí řídicího panelu. Dílensky orientované programování zahrnuje dílensky vytvořené programy i externě vytvořené programy, které lze dílensky dodělovat a upravovat. K takovému programování (úpravám) se nepoužívá strojový NC kód, ale uživatelsky orientovaný grafický jazyk, vyjadřující potřebná data interaktivním způsobem. Postupem doby a vývojem techniky (výkonnější hardware přímo na stroji) se v některých případech přenáší programování do dílny. Kvalifikovaná obsluha v překrytém čase, kdy koná pasivní dozor u CNC stroje, který obrábí, využívá čas a připravuje program pro další vyráběnou součást. Zde je jednotnost programování v dílně s externím programátorským pracovištěm. Programuje se interaktivně, při využití grafické podpory tak, že lze přímo na simulátoru vidět simulaci obrábění dynamicky po jednotlivě napsaných blocích. Při napojení na počítačovou síť je možné přebírat výkresy z CAD systému, včetně externě vyhotovených programů. [2]

Programování konturové – často se programátoři setkávají s výkresy, kde nejsou zakótovány potřebné důležité body na výkrese nutné pro programování, např. kontury, průsečíky, tečné body přímek nebo kruhových oblouků. Pokud přímky jsou rovnoběžné s osami souřadnic, lze požadované body vypočítat z výkresu. V případě, kdy oblouky nejsou v celých kvadrantech a přímky nejsou rovnoběžné s osami, to vyžaduje náročné výpočty. Softwarevé řešení umožňuje zadáním různých variant spojení základních elementů (které mohou být zadány tečným spojením, úhlem, bodem, sražením, zaoblením) vypočítat požadované body souřadnic a přenést je do programu. [2]

Absolutní programování – programované souřadnice koncového bodu jsou vztaženy k počátku souřadného systému obrobku (k nulovému bodu obrobku).

Inkrementální (přírůstkové) programování – souřadnice koncového bodu jsou vztaženy k předchozímu bodu. Programuje se tedy přírůstek souřadnic v kladném či záporném směru osy.

Programování pomocí CAD/CAM systémů - CAD/CAM systémy realizují vyšší stupeň počítačové podpory než klasické (ruční) CNC programování. Výkres vytvořený v systému CAD se kopíruje pro další práci v modulu CAM. U tohoto typu programování není potřeba uvádět funkce G, M, popisy dráhy atd. Tyto se automatizovaně vygenerují pomocí zadávaných příkazů z převzaté CAD kontury ve 2D výkresu, či z 3D modelu. [2]

CAD/CAM programování vyžaduje vyšší znalosti obsluhy CAM modulu (často i CAD). Programátor při náročném programování často vyhotoví více variant programů daného obrobku, a vybírá takový program, jehož výroba je časově méně náročná, aniž by docházelo k ničení nástroje a stroje a zároveň byla zaručena požadovaná kvalita výroby. Programátor odpovídá na kladené dotazy CAM modulu. Nabídka v CAM modulu je směřována na tyto body:

- 1) Celková strategie obrábění, tzn. volba výrobního postupu dané součásti, volby pořadí operačních úseků (hrubování, hlazení, závity atd.).
- 2) Volby nástroje (tvar a rozměry) a bod výměny nástroje. Řezné podmínky vztažené na nástroj a na obrobek pro danou strategii obrábění.
- 3) Podmínky vlastního obrábění jako jsou: strategie obrábění daného operačního úseku vázaný na jeden nástroj, poloha obrábění ke kontuře, způsob obrábění (podél kontury, lineárně atd.), chlazení, mazání nástroje, ochrana proti možné kolizi s držákem nástroje atd.
- 4) Procesor poté vyhotoví CL data pro odsimulování daného programu. Simulací se zjišťují možné chyby programu, např. neobrobené plochy apod. Programátor zde může tyto chyby v programu opravit.
- 5) Výběr postprocesoru "překladače" pro daný řídicí systém CNC stroje, na kterém se zhotoví daný výrobek.

- 6) Zhotovení CNC programu v modulu CAM, jenž se zapisuje podobně jako u ručního programování v blocích v ISO kódu. Program se následně přenáší na daný výrobní stroj.
- 7) Program je nahrán v ISO kódu do stroje a je možné ho v řídicím systému stroje číst i upravovat. [2]

3.1.3.4 Programovací jazyky

Jedním z prvních programovacích prostředků se stal jazyk APT, což je zkratka pro ‘Automatically Programmed Tools’. APT je geometricky orientovaný procedurální programovací jazyk, přísně definovaný podle ANSI standartu. APT program se skládá z údajů definujících geometrii, tj. z jednoduchých bodů, čar, kružnic a komplexních povrchů a údajů generujících pohyb nástroje buď přímo, nebo podle předdefinované geometrie. Dalším vývojem vznikly podobné programovací jazyky, např. ADAPT, MINIAPT, EXAPT a u nás ČKD-APT. V současné době již zájem o APT z řad technologů – programátorů klesá. Důvodem proč neustále pojem APT existuje spočívá v tom, že některé moderní CAD/CAM systémy využívají při generování textových CL dat formát, který je podobný datům technologické části programu APT. [11]

Dalším typem programovacího jazyka je ISO kód (G kód). Skládá se z číselně vyjádřených informací o činnosti NC stroje, jež jsou uloženy na nositeli informací. Každý krok obrábění představuje větu programu. Věty (Obr.12) jsou čteny ve své posloupnosti z programové paměti, zpracovány a výsledkem tohoto zpracování jsou pohyby nástroje a technologické funkce. Každá z vět programu je složena z bloků neboli slov, přičemž tyto se skládají z tzv. povelové (adresné) tvořené jedním písmenem a významové části tvořené posloupností číslic. Informační slova jsou většinou uváděna v následující posloupnosti: přípravná funkce, rozměrová funkce (tj. rozměr udávající hodnotu přemístění v jednotlivých pohybových osách), posunová funkce, funkce ovládající rychlost otáčení vřetena, funkce nástroje a pomocné funkce. Výhodou použití G kódu je skutečnost, že se jedná o poměrně jednoduchou aplikaci využitelnou zejména pro jednodušší obráběcí operace (např. řezání závitů apod.). Naopak nevýhodou tohoto typu programování je nutná znalost G kódu a jeho zákonitostí.

Příkazy používané u programování pomocí G kódu:

- M (make) – příkaz pro pomocnou obsluhu stroje,
- T (tool) – kódování nástroje,
- S (speed) – informuje řídicí systém o požadované velikosti otáček,
- F (feed) – definice posuvů,
- D – korekce nástroje.



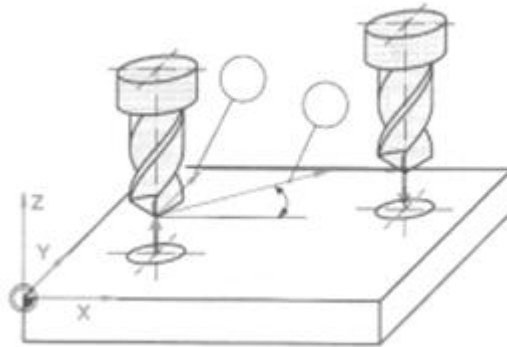
Obr. 12. Schéma struktury věty programu

3.1.4 Druhy řízení CNC strojů

Dle vybavení řídicích systémů CNC softwarem a hardwarem se rozlišují různé druhy řízení.

3.1.4.1 Systémy stavění souřadnic

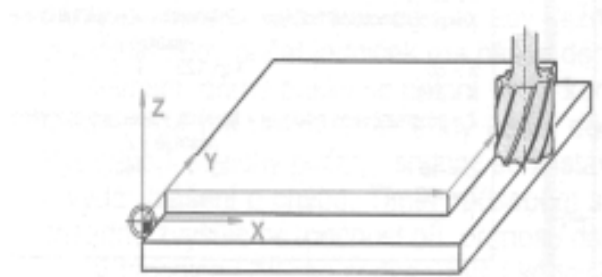
Je to nejstarší typ řízení (Obr. 13), jenž neměl mikroprocesor pro lineární ani kruhovou interpolaci. Nástroj se u tohoto druhu řízení pohybuje rychloposuvem na programovaný bod. Nezáleží přitom na vykonané dráze, takže do koncové polohy nejprve dojde jedna osa a poté dojde k pohybu v ose druhé. Nebo mohou jet na počátku pohybu obě osy současně (pod úhlem 45°), dokud první z os dosáhne naprogramované polohy. Poté jede druhá osa dále až ke svému koncovému bodu. Po najetí do výsledné polohy se provede obrobení v další ose. [5]



Obr. 13. Stavění souřadnic

3.1.4.2 Pravoúhlá řízení

Tento způsob řízení (Obr.14) je následným stupněm stavění souřadnic. Je zde umožněno obrábět rovnoběžně se souřadnými osami a bere se v úvahu rozměr nástroje (výpočet korekce). [5]



Obr. 14. Pravoúhlé řízení

3.1.4.3 Souvislá řízení

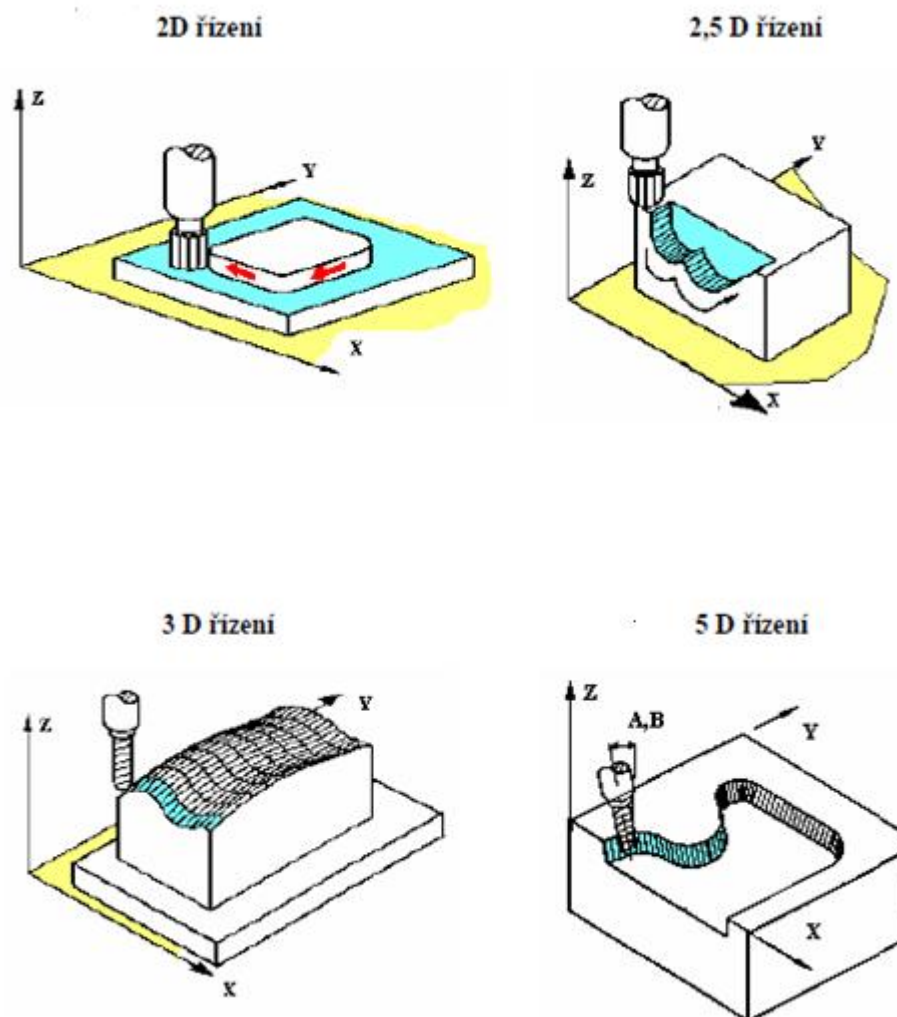
Je to řízení 2D, což znamená řízení ve dvou současně pracujících souřadných osách. Tento způsob řízení umožňuje výpočet korekce a geometrie. 2D řízení (Obr. 15) je používáno u soustruhů a fréz, je možno ho použít k obrábění rádius, tvarových ploch atd.

Dalším typem je 2,5D souvislé řízení (Obr. 15), jenž umožňuje obrábění ve dvou osách, vždy v jedné ze dvou rovin XY, YZ, ZX. Řízení třetí osy probíhá mimo NC systém.

Pomocí 3D řízení (Obr. 15) lze u frézek obrábět libovolné obrysy a prostorové plochy. Musí se přitom vypočítávat pohyb ve dvou osách (např. Y a Z) v závislosti na ose třetí – X. Tohoto řízení lze využít u CNC frézek a obráběcích center.

Pokud jsou vedle pohybů v osách X, Y a Z umožněny ještě další současné pohyby (např. otočný pohyb kolem osy X a Y), jedná se o řízení 4D, případně 5D. U 4 - osého řízení, jenž se využívá u frézek a obráběcích center, je často čtvrtou osou dělička. Tzv. indexování čtvrté osy znamená, že se obrobek může otáčet pouze v případě, kdy se neobrábí.

5 - osé řízení má 3 lineární + 2 rotační osy. Je zde umožněno obrábění z pěti stran objektu (Obr. 15). V dnešní době je možno používat i víceosé řízení. [5], [2]



Obr. 15. Příklady typů souvislého řízení

3.1.5 Nářadí v provozu NC strojů

Při obrábění na číslicově řízených obráběcích strojích jsou kladeny vysoké požadavky na produktivitu a rovněž minimální náklady. Jde především o vysokou řezivost a řezný výkon, kvantifikovaný velkým minutovým úběrem obráběného materiálu a taktéž odolností vůči

tepelným a mechanickým rázům, jímž musí řezné nástroje odolávat. Z těchto důvodů musí být zhotovena řezná část nástroje z velmi kvalitních a odolných materiálů:

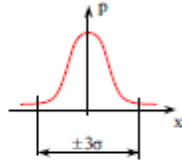
- nástrojové oceli (uhlíkové, slitinové),
- rychlořezné oceli,
- slinuté karbidy,
- cermety,
- keramické nástrojové materiály,
- polykristalický kubický nitrid bóru,
- polykristalický diamant,
- přírodní diamant.

V současnosti se u nástrojů na NC strojích a obráběcích centrech nejvíce používá nástrojů s vyměnitelnými destičkami ze slinutých karbidů (až 80% případů), dále pak nástroje z rychlořezné oceli a to zejména u tzv. osových nástrojů (výhrubníky, výstružníky, vrtáky, tvarové nástroje). [1]

3.1.6 Přesnost číslicově řízených obráběcích strojů

Přesnost NC a CNC strojů je dána součtem chyb řídicího systému a mechanických chyb. Rozložení mechanických chyb se řídí Gaussovým rozdělením (Obr.16), přičemž parametr σ udává výrobce. Chyba vlivem řídicího systému je dána uspořádáním jednotlivých os, přesnost polohování jedné osy je dána rozlišením odměřování. [18]

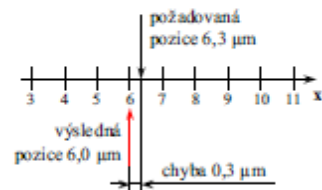
rozložení mechanických chyb:



v pásmu $\pm 3\sigma$ leží 99,73% případů
najetí – pásmo se měří jako
opakovatelnost osy (tj. 6σ)

chyba odměřování:

příklad pro rozlišení
digitálního odměřování $1\ \mu\text{m}$:



max. chyba odměřováním je $\frac{1}{2}$ jeho rozlišení

absolutní přesnost osy stroje = $\frac{1}{2}$ rozlišení + 3σ

Obr. 16. Přesnost CNC obráběcích strojů

4 STAV POVRCHU OBROBKU

Jedním ze základních požadavků při obrábění je, že jakost obrobené plochy se musí pohybovat v určitém rozsahu zadaných hodnot. Definice charakteru obrobeného povrchu zahrnuje náhodné i opakující se odchylky profilu (P) od naprosto ideálního povrchu (N) tak, jak vznikají při obrábění. Žádný povrch není v praxi dokonale rovný, struktura a drsnost každé plochy, by se však měli pohybovat v určitých zadaných mezních hodnotách. [15]

4.1 Parametry charakterizující výšku profilu

4.1.1 Profily

Povrchu - průsečnice skutečného povrchu a roviny kolmé k rovině skutečného povrchu.

Základní – profil odvozený z profilu povrchu potlačením krátkovlnných složek povrchu filtrem L_s , který stanovuje rozhraní mezi drsností a kratšími složkami vln na povrchu.

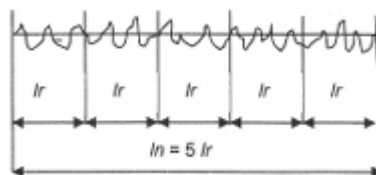
Drsnosti – profil odvozený ze základního profilu potlačením dlouhovlnných složek filtrem L_c , jenž stanovuje rozhraní mezi drsností a vlnitostí.

Vlnitosti – profil odvozený postupnou aplikací filtru L_c a L_f , jenž stanovuje rozhraní mezi vlnitostí a delšími složkami vln na povrchu. [14]

Stav povrchových ploch obrobku je popisován velkým množstvím veličin, jejichž četnost použití je rozdílná.

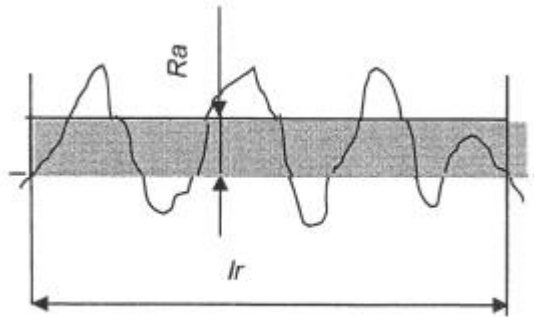
Základní délka l_r – základní délka pro R parametry je rovna vlnové délce dlouhovlnného filtru L_c , jenž stanovuje rozhraní mezi drsností a vlnitostí (Obr. 17).

Vyhodnocovaná délka l_n - vyhodnocovaná délka profilu (Obr. 17) obsahuje implicitně 5 základních délek l_r . Jejich jiný počet se musí předepsat. [14]



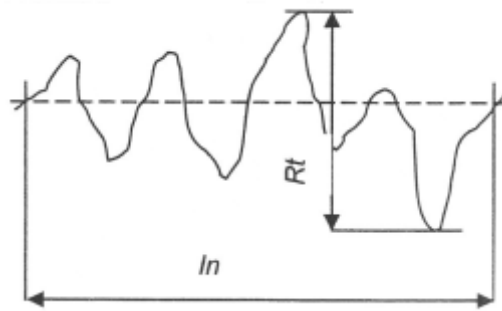
Obr. 17. Vyhodnocovaná délka

Průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu Ra – (Obr. 18) je velmi používanou veličinou. Je definována jako střední aritmetická hodnota absolutních odchylek profilu v rozsahu základní délky l_r . Při posuzování jakosti obrobeneho profilu je právě Ra nejčastěji používanou veličinou, přestože má tato hodnota pouze velmi omezenou vypovídající schopnost. Ra by měla být používána ve vhodné kombinaci s jinými charakteristikami povrchu. Ra neudává dostatečné informace o rozložení povrchových nerovností a u extrémně drsných, či naopak jemně obrobeneých povrchových ploch je tato hodnota takřka bezcenná. Ra se měří dotykem, spojeným s měřicí jednotkou, která provádí vyhodnocení naměřených hodnot. nedostatek současného měření drsnosti povrchu lze vyjádřit závěrem, že dva povrchy, jenž mají stejnou hodnotu Ra , mohou být zcela rozdílné ve svém chování z hlediska funkční spolehlivosti. [14], [15], [16]



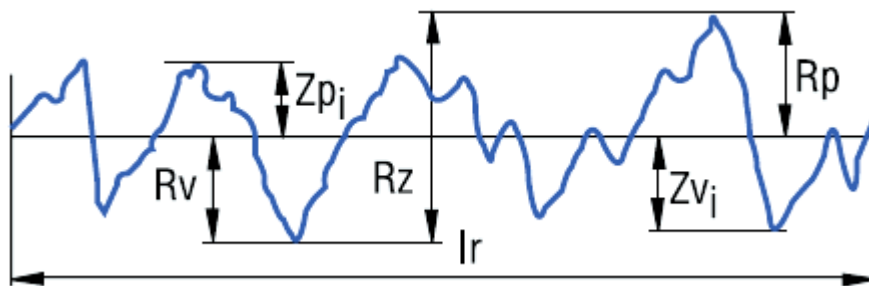
Obr. 18. Průměrná aritmetická úchylka profilu

Celková výška profilu Rt – (Obr. 19) je součet výšky nejvyššího výstupku profilu (Zp) a hloubky nejnižší prohlubně profilu (Zv) v rozsahu vyhodnocované délky l_n . [14]

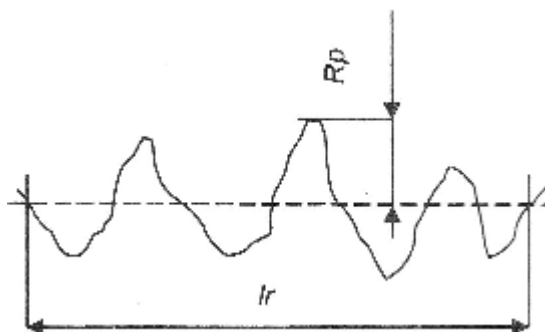


Obr. 19. Celková výška profilu

Největší výška profilu R_z – (Obr.20) součet výšky Z_p nejvyššího výstupku profilu a hloubky Z_v nejnižší prohlubně profilu v rozsahu základní délky l_r . [14]

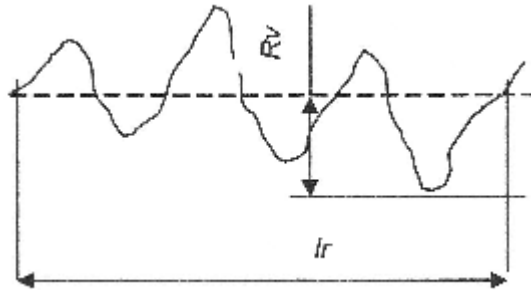
Obr. 20. Největší výška profilu R_z

Největší výška výstupku profilu R_p – (Obr. 21) výška největšího výstupku (Z_p) v rozsahu základní délky l_r . [14]



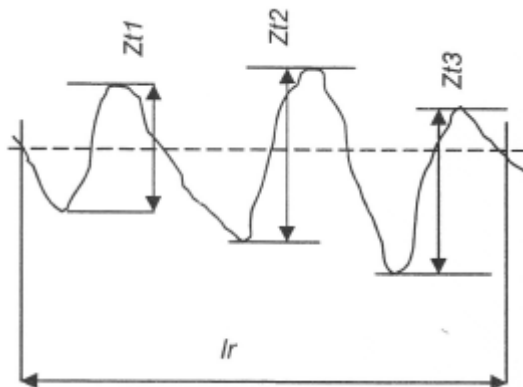
Obr. 21. Největší výška výstupku profilu

Největší hloubka prohlubně profilu R_v – (Obr. 22) hloubka největší prohlubně profilu (Z_v) v rozsahu základní délky l_r . [14]



Obr. 22. Největší hloubka prohlubně profilu

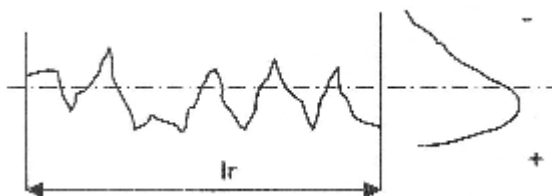
Průměrná výška prvku profilu Rc – (Obr. 23) průměrná hodnota výšek prvku profilu (Zt) v rozsahu základní délky l_r . [14]



Obr. 23. Průměrná výška prvku profilu

Průměrná kvadratická hodnota posuzovaného profilu Rq – kvadratický průměr souřadnic $Z(x)$ v rozsahu základní délky l_r . [14]

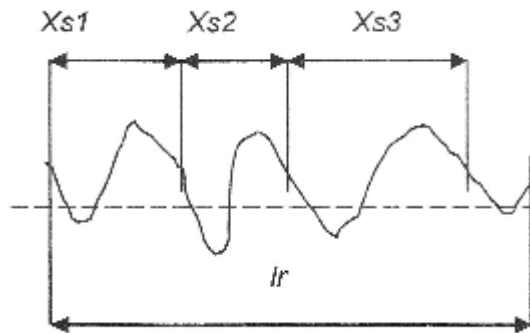
Šikmost posuzovaného profilu Rsk – (Obr. 24) podíl průměrné hodnoty třetích mocnin pořadnic $Z(x)$ v rozsahu základní délky l_r . [14]



Obr. 24. Šikmost posuzovaného profilu

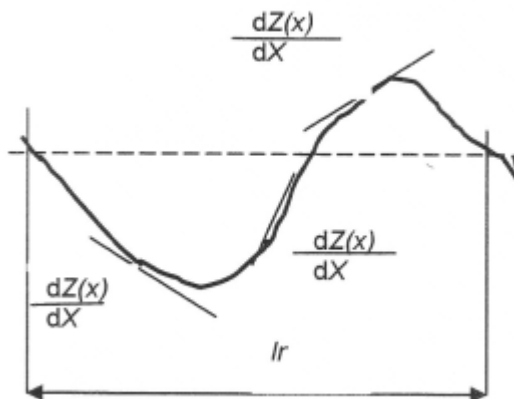
Špičatost posuzovaného profilu Rku – podíl průměrné hodnoty čtvrtých mocnin pořadnic $Z(x)$ v rozsahu základní délky l_r . [14]

Průměrná šířka prvků profilu Rsm – (Obr. 25) aritmetický průměr šířek prvků profilu Xs v rozsahu základní délky l_r . [14]



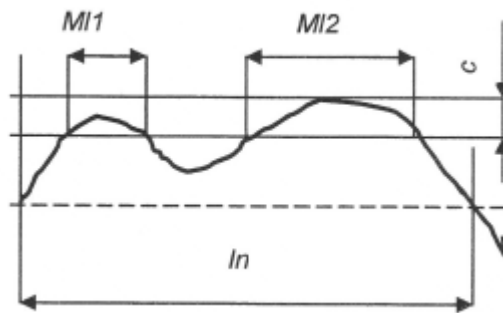
Obr. 25. Průměrná šířka prvků profilu

Průměrný kvadratický sklon posuzovaného profilu Rdq – (Obr. 26) kvadratický průměr sklonů pořadnic dZ/dX v rozsahu základní délky l_r . [14]



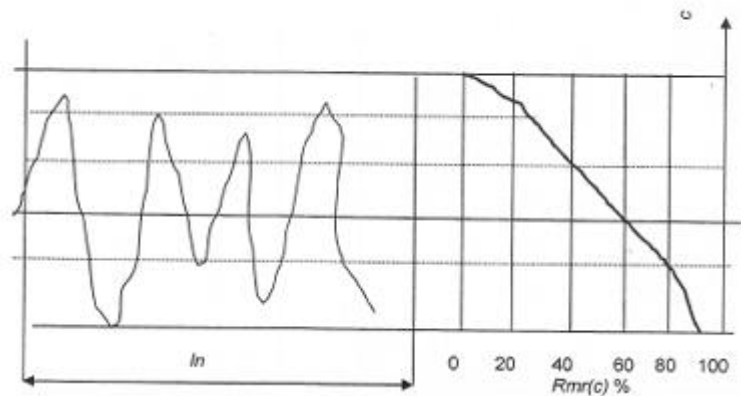
Obr. 26. Průměrný kvadratický sklon posuzovaného profilu

Materiálový poměr profilu (nosný podíl) $Rmr(c)$ – (Obr. 27) poměr délky materiálu elementu profilu $MI(c)$ na dané úrovni c , k vyhodnocované délce l_n . [14]



Obr. 27. Materiálový poměr profilu

Křivka materiálového poměru profilu (nosná křivka profilu) - (Obr. 28) materiálový poměr profilu v závislosti na výšce úrovně. [14]



Obr. 28. Křivka materiálového poměru profilu

Rozdíl výšky úseku profilu Rdc - svislá vzdálenost mezi úrovněmi dvou úseků daného materiálového poměru. [14]

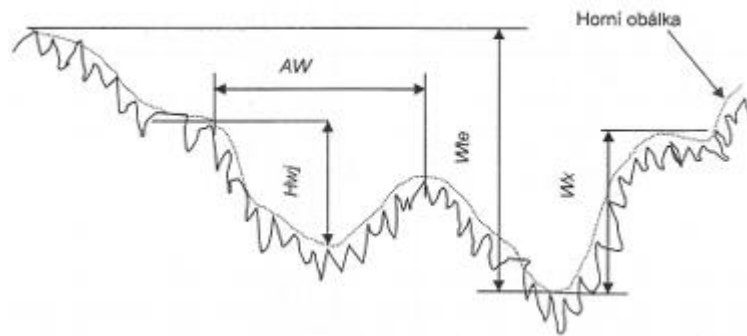
Vlnitost W – je charakterizována průběhem střední čáry vyhlazeného profilu povrchu (odfiltrovaná drsnost). [14]

Střední rozteč prvků motif vlnitosti AW – (Obr. 29) střední aritmetická hodnota délek prvků vlnitosti v rozsahu vyhodnocované délky. [14]

Střední hloubka prvků motif vlnitosti W - střední aritmetická hodnota hloubek prvků vlnitosti v rozsahu vyhodnocované délky. [14]

Největší hloubka vlnitosti Wx – (Obr. 29) největší hloubka v rozsahu vyhodnocované délky. [14]

Celková hloubka vlnitosti W_{te} – (Obr. 29) vzdálenost mezi nejvyšším a nejnižším bodem horní obálky základního profilu, měřená kolmo na obecný směr základního profilu. [14]



Obr. 29. Parametry vlnitosti

4.1.2 Struktura povrchových ploch

Na obráběných plochách vznikají při řezném procesu nepravidelnosti. Stav povrchu je závislý na procesu obrábění, na použitém nástroji a stupni opotřebení břitu a na tuhosti obráběcího systému (statické i dynamické). Velmi malé nepravidelnosti povrchu jsou označovány jako drsnost (R). Drsností se rozumí jemné strukturované mikrogeometrické odchylky od ideálního profilu. Dalším stupněm nepravidelností je vlnitost (W) (Obr. 30). Při vlnitosti předpokládáme, že vzdálenost vln činí 100-násobek až 1000-násobek hloubky vln. U drsnosti tento poměr činí čtyřnásobek až padesátinásobek. Drsnost je makrogeometricky překryta vlnitostí. [15]



Obr. 30. Vlnitost a drsnost povrchu

Dalšími typy vad na obrobcích mohou být:

- *Odchylka tvaru* – přímost, rovnoběžnost, válcovitost, kruhovitost atd.

- *Textura povrchu (L)* – uspořádání stop (rýh) po obrábění. Takto je označován směr převládajícího vzorku na povrchu vytvořený břitem nástroje.
- *Porušená místa (F)* - jsou to nedostatky, jež nelze definovat jako měřitelné vady povrchu. Jedná se např. o vměstky v materiálu obrobku, trhliny, škrábance a jiná neúmyslná poškození povrchu obrobku. [15]

4.1.2.1 Měření profilu povrchu

Skutečný povrch výrobku vykazuje oproti struktuře uvedené na výkresu odchylky, závislé na výrobním postupu. Sejmутý profil (primární profil) je profil s nejmenšími detaily, sejmутý velmi přesně např. diamantovým hrotem nebo laserem. Sejmутý primární profil je výchozím základem pro určení nerovností různých řádů, resp. zvlnění různých vlnových délek, tj. pro určení zvlnění a drsnosti pro určení parametrů drsnosti.

Snímací přenoska mění pohyb diamantového hrotu na elektrický signál, z něhož jsou poté určeny parametry povrchu. Z primárního profilu lze odfiltrováním složky nízkého kmitočtu (zvlnění) získat průběh drsnosti a odfiltrováním vysokých kmitočtů (drsnosti) lze naopak získat průběh zvlnění.

Přístroje pro měření drsnosti povrchu snímající profil ve zvolené rovině řezu kontaktním způsobem používají ke snímání diamantového hrotu. Nejvhodnějším tvarem hrotu je kužel s vrcholovým úhlem 60° nebo 90° se zaobleným hrotem. Pro různé hloubky drsnosti se doporučují různá zaoblení hrotu, protože ostřejší hrot může lépe snímat jemně zdrsněný povrch. [6]

4.1.2.2 Závislost struktury povrchu na charakteristických hodnotách obrábění

Vzhled a parametry obrobenej plochy jsou určovány použitým procesem obrábění a směrem, ve kterém nástroj řezal. Každý typ řezného nástroje zanechává na obráběném povrchu méně či více výrazné stopy. [15]

Faktory ve vztahu k řeznému nástroji:

- stabilita,
- vyložení,

- geometrie břítu,
- materiál obrobku,
- opotřebení břítu,
- utváření třísky,
- řezné podmínky,
- teplota na břítu při procesu obrábění.

Faktory vztahující se na obráběcí stroj:

- stabilita,
- chladící médium,
- technický stav stroje,
- prostředí obrábění,
- tuhost a příkon stroje.

Faktory vztahující se k obrobku:

- stabilita,
- upnutí,
- konstrukce,
- druh materiálu obrobku, tepelné zpracování,
- předcházející proces obrábění,
- charakter polotovaru (přídavky na obrábění, ostřihy atd.),
- tolerance tvarů a rozměrů,
- jakost obrobeného povrchu. [15]

Nerovnosti, které se objevují na obrobené ploše mají v mnoha případech určité charakteristické uspořádání, jenž je výsledkem vzájemných geometrických a kinematických vztahů

nástroje a obrobku. Podle podmínek obrábění, druhu materiálu obrobku, materiálu nástroje se to projeví buď na změně charakteru povrchu, nebo na změně vlastností povrchové vrstvy. Největší vliv na tvar obrobené plochy má tvar špičky nástroje, který je definován poloměrem zaoblení r_ϵ , úhlem nastavení κ_r a vedlejším úhlem nastavení κ_r' . Dalším činitelem, který má významný vliv na drsnost povrchu a charakterizuje kinematický vztah mezi špičkou nástroje a obrobkem je posuv, jenž je u všech obráběcích metod nejvýznamnější veličinou z řezných podmínek. [15]

Je možno rozlišovat drsnost teoretickou a skutečnou drsnost povrchu. Teoretická drsnost povrchu (teoretický tvar nerovností) může být geometricky určena za předpokladu, že: Obráběný materiál je považován za absolutně nedeformovatelný, ostří nástroje tvoří geometrické čáry, systém stroj-nástroj-obrobek je absolutně tuhý. Pak je možné stanovit teoretickou drsnost povrchu (resp. teoretickou největší výšku nerovností) ze vzorců odpovídajících geometrickým schémátům kinematiky odebírané třísky. Skutečné charakteristiky drsnosti povrchu se od vypočtených teoretických hodnot odlišují velikostí i tvarem. Příčiny změny tvaru profilu obrobeného povrchu a příčiny zvýšení skutečných výšek nerovností proti nerovnostem teoretickým je možné hledat v materiálových a technologických činitelích. Mezi činitele technologické patří chvění nástroje i obráběné součásti, nerovnosti ostří nástroje, jeho opotřebení či změna řezného prostředí. Největší vliv na zhoršení skutečné drsnosti mají faktory materiálové. Vlastní příčinu rozdílnosti teoretické a skutečné drsnosti je nutno hledat především v mechanismu vytváření nového povrchu. Tento mechanismus ovlivňují fyzikální vlastnosti obráběného materiálu a také podmínky zatěžování, které vyvolává nástroj působící na obrobek během řezného procesu. [16]

4.1.2.3 Ovlivnění kvality a jakosti obrobené plochy při frézování

Každý druh řezného nástroje zanechává na obráběném povrchu více nebo méně výrazné stopy. Vzhled obrobené plochy je určován použitým procesem obrábění a směrem, ve kterém nástroj řezal. V průběhu doby se změnilo dosud obvyklé poměry mezi procesem obrábění a stavem obrobeného povrchu. Příčinou je pokračující vývoj řezných nástrojů, obráběcích strojů a všeobecně technologií obrábění. [19]

V dnešní době lze frézováním vytvářet povrchy dokonalé jakosti, čehož bylo možné v dřívějších dobách dosáhnout jen broušením. To znamená, že se změnila souvislost mezi jakostí obrobené plochy a výrobními náklady. [19]

Teoreticky dosažitelnou jakost obrobeného povrchu lze pro procesy frézování vypočítat. Výsledek výpočtu je výchozím bodem pro určení, jaké jakosti povrchu může být za ideálních podmínek dosaženo. Skutečný výsledek je ovlivňován velkým počtem faktorů, které se v procesu obrábění vyskytují. Mimoto působí na jakost obrobeného povrchu statická a dynamická tuhost celého systému sestávajícího z nástroje, stroje a obrobku. [19]

Na nástroj jsou při rychlostním frézování kladeny vysoké požadavky. Důležitým faktorem ovlivňujícím průběh obrábění a následnou jakost obrobené plochy je stabilita řezného nástroje. Ta se dá docílit přesným vyvážením a bezpečným upnutím rotujícího nástroje. Dnes je nabízena celá řada upínacích systémů, avšak ne všechny vyhovují podmínkám vyšších otáček vřeten. Další parametr, který má vliv na stabilitu nástroje a následně celého obrábění, je vyložení. Je žádoucí, aby měl nástroj minimální vyložení. Tato problematika se nejčastěji vyskytuje u stopkových fréz. [19]

Vzhled obrobené plochy je do značné míry závislý na podmínkách, při jakých se bude z materiálu odřezávat tříska. Při utváření třísky je nejdůležitějším aspektem geometrie nástroje. Tato geometrie je závislá na obráběném materiálu a materiálu nástroje. Při obrábění neželezných kovů je snahou použít co nejpozitivnější geometrii břitu. Slitiny hliníku se obrábí nástroji s úhlem čela v rozsahu $12 - 15^\circ$ a úhlem hřbetu $20 - 25^\circ$. Pro slitiny mědi se osvědčil úhel čela kolem 8° a úhel hřbetu 16° . Litina je efektivně obráběna nástroji s úhlem čela 0° a úhlem hřbetu přibližně 12° . Nejširší skupina obráběných materiálů, což jsou oceli, vyžadují uplatnění širšího výběru geometrií nástroje. Záleží na druhu oceli, způsobu tepelného zpracování, tvrdosti, zpevňování za studena atd. obecně lze pro měkké materiály doporučit úhel čela 8° . Pro tvrdší materiály se volí nástroj s menším úhlem čela. Pro kalené oceli je ideální velikost úhlu čela 0° . Úhel hřbetu se obecně volí 16° , pro obtížně zpracovatelné materiály 20° . Pro plasty a kompozitní materiály platí podmínka ostrého břitu snad nejvíce. Negativní nebo otupený břit má za následek vytrhávání vláken matrice a tím i destrukci obrobku. [19]

Opotřebení břitu nástroje se projeví také v silových poměrech obrábění. Zvýší se řezné síly působící na nástroj a potřebný výkon vřetene bude stoupat. Opotřebení nástroje má za ná-

sledek výrobu nepřesných výrobků. Kdyby otupení nadále stoupalo, může nastat i destruktivní lom nástroje. [19]

V souvislosti s řeznými nástroji je třeba zmínit se o řezných podmínkách, při kterých se používají. Správná volba řezných podmínek je základem pro kvalitní povrch obrobené plochy. Tyto parametry obrábění (řezná rychlost, posuv na zub, hloubka řezu) většinou pro konkrétní nástroj a obráběný materiál udává výrobce nástroje. Nesprávná volby těchto parametrů může vést k nevyužití parametrů stroje, znehodnocení povrchu výrobku nebo k destrukci řezného nástroje. Jako příklad lze uvést vytváření nárůstku na čele nástroje, opotřebení hřbetu, břitu a opotřebení ve tvaru vrutu na hřbetě břitu, trvalá plastická deformace břitu a vznik hřebenových trhlin na ostří. [19]

Na jakost obrobené plochy má vliv také chemické složení obráběného materiálu. Snad nejhlavnější podmínka pro dosažení nízké drsnosti a kvality povrchu je stabilita a tuhost obráběcího stroje. Tuhost rámu je důležitá pro tlumení celého procesu obrábění. Vzniklé vibrace mohou být způsobeny nedostatečným upnutím polotovaru. V průběhu procesu obrábění se mění řezné síly. Proto by měl stůl CNC centra a upínací zařízení obrobku být z hlediska zachycování sil dostatečně stabilní a měly by spolehlivě upínat obrobek. Při použití kuličkových šroubů u posuvů by se mělo dbát na jejich tuhost a minimální vůli. Například při sousledném válcovém frézování má nástroj snahu vtahovat obrobek pod sebe a v případě velkých vůlí kuličkového šroubu může nastat změna posuvu (zvýšení) a tím pádem poškození nástroje, vznik vibrací a znehodnocení povrchu součásti. [19]

Dalším faktorem ovlivňujícím kvalitu povrchu je příkon a tuhost vřetene. Při nedostatečném příkonu vřetene může dojít díky vyšším posuvům ke vzniku vibrací a následnému poškození vřetene, řezného nástroje a povrchu obrobku. [19]

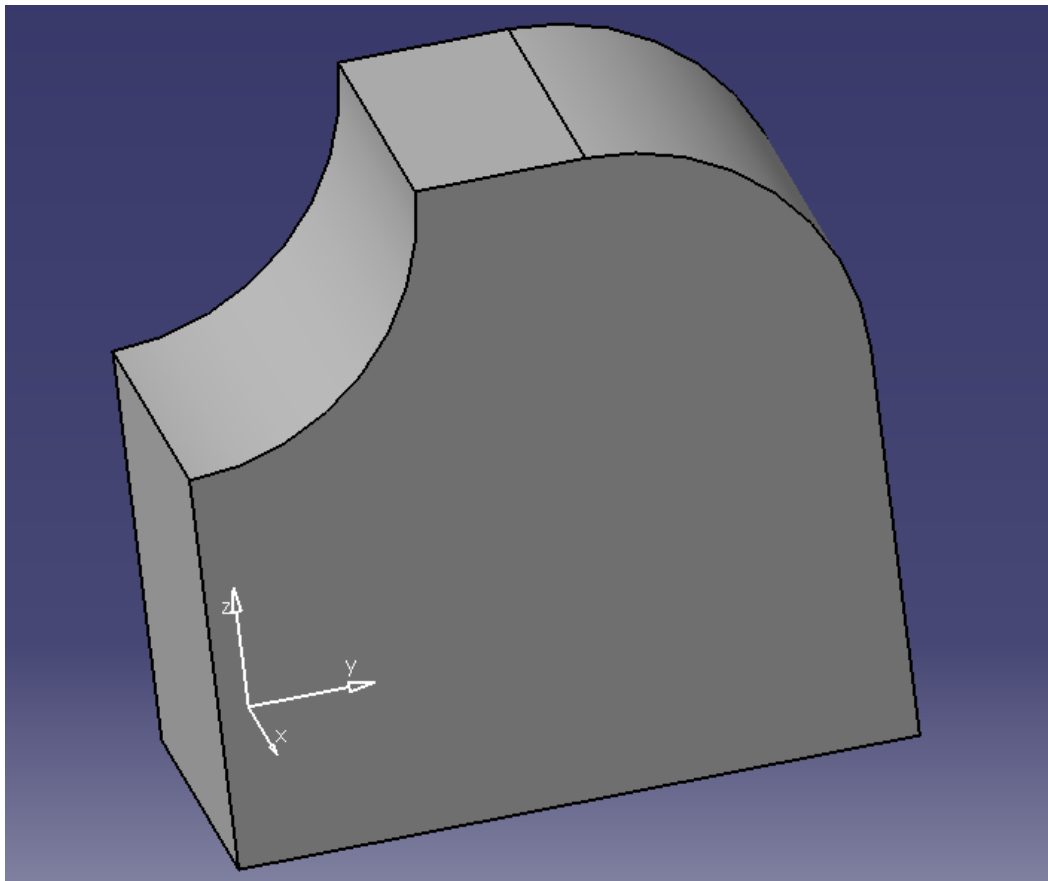
II. PRAKTICKÁ ČÁST

5 TVORBA MODELU SOUČÁSTI

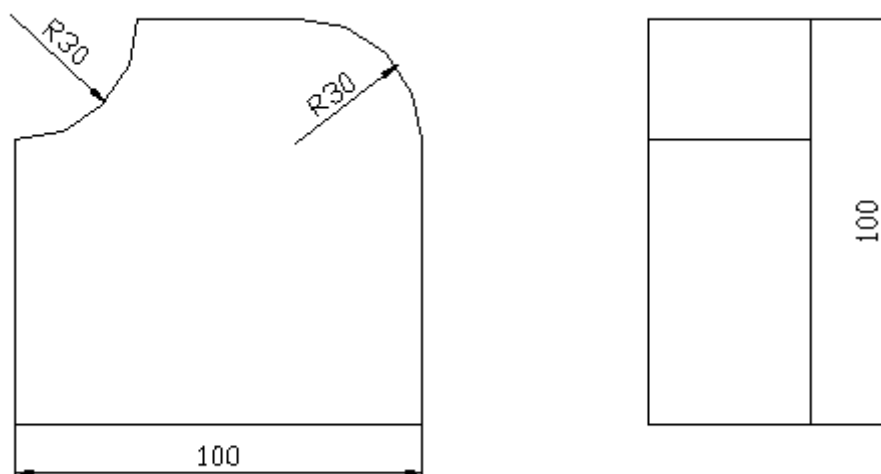
5.1 Volba geometrie a tvaru součásti

Geometrie součásti byla zvolena tak, že její rovinné plochy byly spojeny zaoblením-jak konkávní, tak konvexní plochou. Tato geometrie součásti byla zvolena z důvodu velmi častého výskytu tohoto typu spojení rovinných ploch ve strojírenské výrobě. Tyto zaoblené plochy poté byly obráběny zvolenými řeznými podmínkami a byly vyhodnocovány parametry drsnosti obrobeneho povrchu.

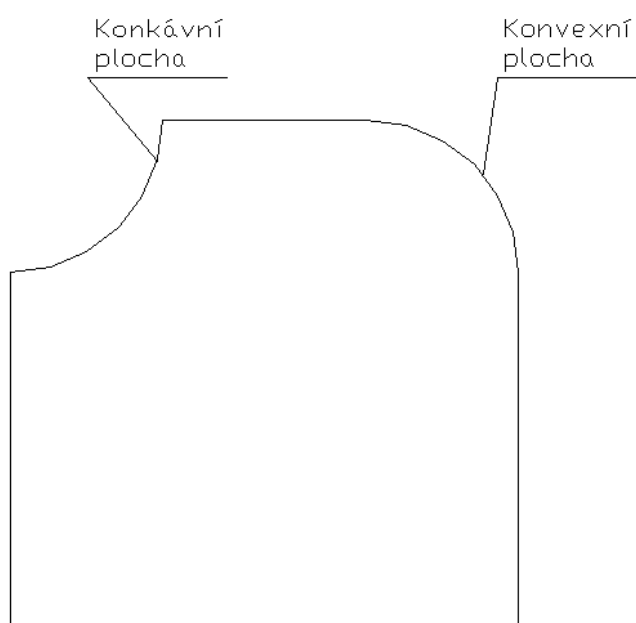
Model součásti byl vytvořen v programu Catia V5R18.



Obr. 31. Tvar součásti



Obr. 32. Rozměry a tvar obráběné součásti



Obr. 33. Konkávní a konvexní plocha součásti

6 DEFINOVÁNÍ OBRÁBĚCÍ STRATEGIE

Vytvořený model byl poté vyexportován do programu CAM Express, kde byly přesně nadefinovány zvolené řezné podmínky, obráběcí strategie a geometrie obráběcích nástrojů.

Z CAM Expressu byl získán program, jenž slouží jako strojní příkazy pro zhotovení obrobku pro konkrétní kombinaci obráběcího stroje a řídicího systému.

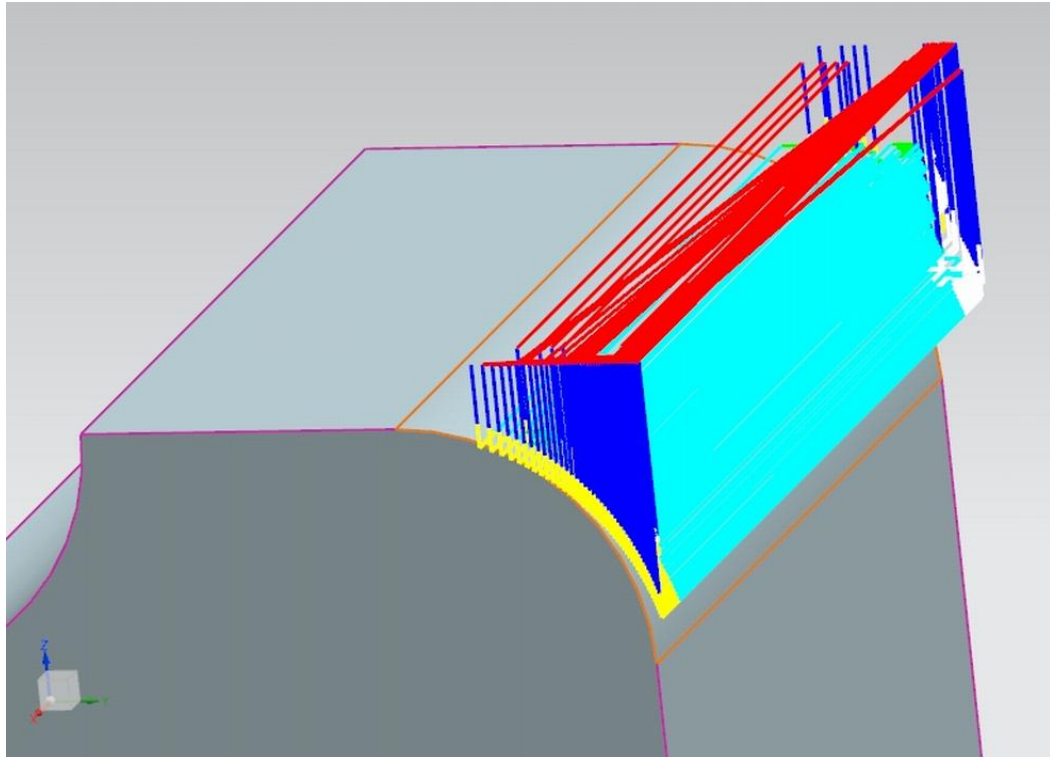
Obráběcí program byl poté nahrán do PC připojeného k CNC frézce (viz. kap. 6.3) na níž probíhalo samotné obrábění. Po upnutí součásti do svěráku byl nadefinován nulový bod obrobku a spuštěn CNC program.

6.1 Programování v CAM Express

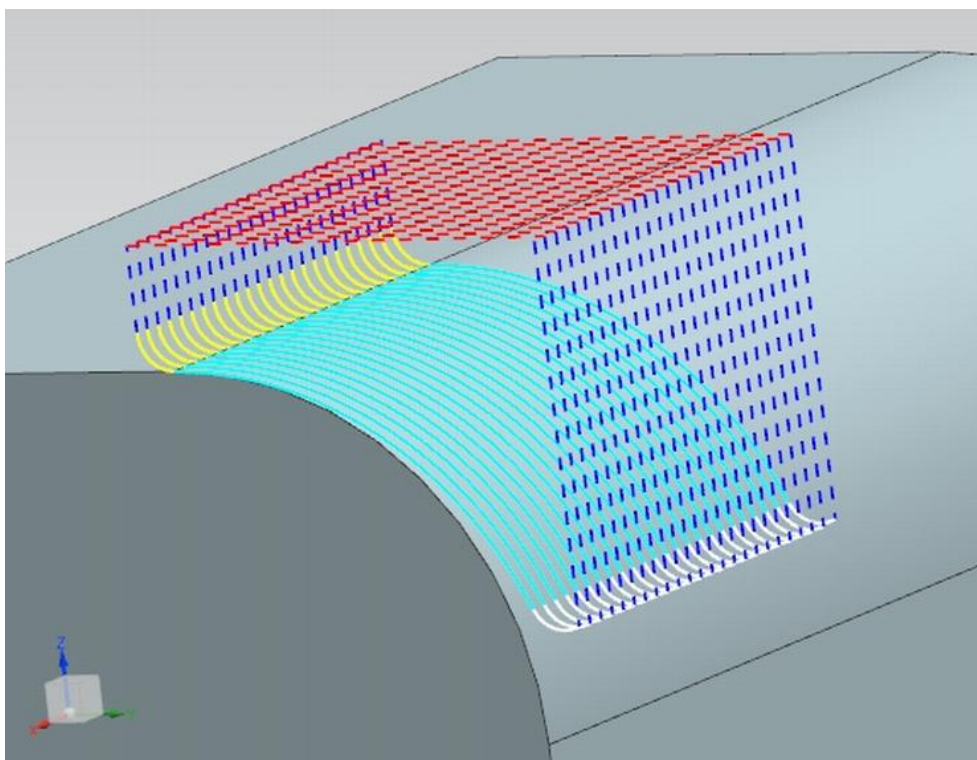
Samotné programování se skládalo z několika kroků. V programu CAM Express byl nejprve ze základního polotovaru vyhrubován tvar součásti s přídávky na obráběná načisto. Poté byl zhotoven program k obrábění načisto s použitím příslušného nástroje a danými řeznými podmínkami. Tento program byl následně verifikován a byly překontrolovány možné vady, či kolize nástroje apod.

Pro každý z použitých průměrů nástroje D a také pro všechny hodnoty radiální hloubky řezu a_e a parametru SH musel být program editován, verifikován a znovu překontrolován.

Pro obrábění načisto byla v programu CAM Express použita obráběcí strategie Countour Area.

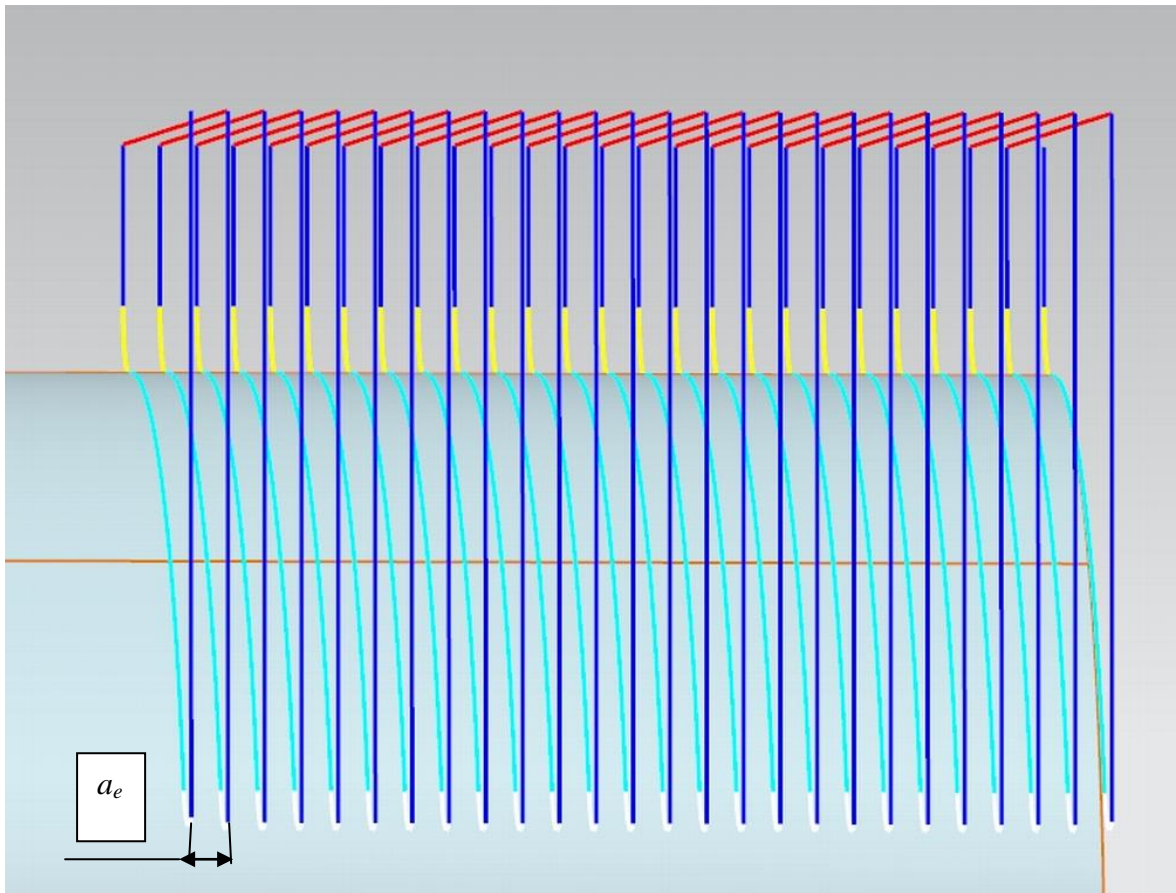


Obr. 34. Dráhy nástroje při hrubování



Obr. 35. Dráhy nástroje pro obrábění načisto-obráběcí

strategie Countour Area



Obr. 36. Parametr a_e

6.2 Volba řezných podmínek

Jako materiál obráběné součásti byl zvolen Necuron 651 a také dural AW 5083. Dva různé materiály byly vybrány z důvodu porovnání jejich vlivu na parametry obrobené plochy.

S ohledem na zvolené materiály obrobku byly následně zvoleny řezné podmínky. Nejprve bylo nutné vyhrubovat požadovaný tvar součásti a poté se provedlo obrábění načisto.

Jako hrubovací nástroj byla u obou materiálů zvolena válcová fréza o průměru $D=8\text{mm}$ a se zaoblením ostří $R=1\text{mm}$.

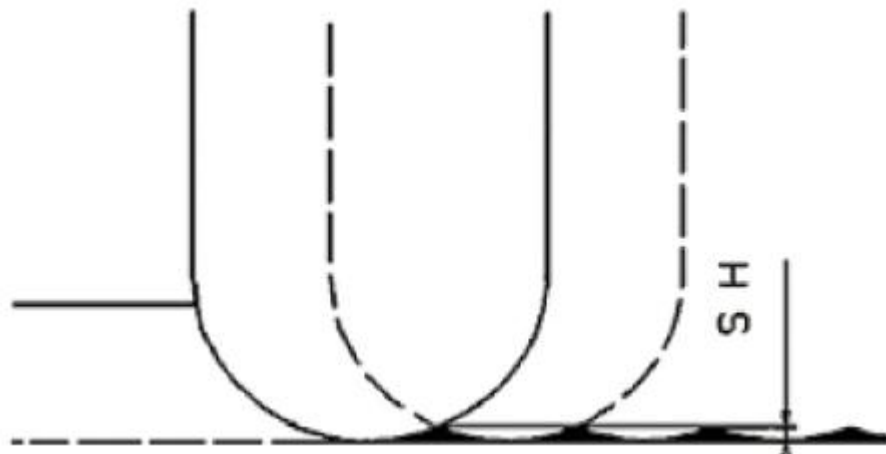
Tab. 2. Řezné podmínky pro hrubování
(u obou druhů materiálu)

Otáčky n	3000 ot./min
Přídavek pro obrábění na- čisto	0,5 mm
Posuv na zub frézy f_z	0,33 mm
Řezná rychlost v_c	75 mm/min
Posuvová rychlost v_f	2000 mm/min

Po vyhrubování následovalo dokončovací obrábění na čisto. Toto bylo provedeno šesti různými nástroji a šesti různými hodnotami a_e (šířka záběru frézované plochy). Jako nástroje pro dokončovací obrábění byly použity kulové frézy o průměrech $D=3, 4, 5, 6, 8$ a 10mm . Použité frézy byly vyrobeny firmou SECO. Šířka záběru frézované plochy a_e byla zadávána v procentech průměru nástroje a její hodnoty byly zvoleny takto: $5\%D, 10\%D, 15\%D, 20\%D, 25\%D$ a $30\%D$. Pro každý z průměrů nástroje byly použity všechny tyto hodnoty a_e a to jak pro konkávní, tak i konvexní plochu.

V dalším kroku následovalo obrábění Necuronu 651 kulovou frézou o průměru $D=6\text{mm}$.

V tomto případě však již nebyla nastavována hodnota a_e v procentech průměru nástroje D , ale byla zadávána hodnota SH , což je parametr nastavení výšky nerovnosti (závisí na vzdálenosti dvou po sobě následujících drahách nástroje). Byly zvoleny tyto hodnoty SH : 20, 40, 60, 80, 100 a $120\ \mu\text{m}$.

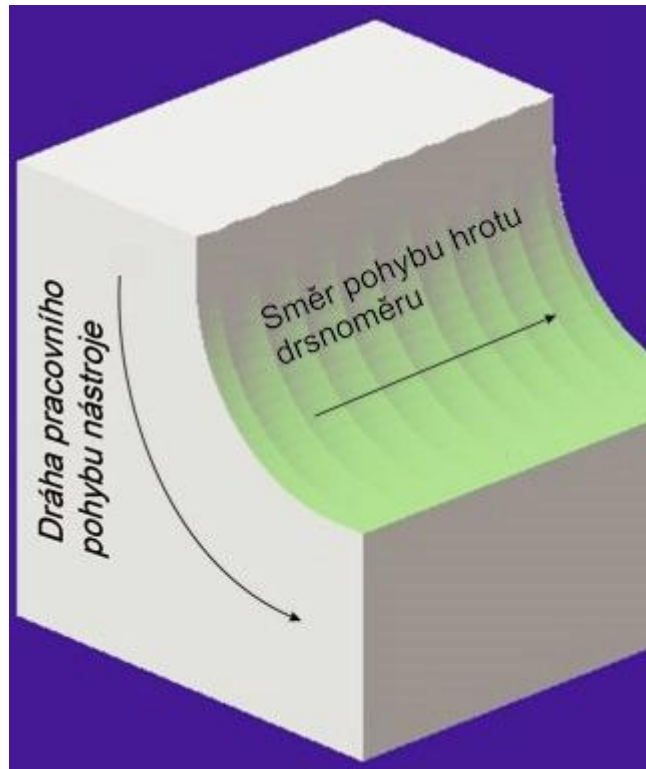


Obr. 37. Parametr SH (Scallop Height)

Pro obrábění duralu byla zvolena tatáž geometrie jako u Necuronu. Vyhrubování probíhalo opět válcovou frézou o průměru $D=8\text{mm}$ a se zaoblením ostří $R=1\text{mm}$. Taktéž řezné podmínky byly stejné jako v předešlém případě. Pro obrábění na čisto byla použita kulová fréza o průměru $D=8\text{mm}$, přičemž hodnota a_e byla zvolena v procentech průměru nástroje, konkrétně pak $a_e=25\%D$. Podobně jako ve všech předešlých případech, byla i zde obráběna jak konkávní tak i konvexní plocha.

6.2.1 Volba řezná strategie

Dokončovací obrábění zaoblených ploch probíhalo ve všech případech sousledným frézováním. Vedlejší pohyb nástroje probíhal ve vertikálním směru po kontuře konkávní/konvexní plochy součásti, přičemž drsnost obrobenej plochy byla následně vyhodnocována ve směru příčném na směr pohybu nástroje.



Obr. 38. Směr pohybu nástroje a směr pohybu hrotu drsnoměru

6.3 Parametry CNC frézky AZK HWT C -442

Celá práce probíhala na 3D CNC frézce AZK HWT C-442. Její parametry jsou následující:

Tab. 3. Parametry CNC frézky

Pracovní zdvih (X, Y, Z)	400x400x200mm
Velikost upínací plochy (X, Y)	500x500mm, 8mm T-drážky
Posuvy plynule	3000mm/min
Programovací jednotka	0,00625mm
Otáčky vřetena	2000-25000 ot/min
Max. upínací průměr nástroje	10mm
Motor vřetena	1000 W univerzální
Řídící jednotka	PC
Napájení	230 V/50 Hz
Příkon	2300 VA
Vnější rozměry (šxhxv)	1200x1000x1400mm
Hmotnost	410kg
Materiál obrobku	plasty, dřevo, barevné kovy, grafit

6.4 Použité materiály

Pro obrábění byly použity dva typy materiálů: Necuron 651 a Dural AW 5083.

6.4.1 Necuron 651

Necuron je plast, který je velmi podobný dřevu. Tento materiál je vyráběn firmou Necumer. Necuron je dodáván v několika různých hustotách, podle nichž se liší číselné označení materiálu.

Vlastnosti a technická data Necuronu 651:

Tab. 4. Vlastnosti Necuronu 651

Barva	Hnědá
Koef. tepelné roztažnosti	$52 \cdot 10^{-6} K^{-1}$
Teplotní odolnost	$70^{\circ} C$
Tvrdość Shore D	67
Pevnost v tlaku	$26 N/mm^2$
Pevnost v ohybu	$30 N/mm^2$
Měrná hmotnost	$0,70 g/cm^3$

6.4.2 Dural AW 5083

Dural je obchodní označení pro různé slitiny hliníku (obvykle 90-96%) a mědi (4-6%) s malými přísadami mědi, hořčíku, manganu aj. Dural je nepatrně těžší než hliník, ale má až pětkrát vyšší pevnost v tahu i tvrdost. Pevnost i tvrdost lze zvýšit tepelným zpracováním a zušlechťováním jako u ocelí. Dural se používá v automobilovém průmyslu, ve stavebnictví, při výrobě letadel a lodí.

Vlastnosti AW 5083:

Tab. 5. Vlastnosti AW 5083

Slitina	EN AW [AlMg4,5Mn0,7]
Mez kluzu	100-125 MPa
Pevnost v tahu	260-270 MPa
Tažnost A ₅	12%
Hustota	2,66 g/cm ³
Modul pružnosti	70 GPa
Koef. tepelné roztažnosti	$24,2 \cdot 10^{-6} K^{-1}$
Odlamování třísek při obrábění	Přijatelné
Lesk opracovaného povrchu	Velmi dobré

7 NAMĚŘENÁ DATA

7.1 Vyhodnocované veličiny

Na obrobených součástech byly měřeny a vyhodnocovány veličiny drsnosti povrchu. Měření drsnosti povrchu probíhalo na drsnoměru Mitutoyo SJ-301. Byly měřeny následující veličiny:

- Průměrná aritmetická úchylka profilu Ra ,
- Největší výška profilu Rz ,
- Průměrná šířka prvků profilu Rsm (5%).

U parametru Rsm značí dodatek 5% to, že šířka prvků profilu byla měřena v hladině 5% od vrcholů nerovností profilu.

Vzorec pro výpočet parametru Ra :

$$Ra = \frac{1}{l} \int_0^l |Z(x)| dx, \quad (5)$$

kde Ra je aritmetický průměr absolutních hodnot pořadnic $Z(x)$ v rozsahu základní délky.

Vyhodnocovaná délka obsahovala pět základních délek po 2,5 mm. Veličiny drsnosti povrchu byly měřeny pro každou zvolenou obráběcí strategii dvacetkrát a z těchto měření byl vypočítán aritmetický průměr.

7.2 Zpracování naměřených dat

Data byla zpracována dle zásad statistiky s pomocí programu Minitab, ve kterém byla nejdříve provedena kontrola odlehlých hodnot a časový vývoj naměřených parametrů drsnosti. Poté byly zhotoveny boxplotové diagramy s jednotlivými závislostmi parametrů drsnosti na použitých veličinách řezného procesu – D , a_e a SH .

7.3 Srovnání konkávní a konvexní plochy

Jak bylo již zmíněno, u všech součástí byly obráběny jak konkávní tak konvexní plochy. Následující grafy znázorňují vliv typu obráběné plochy na jednotlivé vyhodnocované pa-

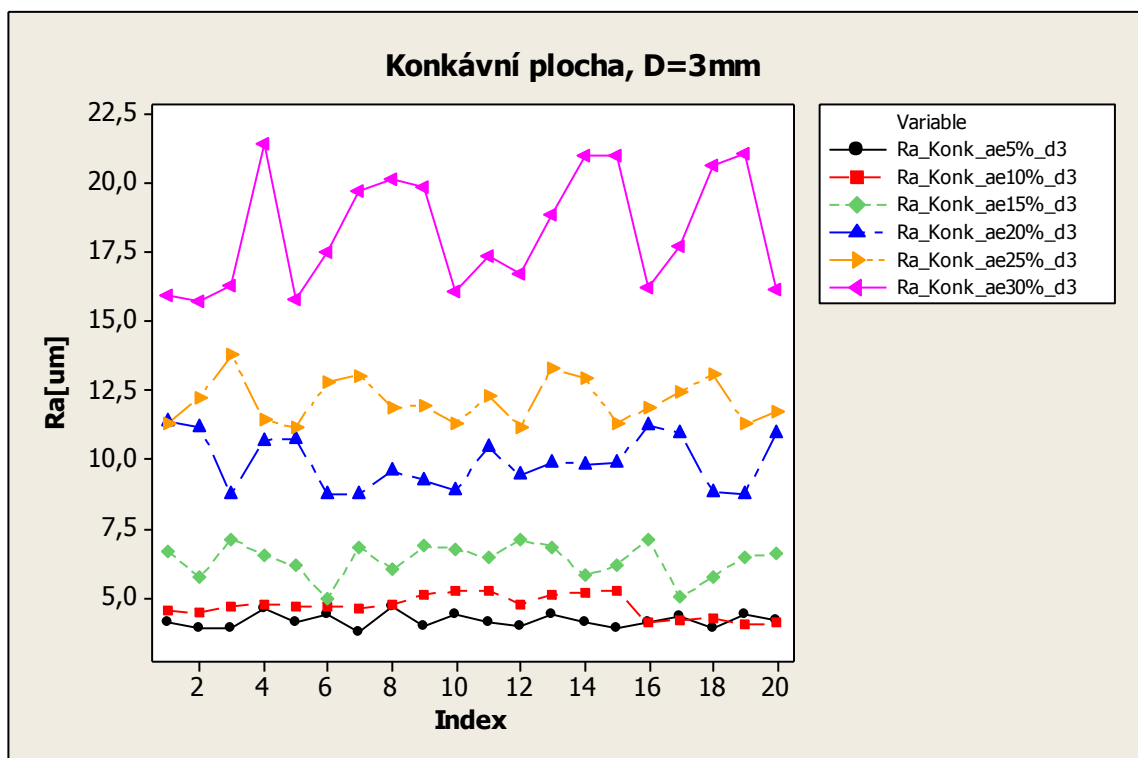
rametry drsnosti. Byly vyhodnocovány veličiny Ra , Rz a Rsm šesti různými nástroji: kulovými frézami o průměru D , jenž činil 3, 4, 5, 6, 8 a 10 mm. Pro každý z použitých průměrů nástroje byly provedeny tyto hodnoty radiální hloubky řezu a_e : $5%D$, $10%D$, $15%D$, $20%D$, $25%D$ a $30%D$.

Nejprve bylo nutno zjistit, zda lze sloučit konkávní a konvexní obráběné plochy, nebo zda jsou naměřené hodnoty na obou typech ploch odlišné a bude tedy zapotřebí vyhodnocovat obě tyto plochy zvlášť, na sobě nezávisle.

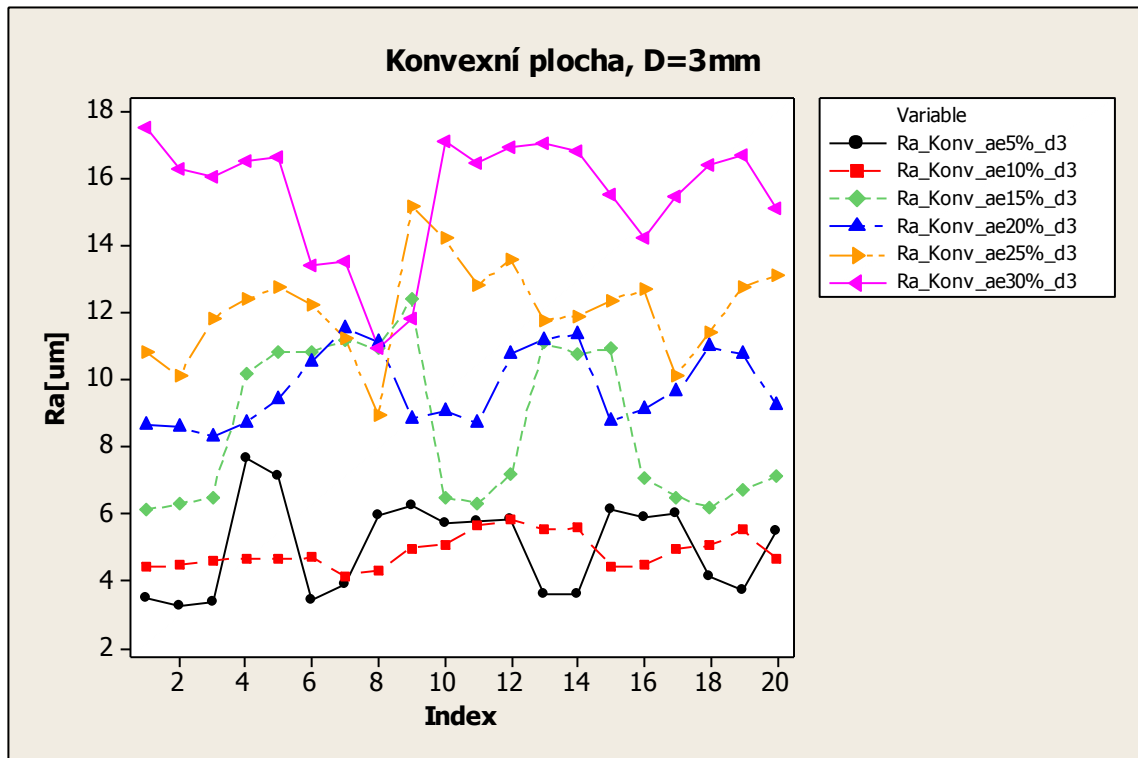
7.3.1 Časový vývoj Ra , Rz a Rsm

Časový vývoj parametrů drsnosti Ra , Rz a Rsm při konstantním průměru nástroje $D=3\text{mm}$.

Časový vývoj pro ostatní použité průměry nástroje D viz. příloha.



Obr. 39. Časový vývoj parametru drsnosti Ra

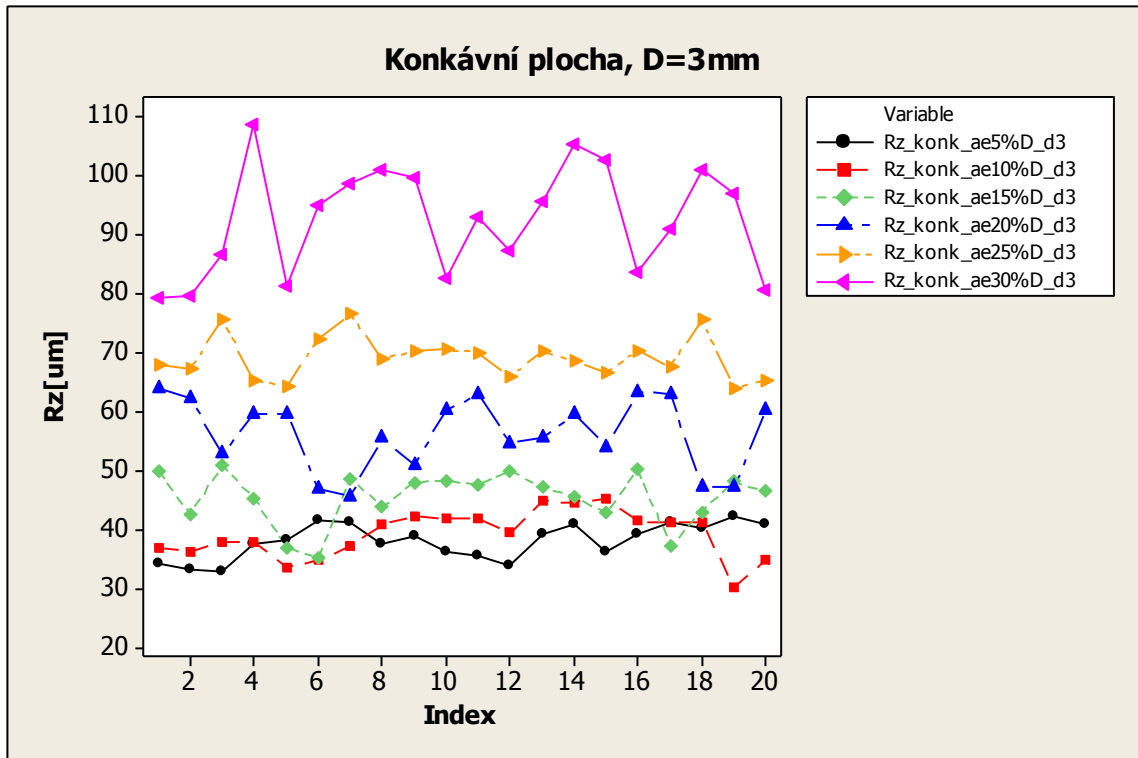


Obr. 40. Časový vývoj parametru drsnosti Ra

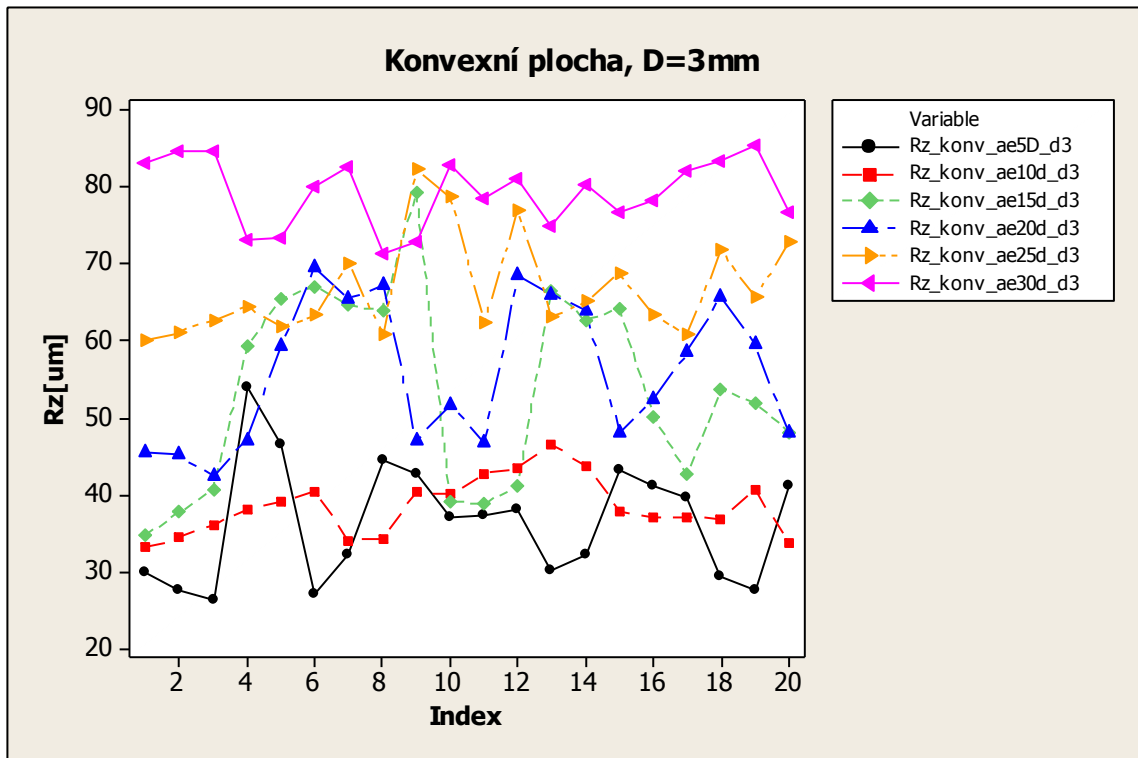
Na obrázku lze vidět vývoj naměřených hodnot parametru Ra v čase při provedených dvaceti měřeních, při použití nástroje o průměru $D=3\text{mm}$ a pro všechny použité hodnoty parametru a_e při obrábění konvexní plochy. Nejvyšších hodnot parametru Ra bylo dosaženo při nastavení hodnoty $a_e = 30\%D$, naopak nejnižší dosažené hodnoty Ra byly naměřeny při $a_e = 5\%D$. Z obrázku je zřetelné, že tento vývoj byl značně proměnlivý, což bylo způsobeno značnou proměnlivostí parametrů drsnosti v jednotlivých místech na obrobené ploše. Jinými slovy, měřené parametry drsnosti byly závislé na tom, zda bylo měření prováděno např. uprostřed konvexní plochy, nebo naopak na kraji. Tento jev byl způsoben zejména také jinou hodnotou řezné rychlosti na různých místech na vzorku, kdy byla určitá místa obráběna špičkou kulové frézy, čili řezná rychlost zde byla téměř nulová. Naopak jiná místa na této ploše byla obráběna obvodem nástroje, a tedy řezná rychlost dosahovala hodnot zcela jiných.

Lze si také povšimnout, že vývoj naměřených hodnot více kolísal u obrábění konvexních ploch (a to u všech zkoumaných parametrů- Ra , Rz i Rsm), kdežto u ploch konkávních byl tento vývoj mírnější. Toto kolísání naměřených hodnot také způsobilo to, že nebylo možné

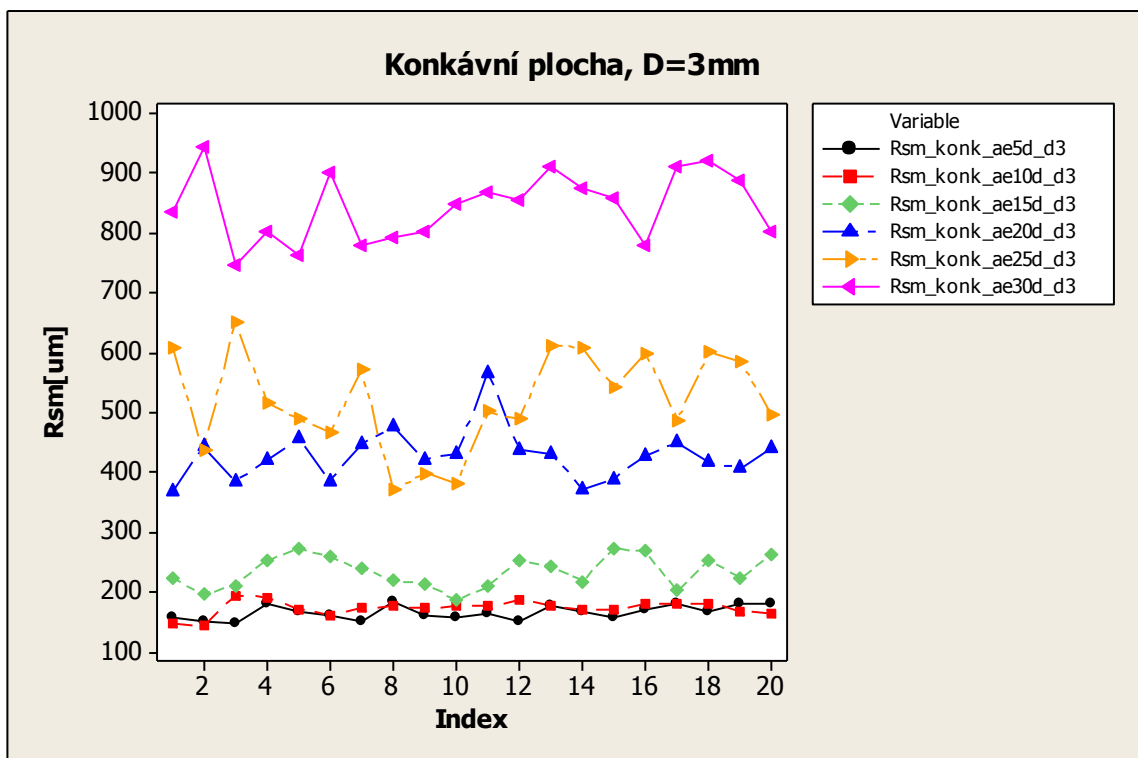
vyhodnocovat konkávní a konvexní plochy společně, ale musely být vytvořeny grafické závislosti pro oba typy ploch zvlášť.



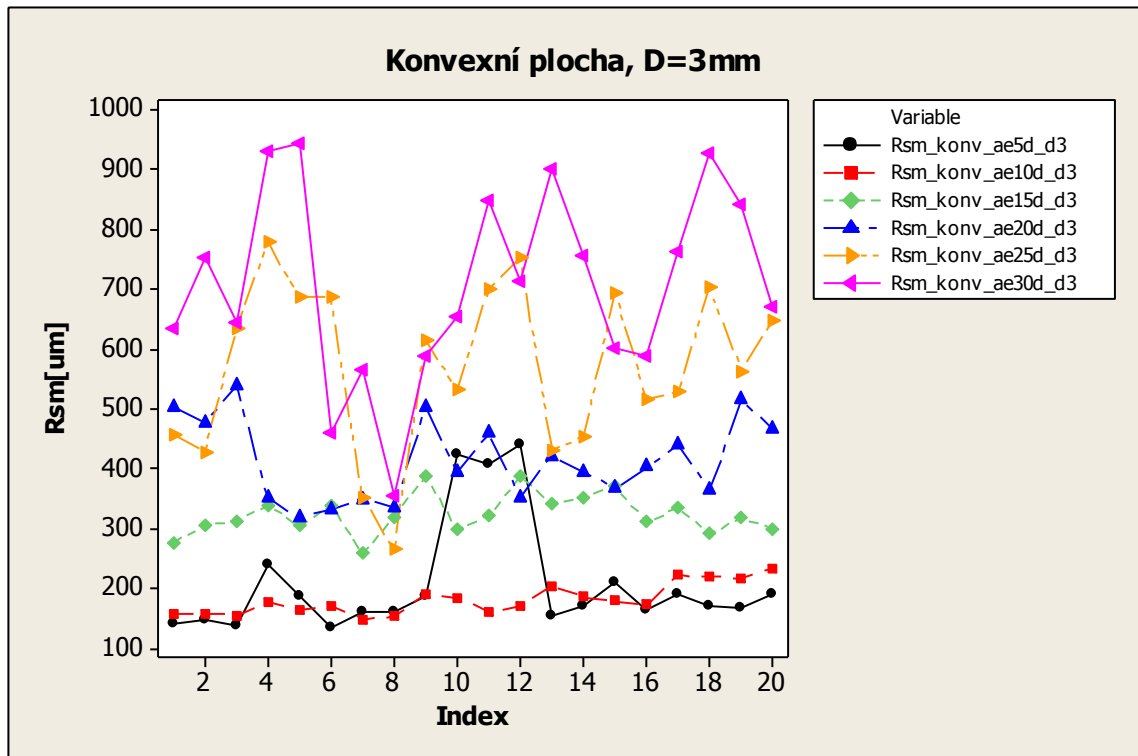
Obr. 41. Časový vývoj parametru drsnosti Rz



Obr. 42. Časový vývoj parametru drsnosti Rz



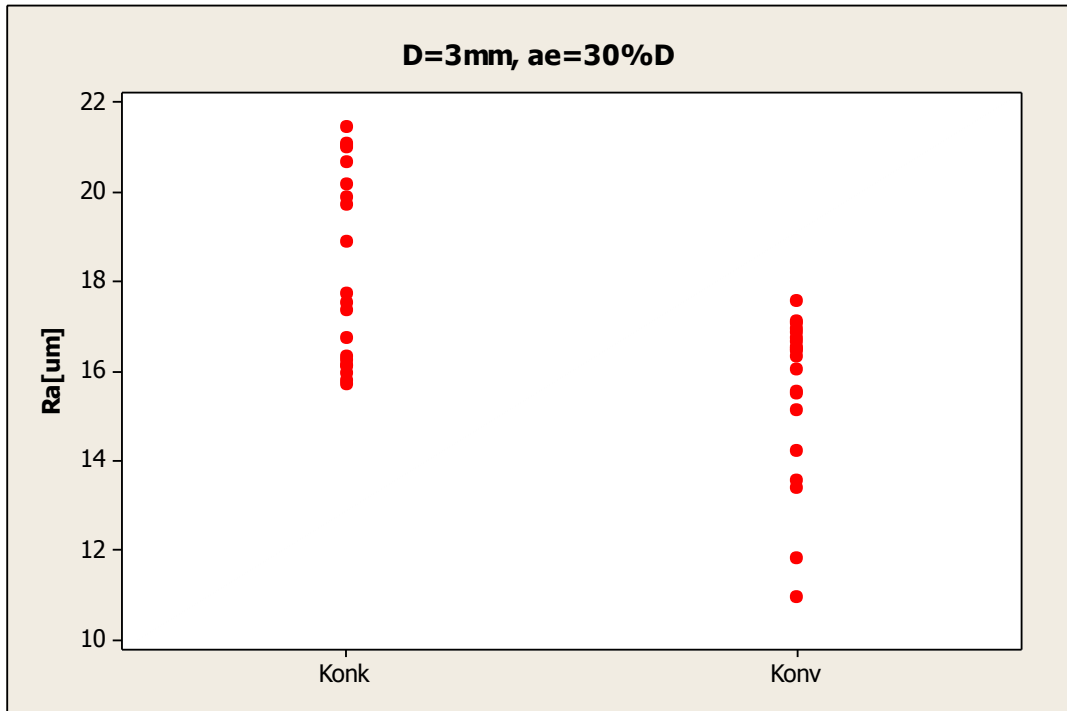
Obr. 43. Časový vývoj parametru drsnosti Rsm



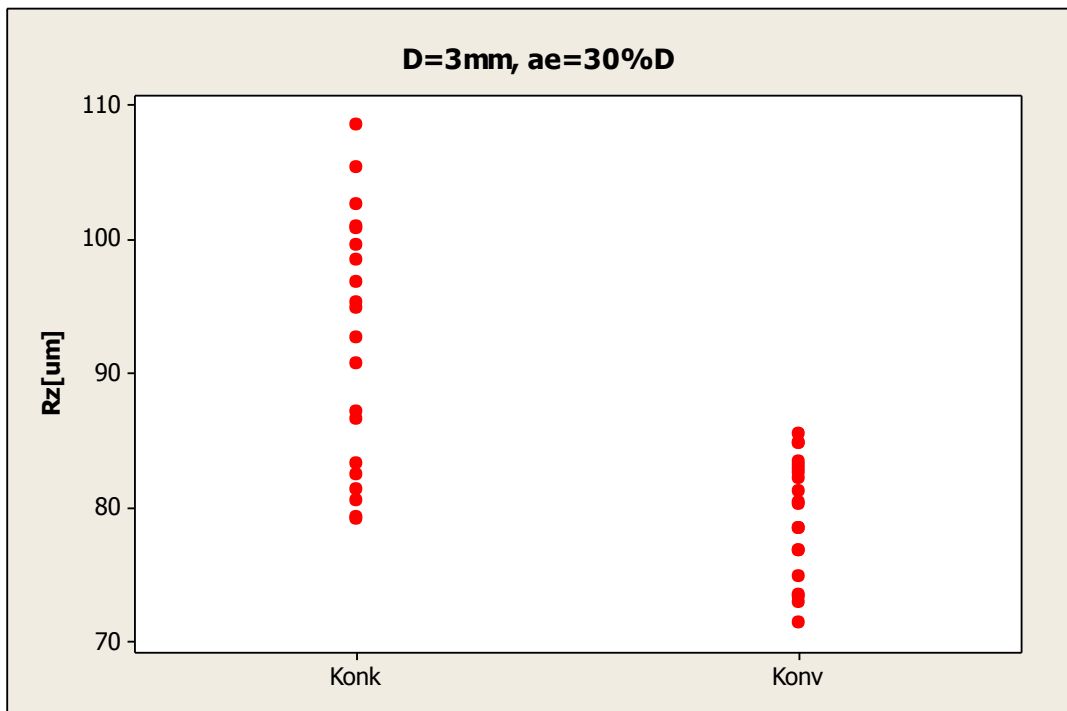
Obr. 44. Časový vývoj parametru drsnosti Rsm

7.3.2 Kontrola na odlehlé hodnoty

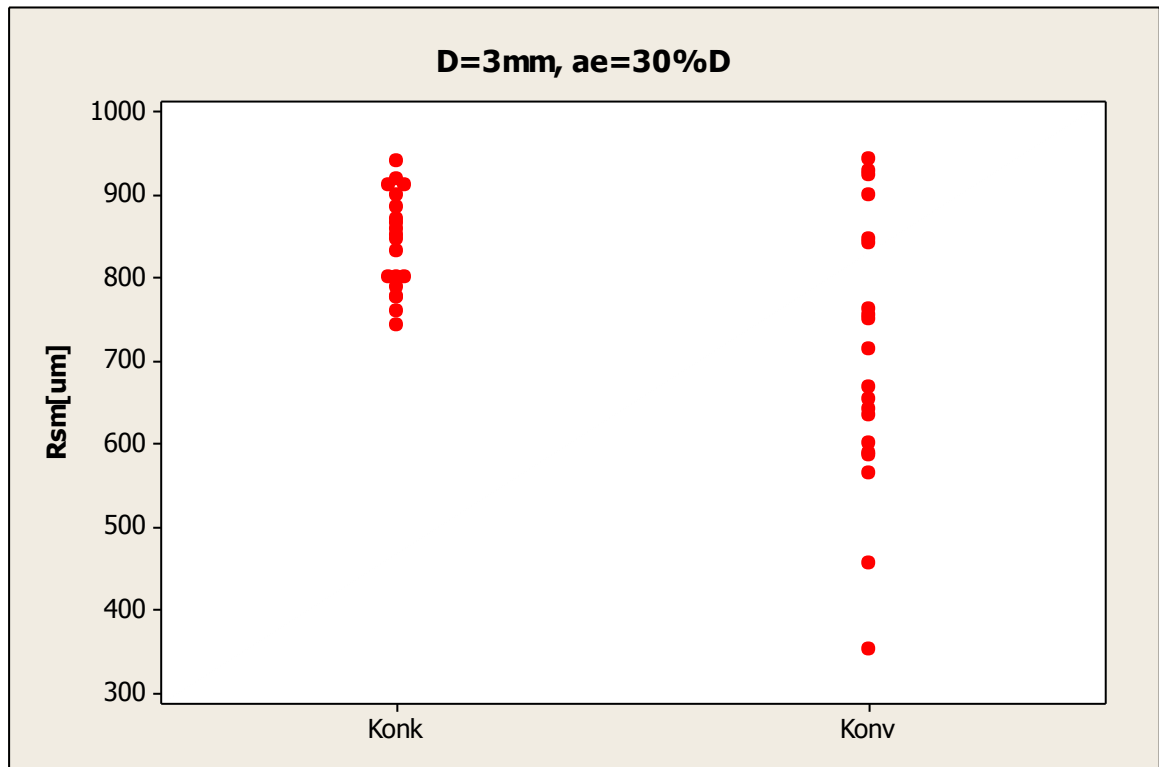
Kontrola na odlehlé hodnoty při konstantním průměru nástroje $D=3\text{mm}$ a hodnotě radiální hloubky řezu $a_e=30\%D$. Ostatní grafické kontroly na odlehlé hodnoty viz. příloha.



Obr. 45. Naměřené hodnoty parametru drsnosti R_a



Obr. 46. Naměřené hodnoty parametru drsnosti R_z



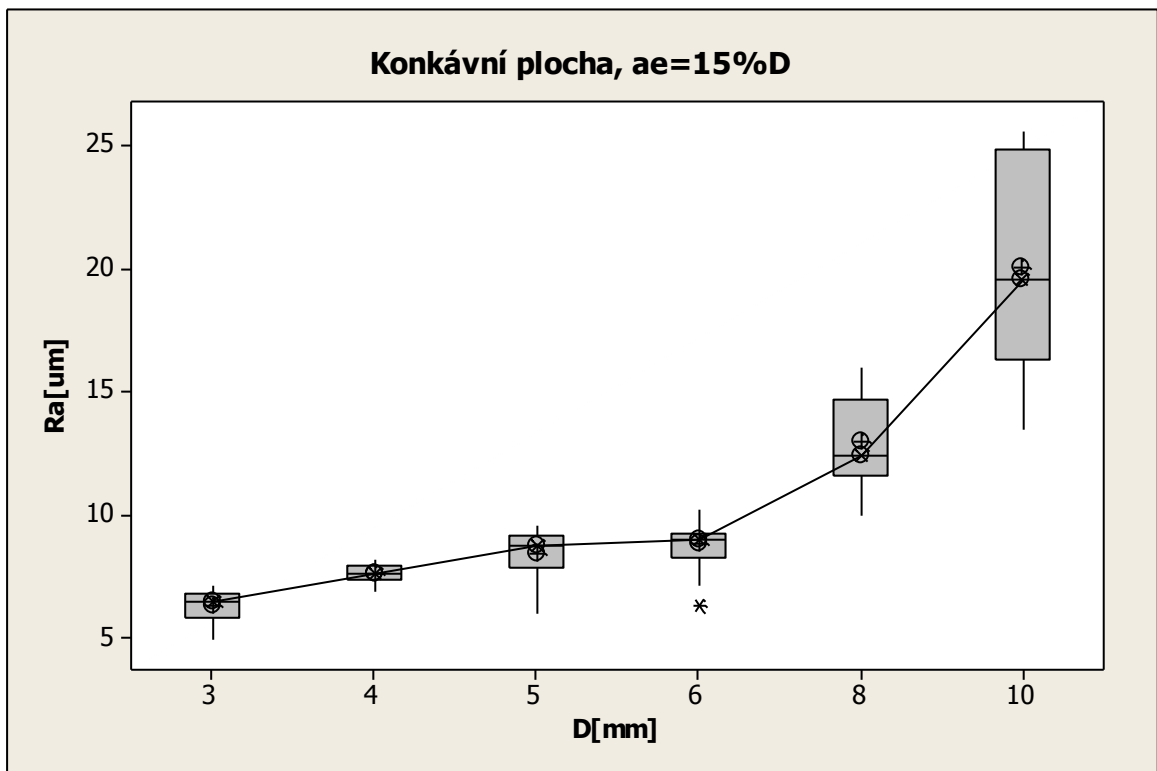
Obr. 47. Naměřené hodnoty parametru drsnosti R_{sm}

Grafy znázorňují naměřené hodnoty drsnosti při použitém průměru nástroje $D=3\text{mm}$ a $a_e=30\%D$. Z těchto grafů je patrné, že naměřené veličiny značně kolísají, což je způsobeno tím, že drsnost nebyla konstantní po celé obráběné ploše a její naměřená hodnota byla tedy značně závislá na místě měření drsnosti, jenž se pro všech dvacet měřených hodnot měnilo. Tento jev je patrný zejména u konvexních a v menší míře i u konkávních ploch.

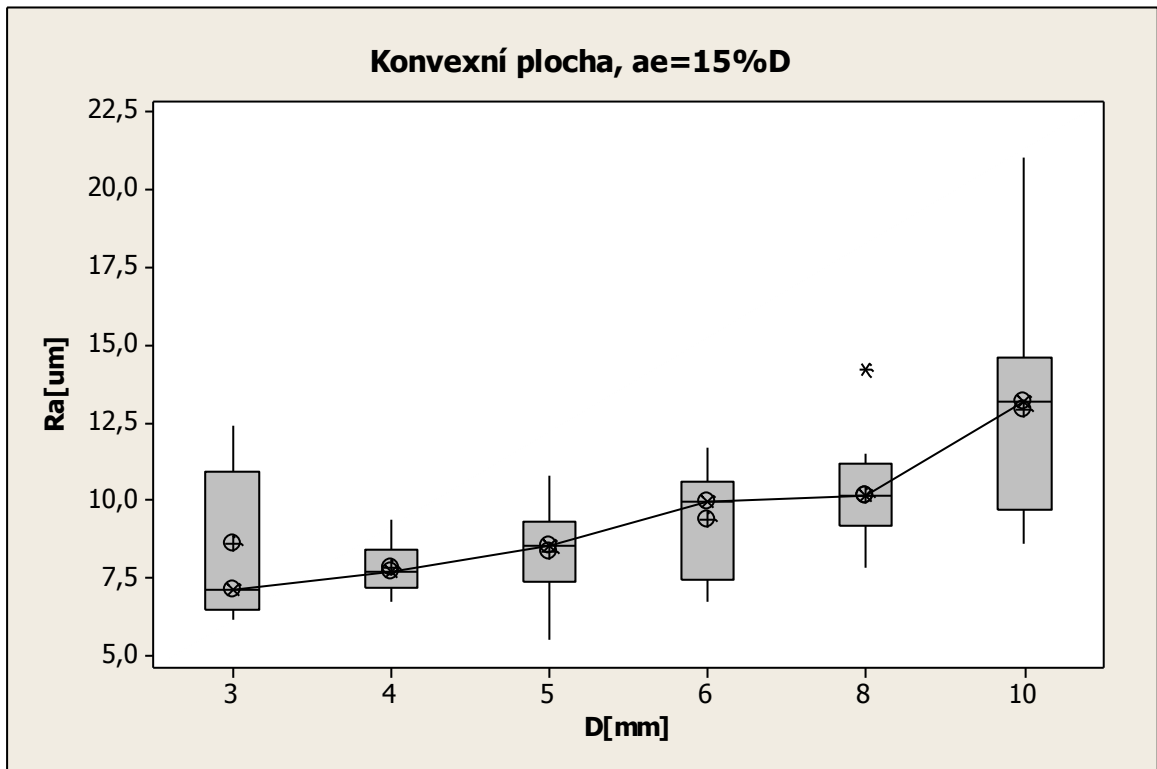
Grafy vykreslují rozdíly v rozložení naměřených hodnot u konkávní a konvexní plochy. Lze si povšimnout, že tyto rozdíly jsou poměrně značné a proto bylo nutno vyhodnocovat dále konkávní a konvexní plochy zvlášť. Největší rozptyl naměřených hodnot bylo dosaženo při vyhodnocování parametru drsnosti R_{sm} u obrábění konvexní plochy, kdy naopak u plochy konkávní byly rozptyly těchto hodnot poměrně malé.

7.4 Vliv průměru nástroje D na parametry drsnosti povrchu

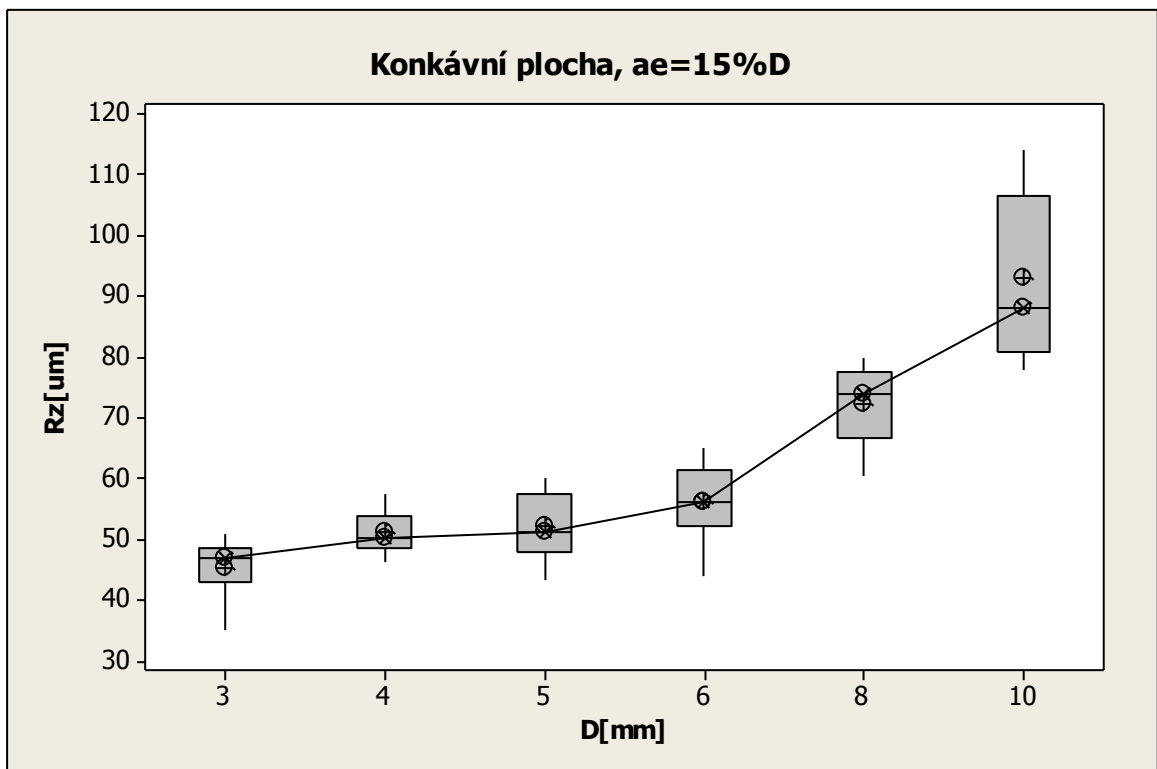
U tohoto typu měření byl zkoumán vliv velikosti použitého průměru nástroje D na parametry Ra , Rz i Rsm a to pro všechny použité hodnoty radiální hloubky řezu a_e . Zde byly vyhodnocovány zvlášť konkávní a konvexní plochy a do grafů byly zaneseny všechny použité hodnoty a_e jednotlivě. Grafické závislosti při použití všech hodnot a_e viz. příloha.



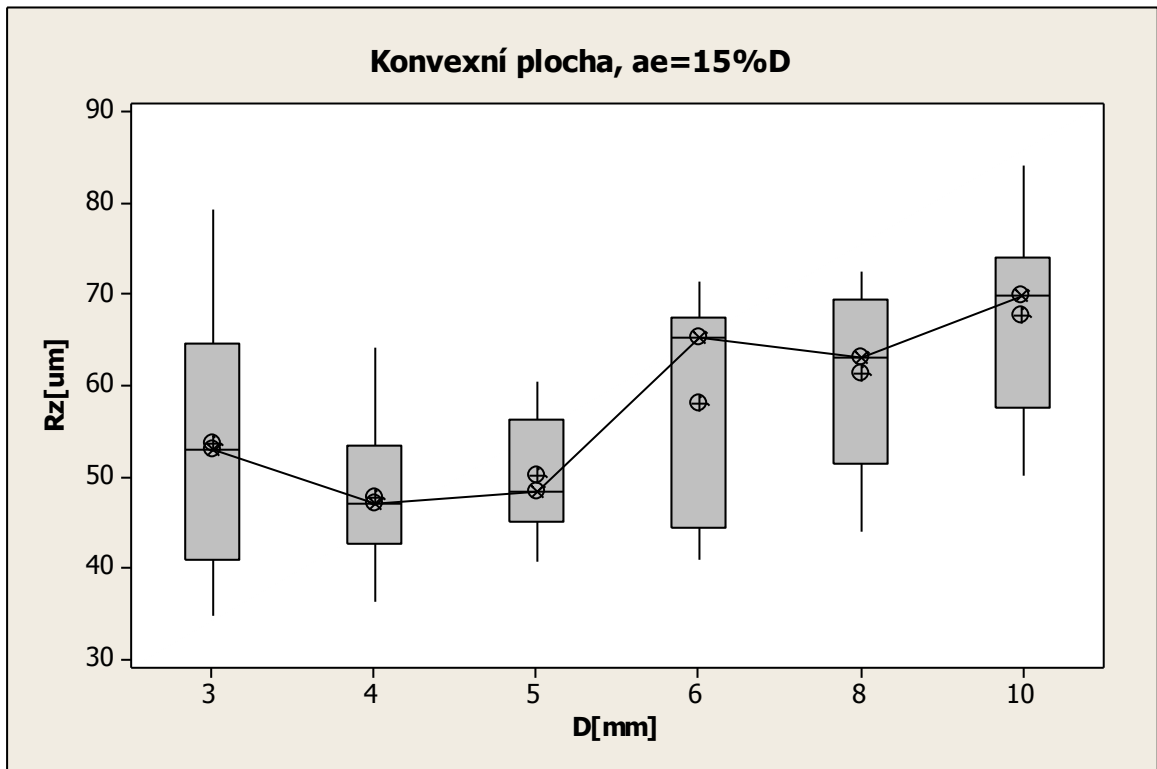
Obr. 48. Závislost parametru drsnosti Ra na průměru frézy D u konkávní plochy



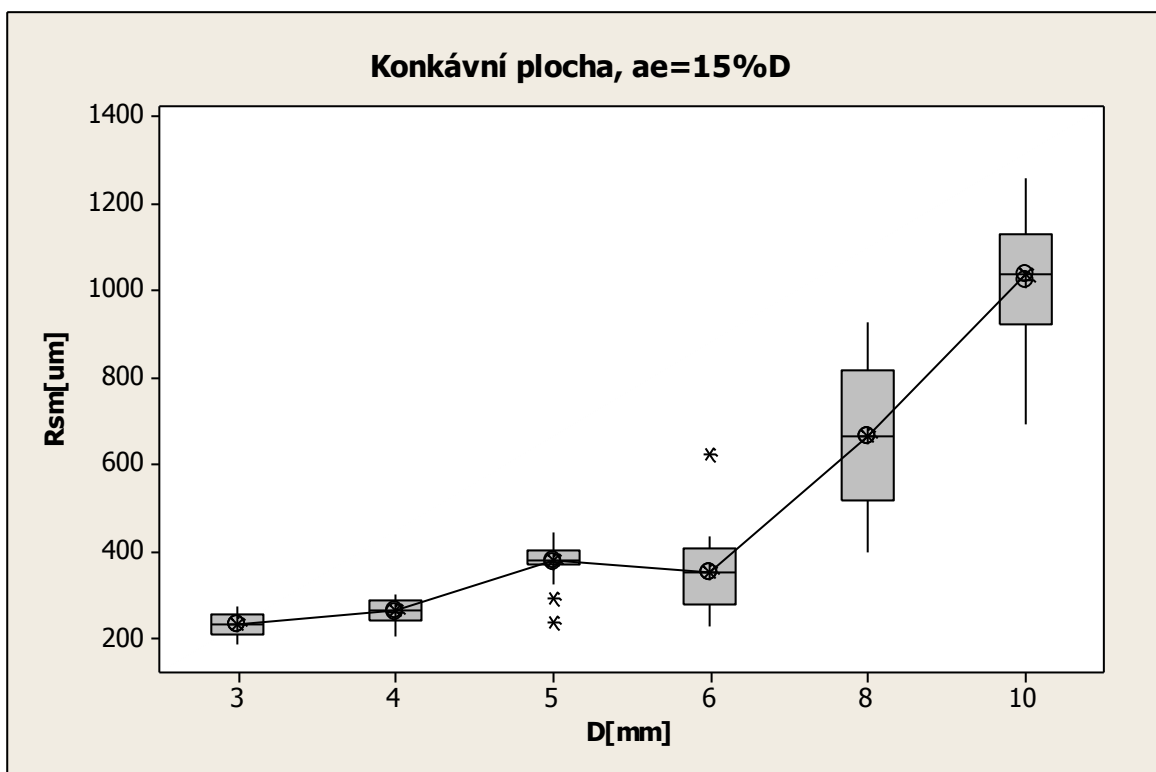
Obr. 49. Závislost parametru drsnosti R_a na průměru frézy D u konvexní plochy



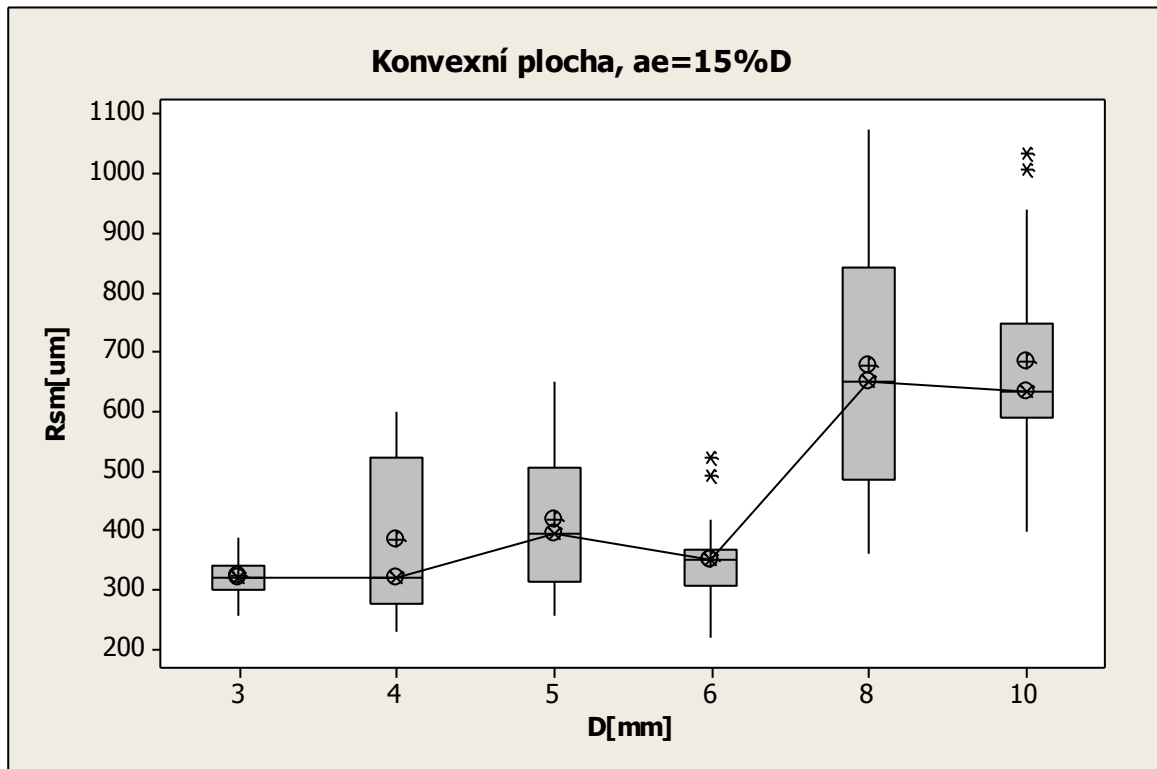
Obr. 50. Závislost parametru drsnosti R_z na průměru frézy D u konkávni plochy



Obr. 51. Závislost parametru drsnosti R_z na průměru frézy D u konvexní plochy



Obr. 52. Závislost parametru drsnosti R_{sm} na průměru frézy D u konkávni plochy



Obr. 53. Závislost parametru drsnosti R_{sm} na průměru frézy D u konvexní plochy

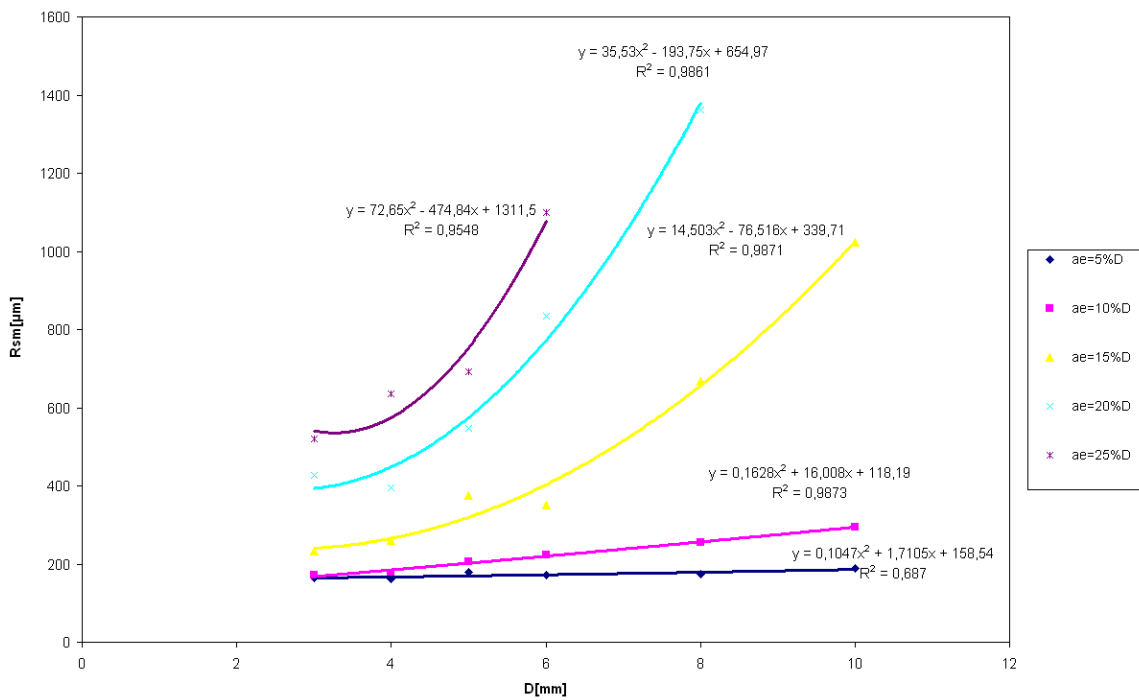
Na grafech je znázorněna závislost veličin R_a , R_z i R_{sm} na velikosti průměru D použitého nástroje, při konstantní hodnotě a_e , jenž v tomto konkrétním případě činila $15\%D$. V grafech lze opět rozpoznat také rozptyl naměřených hodnot příslušných veličin, který je opět kolísající vlivem rozdílnosti míst měření na jednotlivých plochách. U ostatních použitých hodnot parametru a_e byl průběh grafických závislostí obdobný jako v tomto konkrétním případě.

Z grafů a získaných dat bylo zjištěno, že s rostoucími hodnotami průměru nástroje D , se zvyšují také naměřené veličiny drsnosti, a to všechny tři zjišťované parametry – R_a , R_z i R_{sm} .

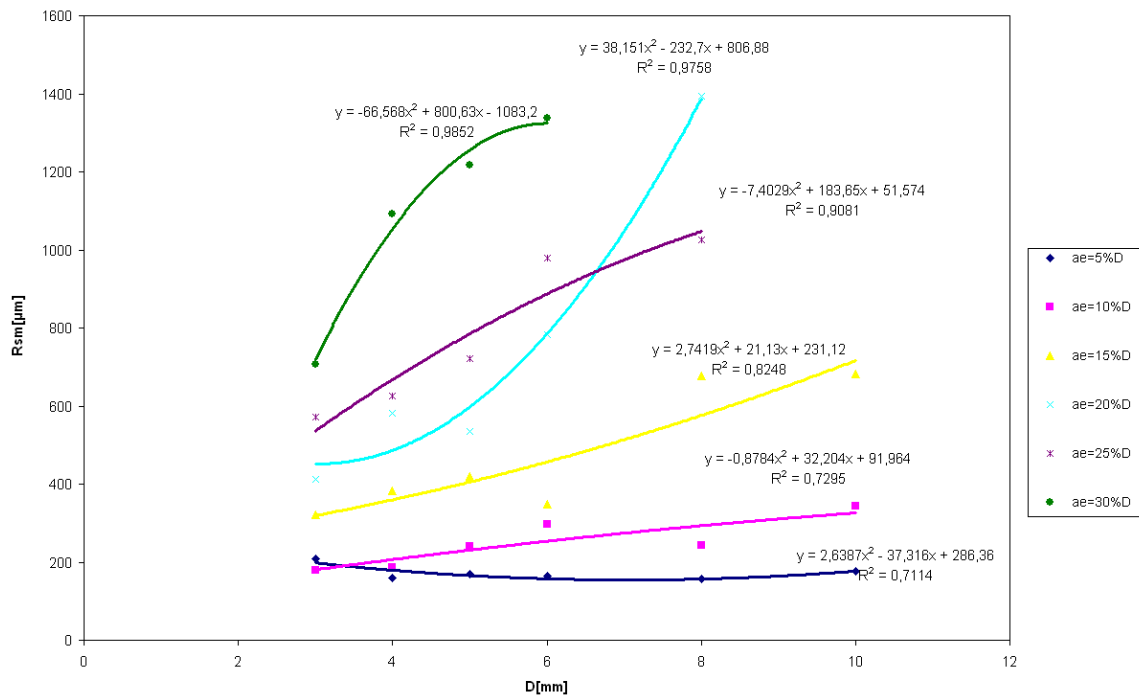
Krabicový diagram poskytuje informace o maximální a minimální hodnotě v souboru naměřených hodnot, o mediánu a horním i dolním kvartilu tohoto souboru a některé další informace.

V krabicovém diagramu odpovídá dolní a horní strana základního obdelníka dolnímu a hornímu kvartilu daného souboru a vodorovná čára uvnitř obdelníka odpovídá mediánu souboru. Výška krabice se nazývá mezikvartilové rozpětí. Dolní svislá úsečka odpovídá

hodnotám, které leží pod krabicí ve vzdálenosti nejvýše rovné 1,5-násobku výšky krabice. Obdobně je to také u horní svislé úsečky. Mimo tyto úsečky jsou znázorněny hodnoty, odpovídající tzv. odlehlým hodnotám. Křížek uvnitř krabice značí aritmetický průměr hodnot a X označuje medián.



Obr. 54. Závislost R_{sm} na průměru frézy D u konkávní plochy



Obr. 55. Závislost R_{sm} na průměru frézy D u konvexní plochy

Na grafech je zobrazena závislost parametru R_{sm} na velikosti použitého průměru nástroje D u všech použitých hodnot radiální hloubky řezu a_e . Z grafů je patrné, že při zvyšujícím se průměru nástroje D stoupá také velikost R_{sm} , tzn., že šířka prvků profilu se zvyšuje.

Tab. 6: Hodnoty R_a pro různé průměry nástroje D

$\varnothing D$ [mm]	3	4	5	6	8	10
R_a -konk [μm]	9,23	10,46	12,13	14,64	15,56	14,26
R_a -konv [μm]	9,31	9,84	11,51	13,33	14,12	10,8

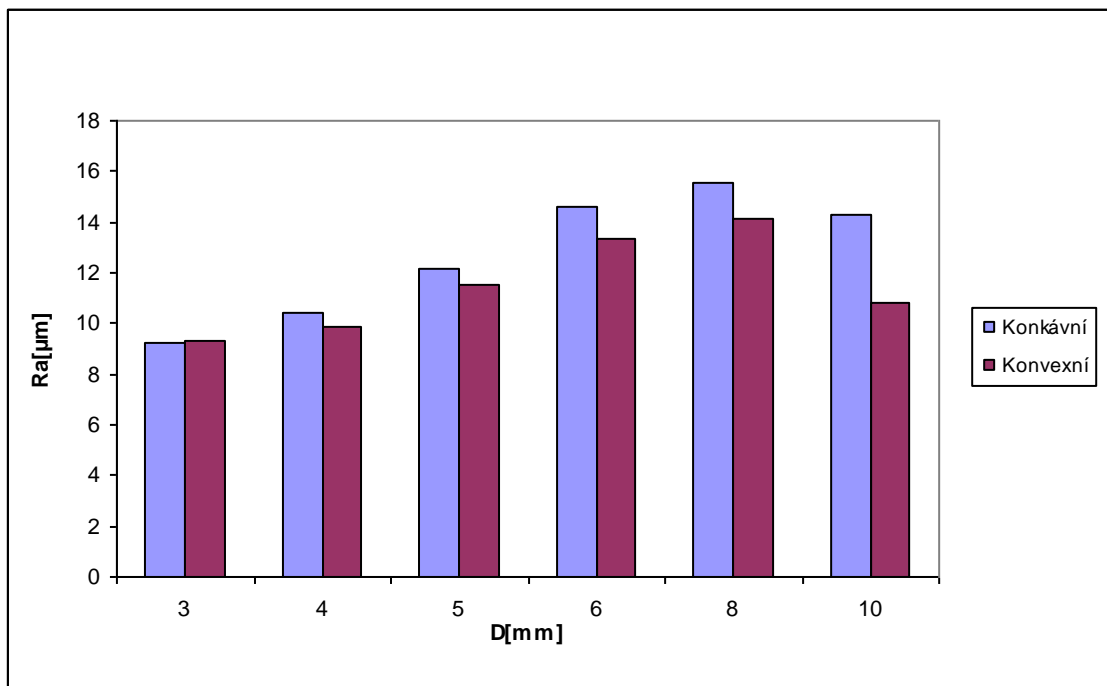
Tab. 7: Hodnoty R_z pro různé průměry nástroje D

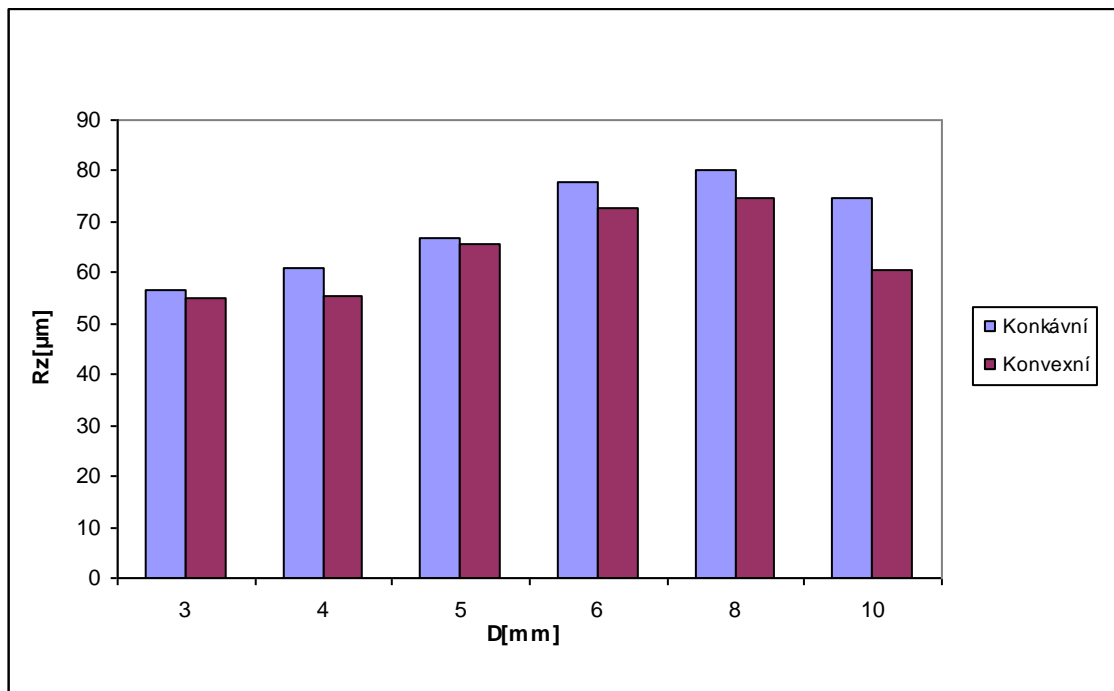
$\varnothing D$ [mm]	3	4	5	6	8	10
R_z -konk [μm]	56,65	61,11	66,86	77,95	80,24	74,83
R_z -konv [μm]	55,11	55,4	65,61	72,78	74,5	60,43

Tab. 8: Hodnoty R_{sm} pro různé průměry nástroje D

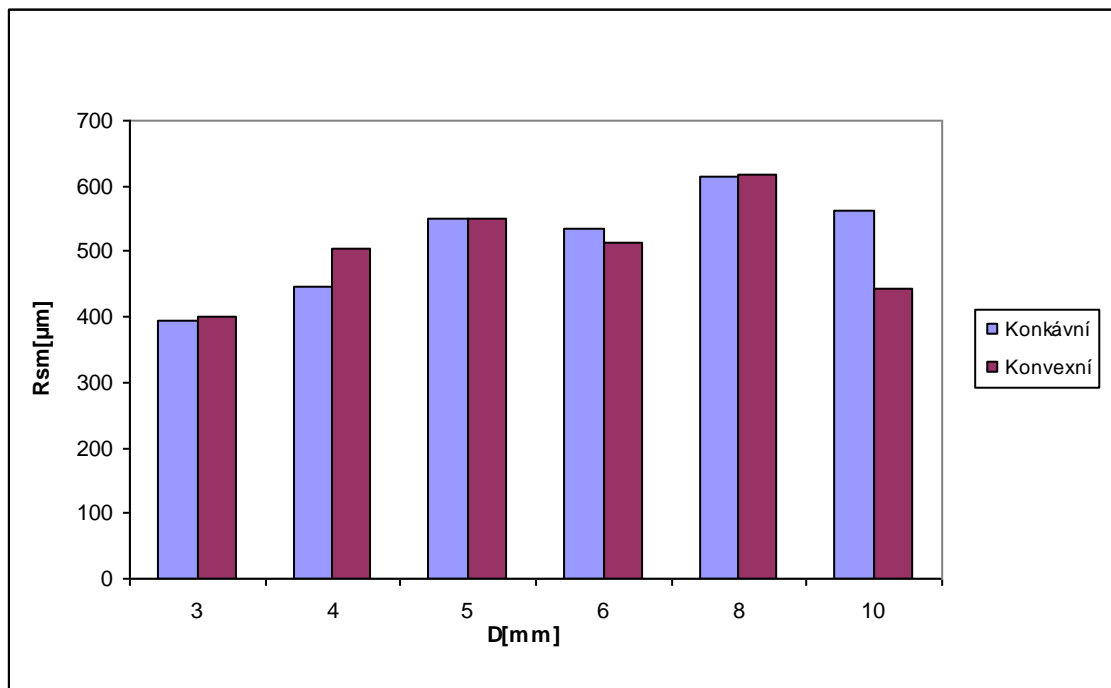
$\varnothing D$ [mm]	3	4	5	6	8	10
$R_{sm-konk}$ [μm]	393,63	446,63	549,09	535,51	615	561,94
$R_{sm-konv}$ [μm]	400,38	504,75	550,7	514,24	617,55	441,78

Na předešlých tabulkách číslo 6 až 8 jsou uvedeny hodnoty vyhodnocovaných veličin drsnosti v závislosti na velikosti průměru použitého nástroje D . Tyto hodnoty jsou aritmetickým průměrem ze všech použitých velikostí radiální hloubky řezu a_e .

Obr. 56. Srovnání hodnot R_a u konkávní a konvexní plochy



Obr. 57. Srovnání hodnot R_z u konkávní a konvexní plochy



Obr. 58. Srovnání hodnot R_{sm} u konkávní a konvexní plochy

Na grafech jsou znázorněny hodnoty parametrů R_a , R_z a R_{sm} u konkávní a konvexní plochy. Tyto hodnoty byly získány aritmetickým průměrem ze všech použitých hodnot parametru a_e .

Tab. 9: Hodnoty R_a pro různé průměry nástroje D a různéšířky záběru a_e u konkávní plochy

D [mm]	3	4	5	6	8	10
$a_e=5\%D$	4,14	4,86	5,62	4,93	5,27	5,64
$a_e=10\%D$	4,67	5,5	6,04	6,64	7,39	7,71
$a_e=15\%D$	6,33	7,61	8,39	8,83	12,94	20,05
$a_e=20\%D$	9,89	9,01	11,97	16,25	26,7	
$a_e=25\%D$	12,11	14,2	16,35	25,03	25,52	25,44
$a_e=30\%D$	18,25	21,56	24,38	26,15	31,79	

Tab. 10: Hodnoty R_a pro různé průměry nástroje D a různéšířky záběru a_e u konvexní plochy

D [mm]	3	4	5	6	8	10
$a_e=5\%D$	5,01	4,09	4,8	4,15	4,62	4,42
$a_e=10\%D$	4,87	5,05	6,64	6,47	6,14	6,72
$a_e=15\%D$	8,57	7,79	8,35	9,33	10,14	12,89
$a_e=20\%D$	9,76	9,23	10,64	13,95	23,95	
$a_e=25\%D$	12,11	13,43	16,92	18,78	25,74	
$a_e=30\%D$	15,53	19,47	21,69	27,29		

Tab. 11: Hodnoty R_z pro různé průměry nástroje D a různéšířky záběru a_e u konkávní plochy

D [mm]	3	4	5	6	8	10
$a_e=5\%D$	37,97	39,27	44,04	38,87	42,63	44,04
$a_e=10\%D$	39,13	41,47	42,63	49,47	51,06	51,62
$a_e=15\%D$	45,3	50,98	52	56,07	72,09	92,87
$a_e=20\%D$	56,14	54,98	62,68	85,67	115,67	
$a_e=25\%D$	69,02	76,69	84,2	112,54	119,77	133,62
$a_e=30\%D$	92,35	103,29	115,62	125,06	146,6	

Tab. 12: Hodnoty R_z pro různé průměry nástroje D a různé šířky záběru a_e u konvexní plochy

$D[\text{mm}]$	3	4	5	6	8	10
$a_e=5\%D$	36,34	34,2	38,42	35,87	37,25	37
$a_e=10\%D$	38,47	40,47	46,42	42,02	42,72	46,3
$a_e=15\%D$	53,64	47,77	50,22	58,1	61,26	67,65
$a_e=20\%D$	55,92	49,65	58,7	77,93	109,21	
$a_e=25\%D$	66,87	69,21	91,29	96,07	122,08	
$a_e=30\%D$	79,43	91,12	108,6	126,7		

Tab. 13: Hodnoty R_{sm} pro různé průměry nástroje D a různé šířky záběru a_e u konkávní plochy

$D[\text{mm}]$	3	4	5	6	8	10
$a_e=5\%D$	164,85	161,15	178,6	172,6	173,55	188,25
$a_e=10\%D$	172,5	174,75	205,95	222,35	256,35	294,2
$a_e=15\%D$	232,95	260,1	374,8	350,05	667,25	1024,3
$a_e=20\%D$	427,8	393,95	548,45	834	1362,84	
$a_e=25\%D$	520,1	636,65	691,4	1098,55		
$a_e=30\%D$	843,55	1053,15	1295,33			

Tab. 14: Hodnoty R_{sm} pro různé průměry nástroje D a různé šířky záběru a_e u konvexní plochy

$D[\text{mm}]$	3	4	5	6	8	10
$a_e=5\%D$	208,15	160,5	169,3	163,6	157,1	175,85
$a_e=10\%D$	180,35	185,75	241,7	297,9	242,1	343,75
$a_e=15\%D$	322,55	381,95	418,65	349,55	677,3	682,85
$a_e=20\%D$	413,45	582,25	535,2	782,2	1393,68	
$a_e=25\%D$	571,1	625,25	722,15	977,95	1026	
$a_e=30\%D$	706,7	1092,8	1217,17	1337		

V tabulkách číslo 9 až 14 jsou uvedeny příslušné hodnoty jednotlivých veličin drsnosti v závislosti na velikosti průměru nástroje D , přičemž jsou tyto hodnoty uvedeny pro každou použitou velikost a_e zvlášť a jsou aritmetickým průměrem z dvaceti provedených mě-

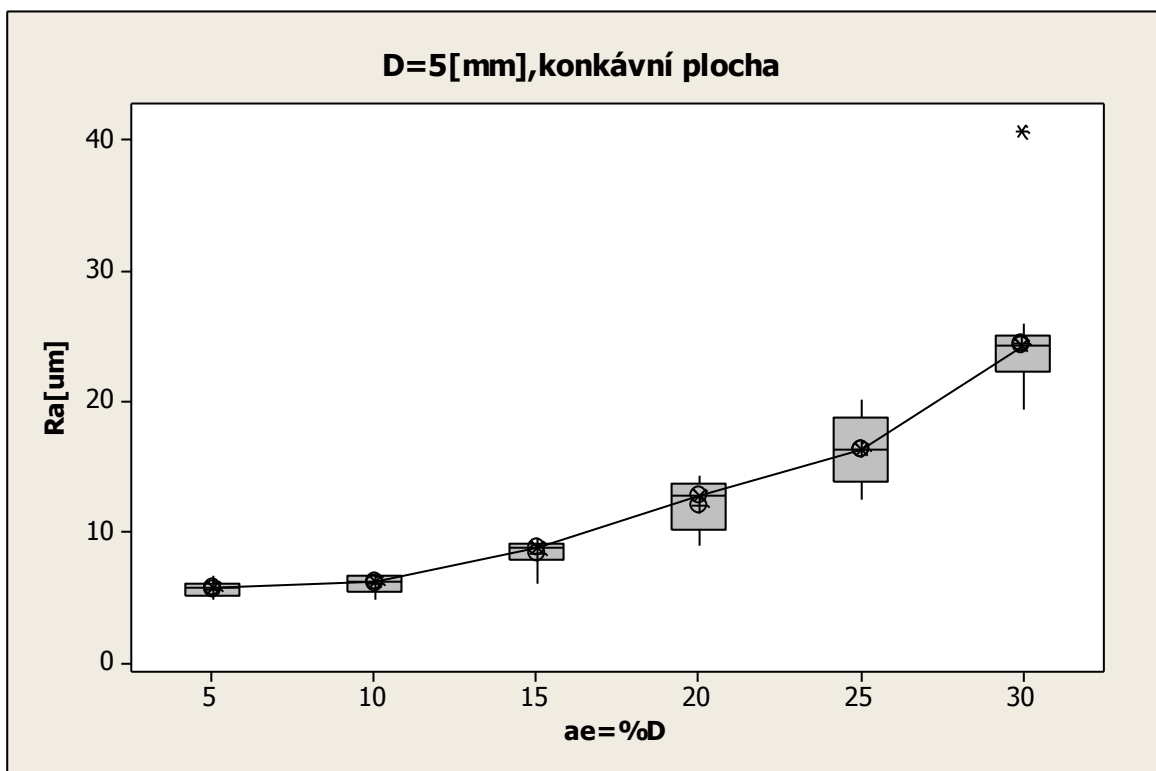
ření. Prázdná políčka v tabulkách jsou z důvodu takových hodnot drsností povrchu, jenž nebylo možné změřit použitým typem drsnoměru.

7.5 Vliv radiální hloubky řezu a_e na parametry drsnosti povrchu

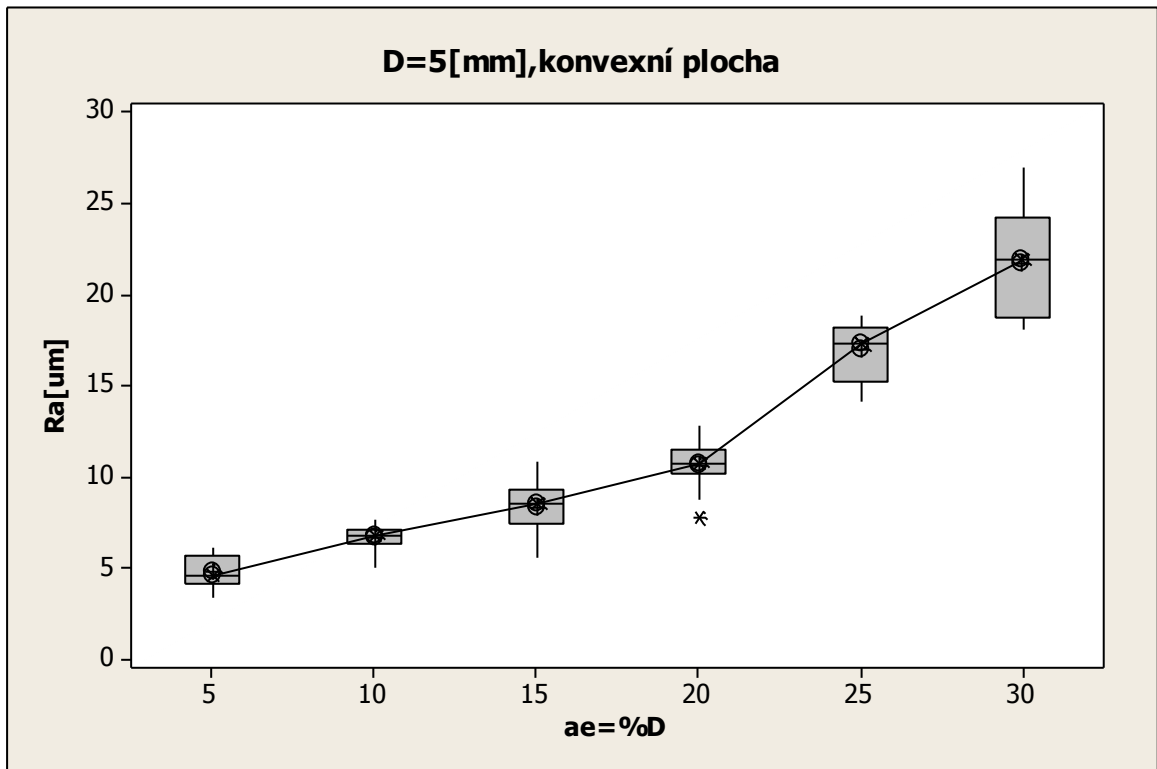
U tohoto experimentu byl zkoumán vliv velikosti radiální hloubky řezu a_e zadávané v procentech průměru nástroje, na veličiny Ra , Rz a Rsm při neměnném průměru nástroje D .

Na grafech jsou vyobrazeny závislosti zjišťovaných parametrů drsnosti na velikosti použité radiální hloubky řezu a_e . U těchto konkrétních grafů byl použit průměr nástroje $D=5\text{mm}$. U ostatních použitých hodnot průměru nástroje D byla grafická závislost obdobná jako u $D=5\text{mm}$.

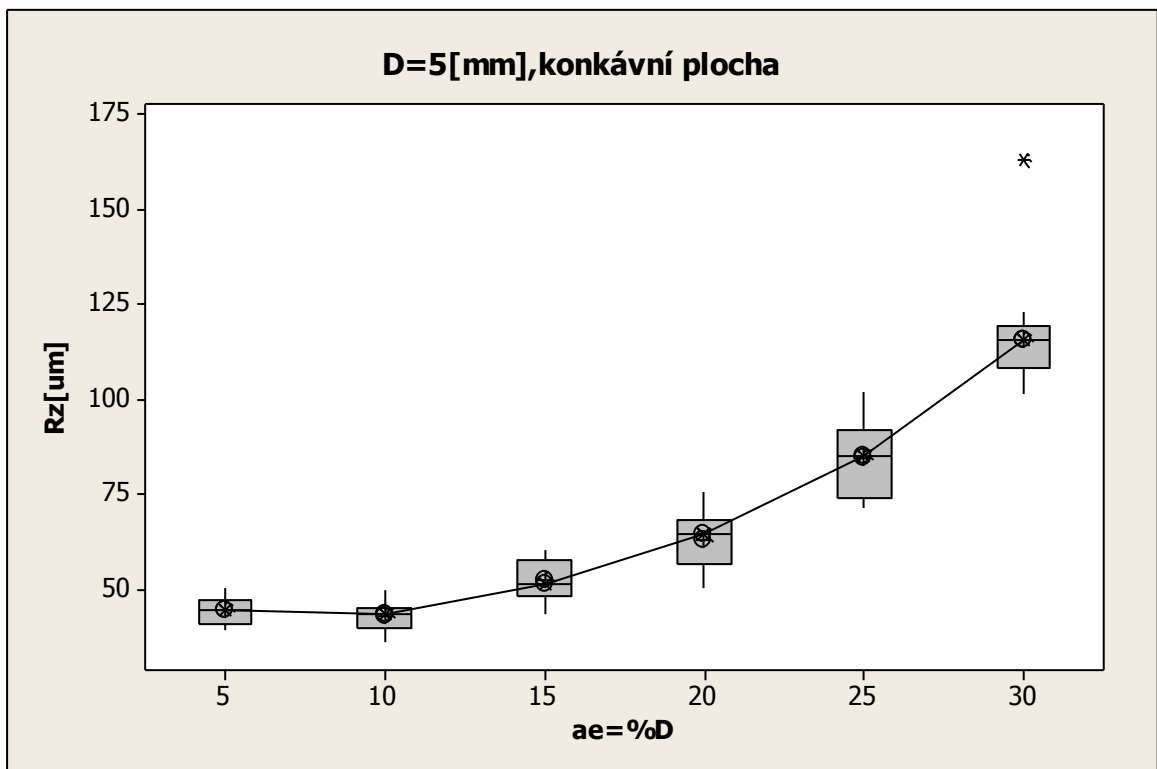
Jak je patrné z grafů, se vzrůstají hodnotou a_e se zvyšují také hodnoty Ra , Rz i Rsm , čili nejspokojivějších parametrů obrobeneé plochy bylo dosaženo při $a_e=5\%D$ a naopak nejvyšší drsnost byla naměřena u $a_e=30\%D$. Grafické závislosti při použití všech průměrů nástroje D viz. příloha.



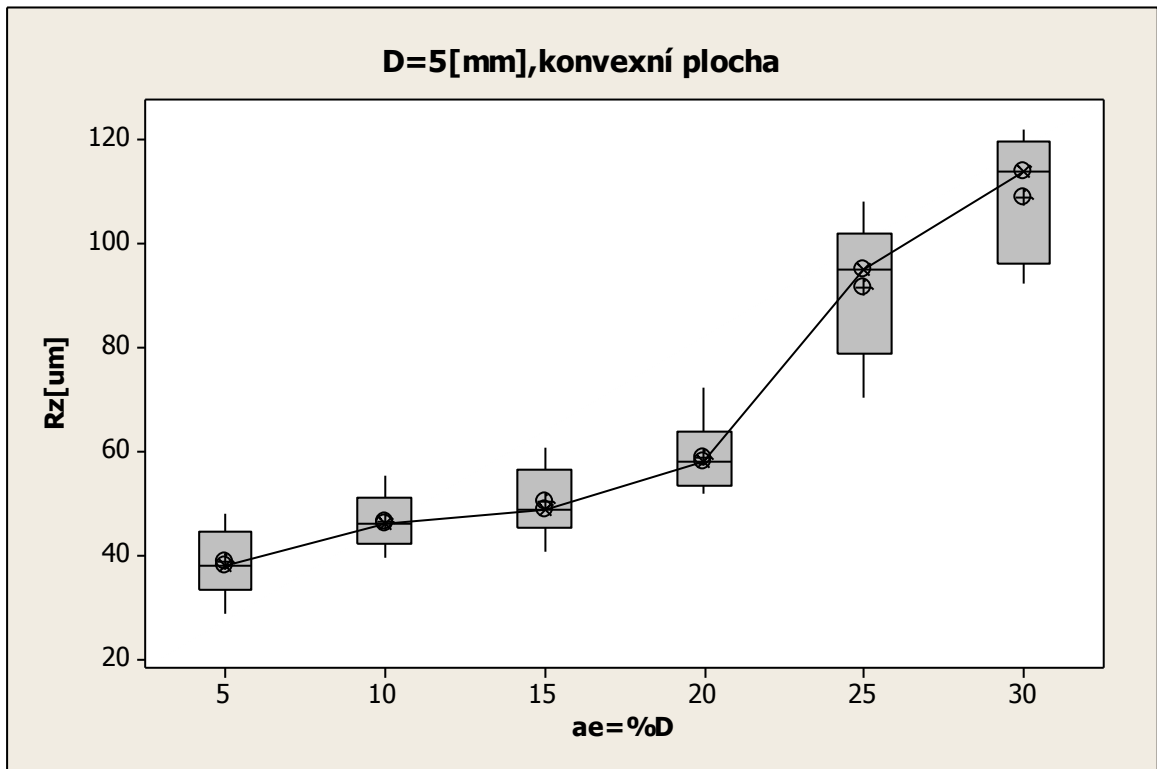
Obr. 59. Závislost parametru Ra na velikosti radiální hloubky řezu a_e u konkávní plochy



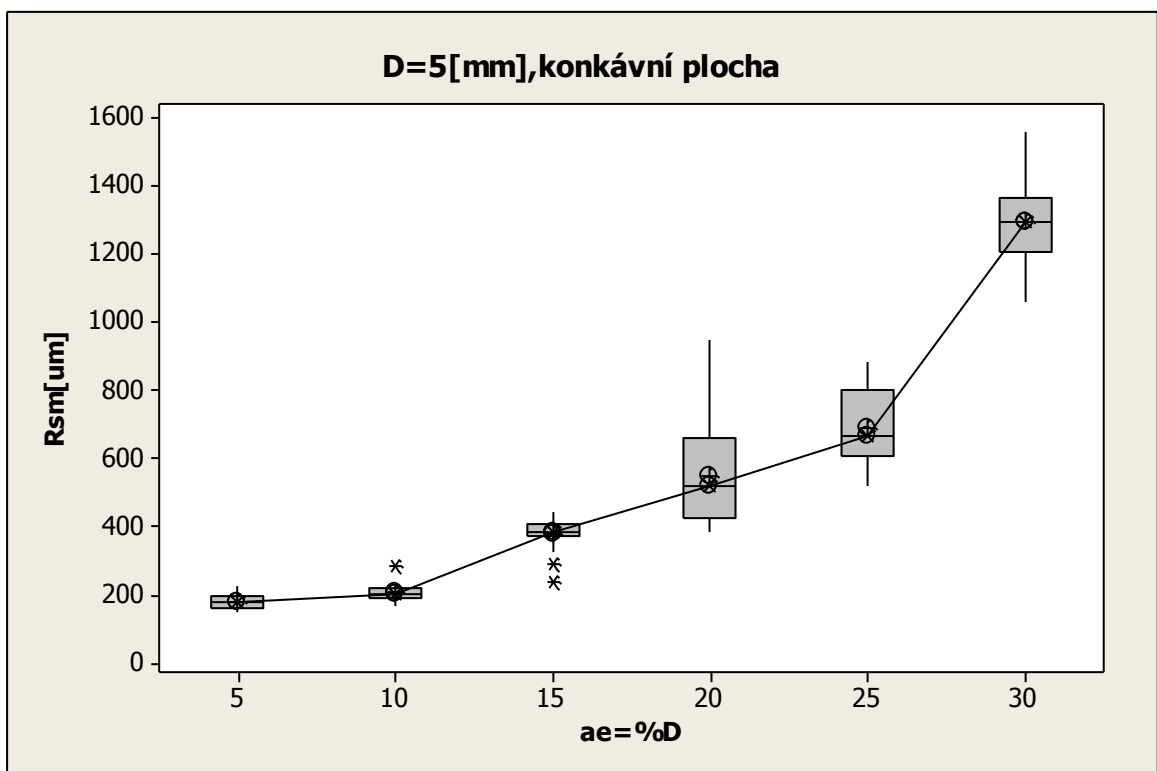
Obr. 60. Závislost parametru Ra na velikosti radiální hloubky řezu a_e u konvexní plochy



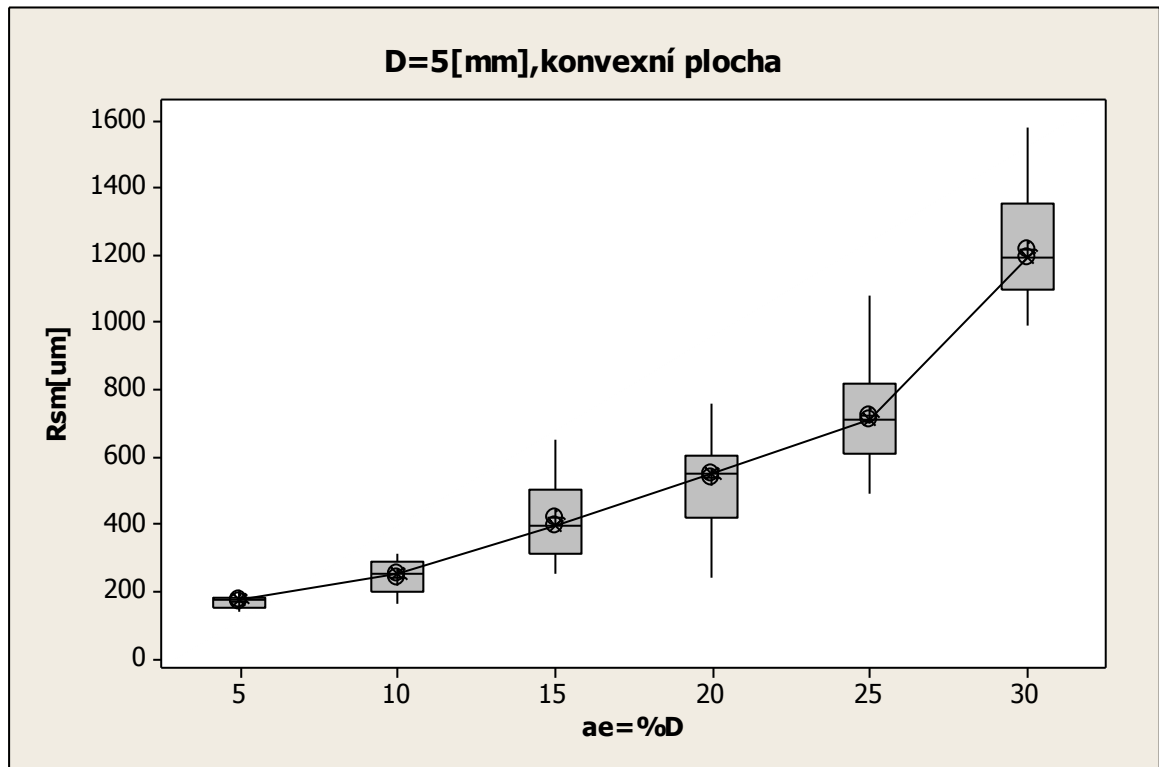
Obr. 61. Závislost parametru Rz na velikosti radiální hloubky řezu a_e u konkávní plochy



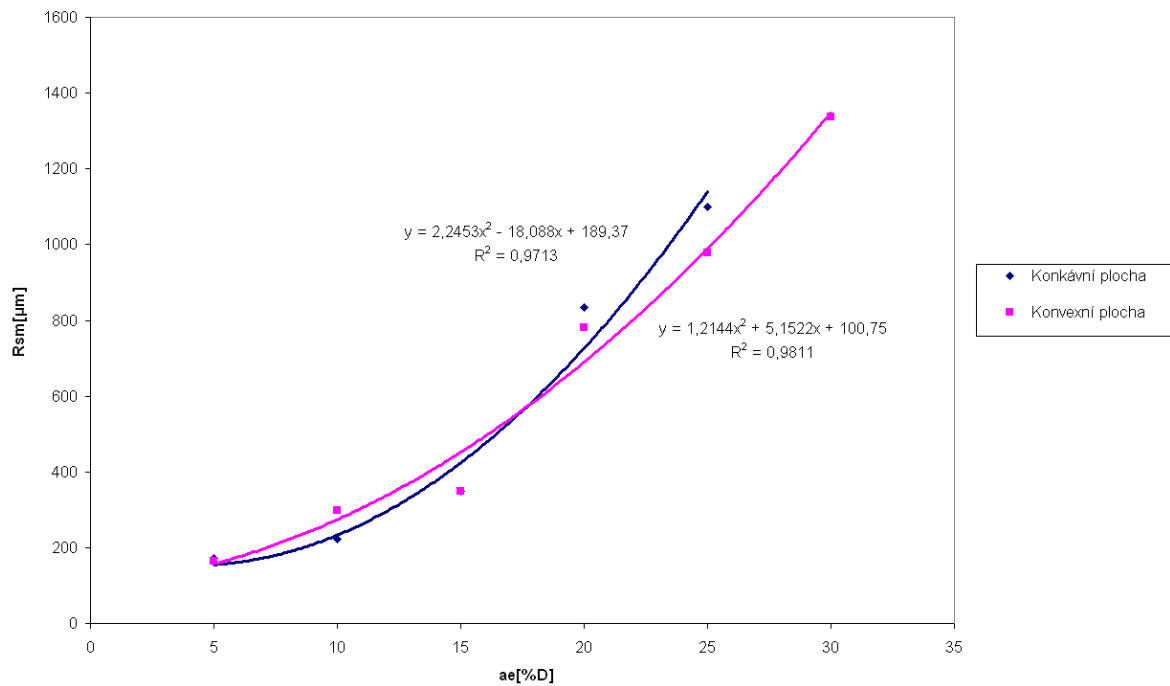
Obr. 62. Závislost parametru Rz na velikosti radiální hloubky řezu a_e u konvexní plochy



Obr. 63. Závislost parametru Rsm na velikosti radiální hloubky řezu a_e u konkávní plochy



Obr. 64. Závislost parametru R_{sm} na velikosti radiální hloubky řezu a_e u konvexní plochy



Obr. 65. Závislost parametru R_{sm} na velikosti radiální hloubky řezu a_e
u konkávní a konvexní plochy

Graf ukazuje závislost R_{sm} na radiální hloubce řezu a_e při použití průměru nástroje $D=6\text{mm}$, s vyobrazenou polynomickeou závislostí. Z grafu je patrné, že s rostoucí hodnotou a_e se zvyšuje i hodnota parametru R_{sm} , což znamená, že se zvyšuje šířka prvků profilu.

Tab. 15: Hodnoty R_a , R_z a R_{sm} pro různé
použité velikosti a_e u konkávní plochy

a_e [%D]	R_a [μm]	R_z [μm]	R_{sm} [μm]
5	5,62	44,04	178,6
10	6,04	42,63	205,95
15	8,39	52	374,8
20	11,97	62,68	548,45
25	16,35	84,2	691,4
30	24,38	115,62	1295,33

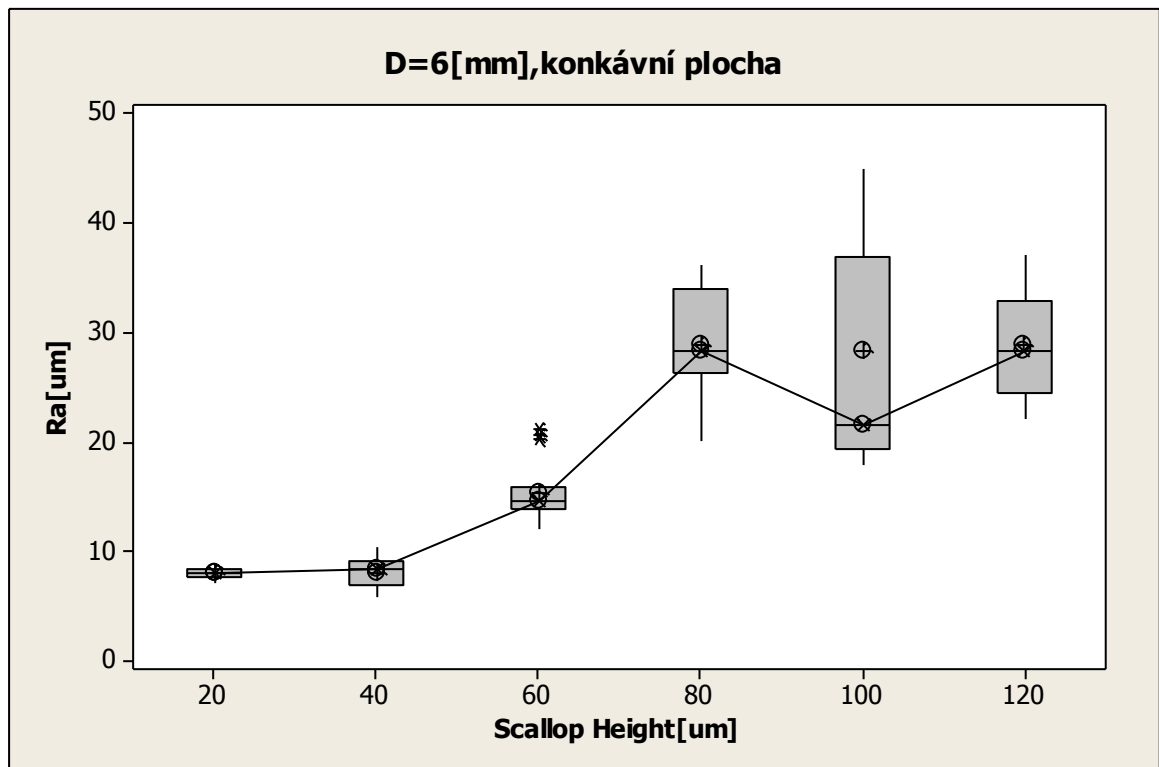
Tab. 16: Hodnoty R_a , R_z a R_{sm} pro různé použité velikosti a_e u konvexní plochy

a_e [%D]	R_a [μm]	R_z [μm]	R_{sm} [μm]
5	4,8	38,42	169,3
10	6,64	46,42	241,7
15	8,35	50,22	418,65
20	10,64	58,7	535,2
25	16,92	91,29	722,15
30	21,69	108,6	1217,17

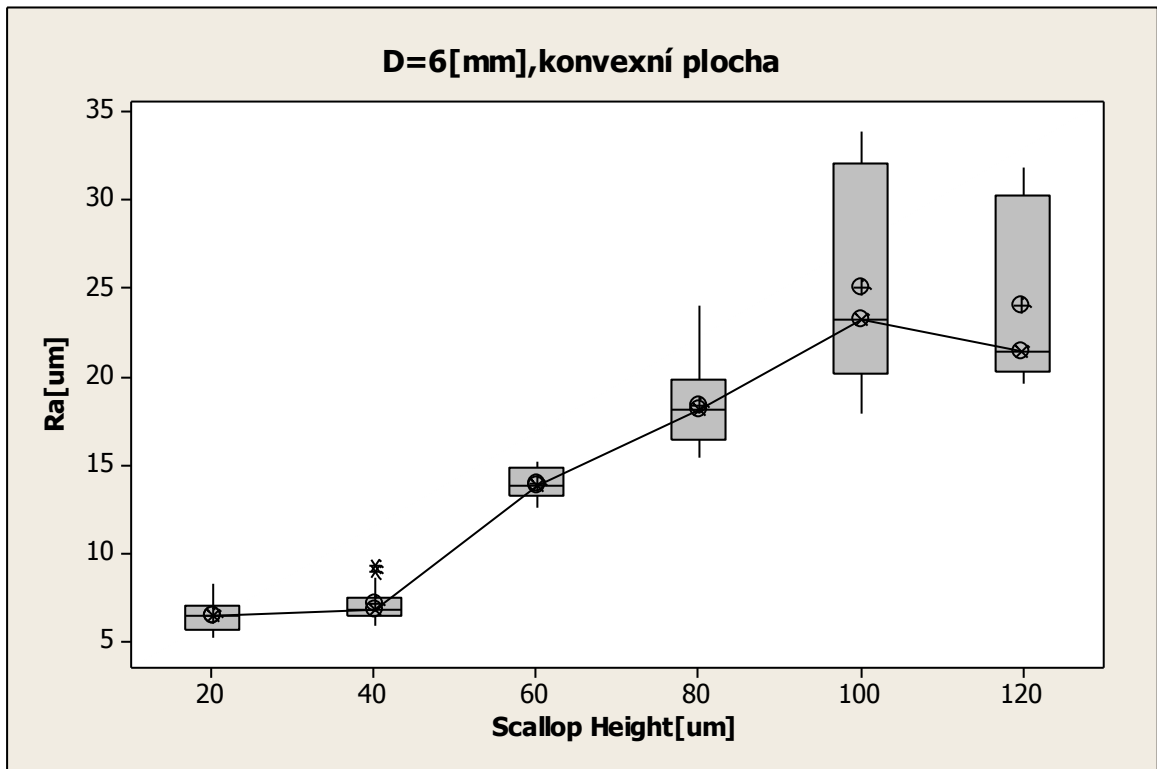
Tabulky číslo 15 a 16 obsahují hodnoty veličin R_a , R_z a R_{sm} pro všechny použité velikosti radiální hloubky řezu a_e , přičemž byl v tomto konkrétním případě použit průměr nástroje $D=5\text{mm}$.

7.6 Vliv parametru SH na sledované parametry drsnosti povrchu

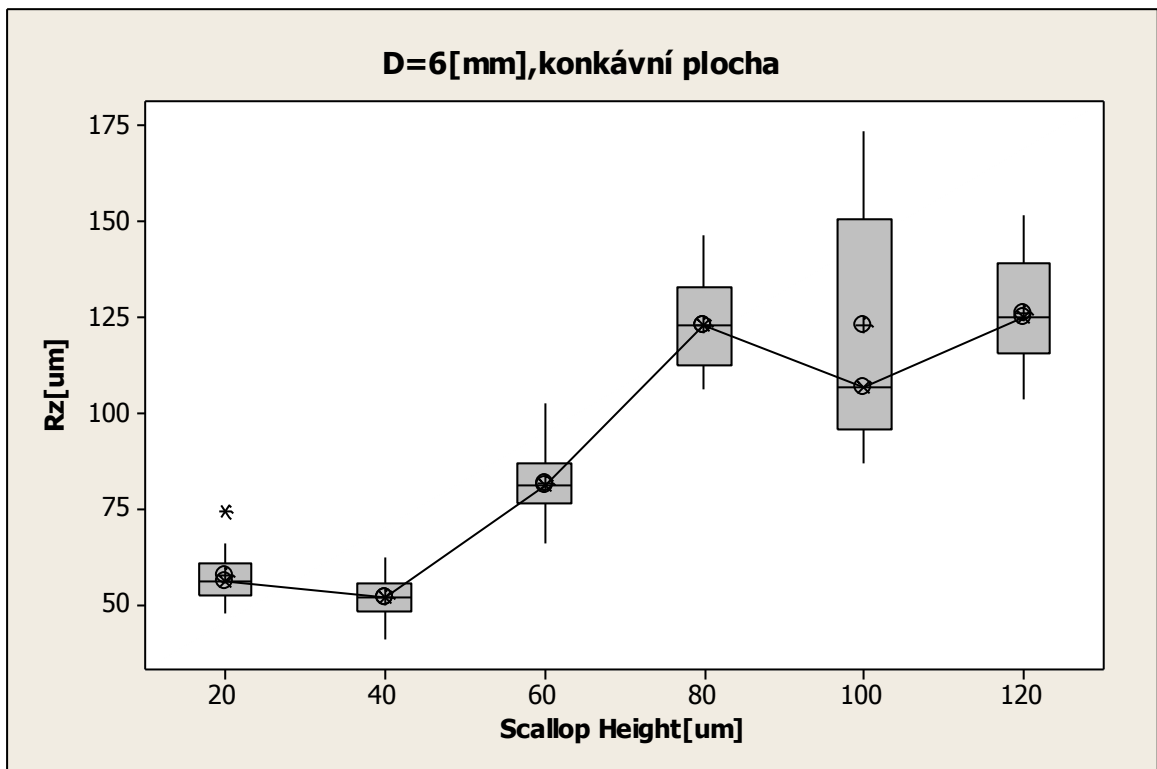
V tomto případě byl namísto hodnoty a_e zadáván parametr nastavení výšky nerovnosti SH (Scallop height), jenž závisí na vzdálenosti dvou po sobě následujících drahách nástroje. Byly zvoleny tyto hodnoty SH : 20, 40, 60, 80, 100 a 120 μm . Stejně jako v předchozích případech byl sledován vliv nastavení tohoto parametru na veličiny Ra , Rz i Rsm . Tento experiment byl proveden pouze pro jeden průměr nástroje $D=6\text{mm}$.



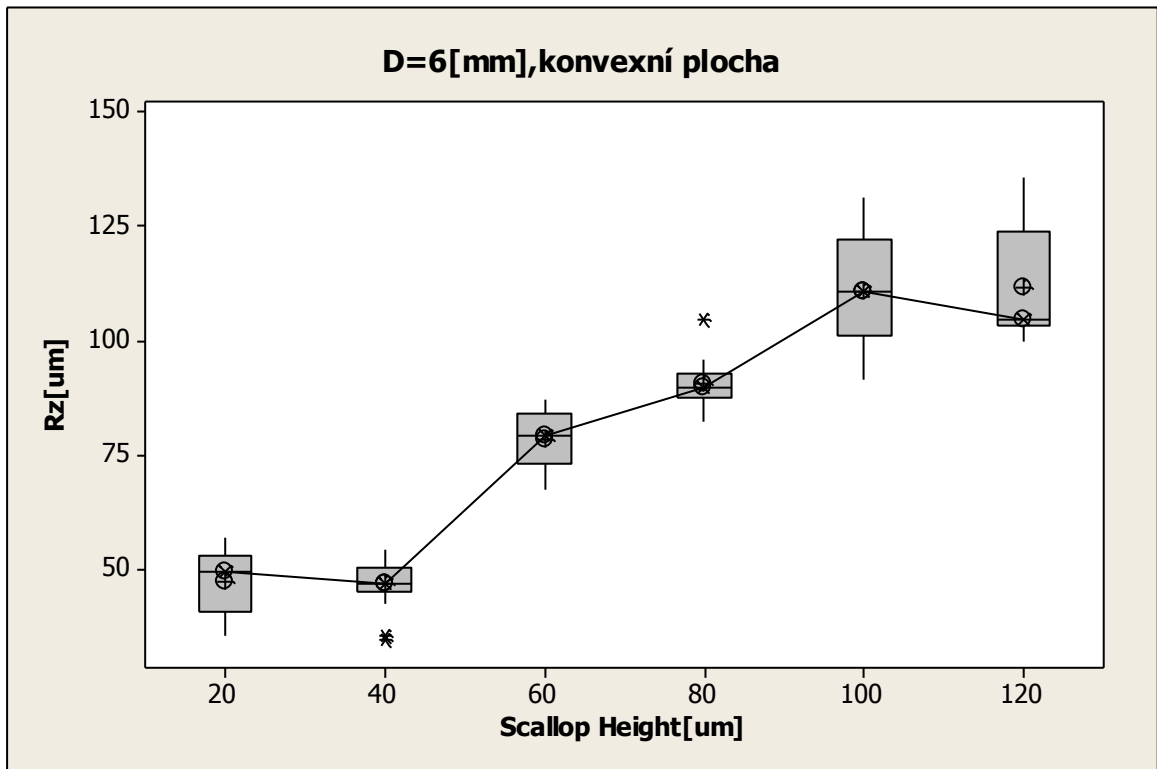
Obr. 66. Závislost parametru Ra na hodnotě SH u konkávní plochy



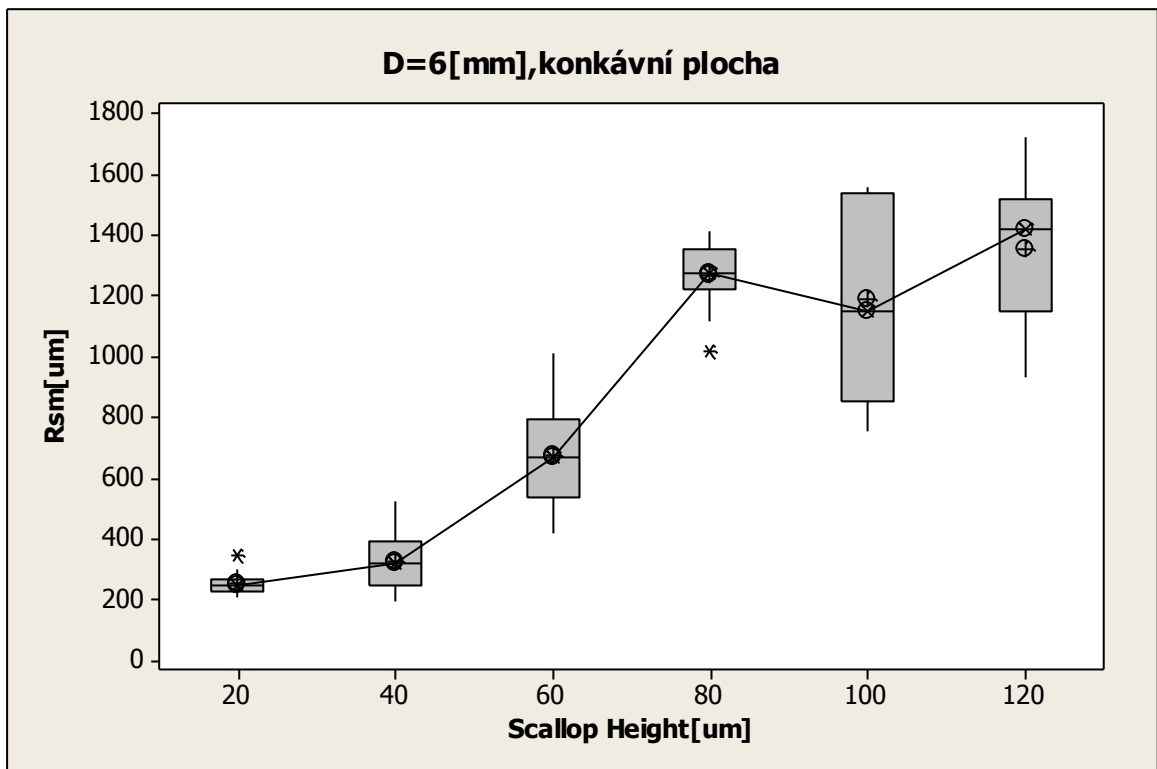
Obr. 67. Závislost parametru Ra na hodnotě SH u konvexní plochy



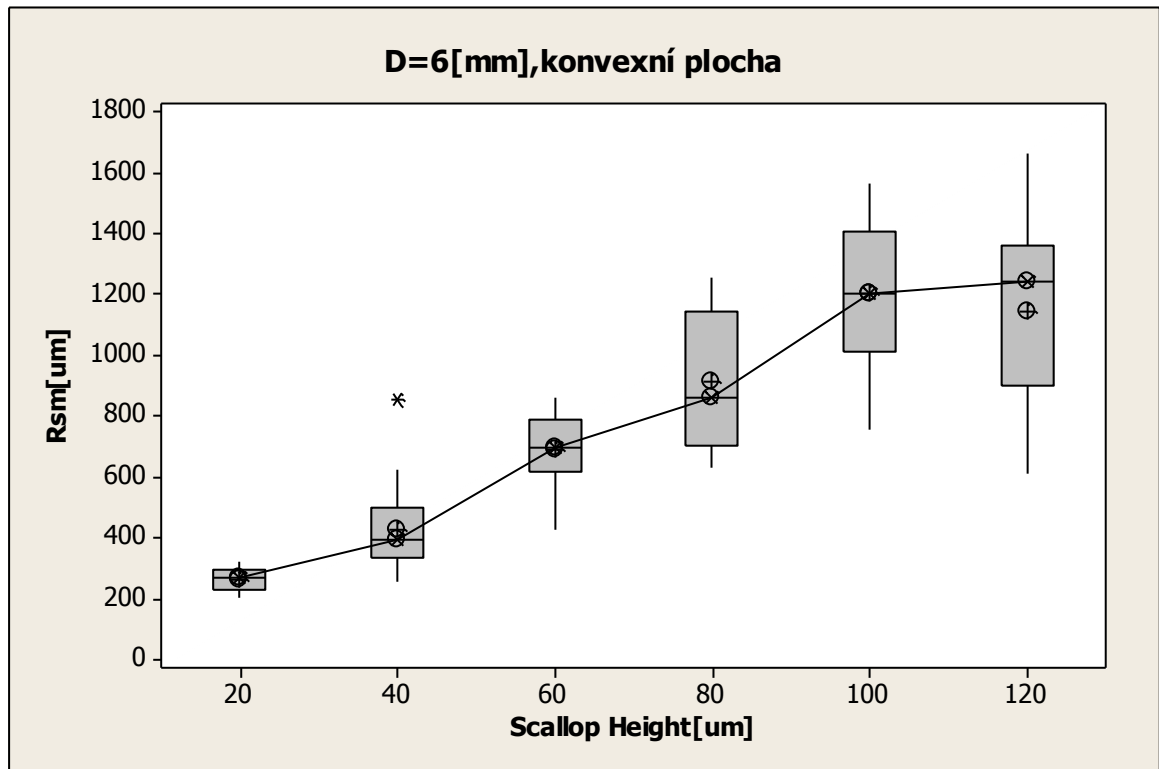
Obr. 68. Závislost parametru Rz na hodnotě SH u konkávní plochy



Obr. 69. Závislost parametru Rz na hodnotě SH u konvexní plochy



Obr. 70. Závislost parametru Rsm na hodnotě SH u konkávní plochy



Obr. 71. Závislost parametru R_{sm} na hodnotě SH u konvexní plochy

Lze si povšimnout, že parametr SH ovlivňuje všechny měřené veličiny drsnosti povrchu přímo úměrně, tzn. s rostoucí velikostí parametru SH se zvyšují i veličiny Ra , Rz a Rsm .

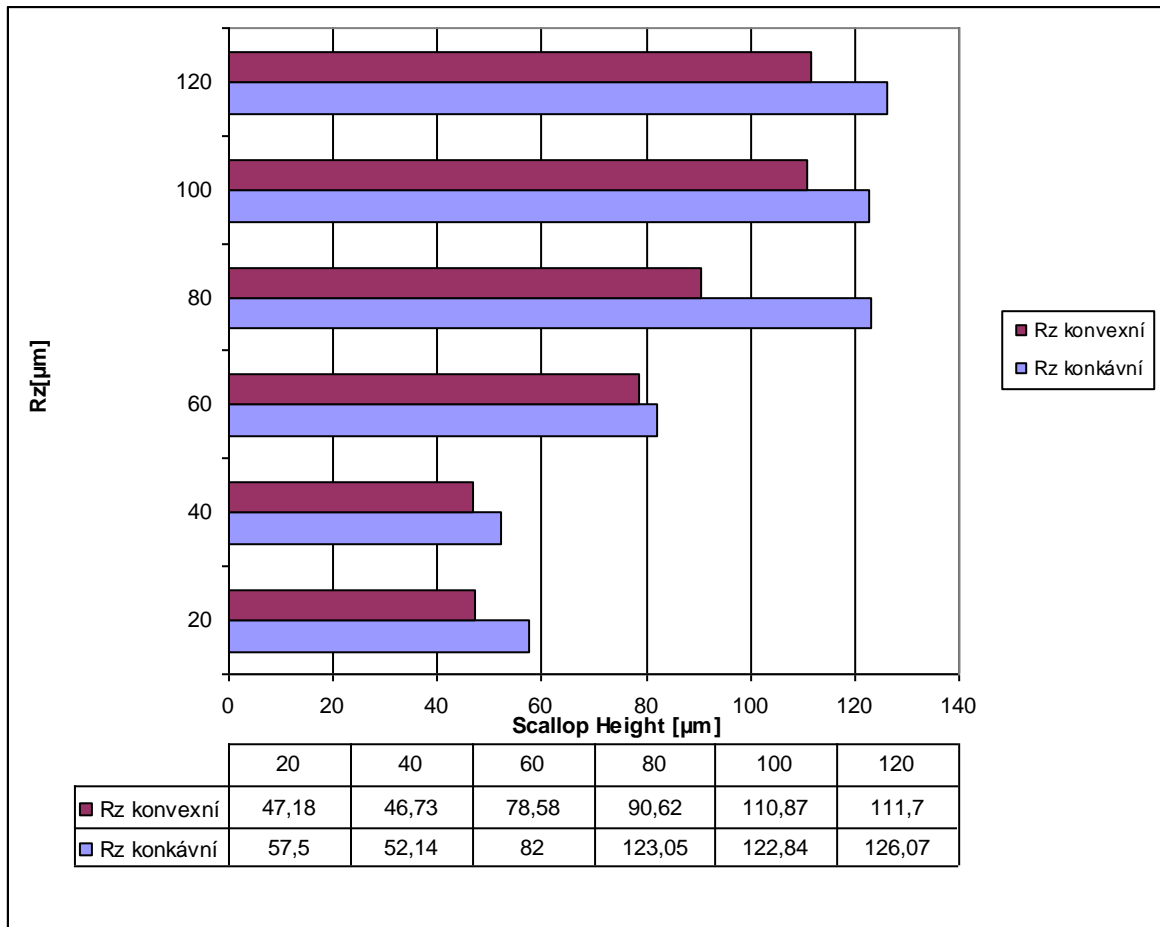
Tab. 17: Hodnoty Ra , Rz a Rsm pro různé nastavení parametru SH u konkávní plochy

$SH[\mu\text{m}]$	$Ra[\mu\text{m}]$	$Rz[\mu\text{m}]$	$Rsm[\mu\text{m}]$
20	8,01	57,5	251,15
40	8,06	52,14	323,2
60	15,31	82	678,65
80	28,84	123,05	1272,25
100	28,37	122,84	1193,4
120	28,81	126,07	1357,5

Tab. 18: Hodnoty Ra , Rz a Rsm pro různé nastavení parametru SH u konvexní plochy

$SH[\mu\text{m}]$	$Ra[\mu\text{m}]$	$Rz[\mu\text{m}]$	$Rsm[\mu\text{m}]$
20	6,42	47,18	260,05
40	7,09	46,73	427,65
60	13,91	78,58	690,75
80	18,37	90,62	912
100	25,08	110,87	1200,7
120	24,02	111,7	1143,79

Tabulky číslo 17 a 18 obsahují číselné informace o vlivu velikosti nastavení parametru Scallop Height na Ra , Rz a Rsm pro konkávní i konvexní obráběnou plochu. Tato číselná data jsou aritmetickým průměrem z dvaceti provedených měření.



Obr. 72. Závislost parametru Rz na hodnotě SH pro konkávní i konvexní plochu

Na grafu jsou znázorněny naměřené hodnoty Rz při různých nastaveních parametru SH . Tyto dvě hodnoty (Rz a SH) by se měli shodovat, ovšem je patrné, že tomu tak není. Největší odchylky se nachází u nejmenších nastaveních parametru SH a postupně tato odchylka se vzrůstající hodnotou parametru SH klesá, jak ukazují i následující tabulky.

Tab. 19: Hodnoty R_z pro různé nastavení parametru SH u konkávní plochy

SH -konkávní [μm]	R_z (naměřeno) [μm]	Rozdíl	Rozdíl (%)
20	57,5	37,5	187,5
40	52,14	12,14	30,4
60	82	22	36,6
80	123,05	43,05	53,8
100	122,84	22,84	22,8
120	126,07	6,07	5,06

Tab. 20: Hodnoty R_z pro různé nastavení parametru SH u konvexní plochy

SH -konvexní [μm]	R_z (naměřeno) [μm]	Rozdíl	Rozdíl (%)
20	47,18	27,18	135,9
40	46,73	6,73	16,8
60	78,58	18,58	31
80	90,62	10,62	13,3
100	110,87	10,87	10,9
120	111,7	-8,3	6,9

Bylo zjištěno, že matematická závislost mezi nastavenou hodnotou parametru SH a skutečnou naměřenou hodnotou parametru R_z je následující:

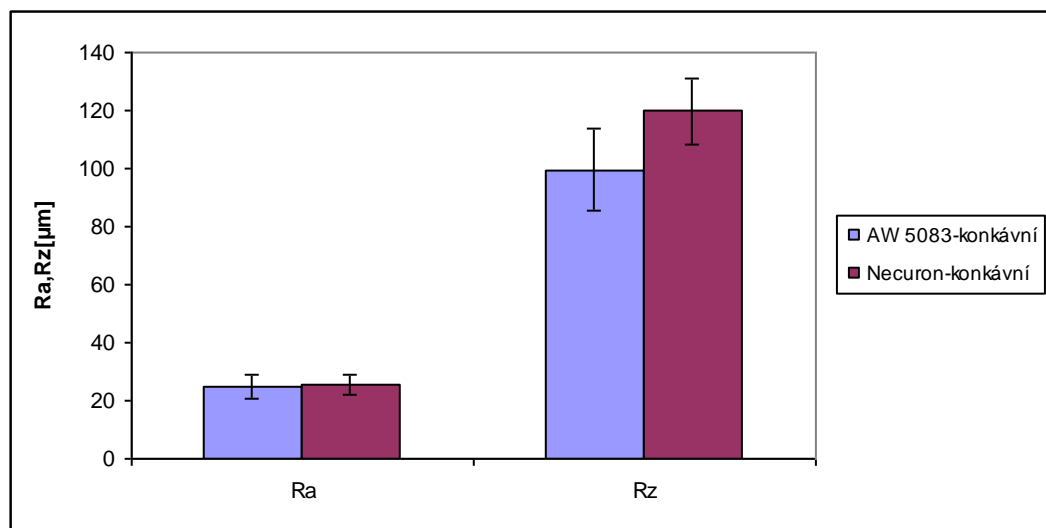
a) pro konkávní plochu: $R_z = -0,0035 \cdot SH^2 + 1,3347 \cdot SH + 21,445$
 Hodnota spolehlivosti $R^2 = 0,8674$

b) pro konvexní plochu: $R_z = -0,0018 \cdot SH^2 + 1,0029 \cdot SH + 21,574$
 Hodnota spolehlivosti $R^2 = 0,9379$

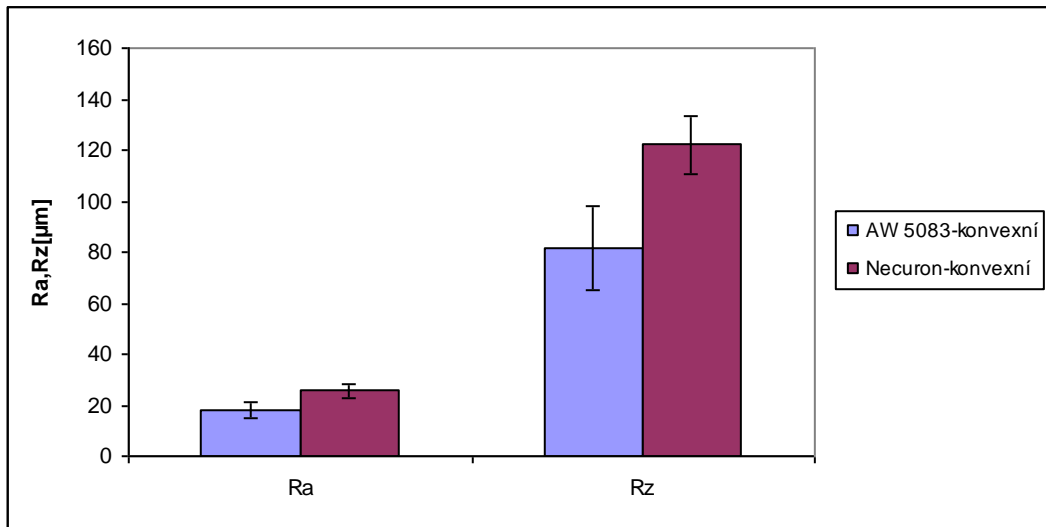
Obě tyto závislosti jsou polynomické druhého stupně.

7.7 Vliv materiálu obrobku na parametry drsnosti povrchu

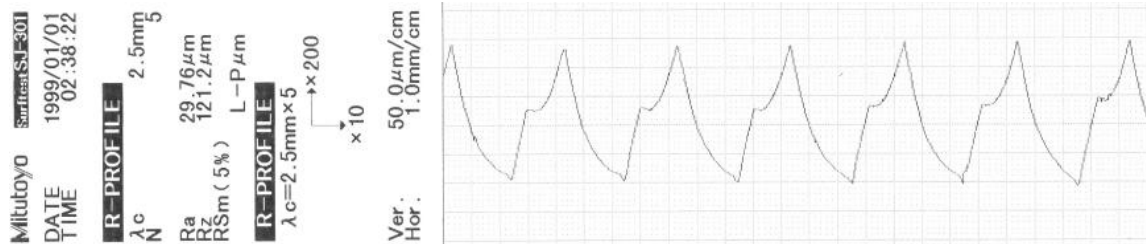
Byly zde použity dva různé typy materiálů obrobku: Necuron 651 a Dural (AW 5083). Tyto byly obráběny stejným nástrojem-kulovou frézou o průměru $D=8\text{mm}$ a také se stejnou hodnotou šířky záběru frézy $a_e=25\%D$. Řezné podmínky byly v obou případech také stejné a byly vyhodnocovány parametry R_a a R_z . Chybové úsečky v sloupcových grafech udávají toleranci s pravděpodobností 95%.



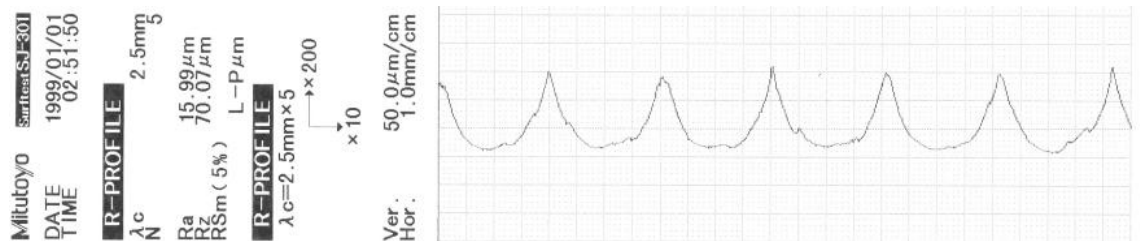
Obr. 73. Porovnání parametrů R_a a R_z pro konkávní plochu
u Necuronu a AW 5083



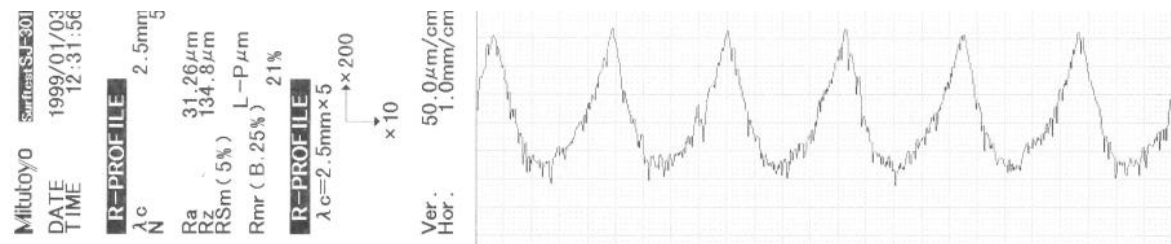
Obr. 74. Porovnání parametrů Ra a Rz pro konvexní plochu u Necuronu a AW 5083



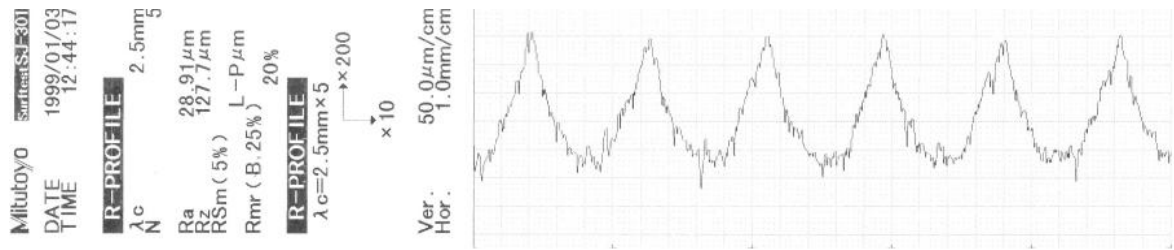
Obr. 75. Profil drsnosti u obrábění konkávní plochy AW 5083



Obr. 76. Profil drsnosti u obrábění konvexní plochy AW 5083



Obr. 77. Profil drsnosti u obrábění konkávní plochy Necuronu 651



Obr. 78. Profil drsnosti u obrábění konvexní plochy Necuronu 651

Z údajů v grafech lze usoudit, že při stejných řezných podmínkách a stejném použitém nástroji vykazuje Necuron horší parametry drsnosti obrobené plochy než-li AW 5083 a to jak u konkávní tak i konvexní plochy. Na obrázcích číslo ... je ukázka profilu drsnosti jak u obrábění Necuronu 651, tak i AW 5083, a to při stejných řezných podmínkách i použitím nástroji.

V následujících tabulkách jsou uvedeny průměrné hodnoty vypočtené z dvaceti provedených měření pro oba materiály.

Tab. 21. Hodnoty R_a a R_z u konkávní plochy

u Necuronu a AW 5083

AW 5083	$R_a[\mu\text{m}]$	24,8
	$R_z[\mu\text{m}]$	99,6
Necuron	$R_a[\mu\text{m}]$	25,52
	$R_z[\mu\text{m}]$	119,77

Tab. 22. Hodnoty R_a a R_z u konvexní plochy

u Necuronu a AW 5083

AW 5083	$R_a[\mu\text{m}]$	18,15
	$R_z[\mu\text{m}]$	81,56
Necuron	$R_a[\mu\text{m}]$	25,74
	$R_z[\mu\text{m}]$	122,08

7.8 Strojní čas

Při obrábění byl měřen strojní čas u jednotlivých operací a ten byl následně porovnáván s časem odhadovaným programem CAM Express. Bylo zjištěno, že se tyto dva časy poměrně značně liší, a to zhruba o 65% u všech provedených operací. Strojní čas z programu CAM Express byl pro všechny použité parametry obrábění vždy nižší, než skutečný strojní čas. V tabulce číslo 23 je ukázka naměřených časů a časů získaných z CAM Expressu při obrábění konkávní plochy nástrojem o průměru $D=3\text{mm}$. Zjištěné rozdíly byly obdobné u všech použitých nástrojů.

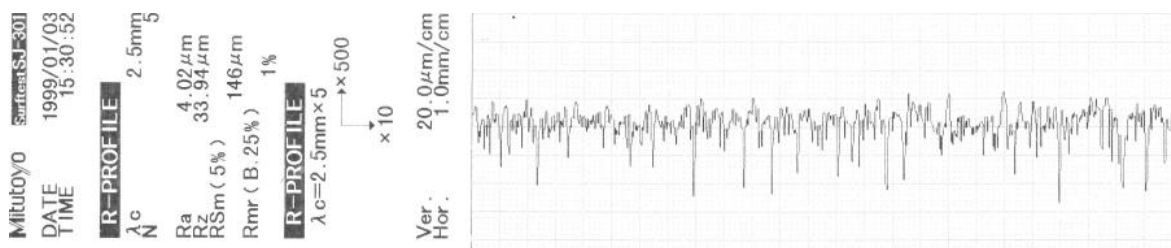
Celá tabulka viz příloha.

Tab. 23. Strojní časy pro $D=3\text{mm}$ u konkávní plochy

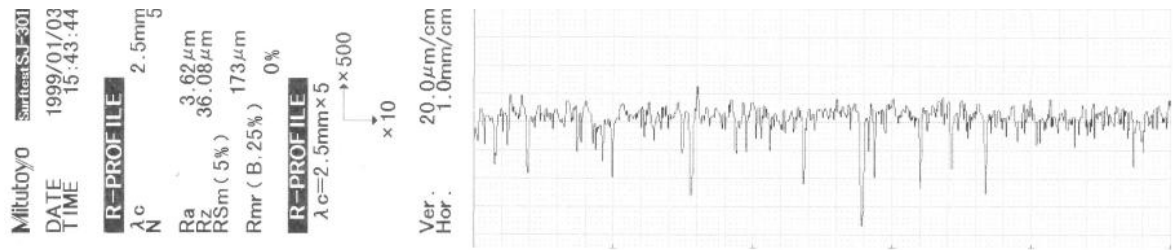
Operace pro	Odhadovaný strojní čas [min]	Skutečný strojní čas [min]	Rozdíl [min]	Rozdíl (%)
$a_e=5\%D$	9:04	25:22	16:18	64,3
$a_e=10\%D$	4:34	13:00	8:26	64,9
$a_e=15\%D$	3:02	8:34	5:32	64,6
$a_e=20\%D$	2:18	6:32	4:14	64,8
$a_e=25\%D$	1:51	5:15	3:24	60,0
$a_e=30\%D$	1:33	4:29	2:56	65,4

7.9 Data získaná z drsnoměru Mitutoyo SJ-301

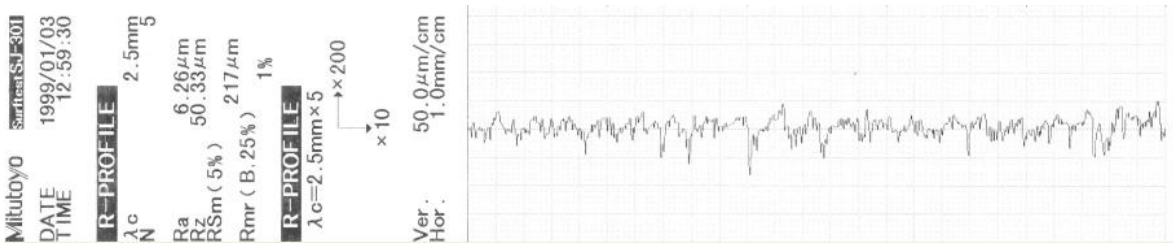
Drsnost na každé z obrobenech ploch byla změřena drsnoměrem Mitutoyo SJ-301, z nějž byly získány tištěné výsledky drsnosti s profilem povrchu. Zde je ukázka profilů drsnosti při použití nástroje $D=6\text{mm}$.



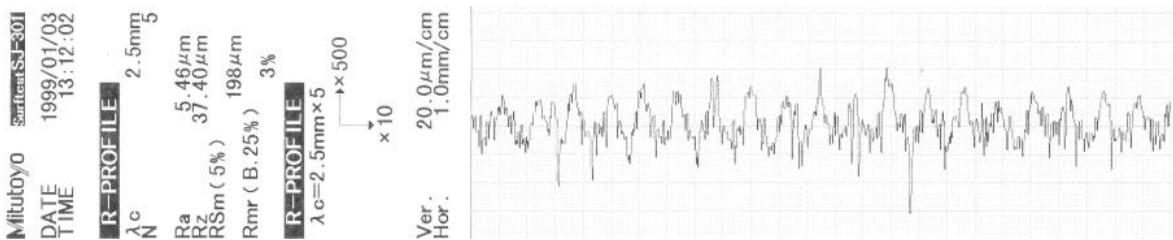
Obr. 79. Profil drsnosti při použití $D=6\text{mm}$ a $a_e=5\%D$ u obrábění konkávní plochy



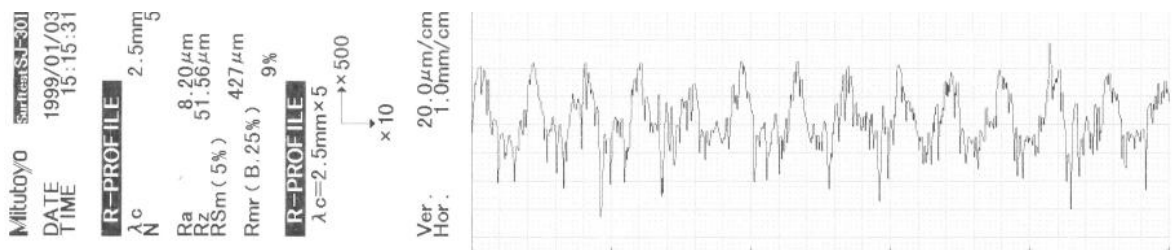
Obr. 80. Profil drsnosti při použití $D=6\text{mm}$ a $a_e=5\%D$ u obrábění konvexní plochy



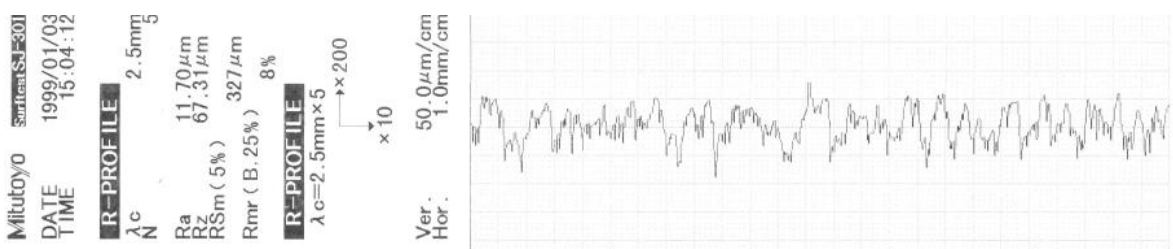
Obr. 81. Profil drsnosti při použití $D=6\text{mm}$ a $a_e=10\%D$ u obrábění konkávní plochy



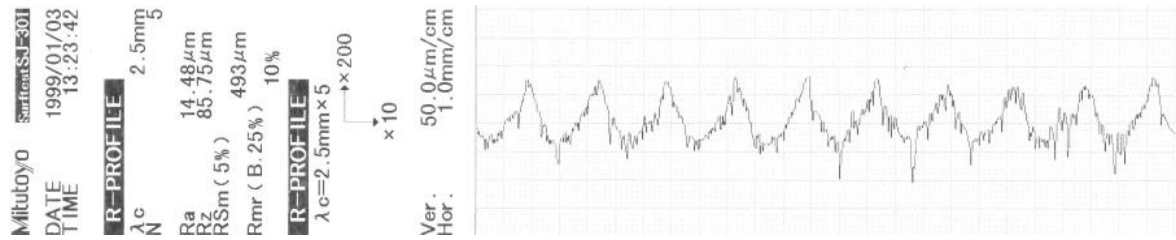
Obr. 82. Profil drsnosti při použití $D=6\text{mm}$ a $a_e=10\%D$ u obrábění konvexní plochy



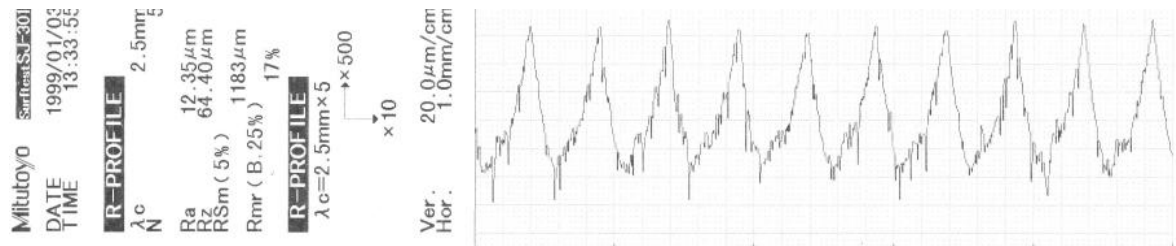
Obr. 83. Profil drsnosti při použití $D=6\text{mm}$ a $a_e=15\%D$ u obrábění konkávní plochy



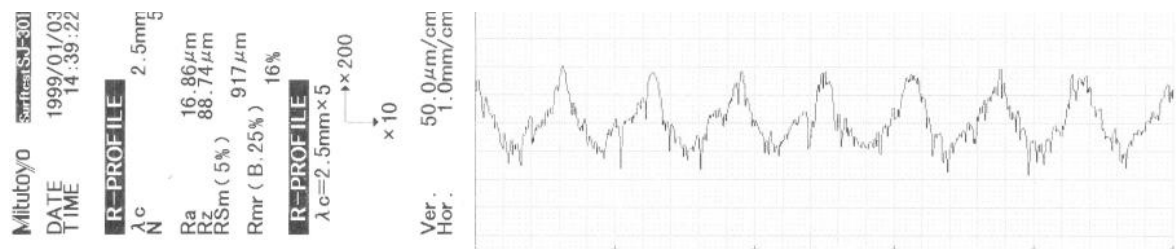
Obr. 84. Profil drsnosti při použití $D=6\text{mm}$ a $a_e=15\%D$ u obrábění konvexní plochy



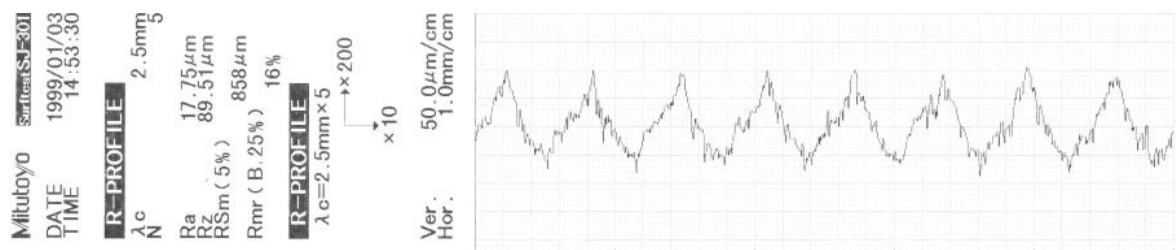
Obr.85. Profil drsnosti při použití $D=6mm$ a $a_e=20\%D$ u obrábění konkávní plochy



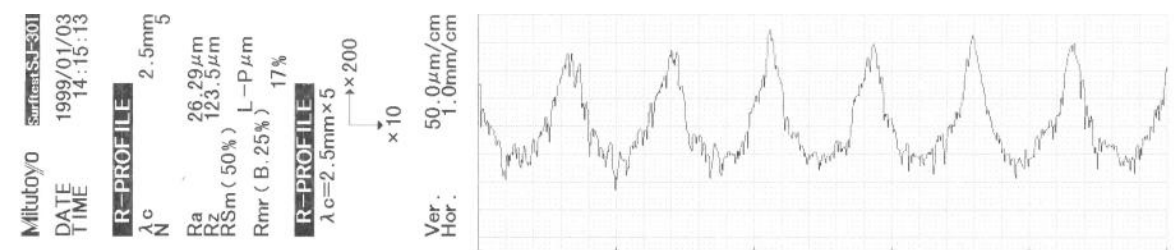
Obr. 86. Profil drsnosti při použití $D=6mm$ a $a_e=20\%D$ u obrábění konvexní plochy



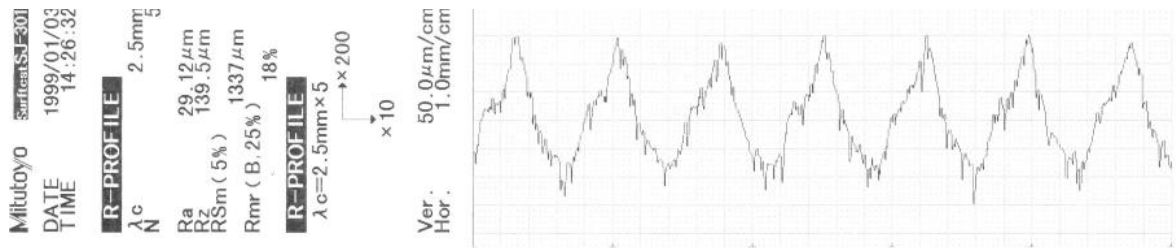
Obr. 87. Profil drsnosti při použití $D=6mm$ a $a_e=25\%D$ u obrábění konkávní plochy



Obr. 88. Profil drsnosti při použití $D=6mm$ a $a_e=25\%D$ u obrábění konvexní plochy



Obr. 89. Profil drsnosti při použití $D=6mm$ a $a_e=30\%D$ u obrábění konkávní plochy

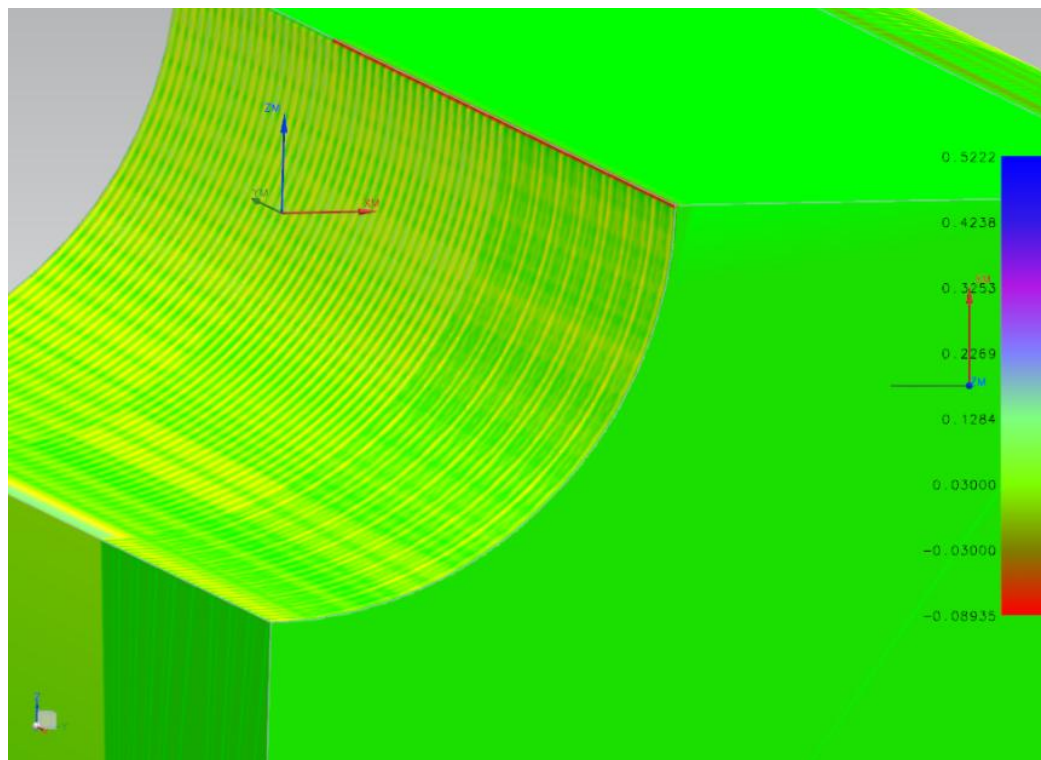


Obr. 90. Profil drsnosti při použití $D=6\text{mm}$ a $a_e=30\%D$ u obrábění konvexní plochy

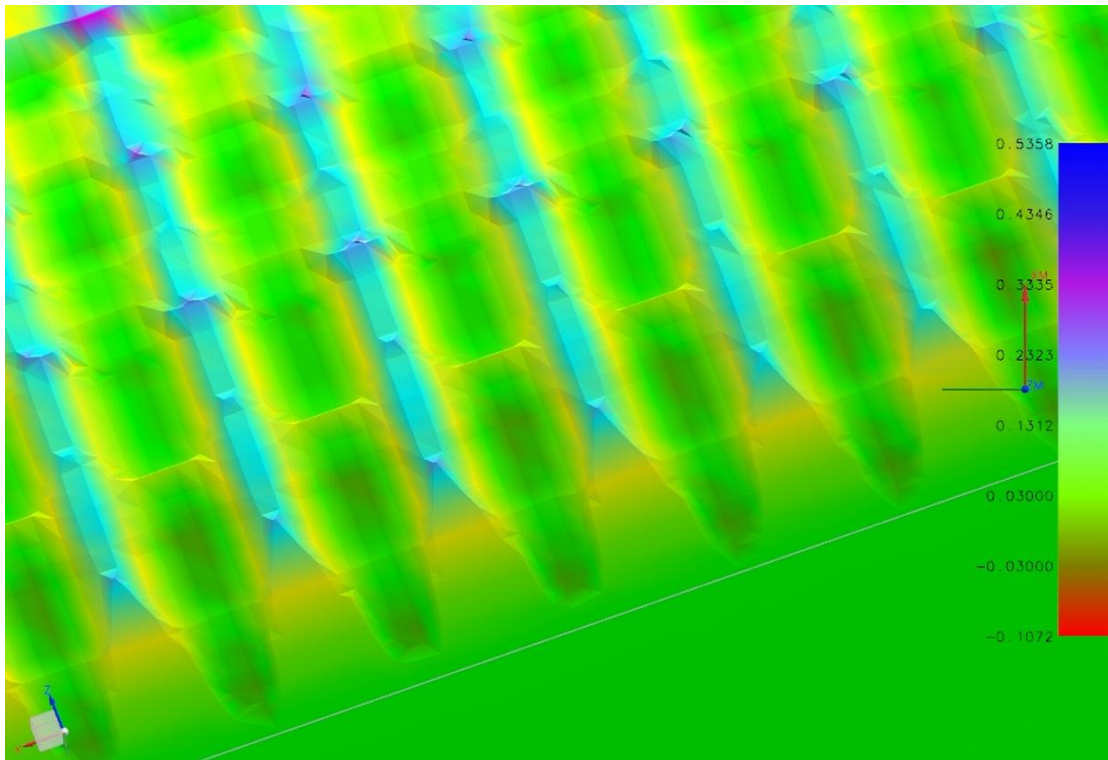
Na obrázcích lze názorně vidět, jak se měnil profil drsnosti obroběných ploch, při použití nástroje o průměru $D=6\text{mm}$, pokud se měnila hodnota radiální hloubky řezu a_e jak u konkávní tak i u konvexní plochy.

7.10 Data získaná z programu CAM Express

Z programu CAM Express byly pro porovnání se skutečností získány obrázky obroběných ploch.



Obr. 91. Konkávní plocha obroběná nástrojem o průměru $D=6\text{mm}$ a radiální hloubce řezu $a_e=25\%D$

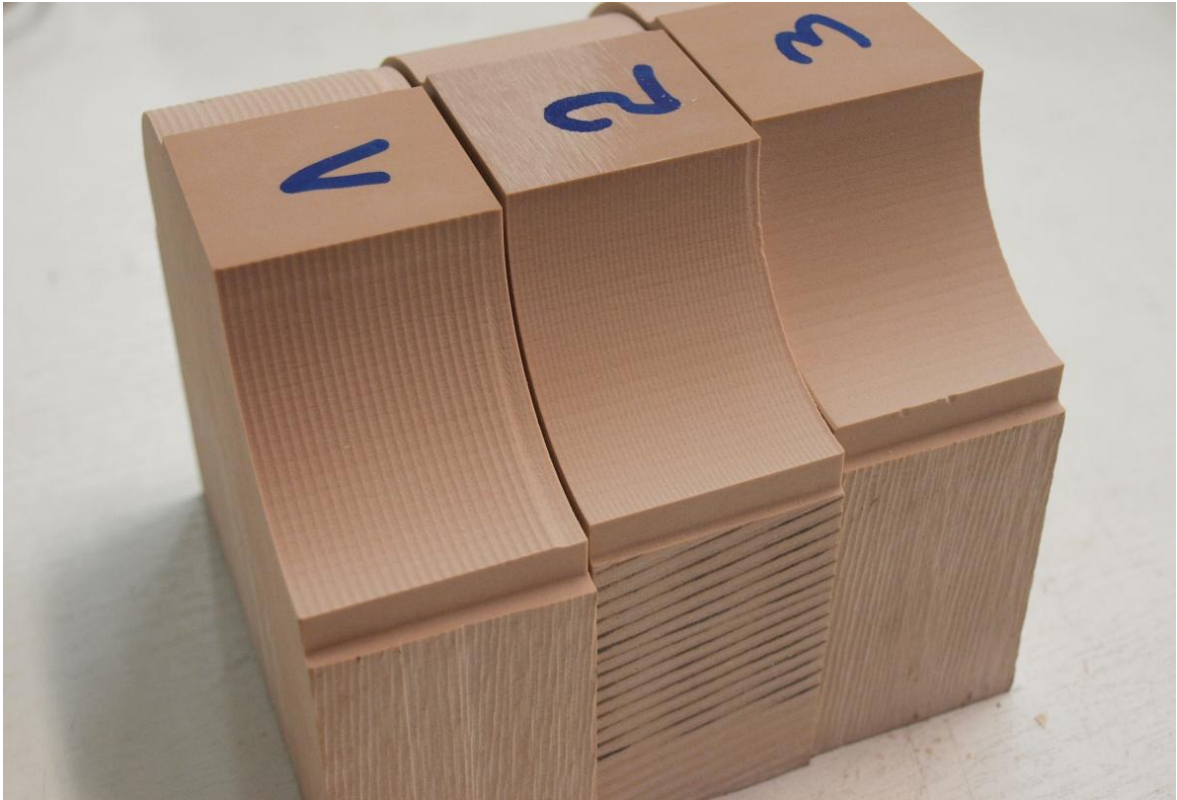


*Obr. 92. Detail konvexní plochy obrobene nástrojem o průměru $D=6\text{mm}$
a radiální hloubce řezu $a_e=25\%D$*



Obr. 93. Detail skutečné obrobene plochy

Pro porovnání následuje obrázek skutečných obrobků při totožných řezných podmínkách – nástroji o průměru $D=6\text{mm}$ a radiální hloubce řezu $a_e=10, 20$ a $30\%D$.



Obr. 94. Konkávní plocha obrobena nástrojem o průměru $D=6\text{mm}$ a $a_e=10, 20$ a $30\%D$

8 DISKUZE VÝSLEDKŮ

Z provedených experimentů a naměřených dat vyplývá, že parametry drsnosti jsou značně závislé na nastavení hodnot veličin obráběcího procesu, a lze je tedy těmito parametry obrábění ovlivňovat a upravovat dle konkrétní potřeby. Bylo zjištěno a ověřeno, že všechny tři vyhodnocované parametry drsnosti – Ra , Rz i Rsm – jsou závislé jak na velikosti použitého průměru nástroje D , tak dále i na velikosti radiální hloubky řezu a_e (šířce záběru nástroje) a také na hodnotě parametru SH – Scallop Height – tedy parametru nastavení výšky nerovnosti. U všech těchto veličin byla zjištěna přímo úměrná závislost na parametrech drsnosti vzniklé plochy, a to jak u konkávní tak i konvexní.

Dále bylo potvrzeno, že na drsnost obrobených ploch má značný vliv i použitý materiál obrobku. Byly dosaženy výrazně horší parametry drsnosti u obrábění Necuronu 651, než-li u obrobku z materiálu AW 5083 (Dural) a to při stejných použitých řezných podmínkách a nástrojích.

Dalším poznatkem je značná rozdílnost ve strojních časech odhadovaných softwarem a časech skutečných. Lze z toho vyvodit závěr, že časy odhadované CAD/CAM programem CAM Express jsou jen velmi přibližné a značně nepřesné.

ZÁVĚR

Cílem této diplomové práce bylo stanovit vliv a závislost parametrů řezného procesu na hodnoty drsnosti obrobeného povrchu.

V praktické části byla nejprve navržena vhodná geometrie obráběné součásti, která byla poté vymodelována v programu Catia V5R18. Tento model byl poté vyexportován do programu CAM Express, kde byla navržena obráběcí strategie a vhodné nástroje. V další fázi práce byl program zhotovený v programu CAM Express převeden do řídicího systému CNC frézky, na které probíhalo obrábění zkušebních vzorků zvolenými nástroji a řeznými podmínkami. Následně byly na vzorcích měřeny parametry drsnosti povrchu, přičemž pro každý typ obrábění bylo změřeno dvacet hodnot, aby bylo možné tato data následně statisticky vyhodnocovat. Samotné zpracování dat probíhalo v programech Minitab a Microsoft Excel, kde byla provedena nejdříve kontrola na odlehlé hodnoty, časový vývoj naměřených dat nakonec zde byly zhotoveny příslušné grafické závislosti.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] BRYCHTA, J. *Výrobní stroje obráběcí*. VŠB-TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA, 2003. 146s. ISBN 80-248-0237-6.
- [2] BUMBÁLEK, B., ODVODY, V., OŠŤÁDAL, B., *Drsnost povrchu*. Praha: SNTL, 1989.
- [3] DILLINGER, J. *Moderní strojírenství pro školu i praxi*. Praha: Europa-Sobotáles, 2007. 608s. ISBN 978-80-86706-19-1.
- [4] FRISCHHERZ, A., PIEGLER, H., PRAGAČ, J. *Technologie zpracování kovů: Odborné znalosti 2*. Praha: SNTL, 2001. 279s. ISBN 80-902655-1-0.
- [5] HLUCHÝ, M., HANĚK, V., *Strojírenská technologie 2 – 2. díl*. Praha: Scientia, 2001. ISBN 80-7183-245-6.
- [6] HOUŠA, J. *Konstrukce číslicově řízených obráběcích strojů*. Praha: SNTL, 1985.
- [7] JANDEČKA, K. *Postprocesory a programování NC strojů.*: UJEP, 2007. 244s. ISBN 978-80-7044-870-0.
- [8] KELLER, P. *Programování a řízení CNC strojů*. Technická univerzita Liberec, 2005.
- [9] KOČMAN, K. *Speciální technologie obrábění*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004. 227s. ISBN 80-214-2562-8.
- [10] KOČMAN, K., PROKOP, J. *Technologie obrábění*. Brno: CERM, 2005. 270s. ISBN 80-214-3068-0.
- [11] KOVÁŘ, J. Ovlivnění kvality a jakosti obrobené plochy při frézování. *Mm průmyslové spektrum* [online]. 14. dubna 2004. č.4,[cit. 2010-11-28]. Dostupný z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/ovlivneni-kvality-a-jakosti-obrobene-plochy-pri-frezovani> >.

- [12] KŘÍŽ, R., VÁVRA, P. *Strojírenská příručka – Svazek 2*. Praha: Scientia, 1993. ISBN 80-85827-00-X.
- [13] PEŠIČKA, L. *Geometrická specifikace výrobků strojírenské výroby (GPS) – Textura povrchu – Požadavky na drsnost, vlnitost a základní profil povrchu*. Praha: Český normalizační institut, 2006.
- [14] RAO, R. N. *CAD/CAM: principles and applications*. Tata McGraw – Hill Publishing Copany Limited. 2006. ISBN 0-07-058373-0.
- [15] SMID, P. *CNC programming handbook: a comprehensive guide to practical CNC programming*. New York, 2003. ISBN 0-8311-3158-6.
- [16] ŠTULPA, M. *CNC obráběcí stroje a jejich programování*. Praha: BEN, 2000. ISBN 978-80-7300-207-7.
- [17] VAŇÁK, A. *Technologie frézování – pracovní listy*. Šumperk: 2007. Reg. číslo: CZ.04.1.03/3.1.15.2/0091.
- [18] VASILKO, K. *Analytická teória trieskového obrábania*. Prešov: Fakulta výrobných technológií TU Košice, 2007. 338s. ISBN 978-80-8073-759-7.
- [19] *Příručka obrábění: Kniha pro praktiky*. Praha: Fa Sandvik CZ s.r.o., 1997. ISBN 91-97 22 99-4-6.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

A_γ	Čelo frézy
A_α	Hřbet frézy
S	Nástrojové hlavní ostří
S'	Nástrojové vedlejší ostří
κ	Úhel nastavení
κ_r	Nástrojový úhel nastavení hlavního ostří
α	Úhel hřbetu frézy
β	Úhel břitu frézy
γ	Úhel čela frézy
δ	Úhel řezu
λ	Úhel sklonu ostří
r_ε	Poloměr zaoblení špičky nástroje
D	Průměr frézy
n	Otáčky vřetene frézy
v_c	Řezná rychlost
v_f	Posuvová rychlost
v_e	Výsledná rychlost řezného pohybu
f	Posuv nástroje
f_z	Posuv na zub frézy
f_n	Posuv na otáčku
f_{\min}	Posuv nástroje za minutu
z	Počet zubů frézy

a_e	Radiální hloubka řezu
a_p	Axiální hloubka řezu
φ	Úhel posuvového pohybu frézy
η	Úhel řezného pohybu frézy
P_{fe}	Pracovní boční rovina
V	Objem odebraného materiálu za jednotku času
h_{\max}	Maximální tloušťka třísky
F_c	Tangenciální složka řezné síly
F_{cn}	Normálová složka řezné síly
F_p	Axiální složka řezné síly
F_a	Aktivní složka řezné síly
F	Celková řezná síla
F_f	Posunová síla
F_{fn}	Kolmá posunová síla
CAM	Computer Aided Manufacturing
CAD	Computer Aided Design
NC	Numerical Control
CNC	Computerized Numerical Control
DNC	Direct Numerical Control
X,Y,Z	Osy pravoúhlé souřadné soustavy CNC stroje
A,B,C	Rotační pohyby kolem os X,Y,Z
U,V,W	Sekundární, doplňkové osy CNC stroje
M	Nulový bod CNC stroje

W	Nulový bod obrobku
R	Referenční bod
F	Vztažný bod suportu nebo vřetene
E	Bod nastavení nástroje
T	Referenční bod držáku nástroje
L_c, L_s, L_f	Filtry drsnosti povrchu
l_r	Základní délka profilu
l_n	Vyhodnocovaná délka profilu
Ra	Průměrná aritmetická úchylka profilu
Rt	Celková výška profilu
Rz	Největší výška profilu
Rp	Největší výška výstupku profilu
Rv	Největší hloubka prohlubně profilu
Rc	Průměrná výška prvku profilu
Rq	Průměrná kvadratická hodnota posuzovaného profilu
Rsk	Šikmost posuzovaného profilu
Rku	Špičatost posuzovaného profilu
Rsm	Průměrná šířka prvků profilu
Rdq	Průměrný kvadratický sklon posuzovaného profilu
Rmr	Materiálový poměr profilu
Rdc	Rozdíl výšky úseku profilu
Zp	Výška nejvyššího výstupku profilu
Zv	Hloubka nejnižší prohlubně profilu
Zt	Výška prvku profilu
W	Vlnitost profilu

<i>R</i>	Drsnost profilu
<i>L</i>	Textura povrchu
<i>AW</i>	Střední rozteč prvků motif vlnitosti
<i>W_x</i>	Největší hloubka vlnitosti
<i>W_{te}</i>	Celková hloubka vlnitosti

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1. Způsoby frézování.....	13
Obr. 2. Sousedné a nesousedné frézování.....	14
Obr. 3. Základní druhy fréz.....	16
Obr. 4. Nástrojové úhly na fréze.....	17
Obr. 5. Geometrie fréz s vyměnitelnými destičkami podle úhlu čela.....	19
Obr. 6. Řezné pohyby při frézování.....	21
Obr. 7. Vektory řezných rychlostí při nesousedném frézování.....	21
Obr. 8. Kinematika pohybů nástroje a obrobku.....	22
Obr. 9. Síly na fréze a obrobku.....	24
Obr. 10. Pravoúhlá souřadná soustava a otočné osy.....	28
Obr. 11. Polohy referenčních a vztažných bodů u frézky a její souřadný systém.....	29
Obr. 12. Schéma struktury věty programu.....	34
Obr. 13. Stavění souřadnic.....	35
Obr. 14. Pravoúhlé řízení.....	35
Obr. 15. Příklady typů souvislého řízení.....	36
Obr. 16. Přesnost CNC obráběcích strojů.....	38
Obr. 17. Vyhodnocovaná délka.....	39
Obr. 18. Průměrná aritmetická úchylka profilu.....	40
Obr. 19. Celková výška profilu.....	41
Obr. 20. Největší výška profilu Rz.....	41
Obr. 21. Největší výška výstupku profilu.....	41
Obr. 22. Největší hloubka prohlubně profilu.....	42
Obr. 23 Průměrná výška prvku profilu.....	42
Obr. 24. Šikmost posuzovaného profilu.....	42

Obr. 25. Průměrná šířka prvků profilu.....	43
Obr. 26. Průměrný kvadratický sklon posuzovaného profilu.....	43
Obr. 27. Materiálový poměr profilu.....	44
Obr. 28. Křivka materiálového poměru profilu.....	44
Obr. 29. Parametry vlnitosti.....	45
Obr. 30. Vlnitost a drsnost povrchu.....	45
Obr. 31. Tvar součásti.....	52
Obr. 32. Rozměry a tvar obráběné součásti.....	53
Obr. 33. Konkávní a konvexní plocha součásti.....	53
Obr. 34. Dráhy nástroje při hrubování.....	55
Obr. 35. Dráhy nástroje pro obrábění načisto-obráběcí strategie Countour Area.....	55
Obr. 36. Parametr a_e	56
Obr. 37. Parametr SH (Scallop Height)	58
Obr. 38. Směr pohybu nástroje a směr pohybu hrotu drsnoměru.....	59
Obr. 39. Časový vývoj parametru drsnosti R_a	64
Obr. 40. Časový vývoj parametru drsnosti R_a	65
Obr. 41. Časový vývoj parametru drsnosti R_z	66
Obr. 42. Časový vývoj parametru drsnosti R_z	67
Obr. 43. Časový vývoj parametru drsnosti R_{sm}	67
Obr. 44. Časový vývoj parametru drsnosti R_{sm}	68
Obr. 45. Naměřené hodnoty parametru drsnosti R_a	69
Obr. 46. Naměřené hodnoty parametru drsnosti R_z	69
Obr. 47. Naměřené hodnoty parametru drsnosti R_{sm}	70
Obr. 48. Závislost parametru drsnosti R_a na průměru frézy D u konkávní plochy	71
Obr. 49. Závislost parametru drsnosti R_a na průměru frézy D u konvexní plochy	72

Obr. 50. Závislost parametru drsnosti Rz na průměru frézy D u konkávní plochy	72
Obr. 51. Závislost parametru drsnosti Rz na průměru frézy D u konvexní plochy	73
Obr. 52. Závislost parametru drsnosti Rsm na průměru frézy D u konkávní plochy	73
Obr. 53. Závislost parametru drsnosti Rsm na průměru frézy D u konvexní plochy	74
Obr. 54. Závislost Rsm na průměru frézy D u konkávní plochy	75
Obr. 55. Závislost Rsm na průměru frézy D u konvexní plochy	76
Obr. 56. Srovnání hodnot Ra u konkávní a konvexní plochy	77
Obr. 57. Srovnání hodnot Rz u konkávní a konvexní plochy	78
Obr. 58. Srovnání hodnot Rsm u konkávní a konvexní plochy	78
Obr. 59. Závislost parametru Ra na velikosti radiální hloubky řezu a_e u konkávní plochy	81
Obr. 60. Závislost parametru Ra na velikosti radiální hloubky řezu a_e u konvexní plochy	82
Obr. 61. Závislost parametru Rz na velikosti radiální hloubky řezu a_e u konkávní plochy	82
Obr. 62. Závislost parametru Rz na velikosti radiální hloubky řezu a_e u konvexní plochy	83
Obr. 63. Závislost parametru Rsm na velikosti radiální hloubky řezu a_e u konkávní plochy	83
Obr. 64. Závislost parametru Rsm na velikosti radiální hloubky řezu a_e u konvexní plochy	84
Obr. 65. Závislost parametru Rsm na velikosti radiální hloubky řezu a_e u konkávní a konvexní plochy.....	85
Obr. 66. Závislost parametru Ra na hodnotě SH u konkávní plochy	87
Obr. 67. Závislost parametru Ra na hodnotě SH u konvexní plochy	88

Obr. 68. Závislost parametru Rz na hodnotě SH u konkávní plochy	88
Obr. 69. Závislost parametru Rz na hodnotě SH u konvexní plochy	89
Obr. 70. Závislost parametru Rsm na hodnotě SH u konkávní plochy	89
Obr. 71. Závislost parametru Rsm na hodnotě SH u konvexní plochy	90
Obr. 72. Závislost parametru Rz na hodnotě SH pro konkávní i konvexní plochu	92
Obr. 73. Porovnání parametrů Ra a Rz pro konkávní plochu u Necuronu a AW 5083	94
Obr. 74. Porovnání parametrů Ra a Rz pro konvexní plochu u Necuronu a AW 5083	95
Obr. 75. Profil drsnosti u obrábění konkávní plochy AW 5083	95
Obr. 76. Profil drsnosti u obrábění konvexní plochy AW 5083	95
Obr. 77. Profil drsnosti u obrábění konkávní plochy Necuronu 651	95
Obr. 78. Profil drsnosti u obrábění konvexní plochy Necuronu 651	96
Obr. 79. Profil drsnosti při použití $D=6\text{mm}$ a $a_e=5\%D$ u obrábění konkávní plochy	97
Obr. 80. Profil drsnosti při použití $D=6\text{mm}$ a $a_e=5\%D$ u obrábění konvexní plochy	98
Obr. 81. Profil drsnosti při použití $D=6\text{mm}$ a $a_e=10\%D$ u obrábění konkávní plochy	98
Obr. 82. Profil drsnosti při použití $D=6\text{mm}$ a $a_e=10\%D$ u obrábění konvexní plochy	98
Obr. 83. Profil drsnosti při použití $D=6\text{mm}$ a $a_e=15\%D$ u obrábění konkávní plochy	98
Obr. 84. Profil drsnosti při použití $D=6\text{mm}$ a $a_e=15\%D$ u obrábění konvexní plochy	98
Obr. 85. Profil drsnosti při použití $D=6\text{mm}$ a $a_e=20\%D$ u obrábění konkávní plochy	99
Obr. 86. Profil drsnosti při použití $D=6\text{mm}$ a $a_e=20\%D$ u obrábění konvexní plochy	99
Obr. 87. Profil drsnosti při použití $D=6\text{mm}$ a $a_e=25\%D$ u obrábění konkávní plochy	99
Obr. 88. Profil drsnosti při použití $D=6\text{mm}$ a $a_e=25\%D$ u obrábění konvexní plochy	99
Obr. 89. Profil drsnosti při použití $D=6\text{mm}$ a $a_e=30\%D$ u obrábění konkávní plochy	99
Obr. 90. Profil drsnosti při použití $D=6\text{mm}$ a $a_e=30\%D$ u obrábění konvexní plochy	100

Obr. 91. Konkávní plocha obrobena nástrojem o průměru $D=6\text{mm}$ a radiální hloubce řezu $a_e=25\%D$	100
Obr. 92. Detail konvexní plochy obrobena nástrojem o průměru $D=6\text{mm}$ a radiální hloubce řezu $a_e=25\%D$	101
Obr. 93. Detail skutečné obrobena plochy	101
Obr. 94. Konkávní plocha obrobena nástrojem o průměru $D=6\text{mm}$ a $a_e=10, 20$ a $30\%D$	102

SEZNAM TABULEK

Tab. 1. Hodnoty úhlů čela a hřbetu frézy při obrábění různých materiálů.....	17
Tab. 2. Řezné podmínky pro hrubování	57
Tab. 3. Parametry CNC frézky.....	60
Tab. 4. Vlastnosti Necuronu 651.....	61
Tab. 5. Vlastnosti AW 5083.....	62
Tab. 6. Hodnoty Ra pro různé průměry nástroje D.....	76
Tab. 7. Hodnoty Rz pro různé průměry nástroje D.....	76
Tab. 8. Hodnoty Rsm pro různé průměry nástroje D.....	77
Tab. 9. Hodnoty Ra pro různé průměry nástroje D a různé šířky záběru a_e u konkávní plochy.....	79
Tab. 10. Hodnoty Ra pro různé průměry nástroje D a různé šířky záběru a_e u konvexní plochy.....	79
Tab. 11. Hodnoty Rz pro různé průměry nástroje D a různé šířky záběru a_e u konkávní plochy.....	79
Tab. 12. Hodnoty Rz pro různé průměry nástroje D a různé šířky záběru a_e u konvexní plochy.....	80
Tab. 13. Hodnoty Rsm pro různé průměry nástroje D a různé šířky záběru a_e u konkávní plochy.....	80
Tab. 14. Hodnoty Rsm pro různé průměry nástroje D a různé šířky záběru a_e u konvexní plochy.....	80
Tab. 15. Hodnoty Ra, Rz a Rsm pro různé použité velikosti a_e u konkávní plochy.....	85
Tab. 16. Hodnoty Ra, Rz a Rsm pro různé použité velikosti a_e u konvexní plochy.....	86

Tab. 17. Hodnoty Ra, Rz a Rsm pro různé nastavení parametru SH u konkávní plochy.....	91
Tab. 18. Hodnoty Ra, Rz a Rsm pro různé nastavení parametru SH u konvexní plochy.....	91
Tab. 19. Hodnoty Rz pro různé nastavení parametru SH u konkávní plochy.....	93
Tab. 20. Hodnoty Rz pro různé nastavení parametru SH u konvexní plochy.....	93
Tab. 21. Hodnoty Ra a Rz u konkávní plochy u Necuronu a AW 5083.....	96
Tab. 22. Hodnoty Ra a Rz u konvexní plochy u Necuronu a AW 5083.....	96
Tab. 23. Strojní časy pro $D=3\text{mm}$ u konkávní plochy.....	97

SEZNAM PŘÍLOH

Na CD nosiči jsou přílohy:

Adresář:

přílohy DP/CAM Express – obráběcí programy pro jednotlivé použité nástroje a řezné podmínky

přílohy DP/model součásti/R30.model – model obráběné součásti

přílohy DP/výkres součásti/součást výkres.dwg – výkres obráběné součásti

přílohy DP/zpracovaná data/Excel/drsnost_máčala.xls – tabulky a grafy zhotovené v programu Microsoft Excel

přílohy DP/zpracovaná data/Minitab/boxplotové grafy.doc – krabicové grafy zhotovené v programu Minitab

přílohy DP/zpracovaná data/Minitab/odlehle hodnoty+časový vývoj dat.doc – grafy odlehle hodnot a časového vývoje dat zhotovené v programu Minitab