

# Vliv řezných podmínek na kvalitu povrchu obrobek- né plochy u CNC frézování

Bc. Michal Martinek

---

Diplomová práce  
2012



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2011/2012

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Michal MARTINEK**

Osobní číslo: **T100105**

Studijní program: **N 3909 Procesní inženýrství**

Studijní obor: **Výrobní inženýrství**

Téma práce: **Vliv řezných podmínek na kvalitu povrchu obrobené plochy u CNC frézování**

Zásady pro vypracování:

1. Vypracujte literární studii na dané téma
2. Proveďte návrh a přípravu zkušebních vzorků
3. Vytvořte NC programy a proveďte frézování na modelu
4. Proveďte měření výstupních parametrů řezného procesu
5. Vyhodnoťte výsledky měření

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

**Dle doporučení vedoucího diplomové práce.**

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

Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce: **13. února 2012**

Termín odevzdání diplomové práce: **18. května 2012**

Ve Zlíně dne 2. února 2012

  
doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.  
děkan



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

## 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 <sup>1)</sup>;
- 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 <sup>2)</sup>;
- beru na vědomí, že podle § 60 <sup>3)</sup> 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 <sup>3)</sup> 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 1.5.2012 .....

 .....

<sup>2)</sup> 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.

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

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

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

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

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

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

## **ABSTRAKT**

Cílem diplomové práce je nejprve vymežit teoretickou koncepci frézování a následně prakticky frézování aplikovat. Teoretická část je zaměřena obecně na frézování a na frézování s pomocí číslicově řízenými stroji. Dále je uvedena problematika týkající se vyhodnocování struktury povrchu. Praktická část je zaměřena na vytvoření modelu, zvolení obráběcího nástroje s řeznými podmínkami, určení obráběcí strategie a následném obrábění na CNC stroji. Následovalo změření a statistické vyhodnocení drsnosti obrobené plochy.

Klíčová slova: Frézování, frézky, frézy, CNC frézování, drsnost povrchu.

## **ABSTRACT**

The aim of the thesis is to first determine the theoretical concept of milling and then practically apply milling. The theoretical part is generally focused on milling and milling with numerically controlled machines. Furthermore, given issues related to evaluating the structure of the surface. The practical part is focused on creating a model, select the cutting tool with cutting conditions, the determination of machining strategies and subsequent machining on a CNC machine. Followed by measurement and statistical evaluation of the roughness of the machined surface.

Keywords: Milling, milling machine, mills, CNC milling, surface roughness.

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Ondřeji Bílkovi Ph.D. za odborné vedení, cenné rady a soustavnou pozornost, kterou mi při vypracování diplomové práce věnoval.

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

Ve Zlíně

.....  
Podpis diplomanta

# OBSAH

<b>ÚVOD</b> .....	<b>11</b>
<b>I. TEORETICKÁ ČÁST</b> .....	<b>12</b>
<b>1 OBRÁBĚNÍ</b> .....	<b>13</b>
<b>2 FRÉZOVÁNÍ</b> .....	<b>14</b>
2.1    PODSTATA METODY.....	14
2.1.1    Kinematika obráběcího procesu.....	15
2.1.2    Průřez třísky .....	16
2.1.3    Řezné síly .....	17
2.1.4    Řezné podmínky.....	17
2.2    NÁSTROJE .....	18
2.2.1    Úhly nástroje .....	20
2.2.2    Nástrojové materiály .....	22
2.2.3    Ostření fréz.....	24
2.3    STROJE .....	25
2.3.1    Konzolové frézky .....	25
2.3.2    Rovinné frézky .....	27
2.3.3    Stolové frézky .....	27
2.4    UPÍNÁNÍ NÁSTROJŮ A OBROBKŮ .....	28
<b>3 AUTOMATIZACE</b> .....	<b>29</b>
3.1    ČÍSLICOVĚ ŘÍZENÉ OBRÁBĚCÍ STROJE .....	29
3.1.1    CNC Stroje .....	30
3.2    DRUHY ŘÍZENÍ ČÍSLICOVÝCH STROJŮ .....	31
3.2.1    Podle způsobu řízení dráhy nástroje .....	31
3.2.2    Podle způsobu programování .....	33
3.3    STAVBA CNC PROGRAMU .....	34
3.3.1    Podprogramy a cykly .....	35
3.4    SOUŘADNÝ SYSTÉM STROJE .....	35
3.4.1    Vztažné body.....	37
3.4.2    Určení nulového bodu obrobku.....	38
3.5    CAM SYSTÉMY .....	41
3.5.1    Rozdělení CAM systémů .....	42
3.5.2    Klasifikace drah nástroje v CAM.....	43
3.5.3    Postprocesor .....	47
<b>4 STRUKTURA POVRCHU</b> .....	<b>48</b>
4.1    PROFIL NEROVNOSTI POVRCHU.....	48
4.2    FILTRY PROFILU .....	49
4.3    PARAMETRY STRUKTURY POVRCHU .....	51
4.3.1    Výškové parametry .....	51
4.3.2    Délkové (šířkové) parametry.....	53
4.3.3    Tvarové parametry .....	54
4.3.4    Křivky a odpovídající parametry .....	54



4.4	PRAVIDLA PRO HODNOCENÍ STRUKTURY POVRCHU .....	55
4.4.1	Uplatnění „pravidla 16 %“ .....	55
4.4.2	Uplatnění „pravidla maxima“ .....	55
4.5	OZNAČOVÁNÍ STRUKTURY POVRCHU V TECHNICKÉ DOKUMENTACI .....	55
4.6	MĚŘIDLA PRO MĚŘENÍ DRSNOSTI POVRCHU .....	56
4.6.1	Měřidla dotyková .....	56
4.6.2	Měřidla bezdotyková .....	57
<b>II.</b>	<b>PRAKTICKÁ ČÁST .....</b>	<b>59</b>
<b>5</b>	<b>EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST .....</b>	<b>60</b>
5.1	OBRÁBĚCÍ STROJ .....	60
5.2	OBRÁBĚCÍ NÁSTROJ .....	61
5.2.1	Upínání nástroje .....	62
5.3	ŘEZNÉ PODMÍNKY .....	63
5.4	GEOMETRIE OBROBKU .....	64
5.5	MATERIÁL OBROBKU .....	65
5.6	OBRÁBĚCÍ STRATEGIE .....	65
5.6.1	Hrubovací strategie .....	66
5.6.2	Strategie 3D Offset .....	66
5.6.3	Strategie Konstant Z .....	67
5.7	MĚŘICÍ PŘÍSTROJ PRO URČOVÁNÍ DRSNOSTI .....	69
<b>6</b>	<b>NAMĚŘENÁ DATA .....</b>	<b>71</b>
6.1	VYHODNOCOVANÉ VELIČINY .....	71
6.2	ZPRACOVÁNÍ NAMĚŘENÝCH DAT .....	71
6.3	STATISTICKÉ VYHODNOCENÍ NAMĚŘENÝCH DAT .....	72
6.3.1	Statistická interpretace hodnot parametru drsnosti Ra pro strategii 3D Offset a nástroj OK .....	72
6.3.2	Statistická interpretace hodnot parametru drsnosti Ra pro strategii Konstant Z a nástroj OK .....	73
6.3.3	Statistická interpretace hodnot parametru drsnosti Ra pro strategii 3D Offset a nástroj KK .....	74
6.3.4	Statistická interpretace hodnot parametru drsnosti Ra pro strategii Konstant Z a nástroj KK .....	75
6.3.5	Statistická interpretace hodnot parametru drsnosti Rz pro strategii 3D Offset a nástroj OK .....	76
6.3.6	Statistická interpretace hodnot parametru drsnosti Rz pro strategii Konstant Z a nástroj OK .....	76
6.3.7	Statistická interpretace hodnot parametru drsnosti Rz pro strategii 3D Offset a nástroj KK .....	77
6.3.8	Statistická interpretace hodnot parametru drsnosti Rz pro strategii Konstant Z a nástroj KK .....	78

6.4	VLIV KROKU DO BOKU NA PARAMETRY DRSNOSTI POVRCHU.....	79
6.5	VLIV POSUVU NA ZUB NA PARAMETRY DRSNOSTI POVRCHU .....	84
6.6	VLIV NÁSTROJE NA PARAMETRY DRSNOSTI POVRCHU .....	90
6.7	VLIV OBRÁBĚCÍ STRATEGIE NA PARAMETRY DRSNOSTI POVRCHU .....	96
6.8	POROVNÁNÍ OBRÁBĚCÍCH ČASŮ .....	101
6.8.1	Porovnání obráběcích časů pro strategii 3D Offset.....	101
6.8.2	Porovnání obráběcích časů pro strategii Konstant Z.....	103
<b>7</b>	<b>DISKUZE VÝSLEDKŮ.....</b>	<b>105</b>
	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>108</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....</b>	<b>110</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....</b>	<b>113</b>
	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>116</b>
	<b>SEZNAM TABULEK.....</b>	<b>119</b>
	<b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>	<b>120</b>

## ÚVOD

Počátky technologie spadají do doby před více než dvěma miliony lety, kdy člověk zručný vyrobil první kamenný nástroj. Následně výrobu kamenných nástrojů zdokonalil až homo sapiens. Používal technologie přitlukání, otlukání, odbíjení apod. Po celá staletí člověk vyráběl předměty výhradně ručně, což mělo za následek zdokonalování ručních nástrojů. Základními technologiemi bylo kování a lití. Pro opracování se používaly kladiva, kleště, vrtáky, sekery, pilníky apod.

Samozřejmostí je, že si člověk chtěl ulehčit práci a proto vymýšlel a stavěl různé obráběcí stroje. Jejich konstrukci a návrhu se věnoval i všestranný umělec, vědec a technik Leonardo da Vinci. V jeho pozůstalosti se našlo více než 5000 listů, z nichž většina je věnována konstrukcím různých mechanismů a strojů, kde například navrhl vrtačku, frézku, zdokonalil soustruh apod.

Systematický vývoj obráběcích strojů se datuje až od počátku 18. století. Vyvolaly jej zejména požadavky na přesnost a jakost práce, ale i požadavky na zvyšování počtu vyrobených součástí. S rostoucími se požadavky na přesnost rozměru, jakosti povrchu a především výkonu obrábění dochází k vývoji technologií, jako je frézování, vyvrtávání, výroba přesných závitů, výroba ozubených kol apod. Samozřejmě dochází i k vývoji automaticky pracujících obráběcích strojů. V současnosti obrábění tvoří asi 40 % průmyslové výroby, přičemž technologie tváření zaujímá 30 % a zbylých 30 % je zastoupeno technologií slévání.

V dnešní době si už těžko dovedeme představit moderní výrobní zařízení bez elektroniky a bez podpory počítačových systémů. K nejznámějším a nejpoblárnějším počítačem podporovaných systémům patří CAD a CAM systémy. Tyto systémy představují důležitý nástroj pro zvyšování přesnosti rozměrů, zlepšování jakosti povrchu a především zvyšování výkonu obrábění a snižování nákladů na výrobu ve strojírenském podniku.

Teoretická část je zaměřena obecně na frézování, kde zde můžeme nalézt kapitoly zabývající se podstatě metody, frézovací nástroje a stroje apod. Dále zde můžeme nalézt frézování s pomocí číslicově řízenými stroji a problematika týkající se vyhodnocování struktury povrchu, kde jsou uvedeny základní parametry struktury povrchu, pravidla pro hodnocení povrchu a označování hodnot na technické dokumentaci.

## **I. TEORETICKÁ ČÁST**

## 1 OBRÁBĚNÍ

Výrobky, které jsou zhotoveny ve slévárnách, lisovnách, kovárnách, válcovnách aj. mají většinou jen přibližný tvar. Pro dosažení přesných rozměrů, tvarů a hladkého povrchu se obrábějí.

Obrábět, neboli odebrat přebytečný materiál ve formě třísky, můžeme ručně nebo strojně. Přestože je dnes snahou namáhavé ruční obrábění nahradit strojním obráběním, nelze ruční obrábění z výrobního procesu úplně vyloučit. Ruční obrábění kromě fyzické síly vyžaduje celkovou manuální zručnost. Patří zde například montážní, údržbářské a opravárenské práce. Strojní obrábění patří mezi nejpoužívanější způsoby výroby přesných součástí.

Obrábění se uskutečňuje v soustavě stroj – nástroj – obrobek. Obrobkem nazýváme již částečně obrobený předmět. Předmět, který se bude teprve obrábět, nazýváme polotovarem a předmět, který je již obroben, nazýváme výrobkem. Na obrobku rozeznáváme plochu obráběnou, plochu řeznou a plochu obrobenou. Plochu, kterou budeme obrábět, nazýváme obráběnou plochou. Řezná plocha je těsně za nástrojem a obrobená plocha je plocha, která nám vznikne obráběním.

Důležitým prvkem obráběcí soustavy je nástroj. Nástroj je předmět, pomocí kterého se uskutečňuje obrábění. Nástroj se skládá z činné části, neboli z řezné části a stopky, která nám slouží jako upínací prvek a která má podle druhu nástroje různé tvary. Břit je činnou částí nástroje. Většinou má tvar klínu, který je ohraničený plochou čela a plochou hlavního a vedlejšího hřbetu. Průsečnicí hřbetu a čela je ostří, které vniká do materiálu a tím vzniká tříška. Vhodnou volbou úhlů ovlivňujeme obrábění, jako například velikost řezných sil, drsnost a přesnost obrobené plochy, trvanlivost ostří a ekonomii obrábění.

U obrábění jsou důležité dva základní pohyby. Máme pohyb hlavní, jehož rychlost nazýváme řeznou rychlostí a dále máme pohyb vedlejší, neboli posuv a přísuv. Hlavní pohyb vede nástroj do řezu, pomocí kterého se odděluje z materiálu tříška. Tento pohyb vykonává nástroj nebo obrobek a může být buď rotační, nebo přímočarý. Vedlejší pohyb nástroje nebo obrobku nebo společný pohyb umožňuje spolu s hlavním pohybem opakované odebrání třísky. Může být buď plynulý, nebo přerušovaný. [2,5]

## 2 FRÉZOVÁNÍ

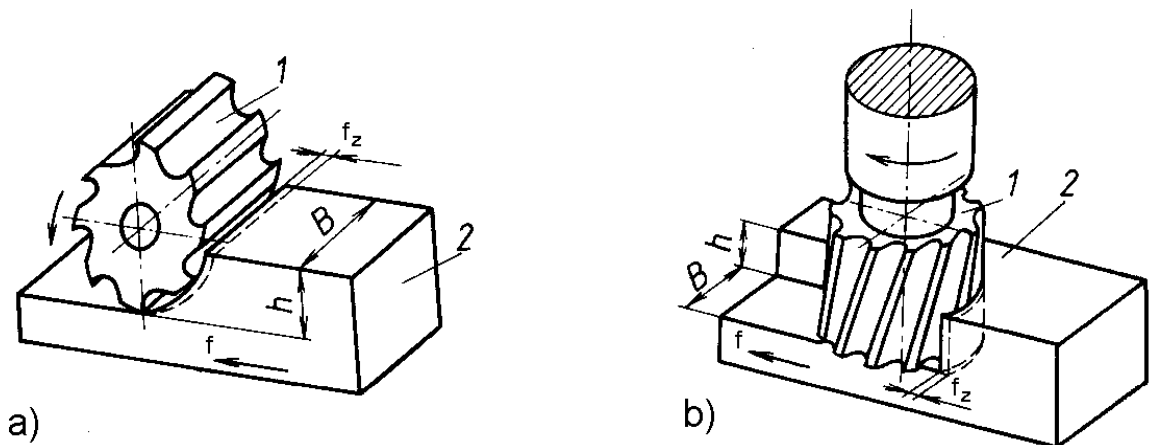
Frézování je obrábění rovinných, nebo tvarových ploch, vnějších nebo vnitřních, vícebřitým nástrojem. První stroje na frézování byly zkonstruovány začátkem 18. století a dnešní podobu dostaly koncem 19. století. Frézky jsou velmi výkonné stroje a v průmyslu jsou druhými nejrozšířenějšími stroji po soustruzích. Frézují se většinou rovinné plochy nebo tvarové přímkové plochy. CNC stroje umožňují frézovat obecné tvarové plochy.

### 2.1 Podstata metody

Nástrojem je fréza, která je obvykle vícebřitá. Z hlediska chvění je výhodné, aby v záběru s obrobkem bylo více břitů současně. Nástroj při frézování koná hlavní řezný pohyb (otáčivý) a obrobek koná pohyb posuvný obvykle přímočarý, někdy otáčivý, nebo obecný pohyb po prostorové křivce.

Řezný proces je přerušovaný. Jednotlivé zuby nástroje vcházejí a vycházejí ze součásti a odebírají třísku proměnného průřezu. Rozoznáváme dva základní způsoby frézování. Frézování obvodem válcové frézy a frézování čelem čelní frézy. [8]

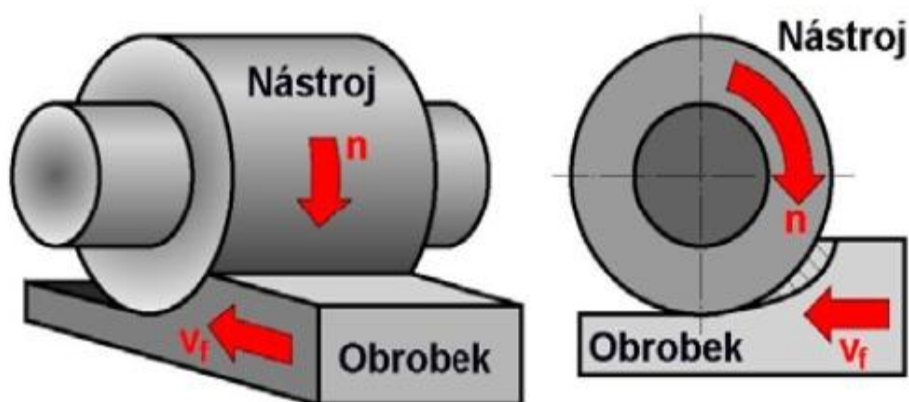
Na obrázku 1a je zobrazeno frézování obvodem válcové frézy a na obrázku 1b je zobrazeno frézování čelem čelní frézy. Kde 1 označuje nástroj, 2 obrobek,  $h$  je hloubka záběru a  $B$  je šířka záběru.



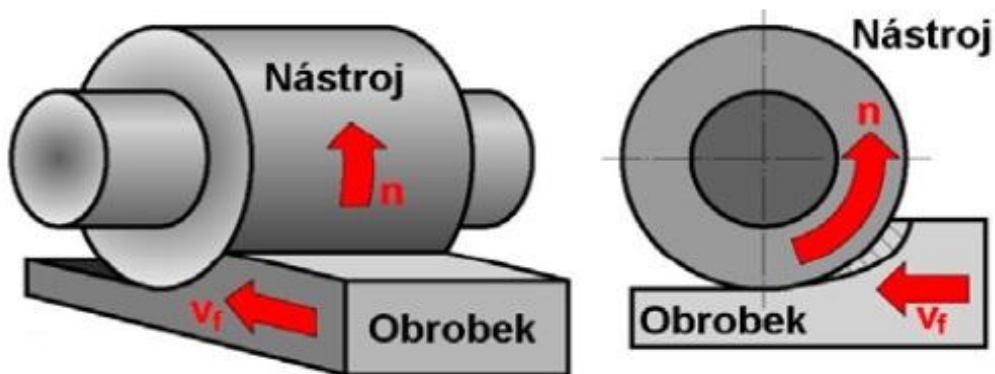
Obr. 1. Frézování válcové (obvodové) a čelní [8]

### 2.1.1 Kinematika obráběcího procesu

Frézování obvodem frézy neboli válcové frézování se převážně uplatňuje při práci s válcovými a tvarovými frézami. Zuby frézy jsou pouze po obvodu nástroje. Hloubka odebírané vrstvy se nastavuje kolmo na osu frézy a na směr posuvu. Osa otáčení frézy je rovnoběžná s obrobenou plochou. V závislosti na kinematice obráběcího procesu rozlišujeme frézování sousledné (souměrné) a nesousledné (protisměrné). Na obrázku 2 je zobrazeno sousledné frézování a na obrázku 3 je zobrazeno nesousledné frézování. [6]



Obr. 2. Frézování sousledné [23]



Obr. 3. Frézování nesousledné [23]

Sousledné frézování má smysl otáčení nástroje ve směru posuvu obrobku. Maximální tloušťka třísky vzniká při vnikání zubu nástroje do obrobku. Obrobená plocha se vytváří tehdy, kdy zub vychází ze záběru. Řezné síly působí většinou směrem dolů. Sousledné frézování se může provádět pouze na přizpůsobeném stroji při vymezené vůli a předpětí mezi posuvovým šroubem a maticí stolu frézky. V opačném případě vůle způsobuje nestejný pohyb a může dojít k poškození nástroje i stroje.

Mezi vlastnosti sousledného frézování patří:

- vyšší trvanlivost břitů (umožňuje použití vyšších řezných rychlostí a posuvů),
- potřebný menší řezný výkon,
- řezná síla přitlačuje obrobek ke stolu (lze použít jednodušší upínací komponenty),
- menší sklon ke chvění,
- menší drsnost povrchu obrobeneé plochy. [6]

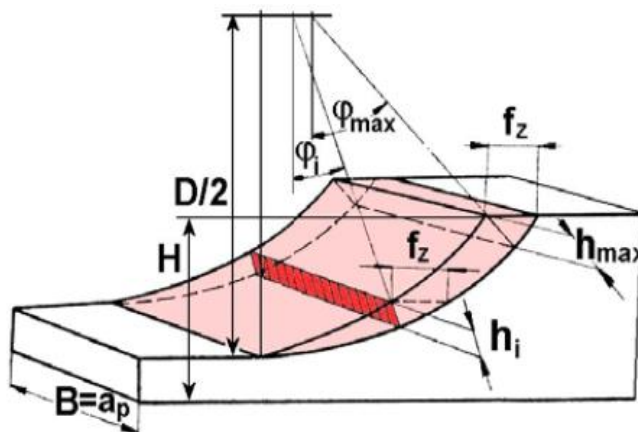
Nesousledné frézování má smysl otáčení nástroje proti směru posuvu obrobku. Tloušťka třísky se postupně zvětšuje od nulové hodnoty až po maximální hodnotu. K oddělování třísky nedochází v okamžiku její nulové tloušťky, ale po určitém skluzu břitu po ploše, kterou vytvořil předcházející zub. Přitom vznikají silové účinky a deformace způsobující zvýšené opotřebení břitu nástroje. Řezná síla při nesousledném frézování má složku, která působí směrem nahoru a odtahuje obrobek od stolu.

Mezi vlastnosti nesousledného frézování patří:

- trvanlivost nástroje není závislá na okujích, písčitém povrchu obrobku apod.,
- menší opotřebení matice a šroubu,
- není potřeba vymezování vůle mezi posuvovým šroubem a maticí stolu stroje. [6]

### 2.1.2 Průřez třísky

Tloušťka odřezávané třísky se při válcovém sousledném frézování mění od maximální hodnoty po nulu a při nesousledném frézování se mění od nuly po maximální hodnotu. Průřez třísky je zobrazen na obrázku 4, kde  $f_z$  je posuv na zub,  $D/2$  je polovina průměru nástroje,  $H$  je výška součásti,  $h_i$  je tloušťka třísky v dané fázi,  $B$  je šířka záběru a  $\varphi_i$  je úhel posuvového pohybu v dané fázi.



Obr. 4. Průřez třísky [25]



Jmenovitá tloušťka třísky v libovolné fázi jejího odřezávání se vyjádří vztahem:

$$h_i = f_z \cdot \sin \varphi_i, \quad (1)$$

kde:  $h_i$  – tloušťka třísky [mm],

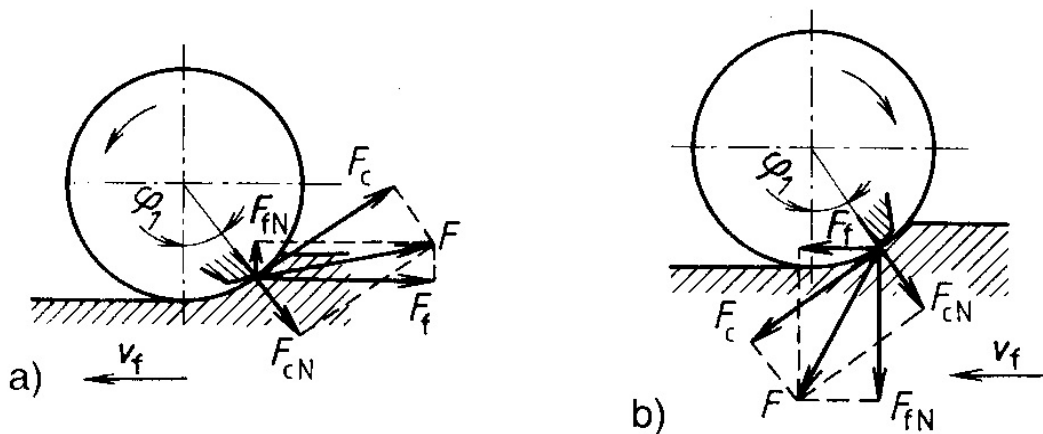
$f_z$  – posuv na zub [mm],

$\varphi_i$  – úhel posuvového pohybu [°].

Úhel posuvového pohybu se mění nejen v závislosti na poloze řešeného zubu, ale u fréz se zuby ve šroubovici nebo šikmými zuby také podél příslušného ostří. [6]

### 2.1.3 Řezné síly

Při specifikaci řezných sil vycházíme ze silových poměrů na jednom břitu, který se nachází v poloze určené úhlem  $\varphi_i$ . Na obrázku 5a jsou zobrazeny řezné síly pro nesousledné frézování a na obrázku 5b jsou zobrazeny řezné síly pro sousledné frézování. Pro obvodové (válcové) frézování nástrojem s přímými zuby se celková řezná síla působící na břitu  $F$  rozkládá na složky  $F_c$  a  $F_{cN}$ , respektive na složky  $F_f$  a  $F_{fN}$ , kde složka  $F_c$  je řezná síla,  $F_{cN}$  je kolmá řezná síla,  $F_f$  je posuvová síla a  $F_{fN}$  je kolmá posuvová síla. [6]



Obr. 5. Řezné síly [8]

### 2.1.4 Řezné podmínky

Volba řezných podmínek je závislá na vlastnostech nástroje, stroje, obrobku i prostředí a na požadovaných parametrech frézovaných ploch obrobku. Je proto vhodné se řídit doporučenými hodnotami výrobce nástrojů.

Posuv na zub by neměl klesnout pod 0,05 mm, protože pak se již začíná projevovat vliv poloměru ostří břítu nástroje. Toto platí zejména u nástrojů s břity, které jsou z povlakovaných slinutých karbidů. [8]

Velikost obvodové rychlosti frézy neboli řeznou rychlost spočítáme:

$$v_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000}, \quad (2)$$

kde:  $v_c$  – řezná rychlost [m/min],

$n$  – otáčky vřetene [1/min],

$D$  – průměr nástroje [mm],

$\pi$  – Ludolfovo číslo.

Hodnotu posuvu na zub spočítáme:

$$f_z = \frac{v_f}{z \cdot n}, \quad (3)$$

kde:  $f_z$  – posuv na zub [mm],

$n$  – otáčky vřetene [1/min],

$z$  – počet zubů,

$v_f$  – posuvová rychlost [mm/min].

Posuv na otáčku představuje dráhu, kterou urazí obrobek za jednu otáčku frézy, a spočítáme jej následovně:

$$f_o = f_z \cdot z, \quad (4)$$

kde:  $f_o$  – posuv na otáčku [mm],

$f_z$  – posuv na zub [mm],

$z$  – počet zubů. [8]

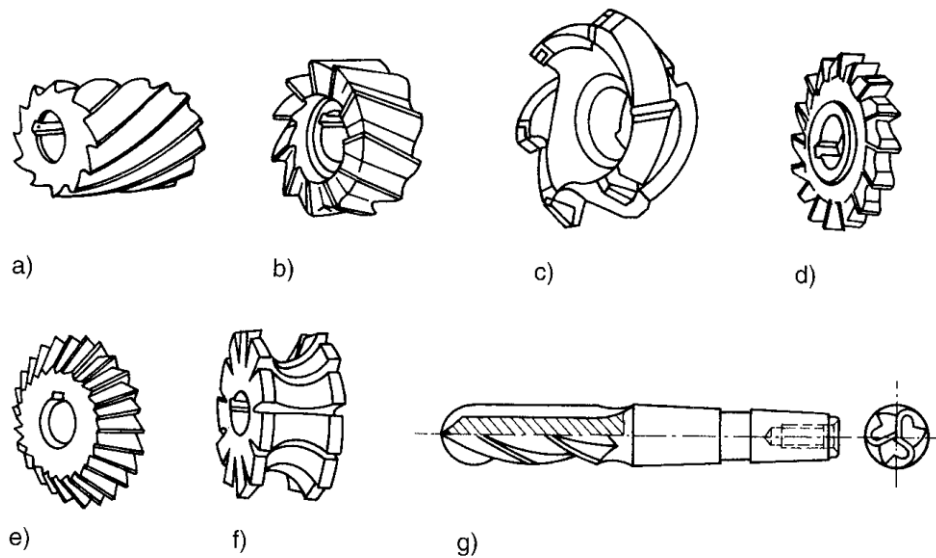
## 2.2 Nástroje

Frézy je možné dělit z mnoha hledisek. Zejména podle umístění břitů, tvaru zubů, průběhu ostří, upínání a konstrukce.

Podle umístění břitu fréz se frézy dělí:

- válcové (s břity na válcové ploše),
- čelní (s břity na válcové a čelní ploše),
- kotoučové (s břity na válcové a obou čelních plochách),
- kuželové (s břity na jedné nebo dvou kuželových plochách),
- tvarové (s břity na tvarových plochách, např. frézy na závity). [8]

Na obrázku 6 jsou zobrazeny vybrané druhy fréz, kde nástroj s označením a je válcová fréza, b čelní fréza, c frézovací hlava, d kotoučová, e kuželová, f tvarová a g kopírovací (kulová) fréza.



Obr. 6. Vybrané druhy fréz [8]

Podle tvaru zubů jsou frézy:

- s frézovanými zuby (zubové mezery se frézují kuželovými frézami),
- s podsoustruženými zuby (hřbety zubů těchto fréz se obrábějí na podtáčecích soustruzích a mají tvar Archimédovy spirály).

Podle průběhu ostří zubů jsou frézy:

- s přímými zuby (mají zuby rovnoběžné s osou),
- se zuby do šroubovice (pravotočivé nebo levotočivé).

Podle upínání dělíme frézy:

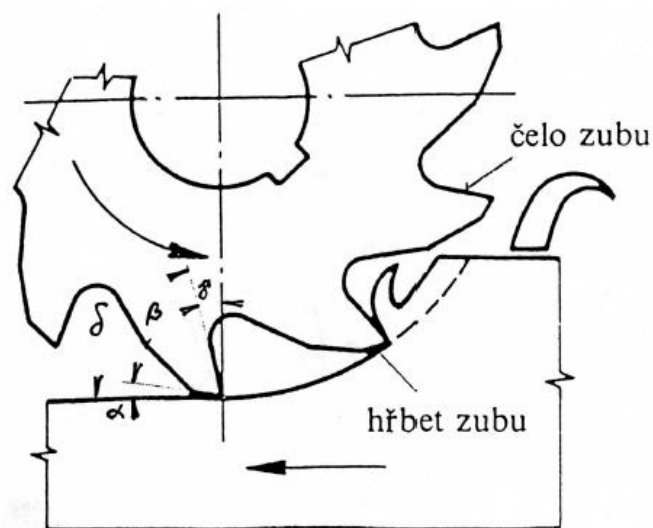
- stopkové (s kuželovou stopkou nebo s válcovou stopkou),
- nástrčné.

Podle konstrukce dělíme frézy:

- celistvé (monolitní),
- s vyměnitelnými břitovými destičkami,
- skládané (z více samostatných fréz). [8]

### 2.2.1 Úhly nástroje

Aby břit mohl odebírat třísku, musí k tomu být upraven. Každý zub má klínové provedení zakončené břitem, který je tvořen dvěma plochami, v jejichž průsečíku vznikne ostří, které má schopnost odebírat třísku. Těmito plochami jsou čelo a hřbet. Čím ostřejší klín břit má, tím jednodušeji vniká do obrobku. Vzájemná poloha ploch břitu nástroje a obrobku vytváří soustavu úhlů, které nazýváme geometrie břitu (obrázek 7). [16]



Obr. 7. Geometrie zuby frézy [16]

Na obrázku 7 jsou znázorněny následující typy úhlů:

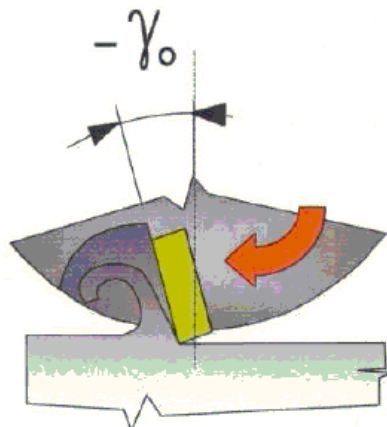
- a) Úhel hřbetu  $\alpha$  – je úhel svíraný mezi hřbetem zuby frézy a tečnou k obvodu nástroje (řeznou rovinou). Jeho úkolem je snižovat tření hřbetu zuby na obráběné ploše. Čím větší je jeho hodnota, tím je tření menší. Jeho velikost je však omezena, aby nedocházelo k zeslabování zuby a tím snižování jeho pevnosti.
- b) Úhel břitu  $\beta$  – je úhel svíraný plochou hřbetu a plochou čela. Čím menší je tento úhel, tím je snadnější vnikání břitu do materiálu. Jeho hodnota je omezena pevností břitu. Pro frézování málo pevných materiálů mívá menší hodnotu a naopak u tvrdých materiálů má hodnotu větší, aby snesl zatížení vyvolané velkým řezným odporem.

c) Úhel čela  $\gamma$  – úhel mezi plochou čela břitu a spojnicí špičky břitu se středem otáčení frézy. Usnadňuje tvoření třísky a vnikání břitu do obrobku. Jeho rostoucí hodnota zeslabuje celý břit frézy, proto je také jeho velikost omezena.

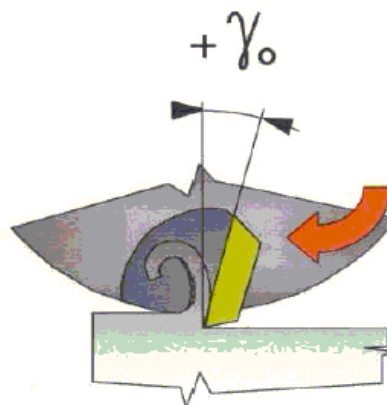
d) Úhel řezu  $\delta$  – úhel, který svírá plocha čela a tečna k obvodu frézy. Tento úhel je součtem úhlů břitu a hřbetu.

Dále na nástroji můžeme najít úhel nastavení  $\kappa$ , což je úhel mezi ostřím frézy a rovinou kolmou na osu jejího otáčení a úhel sklonu ostří  $\lambda$ , který svírá osa otáčení frézy a tečna k šroubovici břitu. Úhel sklonu ostří se vyskytuje u nástroje s břity šikmými, šroubovitými, střídavými a šípovými.

Podle úhlu čela rozeznáváme geometrii frézovacích nástrojů na geometrii pozitivní a negativní. Negativní geometrie (obrázek 8) je vhodná pro frézování ocelí, litin a těžko obrobitelných materiálů při větším zatížení břitu v hromadné výrobě. Pozitivní geometrie (obrázek 9) je vhodná pro ocelové a litinové součástky se sklonem ke chvění, pro součástky ze slitin hliníku a legované slitiny snadno vytvářející na čele břitu nárůstek. [16]



Obr. 8. Negativní geometrie [16]



Obr. 9. Pozitivní geometrie [16]

### 2.2.2 Nástrojové materiály

Průběh a výstupy řezného procesu významně závisí na vlastnostech řezné části nástroje, která je vyrobena z nástrojového materiálu. Mezi nástrojové materiály patří nástrojové oceli, slinuté karbidy, řezná keramika, cermety a supertvrdé materiály. K základním požadavkům k těmto materiálům patří jejich tvrdost, odolnost proti opotřebení, tepelná vodivost, pevnost v ohybu a houževnatost.

#### *Nástrojové oceli*

Nástrojové oceli rozdělujeme na nelegované a legované. U nelegovaných nástrojových ocelí má největší vliv obsah uhlíku. Se zvyšujícím se obsahem uhlíku se tvrdost zvyšuje. Pro strojní obrábění se používá jen výjimečně a jsou často nahrazovány legovanými nástrojovými oceli. [4,6]

U legovaných nástrojových ocelí jsou hlavní legující prvky karbidotvorný chrom, vanad, wolfram a molybden. Tyto prvky vytváří tvrdé a až do vysokých teplot stálé karbidy. Jsou více odolné proti otupení a mají dobrou prokalitelnost. Používají se pro jednoduché řezné nástroje, ale nejsou vhodné pro obrábění těžkoobrobitelných materiálů. [6,21]

Rychlořezné oceli patří do skupiny legovaných nástrojových ocelí, ale díky svým vlastnostem se uvádějí jako samostatná skupina. Obsahují karbidotvorné kovy wolfram, vanad, chrom a molybden a nekarbidotvorný kobalt. Uhlíku je zpravidla méně než 1 %. Díky svým vlastnostem jsou vhodné pro obrábění ocelí, ocelí na odlitky a těžkoobrobitelných materiálů. [4,6]

#### *Slinuté karbidy*

Slinuté karbidy jsou produktem práškové metalurgie. Vyrábí se z karbidu wolframu, karbidu titanu, karbidu tantalu a kovového pojiva, kde ve většině případů se používá kobalt. Slinuté karbidy předčí rychlořeznou ocel otěruvzdorností, ale jsou křehké a mají sklon k vydrolování ostří.

V technologické praxi se používají slinuté karbidy nepovlakované a slinuté karbidy opatřeny různými povlaky. Nepovlakované slinuté karbidy se člení v závislosti na svém složení a oblasti použití do skupin typu P, M a K.

Od řezných nástrojů ze slinutého karbidu se vyžaduje, aby vykazovaly co největší otěruvzdornost a současně i velkou houževnatost. Tomuto požadavku vyhovují nástroje ze

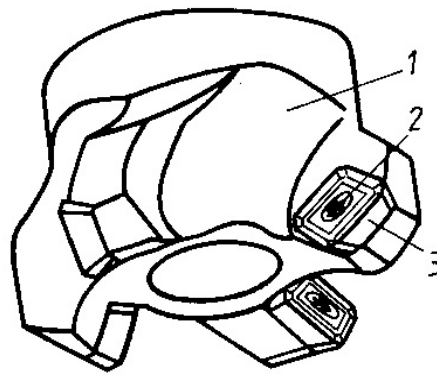
slinutého karbidu s tvrdými povlaky karbidu titanu, nitridu titanu nebo oxidu hlinitého. Povlaky mohou být jednovrstvé nebo vícevrstvé. [6]

### *Cermety*

Cermet je řezný materiál obsahující tvrdé částice v kovovém pojivu, který je vyráběn práškovou metalurgií. Tvrdost cermetů je přibližně srovnatelná se slinutými karbidy, ale houževnatost a pevnost je nižší. Cermety špatně snášejí teplotní šoky a tím je omezeno použití řezné kapaliny. Nástroje osazené cermety jsou vhodné pro obrábění ocelí, litin, lité oceli a snadno obrobitelných slitin.

### *Řezná keramika*

Keramické řezné materiály jsou tvrdé, mají vysokou tvrdost za tepla a nereagují chemicky s materiálem obrobku. Zaručují vysokou trvanlivost bříty a mohou být použity při řezných rychlostech od 300 do 1600 m/min. Řezná keramika se vyrábí ve tvaru destiček, které jsou mechanicky upínané na řeznou část nástroje. Na obrázku 10 je zobrazen příklad upnutí vyměnitelné destičky, kde 1 představuje těleso nástroje, 2 šroub a 3 vyměnitelnou destičku. [7]



Obr. 10. Příklady upnutí vyměnitelné destičky [8]

### *Supertvrdé řezné materiály*

Do skupiny supertvrдых řezných materiálů zařazujeme polykrystalický diamant a polykrystalický kubický nitrid bóru. V jakém rozsahu bude možno použít těchto vývojových řezných materiálů ukáže nejbližší budoucnost. V současnosti hlavní nevýhodou je jejich vysoká pořizovací cena. Tyto materiály zařazujeme mezi nejtvrďší řezné materiály.

Nejtvrďším známým materiálem je přírodní diamant, jehož tvrdosti syntetický polykrystalický diamant téměř dosahuje. Jemné krystaly diamantu jsou spojovány slinováním za vy-

soké teploty a tlaku. Polykrystalický diamant je doporučen pro obrábění všech neželezných kovů a nekovových materiálů.

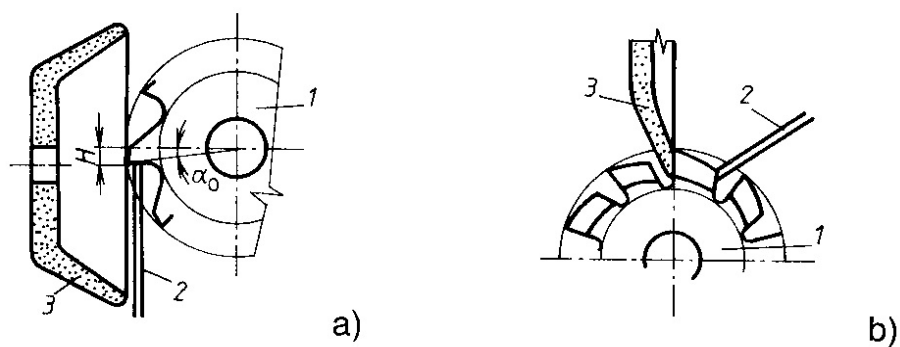
Polykrystalický kubický nitrid boru je zvláště tvrdý materiál, jehož tvrdost se blíží tvrdosti diamantu. Vyrábí se při vysokých teplotách a tlacích. Segmenty z PKNB tvoří řeznou část vyměnitelné destičky ze slinutého karbidu. Jsou však také dodávány jako monolitické vyměnitelné destičky z PKNB. [7]

### 2.2.3 Ostření fréz

Monolitní frézy a frézy s pájenými břity je třeba po otupení přestrojit. Pro ostření fréz z rychlořezných ocelí se používají buď klasické brousící kotouče z oxidu hlinitého, nebo nové kotouče z kubického nitridu boru. Pro ostření fréz ze slinutých karbidů se používají brousící kotouče z karbidu křemíku nebo z diamantu.

Frézy s frézovanými zuby se ostří na hřbetě zubu miskovým nebo hrncovým brousícím kotoučem. Zub se při tom opírá o opěrku, která je níže než osa nástroje. Výškou opěrky se nastaví velikost úhlu hřbetu. Při ostření se fréza posouvá ve směru osy podél stojící opěrky a zub se k opěrce přitlačuje. Tímto způsobem můžeme ostřit i zuby ve šroubovici.

Frézy s podsoustruženými zuby se ostří na čele zubu. Tímto se zachová tvar profilu frézy. Ostří se talířovým brousícím kotoučem, u přímých zubů plochou stranou (obrázek 11a) a u zubů do šroubovice kuželovou stranou kotouče (obrázek 11b). [8]



Obr. 11. Ostření fréz [8]



## 2.3 Stroje

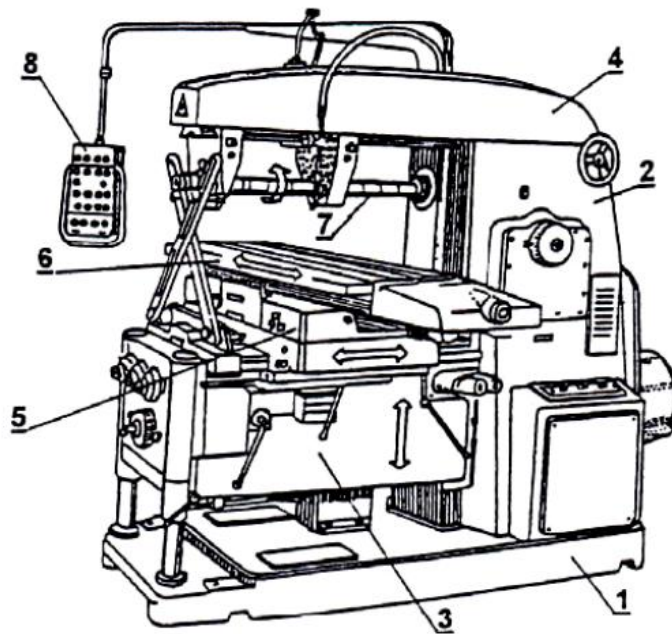
Frézovací stroje, nebo jak je nazýváme frézky, se vyrábějí a dodávají ve velkém počtu modelů a velikostí, často pak s rozsáhlým speciálním příslušenstvím. Frézky se zpravidla člení do čtyř základních skupin a to na frézky konzolové, stolové, rovinné a speciální. Z hlediska řízení pracovního cyklu lze frézky dělit na ovládané ručně a řízené programově.

Velikost frézky určuje upínací plocha stolu a velikost kužele ve vřetenu pro upnutí nástroje. Dalšími důležitými technickými parametry jsou maximální délky pohybu stolu nebo vřetene, rozsah otáček vřetene a rozsah posuvů, výkon elektromotoru pro otáčení vřetena a kvalitativní parametry dosahované u obroběných ploch. [8]

### 2.3.1 Konzolové frézky

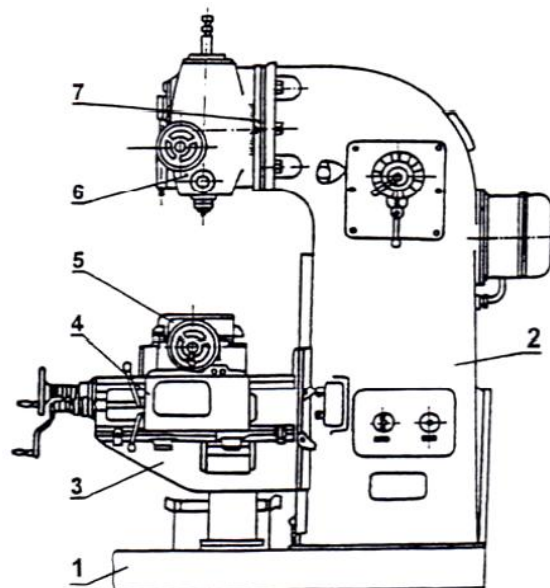
Konzolové frézky se používají nejčastěji. Mají konzolu posuvnou po vedení stojanu stroje. Po konzole se pohybuje pracovní stůl pro upínání obrobků. Konzola umožňuje svislý pohyb stolu. Stůl má příčný a podélný posuv. Všechny pohyby se uskutečňují pomocí šroubů a matic a umožňují pohyb obrobku ve třech osách. Pohon posuvu je nezávislý na otáčkách vřetene, protože je obvykle zajišťovaný samostatným motorem s převodovkou. Konzolové frézky mohou být vodorovné (horizontální), svislé (vertikální) a univerzální.

Vodorovné konzolové frézky mají vřeteno uložené horizontálně. Obrábějí se na nich především drážky kotoučovými nebo tvarovými frézami. Můžeme na nich obrábět i drážky nebo rovinné plochy stopkovými frézami upnutými do vřetene stroje. Na obrázku 12 je zobrazena vodorovná konzolová frézka, kde část označená 1 zobrazuje základnu, 2 stojan, 3 konzoli, 4 rameno, 5 příčný stůl, 6 podélný pracovní stůl, 7 vřeteno a 8 ovládací panel.



Obr. 12. Vodorovná konzolová frézka [21]

Svislé konzolové frézky mají vertikální vřeteno s osou kolmou na plochu pracovního stolu. Vřeteno je uložené ve svislé hlavě, která může být otočná kolem vodorovné osy a lze ji natočit obvykle o  $45^\circ$ . Na svislých frézkách se obrábějí zejména rovinné plochy a drážky čelními frézami a stopkovými frézami. Na obrázku 13 je zobrazena svislá konzolová frézka, kde část označená 1 zobrazuje základnu, 2 stojan, 3 konzoli, 4 příčný stůl, 5 podélný pracovní stůl, 6 naklápěcí vřeteník a 7 kruhovou základnu vřeteníku. [8]

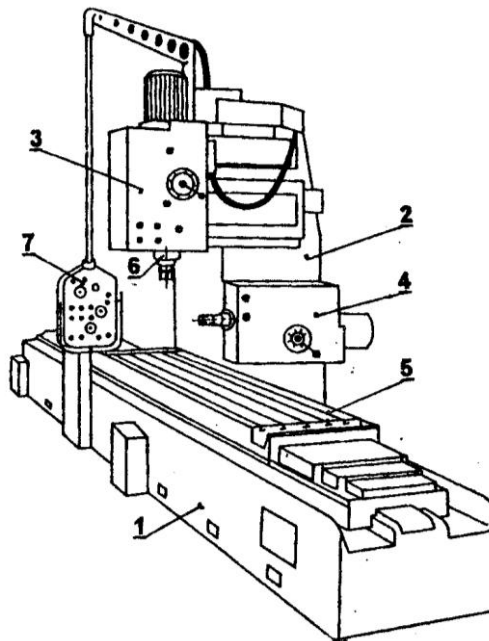


Obr. 13. Svislá konzolová frézka [21]

Univerzální konzolové frézky jsou obdobné konstrukce jako vodorovné konzolové frézky, avšak s tím rozdílem, že mají otočný pracovní stůl. Tato úprava umožňuje frézování šroubovic pomocí univerzálního dělicího přístroje.

### 2.3.2 Rovinné frézky

Rovinné frézky se od konzolových frézek liší tím, že pracovní stůl se pohybuje pouze v podélném směru po pevném loži. Po svislém stojanu frézky se pohybuje vřeteník. Příčně se pohybuje nástroj vysouváním pinoly z vřeteníku. Rovinné frézky se vyrábějí s jedním vřeteníkem nebo mohou mít druhý stojan s vřeteníkem na opačné straně pracovního stolu. Vřeteníky jsou na sobě nezávislé a také mají samostatný motor s převodovkou. Na obrázku 14 je zobrazena rovinná frézka se dvěma vřeteníky, kde část označená 1 zobrazuje lože, 2 stojan, 3 svislý vřeteník, 4 vodorovný vřeteník, 5 pracovní stůl, 6 vřeteno a 7 je ovládací panel. [8]

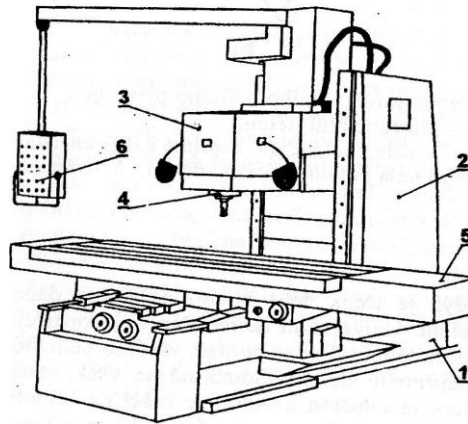


Obr. 14. Rovinná frézka [6]

### 2.3.3 Stolové frézky

Stolové frézky nemají konzolu a obvykle mívají podélný a příčný stůl. Pohyb ve svislém směru pro nastavení nástroje vzhledem k obrobku je zajištěn přemísťováním vřeteníku po vedení stroje. Na stolových frézkách můžeme kvalitně a produktivně obrábět rozměrnější a těžší součástky. Vyrábějí se v provedení svislém i vodorovném. Na obrázku 15 je zobraze-

na svislá stolová frézka, kde část označená 1 zobrazuje základnu, 2 je stojan, 3 je vřeteník, 4 je vřeteno, 5 je pracovní stůl, 6 je ovládací panel. [6]



Obr. 15. Svislá stolová frézka [6]

## 2.4 Upínání nástrojů a obrobků

Důležitou podmínkou kvalitního frézování je minimální radiální a axiální házení nástroje. To je u ostřených fréz dáno házením trnu a přesnostmi upnutí a ostření. U fréz s vyměnitelnými destičkami je to dáno nepřesnostmi upnutí a výrobními tolerancemi tělesa frézy a destiček. Radiální a axiální házení by se mělo pohybovat v setinách milimetrů. Upnutí nástroje musí zaručit maximální tuhost a minimální radiální a axiální házení.

Nástrčné frézy se upínají na trn. Trn je ukončen kuželem Morse nebo ISO, který přenáší točivý moment z vřetene třením a unášecími kameny. Točivý moment z upínacího trnu na frézu se přenáší perem nebo kameny. Frézy s válcovou stopkou se upínají do sklíčidla s upínací kleštinou. Frézy se stopkou Morse se upínají do vřetene přímo nebo pomocí redukce. Upnutí je jištěno šroubem, procházejícím vrtáním vřetene. Točivý moment se přenáší třením. Frézy s kuželovou stopkou ISO se upínají přímo nebo s redukcí do vřetene frézky a jistí se stejně jako frézy se stopkou Morse. Točivý moment se přenáší třením a unášecími kameny.

Obrobek se upíná na pracovní stůl frézky. Upínání obrobku musí být dostatečně tuhé, aby byla zaručena nehybnost obrobku a odolnost proti vzniku chvění. Obrobek ovšem nesmí být upínací silou deformován. K upínání se používají strojní svěráky, které mohou být ovládány ručně, pneumaticky nebo hydraulicky. Dále se používají upínky se šrouby a opěrkami, sklíčidla, jednoúčelové upínací přípravky anebo technologické palety. [8]

### 3 AUTOMATIZACE

Současný stav třískového obrábění a perspektivní trendy rozvoje ukazují, že obrábění zůstává a v budoucnosti strojírenské výroby určitě zůstane základní technologickou operací. Několik tisíciletí byla zaměřena výroba kovových součástí a nástrojů pouze na kování a odlévání. Teprve v 19. a 20. století došlo k rozvoji třískového obrábění, které zajišťuje podstatně vyšší přesnost výroby a tím i vyšší spolehlivost jednotlivých stavebních prvků strojů i jejich komponentů. V první polovině 20. století došlo v oblasti technologie obrábění k prudkému rozvoji sériové, velkosériové a hromadné výroby. V 60. letech se zejména vlivem vysokých požadavků leteckého a kosmického průmyslu na spolehlivost a přesnost obráběných součástí změnila požadavky na vývoj a konstrukci obráběcích strojů. Došlo poprvé k nasazení obráběcích strojů, u kterých byla posloupnost pracovních operací řízena číslicově zadanými informacemi. Ukázalo se, že číslicový řídicí systém a v pozdější době počítač je schopen podstatně rychleji dodávat informace potřebné k realizaci výrobního procesu než lidský činitel. Výsledkem byly první číslicově řízené obráběcí a tvářecí stroje.

#### 3.1 Číslicově řízené obráběcí stroje

Číslicově řízený obráběcí stroj je definován jako obráběcí stroj, u něhož je průběh pracovního procesu řízen výhradně číslicově vyjádřenými informacemi o dráze, směru a smyslu pohybu pracovních prvků, řezných podmínkách a pomocných funkcích. Tyto informace jsou zaznamenávány ve formě čísel, zakódovány a postupně předávány řídicímu systému stroje nosičem informací nebo prostřednictvím počítače.

Jedná se tedy o konstrukčně upravený obráběcí stroj doplněný o číslicový řídicí systém, který umí řídit dráhu nástroje vůči obrobku a nastavit technologické podmínky obrábění.

Číslicově řízené obráběcí stroje je možné z hlediska úrovně použité řídicí a automatizační techniky rozdělit do čtyř vývojových stupňů:

1. Vývojový stupeň – mechanická část stroje je totožná s konvenčním obráběcím strojem, pouze je doplněna řídicím systémem.
2. Vývojový stupeň – mechanická část stroje je upravena pro potřeby řídicího systému. Řídicí systémy jsou osazeny germaniovými a křemíkovými tranzistory. Začínají se uplatňovat integrované obvody.

3. Vývojový stupeň – více zdokonalená mechanická část obráběcího stroje. Možnost přímého řízení mikropočítačem. Mezi vnější znaky patří obrazovka, klávesnice, programová paměť, simulace procesu obrábění. Možnost napojení stroje do systému mezioperační dopravy obrobků a nástrojů. V řídicích systémech se již plně využívají integrované obvody a začínají se objevovat mikroprocesory.

4. Vývojový stupeň – zatím nejdokonalější typ obráběcích strojů s prvky adaptivního řízení procesu včetně aktivní rozměrové kontroly. V rámci tohoto vývojového stupně lze uvést rovněž CNC obráběcí centra, u kterých je možné při jednom upnutí obrobku provádět frézování, vrtání, vystružování a závitování. Použití lineárních motorů pro posun v souřadných osách zkracuje pracovní čas. [17]

### 3.1.1 CNC Stroje

CNC obráběcí stroje dnes existují prakticky ve všech oblastech obrábění, a proto se setkáváme s CNC frézky, soustruhy, vrtačkami, bruskami a také nekonvečními stroji pro obrábění.

Vývojové trendy CNC obráběcích strojů a zejména jejich řídicích systémů na počátku 21. století jsou výrazně poznamenány širokým použitím prvků průmyslové automatizace a razantním vstupem informačních technologií.

Konstrukce číslicově řízených strojů se liší od konvenčních strojů z důvodu požadované přesnosti tvaru, rozměru a požadované drsnosti povrchu a snadné obsluhy. Proto stroje mají charakteristické vlastnosti, mezi které patří vysoká tuhost a přesnost provedení, vysoce přesné vodící plochy s vysokou životností a možností výměny, stabilizace teploty, automatická výměna nástrojů, použití upínacích přípravků, automatický odvod třísek, pracovní prostor stroje je uzavřený.

Mezi hlavní součásti číslicově řízeného stroje patří:

- 1) Lože a vodící plochy – hlavními požadavky na konstrukci je vysoká tuhost, schopnost tlumit chvění, jednoduchost, snadná obsluha a dobrý odvod třísek.
- 2) Hlavní pohon – musí umožňovat takového počtu otáček, který odpovídá optimální řezné rychlosti. Nejčastěji se používají střídavé servopohony, případně stejnosměrné servopohony.
- 3) Vřeteník – ve vřeteníku je uložen převodový mechanismus a vřeteno s upínacím zařízením. U frézky se do vřetena upínají nástroje.

- 4) Suporty – tvoří montážní celek, který se skládá z podélného a příčného suportu. Jsou uloženy kluzně na vodících lištách nebo na valivém vedení. Pohyb je prováděn pomocí kuličkových šroubů.
- 5) Posuvové mechanismy – CNC řízení klade vysoké požadavky na pohon posuvů, který má zajistit maximální rychlost pohybu při přejezdech, programovanou rychlost pohybu při pracovních posuvech a přesné nastavení vzájemné polohy nástroje a obrobku.
- 6) Pohon posuvu – převádí příkazy od polohového diferenčního členu na pohyb nástroje nebo obrobku. Obecně se skládá z posuvového motoru, který přenáší kroutící moment na šroubový převod.
- 7) Posuvové kuličkové šrouby – na posuvový šroub jsou kladeny nároky na tuhost, přesnost a nízké pasivní odpory.

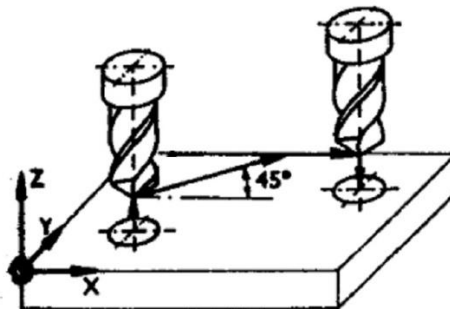
### 3.2 Druhy řízení číslicových strojů

Číslicově řídicí systémy jsou zařízení k automatickému řízení procesu obrábění, u kterých se informace vyskytují v číslicové formě. Dělení těchto systémů je možné provádět podle různých hledisek. [17]

#### 3.2.1 Podle způsobu řízení dráhy nástroje

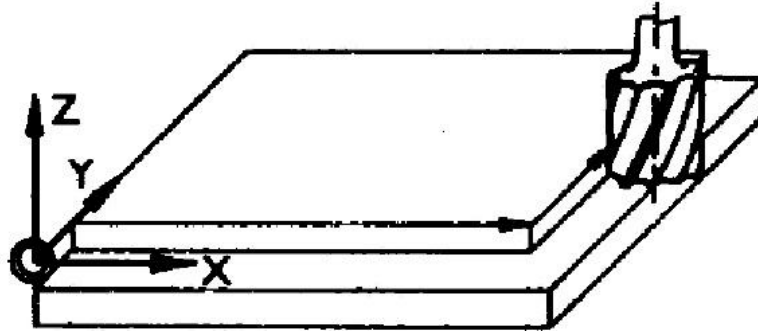
Podle složitosti pracovních cyklů rozeznáváme tyto druhy řídicích systémů:

- a) Systém stavění souřadnic (obrázek 16) – Tento systém se nejčastěji používá u číslicově řízených vrtaček a vyvrtávacích strojů pro přemísťování obrobku vzhledem k nástroji. Pohyb probíhá rychloposuvem v osách x a y podle určených souřadnic a není pohybem pracovním. Pracovní pohyb probíhá v ose z, a představuje posun nástroje do řezu. Pohyb v této ose bývá řízen nárážkami. [15,19]



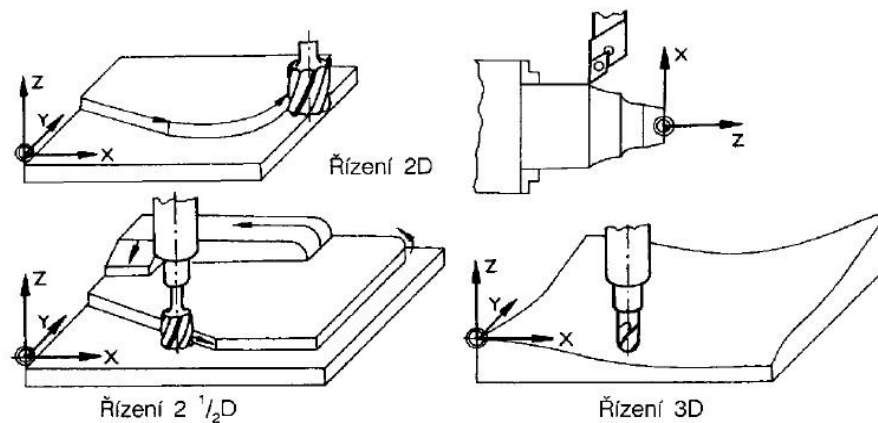
Obr. 16. Systém stavění souřadnic [19]

b) Systém pro pravoúhlé řízení (obrázek 17) – při tomto systému je prováděno obrábění rovnoběžně se souřadnými osami x, y, z avšak vždy pouze v jedné z nich. Teprve po ukončení pohybu v jedné ose může nastat pohyb v ose druhé. To umožňuje soustružit válcové plochy a frézovat pravoúhlé součásti. [19]



Obr. 17. Systém pro pravoúhlé řízení [19]

c) Systém pro souvislé řízení (obrázek 18) – tento systém se používá u soustruhů, frézek a obráběcích center. V porovnání s pravoúhlým řízením umožňuje současný pohyb nejméně ve dvou osách. Provádí-li se obrábění současně ve 2 osách, tak se toto řízení označuje jako souvislé řízení 2D, nebo ve třech osách a to se označuje jako souvislé řízení 3D. V současnosti lze považovat za nejvyspělejší řídicí systémy umožňující současný pohyb v 5 osách tedy 5D. [15,19]



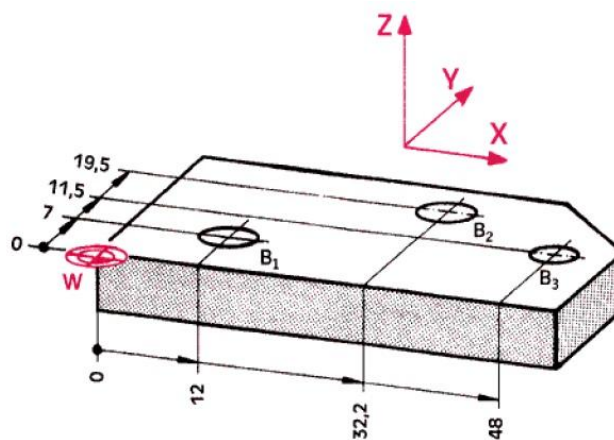
Obr. 18. Systém pro souvislé řízení [17]



### 3.2.2 Podle způsobu programování

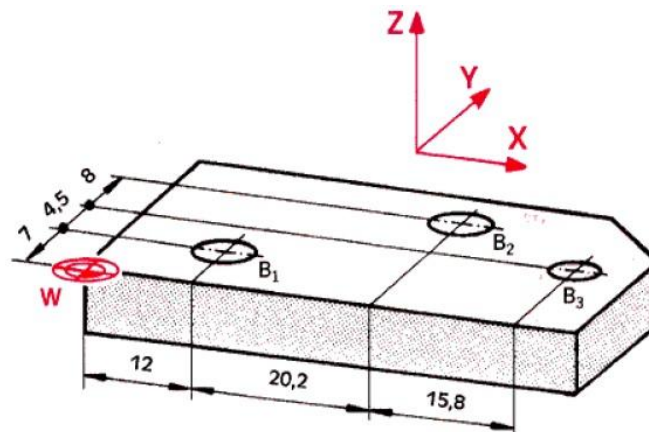
Podle způsobu zadávání souřadnic jednotlivých bodů dráhy nástroje rozeznáváme tyto druhy programování:

a) Absolutní programování (obrázek 19) – toto programování popisuje cílový bod dráhy nástroje vztahovaný k předem zvolenému počátku souřadnic (k nulovému bodu obrobku W), jehož polohu volí programátor. Jedná se tedy o určení souřadnic cílového bodu vůči nějaké základně. Kotování součástky je vhodně provádět od konstrukční (technologické) základny. [19]



Obr. 19. Absolutní programování [15]

b) Přírůstkové (inkrementální) programování (obrázek 20) – souřadnice všech bodů se udávají v hodnotách měřených vzhledem k předchozímu bodu (zapisují se souřadnice, o kolik se nástroj posune od startovacího bodu do cílového bodu). Součet všech hodnot souřadnic je nula, pokud se nástroj vrací do výchozí polohy. Součástku je vhodné kotovat v tomto případě řetězcem kot. [19]



Obr. 20. Přírůstkové programování [15]

### 3.3 Stavba CNC programu

Řídící program je soubor číselných informací odděleně popisující činnost stroje. Struktura řídicího programu pro CNC stroje je dána mezinárodní normou ISO 1058.

Program se skládá z bloků (vět) zapsaných v jednom řádku. Každý blok obsahuje:

- geometrickou informaci – výsledkem jsou pohyby ve směru os,
- technologickou informaci – například nastavení otáček, spuštění chlazení atd.

Každý blok (obrázek 21) se skládá ze slov. Slovo popisuje jeden příkaz a je složeno z adresy a číselného kódu. Adresa určuje, kam bude informace směřována. Číselný kód určuje konkrétní hodnotu. Slovo může být rozměrové nebo bezrozměrové.

<b>N 015</b>	<b>G 02</b>	<b>X 10.000</b>	<b>Z – 12.500</b>	<b>R 10</b>	<b>F 0.1</b>
číslo bloku	bezrozměrové slovo	rozměrové slovo	adresa	číselný kód	

*Obr. 21. Blok*

Číslo každého bloku se skládá z adresy N a čísla odpovídajícího poloze bloku v programu. Je výhodné číslovat bloky po pěti nebo po deseti, aby bylo možné dodatečné vložení dalších bloků bez nutnosti přečíslování programu. Číslování bloků slouží pro snadnější orientaci při opravách nebo skocích do podprogramů.

Rozměrové slovo má významovou část tvořenou fyzikální veličinou a představuje například polohu v příslušné ose, případně velikost vřetena, velikost posuvu atd.

Bezrozměrové slovo řadíme podle významu do skupin, které nazýváme funkce:

G – přípravné funkce (geometrické) – sdělují, jakým způsobem se bude provádět pohyb (po přímce, po kružnici),

M – pomocné funkce (technologické) – jsou specifické pro každý stroj. Slouží k vyvolání určité činnosti stroje (nastavení otáček, spuštění chlazení atd.).

Velikost bloku (věty) udává formát bloku. Rozlišujeme dva formáty:

- Pevný formát bloku (obrázek 22) – každé slovo má přesně stanovenou polohu a daný počet slov. Při opakování stejné hodnoty se v dalším bloku musí příslušně slovo znovu psát.

- Volný formát bloku (obrázek 23) – dovoluje vynechat slova, která se v dalším bloku nevyskytují, nebo mají stejnou hodnotu. [19]

N 005	G 01	X 55.000	Z-25.700	F 080
N 010	G 01	X 62.00	Z-25.700	F 080

*Obr. 22. Příklad pevného formátu*

N 5	G 1	X 55	Z-25.7	F 80
N 10	X 62			

*Obr. 23. Příklad volného formátu*

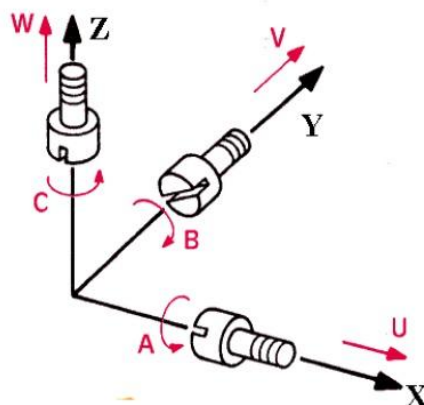
### 3.3.1 Podprogramy a cykly

Podprogram je určitá uzavřená část programu, která se v hlavním programu může několikrát opakovat, nebo se může použít v jiném programu. Podprogram vytváří programátor. U některých systémů se uvádí za hlavním programem, obvykle je to ale samostatně existující část programového kódu, který se volá jiným programem. Podprogram má podobnou strukturu jako hlavní program.

Cyklus je podprogram dodaný a pevně stanovený výrobcem řídicího systému. Cykly se používají například u frézování pro vrtání, výrobu kapes, výrobu drážek atd. [15]

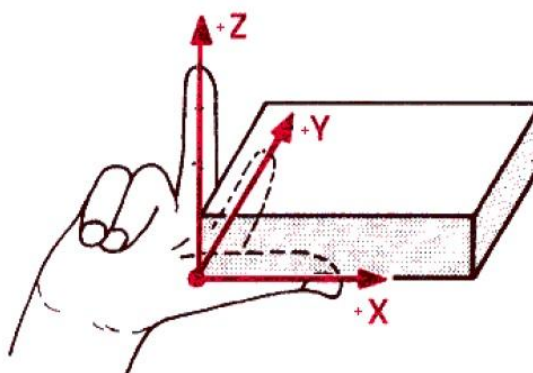
## 3.4 Souřadný systém stroje

V současnosti výrobní stroje používají kartézský systém souřadnic. Definice je dána normou ČSN Terminologie os a pohybu. Systém je pravotočivý, pravoúhlý s osami X, Y, Z. Otáčivé pohyby, jejichž osy jsou rovnoběžné s osami X, Y, Z, se označují jako A, B, C. Platí, že osa Z je rovnoběžná s osou vřetene, přičemž kladný smysl probíhá od obrobku k nástroji. Hodnoty se objevují i v záporném poli souřadnic. Na obrázku 24 je zobrazen pravoúhlý pravotočivý souřadný systém. [12]



Obr. 24. Pravoúhlý pravotočivý souřadný systém [15]

Jako pomůcka může posloužit pravá ruka, jak je zobrazeno na obrázku 25. Palec ukazuje ve směru osy X, ukazováček ve směru osy Y a prostředníček ve směru osy Z.



Obr. 25. Mnemotechnická pomůcka [15]

Kartézský systém souřadnic je nutný pro řízení stroje. Nástroj se v něm pohybuje podle zadaných příkazů z řídicího panelu CNC stroje nebo podle příkazů uvedených ve spuštěném CNC programu. Je nutný pro měření nástrojů. Podle potřeby lze souřadný systém posunout a otáčet. V případě měření nástrojů je umístěn v bodě výměny nástroje nebo na špičce nástrojů.

V programech se v závislosti na technickém řešení použitého stroje a náročnosti vyráběné součásti používá pro rozličné účely dané značení dalších os souřadných systémů. Přehled možností a použití uvádí tabulka 1. [12]

Tab. 1. Značení os [12]

OSY - DRUHY		Určeno pro
Základní osy	X Y Z	Geometrie pohybu nástroje
Rotační osy	A B C	Pokud konstrukce stroje umožňuje provádět přídavné pohyby v osách
Doplňkové osy	I J K	Parametry interpolace
Sekundární osy	U V W	Přídavné pohyby v osách
Terciální osy	P Q R	Většinou pro programování manipulátorů u strojů

### 3.4.1 Vztažné body

Řídicí systém CNC stroje po zapnutí stroje aktivuje souřadný systém ve vlastním stroji. Souřadný systém má svůj počátek, který nazýváme nulový bod, a který musí být přesně stanoven. Podle použití mají nulové body své názvy. Vztažné body jsou zobrazeny na obrázku 26. Na CNC stroji jsou další důležité body:

1) *Nulový bod stroje M* – je stanoven výrobcem. Je výchozím bodem pro všechny další souřadnicové systémy a vztažné body na stroji. U frézky je nulový bod stroje umístěn v krajní poloze stolu frézky v obou osách. Obvykle z pohledu obsluhy je to vpředu vlevo.

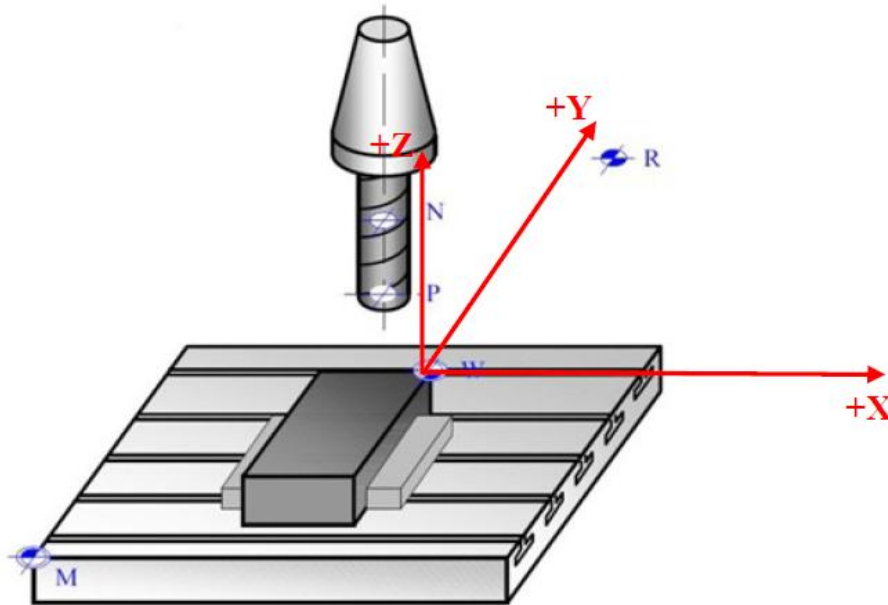
2) *Nulový bod obrobku W* – je počátkem souřadného systému obrobku. Polohu volí libovolně programátor a je možné ji v průběhu programu měnit. Umísťuje se do takového místa, aby se co nejvíce zjednodušilo programování v souvislosti s výpočtem jednotlivých bodů.

3) *Referenční bod stroje R* – je stanoven výrobcem a realizován koncovými spínači. Vzdálenosti nulového bodu stroje a referenčního bodu stroje jsou výrobcem přesně odměřeny v souřadnicové soustavě stroje a vloženy do paměti řídicího systému jako strojní konstanty.

4) *Nulový bod nosiče nástroje N* – je bod na upínací ploše nosiče nástroje. Tento bod vlastně řídí podle programu řídicí systém. V bodě N má nástroj nulové rozměry, proto je nutné skutečnou dráhu nástroje korigovat. K tomuto bodu se vztahují délkové korekce nástroje.

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

6) *Bod špičky nástroje P* – je bod, jehož pohyb se teoreticky programuje. Je důležitý pro stanovení délkové korekce a následně rádiusové korekce nástroje. [9,12]



Obr. 26. Vztažné body [32]

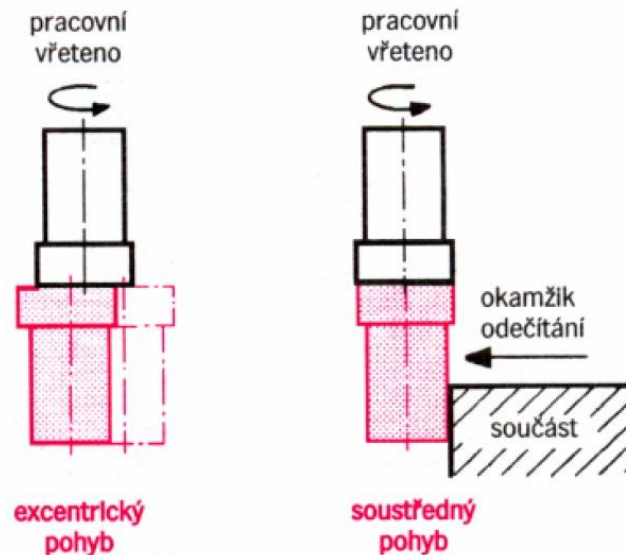
### 3.4.2 Určení nulového bodu obrobku

Nulový bod obrobku je pro technologa – programátora jedním ze základních bodů. Z tohoto bodu se vychází při programování a jeho umístění musí být voleno s ohledem na optimální tvorbu řídicího programu. Na začátku obrábění (tvorby programu) je nutné posunout souřadný systém z nulového bodu stroje (absolutní nula) do nulového bodu obrobku. Máme několik způsobů určení nulového bodu:

a) Dotykem (naškrábnutím) nástroje na obrobku – na frézce dotykem nástroje v osách X, Y a Z na plochách polotovaru a výpočtem vzhledem k poloměru nástroje a přídávků na opracování se určí poloha nástroje vůči nulovému bodu obrobku. Určování nulového bodu obrobku dotykem není nejpřesnější způsob, neboť přesnost ovlivňuje kvalita obrobku. Jednou z příčin nepřesností je nedostatečná zkušenost obsluhy. [15]

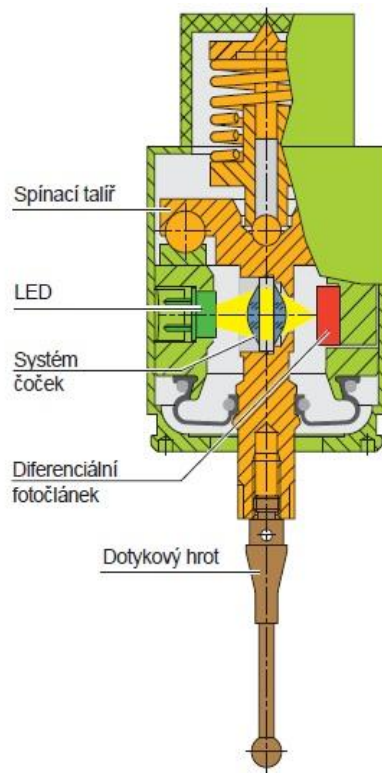
b) Dotykem pomocí excentrického měřicího dotyku na frézce (obrázek 27) – základem jsou dva válcové čepy, které jsou k sobě ve vnitřní části přitlačovány pružinou. Horní čep je upnut v pracovním vřetenu a při měření se otáčí malou rychlostí. Spodní čep se také otáčí – excentricky a na tento čep se při měření najíždí obrobkem. V určitém okamžiku,

kdy se spodní čep mírně dotýká obrobku, dochází k souřadnému pohybu obou čepů a tento okamžik se nazývá okamžikem odečítání. Tato metoda je výhodná zejména v případech, kdy nelze připustit byť jen nepatrné poškození upnuté součástky, ke kterému by mohlo dojít při určování nulového bodu dotykem nástroje. [19]



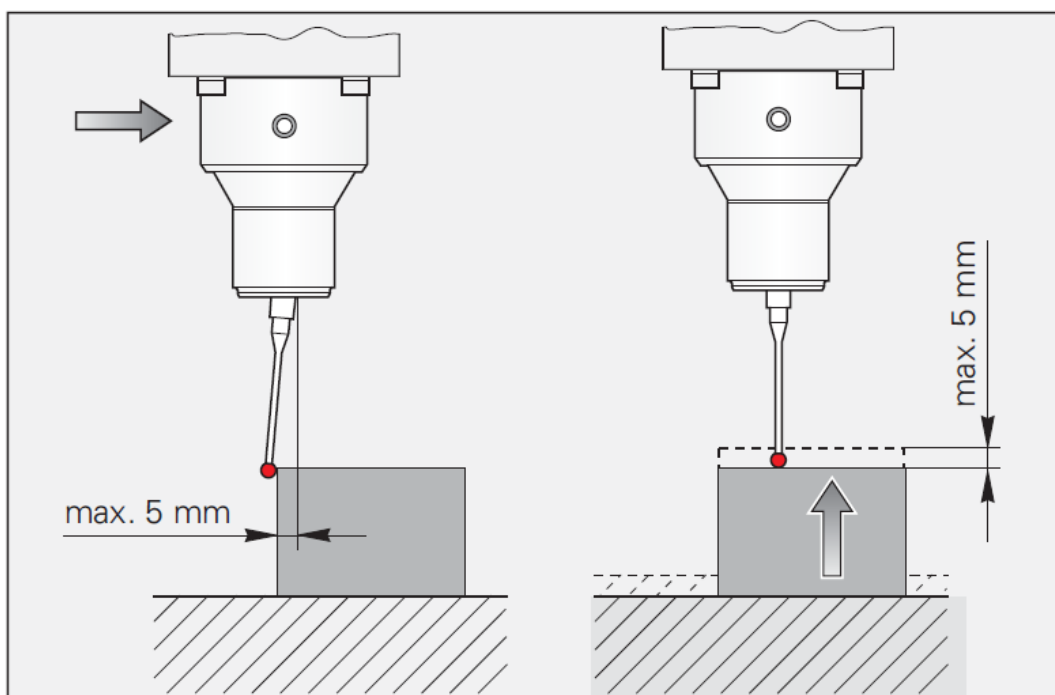
Obr. 27. Excentrický měřicí dotyk [15]

c) Dotykovými sondami (obrázek 28) – ty jsou různě konstrukčně řešeny. Mezi nejpoužívanější patří sondy mechanické a elektrokontaktní, které signalizují dotyk, případně zastaví posuv stroje. Mezi nejvýznamnější výrobce dotykových sond patří Heidenhain a Renishaw. Na obrázku 28 je zobrazen princip dotykové sondy od firmy Heidenhain, které pracují s jedním optickým snímačem jako senzorem. Světelné paprsky vycházející z LED diody jsou zaostřeny soustavou čoček a dopadají jako světelný bod na diferenciální fotočlánek. Při vychýlení dotykového hrotu vygeneruje diferenciální fotočlánek spínací signál. Přenos signálu je uskutečněn pomocí kabelu, nebo pomocí infračerveného paprsku. U dotykových sond s kabelovým přenosem slouží kabel k přívodu napájení a k přenosu signálu. Tyto sondy se upínají ručně do vřetena. U sond s infračerveným přenosem probíhá signál mezi dotykovou sondou a vysílací/přijímací jednotkou. Tyto sondy jsou vhodné k používání na strojích s automatickou výměnou nástrojů. [19,20]



Obr. 28. Princip dotykové sondy [20]

Na obrázku 29 je zobrazeno vychýlení dotykové sondy. Maximální přípustné vychýlení dotykové sondy je do všech směrů 5 mm. V rámci této dráhy se musí zastavit pohyb stroje, aby se zabránilo poškození sondy.



Obr. 29. Vychýlení dotykové sondy [20]



V tabulce 2 je zobrazena základní charakteristika dotykový sond.

Tab. 2. Charakteristika dotykových sond [20]

<b>Přesnost snímání</b>	±5 μm
<b>Vychýlení dotykového hrotu</b>	5 mm ve všech směrech (při délce hrotu 40 mm)
<b>Síly vychýlení</b>	Axiální 8 N Radiální 1 N
<b>Rychlost snímání</b>	5 m/min
<b>Pracovní teplota</b>	10°C až 40°C
<b>Skladovací teplota</b>	-20°C až 70°C

### 3.5 CAM systémy

Na počítačovou podporu výroby označovanou jako CAM – Computer Aided Manufacturing je možné nahlížet v jednoduchosti jen jako na technologický proces anebo v komplexnějším pojmání jako na technologický, manipulační, řídicí proces apod. Podle toho je CAM chápáný buď jako počítačová podpora v hlavní části technologického procesu anebo jako komplexní počítačová podpora výroby.

CAM jako komplexní počítačová podpora výroby představuje automatizované operativní řízení výroby na dílenské úrovni, numericky řízené výrobní systémy, automatické dopravníky a automatizované sklady.

CAM jako systém představuje software související s tvorbou řídicích programů pro CNC výrobní techniku. Tyto systémy využívají především geometrická a další data, která byla získána v etapě počítačového návrhu součástky prostřednictvím CAD systémů. Součástí CAM softwaru jsou ve většině případů i postprocesory.

CAM jako koncept automatizace a počítačové podpory výrobního procesu je dost široký. Zahrnuje všechny činnosti spojené bezprostředně s výrobním procesem, přičemž k nejdůležitějším činnostem patří řízení vstupu do výroby, sběr výrobních údajů, plánování výroby, monitorování průběhu výroby, nástrojové hospodaření apod. [11]

### 3.5.1 Rozdělení CAM systémů

Současné systémy pro počítačovou podporu výroby je možné rozdělit podle rozsahu a účelu do následujících skupin:

- Malé CAM programy – představují jednoduché aplikace pro tvorbu CNC programů obvykle pro jeden způsob obrábění v malém rozsahu technologických možností a nižší úrovni programátorské propracovanosti. Jsou schopné efektivně řešit simulaci 2,5D obrábění s výstupem ve formě CNC programu. Model součástky je převzat z některé CAD aplikace. Cenově jsou nejlevnější a nároky na hardware jsou minimální.
- Střední CAM programy – jsou cenově náročnější. Vyžadují výkonnější hardware pro oblast simulace. Jsou schopny na profesionální úrovni řešit některé náročné výpočty a simulaci.
- Velké CAM programy – jsou schopny velmi efektivně a lehce řešit 3D – 5D obrábění komplexních ploch s množstvím technologických variací a širokou technologickou podporou při výběru nástroje, řezných podmínek, strategií pohybů apod. Opět je potřebné převzít model součástky vytvořený v CAD systému. [11]

CAM systémy jsou nejvíce propracované v oblasti frézování. Je možné je využít i pro soustružení, vrtání, drátové řezání, elektroerozivní hloubení, obrábění laserem anebo obrábění vodním paprskem.

CAM systémy jsou buď specializované a mají zabudovanou podporu jen některých ze zmiňovaných metod obrábění, anebo existuje podpora pro všechny způsoby obrábění.

Další vlastnost, na základě které je možné CAM systémy začlenit do určitých skupin, se jeví jejich komplexnost a provázanost s dalšími CA systémy. Potom CAM systémy můžeme rozdělit do dvou skupin:

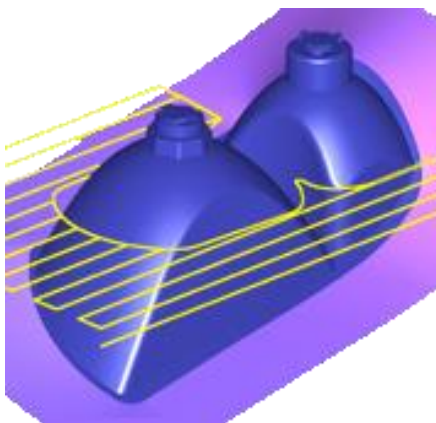
- a) *CAM systémy integrované v rámci komplexních CAD/CAM/CAE systémů* – výhodou je provázanost jednotlivých modulů a neexistují zde problémy s přenosy údajů a geometrických dat mezi jednotlivými částmi a moduly.
- b) *Samostatné CAM systémy* – je to skupina specializovaných CAM systémů, do kterých patří např. Surfcam, Smartcam, Sprutcam, AlphaCAM, Powermill, Featurecam, WorkNC, Tebis, Hypermill apod. [11]

### 3.5.2 Klasifikace drah nástroje v CAM

CAM systémy nabízejí vytváření různých strategií při obrábění, které snižují výrobní časy, zaručují kvalitu plochy a využívají možnost moderních nástrojů. V podstatě lze strategie rozdělit na hrubovací a dokončovací.

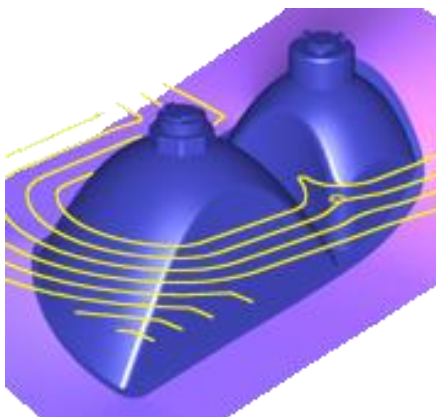
1) *Hrubovací strategie* – hrubováním odebíráme podstatnou část materiálu z polotovaru až po rozměry součástky zvětšené o přídavek na obrábění na dokončování. Nejčastěji se hrubuje po vrstvách. Hlavním kritériem by měl být minimální čas odebrání materiálu a maximální objem odebraného materiálu. V podstatě jsou tři typy hrubovacích strategií a to hrubování rastrem, hrubování profilováním a hrubování konturováním. [11]

Hrubování rastrem je charakteristická tím, že dráha nástroje je rovnoběžná s osou souřadnicového systému s definovaným krokem v rovinách obrábění. Hrubování rastrem můžeme vidět na obrázku 30.



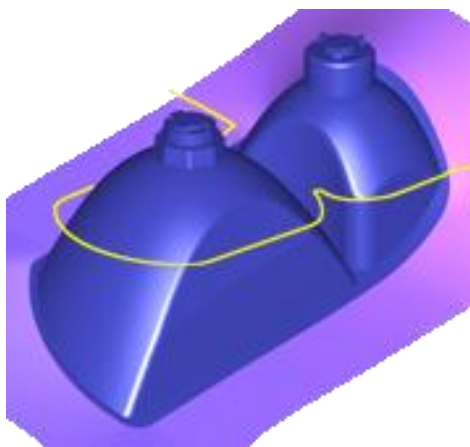
Obr. 30. Hrubování rastrem

Na obrázku 31 je zobrazeno hrubování profilem. Strategie je charakteristická tím, že dráha nástroje opisuje profil modelu součástky s definovaným krokem v rovinách obrábění.



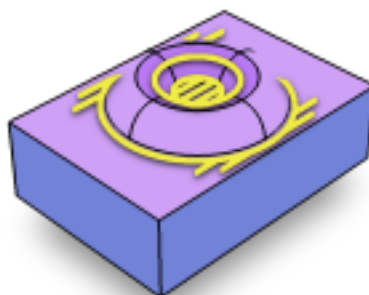
Obr. 31. Hrubování profilem

Na obrázku 32 je zobrazeno hrubování konturou. Strategie je charakteristická tím, že dráha nástroje opisuje obrys součástky v rovinách obrábění.



Obr. 32. Hrubování konturou

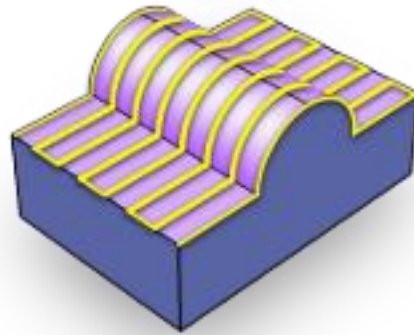
Mezi hrubovací strategie můžeme ještě zařadit zbytkové hrubování (obrázek 33), které pracuje na obdobném principu jako hrubování, avšak s tím rozdílem, že pracuje se zbytkovým materiálem, který zůstane po větším nástroji.



Obr. 33. Zbytkové hrubování

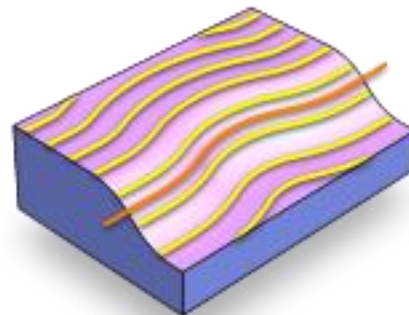
2) *Dokončovací strategie* – dokončováním rozumíme obrábění takovými řeznými nástroji a parametry, aby byly dosaženy požadované vlastnosti součástky (rozměr, tvar, drsnost). Tento způsob je charakterizován i nastavením nulového přídatku při generování drah nástroje. Použijeme ho tehdy, kdy předpokládáme výrobu rozměrů identických s počítačovým modelem. Obecně jsou dokončovací strategie dokončení rastrem, dokončení offsetem, dokončení Konstant Z, dokončení optimalizovaným Konstant Z, dokončení rohu a dokončení strmé plošné. [11]

Na obrázku 34 je zobrazena dokončovací strategie dokončení rastrem, která se používá pro obrábění horizontální plochy. Tato strategie si drží konstantní krok do boku.



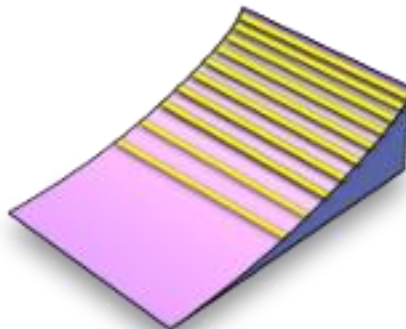
*Obr. 34. Dokončení rastrem*

Na obrázku 35 je zobrazena dokončovací strategie dokončení offsetem, která se používá pro obrábění horizontální plochy.



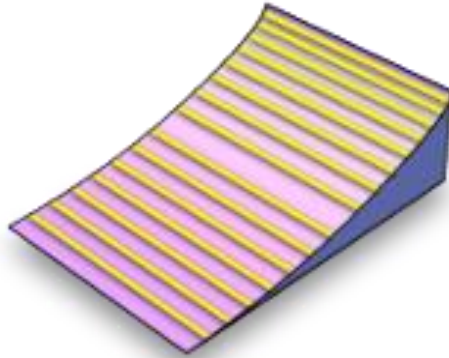
*Obr. 35. Dokončení offsetem*

Na obrázku 36 je zobrazena dokončovací strategie dokončení Konstant Z, která se používá pro obrábění vertikální plochy. Je charakteristická konstantním krokem v ose Z.



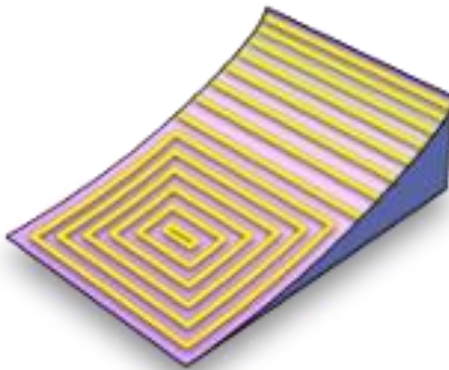
*Obr. 36. Dokončení Konstant Z*

Na obrázku 37 je zobrazena dokončovací strategie dokončení optimalizovaným Konstant Z, která se používá pro obrábění horizontální i vertikální plochy. Na vertikální ploše se jeví jako Konstant Z a drží si konstantní krok v ose Z a při přechodu na horizontální plochu plynule přejde na strategii dokončení rastrem. Tato strategie je tedy kombinovaná.



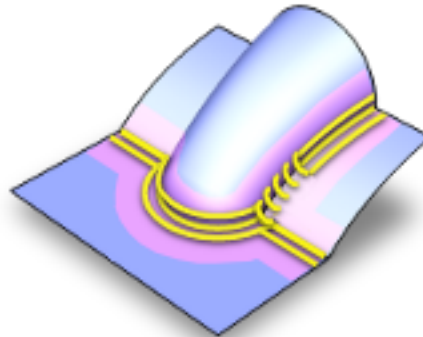
*Obr. 37. Dokončení optimalizovaným Konstant Z*

Na obrázku 38 je zobrazena dokončovací strategie dokončení strmé plošné, která se používá pro obrábění horizontální i vertikální plochy. Na vertikální ploše se jeví jako Konstant Z a drží si konstantní krok v ose Z a při přechodu na vertikální plochu plynule přejde na strategii dokončení offsetem.



*Obr. 38. Dokončení strmé plošné*

Na obrázku 39 je zobrazena dokončovací strategie dokončení rohu, která se používá pro obrábění zbytkových materiálů, které zůstanou po větším nástroji.



Obr. 39. Dokončení rohu

### 3.5.3 Postprocessor

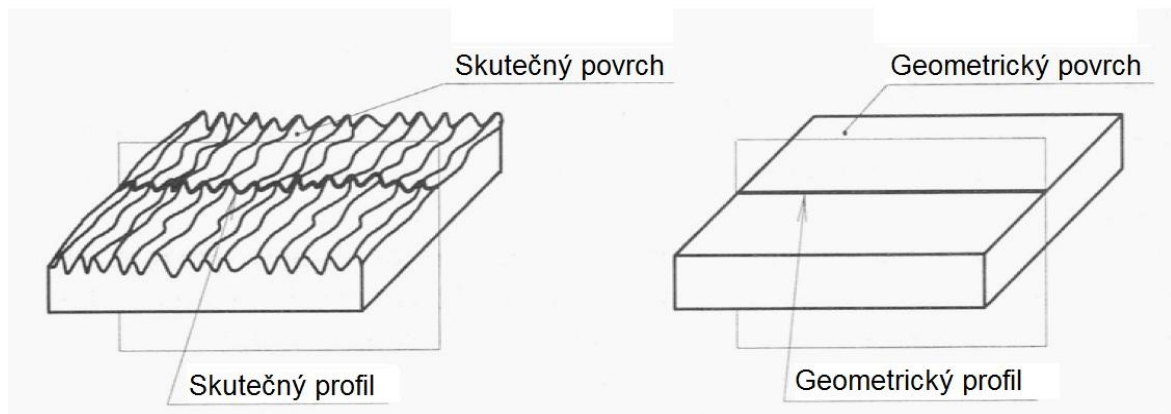
Vzhledem k tomu, že existuje mnoho řídicích systémů obráběcích strojů, je potřebné přeložit CLDATA do jazyka konkrétního řídicího systému. Pro tento účel slouží postprocesory. Jsou to programy, které mohou pracovat mimo prostředí CAM. Vstupem do postprocesoru jsou CLDATA a výstupem CNC program pro konkrétní řídicí systém obráběcího stroje. Tyto programy mohou pracovat i přímo v prostředí CAM. Uživatel ani nemusí postřehnout vytvoření souboru CLDATA, protože je přímo generován soubor s CNC daty.

Složitost postprocesoru určuje řídicí systém, pro který je určený. Postprocesory se rozdělují podle následujících hledisek:

- a) podle počtu os, pro které se generuje současný pohyb nástroje anebo součástky na: jednoosý, dvouosý, tříosý, čtyřosý anebo pětiosý postprocesor,
- b) podle počtu řídicích systémů, pro které se generuje CNC program: pro jeden, dva a více řídicích systémů,
- c) podle typu generovaných CNC dat na: diskretní postprocesory a „splinové“ postprocesory. [11]

## 4 STRUKTURA POVRCHU

Při použití jakékoliv technologické metody vzniká na povrchu technických ploch nerovnost, která má značný význam při funkci těchto ploch. Povrch představuje prostorový útvar, což vede k tomu, že posuzování nerovností se řeší do roviny řezu rovinou kolmou k povrchu (obrázek 40). Tímto se získá profil, který je základním zdrojem informací. [1]



Obr. 40. Řez rovinou kolmou k povrchu [1]

### 4.1 Profil nerovnosti povrchu

Rozteč příslušných nerovností charakterizuje strukturu povrchu a dělí ji na složky. Složka s nejmenší roztečí tvoří drsnost povrchu, dále pak máme složku nazvanou vlnitost povrchu a největší rozteč nerovností určuje základní profil. Geometrické parametry definované normou jsou:

- R – parametr vypočítaný z profilu drsnosti,
- W – parametr vypočítaný z profilu vlnitosti,
- P – parametr vypočítaný ze základního profilu. [10]

V novém systému je základním zdrojem informace profil (jedná se o profilovou metodu) a je definován:

*Profil povrchu* – průsečnice skutečného povrchu a dané roviny.

*Snímaný profil* – jako geometrické místo středů snímacího hrotu stanovených parametrů. Od tohoto profilu jsou odvozeny všechny ostatní profily.

*Referenční profil* – dráha, po které se snímač, podél vedení, pohybuje v rovině řezu.

*Úplný profil* – jako číslíková forma snímaného profilu vzhledem k referenčnímu profilu.



*Základní profil* – úplný profil po aplikaci krátkovlnného filtru  $\lambda_s$ . Základní profil reprezentuje základnu pro číselné zpracování profilu pomocí filtrů profilu a pro výpočet parametrů profilu.

*Zbytkový profil* – základní profil získaný snímáním ideálně hladkého a rovného povrchu. Zbytkový profil je složen z úchylek vedení, vnějších a vnitřních poruch a z úchylek vzniklých při přenosu profilu.

*Profil drsnosti* – profil odvozený ze základního profilu potlačením dlouhovlnných složek použitím filtru profilu  $\lambda_c$ . Profil drsnosti je základem pro hodnocení parametrů profilu drsnosti.

*Profil vlnitosti* – profil odvozený postupnou aplikací filtru profilu  $\lambda_f$  a filtru profilu  $\lambda_c$  na základní profil. [10]

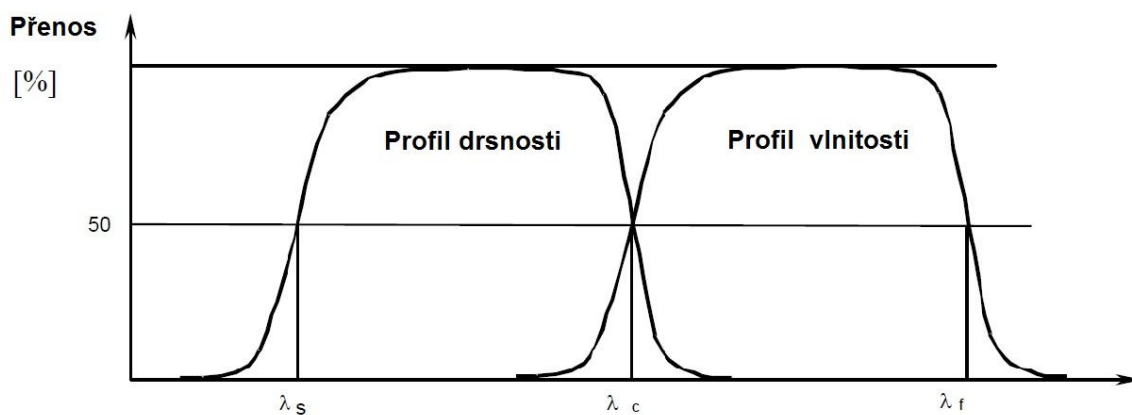
## 4.2 Filtry profilu

Filtr profilu je filtr rozdělující profily na dlouhovlnné a krátkovlnné složky. Norma ČSN EN ISO 4287 zavádí následující filtry profilu (obrázek 41):

*$\lambda_s$  filtr profilu* – filtr definující rozhraní mezi drsností a kratšími složkami vln přítomnými na povrchu.

*$\lambda_c$  filtr profilu* – filtr určující rozhraní mezi složkami drsnosti a vlnitosti.

*$\lambda_f$  filtr profilu* – filtr určující rozhraní mezi vlnitostí a delšími složkami vln přítomnými na povrchu. [13]



Obr. 41. Profily [13]

Střední čáry jsou čáry, od kterých jsou odměřovány pořadnice profilu. Norma ČSN EN ISO 4287 zavádí následující střední čáry:

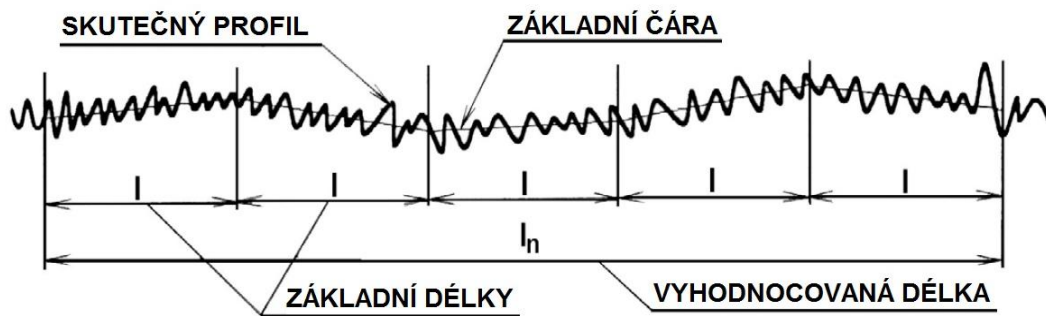
*Střední čára profilu drsnosti* – čára odpovídající dlouhovlnné složce profilu potlačené filtrem profilu  $\lambda_c$ .

*Střední čára profilu vlnitosti* – čára odpovídající dlouhovlnné složce profilu potlačené filtrem profilu  $\lambda_f$ .

*Střední čára základního profilu* – čára nejmenších čtverců přiléhající jmenovitému tvaru základního profilu. [13]

*Základní délka ( $l_p$ ,  $l_r$ ,  $l_w$ )* – délka ve směru osy x použitá pro rozpoznání nerovností charakterizujících vyhodnocovaný profil. Základní délka pro drsnost  $l_r$  a pro profil  $l_w$  jsou číselně rovné charakteristické vlnové délce profilového filtru  $\lambda_c$  a  $\lambda_f$ . Základní délka pro základní profil  $l_p$  se rovná vyhodnocované délce. Základní délka je zobrazena na obrázku 42.

*Vyhodnocovaná délka ( $l_n$ )* – délka ve směru osy x použitá pro posouzení vyhodnocovaného profilu. Vyhodnocovaná délka může obsahovat jednu nebo více základních délek. Vyhodnocovaná délka je zobrazena na obrázku 42. [10]



Obr. 42. Základní a vyhodnocovaná délka

### 4.3 Parametry struktury povrchu

Parametry struktury povrchu lze rozdělit na výškové, délkové (šířkové), tvarové a křivky a odpovídající parametry.

#### 4.3.1 Výškové parametry

Norma ČSN EN ISO 4287 zavádí následující definice výškových parametrů:

*Největší výška výstupku profilu ( $P_p$ ,  $R_p$ ,  $W_p$ )* – výška nejvyššího výstupku profilu v rozsahu základní délky označována  $Z_p$ .

*Největší hloubka prohlubně profilu ( $P_v$ ,  $R_v$ ,  $W_v$ )* – hloubka nejnižší prohlubně profilu v rozsahu základní délky označována  $Z_v$ .

*Největší výška profilu ( $P_z$ ,  $R_z$ ,  $W_z$ )* – součet výšky nejvyššího výstupku profilu a hloubky nejnižší prohlubně profilu v rozsahu základní délky označovaná  $R_z$ .

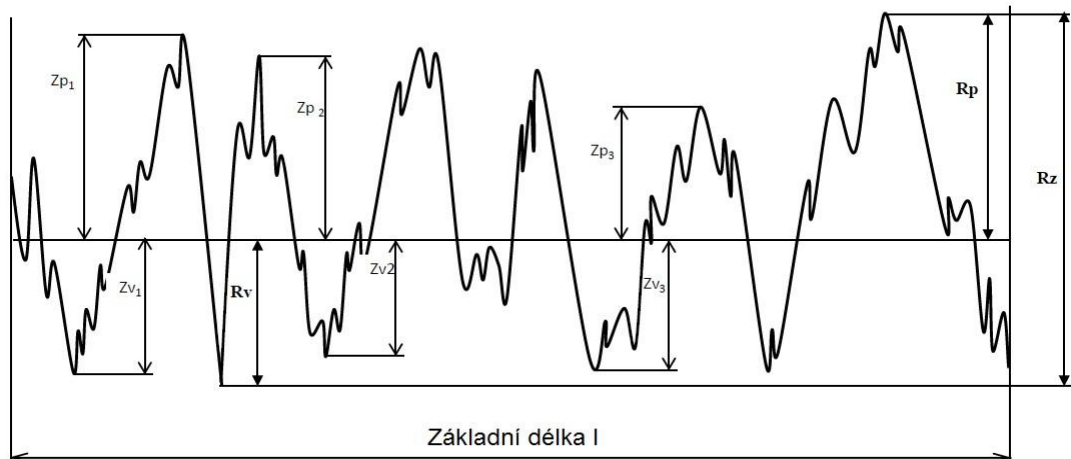
Největší výšku profilu spočítáme:

$$R_z = \frac{\sum_{i=1}^5 |Z_{pi}| + \sum_{i=1}^5 |Z_{vi}|}{5}, \quad (5)$$

kde:  $Z_p$  – vzdálenost mezi střední čarou a nejvyšším výstupkem profilu [ $\mu\text{m}$ ],

$Z_v$  – vzdálenost mezi střední čarou a nejnižším výstupkem profilu [ $\mu\text{m}$ ].

Na obrázku 43 je zobrazena největší výška výstupku profilu, největší hloubka prohlubně profilu a největší výška profilu.



Obr. 43. Největší výška profilu [13]

Průměrná výška prvků profilu ( $Pc$ ,  $Rc$ ,  $Wc$ ) – průměrná hodnota výšek prvků profilu v rozsahu základní délky.

Průměrnou výšku prvků profilu spočítáme:

$$Rc = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m Zt_i, \quad (6)$$

kde:  $Z_t$  – součet výšky výstupku a hloubky prohlubně [ $\mu\text{m}$ ].

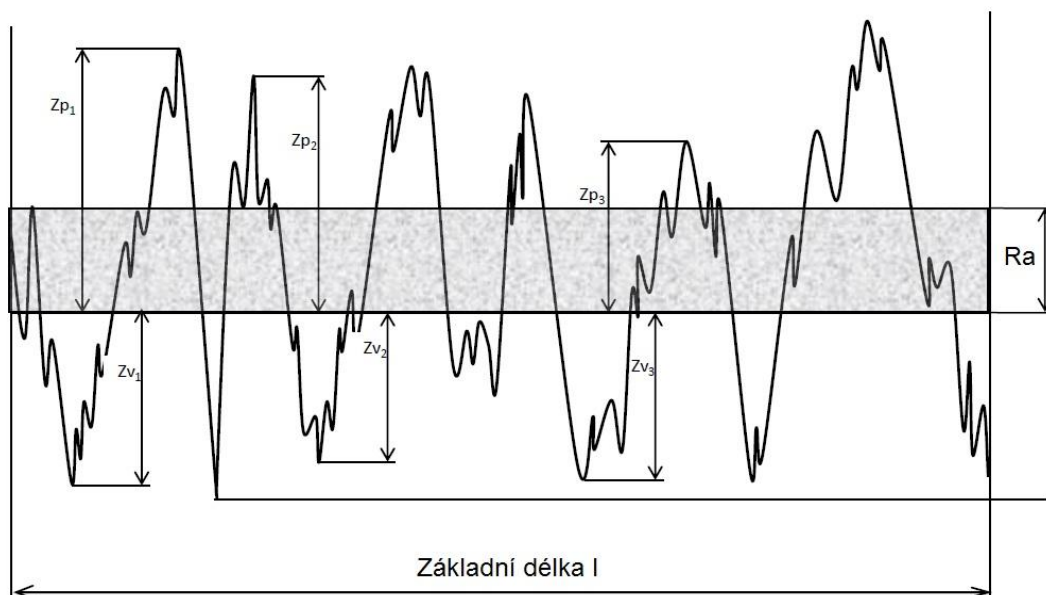
Celková výška profilu ( $Pt$ ,  $Rt$ ,  $Wt$ ) – součet výšky nejvyššího výstupku profilu a hloubky nejnižší prohlubně profilu v rozsahu vyhodnocované délky. [13]

Průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu ( $Pa$ ,  $Ra$ ,  $Wa$ ) (obrázek 44) – aritmetický průměr absolutních hodnot pořadnic v rozsahu základní délky.

Průměrnou aritmetickou úchytku posuzovaného profilu spočítáme:

$$Ra = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m |Z(x)|, \quad (7)$$

kde:  $Z$  – vzdálenost mezi střední čarou a body na křivce profilu [ $\mu\text{m}$ ].



Obr. 44. Průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu

Průměrná kvadratická úchylka posuzovaného profilu ( $Pq$ ,  $Rq$ ,  $Wq$ ) – kvadratický průměr pořadnic v rozsahu základní délky.

Průměrnou kvadratickou úchylku posuzovaného profilu spočítáme:

$$Rq = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m Z(x)^2}, \quad (8)$$

kde:  $Z$  – vzdálenost mezi střední čarou a body na křivce profilu [ $\mu\text{m}$ ].

*Šikmost posuzovaného profilu ( $Psk, Rsk, Wsk$ )* – podíl průměrné hodnoty třetích mocnin pořadnic a třetí mocniny kvadratické úchylky posuzovaného profilu v rozsahu základní délky.

*Špičatost posuzovaného profilu ( $Pku, Rku, Wku$ )* – podíl průměrné hodnoty čtvrtých mocnin pořadnic a čtvrté mocniny kvadratické úchylky posuzovaného profilu v rozsahu základní délky. [13]

#### 4.3.2 Délkové (šířkové) parametry

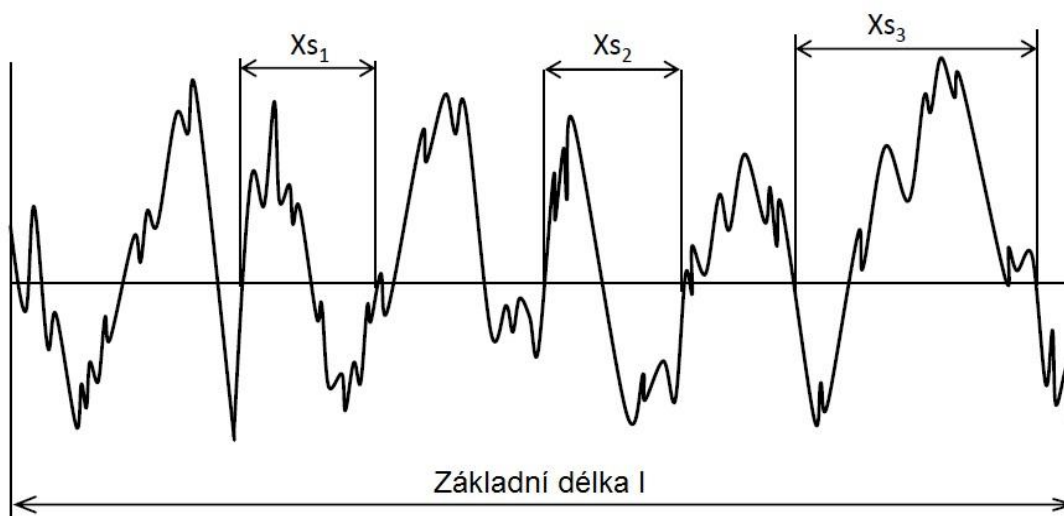
Norma ČSN EN ISO 4287 zavádí následující definice délkových parametrů:

*Průměrná šířka prvků profilu ( $PSm, RSm, WSm$ )* (obrázek 45) – průměrná hodnota šířek prvků profilu v rozsahu základní délky.

Průměrnou šířku prvků profilu spočítáme:

$$RSm = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m Xs_i, \quad (9)$$

kde:  $Xs$  – délka úseku osy X protínající prvek profilu [ $\mu\text{m}$ ].



Obr. 45. Průměrná šířka prvků profilu [13]

### 4.3.3 Tvarové parametry

Norma ČSN EN ISO 4287 zavádí následující definice tvarových parametrů:

*Průměrný kvadratický sklon posuzovaného profilu ( $Pdq$ ,  $Rdq$ ,  $Wdq$ )* – průměrná kvadratická hodnota sklonů pořadnic v rozsahu základní délky. [13]

### 4.3.4 Křivky a odpovídající parametry

Norma ČSN EN ISO 4287 zavádí následující definice křivek a odpovídajících parametrů:

*Materiálový poměr profilu ( $Pmr(c)$ ,  $Rmr(c)$ ,  $Wmr(c)$ )* – poměr délky materiálu elementů profilu  $Ml(c)$  na dané úrovni  $c$  v rozsahu vyhodnocované délky.

*Křivka materiálového poměru profilu* – křivka představující materiálový poměr profilu v závislosti na výšce úrovně.

*Rozdíl výšky úseku profilu ( $Pdc$ ,  $Rdc$ ,  $Wdc$ )* – svislá vzdálenost mezi úrovněmi dvou úseků daného materiálového poměru.

*Vzájemný materiálový poměr ( $Pmr$ ,  $Rmr$ ,  $Wmr$ )* – materiálový poměr určený na úrovni části profilu  $Rdc$  vztažený k úrovni  $C0$ . [13]

## 4.4 Pravidla pro hodnocení struktury povrchu

Mezi pravidla pro hodnocení struktury povrchu patří pravidlo 16 % a pravidlo maxima.

### 4.4.1 Uplatnění „pravidla 16 %“

Pro požadavky specifikované horní mezí parametru jsou povrchy považovány za přijatelné, jestliže hodnotu uvedenou na výrobní dokumentaci přesáhne maximálně 16 % všech naměřených hodnot zvolených parametrů zjišťovaných na vyhodnocované délce.

Pro požadavky specifikované dolní mezí parametru jsou povrchy považovány za přijatelné, jestliže hodnotu uvedenou na výrobní dokumentaci nedosáhne maximálně 16 % všech naměřených hodnot zvolených parametrů zjišťovaných na vyhodnocované délce.

Při stanovení horní a dolní meze parametru se používá značka parametru bez indexu „max“. [14]

### 4.4.2 Uplatnění „pravidla maxima“

Při požadavcích specifikovaných největší hodnotou parametru nesmí v průběhu kontroly žádná z měřených hodnot parametru na celém kontrolovaném povrchu překročit hodnotu uvedenou na výrobní dokumentaci.

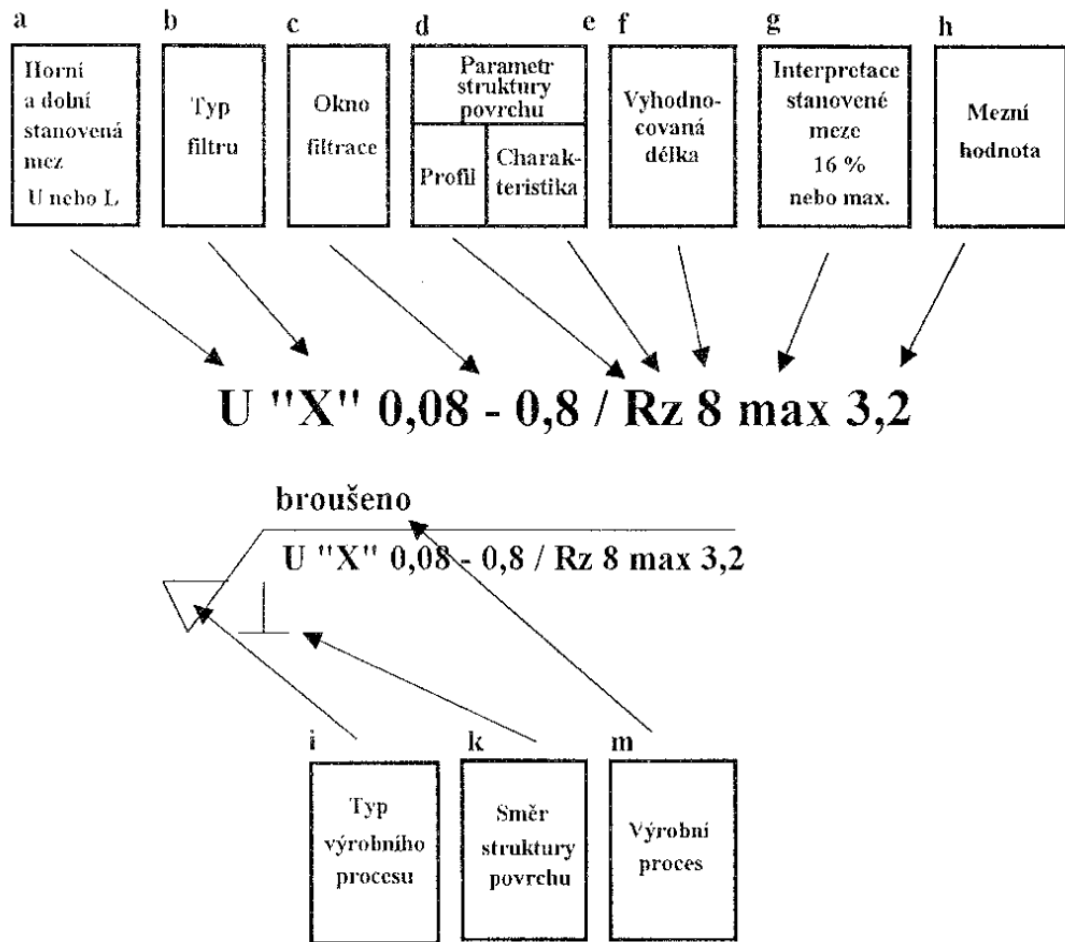
Při stanovení největší dovolené hodnoty parametru se značka parametru doplňuje indexem „max“. [14]

## 4.5 Označování struktury povrchu v technické dokumentaci

Způsob a možnosti označování struktury povrchu je znázorněno na obrázku 46. K jednotlivým bodům na obrázku existují následující možnosti:

- a) Údaj horní U nebo dolní L stanovené meze.
- b) Typ filtru „X“ (normalizovaný filtr je Gaussův filtr).
- c) Okno filtrace je uvedeno hodnotou krátkovlnného filtru, který filtruje krátkovlnné složky profilu povrchu a dlouhovlnného filtru, který filtruje dlouhovlnné složky profilu povrchu.
- d) Profil (W, P, R).
- e) Parametr.
- f) Vyhodnocovaná délka udaná počtem základních délek.

- g) Interpretace stanovené meze.
- h) Mezní hodnota v mikrometrech.
- i) Způsob opracování.
- k) Uspořádání povrchu a směr nerovností dle normy.
- m) Výrobní proces. [10]



Obr. 46. Značení struktury povrchu [10]

## 4.6 Měřidla pro měření drsnosti povrchu

Měřidla pro zjišťování hodnot struktury povrchu lze obecně rozdělit na měřidla dotyková a bezdotyková.

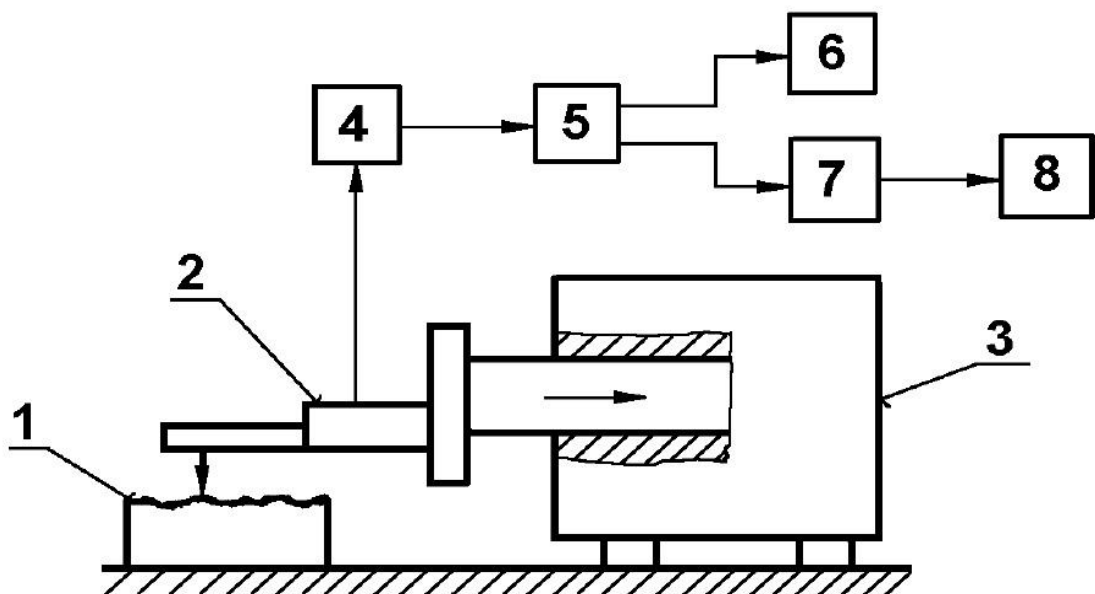
### 4.6.1 Měřidla dotyková

Dotyková metoda používá ostrého hrotu, který se v daném směru posouvá po povrchu a tím získává informace o jeho profilu. Pohyb snímacího hrotu musí být velmi přesný co do



přímosti a rovnoměrnosti. Rychlost musí být zvolena s ohledem na dynamické vlastnosti snímacího systému. Získaný profil je ovlivňován vlastnostmi snímacího systému. Správnost naměřených výsledků ovlivňuje poloměr zaoblení snímacího hrotu, vrcholový úhel snímacího hrotu, měřicí síla, rychlost změny měřicí síly a celkové geometrické uspořádání systému snímače. [22]

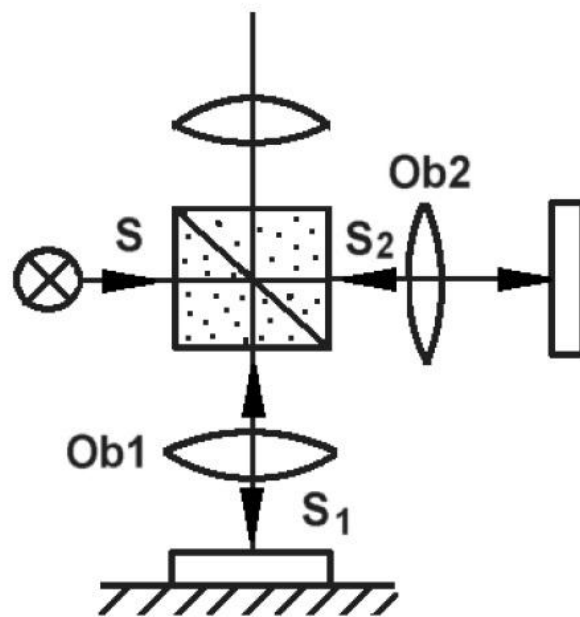
Na obrázku 47 je zobrazen dotykový profilometr, který se skládá z mechanické části a elektronické části. Mechanickou část tvoří stolek, rameno se snímacím hrotem a elektromotor. Elektronická část nám transformuje mechanický signál generovaný snímacím hrotem sledující nerovnosti povrchu měřené plochy na elektrický signál. V obrázku 48 označení 1 představuje měřenou součást, 2 snímací hlavici s měřícím hrotem, 3 posuvový mechanismus, 4 zesilovač, 5 filtr, 6 registrační jednotku, 7 jednotku zpracovávající měřicí signál a 8 zobrazovací jednotku. [21,22]



Obr. 47. Dotykový profilometr [24]

#### 4.6.2 Měřidla bezdotyková

K bezdotykovým měřidlům patří metoda, která využívá princip interference světla. Na obrázku 48 je jednoduše zobrazen princip měření klasickým interferenčním mikroskopem. Paprsek, který vznikl ve zdroji světla, prostupuje přes polopropustné zrcadlo, které jej rozdělí na dva různé paprsky. Jeden paprsek S1 jde na povrch měřené součásti a zpátky do okuláru a druhý paprsek S2 jde na odrazné zrcadlo, kde se odráží zpět přímo do okuláru. V okuláru paprsky interferují (spojí se) a tím získáme obraz povrchu. [21,24]



Obr. 48. Interferenční mikroskop [24]

## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

## 5 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Cílem výzkumu je nalézt nejvhodnější kombinaci řezných podmínek z hlediska hodnot parametru drsnosti povrchu pro dosažení drsnosti povrchu  $Ra= 0,8 \mu\text{m}$  neboli  $Rz= 6,3 \mu\text{m}$ . Tyto hodnoty parametru drsnosti povrchu jsou určující konstruktérem. Pro vybraný frézovací nástroj budeme aplikovat různé řezné podmínky na zvolený materiál. V experimentální části se také zabýváme volbou vhodné geometrie obrobku a s tím související volbou vhodné strategie obrábění. Následuje zjištění a vyhodnocení pomocí statistických modelů kvality povrchu obrobkové plochy.

### 5.1 Obráběcí stroj

Experiment byl proveden na vertikálním frézovacím centru Mikron HSM 800, které je určené pro vysoce výkonné a přesné obrábění v kusové i hromadné výrobě. Obráběcí stroj Mikron HSM 800 je zobrazen na obrázku 49.



Obr. 49. Mikron HSM 800 [28]

Stroj má vysokofrekvenční vřeteno, které je vybaveno hybridními keramickými ložisky. Vřeteno je mazáno olejovou mlhou. Plášť vřetena je chlazen kapalinou, která stabilizuje teplotu. Posuvové pohyby zajišťují střídavé servomotory spárované recirkulačními kuličkovými vřeteny. Dále stroj obsahuje ovládací panel, kabinu, zásobník pro 30 nástrojů a měnič obrobků se 4 paletami. Technické parametry obráběcího centra jsou uvedeny v tabulce 3. [28]

Tab. 3. Specifikace stroje [28]

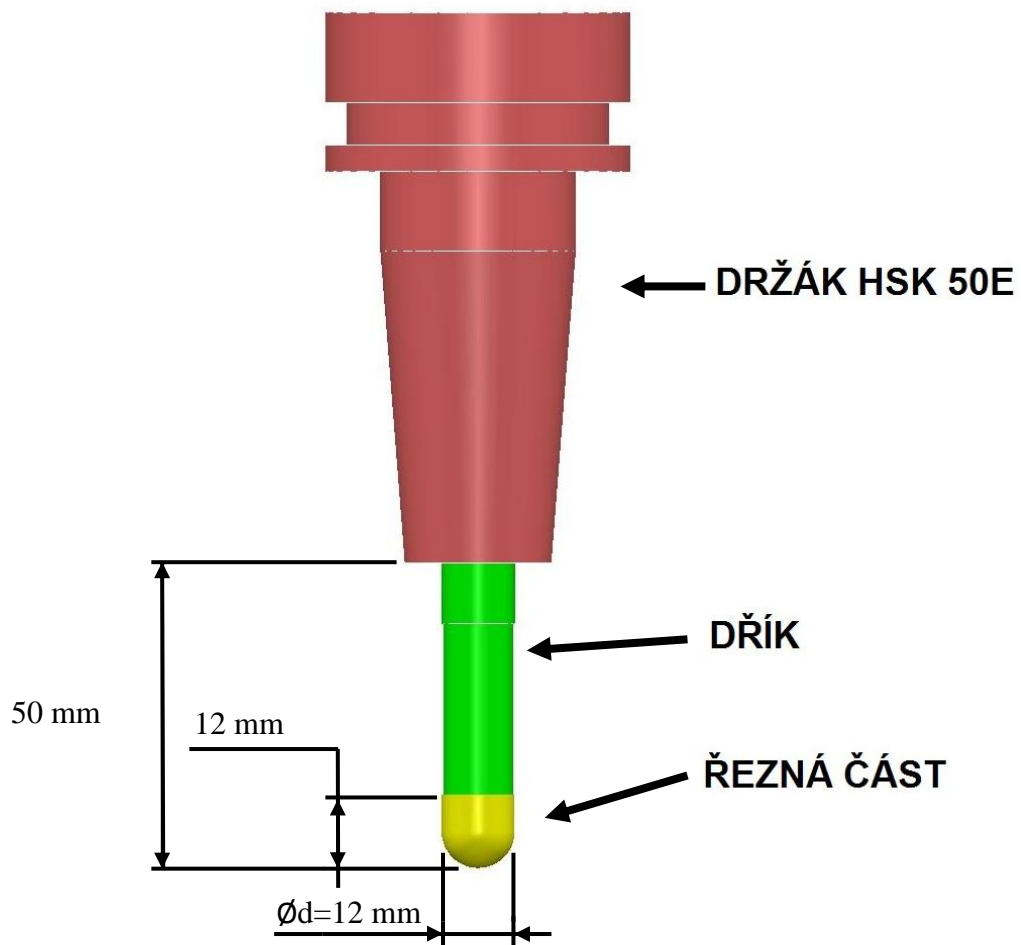
<b>Vzdálenosti pojezdu</b>	osa X = 800 mm osa Y = 600 mm osa Z = 500 mm
<b>Rychlost posuvu</b>	0 – 50 m/min
<b>Zrychlení os</b>	1g (10 m/s <sup>2</sup> )
<b>Otáčky vřetene</b>	36 000 ot/min
<b>Výkon vřetene</b>	25 kW
<b>Krouticí moment</b>	20 Nm
<b>Maximální hmotnost obrobku</b>	1000 kg
<b>Řízení (řídící systém)</b>	Heidenhain iTNC 530
<b>Upínací kužel</b>	HSK 50E
<b>Maximální průměr nástroje</b>	25 mm
<b>Doba výměny nástroje</b>	10 s

## 5.2 Obráběcí nástroj

Pro experiment byly použity kopírovací (kulové) frézy o průměru 12 mm od výrobce Nástroje 24. Byly použity nástroje s výrobním označením KK441.120 001452 12R6 (dále jen KK) a OK441.120 001452 12R6 (dále jen OK). Celková délka je 83 mm a oba mají 4 zuby. Nástroje jsou monolitní. Oba jsou vyrobeny ze slinutých karbidů, které jsou povlakovány tvrdými povlaky. Základní charakteristika obou nástrojů je uvedena v tabulce 4. Na obrázku 50 je zobrazen nástroj s držákem. Vyložení nástroje bylo 50 mm. Držák byl použit HSK 50E od firmy Seco.

Tab. 4. Charakteristika nástrojů

	<b>OK441.120 001452 12R6</b>	<b>KK441.120 001452 12R6</b>
<b>průměr</b>	12 mm	12mm
<b>rádus</b>	6 mm	6 mm
<b>celková délka</b>	83 mm	83mm
<b>délka řezné části</b>	12 mm	12 mm
<b>počet zubů</b>	4	4
<b>tolerance rádiusu</b>	±0,01 mm	±0,01 mm
<b>tolerance průměru</b>	0 až -0,03 mm	0 až -0,03 mm
<b>λ (úhel šroubovice)</b>	35°	35°
<b>γ (úhel čela)</b>	12°	-4°



Obr. 50. Nástroj s držákem HSK 50E

### 5.2.1 Upínání nástroje

Upínání nástroje bylo řešeno pomocí tepelného držáku HSK 50E, který je vyroben ze speciálního materiálu, jehož ohřevem dojde ke zvětšení otvoru pro upnutí nástroje. Do otvoru držáku se vloží nástroj. Ochlazením dojde ke smrštění držáku, a tím k upnutí nástroje. Na obrázku 51 je zobrazen modulární systém EasyShrink 20, který byl použit pro upnutí nástroje. Tepelné upínání nástrojů nachází ve strojírenství stále větší oblibu a uplatnění. Mezi jeho výhody patří rychlost, přesnost a výrazné snížení nákladů. [26,27]



Obr. 51. EasyShrink 20 [26]

### 5.3 Řezné podmínky

Při výběru řezných podmínek se vycházelo z materiálu obrobku, frézovacího stroje a z hodnot, které jsou doporučující od výrobce nástroje pro tento materiál.

Hrubovací řezné podmínky byly zvoleny dle doporučení výrobce nástroje, kde řezná rychlost pro toroidní frézu o průměru 12 mm a rohovým rádiusem 1,6 mm byla zvolena  $v_c=200$  m/min, krok do boku  $a_e=6$  mm, krok v ose Z  $a_p=0,5$  mm a posuv na zub  $f_z=0,8$  mm. Rychloposuv byl zvolen 50 m/min.

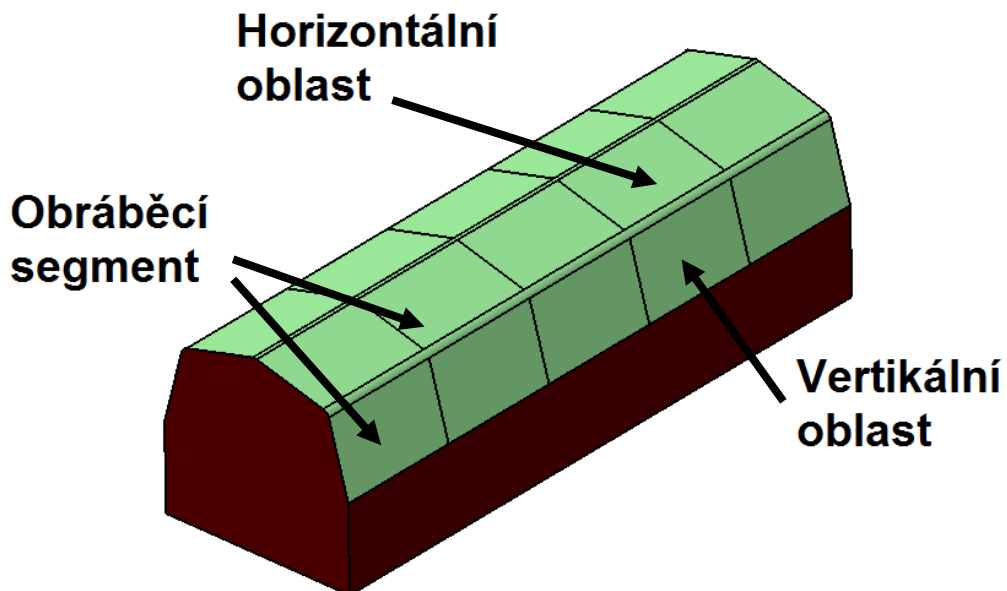
Řezná rychlost pro experiment byla dle doporučení výrobce nástroje zvolena konstantní a to  $v_c=200$  m/min a tím i otáčky nástroje byly konstantní ( $n=5306$  ot/min). Hodnota rychloposuvu byla zvolena 50 m/min. U strategie 3D Offset jsme měnili krok do boku a posuv na zub a u strategie Konstant Z jsme měnili krok v ose Z a posuv na zub. Hodnoty jsme mezi sebou kombinovali. U všech zkoušek jsme chladili olejovou mlhou. Olejová mlha se skládá z oleje Unicut Saw-EP-A4 a vzduchu. Poměr oleje ku vzduchu je 1:500000. Spotřeba oleje za hodinu je 1-5 ml. Krok do boku, krok v ose Z a posuv na zub jsou uvedeny v tabulce 5.

Tab. 5. Řezné podmínky

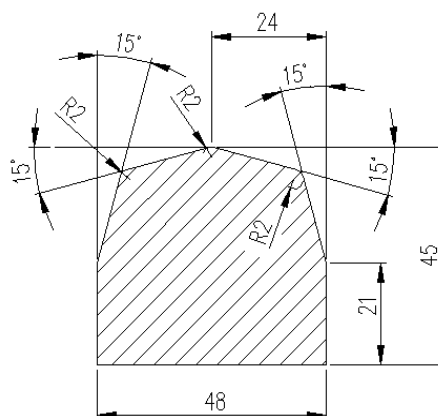
<b><math>n</math></b>	5306 ot/min
<b>krok do boku (<math>a_e</math>)</b>	0,16 mm – 0,25 mm – 0,32 mm – 0,40 mm – 0,60 mm
<b>krok v ose Z (<math>a_p</math>)</b>	0,16 mm – 0,25 mm – 0,32 mm – 0,40 mm – 0,60 mm
<b>posuv na zub (<math>f_z</math>)</b>	0,1 mm – 0,12 mm – 0,135 mm – 0,15 mm – 0,17 mm

## 5.4 Geometrie obrobku

Geometrie obrobku byla zvolena tak, abychom byli schopni implementovat rovinnou obráběcí strategii a strmou strategii. Úhel, který rozděluje tyto strategie je v rozmezí od  $30^\circ$  do  $40^\circ$ . Pro nižší hodnoty se používá rovinné (horizontální) strategie a pro vyšší hodnoty úhlů se používají strmé (vertikální) strategie. Na obrázku 52 je zobrazen tvar modelu, kde zelenou barvou je znázorněna oblast obrábění. Na modelu se nachází dvě horizontální oblasti a dvě vertikální oblasti, kde každá oblast je dále rozdělena na pět segmentů. Každý segment je charakterizován nástrojem, obráběcí strategií, posuvem na zub a krokem do boku (strategie 3D Offset) respektive krokem v ose Z (strategie Konstant Z). Na jednom modelu bylo implementováno 20 obráběcích segmentů. Na obrázku 53 je zobrazen zakótovaný řez součásti (výkres součásti je uveden v příloze P I), kde celková délka součásti byla 148 mm.



Obr. 52. Tvar modelu



Obr. 53 Řez modelem



## 5.5 Materiál obrobku

Pro provedení experimentu byla použita vysoce legovaná nástrojová ocel označena W.Nr. 1.2379, kde podle ČSN se tato ocel značí ČSN 19 573 a podle německé normy DIN je tento materiál značen X153CrMoV12-1. Tato ocel je ledeburická chromová. Tento materiál se vyznačuje dobrou houževnatostí, výbornou kalitelností a prokalitelností, rozměrovou stálostí, vysokou odolností proti opotřebením a deformacím a vysokou pevností v tlaku. Používá se pro vysoce výkonné střížné nástroje na stříhání tvrdších materiálů do tloušťky 10 mm. Chemické složení je uvedeno v tabulce 6, kde hodnoty jsou uvedeny jako hmotnostní složení v procentech. [30]

Tab. 6. Chemické složení ČSN 19573 [29]

C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	W	V	S
1,55 %	0,30 %	0,30 %	12,0 %	0,18 %	0,70 %	0,18 %	0,80 %	0,02 %

Materiál je dodáván ve stavu žíhaném na měkko, kde základní vlastnosti tohoto materiálu jsou uvedeny v tabulce 7.

Tab. 7. Základní vlastnosti materiálu ve stavu žíhaném [29]

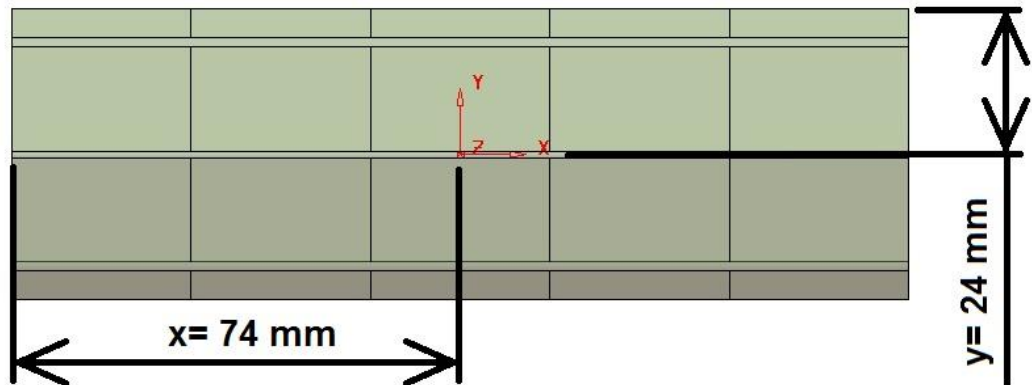
<b>Mez pevnosti R<sub>m</sub></b>	845 MPa
<b>Tvrdość dle Brinella</b>	250 HB
<b>Hustota</b>	7600 kg/m <sup>3</sup>
<b>Tepelná vodivost</b>	20 W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup>
<b>Tepelná roztažnost (při 100°C)</b>	10,5·10 <sup>-6</sup> mm

Díky své výborné kalitelnosti a prokalitelnosti jsme schopni dosáhnout vysoké tvrdosti a pevnosti. Dosažitelná tvrdost je až 63 HRC a pevnost 3100 MPa.

## 5.6 Obráběcí strategie

Pro obrábění byly zvoleny dokončovací strategie 3D Offset a Konstant Z. Strategie 3D Offset je vhodná pro obrábění rovinných oblastí a strategie Konstant Z je vhodná pro strmé plochy. Strategie byly vytvořeny v programu Powermill od firmy Delcam. Nulový bod obrobku (obrázek 54) byl umístěn v rovině XY ve středu součásti a nula v ose Z byla na

základně. Nejdříve se součást vyhrubovala strategií 3D hrubování a poté se implementovaly dokončovací strategie. Obě dokončovací strategie byly vytvořeny v toleranci 0,01 mm.



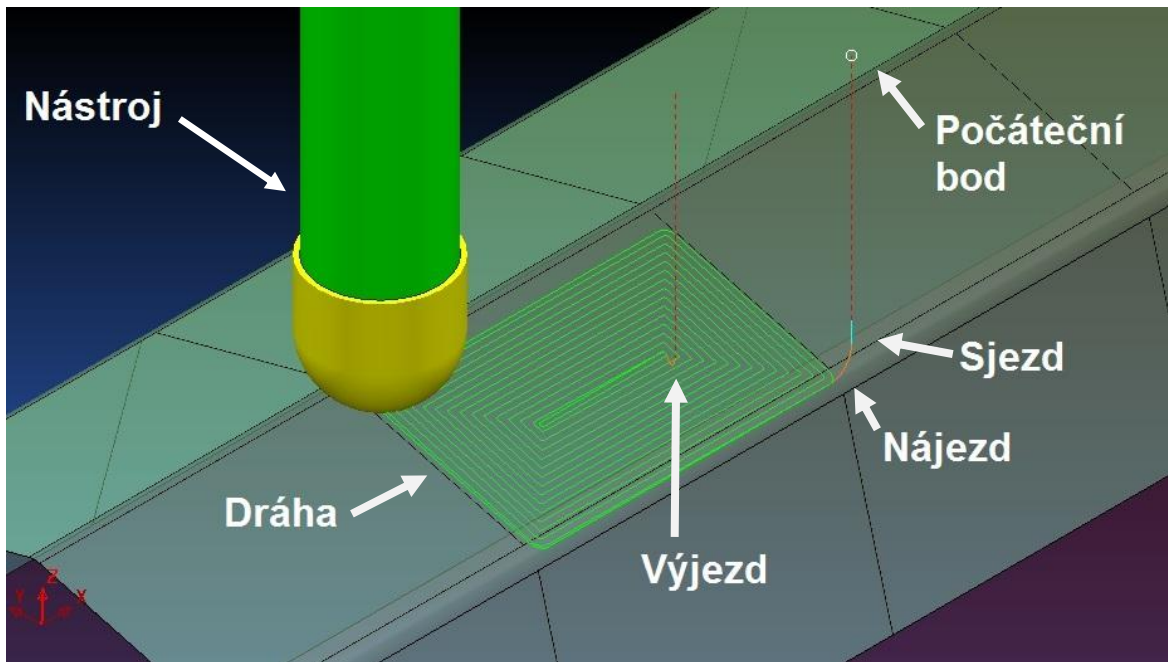
Obr. 54. Umístění nulového bodu obrobku

### 5.6.1 Hrubovací strategie

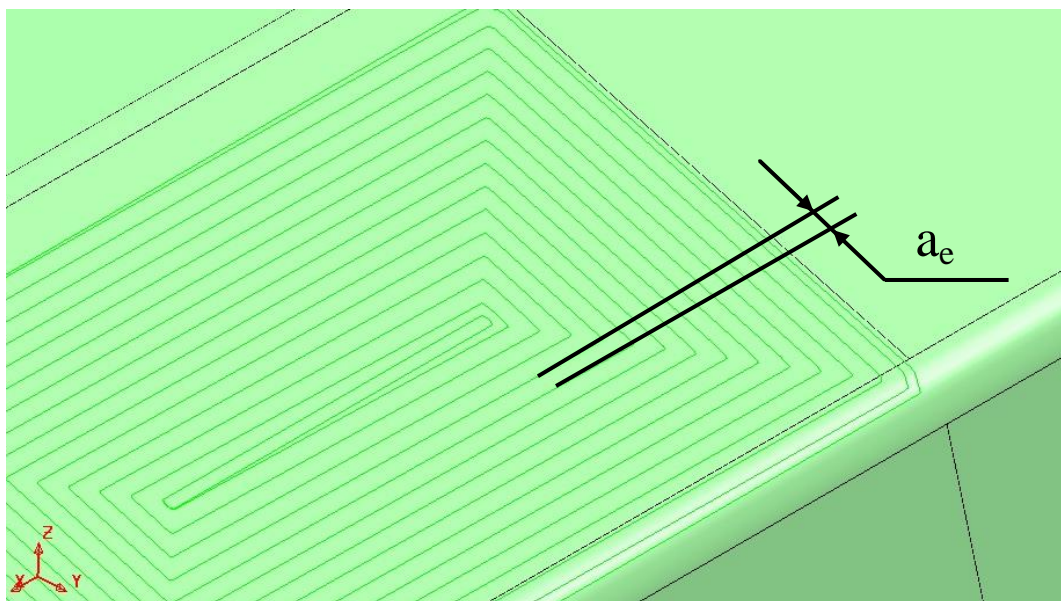
Nejdříve se součást vyhrubovala strategií 3D hrubování s přídatkem 0,3 mm a v toleranci 0,1 mm. Pro hrubování byl použit torický nástroj průměru 12 mm s rádiusem 1,6 mm.

### 5.6.2 Strategie 3D Offset

Obráběcí strategie 3D Offset je vhodná pro dokončování rovinných ploch. Je charakteristická konstantním krokem do boku a spirálou. Schéma této strategie je zobrazeno na obrázku 55, kde dráha nástroje je zobrazena zelenou barvou. Nástroj se pohybuje sousledně. Celková dráha začíná v počátečním bodu, odkud nástroj putuje rychloposuvem do sjezdu. Rychloposuv je znázorněn červenou a sjezd modrou barvou. Rychlost sjezdu je 75 % pracovního posuvu a jeho velikost je 2 mm. Po sjezdu následuje nájezd (oranžová barva), který má stejnou rychlost jako sjezd. U této strategie byl zvolen vertikální nájezd, který je charakteristický obloukem o rádiu 2 mm a úhlem 90°. Po dokončení obrábění následuje výjezd, který má stejné parametry jako nájezd a má také stejnou barvu. Poté nástroj vyjede rychloposuvem do bezpečné vzdálenosti. Na obrázku 56 je zobrazen krok do boku  $a_e$  u strategie 3D Offset.



Obr. 55. Strategie 3D Offset

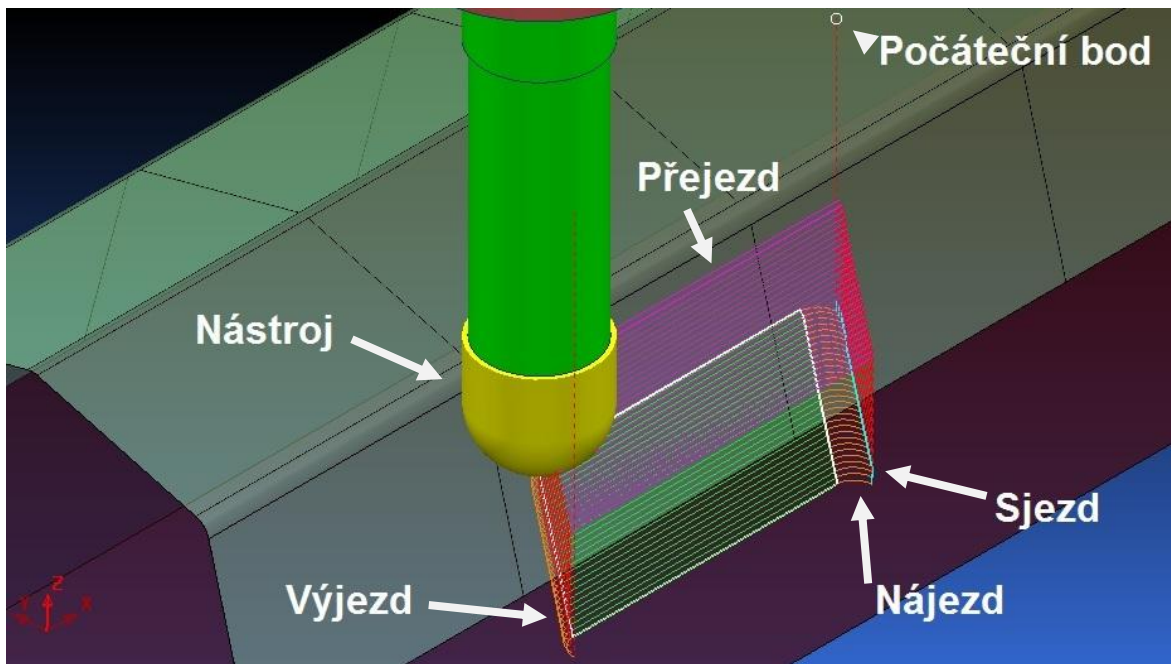


Obr. 56. Krok do boku u strategie 3D Offset

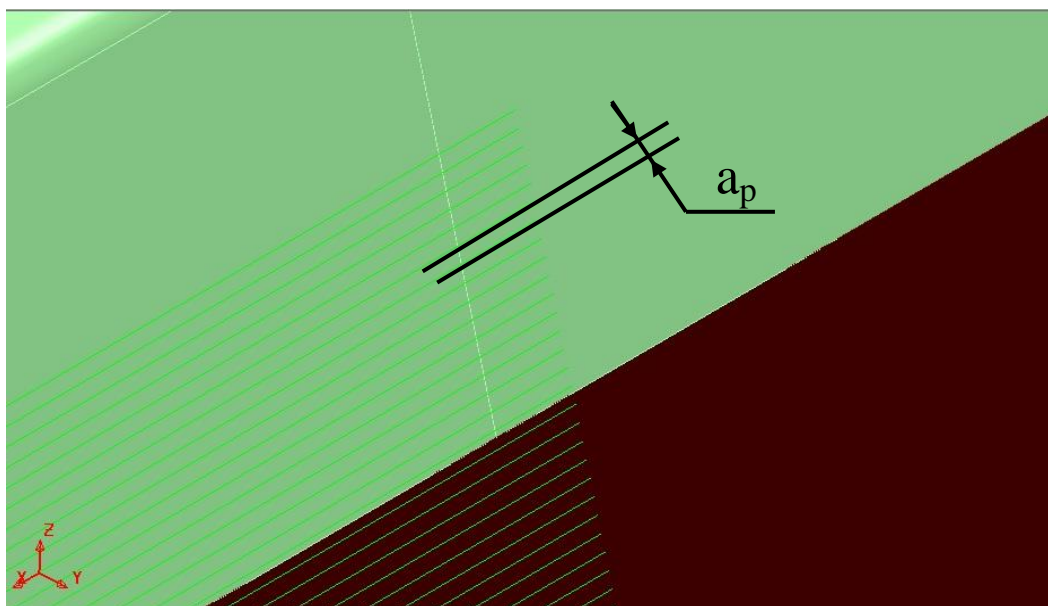
### 5.6.3 Strategie Konstant Z

Obráběcí strategie Konstant Z je vhodná pro dokončování strmých (vertikálních) oblastí. Je charakteristická konstantním krokem v ose Z. Na rovných plochách dráhy nebudou existovat. Schéma této strategie je zobrazeno na obrázku 57, kde dráha nástroje je zobrazena zelenou barvou. Nástroj se pohybuje sousledně. Celková dráha začíná v počátečním bodu, odkud nástroj putuje rychloposuvem (červená barva) do sjezdu (modrá barva). Rychlost sjezdu je 75 % pracovního posuvu a jeho velikost je 2 mm. Po sjezdu následuje nájezd

(oranžová barva), který má stejnou rychlost jako sjezd. U této strategie byl zvolen horizontální nájezd, který je charakteristický obloukem o rádiu 2 mm a úhlem  $90^\circ$ . Po dokončení obrábění následuje výjezd (oranžová barva), který má stejné parametry jako nájezd a nástroj putuje v bezpečné výšce přejezdem (fialová barva) k další dráze, která je posunuta v ose Z o hodnotu zvoleného kroku a postup se opakuje. Rychlost přejezdu je hodnota rychloposuvu. Po obrobení celé oblasti nástroj vyjede rychloposuvem do bezpečné vzdálenosti. Na obrázku 58 je zobrazen krok v ose Z  $a_p$  u strategie Konstant Z.



Obr. 57. Strategie Konstant Z



Obr. 58. Krok v ose Z u strategie Konstant Z

## 5.7 Měřicí přístroj pro určování drsnosti

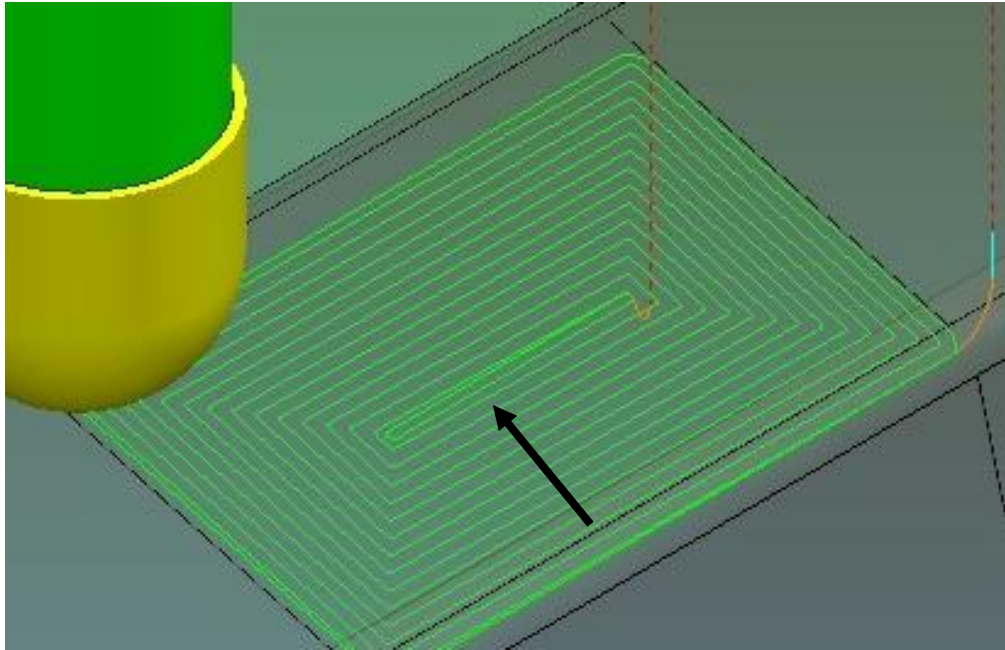
Pro zjišťování drsnosti povrchu byl použit drsnoměr Surftest SJ-210 od výrobce Mitutoyo, který je koncipovaný jako kapesní přístroj s jednoduchým ovládním a velkou precizností měření. Zařízení se skládá ze zobrazovací jednotky, ve které je umístěn přehledný LCD displej a z posuvové jednotky, ve které se nachází snímací hrot. Byla použita standardní posuvová jednotka se snímacím hrotem R 2  $\mu\text{m}$  a vrcholovým úhlem 60° a měřicí silou 0,75 mN. Základní délka byla 0,8 mm a vyhodnocovaná délka byla 4 mm. Na obrázku 59 je zobrazen drsnoměr Surftest SJ-210. [31]



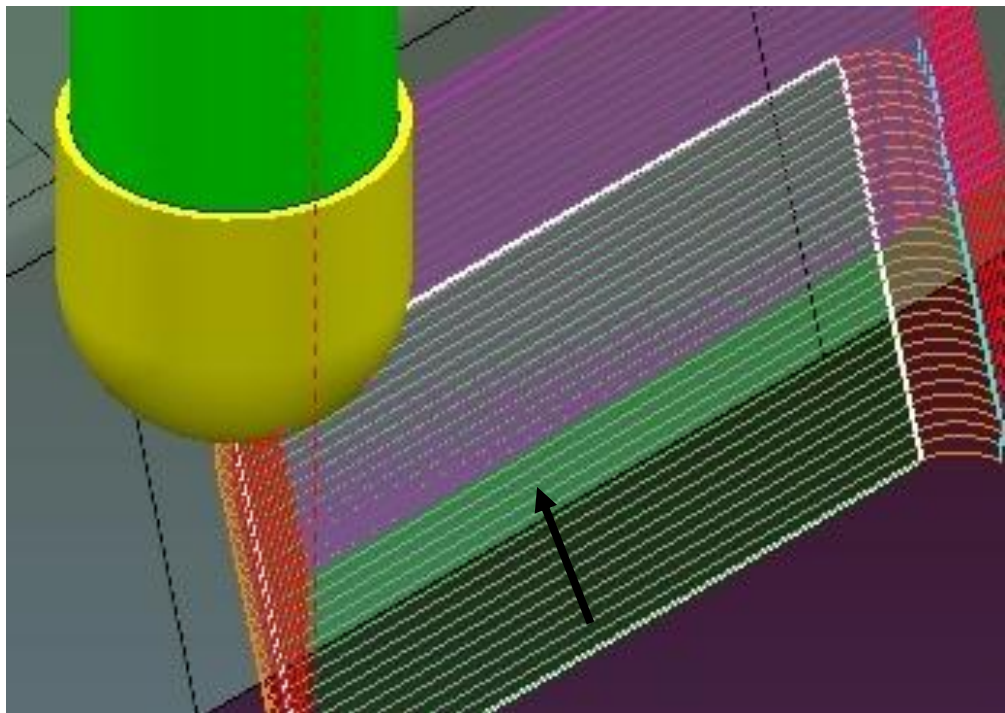
Obr. 59. Drsnoměr Surftest SJ-210 [31]

Na obrázku 60 je zobrazen směr měřicího hrotu u strategie 3D Offset. Směr hrotu byl zvolen příčně na směr dráhy nástroje. Na obrázku 61 je zobrazen směr měřicího hrotu u strategie Konstant Z a směr posuvu hrotu byl také zvolen příčně na směr pohybu nástroje. Tento směr byl zvolen za předpokladu vyššího parametru drsnosti.





*Obr. 60. Směr měřícího hrotu u strategie 3D Offset*



*Obr. 61. Směr měřícího hrotu u strategie Konstant Z*

## 6 NAMĚŘENÁ DATA

Naměřená data, která byla získaná pomocí drsnoměr Mitutoyo SJ-201 byly zpracovány a vyhodnoceny ve statistickém programu Minitab. Byly zvoleny vyhodnocované veličiny, které nejlépe charakterizují kvalitu povrchu obrobené plochy. Následně byly pro tyto parametry zvoleny statistické odhady pro interpretaci kvality povrchu.

Byla zvolena varianta, kde parametr kvality se zjistí na několika specifikovaných místech obrobené plochy zkušebního obrobku a pro statistickou interpretaci se dále pracuje s odhadem střední hodnoty. Na každé charakteristické ploše bylo provedeno celkem 30 měření (naměřená data jsou uvedena v příloze na CD/Přílohy DP/Naměřená a zpracovaná data).

### 6.1 Vyhodnocované veličiny

Mezi sledované veličiny pro posouzení kvality povrchu obrobené plochy byly zvoleny parametry:

- $Ra$  (průměrná aritmetická úchylka),
- $Rz$  (největší výška profilu).

Na každé ploše, která je charakteristická strategií obrábění, krokem do boku ( $a_e$ ,  $a_p$ ) a posuvovou rychlostí, bylo změřeno celkem třicet hodnot parametru  $Ra$  a  $Rz$  a následně tyto hodnoty byly statisticky vyhodnoceny a zpracovány.

### 6.2 Zpracování naměřených dat

Získaná data byla zpracována a vyhodnocena pomocí programu Minitab. Na základě zjištěných parametrů kvality povrchu obrobené plochy na zkušebních obrobkách se stanoví odhad střední hodnoty, odhad směrodatné odchylky a variační koeficient parametru kvality povrchu obrobené plochy (hodnoty variačního koeficientu do 15 % svědčí o malé variabilitě, odhad střední hodnoty je možné považovat za typickou hodnotu datového souboru).

Odhad střední hodnoty parametru kvality povrchu obrobené plochy se vyjádří jako výběrový průměr definovaný vztahem:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i, \quad (10)$$

kde:  $\bar{x}$  – odhad střední hodnoty,

$x_i$  –  $i$ -tá hodnota měřené veličiny,

$n$  – počet měření.

Odhad směrodatné odchyly parametru kvality povrchu obrobené plochy se vyjádří definovaný vztahem:

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}, \quad (11)$$

kde:  $s$  – odhad směrodatné odchyly,

$\bar{x}$  – odhad střední hodnoty,

$x_i$  –  $i$ -tá hodnota měřené veličiny,

$n$  – počet měření.

Variační koeficient parametru kvality povrchu obrobené plochy se vyjádří definovaný vztahem:

$$V = \frac{s}{\bar{x}} \cdot 100\%, \quad (12)$$

kde:  $V$  – variační koeficient,

$s$  – odhad směrodatné odchyly,

$\bar{x}$  – odhad střední hodnoty.

### 6.3 Statistické vyhodnocení naměřených dat

Naměřená data byla zpracována a statisticky vyhodnocena. Z 30 naměřených hodnot byl vypočítaný bodový odhad střední hodnoty, směrodatná odchylyka a variační koeficient. Podle zkoumaného parametru drsnosti, strategie a nástroje byly statistické hodnoty rozděleny do jednotlivých podkapitol.

#### 6.3.1 Statistická interpretace hodnot parametru drsnosti $R_a$ pro strategii 3D Offset a nástroj OK

V tabulce 8 je uveden bodový odhad střední hodnoty drsnosti  $R_a$  v mikrometrech založený na 30 měřeních pro strategii 3D Offset a nástroj označený OK. Nejnižší hodnoty drsnosti  $R_a$  dosáhl krok do boku 0,16 mm a posuv na zub 0,1 mm a nejvyšší hodnoty krok do boku 0,60 mm a posuv na zub 0,17 mm. S rostoucím krokem do boku a posuvem na zub se hodnoty drsnosti  $R_a$  zvětšovaly.



Tab. 8. Odhad střední hodnoty parametru drsnosti  $Ra$  pro 3D Offset a nástroj OK

$Ra$ ( $\mu\text{m}$ )	$a_e=0,16$ mm	$a_e=0,25$ mm	$a_e=0,32$ mm	$a_e=0,40$ mm	$a_e=0,60$ mm
$f_z=0,1$ mm	0,5997	0,6710	0,7499	0,9540	1,3565
$f_z=0,12$ mm	0,6583	0,6904	0,7737	0,9534	1,3688
$f_z=0,135$ mm	0,6764	0,7068	0,8159	0,9944	1,4486
$f_z=0,15$ mm	0,7054	0,7483	0,8439	0,9992	1,4557
$f_z=0,17$ mm	0,7956	0,7849	0,8568	1,0508	1,4869

V tabulce 9 jsou uvedeny hodnoty směrodatné odchylky a variačního koeficientu pro hodnoty drsnosti  $Ra$  pro strategii 3D Offset a nástroj OK. Z tabulky je patrné, že hodnoty směrodatné odchylky a variačního koeficientu jsou nízké. Z toho vyplývá, že odhad střední hodnoty může být použit pro prezentaci výsledků.

Tab. 9. Směrodatná odchylka a variační koeficient pro 3D Offset a nástroj OK ( $Ra$ )

	$a_e=0,16$ mm		$a_e=0,25$ mm		$a_e=0,32$ mm		$a_e=0,40$ mm		$a_e=0,60$ mm	
	$s$ ( $\mu\text{m}$ )	$V$ (%)	$s$ ( $\mu\text{m}$ )	$V$ (%)	$s$ ( $\mu\text{m}$ )	$V$ (%)	$s$ ( $\mu\text{m}$ )	$V$ (%)	$s$ ( $\mu\text{m}$ )	$V$ (%)
$f_z=0,1$ mm	0,0158	2,64	0,0227	3,38	0,0167	2,23	0,0179	1,88	0,0232	1,71
$f_z=0,12$ mm	0,0237	3,59	0,0215	3,11	0,0169	2,18	0,0237	2,48	0,0182	1,33
$f_z=0,135$ mm	0,0196	2,90	0,0223	3,16	0,0278	3,41	0,0152	1,53	0,0195	1,35
$f_z=0,15$ mm	0,0351	4,98	0,0179	2,39	0,0231	2,73	0,0226	2,26	0,0357	2,45
$f_z=0,17$ mm	0,0334	4,20	0,0345	4,39	0,0197	2,29	0,0275	2,62	0,0270	1,82

### 6.3.2 Statistická interpretace hodnot parametru drsnosti $Ra$ pro strategii Konstant Z a nástroj OK

V tabulce 10 je uveden bodový odhad střední hodnoty drsnosti  $Ra$  v mikrometrech založený na 30 měřeních pro strategii Konstant Z a nástroj označený OK. S rostoucím krokem v ose Z a posuvem na zub se hodnoty drsnosti  $Ra$  zvětšovaly.

Tab. 10. Odhad střední hodnoty parametru drsnosti  $Ra$  pro Konstant Z a nástroj OK

$Ra$ ( $\mu\text{m}$ )	$a_p=0,16$ mm	$a_p=0,25$ mm	$a_p=0,32$ mm	$a_p=0,40$ mm	$a_p=0,60$ mm
$f_z=0,1$ mm	0,4671	0,5300	0,6595	0,8077	1,1877
$f_z=0,12$ mm	0,5067	0,5591	0,7458	0,8536	1,3033
$f_z=0,135$ mm	0,5277	0,6726	0,8175	0,9314	1,3551
$f_z=0,15$ mm	0,6452	0,7965	0,8842	0,9634	1,4203
$f_z=0,17$ mm	0,7565	0,9512	0,9605	0,9842	1,4759

V tabulce 11 jsou uvedeny hodnoty směrodatné odchylky a variačního koeficientu pro hodnoty drsnosti  $Ra$  pro strategii Konstant Z a nástroj OK. Z tabulky je patrné, že hodnoty směrodatné odchylky a variačního koeficientu jsou nízké. Z toho vyplývá, že odhad střední hodnoty může být použit pro prezentaci výsledků.

Tab. 11. Směrodatná odchylka a variační koeficient pro Konstant Z a nástroj OK ( $Ra$ )

	$a_p=0,16$ mm		$a_p=0,25$ mm		$a_p=0,32$ mm		$a_p=0,40$ mm		$a_p=0,60$ mm	
	$s$ ( $\mu\text{m}$ )	$V$ (%)	$s$ ( $\mu\text{m}$ )	$V$ (%)	$s$ ( $\mu\text{m}$ )	$V$ (%)	$s$ ( $\mu\text{m}$ )	$V$ (%)	$s$ ( $\mu\text{m}$ )	$V$ (%)
$f_z=0,1$ mm	0,0229	4,91	0,0158	2,98	0,0264	4,00	0,0224	2,77	0,0465	3,91
$f_z=0,12$ mm	0,0315	6,21	0,0265	4,73	0,0268	3,60	0,0179	2,10	0,0290	2,22
$f_z=0,135$ mm	0,0238	4,52	0,0267	3,98	0,0352	4,30	0,0173	1,86	0,0264	1,94
$f_z=0,15$ mm	0,0219	3,40	0,0298	3,74	0,0229	2,59	0,0174	1,80	0,0281	1,98
$f_z=0,17$ mm	0,0192	2,54	0,0317	3,33	0,0243	2,53	0,0177	1,70	0,0244	1,65

### 6.3.3 Statistická interpretace hodnot parametru drsnosti $Ra$ pro strategii 3D Offset a nástroj KK

V tabulce 12 je uveden bodový odhad střední hodnoty drsnosti  $Ra$  v mikrometrech založený na 30 měřeních pro strategii 3D Offset a nástroj označený KK. Nejnižší hodnoty drsnosti  $Ra$  dosáhl krok do boku 0,16 mm a posuv na zub 0,1 mm. Nejvyšší hodnoty dosáhl krok do boku 0,60 mm a posuv na zub 0,17 mm. S rostoucím krokem do boku a posuvem na zub se hodnoty drsnosti  $Ra$  zvětšovaly.

Tab. 12. Odhad střední hodnoty parametru drsnosti  $Ra$  pro 3D Offset a nástroj KK

$Ra$ ( $\mu\text{m}$ )	$a_e=0,16$ mm	$a_e=0,25$ mm	$a_e=0,32$ mm	$a_e=0,40$ mm	$a_e=0,60$ mm
$f_z=0,1$ mm	0,4733	0,5849	0,6711	0,8070	1,3855
$f_z=0,12$ mm	0,4931	0,5916	0,6840	0,8537	1,4514
$f_z=0,135$ mm	0,5079	0,6006	0,7254	0,8970	1,5085
$f_z=0,15$ mm	0,5605	0,6952	0,7439	0,9063	1,5592
$f_z=0,17$ mm	0,6548	0,7588	0,7758	0,9704	1,5904

V tabulce 13 jsou uvedeny hodnoty směrodatné odchylky a variačního koeficientu pro hodnoty drsnosti  $Ra$  pro strategii 3D Offset a nástroj KK. Z tabulky je patrné, že hodnoty směrodatné odchylky a variačního koeficientu jsou nízké. Z toho vyplývá, že odhad střední hodnoty může být použit pro prezentaci výsledků.

Tab. 13. Směrodatná odchylka a variační koeficient pro 3D Offset a nástroj KK ( $R_a$ )

	$a_e=0,16$ mm		$a_e=0,25$ mm		$a_e=0,32$ mm		$a_e=0,40$ mm		$a_e=0,60$ mm	
	$s$ ( $\mu\text{m}$ )	$V$ (%)	$s$ ( $\mu\text{m}$ )	$V$ (%)	$s$ ( $\mu\text{m}$ )	$V$ (%)	$s$ ( $\mu\text{m}$ )	$V$ (%)	$s$ ( $\mu\text{m}$ )	$V$ (%)
$f_z=0,1$ mm	0,0204	4,31	0,0270	4,62	0,0135	2,01	0,0168	2,08	0,0216	1,56
$f_z=0,12$ mm	0,0177	3,58	0,0312	5,28	0,0135	1,98	0,0169	1,97	0,0228	1,57
$f_z=0,135$ mm	0,0236	4,65	0,0271	4,50	0,0165	2,28	0,0240	2,68	0,0203	1,34
$f_z=0,15$ mm	0,0208	3,71	0,0225	3,23	0,0141	1,90	0,0188	2,08	0,0232	1,49
$f_z=0,17$ mm	0,0270	4,12	0,0197	2,59	0,0198	2,55	0,0180	1,85	0,0175	1,10

### 6.3.4 Statistická interpretace hodnot parametru drsnosti $R_a$ pro strategii Konstant Z a nástroj KK

V tabulce 14 je uveden bodový odhad střední hodnoty drsnosti  $R_a$  v mikrometrech založený na 30 měřeních pro strategii Konstant Z a nástroj označený KK. S rostoucím krokem v ose Z a posuvem na zub se hodnoty drsnosti  $R_a$  zvětšovaly.

Tab. 14. Odhad střední hodnoty parametru drsnosti  $R_a$  pro Konstant Z a nástroj KK

$R_a$ ( $\mu\text{m}$ )	$a_p=0,16$ mm	$a_p=0,25$ mm	$a_p=0,32$ mm	$a_p=0,40$ mm	$a_p=0,60$ mm
$f_z=0,1$ mm	0,6175	0,7013	0,9603	1,3067	1,8723
$f_z=0,12$ mm	0,6540	0,7717	0,9726	1,3549	1,9477
$f_z=0,135$ mm	0,7625	0,8049	1,0054	1,4372	2,0230
$f_z=0,15$ mm	0,7999	0,8145	1,0378	1,4574	2,0819
$f_z=0,17$ mm	1,0648	1,1087	1,1156	1,4928	2,1288

V tabulce 15 jsou uvedeny hodnoty směrodatné odchylky a variačního koeficientu pro hodnoty drsnosti  $R_a$  pro strategii Konstant Z a nástroj KK. Z tabulky je patrné, že hodnoty směrodatné odchylky a variačního koeficientu jsou nízké. Z toho vyplývá, že odhad střední hodnoty může být použit pro prezentaci výsledků.

Tab. 15. Směrodatná odchylka a variační koeficient pro Konstant Z a nástroj KK ( $R_a$ )

	$a_p=0,16$ mm		$a_p=0,25$ mm		$a_p=0,32$ mm		$a_p=0,40$ mm		$a_p=0,60$ mm	
	$s$ ( $\mu\text{m}$ )	$V$ (%)	$s$ ( $\mu\text{m}$ )	$V$ (%)	$s$ ( $\mu\text{m}$ )	$V$ (%)	$s$ ( $\mu\text{m}$ )	$V$ (%)	$s$ ( $\mu\text{m}$ )	$V$ (%)
$f_z=0,1$ mm	0,0222	3,60	0,0169	2,40	0,0201	2,09	0,0225	1,72	0,0235	1,25
$f_z=0,12$ mm	0,0218	3,33	0,0252	3,26	0,0242	2,49	0,0272	2,01	0,0198	1,02
$f_z=0,135$ mm	0,0254	3,33	0,0338	4,20	0,0204	2,03	0,0209	1,46	0,0426	2,10
$f_z=0,15$ mm	0,0244	3,05	0,0320	3,92	0,0181	1,75	0,0219	1,50	0,0453	2,18
$f_z=0,17$ mm	0,0405	3,80	0,0446	4,02	0,0339	3,04	0,0209	1,40	0,0488	2,29

### 6.3.5 Statistická interpretace hodnot parametru drsnosti $R_z$ pro strategii 3D Offset a nástroj OK

V tabulce 16 je uveden bodový odhad střední hodnoty drsnosti  $R_z$  v mikrometrech založený na 30 měřeních pro strategii 3D Offset a nástroj označený OK. Z tabulky je patrné, že s rostoucím krokem do boku a posuvem na zub se hodnoty drsnosti  $R_z$  zvětšovaly.

Tab. 16. Odhad střední hodnoty parametru drsnosti  $R_z$  pro 3D Offset a nástroj OK

$R_z$ ( $\mu\text{m}$ )	$a_e=0,16$ mm	$a_e=0,25$ mm	$a_e=0,32$ mm	$a_e=0,40$ mm	$a_e=0,60$ mm
$f_z=0,1$ mm	4,1216	4,5738	4,9293	6,2147	7,3395
$f_z=0,12$ mm	4,3533	4,7080	5,1478	6,2737	7,4256
$f_z=0,135$ mm	4,6742	4,7604	5,3978	6,5140	7,6840
$f_z=0,15$ mm	4,9028	5,0187	5,4255	6,5282	8,0636
$f_z=0,17$ mm	5,1627	5,3017	5,4706	6,5939	8,1682

V tabulce 17 jsou uvedeny hodnoty směrodatné odchylky a variačního koeficientu pro hodnoty drsnosti  $R_z$  pro strategii 3D Offset a nástroj OK. Z tabulky je patrné, že hodnoty směrodatné odchylky a variačního koeficientu jsou nízké. Z toho vyplývá, že odhad střední hodnoty může být použit pro prezentaci výsledků.

Tab. 17. Směrodatná odchylka a variační koeficient pro 3D Offset a nástroj OK ( $R_z$ )

	$a_e=0,16$ mm		$a_e=0,25$ mm		$a_e=0,32$ mm		$a_e=0,40$ mm		$a_e=0,60$ mm	
	$s$ ( $\mu\text{m}$ )	$V$ (%)	$s$ ( $\mu\text{m}$ )	$V$ (%)	$s$ ( $\mu\text{m}$ )	$V$ (%)	$s$ ( $\mu\text{m}$ )	$V$ (%)	$s$ ( $\mu\text{m}$ )	$V$ (%)
$f_z=0,1$ mm	0,3874	9,40	0,3121	6,82	0,1374	2,79	0,3400	5,47	0,3495	4,76
$f_z=0,12$ mm	0,2447	5,62	0,3269	6,94	0,2211	4,30	0,2844	4,53	0,3600	4,85
$f_z=0,135$ mm	0,4313	9,23	0,2847	5,98	0,2725	5,05	0,3912	6,01	0,4316	5,62
$f_z=0,15$ mm	0,3704	7,55	0,3663	7,30	0,1546	2,85	0,3856	5,91	0,2818	3,49
$f_z=0,17$ mm	0,3690	7,10	0,4606	8,69	0,2723	4,98	0,3115	4,72	0,3490	4,27

### 6.3.6 Statistická interpretace hodnot parametru drsnosti $R_z$ pro strategii Konstant Z a nástroj OK

V tabulce 18 je uveden bodový odhad střední hodnoty drsnosti  $R_z$  v mikrometrech založený na 30 měřeních pro strategii Konstant Z a nástroj označený OK. S rostoucím krokem v ose Z a posuvem na zub se hodnoty drsnosti  $R_z$  zvětšovaly.

Tab. 18. Odhad střední hodnoty parametru drsnosti  $R_z$  pro Konstant Z a nástroj OK

$R_z$ ( $\mu\text{m}$ )	$a_p=0,16$ mm	$a_p=0,25$ mm	$a_p=0,32$ mm	$a_p=0,40$ mm	$a_p=0,60$ mm
$f_z=0,1$ mm	2,6320	2,9549	3,3475	3,9664	6,1013
$f_z=0,12$ mm	2,8317	3,0165	4,0646	4,2954	6,3399
$f_z=0,135$ mm	3,0891	3,5014	4,1560	4,3145	6,3757
$f_z=0,15$ mm	3,4339	4,0571	4,4191	4,5888	6,6057
$f_z=0,17$ mm	4,2032	4,6256	4,6435	4,9040	6,6997

V tabulce 19 jsou uvedeny hodnoty směrodatné odchylky a variačního koeficientu pro hodnoty drsnosti  $R_z$  pro strategii Konstant Z a nástroj OK. Z tabulky je patrné, že hodnoty směrodatné odchylky a variačního koeficientu jsou nízké. Z toho vyplývá, že odhad střední hodnoty může být použit pro prezentaci výsledků.

Tab. 19. Směrodatná odchylka a variační koeficient pro Konstant Z a nástroj OK ( $R_z$ )

	$a_p=0,16$ mm		$a_p=0,25$ mm		$a_p=0,32$ mm		$a_p=0,40$ mm		$a_p=0,60$ mm	
	$s$ ( $\mu\text{m}$ )	$V$ (%)	$s$ ( $\mu\text{m}$ )	$V$ (%)	$s$ ( $\mu\text{m}$ )	$V$ (%)	$s$ ( $\mu\text{m}$ )	$V$ (%)	$s$ ( $\mu\text{m}$ )	$V$ (%)
$f_z=0,1$ mm	0,1882	7,15	0,1847	6,25	0,1706	5,10	0,1597	4,03	0,2884	4,73
$f_z=0,12$ mm	0,1443	5,09	0,2859	9,48	0,3635	8,94	0,2708	6,30	0,2467	3,89
$f_z=0,135$ mm	0,3072	9,95	0,1964	5,61	0,2775	6,68	0,2188	5,07	0,2658	4,17
$f_z=0,15$ mm	0,1858	5,41	0,2693	6,64	0,2496	5,65	0,2357	5,14	0,1919	2,91
$f_z=0,17$ mm	0,2124	5,05	0,2498	5,40	0,2153	4,64	0,3313	6,76	0,2231	3,33

### 6.3.7 Statistická interpretace hodnot parametru drsnosti $R_z$ pro strategii 3D Offset a nástroj KK

V tabulce 20 je uveden bodový odhad střední hodnoty drsnosti  $R_z$  v mikrometrech založený na 30 měřeních pro strategii 3D Offset a nástroj označený KK. Nejnižší hodnoty drsnosti  $R_z$  dosáhl krok do boku 0,16 mm a posuv na zub 0,1 mm. Nejvyšší hodnoty dosáhl krok do boku 0,60 mm a posuv na zub 0,17 mm.

Tab. 20. Odhad střední hodnoty parametru drsnosti  $R_z$  pro 3D Offset a nástroj KK

$R_z$ ( $\mu\text{m}$ )	$a_e=0,16$ mm	$a_e=0,25$ mm	$a_e=0,32$ mm	$a_e=0,40$ mm	$a_e=0,60$ mm
$f_z=0,1$ mm	3,7821	4,3693	4,5767	4,9269	7,5499
$f_z=0,12$ mm	4,0402	4,3748	4,6480	5,0768	7,5326
$f_z=0,135$ mm	4,1399	4,5395	4,9493	5,3571	7,6840
$f_z=0,15$ mm	4,4367	4,6640	5,0966	5,3789	7,6805
$f_z=0,17$ mm	4,9370	5,1050	5,8173	6,0750	8,0073

V tabulce 21 jsou uvedeny hodnoty směrodatné odchylky a variačního koeficientu pro hodnoty drsnosti  $R_z$  pro strategii 3D Offset a nástroj KK. Z tabulky je patrné, že hodnoty směrodatné odchylky a variačního koeficientu jsou malé. Z toho vyplývá, že odhad střední hodnoty může být použit pro prezentaci výsledků.

Tab. 21. Směrodatná odchylka a variační koeficient pro 3D Offset a nástroj KK ( $R_z$ )

	$a_e=0,16$ mm		$a_e=0,25$ mm		$a_e=0,32$ mm		$a_e=0,40$ mm		$a_e=0,60$ mm	
	$s$ ( $\mu\text{m}$ )	$V$ (%)	$s$ ( $\mu\text{m}$ )	$V$ (%)	$s$ ( $\mu\text{m}$ )	$V$ (%)	$s$ ( $\mu\text{m}$ )	$V$ (%)	$s$ ( $\mu\text{m}$ )	$V$ (%)
$f_z=0,1$ mm	0,3849	10,18	0,2317	5,30	0,3520	7,69	0,1646	3,34	0,2271	3,01
$f_z=0,12$ mm	0,3873	9,59	0,2380	5,44	0,2936	6,32	0,1720	3,39	0,3405	4,52
$f_z=0,135$ mm	0,3164	7,64	0,2986	6,58	0,2994	6,05	0,2261	4,22	0,4316	5,62
$f_z=0,15$ mm	0,4421	9,96	0,2757	5,91	0,4063	7,97	0,2447	4,55	0,2939	3,83
$f_z=0,17$ mm	0,3013	6,10	0,2841	5,56	0,3345	5,75	0,3455	5,69	0,2843	3,55

### 6.3.8 Statistická interpretace hodnot parametru drsnosti $R_z$ pro strategii Konstant Z a nástroj KK

V tabulce 22 je uveden bodový odhad střední hodnoty drsnosti  $R_z$  v mikrometrech založený na 30 měřeních pro strategii Konstant Z a nástroj označený KK. Z tabulky je zřejmé, že s rostoucím krokem v ose Z a posuvem na zub se hodnoty drsnosti  $R_z$  zvětšovaly.

Tab. 22. Odhad střední hodnoty parametru drsnosti  $R_z$  pro Konstant Z a nástroj KK

$R_z$ ( $\mu\text{m}$ )	$a_p=0,16$ mm	$a_p=0,25$ mm	$a_p=0,32$ mm	$a_p=0,40$ mm	$a_p=0,60$ mm
$f_z=0,1$ mm	3,9800	4,1667	4,5389	6,1207	9,1223
$f_z=0,12$ mm	4,1567	4,5765	4,9331	6,4245	9,0770
$f_z=0,135$ mm	4,7289	4,8615	4,9676	6,4411	9,2048
$f_z=0,15$ mm	5,0628	5,1351	5,5590	6,5021	9,2325
$f_z=0,17$ mm	5,1653	5,4588	6,2136	6,5195	9,2613

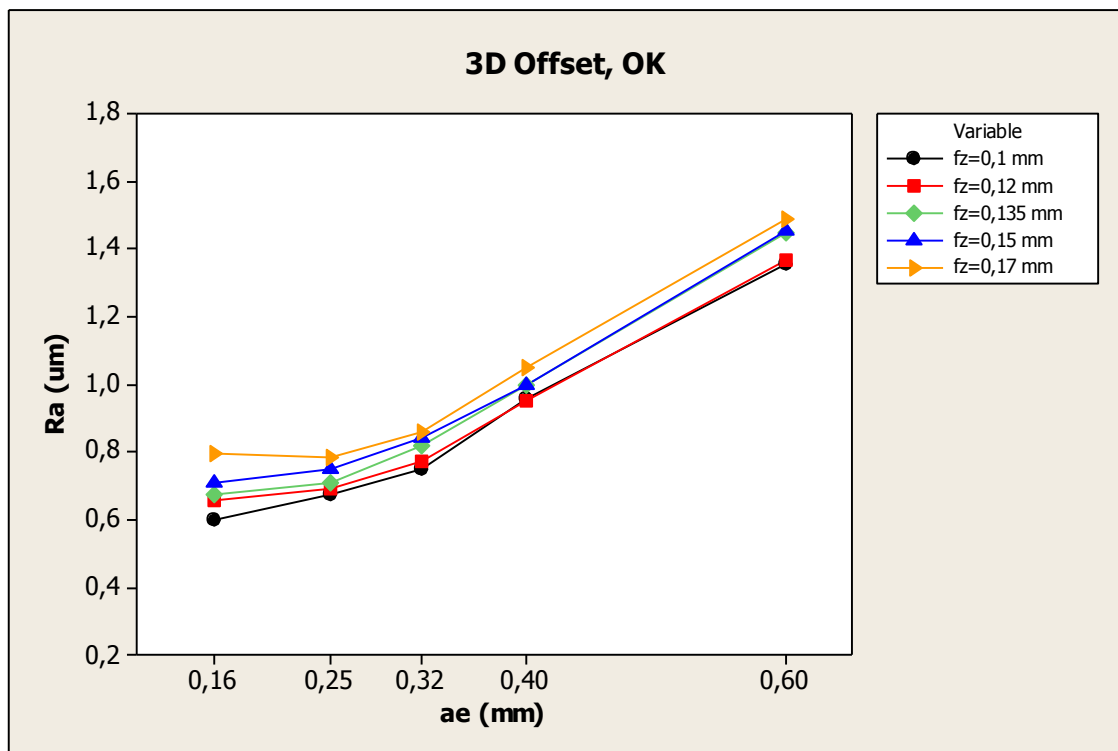
V tabulce 23 jsou uvedeny hodnoty směrodatné odchylky a variačního koeficientu pro hodnoty drsnosti  $R_z$  pro strategii Konstant Z a nástroj KK. Z tabulky je patrné, že hodnoty směrodatné odchylky a variačního koeficientu jsou malé. Z toho vyplývá, že odhad střední hodnoty může být použit pro prezentaci výsledků.

Tab. 23. Směrodatná odchylka a variační koeficient pro Konstant Z a nástroj KK ( $R_z$ )

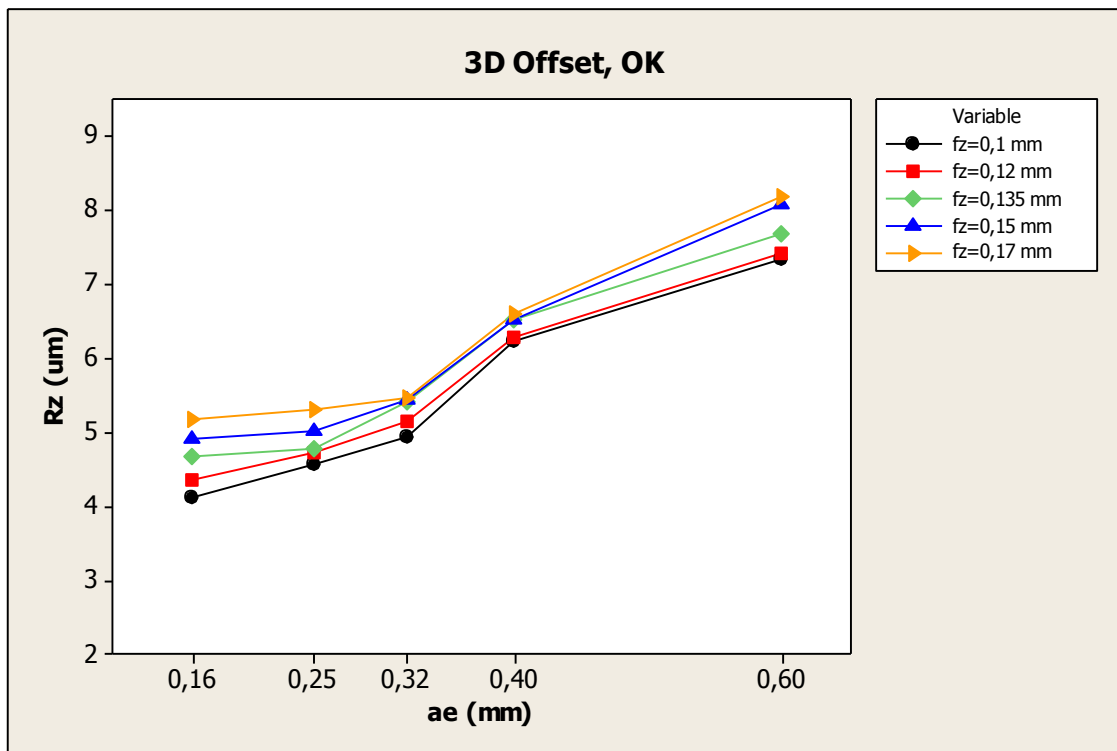
	$a_p=0,16$ mm		$a_p=0,25$ mm		$a_p=0,32$ mm		$a_p=0,40$ mm		$a_p=0,60$ mm	
	$s$ ( $\mu\text{m}$ )	$V$ (%)	$s$ ( $\mu\text{m}$ )	$V$ (%)	$s$ ( $\mu\text{m}$ )	$V$ (%)	$s$ ( $\mu\text{m}$ )	$V$ (%)	$s$ ( $\mu\text{m}$ )	$V$ (%)
$f_z=0,1$ mm	0,1590	4,00	0,2200	5,28	0,1703	3,75	0,1977	3,23	0,2833	3,11
$f_z=0,12$ mm	0,2199	5,29	0,2452	5,36	0,1950	3,95	0,2035	3,17	0,3147	3,47
$f_z=0,135$ mm	0,3660	7,74	0,2374	4,88	0,1762	3,55	0,1554	2,41	0,3793	4,12
$f_z=0,15$ mm	0,2851	5,63	0,1348	2,62	0,4415	7,94	0,2504	3,85	0,2862	3,10
$f_z=0,17$ mm	0,2477	4,79	0,1562	2,86	0,5016	8,07	0,2252	3,45	0,3236	3,49

#### 6.4 Vliv kroku do boku na parametry drsnosti povrchu

Na obrázku 62 je zobrazen vliv kroku do boku na drsnost povrchu pro použitou strategii 3D Offset a nástroj s označením OK. Dále je na obrázku zobrazeno barevné rozlišení posuvu na zub. Z obrázku je patrné, že při zvětšujícím se kroku do boku se drsnost  $R_a$  zvětšuje, neboli se zhoršuje kvalita povrchu. Pro krok do boku 0,16 mm je drsnost  $R_a$  od 0,6  $\mu\text{m}$  do 0,8  $\mu\text{m}$  pro všechny posuvy na zub. Nejvyšší drsnost  $R_a$  je pro krok do boku 0,60 mm a je v rozmezí od 1,35  $\mu\text{m}$  do 1,48  $\mu\text{m}$ . Z obrázku je patrné, že při zvětšujícím se posuvu na zub se drsnost  $R_a$  nepatrně zvětšuje.

Obr. 62. Závislost drsnosti  $R_a$  na kroku do boku pro strategii 3D Offset a nástroj OK

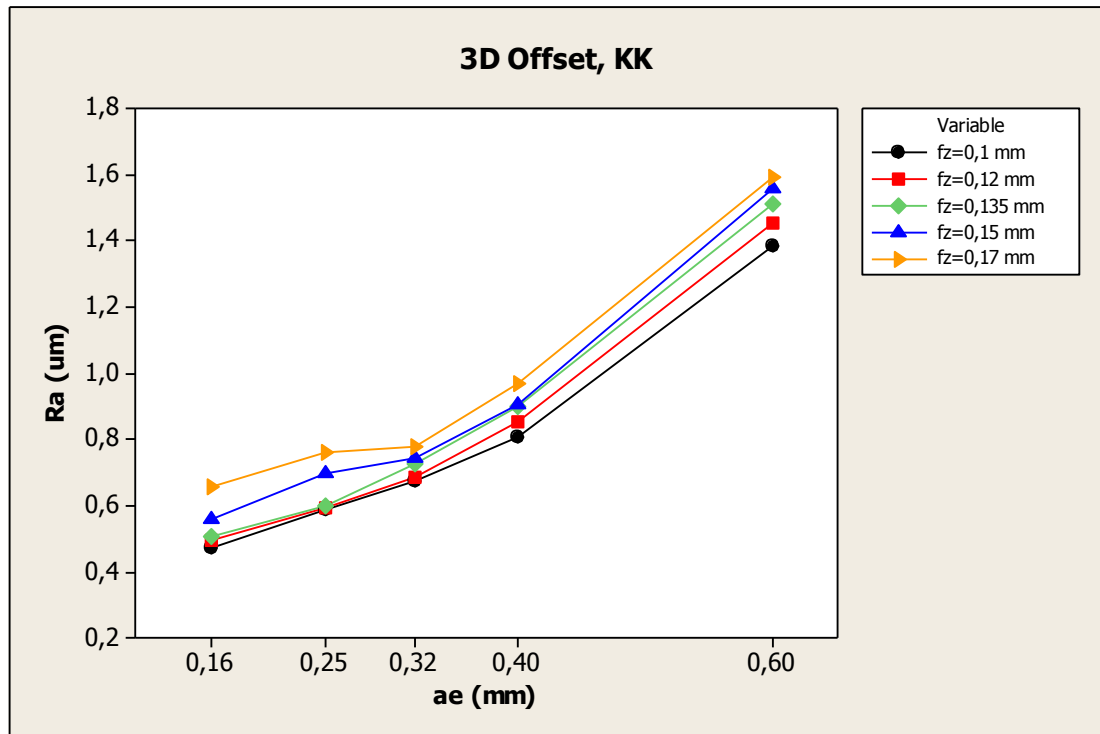
Na obrázku 63 je zobrazen vliv kroku do boku na drsnost povrchu pro použitou strategii 3D Offset a nástroj s označením OK. Dále je na obrázku zobrazeno barevné rozlišení posuvu na zub. Z obrázku je patrné, že při zvětšujícím se kroku do boku se drsnost  $R_z$  zvětšuje. Pro krok do boku 0,16 mm je drsnost  $R_z$  od 4,12  $\mu\text{m}$  do 5,16  $\mu\text{m}$  pro všechny posuvy na zub. Nejvyšší drsnost  $R_z$  je pro krok do boku 0,60 mm a je v rozmezí od 7,33  $\mu\text{m}$  do 8,16  $\mu\text{m}$ . Z obrázku je také patrné, že při zvětšujícím se posuvu na zub se drsnost  $R_z$  nepatrně zvětšuje.



Obr. 63. Závislost drsnosti  $R_z$  na kroku do boku pro strategii 3D Offset a nástroj OK

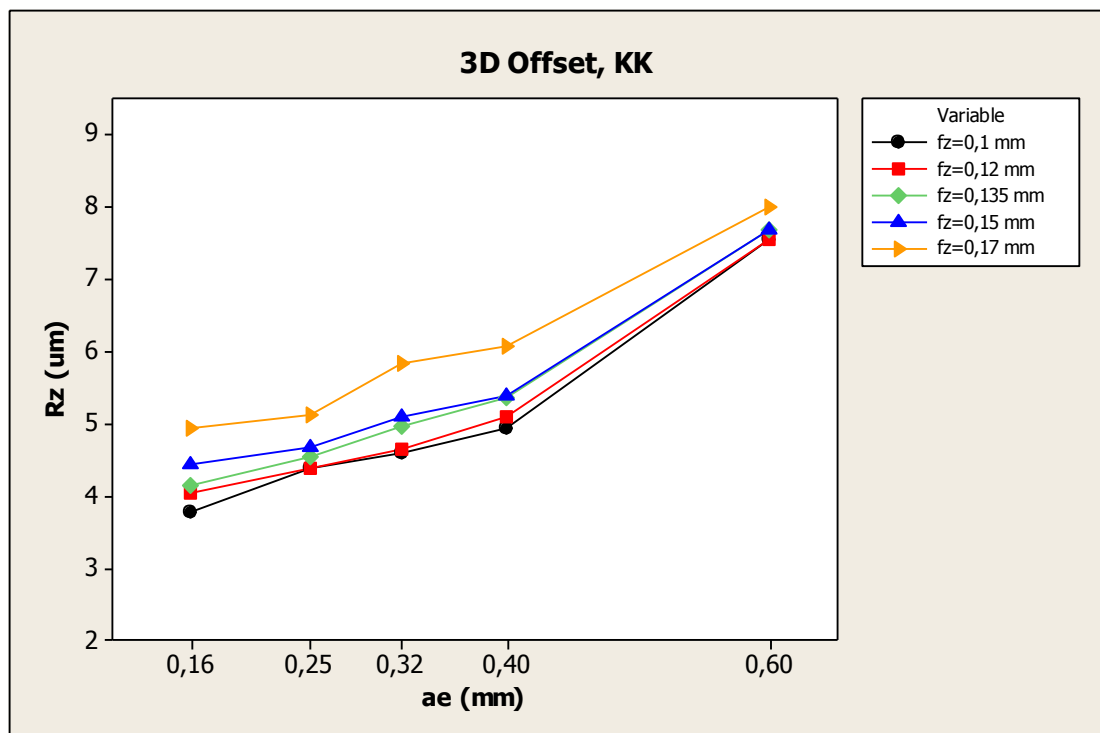
Na obrázku 64 je zobrazen vliv kroku do boku na drsnost povrchu pro použitou strategii 3D Offset a nástroj s označením KK. Dále je na obrázku zobrazeno barevné rozlišení posuvu na zub. Z obrázku je patrné, že při zvětšujícím se kroku do boku se drsnost  $R_a$  zvětšuje, neboli se zhoršuje kvalita povrchu. Pro krok do boku 0,16 mm je drsnost  $R_a$  od 0,47  $\mu\text{m}$  do 0,65  $\mu\text{m}$  pro všechny posuvy na zub. Nejvyšší drsnost  $R_a$  je pro krok do boku 0,60 mm a je v rozmezí od 1,38  $\mu\text{m}$  do 1,59  $\mu\text{m}$ . Z obrázku je patrné, že při zvětšujícím se posuvu na zub se drsnost  $R_a$  nepatrně zvětšuje.





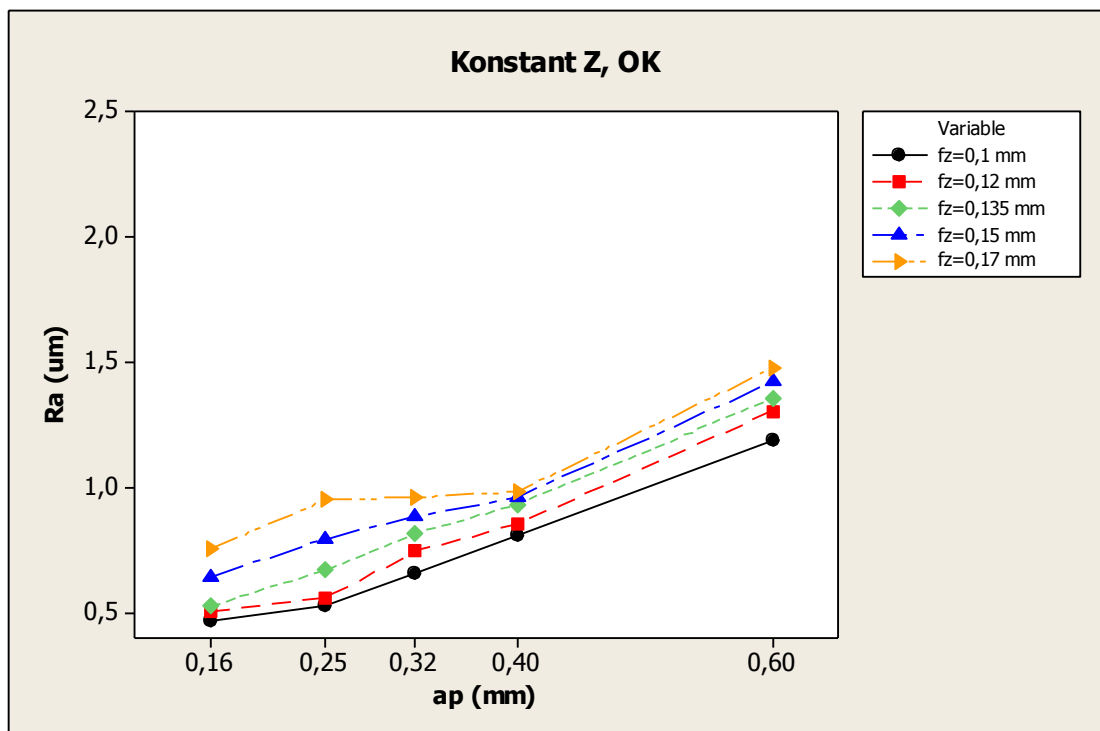
Obr. 64. Závislost drsnosti Ra na kroku do boku pro strategii 3D Offset a nástroj KK

Na obrázku 65 je zobrazen vliv kroku do boku na drsnost povrchu pro použitou strategii 3D Offset a nástroj s označením KK. Dále je na obrázku zobrazeno barevné rozlišení posuvu na zub. Při zvětšujícím se kroku do boku se drsnost  $R_z$  zvětšuje.



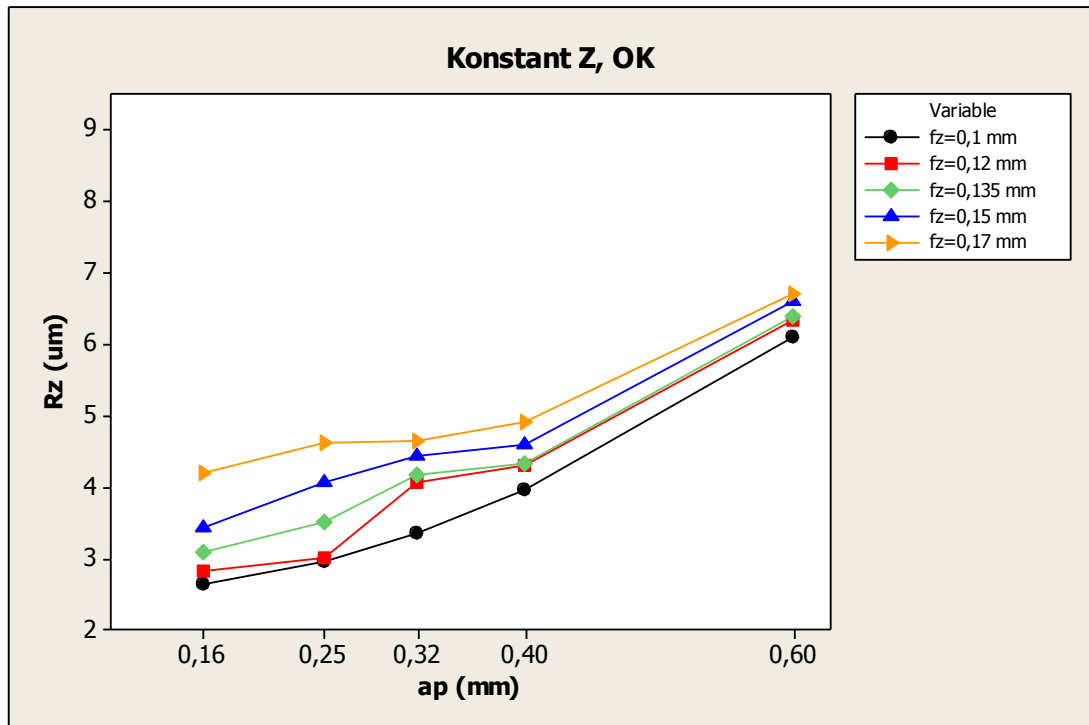
Obr. 65. Závislost drsnosti Rz na kroku do boku pro strategii 3D Offset a nástroj KK

Na obrázku 66 je zobrazen vliv kroku v ose Z na drsnost povrchu pro použitou strategii Konstant Z a nástroj s označením OK. Dále je na obrázku zobrazeno barevné rozlišení posuvu na zub. Z obrázku je patrné, že při zvětšujícím se kroku do boku se drsnost  $R_a$  zvětšuje (zhoršuje kvalita povrchu). Pro krok v ose Z 0,16 mm je drsnost  $R_a$  od 0,47  $\mu\text{m}$  do 0,65  $\mu\text{m}$  pro všechny posuvy na zub. Nejvyšší drsnost  $R_a$  je pro krok v ose Z 0,60 mm a je v rozmezí od 1,38  $\mu\text{m}$  do 1,59  $\mu\text{m}$ . Při zvětšujícím se posuvu na zub se drsnost již znatelně projevuje a to zejména u kroku do boku 0,25 mm.



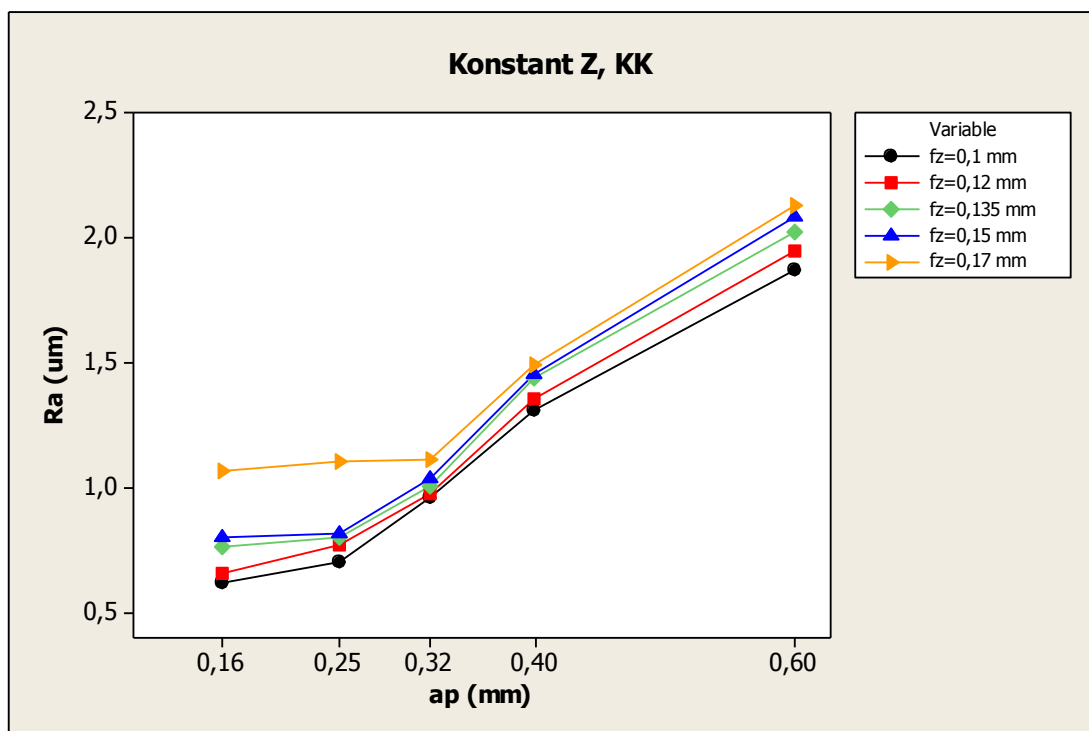
Obr. 66. Závislost drsnosti  $R_a$  na kroku v ose Z pro strategii Konstant Z a nástroj OK

Na obrázku 67 je zobrazen vliv kroku v ose Z na drsnost povrchu pro použitou strategii Konstant Z a nástroj s označením OK. Dále je na obrázku zobrazeno barevné rozlišení posuvu na zub. Z obrázku je patrné, že při zvětšujícím se kroku v ose Z se drsnost  $R_z$  zvětšuje (zhoršuje kvalita povrchu). Pro krok 0,16 mm je drsnost  $R_z$  od 2,63  $\mu\text{m}$  do 4,20  $\mu\text{m}$  pro všechny posuvy na zub. Nejvyšší drsnost  $R_z$  je pro krok 0,60 mm. Při zvětšujícím se posuvu na zub se drsnost již znatelně projevuje a to zejména u kroku do boku 0,25 mm a 0,32 mm.



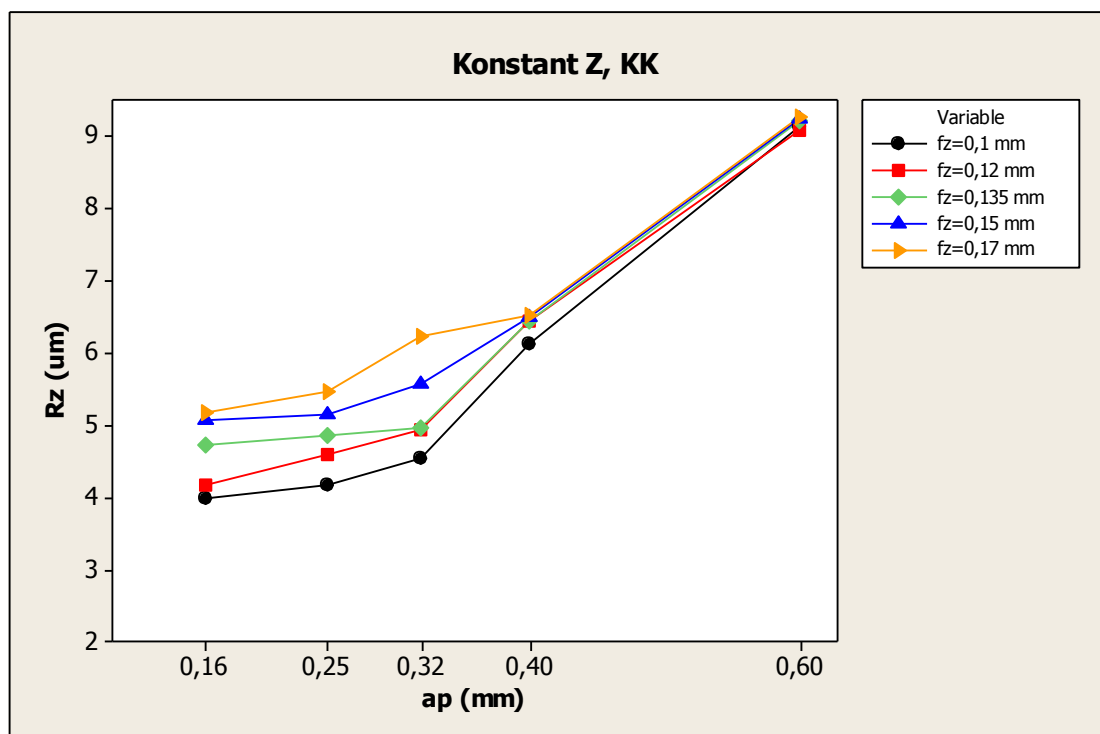
Obr. 67. Závislost drsnosti  $R_z$  na kroku v ose Z pro strategii Konstant Z a nástroj OK

Na obrázku 68 je zobrazen vliv kroku v ose Z na drsnost povrchu pro použitou strategii Konstant Z a nástroj s označením KK. Dále je na obrázku zobrazeno barevné rozlišení posuvu na zub. Z obrázku je patrné, že při zvětšujícím se kroku v ose Z drsnost  $R_a$  zvětšuje (zhoršuje kvalita povrchu). Při zvětšujícím se posuvu na zub se drsnost nepatrně zvětšuje.



Obr. 68. Závislost drsnosti  $R_a$  na kroku v ose Z pro strategii Konstant Z a nástroj KK

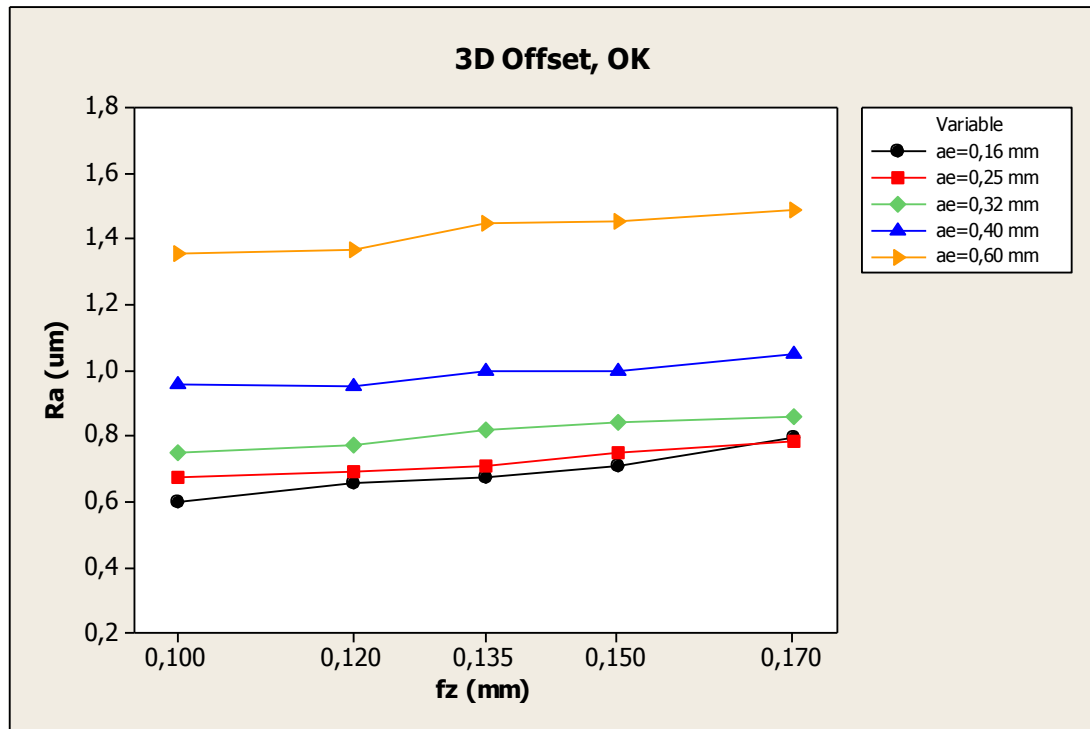
Na obrázku 69 je zobrazen vliv kroku v ose Z na drsnost povrchu pro použitou strategii Konstant Z a nástroj s označením KK. Dále je na obrázku zobrazeno barevné rozlišení posuvu na zub. Z obrázku je patrné, že při zvětšujícím kroku v ose Z se drsnost  $R_z$  zvětšuje. Pro krok 0,16 mm je drsnost  $R_z$  od 3,98  $\mu\text{m}$  do 5,16  $\mu\text{m}$ . Nejvyšší drsnost  $R_z$  je pro krok 0,60 mm a je v rozmezí od 9,12  $\mu\text{m}$  do 9,26  $\mu\text{m}$ . Při zvětšujícím se posuvu na zub se drsnost znatelně zvyšuje u kroku 0,16 mm, 0,25 mm a 0,32 mm. Avšak u kroku do boku 0,40 mm a 0,60 mm se rozdíly v drsnosti mezi posuvy na zub téměř ztrácí.



Obr. 69. Závislost drsnosti  $R_z$  na kroku v ose Z pro strategii Konstant Z a nástroj KK

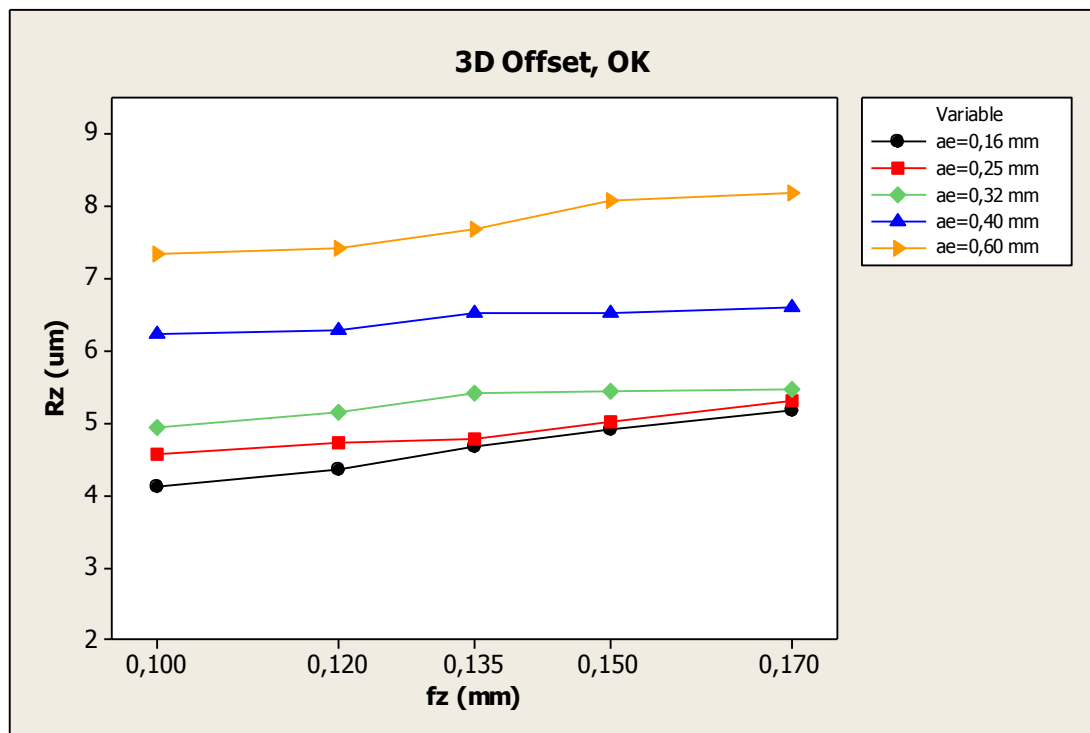
## 6.5 Vliv posuvu na zub na parametry drsnosti povrchu

Na obrázku 70 je zobrazen vliv posuvu na zub na drsnost povrchu pro použitou strategii 3D Offset a nástroj s označením OK. Dále je na obrázku zobrazeno barevné rozlišení kroku do boku. Z obrázku je patrné, že při zvětšujícím se posuvu na zub se drsnost  $R_a$  znatelně nezvyšuje. Drsnost  $R_a$  je v rozmezí od 0,59  $\mu\text{m}$  do 1,48  $\mu\text{m}$  pro všechny posuvy na zub, kde tento rozdíl je způsoben především krokem do boku.



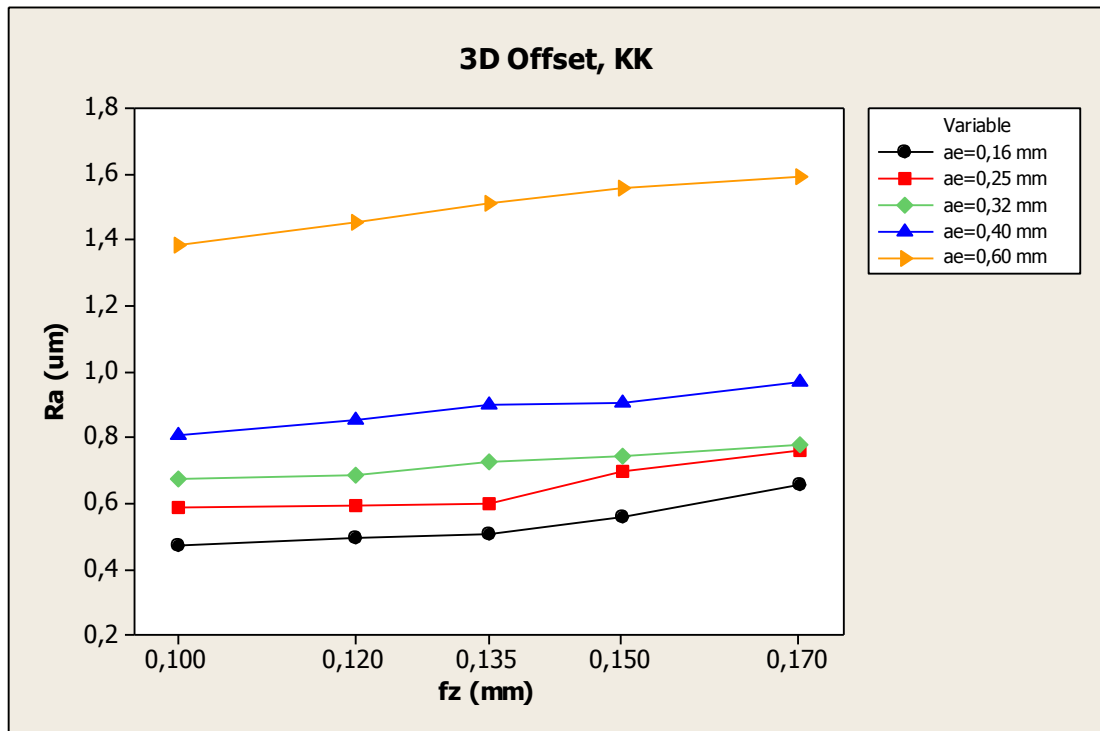
Obr. 70. Závislost drsnosti  $R_a$  na posuv na zub pro strategii 3D Offset a nástroj OK

Na obrázku 71 je zobrazen vliv posuvu na zub na drsnost povrchu pro použitou strategii 3D Offset a nástroj s označením OK. Dále je na obrázku zobrazeno barevné rozlišení kroku do boku. Při zvětšujícím se posuvu na zub se drsnost  $R_z$  postupně nepatrně zvětšuje.



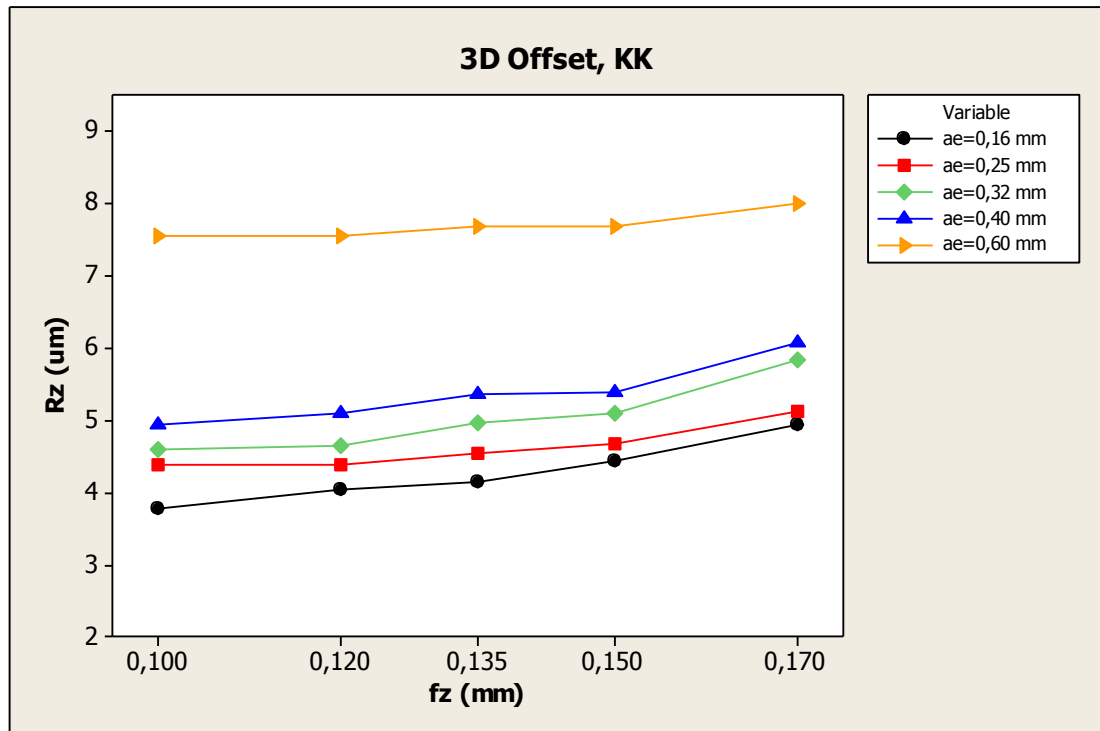
Obr. 71. Závislost drsnosti  $R_z$  na posuv na zub pro strategii 3D Offset a nástroj OK

Na obrázku 72 je zobrazen vliv posuvu na zub na drsnost povrchu pro použitou strategii 3D Offset a nástroj s označením KK. Dále je na obrázku zobrazeno barevné rozlišení kroku do boku. Z obrázku je patrné, že při zvětšujícím se posuvu na zub se drsnost  $Ra$  postupně zvětšuje. Drsnost  $Ra$  je v rozmezí od 0,47  $\mu\text{m}$  do 1,59  $\mu\text{m}$  pro všechny posuvy na zub. Tento rozdíl je způsoben především krokem do boku.



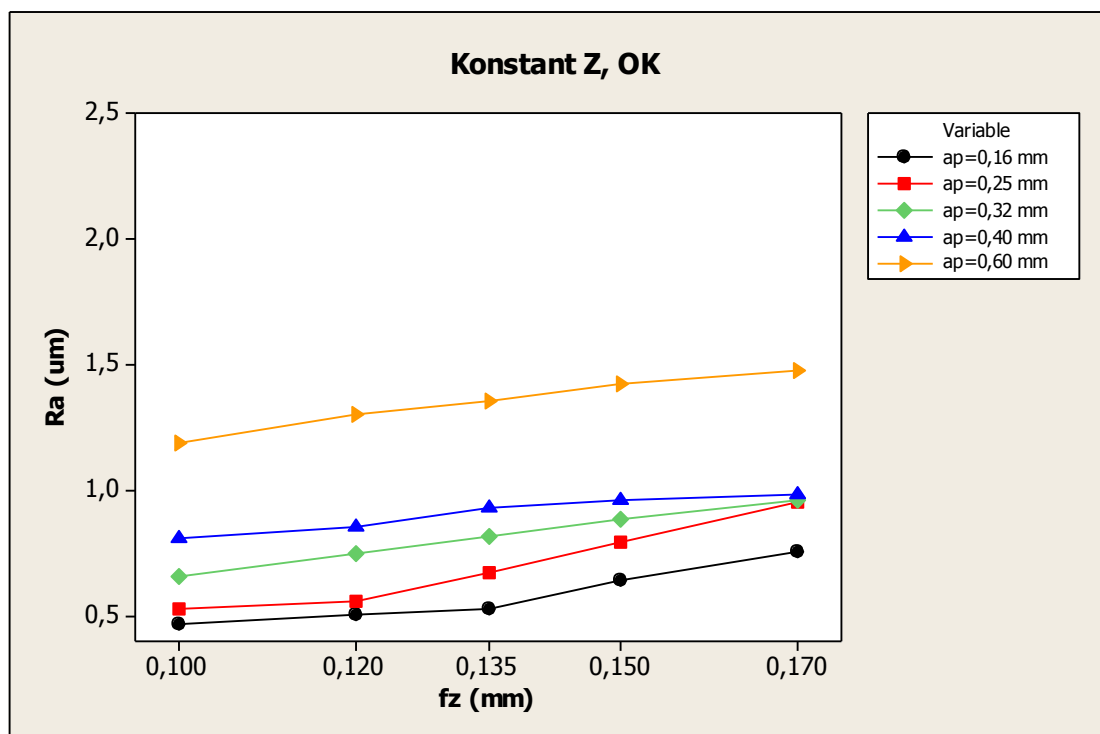
Obr. 72. Závislost drsnosti  $Ra$  na posuvu na zub pro strategii 3D Offset a nástroj KK

Na obrázku 73 je zobrazen vliv posuvu na zub na drsnost povrchu pro použitou strategii 3D Offset a nástroj s označením KK. Dále je na obrázku zobrazeno barevné rozlišení kroku do boku. Z obrázku je patrné, že při zvětšujícím se posuvu na zub se drsnost  $Rz$  postupně nepatrně zvětšuje. Drsnost  $Rz$  je v rozmezí od 3,78  $\mu\text{m}$  do 8,00  $\mu\text{m}$  pro všechny posuvy na zub, kde tento rozdíl je způsoben především krokem do boku.



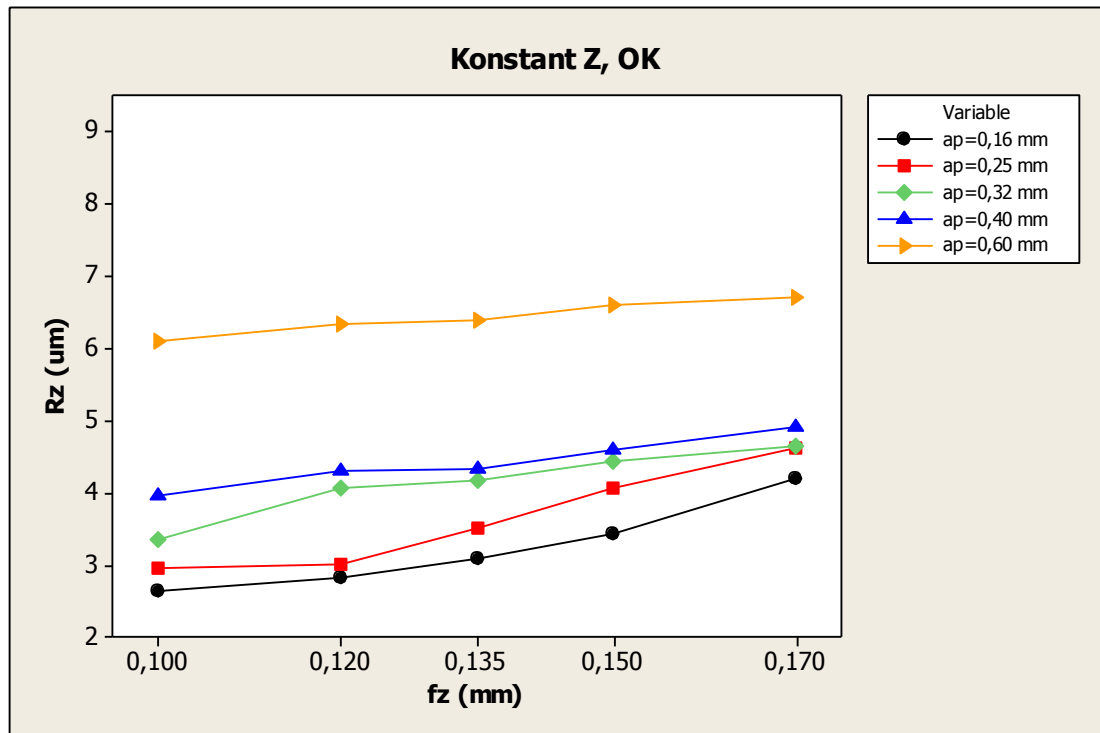
Obr. 73. Závislost drsnosti  $R_z$  na posuv na zub pro strategii 3D Offset a nástroj KK

Na obrázku 74 je zobrazen vliv posuvu na zub na drsnost povrchu pro použitou strategii Konstant Z a nástroj s označením OK. Dále je na obrázku zobrazeno barevné rozlišení kroku v ose Z. Při zvětšujícím se posuvu na zub se drsnost  $R_a$  postupně zvětšuje.



Obr. 74. Závislost drsnosti  $R_a$  na posuv na zub pro strategii Konstant Z a nástroj OK

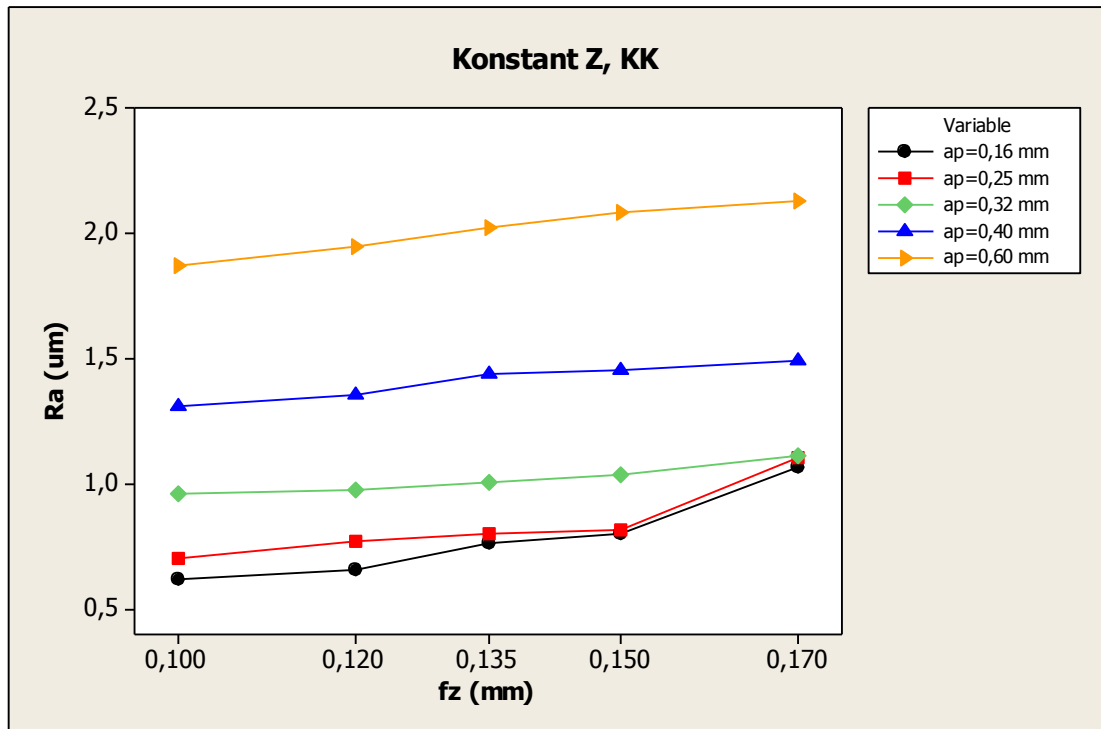
Na obrázku 75 je zobrazen vliv posuvu na zub na drsnost povrchu pro použitou strategii Konstant Z a nástroj s označením OK. Dále je na obrázku zobrazeno barevné rozlišení kroku v ose Z. Z obrázku je patrné, že při zvětšujícím se posuvu na zub se drsnost  $R_z$  postupně zvětšuje. Drsnost  $R_z$  je v rozmezí od 2,63  $\mu\text{m}$  do 6,69  $\mu\text{m}$  pro všechny posuvy na zub, kde tento rozdíl je způsoben především krokem v ose Z.



Obr. 75. Závislost drsnosti  $R_z$  na posuv na zub pro strategii Konstant Z a nástroj OK

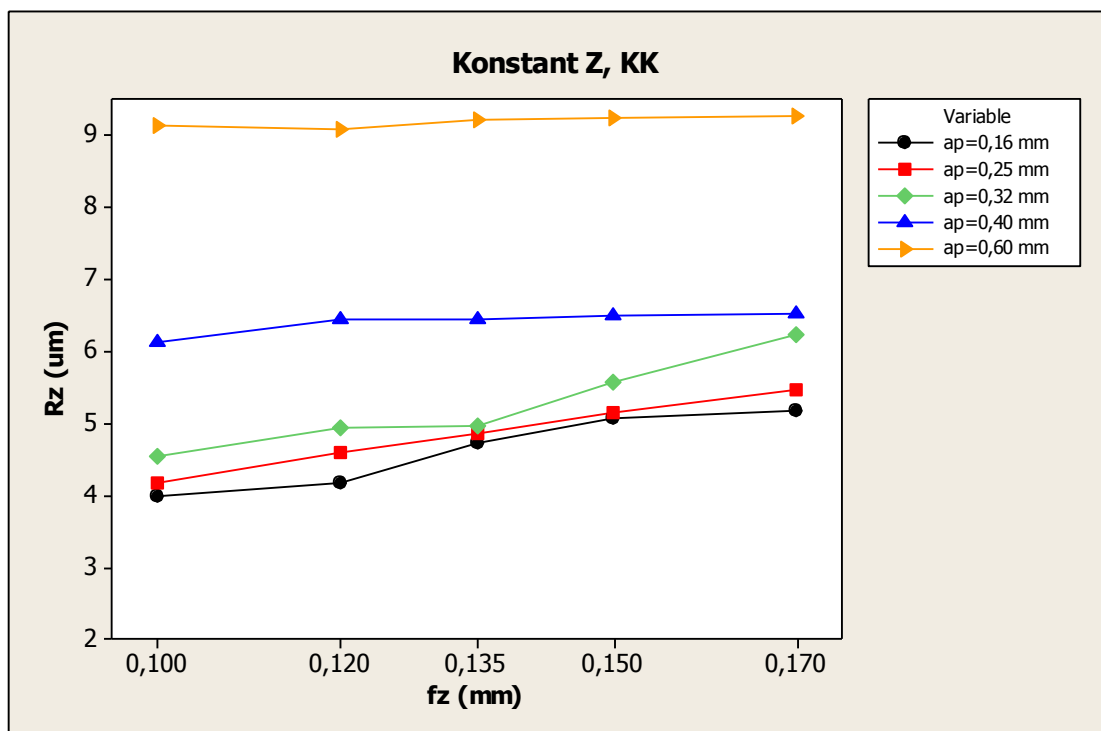
Na obrázku 76 je zobrazen vliv posuvu na zub na drsnost povrchu pro použitou strategii Konstant Z a nástroj s označením KK. Dále je na obrázku zobrazeno barevné rozlišení kroku v ose Z. Z obrázku je patrné, že při zvětšujícím se posuvu na zub se drsnost  $R_a$  postupně zvětšuje. Drsnost  $R_a$  je v rozmezí od 0,61  $\mu\text{m}$  do 2,12  $\mu\text{m}$  pro všechny posuvy na zub, kde tento rozdíl je způsoben především krokem v ose Z.





Obr. 76. Závislost drsnosti Ra na posuv na zub pro strategii Konstant Z a nástroj KK

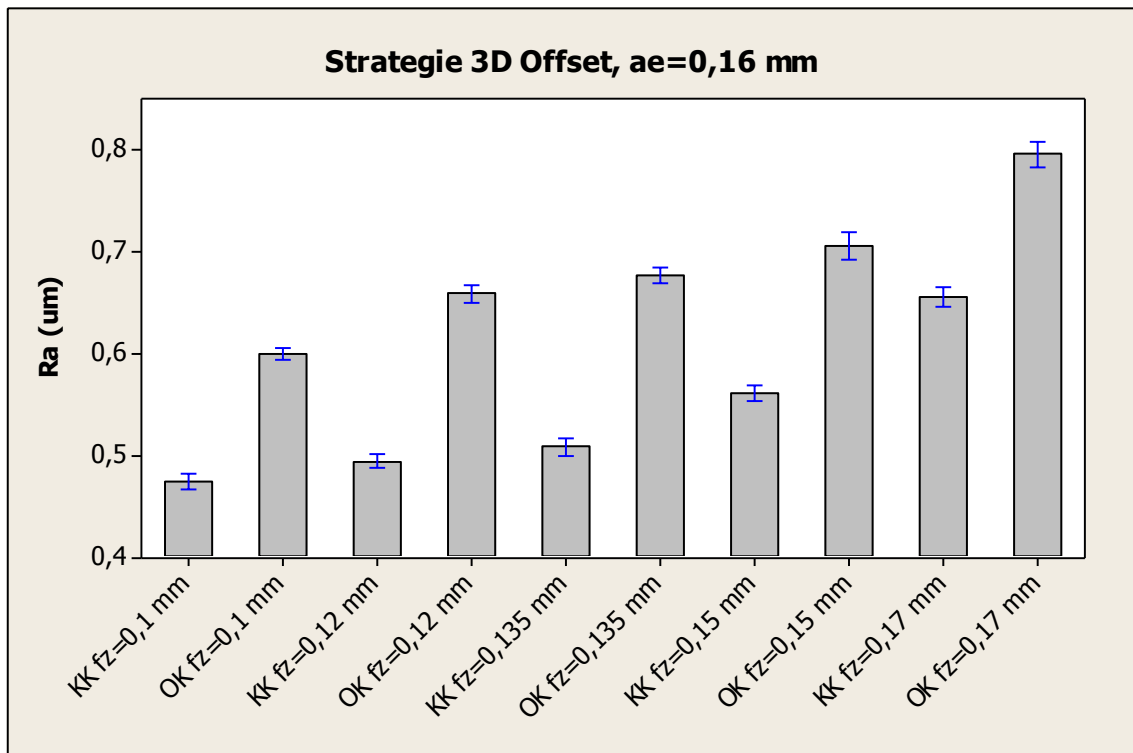
Na obrázku 77 je zobrazen vliv posuvu na zub na drsnost povrchu pro použitou strategii Konstant Z a nástroj s označením KK. Dále je na obrázku zobrazeno barevné rozlišení kroku v ose Z. Při zvětšujícím se posuvu na zub se drsnost Rz postupně zvětšuje.



Obr. 77. Závislost drsnosti Rz na posuv na zub pro strategii Konstant Z a nástroj KK

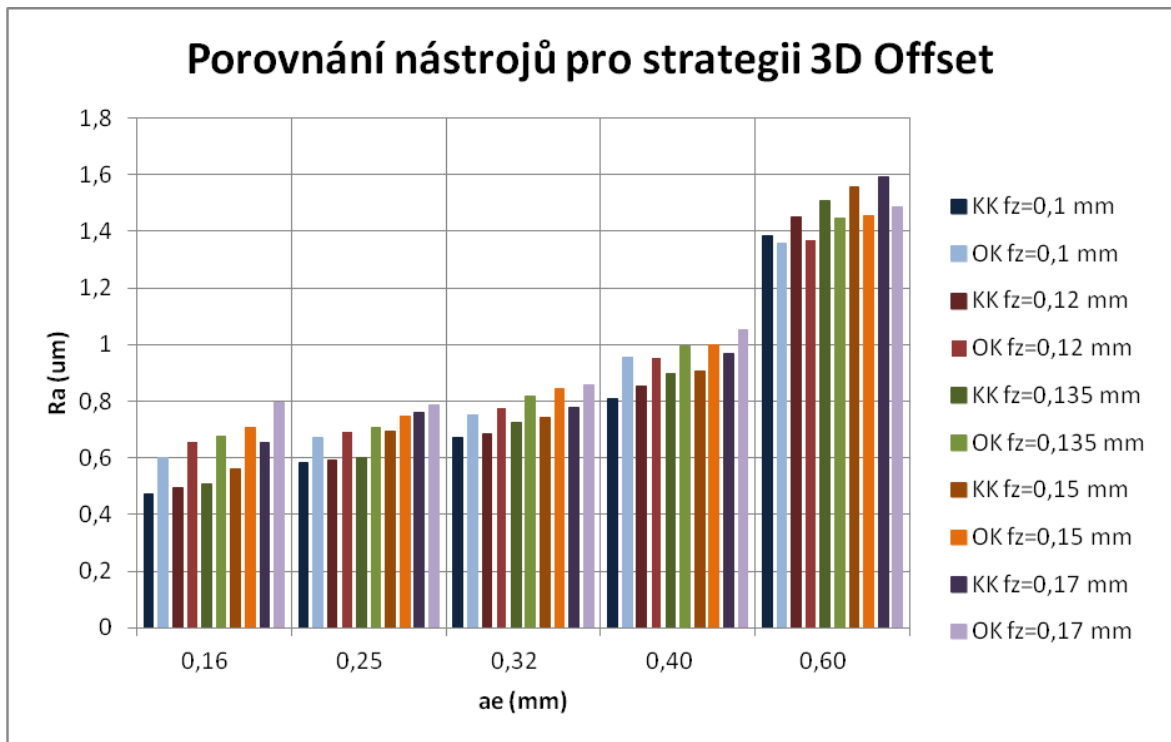
## 6.6 Vliv nástroje na parametry drsnosti povrchu

Na obrázku 78 je zobrazeno porovnání nástrojů pro strategii 3D Offset a krok do boku 0,16 mm. Na obrázku jsou také zobrazeny intervalové odhady, které nám s pravděpodobností 95 % obsahují střední hodnoty. Z obrázku je patrné, že nástroj KK vytváří kvalitnější povrch z hlediska parametru drsnosti  $R_a$  u všech posuvů na zub, než nástroj OK. Rozdíl mezi nástroji je znatelný.



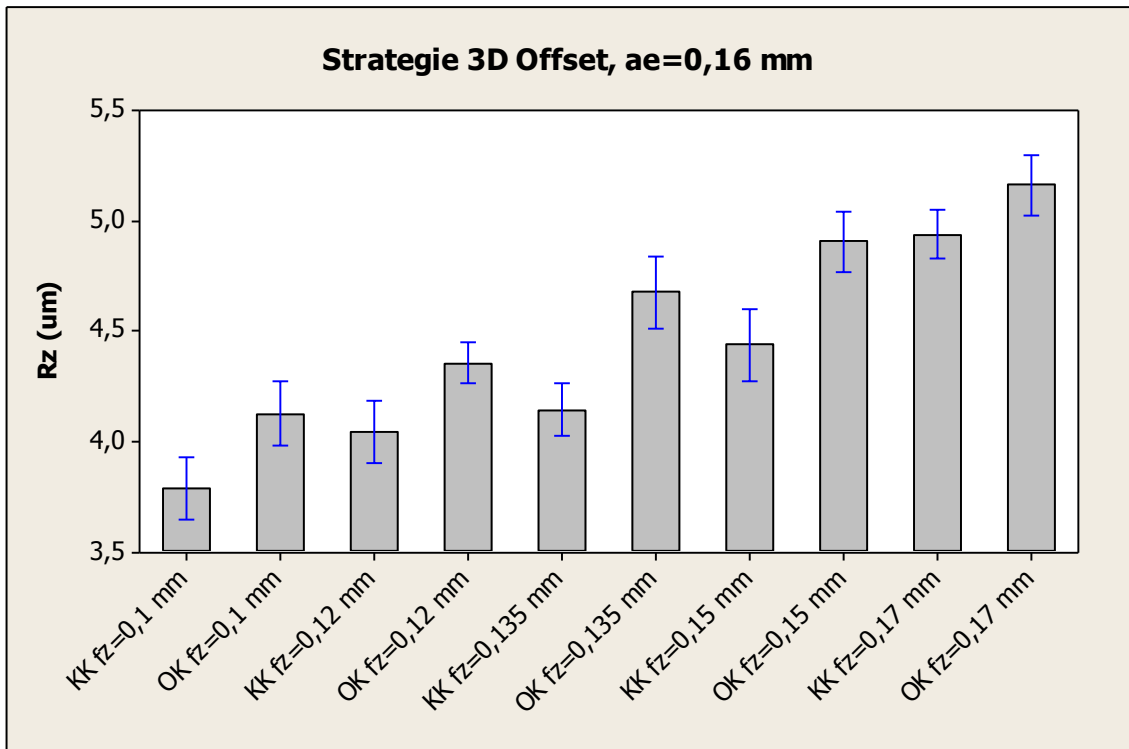
Obr. 78. Porovnání nástroje pro strategii 3D Offset,  $a_e=0,16$  mm pro hodnotu  $R_a$

Na obrázku 79 je zobrazeno porovnání nástrojů pro strategii 3D Offset. Z obrázku je patrné, že u kroku do boku 0,16 mm, 0,25 mm, 0,32 mm a 0,40 mm pro jakýkoliv posuv na zub je z hlediska drsnosti  $R_a$  vhodnější nástroj s označením KK. Pro krok do boku 0,60 mm pro jakýkoliv posuv na zub je z hlediska drsnosti  $R_a$  vhodnější nástroj s označením OK.



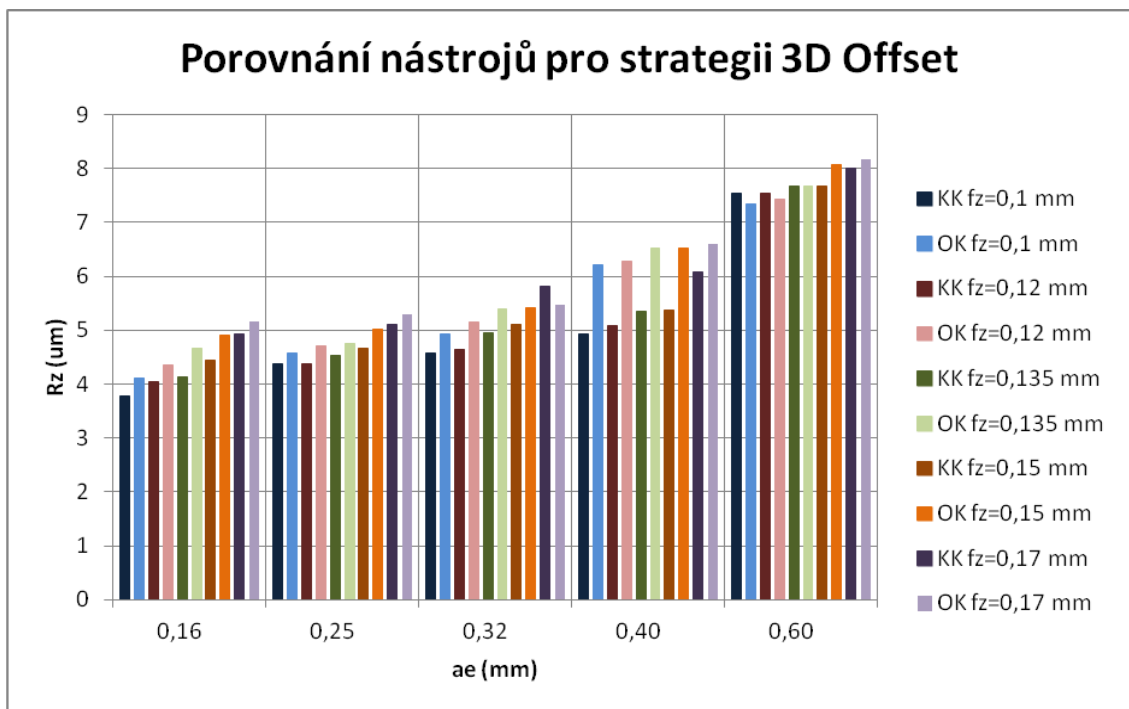
Obr. 79. Porovnání nástroje pro strategii 3D Offset pro hodnotu  $R_a$

Na obrázku 80 je zobrazeno porovnání nástrojů pro strategii 3D Offset a krok do boku 0,16 mm. Na obrázku jsou také zobrazeny intervalové odhady, které nám s pravděpodobností 95 % obsahují střední hodnoty. Z obrázku je patrné, že nástroj KK vytváří kvalitnější povrch z hlediska parametru drsnosti  $R_a$  u všech posuvů na zub, než nástroj OK. Avšak rozdíl mezi nástroji je velmi malý. U posuvu na zub 0,17 mm se protínají úsečky, které s pravděpodobností 95 % určují střední hodnotu, tudíž zde již nástroje vytvářejí téměř stejný povrch z hlediska parametru drsnosti  $R_a$ .



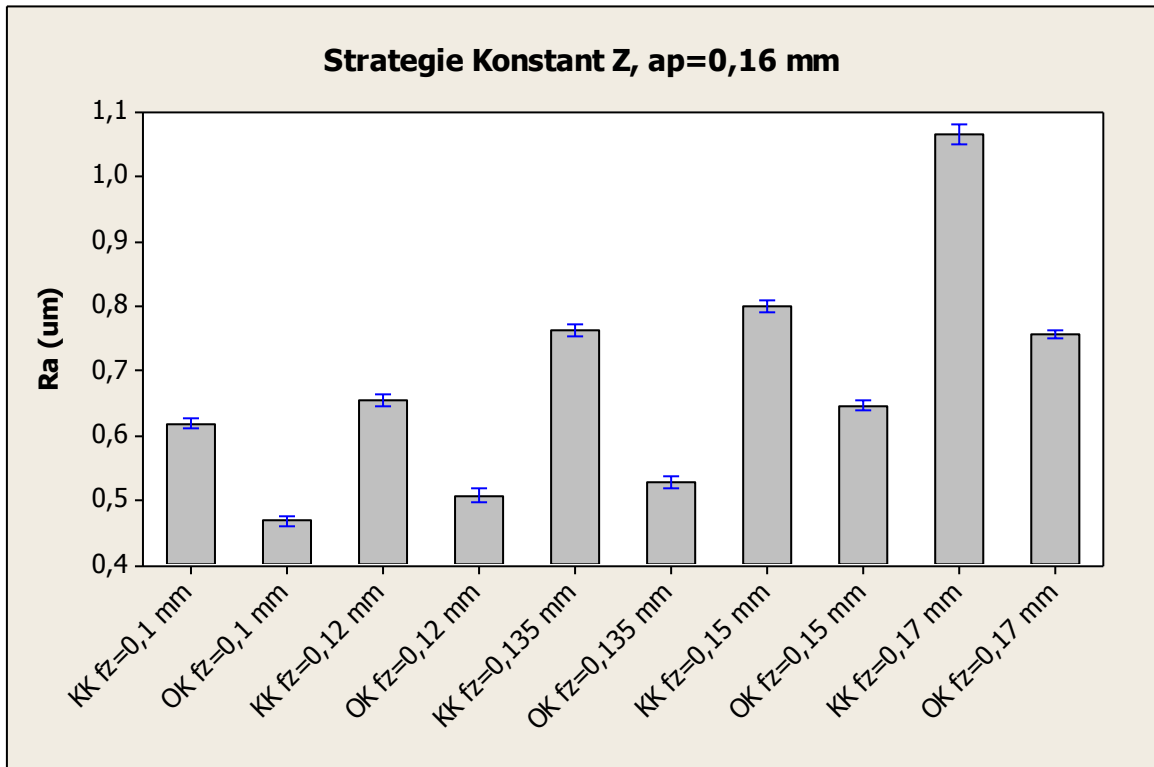
Obr. 80. Porovnání nástroje pro strategii 3D Offset, ae=0,16 mm pro hodnotu Rz

Na obrázku 81 je zobrazeno porovnání nástrojů pro strategii 3D Offset. Z obrázku je patrné, že u kroku do boku 0,16 mm, 0,25 mm pro jakýkoliv posuv na zub je z hlediska drsnosti Ra vhodnější nástroj s označením KK. Pro krok do boku 0,40 mm je u všech posuvů vhodnější nástroj OK a pro krok do boku 0,60 mm jsou hodnoty téměř shodující se.



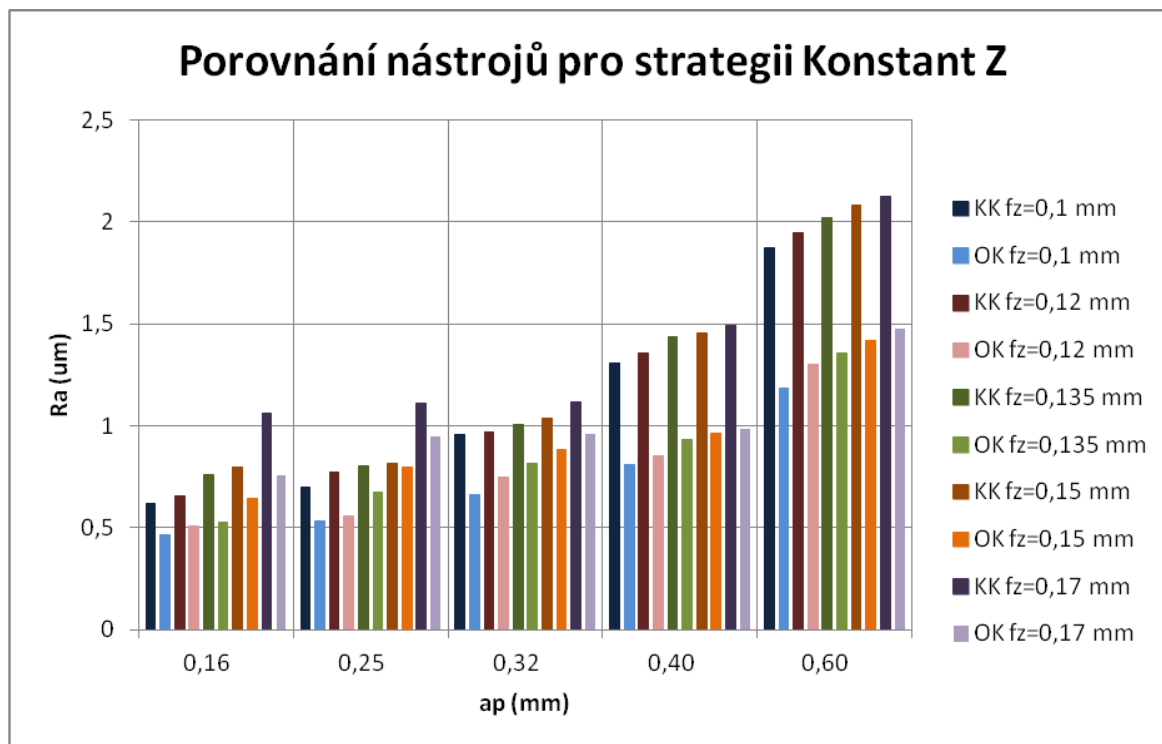
Obr. 81. Porovnání nástroje pro strategii 3D Offset pro hodnotu Rz

Na obrázku 82 je zobrazeno porovnání nástrojů pro strategii Konstant Z a krok v ose Z 0,16 mm. Na obrázku jsou také zobrazeny intervalové odhady, které nám s pravděpodobností 95 % obsahují střední hodnoty. Z obrázku je patrné, že nástroj OK vytváří kvalitnější povrch z hlediska parametru drsnosti  $R_a$  u všech posuvů na zub, než nástroj KK. Rozdíly mezi nástroji jsou znatelné u všech posuvů na zub. Tento trend u této strategie je obdobný u všech kroků v ose Z podle obrázku 83.



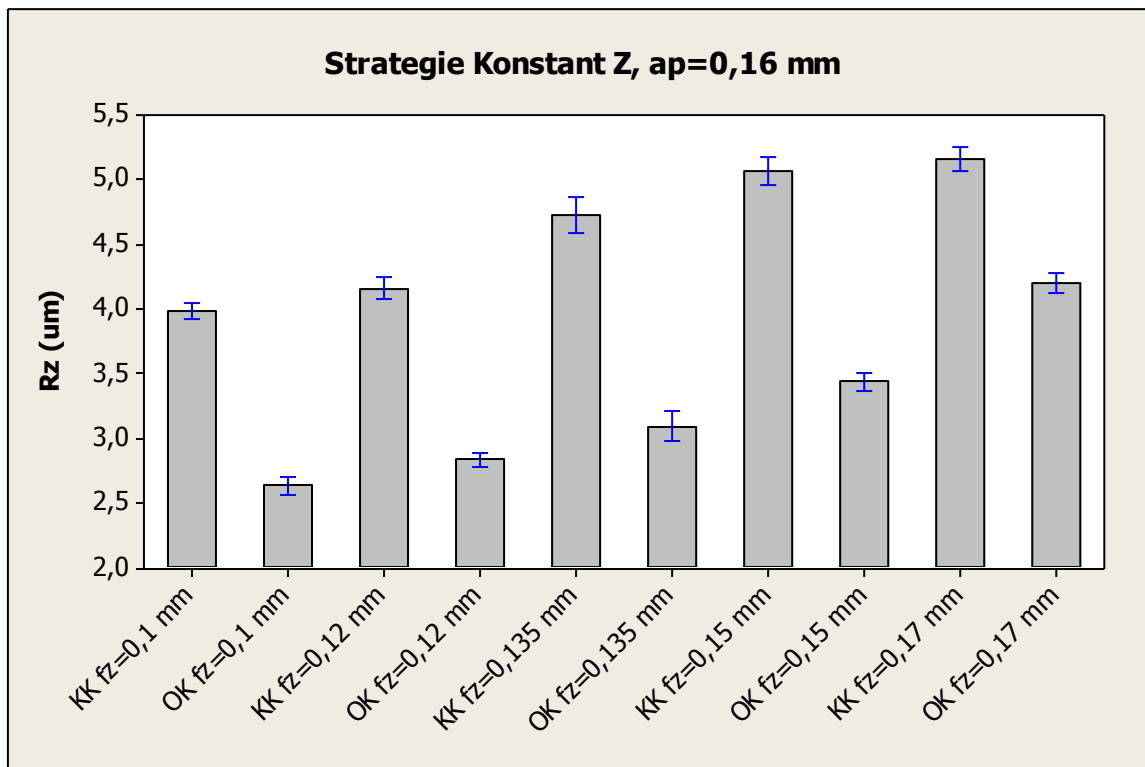
Obr. 82. Porovnání nástroje pro strategii Konstant Z,  $a_p=0,16$  mm pro hodnotu  $R_a$

Na obrázku 83 je zobrazeno porovnání nástrojů pro strategii Konstant Z. Z obrázku je patrné, že u všech kroků v ose Z je vhodnější nástroj s označením OK. U kroku v ose Z 0,16 mm, 0,25 mm a 0,32 mm je rozdíl hodnot drsnosti  $R_a$  nepatrný. U kroku v ose Z 0,40 mm a 0,60 mm je ovšem rozdíl již znatelný.



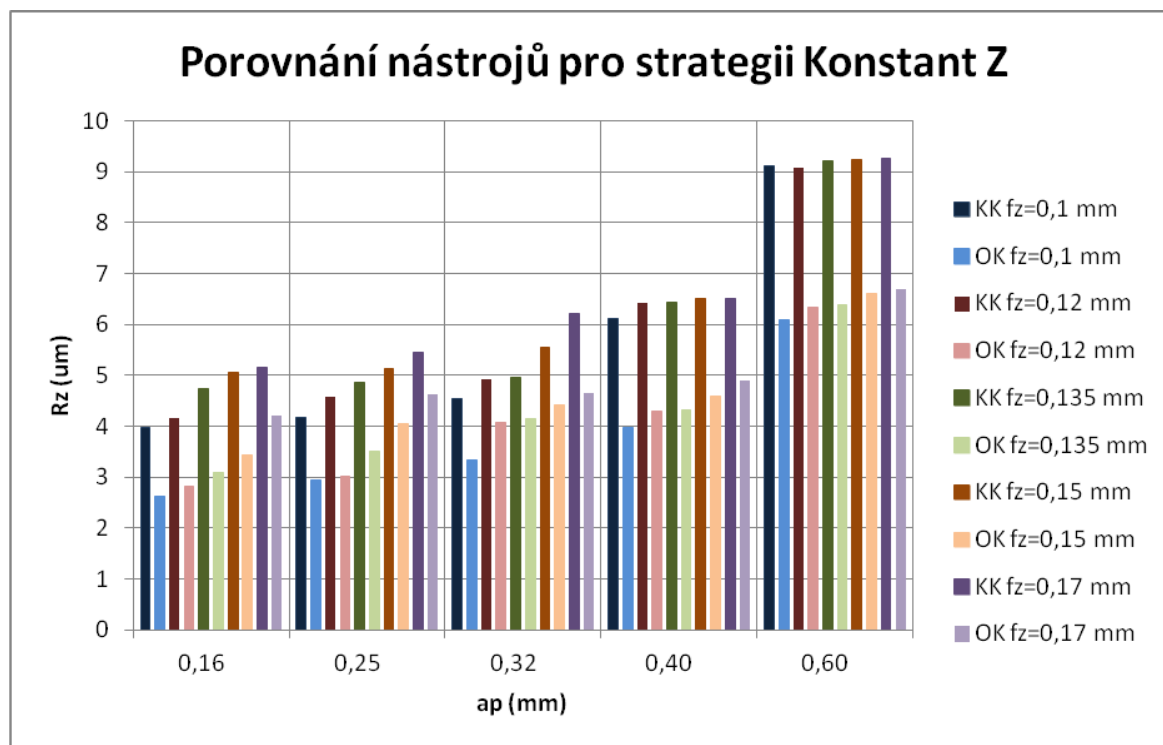
Obr. 83. Porovnání nástroje pro strategii Konstant Z pro hodnotu  $R_a$

Na obrázku 84 je zobrazeno porovnání nástrojů pro strategii Konstant Z a krok v ose Z 0,16 mm. Na obrázku jsou také zobrazeny intervalové odhady, které nám s pravděpodobností 95 % obsahují střední hodnoty. Z obrázku je patrné, že nástroj OK vytváří kvalitnější povrch z hlediska parametru drsnosti  $R_a$  u všech posuvů na zub, než nástroj KK. Rozdíl mezi nástroji je zřetelný.



Obr. 84. Porovnání nástroje pro strategii Konstant Z pro hodnotu  $R_z$

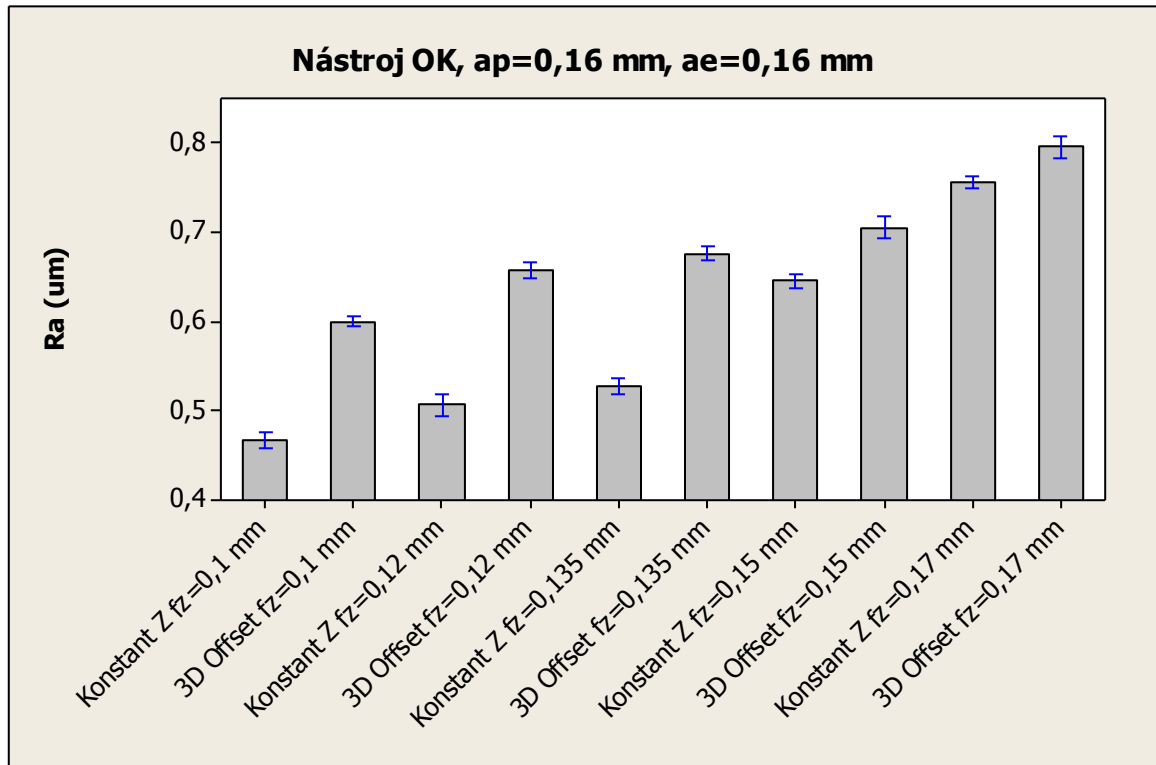
Na obrázku 85 je zobrazeno porovnání nástrojů pro strategii Konstant Z. Z obrázku je patrné, že u všech kroků do boku a posuvech na zub je vhodnější nástroj s označením OK. Rozdíly v hodnotách drsnosti  $R_z$  jsou znatelné.



Obr. 85. Porovnání nástroje pro strategii Konstant Z pro hodnotu  $R_z$

## 6.7 Vliv obráběcí strategie na parametry drsnosti povrchu

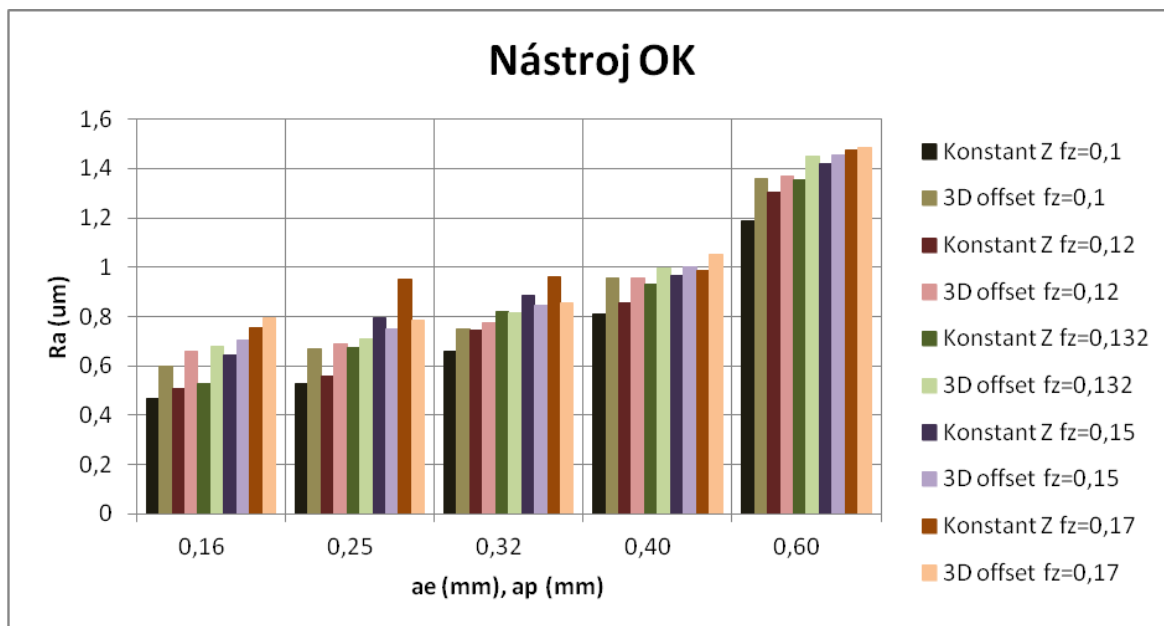
Na obrázku 86 je zobrazeno porovnání obráběcí strategie pro nástroj OK a krok v ose Z 0,16 mm a krok do boku 0,16 mm. Na obrázku jsou také zobrazeny intervalové odhady, které nám s pravděpodobností 95 % obsahují střední hodnoty. Z obrázku je patrné, že strategie Konstant Z vytváří kvalitnější povrch z hlediska parametru drsnosti  $R_a$  u všech posuvů na zub, než strategie 3D Offset.



Obr. 86. Porovnání obráběcí strategie pro nástroj OK,  $a_e(a_p)=0,16$  mm hodnotou  $R_a$

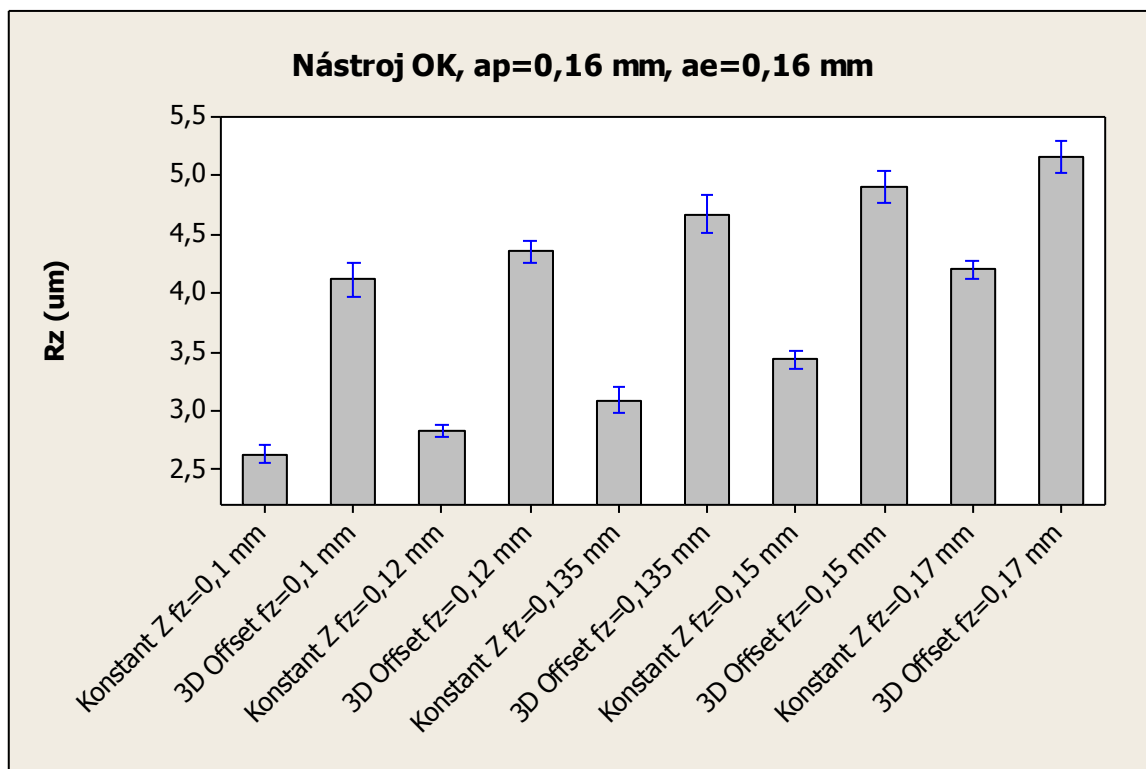
Na obrázku 87 jsou porovnány obráběcí strategie pro nástroj OK. Na obrázku jsou uvedeny rozdíly drsnosti  $R_a$  mezi strategiemi, neboli rozdíly mezi vertikálními oblastmi a horizontálními oblastmi pro nástroj s označením OK, kde ovšem byly použity stejné řezné podmínky. Z obrázku je patrné, že u kroku do boku 0,16 mm a 0,25 mm a u všech posuvů na zub, nástroj s označením OK vytváří kvalitnější povrch u strategie Konstant Z. U kroku do boku 0,32 mm, 0,40 mm a 0,60 mm již při některých posuvech nástroj OK vytváří lepší povrch u strategie 3D Offset, ovšem stále převažuje strategie Konstant Z.





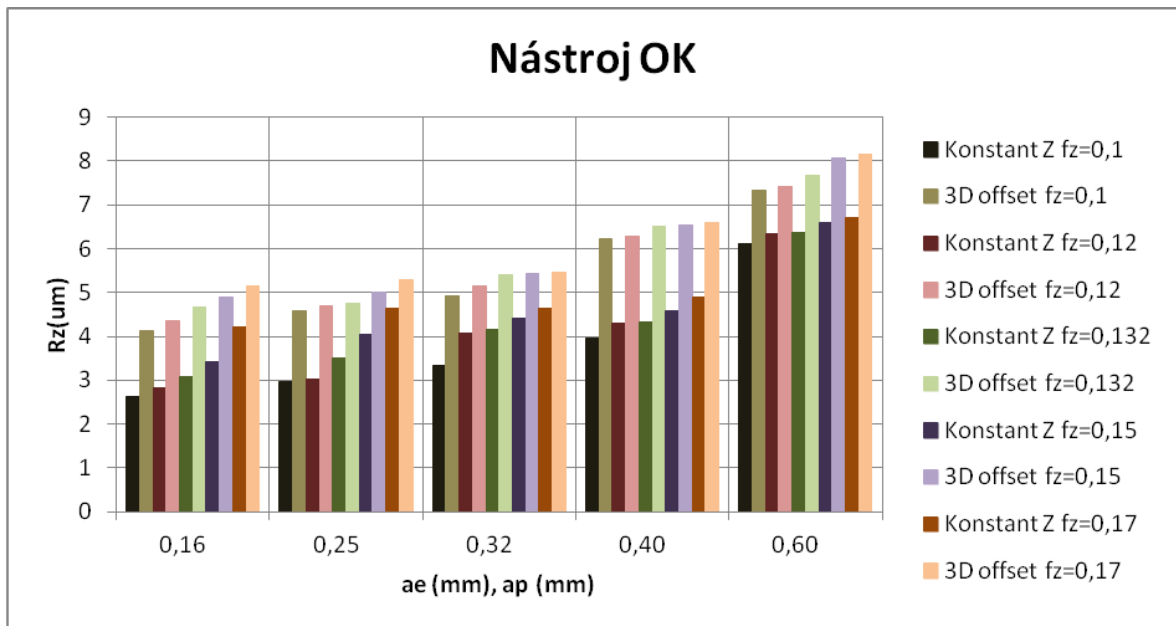
Obr. 87. Porovnání obráběcí strategie pro nástroj OK hodnotou Ra

Na obrázku 88 je zobrazeno porovnání obráběcí strategie pro nástroj OK a krok v ose Z 0,16 mm a krok do boku 0,16 mm. Na obrázku jsou také zobrazeny intervalové odhady, které nám s pravděpodobností 95 % obsahují střední hodnoty. Z obrázku je patrné, že strategie Konstant Z vytváří kvalitnější povrch z hlediska parametru drsnosti Rz u všech posuvů na zub, než strategie 3D Offset.



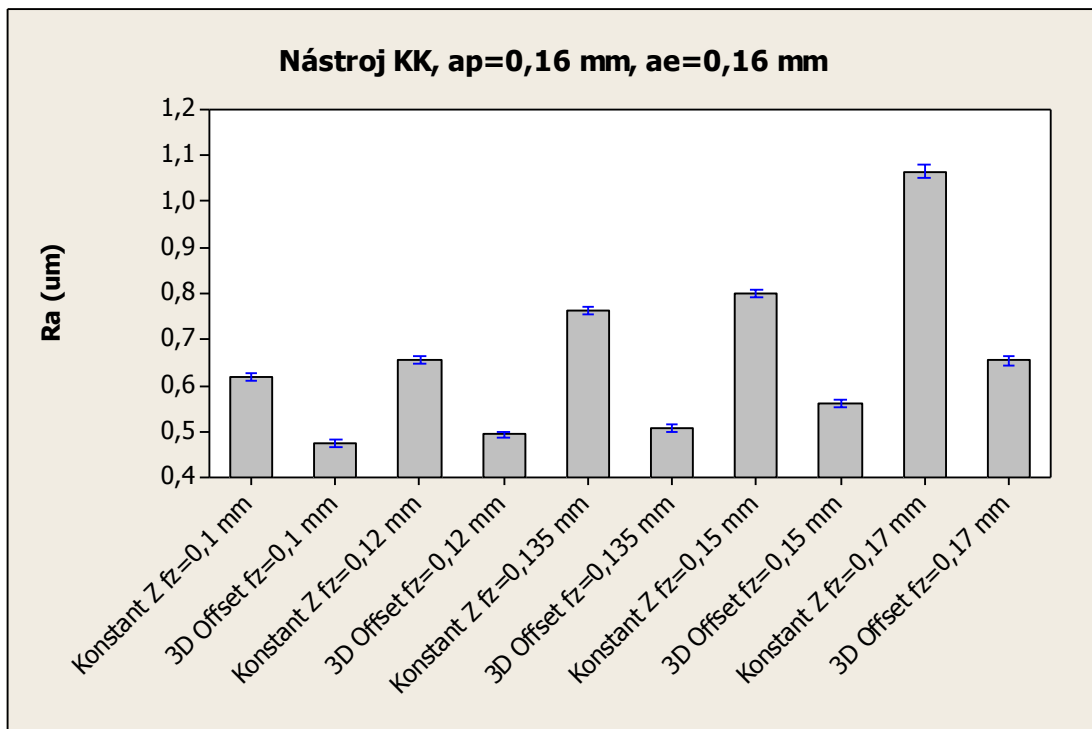
Obr. 88. Porovnání obráběcí strategie pro nástroj OK, ae(ap)=0,16mm hodnotou Rz

Na obrázku 89 jsou porovnány obráběcí strategie pro nástroj OK. Na obrázku jsou uvedeny rozdíly drsnosti  $R_z$  mezi strategiemi, neboli rozdíly mezi vertikální oblastí a horizontální oblastí pro nástroj s označením OK, kde ovšem byly použity stejné řezné podmínky. Z obrázku je patrné, že u všech kroků do boku a posuvů na zub nástroj s označením OK vytváří kvalitnější povrch z hlediska hodnot  $R_z$  u strategie Konstant Z.



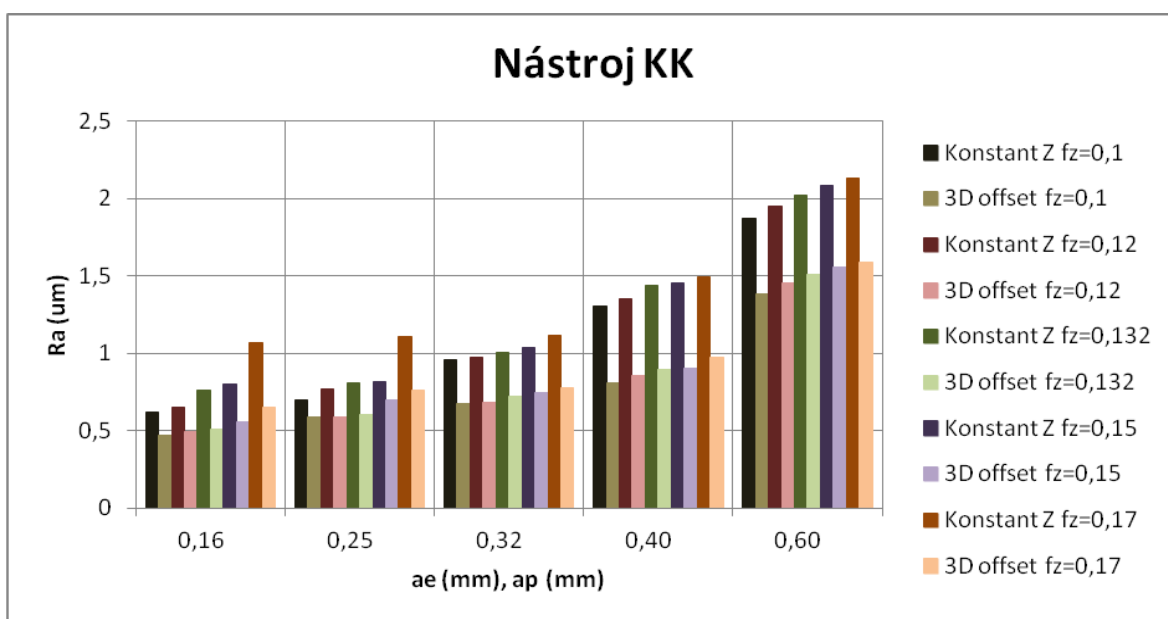
Obr. 89. Porovnání obráběcí strategie pro nástroj OK hodnotou  $R_z$

Na obrázku 90 je zobrazeno porovnání obráběcí strategie pro nástroj KK a krok v ose Z 0,16 mm a krok do boku 0,16 mm. Na obrázku jsou také zobrazeny intervalové odhady, které nám s pravděpodobností 95 % obsahují střední hodnoty. Z obrázku je patrné, že strategie 3D Offset vytváří kvalitnější povrch z hlediska parametru drsnosti  $R_a$  u všech posuvů na zub.



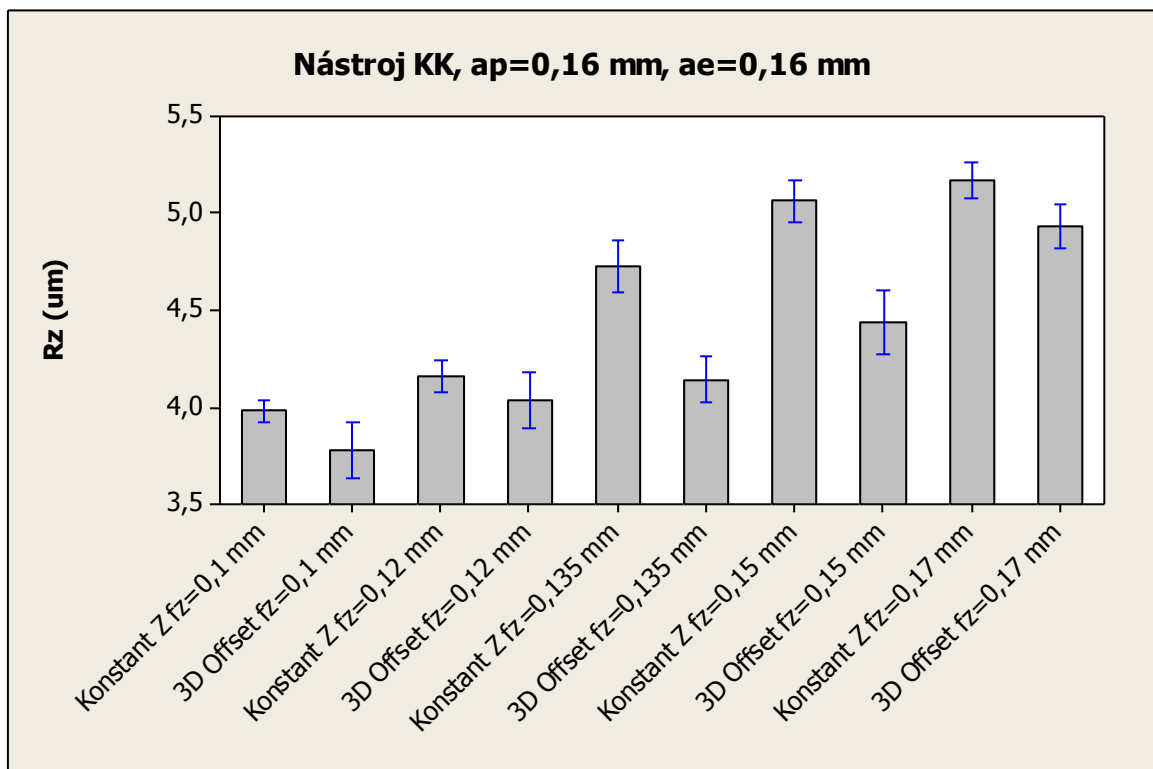
Obr. 90. Porovnání obráběcí strategie pro nástroj KK,  $a_e(a_p)=0,16$  mm hodnotou Ra

Na obrázku 91 jsou porovnány obráběcí strategie pro nástroj KK. Na obrázku jsou uvedeny rozdíly drsnosti Ra mezi strategiemi, neboli rozdíly mezi vertikální oblastí a horizontální oblastí pro nástroj s označením KK, kde ovšem byly použity stejné řezné podmínky. Z obrázku je patrné, že u všech kroků do boku a posuvů na zub nástroj s označením KK vytváří kvalitnější povrch z hlediska hodnot Ra u strategie 3D Offset. U posuvů na zub 0,1 mm, 0,12 mm a 0,135 mm jsou rozdíly již znatelné.



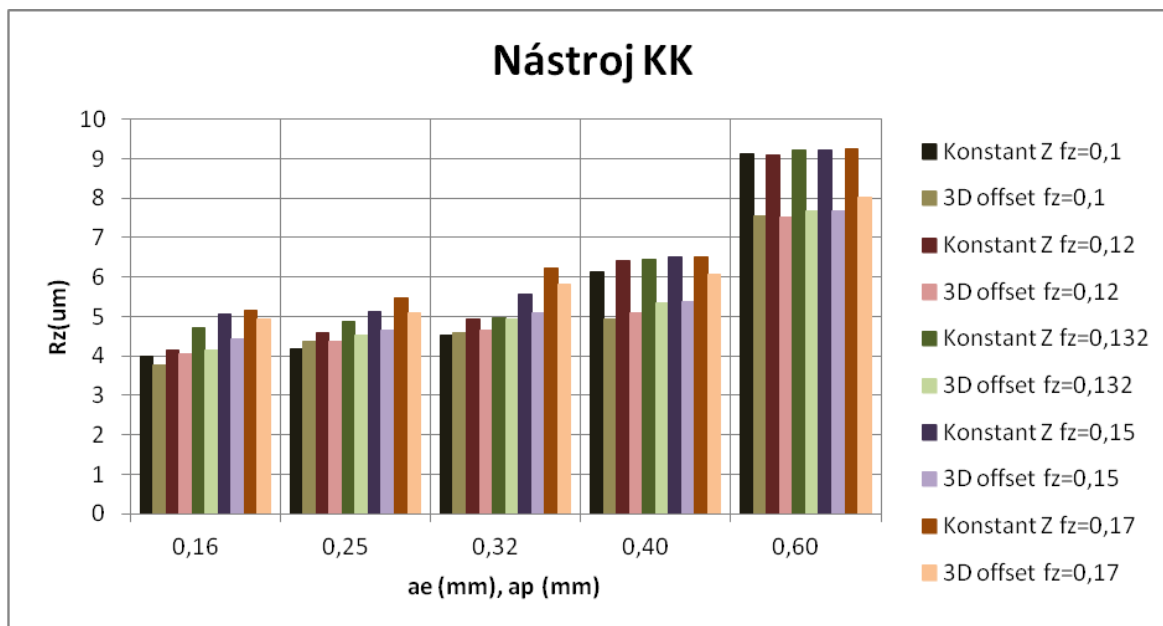
Obr. 91. Porovnání obráběcí strategie pro nástroj KK hodnotou Ra

Na obrázku 92 je zobrazeno porovnání obráběcí strategie pro nástroj KK a krok v ose Z 0,16 mm a krok do boku 0,16 mm. Na obrázku jsou také zobrazeny intervalové odhady, které nám s pravděpodobností 95 % obsahují střední hodnoty. Z obrázku je patrné, že strategie 3D Offset vytváří kvalitnější povrch z hlediska parametru drsnosti  $R_z$  u všech posuvů na zub. Ovšem u posuvu na zub 0,1 mm a 0,12 mm se protínají chybové úsečky a tím zde můžou obě strategie vytvářet stejný povrch.



Obr. 92. Porovnání obráběcí strategie pro nástroj KK,  $a_e(a_p)=0,16$  mm hodnotou  $R_z$

Na obrázku 93 jsou porovnány obráběcí strategie pro nástroj KK. Na obrázku jsou uvedeny rozdíly drsnosti  $R_z$  mezi strategiemi, neboli rozdíly mezi vertikální oblastí a horizontální oblastí pro nástroj s označením KK, kde ovšem byly použity stejné řezné podmínky. Z obrázku je patrné, že při posuvech na zub 0,1 mm, 0,12 mm a 0,135 mm u všech kroků do boku jsou hodnoty drsnosti  $R_z$  pro strategie velmi blízké. Ovšem při posuvech 0,15 mm a 0,17 mm jsou rozdíly hodnot drsnosti  $R_z$  již znatelné, přičemž nástroj s označením KK vytváří kvalitnější povrch založený na hodnotách drsnosti  $R_z$  u strategie 3D Offset.



Obr. 93. Porovnání obráběcí strategie pro nástroj KK hodnotou Rz

## 6.8 Porovnání obráběcích časů

Během obrábění byl měřen strojní čas, který porovnáváme s časem, který byl spočítán v programu Powermil. Časy jsou porovnávány pro odlišné strategie zvláště.

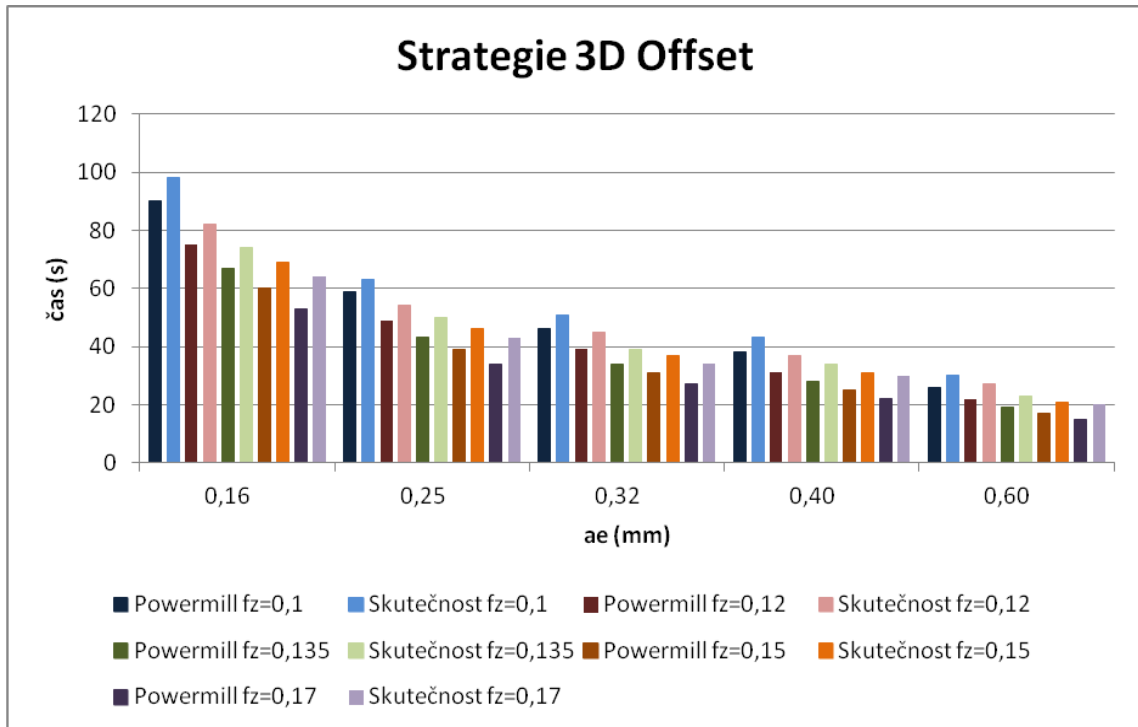
### 6.8.1 Porovnání obráběcích časů pro strategii 3D Offset

V tabulce 24 jsou uvedeny obráběcí časy pro strategii 3D Offset, které jsme získali z programu Powermill a časy, které jsme ve skutečnosti naměřili. Z tabulky je patrné, že čas obrábění získaný z programu Powermill je vždy menší.

Tab. 24. Obráběcí časy pro strategii 3D Offset

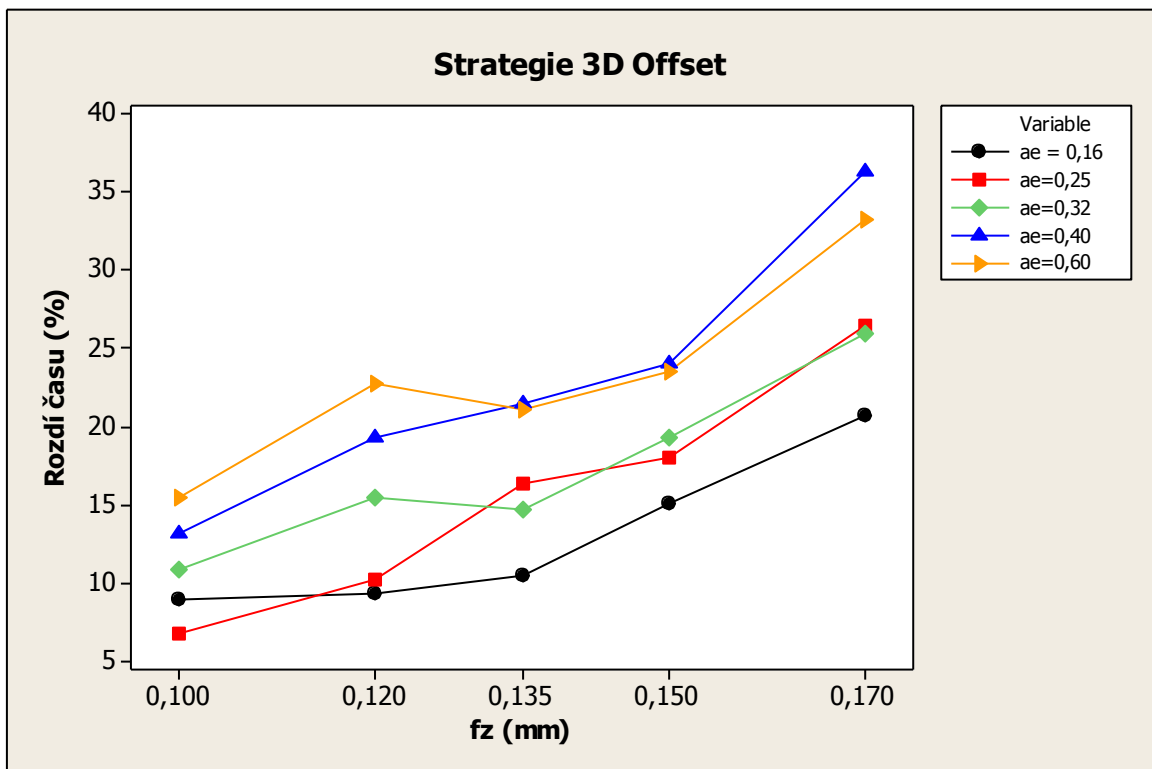
Čas (s)	$a_e=0,16$ mm		$a_e=0,25$ mm		$a_e=0,32$ mm		$a_e=0,40$ mm		$a_e=0,60$ mm	
	PM	Realita	PM	Realita	PM	Realita	PM	Realita	PM	Realita
$f_z=0,1$ mm	90	98	59	63	46	51	38	43	26	30
$f_z=0,12$ mm	75	82	49	54	39	45	31	37	22	27
$f_z=0,135$ mm	67	74	43	50	34	39	28	34	19	23
$f_z=0,15$ mm	60	69	39	46	31	37	25	31	17	21
$f_z=0,17$ mm	53	64	34	43	27	34	22	30	15	20

Na obrázku 94 je zobrazeno porovnání obráběcích časů pro strategii 3D offset získaných z programu Powermill s časy, které jsme ve skutečnosti naměřili. Z obrázku je patrné, že pokaždé skutečný čas obrábění je větší než čas, který nám vypočítal Powermill.



Obr. 94. Porovnání obráběcích časů pro strategii 3D Offset

Na obrázku 95 je zobrazeno porovnání obráběcích časů pro strategii 3D offset. Na obrázku je zobrazen rozdíl skutečného času v % v porovnání s programovým časem. Z obrázku je patrné, že pokaždé skutečný čas obrábění je větší než čas, který nám vypočítal Powermill.



Obr. 95. Porovnání obráběcích časů pro strategii 3D Offset

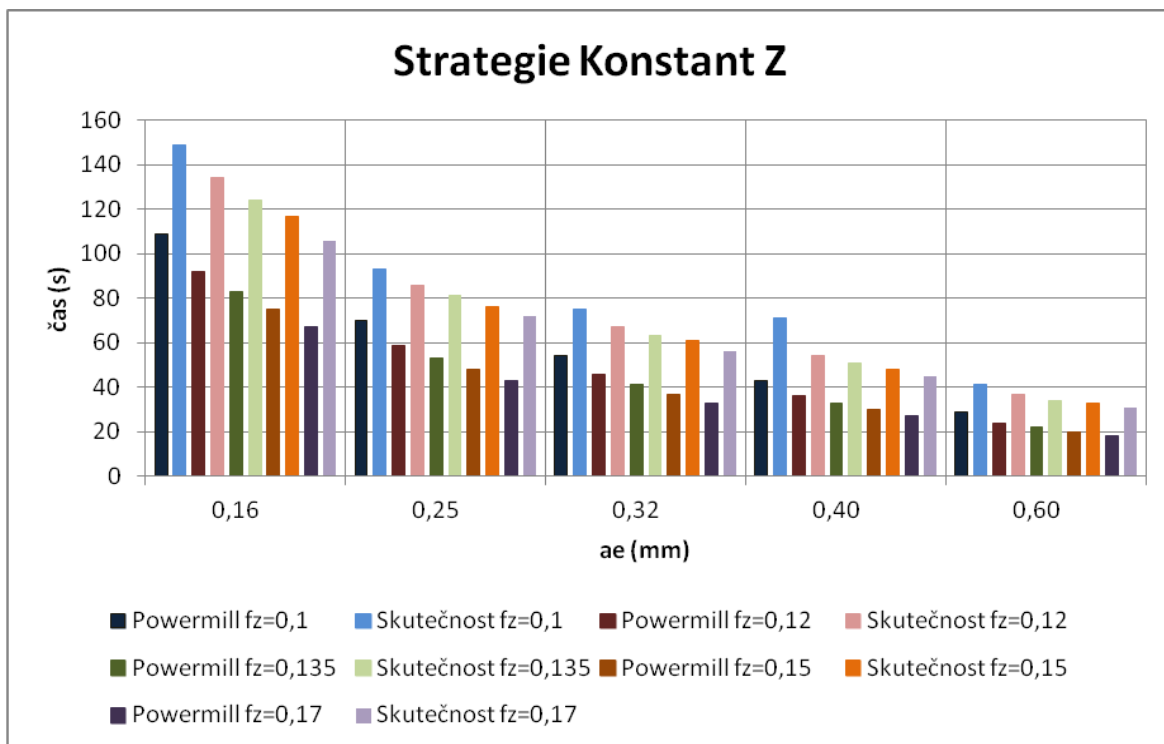
### 6.8.2 Porovnání obráběcích časů pro strategii Konstant Z

V tabulce 25 jsou uvedeny obráběcí časy pro strategii Konstant Z, které jsme získali z programu Powermill a časy, které jsme ve skutečnosti naměřili. Z tabulky je patrné, že čas obrábění získaný z programu Powermill je vždy menší než čas, který jsme ve skutečnosti naměřili.

Tab. 25. Obráběcí časy pro strategii Konstant Z

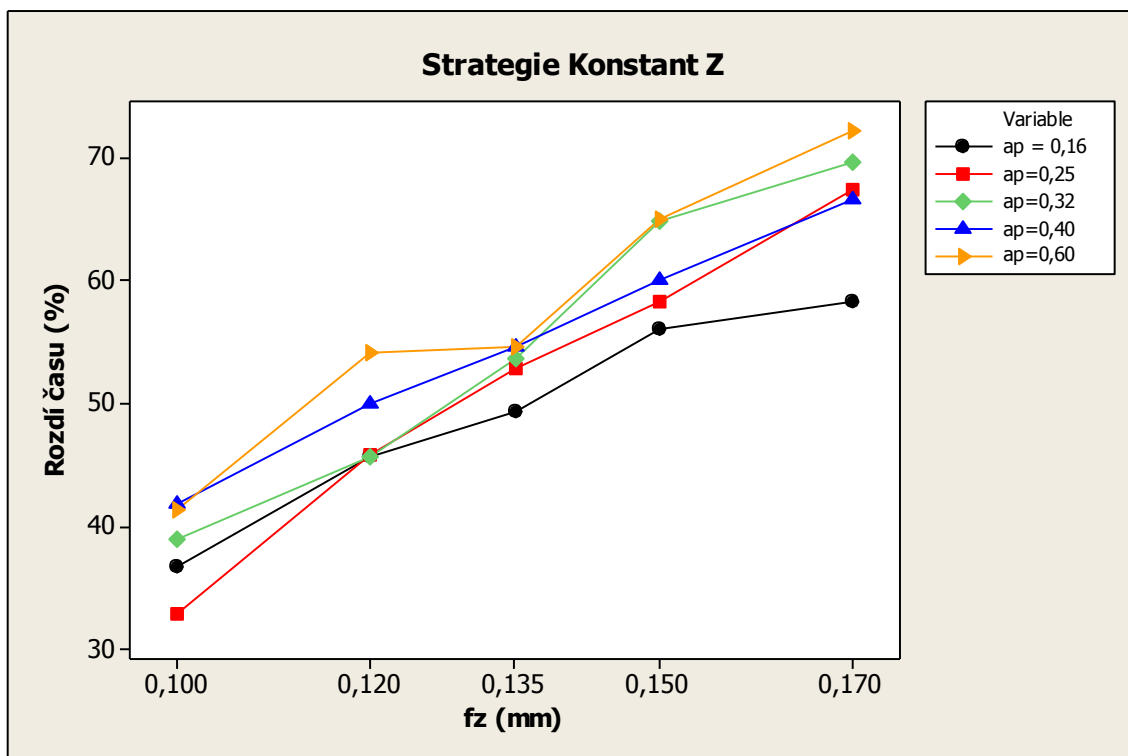
Čas (s)	$a_p=0,16$ mm		$a_p=0,25$ mm		$a_p=0,32$ mm		$a_p=0,40$ mm		$a_p=0,60$ mm	
	PM	Realita	PM	Realita	PM	Realita	PM	Realita	PM	Realita
$f_z=0,1$ mm	109	149	70	93	54	75	43	71	29	41
$f_z=0,12$ mm	92	134	59	86	46	67	36	54	24	37
$f_z=0,135$ mm	83	124	53	81	41	63	33	51	22	34
$f_z=0,15$ mm	75	117	48	76	37	61	30	48	20	33
$f_z=0,17$ mm	67	106	43	72	33	56	27	45	18	31

Na obrázku 96 je zobrazeno porovnání obráběcích časů pro strategii Konstant Z získaných z programu Powermill s časy, které jsme ve skutečnosti naměřili. Z obrázku je patrné, že pokaždé skutečný čas obrábění je větší než čas, který nám vypočítal Powermill. Rozdíly jsou již velice znatelné a je to dáno zejména větším počtem přejezdů mezi jednotlivými drahami. Powermill nepočítá s dynamikou stroje a čím více je přejezdů, tak tím se zvětšuje časový rozdíl mezi skutečností a powermillem.



Obr. 96. Porovnání obráběcích časů pro strategii Konstant Z

Na obrázku 97 je zobrazeno porovnání obráběcích časů pro strategii Konstant Z. Na obrázku je zobrazen rozdíl skutečného času v % v porovnání s programovým časem. Z obrázku je patrné, že skutečný čas obrábění je větší až o 70 %.



Obr. 97. Porovnání obráběcích časů pro strategii Konstant Z



## 7 DISKUZE VÝSLEDKŮ

V experimentální části bylo realizováno frézování kopírovacími frézami s označením KK441.120 001452 12R6 a OK441.120 001452 12R6, které se od sebe liší zejména úhlem čela. Bylo zvoleno pět různých kroků do boku pro strategii 3D Offset a pět různých kroků v ose Z pro strategii Konstant Z a pět různých posuvů na zub, přičemž jsme tyto zvolené hodnoty mezi sebou kombinovali. Obrábění bylo prováděno na zkušebním vzorku z materiálu 19 573. Zkušební vzorek byl navržen tak, aby se na něm vyskytovaly horizontální oblasti, pro které je vhodná strategie 3D Offset a vertikální oblasti, pro které je vhodná strategie Konstant Z. Pro jednotlivé kombinace kroků do boku (kroků v ose Z) s posuvem na zub bylo naměřeno pomocí drsnoměru Surftest SJ-201 celkem třicet hodnot  $R_a$  a třicet hodnot  $R_z$ . Z naměřených hodnot byl vypočítán odhad střední hodnoty a dále pak směrodatná odchylka a variační koeficient.

Pro různé kombinace kroků do boku pro strategii 3D Offset, kroků v ose Z pro strategii Konstant Z a posuvu na zub, pro oba nástroje a pro obě strategie se odhady středních hodnot pohybují v rozmezí od hodnot drsnosti  $R_a=0,47 \mu\text{m}$  do  $R_a=2,12 \mu\text{m}$  a od hodnot drsnosti  $R_z=3,78 \mu\text{m}$  do  $R_z=9,26 \mu\text{m}$ . Dále byla vypočítána hodnota směrodatné odchylky, kde tato hodnota nám vypovídá o tom, jak moc se od sebe liší hodnoty ve statistickém souboru. Pro hodnoty drsnosti  $R_a$  se hodnoty směrodatné odchylky pohybovaly v rozmezí od  $0,015 \mu\text{m}$  do  $0,050 \mu\text{m}$  a pro hodnoty drsnosti  $R_z$  se hodnoty směrodatné odchylky pohybovaly v rozmezí od  $0,134 \mu\text{m}$  do  $0,501 \mu\text{m}$ . Hodnoty směrodatné odchylky pro drsnost  $R_a$  jsou menší než hodnoty drsnosti  $R_z$ . Je to dáno tím, že drsnost  $R_a$  je průměrnou aritmetickou úchylkou posuzovaného profilu a tím jsou hodnoty menší než  $R_z$ . Hodnota  $R_z$  je součet výšky nejvyššího výstupku profilu a hloubky nejnižší prohlubně profilu. Z toho vyplývá, že míra variability je pro hodnoty drsnosti  $R_a$  menší, než pro hodnoty drsnosti  $R_z$ . Poté byla vypočítána hodnota variačního koeficientu, která nám udává, z kolika procent se směrodatná odchylka podílí na odhadu střední hodnoty. Variační koeficient pro hodnoty drsnosti  $R_a$  se pohybuje od 1,02 % do 6,21 % a pro hodnoty drsnosti  $R_z$  se pohybuje od 2,41 % do 10,18 %. Z toho vyplývá, že variabilita hodnot drsnosti  $R_a$  je menší, než hodnot drsnosti  $R_z$ . Variační koeficient hodnot drsnosti  $R_a$  a  $R_z$  je maximálně 10,18 %, z čehož můžeme odvodit, že odhad střední hodnoty je důvěryhodný.

Při pohledu na obrázky 62 až 69, které zobrazují vliv kroku do boku na drsnost povrchu, je znatelné, že tento parametr nejvíce ovlivňuje kvalitu povrchu obrobené plochy. Při zvyšování

jícím se kroku do boku se drsnost  $R_a$  i drsnost  $R_z$  zvyšovala. Pro strategii 3D Offset se drsnost povrchu  $R_a$  pro krok do boku 0,16 mm pro oba nástroje pohybovala v rozmezí od 0,47  $\mu\text{m}$  do 0,79  $\mu\text{m}$ . Drsnost  $R_a$  pro krok do boku 0,25 mm byla v rozmezí od 0,58  $\mu\text{m}$  do 0,78  $\mu\text{m}$ , pro krok do boku 0,32 mm od 0,67  $\mu\text{m}$  do 0,85  $\mu\text{m}$ , pro krok do boku 0,40 mm od 0,80  $\mu\text{m}$  do 1,05  $\mu\text{m}$  a pro krok do boku 0,60 mm od 1,35  $\mu\text{m}$  do 1,55  $\mu\text{m}$ . Drsnost  $R_z$  pro krok do boku 0,16 mm byla v rozmezí od 3,78  $\mu\text{m}$  do 5,16  $\mu\text{m}$ , pro krok do boku 0,25 mm byla v rozmezí od 4,36  $\mu\text{m}$  do 5,30  $\mu\text{m}$ , pro krok do boku 0,32 mm od 4,57  $\mu\text{m}$  do 5,81  $\mu\text{m}$ , pro krok do boku 0,40 mm od 4,92  $\mu\text{m}$  do 6,59  $\mu\text{m}$  a pro krok do boku 0,60 mm od 7,53  $\mu\text{m}$  do 8,16  $\mu\text{m}$ . Pro strategii Konstant Z se drsnost povrchu  $R_a$  pro krok v ose Z 0,16 mm pro oba nástroje pohybovala v rozmezí od 0,46  $\mu\text{m}$  do 1,06  $\mu\text{m}$ , pro krok v ose Z 0,25 mm byla v rozmezí od 0,53  $\mu\text{m}$  do 1,10  $\mu\text{m}$ , pro krok v ose Z 0,32 mm od 0,65  $\mu\text{m}$  do 1,11  $\mu\text{m}$ , pro v ose Z 0,40 mm od 0,80  $\mu\text{m}$  do 1,49  $\mu\text{m}$  a pro krok v ose Z 0,60 mm od 1,18  $\mu\text{m}$  do 2,12  $\mu\text{m}$ . Drsnost  $R_z$  pro krok v ose Z 0,16 mm byla v rozmezí od 2,63  $\mu\text{m}$  do 5,16  $\mu\text{m}$ , pro krok v ose Z 0,25 mm byla v rozmezí od 2,95  $\mu\text{m}$  do 5,45  $\mu\text{m}$ , pro krok v ose Z 0,32 mm od 3,34  $\mu\text{m}$  do 6,21  $\mu\text{m}$ , pro krok v ose Z 0,40 mm od 3,96  $\mu\text{m}$  do 6,51  $\mu\text{m}$  a pro v ose Z 0,60 od 6,10  $\mu\text{m}$  do 9,26  $\mu\text{m}$ . Toto rozmezí je způsobeno především posuvem na zub a částečně i nástrojem.

Při pohledu na obrázky 70 až 77, které zobrazují vliv posuvu na zub na drsnost povrchu, je znatelné, že tento parametr kvalitu povrchu obrobeneé plochy téměř neovlivňuje. Při zvyšujícím se posuvu na zub se drsnost  $R_a$  a drsnost  $R_z$  mírně zvyšovala. Pro strategii 3D Offset a Konstant Z a pro oba nástroje při posuvu na zub 0,1 mm hodnota drsnosti závisela především na kroku do boku. Totéž platilo i u posuvu na zub 0,12 mm, 0,135 mm, 0,15 mm a 0,17 mm.

Při pohledu na obrázky 78 až 85, které zobrazují vliv nástroje na drsnost povrchu, je znatelné, že volba nástroje ovlivňuje kvalitu povrchu obrobeneé plochy. Pro strategii 3D Offset pro kroky do boku 0,16 mm, 0,25 mm, 0,32 mm a 0,40 mm a pro všechny posuvy na zub se jeví vhodnější nástroj KK441.120 001452 12R6. Pro krok do boku 0,60 mm a pro všechny posuvy na zub se jeví vhodnější nástroj OK441.120 001452 12R6. Rozdíly v drsnostech mezi těmito nástroji je nepatrný. Pro strategii Konstant Z pro všechny kroky v ose Z a pro všechny posuvy na zub se výrazně jeví vhodnější nástroj OK441.120 001452 12R6. Z toho vyplývá, že pro strategii 3D Offset, neboli pro horizontální plochy je vhod-

nější nástroj KK441.120 001452 12R6 a pro strategii Konstant Z, neboli pro vertikální plochy je vhodnější nástroj OK441.120 001452 12R6.

Při pohledu na obrázky 86 až 93, které zobrazují vliv obráběcí strategie na drsnost povrchu, je zřejmé, že pro nástroj KK441.120 001452 12R6 je vhodnější strategie 3D Offset (neboli pro horizontální oblast) a pro strategii Konstant Z (neboli pro vertikální oblast) je vhodnější nástroj OK441.120 001452 12R6.

Při porovnání časů, které jsme získali z programu Powermill a které jsme ve skutečnosti naměřili, jsme zjistili, že hodnoty naměřené ve skutečnosti byly vždy větší, než hodnoty získané z programu Powermill. Rozdíly u strategie 3D Offset jsou menší, než u strategie Konstant Z. To je dáno zejména větším počtem přejezdů mezi jednotlivými drahami. U strategie 3D Offset je nástroj v plynulém řezu. U strategie Konstant Z je velký počet přejezdů, kde tato strategie byla nastavena tak, aby se nástroj pohyboval sousledně. Powermill nepočítá s dynamikou stroje a čím více je přejezdů, tak tím se zvětšuje časový rozdíl mezi skutečností a Powermillem.

## ZÁVĚR

Diplomová práce řeší vliv řezných podmínek na kvalitu povrchu obrobené plochy. Mezi nejpodstatnější vlivy ovlivňující výslednou jakost povrchu patří krok do boku (radiální) a krok v ose Z (axiální) nástroje, řezná rychlost, posuvová rychlost, geometrie nástroje, celková tuhost soustavy a volba vhodné obráběcí strategie.

V praktické části byl navržen model součásti pomocí programu Catia V5R20, na kterém jsme testovali zvolené řezné podmínky. Součást byla z nástrojového materiálu, kde označení materiálu je W.Nr 1.2379, kde dle normy ČSN je označení 19 573 a dle normy DIN je označení X153CrMoV12-1. Mezi proměnné řezné podmínky jsme vybrali pro horizontální strategii 3D Offset rozdílný krok do boku ( $a_e$ ) a rozdílný posuv na zub a pro vertikální strategii Konstant Z rozdílný krok v ose Z ( $a_p$ ) a rozdílný posuv na zub. Dle doporučení výrobce nástroje jsme řeznou rychlost udržovali na konstantní hodnotě. V testování byly použity dva monolitní kopírovací (kulové) nástroje o průměru 12 mm od výrobce Nástroje 24, kde tyto nástroje se především lišily úhlem čela. Model byl záměrně navržen pro dvě odlišné strategie, kde část modelu byla vhodná pro rovinou dokončovací strategii a část modelu byla vhodná pro strmou dokončovací strategii. Tvorba obráběcí strategie a generování CNC kódu (viz příloha na CD/CNC programy) proběhla v programu Powermill od firmy Delcam. Pro rovinou oblast byla použita strategie 3D offset a pro strmou oblast strategie Konstant Z. Samotné obrábění bylo prováděno na tříosém CNC frézovacím centru Mikron HSM 800. Jednotlivé obrobené povrchy byly změřeny pomocí dotykového drsnoměru Surftest SJ-210 od firmy Mitutoyo. Z hodnot charakterizující strukturu povrchy byl vybrán parametr  $R_a$  a parametr  $R_z$ . Na každé ploše bylo změřeno 30 hodnot parametru  $R_a$  a  $R_z$ , které jsme následně pomocí programu Minitab 14 statisticky zpracovali.

Byly zkoumány hodnoty parametru drsnosti v závislosti na kroku do boku (pro strategii 3D Offset), kroku v ose Z (pro strategii Konstant Z), posuvové rychlosti, vliv geometrie nástroje (rozdílné úhly čela) a vliv obráběcí strategie. Dále jsme zkoumali čas obrábění, kde program Powermill nám určil teoretický čas obrábění, který jsme následně porovnávali se skutečným časem obrábění.

Při analýze výsledků je patrné, že velký vliv na výslednou drsnost povrchu má krok do boku nástroje. Méně už pak geometrie nástroje (úhel čela), avšak při malých krocích do boku. Při větších krocích do boku je již znatelný rozdíl mezi odlišnými úhly čela na nástroji. Naopak velmi malý vliv na výslednou drsnost povrchu při jakémkoliv kroku do boku

má posuvová rychlost. Obráběcí časy se u strategie 3D offset výrazně nelišily, ale u strategie Konstant Z byly rozdíly již znatelné. Tyto rozdíly jsou zapříčiněny dynamikou stroje. Program počítá s teoretickými hodnotami posuvů a nepočítá s dynamikou stroje.

Pro hodnotu parametru drsnosti  $R_a=0,8\mu\text{m}$  zadanou konstrukční dokumentací pro strategii 3D Offset nejlépe vyhovuje nástroj označen KK441.120 001452 12R6 s krokem do boku 0,32mm a posuvem na zub 0,17mm. Pro hodnotu parametru drsnosti  $R_a=0,8\mu\text{m}$  zadanou konstrukční dokumentací pro strategii Konstant Z nejlépe vyhovuje nástroj označen OK441.120 001452 12R6 s krokem v ose Z 0,40mm a posuvem na zub 0,17mm. Pro hodnotu parametru drsnosti  $R_z=6,3\mu\text{m}$  zadanou konstrukční dokumentací pro strategii 3D Offset nejlépe vyhovuje nástroj označen KK441.120 001452 12R6 s krokem do boku 0,40mm a posuvem na zub 0,17mm. Pro hodnotu parametru drsnosti  $R_z=6,3\mu\text{m}$  zadanou konstrukční dokumentací pro strategii Konstant Z nejlépe vyhovuje nástroj označen OK441.120 001452 12R6 s krokem v ose Z 0,40mm a posuvem na zub 0,17mm.

**SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY**

- [1] BUMBÁLEK, B., ODVODY, V. a OŠŤÁDAL, B. *Drsnost povrchu*. Praha: SNTL, 1989. 340s. ISBN 04-252-89.
- [2] HLUCHÝ, M., KOLOUCH, J. *Strojírenská technologie 1: Nauka o materiálu*. 3. vyd. Praha: Scientia, 2002. 266s. ISBN 80-7183-262-6.
- [3] HLUCHÝ, M., KOLOUCH, J., PAŇÁK, R. *Strojírenská technologie 2: Polotovary a jejich technologičnost*. 2. vyd. Praha: Scientia, 2001. 315s. ISBN 80-7183-244-8.
- [4] HLUCHÝ, M., HANĚK, V. *Strojírenská technologie 2: Koroze, základy obrábění, výrobní postupy*. Praha: Scientia, 1998. 176s. ISBN 80-7183-127-1.
- [5] KAŠTÁNEK, O. *Strojírenské materiály a technologie*. Olomouc: Moravské tiskařské závody, 1982. 308s. ISBN 55-575-82.
- [6] KOČMAN, K., PROKOP, J. *Technologie obrábění*. 2. vyd. Brno: AKADEMICKÉ NAKLADATELSTVÍ CERM, 2005. 270s. ISBN 80-214-3068-0.
- [7] KOČMAN, K. *Speciální technologie obrábění*. 3. vyd. Brno: AKADEMICKÉ NAKLADATELSTVÍ CERM, 2004. 227s. ISBN 80-214-2562-8.
- [8] ŘASA, J., GABRIEL, V. *Strojírenská technologie 3: Metody, stroje a nástroje pro obrábění*. 2. vyd. Praha: Scientia, 2005. 256s. ISBN 80-7183-337-1.
- [9] ŘASA, J., POKORNÝ, P., GABRIEL, V. *Strojírenská technologie 3: Obráběcí stroje pro automatizovanou výrobu, fyzikální technologie obrábění*. 2. vyd. Praha: Scientia, 2005. 221s. ISBN 80-7183-336-1.
- [10] PERNIKÁŘ, J., TYKAL, M. a VAČKÁŘ, J. *Jakost a metrologie*. Brno: AKADEMICKÉ NAKLADATELSTVÍ CERM, 2001. 151s. ISBN 80-214-1997-0.
- [11] PETERKA, J., JANÁČ, A. *CAD/CAM SYSTÉMY*. Bratislava: STU, 2002. 63s. ISBN 80-227-1685-5.
- [12] ŠTULPA, M. *CNC obráběcí stroje a jejich programování*. Praha: BEN, 2006. 128s. ISBN 978-80-7300-207-7.

- [13] ČSN EN ISO 4287:1997. *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) – Struktura povrchu: Profilová metoda – Pojmy, definice a parametry struktury povrchu*. Praha: Český normalizační institut, 1999.
- [14] ČSN EN ISO 4288:1997. *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) – Struktura povrchu: Profilová metoda – Pravidla a postupy pro posuzování struktury povrchu*. Praha: Český normalizační institut, 1999.
- [15] *Programování CNC strojů* [online]. [cit. 2011-12-26]. Dostupné z: [http://vkonar.ic.cz/dokumenty/zaklady\\_prog/program\\_CNC.pdf](http://vkonar.ic.cz/dokumenty/zaklady_prog/program_CNC.pdf)
- [16] VAŇÁK, A. *Technologie frézování* [online]. Šumperk, 2007. [cit. 2011-12-26]. Dostupné z: [http://www.sossou-spk.cz/esf/TEC\\_fr.pdf](http://www.sossou-spk.cz/esf/TEC_fr.pdf)
- [17] ŘEZNÍČEK, L., KNAP, Z. *Základy obrábění na číslicově řízených obráběcích strojích*. Trutnov: SPŠ Trutnov, 2001. 75s.
- [18] *Programování CNC systémů* [online]. [cit. 2011-12-26]. Dostupné z: <http://www.fs.vsb.cz/books/PNCS/programovani-cnc-systemu.pdf>
- [19] *Učebnice CNC* [online]. [cit. 2011-12-26]. Dostupné z: <http://sstzr.cz/download/cat1/ucebnicecnc.pdf>
- [20] *Dotykové sondy pro obráběcí stroje* [online]. [cit. 2011-12-26]. Dostupné z: [http://www.heidenhain.cz/fileadmin/pdb/media/img/208\\_951-C2.pdf](http://www.heidenhain.cz/fileadmin/pdb/media/img/208_951-C2.pdf)
- [21] ČEP, R. *Technologie II -1.díl* [online]. [cit. 2011-12-26]. Dostupné z: [http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/skripta\\_Technologie\\_II\\_1dil.pdf](http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/skripta_Technologie_II_1dil.pdf)
- [22] TICHÁ, Š. *Strojírenská metrologie* [online]. Ostrava, 2004. [cit. 2011-12-26]. Dostupné z: <http://www.fs.vsb.cz/books/StrojMetro/strojirenska-metrologie.pdf>
- [23] HUMÁR, A. *Technologie I: Základy metody obrábění* [online]. BRNO, 2004 [cit. 2011-12-26]. Dostupné z: [http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/oporysave/zakl\\_met\\_obr/zakl\\_met\\_obr\\_1](http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/oporysave/zakl_met_obr/zakl_met_obr_1)
- [24] BRYCHTA, J. a kol. *Nové směry v progresivním obrábění*. Ostrava: Ediční středisko VŠB-TUO, 2007. 256Ss. ISBN 978-80-248-1505-3.
- [25] ČEP, R. *Technologie II-2. díl* [online]. [cit. 2012-01-22]. Dostupné z: [http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/skripta\\_Technologie\\_II\\_2dil.pdf](http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/skripta_Technologie_II_2dil.pdf)

- [26] *EasyShrink20* [online]. [cit. 2012-01-25]. Dostupné z: <<http://www.secotools.com/CorpWeb/Slovakia/Aktuality/Technical%20articles/EasyShrink20/EasyShrink20katalogCZ.pdf>>
- [27] Nová koncepce tepelného upínání nástrojů. *MM průmyslové spektrum* [online]. 2004 [cit. 2012-01-25]. Dostupné z: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/nova-koncepce-tepelneho-upinani-nastroju.html>>
- [28] MIKRON AG. *Návod k obsluze rychloběžného stroje HSM 600/HSM 800*. Nidau, 2001.
- [29] *I.2379* [online]. [cit. 2012-01-25]. Dostupné z: <<http://www.nastrojove-oceli.com/tu/1.2379.pdf>>
- [30] *Ocel nástrojová pro práce za studena W. Nr. I.2379* [online]. [cit. 2012-01-25]. Dostupné z: <<http://www.jkz.cz/cs/produkty/nastrojova-ocel-12379>>
- [31] *Přenosný drsnoměr Surftest SJ-210* [online]. [cit. 2012-01-26]. Dostupné z: <<http://www.mitutoyo.cz/cz/pdf/2011/PRC1344%282%29-SJ-210.pdf>>
- [32] *Obecný úvod do problematiky CNC programování* [online]. [cit. 2012-03-18]. Dostupné z: <[http://www.sosbites.cz/images/stories/VUKOV\\_TEXT\\_-\\_1.ST.pdf](http://www.sosbites.cz/images/stories/VUKOV_TEXT_-_1.ST.pdf)>



**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

$a_e$	Krok do boku.
$a_p$	Krok v ose Z.
B	Šířka záběru.
CAD	Computer Aided Design.
CAM	Computer Aided Manufacturing.
CAE	Computer Aided Engineering.
CNC	Computer Numeric Control.
ČSN	Česká státní norma.
d	Průměr nástroje.
DIN	Německá norma.
E	Bod nastavení nástroje.
$F$	Celková řezná síla.
$F_c$	Řezná síla.
$F_{cN}$	Kolmá řezná síla.
$F_f$	Posuvová síla.
$F_{fN}$	Kolmá posuvová síla.
$f_o$	Posuv na otáčku.
$f_z$	Posuv na zub.
G	Přípravná funkce (geometrická).
h	Hloubka záběru.
HB	Tvrdost podle Brinella.
HRC	Tvrdost podle Rockwella.
ISO	Mezinárodní norma.
l	Základní délka.

---

$l_n$	Vyhodnocovaná délka.
$M$	Pomocná funkce (technologická), nulový bod stroje.
$N$	Nulový bod nosiče nástroje.
$n$	Otáčky, počet měření.
$P$	Bod špičky nástroje, parametr vypočítaný ze základního profilu.
PKNB	Polykrystalický kubický nitrid bóru.
PM	Powermill.
$R$	Referenční bod stroje, parametr vypočítaný z profilu drsnosti.
$Ra$	Průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu.
$Rc$	Průměrná výška prvků profilu.
$Rdc$	Rozdíl výšky úseku profilu.
$Rdq$	Průměrný kvadratický sklon posuzovaného profilu.
$Rku$	Špičatost posuzovaného profilu.
$Rm$	Mez pevnosti.
$Rmr$	Materiálový poměr profilu.
$Rq$	Průměrná kvadratická úchylka posuzovaného profilu.
$Rsk$	Šikmost posuzovaného profilu.
$RSm$	Průměrná šířka prvků profilu.
$Rt$	Celková výška prvků profilu.
$Rz$	Největší výška profilu.
$s$	Odhad směrodatné odchylky.
$V$	Variační koeficient.
$v_c$	Řezná rychlost.
$v_f$	Posuvová rychlost.
$W$	Nulový bod obrobku, parametr vypočítaný z profilu vlnitosti.
W.Nr.	Číslo materiálu.

---

$\bar{x}$	Odhad střední hodnoty.
$x_i$	i-tá hodnota naměřené veličiny.
$Z_p$	Vzdálenost mezi střední čarou a nejvyšším výstupkem profilu.
$Z_v$	Vzdálenost mezi střední čarou a nejnižším výstupkem profilu.
$\alpha$	Úhel hřbetu.
$\beta$	Úhel břitu.
$\gamma$	Úhel čela.
$\delta$	Úhel řezu.
$\varphi_i$	Úhel posuvového pohybu.
$\kappa$	Úhel nastavení.
$\lambda$	Úhel sklonu ostří.

**SEZNAM OBRÁZKŮ**

<i>Obr. 1. Frézování válcové (obvodové) a čelní [8]</i> .....	14
<i>Obr. 2. Frézování sousledné [23]</i> .....	15
<i>Obr. 3. Frézování nesousledné [23]</i> .....	15
<i>Obr. 4. Průřez třísky [25]</i> .....	16
<i>Obr. 5. Řezné síly [8]</i> .....	17
<i>Obr. 6. Vybrané druhy fréz [8]</i> .....	19
<i>Obr. 7. Geometrie zubu frézy [16]</i> .....	20
<i>Obr. 8. Negativní geometrie [16]</i> .....	21
<i>Obr. 9. Pozitivní geometrie [16]</i> .....	21
<i>Obr. 10. Příklady upnutí vyměnitelné destičky [8]</i> .....	23
<i>Obr. 11. Ostření fréz [8]</i> .....	24
<i>Obr. 12. Vodorovná konzolová frézka [21]</i> .....	26
<i>Obr. 13. Svislá konzolová frézka [21]</i> .....	26
<i>Obr. 14. Rovinná frézka [6]</i> .....	27
<i>Obr. 15. Svislá stolová frézka [6]</i> .....	28
<i>Obr. 16. Systém stavění souřadnic [19]</i> .....	31
<i>Obr. 17. Systém pro pravoúhlé řízení [19]</i> .....	32
<i>Obr. 18. Systém pro souvislé řízení [17]</i> .....	32
<i>Obr. 19. Absolutní programování [15]</i> .....	33
<i>Obr. 20. Přírůstkové programování [15]</i> .....	33
<i>Obr. 21. Blok</i> .....	34
<i>Obr. 22. Příklad pevného formátu</i> .....	35
<i>Obr. 23. Příklad volného formátu</i> .....	35
<i>Obr. 24. Pravoúhlý pravotočivý souřadný systém [15]</i> .....	36
<i>Obr. 25. Mnemotechnická pomůcka [15]</i> .....	36
<i>Obr. 26. Vztažené body [32]</i> .....	38
<i>Obr. 27. Excentrický měřicí dotyk [15]</i> .....	39
<i>Obr. 28. Princip dotykové sondy [20]</i> .....	40
<i>Obr. 29. Vychýlení dotykové sondy [20]</i> .....	40
<i>Obr. 30. Hrubování rastrem</i> .....	43
<i>Obr. 31. Hrubování profilem</i> .....	43
<i>Obr. 32. Hrubování konturou</i> .....	44

<i>Obr. 33. Zbytkové hrubování .....</i>	44
<i>Obr. 34. Dokončení rastrem .....</i>	45
<i>Obr. 35. Dokončení offsetem .....</i>	45
<i>Obr. 36. Dokončení Konstant Z .....</i>	45
<i>Obr. 37. Dokončení optimalizovaným Konstant Z.....</i>	46
<i>Obr. 38. Dokončení strmé plošné .....</i>	46
<i>Obr. 39. Dokončení rohu .....</i>	47
<i>Obr. 40. Řez rovinou kolmou k povrchu [1] .....</i>	48
<i>Obr. 41. Profily [13] .....</i>	49
<i>Obr. 42. Základní a vyhodnocovaná délka .....</i>	50
<i>Obr. 43. Největší výška profilu [13].....</i>	51
<i>Obr. 44. Průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu.....</i>	52
<i>Obr. 45. Průměrná šířka prvků profilu [13] .....</i>	54
<i>Obr. 46. Značení struktury povrchu [10].....</i>	56
<i>Obr. 47. Dotykový profilometr [24].....</i>	57
<i>Obr. 48. Interferenční mikroskop [24].....</i>	58
<i>Obr. 49. Mikron HSM 800 [28] .....</i>	60
<i>Obr. 50. Nástroj s držákem HSK 50E .....</i>	62
<i>Obr. 51. EasyShrink 20 [26] .....</i>	63
<i>Obr. 52. Tvar modelu.....</i>	64
<i>Obr. 53 Řez modelem.....</i>	64
<i>Obr. 54. Umístění nulového bodu obrobku.....</i>	66
<i>Obr. 55. Strategie 3D Offset .....</i>	67
<i>Obr. 56. Krok do boku u strategie 3D Offset.....</i>	67
<i>Obr. 57. Strategie Konstant Z.....</i>	68
<i>Obr. 58. Krok v ose Z u strategie Konstant Z.....</i>	68
<i>Obr. 59. Drsnoměr Surftest SJ-210 [31].....</i>	69
<i>Obr. 60. Směr měřícího hrotu u strategie 3D Offset .....</i>	70
<i>Obr. 61. Směr měřícího hrotu u strategie Konstant Z .....</i>	70
<i>Obr. 62. Závislost drsnosti Ra na kroku do boku pro strategii 3D Offset a nástroj OK .....</i>	79
<i>Obr. 63. Závislost drsnosti Rz na kroku do boku pro strategii 3D Offset a nástroj OK.....</i>	80
<i>Obr. 64. Závislost drsnosti Ra na kroku do boku pro strategii 3D Offset a nástroj KK .....</i>	81
<i>Obr. 65. Závislost drsnosti Rz na kroku do boku pro strategii 3D Offset a nástroj KK.....</i>	81

<i>Obr. 66. Závislost drsnosti Ra na kroku v ose Z pro strategii Konstant Z a nástroj OK .....</i>	82
<i>Obr. 67. Závislost drsnosti Rz na kroku v ose Z pro strategii Konstant Z a nástroj OK.....</i>	83
<i>Obr. 68. Závislost drsnosti Ra na kroku v ose Z pro strategii Konstant Z a nástroj KK.....</i>	83
<i>Obr. 69. Závislost drsnosti Rz na kroku v ose Z pro strategii Konstant Z a nástroj KK.....</i>	84
<i>Obr. 70. Závislost drsnosti Ra na posuv na zub pro strategii 3D Offset a nástroj OK .....</i>	85
<i>Obr. 71. Závislost drsnosti Rz na posuv na zub pro strategii 3D Offset a nástroj OK.....</i>	85
<i>Obr. 72. Závislost drsnosti Ra na posuv na zub pro strategii 3D Offset a nástroj KK .....</i>	86
<i>Obr. 73. Závislost drsnosti Rz na posuv na zub pro strategii 3D Offset a nástroj KK.....</i>	87
<i>Obr. 74. Závislost drsnosti Ra na posuv na zub pro strategii Konstant Z a nástroj OK.....</i>	87
<i>Obr. 75. Závislost drsnosti Rz na posuv na zub pro strategii Konstant Z a nástroj OK .....</i>	88
<i>Obr. 76. Závislost drsnosti Ra na posuv na zub pro strategii Konstant Z a nástroj KK .....</i>	89
<i>Obr. 77. Závislost drsnosti Rz na posuv na zub pro strategii Konstant Z a nástroj KK.....</i>	89
<i>Obr. 78. Porovnání nástroje pro strategii 3D Offset, <math>a_e=0,16</math> mm pro hodnotu Ra .....</i>	90
<i>Obr. 79. Porovnání nástroje pro strategii 3D Offset pro hodnotu Ra.....</i>	91
<i>Obr. 80. Porovnání nástroje pro strategii 3D Offset, <math>a_e=0,16</math> mm pro hodnotu Rz.....</i>	92
<i>Obr. 81. Porovnání nástroje pro strategii 3D Offset pro hodnotu Rz .....</i>	92
<i>Obr. 82. Porovnání nástroje pro strategii Konstant Z, <math>a_p=0,16</math> mm pro hodnotu Ra.....</i>	93
<i>Obr. 83. Porovnání nástroje pro strategii Konstant Z pro hodnotu Ra .....</i>	94
<i>Obr. 84. Porovnání nástroje pro strategii Konstant Z pro hodnotu Rz.....</i>	95
<i>Obr. 85. Porovnání nástroje pro strategii Konstant Z pro hodnotu Rz.....</i>	95
<i>Obr. 86. Porovnání obráběcí strategie pro nástroj OK, <math>a_e(a_p)=0,16</math> mm hodnotou Ra .....</i>	96
<i>Obr. 87. Porovnání obráběcí strategie pro nástroj OK hodnotou Ra .....</i>	97
<i>Obr. 88. Porovnání obráběcí strategie pro nástroj OK, <math>a_e(a_p)=0,16</math> mm hodnotou Rz .....</i>	97
<i>Obr. 89. Porovnání obráběcí strategie pro nástroj OK hodnotou Rz .....</i>	98
<i>Obr. 90. Porovnání obráběcí strategie pro nástroj KK, <math>a_e(a_p)=0,16</math> mm hodnotou Ra .....</i>	99
<i>Obr. 91. Porovnání obráběcí strategie pro nástroj KK hodnotou Ra .....</i>	99
<i>Obr. 92. Porovnání obráběcí strategie pro nástroj KK, <math>a_e(a_p)=0,16</math> mm hodnotou Rz.....</i>	100
<i>Obr. 93. Porovnání obráběcí strategie pro nástroj KK hodnotou Rz.....</i>	101
<i>Obr. 94. Porovnání obráběcích časů pro strategii 3D Offset .....</i>	102
<i>Obr. 95. Porovnání obráběcích časů pro strategii 3D Offset .....</i>	102
<i>Obr. 96. Porovnání obráběcích časů pro strategii Konstant Z .....</i>	104
<i>Obr. 97. Porovnání obráběcích časů pro strategii Konstant Z .....</i>	104

**SEZNAM TABULEK**

<i>Tab. 1. Značení os [12] .....</i>	<i>37</i>
<i>Tab. 2. Charakteristika dotykových sond [20] .....</i>	<i>41</i>
<i>Tab. 3. Specifikace stroje [28] .....</i>	<i>61</i>
<i>Tab. 4. Charakteristika nástrojů .....</i>	<i>61</i>
<i>Tab. 5. Řezné podmínky .....</i>	<i>63</i>
<i>Tab. 6. Chemické složení ČSN 19573 [29] .....</i>	<i>65</i>
<i>Tab. 7. Základní vlastnosti materiálu ve stavu žíhaném [29] .....</i>	<i>65</i>
<i>Tab. 8. Odhad střední hodnoty parametru drsnosti Ra pro 3D Offset a nástroj OK .....</i>	<i>73</i>
<i>Tab. 9. Směrodatná odchylka a variační koeficient pro 3D Offset a nástroj OK (Ra) .....</i>	<i>73</i>
<i>Tab. 10. Odhad střední hodnoty parametru drsnosti Ra pro Konstant Z a nástroj OK .....</i>	<i>73</i>
<i>Tab. 11. Směrodatná odchylka a variační koeficient pro Konstant Z a nástroj OK (Ra) .....</i>	<i>74</i>
<i>Tab. 12. Odhad střední hodnoty parametru drsnosti Ra pro 3D Offset a nástroj KK .....</i>	<i>74</i>
<i>Tab. 13. Směrodatná odchylka a variační koeficient pro 3D Offset a nástroj KK (Ra) .....</i>	<i>75</i>
<i>Tab. 14. Odhad střední hodnoty parametru drsnosti Ra pro Konstant Z a nástroj KK .....</i>	<i>75</i>
<i>Tab. 15. Směrodatná odchylka a variační koeficient pro Konstant Z a nástroj KK (Ra) .....</i>	<i>75</i>
<i>Tab. 16. Odhad střední hodnoty parametru drsnosti Rz pro 3D Offset a nástroj OK .....</i>	<i>76</i>
<i>Tab. 17. Směrodatná odchylka a variační koeficient pro 3D Offset a nástroj OK (Rz) .....</i>	<i>76</i>
<i>Tab. 18. Odhad střední hodnoty parametru drsnosti Rz pro Konstant Z a nástroj OK .....</i>	<i>77</i>
<i>Tab. 19. Směrodatná odchylka a variační koeficient pro Konstant Z a nástroj OK (Rz) .....</i>	<i>77</i>
<i>Tab. 20. Odhad střední hodnoty parametru drsnosti Rz pro 3D Offset a nástroj KK .....</i>	<i>77</i>
<i>Tab. 21. Směrodatná odchylka a variační koeficient pro 3D Offset a nástroj KK (Rz) .....</i>	<i>78</i>
<i>Tab. 22. Odhad střední hodnoty parametru drsnosti Rz pro Konstant Z a nástroj KK .....</i>	<i>78</i>
<i>Tab. 23. Směrodatná odchylka a variační koeficient pro Konstant Z a nástroj KK (Rz) .....</i>	<i>79</i>
<i>Tab. 24. Obráběcí časy pro strategii 3D Offset .....</i>	<i>101</i>
<i>Tab. 25. Obráběcí časy pro strategii Konstant Z .....</i>	<i>103</i>

## SEZNAM PŘÍLOH

### PŘÍLOHA P I: VÝKRES SOUČÁSTI

Přílohy uvedené na CD:

Přílohy DP/Powermill – vytvořené programy pro jednotlivé nástroje a řezné podmínky

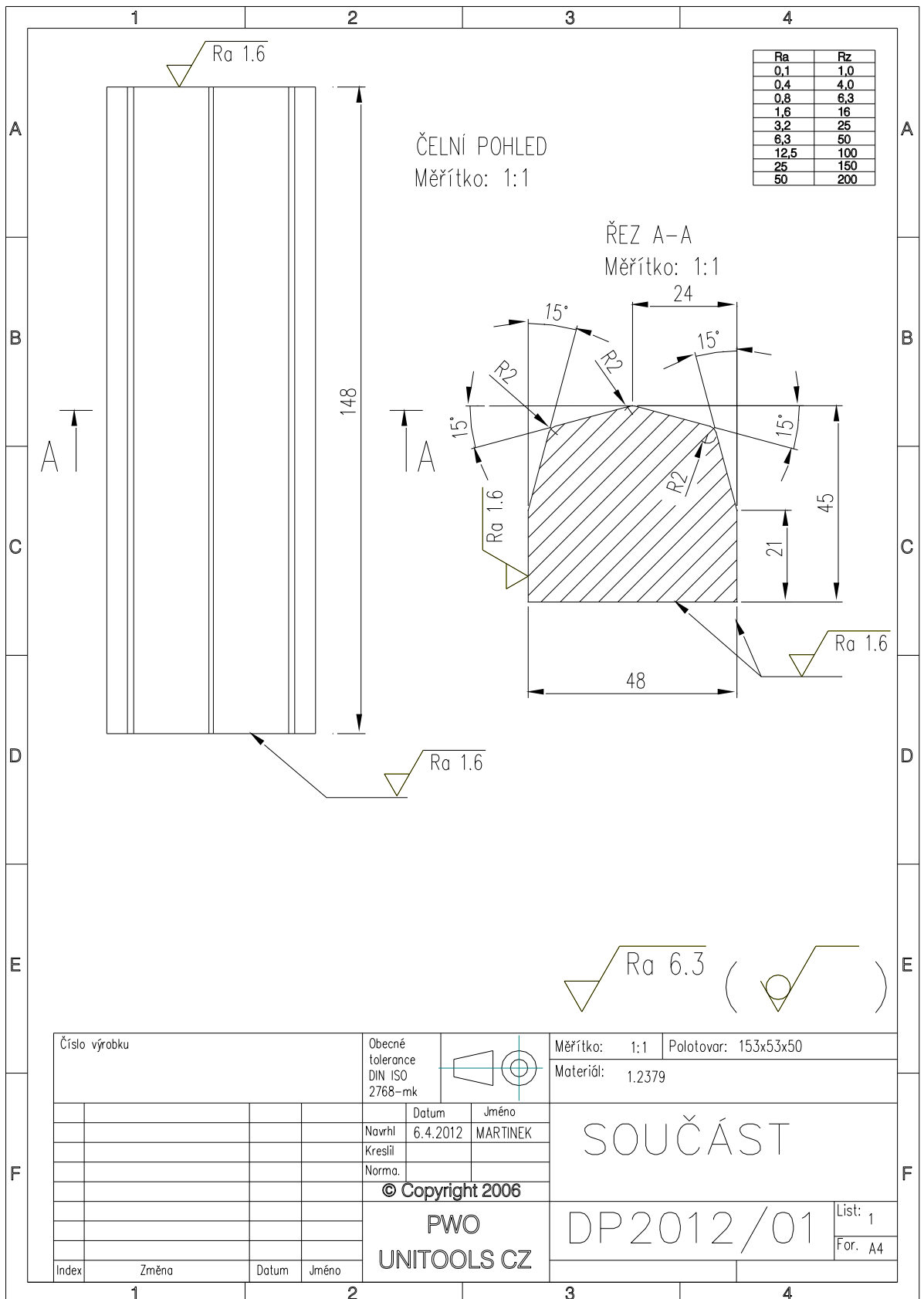
Přílohy DP/CNC programy – vytvořené CNC programy z programu Powermill

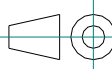
Přílohy DP/Model součásti – 3D model obráběné součásti vytvořený v programu Catia V5R20

Přílohy DP/Naměřená a zpracovaná data – naměřená data získaná pomocí drsnoměr Surf-test SJ-201 a zpracovaná v programu Minitab 14



# PŘÍLOHA P I: VÝKRES SOUČÁSTI



Číslo výrobku		Obecné tolerance DIN ISO 2768-mk				Měřítko: 1:1	Polotovar: 153x53x50
						Materiál: 1.2379	
			Datum	Jméno		<p>SOUČÁST</p> <p>DP2012/01</p> <p>List: 1 For. A4</p>	
			Navrhl	6.4.2012 MARTINEK			
			Kreslil				
			Norma.				
				© Copyright 2006			
				PWO			
				UNITOOLS CZ			
Index	Změna	Datum	Jméno				