

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ



Pavel Skoupý

**Hodnocení zbytkové výšky materiálu při frézování obecných
ploch za použití CAM**

Bakalářská práce

2017

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Skoupý** Jméno: **Pavel** Osobní číslo: **437231**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**
Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Hodnocení zbytkové výšky materiálu při frézování obecných ploch za použití CAM

Název bakalářské práce anglicky:

Evaluation of scallop height during milling of general surfaces with use of CAM software

Pokyny pro vypracování:

1. Provedte rešerši na téma zbytkové výšky obrábění a její výpočet
2. Provedte tvorbu teoretického modelu pro výpočet zbytkové výšky obrábění při frézování obecných ploch tvarovými nástroji
3. Připravte ve vybraném SW CAM model součásti a partprogram s obráběním obecné plochy pro provedení experimentu
4. Experimentálně obrobte obecnou plochu s různým nastavením dráhy nástroje
5. Provedte srovnání dosažené drsnosti a profilu povrchu na součásti s teoretickým modelem

Seznam doporučené literatury:

VRABEC, Martin, Jan MÁDL a České vysoké učení technické v Praze. Strojní fakulta. NC programování v obrábění [online]. Vyd. 1. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2004. ISBN 8001030458;9788001030455
BLÍK, Oldřich, Martin VRABEC a Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava. Katedra obrábění a montáže. Technologie obrábění s využitím CAD/CAM systémů [online]. 1. vyd. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2002. ISBN 9788024800349;8024800349

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

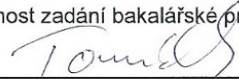
Ing. Jan Tomíček Ph.D., ústav technologie obrábění, projektování a metrologie FS

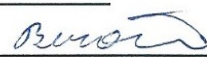
Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **20.04.2017**

Termín odevzdání bakalářské práce: **15.07.2017**

Platnost zadání bakalářské práce: _____


Podpis vedoucí(ho) práce


Podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

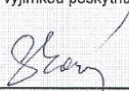

Podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

26.4.2017

Datum převzetí zadání


Podpis studenta

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval panu Ing. Tomíčkoví, Ph.D. za odborné vedení mé bakalářské práce a všechny cenné rady, které mi poskytl.

Dále bych rád poděkoval panu Ing. Urbanovi, který mi pomohl s měřením vzorků a všem, kteří mne během mého studia podporovali, především pak své rodině.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl v přiloženém seznamu veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č.121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne

Jméno autora: Skoupý Pavel

Název BP: Hodnocení zbytkové výšky materiálu při frézování obecných ploch za použití CAM

Rozsah práce: 53 stran

Akad. rok vyhotovení: 2016/2017

Ústav: Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie (ú12134)

Vedoucí BP: Ing. Jan Tomíček, Ph.D.

Konzultant: Ing. Jan Urban

Klíčová slova: obrábění, frézování, CAM, zbytková výška obrábění, jakostní parametry, obecné plochy

Anotace: Tato práce se zabývá parametrem zbytkové výšky obrábění a jeho návazností na povrch součásti. Řeší problematiku jeho definice a použití v CAM systémech. Dále se zabývá povrchem obrobků, jakostními parametry a jejich měřením. Pro praktickou část byl navržen a proveden experiment obrábění zkušebních ploch, na kterých proběhlo měření povrchu. Tyto hodnoty byly porovnány s teoretickým modelem zbytkové výšky.

Author: Skoupý Pavel

Title: Evaluation of scallop height during milling of general surfaces with use of CAM software

Number of pages: 53

Academic year: 2016/2017

Department: Department of Machining, Process Planning and Metrology

Supervisor: Ing. Jan Tomíček, Ph.D.

Consultant: Ing. Jan Urban

Key words: machining, CAM, scallop height, cusp-height, surface texture parameters, milling, general surfaces

Abstract: This thesis concerns itself with scallop-height in milling processes, and its relevance to surface roughness. It discusses problems of its definition and its use in CAM systems. It further introduces surface texture, its parameters and their evaluation. For the practical part of this thesis, an experiment was designed and carried out, during which experimental surfaces were machined and these were measured and evaluated. The relevant data was compared to the theoretical model of scallop-height.

Obsah

1	Seznam zkratek:.....	10
2	Úvod	11
3	Frézování	12
4	Povrch obrobku	13
5	Jakostní parametry:	13
5.1	Úvod	13
5.2	Vybrané termíny dle normy ČSN EN ISO 4287	13
5.2.1	Povrch.....	13
5.2.2	Filtr profilu	14
5.2.3	Profily povrchu	15
5.2.4	Střední čáry.....	15
5.2.5	Délkové prvky	15
5.3	Názvy geometrických parametrů dle normy ČSN EN ISO 4287:.....	16
5.3.1	Prvky profilu:	16
5.3.2	Dělení parametrů dle profilu:.....	16
5.3.3	Výškové parametry:.....	16
5.3.4	Délkové parametry	18
5.4	Doporučené hodnoty parametrů	19
6	Značení na výkresech	20
6.1	Základní značka.....	20
6.2	Variace značky	20
6.3	Použití a orientace značky na výkresu:.....	21
6.4	Meze struktury povrchu	22
7	Měření struktury povrchu	23
7.1	Kontrola porovnáním s etalony	23
7.2	Měření dotykovými přístroji.....	23

7.3	Měření bezdotykové.....	24
8	CNC stroje a jejich programování.....	24
8.1	CNC.....	24
8.2	NC Program.....	25
8.2.1	Rozdělení informací:.....	25
8.2.2	Stavba CNC kódu:.....	26
8.3	CAM.....	26
8.3.1	Tvorba drah nástroje.....	27
9	Zbytková výška obrábění.....	31
9.1	Definice.....	31
9.2	Teoretický výpočet.....	32
9.3	Využití.....	32
9.4	Problémy.....	32
10	Metodika testování.....	34
11	Provedení testů.....	36
11.1	Volba polotovaru:.....	36
11.2	Pracoviště:.....	37
11.3	Volba nástroje:.....	39
11.4	Tvorba drah nástroje:.....	39
11.5	Obrábění:.....	41
11.6	Měření:.....	43
11.7	Výsledky měření.....	45
11.7.1	Zpracování naměřených hodnot.....	45
11.7.2	Srovnání teoretických a reálných hodnot.....	46
11.7.3	Srovnání vzniku chyby při použití špatné definice zbytkové výšky.....	47
11.7.4	Závěr měření.....	48
12	Závěr.....	49
13	Seznam použitých zdrojů.....	50

14	Seznam obrázků a tabulek.....	52
14.1	Obrázky.....	52
14.2	Tabulky	53
15	Přílohy.....	53

1 Seznam zkratek:

CAD	-Computer Aided Design (počítačová podpora konstruování)
CAM	-Computer Aided Manufacturing (počítačová podpora výroby)
CNC	-Computer Numerical Control (počítačově řízené stroje)
ČSN	-česká státní norma
DIN	-německá národní norma
EN	-evropská norma
GPS	-geometrické požadavky na výrobky
ISO	-mezinárodní organizace pro normalizaci
ISO-G kód	-kódovací jazyk zápisu NC programu
NC	-Numerical Control (číslicové řízení stroje)
VBD	-výměnné břitové destičky
dn	-průměr nástroje (mm)
k, K	-velikost kroku (mm)
l	-základní délka (mm)
ln	-vyhodnocovaná délka (mm)
P	-parametry základního profilu (μm)
R	-parametry profilu drsnosti (μm)
Ra	-střední aritmetická úchylka profilu (μm)
Rz	-největší výška profilu (μm)
W	-parametry profilu vlnitosti (μm)
Z	-výšková souřadnice (mm)
X	-délková souřadnice (μm , mm)
Zp	-výstupek profilu (μm)
Zv	-prohlubeň profilu (μm)
ZV	-zbytková výška (μm)
λs	-filtr rozhraní mezi drsností a kratšími složkami vln na povrchu (μm)
λc	-filtr rozhraní mezi složkami drsnosti a vlnitosti, mezní vlnová délka „cut-off“ (μm)
λf	-filtr rozhraní mezi vlnitostí a delšími složkami vln na povrchu (μm)
μm	-mikrometr
kg	-kilogram
mm	-milimetr
kW	-kilowatt
ot/min	-otáčky za minutu
mN	-milinewton
mm/s	-milimetr za sekundu

2 Úvod

V moderním strojírenském průmyslu je mnoho faktorů, které ovlivňují způsoby a metody výroby. Tradiční metody obrábění, kde byla většina výroby prováděna na konvenčních strojích, se pomalu vytrácejí. Konvenční stroje bývají v mnoha firmách nahrazovány, případně jsou již nahrazeny moderními CNC stroji. Aktuálním trendem ve strojírenství je automatizování výrobních linek pomocí automatických podavačů, výměníků nástrojů, robotů a jiných zařízení, s cílem minimalizování času, který je potřebný na samotnou výrobu součásti. Stroje jsou využívány tak, aby byl co nejvíce využit jejich potenciál a maximalizovala se tak ziskovost výroby. Vstupní investice do CNC strojů je totiž několikanásobně vyšší než cena přístrojů konvenčních, a proto, aby se tato investice vyplatila, se musí stroj využít co nejlépe.

Snaha urychlit výrobní proces vede mimo jiné ke zvyšování řezných rychlostí a jiných technických parametrů, čímž se zvyšují i nároky na použité nástroje. Požadavky zákazníka na kvalitu, přesnost a povrchovou strukturu vyrobených součástí se však také zvyšuje a z tohoto důvodu je pro strojírenské firmy důležité nalézt metody a způsoby obrábění, které za dodržení požadavků zákazníka umožní co nejefektivněji využít dostupných strojů a zařízení tak, aby byla zajištěna co největší produktivita výroby.

Velký vliv na produktivitu a kvalitu výroby má tvorba drah nástrojů. Tato práce se bude zabývat použitím parametru zbytkové výšky pro tvorbu drah nástrojů v CAM systému pro obrábění za využití CNC frézování a možností použití tohoto parametru v závislosti na požadované výchozí struktuře povrchu a srovnání vstupních hodnot v CAM systému s reálným výstupem na povrchu součásti.

Práce se zabývá kromě parametru samotného také frézováním, možnostmi použití CNC strojů, programováním drah nástrojů pro CNC stroje a využitím CAM systémů pro generaci drah nástroje. Dále se pak zabývá strukturou povrchu, jejím značením na výkresech a způsoby měření povrchu součástí.

V praktické části této práce je navržen průběh experimentu pro porovnání vstupních parametrů v CAM systému s reálným výstupem hodnot na povrchu součásti a pro srovnání reálných výstupů při použití jiných definic zbytkové výšky v CAM systému. Pro toto porovnání byly použity hodnoty, které vychází z teoretického modelu výpočtu zbytkové výšky obrábění, a hodnoty získané z výstupu generování drah v CAM systému. Výsledkem práce je porovnání těchto hodnot s měřením struktury povrchu součásti a hodnocení využitelnosti tohoto vstupního parametru CAM systému v závislosti na parametrech struktury povrchu.

3 Frézování

Frézování je spolu se soustružením nejpoužívanějším způsobem obrábění. Využívá se mimo jiné pro obrábění rovinných, tvarových ploch, či pro obrábění drážek a ozubení. Jedná se o třískové obrábění, kde hlavní pohyb koná rotující nástroj- fréza, vedlejší pohyb provádí obrobek. [13, str. 20]

Frézovací stroje se nazývají frézky. Ty se dělí například podle počtu pohyblivých os, podle konstrukce (vertikální a horizontální) a podle způsobu pohybu obrobku (stolové, konzolové). Frézky mohou být konvenční, či číslicově řízené s vlastním řídicím systémem. [13, str. 31-35]

Stejně jako u jiných způsobů obrábění je možné rozlišovat frézování dle operací na hrubování, během kterého dochází k odebrání velkého množství materiálu a dokončování, kdy dochází k odebrání voleného technologického přídavku a dochází k utváření struktury povrchu obrobku.

Jedním z nejvíce řešených témat moderního frézování je obrábění obecných ploch, které jsou někdy také nazývané plochy volné, či tvarové. Tyto plochy mohou být jednoduchých, nebo složitých tvarů. Obvykle však nejsou pravidelné a sestávají se z různých pravidelných (například rovinné, rotační a sférické plochy) i nepravidelných tvarů, které na sebe plynule navazují. Tyto plochy se využívají v CAD programech pro vytvoření složitých 3D součástí, kde popisují jejich povrch. Používají se například pro výrobu forem v leteckých a automobilových aplikacích. [28, str. 114; 29, str. 4]

V moderním průmyslu se využívá frézovacích strojů pro obrábění těchto ploch, pro dokončovací operace se stále častěji využívá čtyř a pětiosých strojů. Především z důvodu pořizovací ceny strojů a jednoduššího programování se však nadále pro tyto operace využívá i tříiosých strojů, které je možno doplnit pro složitější operace polohovatelnými stoly. [22; 28, str. 114-132]

Při frézování je možno využít široké škály nástrojů, které můžeme dělit podle mnoha kritérií. Můžeme je dělit například podle konstrukčního uspořádání na frézy celistvé (monolitní) a na frézy s výměnnými břity (VBD), které jsou mechanicky upevněny na tělo frézy. Rozdělit frézy lze ale i podle jejich použití na frézy hrubovací, dokončovací, nebo podle aplikace- například frézy na tvarové plochy (kulové frézy) a další. [13, str. 27-29]

4 Povrch obrobku

Povrch obrobku je u frézování a jiných operací třískového obrábění vytvářen odebráním materiálu. Během obrábění po sobě nástroj zanechává stopy-nerovnosti, tím vzniká na povrchu obrobku jeho struktura. Na strojní výrobky jsou kladeny vysoké požadavky na přesnost a jakost jejich povrchu s ohledem na funkce daných ploch na výrobku. Struktura povrchu totiž může ovlivnit funkci i životnost součásti. Vlastnosti struktury povrchu obrobku jsou definovány jakostními parametry. [13, str. 3; 19]

Přesnost obrobku a jakost jeho povrchu však patří mezi parametry, které vysoce ovlivňují produktivitu obrábění a výslednou cenu výroby součásti. Je tedy vhodné je volit s uvážením funkce plochy dané součásti (například dosedající části v pevných, posuvných a otáčivých aplikacích, stykové plochy těsnících spojů, dynamicky namáhané plochy, nebo plochy bez zvláštních požadavků na funkci).

Parametry řezných podmínek jako jsou řezná rychlost, posuv na zub a hloubka řezu silně ovlivňují výslednou strukturu povrchu obrobku. Výrobce nástrojů většinou dodává doporučené nastavení pro danou aplikaci, špatná volba technologických parametrů však může vést k nevyužití potenciálu stroje a tedy není dosaženo optimální produktivity výroby, nebo v horším případě k znehodnocení výrobku či zničení nástroje. [12]

5 Jakostní parametry:

5.1 Úvod

Jakostní parametry jsou spolu s tolerancemi délkových rozměrů nejvíce používanými parametry definice vlastností výrobku na technických výkresech. Jsou to parametry, které určují, jakou strukturu povrchu má mít výsledný povrch součásti. Při obrábění je proto nutno přizpůsobit technologické podmínky a způsob obrábění tak, aby výsledný produkt dosáhl požadovaných parametrů.

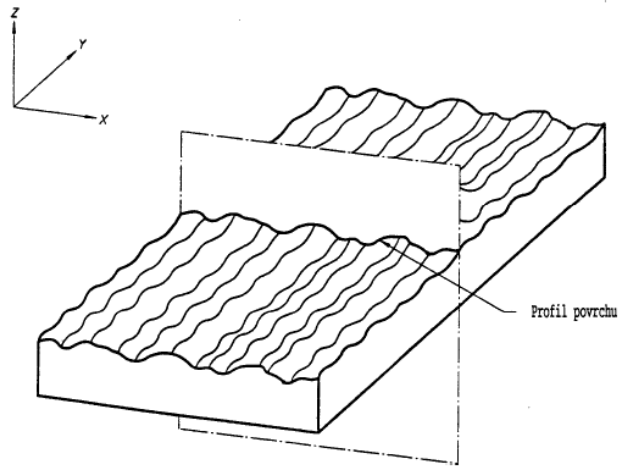
5.2 Vybrané termíny dle normy ČSN EN ISO 4287

5.2.1 Povrch

Skutečný povrch je povrch omezující těleso, který jej odděluje od okolního prostředí, je tím míněna reálná plocha součásti, která je vyrobena danou operací, při stejných řezných podmínkách. [1, str. 7]

Profil povrchu je profil vzniklý jako průsečnice skutečného povrchu a dané roviny (Obr. 5-1). V praxi se volí rovina kolmá k rovině rovnoběžné se skutečným povrchem ve vhodném směru. Tento směr je volen s ohledem na strukturu povrchu, a to ve směru pokrývajícím největší nerovnosti povrchu. Pokud

směr, kde se nachází největší nerovnosti povrchu, není zřejmý, provede se měření v několika směrech.
[1, str. 7]



5-1: Profil povrchu

5.2.2 Filtr profilu

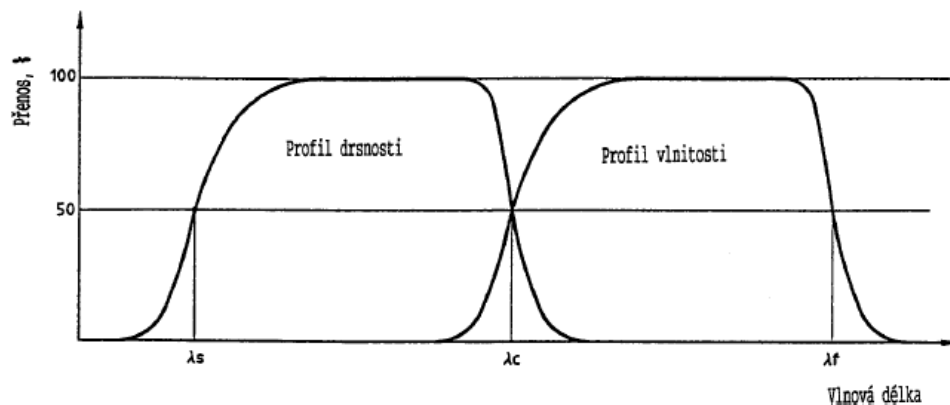
Těmito filtry se rozdělují profily na dlouhovlnné a krátkovlnné složky, čímž od sebe oddělují profily drsnosti a vlnitosti (Obr. 5-2). [1, str. 6]

Rozlišujeme tři typy filtrů profilu:

λ_s filtr profilu je filtr definující rozhraní mezi drsností a kratšími složkami vln přítomnými na povrchu. [1, str. 6]

λ_c filtr profilu je filtr definující rozhraní mezi složkami drsnosti a vlnitosti. [1, str. 6]

λ_f filtr profilu je filtr definující rozhraní mezi vlnitostí a delšími složkami vln přítomnými na povrchu. [1, str. 6]



5-2: Přenosová charakteristika profilu drsnosti a vlnitosti

5.2.3 Profily povrchu

Základní profil je úplný profil po aplikaci krátkovlnného filtru λ_s , je základem hodnocení parametrů základního profilu. [1, str. 8; 6, str. 7]

Profil drsnosti je profil odvozený ze základního profilu potlačením dlouhovlnných složek použitím filtru povrchu λ_c . [1, str. 8]

Profil vlnitosti je profil odvozený postupnou aplikací filtru profilu λ_f a filtru profilu λ_c na základní profil, potlačující dlouhovlnné složky filtrem profilu λ_f a krátkovlnné složky filtrem λ_c . [1, str. 8]

5.2.4 Střední čáry

Střední čára profilu drsnosti je čára odpovídající dlouhovlnné složce profilu potlačené filtrem profilu λ_c , od této čáry se hodnotí výstupní parametry profilu drsnosti. [1, str. 8]

Střední čára profilu vlnitosti je čára odpovídající dlouhovlnné složce profilu potlačené filtrem profilu λ_f , tato čára určuje profil vlnitosti. [1, str. 8]

Střední čára základního profilu je čára nejmenších čtverců přiléhající jmenovitému tvaru základního profilu, od této čáry se hodnotí výstupní parametry základního profilu. [1, str. 8]

5.2.5 Délkové prvky

Jako **základní délka** je označována délka ve směru osy X, jenž je použita pro rozpoznání nerovností charakterizující vyhodnocovaný profil. Toto však není postačující k hodnocení profilu povrchu, a proto se zavádí pojem **vyhodnocovaná délka**, čímž je označena délka ve směru osy X. Tato délka se používá pro posouzení vyhodnocení profilu. Vyhodnocovaná délka obsahuje jednu, nebo více základních délek. [1, str. 8]

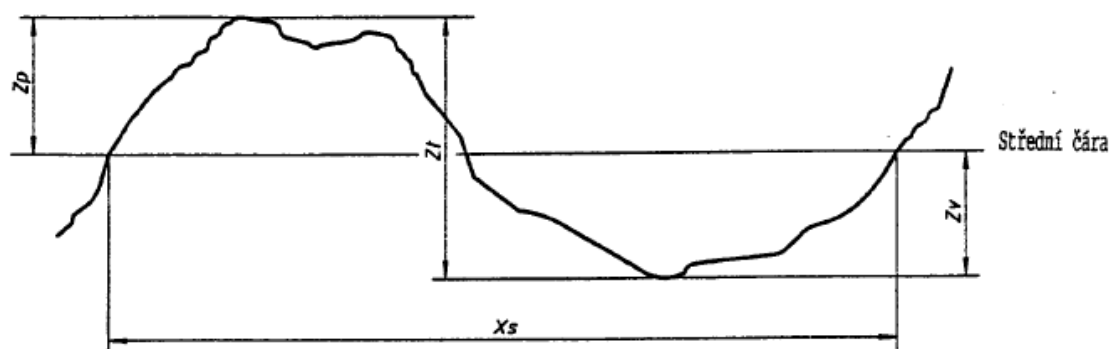
5.3 Názvy geometrických parametrů dle normy ČSN EN ISO 4287:

5.3.1 Prvky profilu:

Výstupek profilu je z povrchu ven směřující část posuzovaného profilu spojující dva přilehlé body na průřezu profilu s osou X, jedná se tedy o plochu povrchu nad střední čarou profilu. [1, str. 9]

Prohlubeň profilu je dovnitř směřující část posuzovaného profilu spojující dva přilehlé body na průřezu profilu s osou X. [1, str. 9]

Prvkem profilu je myšleno spojení jednoho výstupku profilu a jemu přilehlé prohlubně (obr. 5-3). [1, str. 9]



5-3: Prvek profilu

5.3.2 Dělení parametrů dle profilu:

Parametry profilu rozlišujeme na tři kategorie podle profilu, ze kterého byla hodnota parametru určena.

P-parametr: parametr vypočtený ze základního profilu [1, str. 8]

R-parametr: parametr vypočtený z profilu drsnosti [1, str. 8]

W-parametr: parametr vypočtený z profilu vlnitosti [1, str. 8]

5.3.3 Výškové parametry:

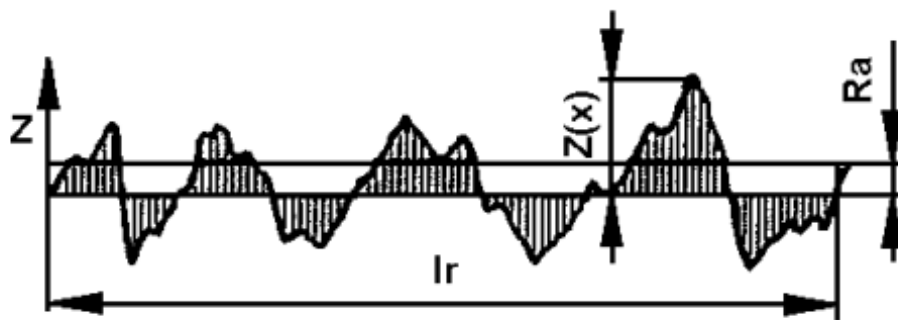
Výškové parametry jsou parametry, které nejčastěji najdeme předepsané na výkresech a kterými se většinou definují jakostní parametry dané součásti spolu s předepsáním geometrických a délkových tolerancí. Nejpoužívanějšími výškovými parametry v České republice jsou parametry Ra a Rz, jedná se tedy o parametry R, které vychází z profilu drsnosti.

Průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu Ra

Jedná se o aritmetický průměr absolutních hodnot pořadnic $Z(x)$ v rozsahu základní délky l .¹ [1, str. 13]

$$P_a, R_a, W_a = \frac{1}{l} \int_0^l |Z(x)| dx \quad 1$$

Tento parametr je stále nejčastěji užívaným jakostním parametrem drsnosti na výkresech strojních součástí. A to i přesto, že povrchy se stejnou výslednou drsností Ra mohou mít zcela rozdílné reálné profily povrchu, jelikož se jedná o průměr absolutních hodnot. Mimo parametr Ra vzniklý z profilu drsnosti se můžeme také setkat s obdobnými parametry Pa a Wa, které vychází ze základního profilu a profilu vlnitosti.

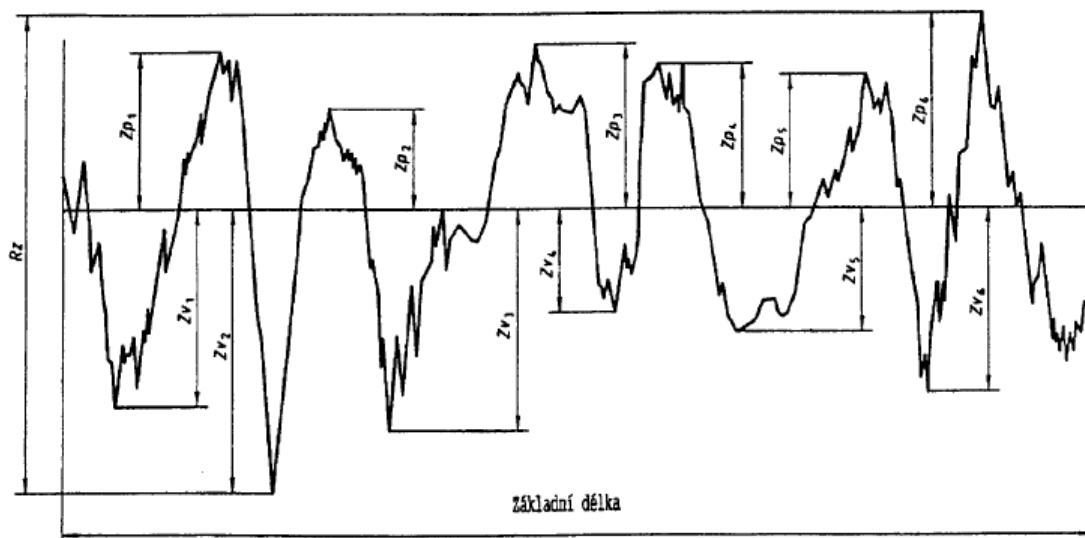


5-4: Parametr Ra

Největší výška profilu Rz

Udává součet výšky Z_p nejvyššího výstupku profilu a hloubky Z_v nejnižší prohlubně profilu v rozsahu základní délky (Obr. 5-5) [1, str. 12], dříve byl tento parametr definován určením výšky nerovnosti z deseti bodů profilu.

Tento parametr se často používá jako doplněk k upřesnění parametru Ra, nebo samostatně na výkrese, kde je důležité na součásti potlačit větší odchylky v profilu drsnosti součásti. Stejně, jako u parametru Ra se můžeme setkat s obdobou parametru Rz – Pz a Wz, které vychází ze základního profilu a profilu vlnitosti.



5-5: Parametr Rz

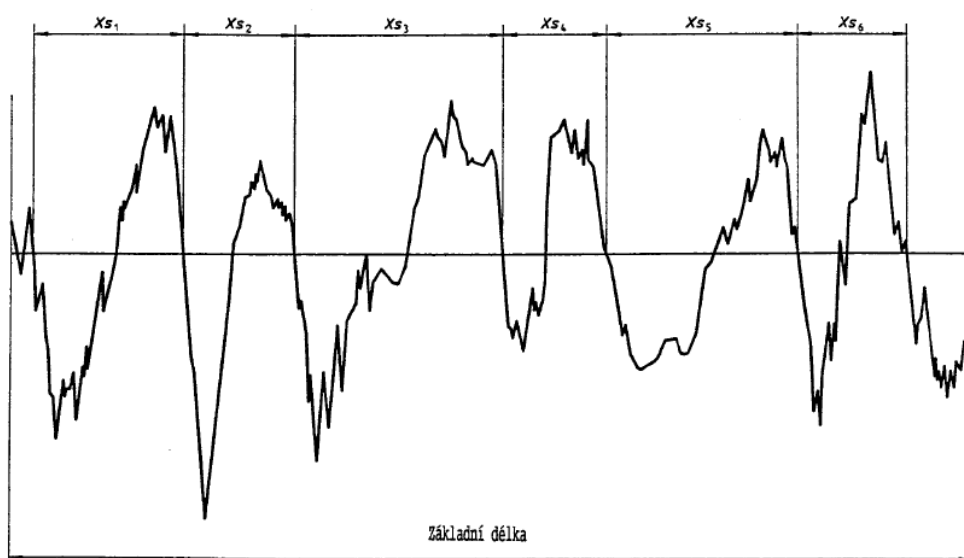
Celková výška profilu Pt

Jedná se o součet výšky Z_p nejvyššího výstupku profilu a hloubky Z_v nejnižší prohlubně profilu v rozsahu vyhodnocované délky [1, str. 13]

5.3.4 Délkové parametry

Průměrná šířka prvků profilu R_{sm}

Tento parametr udává aritmetický průměr šířek X_s prvků profilu v rozsahu základní délky (Obr. 5-6) [1, str. 14]



5-6: Šířka prvků profilu

5.4 Doporučené hodnoty parametrů

Maximální hodnota drsnosti je funkcí velikosti tolerance délkového rozměru určujícího polohu, nebo velikost dané plochy. Ve výsledku to znamená, že parametr drsnosti Rz nesmí být vyšší než hodnota tolerance rozměru, který určuje polohu, nebo velikosti dané plochy, jelikož by tím byla ovlivněna tolerance délkového rozměru, stejně tak nesmí být překročena ani hodnota geometrických tolerancí. [2, str. 48]

Doporučené hodnoty Ra, v závislosti na stupni tolerance délkových rozměrů, lze nalézt ve strojnických tabulkách. Nejčastěji užívané hodnoty jakostních parametrů jsou součástí praktické řady, kterou je možno vidět v tabulce 5-1.

5-1: Řada parametrů drsnosti

Střední aritmetická úchylka		Výška nerovnosti		Střední aritmetická úchylka		Výška nerovnosti	
Ra [μm]		Rz [μm]		Ra [μm]		Rz [μm]	
základní řada	praktická řada	základní řada	praktická řada	základní řada	praktická řada	základní řada	praktická řada
0,008		0,032		1		4	
0,01		0,04		1,25		5	
0,012	0,012	0,05	0,05	1,6	1,6	6,3	6,3
0,016		0,063		2		8	
0,02		0,08		2,5		10	
0,025	0,025	0,1	0,1	3,2	3,2	12,5	12,5
0,032		0,125		4		16	
0,04		0,16		5		20	
0,05	0,05	0,2	0,2	6,3	6,3	25	25
0,063		0,25		8		32	
0,08		0,32		10		40	
0,1	0,1	0,4	0,4	12,5	12,5	50	60
0,125		0,5		16		63	
0,16		0,63		20		80	
0,2	0,2	0,8	0,8	25	25	100	100
0,25		1		32		125	
0,32		1,25		40		160	
0,4	0,4	1,6	1,6	50	50	200	200
0,5		2		63		250	
0,63		2,5		80		320	
0,8	0,8	3,2	3,2	100	100	400	400

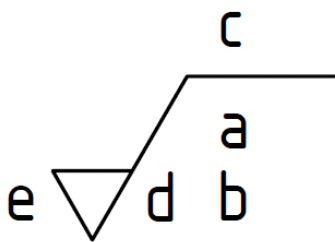
6 Značení na výkresech

Abychom pochopili, jaké jsou zadavatelem kladeny požadavky na výrobu součástí, a tedy věděli, jaké parametry výroby je vhodné zvolit, je nutné znát způsob značení jakostních parametrů na výkresech. Označování struktury povrchu na výkresech a v technické dokumentaci je předepsáno normou ČSN EN ISO 1302.

Struktura povrchu se na výkresech označuje příslušnou značkou a u ní uvedenými významovými údaji. Tato norma pak upravuje správnou velikost a umístění značky struktury povrchu na výkresu, stejně jako její umístění a význam údajů, které jsou ke značce připojeny. [10, str. 8]

6.1 Základní značka

Základní značku drsnosti je možno použít s řadou doplňkových požadavků, přesný zápis a význam je upraven normou ČSN EN ISO 1302.



6-1: Základní značka s polohou doplňkových parametrů

Význam doplňkových požadavků:

- a**-jediný požadavek na strukturu povrchu
 - a a b**-dva, nebo více požadavků na strukturu povrchu
 - c**-výrobní proces
 - d**-nerovnosti a jejich orientace
 - e**-konstrukční přídavek na obrábění [mm]
- [2, str. 48]

6.2 Variace značky

Značka na výkrese se může lišit podle způsobu, kterým má být na daném povrchu dosaženo výsledné struktury povrchu.

- a) *Nezáleží*, jestli bude struktury dosaženo obráběním, či nikoliv. [2, str. 48]



6-2: Značka typ1

b) Plocha *musí* být *obrobena*.



6-3: Značka typ2

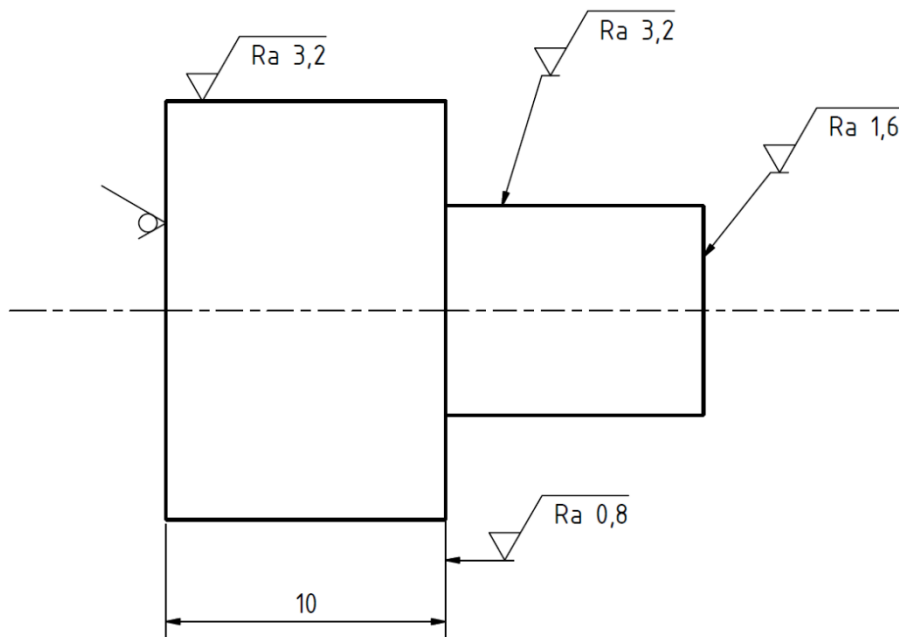
Tuto značku nalezneme v místech, kde je nutné povrch obrábět, tedy v případě frézování na místech, kde je nutné provádět frézovací operace. [2, str. 48]

c) Povrch *nesmí* být *obroben*, tedy musí být ponechán ve stavu dosaženém v předchozím výrobním procesu. [2, str. 48]



6-4: Značka typ3

6.3 Použití a orientace značky na výkresu:



6-5: Ukázka prvků na výkresu

Značka na výkresu musí být umístěna do stejného obrazu, kde je plocha kótována, pokud možno co nejbližší příslušné kótě, ale s ohledem na čitelnost a přehlednost. Pokud se pro danou plochu nachází na výkrese více pohledů, je nutné kótovat požadavek struktury povrchu pouze v jednom pohledu. [2, str. 49]

Možné umístění značky na výkresu:

-přímo k ploše, ke které je určena

-na praporku odkazové čáry

-na pomocnou kótovací čáru

-na kótovací čáru

-nad předpisem geometrické tolerance

[10, str. 17-19; 2, str. 49]

6.4 Meze struktury povrchu

Pro předpis a výklad mezi struktur povrchu se standardně používají tato dvě pravidla:

Pravidlo 16% udává, že struktura povrchu je přijatelná, jestliže ne více než šestnáct procent naměřených hodnot vybraných parametrů na vyhodnocované délce přesahuje předepsanou mezní hodnotu na výkresu. To znamená, že jedno ze šesti (2/12; 3/18 apod.) měření nemusí vyhovět předepsané mezi. [2, str. 49; 5, str. 7-8]

Pravidlo Maxima (max) udává, že struktura povrchu odpovídá požadované hodnotě, pokud ani jedna z naměřených hodnot na celém kontrolovaném povrchu nepřesahuje mezní hodnotu, tedy každé měření musí vyhovět předepsané mezi. [5, str. 8]

Obecně platí to, že pokud není na výkresu uvedeno jinak, vyhodnocovaná délka je rovna pěti základním délkám, volbu základní délky definuje norma ČSN EN ISO 4288. [2, str. 48]

Na výkresu je možné předepsat požadavky na horní, dolní, nebo obě meze. Pokud se na výkresu nachází jen jedna hodnota a není uvedeno jinak, jedná se o horní mez. [2, str. 48]

Pro plynule na sebe navazující plochy se značí požadavky na texturu povrchu pouze jednou, nevyžaduje-li to technologie výroby. [2, str. 49]

Pro úsporu místa na výkresu je možno použít zjednodušené označení, pokud se jeho význam vysvětlí co nejbližší k místu jeho použití, nebo v místě pro všeobecné poznámky. [2, str. 49]

Pro veškeré plochy tvořící obrys součásti je možné zapsat stejné parametry struktury jediným doplněným speciálním znakem. [2, str. 49]

Převládající drsnost se uvádí u razítka popisového pole výkresu. Tuto drsnost mají všechny plochy, které na výkrese nejsou označené vlastním znakem. Většinou se pro tyto plochy používá značka určující horní mez struktury povrchu, bez speciálních určení, je však možné i tuto značku doplnit o upřesňující prvky. Do závorčky za převládající drsnost se umístí všechny drsnosti na výkrese označené. [2, str. 49; 10, str. 20]

Drsnost normalizovaných součástí a tvarových prvků, kde je drsnost určena normou, není nutno uvádět, nevyžaduje-li se jiná hodnota drsnosti. [2, str. 49]

7 Měření struktury povrchu

Měření struktury povrchu může být realizováno různými způsoby. Je důležité správně zvolit měřicí metodu, jelikož ne každý způsob měření je možné použít s dosažením dostatečně přesných výsledků pro danou aplikaci. Zároveň je zapotřebí zvážit i ekonomický aspekt, neboť i samotné měření může ovlivnit cenu výsledného výrobku. Počáteční investice do přesného přístroje na měření struktury povrchu bývá nákladná a měření a vyhodnocení je časově náročné, proto se v některých případech vyplatí nechat si vypracovat vyhodnocení dat externí firmou.

7.1 Kontrola porovnáním s etalony

Tato metoda hodnocení povrchu využívá lidských smyslů. Používají se vzorové plochy-etalony, se kterými se může měřená plocha porovnávat. Využívá se hmatu a zraku, případně je možno použít optických pomůcek, například mikroskopů. Jedná se o nyní již zastaralou metodu, která může být použita ke zjištění hodnot, v případě provedení kontroly zkušenou osobou může být i velice přesná, v průmyslu se však již moc nevyužívá. [7, str. 9-10, 88]

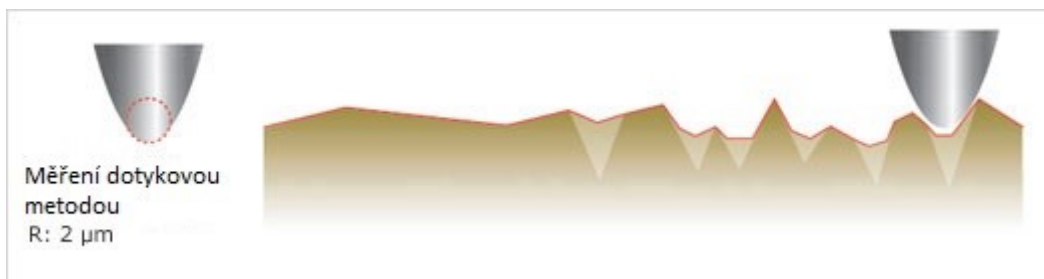
7.2 Měření dotykovými přístroji

Přístroje pro měření profilu a parametrů povrchu se nazývají profilometry, někdy jsou také označovány jako drsnoměry. Jedná se o zařízení snímající povrch obrobku jemným snímacím hrotem, kterým se získávají úchytky ve formě profilu povrchu. Tento přístroj, či k němu připojený počítač s příslušným programem, vypočítává parametry a zaznamenává profil povrchu. Tyto přístroje jsou definovány normou ČSN EN ISO 3274, která určuje jejich charakteristiky a uvádí jejich vztah ke Geometrickým požadavkům na výrobky (GPS). [6; 7, str. 88]

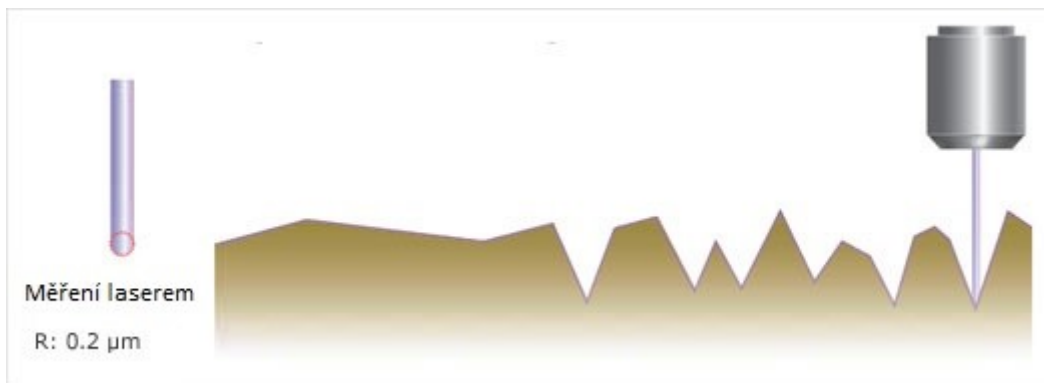
Měřicí hroty mohou mít různou geometrii a přístroje se mohou částečně lišit konstrukcí. Rozlišení přístroje je omezeno fyzickým přístupem do prohlubní povrchu součásti (Obr. 7-1) a rozlišením elektronických součástí přístroje. Nejčastější rozdělení přístrojů, se kterým se můžeme setkat, je rozlišení na měřicí přístroje laboratorní a přístroje dílenské. Laboratorní přístroje jsou vysoce přesná zařízení, která jsou však citlivější na přesnost seřízení a prostředí, ve kterém se nacházejí. Dílenské přístroje bývají o něco méně přesná zařízení, která jsou však méně náchylná na znečištění, změny teplot a jiné nepříznivé vlivy, se kterými se lze setkat v dílně. Jsou jednodušší na seřízení i použití a je možno z nich přímo číst naměřené hodnoty, což může urychlit kontrolu dílce během výroby. [6; 9; 7, str. 88]

7.3 Měření bezdotykové

Jedná se především o měření fotoelektrickými přístroji s laserem (Obr. 7-2), ale je možné použít i jiných optických metod, jako například interferenčních. Tyto metody měření nejsou omezeny tvarovou složitostí profilu povrchu, ale jsou náchylné na znečištění povrchu a na odrazy světla (například od lesklých, metalických povrchů). Některé bezdotykové metody umožňují vytvoření 3D obrazu celé měřené plochy. Přesnost měření je však více náchylná na znečištění povrchu měřené součásti a přípravu samotného měření, proto se stále více využívá dotykových měřících přístrojů. Bezdotykové měření je vhodné použít tam, kde kvůli vlastnostem materiálu součásti není možné použít metody dotykové, například pokud by při dotykovém měření mohlo dojít k poškození součásti (u měkkých materiálů). [7, str. 89,92-95; 8; 9]



7-1: Měření profilometrem



7-2: Měření laserem

8 CNC stroje a jejich programování

8.1 CNC

Zkratka CNC pochází z anglického označení „Computer Numerical Control“ - jedná se o počítačem, číslicově, řízený výrobní stroj. Mimo jiné se může jednat o soustružnická, nebo frézovací centra, ale i brusky, svářečí centra, či ohýbačky.

Díky široké škále využití, „pružnosti“ automatické výroby, tedy možnosti relativně rychlého přizpůsobení k výrobě jiné součásti na stejném stroji, a vysoké dosahované přesnosti, se CNC stroje uplatňují jak v prototypové výrobě, tak i v sériových aplikacích. Víceosé stroje umožňují obrábění složitých součástí s obecnými i rovinnými plochami na minimum potřebných upnutí a šetří tak výrobní čas. [3, str. 10]

Řízení CNC stroje je prováděno řídicím systémem stroje, pomocí vytvořeného programu. Programování strojů je možné provádět ručně, dílenským (strojním) programováním, nebo s využitím CAM systému. Výstupem je však vždy NC program v kódu daného stroje. [3, str. 10]

8.2 NC Program

Pohyby a funkce stroje jsou řízeny vlastním řídicím systémem CNC stroje za pomoci vytvořeného programu. Tento program obsahuje veškeré informace o pohybech a činnostech stroje, které jsou zapsány pomocí alfanumerických znaků v daném kódovacím jazyce (např. ISO G-kód). [3, str. 9]

Výsledný program by neměl obsahovat chyby, zbytečné přejezdy a volby nástrojů, měl by vést nástroj po co nejkratších drahách tak, aby se dodržela přesnost předepsaných ploch a byla maximalizována produktivita výroby. [4, str. 12]

8.2.1 Rozdělení informací:

Program je dělen na jednotlivé řádky - bloky, které v ISO G-kódu značí pořadí jednotlivých funkcí v programu, který řídí silové a pomocné prvky stroje. [3, str. 9]

Údaje obsažené v NC programu lze rozdělit na geometrické, technologické a pomocné.

Geometrické:

Geometrické údaje popisují pohyb nástroje ve strojním prostoru, jako jsou dráhy obrábění součásti, pohyb příjezdu a odjezdu k obrobku a od něho. Pohyb je popsán v kartézských, pravotočivých souřadnicích (pro tříosé obrábění X, Y, Z). Tato data je nejlepší načíst přímo ve formě digitálního modelu z CAD systému. [3, str. 10; 4, str. 12]

Technologické:

Tyto údaje určují technologické parametry – volí nástroj a definují jeho činnosti, jako například posuv, otáčky vřetene, nebo řeznou rychlost [3, str. 10; 4, str. 12]

Pomocné:

Pomocné údaje kódu poskytují informace pro stroj - spínají pomocné funkce, jako například čerpadlo chlazení, ale řídí i například odjezd stroje k výměně nástroje, nebo spínají vřeteno [3, str. 10]

8.2.2 Stavba CNC kódu:

Jednotlivé bloky programu se skládají ze znaků a takzvaných slov, tato slova obsahují dvě základní části – povelovou (adresa-písmeno) a významovou (číselnou) část. Povelová část udává instrukci, která bude vykonána, významová pak určuje její konkrétní hodnotu. [3, str. 32-35]

Blok se může skládat z těchto znaků a slov:

N - udává číslo bloku a určuje pořadí v programu, nachází se vždy na začátku bloku, obsahuje adresu „N“ a číslo daného bloku, standardně se volí skoky po desítkách (N10, N20, N30...), což umožňuje případné dodatečné vložení bloku (například N15 mezi N10 a N20)

G - přípravná funkce, která zpracovává geometrické informace, obsahuje adresu „G“ a dvojčíselnou významovou část (například funkce G01-lineární posuv)

X,Y,Z - rozměrové funkce, které určují absolutní, či relativní polohu v souřadném systému a doplňují přípravné funkce

F- funkce posuvu

S- funkce rychlosti vřetena

T- funkce nástroje, určuje nástroj, jímž má být obráběno

M- pomocné funkce (spouštění a zastavení vřetene, výměna nástroje, chlazení aj.)

```
N20 G00 X15 Y32 Z1  
N30 G01 X30 Z0.5 F200 M08
```

8-1: Příklad zápisu bloků programu

Moderní řídicí systémy nemají doslovně stanovené pořadí slov v bloku a jsou zpracovány v logickém pořadí, přesto se doporučuje dodržet standardní pořadí slov v bloku (N G X Y Z F S T M). Struktura programů vychází z norem ČSN ISO 6983-1 (Číslíkové řízení strojů, formát programu a definice adres) a DIN 66025 (NC programování). Kódy neobsazené (nedefinované těmito normami) využívají výrobci strojů k volání cyklů a jiných specifických povelů pro daný systém. [3, str. 32-35]

8.3 CAM

Zkratka CAM vychází z anglického označení „Computer Aided Manufacturing“, což je v překladu počítačem podporovaná výroba. Softwarové produkty CAM umožňují programování činností stroje a tvorbu drah nástrojů přímo z 3D modelů vytvořených v CAD systémech a jejich následnou simulaci, včetně možnosti simulace celkové sestavy daného CNC stroje, obrobku, nástroje i jeho držáků a

upínacích systémů obrobku. Uplatněním CAD/CAM systémů dochází ke snížení nákladů na vývoj a výrobu součástí a programování pomocí CAM systému tak v průmyslu nahrazuje ve většině případů ruční, či dílenské programování, které se už využívá většinou jen v případě provádění jednodušších operací. Díky možnosti simulace a výpočtu výrobního času lze využívat CAM systém i jako ukazatel pro výpočet ceny dílce. [3, str. 96-97; 4, str. 125]

CAM systémů existuje celá řada, mimo jiné se jedná například o produkty Catia, EdgeCAM, Inventor HSM, nebo Siemens NX. Tyto systémy disponují různými možnostmi v nastavení, podporovaných procesech, simulacích i tvorbě drah pro CNC stroje.

Pro převod programu vytvořeného v CAM systému do konkrétního systému CNC stroje je nutné použít softwarový převodník dat zvaný postprocesor. Tento převodník dat v sobě obsahuje veškeré informace o stroji a umožňuje plně využít jeho funkce. [11]

Při obrábění obecných ploch však nastává problém s množstvím dat, které musí řídicí systém stroje z CAM systému přijmout a zpracovat. V praxi se nedostatek výpočetní paměti někdy řeší na úkor přesnosti výroby snížením přesnosti pohybu. Toto přináší sporné výsledky výroby, proto je například možno snížit rychlost obrábění, tak aby měl systém dostatek času na zpracování dat, nebo lze v některých případech program rozdělit na několik na sebe navazujících částí, čímž se zamezí zkrácení pohybu, které nastává při odebrání dat. Se zvyšující se výpočetní kapacitou moderních strojů se však tento problém stává méně relevantním, neboť systém zvládá výpočet většího množství bloků „napřed“ a tedy je schopen zpracovávat větší objemy dat při zachování rychlosti obrábění. [23]

8.3.1 Tvorba drah nástroje

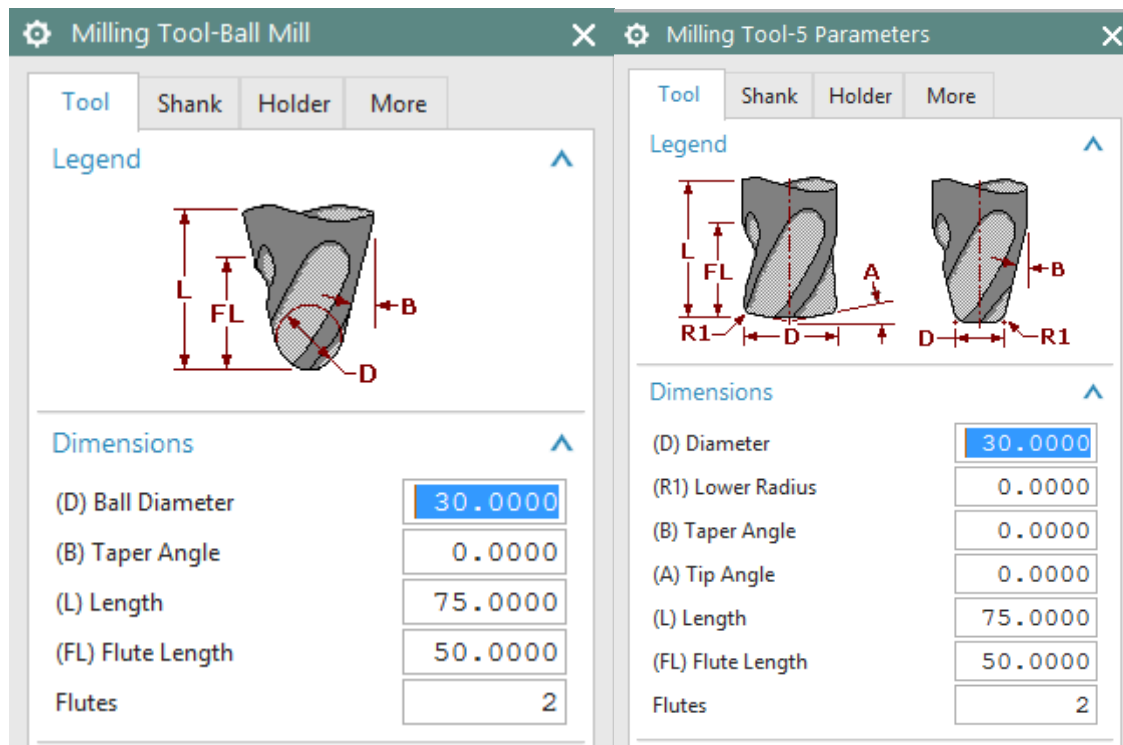
Způsob pohybu nástroje po obrobku má vliv na jakost povrchu, opotřebení nástroje, čas výroby a tedy produktivitu obrábění. Při výrobě součástí je proto vhodné dbát nejen na technologické parametry výroby, ale i na programování drah v CAM systému.

Analýza drah nástroje je komplexní problematika s množstvím parametrů, které mohou generování dráhy CAM programem zásadně ovlivnit. Mimo jiné záleží především na definici nástroje, výběru tvaru dráhy, nastavení obráběné plochy a na zadaných vstupních parametrech pro posuv a hloubku řezu.

Definice nástroje

Pro správnou tvorbu drah je třeba správně definovat nástroj, který při obrábění bude použit. Volba nástroje závisí na technologických možnostech a požadavcích na výrobu. Ve většině CAM systémů je možné definovat nástroj pomocí připravených šablon. Obvykle se v CAM systémech nachází alespoň základní druhy nástrojů, jakými jsou například válcová, kulová či kuželová fréza. V některých případech můžeme definovat i jiné nástroje, jako například vrtáky, závitníky, závitořezné frézy nebo tvarové frézy.

Některé systémy umožňují i definici vlastních tvarů nástrojů, případně lze získat požadovaný tvar nástroje definicí parametrů pro tato základní nastavení, ovšem ne vždy proběhne vykreslení drah pro takto definované nástroje bez potíží a někdy je nutno omezit kontroly kolizí, aby program dráhu vykreslil podle zadaných parametrů. [30]

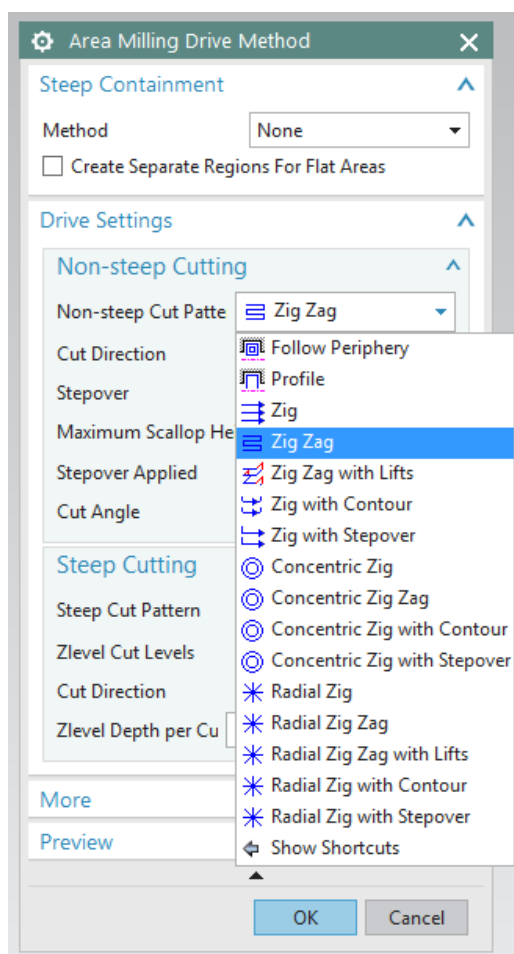


8-2: Definice nástroje

Nastavení tvaru dráhy

V CAM systému lze generovat dráhy nástrojů pomocí přednastavených tvarů drah, které umožňují rychlou volbu strategie obrábění.

V některých moderních CAM systémech se nachází algoritmy, které by měly dokázat zvolit vhodný tvar dráhy podle tvaru ploch obráběné součásti, ne vždy je však výhodné tyto tvary dráhy použít. Tvar automaticky generovaných drah lze v některých případech modifikovat vhodně zvolenými řídicími křivkami, nebo je možno vybrat z předvoleb konvenčních tvarů drah, jakými jsou například jednosměrné, či obousměrné řádkování. [30]



8-3: Ukázka volby tvaru dráhy

Nastavení obráběné plochy

Tvorbu drah ovlivňuje mimo jiné i způsob zadání obráběné plochy.

Plocha může být zadána a omezena jednotlivými geometrickými tvary v CAD modelu, případně může být tvořena hranicí (uzavřenou křivkou) vytvořenou hranami či volně zvolenými křivkami v modelu. Je možné nastavit i odsazení od těchto křivek a omezit, nebo rozšířit obráběnou plochu. [30]

Vstupní parametry

Tvorbu programu dráhy nástroje ovlivňují technologické parametry, jakými jsou posuv, nebo řezná rychlost, ale na samotný tvar dráhy tyto parametry vliv nemají. Na výsledný tvar dráhy nástroje, mimo samotné volby ploch a strategie obrábění, mají vliv parametry hloubky řezu a kroku nástroje.

Hloubka řezu i krok nástroje se dají ve většině CAM systémech zadat několika způsoby. Mimo jiné se může jednat o zadání konstantní vzdálenosti, procentuálního překrytí, anebo zbytkové výšky po obrábění. [30]

Konstantní vzdálenost:

Jako vstupní hodnota do CAM systému se udává konstanta, která je rovna kroku mezi jednotlivými drahami nástroje či hloubce řezu. Tyto hodnoty lze zadat samostatně. [30]

Procentuální překrytí:

Jako vstupní hodnota do CAM systému se vloží údaj v procentech, který odpovídá překrytí nástroje mezi jednotlivými drahami. Systém použije definici nástroje, kterou uživatel nastaví, a vzdálenost kroku automaticky napočítá. Hloubku řezu je možno zde zadat samostatně jako konstantní vzdálenost, nebo počtem obráběných vrstev. [30]

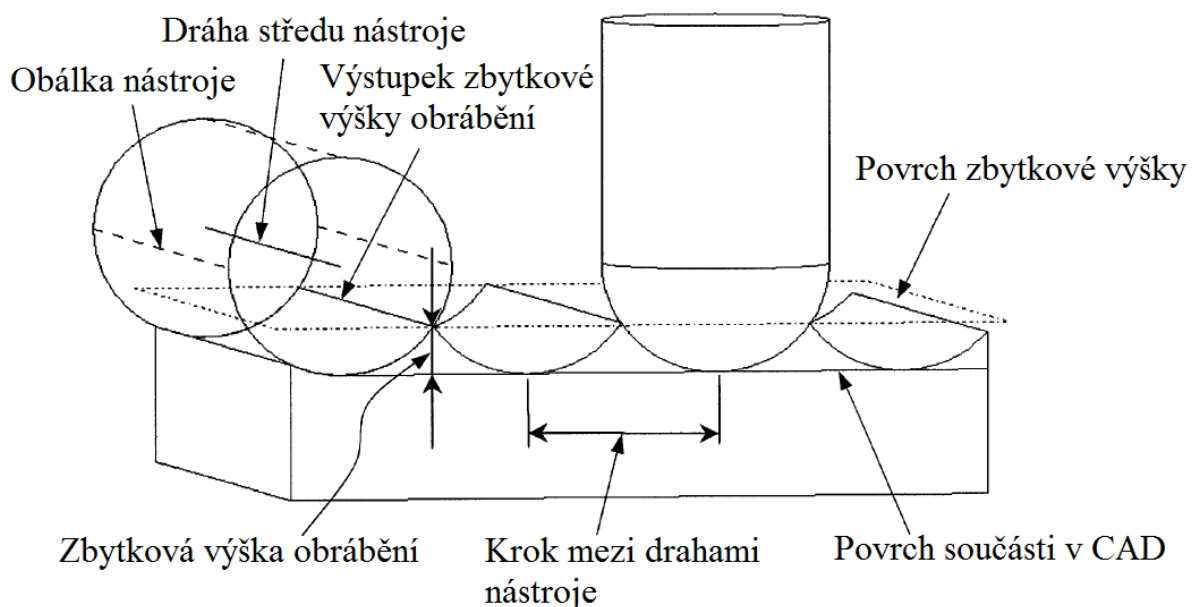
9 Zbytková výška obrábění

9.1 Definice

Zbytková výška obrábění (také zbytková výška po obrábění, nebo zbytková výška) je parametr, který standardně nenajdeme na výrobním výkrese, protože jako takový není normalizovaný. Jeho definice v CAM systémech se tedy mohou lišit. Stejně tak se mezi jednotlivými CAM systémy, a i publikacemi, liší užívaná anglická označení. Například v systémech Siemens NX se tento parametr označuje pojmem „Scallop“, v některých jiných systémech se však používá označení „Scallop-height“, „Cusp-height“, nebo i jen „Cusp“.

Obecně se jedná o hodnotu výšky materiálu, kterou po sobě zanechá nástroj na povrchu součásti po obrábění mezi jednotlivými drahami.

Může však být definována jako výška zbylého materiálu kolmo na povrch součásti, nebo kolmo k základní rovině, respektive v ose nástroje. Na toto je nutno dbát zřetel při volbě tohoto vstupního parametru. V některých systémech CAM je dokonce možno z těchto definic volit při tvorbě drah a systém upraví vygenerovanou dráhu nástroje tak, aby odpovídala zvolené definici. [14, str. 648; 16, str. 477]



9-1: Zbytková výška pro kulový nástroj definicí kolmo na povrch součásti

9.2 Teoretický výpočet

V praxi se parametr zbytkové výšky obrábění využívá nejčastěji při obrábění obecných ploch metodou řádkování kulovou frézou. Teoretický výpočet zbytkové výšky vychází z předpokladu, že nástrojem je dokonalá koule a dráhou nástroje je obálková plocha této dokonalé koule.

$$ZV = \frac{d_n}{2} - \sqrt{\frac{(d_n)^2 - (k)^2}{4}} \quad (2)$$

Kde „ZV“ je výsledná zbytková výška, „d_n“ je průměrem nástroje a „k“ je krokem dráhy nástroje.

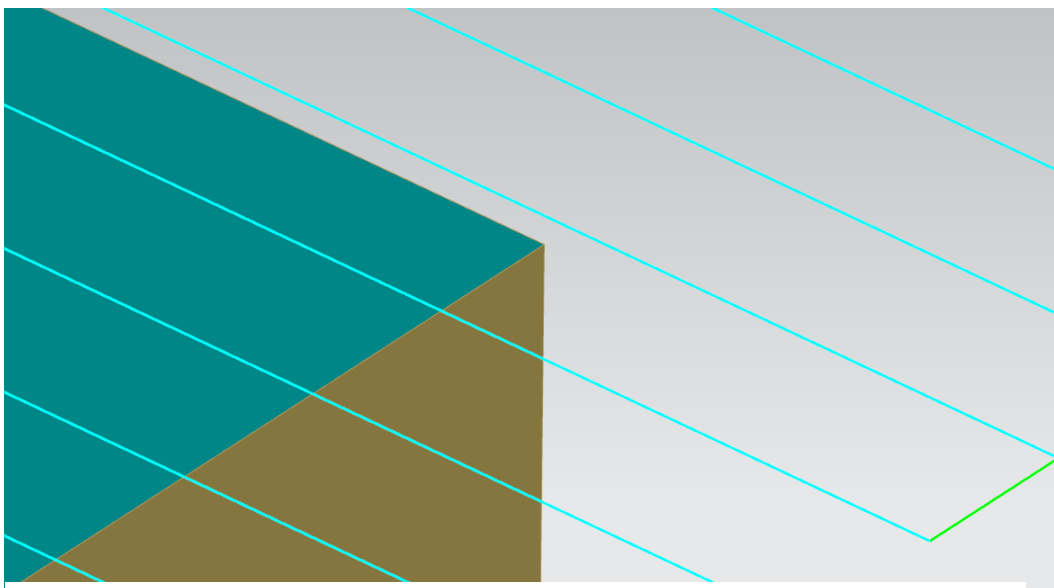
Tento vzorec je snadné odvodit z geometrické analýzy problematiky, lze jej také nalézt v řadě příruček pro obrábění [24]. Pokud CAM systém nedisponuje možností zadání drah nástroje pomocí parametru zbytkové výšky, je možno využít některé z online kalkulací [25; 26].

9.3 Využití

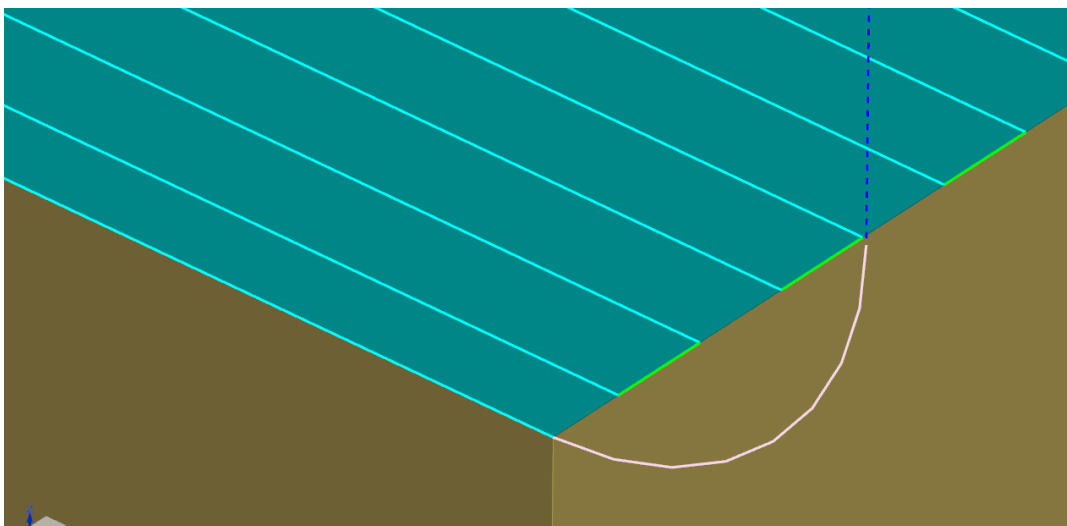
Na rozdíl od ostatních parametrů pro zadávání dráhy nástroje je velkou výhodou parametru zbytkové výšky možnost přímého porovnání zadané hodnoty s teoretickým výsledným povrchem součásti, tedy v případě, pokud používáme definici zbytkové výšky jako zbytek materiálu kolmo na povrch součásti. Není tedy třeba dalšího přepočtu, jako je tomu například u konstantního zadání velikosti kroku, což může výrazně urychlit práci programátora. Zároveň tento způsob generování drah teoreticky umožňuje vyšší produktivitu obrábění díky snížení délky generovaných drah na obecných plochách. [14, str. 653]

9.4 Problémy

Ve využití parametru zbytkové výšky obrábění je několik faktorů, které je nutno uvážit. Systém CAM vytváří dráhy nástroje na obráběné ploše, kterou mu uživatel nastaví pomocí výběru prvků modelu, nebo nastavením hranic pro obrábění jiným způsobem. Toto však vede k tomu, že CAM systém není schopen při omezení prostoru vytvořit přesný počet drah s konstantní velikostí kroku tak, aby parametr zbytkové výšky zůstal po celou dobu obrábění konstantní. Toto vede k nepřesnostem v tvorbě drah na okrajích hranic obráběné plochy a k jisté nepravidelnosti vzdálenosti kroků. [15, str. 731]



9-2: Tvorba dráhy bez omezení hranic- volný přesah dráhy bez chyby ve velikosti kroku



9-3: vytvořená dráha s omezenými hranicemi- vzniklá chyba na okraji omezení

Dalším problémem použití parametru zbytkové výšky obrábění je absence modelu pro převod této hodnoty na standardně používaný parametr jakosti povrchu Ra. Pokud by bylo možné alespoň přibližně určit, jakých parametrů Ra je možno dosahovat při obrábění za použití parametru zbytkové výšky, proces návrhu drah nástroje by se urychlil. Bohužel vlastnosti povrchu se budou razantně lišit v případě jinak nastavených technologických podmínek obrábění a obráběného materiálu, což znesnadňuje možnost určení ideálního převodu mezi parametrem zbytkové výšky zadávaným do CAM systému a výslednými parametry povrchu.

Problém s využitím tohoto parametru může nastat také z důvodu chyby uživatele. V praxi je totiž obecně rozšířené využití definice zbytkové výšky obrábění jako uvedená první varianta v kapitole 11.1, tedy definována jako výška zbylého materiálu kolmo na povrch součásti. Může tedy nastat situace, kdy uživatel chybně předpokládá, že je takto tento parametr definován, přestože CAM systém pro danou operaci využívá druhé možné definice, což vede k vzniku chybně zadané dráhy nástroje.

10 Metodika testování

Cílem experimentu bylo porovnání reálných výstupů z měření parametrů na obrobku s teoretickou hodnotou parametru zbytkové výšky zadanou do CAM systému. Pro možnost reálného ověření dat byl navržen zjednodušený experiment, který využívá parametru zbytkové výšky jako vstupního parametru dokončovací operace na rovinných plochách.

Pro tento experiment bylo zvoleno šest hodnot parametru zbytkové výšky. Tyto hodnoty byly vybrány s ohledem na teoretický vztah, kdy by se v ideálním tvaru profilu po obrábění kulovým nástrojem měla hodnota parametru Rz rovnat hodnotě zbytkové výšky. Jednotlivé velikosti vstupního parametru byly voleny z orientačního, porovnávacího grafu, který udává teoretický vztah mezi parametry Ra a Rz, od firmy Strack [20], tento graf lze však nalézt i v jiných variantách, například od firmy Mahr. Hodnoty byly voleny tak, aby byl pokryt co největší rozsah standardně užívaných hodnot parametrů Ra a Rz.

10-1: Tabulka volených hodnot zbytkové výšky

Ra [μm]	Rz \approx ZV [μm]
0,315-0,8-1,6	6,3
0,63-1,6-2,5	10
1-1,6-4	16
2-3,2-6,3	25
4-6,3-12,5	40
6,3-12,5-20	63

Pro tyto hodnoty byl vypočten teoretický krok, vycházející z teoretického modelu. Tento krok byl porovnán s výstupem hodnot z CAM systému, do kterého byly zadány pro rovinnou plochu stejné vstupní parametry hodnot zbytkové výšky a vygenerovány dráhy nástroje na testovací ploše. Plocha byla pro získání hodnot kroku nastavena pro základní ověření bez omezení hranic. Pro porovnání získaných hodnot byla vytvořena plocha omezena hranicemi o rozměru 40x40mm, pro kterou byly

napočítány dráhy se stejnými vstupními parametry. Mezi porovnávanými hodnotami byly rozdíly především u krajů plochy, kde docházelo k automatickému snížení velikosti kroku CAM systémem tak, aby se poslední dráha nástroje vešla do plochy vymezené hraniční křivkou.

Pro zvolené hodnoty byly tímto způsobem vytvořeny jednotlivé testovací plochy, které byly označeny čísly jedna až šest. Toto značení, které označuje, jaký parametr zbytkové výšky je u příslušné plochy zadán do CAM systému (Tab. 12-1; 12-2), se dále používá v celé práci.

10-2 : Tabulka hodnot kroku

Plocha	ZV [mm]	$K_{\text{výpočet}}$ [mm]	K_{CAM} [mm]	Odchylka [%]
1	0,0063	0,388640245	0,374	3,638389
2	0,01	0,48948953	0,465	4,900928
3	0,016	0,618850547	0,585	5,389112
4	0,025	0,772981242	0,737	4,590181
5	0,04	0,976524449	0,938	6,453955
6	0,063	1,223161477	1,188	6,676263

Z takto získaných hodnot byla poté zpětným výpočtem (vycházejícím z teoretického modelu viz 11.2) ověřena velikost zbytkové výšky pro jednotlivé plochy a tato velikost byla porovnána s hodnotami z teoretického modelu, které byly rovny vstupním hodnotám CAM systému.

10-3: Tabulka zpětného výpočtu zbytkové výšky

Plocha	ZV (výpočet/zadáno)[mm]	ZV (zpětný výpočet z CAM) [mm]	Odchylka [%]
1	0,0063	0,005849463	7,151379051
2	0,01	0,009042388	9,576121202
3	0,016	0,014317928	10,51295255
4	0,025	0,022749013	9,003946594
5	0,04	0,034973957	12,56510827
6	0,063	0,054792972	13,0270285

Porovnáním hodnot můžeme vidět, že z CAM systému vychází zpětným výpočtem menší parametr zbytkové výšky, než jaký byl zadán, a to až o 13%. Toto je dáno především upravením výpočtu kroku v CAM systému na tři desetinná místa, tedy ztrátou dat zaokrouhlením, a drobnými výchylkami mezi jednotlivými kroky na ohraničené ploše, kde generace drah probíhá. Je možné, že je tato skutečnost stanovena výrobcem CAM systému jako bezpečnost pro případy, kdy uživatel zadává teoretickou velikost nástroje a reálná velikost by byla menší než hodnota jmenovitá, případně se může jednat o bezpečnost pro interpolaci drah nástroje. Bohužel přesný způsob výpočtu zbytkové výšky v CAM

systemu není možno zjistit, jelikož je součástí zdrojového kódu programu, ke kterému nemá uživatel přístup.

Hlavní součástí navrženého experimentu je porovnání těchto teoretických hodnot s reálně získanými hodnotami z měření obrobenej plochy. Experiment byl navržen tak, aby pro zvolenou obráběnou plochu byly hodnoty kroku, které vypočítá program, stejné pro definici zbytkové výšky jako výšky zbylého materiálu kolmo na obráběný povrch, tak i pro definici zbytkové výšky jako výšky zbylého materiálu v ose nástroje. Proto byla volena rovinná plocha, která je kolmá na osu nástroje.

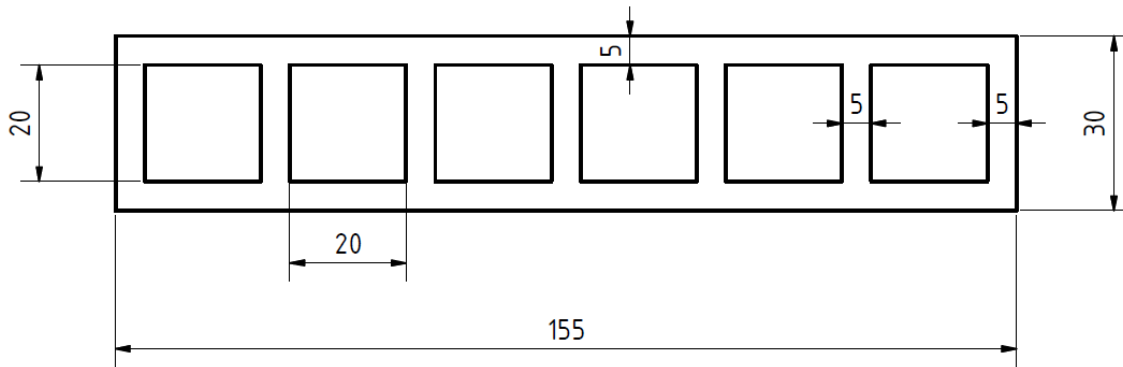
Pro zjištění chyby, způsobené chybným zadáním parametru zbytkové výšky do CAM systému, kdy uživatel špatně zvolí její definici, byl experiment rozšířen také o dvě nakloněné plochy. Pro tuto část experimentu byl volen sklon 10° a 20° , což odpovídá běžnému sklonu obrábění obecných ploch. Pro tyto plochy byla záměrně zvolena špatná definice výpočtu zbytkové výšky v CAM systému tak, aby byl tento parametr počítán kolmo na základní rovinu, což může být jedna z možných chyb, které se může uživatel při tvorbě drah pomoci tohoto parametru dopustit.

11 Provedení testů

11.1 Volba polotovaru:

Navrhovaný rozměr polotovaru 155x30x20mm, byl volen tak, aby bylo možno polotovar vhodně upnout a zároveň bylo možné na jeden polotovar umístit šest samostatných zkušebních ploch, které od sebe oddělují drážky. Zkušební plochy byly zvoleny o velikosti 20x20mm s přihlédnutím k normě ČSN ISO 4288, která se zabývá měřením profilu povrchu a která nám předkládá pro periodickou strukturu povrchu minimální mezní vlnové délky „cut-off“ pro měření parametrů profilu drsnosti a z toho vyplývající potřebnou vyhodnocovanou délku $l_n=12,5\text{mm}$ pro úspěšné vyhodnocení periodického profilu povrchu. Pro zajištění dostatečného prostoru pro provedení alespoň pěti náhodných měření byly plochy voleny větší, než je minimálně nutné. Mezi jednotlivé plochy byly umístěny dělicí drážky o šířce 5mm, oddělující jednotlivé testovací plochy tak, aby se omezily chyby tvorby dráhy na hranicích ploch a nástroj mohl volně vybíhat z materiálu a jednotlivé plochy bylo případně možno oddělit.

Z hlediska dostupnosti materiálu byl zvolen materiál Al7075, jedná se o hliníkovou slitinu se zinkem, jako primárním legujícím prvkem, doplněným hořčíkem a mědí. Tento materiál se často používá v leteckých konstrukcích pro výrobu krytů, žeber a výztuh. [21]



11-1: Navrhovaný polotovar

Výsledná velikost polotovaru byla upravena, za účelem využití zbytkového materiálu, který byl k dispozici, na velikost 148x31x20mm. Díky tomu bylo možno zvětšit velikost zkušebních ploch na 23x20mm. Drážky mezi jednotlivými plochami byly zachovány, byly však omezeny drážky na okrajích dílce. Na dlouhých hranách byla zmenšena šířka drážky na 4mm. Na krátkých hranách byla velikost drážek omezena na minimum. Na těchto místech nebylo nutné drážky zachovat, neboť zde již nástroj vybíhá do volného prostoru.

11.2 Pracoviště:

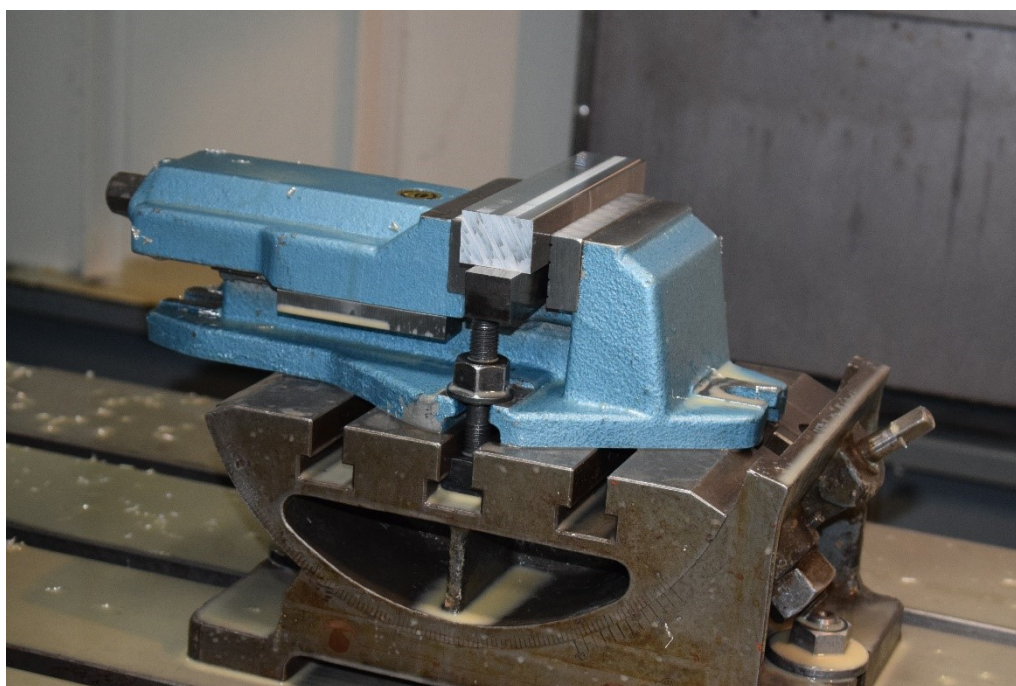
Výroba testovacích vzorků proběhla na stroji od firmy Kovosvit MAS, a.s. typu VMC500.

Jedná se o vertikální obráběcí centrum, které je určeno pro obrábění dílců z oceli, barevných kovů a syntetických materiálů. Na stroji je mimo jiné možno provádět operace frézování, vrtání a řezání závitů. Tento stroj disponuje třemi řízenými osami (X, Y, Z). Funkce stroje jsou řízeny CNC systémem Acramatic A-2100 firmy Siemens (původně Vickers). K upínání materiálu je určen pracovní stůl o velikosti 800x500mm, vybavený třemi T drážkami, který má nosnost 300kg. Vřeteno, které má rozsah otáček 40-10000 ot/min a výkon 7,5kW je vybaveno upínacím kuželem 7:24 velikosti 40. Pracovní posuv je v rozsahu 1-5000mm/min, rychloposuv 25000mm/min. Opakovatelná přesnost polohování je 0,008mm. Stroj je vybaven zásobníkem a čerpadlem na chladicí kapalinu. [18]



11-2: Pracoviště CNC stroje

Polotovár byl upnut do svěráku umístěném na naklápěcím stole, který byl vyrovnán na pracovním stole vůči osám frézovacího centra. Naklápěcí stůl, kterým byl pro účely obrábění nastaven sklon plochy, umožňuje rozsah naklopení až 110°.



11-3: Upnutí obrobku ve stroji

11.3 Volba nástroje:

Zvoleným nástrojem pro obrábění testovacích ploch řádkováním je kulová, kopírovací, dvoubřitá fréza D6R3 z katalogu firmy ZPS - FRÉZOVACÍ NÁSTROJE a.s. (kat. č.: S511612.060). Fréza je vyrobena dle normy DIN 6527L. Jedná se o frézu ze slinutých karbidů s povlakem AlTiN, který zaručuje vysokou tepelnou stabilitu nástroje, nástroj je určený pro obrábění materiálů do pevnosti 900MPa. Charakteristický rozměr této frézy - průměr 6mm - je tolerovaný s úchylkou +120 μ m. [27]

Tento nástroj je vhodný k použití v aplikacích pro obrábění tvarových ploch. Vlastnosti nástroje vzhledem k obráběnému materiálu by měly zaručit konstantní průběh tvaru drah během obrábění, jelikož opotřebení nástroje během této aplikace je minimální. Nástroj disponuje válcovou stopkou o průměru 6mm a byl upevněn za pomoci upínací hlavice s kleštinou (typ E4466 5875).

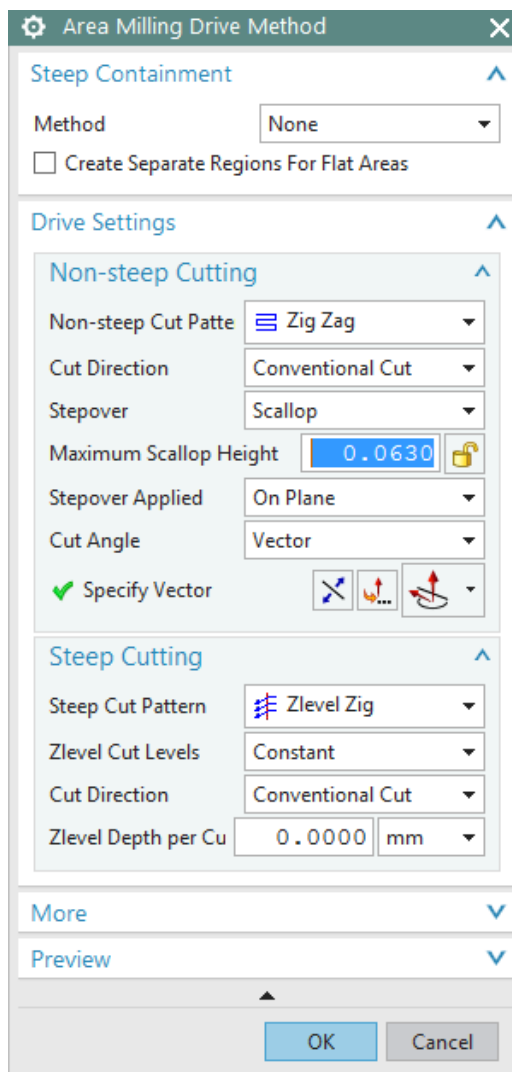
Pro vytvoření dělicích drážek byla použita válcová čelní fréza o průměru 5mm ze slinutých karbidů. Pro srovnání polotovaru byla použita nástrčná rovinná fréza s VBD o průměru 50mm.



11-4: Použité nástroje

11.4 Tvorba drah nástroje:

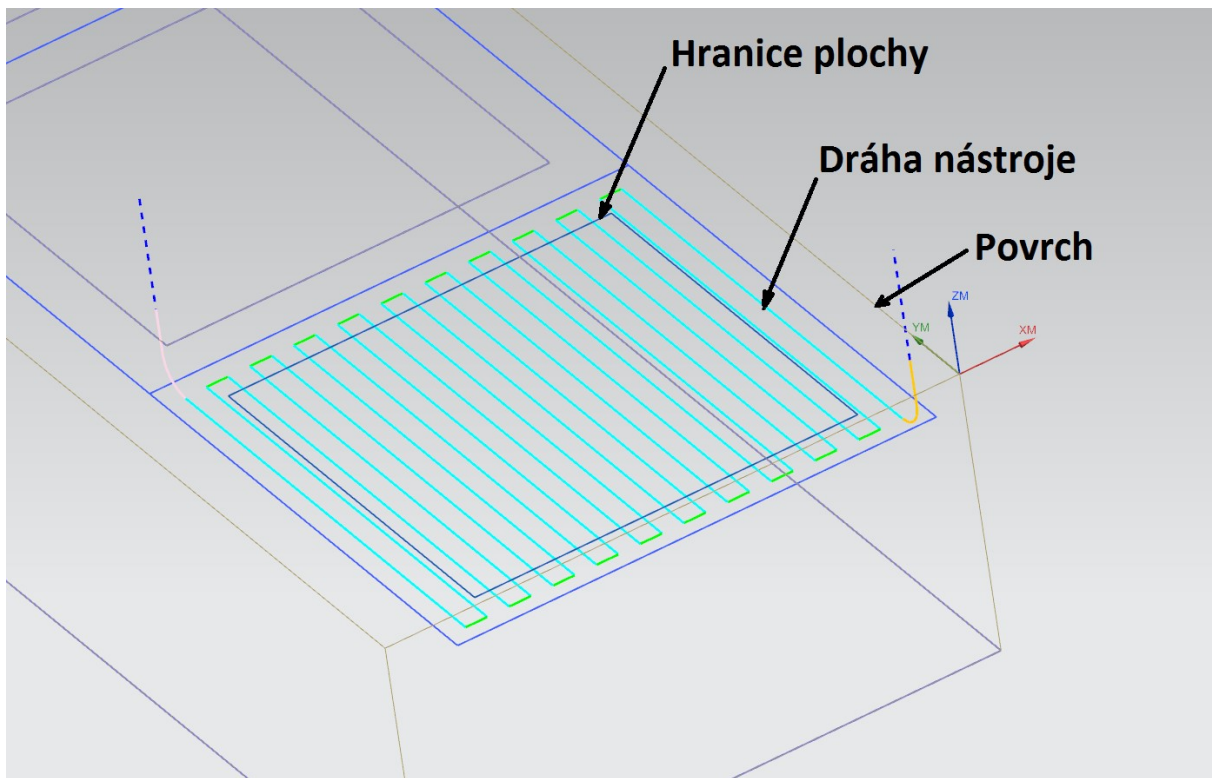
Testovaný dílec byl vymodelován v CAD/CAM programu Siemens NX. Jednotlivé plochy byly definovány uzavřenými křivkami, odpovídajícími výsledné velikosti polotovaru a obráběné plochy. Dráha nástroje byla vytvořena za pomoci metody „Area Milling Drive Method“ (tedy metodou pro obrábění ploch), která je relativně univerzální a poskytuje řadu možných nastavení.



11-5: Možnosti volby v nastavení dráhy nástroje

Obráběné plochy byly vybrány s omezením uzavřenou křivkou. Pro plochu bez naklopení byly nastaveny zvolené velikosti parametru zbytkové výšky s volbou výpočtu zbytkové výšky kolmo na plochu součásti. Pro porovnání byly na nakloněných vzorcích voleny parametry definicí s volbou výpočtu zbytkové výšky kolmo na základní rovinu.

Bylo zvoleno nastavení tvaru dráhy strategií obousměrného řádkování s řídicími vektory ve směru delších hran obrobku, tak aby byl usnadněn přístup měřícího zařízení k obrobené ploše. Tato metoda umožňuje rozšíření obráběné plochy o odsazení (offset) od omezující křivky plochy, čehož bylo využito pro zvětšení obráběné plochy o 1,5mm. Nástroj tak vyběhá z obráběného materiálu do předem vytvořených drážek, což zamezuje vzniku chyb na hranicích ploch a poskytuje možnost optické kontroly tvaru obrobených drah.



11-6: Vygenerovaná dráha nástroje

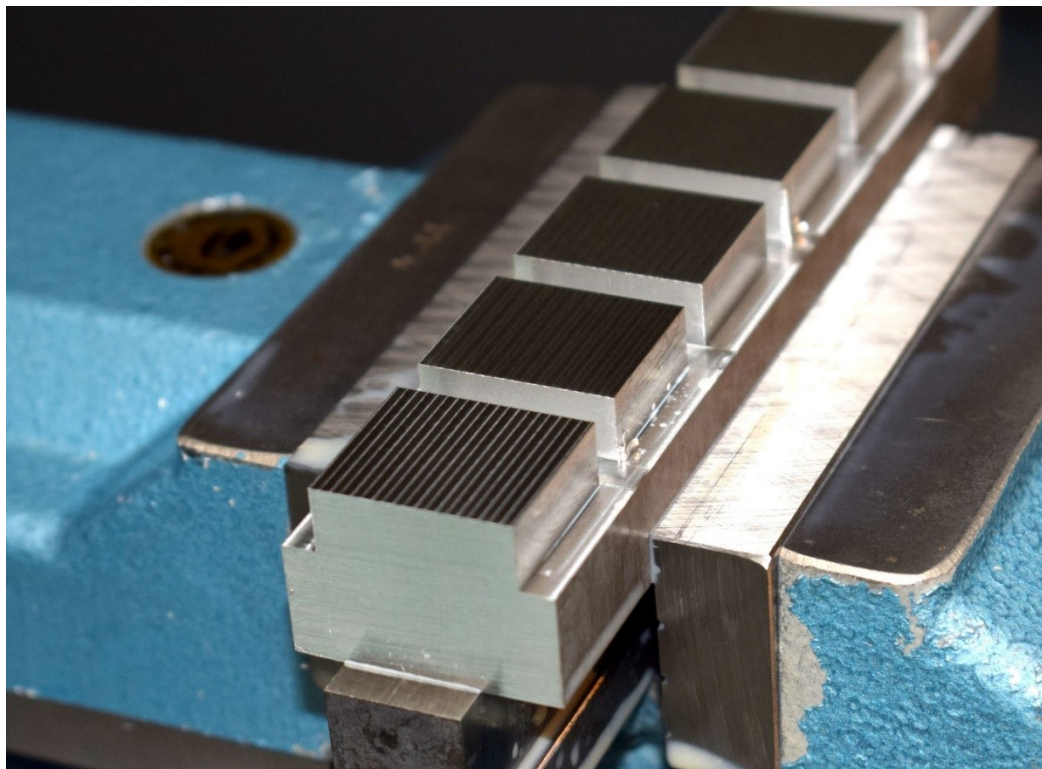
11.5 Obrábění:

Pro obrábění byly zvoleny technologické podmínky s uvažováním doporučení výrobce nástroje a možnostmi stroje. Z doporučení výrobce, který udává velikost posuvu na zub $0,09\text{mm/z}$ a řeznou rychlost 300m/min by vycházely otáčky stroje přes 15000ot/min . Z důvodu možností stroje byly voleny otáčky vřetena 8000ot/min a posuv byl volen 1280mm/min . Hloubka řezu pro řádkování byla volena $0,15\text{mm}$, tedy doporučená hodnota výrobcem nástroje.

Jako první se obráběl testovací vzorek se sklonem 0° , který byl nejjednodušší na nastavení a přípravu obrábění. Nejprve byla manuálním režimem stroje zarovnána obráběná plocha polotovaru frézou o průměru 50mm , poté byl zaměřen pomocí sondy souřadný systém. Automatickým programem bylo provedeno obrábění drážek mezi testovanými plochami válcovou frézou o průměru 5mm . Následně bylo kulovým nástrojem D6R3 obrobena všech šest zkušebních ploch, nastavených pro různé vstupní parametry zbytkové výšky v CAM systému.

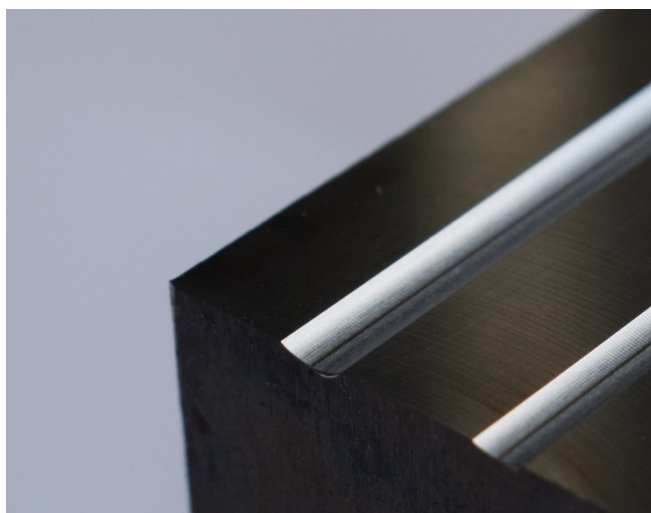
Pro vzorky se sklonem plochy 10° a 20° se nejprve provedlo srovnání obráběné plochy a obrobení drážek stejně jako pro nenakloněný vzorek. Poté byl obrobek naklopen na požadovaný úhel pomocí naklápěcího stolu. Následně bylo nutno upravit souřadný systém a tedy jej zaměřit na nakloněném obrobku. Po zaměření souřadného systému pomocí vřetenové sondy byly obrobena zkušební plochy se stejnými vstupními parametry zbytkové výšky jako u nenakloněného vzorku.

Aby bylo možno vzorky od sebe rozlišit, bylo na bok každého vzorku vyraženo příslušné označení A, B a C, které značí náklon roviny- 0°, 10° a 20°.



11-7: Dokončený obrobek

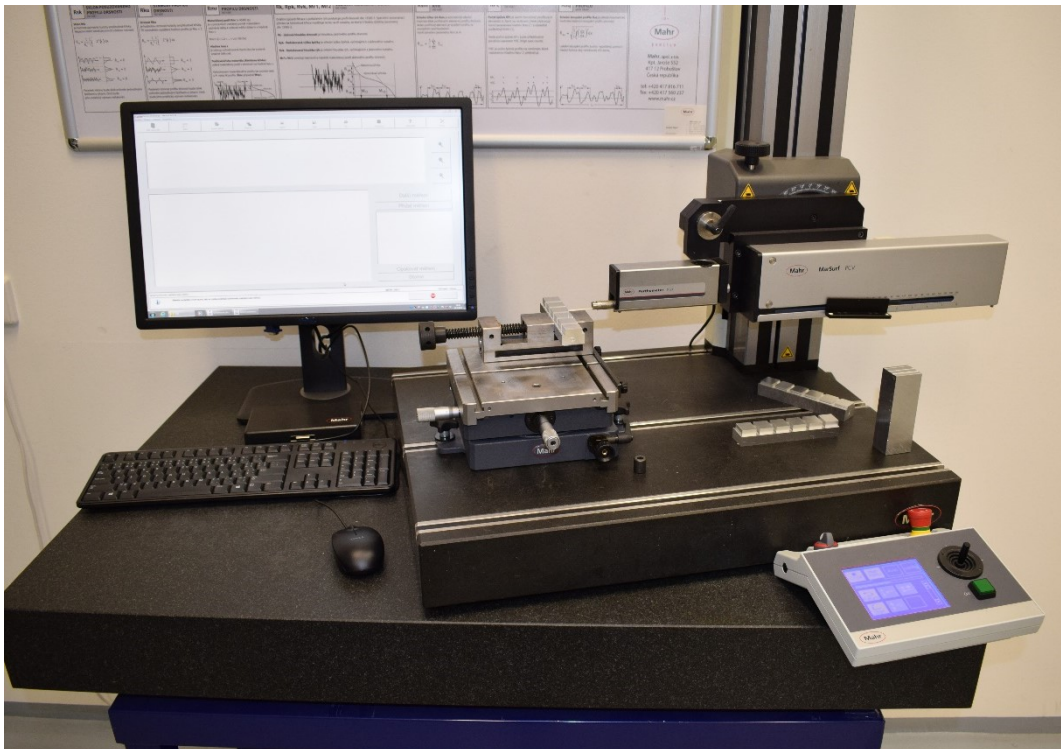
Pro zjištění přesného tvaru obráběné dráhy nástrojem bylo provedeno testovací obrábění jednotlivé dráhy při stejných otáčkách a posuvu, jakých bylo použito při obrábění a pro hloubku řezu 0,5mm.



11-8: Testovací obrábění

11.6 Měření:

Měření proběhlo na pracovišti na měření drsnosti a obrysů firmy Mahr typu MarSurf XCR 20. Toto kombinované pracoviště umožňuje měření parametrů drsnosti, záznam profilu povrchu a následné vyhodnocení dat. S ohledem na typ měření lze použít posuvnou jednotku profilometru PGK, určenou pro měření drsnosti, nebo posuvnou jednotku PCV, která je určena pro měření obrysů. Tyto jednotky jsou umístěny na měřícím stojanu MarSurf ST 750, který je vybaven kombinovaným upínačem jednotek a stolem pro uchycení držáku měřeného dílce. [17]

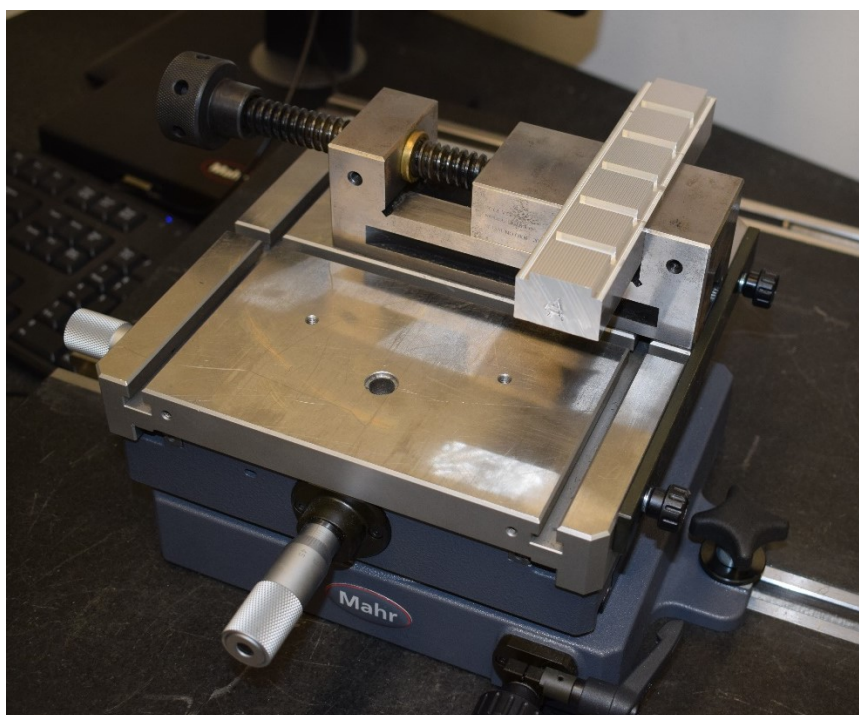


11-9: Měřící pracoviště

Jedná se o měření dotykovou metodou. Tato metoda byla volena oproti metodě bezdotykové z několika důvodů, mimo jiné kvůli lesklému povrchu obráběného materiálu, který by mohl ovlivnit měření bezdotykovými metodami. Tyto metody jsou zároveň náchylné i na znečištění povrchu, které může vzniknout důsledkem obrábění s chladicí kapalinou, kde i přes čištění součásti se může stopové množství chladicí kapaliny nadále vyskytovat v prohlubních struktury povrchu. Tvar testované součásti není nikterak složitý a měření tak není ovlivněno tvarovou složitostí. Rozlišení a přesnost měření tohoto laboratorního přístroje by měly být dostatečné pro posouzení struktury povrchu testovaných ploch.

Přístroj MarSurf XCR20 dosahuje rychlosti měření až 4mm/s, umožňuje rozsah měření až 50mm v ose Z. Rozlišení přístroje je 0,04 μm . Lze nastavit snímané délky od 0,56mm do 56mm, přístroj zároveň dokáže vyhodnotit vhodnou hodnotu snímané délky automaticky. Sílu při měření je možné nastavit na 1 mN až 120 mN směrem nahoru i směrem dolů. [17]

Na měřicím pracovišti byly všechny obrobky postupně připevněny na svěrák umístěný na posuvném stolku, kolmo na měřicí zařízení. Obrobky byly postupně posouvány tak, aby proběhlo měření všech zkušebních ploch. Na každé ploše bylo nejprve provedeno jedno testovací měření pro získání hodnoty R_{sm} , podle které byly následně zvoleny parametry měření cut-off a snímané délky. Pro veškerá měření byla volena mezní vlnová délka cut-off 2,5mm, což znamená, že na přístroji byla nastavena snímaná délka 17,5mm. Následně bylo provedeno pět náhodných měření na každém vzorku. Z těchto měření byl poté vytvořen výstupní protokol ve formátu PDF a data měření byla uložena ve vlastním formátu zařízení, které je možno použít k dalšímu vyhodnocování výsledků měření.



11-10: Uchycení vzorku v měřicím přístroji

11.7 Výsledky měření

11.7.1 Zpracování naměřených hodnot

Naměřené hodnoty byly zpracovány do tabulky v programu Excel a byly spočítány průměrné hodnoty jednotlivých parametrů. Z těchto průměrných hodnot parametrů byla vytvořena následující tabulka.

11-1: Průměrné hodnoty z naměřených hodnot

Vzorek	Plocha	Rsm [μm]	Ra [μm]	Rz [μm]	Pt [μm]
A-0°	1	450,838	0,798	4,646	5,215
	2	516,457	1,475	6,723	7,305
	3	649,517	2,703	11,237	11,981
	4	817,564	4,602	18,980	19,742
	5	1013,825	7,535	29,437	30,845
	6	1268,667	11,695	46,003	49,867
B-10°	1	420,383	1,921	8,135	9,378
	2	520,607	2,631	10,695	11,968
	3	663,313	4,064	16,262	17,518
	4	828,964	6,150	24,757	26,391
	5	1019,073	9,152	36,844	38,806
	6	1325,400	14,573	57,874	64,016
C-20°	1	441,744	1,672	7,647	8,825
	2	553,827	2,658	11,883	13,151
	3	700,076	4,386	18,252	19,739
	4	886,362	7,398	28,614	29,976
	5	1108,920	11,031	43,712	46,251
	6	1400,588	15,667	63,786	71,836

V jednotlivých měřeních jsou nápadné odchylky, které nastaly pro měření u ploch 1 na všech vzorcích. Je možné, že tyto odchylky byly způsobené chybou v měření tohoto jemného profilu.

Z měření na jednotce PCV, kde byl měřen obrysový tvar jednotlivé dráhy testovacího obrábění, byl v programu XCR20 proložen tento naměřený tvar dráhy profilem aproximované křivky. Z tohoto

měření vyšlo, že velikost nástroje se nachází v toleranci udávané výrobcem a jeho skutečný rozměr poloměru je 3,047mm.

11.7.2 Srovnání teoretických a reálných hodnot

Srovnání teoretických a reálných hodnot provádíme pouze pro zkušební plochy, kde byl parametr zbytkové výšky definován kolmo na povrch součásti-tedy pro naklopení vzorku o 0°.

Pokud se pro skutečný rozměr nástroje a výsledný krok nástroje získaný z CAM systému vypočte teoretická hodnota zbytkové výšky (ZV1), která vychází z teoretického modelu, získá se tak teoretická hodnota, kterou lze dále použít k porovnání s reálně naměřenými daty. Odchylky vzniklé od zadané hodnoty jsou způsobeny použitím jmenovité hodnoty nástroje při zadávání tvorby drah, odchylkami, které způsobuje CAM systém a možnými vibracemi nástroje.

11-2: Srovnání zadané hodnoty s teoreticky vypočítanou hodnotou ZV pro reálný poloměr nástroje

Plocha	ZV0 (zadáno do CAM)[mm]	ZV1 (zpětný výpočet z CAM) [mm]	Odchylka [%]
1	0,0063	0,005759063	8,586303193
2	0,01	0,008902497	10,97502961
3	0,016	0,014096039	11,89975713
4	0,025	0,022395491	10,41803708
5	0,04	0,034428268	13,92932878
6	0,063	0,053932437	14,39295736

Tato vypočítaná hodnota zbytkové výšky byla porovnána s měřením získanými hodnotami parametrů Rz a Pt, které jsou svou definicí nejvíce vhodné ke srovnání s tímto parametrem.

11-3: Srovnání teoretické hodnoty ZV1 s reálně naměřenými hodnotami

Plocha	Rz [μm]	Pt [μm]	Zbytková výška (ZV1) [μm]	Odchylka Rz [%]	Odchylka Pt [%]
1	4,646	5,215	5,7591	19,3282	9,4547
2	6,723	7,305	8,9025	24,4866	17,9426
3	11,237	11,981	14,0960	20,2809	15,0029
4	18,980	19,742	22,3955	15,2515	11,8485
5	29,437	30,845	34,4283	14,4976	10,4066
6	46,003	49,867	53,9324	14,7018	7,5372

Z tohoto srovnání je zřejmé, že nejbližší měřenou hodnotou k vypočtenému parametru zbytkové výšky je parametr Pt, jehož odchylka od teoretické hodnoty je nejvíce 18%. Nejvyšší odchylka parametru Rz je 24,5%. Z těchto dat je možné usoudit, že mezi těmito parametry existuje jistá souvislost. Z množství

dat, které byly získány z tohoto experimentu, však nelze vyvodit přímou závislost. Pro bližší prozkoumání vztahu mezi těmito parametry je nutné provést rozsáhlejší experiment, nad rámec této bakalářské práce.

11.7.3 Srovnání vzniku chyby při použití špatné definice zbytkové výšky

Druhou částí experimentu bylo srovnání vlivu naklonění plochy na chybu, která vznikne, pokud operátor vybere v CAM systému špatnou definici zbytkové výšky. Pro toto řešení bylo provedeno srovnání mezi reálnými výstupy z měření na ploše s nakloněním 0° a s plochami s nakloněním 10° a 20°.

V následující tabulce bylo vytvořeno srovnání průměrných hodnot parametrů Rsm. Tento parametr udává střední vzdálenost prvků profilu, teoreticky by tedy měl odpovídat velikosti kroku nástroje mezi drahami pro plochu s nakloněním 0°. Z reálných výsledků je vidět, že tyto hodnoty úplně neodpovídají, jsou větší o velikost do 10%. Je možné, že toto bylo způsobeno jemnými vibracemi nástroje na povrchu obrobku během obrábění.

11-4: Srovnání hodnot Rsm

Plocha	Rsm pro 0° [μm]	Rsm pro 10° [μm]	Rsm pro 20° [μm]	odchylka pro 10° [%]	odchylka pro 20° [%]
1	450,838	420,383	441,744	6,7553	2,0171
2	516,457	520,607	553,827	0,7973	6,7477
3	649,517	663,313	700,076	2,0799	7,2220
4	817,564	828,964	886,362	1,3752	7,7618
5	1013,825	1019,073	1108,920	0,5150	8,5755
6	1268,667	1325,400	1400,588	4,2805	9,4190

V celé tabulce je vidět obecná vzestupná tendence, výjimku tvoří hodnota plochy 1 pro nulové naklonění, kde zřejmě došlo k chybě u dvou měření (viz příloha), jelikož se tato hodnota odchyluje i od teoretické hodnoty kroku o více než 16%.

V následující tabulce je uvedeno srovnání průměrných hodnot Ra mezi zkušebními vzorky. Stejně jako v případě tabulky předcházející, která srovnávala hodnoty Rsm, i zde je možné, že došlo k chybě způsobené měřením plochy jedna. Z měření je však vidět, že naklopení vzorků B a C způsobilo poměrně razantní nárůst parametru Ra.

11-5: Srovnání hodnot Ra

Plocha	Ra pro 0° [μm]	Ra pro 10° [μm]	Ra pro 20° [μm]	odchylka pro 10° [%]	odchylka pro 20° [%]
1	0,798	1,921	1,672	58,4362	52,2427
2	1,475	2,631	2,658	43,9639	44,5317
3	2,703	4,064	4,386	33,4800	38,3618
4	4,602	6,150	7,398	25,1585	37,7858
5	7,535	9,152	11,031	17,6641	31,6881
6	11,695	14,573	15,667	19,7496	25,3519

11.7.4 Závěr měření

Z naměřených hodnot je možné dojít k závěru, že definice zbytkové výšky v CAM systému není zcela přesná. CAM systém upravuje zadanou hodnotu tak, že po zaokrouhlení a možných chybách v interpolaci dráhy, tato hodnota nepřesáhne zadanou vstupní hodnotu zbytkové výšky. To ale znamená, že CAM systém nepracuje se zadanou hodnotou jako s konstantou, ale spíše jako limitní, přibližnou hodnotou, ke které se snaží přiblížit v rámci určitého tolerančního pole, které je definované uvnitř programu. Skutečná velikost výstupků na povrchu je potom daná také tuhostí soustavy stroje, použitým nástrojem a vlivem technologických parametrů na obrábění.

Ve všech měřeních na vzorku A byly naměřené hodnoty parametru Pt v rozmezí od 7,5 do 17,9% menší, než teoretická velikost zbytkové výšky ZV1. Velikost parametru Rz potom byla ještě menší a oproti teoretickým hodnotám se nacházela v rozmezí 14,5-24,5%. Z měření tedy vyplývá souvislost mezi těmito parametry, bližší vztah můžeme nalézt mezi parametry Pt a ZV. Pro bližší ověření toho vztahu a možnosti nalezení případného matematického modelu převodu mezi těmito parametry by však bylo nutné provést více rozsáhlé měření a výzkum nad rámec této práce.

Z porovnání hodnot z měření vzorků B a C spolu s hodnotami z vzorku A je vidět, jak zásadně ovlivňuje správná volba definice výsledný povrch součásti. Díky tolerančnímu poli parametru zbytkové výšky není chyba tak zřejmá na vzorku B, kde bylo naklonění roviny 10°, ale pokud by uživatel zadal přesnou hodnotu nástroje, nebo počítal s tímto tolerančním polem a zadával úmyslně hodnotu větší, rozdíl by byl zřetelnější a povrch by nevyhovoval požadovanému parametru. Na vzorku C je však chyba zcela zřejmá i v takto provedeném obrábění. V případě obrábění obecných ploch, kdy běžně dochází k naklopení nástroje vůči obrobku, je proto nutno dbát na volbu správné definice parametru zbytkové

výšky - v této situaci by se tedy jednalo o definici, kde je výpočtová velikost zbytkového materiálu kolmo na povrch obrobku.

12 Závěr

Tato práce měla za úkol prozkoumat problematiku zbytkové výšky materiálu a provést srovnání teoretického modelu za použití hodnot zadávaných do CAM systému s reálným výstupem experimentu. Práce se proto zabývala uvedením termínu zbytkové výšky v kontextu obecné problematiky frézování na CNC strojích, programování NC kódu a použití CAM systému pro tvorbu drah nástroje. Dále bylo pro řešení této práce nutné uvést problematiku povrchu součástí a vybraných jakostních parametrů před provedením praktické části.

Parametr zbytkové výšky má jistě velký potenciál v moderní výrobě za použití CAM systémů, jelikož je možné přímo srovnávat vstupní parametr, který zadáváme do CAM systému, s výstupními hodnotami, které můžeme naměřit na povrchu součásti, což může vést ke zvýšení produktivity výroby. Před plným využitím tohoto potenciálu je však třeba dořešit problémy, které mohou nastat při použití tohoto parametru.

Aktuálně hlavním problémem je, že tento parametr není dostatečně přesně definován. V CAM systémech se používají dvě definice. První, obecněji používaná, udává tento parametr jako vzdálenost zbytkového materiálu kolmo na povrch součásti. Druhá definice, kterou můžeme v CAM systémech nalézt, udává tento parametr jako velikost zbytkového materiálu ve směru osy nástroje. Důsledky použití chybné definice, což může být jedna z chyb při tvorbě drah v CAM systému s využitím tohoto parametru, byly demonstrovány v praktickém experimentu. Vytvoření normalizované definice, která by pevně stanovila jednotnou charakteristiku velikosti zbytkové výšky, by mělo tento a obdobné problémy vyřešit.

Během experimentu byly vytvořeny testovací vzorky, na kterých bylo provedeno srovnání teoretických hodnot s hodnotami naměřenými na povrchu vzorků. Mezi teoretickými a reálnými hodnotami byla zjištěna možná korelace mezi parametrem zbytkové výšky a hodnotami Rz a Pt, které lze naměřit na povrchu součásti. Tuto souvislost je možno však hledat pouze v případě, že se správně zvolí definice parametru zbytkové výšky - tedy kolmo na povrch. Rozsah této práce však neumožnil důkladné prozkoumání těchto souvislostí, pro to by bylo nutné provést mnohem větší množství experimentálních měření.

13 Seznam použitých zdrojů

- [1] ČSN EN ISO 4287 *Geometrické požadavky na výrobky (GPS)- Struktura povrchu: Profilová metoda – Termíny, definice, a parametry struktury povrchu*. Český normalizační institut, březen 1999
- [2] POSPÍCHAL, Jaroslav. *Technické kreslení*. 4., přeprac. vyd. V Praze: České vysoké učení technické, 2014. ISBN 9788001055953
- [3] ŠTULPA, Miloslav. *CNC: programování obráběcích strojů*. Praha: Grada, 2015. ISBN 9788024752693
- [4] BILÍK, Oldřich a VRABEC, Martin. *Technologie obrábění s využitím CAD/CAM systémů*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, Strojní fakulta, 2002. ISBN 9788024800349
- [5] ČSN EN ISO 4288 *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Struktura povrchu: Profilová metoda - Pravidla a postupy pro posuzování struktury povrchu*. Český normalizační institut, březen 1999
- [6] ČSN EN ISO 3274 *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) – Struktura povrchu: Profilová metoda – Jmenovité charakteristiky dotykových (hrotových) přístrojů*. Český normalizační institut, únor 1999
- [7] TICHÁ, Šárka. *Strojírenská metrologie*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita, 2006. ISBN 9788024812090
- [8] *OLS4000* [online]. [cit. 29.4.2017]. Dostupné z: <http://www.olympus-ims.com/en/metrology/ols4000/>
- [9] Dotykové, nebo bezdotykové měření struktury povrchu? *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2005, (6) [cit. 25.4.2017]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/dotykovye-nebo-bezdotykovye-mereni-struktury-povrchu.html>
- [10] ČSN EN ISO 1302 *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) – Označování struktury povrchu v technické dokumentaci výrobků*. Český normalizační institut, únor 2002
- [11] SADÍLEK, Miloslav. Postprocessor - slabé místo CAM systémů? *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2005, (4), 46 [cit. 15.5.2017]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/postprocessor-slabe-misto-cam-systemu.html>
- [12] KOVÁŘ, Jiří. Ovlivnění kvality a jakosti obrobené plochy při frézování. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2004, (4), 30 [cit. 9.6.2017]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/ovlivneni-kvality-a-jakosti-obrobene-plochy-pri-frezovani.html>

- [13] BRYCHTA, Josef, ČEP, Robert, NOVÁKOVÁ, Jana, a PETŘKOVSKÁ, Lenka. *Technologie II*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2008. ISBN 9788024818221
- [14] HSI-YUNG, Feng a HUIWEN, Li. Constant scallop-height tool path generation for three-axis sculptured surface machining. *Computer-Aided Design* [online]. 2002, **34**(9), 647-654 [cit. 20.4.2017]. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0010-4485\(01\)00136-1](https://doi.org/10.1016/S0010-4485(01)00136-1). Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0010448501001361>
- [15] SENATORE, Johanna, MOUSSAOUI, Kamel, SEGONDS, Stéphane, MONIÈS, Frédéric, a RUBIO, Walter. Analysis of drift in iso-scallop planning—machining by regions. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. 2013, **67**(1-4), 719–732 [cit. 5.5.2017]. DOI: 10.1007/s00170-012-4517-1. Dostupné z: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-012-4517-1>
- [16] SHOKROLLAHI, N. a SHOJAEI, E.. Experimental comparison of iso scallop, iso planar and iso parametric algorithms in machining sculptured surfaces. *Indian Journal of Scientific Research*. 2014, **1**(2), 475-481. ISSN 0976-2876 Online ISSN : 2250-0138.
- [17] *MarSurf XCR 20* [online]. [cit. 29.6.2017]. Dostupné z: <https://www.mahr.com/cs/Produkty-a-slu%C5%BEby/V%C3%BDrobn%C3%AD-m%C4%9B%C5%99ic%C3%AD-technika/Produkty/MarSurf---Po%C4%8D%C3%ADta%C4%8Dov%C4%9B-%C5%99%C3%ADzen%C3%A1-za%C5%99%C3%ADzen%C3%AD-na-m%C4%9B%C5%99en%C3%AD-drsnosti/MarSurf-XCR-20/>
- [18] Produktový list výrobce MAS Kovosvit
- [19] Drsnost obrobeného povrchu. *Tumlikovo: Metal Cutting Technologies* [online]. 2011 [cit. 15.4.2017]. Dostupné z: <http://www.tumlikovo.cz/drsnost-obrobeneho-povrchu/>
- [20] Surface condition: DIN 4768-1 Conversion from Ra in Rz and vice versa. *Strack Normalien* [online]. [cit. 2.5.2017]. Dostupné z: http://www.strack.de/_cms/lib/f_dbstream.php?tn=tab_file&fd=file&mt=application/pdf&id=738&hfile&f=Oberfl%25C3%25A4chenbeschaffenheit_d_e_f.pdf
- [21] *Hliník AlZn6Mg2Cu - ČSN 424222* [online]. [cit. 11.7.2017]. Dostupné z: <http://www.proal.cz/info/424222.htm>
- [22] Tvarové frézování. *Sandvik Coromant* [online]. [cit. 6.7.2017]. Dostupné z: http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/milling/application_overview/profile_milling/profile_milling

[23] Lepší kvalita v kratším čase. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2001, (9), 46 [cit. 2.4.2017].

Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/lepsi-kvalita-v-kratsim-case.html>

[24] Technical data. *Tyson Tool Company* [online]. [cit. 2.4.2017]. Dostupné z:

<http://www.tysontool.com/tech-mill-formulas.pdf>

[25] Imperial surface finish calculators. *Theoretical machinist* [online]. [cit. 27.4.2017]. Dostupné z:

http://theoreticalmachinist.com/Surface_Finish_Calc.aspx

[26] Metric End Ball Mill Calculation. *Kyocera: SGS Precision Tools* [online]. [cit. 25.5.2017]. Dostupné

z: <http://www.kyocera-sgstool.com/content.aspx?contentId=MetricBallEndMillCalculators>

[27] Frézy kopírovací dlouhé, 2 zuby, typ N, weldon ploška. *ZPS - FRÉZOVACÍ NÁSTROJE a.s.* [online].

[cit. 9.6.2017]. Dostupné z: [https://www.zps-fn.cz/hledani/detail1/frezy-kopirovaci-dlouhe,-2-zuby,-typ-n,-weldon-ploska,-din-6527-l,-slinute-karbidy-\(sk\)/](https://www.zps-fn.cz/hledani/detail1/frezy-kopirovaci-dlouhe,-2-zuby,-typ-n,-weldon-ploska,-din-6527-l,-slinute-karbidy-(sk)/)

[28] BRYCHTA, Josef, Marek SADÍLEK, Robert ČEP a Jana PETRŮ. *Progresivní metody v obrábění: studijní opora*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2011. ISBN 978-802-4825-137.

[29] CHEN, Tao a SHI, Zhiliang. A tool path generation strategy for three-axis ball-end milling of free-form surfaces. *Journal of Materials Processing Technology* [online]. 2008, 208(1-3), 259-263 [cit.

18.5.2017]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.12.142>. Dostupné z:

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013608000435>

[30] NX 10 Help. Siemens [online]. [cit. 15.6.2017]. Dostupné z:

https://docs.plm.automation.siemens.com/tdoc/nx/10/nx_help/#uid:index

14 Seznam obrázků a tabulek

14.1 Obrázky

5-1: Profil povrchu	14
5-2: Přenosová charakteristika profilu drsnosti a vlnitosti.....	15
5-3: Prvek profilu	16
5-4: Parametr Ra.....	17
5-5: Parametr Rz.....	18
5-6: Šířka prvků profilu	18
6-1: Základní značka s polohou doplňkových parametrů	20
6-2: Značka typ1	20
6-3: Značka typ2	21
6-4: Značka typ3	21
6-5: Ukázka prvků na výkresu.....	21
7-1: Měření profilometrem	24
7-2: Měření laserem	24

8-1: Příklad zápisu bloků programu.....	26
8-1: Definice nástroje	28
8-2: Ukázka volby tvaru dráhy	29
9-1: Zbytková výška pro kulový nástroj definicí kolmo na povrch součásti	31
9-2: Tvorba dráhy bez omezení hranic- volný přesah dráhy bez chyby ve velikosti kroku	33
9-3: vytvořená dráha s omezenými hranicemi- vzniklá chyba na okraji omezení.....	33
11-1: Navrhovaný polotovár	37
11-2: Pracoviště CNC stroje	38
11-3: Upnutí obrobku ve stroji	38
11-4: Použité nástroje	39
11-5: Možnosti volby v nastavení dráhy nástroje	40
11-6: Vygenerovaná dráha nástroje	41
11-7: Dokončený obrobek	42
11-8: Testovací obrábění.....	42
11-9: Měřicí pracoviště.....	43
11-10: Uchycení vzorku v měřicím přístroji.....	44

14.2 Tabulky

5-1: Řada parametrů drsnosti	19
10-1: Tabulka volených hodnot zbytkové výšky	34
10-2 : Tabulka hodnot kroku	35
10-3: Tabulka zpětného výpočtu zbytkové výšky	35
11-1: <i>Průměrné hodnoty z naměřených hodnot</i>	45
11-2: Srovnání zadané hodnoty s teoreticky vypočítanou hodnotou ZV pro reálný poloměr nástroje 46	
11-3: Srovnání teoretické hodnoty ZV1 s reálně naměřenými hodnotami.....	46
11-4: Srovnání hodnot Rsm	47
11-5: Srovnání hodnot Ra.....	48

15 Přílohy

1: Protokoly měření

2: DVD