

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ,
PROJEKTOVÁNÍ A METROLOGIE



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

MĚŘENÍ DRSNOSTI POVRCHU OBRÁBĚNÝCH FREE-FORM
PLOCH

MACHINED FREE-FORM SURFACE ROUGHNESS
MEASUREMENT

AUTOR: Tomáš Havránek

STUDIJNÍ PROGRAM: B 2343 Výroba a ekonomika ve strojírenství

VEDOUCÍ PRÁCE: Ing. Jan Tomíček, Ph.D.

Praha 2023

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Havránek** Jméno: **Tomáš** Osobní číslo: **484711**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**
Studijní program: **Výroba a ekonomika ve strojírenství**
Studijní obor: **Technologie, materiály a ekonomika strojírenství**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Měření drsnosti povrchu obráběných free-form ploch

Název bakalářské práce anglicky:

Machined free-form surface roughness measurement

Pokyny pro vypracování:

Práce zaměřená na měření drsnosti po obrábění free-form ploch. Součástí práce je analýza možnosti měření na tvarově složitých (free-form) plochách v souvislosti s normativní regulací předepisování drsnosti na výrobcích. Zjištěné skutečnosti budou ověřeny experimentálním měřením a vyhodnoceny.

V rámci práce proveďte:

1. Rešerše na téma obrábění tvarových ploch a měření drsnosti na těchto plochách.
2. Rešerše v oblasti normalizace měření drsnosti zaměřenou na způsoby a požadavky na měření obráběných free form ploch.
3. Návrh experimentálního tělesa a měření drsnosti.
4. Vyhodnocení výsledků měření získaných různými metodami
5. Závěry a doporučení pro měření free form ploch.

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

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

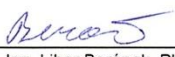
Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

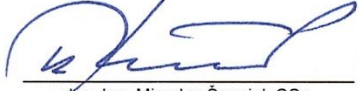
Datum zadání bakalářské práce: **03.04.2023**

Termín odevzdání bakalářské práce: **31.07.2023**

Platnost zadání bakalářské práce: _____


Ing. Jan Tomíček, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

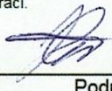

Ing. Libor Beránek, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry


doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.
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.

26.4.2023
Datum převzetí zadání


Podpis studenta

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu práce Ing. Janu Tomíčkoví Ph.D. za konzultace, rady a připomínky, které při vypracování práce poskytl. Zároveň chci poděkovat za velikou podporu ze strany rodičů a přátel. Nakonec děkuji Bc. Ondřeji Gregorovi, který mi vysvětlil obsluhu školního konfokálního mikroskopu.

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou/diplomovou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady uvedené v příloženém seznamu.

V Praze dne:

.....

Podpis

Anotace:

Autor:	Tomáš Havránek
Název práce:	Měření drsnosti povrchu obráběných free-form ploch
Rozsah práce:	62 stran, 25 obrázků, 41 tabulek, 12 příloh
Akademický rok:	2022/2023
Vysoká škola	ČVUT v Praze, Fakulta strojní
Studijní program:	B 2343 Výroba a ekonomika ve strojírenství
Ústav:	12134 - Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie
Vedoucí práce:	Ing. Jan Tomíček, Ph.D.
Abstrakt:	Tato práce se zabývá měřením drsnosti povrchu free-form ploch po obrábění. Cílem je zjistit vhodnou metodu měření těchto ploch. Byla provedena rešerše na téma výroby free-form ploch a měření drsnosti na těchto plochách. Následovala rešerše v oblasti normalizace v oblasti měření drsnosti. V praktické části práce je popsán návrh experimentálního tělesa a měření drsnosti na navrženém tělese. Závěrem je porovnání různých metod měření drsnosti a vyhodnocení celé práce.
Klíčová slova:	Tvarově složité plochy, měření drsnosti, konfokální mikroskop, konturograf
Citace práce:	HAVRÁNEK, Tomáš. <i>Měření drsnosti povrchu obráběných free-form ploch</i> . Praha, 2023. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní. Vedoucí práce Ing. Jan Tomíček, Ph.D.

Annotation:

Author:	Tomáš Havránek
Title of the thesis:	Machined free-form surface roughness measurement
Extent:	62 pages, 25 pictures, 41 tables, 12 annexes
Academic year:	2022/2023
Study program:	B 2343 Production and economics in engineering
Department:	12134 – Department of machining, process planning and metrology
Supervisor:	Ing. Jan Tomíček, Ph.D.
Abstrakt:	<p>This thesis deals with the measurement of surface roughness of free-form surfaces after machining. The aim is to determine a suitable method for measuring these surfaces. Research has been carried out on the topic of manufacturing of free-form surfaces and measuring the roughness on these surfaces. This was followed by a research on standardization in the field of roughness measurement. The practical part of the thesis describes the design of the experimental solid and the measurement of roughness on the designed solid. Finally, a comparison of different methods of roughness measurement and an evaluation of the whole work is presented.</p>
Key words:	Free-form surfaces, surface roughness measurement, confocal microscopy, Contourograph
Thesis citation:	HAVRÁNEK, Tomáš. <i>Machined free-form surface roughness measurement</i> . Prague, 2023. Bachelor thesis. Czech technical university in Prague, Faculty of mechanical engineering. Vedoucí práce Ing. Jan Tomíček, Ph.D.

Obsah

1	Úvod	7
2	Free-form povrchy	8
2.1	Použití free-form ploch	8
2.2	Výroba free-form ploch	10
3	Měření drsnosti povrchu	13
3.1	Metody měření drsnosti povrchu	13
3.2	Technická normalizace v oblasti měření drsnosti povrchu	16
4	Příprava experimentu	21
4.1	Návrh tvaru experimentálního tělesa	21
4.2	Strategie obrábění tělesa	24
5	Měření drsnosti experimentálního tělesa	35
5.1	Měření Konturografem	35
5.2	Měření konfokálním mikroskopem	36
5.3	Naměřené hodnoty	38
6	Interpretace naměřených výsledků	48
6.1	Výsledky konvexních oblastí	48
6.2	Výsledky konkávních oblastí	49
6.3	Výsledky oblastí s rovinnými plochami	50
6.4	Výsledek všech oblastí	52
6.5	Parametry drsnosti na jednotlivých plochách	52
7	Závěr	55
8	Bibliografie	56
9	Přílohy	62

1 Úvod

Tato bakalářská práce se zaměřuje na výrobu free-form ploch a měření drsnosti na těchto plochách. Ve své práci jsem porovnával různé metody měření drsnosti povrchu. Cílem je zjistit, zdali lze pro měření free-form ploch využít dotekové metody, které jsou rychlejší než ty optické.

Free-form plochy se používají čím dál častěji ve všech průmyslových odvětvích. S tím je spojena větší poptávka výroby. Pro většinu výrobních postupů free-form ploch je zapotřebí vytvořit formu. Formy se vyrábí především obráběním. Znalost drsnosti povrchu může hrát roli při následujících úpravách povrchu, např. broušení scallopu či kuličkování. O možných využitích a výrobě free-form ploch se lze dočíst v následující kapitole.

Třetí kapitola je zaměřena na technickou normalizaci v oblasti měření povrchů. V červnu roku 2023 byli vydány tři překlady mezinárodních norem zabývajících se problematikou textury povrchu. Jelikož předchozí normy byli přes dvacet let staré, a byli rozebrány v nespočetně jiných pracích, rozhodl jsem se v této práci vypsát změny zavedené v nových normativních dokumentech.

Ve zbytku práce se lze dočíst postup při návrhu experimentálního tělesa, postup při volbě strategií, nastavení řezných podmínek při obrábění, naměřené hodnoty, diskusi výsledků a závěr práce.

2 Free-form povrchy

V posledních letech probíhá ve strojírenství transformace stylu výroby i požadavků na výrobky. Čím dál tím častěji firmy využívají počítačem řízené obráběcí stroje (CNC stroje), což snižuje nároky na zaměstnance, zvyšuje stálost a efektivitu výroby a zároveň dovoluje vytvářet tvarově složitější obrobky. Může se jednat o členité tvary, které by na konvenčním stroji trvalo dlouho vyrobít, ale může jít i o free-form plochy, které by byly na konvenčních strojích prakticky nevyrobitelné ^[1].

Free-form plochy se dají přeložit jako tvarově složité plochy. Zatímco běžné výrobky jsou tvořené základními a lehce vyrobitelnými geometrickými tvary (rovina, válec, kužel, koule), free-form plochy se popisují velmi složitě. V některých případech by matematický popis takových ploch mohl být tak složitý a náročný, že se zkrátka nevyplatí jej dělat. Z těchto důvodů se nedělají ani výkresy, protože často nelze těleso řádně nadefinovat. V takových případech se pro jakoukoliv kontrolu používá CAD model součásti. Zároveň tyto součásti nemívají osu rotace ^[2].

V letech 2001 až 2005 byl meziroční nárůst trhu s free-form povrchy 21%. Dnes se lze s takovými výrobky potkat v optice, telekomunikaci, energetice, zemědělství, letectví, automotive či biomedicině ^[1].

2.1 Použití free-form ploch

Jelikož zbytek práce se zabývá návrhem tělesa s vlastní free-form plochou a měření drsnosti po obrábění, je vhodné uvést i praktické příklady využití tvarově složitých ploch.

2.1.1 Optika

Free-form plochy se v optice používají už od devadesátých let minulého století ^[3] a mají nespočetná využití. Takové čočky lze použít na osvětlení (ať už efektivnější klasické osvětlení či nové automobilové světlomety), pro průmyslovou výrobu (usměrňování laserových paprsků, optické kontrolní systémy), v energetice (např. fotovoltaické panely), pro dálkové průzkumy (Mohou být použity v astronomických dalekohledech pro průzkum hlubokého vesmíru nebo naopak v satelitech, které pořizují snímky povrchu planety) a v neposlední řadě se free-

form čočky používají i vojenské technice, například v kamerách bezpilotních letadel [4].

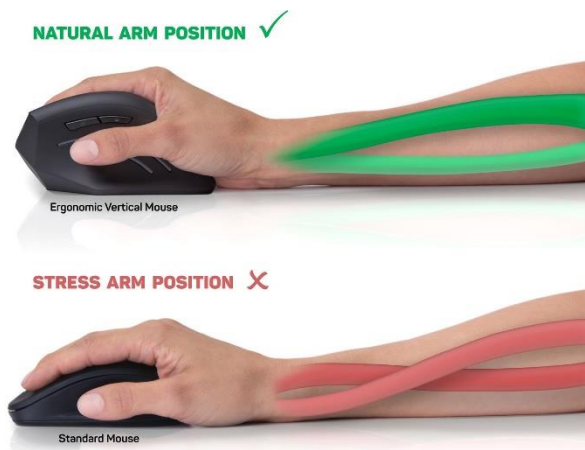
2.1.2 Ergonomie

Definice ergonomie je několik. Dle mého osobního názoru je nejsrozumitelnější tato: „*Ergonomie je interdisciplinární obor studující vztah člověka a pracovních podmínek při uplatnění nejnovějších poznatků věd biologických, technických a společenských. Jejím cílem je optimalizace postavení člověka v pracovních podmínkách, a to ve smyslu dosažení zdraví, pohody, bezpečnosti a optimální výkonnosti*“ [5].

Na základě této definice je zřejmé, že jedním z hlavních cílů ergonomie je navržení takových pracovních pomůcek, které budou pracovní činnosti usnadňovat a zároveň budou snižovat riziko dlouhodobých zdravotních následků. Jednoduchým příkladem propojení ergonomie a free-form ploch je ergonomická počítačová myš (Obr. 1). Takto vzpřímená myš má výhodu, že při uchopení myši člověku zůstává ruka v přirozené pozici (pozice předloktí je stejná jako když je ruka volně spuštěna podél těla) (Obr. 2). Díky tomu nedochází k překřížení loketní a vřetenní kosti a tím se snižuje pravděpodobnost případných zánětů zápěstí a podobných onemocnění spojených s kancelářskými činnostmi.



Obr. 1 Ergonomická myš [6]



Obr. 2 Pozice kostí předloktí při použití klasické a ergonomické myši [7]

Další případy jsou například úchyty lyžařských hůlek, rukojeti vrtaček nebo fénů a další rukojeti nářadí.

2.1.3 Lopatky turbín

Lopatky turbín můžeme vidět v malých rozměrech v domácím prostředí, jako jsou například počítačové větráky nebo osobní větráky, přes větší lopatková kola ve spalovacích a tryskových motorech až po několikametrové používané v elektrárnách [1].

2.2 Výroba free-form ploch

Při výrobě free-form ploch se nejčastěji využívá následujících pět technologií. Technologie jsou seřazeny podle požadavků na použití.

2.2.1 Aditivní technologie

Přestože se aditivní technologie stále řadí mezi nekonvenční metody výroby, 3D tisk je stále častější a častější. Pro výrobu free-form povrchů je aditivní technologie rozhodně nejjednodušší metodou. Jediné, co je za potřebí, je 3D tiskárna, CAD model a materiál. Oproti dalším technologiím má aditivní technologie výroby nejnižší požadavky.

Značnou nevýhodou při kovovém tisku je cena a doba tisku. Zároveň je zapotřebí dalších tepelných úprav, protože po tisku zůstávají ve výtisku zbytková napětí způsobená teplem potřebným k navařování materiálu. Dalším problémem je pórovitost materiálu a nejednotné mechanické vlastnosti v různých směrech.

Plastový 3D tisk bude mít výhodu nižší ceny. Drsnost povrchu lze snížit naleptáním ploch acetonem, ale mechanické vlastnosti takové součásti budou mít malé využití. Proto nalezne plastový tisk free-form ploch využití spíše jako model součásti.

2.2.2 Technologie slévání

Druhou možnou variantou výroby je slévání. Při této technologii dochází k lití roztaveného kovu do připravené formy. Po zatuhnutí kovu je z formy vyndán hotový výrobek nebo polotovár pro další operace. Řadím tuto technologii jako druhou nejméně náročnou technologii, protože pro gravitační lití do písku nám stačí model výrobku (například vytištěný z plastu na 3D tiskárně).

Při slévání do pískové formy je výsledný povrch velmi hrubý. Když na tělese bude free-form povrch, tak se bude pravděpodobně jednat o funkční plochu, u které je

zapotřebí zajistit určité vlastnosti a bylo by nutné ji dále obrobit. Při tlakovém lití by nemusela být nutnost následného obrábění, ale pro tuto metodu je potřeba vyrobit formu, která se bude pravděpodobně obrábět.

2.2.3 Obrábění free-form ploch

Free-form plochy lze vyrábět broušením, soustružením i frézováním. Pro účely této práce byli vypsány nejvhodnější metody pro frézování free-form ploch, protože experimentální těleso bylo frézováno.

2.2.3.1 Strategie kontura

„Nástroj pomocí offsetu kopíruje okraj obecné tvarové plochy. Možné je obrábět od okraje do středu a od středu do kraje“ [8].

2.2.3.2 Strategie řádkování

„Dráhy nástroje jsou pod určitým úhlem nebo rovnoběžné s některou osou. Dráhy mohou být ZIG nebo ZIG-ZAG. V případě ZIG nástroj začíná vždy z jedné strany. Je zachováno sousledné nebo nesousledné frézování. Je zde nárůst času obrábění díky přejezdům. ZIG-ZAG střídá sousledné a nesousledné frézování“ [8].

2.2.3.3 Strategie soustředné kružnice

„Nástroj se pohybuje po soustředných kružnicích. Střed kružnic se zadá. Nástroj po dokončení jedné kruhové dráhy přejde na další po povrchu součásti nebo se oddálí, přejede a znovu se přiblíží“ [8].

2.2.3.4 Strategie spirála

„Na povrchu obráběné plochy vznikne spirála. Je zachován stálý kontakt nástroje s obrobkem. Do CAM programu se zadává střed spirály a její průměr“ [8].

2.2.4 Technologie tváření

Při tváření dochází ke změně tvaru materiálu působením mechanické energie. Pokud dochází k tváření za studena (tvářený materiál má teplotu nižší, než je jeho rekrytalizační teplota), mění se i mechanické vlastnosti tvářeného materiálu. Výroby free-form plochy tvářením by šlo dosáhnout ražením nebo zápusťkovým kování. V obou případech by bylo zapotřebí nástroje, který by byl vyroben pravděpodobně obráběním.

2.2.5 Technologie vstřikování

Poslední možností výroby by bylo vstřikování. Jedná se o podobný princip jako u tlakového lití, ale místo kovu se do formy vstřikuje plast. Nejdříve by bylo zapotřebí vyrobit formu, která by se pravděpodobně obráběla.

3 Měření drsnosti povrchu

Textura povrchu se podle normy skládá ze základního profilu, profilu vlnitosti povrchu a profilu drsnosti povrchu. Zatímco textura povrchu obsahuje veškeré geometrické nepřesnosti obsažené na vymezeném profilu, drsnost povrchu obsahuje pouze nepřesnosti malého měřítka. Ostatní nepřesnosti jsou odfiltrovány pomocí definovaných filtrů [14].

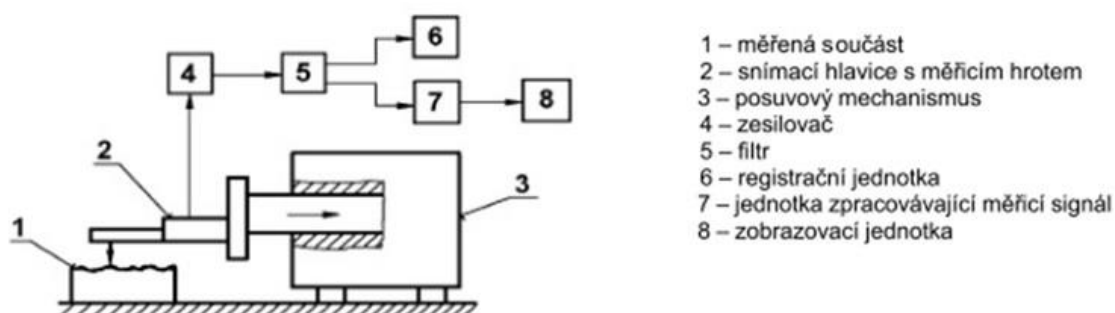
V následujících kapitolách jsou vysvětleny metody měření drsnosti a změny v technické normalizaci týkající se měření drsnosti povrchu.

3.1 Metody měření drsnosti povrchu

Pro měření drsnosti povrchu se obecně uvádí tři metody. První je Kvalitativní metoda, kdy se povrch měří pomocí lidských smyslů. Této metodě se v této práci nebudu věnovat. Další dvě metody jsou kvantitavní, které se dále dělí do vlastních podskupin.

3.1.1 Princip dotekového měření

Pro měření drsnosti povrchu dotykovým způsobem lze použít příruční drsnoměry nebo laboratorní konturografy. Princip kontaktních metod spočívá v tažení diamantového hrotu po měřeném povrchu. Hrot musí mít takový rozměr a takovou geometrii, aby se dostal do všech detailních geometrií měřeného tělesa. Měřicí jehla je připevněna na rameni se snímačem (Obr. 3).



Obr. 3 Schéma dotekové metody měření drsnosti povrchu [9]

Při pohybu sondy po měřeném povrchu dochází ke změnám výšky hrotu. Tyto změny vysílají signály, které jsou detekovány a následně zesilovány pomocí

elektroniky. Tyto zesílené signály jsou dále zaznamenány a z nich dostáváme profil měřeného povrchu.

Snímače jsou nejčastěji založeny na principu indukce, díky kterému mohou mít robustní konstrukci a zároveň nabídnou velký rozsah měření.

Nevýhodou této metody je nutnost kontaktu mezi měřidlem a měřenou plochou, což může u měkkých materiálů vést k poškrábání a následné změně drsnosti povrchu ^[10].

Jelikož dráhou pro měření povrchu dotykovou metodou je přímka, mohlo by při měření členitého free-form povrchu dojít k situaci, kdy již nebude profil měřen kolmo na dráhy nástroje a z toho důvodu může dojít ke zkreslení informací. Proto je pro některé free-form plochy tato metoda nevhodná.

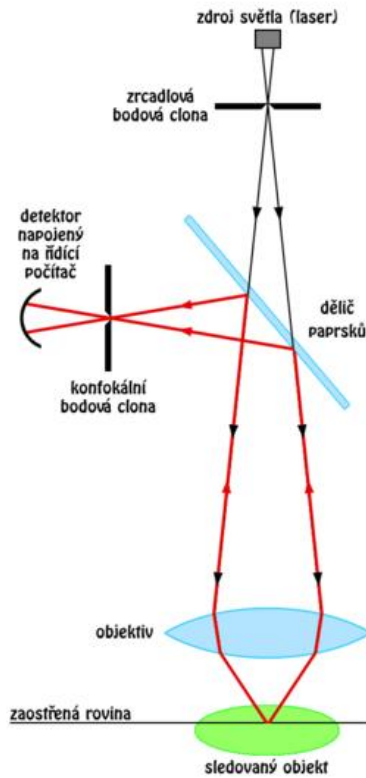
3.1.2 Princip bezkontaktního měření

Principů bezkontaktního měření drsnosti je několik. Pro tuto práci byli zvažovány dva.

3.1.2.1 *Konfokální mikroskopie*

Konfokální mikroskop pořizuje snímky povrchu s vysokým rozlišením, na základě kterých dochází k trojrozměrné rekonstrukci povrchu. Při použití klasického mikroskopu je vzorek plošně osvětlen. Konfokální mikroskop používá pouze bodové osvětlení (Obr. 4). Paprsek prochází polopropustnou clonou, dále je usměrňován objektivem a při návratu paprsek narazí na nepropustnou stranu polopropustné clony. Jednotlivé paprsky jsou filtrovány pomocí konfokální bodové clony, což vede k eliminaci informací, které jsou mimo ohnisko. Tím jsou získány kvalitnější snímky obrazu. Pro následnou trojrozměrnou rekonstrukci povrchu je zapotřebí udělat několik snímků pomocí pravidelného rastru ve směru osy Z ^[10].

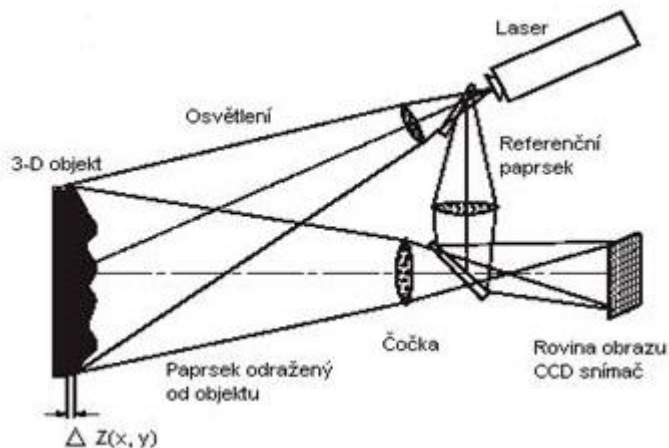
PRINCIP KONFOKÁLNÍHO MIKROSKOPU



Obr. 4 Schéma konfokálního mikroskopu ^[11]

3.1.2.2 Optická interferometrie

Při měření pomocí interferometru je měřený povrch vystaven monochromatickému nebo bílému světlu (Obr. 5). Paprsky světla se následně odrazí od měřeného povrchu a dojde k malému posunutí. Když signály dopadají na snímač, vytváří interferenční obrazce, které jsou dále analyzovány počítačovým programem, který zrekonstruuje měřenou plochu ^[10].



Obr. 5 Schéma měření pomocí interferometru ^[12]

3.2 Technická normalizace v oblasti měření drsnosti povrchu

3.2.1 ČSN EN ISO 21920-1 ^[13]

V červenci roku 2022 byla do soustavy ČSN převzata nová norma s názvem Geometrické specifikace produktu (GPS) - Struktura povrchu: Profil – Část 1: Indikace struktury povrchu (označení ČSN EN ISO 21920-1) a červnu roku 2023 vyšel její překlad. Tato norma nahrazuje dříve platnou normu Geometrické požadavky na výrobky (GPS) – Označování struktury povrchu v technické dokumentaci výrobků (ČSN EN ISO 1302).

Prvním rozdílem je nová úplná grafická značka (Obr. 6). Nová značka má doplněnou úsečku. Důvod této změny mi není znám a v normě není vysvětlen.



Obr. 6 Nové grafické značky ^[13]

Dalším rozdílem je nové toleranční přejímací pravidlo medián. Stará norma znala přejímací pravidla pouze dvě. První bylo přejímací pravidlo maxima, kterým se určila maximální možná naměřená hodnota. Pokud některá naměřená hodnota překročila mez stanovenou pravidlem T_{max} , výrobek je zmetkem. Druhé toleranční pravidlo je pravidlo 16 %. V případě, že by byla stanovena horní i dolní toleranční mez, smí 16 % naměřených hodnot překročit horní mez a 16 % smí překročit spodní mez. Nové pravidlo T_{med} udává, že mediánová hodnota všech naměřených hodnot parametru musí splňovat toleranční meze.

Zároveň nově není pravidlo T 16 % bráno jako výchozí.

Další důležitou změnou v normě je jasné nadefinováno, jaké parametry lze předepsat. Ve staré normě byly dány příklady požadavků, které lze předepsat, a jejich zakreslení do výkresu. V nové normě je přesně nadefinováno, jaké parametry lze předepsat a jaké bude jejich umístění v indikaci textury povrchu (Obr. 7).

$$\sqrt{[u] \left(\frac{[s][t]}{[a]\langle b \rangle\langle c \rangle[d] / [e][f] - [g][h]([i]x[k])[n][p] / [q][r]} \right)}$$

Obr. 7 Indikace parametru drsnosti povrchu ^[13]

V následující tabulce (Tab. 1) jsou uvedeny vysvětlivky jednotlivých značek z Obr. 7. Jedná se pouze o indikaci parametru drsnosti povrchu, vlnitost, která se značí W, a primární profil P používají trochu jiné doplňkové parametry.

Tab. 1 Přehled možných parametrů pro indikaci parametru drsnosti povrchu

Parametr	Vysvětlivka
a	Typ tolerance
b	Značka pro R-parametr
c	Hodnota toleranční meze parametru povrchové textury profilu
d	Toleranční přejímací pravidlo
e	Typ profilového S-filtru
f	Index vložení profilového S-filtru
g	Typ profilového L-filtru
h	Index vložení profilového L-filtru
i	Úseková délka
k	Počet úseků
n	Metoda přiřazení a element přiřazení profilového F-operátoru
p	Index vložení profilového F-operátoru
q	Metoda extrakce profilu
r	Vyhrazené pole pro značku OR(n) indikující další požadavky
s	Výrobní proces
t	Povrchové nerovnosti a jejich směr
u	Směr profilu vůči povrchové nerovnosti
<>	Vyhrazené pole, které se musí specifikovat
[]	Vyhrazené pole, které se specifikuje, je-li odlišnost od výchozí hodnoty nebo je další požadavek
m	Namísto parametrů i a k může být pouze parametr m, který značí <u>hodnocenou</u> délku

Další změny se lze dočíst v normě v příloze G.

3.2.2 ČSN EN ISO 21920-2 ^[14]

Norma ČSN EN ISO 21920-2 Geometrické specifikace produktu (GPS) – Struktura povrchu: Profil – Část 2: Termíny, definice a parametry struktury povrchu vyšla v soustavě ČSN v červenci roku 2022 a byla přeložena v červnu 2023 stejně jako první díl. Tato norma nahrazuje normy ČSN EN ISO 12085 (Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Struktura povrchu: Profilová metoda - Parametry metody motif), ČSN EN ISO 4287 (Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Struktura povrchu: Profilová metoda - Termíny, definice a parametry struktury povrchu), ČSN EN ISO 13565-2 (Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Struktura povrchu: Profilová metoda; povrchy mající

stratifikované funkční vlastnosti - Část 2: Výškové charakteristiky využívající křivku lineárního materiálového poměru) a ČSN EN ISO 13565-3 (Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Struktura povrchu: Profilová metoda; Povrchy mající stratifikované funkční vlastnosti - Část 3: Výškové charakteristiky využívající pravděpodobnostní křivku materiálu)

Oproti normě ČSN EN ISO 4287 jsou v normě ČSN EN ISO 21920-2 nadefinované nové termíny. Některé z těchto termínů jsou harmonizovány s normou ČSN EN ISO 25178-2 Geometrické specifikace produktu (GPS) - Textura povrchu: Plocha – Část 2: Termíny, definice a parametry textury povrchu.

Změnou ve vztahu k normě ČSN EN ISO 13565-2 bylo nadefinování dvou nových parametrů: plocha vrchů a plocha údolí.

3.2.3 ČSN EN ISO 21920-3 ^[15]

Norma s názvem Geometrické specifikace produktu (GPS) – Textura povrchu: Profil – Část 3: Operátory specifikací byla vydána stejným způsobem jako dvě předchozí. Tato norma nahrazuje normu ČSN EN ISO 4288 Geometrické požadavky na výrobky (GPS) – Struktura povrchu: Profilová metoda – Pravidla a postupy pro posuzování struktury povrchu.

Změny v normě ČSN EN ISO 21920-3 ve vztahu k ČSN EN ISO 4288 jsou uvedeny v příloze normy C.

První změnou je rozlišování periodického a neperiodického profilu. Nová norma nerozlišuje typy profilu a udává jeden jedinečný postup pro všechny typy profilů. Stará norma, která sice periodicitu profilů rozeznávala, neměla žádná kritéria pro tyto rozlišení. To vedlo k zcela subjektivnímu rozhodnutí operátora, o jaký typ profilu se jedná. Zároveň bylo různé nastavení pro periodické a neperiodické profily i přesto, že mohly mít stejné výškové parametry. Z toho vyplývá zásadní problém. Jelikož volba postupu byla na operátorovi měření, mohl při měření jedné výrobní dávky použít různá nastavení měřícího přístroje.

Druhou změnou je, že základem pro výchozí nastavení je efektivní výška zkoušené součásti. Z toho plyne, že výchozí nastavení je nezávislé na charakteristice a výšce profilu. Dříve byl stanoven složitý postup pro získání příslušných hodnot parametrů pro tabulky výchozího nastavení, který byl časově

náročný a jak nastavení, tak i výsledky závisely na subjektivních rozhodnutí operátora.

Poslední výraznou změnou je jednoznačnost ohledně vad povrchu. Nyní jsou povrchové nedokonalosti a vady součástí specifikovaného povrchu. Tato nejednoznačnost u normy ČSN EN ISO 4288 vedla ke konfliktu pravidel, kdy měření mělo být provedeno v místech, kde byly očekávané kritické hodnoty, ale zároveň se povrchové vady při kontrole textury povrchu nebraly v úvahu.

4 Příprava experimentu

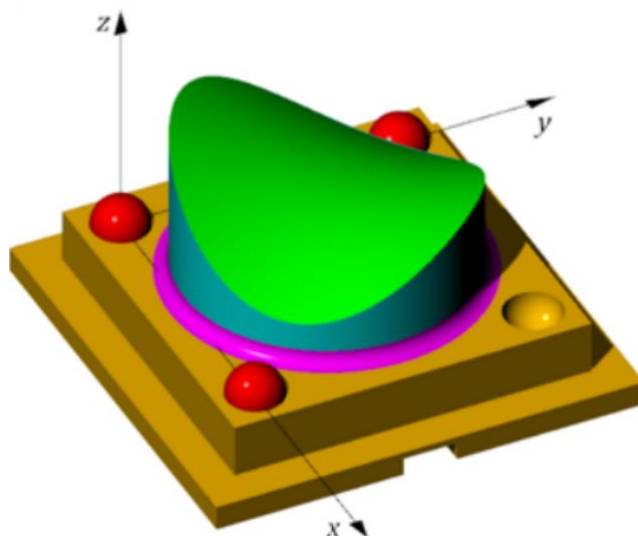
V následující kapitole je popsán výběr tvaru tělesa, stroje a nástroje použity k výrobě vybraného tělesa a volba strategií a řezných podmínek pro výrobu měřeného artefaktu. Celková doba obrábění při níže popsaných podmínkách je přibližně hodina (odhadovaná doba obrábění CAM softwaru není totožná se skutečnou dobou obrábění).

4.1 Návrh tvaru experimentálního tělesa

Pro tento experiment byly zvažovány tři tvary ploch. Výsledné těleso bylo navrženo tak, aby bylo možné porovnat rozdíly měřících metod na konvexních, konkávních i rovinných plochách, ale aby zároveň splňovalo podmínky free-form plochy.

4.1.1 Hyperbolický paraboloid

Prvním zvažovaným tělesem byl hyperbolický paraboloid, který je používán jako metrologický standart Českého metrologického institutu (Obr. 8).



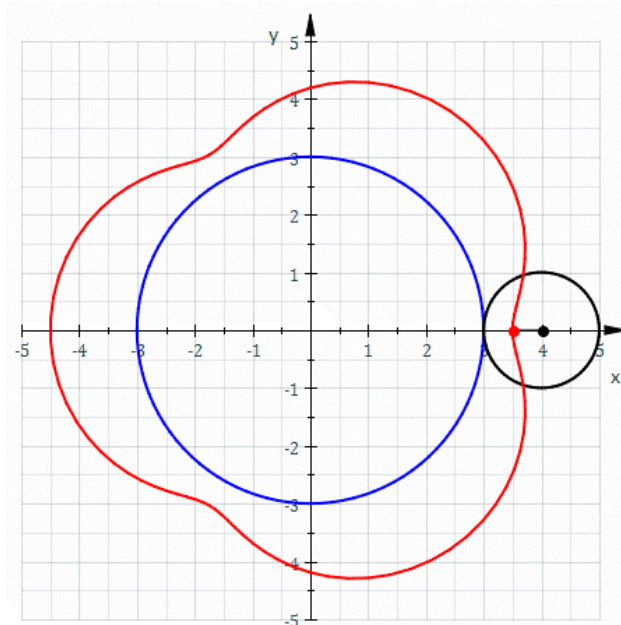
Obr. 8 Hyperbolický paraboloid ČMI [16]

Velikou výhodou využití tohoto tvaru by bylo, že tato free-form plocha je jasně nadefinovaná rovnicí. Díky tomu by navrhované experimenty byly lehce opakovatelné. Zároveň by se, pokud by nám český metrologický institut těleso zapůjčil, práce na experimentech urychlila.

Přestože těleso, o kterém se můžeme v pracích publikovaných Českým metrologickým institutem dočíst, bylo po obrábění dále upravováno, v archivech se našla plocha, která bylo pouze obrobena. Bohužel nemožnost zaručit, že by se při dotekovém měření povrch nepoškrábal vedlo k rozhodnutí navrhnout a vyrobit vlastní plochu.

4.1.2 Těleso tvořené kruhovou podstavou a epitrochoidou

Protože nebylo možné si zkušební těleso zapůjčit, přešlo se k vlastnímu návrhu. Těleso mělo mít kruhovou podstavu a vrchní plocha by byla tvořena epitrochoidou. Epitrochoida je speciální případ Epicykloidy. Je to křivka, která vzniká odvalováním kružnice po kružnici (Obr. 9), kdy je opisován bod uvnitř odvalované kružnice.



Obr. 9 Epitrochoida [17]

Křivka je daná rovnicemi [18]

$$x(\varphi) = (R + r) \cdot \cos(\varphi) - d \cdot \cos\left(\frac{R + r}{r} \cdot \varphi\right)$$

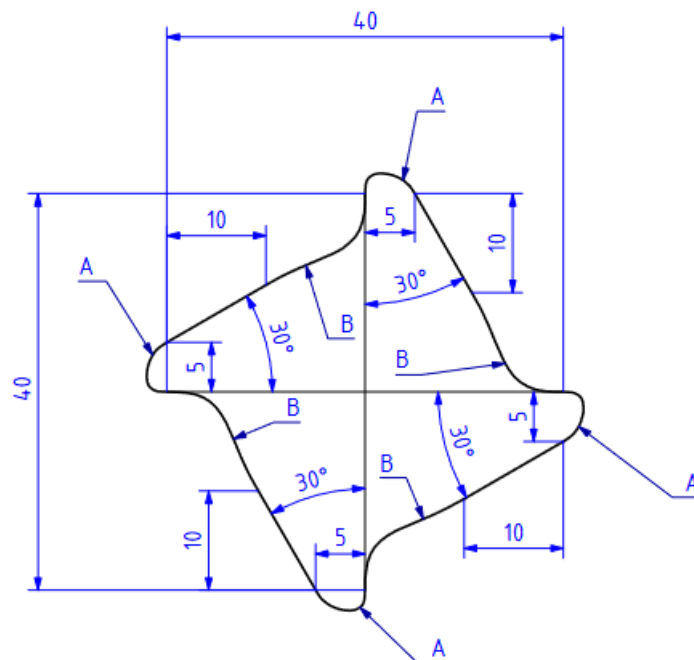
$$y(\varphi) = (R + r) \cdot \sin(\varphi) - d \cdot \sin\left(\frac{R + r}{r} \cdot \varphi\right)$$

Kde R je poloměr kružnice trajektorie, poloměr odvalované kružnice značí r , d je vzdálenost opisovaného bodu od středu odvalované kružnice a φ je úhel. Jelikož

jeden z cílů našeho experimentu bylo vytvořit plochu, kterou lze rozdělit na čtyři stejné části, bylo zapotřebí, aby se prvek $\left(\frac{R+r}{r}\right) = 5$. Bohužel se zjistilo, že při tomto nastavení epitrochoidy a při navrhovaných rozměrech tělesa je konkávní část příliš mělká. To by vedlo k problémům při obrábění a zároveň k nejistotě, zdali by byly správně reprezentovány konkávní části free-form povrchů. Z toho důvodu bylo rozhodnuto tento tvar nevyužít.

4.1.3 Těleso tvořené kruhovou podstavou a vlastní křivkou

Jelikož se nepodařilo najít jinou vhodnou matematickou křivku, která by splňovala určené požadavky, byla vymodelovaná vlastní křivka (Obr. 10).

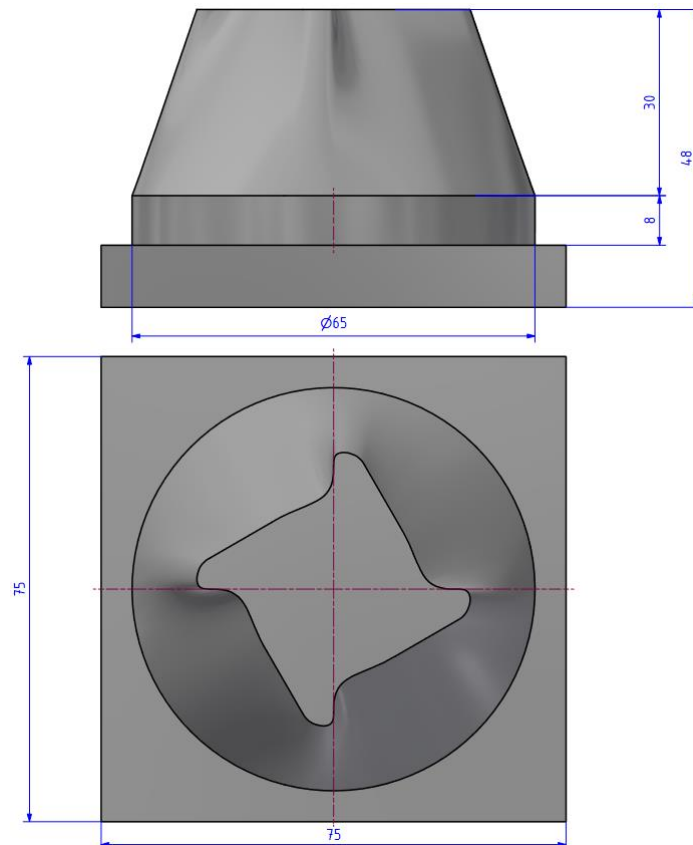


Obr. 10 Křivka vrchní plochy tělesa

Křivka začíná křížem 40x40 mm. Na vrcholech kříže se udělá úsečka o délce 5 mm, která je kolmá k větvi kříže. Na ni navazuje přímka, která má úhel 30° (délka odvěsny pomyslného trojúhelníku má 10 mm). Když byla tato kostra připravena, použil se nástroj programu Autodesk Inventor 2023 křivka přemostění. Tím vznikly křivky A a B na Obr. 10. Tento nástroj využívá interpolaci a zajištění spojitosti.

Těleso bylo obrobena do bloku 75x75 mm. Z této podstavky vyčnívá válec o průměru 65 mm a výšce 8 mm. Toto odsazení bylo vytvořeno, aby byla zajištěna obrobiteľnosť celého free-form povrchu. Bez tohoto odsazení by při

obrábění spodní části plochy došlo k obrábění podstavy. Dále byl využit nástroj Inventoru šablonování. Tento nástroj vytvoří přechod mezi vrchní plochou válce a navržené křivky. Výsledné rozměry tělesa jsou zobrazeny na Obr. 11.



Obr. 11 Rozměry tělesa

4.2 Strategie obrábění tělesa

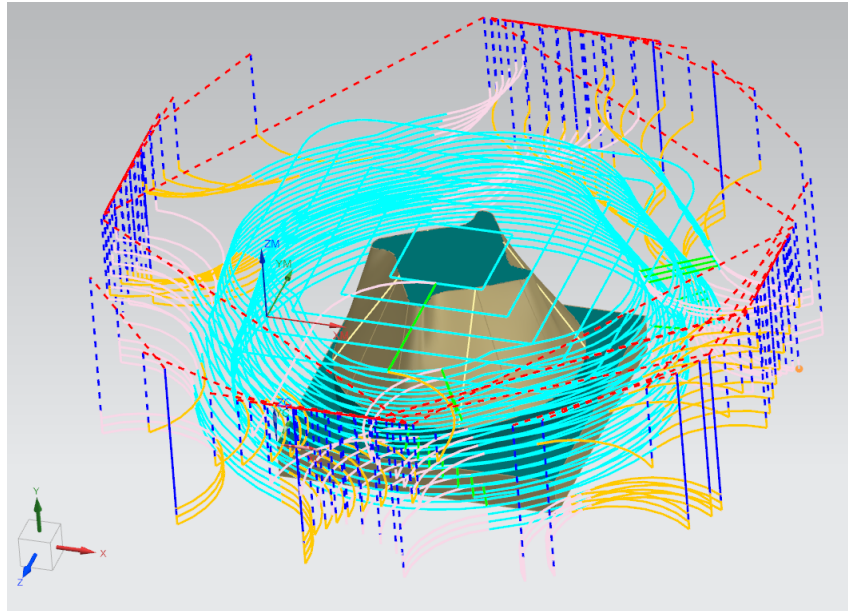
Pro návrh strategií obrábění byl využit program Siemens NX. Free-form plocha byla rozdělena do čtyř oblastí, které byly mezi sebou oddělené drážkou. Každá oblast obsahovala konvexní, konkávní a rovinnou část. Každá část byla vytvořena za jiných podmínek. Pro obrábění byl použit stroj Kovosvit MAS VMC 500 s řídicím systémem Acramatic A2100.

4.2.1 Hrubování a obrábění rovinných ploch

Jelikož hrubování a rovinné plochy byly obráběny stejným nástrojem, došlo ke spojení kapitol kvůli přehlednosti. Použitý nástroj měl průměr 50 mm s pěti vyměnitelnými destičkami. Detaily všech použitých nástrojů jsou k nalezení v kapitole 1.2.4.

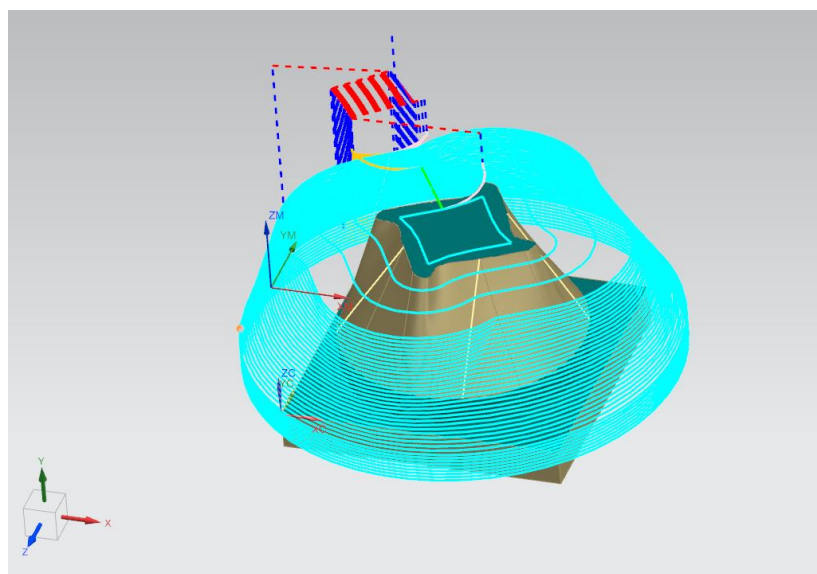
4.2.1.1 Původní návrh

Polotovarem pro výrobu je kvádr o velikosti 75x75x50 mm z hliníku 7075. Zbytkový materiál měl tloušťku 1 mm. Pro generování drah byla použita strategie cavity mill, kde nástroj kopíroval vybrané plochy tělesa. Tím vznikly dráhy na Obr. 12. Posun ve směru osy Z byl o 2,5 mm,



Obr. 12 Původní strategie hrubování

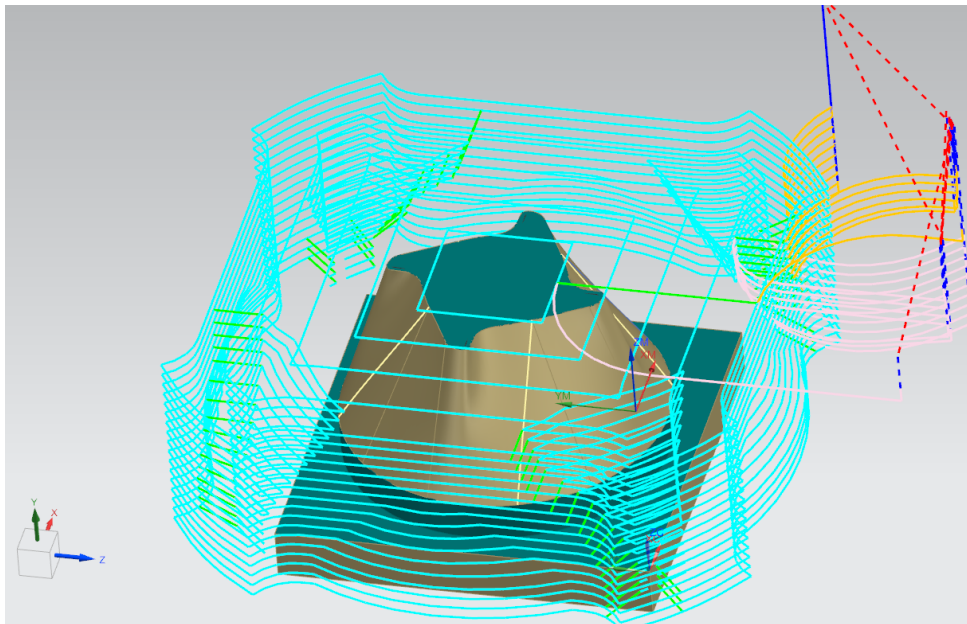
Pro obrobení rovinných ploch se využilo stejných strategií. Jelikož se původně nepodařilo označit správné plochy, došlo k obrábění i přebytečného materiálu kolem free-form ploch (Obr. 13).



Obr. 13 Dokončování rovinných ploch

4.2.1.2 Optimalizace a nastavení řezných podmínek

V dalším kroku došlo k optimalizaci strategie a nastavení řezných podmínek. Když se změnilo nastavení způsobu generování drah na cavity mill (místo kopírování součásti došlo ke kopírování vybraných ploch po periferii), hrubovací dráhy se změnil tak, jak je vyobrazeno na Obr. 14. Výsledek hrubování lze vidět na Obr. 15.

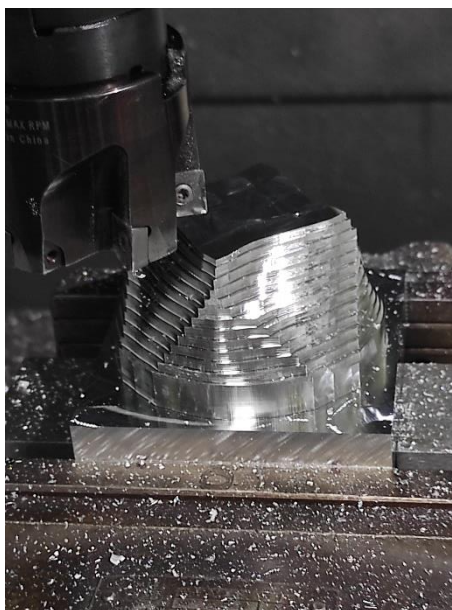


Obr. 14 Optimalizace hrubování

Pro hrubování byly nastaveny následující řezné podmínky:

Tab. 2 Řezné podmínky pro hrubování

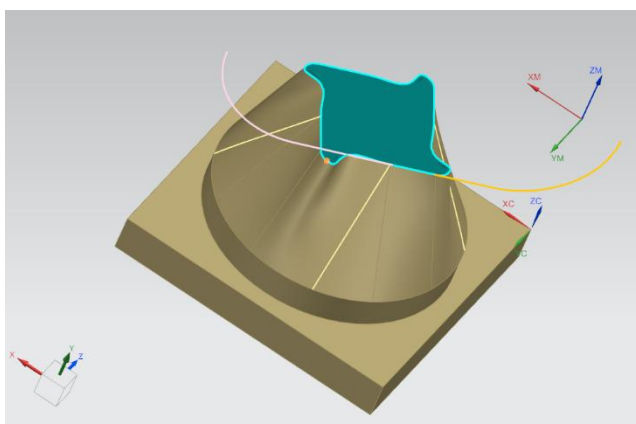
Řezné podmínky pro hrubování	
Stepover	20% nástroje
Hloubka řezu	2,5 mm
Styl frézování	Sousledné
Zbytkový materiál	1 mm
Průměr nástroje	50 mm
Řezná rychlost	300 m/min
Otáčky	1910 ot/min
Posuv na zub	0,18 mm/zub
Počet zubů	5
Rychlost posuvu	1719 mm/min



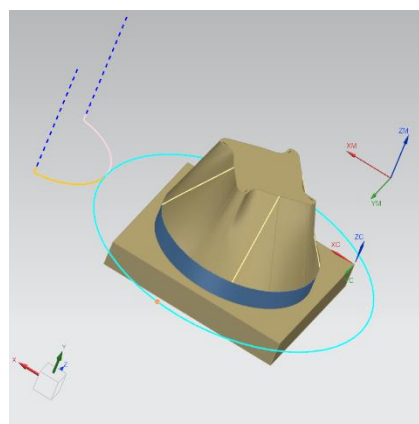
Obr. 15 Fotografie po hrubování

Pro polo dokončovací operaci rovinných ploch byly použity podobné řezné podmínky jako v tabulce jedna. Změna se týkala zbytkového materiálu (0,25 mm) a hloubky řezu (1 mm). Dráhy nástroje jsou stejné jako na Obr. 13.

Dokončovací operace rovinných ploch byly upraveny tak, aby vrchní plocha tělesa byla obráběná strategií area mill (Obr. 16) a pro plochu podstavce byla použita strategie solid profile (Obr. 17).



Obr. 16 Dokončení vrchní plochy

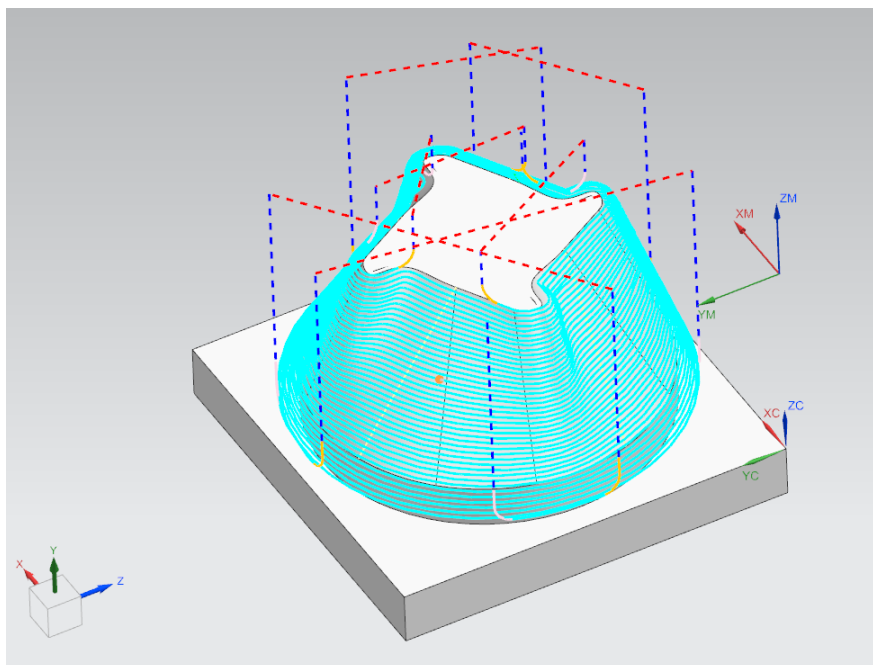


Obr. 17 Dokončení plochy podstavce

4.2.2 Polo dokončování free-form ploch

Pro polo dokončovací operaci free-form ploch byla zvolena strategie area mill pevným posuvem ve směru osy Z (Obr. 18). Jedná se tedy o metodu řádkování, což je nejvhodnější metoda při obrábění na tříosé frézce. Pro frézování byla použita kulová fréza o průměru 6 mm, dráhy byly navrženy v metodě Zig Zag

(nástroj obrobí jednu hladinu a do další se dostane při stálém záběru nástroje). Tím se zmenší počet zbytečných přejezdů a sníží se tak i doba obrábění. Přídavek na dokončení je 0,25 mm a krok v ose Z je 1 mm.



Obr. 18 Strategie polo dokončení free-form ploch

Maximální řezné podmínky pro polo dokončovací operaci byly stanoveny následujícím způsobem:

Tab. 3 Optimální řezné podmínky pro polo dokončování

Maximální řezné podmínky pro polo dokončování	
Hloubka řezu	0,5 mm
Styl frézování	Sousledné
Zbytkový materiál	0,25 mm
Průměr nástroje	6 mm
Řezná rychlost	250 m/min
Otáčky	13263 ot/min
Posuv na zub	0,059 mm/zub
Počet zubů	4
Rychlost posuvu	3130 mm/min

Naneštěstí nešlo v této situaci použít optimální řezné podmínky, jelikož je nedovolovaly možnosti stroje. Proto bylo zapotřebí všechny řezné podmínky snížit, aby odpovídaly maximálním otáčkám 7500 ot/min (Tab. 4).

Tab. 4 Řezné podmínky pro polo dokončování

Řezné podmínky pro polo dokončování	
Hloubka řezu	1 mm
Styl frézování	Sousledné
Zbytkový materiál	0,25 mm
Průměr nástroje	6 mm
Řezná rychlost	141 m/min
Otáčky	7480 ot/min
Posuv na zub	0,059 mm/zub
Počet zubů	4
Rychlost posuvu	1765 mm/min

4.2.3 Dokončování free-form ploch

Pro porovnání jednotlivých způsobů měření drsnosti bylo rozhodnuto obrobit na povrchu čtyři stejné plochy, kde každá byla vyrobena za jiných podmínek. Pro tři plochy byly použity různé hodnoty kroku ve směru osy Z a pro čtvrtou plochu, byl použit stejný krok jako pro plochu, která byla označena za základní. Rozdíl u čtvrté plochy je ten, že při obrábění byl zvolen jiný průměr nástroje.

4.2.3.1 Základní plocha

Při návrhu obrábění první plochy bylo zapotřebí nastavit obráběcí podmínky tak, aby bylo dosaženo drsnosti povrchu, která odpovídá reálným požadavkům. Pokud by námi navržené povrchy měl hodnoty parametru drsnosti větší než Ra 20 μm, tak by výsledek práce nebyl implementovatelný do praxe. U free-form ploch se většinou vyžaduje drsnost povrchu co nejnižší. Jelikož při přípravě obrábění nešla nastavit hodnota scallop, která ovlivňuje především parametr drsnosti Rz, tak bylo zapotřebí tuto hodnotu odhadnout výpočtem. Bohužel pro free-form plochy neexistuje žádný výpočtový vzorec pro tyto parametry. Proto byl udělán odhadový výpočet výšky scallopu, který se počítá podle vzdálenosti jednotlivých drah, dle následující rovnice ^[19]:

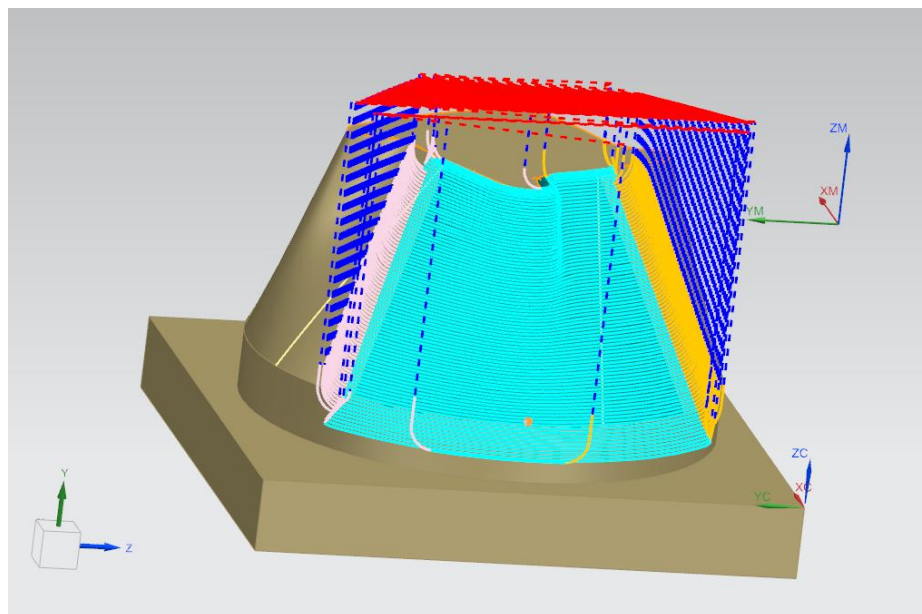
$$scallop = R - \sqrt{R^2 - (SO)^2}$$

Kde R je poloměr nástroje a SO je stepover. Podle této rovnice byla navrhována taková strategie obrábění, při které by se přibližná výška scallopu (a tudíž i hodnota Rz) měla rovnat 10 μm. Abychom se rovnali těmto vypočítaným parametrům, tak krok v hladině osy Z musí být 0,5 mm. Kvůli tomuto výpočtu je tato plocha po zbytek práce označována za základní. U ostatních ploch je

hodnota parametru drsnosti Rz ověřena pouze experimentálně a dále porovnávána pouze mezi jednotlivými metodami.

Pro všechny čtyři plochy byla použita strategie area mill. Dráhy byly navrženy v metodě Zig. To znamená, že nástroj obrobí vždy jednu úroveň, pak vyjede ze záběru, vrátí se do původní polohy, kde se posune o žádaný krok (0,5 mm v hladině Z), a obrobí další vrstvu. Tato metoda je pomalejší než Zig Zag, ale obrobený povrch je jednodušší.

Na základě všech těchto omezení jsou vygenerovány dráhy, které lze vidět na Obr. 19.



Obr. 19 Strategie dokončování pro základní plochu

S vědomím omezení obráběcího stroje byly nastaveny řezné podmínky následujícím způsobem:

Tab. 5 Řezné podmínky pro dokončování základní plochy

Řezné podmínky pro dokončování základní plochy	
Hloubka řezu	0,5 mm
Styl frézování	Sousledné
Zbytkový materiál	0 mm
Průměr nástroje	6 mm
Řezná rychlost	141 m/min
Otáčky	7480 ot/min
Posuv na zub	0,049 mm/zub
Počet zubů	4
Rychlost posuvu	1466 mm/min
Odhadované Rz	10 μm

4.2.3.2 Plocha s menším scallopem

Jak bylo uvedeno na začátku kapitoly 1.2.3, další plocha se od té základní příliš neliší, pouze ve velikosti kroku v ose Z. Zde krok není 0,5 mm, ale 0,3 mm. Odhadované Rz se rovná 4 μm. Vygenerované dráhy nástroje jsou podobné jako na Obr. 19, rozdíl je ve vyšší hustotě jednotlivých drah. Stejně tak byly nastaveny stejné řezné podmínky jako v Tab. 5.

4.2.3.3 Plocha s větším scallopem

Tato plocha byla vyrobena obdobně jako plocha s menším scallopem, jen krok v ose Z je roven 0,7 mm. Odhadované Rz se rovná 20 μm.

4.2.3.4 Plocha obráběná nástrojem o průměru 5 mm

I pro tuto plochu se použila stejná strategie jako pro výrobu základní plochy. Je zde aplikována stejná hodnota kroku v hladině osy Z i metoda Zig. Řezné podmínky se však liší, nejen kvůli změně průměru, ale protože použitý nástroj je i od jiného výrobce. Nastavené řezné hodnoty jsou v Tab. 6.

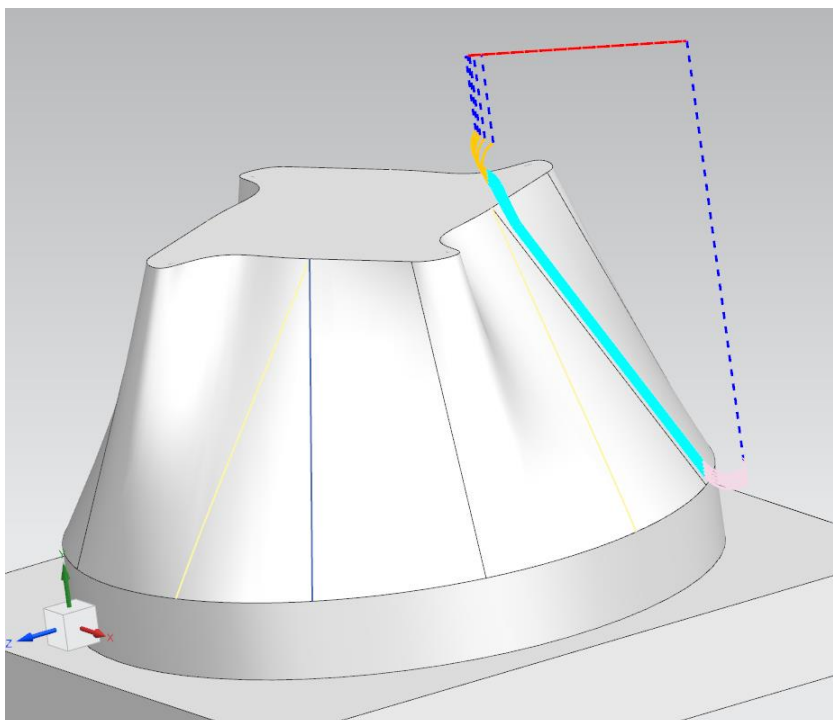
Tab. 6 Řezné podmínky pro dokončování plochy obráběné nástrojem 5 mm

Řezné podmínky pro dokončování plochy obráběné nástrojem 5 mm	
Hloubka řezu	0,5 mm
Styl frézování	Sousledné
Zbytkový materiál	0 mm
Průměr nástroje	5 mm
Řezná rychlost	117 m/min
Otáčky	7448 ot/min
Posuv na zub	0,018 mm/zub
Počet zubů	2
Rychlost posuvu	268 mm/min
Odhadované Rz	12,5 μm

4.2.3.5 Drážky

Na free-form povrchu tělesa byly vytvořeny čtyři drážky. Ty se nachází na rozmezí, kdy křivka tvořící rovinnou plochu se potkává s křivkou tvořící konkávní část. Tato drážka má dvě funkce. První je zřejmá vizuální indikace, aby bylo vidět, kde se dělí jednotlivé povrchy (např. základní povrch a povrch s větším scallopem). Druhá funkce je praktická pro měření povrchu. Aby byl povrch správně obroben na celé ploše, musí nástroj přejet hranici dané plochy. Pokud by tam tato drážka nebyla, docházelo by na hranicích ploch interferenci.

Pro výrobu drážky byla použita strategie curve drive, která kopíruje zadanou křivku. Vygenerované dráhy lze vidět na Obr. 20.



Obr. 20 Strategie obrábění pro výrobu drážky

Pro výrobu drážky byla použita fréza o průměru 6 mm s následujícími řeznými podmínkami:

Tab. 7 Řezné podmínky pro výrobu drážek

Řezné podmínky pro dokončování základní plochy	
Hloubka řezu	0,2 mm
Styl frézování	Sousledné
Zbytkový materiál	0 mm
Průměr nástroje	6 mm
Řezná rychlost	141 m/min
Otáčky	7480 ot/min
Posuv na zub	0,029 mm/zub
Počet zubů	4
Rychlost posuvu	868 mm/min

4.2.4 Použité nástroje

Pro výrobu tělesa byly použity tři nástroje: Jedna frézovací hlava s vyměnitelnými břitovými destičkami o průměru 50 mm, kulová fréza o průměru 6 mm a kulová fréza o průměru 5 mm. Pro výrobu free-form ploch nebylo možné použít větších kulových nástrojů než 6 mm, protože by nedošlo k obrobení části konkávní plochy. Nástroje byli vybrány z dostupné sady ve škole.

4.2.4.1 Frézovací hlava 50A05RS90SP10DG

Pro hrubování tělesa a obrábění rovinných ploch byla použita frézovací hlava od firmy KENNAMETAL s katalogovým číslem 50A05RS90SP10DG. Průměr této hlavy je 50 mm, má 5 vyměnitelných břitových destiček a maximální otáčky pro použití frézovací hlavy jsou 26300 ot/min. Do této hlavy bylo upnuto pět vyměnitelných břitových destiček od stejné firmy, s označením SPCT-LE [20].

4.2.4.1.1 Vyměnitelné břitové destičky SPCT-LE

Do frézovací hlavy bylo umístěno pět vyměnitelných břitových destiček typu SPCT-LE třídy KC410M. Jsou to čtvercové destičky o velikosti 10 mm určené k obrábění hliníku. Z hodnot uvedených v katalogu firmy KENNAMETAL byl určen posuv na zub 0,18 mm/zub a řeznou rychlost 300 m/min [20].

4.2.4.2 Kulová fréza F4AL0600ADL30

Fréza o průměru 6 mm od firmy KENNAMETAL s katalogovým označením F4AL0600ADL30 třídy KC633M. Tato fréza není ideální pro obrábění hliníku, avšak nebyl k dispozici vhodnější nástroj. Nebyla možnost použít větší nástroj, jelikož by nedokázal správně obrobit celou plochu. Původní řezné podmínky byly stanoveny na základě porovnávání dovolených řezných podmínek tohoto a podobného nástroje. Omezení stroje však nedovolilo se k těmto podmínkám přiblížit. Řezné podmínky nakonec byly nastaveny podle stroje, nikoli podle katalogu [20].

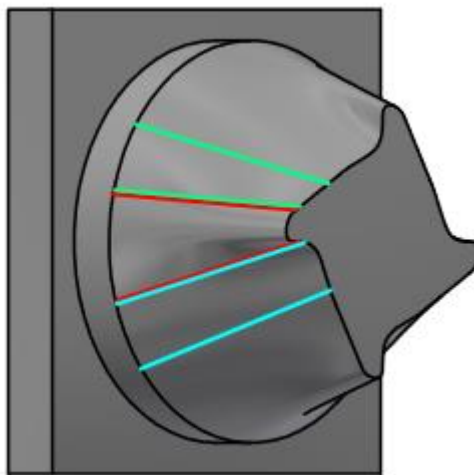
4.2.4.3 Kulová fréza S5015.0

Fréza o průměru 5 mm od firmy DORMER PRAMET s označením S5015.0. Tato fréza je určena k obrábění hliníku s doporučeným posuvem 0,018 mm/zub. Řezná rychlost byla opět upravena podle možnosti stroje [21].

5 Měření drsnosti experimentálního tělesa

Free-form povrchy jsou běžně měřené optickými metodami, neboť poskytují komplexní výsledky celého povrchu. Experiment byl navržen tak, aby se zjistilo, jak velké rozdíly jsou mezi dotykovou a optickou metodou při měření free-form povrchů. Cílem je zjistit, zdali a za jakých podmínek lze drsnost povrchu free-form ploch měřit dotykovou metodou.

Na Obr. 21 jsou barvou vyznačeny tři oblasti (jedná se o přibližné ohraničení pro upřesnění výkladu). Každá oblast se měřila zvlášť. Modrou barvou je ohraničena konkávní část plochy, červená pak vyznačuje konvexní plochu a zelený ohraničení vymezuje rovinnou plochu.



Obr. 21 Oblasti měření

5.1 Měření Konturografem

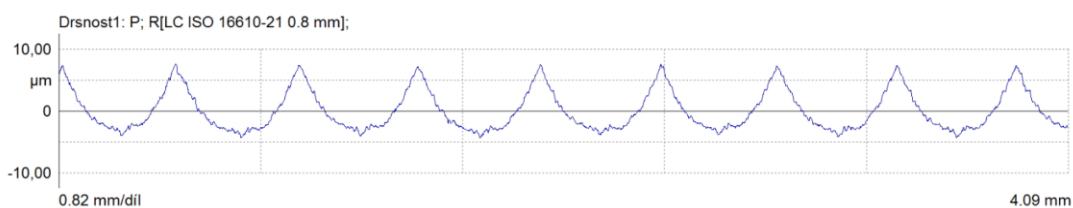
Pro měření dotykovou metodou byl použit konturograf Mahr MarSurf LD 120. Při měření je zapotřebí napolohovat těleso tak, aby byl snímací senzor ideálně kolmo na povrch. Bohužel nebylo možné použít polohovadlo, které by mělo dvě osy rotace. Z toho důvodu byly k polohování použity dva svěráky (Obr. 22). Dokud je však zajištěno měření kolmo na dráhy obrábění, tak se mírné naklopení ztrácí v tvarových odchylkách a do drsnosti se propisuje minimálně.



Obr. 22 Polohování výrobku na konturografu pomocí dvou svěráků

5.1.1 Způsob sběru dat

Po napolohování tělesa je zapotřebí vybrat způsob sběru dat. Pro konturograf bylo zvoleno, že na každé oblasti každé plochy budou naměřeny čtyři profily a z nich budou vyhodnoceny parametry drsnosti. Po naměření profilu dostaneme křivku (Obr. 23), ze které se pak odečítají jednotlivé parametry.



Obr. 23 Křivka profilu drsnosti pro oblast rovinné plochy obráběné nástrojem o průměru 5 mm

Jelikož byly naměřeny čtyři profily na každé oblasti, které jsou tři, a na každé ploše, které jsou čtyři, tak celkový počet měření je 48. Jednotlivé protokoly měření lze nalézt v příloze.

5.2 Měření konfokálním mikroskopem

Pro měření optickou metodou byl použit konfokální mikroskop MarSurf CM expert. Při použití této metody není již zapotřebí tak přesné polohování, jelikož software, který data následně zpracovává dokáže povrch částečně narovnat. Dochází však k drobnému zkreslení a doba měření se tím prodlužuje. Čím blíže

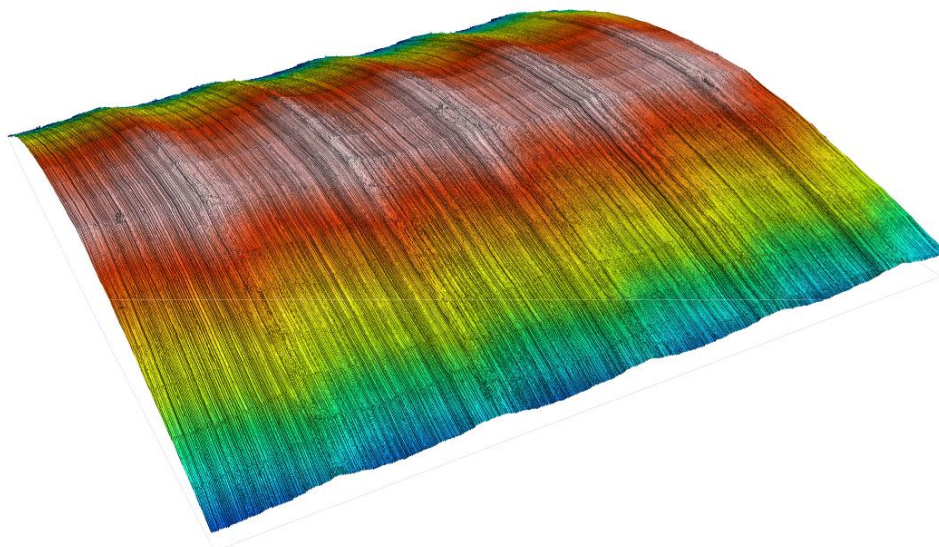
jsou u sebe nejnižší a nejvyšší místa měřené oblasti, tím se doba měření zkracuje. Pro polohování byly použity již osvědčené dva svěráky (Obr. 24).



Obr. 24 Polohování na konfokálním mikroskopu pomocí dvou svěráků

5.2.1 Způsob sběru dat

Po napolohování tělesa mikroskop nasnímá několik fotografií povrchu v předem daných hladinách osy Z. Z jednotlivých snímků vytvoří měřící software topografii povrchu. Tato topografie se nahraje do softwaru Mountains, ve kterém dojde k dalším úpravám povrchu, jako například dopočítání chybějících míst na povrchu. Výsledný nasnímaný povrch může nakonec vypadat tak, jako na Obr. 25.



Obr. 25 Topografie konvexní oblasti základní plochy

Na dané topografii se poté nasnímá několik profilů drsnosti ve stejné vzdálenosti od sebe. Výsledný počet profilů na jedné topografii je 107. Každá oblast každé plochy byla měřena dvakrát. Protokoly měření lze nalézt v příloze.

5.3 Naměřené hodnoty

V této kapitole jsou vypsány naměřené hodnoty jednotlivých ploch v daných oblastech měření. Základním měřeným parametrem drsnosti bylo R_z , podle kterého i byly vybírány základní délky, avšak jsou pro zajímavost vypsány i parametry drsnosti R_a .

5.3.1 Naměřené hodnoty v konvexní oblasti

V následujících podkapitolách jsou vypsány výsledky měření na jednotlivých plochách v konvexní oblasti

5.3.1.1 Naměřené hodnoty v konvexní oblasti základní plochy

V následující tabulce jsou vypsány a zprůměrovány hodnoty naměřené konturografem:

Tab. 8 Výsledky konvexní oblasti základní plochy měřené konturografem

Měření	Měřené parametry	
	Rz [μm]	Ra [μm]
První	10,044	2,426
Druhé	10,405	2,457
Třetí	10,322	2,433
Čtvrté	10,184	2,403
Průměr	10,239	2,430

V následující tabulce jsou vypsány průměrné hodnoty, nejnižší a nejvyšší hodnoty naměřené konfokálním mikroskopem:

Tab. 9 Výsledky konvexní oblasti základní plochy měřené konfokálním mikroskopem

Měření	Měřené parametry	
	Rz [μm]	Ra [μm]
Průměr	10,625	2,401
Nejnižší naměřená hodnota	9,767	2,219
Nejvyšší naměřená hodnota	13,440	2,551

5.3.1.2 Naměřené hodnoty v konvexní oblasti plochy s menším scallopem

V následující tabulce jsou vypsány a zprůměrovány hodnoty naměřené konturografem:

Tab. 10 Výsledky konvexní oblasti plochy s menším scallopem měřené konturografem

Měření	Měřené parametry	
	Rz [μm]	Ra [μm]
První	6,090	1,206
Druhé	5,337	1,171
Třetí	5,479	1,206
Čtvrté	6,106	1,189
Průměr	5,753	1,193

V následující tabulce jsou vypsány průměrné hodnoty, nejnižší a nejvyšší hodnoty naměřené konfokálním mikroskopem:

Tab. 11 Výsledky konvexní oblasti plochy s menším scallopem měřené konfokálním mikroskopem

Měření	Měřené parametry	
	Rz [μm]	Ra [μm]
Průměr	5,757	1,094
Nejnižší naměřená hodnota	5,174	0,897
Nejvyšší naměřená hodnota	7,123	1,265

5.3.1.3 Naměřené hodnoty v konvexní oblasti plochy s větším scallopem

V následující tabulce jsou vypsány a zprůměrovány hodnoty naměřené konturografem:

Tab. 12 Výsledky konvexní oblasti plochy s větším scallopem měřené konturografem

Měření	Měřené parametry	
	Rz [μm]	Ra [μm]
První	14,737	3,260
Druhé	15,002	3,313
Třetí	14,904	3,379
Čtvrté	14,570	3,184
Průměr	14,803	3,284

V následující tabulce jsou vypsány průměrné hodnoty, nejnižší a nejvyšší hodnoty naměřené konfokálním mikroskopem:

Tab. 13 Výsledky konvexní oblasti plochy s větším scallopem měřené konfokálním mikroskopem

Měření	Měřené parametry	
	Rz [μm]	Ra [μm]
Průměr	14,295	3,023
Nejnižší naměřená hodnota	13,610	2,941
Nejvyšší naměřená hodnota	15,320	3,098

5.3.1.4 Naměřené hodnoty v konvexní oblasti plochy obráběné nástrojem o průměru 5 mm

V následující tabulce jsou vypsány a zprůměrovány hodnoty naměřené konturografem:

Tab. 14 Výsledky konvexní oblasti plochy obráběné nástrojem o průměru 5 mm měřené konturografem

Měření	Měřené parametry	
	Rz [μm]	Ra [μm]
První	10,271	2,384
Druhé	10,112	2,378
Třetí	10,625	2,470
Čtvrté	10,035	2,290
Průměr	10,261	2,381

V následující tabulce jsou vypsány průměrné hodnoty, nejnižší a nejvyšší hodnoty naměřené konfokálním mikroskopem:

Tab. 15 Výsledky konvexní oblasti plochy obráběné nástrojem o průměru 5 mm měřené konfokálním mikroskopem

Měření	Měřené parametry	
	Rz [μm]	Ra [μm]
Průměr	10,575	2,235
Nejnižší naměřená hodnota	9,828	2,132
Nejvyšší naměřená hodnota	11,37	2,341

5.3.2 Naměřené hodnoty v konkávní oblasti

V následujících podkapitolách jsou vypsány výsledky měřené na jednotlivých plochách v konkávní oblasti

5.3.2.1 Naměřené hodnoty v konkávní oblasti základní plochy

V následující tabulce jsou vypsány a zprůměrovány hodnoty naměřené konturografem:

Tab. 16 Výsledky konkávní oblasti základní plochy měřené konturografem

Měření	Měřené parametry	
	Rz [μm]	Ra [μm]
První	9,660	2,030
Druhé	10,679	2,425
Třetí	9,931	2,165
Čtvrté	9,795	1,923
Průměr	10,016	2,136

V následující tabulce jsou vypsány průměrné hodnoty, nejnižší a nejvyšší hodnoty naměřené konfokálním mikroskopem:

Tab. 17 Výsledky konkávní oblasti základní plochy měřené konfokálním mikroskopem

Měření	Měřené parametry	
	Rz [μm]	Ra [μm]
Průměr	11,075	1,920
Nejnižší naměřená hodnota	9,520	1,843
Nejvyšší naměřená hodnota	14,950	1,987

5.3.2.2 Naměřené hodnoty v konkávní oblasti plochy s menším scallopem

V následující tabulce jsou vypsány a zprůměrovány hodnoty naměřené konturografem:

Tab. 18 Výsledky konkávní oblasti plochy s menším scallopem měřené konturografem

Měření	Měřené parametry	
	Rz [μm]	Ra [μm]
První	5,274	1,140
Druhé	5,341	1,059
Třetí	5,565	1,139
Čtvrté	4,984	1,123
Průměr	5,291	1,115

V následující tabulce jsou vypsány průměrné hodnoty, nejnižší a nejvyšší hodnoty naměřené konfokálním mikroskopem:

Tab. 19 Výsledky konkávní oblasti plochy s menším scallopem měřené konfokálním mikroskopem

Měření	Měřené parametry	
	Rz [μm]	Ra [μm]
Průměr	7,013	1,050
Nejnižší naměřená hodnota	5,067	0,834
Nejvyšší naměřená hodnota	10,880	1,203

5.3.2.3 Naměřené hodnoty v konkávní oblasti plochy s větším scallopem

V následující tabulce jsou vypsány a zprůměrovány hodnoty naměřené konturografem:

Tab. 20 Výsledky konkávní oblasti plochy s větším scallopem měřené konturografem

Měření	Měřené parametry	
	Rz [μm]	Ra [μm]
První	16,300	3,413
Druhé	16,248	3,333
Třetí	16,170	3,374
Čtvrté	16,443	3,354
Průměr	16,290	3,369

V následující tabulce jsou vypsány průměrné hodnoty, nejnižší a nejvyšší hodnoty naměřené konfokálním mikroskopem:

Tab. 21 Výsledky konkávní oblasti plochy s větším scallopem měřené konfokálním mikroskopem

Měření	Měřené parametry	
	Rz [μm]	Ra [μm]
Průměr	17,455	3,321
Nejnižší naměřená hodnota	15,840	3,120
Nejvyšší naměřená hodnota	23,740	3,559

5.3.2.4 Naměřené hodnoty v konkávní oblasti plochy obráběné nástrojem o průměru 5 mm

V následující tabulce jsou vypsány a zprůměrovány hodnoty naměřené konturografem:

Tab. 22 Výsledky konkávní oblasti plochy obráběné nástrojem o průměru 5 mm měřené konturografem

Měření	Měřené parametry	
	Rz [μm]	Ra [μm]
První	11,582	2,685
Druhé	11,161	2,699
Třetí	11,441	2,647
Čtvrté	11,641	2,703
Průměr	11,456	2,684

V následující tabulce jsou vypsány průměrné hodnoty, nejnižší a nejvyšší hodnoty naměřené konfokálním mikroskopem:

Tab. 23 Výsledky konkávní oblasti plochy obráběné nástrojem o průměru 5 mm měřené konfokálním mikroskopem

Měření	Měřené parametry	
	Rz [μm]	Ra [μm]
Průměr	12,075	2,516
Nejnižší naměřená hodnota	10,960	2,448
Nejvyšší naměřená hodnota	12,460	2,617

5.3.3 Naměřené hodnoty v oblasti rovinné plochy

V následujících podkapitolách jsou vypsány výsledky měřené na jednotlivých plochách v oblasti rovinných ploch

5.3.3.1 Naměřené hodnoty v oblasti základní rovinné plochy

V následující tabulce jsou vypsány a zprůměrovány hodnoty naměřené konturografem:

Tab. 24 Výsledky oblasti základní rovinné plochy měřené konturografem

Měření	Měřené parametry	
	Rz [μm]	Ra [μm]
První	11,208	2,388
Druhé	11,375	2,646
Třetí	11,487	2,684
Čtvrté	11,810	2,541
Průměr	11,470	2,565

V následující tabulce jsou vypsány průměrné hodnoty, nejnižší a nejvyšší hodnoty naměřené konfokálním mikroskopem:

Tab. 25 Výsledky oblasti základní rovinné plochy měřené konfokálním mikroskopem

Měření	Měřené parametry	
	Rz [μm]	Ra [μm]
Průměr	11,720	2,325
Nejnižší naměřená hodnota	10,570	2,139
Nejvyšší naměřená hodnota	11,740	2,518

5.3.3.2 Naměřené hodnoty v oblasti rovinné plochy s menším scallopem

V následující tabulce jsou vypsány a zprůměrovány hodnoty naměřené konturografem:

Tab. 26 Výsledky oblasti rovinné plochy s menším scallopem měřené konturografem

Měření	Měřené parametry	
	Rz [μm]	Ra [μm]
První	6,016	1,119
Druhé	6,580	1,614
Třetí	6,295	1,516
Čtvrté	6,373	1,442
Průměr	6,316	1,423

V následující tabulce jsou vypsány průměrné hodnoty, nejnižší a nejvyšší hodnoty naměřené konfokálním mikroskopem:

Tab. 27 Výsledky konkávní oblasti plochy s menším scallopem měřené konfokálním mikroskopem

Měření	Měřené parametry	
	Rz [μm]	Ra [μm]
Průměr	7,008	1,274
Nejnižší naměřená hodnota	5,963	0,933
Nejvyšší naměřená hodnota	8,941	1,637

5.3.3.3 Naměřené hodnoty v oblasti rovinné plochy s větším scallopem

V následující tabulce jsou vypsány a zprůměrovány hodnoty naměřené konturografem:

Tab. 28 Výsledky oblasti rovinné plochy s větším scallopem měřené konturografem

Měření	Měřené parametry	
	Rz [μm]	Ra [μm]
První	16,631	3,531
Druhé	15,934	3,554
Třetí	16,137	3,556
Čtvrté	16,295	3,436
Průměr	16,249	3,519

V následující tabulce jsou vypsány průměrné hodnoty, nejnižší a nejvyšší hodnoty naměřené konfokálním mikroskopem:

Tab. 29 Výsledky oblasti rovinné plochy s větším scallopem měřené konfokálním mikroskopem

Měření	Měřené parametry	
	Rz [μm]	Ra [μm]
Průměr	16,515	3,221
Nejnižší	14,020	3,080
Nejvyšší	20,240	3,349

5.3.3.4 Naměřené hodnoty v oblasti rovinné plochy obráběné nástrojem o průměru 5 mm

V následující tabulce jsou vypsány a zprůměrovány hodnoty naměřené konturografem:

Tab. 30 Výsledky oblasti rovinné plochy obráběné nástrojem o průměru 5 mm měřené konturografem

Měření	Měřené parametry	
	Rz [μm]	Ra [μm]
První	11,687	2,708
Druhé	11,227	2,704
Třetí	10,408	2,624
Čtvrté	12,123	2,728
Průměr	11,361	2,691

V následující tabulce jsou vypsány průměrné hodnoty, nejnižší a nejvyšší hodnoty naměřené konfokálním mikroskopem:

Tab. 31 Výsledky oblasti rovinné plochy obráběné nástrojem o průměru 5 mm měřené konfokálním mikroskopem

Měření	Měřené parametry	
	Rz [μm]	Ra [μm]
Průměr	11,845	2,443
Nejnižší	11,090	2,369
Nejvyšší	13,740	2,547

6 Interpretace naměřených výsledků

V předchozí kapitole byly naměřeny hodnoty drsnosti povrchu pro jednotlivé oblasti. Cílem této kapitoly je výsledky interpretovat. Pro každou z dvanácti oblastí byla porovnávána průměrná naměřená hodnota Rz a Ra jak optickou, tak dotekovou metodou. Zároveň se porovnává, zdali se hodnota parametru drsnosti naměřená konturografem nachází v rozmezí hodnot naměřených konfokálním mikroskopem. Pokud ano, jedná se o indikaci, že by se na dala optická metoda nahradit dotekovou.

6.1 Výsledky konvexních oblastí

V následujících dvou tabulkách (Tab. 32 a Tab. 33) jsou vyhodnoceny výsledky měření pro konvexní oblasti jednotlivých ploch. Z měření bylo zjištěno, že pro parametry Rz jsou všechny indikace záměnnosti kladné. Pro parametry Ra jsou dvě kladné a dvě záporné indikace.

Tab. 32 Výsledky parametru Rz v konvexní oblasti

Plocha	Výsledky parametrů Rz			
	Průměr dotekové metody [μm]	Průměr Optické metody [μm]	Rozdíl [μm]	Indikace [μm]
Základní	10,239	10,625	0,386	Kladná
S menším scallopem	5,753	5,757	0,004	Kladná
S větším scallopem	14,803	14,295	0,508	Kladná
Plocha obráběná nástrojem o průměru 5 mm	10,261	10,575	0,314	Kladná

Tab. 33 Výsledky parametru Ra v konvexní oblasti

Plocha	Výsledky parametrů Ra			
	Průměr dotykové metody [μm]	Průměr Optické metody [μm]	Rozdíl [μm]	Indikace [μm]
Základní	2,430	2,401	0,029	Kladná
S menším scallopem	1,193	1,094	0,099	Kladná
S větším scallopem	3,284	3,023	0,261	Záporná
Plocha obráběná nástrojem o průměru 5 mm	2,381	2,235	0,146	Záporná

6.2 Výsledky konkávních oblastí

V Tab. 34 a Tab. 35 se vyhodnotili konkávní oblasti. Pro Rz jsou všechny indikace kladné, pro Ra jsou dvě kladné a dvě záporné.

Tab. 34 Výsledky parametrů Rz v konkávní oblasti

Plocha	Výsledky parametrů Rz			
	Průměr dotykové metody [μm]	Průměr Optické metody [μm]	Rozdíl [μm]	Indikace [μm]
Základní	10,016	11,075	1,059	Kladná
S menším scallopem	5,291	7,013	1,722	Kladná
S větším scallopem	16,290	17,455	1,165	Kladná
Plocha obráběná nástrojem o průměru 5 mm	11,456	12,075	0,619	Kladná

Tab. 35 Výsledky parametrů Ra v konkávní oblasti

Plocha	Výsledky parametrů Ra			
	Průměr dotykové metody [μm]	Průměr Optické metody [μm]	Rozdíl [μm]	Indikace [μm]
Základní	2,136	1,920	0,126	Záporná
S menším scallopem	1,115	1,050	0,065	Kladná
S větším scallopem	3,369	3,321	0,048	Kladná
Plocha obráběná nástrojem o průměru 5 mm	2,684	2,516	0,168	Záporná

6.3 Výsledky oblastí s rovinnými plochami

V následujících tabulkách (Tab. 36 a Tab. 37) jsou vyhodnoceny hodnoty parametrů drsnosti naměřené konturografem a konfokálním mikroskopem. Indikace pro Rz jsou všechny kladné, zatímco pro Ra byla kladná pouze jedna.

Tab. 36 Výsledky parametrů Rz pro oblasti s rovinnými plochami

Plocha	Výsledky parametrů Rz			
	Průměr dotykové metody [μm]	Průměr Optické metody [μm]	Rozdíl [μm]	Indikace [μm]
Základní	11,470	11,720	0,250	Kladná
S menším scallopem	6,316	7,008	0,692	Kladná
S větším scallopem	16,249	16,515	0,266	Kladná
Plocha obráběná nástrojem o průměru 5 mm	11,361	11,845	0,485	Kladná

Tab. 37 Výsledky parametrů Ra pro oblasti s rovinnými plochami

Plocha	Výsledky parametrů Ra			
	Průměr dotykové metody [μm]	Průměr Optické metody [μm]	Rozdíl [μm]	Indikace [μm]
Základní	2,565	2,325	0,240	Záporná
S menším scallopem	1,423	1,274	0,149	Kladná
S větším scallopem	3,519	3,349	0,170	Záporná
Plocha obráběná nástrojem o průměru 5 mm	2,691	2,443	0,248	Záporná

6.4 Výsledek všech oblastí

Po vyhodnocení jednotlivých parametrů jsme zjistili, že pro měření parametru Rz lze zaměnit dotykové a optické metody. Je zapotřebí přihlídnout k faktu, že experimentální těleso bylo navrženo tak, aby dráhy měření byli přímky. Pro tělesa, kde není tato podmínka splněna, nelze tuto záměnnost zaručit.

Pro parametry Ra jsme zjistili, že pouze pět z dvanácti indikací byly kladné. Z toho důvodu není doporučeno pro měření drsnosti Ra na free-form plochách využívat dotekové metody.

6.5 Parametry drsnosti na jednotlivých plochách

V této kapitole jsou vyobrazeny naměřené parametry drsnosti na každé ze čtyř ploch. Byla provedena diskuse nad rozdíly mezi odhadnutou hodnotou parametru Rz a nad rozdílnými hodnotami drsnosti v jednotlivých oblastech.

6.5.1 Základní plocha

V následující tabulce jsou vypsané průměrné hodnoty parametrů drsnosti pro obě použité metody měření:

Tab. 38 Průměrné hodnoty parametrů drsnosti pro základní plochu

oblast	Průměrné hodnoty dotykové metody		Průměrné hodnoty optické metody	
	Rz [μm]	Ra [μm]	Rz [μm]	Ra [μm]
Konvexní	10,239	2,430	10,625	2,401
Konkávní	10,016	2,136	11,075	1,920
Rovinná plocha	11,470	2,565	11,720	2,325
Odhadnuté Rz = 10 μm				

6.5.2 Plocha s menším scallopem

V následující tabulce jsou vypsány průměrné hodnoty parametrů drsnosti na ploše s menším scallopem pro obě použité metody měření:

Tab. 39 Průměrné hodnoty parametrů drsnosti pro plochu s menším scallopem

oblast	Průměrné hodnoty dotykové metody		Průměrné hodnoty optické metody	
	Rz [μm]	Ra [μm]	Rz [μm]	Ra [μm]
Konvexní	5,753	1,193	5,757	1,094
Konkávní	5,291	1,115	7,013	1,050
Rovinná plocha	6,316	1,423	7,008	1,274
Odhadnuté Rz = 4 μm				

6.5.3 Plocha s větším scallopem

V následující tabulce jsou vypsány průměrné hodnoty parametrů drsnosti pro obě použité metody měření:

Tab. 40 Průměrné hodnoty parametrů drsnosti pro plochu s větším scallopem

oblast	Průměrné hodnoty dotykové metody		Průměrné hodnoty optické metody	
	Rz [μm]	Ra [μm]	Rz [μm]	Ra [μm]
Konvexní	14,803	3,284	14,295	3,023
Konkávní	16,290	3,369	17,455	3,321
Rovinná plocha	16,249	3,519	16,515	3,221
Odhadnuté Rz = 20 μm				

6.5.4 Plocha obráběná nástrojem o průměru 5 mm

V následující tabulce jsou vypsané průměrné hodnoty parametrů drsnosti pro obě použité metody měření:

Tab. 41 Průměrné hodnoty parametrů drsnosti pro plochu obráběnou nástrojem o průměru 5 mm

oblast	Průměrné hodnoty dotykové metody		Průměrné hodnoty optické metody	
	Rz [μm]	Ra [μm]	Rz [μm]	Ra [μm]
Konvexní	10,261	2,381	10,575	2,235
Konkávní	11,456	2,684	12,075	2,516
Rovinná plocha	11,361	2,691	11,845	2,443
Odhadnuté Rz = 12,5 μm				

6.5.5 Vyhodnocení drsnosti jednotlivých ploch

Na základě naměřených hodnot lze tvrdit, že hodnota scallop skutečně ovlivňuje hodnoty Rz, ale vzorec, který jsme pro výpočty těchto hodnot, lze použít jen pro orientační účely. Jakékoliv další vazby mezi tvarem free-form plochy, reznými podmínkami a výslednou drsností povrchu jsou pro další výzkum. Takový výzkum překračuje znalosti bakalářského studia na fakultě strojní ČVUT.

7 Závěr

Závěr rešerše v oblasti výroby a měření free-form ploch je výroba experimentálního tělesa pomocí strategie řádkování a porovnávání hodnot naměřených pomocí konturografu a konfokálního.

Z rešerše technické normalizace zaměřené na měření drsnosti povrchu je nejdůležitější zjištění, že podle nové normy ČSN EN ISO 21920-3 se neperiodické povrchy, jakými jsou i free-form plochy, měří stejným postupem, jako ty periodické.

Z naměřených hodnot jsme zjistili, že pro takové tvarové plochy, na kterých lze realizovat přímkovou dráhu měření, lze zaměnit měření drsnosti parametru Rz pomocí optických metod těmi dotekovými. Pro parametr drsnosti Ra jsou neprůkazné výsledky, proto pro měření tohoto parametru není doporučeno tyto metody zaměňovat.

Bylo pozorováno, že hodnoty parametru drsnosti se mění na základě hodnoty scallopu, avšak použitý vzorec pro výpočet hodnoty scallopu lze použít pouze pro odhad výsledné drsnosti. Lze předpokládat, že jiná než vrstevná strategie obrábění by rovněž přinesla jiné výsledky, ale toto nebylo předmětem BP.

Během obrábění experimentálního tělesa vznikla hypotéza, že v jednotlivých měřených oblastech tělesa, budou rozdílné hodnoty drsnosti. Očekávala se určitá spojitost mezi úhlem, který svírá plocha v daném místě s podstavou, a výslednou drsností. V konvexních oblastech tedy měla být jiná drsnost než v konkávních, což je pravda, ale nebyla pozorována pravidelnost v těchto rozdílech. Je možné předpokládat, že nepravidelnost způsobuje samotné obrábění, nikoliv generování drah, což naším experimentem nebylo možné ověřit.

8 Bibliografie

- [1] - JIANG, X., P. SCOTT a D. WHITEHOUSE. Freeform Surface Characterisation - A Fresh Strategy. *CIRP Annals* [online]. 2007, **56**(1), 553-556 [cit. 2023-07-28]. ISSN 00078506. Dostupné z: doi:10.1016/j.cirp.2007.05.132
- [2] - LINKEOVÁ, Ivana a Vít ZELENÝ. APPLICATION OF RULED SURFACES IN FREEFORM AND GEAR METROLOGY. *Acta Polytechnica* [online]. 2021, **61**(SI), 99-109 [cit. 2023-07-28]. ISSN 1805-2363. Dostupné z: doi:10.14311/AP.2021.61.0099
- [3] - What Is Freeform Optics?. *CEFO The Center for Freeform Optics* [online]. Rochester: University of Rochester, c2012-2023, b. r. [cit. 2023-07-28]. Dostupné z: <http://centerfreeformoptics.org/what-is-freeform-optics/>
- [4] - FALAGGIS, Konstantinos, Jannick ROLLAND, Fabian DUERR a Alexander SOHN. Freeform optics: introduction. *Optics Express* [online]. 2022, **30**(4) [cit. 2023-07-28]. ISSN 1094-4087. Dostupné z: doi:10.1364/OE.454788
- [5] - BOZPinfo. *Co je to ergonomie* [online]. Praha: Výzkumný ústav bezpečnosti práce, 2004 [cit. 2023-03-23]. Dostupné z: <https://www.bozpinfo.cz/>
- [6] – Trust Verto. In: *CZC.cz* [online]. Praha: CZC.cz, b. r. [cit. 2023-07-28]. Dostupné z: <https://www.czc.cz/trust-verto/244224/produkt>
- [7] – Connect IT CMO-2510-BK ergonomická vertikální myš bezdrátová. *Dr. Max* [online]. Brno: ČESKÁ LÉKÁRNA HOLDING, b. r. [cit. 2023-07-28]. Dostupné z: <https://www.drmax.cz/connect-it-cmo-2510-bk-ergonomicka-vertikalni-mys-bezdratova>
- [8] - BC. VACÍK, Josef. *VÝVOJ A VÝROBA FREEFORM ETALONU PRO PERIODICKÉ ZKOUŠKY CMM*. Praha, 2018. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní. Vedoucí práce Ing. Libor Beránek, Ph.D.
- [9] - Měření drsnosti povrchu. *Elektronická učebnice* [online]. Olomouc: Olomoucký kraj, c2020-2023 [cit. 2023-07-28]. Dostupné z: <https://eluc.ikap.cz/verejne/lekce/1103>
- [10] - BUTLER, David Lee. Surface Roughness Measurement. In: LI, Dongqing, ed. *Encyclopedia of Microfluidics and Nanofluidics* [online]. Boston, MA: Springer US, 2008, s. 1945-1949 [cit. 2023-07-28]. ISBN 978-0-387-32468-5. Dostupné z: doi:10.1007/978-0-387-48998-8_1506

- [11] - Konfokální mikroskop. *WikiSkripta* [online]. Praha: Olomoucký kraj, 2018 [cit. 2023-07-28]. Dostupné z:
https://www.wikiskripta.eu/w/Konfok%C3%A1ln%C3%AD_mikroskop
- [12] - ING. KALOVÁ, Ilona a Karel ING. HORÁK. Optické metody měření 3D objektů. *Elektrorevue* [online]. Brno: International Society for Science and Engineering, 2005 [cit. 2023-07-28]. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/05023/index.html>
- [13] – ČSN EN ISO 21920-1 Geometrické specifikace produktu (GPS) - Struktura povrchu: Profil – Část 1: Indikace struktury povrchu. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2023.
- [14] – ČSN EN ISO 21920-2 Geometrické specifikace produktu (GPS) – Struktura povrchu: Profil – Část 2: Termíny, definice a parametry struktury povrchu. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2023.
- [15] - ČSN EN ISO 21920-3 Geometrické specifikace produktu (GPS) – Textura povrchu: Profil – Část 3: Operátory specifikací. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2023.
- [16] - LINKEOVÁ, Ivana a Vít ZELENÝ. APPLICATION OF RULED SURFACES IN FREEFORM AND GEAR METROLOGY. *Acta Polytechnica* [online]. 2021, **61**(SI), 99-109 [cit. 2023-07-28]. ISSN 1805-2363. Dostupné z: doi:10.14311/AP.2021.61.0099
- [17] - Build Epitrochoid. *Rhinoceros Forum* [online]. Barcelona: McNeel Europe, 2020 [cit. 2023-07-28]. Dostupné z: <https://discourse.mcneel.com/t/build-epitrochoid/100180>
- [18] - WEISSTEIN, Eric W. Epitrochoid. *Wolfram MathWorld* [online]. Oxfordshire: Wolfram Research, b.r. [cit. 2023-07-28]. Dostupné z:
<https://mathworld.wolfram.com/Epitrochoid.html>
- [19] - Constant Scallop Height. *CIM-Tech* [online]. Orlando: CIM-TECH, b.r. [cit. 2023-07-28]. Dostupné z:
https://www.cimtechsoftware.com/RouterCIM_Online_Help/constant_scallop_height.htm
- [20] - Master Catalog 2018: Volume Two, Rotating Tools. *KENNAMETAL* [online]. Pittsburgh: KENNAMETAL, c2023 [cit. 2023-07-31]. Dostupné z:

<https://catalogs.kennametal.com/Master-Catalog-2018-Vol-2-Rotating-Tools-English-Metric/C/#>

[21] - S5015.0. *DORMER PRAMET* [online]. Šumperk: Dormer Pramet, b.r. [cit. 2023-07-28]. Dostupné z: <https://www.dormerpramet.com/cz/cs/p/5983163>

Seznam obrázků

Obr. 1 Ergonomická myš ^[6]	9
Obr. 2 Pozice kostí předloktí při použití klasické a ergonomické myši ^[7]	9
Obr. 3 Schéma dotekové metody měření drsnosti povrchu ^[9]	13
Obr. 4 Schéma konfokálního mikroskopu ^[11]	15
Obr. 5 Schéma měření pomocí interferometru ^[12]	16
Obr. 6 Nové grafické značky ^[13]	16
Obr. 7 Indikace parametru drsnosti povrchu ^[13]	17
Obr. 8 Hyperbolický paraboloid ČMI ^[16]	21
Obr. 9 Epitrochoida ^[17]	22
Obr. 10 Křivka vrchní plochy tělesa	23
Obr. 11 Rozměry tělesa.....	24
Obr. 12 Původní strategie hrubování	25
Obr. 13 Dokončování rovinných ploch	25
Obr. 14 Optimalizace hrubování	26
Obr. 15 Fotografie po hrubování.....	27
Obr. 16 Dokončení vrchní plochy	27
Obr. 17 Dokončení plochy podstavce.....	27
Obr. 18 Strategie polo dokončení free-form ploch	28
Obr. 19 Strategie dokončování pro základní plochu	30
Obr. 20 Strategie obrábění pro výrobu drážky.....	33
Obr. 21 Oblasti měření	35
Obr. 22 Polohování výrobku na konturografu pomocí dvou svěráků	36
Obr. 23 Křivka profilu drsnosti pro oblast rovinné plochy obráběné nástrojem o průměru 5 mm.....	36
Obr. 24 Polohování na konfokálním mikroskopu pomocí dvou svěráků	37
Obr. 25 Topografie konvexní oblasti základní plochy	38

Seznam Tabulek

Tab. 1 Přehled možných parametrů pro indikaci parametru drsnosti povrchu	18
Tab. 2 Řezné podmínky pro hrubování	26
Tab. 3 Optimální řezné podmínky pro polo dokončování	28
Tab. 4 Řezné podmínky pro polo dokončování	29
Tab. 5 Řezné podmínky pro dokončování základní plochy	31
Tab. 6 Řezné podmínky pro dokončování plochy obráběné nástrojem 5 mm	32
Tab. 7 Řezné podmínky pro výrobu drážek	33
Tab. 8 Výsledky konvexní oblasti základní plochy měřené konturografem.....	39
Tab. 9 Výsledky konvexní oblasti základní plochy měřené konfokálním mikroskopem	39
Tab. 10 Výsledky konvexní oblasti plochy s menším scallopem měřené konturografem	39
Tab. 11 Výsledky konvexní oblasti plochy s menším scallopem měřené konfokálním mikroskopem	40
Tab. 12 Výsledky konvexní oblasti plochy s větším scallopem měřené konturografem	40
Tab. 13 Výsledky konvexní oblasti plochy s větším scallopem měřené konfokálním mikroskopem	40
Tab. 14 Výsledky konvexní oblasti plochy obráběné nástrojem o průměru 5 mm měřené konturografem	41
Tab. 15 Výsledky konvexní oblasti plochy obráběné nástrojem o průměru 5 mm měřené konfokálním mikroskopem.....	41
Tab. 16 Výsledky konkávní oblasti základní plochy měřené konturografem.....	42
Tab. 17 Výsledky konkávní oblasti základní plochy měřené konfokálním mikroskopem	42
Tab. 18 Výsledky konkávní oblasti plochy s menším scallopem měřené konturografem	42
Tab. 19 Výsledky konkávní oblasti plochy s menším scallopem měřené konfokálním mikroskopem	43
Tab. 20 Výsledky konkávní oblasti plochy s větším scallopem měřené konturografem	43

Tab. 21 Výsledky konkávní oblasti plochy s větším scallopem měřené konfokálním mikroskopem	43
Tab. 22 Výsledky konkávní oblasti plochy obráběné nástrojem o průměru 5 mm měřené konturografem	44
Tab. 23 Výsledky konkávní oblasti plochy obráběné nástrojem o průměru 5 mm měřené konfokálním mikroskopem.....	44
Tab. 24 Výsledky oblasti základní rovinné plochy měřené konturografem	45
Tab. 25 Výsledky oblasti základní rovinné plochy měřené konfokálním mikroskopem	45
Tab. 26 Výsledky oblasti rovinné plochy s menším scallopem měřené konturografem	45
Tab. 27 Výsledky konkávní oblasti plochy s menším scallopem měřené konfokálním mikroskopem	46
Tab. 28 Výsledky oblasti rovinné plochy s větším scallopem měřené konturografem	46
Tab. 29 Výsledky oblasti rovinné plochy s větším scallopem měřené konfokálním mikroskopem	46
Tab. 30 Výsledky oblasti rovinné plochy obráběné nástrojem o průměru 5 mm měřené konturografem	47
Tab. 31 Výsledky oblasti rovinné plochy obráběné nástrojem o průměru 5 mm měřené konfokálním mikroskopem	47
Tab. 32 Výsledky parametru Rz v konvexní oblasti	48
Tab. 33 Výsledky parametru Ra v konvexní oblasti.....	49
Tab. 34 Výsledky parametrů Rz v konkávní oblasti	49
Tab. 35 Výsledky parametrů Ra v konkávní oblasti.....	50
Tab. 36 Výsledky parametrů Rz pro oblasti s rovinnými plochami.....	51
Tab. 37 Výsledky parametrů Ra pro oblasti s rovinnými plochami	51
Tab. 38 Průměrné hodnoty parametrů drsnosti pro základní plochu	52
Tab. 39 Průměrné hodnoty parametrů drsnosti pro plochu s menším scallopem	53
Tab. 40 Průměrné hodnoty parametrů drsnosti pro plochu s větším scallopem	53
Tab. 41 Průměrné hodnoty parametrů drsnosti pro plochu obráběnou nástrojem o průměru 5 mm	54

9 Přílohy

Příloha 1: Protokoly měření konvexní oblasti základní plochy

Příloha 2: Protokoly měření konkávní oblasti základní plochy

Příloha 3: Protokoly měření rovinné oblasti základní plochy

Příloha 4: Protokoly měření konvexní oblasti plochy s menším scallopem

Příloha 5: Protokoly měření konkávní oblasti plochy s menším scallopem

Příloha 6: Protokoly měření rovinné oblasti plochy s menším scallopem

Příloha 7: Protokoly měření konvexní oblasti plochy s větším scallopem

Příloha 8: Protokoly měření konkávní oblasti plochy s větším scallopem

Příloha 9: Protokoly měření rovinné oblasti plochy s větším scallopem

Příloha 10: Protokoly měření konvexní oblasti plochy obráběné nástrojem o průměru 5 mm

Příloha 11: Protokoly měření konkávní oblasti plochy obráběné nástrojem o průměru 5 mm

Příloha 12: Protokoly měření rovinné oblasti plochy obráběné nástrojem o průměru 5 mm