

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ
ÚSTAV TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ, PROJEKTOVÁNÍ A METROLOGIE



DIPLOMOVÁ PRÁCE

VÝVOJ A VÝROBA FREEFORM ETALONU PRO PERIODICKÉ
ZKOUŠKY CMM

DEVELOPMENT AND PRODUCTION OF FREEFORM STANDARD FOR
REVERIFICATION TESTING OF CMM

AUTOR: Bc. Josef Vacík

STUDIJNÍ PROGRAM: Výrobní a materiálové inženýrství

VEDOUCÍ PRÁCE: Ing. Libor Beránek, Ph.D.

PRAHA 2018



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Vacík** Jméno: **Josef** Osobní číslo: **409561**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**
Studijní program: **Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Výrobní a materiálové inženýrství**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Vývoj a výroba freeform etalonu pro periodické zkoušky CMM

Název diplomové práce anglicky:

Development and production of freeform standard for reverification testing of CMM

Pokyny pro vypracování:

1. Typické aplikace obecných tvarových ploch v průmyslu a technologie jejich výroby
2. Parametrické modelování obecných tvarových ploch a návrh etalonu
3. Realizace výroby etalonu s využitím různých strategií obrábění
4. Posouzení jednotlivých strategií obrábění z pohledu dosahované přesnosti, kvality povrchu a času obrábění

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

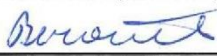
Ing. Libor Beránek, Ph.D., ústav technologie obrábění, projektování a metrologie FS

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

Datum zadání diplomové práce: **09.04.2018**

Termín odevzdání diplomové práce: **31.07.2018**

Platnost zadání diplomové práce: _____


Ing. Libor Beránek, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce



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


prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

24.4.2018
Datum převzetí zadání


Podpis studenta

Anotace

Diplomová práce se zabývá aplikací obecných tvarových ploch v praxi. Popisuje výrobní technologie, které se využívají při jejich výrobě. Pomocí parametrického modelování je vytvořen CAD model etalonu, který je určen pro periodické zkoušky na CMM. Pomocí různých strategií obrábění, řezných podmínek a frézovacích nástrojů je vyrobeno devět vzorků. Tyto vzorky jsou mezi sebou porovnávány z hlediska chyby tvaru obecné tvarové plochy, kvality povrchu a času obrábění. V závěru práce je zhodnocení všech výsledků obrábění.

Klíčová slova

Obecná tvarová plocha, frézování, frézovací centrum, kulová fréza, obrábění obecných tvarových ploch.

Annotation

This thesis deals with application of freeform surfaces into practice. It describes the manufacturing technologies employed in its production. With the help of parametrical modelling a CAD model of etalon is created which is designated for periodical examination on CMM. Nine samples are produced with the help of various strategies of machining, tipping condition and milling tools. These samples are compared to each other from the aspect of fault in shape of the freeform surface, quality of the surface and the time of machining. In the conclusion of the thesis there is an evaluation of every result of the machining.

Keywords

Freeform surface, milling work, milling center, ball cutter, freeform surface manufacturing.

Bibliografická citace

VACÍK, Josef. *Vývoj a výroba freeform etalonu pro periodické zkoušky CMM*. Praha, 2018. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Ing. Libor Beránek, Ph.D.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně, a to výhradně s použitím pramenů a literatury, uvedených v seznamu citovaných zdrojů.

V Praze dne:

.....

Podpis

Poděkování

Děkuji tímto rodičům za jejich trpělivost a podporu při studiu. Vedoucímu práce Ing. Liboru Beránkovi, Ph.D. děkuji za cenné připomínky a rady při vypracování diplomové práce. Kolegům Ing. Janu Rajalovi, Ing. Lukáši Pelikánovi a Ing. Jiřímu Sommerovi za pomoc při obrábění vzorků a Ing. Vladimíru Šulcovi za rady a měření vzorků na CMM.

Obsah

Úvod	9
1 Aplikace obecných tvarových ploch	10
2 Technologie výroby obecných tvarových ploch ve strojírenství.....	16
2.1 Třískové obrábění	16
2.2 Tváření	18
2.3 Slévání	20
2.4 Výroba plastových dílů	20
2.5 Nekonenční technologie výroby tvarových ploch.....	21
3 Parametry frézování ovlivňující kvalitu a jakost obrobené plochy	22
3.1 Frézovací nástroje	22
3.2 Upnutí nástroje.....	22
3.3 Chlazení.....	23
3.4 Řezné podmínky	23
3.5 Strategie obrábění	23
3.6 Stroj	24
4 Návrh etalonu	25
4.1 Zadání freeform plochy	25
4.2 Návrh ploch pro vyrovnání na CCM	26
4.3 Program Rhinoceros	28
4.4 Modelování zadané plochy pomocí Rhinoceros a Math Plugin	28
4.5 Návrh polotovaru	29
4.6 Modelování v programu Siemens NX 12.0	29
5 Výroba vzorků.....	31
5.1 Obráběcí centrum VMC 500.....	31
5.2 Frézovací nástroje	32

5.3	Měřicí zařízení	33
5.4	Hrubování a dohrubování	34
5.5	Polodokončování	37
5.6	Obrábění ploch pro vyrovnání na CMM	38
5.7	Dokončování	39
5.8	Obrábění vzorků	40
5.9	Porovnání jednotlivých strategií v závislosti na čase obrábění.....	59
6	Měření a vyhodnocení vyrobených vzorků	60
6.1	Způsob vyhodnocení chyby tvaru obecné tvarové plochy.....	60
6.2	Porovnání podle chyby tvaru plochy.....	61
6.3	Porovnání dle histogramů	61
6.4	Porovnání podle připasování	63
6.5	Celkové shrnutí výsledků	64
7	Závěr	65
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ:	67
	SEZNAM OBRÁZKŮ:.....	71
	SEZNAM TABULEK:	73
	SEZNAM GRAFŮ:.....	73
	SEZNAM ZKRATEK A SYMBOLŮ:.....	74
	SEZNAM ELEKTRONICKÝCH PŘÍLOH:	75

Úvod

Obecné tvarové plochy (freeform plochy) jsou neanalytické hladké plochy nedefinovaných tvarů. Často jsou popisovány pomocí matematických rovnic nebo pouze CAD modelem. Z těchto ploch se skládá mnoho výrobních nástrojů, strojních součástí a běžně používaných výrobků. Vlastně vše, co najdeme v přírodě je obecná tvarová plocha. Jednoduché geometrické plochy jako je rovina nebo koule, jsou vlastně dokonalé, matematicky definované objekty.

K výrobě obecných tvarových ploch se používá tváření, slévání, vstřikování plastů, třískové obrábění a nekonvenční technologie. U technologií, kde vyrobená obecná tvarová plocha je negativem nástroje, se používá pro výrobu nástrojů třískové obrábění. Jedná se převážně o 3D frézování. Možnost výroby přesných tvarových ploch přinesla číselně řízená frézovací centra a CAD modelování.

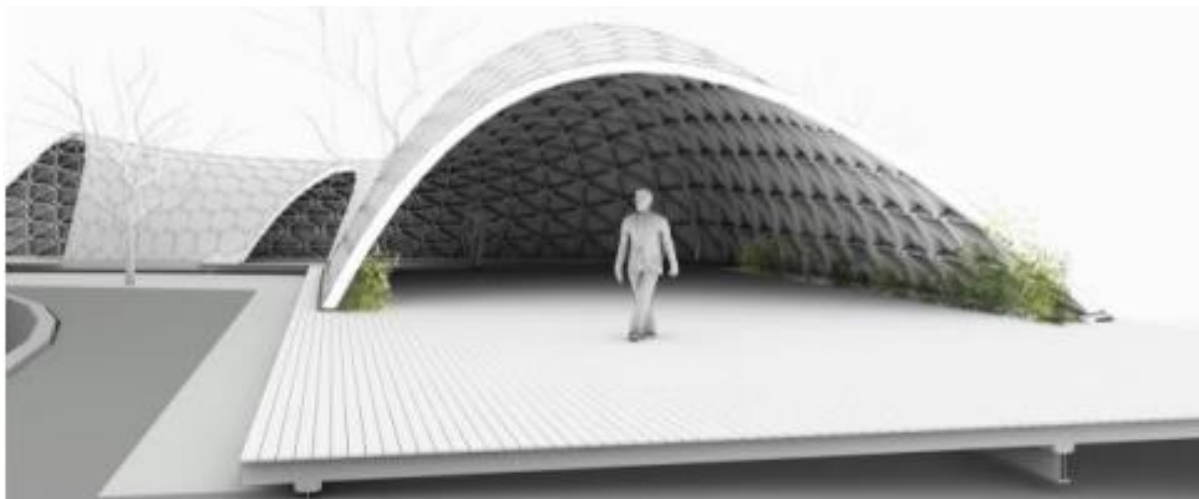
Cílem práce je návrh a výroba etalonu, který bude složit ke kontrole měřicích strojů. Etalon je ztělesněním veličiny. V mém případě je to obecná tvarová plocha. Tato plocha je popsána pomocí matematické rovnice. Měřicí stroje se kontrolují pomocí periodických zkoušek. Periodické zkoušky CMM jsou zkoušky provádějící se opakovaně v časových intervalech. Nutnost kontroly CMM vyplývá z vysokých požadavků na přesnost výroby obecných tvarových ploch. Důvodem je hojné využití těchto ploch v aerodynamice, ergonomii nebo v optice.

1 Aplikace obecných tvarových ploch

Obecné tvarové plochy (freeform surfaces) jsou všude kolem nás. Dá se říct, že tvoří svět. Setkáváme se s nimi v každodenním životě. Jsou to neanalytické hladké plochy (povrchy) různě definovaných tvarů. Obecné tvarové plochy jsou určeny pravouhlým uspořádáním řídicích bodů a matematickým modelem, který vymezuje způsob, jakým je plocha vytvořena. K modelování přesně definovaných obecných tvarových ploch se používají CAD programy. Do programů se plochy zadávají více stupňovými polynomy. Tyto polynomy mohou být až 21. stupně. Novodobé obecné tvarové matematické modely umožňují přesně popsat základní geometrické plochy. Obecné tvarové plochy se dělí na rotační a nerotační. Mohou se vyskytovat ve dvourozměrném i třírozměrném systému. Příklady oborů využívající obecné tvarové plochy jsou uvedeny v následujících bodech [1, 2, 23].

1.1 Stavitelství

Moderní design domů, budovaných v dnešní době, využívá v hojném množství obecné tvarové plochy. Na budovách tyto plochy mají jak funkční, tak designovou úlohu. Co se týče vnějšího opláštění budov, používá se princip tenké skořepiny. Pod takovým pláštěm jsou roštové konstrukce, které plní statické požadavky. Používaný materiál je sklo, plast nebo plech. V praxi se s tím můžeme setkat na hangárech, pavilonech nebo kopulích. Na obrázku 1 je počítačový model hangáru [3]. Dále se obecné tvarové plochy užívají jako designový prvek. Můžeme je najít jak v interiéru, tak v exteriéru budov.



Obrázek 1: Digitální model pavilonu knihovny [3]

1.2 Optika

Optika využívá obecných tvarových ploch v podobě čoček (Obr. 2). Pro výrobu dříve hojně používané sklo je dnes nahrazováno nejrůznějšími organickými i anorganickými materiály. Podmínka pro tyto materiály je transparentnost. Trendem při výrobě čoček je dnes freeform platforma. Umožňuje výrobu složitých povrchových tvarů a zakřivení čoček. Umožňuje také výrobu torických, asférických a hlavně progresivních povrchů freeform. Touto metodou je možné vyrobit komplexní povrchy s velkou přesností. Freeform procesem se rozumí číslicově řízená frézovací operace. Jako nástroje pro frézování se používají diamantové hroty. Po frézování následuje leštění pomocí šal. U freeform technologie se každá čočka brousí jednotlivě. To je nevýhoda oproti konvenčním strojům. Konvenční stroje jsou časově úspornější. Další nevýhodou jsou vyšší nároky na obsluhu a údržbu technologického vybavení [18]. Hlavní rozdělení čoček je na unifokální, bifokální, trifokální a multifokální. Unifokální čočky se dále dělí na sférické, asférické, torické a prizmatické [4].



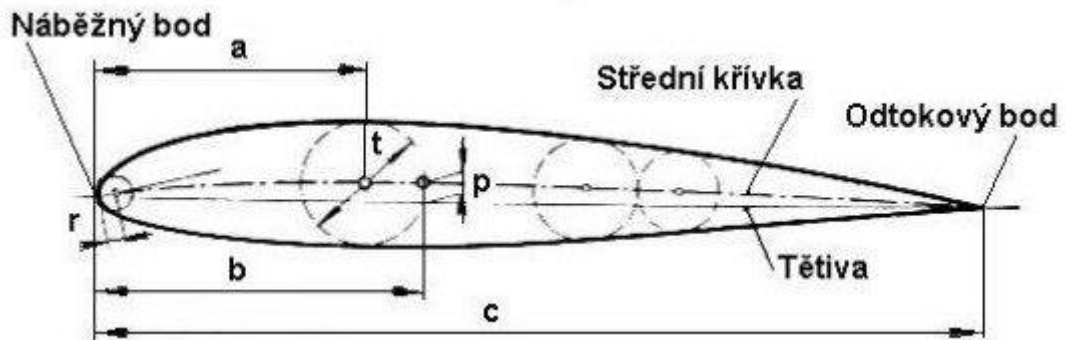
Obrázek 2: Čočky vyrobené z vysokoindexového skla [4]

1.3 Automobilový průmysl

Obecné tvarové plochy tvořící karoserii mají designový i praktický účel. Jsou důležité pro obtékání vzduchu kolem vozidla. Tím se dají zajistit vhodné jízdní vlastnosti a v neposlední řadě to má vliv na spotřebu paliva. Zákazník při koupi nového vozu hledí na vizuální dojem. Důležitý je interiér i exteriér. Při plánování nového vozu se výrobní náklady snaží výrobci snížit, proto nahrazují kovové díly plastovými. Plast má velkou výhodu, že se snáze tvaruje do obecných tvarových ploch. Další funkční obecné tvarové plochy jsou součástí motoru. Mohou to být lopatky turbíny turbodmychadla nebo vačková hřídel.

1.4 Letecký průmysl

V leteckém průmyslu hraje klíčovou roli aerodynamika, což je věda zkoumající proudění vzduchu kolem těles. Celý vnější obal letadla tvoří složitě vygenerované křivky. Tyto obecné tvarové plochy trupu slouží k dobrému proudění vzduchu kolem letadla. Ideální proudění vede například ke snížení spotřeby paliva. Základem létání je profil křídla (Obr. 3). Profil tvořený obecnou tvarovou plochou je hlavní nosná plocha sloužící k vytvoření dostatečného vztlaku.



Obrázek 3: Charakteristika profilu křídla [18]

1.5 Energetika

Vyrábí-li se elektřina pomocí generátoru je jeho pohyb zajištěn pomocí turbíny. Například parní turbíny mění tepelnou energii uloženou v páře na mechanickou práci. Mechanická práce je v generátoru měněna na elektrickou energii. Hlavní součástí turbín jsou lopatky (Obr. 4). Na lopatky jsou kladeny velké nároky na přesnost výroby i materiálové vlastnosti. Pracovní část lopatky turbíny je obecná tvarová plocha [5].



Obrázek 4: Lopatka turbíny [20]

1.6 Zemědělská technika

Zemědělská technika pro zpracování půdy užívá složité tvarové součásti. U techniky pro zpracování půdy slouží k optimálnímu toku půdy a u techniky pro pícniny slouží k manipulaci s pící. Stěžejní příklad může být orební těleso pluhu (Obr. 5) nebo disky u talířových bran. Moderní žací stroje mají velice složitě tvarované nože, které slouží k sekání. Sklízecí mlátičky a řezačky mají komplikované vnitřní ústrojí, kde se pohybuje a přemísťuje sklizený materiál. Pro tento pohyb jsou většinou součásti tvořené tvarovou plochou.



Obrázek 5: Orební těleso pluhu [31]

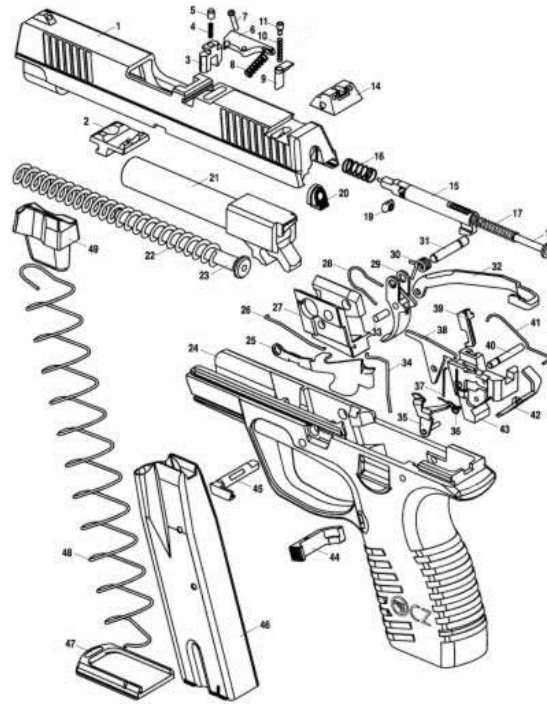
1.7 Ergonomie

Ergonomie je jeden z mladších vědních oborů, který studuje zákonitosti lidské práce. Název vznikl ze spojení slov ergon (práce) a nomos (zákon). Jedná se o vědní obor, který vychází z humanitních oborů (antropometrie, fyziologie, psychologie, sociologie atd.) a technických oborů (konstruování, normování, statistika atd.).

Využitím ergonomie upravujeme prostředí a vlivy působící na člověka. Prostředím se myslí pracoviště a nástroje, které člověk využívá k práci. Takové prostředí je nezbytné přizpůsobit lidskému tělu. Proto veškeré nástroje a pomůcky se neskládají z jednoduchých ploch, ale z obecných tvarových ploch [29].

1.8 Zbrojní průmysl

Mechanismus automatické nebo samonabíjecí palné zbraně patří mezi nejsložitější. Bicí mechanismus funguje pomocí tvarových ploch. Dále vnější plášť zbraně je tvořen převážně tvarovými plochami, které slouží k pohodlné a bezpečné manipulaci. Na obrázku 6 jsou jednotlivé součásti zbraně, kde můžeme vidět například spoušťový a bicí mechanismus.



Obrázek 6: Pistole CZ 100 [30]

1.9 Sport

Náčiní používající se při sportu je také převážně tvořeno obecnými tvarovými plochami. Pracovní část pomůcek pro sport např. hokejka, tenisová raketa, lyže, snowboard nebo saně je tvořena právě těmito plochami. Je to z důvodu optimální funkce daného předmětu. Další část sportovního vybavení jsou chrániče. Chrániče zajišťují ochranu sportovce a současně nesmějí omezovat v pohybu.

1.10 Medicína

Chirurgické nástroje se skládají vždy ze dvou částí. Jedna část je pracovní a druhá slouží jako držadlo. Obě tyto části se skládají z obecných tvarových ploch. Pracovní část má rozličné tvary a funkce. Na držadlo jsou kladeny ergonomické podmínky, protože s těmito nástroji jsou nuceni lékaři pracovat i několik hodin. Příklady chirurgických nástrojů jsou na obrázku 7.

Další lékařský obor, kde se můžeme setkat s obecnými tvarovými plochami jsou umělé implantáty. Jedná se o uměle vytvořené části lidského těla. Nahrazují se jak tvrdé, tak měkké tkáně. Velký důraz je zde kladen na materiál, který musí být jednoznačně biokompatibilní. V dnešní medicíně se používají například umělé kloubní náhrady, umělé srdeční chlopně, kostní fixace nebo zubní implantáty [28].



Obrázek 7: Příklady chirurgických nástrojů [19]

2 Technologie výroby obecných tvarových ploch ve strojírenství

Při volbě technologie pro výrobu obecné tvarové plochy hraje zásadní roli použitý materiál. Další specifikací je požadovaná přesnost dílu a kvalita povrchu. Klíčová je také složitost obecné tvarové plochy a počet kusů, které je nutné vyrobit.

2.1 Třískové obrábění

Technologie třískového obrábění je specifická tím, že potřebného tvaru součásti se docílí odebráním vrstvy materiálu z polotovaru. Je základem přesnosti jiných výrobních technologií. Míněno technologie, které používají nástroje vyrobené právě třískovým obráběním. Příkladem je slévání, nebo tváření.

2.1.1. Soustružení [11, 12, 13,14]

Soustružení je nejpoužívanější výrobní metoda ve strojírenství. Slouží k výrobě rotačních součástí. Obrobek vykonává hlavní pohyb. Tento pohyb je rotační. Nástroj vykonává posuv, který je buď příčný nebo podélný. Soustružnické operace mohou být – dělení materiálu, výroba válcových, kuželových a kulových rotačních ploch. Soustružením je možné vyrábět obecné tvarové plochy, které jsou na rotačních součástech. V následujících bodech jsou uvedeny druhy soustružení, využívaných pro výrobu obecných tvarových ploch.

a) Soustružení sdruženými pohyby

Tento druh technologie je vhodný pouze pro kusovou výrobu. Vyžaduje značnou zručnost obsluhy. Vyznačuje se i velkou časovou náročností. Při této operaci se využívají standardní soustružnické nože. Touto metodou je pracovník na soustruhu schopen vyrobit pouze hrubý tvar součásti.

b) Soustružení tvarovými noži

Tvarové soustružnické nože jsou specifické tím, že mají ostří vybroušené do požadovaného tvaru. Tyto nože jsou velice rozmanité. Nůž je možné vybrousit do jakéhokoli složitého tvaru. Jako příklad tvarového nože můžeme zmínit závitovací soustružnický nůž, jehož ostří má tvar profilu závitu. V následujících bodech jsou uvedeny druhy tvarových nožů.

- Radiální

Tvarový radiální prizmatický soustružnický nůž vyrábí tvarovou plochu zapichovacím způsobem. Posuvový pohyb se děje v radiálním směru.

- Tangenciální
Posuvný pohyb vykonává nůž po přímce, která je mimoběžná s osou rotace obrobku.
- Kotoučové soustružnické nože
Velká výhoda těchto nástrojů je ostření na čele. Špička tohoto nože musí být umístěna do osy soustružení.

c) Soustružení kopírováním

V dnešní době se tento způsob soustružení již nepoužívá. Metoda spočívá v tom, že dotyk snímá tvar šablony. Soustružnický nůž kopíruje pohyb dotyku. Nevýhoda této technologie je, že chyba, která je na šabloně, se přenáší na výrobek.

d) Soustružení číslicově řízenými stroji (CNC)

S příchodem číslicově řízených strojů se velice usnadnila výroba tvarově složitých obrobků. Pohyb nástroje je řízen počítačovým programem. Program NC je vytvořen pomocí CAD/CAM softwaru nebo přímo na ovládacím panelu stroje. Vytváření NC programu na stroji se nazývá ruční nebo strojní programování. V NC programu jsou zaznamenány dráhy, po kterých se pohybuje nástroj. Dále obsahuje informace o řezných podmínkách, nástrojích a použití chlazení.

2.1.2. Frézování [1, 11, 12, 15]

Frézování slouží především k výrobě rovinných a tvarových ploch. Nástroje pro frézování se nazývají frézy a jsou vícebřité. Nástroj vykonává rotační pohyb. Posuvný pohyb vykonává stůl, popřípadě nástroj. Stroj pro frézařské operace je frézka. V následujících bodech jsou uvedeny druhy frézování, používané pro výrobu obecných tvarových ploch.

a) Ruční frézování

Tento druh technologie je vhodný pouze pro kusovou výrobu. Je nutná velká zručnost obsluhy. Vyznačuje se velkou časovou náročností. Obsluha pomocí posuvů frézky odebírá konstantní vrstvu materiálu. Součást vzniká na základě parametrů odečtených z výkresu.

b) Frézování kopírováním

Spočívá na přenosu tvaru a rozměrů na základě fyzického modelu. Nástroj kopíruje pohyb doteku, který je v kontaktu s modelem. Tato metoda se dnes nevyužívá, ale na jejím principu je obrábění pomocí CNC strojů, kde místo fyzického modelu je CAD model.

c) Frézování tvarovými nástroji

Tvarové frézy se dělí podle ploch, na které jsou určeny. Plochy mohou být normalizované (cykloidy, evolventy, epicykloidy, konvexní, konkávní, kruhy, půlkruhy) a nenormalizované (jakékoli obecné tvary).

Rozdělení tvarových nástrojů:

- Nástroje na ozubení
- Nástroje na závity
- Nástroje na rádiusy, drážky a úhly

d) Frézování číslicově řízenými stroji

Pohyb nástroje je řízen počítačovým programem. NC program je generován CAD/CAM softwarem, který na základě matematických výpočtů určí přesnou dráhu nástroje. Jedná se o velmi efektivní metodu. Při přípravě a generování NC programu pro určitý stroj není nutnost přerušit probíhající výrobu. Až bezchybný program je aplikován na stroj.

e) HSC technologie

HSC je vysokorychlostní frézování. Vysoké řezné rychlosti vedou ke zkrácení času pro obrábění. Při tomto obrábění se nepoužívají řezné kapaliny, proto se často setkáváme s označením suché obrábění. Tato technologie je vhodná pro obrábění velice tvrdých materiálů např. kalené oceli. Řezná rychlost se pohybuje na hodnotě 5-10x vyšší než řezná rychlost při konvenčním obrábění. Z ekonomického hlediska je tato metoda vhodná pro obrábění zápustek a jiných forem určených pro tváření.

2.2 Tváření

Tvářením nedochází k úběru materiálu. Tímto procesem se mění rozměry a mechanické vlastnosti polotovaru tak, že vznikne potřebný výrobek. Působením tvářecích sil se materiál plasticky deformuje a vzniká požadovaný tvar. Tvářením dosahujeme těch nejlepších mechanických vlastností, jakých lze u daného materiálu dosáhnout. Daného tvaru se docílí přetvořením materiálu. Nástroje jsou velice náročné na přesnost a odolnost, proto je jejich pořizovací cena vysoká. Nástroje se vyrábějí převážně pomocí 3D frézování [6].

2.2.1. Zápustkové kování

Jedná se o velice efektivní technologii. Při zápustkovém kování se používá nástroj zvaný zápustka. Zápustku můžeme definovat jako tvarovou dutinu. Tato tvarová dutina má negativní tvar výsledné součásti. Technologie je vhodná pro výrobu součástí, které jsou tvořeny tvarovými plochami. Před zápustkové kování je řazeno předkování. Výroba zápustek je velice nákladná, proto je tato technologie nevhodná pro kusovou výrobu. Nástroje se vyrábějí převážně pomocí 3D frézování. Předkování je druh volného kování, které slouží ke tvarování

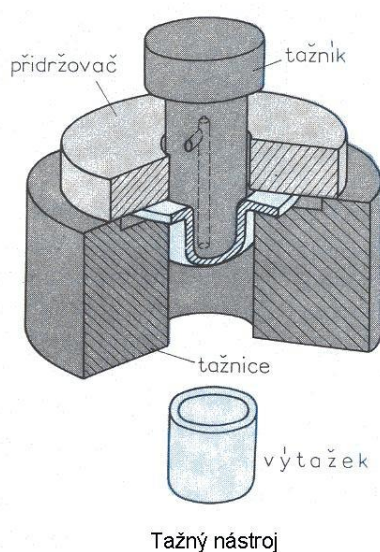
materiálu pro zápustku. V zápustce je materiál pýchován a tvářen do potřebného tvaru. Zápustky mohou být jednodutinové a postupové. Jednodutinové zápustky se používají v malosériové výrobě, postupové zápustky potom v sériové a hromadné výrobě. Postupová zápustka je tvořena několika dutinami a dutinou dokončovací. Dokončovací dutina má tvar výkovku. Zápustkové kování se provádí na lisech nebo bucharech. Lisy pracují na jeden zdvih. Buchary pracují na více pracovních zdvihů [9].

2.2.2. Ražení

Při tomto procesu vzniká vydutý nebo vypouklý reliéf tím, že se mění tloušťka materiálu. Působením síly lisu materiál vyplňuje dutiny v razidle. Technologie se často využívá v umění. Razí se například mince nebo medaile. Nástroj je tvořen raznicí a razníkem. Ty mají negativní tvar vyráběné součásti. Také u této technologie se hojně využívá pro výrobu nástrojů 3D frézování [8].

2.2.3. Technologie tažení

Polotovary pro tažení jsou plechy. Polotovar se tváří za tepla i za studena. Vznikají tedy plechové součásti, které mohou tvořit obecné tvarové plochy. Metoda je vhodná pro širokou škálu tvarových součástí. Můžeme vyrábět součásti rotační, nerotační, symetrické i nesymetrické. Pro rozměry výtažku je rozhodující kritérium hloubka tažení. Podle tohoto parametru se určuje, zda bude výrobek tažen v jedné nebo více operacích. Působením nástroje, který se nazývá tažník je polotovar přetvářen do požadovaného tvaru. Tažník vyvíjí potřebnou sílu, která v podobě tlaku působí na polotovar. Příklad tažného nástroje je znázorněn na obrázku 8. Výsledná součást se nazývá výtažek [7].



Obrázek 8: Tažný nástroj [21]

2.3 Slévání

Jedná se o druh výroby kovových součástí. Výchozí materiály jsou kovy a jejich slitiny. Princip této technologie spočívá v nalití roztaveného kovu do formy. Kov se taví pomocí vysokých teplot. Ve formě kov ztuhne a my získáme surový odlitek. Pro lití kovu do formy slouží vtoková a nálitková soustava. Vtoková a nálitková soustava se posléze odstraní od finálního odlitku. Sléváním je možné vyrábět složité tvarové součásti. Omezení spočívá v přesnosti a kvalitě povrchu. Základním druhem slévání je lití pomocí formovací směsi a modelu [7]. Existují však způsoby pro výrobu kvalitnějších a přesnějších odlitků. Jedna z moderních slévárenských technologií je například metoda vytavitelného modelu. V dnešní době je již běžně rozšířená i pro materiálově náročné součásti. Slouží k výrobě odlitků s vyšší tvarovou a rozměrovou přesností. To souvisí i s vyššími nároky na finance potřebné pro výrobu [10].

2.4 Výroba plastových dílů

Plast je častý materiál, který se používá pro výrobu obecných tvarových ploch. Velkou část této výroby tvoří čočky. Dále se z plastu vyrábí mnoho dílů např.: interiér vozidel, bytové doplňky nebo části zbraní. Plastové díly se vyrábějí lisováním, vstřikováním nebo odléváním. Tyto technologie spojují velké nároky na přesnost nástrojů. Jejich nepřesnost se přímo přenáší na výrobky. Vysoká přesnost se projevuje na ceně nástrojů. Nástroje se vyrábějí 3D frézováním.

2.4.1. Lisování

Metoda je vhodná pro výrobu rozptylných čoček z polymethylmetakrylátu. Polotovary ve tvaru koleček potřebného průměru se nejprve leští. Poté se polotovar zahřeje na potřebnou teplotu a vkládá mezi lisovací nástroje. Nástroje mají požadovaný poloměr křivosti. Působením tlaku (20 MPa) se dosahuje požadovaného tvaru. Lisováním lze vyrábět nejen čočky, ale i jiné díly skládající se z obecných tvarových ploch [37].

2.4.2. Vstřikování

Vstřikují se polymethylmetakryláty, acetátcelulózy nebo polystyreny. Polotovar je ve formě granulí. Metoda patří mezi nejvýznamnější technologie v plastařském průmyslu. Vyrábí se tak většina plastových výrobků. Plast, ohřátý na potřebnou teplotu, je vstřikován do kovové formy. Hlavní výhody vstřikování jsou žádné nebo minimální dokončování operace. Při hromadné výrobě jsou nízké náklady na jeden kus výrobku. Nevýhodou je vysoká pořizovací cena formy [17].

2.4.3. Odlévání

Hojně se tato metoda využívá v sériové výrobě. Nejčastěji se odlévá monomer. Nástroj se skládá z leštěných a přesně broušených skleněných forem. Do nástroje je přiveden roztavený

plast spolu s iniciátorem a UV pohlcovačem. Iniciátor vytvrzuje směr a UV pohlcovač absorbuje ultrafialové záření. Z důvodu vysoké ceny nástroje se metoda nehodí pro malosériovou nebo kusovou výrobu. Po vyjmutí je součástí odlitku vtok. Ten se musí odříznout [37].

2.5 Nekonenční technologie výroby tvarových ploch

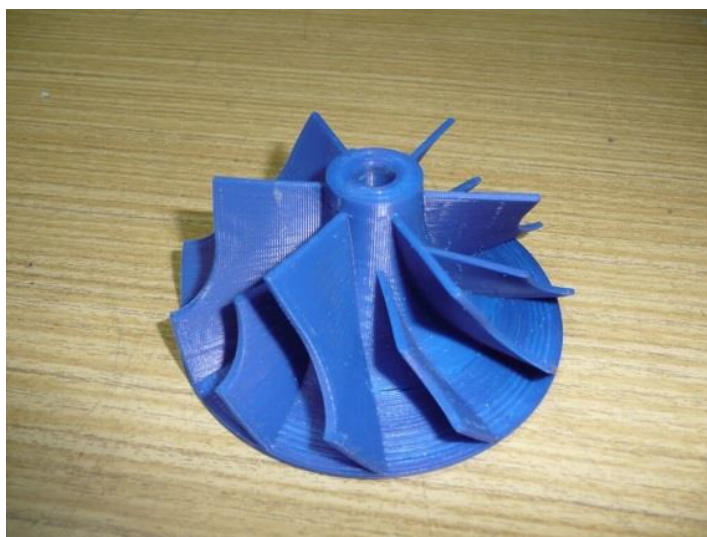
Tyto metody jsou založeny na fyzikálních nebo chemických principech.

2.5.1. Elektroerozivní obrábění

Tato technologie využívá principu elektrolýzy. Je to beztržkové obrábění. Základní požadavek na výrobek je elektricky vodivý materiál. Technologie Elektrochemické hloubení směsným elektrolytem (elektrolyt + CO₂ nebo vzduch) se využívá při výrobě zápusťek. Mezi nástrojem a obrobkem je mezera 0,05-2 mm. Touto mezerou protéká elektrolyt. Nástroje jsou z korozi-vzdorné oceli nebo mědi [12].

2.5.2. Aditivní výroba

Podstatou je postupné vrstvení nataveného materiálu. Jako materiál se používají plasty i kovy. Obchodní označení této technologie je 3D tisk. Stavební materiál je nanášen v tenkých vrstvách, které jsou spojovány lepením nebo tavením. Velká výhoda této technologie je možnost výroby velice tvarově složitých součástí (Obr. 9), které by nebylo možno vyrobit konvenčními způsoby výroby. Další výhodou je rychlost přípravy výroby. Není potřeba vyrábět přípravky na upnutí. Tato technologie se využívá pro kusovou a malosériovou výrobu. Klíčovou roli hraje ve výzkumu prototypů [16].



Obrázek 9: Součást vyrobená pomocí Aditivní výroby [22]

3 Parametry frézování ovlivňující kvalitu a jakost obrobené plochy

Přesnost výroby výše uvedených technologií je odvozena od kvality nástroje. Pro většinu, až na výjimky, se pro výrobu nástrojů používá 3D frézování. Proto v této kapitole jsou popsány podmínky frézování, které mají výrazný vliv na přesnost.

Frézy zanechávají při obrábění svou stopu na obrobeném povrchu. Tyto stopy mohou být patrné pouhým okem. Vývojem se měnil poměr mezi stavem obrobeného povrchu a výrobním procesem. Je to důsledkem neustálého vývoje řezných nástrojů jejich materiálu, frézovacích strojů, obecně lze říct komplexně technologie obrábění [25].

Dříve pro vyrobení povrchu o dokonalé jakosti povrchu a přesnosti bylo nutné použít broušení. Dnes však existují frézovací procesy, které jsou schopny potřebu broušení eliminovat. Výsledek frézování jsme schopni predikovat pomocí CAD programů. Je to však pouze teoretický odhad, který se od skutečnosti liší. Reálný výsledek je ovlivněn mnoha faktory [24].

3.1 Frézovací nástroje

Geometrie nástroje je nejdůležitějším aspektem při utváření třísky. Vliv má však i samotný materiál nástroje nebo použitý povlak. Pro kompozitní materiály a plasty má pozitivní vliv podmínka ostrého břitu. Otupený nebo negativní břit má za následek vytrhávání vláken matrice a následnou horší jakost povrchu. Opotřebený břit nástroje přímo ovlivňuje jeho geometrii a tudíž má velký vliv [26].

3.2 Upnutí nástroje

Na trhu je celá řada používaných upínacích systémů. Požadavky na ně jsou vypsány níže. Upínací systém je nutno volit v závislosti na použití. Klíčovou roli hrají také řezné podmínky, kde je důležitá řezná rychlost, tedy otáčky. Podstatný parametr pak u stopkových fréz hraje vyložení nástroje. Tuto hodnotu je žádoucí snížit na možné minimum [11].

Hlavní požadavky na upnutí nástroje:

- vystředění nástroje (zabraňuje radiálnímu házení u rotačních nástrojů);
- přenos krouticího momentu mezi držákem nástroje a nástrojem;
- rychlá a snadná výměna nástroje;
- přívod procesní kapaliny do řezné části nástroje [32]

3.3 Chlazení

Volba chlazení má velký vliv na opotřebení nástroje. Chybná volba nebo špatná aplikace může mít fatální následky. Příčinou jsou teplotní šoky. Když je nástroj v řezu, teplota je vysoká. Když v řezu není chladicí tekutina rapidně sníží jeho teplotu.

Rozvíjí se tendence chladit proudem stlačeného vzduchu, kde vzduch je přiváděn skrze vřeteno nebo tryskou. Projevuje se lepší odvod třísek než při použití chladicí emulze. Teplotní šoky pro nástroj jsou výrazné [32].

3.4 Řezné podmínky

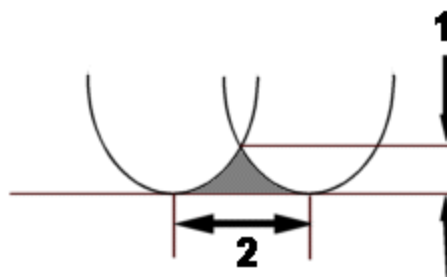
Základem pro kvalitní obrobení plochy je volba správných řezných podmínek. Řezné podmínky jsou:

- Hloubka záběru: a_p [mm]
- Posuv na zub: f_z [mm]
- Řezná rychlost: v_c [mm/min]

Optimální rozmezí těchto podmínek doporučuje výrobce nástroje. Jejich špatná volba vede ke zvýšení nákladů na obrábění, kratší životnosti nástroje, destrukci nástroje, poškození stroje a znehodnocení obráběné plochy [26, 27].

3.5 Strategie obrábění

Při volbě strategie se uvažuje křivost vyráběné plochy. Dále se uvažuje sousledné a nesousledné frézování. Krok nástroje do strany je důležitý pro výslednou drsnost povrchu. Je možné ho zadávat jako konstantu, procento překrytí nástroje nebo maximální výška drsnosti řádkování. Konstanta je číselná hodnota rozteče drah. Metoda procento překrytí nástroje je hodnota v procentech o kolik se dráhy nástroje vzájemně překrývají. Na obrázku 10 je metoda maximální výška drsnosti řádkování. Hodnota 2 znázorňuje krok do strany a hodnota 1 je maximální výška drsnosti řádkování.



Obrázek 10: Metoda maximální výška drsnosti řádkování [38]

a) Strategie kontura:

Nástroj pomocí offsetu kopíruje okraj obecné tvarové plochy. Možné je obrábět od okraje do středu a od středu do kraje.

b) Strategie řádkování:

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

c) 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.

d) 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.

3.6 Stroj

Velice podstatná je volba stroje. Stroj má přímo vliv na kvalitu obrobeného povrchu a výslednou chybu tvaru plochy. Frézovací stroje se prokazují opakovatelností a tuhostí. Klíčová je zde tuhost rámu, který zabraňuje vzniku vibrací. Další vlastností je přesnost odměřování na osách. Každý výrobce musí deklarovat opakovatelnou přesnost. V neposlední řadě ovlivňuje výsledek frézování i software, který frézovací centrum řídí.

4 Návrh etalonu

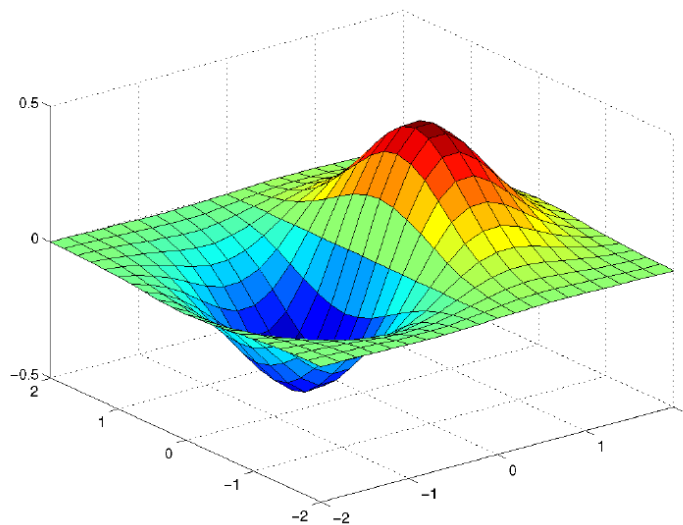
V této části práce je popsán postup parametrického programování a vytváření modelu etalonu. Podle modelu bude probíhat výroba vzorků. Vzorky budou dále mezi sebou porovnávány.

4.1 Zadání freeform plochy

Jedná se o obecnou tvarovou plochu. Zadaná je pomocí exponenciální funkce:

$$z(x, y) = x * \exp(-x^2 - y^2)$$

Grafická podoba vytvořená pomocí programu Matlab viz obrázek 11. Nutný požadavek byl, aby rozdíl mezi nejvyšším a nejnižším bodem byl maximálně 15 mm. Tuto hodnotu je důležité dodržet kvůli následné práci na měřicích strojích.



Obrázek 11: Graf exponenciální funkce

Jako materiál byla zadána slitina hliníku EN AW 2007. Její obrobiteľnosť je dobrá. V tabulce 1 jsou vlastnosti této slitiny. V tabulce 2 jsou mechanické vlastnosti slitiny EN AW 2007.

Tabulka 1: Označení a vlastnosti materiálu EN AW 2007 [33]

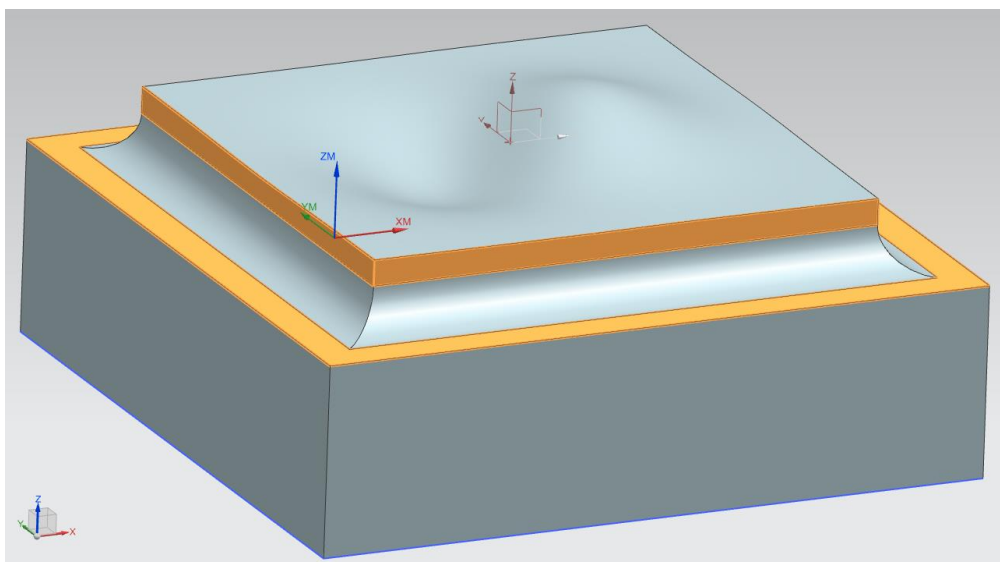
Označení EN	Hutní označení	DIN	Korozní odolnost	Obrobiteľnosť
EN AW 2007	AlCu4PbMgMn	3.1645	nížká	dobrá

Tabulka 2: Mechanické vlastnosti [33]

R _m min.	R _{p0,2}	Tažnosť A 50 mm
MPa	MPa	%
370	250	6

4.2 Návrh ploch pro vyrovnání na CCM

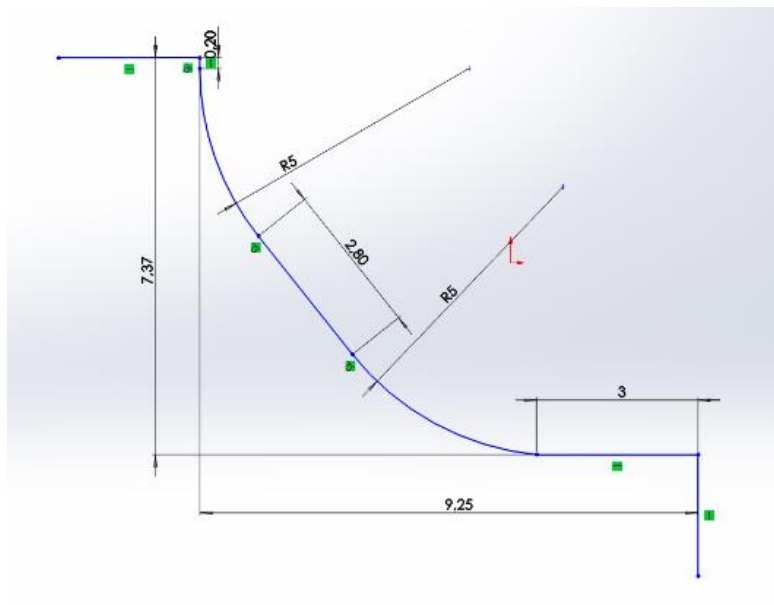
Jedním z prvních kroků při tvorbě plánu měření je vyrovnání součásti. Vyrovnání je zavedení lokálního souřadného systému. Tento lokální souřadný systém je umístěn do globálního souřadného systému stroje. Tím specifikuje polohu součásti v pracovním prostoru stroje. Pro vyrovnání součásti se používá více metod. Hlavní požadavek pro vyrovnání je odebrání všech stupňů volnosti v prostoru dané součásti. Plochy využitě pro vyrovnání jsou znázorněny oranžovou barvou na obrázku 12.



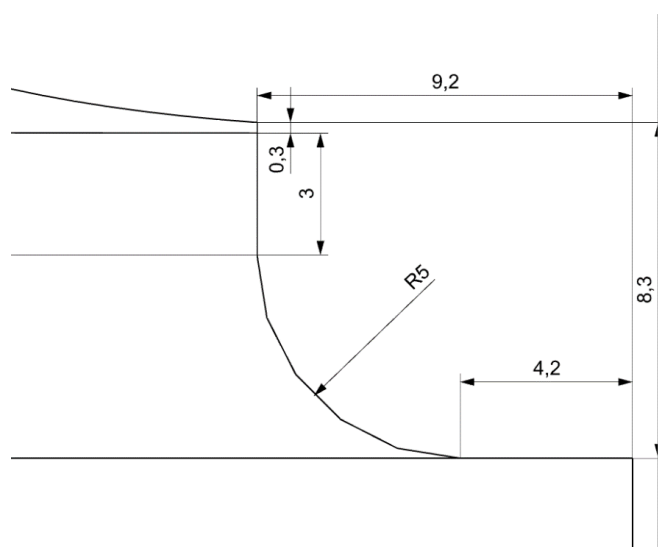
Obrázek 12: CAD model etalonu

První varianta ploch pro vyrovnání je na obrázku 13. Tento návrh vyplývá z použití destičkového nástroje. Destičková fréza oproti monolitní není schopna obrábět svislé plochy na jednu třísku. U této varianty k vyrovnání slouží šikmá a vodorovná plocha. Pomocí této varianty byl měřen vzorek 1 a 2. Ukázalo se však, že šikmá plocha není vhodná pro vyrovnání. Následně se začal používat monolitní nástroj pro dokončování. Bylo tedy nutné navrhnout další variantu ploch pro vyrovnání.

Na obrázku 14 jsou vidět rozměry ploch k vyrovnání. Jedná se o druhou variantu pro vyrovnání. Tato varianta je vhodná pro monolitní nástroj. Je výhodnější pro vyrovnání než první varianta. Rozměry 3 mm a 4,2 mm jsou určeny právě pro vyrovnání. Jejich rozměr byl volen s ohledem na průměr kuličky snímače. Poloměr R5 vyplývá z průměru nástroje, který je 10 mm.



Obrázek 13: Plochy pro vyrovnání (varianta 1)



Obrázek 14: Plochy pro vyrovnání (varianta 2)

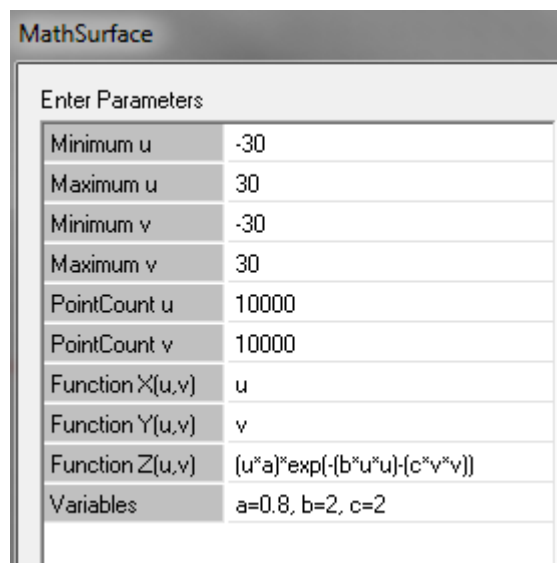
4.3 Program Rhinoceros

Rhinoceros je počítačový software, který patří mezi nejčastěji používané modeláře na světě. Hojně se používá v průmyslovém designu, architektuře nebo šperkařství. Patří do skupiny CAD programů. Program vyvinul Robert McNeel & Associates [34].

Většina CAD modelářů využívá polygonové sítě, které jsou vhodné při renderování a animaci. Na první pohled se zdá, že polygonové modelování nabízí vhodné nástroje pro modelování objektů jako jsou koule, spline nebo numbs plochy. Nastává však problém při následném převedení objektu do polygonové sítě. Polygonová síť je soubor plochých trojúhelníků, které mají za úkol aproximovat vytvořenou plochu. Při modelování obecných tvarových ploch se musíme snažit v prvopočátku, tedy při modelování minimalizovat vznikuvší chybu tvaru. Pokud již pro modelování vlivem aproximace dostaneme zkreslený (chybný) výsledek, tuto chybu již nejsme schopni odstranit. Rhinoceros je modelář ploch volného tvaru, jeho NURBS geometrie je tudíž jednou z nejrobustnějších a nejkompexnějších implementací, která je v současnosti dostupná. Proto jsem využil při modelování právě Rhinoceros [34, 35].

4.4 Modelování zadané plochy pomocí Rhinoceros a Math Plugin

Program Math Plugin je doplňková aplikace Rhinoceros. Není součástí základní verze programu. Je nutné tuto aplikaci implementovat. Slouží k výpočtu hladkých křivek třetího stupně a ploch založené na parametrických rovnicích. Obrázek 15 znázorňuje parametrická modelování zadané plochy v Math Plugin.

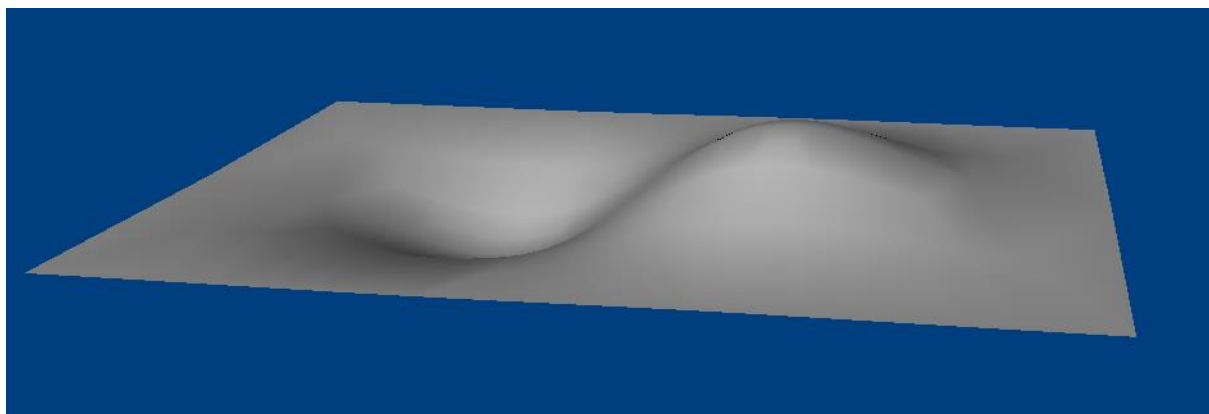


Obrázek 15: Parametrické modelování v Math Plugin

Vymodelovaná plocha je 60x60 mm. Požadavek byl, aby rozdíl mezi nejvyšším a nejnižším bodem byl maximálně 15 mm. Proto byla zadaná rovnice pomocí parametrů upravena, aby splňovala požadavek. Upravená parametrická rovnice je:

$$z(x, y) = (0,8 * x) * \exp(-(2 * x^2) - (2 * y^2))$$

Hodnota rozdílu mezi nejvyšším a nejnižším bodem na vygenerovaném modelu etalonu je 10,8 mm. Na obrázku 16 je vygenerovaná obecná tvarová plocha, která bude frézována.



Obrázek 16: Obecná tvarová plocha etalonu

4.5 Návrh polotovaru

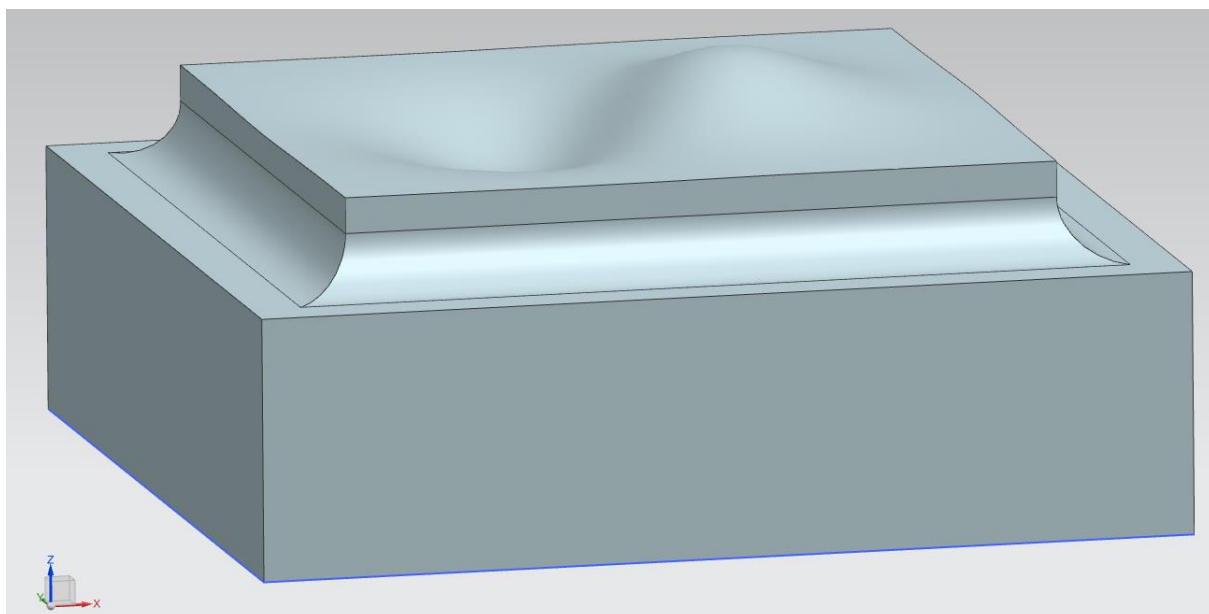
Obecná tvarová plocha má rozměry 60x60 mm. Po zohlednění ploch potřebných pro vyrovnání na CMM dostáváme rozměr 78,5x78,5 mm. Polotovar použitý pro obrábění bude mít rozměry v osách X a Y 80x80 mm. Tento přídavek je nutný pro stanovení souřadného systému v prostoru obráběcího stroje. Třetí rozměr polotovaru je různý při každém obrábění. Závisí na přídávku na upnutí a tuhosti vlastního vzorku. Přídavek pro obrábění v ose Z na vrcholu vzorku je 2 mm.

4.6 Modelování v programu Siemens NX 12.0

Vytvořenou plochu jsem převedl z programu Rhinoceros do programu Siemens NX 12.0. Software Siemens NX 12.0 (dále jen NX) se využívá v konstrukci a výrobě. Jedná se o velmi rozšířený CAD/CAM program. Jeho velikou výhodou je, že kombinuje nástroje CAD a CAM v jednom rozhraní. Díky této kombinaci je možná modelovat a následně vytvořit NC kód v jednom programu [36].

V NX jsem vymodeloval pod obecnou tvarovou plochu převedenou z Rhinoceros blok materiálu, který je určený pro upnutí a je důležitý pro vlastní tuhost výrobku. Do zmíněného bloku materiálu jsem vymodeloval plochy určené pro vyrovnání na CMM.

Následně jsem mohl přejít k vlastní tvorbě programů pro frézování. Model využitý pro práci v CAD modulu NX a pro práci v Zeiss Calypso je na obrázku 17. Model obsahuje druhou variantu ploch pro vyrovnání na CMM.



Obrázek 17: CAD model etalonu

5 Výroba vzorků

Následující kapitoly obsahují popis výrobního a měřicího zařízení. Dále popisují podmínky výroby etalonu. Bylo obrobena devět vzorků. Kombinací různých nástrojů, strategií obrábění, řezných podmínek a chlazení jsem se snažil vyrobit etalon s co nejmenší chybou tvaru obecné tvarové plochy a dobrou kvalitou povrchu.

5.1 Obráběcí centrum VMC 500

Obrábění probíhalo na frézovacím centru VMC 500 (Obr. 18). Jedná se o svislou numericky řízenou frézku. Její pracovní prostor je 500x500x500 mm. Rozsah otáček vřetene je 40–10 000 otáček za minutu. Vzhledem k umístění, konstrukci a stavu stroje není možné použít otáčky vyšší než 8000 otáček za minutu. Deklarovaná opakovaná přesnost je 0,008 mm. Upnutí obrobku bylo zajištěno pomocí strojního svěraku.



Obrázek 18: VMC 500

5.2 Frézovací nástroje

Při obrábění bylo použito několik nástrojů. Pro hrubovací práce byla použita monolitická válcová fréza V 10 A. Průměr frézy je 10 mm. Fréza má 3 zuby. Materiál frézy je povlakovaný slinutý karbid. Tato fréza je svou specifickou geometrií ostří přímo určena pro obrábění hliníkových slitin. Dále byla použita destičková fréza K 10 G (Obr. 19 vlevo). Průměr destičky je 10 mm. Převážně dokončovací práce byly prováděny monolitickou karbidovou kulovou frézou K 10 A (Obr. 19 vpravo) o průměru 10 mm. Fréza má 2 zuby. Její geometrie břítu je stejně jako u válcové frézy příznivá pro frézování hliníkových slitin. Upnutí nástrojů bylo pomocí hydraulických upínačů.



Obrázek 19: Frézovací nástroje (K 10 G vlevo, K10 A vpravo)

Tabulka 3: Specifikace nástrojů

Nástroj	V 10 A	K 10 G	K 10 A
Průměr nástroje [mm]	10	10	10
Počet břitů	3	2	2
Celková délka nástroje [mm]	72	94	67
Délka vyložení [mm]	22	44	13
Doporučená řezná rychlost [m/min]	350-500	200	400-550
Doporučený posuv na zub [mm]	0,05-0,10	0,035	0,06-0,09
Povlak	ZrCN Ultra-N	-	ZrCN Ultra-N
Výrobce	Atorn	Guhring	Atorn

5.3 Měřicí zařízení

Vyrobené vzorky byly měřeny pomocí souřadnicového měřicího stroje (CMM) Carl Zeiss UMC 1000 Carat (Obr. 20). Pracovní prostor stroje je 1000x3000x900 mm. Software pro tvorbu plánu měření a pro následné vyhodnocení bylo Zeiss Calypso 2015 6.0.28. Maximální chyba indikace měření CMM je ve 3D $2,4 + L/300 \mu\text{m}$.



Obrázek 20: Carl Zeiss UMC 1000 Carat

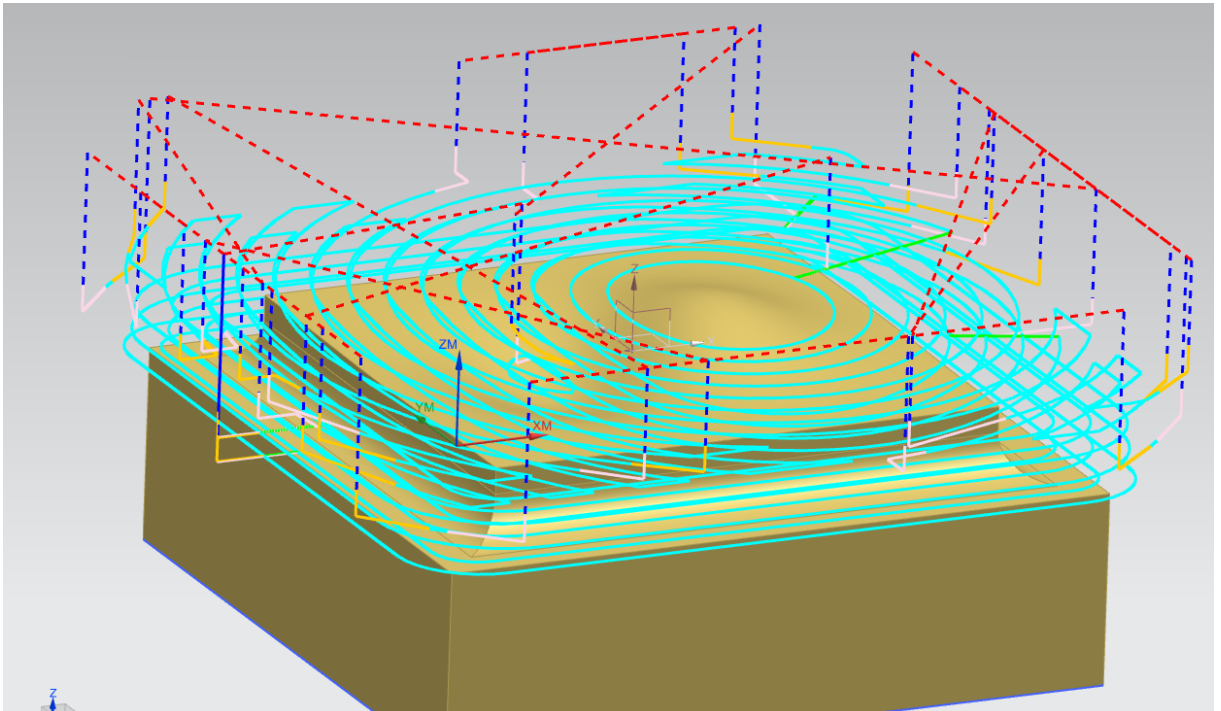


Obrázek 21: Dotykový snímač

Pro měření byl použit dotykový snímač (Obr. 21). Průměr kuličky je 3 mm. Kulička je vyrobena z materiálu SiN. Materiál SiN je vhodný pro měření hliníkových dílů. Měření každého vzorku trvalo 48 minut.

5.4 Hrubování a dohrubování

Hrubování je úkon, kdy chceme odebrat velké množství materiálu v krátkém čase. Pro hrubování jsem použil strategii CAVITY_MILL. Dráhy nástroje vytvořené programem NX jsou na obrázku 22.

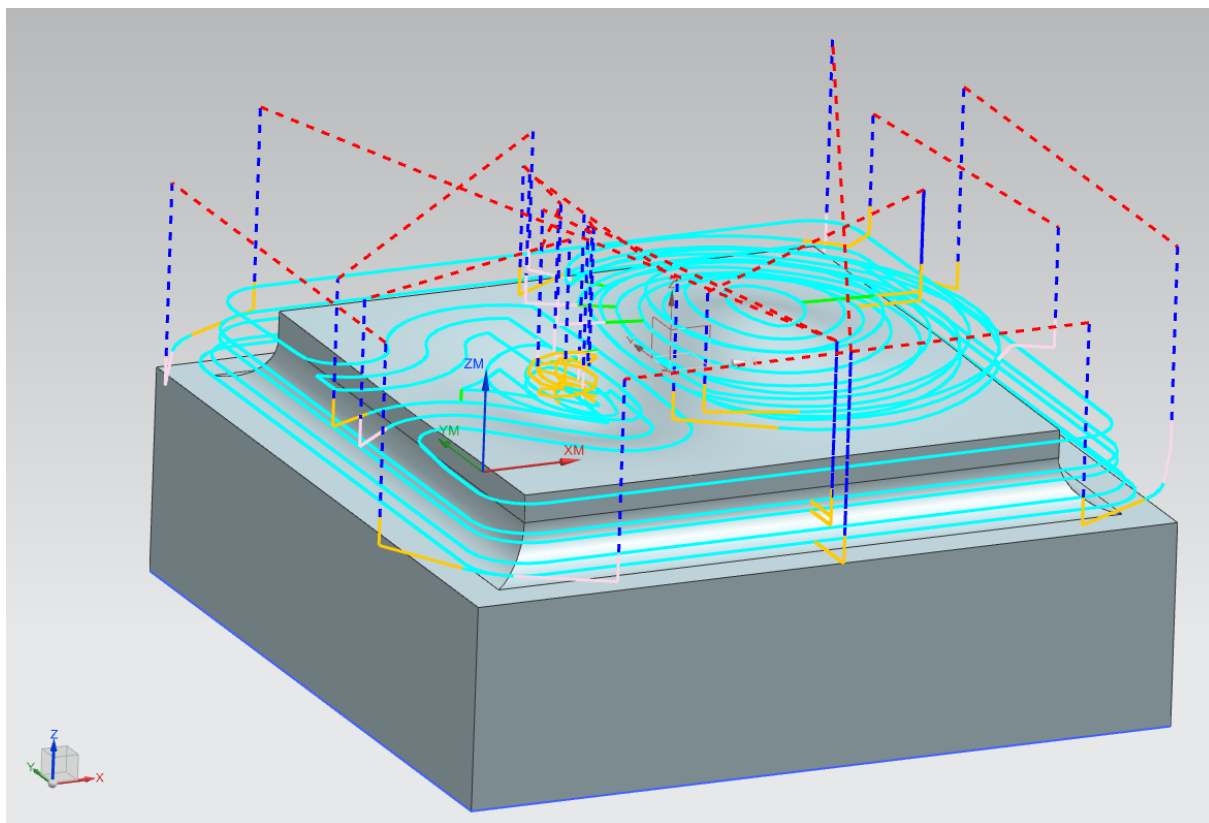


Obrázek 22: Hrubovací dráhy

Přídavek na další obrábění je 1 mm. Nástroj pro tuto strategii je válcová fréza V 10 A. Krok nástroje je volen jako procento překrytí nástroje. Překrytí v jednotlivých drahách je 40 %. Krok v ose Z je 3 mm. Teoretický čas obrábění spočítaný softwarem NX je 4 minuty 30 sekund. V následujících bodech jsou uvedeny podmínky obrábění.

- Použitý nástroj: V 10 A
- Přídavek na další operace: 1 mm
- Řezná rychlost: 200 m/min
- Otáčky vřetene: 6366 ot/min
- Posuv na zub: 0,08 mm
- Pracovní posuv: 1527,8 mm/min

Dohrubování je velice podobné jako hrubování. Také má za úkol odebrat velké množství materiálu v krátkém čase, ale další funkcí je blíže se přiblížit konstantnímu přídávku na obrábění. Pro dohrubování je použita strategie REST_MILLING. Na obrázku 23 jsou dráhy nástroje pro dohrubování.



Obrázek 23: Dohrubovací dráhy nástroje

Nástroj pro tuto strategii je stejně jako při hrubování válcová fréza o průměru 10 mm (V 10 A). Přídavek na další obrábění je stejně jako při hrubování 1 mm. Krok nástroje je volen jako procento překrytí nástroje. Překrytí v jednotlivých drahách je 40 %. Krok v ose Z je 1 mm. Teoretický čas obrábění spočítaný softwarem NX je 2 minuty 23 sekund. V následujících bodech jsou uvedeny podmínky obrábění.

- Použitý nástroj: V 10 A
- Přídavek na další operace: 1 mm
- Řezná rychlost: 200 m/min
- Otáčky vřetene: 6366 ot/min
- Posuv na zub: 0,08 mm
- Pracovní posuv: 1527,8 mm/min

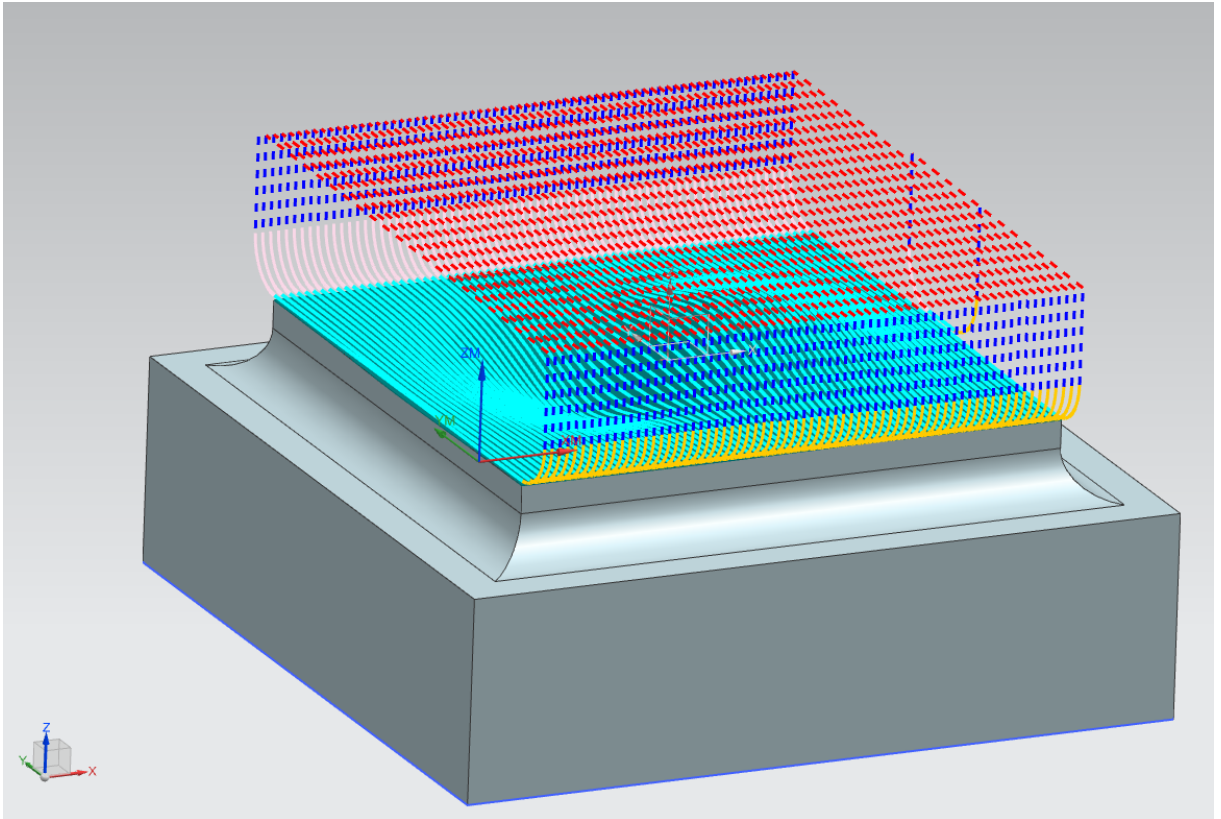
Na obrázku 24 je vyfocen vzorek po dokončení hrubování a dohrubování. Je evidentní, že bylo odebráno potřebné množství materiálu a obrobek je připraven na další obrábění. Hrubování a dohrubování je použito stejně u všech obráběných vzorků. Chlazení bylo zajištěno emulzí.



Obrázek 24: Vzorek po hrubování

5.5 Polodokončování

Polodokončování slouží primárně k odstranění nerovnoměrného přídavku materiálu pro další obrábění. Bylo docíleno konstantního přídavku na celé tvarové ploše. Použitá strategie je FIXED_CONTOUR. Na obrázku 25 jsou dráhy nástroje pro polodokončování. Parametry polodokončování byly měněny. U jednotlivých vzorků je uvedeno, jak polodokončování probíhalo.

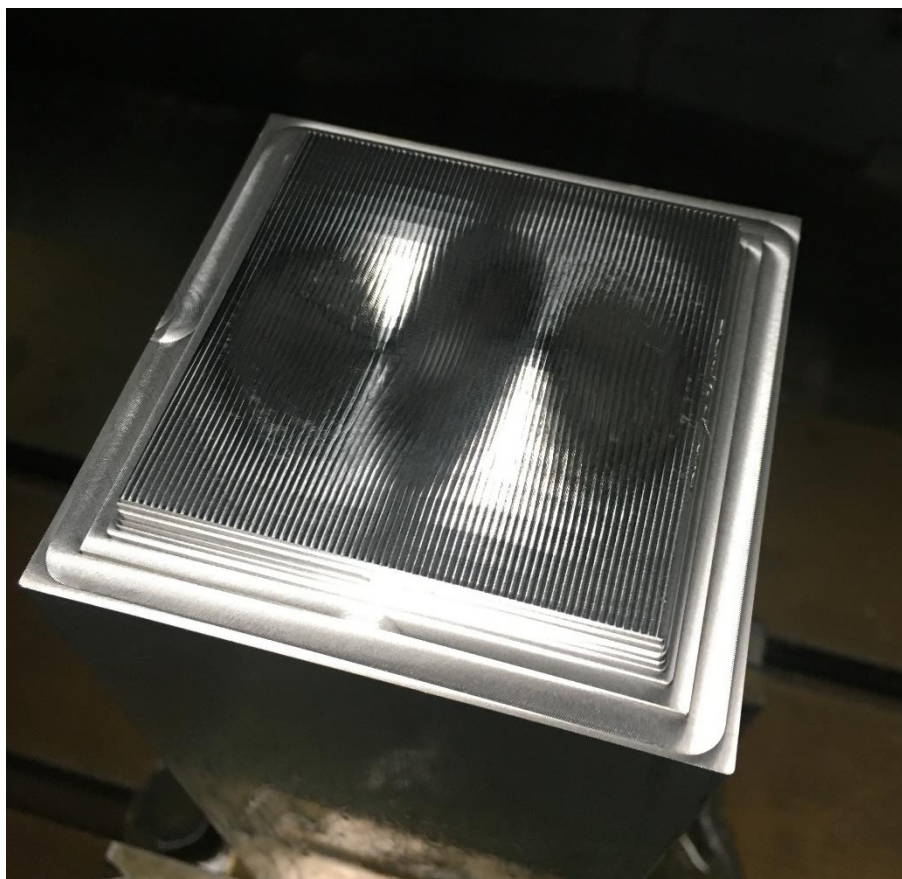


Obrázek 25: Polodokončovací dráhy nástroje

Směr řezu byl zvolen pouze CIK, aby bylo zachováno nesousledné obrábění na celé obecné tvarové ploše. Boční krok je volen jako maximální výška drsnosti řádkování. V tomto případě je to 0,02 mm. Teoretický čas obrábění spočítaný softwarem NX je 6 minut 32 sekund. V následujících bodech jsou uvedeny podmínky obrábění. Vliv polodokončení na finální výsledek obrábění je jedním z předmětů zkoumání. Chlazení bylo zajištěno emulzí.

- Použitý nástroj:
 - Otáčky vřetene: 6366 ot/min
- K 10 G nebo K 10 A
 - Posuv na zub: 0,08 mm
- Přídavek na další operace: 0,5 mm
 - Pracovní posuv: 891,2 mm/min
- Řezná rychlost: 200 m/min

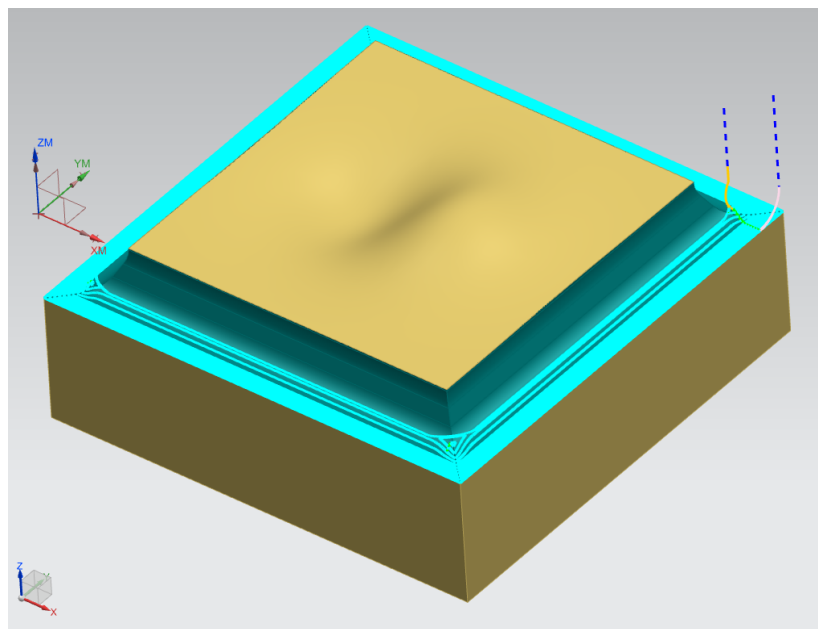
Na obrázku 26 je fotografie vzorku po dokončení polodokončování.



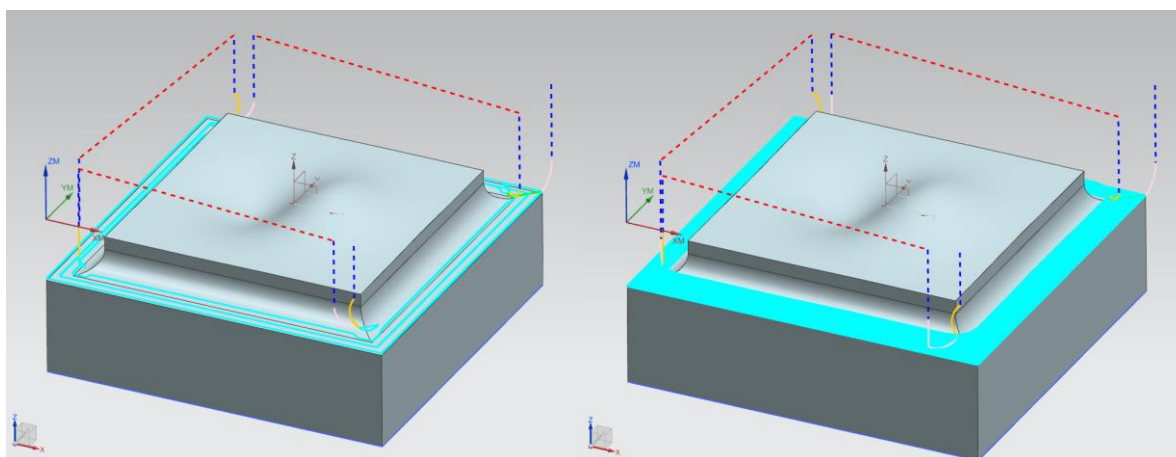
Obrázek 26: Vzorek po dokončení polodokončování

5.6 Obrábění ploch pro vyrovnání na CMM

Při obrábění vzorku 1 a 2 byla využita varianta ploch 1. Při obrábění ostatních vzorků byla využita varianta 2. Strategie pro toto obrábění byla CONTOUR_AREA. Od obrábění vzorku 3 bylo použito polodokončovací frézování. Pro toto obrábění byly vždy řezné podmínky totožné s dokončováním. Na obrázku 27 jsou dráhy nástroje pro variantu 1. Na obrázku 28 jsou hrubovací dráhy a dokončovací dráhy pro variantu 2.



Obrázek 28: Dráhy nástroje pro frézování ploch pro vyrovnání (varianta 1)



Obrázek 27: Dráhy pro frézování ploch pro vyrovnání (varianta 2)

5.7 Dokončování

Tento proces je finální. Jeho úkolem je odebrat zbývající přídavek materiálu a zanechat výsledný povrch. Má veliký vliv na integritu povrchu a chybu tvaru obecné tvarové plochy. Proto jsem se ve velké míře věnoval právě změnám jeho parametrů. V následujících bodech jsou parametry obrábění využité při obrábění jednotlivých vzorků.

5.8 Obrábění vzorků

Tato kapitola popisuje parametry obrábění jednotlivých vzorků.

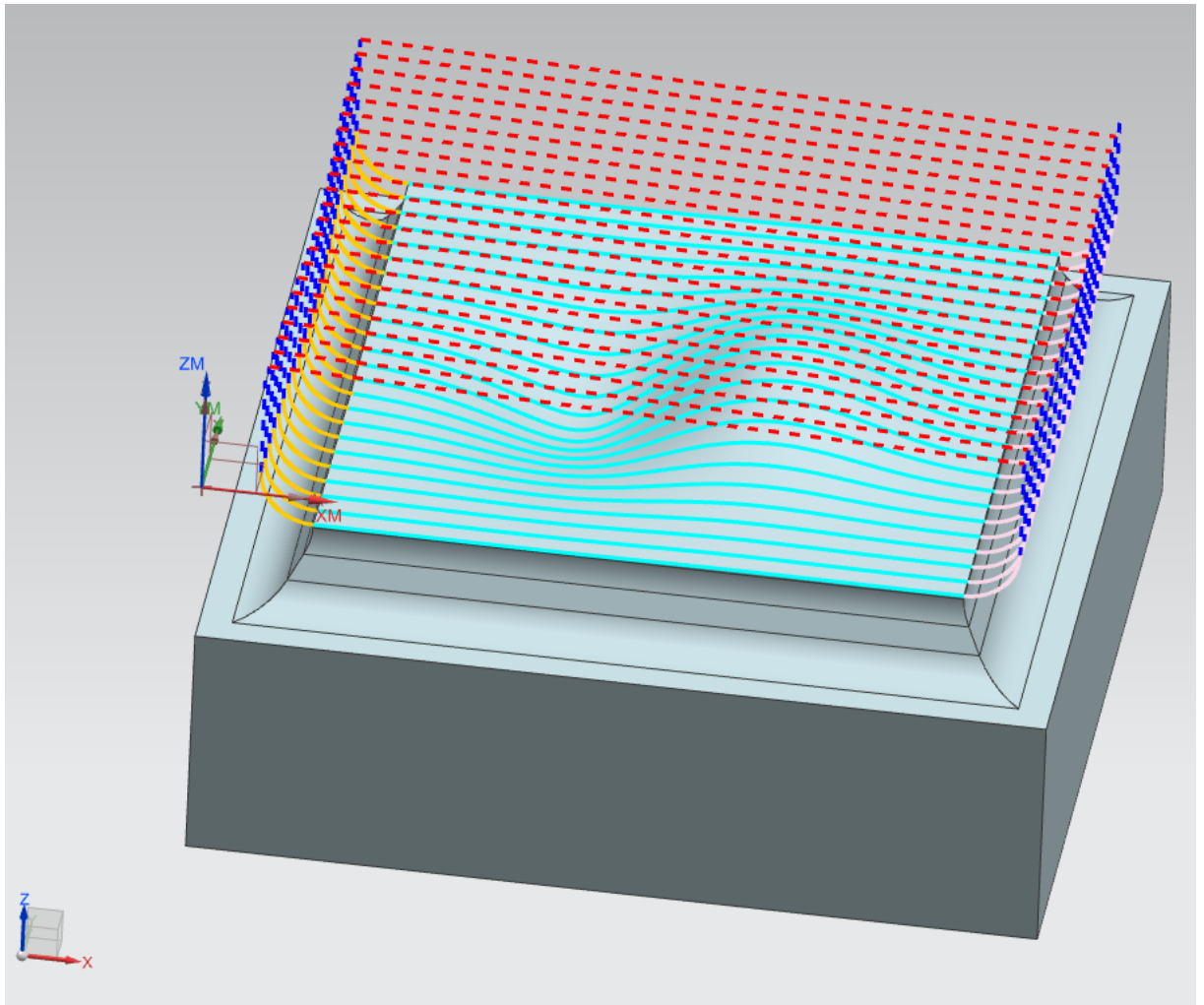
5.8.1. Obrábění vzorku 1

První vzorek byl obráběn destičkovým nástrojem K 10 G. Pro vyrovnání, a tedy model byla použita varianta 1. Použitá strategie je FIXED_CONTOUR_CIK_X. Směr řezu byl zvolen pouze CIK_X, aby bylo zachováno nesousledné obrábění na celé obecné tvarové ploše. CIK_X znamená, že nástroj přejíždí po ploše vždy s konstantní hodnotou v ose Y. Dráha nástroje je rovnoběžná s osou X. Boční krok je volen jako maximální výška drsnosti řádkování. V tomto případě je to 0,003 mm. Polodokončovací dráhy jsou rovnoběžné s osou Y. Přídavek na polodokončování je 0,5 mm.

Vlivem velkého vyložení kulové frézy docházelo při dokončování ke značnému chvění. Nejvíce chvění bylo při frézování vrcholu a prohlubně. Toto chvění se projevovalo zvýšeným hlukem stroje. Bylo tedy nutné změnit nástroj pro dokončování.

- | | |
|--|---|
| • Použitá strategie:
FIXED_CONTOUR_CIK_X | • Posuv na zub pro dokončování:
0,035 mm |
| • Dokončovací nástroj: K 10 G | • Pracovní posuv pro dokončování:
445,6 mm/min |
| • Řezná rychlost pro dokončování:
200 m/min | • Teoretický čas dokončování:
32 min 16 s |
| • Otáčky vřetene pro dokončování:
6366 ot/min | |

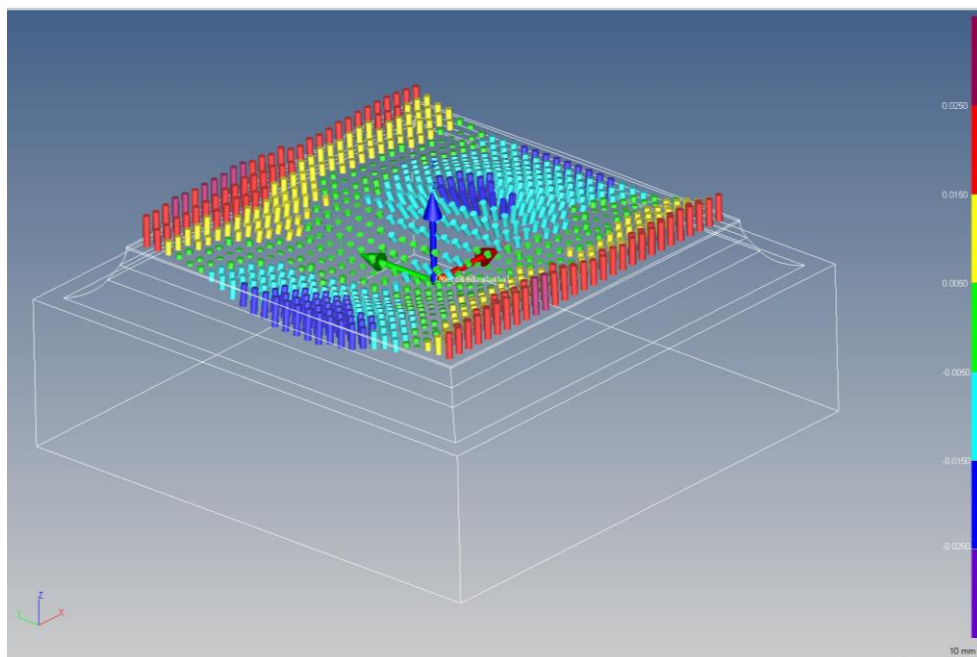
Obrázek 29 znázorňuje dráhy nástroje. Rozteč znázorněných drah neodpovídá realitě. Obrázek slouží pouze pro znázornění strategie. Ve skutečnosti mají dráhy mnohem menší rozteč. Pokud by byly dráhy na obrázku skutečné, splynuly by v modrou plochu.



Obrázek 29: Dráhy strategie FIXED_CONTOUR_CIK_X

Vyhodnocení vzorku 1

Ve velké míře se projevilo chvění nástroje. Toto chvění bylo způsobeno velkým vyložení. Na obrázku 30 je vidět grafické znázornění naměřené chyby tvaru. Hodnota naměřené chyby tvaru po připsování je 0,0561 mm. Projevilo se zde prohnutí způsobené nesprávným upnutím.



Obrázek 30: Průběh chyby tvaru vzorku 1

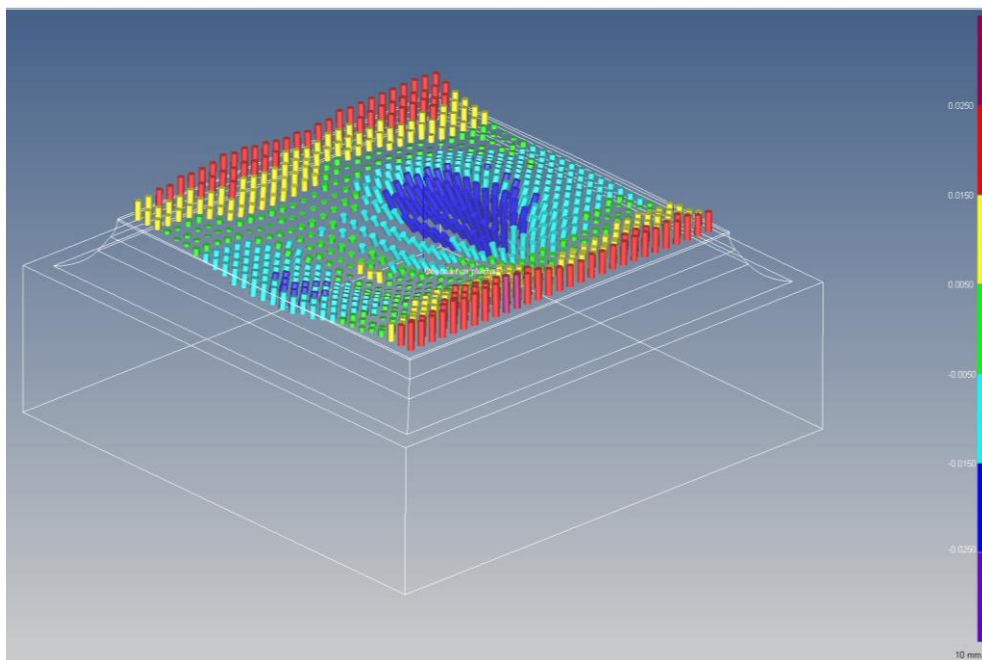
5.8.2. Obrábění vzorku 2

Druhý vzorek byl obráběn monolitním nástrojem K 10 A. Strategie byla zachována z předchozí varianty. Stejně tak byl zachován boční krok nástroje. Výrazně byly navýšeny řezné podmínky. Následkem bylo zkrácení frézovacího času na polovinu. Polodokončovací dráhy jsou rovnoběžné s osou Y. Přídavek na polodokončování je 0,5 mm.

- Použitá strategie:
FIXED_CONTOUR_CIK_X
- Dokončovací nástroj pro dokončování: K 10 A
- Řezná rychlost pro dokončování:
250 m/min
- Otáčky vřetene pro dokončování:
7958 ot/min
- Posuv na zub pro dokončování:
0,06 mm
- Pracovní posuv pro dokončování:
954,9 mm/min
- Teoretický čas dokončování:
15 min 54 s

Vyhodnocení vzorku 2

Vzhledem k připravenému polotovaru jsem použil stejné upnutí jako v prvním případě. Rozhodující byla změna nástroje a řezných podmínek. Hodnota naměřené chyby tvaru po připosování je 0,0560 mm. Chvění bylo eliminováno. Čas obrábění se zkrátil na polovinu.



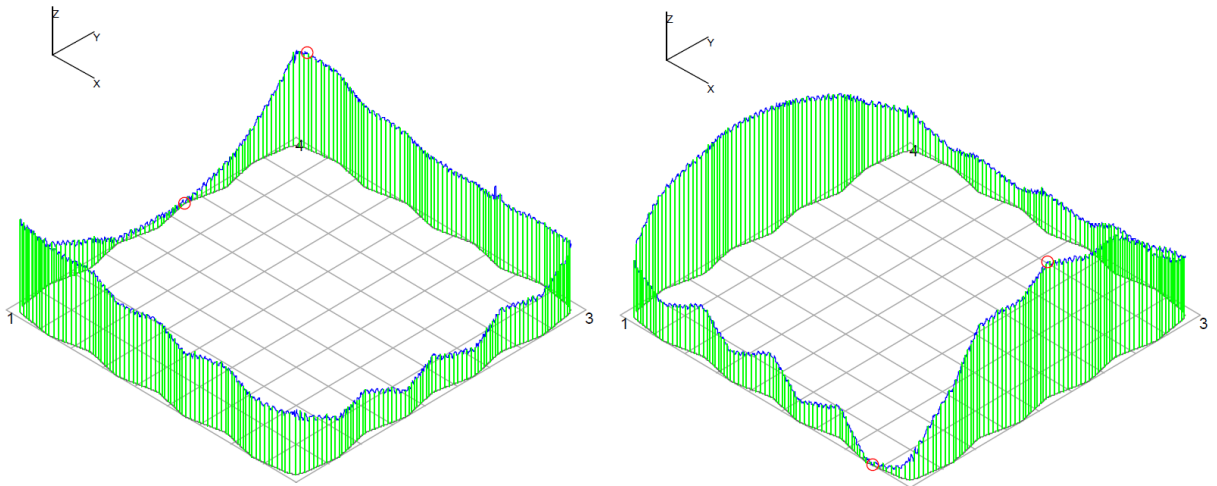
Obrázek 31: Průběh chyby tvaru vzorku 2

Způsob upnutí

Při obrábění prvního a druhého vzorku bylo použito upnutí ve svěráku. Tloušťka polotovaru byla 25 mm.

Vlivem upínací síly svěráku došlo k prohnutí celého vzorku. Následným uvolněním ze svěráku došlo k deformaci materiálu. Tato deformace se projevila v naměřených hodnotách. Nejvíce patrné to bylo v rovinnosti plochy pro vyrovnání.

Pro ověření teorie, že příčinou zkreslených výsledků je velká síla upnutí, byl proveden pokus na CMM. Na vzorku 2 byla dvakrát měřena rovinnost plochy pro vyrovnání. Pokaždé byl vzorek upnut na stole CMM ve svěráku. Poprvé byla pro upnutí vyvinuta malá síla. Pouze taková, aby se vzorek při měření nemohl pohybovat. Při druhém měření byla pro upnutí vyvinuta maximální síla na klíče svěráku. Utahovací síla svěráku působila ve směru osy Y. Naměřené rovinnosti ploch jsou na obrázcích 32. Při upnutí malou silou byla rovinnost 0,023 mm. Při upnutí velkou silou byla rovinnost 0,041 mm. Výsledkem je, že při použití větší síly vzrostla chyba rovinnosti dvojnásobně.

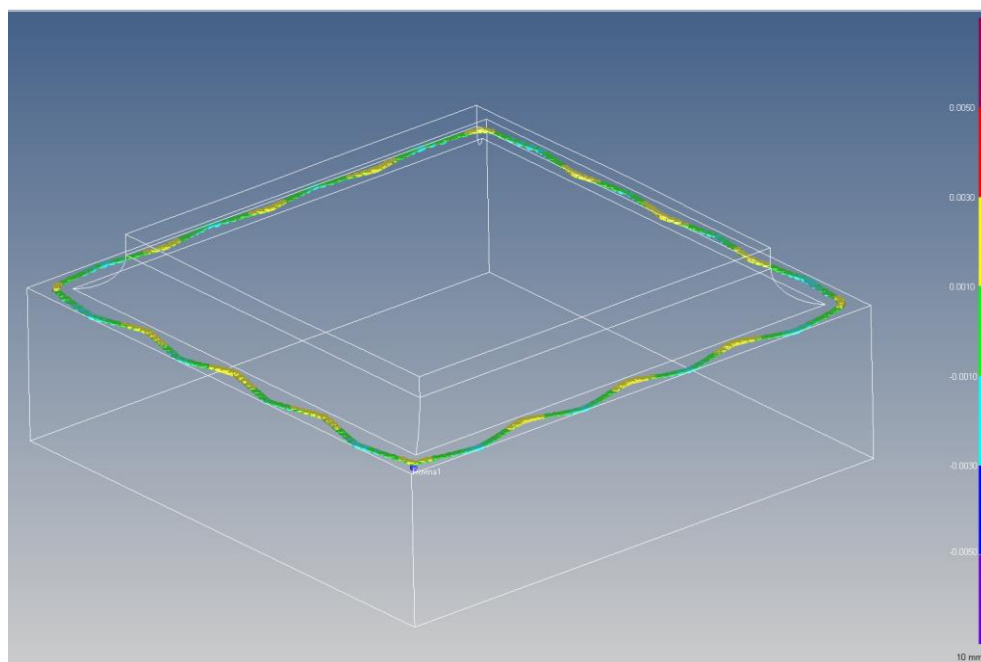


Obrázek 32: Rovinnost vzorku 2 (malá síla upnutí vlevo, velká síla upnutí vpravo)

Z těchto výsledků je patrné, že bylo nutné změnit způsob upnutí ve stroji. Navrženo bylo několik možností. Zaprvé, obrobek pomocí šroubů připevnit k ocelové desce. Následně tuto desku upnout do svěráku. Zadruhé, již zmíněnou ocelovou desku připevnit pomocí upínek ke stolu stroje. Zatřetí, použít blok materiálu o rozměrech 80x80x400 mm. Tento blok byl upnut do svěráku a obráběn. Vlivem velkého rozměru polotovaru, nebyla utahovací síla svěráku podstatná. Po naměření byl obrobený vzorek pomocí pásové pily oddělen od bloku. Tím mohl být polotovar znovu použit pro další obrábění.

Pro třetí návrh jsem se rozhodl kvůli časové náročnosti předchozích. Jelikož bylo potřeba obrábět poměrně velké množství vzorků bylo nežádoucí prodlužovat část přípravy polotovaru. Pokud bych chtěl využít upnutí pomocí ocelové desky, bylo by nutné vrtat čtyři díry a následně je závitovat v každém vzorku. Oproti tomu odříznutí obrobeného vzorku trvalo několik málo minut.

Vzorek 3 byl již obráběn z bloku a jeho rovinnost byla 0,0067 mm. Grafické znázornění rovinnosti vzorku 3 je na obrázku 33.



Obrázek 33: Rovinnost vzorku 3

5.8.3. Obrábění vzorku 3

Došlo ke změně modelu. Jedná se o variantu 2 ploch pro vyrovnání. Krok nástroje je stále maximální výška drsnosti řádkování a to 0,003 mm. Polodokončovací dráhy jsou rovnoběžné s osou Y. Přídavek na polodokončování je 0,3 mm.

Změnil se i způsob obrábění ploch pro vyrovnání. Bylo přidáno polodokončování. Obrábění ploch pro vyrovnání bylo pomocí nástroje K 10 A.

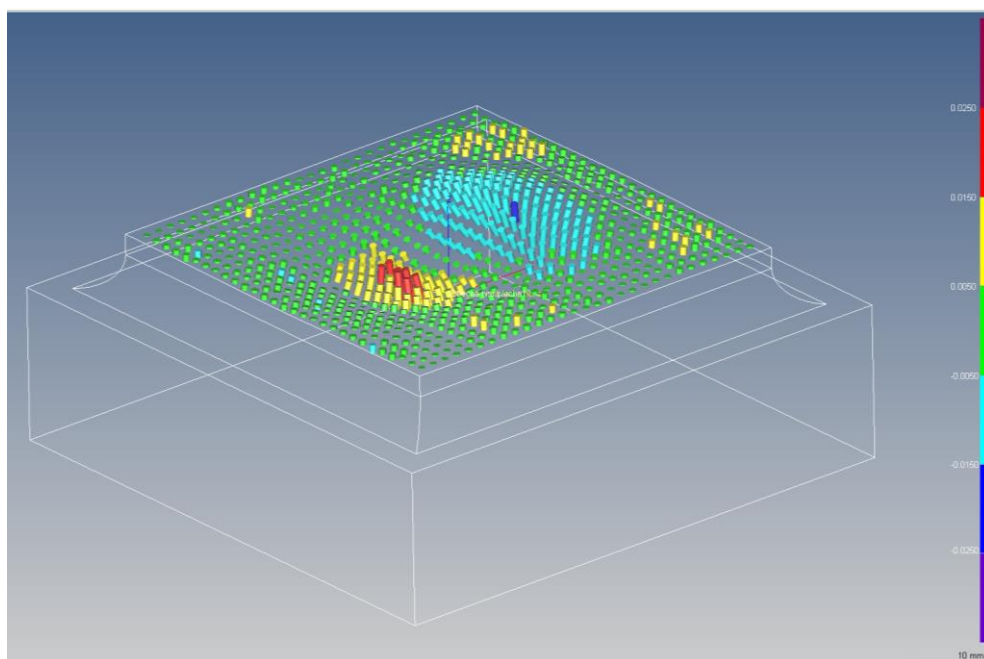
Změnil se polotovar a způsob upnutí. Upnutí bylo stále pomocí svěráku, ale polotovar byl blok materiálu 80x80x400 mm.

- Použitá strategie:
FIXED_CONTOUR_CIK_X
- Dokončovací nástroj: K 10 A
- Řezná rychlost pro dokončování:
250 m/min
- Otáčky vřetene pro dokončování:
7958 ot/min
- Posuv na zub pro dokončování:
0,06 mm
- Pracovní posuv pro dokončování:
954,9 mm/min
- Teoretický čas dokončování:
15 min 54 s

Vyhodnocení vzorku 3

Na první pohled z obrázku 34 je patrné, že změna způsobu upnutí výrazně přispěla ke zlepšení výsledku. Na obecné tvarové ploše již není patrný vliv upínací síly svěráku. Hodnota naměřené chyby tvaru po připasování je 0,0399 mm.

Dle očekávání kritické oblasti jsou vrchol a prohlubeň. Tam můžeme najít největší odchylky. Na vrcholu je záporná hodnota odchylek a v prohlubni je hodnota odchylek kladná.



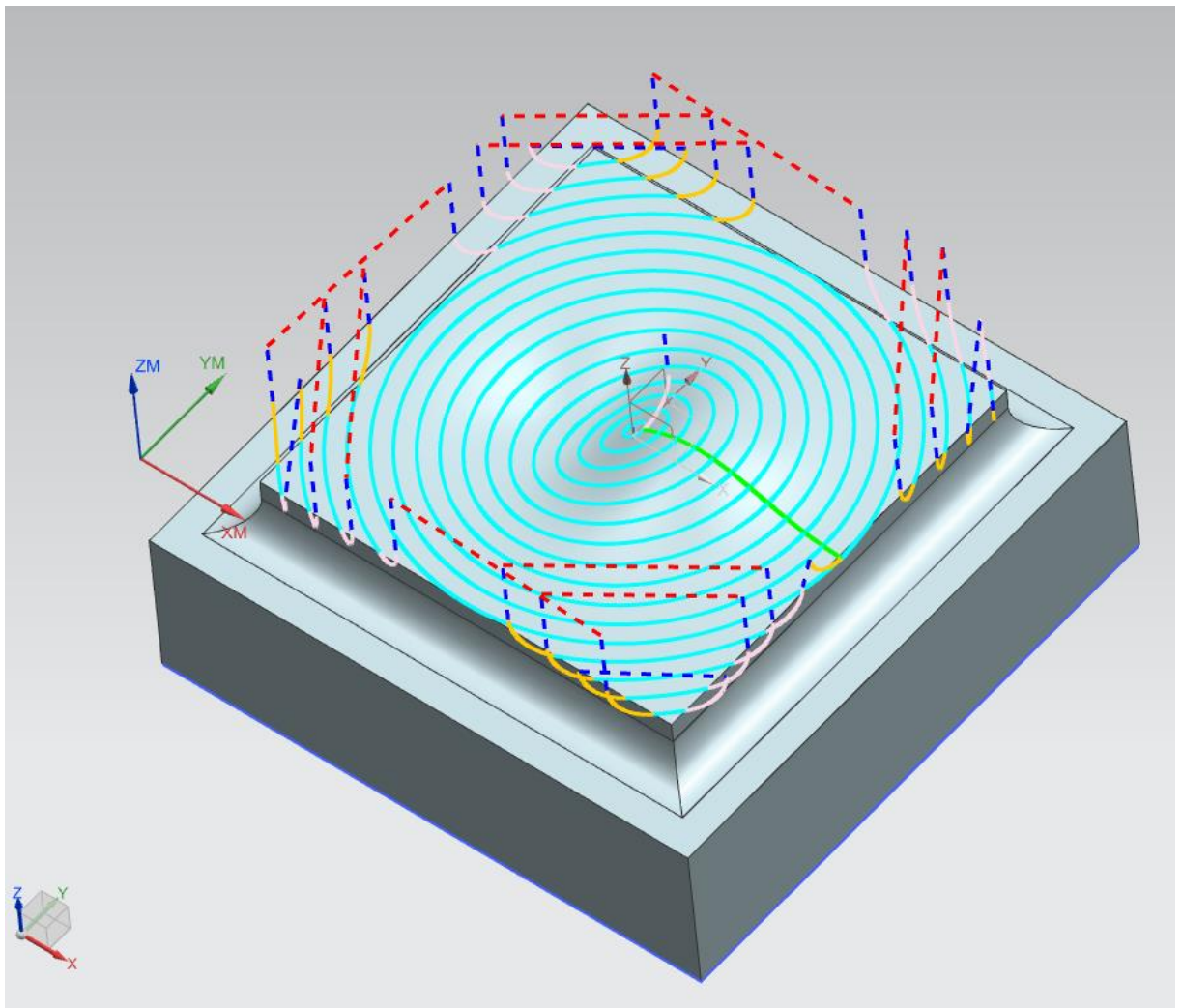
Obrázek 34: Průběh chyby tvaru vzorku 3

5.8.4. Obrábění vzorku 4

Stále je používán nástroj K 10 A. Změněna byla strategie obrábění. Použitá strategie je FIXED_CONTOUR_Soustředné_CIK. Jelikož se jedná o CIK je stále zachováno nesusledné frézování. Dráhy nástroje jsou soustředné kružnice. Střed těchto kružnic je ve středu vzorku. Nástroj přejíždí z jedné dráhy na druhou při stálém kontaktu s materiálem. Tato skutečnost by mohla způsobit rýhu na obecné tvarové ploše. Čas obrábění klesl o více než minutu. Boční krok nástroje se zadává pomocí maximální výšky drsnosti řádkování. Stále je tato hodnota 0,003 mm. Polodokončovací dráhy jsou rovnoběžné s osou Y. Přídavek na polodokončování je 0,5 mm.

- Použitá strategie:
FIXED_CONTOUR_Soustředné_CIK
- Dokončovací nástroj pro dokončování:
K 10 A
- Řezná rychlost pro dokončování:
250 m/min
- Otáčky vřetene pro dokončování:
7958 ot/min
- Posuv na zub pro dokončování:
0,06 mm
- Pracovní posuv pro dokončování:
954,9 mm/min
- Teoretický čas dokončování:
14 min 23 s

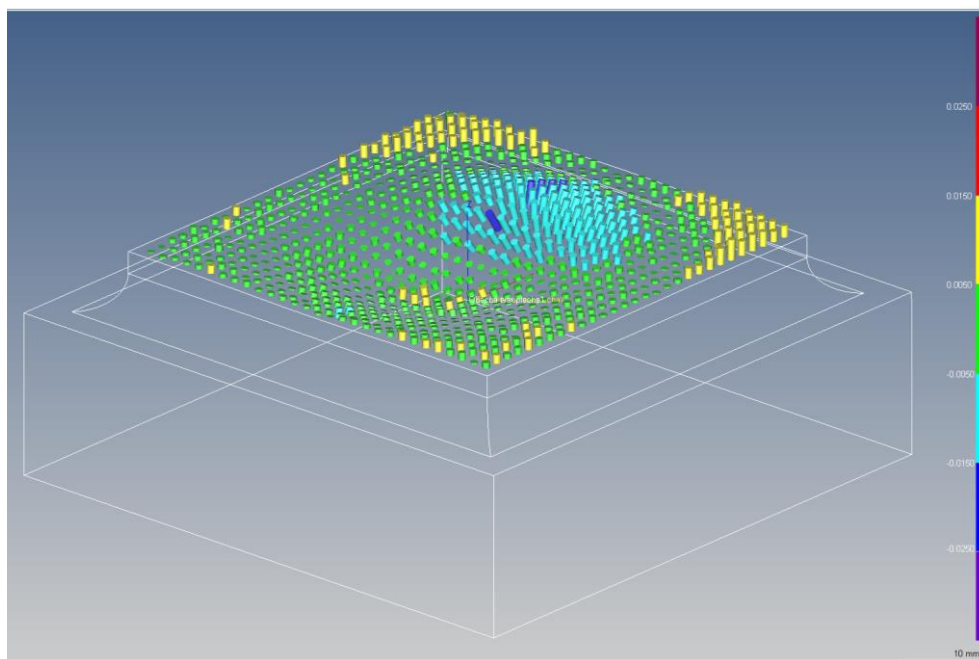
Obrázek 35 znázorňuje dráhy nástroje. Rozteč znázorněných drah neodpovídá realitě. Obrázek slouží pouze pro znázornění strategie. Ve skutečnosti mají dráhy mnohem menší rozteč. Pokud by byly dráhy na obrázku skutečné, splynuly by v modrou plochu.



Obrázek 35: Dráhy strategie FIXED_CONTOUR_Soustředné_CIK

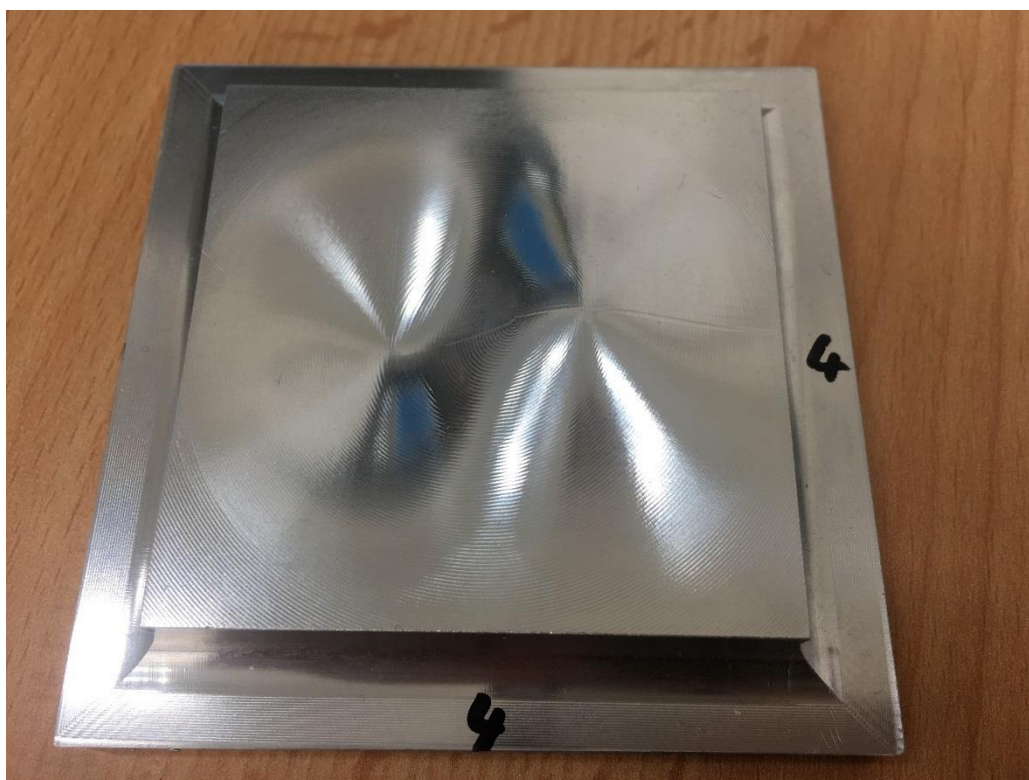
Vyhodnocení vzorku 4

Na povrchu tvarové plochy je patrná rýha. Rýha je vidět pouhým okem. To je nevhodné vzhledem k potřebě celistvosti obrobené plochy. Na obrázku 36 je vidět několik tmavě modrých bodů, které jsou naměřeny ve zmíněné rýze. Rýha vznikla propojováním jednotlivých kruhových drah nástroje. Hodnota naměřené chyby tvaru po připsování je 0,0397 mm. V rozích plochy jsou také naměřeny větší odchylky tvaru. Prohlubeň nevykazuje tak markantní chybu jako v předchozích měřeních. Největší naměřená hodnota odchylky je -0,0198 mm.



Obrázek 36: Průběh chyby tvaru vzorku 4

Na obrázku 37 je fotografie vzorku 4. Je zde patrná již zmíněná rýha.



Obrázek 37: Vzorek 4

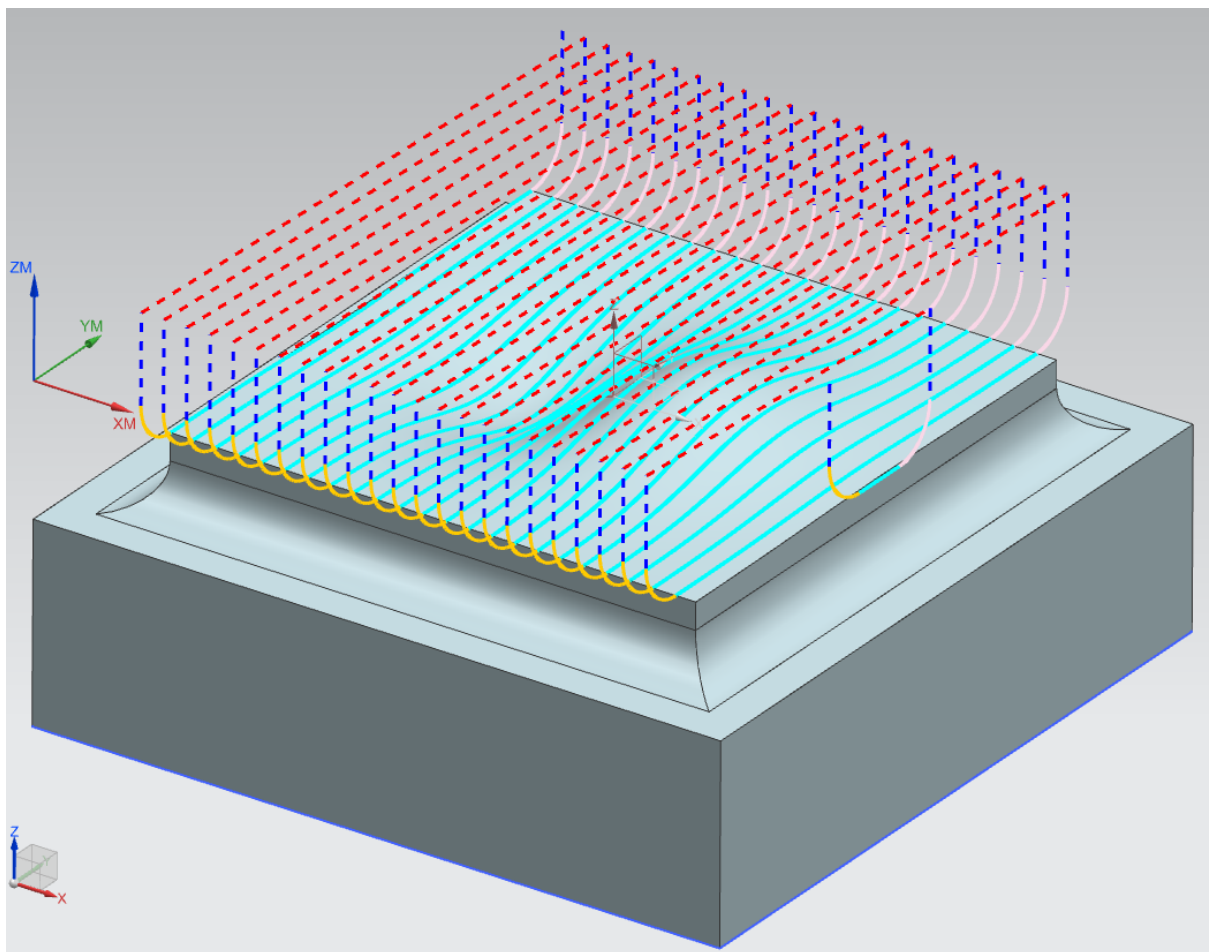
5.8.5. Obrábění vzorku 5

Strategie při obrábění vzorku 5 je FIXED_CONTOUR_CIK_Y. Je zachováno frézování CIK. Dokončovací dráhy jsou rovnoběžné s osou Y. Jsou tedy otočené o 90° oproti předchozím. Snaha byla odstranit velkou chybu tvaru, která vzniká v prohlubni a na vrcholu.

Aby byl zachován koncept vztahu polodokončovacích a dokončovacích drah jsou polodokončovací dráhy rovnoběžné s osou X. Příklad na polodokončování je 0,5 mm.

- Použitá strategie:
FIXED_CONTOUR_CIK_Y
- Dokončovací nástroj: K 10 A
- Řezná rychlost pro dokončování:
250 m/min
- Otáčky vřetene pro dokončování:
7958 ot/min
- Posuv na zub pro dokončování:
0,06 mm
- Pracovní posuv pro dokončování:
954,9 mm/min
- Teoretický čas dokončování:
15 min 52 s

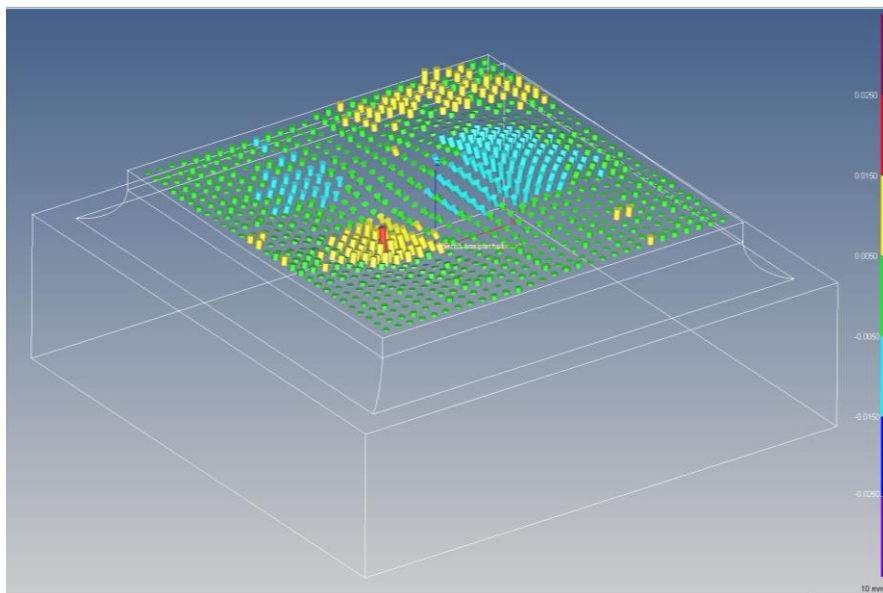
Obrázek 38 znázorňuje dráhy nástroje. Rozteč znázorněných drah neodpovídá realitě. Obrázek slouží pouze pro znázornění strategie. Ve skutečnosti mají dráhy mnohem menší rozteč. Pokud by byly dráhy na obrázku skutečné, splynuly by v modrou plochu.



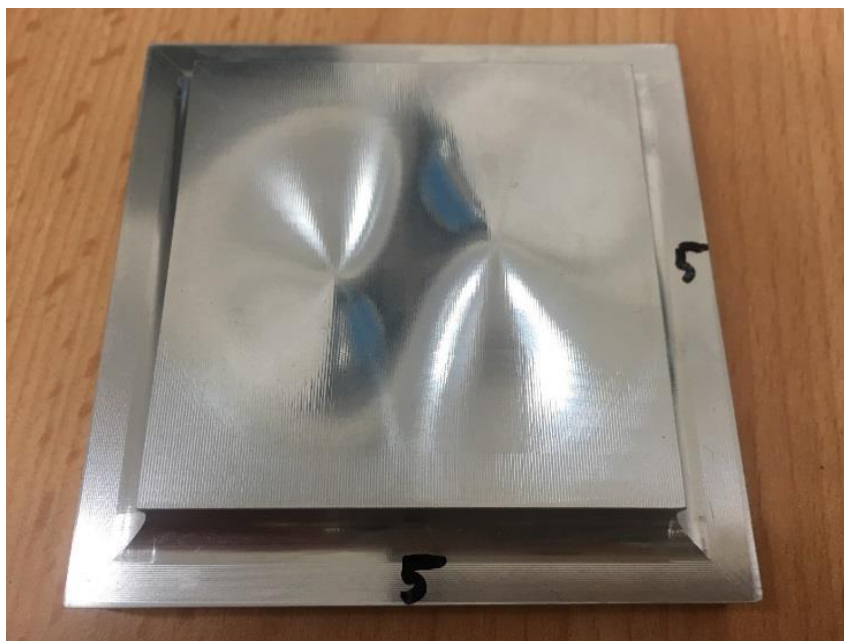
Obrázek 38: Dráhy strategie FIXED_CONTOUR_CIK_Y

Vyhodnocení vzorku 5

Hodnota naměřené chyby tvaru po připasování je 0,0375 mm. Z obrázku 39 je patrné, že otočení drah o 90° nepřineslo lepší výsledek než předchozí obrábění. Stále hodnotu chyby tvaru ovlivňuje nejvíce pouze jeden bod, který je na obrázku 39 červený. Větší hodnoty odchylek nacházíme jak na vrcholu, tak v prohlubni. Na obrázku 40 je fotografie vzorku 5.



Obrázek 40: Průběh chyby vzorku 5



Obrázek 39: Vzorek 5

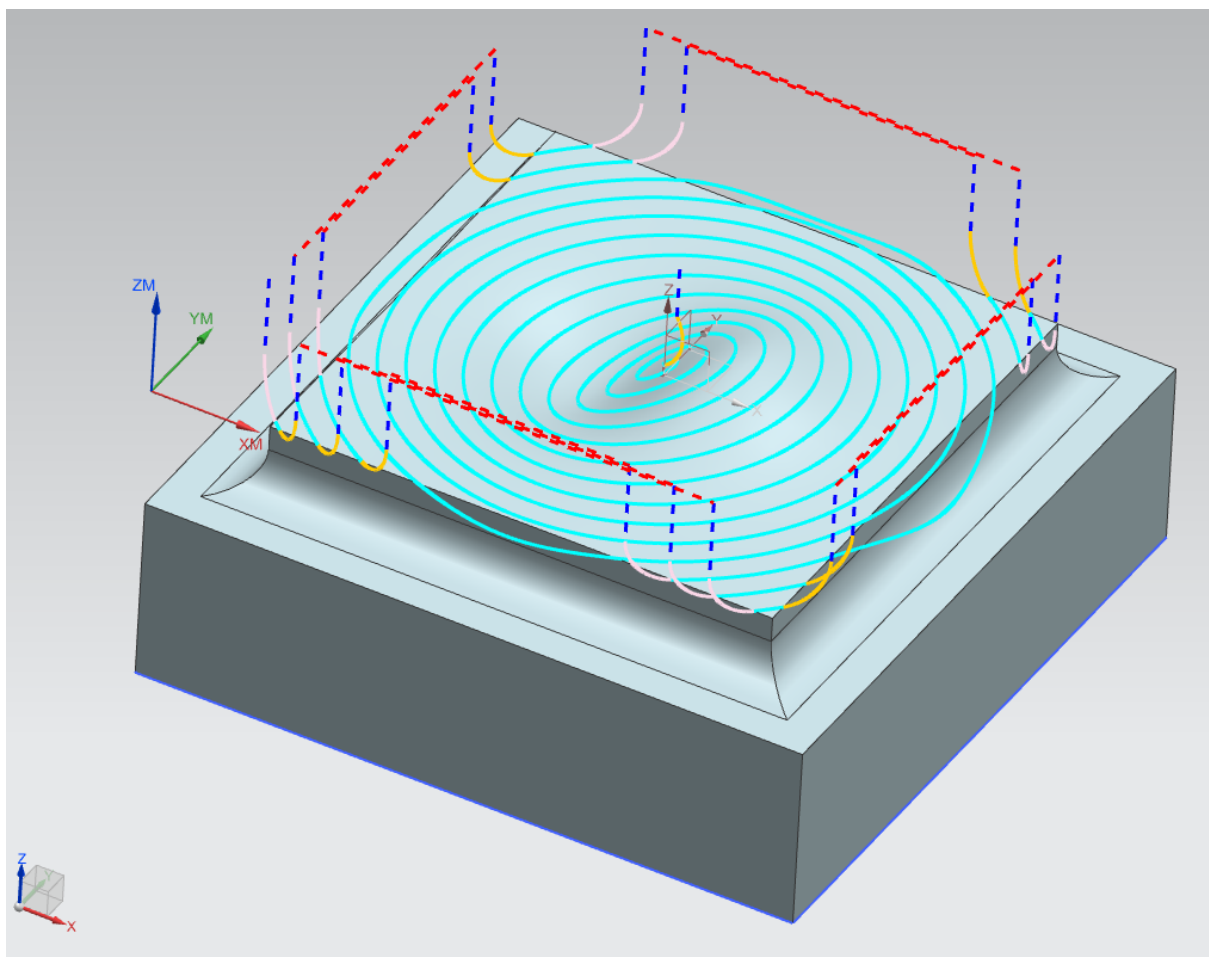
5.8.6. Obrábění vzorku 6

Vzorek 6 reaguje na problém vzniknuvší rýhy na obecné tvarové ploše. Tato rýha vznikla přejezdem nástroje na další kružnici. Proto byla použita strategie FIXED_CONTOUR_Spirála. Spirála začíná ve středu součásti a postupuje do krajů. Tím, že se jedná o spirálu je zachován

nepřetržitý kontakt nástroje s materiálem. Boční krok nástroje se u této strategie zadává pomocí překrytí nástroje. Překrytí je 3,5 %. Polodokončovací dráhy jsou rovnoběžné s osou Y. Přídavek na polodokončování je 0,5 mm.

- Použitá strategie:
FIXED_CONTOUR_Spirála
- Dokončovací nástroj: K 10 A
- Řezná rychlost pro dokončování:
250 m/min
- Otáčky vřetene pro dokončování:
7958 ot/min
- Posuv na zub pro dokončování:
0,06 mm
- Pracovní posuv pro dokončování:
954,9 mm/min
- Teoretický čas dokončování:
14 min 23 s

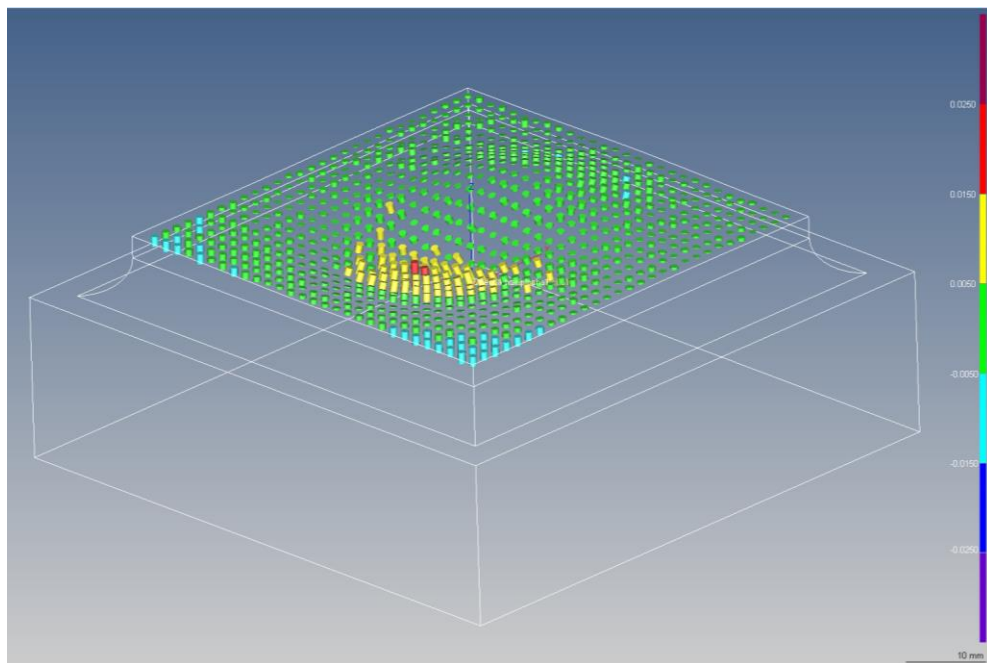
Obrázek 41 znázorňuje dráhy nástroje. Rozteč znázorněných drah neodpovídá realitě. Obrázek slouží pouze pro znázornění strategie. Ve skutečnosti mají dráhy mnohem menší rozteč. Pokud by byly dráhy na obrázku skutečné, splynuly by v modrou plochu.



Obrázek 41: Dráhy strategie FIXED_CONTOUR_Spirála

Vyhodnocení vzorku 6

Hodnota naměřené chyby tvaru po připasování je 0,0343 mm. Na obrázku 42 vidíme, že většina bodů jsou zelené. To znamená, že jsou v rozmezí +0,005 a -0,005 mm. To je velice malé rozmezí vzhledem k tomu, že se jedná o obecnou plochu. Největší problém je stále prohlubeň. Zde jsou dva červené body, které jsou v rozmezí +0,015 až +0,025 mm. Z těchto dvou bodů je největší naměřená hodnota odchylky 0,0171 mm.



Obrázek 42: Průběh chyby tvaru vzorku 6

5.8.7. Obrábění vzorku 7

Byl zmenšen krok nástroje do strany. Stejně jako u vzorku 6 se zadává jako procento překrytí nástroje. Hodnota byla upravena na 3 %. Strategie FIXED_CONTOUR_Spirála je zachována.

Korekce na délku nástroje se prováděla pomocí nástrojové sondy Renishaw TS27R. Pro přesné obrábění bylo zkoumáno, zda nevzniká chyba v korekci na délku. V tabulce 4 jsou uvedeny naměřené délky nástrojů. Hodnoty jsou v mm. Tyto hodnoty jsou zjištěny pomocí nástrojové sondy. Délky byly naměřeny před obráběním a po dokončení celého obrábění. Poté byl nástroj V 10 A změřen, vyjmut z vřetene a poté znovu upnut a změřen.

Tabulka 4: Korekce na délku nástrojů

	Před frézováním	Po frézování	Přeupnutí
V 10 A	106,6045	106,6426	-
K 10 G	126,2229	126,2658	-
K 10 A	99,7085	99,7534	99,7517

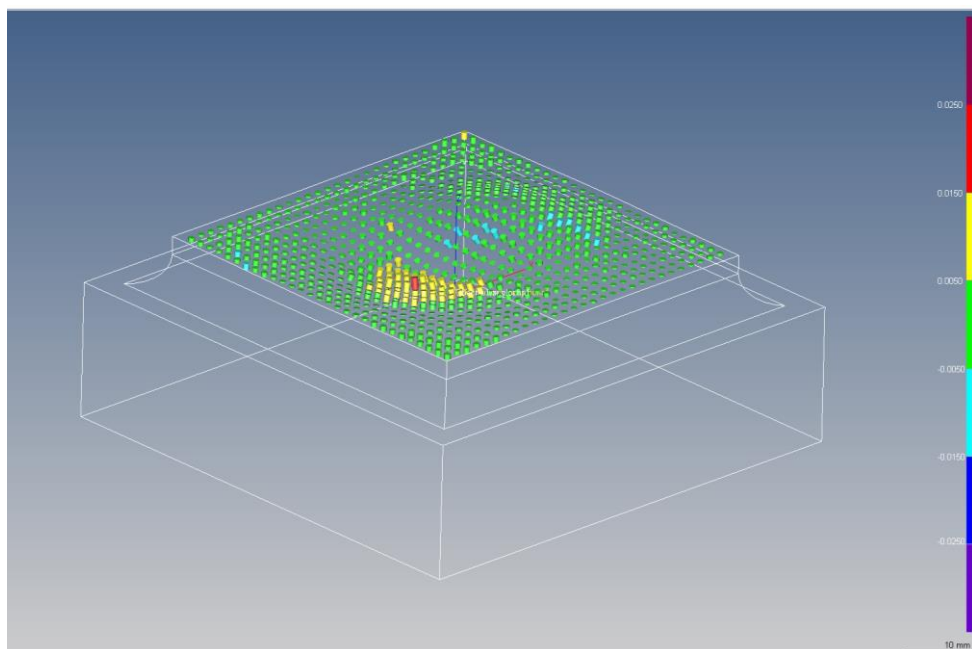
Z tabulky 4 je patrné, že pouhým vyjmutím a znovu upnutím nástroje vznikne chyba v délce 17 μm . Hodnota je tak malá, že se blíží rozpoznávací schopnosti sondy. Nebylo tedy možné odhalit přesnou hodnotu. Chyba byla eliminována tím, že celé dokončování bylo provedeno na jedno upnutí jednoho nástroje.

Pro polodokončení byl použit nástroj K10 A, tedy stejný nástroj jako pro dokončování. Vzniknuvší chyba korekce na délku měla za následek nestejněměrný přírůstek na obrábění mezi polodokončováním a dokončováním. Tímto opatřením se přírůstek stal konstantním. Polodokončovací dráhy jsou rovnoběžné s osou Y. Přírůstek na polodokončování je 0,05 mm. Ze stejného důvodu se plochy pro vyrovnání obrábějí stejným nástrojem jako dokončování obecné tvarové plochy.

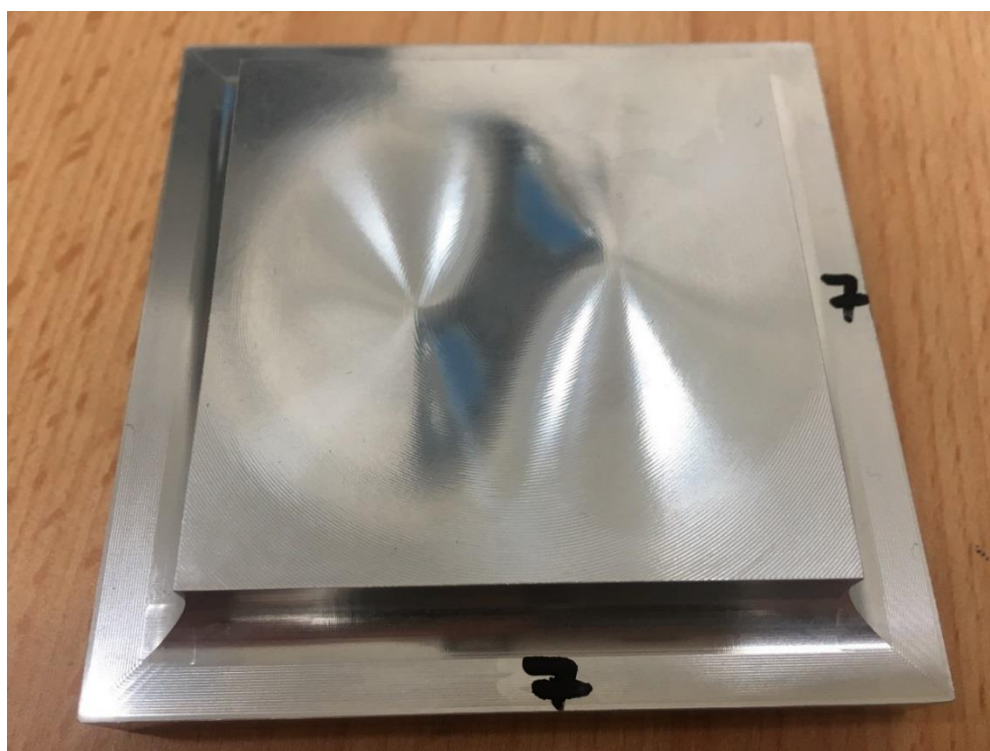
- Použitá strategie:
FIXED_CONTOUR_Spirála
- Dokončovací nástroj: K 10 A
- Řezná rychlost pro dokončování:
250 m/min
- Otáčky vřetene pro dokončování:
7958 ot/min
- Posuv na zub pro dokončování:
0,06 mm
- Pracovní posuv pro dokončování:
954,9 mm/min
- Teoretický čas dokončování:
16 min 47 s

Vyhodnocení vzorku 7

Hodnota naměřené chyby tvaru po připasování je 0,0309 mm. Z obrázku 43 je vidět zlepšení v oblasti vrcholu. Na celé ploše jsou odchylky zelené. To znamená, že jsou v rozmezí +0,015 až +0,025 mm. V prohlubni je stále problém. Největší naměřená odchylka je 0,0155 mm.



Obrázek 43: Průběh chyby vzorku 7



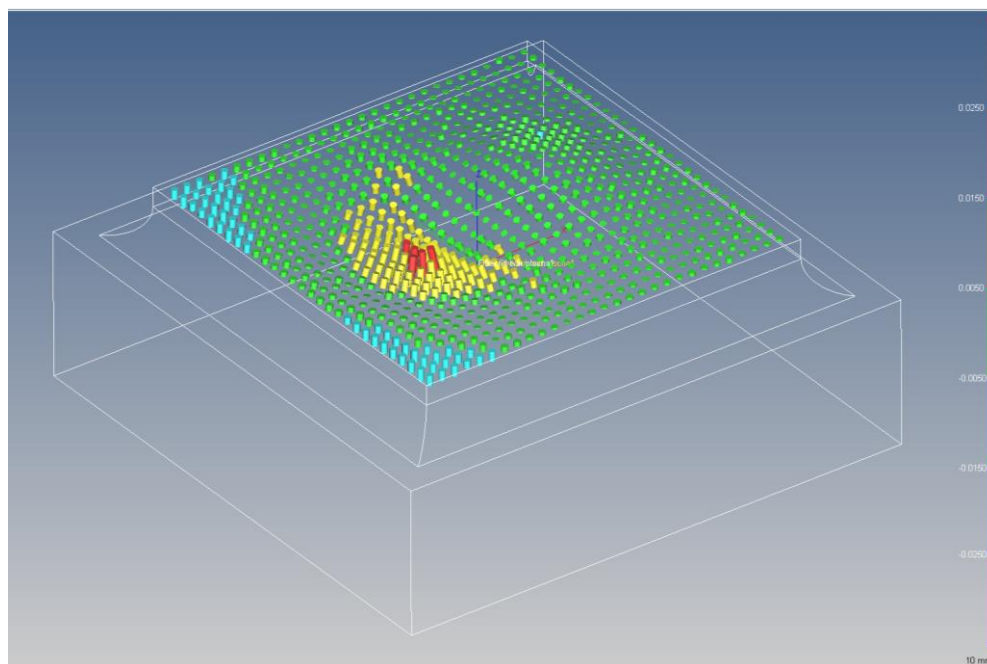
Obrázek 44: Vzorek 7

5.8.8. Obrábění vzorku 8

Při obrábění vzorku 8 byl zkoumán vliv velikosti přídávku na dokončování. V předchozích obrábění byl přídavek 0,5 mm. Pro toto obrábění je přídavek 0,3 mm. Polodokončovací dráhy jsou rovnoběžné s osou Y. Polodokončování je prováděno stejným nástrojem (K 10 A) jako dokončování. Hodnota bočního kroku nástroje je stejná jako u vzorku 7. Strategie je FIXED_CONTOUR_Spirála.

- Použitá strategie:
FIXED_CONTOUR_Spirála
- Dokončovací a polodokončovací nástroj: K 10 A
- Řezná rychlost pro dokončování:
250 m/min
- Otáčky vřetene pro dokončování:
7958 ot/min
- Posuv na zub pro dokončování:
0,06 mm
- Pracovní posuv pro dokončování:
954,9 mm/min
- Teoretický čas dokončování:
16 min 47 s

Vyhodnocení vzorku 8



Obrázek 45: Průběh chyby vzorku 8

Hodnota naměřené chyby tvaru po připasování je 0,0363 mm. Změna podmínek obrábění nepřinesla zlepšení. Naopak chyba tvaru v prohlubni se ještě rozšířila.

5.8.9. Obrábění vzorku 9

Všechny podmínky obrábění byly identické jako u vzorku 7. Změna byla v použitém chlazení. Chlazení emulzí bylo nahrazeno chlazeným stlačeným vzduchem.

- Použitá strategie:
FIXED_CONTOUR _Spirála
- Dokončovací a polodokončovací nástroj: K 10 A
- Řezná rychlost pro dokončování:
250 m/min
- Otáčky vřetene pro dokončování:
7958 ot/min
- Posuv na zub pro dokončování:
0,06 mm
- Pracovní posuv pro dokončování:
954,9 mm/min
- Teoretický čas dokončování:
16 min 47 s

Způsob chlazení

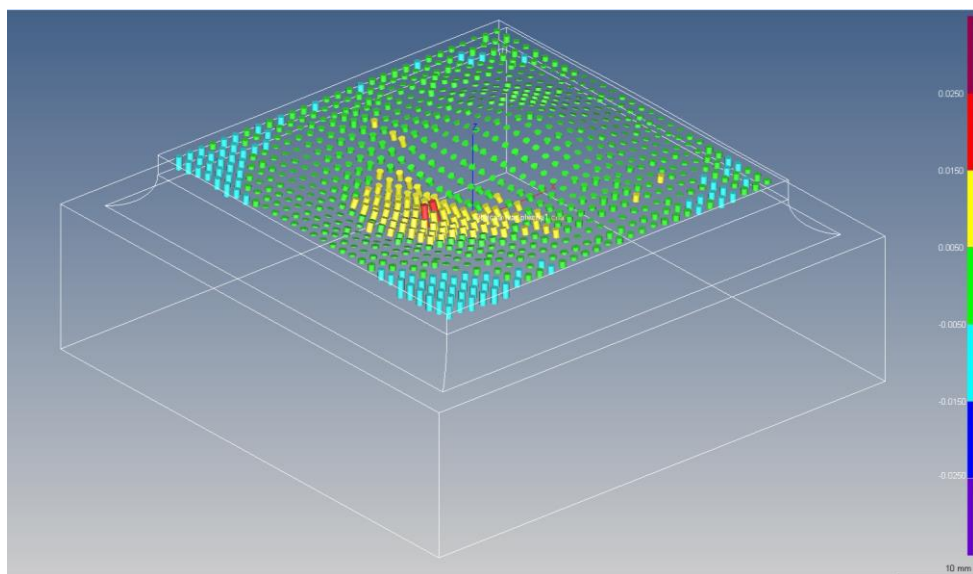
Byla využita tryska studeného vzduchu od firmy HHW. Tryska funguje na principu vířivé trubice. Do trysky je přiveden stlačený vzduch, který z jednoho konce vychází jako teplý a z druhého jako studený. S přívodem 6 barů dostaneme na výstupu studený vzduch cca -15°C [39]. Připojení trysky na stroj je na obrázku 46. K připojení sloužil magnet. Reálná teplota vzduchu využitá pro chlazení byla -11°C. Při měření teploty chladicí emulze byla naměřena teplota +28°C. Faktem zůstává, že emulze má současně s chladícím také mazací účinek.



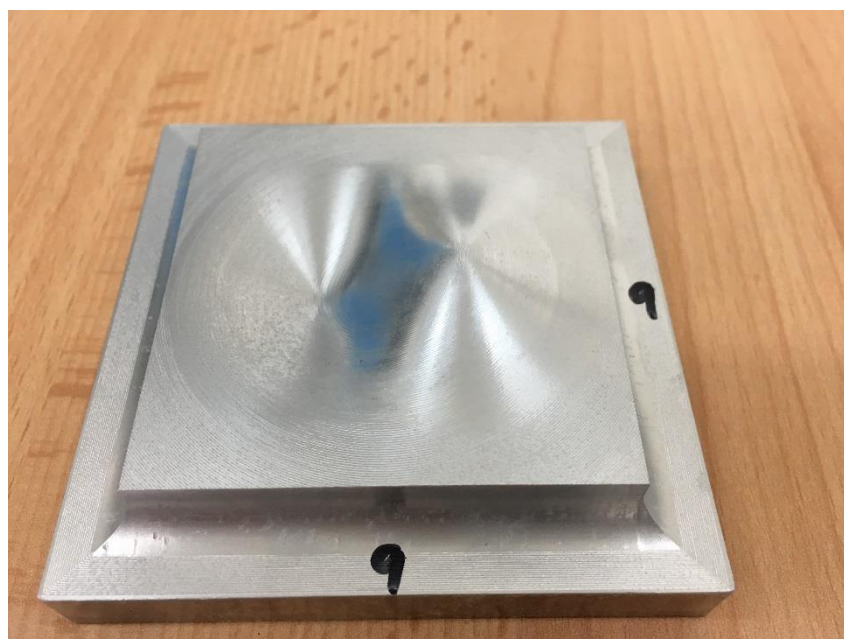
Obrázek 46: Tryska studeného vzduchu

Vyhodnocení vzorku 9

Hodnota naměřené chyby tvaru po připosování je 0,0322 mm. Na obrázku 47 je grafické znázornění naměřených odchylek. Na obrázku 48 je detail vyrobeného povrchu. Vlivem změny chlazení došlo k výraznému zhoršení kvality povrchu. Může to být následkem absence mazání, popřípadě nevhodnými řeznými podmínkami. Řezné podmínky vhodné pro chlazení emulzí, nejsou kompatibilní s chlazením stlačeným vzduchem. Nehledě na špatný povrch, chyba tvaru obecné plochy vyšla lépe, než ve většině předchozích variant.



Obrázek 47: Průběh chyby vzorku 9



Obrázek 48: Vzorek 9

5.9 Porovnání jednotlivých strategií v závislosti na čase obrábění

Součet časů pro hrubování, dohrubování a polodokončování je 13 min 25 sekund. Tento čas byl stejný pro všechny varianty. Lišily se časy pro dokončování.

Z grafu 1 vidíme, že jednotlivé dokončovací strategie mají vliv na výsledný čas obrábění. Znárodně časy jsou časy teoretické, vypočtené pomocí NX. Nebudeme-li brát v úvahu první obrábění, jsou časy relativně srovnatelné. Rozdíly jsou v řádu minut. Různé strategie se časově liší kvůli neřezným pohybům nástroje.

Reálný čas dokončování vzorku 9 je 17 min 27 s. Tato hodnota se liší od teoretické o 40 sekund. Dále do reálných časů jsou přičtené časy na výměnu nástrojů.

Graf 1: Čas dokončování



6 Měření a vyhodnocení vyrobených vzorků

Tato kapitola popisuje způsoby a parametry vyhodnocování obrobených vzorků. Porovnává všechny výsledky a vyhodnocuje nejlepší obrobený kus.

6.1 Způsob vyhodnocení chyby tvaru obecné tvarové plochy

Pomocí softwaru Zeiss Calypso bylo naměřeno 841 bodů. Snímání probíhalo bodově. Body jsou rovnoměrně rozprostřeny po celé obecné tvarové ploše.

Program Zeiss Calypso po naměření bodů vyhodnotí chybu tvaru plochy vzhledem k souřadnému systému měřené součásti. Chyba je větší o posunutí a natočení obecné tvarové plochy vůči ní samotné. Důležité pro tento výzkum však byla chyba samotného tvaru plochy. Program pomocí funkce Připasování natočil a posunul naměřenou plochu vůči teoretické ploše. Teoretickou plochou je CAD model etalonu, pomocí kterého se tvořil plán měření. Posunutí a natočení proběhlo ve všech osách, získáváme tedy 6 hodnot. Tyto hodnoty jsou:

- Posunutí v ose X
- Posunutí v ose Y
- Posunutí v ose Z
- Natočení kolem osy X
- Natočení kolem osy Y
- Natočení kolem osy Z

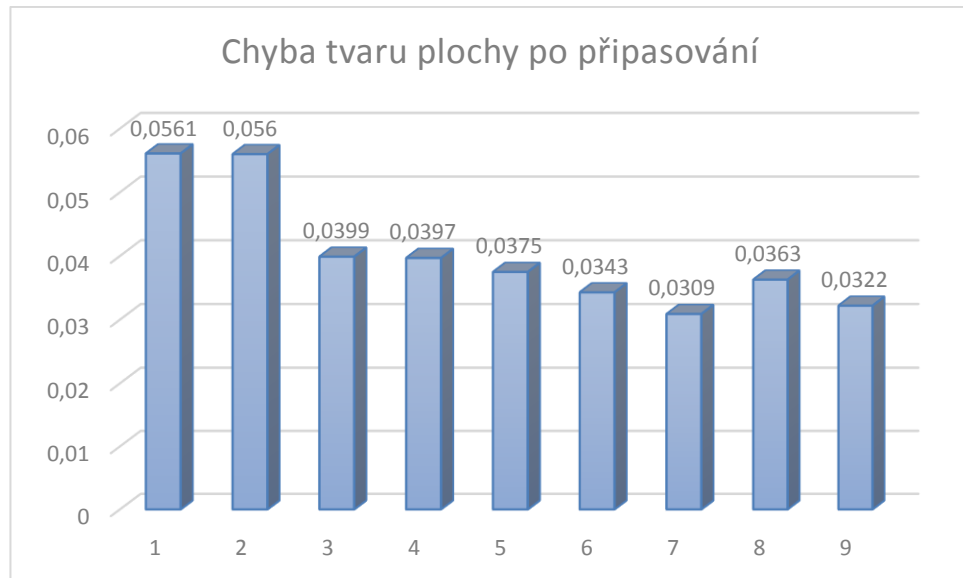
Připasování bylo vyhodnoceno u každého vzorku a následně byly porovnány výsledky. Čím menší hodnoty připasování tím lepší výsledek.

Další z kritérií, pomocí které jsem porovnával výsledky byla chyba tvaru obecné tvarové plochy. Tato hodnota je dvojnásobek největší naměřené odchylky. Proto bylo nutné ještě pomocí histogramu zjistit, jaká je četnost jednotlivých naměřených odchylek. Společně tyto dva ukazatele dávají ponětí o výsledku naměřených hodnot. Grafické znázornění průběhu jednotlivých odchylek je na obrázcích v předchozí kapitole. Součást každého obrázku je barevná stupnice hodnot.

6.2 Porovnání podle chyby tvaru plochy

Následující graf znázorňuje hodnoty chyb tvaru obroběných obecných tvarových ploch. Nejmenší chybu tvaru má vzorek 7. Největší chybu tvaru má vzorek 1.

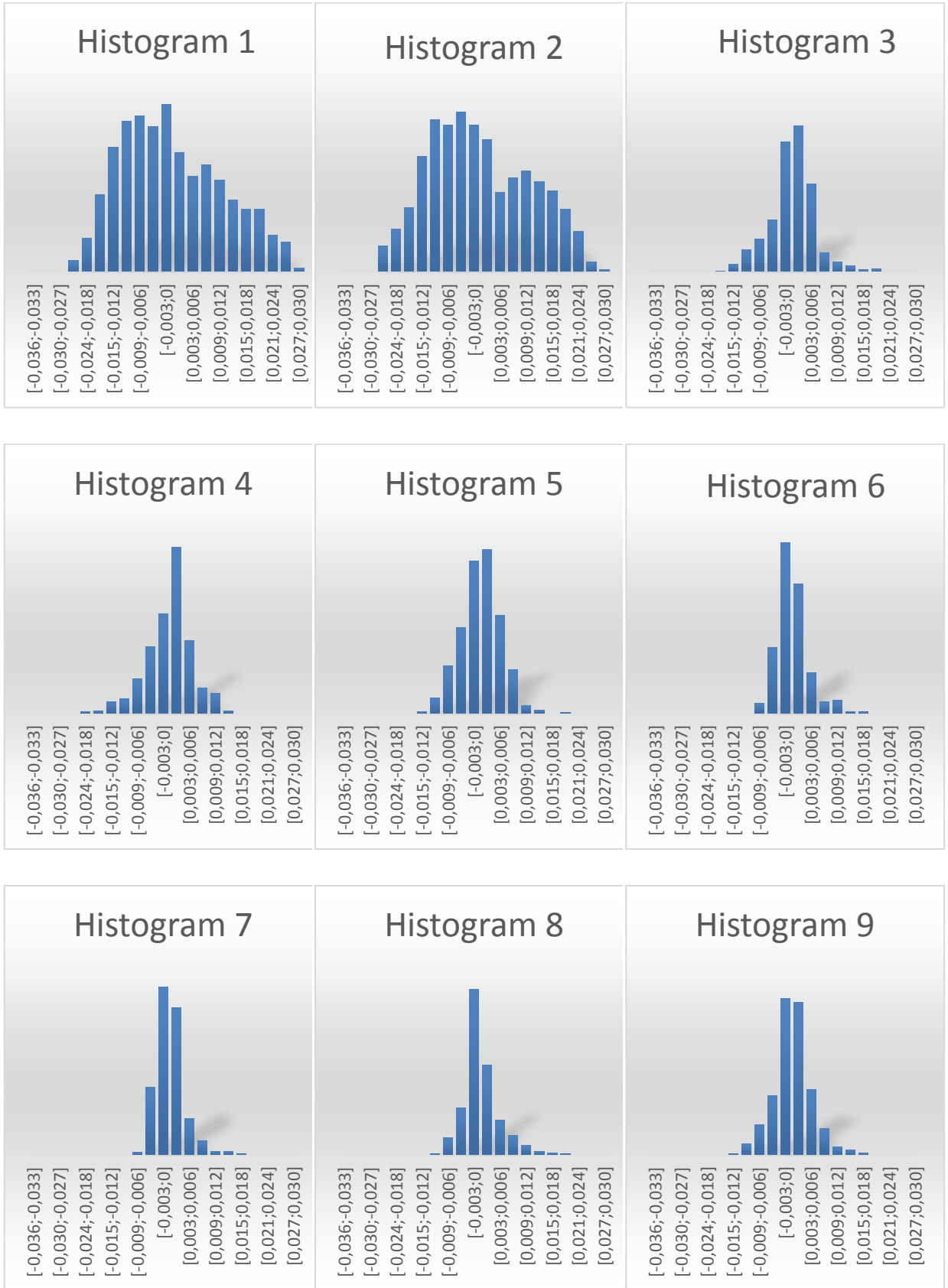
Graf 2: Chyba tvaru plochy po připasování



6.3 Porovnání dle histogramů

Histogramy znázorňují četnost odchylek naměřených v jistém rozsahu. Je zde patrné, že díky jednomu bodu rapidně vzroste chyba tvaru obecné tvarové plochy. První dva vzorky vyšly nejhůře. Ostatní výsledky jsou relativně srovnatelné. Devět tříd má vzorek 6 a 7. To je nejméně ze všech. Největší četnost je v rozmezí $-0,003$ až 0 mm, nebo 0 až $0,003$ mm. Největší četnost naměřených odchylek má vzorek 8. Odchylky jsou v rozmezí $-0,003$ až 0 mm. V tomto rozmezí je 360 naměřených bodů. To je cca 43 %.

Graf 3: Histogramy



6.4 Porovnání podle připisování

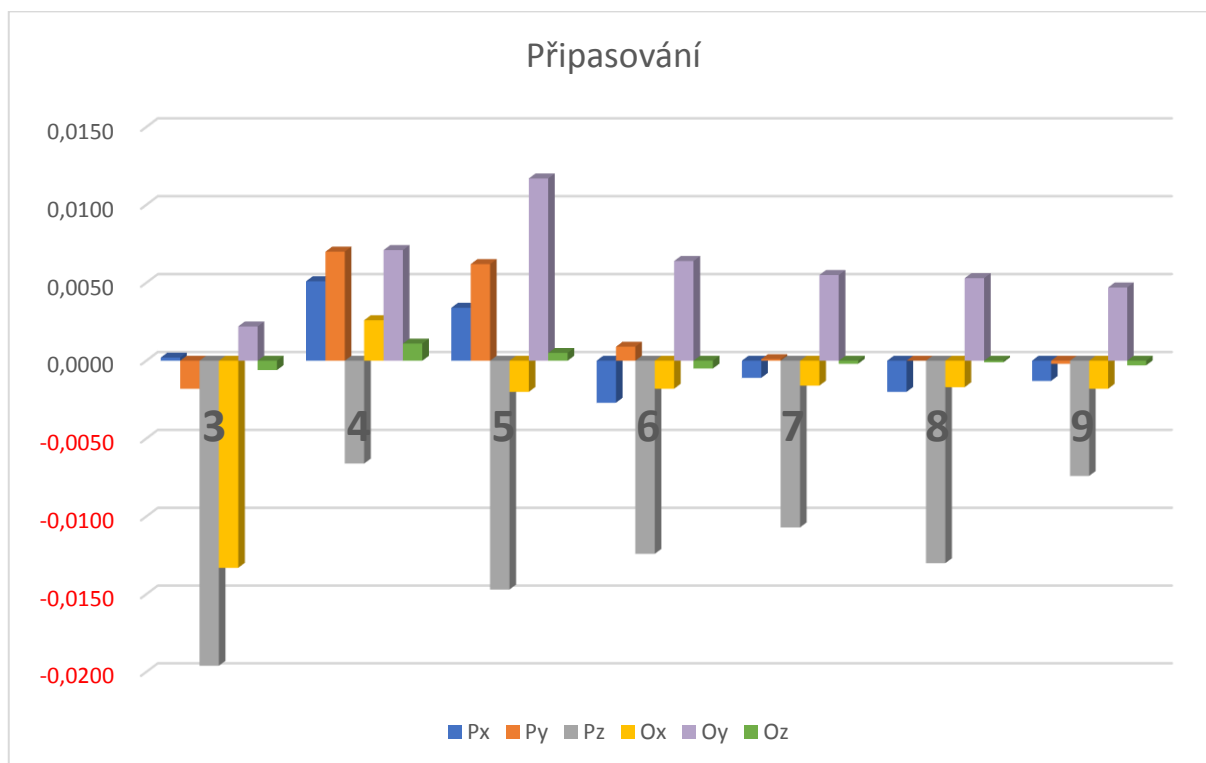
V tabulce 5 jsou hodnoty připisování pro jednotlivé vzorky. Hodnoty nejbližší nule pro posun nebo natočení jsou zvýrazněny. Vzorky 3 a 8 mají po dvou nejmenších hodnotách. Z grafu 4 však nejpříznivěji vypadají hodnoty vzorku 9. Všechny hodnoty připisování jsou relativně blízké nule, oproti ostatním vzorkům. Hodnoty připisování nejsou větší než 0,0074 mm. To je velice dobrý výsledek.

- Posunutí v ose X (Px)
- Posunutí v ose Y (Py)
- Posunutí v ose Z (Pz)
- Otáčení kolem osy X (Ox)
- Otáčení kolem osy Y (Oy)
- Otáčení kolem osy Z (Oz)

Tabulka 5: Hodnoty připisování

		3	4	5	6	7	8	9
Posun	Px	0,0002	0,0051	0,0034	-0,0027	-0,0011	-0,0020	-0,0013
	Py	-0,0018	0,0070	0,0062	0,0009	0,0001	0,0000	-0,0002
	Pz	-0,0196	-0,0066	-0,0147	-0,0124	-0,0107	-0,0130	-0,0074
Otáčení	Ox	-0,0133	0,0026	-0,0020	-0,0018	-0,0016	-0,0017	-0,0018
	Oy	0,0022	0,0071	0,0117	0,0064	0,0055	0,0053	0,0047
	Oz	-0,0006	0,0011	0,0005	-0,0005	-0,0002	-0,0001	-0,0003

Graf 4: Připisování



6.5 Celkové shrnutí výsledků

Nejmenší hodnotu chyby tvaru obecné tvarové plochy má vzorek 7. Podle histogramů může být nejlepší výsledek u vzorků 6, 7 nebo 8. Z grafu hodnot připasování nejlépe vyšel vzorek 9. Grafické znázornění podle Calypsa má nejpříznivější vzorek 7.

Nejlepší výsledek má vzorek 7. Proto můžeme konstatovat, že nejlepší strategie pro dokončování je jednoznačně FIXED_CONTOUR _Spirála. Dále zjemnění kroku a zajištění stejnoměrného přídávku pro dokončování přinese lepší výsledek. Strategie FIXED_CONTOUR_Soustředné_CIK je nepřijatelná z důvodu rýhy na povrchu vzorku. Změna chlazení přinesla velké zhoršení kvality obrobeneho povrchu.

7 Závěr

První část jsem věnoval možnostem využití obecných tvarových ploch jak v průmyslové praxi, tak v jiných oborech. Příklady průmyslu jsou automobilový, zbrojní nebo letecký. Obecné tvarové plochy se dále dají najít v medicíně, optice nebo stavitelství. Analyzoval jsem a popsal technologie, které jsou vhodné pro jejich výrobu. Tyto technologie jsou třískové obrábění, tváření, slévání, výroba plastů a nekonvenční technologie. Nástroje, které jsou negativem vyráběné obecné tvarové plochy se vyrábějí pomocí 3D frézování. Na počátku celkové přesnosti vyrobené obecné tvarové plochy stojí 3D frézování. Proto se v další části věnuji právě možnostem vzniku nepřesnosti ve frézovacím procesu. Na frézování má vliv volba nástroje a způsob jeho upnutí, řezné podmínky, druh chlazení, frézovací strategie a v neposlední řadě i stroj samotný.

V další části jsem navrhl model etalonu, který bude sloužit pro periodické zkoušky CMM. Etalon je nositelem obecné tvarové plochy. Tato obecná tvarová plocha byla zadána pomocí exponenciální rovnice. Rovnice byla parametricky upravena, aby splňovala požadavky. Úprava a vytvoření modelu etalonu proběhlo v modelovacím softwaru Rhinoceros 3.0 SR4. Materiál pro výrobu byla použita slitina hliníku EN AW 2007. Součástí návrhu byla i příprava ploch, které slouží k vyrovnání na CMM.

Pomocí vytvořeného modelu jsem navrhl rozdílné podmínky pro výrobu devíti vzorků. Obrábění jsem připravoval v softwaru Siemens NX 12.0. Tyto vzorky byly v závěru práce mezi sebou porovnány z hlediska času obrábění, jakosti povrchu a přesnosti vyrobené plochy. Obrábění probíhalo na frézovacím centru VMC 500. Měření jsem zajistil pomocí stroje Carl Zeiss UMC 1000 Carat. Vyhodnocovací software bylo Zeiss Calypso 2015 6.0.28.

Frézování všech vzorků mělo stejné hrubování, dohrubování a polodokončení. Rozdíly byly v dokončování. Vzorky 1 a 2 porovnaly nástroje K 10 G a K 10 A. Lepší výsledek přinesl nástroj K 10 A. Pro vzorek 3 bylo využito nově navržené upnutí ve stroji, které se osvědčilo a odstranilo vzniklou chybu rovinnosti plochy určené pro vyrovnání na CMM. Pro výrobu těchto tří vzorků byla použita řádkovací strategie FIXED_CONTOUR_CIK. Pro obrábění vzorku 5 byla dokončovací řádkovací strategie otočena o 90°. Tato modifikace nepřinesla zlepšení, proto řádkovací strategie byla nahrazena. Vzorek 4 byl obráběn pomocí strategie soustředných kružnic (FIXED_CONTOUR_Soustředné_CIK). Vlivem přejezdu frézovacího nástroje na další kružnici vznikla na povrchu obecné tvarové plochy rýha. Ta byla nepřijatelná z důvodu zachování celistvosti obrobeneho povrchu etalonu. Počínaje vzorkem 6 byly ostatní vzorky obráběny pomocí spirálové strategie FIXED_CONTOUR_Spirála, která eliminovala

problém s rýhou. Pro vzorek 7 byl oproti vzorku 6 zjemněn krok nástroje do strany a zajištěn konstantní přísávek materiálu na dokončování. Tato modifikace přinesla zlepšení. U obrábění vzorku 8 byl zmenšen přísávek na dokončování z 0,5 mm na 0,3 mm. Toto opatření se neosvědčilo. Všechny vzorky byly chlazeny pomocí emulze. Vzorek 9 byl chlazen stlačeným ochlazeným vzduchem. Chlazením vzduchem se rapidně zhoršila kvalita obrobené plochy, to však přineslo dobré výsledky chyby tvaru plochy a připasování.

Porovnání z hlediska času nedává objektivní posouzení jednotlivých variant. Například zjemnění bočního kroku nástroje zákonitě zvýšilo čas obrábění. Naopak absence výměny polodokončovacího nástroje čas snížilo. Teoretický čas, který vypočítá software není srovnatelný s časem reálným. Projevuje se zde například vliv softwaru obráběcího stroje a čas na ruční výměnu nástroje. Teoretické dokončovací časy vypočítané pomocí CAM softwaru jsou relativně srovnatelné. Výjimku tvoří vzorek 1, kde je nižší posuv nástroje. Větší hodnoty řezné rychlosti a posuvu zkrátily čas o polovinu. Průměrný teoretický čas pro celé obrábění vzorků (kromě vzorku 1) je 29 minut 16 sekund.

Hodnocení vyrobených vzorků probíhalo pomocí porovnání chyby tvaru obecné tvarové plochy po připasování. Podle tohoto kritéria nejlépe vyšel vzorek 7. Vypočtené hodnoty připasování nepřekročily 0,0055 mm. Nejmenší chybu obecné tvarové plochy měl vzorek 7 s hodnotou 0,0309 mm. Při porovnání histogramů mají nejlepší výsledky vzorky 6, 7 a 8. Kromě několika odlehlých hodnot jsou jejich odchylky v rozmezí -0,0012 mm až +0,0012 mm. Nejhorší kvalitu povrchu má vzorek 9, současně však vykazuje malou chybu tvaru plochy (0,0322 mm). Hodnoty připasování vzorku 9 nepřekročí 0,0074 mm. Shrňme-li veškeré zjištěné poznatky, nejlepší vyrobený vzorek je vzorek 7. Vykazuje dobré výsledky ve všech ohledech. Použitá strategie pro frézování vzorku 7 je FIXED_CONTOUR_Spirála a nástroj je K 10 A.

Zlepšení výsledku by mohla přinést kombinace podmínek vzorku 7 a 9. Pro chlazení vzduchem by bylo nutné modifikovat řezné podmínky. Upnutí frézovacího nástroje je také možné zajistit vhodnějším způsobem. Další možností by bylo použití jiného frézovacího centra. Modernější frézovací centrum může nabídnout větší maximální možné otáčky a lepší opakovanou přesnost. Dále pomocí pětiosého frézovacího centra je možné zajistit naklopení nástroje vůči obráběné ploše. To přinese konstantní a větší opásání nástroje. Modernější řídicí systémy strojů dokáží zajistit adaptivní řezné podmínky. Adaptivní úpravou řezných podmínek by se mohl vyřešit problém chyby tvaru v prohlubni.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ:

- [1] PAVELEK, Michal. *Analýza moderních technologií frézování tvarových ploch* [online]. Brno, 2009 [cit. 2018-03-19]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=16956.
Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Oskar Zemčík, CSc.
- [2] Ing. ŠAFKA, Jiří. *Zpracování obecných tvarových ploch* [online]. Liberec, 2012 [cit. 2018-03-19]. Dostupné z: <https://cxi.tul.cz/projekty-vav/seminare/23-10-Safka.pdf>.
DIZERTAČNÍ PRÁCE. TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI. Vedoucí práce Prof. Ing. Přemysl Pokorný, CSc.
- [3] SEVTSUK, Andres a Raulo KALVO. A freeform surface fabrication method with 2D cutting. *Proceedings of the Symposium on Simulation for Architecture & Urban Design* [online]. San Diego, CA, USA, 2014, 2014(20), 8 [cit. 2018-04-21]. Dostupné z: http://80.delivery.acm.org/dialog.cvut.cz/10.1145/2670000/2664343/a20-sevtsuk.pdf?ip=147.32.240.57&id=2664343&acc=ACTIVE%20SERVICE&key=D6C3EEB3AD96C931%2E9BD1EC80ACA8C1C5%2E4D4702B0C3E38B35%2E4D4702B0C3E38B35&CFID=753743865&CFTOKEN=34020880&__acm__=1455703785_32446ac66e7c07a8a7814f1fdf1bf02b#URLTOKEN#
- [4] MOJŽÍŠOVÁ, Milena. *Brylové čočky* [online]. Brno, 2008 [cit. 2018-06-9]. Dostupné z: https://is.muni.cz/th/176870/lf_b/Brylove_cocky.pdf.
Bakalářská práce. Masarykova univerzita v Brně. Vedoucí práce MUDr. Jan Richter.
- [5] KLÍMA, Petr. *Parní turbíny* [online]. Brno, 2013 [cit. 2018-05-10]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=63980.
Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Doc. Ing. Jan Fiedler, Dr.
- [6] NĚMEC, Milan, Jan SUCHÁNEK a Jan ŠANOVEC. *Základy technologie I*. Vyd. 1. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2006, 136 s. ISBN 80-01-03530-1.
- [7] BC. SMUTNÝ, Petr. *Výroba součástí plošným tvářením* [online]. Brno, 2011 [cit. 2018-05-10]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=40043.
Diplomová práce. Vysoké učení technické. Vedoucí práce Ing. Ladislav Žák, Ph.D.
- [8] LENFELD, Petr. *Katedra tváření kovů a plastů: Skripta* [online]. 2007 [cit. 2018-05-10]. Dostupné z WWW: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce/09.htm#095.

- [9] STRÁNSKÝ, Luboš. *Stroje a nástroje používané ve tváření*[online]. Brno, 2010 [cit. 2018-05-10]. Dostupné z:
https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=26782.
 Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Kamil Podaný, Ph.D.
- [10] PROF. ING. HORÁČEK, CSC., Milan. *Rozměrová přesnost odlitků vyráběných metodou vytavitelného modelu* [online]. Brno, 2009 [cit. 2018-06-15]. Dostupné z:
<http://ust.fme.vutbr.cz/slevarenstvi/download/technologie-vytavitelneho-modelu.pdf>.
 Vysoké učení technické v Brně.
- [11] MÁDL, Jan. *Technologie obrábění*. Vyd. 2., přeprac. V Praze: Nakladatelství ČVUT, 1999, 3 sv. (80, 84, 88 s.). ISBN 978-80-01-03752-2.
- [12] MÁDL, Jan a Jaroslav BARCAL. *Základy technologie II*. Vyd. 1. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2002, 55 s. ISBN 80-01-02610-8.
- [13] VÁCLAVEK, Jiří. *Nástroje pro soustružení* [online]. Brno, 2010 [cit. 2018-06-19]. Dostupné z:
https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=29140.
 Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Doc. Ing. Anton Humár, CSc.
- [14] ING. STAVINOHA, Zdeněk. *Soustružení tvarových ploch*. In: [Http://coptel.coptkm.cz/](http://coptel.coptkm.cz/) [online]. Zlín: <http://coptel.coptkm.cz/>, 2011 [cit. 2018-06-20]. Dostupné z:
<http://coptel.coptkm.cz/?action=2&doc=25216&docGroup=4931&cmd=0&instance=2>
- [15] DOLEŽEL, Ondřej. *Analýza technologie výroby tvarových ploch frézováním* [online]. Brno, 2009 [cit. 2018-06-29]. Dostupné z:
https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=16370.
 Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Oskar Zemčík, CSc.
- [16] BC. HUDCOVIČ, Martin. *Využití optimalizace vstřikovacího procesu při výrobě plastových dílů* [online]. Zlín, 2008 [cit. 2018-07-06]. Dostupné z:
http://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/7201/hudcovi%C4%8D_2008_dp.pdf?sequence=1)000+zpusoby. Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Vedoucí práce Ing. Michal Staněk, Ph.D.
- [17] MGR. VESELÝ, DIS, Petr, Petr ING. ŠIMOVIČ a Sylvie MGR. PETROVÁ. *Free-Form technologie*. In: *Konvenční a Free-form technologie výroby brýlových*

- čoček [online]. Brno: <http://is.muni.cz>, 2012 [cit. 2018-07-07]. Dostupné z: http://is.muni.cz/do/rect/el/estud/lf/js12/vyroba_cocek/web/pages/02-2_free-form.html
- [18] *Profil křídla* [online]. 2010 [cit. 2018-06-30]. Dostupné z: http://www.slavetind.cz/stavba/konstrukce/kridlo/Profil_kridla.aspx
- [19] BC. HANUŠOVÁ, Eva. Základní chirurgické nástroje. In: *Http://www.szsemb.cz/* [online]. Praha: <http://www.szsemb.cz/>, 2011 [cit. 2018-06-13]. Dostupné z: http://www.szsemb.cz/admin/upload/sekce_materialy/Z%C3%A1kladn%C3%AD_chirurgick%C3%A9_n%C3%A1stroje.pdf
- [20] *Allbiz* [online]. [cit. 2018-07-16]. Dostupné z: <http://kaluga.all.biz/lopatki-g1294037#.VsSSDvnhC>
- [21] Katedra strojírenské technologie: Oddělení tváření kovů a plastů [online]. 2005 [cit. 2018-07-13]. Technická univerzita Liberec. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce/09-tazeni/02-tazidlo.jpg
- [22] Robots and cnc [online]. [cit. 2018-06-27]. Dostupné z: <https://robocnc.cz/3d-tiskarna/vyrobky-z-3d-tiskarny/>
- [23] Free form surfaces [online]. 2011 [cit. 2018-07-16]. Dostupné z: <http://geometrie.foretnik.net/files/07-en.pdf>
- [24] AB SANDVIK COROMANT - SANDVIK CZ, s.r.o. Příručka obrábění – Kniha pro praxe. Přel. M. Kudela. 1. vyd. Praha: Scientia, 1997. 857 s. ISBN 91-97 22 99-4-6.
- [25] KOČMAN, K. Technologické procesy obrábění. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011. ISBN 978-80-7204-722-2.
- [26] MÁDL, J. Optimalizace obráběcího procesu. 1. vyd. Praha: ČVUT, 1998. ISBN 978-80-0101-864-4.
- [27] ING. KOVÁŘ, Jiří. Ovlivnění kvality a jakosti obrobené plochy při frézování. *MM Průmyslové spektrum*[online]. 2004, 14.04.2004, 2004(4), 30 [cit. 2018-07-17]. DOI: 040479. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/ovlivneni-kvality-a-jakosti-obrobene-plochy-pri-frezovani.html>
- [28] The Ultimate List of What We Can 3D Print in Medicine And Healthcare!. *The Medical Futurist* □ *Newsletter* [online]. 2017, 11.3.2017, 2017(3) [cit. 2018-07-17]. Dostupné z: <https://medicalfuturist.com/3d-printing-in-medicine-and-healthcare>
- [29] BUDÍK, Josef a Vlastimil HALEXA. Ergonomie ve strojírenství. 1984. Brno: SNTL – Nakladatelství technické literatury.
- [30] *Hecmanovy stránky o zbraních a příslušenství* [online]. Frýdek-Místek [cit. 2018-07-17]. Dostupné z: http://www.tady.cz/hecman/cz_rozkr.jpg

- [31] *AGS Agro Sortiment* [online]. Radiměř [cit. 2018-07-17]. Dostupné z: <http://www.svetpostrikovacu.cz/cz/e-shop/650767/c31615-zemedelska-technika/pluh-neseny-oboustranny-akpil-km-180-4-radlicny.html>
- [32] Ovlivnění kvality a jakosti obrobené plochy při frézování. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2004, 14.4.2004, 2004(4), 30 [cit. 2018-07-17]. DOI: 040479. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/ovlivneni-kvality-a-jakosti-obrobene-plochy-pri-frezovani.html>
- [33] *ALFUN* [online]. Praha [cit. 2018-07-17]. Dostupné z: <http://alfun.cz/produkty/hlinik/tyce-a-profilly>
- [34] *Rhinoceros* [online]. [cit. 2018-07-17]. Dostupné z: <https://www.rhino3d.com/6/features>
- [35] SLANINA, Jan. Ovlivnění kvality a jakosti obrobené plochy při frézování. *Rhinoceros* [online]. 2006, 10.4.2006, 2006(4), 1 [cit. 2018-07-17]. DOI: 040479. Dostupné z: <http://www.rhino3d.cz/clanky/rhino/jak-presny-je-rhinoceros.html>
- [36] *Siemens PLM* [online]. USA, 2018 [cit. 2018-07-17]. Dostupné z: <https://www.plm.automation.siemens.com/global/en/products/nx/>
- [37] BC. ŠTROFOVÁ, Aneta. *Free-form technologie výroby brýlových čoček* [online]. Brno, 2011 [cit. 2018-07-17]. Dostupné z: https://is.muni.cz/th/326346/lf_b/. Bakalářská práce. Masarykova universita. Vedoucí práce Mgr. Petr Veselý.
- [38] *Siemens Product Lifecycle Management Software Inc.* [online]. 2018 [cit. 2018-07-17]. Dostupné z: https://docs.plm.automation.siemens.com/tdoc/nx/12/nx_help/#uid:contour_drive_area_stepover
- [39] *HHW* [online]. Praha: Hommel Hercules Werkzeughandel CZ/SK, 2018 [cit. 2018-07-17]. Dostupné z: https://www.hhw.cz/cz/Shop/Soustru%C5%BEnick%C3%A9%20n%C3%A1stroje/Chladic%C3%AD%20a%20mazac%C3%AD%20syst%C3%A9my/19356101/Trysnstudvzduch-p%C5%99%C3%ADvod_3%2f8

SEZNAM OBRÁZKŮ:

Obrázek 1: Digitální model pavilonu knihovny [3].....	10
Obrázek 2: Čochky vyrobené z vysokoindexového skla [4]	11
Obrázek 3: Charakteristika profilu křídla [18]	12
Obrázek 4: Lopatka turbíny [20]	12
Obrázek 5: Orební těleso pluhu [31].....	13
Obrázek 6: Pistole CZ 100 [30].....	14
Obrázek 7: Příklady chirurgických nástrojů [19]	15
Obrázek 8: Tažný nástroj [21]	19
Obrázek 9: Součást vyrobená pomocí Aditivní výroby [22]	21
Obrázek 10: Metoda maximální výška drsnosti řádkování [38].....	23
Obrázek 11: Graf exponenciální funkce	25
Obrázek 12: CAD model etalonu.....	26
Obrázek 13: Plochy pro vyrovnání (varianta 1).....	27
Obrázek 14: Plochy pro vyrovnání (varianta 2).....	27
Obrázek 15: Parametrické modelování v Math Plugin.....	28
Obrázek 16: Obecná tvarová plocha etelonu	29
Obrázek 17: CAD model etalonu.....	30
Obrázek 18: VMC 500.....	31
Obrázek 19: Frézovací nástroje (K 10 G vlevo, K10 A vpravo)	32
Obrázek 20: Carl Zeiss UMC 1000 Carat.....	33
Obrázek 21: Dotykový snímač	33
Obrázek 22: Hrubovací dráhy.....	34
Obrázek 23: Dohrubovací dráhy nástroje	35
Obrázek 24: Vzorek po hrubování.....	36
Obrázek 25: Polodokončovací dráhy nástroje	37
Obrázek 26: Vzorek po dokončení polodokončování.....	38
Obrázek 27: Dráhy pro frézování ploch pro vyrovnání (varianta 2)	39
Obrázek 28: Dráhy nástroje pro frézování ploch pro vyrovnání (varianta 1).....	39
Obrázek 29: Dráhy strategie FIXED_CONTOUR_CIK_X	41
Obrázek 30: Průběh chyby tvaru vzorku 1	42
Obrázek 31: Průběh chyby tvaru vzorku 2	43
Obrázek 32: Rovinnost vzorku 2 (malá síla upnutí vlevo, velká síla upnutí vpravo).....	44
Obrázek 33: Rovinnost vzorku 3	45
Obrázek 34: Průběh chyby tvaru vzorku 3	46

Obrázek 35: Dráhy strategie FIXED_CONTOUR_Soustředné_CIK	47
Obrázek 36: Průběh chyby tvaru vzorku 4	48
Obrázek 37: Vzorek 4	49
Obrázek 38: Dráhy strategie FIXED_CONTOUR_CIK_Y	50
Obrázek 39: Průběh chyby vzorku 5.....	51
Obrázek 40: Vzorek 5	51
Obrázek 41: Dráhy strategie FIXED_CONTOUR_Spirála.....	52
Obrázek 42: Průběh chyby tvaru vzorku 6	53
Obrázek 43: Průběh chyby vzorku 7.....	55
Obrázek 44: Vzorek 7	55
Obrázek 45: Průběh chyby vzorku 8.....	56
Obrázek 46: Tryska studeného vzduchu	57
Obrázek 47: Průběh chyby vzorku 9.....	58
Obrázek 48: Vzorek 9	58

SEZNAM TABULEK:

Tabulka 1: Označení a vlastnosti materiálu EN AW 2007 [33]	25
Tabulka 2: Mechanické vlastnosti [33].....	25
Tabulka 3: Specifikace nástrojů.....	32
Tabulka 4: Korekce na délku nástrojů	54
Tabulka 5: Hodnoty připasování.....	63

SEZNAM GRAFŮ:

Graf 1: Čas dokončování	59
Graf 2: Chyba tvaru plochy po připasování.....	61
Graf 3: Histogramy	62
Graf 4: Připasování	63

SEZNAM ZKRATEK A SYMBOLŮ:

Zkratka/symbol	Jednotka/význam	Popis
3D	Trojrozměrný (trojdimenzionální)	předmět o třech rozměrech
CNC	Computer Numeric Control	počítačem podporované obrábění
CAD	Computer Aided Design	počítačem podporované konstruování
CAM	Computer Aided Manufacturing	počítačem podporovaná výroba
NC program	Numeric Control program	číslicově řízený program
HSC	High Speed Cutting	vysokorychlostní obrábění
CO ₂	Oxid uhličitý	plyn
mm	milimetr	jednotka vzdálenosti
μm	mikrometr	jednotka vzdálenosti
min	minuta	jednotka času
m/min	metry za minutu	jednotka rychlosti
ot/min	otáčky za minutu	jednotka rychlosti otáčení
mm/min	milimetry za minutu	jednotka rychlosti
s	sekunda	jednotka času
MPa	Megapascal	jednotka tlaku
UV	Ultrafialové	záření

SEZNAM ELEKTRONICKÝCH PŘÍLOH:

Příloha 1: Model freeform plochy Rhinoceros

Příloha 2: CAD model etalonu

Příloha 3: CAM programy NX

Příloha 4: NC programy

Příloha 5: Histogramy naměřených odchylek