

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ
Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie



Vysoce přesné frézování zrcadlových povrchů

Bakalářská práce

AUTOR: Jindřich Kristen

VEDOUCÍ PRÁCE: Ing. Zdeněk Pitrmuc

Praha, 2020

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Kristen** Jméno: **Jindřich** Osobní číslo: **473556**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací 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:

Vysoce přesné frézování zrcadlových povrchů

Název bakalářské práce anglicky:

High precision mirror-like finish milling

Pokyny pro vypracování:

- 1) Způsoby hodnocení přesnosti obráběcích strojů
- 2) Vysoce přesná frézovací centra - výrobci, parametry, specifikace
- 3) Konstrukční specifikace přesných frézovacích center
- 4) Průzkum trhu s obráběcími nástroji pro vysoce přesné aplikace
- 5) Technologický postup, výběr nástrojů a tvorba partprogramu pro vybranou součást a CAM software

Seznam doporučené literatury:

- 1) OVERBY, Alan. CNC machining handbook: building, programming, and implementation. New York: McGraw-Hill, c2011. ISBN 978-0-07-162301-8.
- 2) DAVIM, J. P., ed. Modern machining technology: a practical guide. Cambridge: Woodhead Publishing, 2011. Woodhead Publishing in mechanical engineering. ISBN 978-0-85709-099-7.
- 3) Aplikační návody a prezentační materiály vybraných výrobců zařízení a nástrojů

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

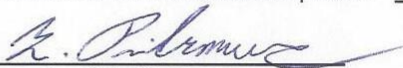
Ing. Zdeněk Pitrmuc, ústav technologie obrábění, projektování a metrologie FS

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

Datum zadání bakalářské práce: **30.04.2020**

Termín odevzdání bakalářské práce: **31.07.2020**

Platnost zadání bakalářské práce: _____



Ing. Zdeněk Pitrmuc
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

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.

23.6.2020

Datum převzetí zadání

Kristen

Podpis studenta

Prohlášení

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

V Praze dne:

.....
Jindřich Kristen

ANOTAČNÍ KARTA

Jméno autora: Jindřich Kristen
Název bakalářské práce: Vysoce přesné frézování zrcadlových povrchů
Anglický název: High precision mirror-like finish milling
Rok: 2020
Studijní obor: Výroba a ekonomika ve strojírenství
Ústav: Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie
Vedoucí ústavu: Ing. Libor Beránek, Ph.D.
Vedoucí práce: Ing. Zdeněk Pitrmuc
Klíčová slova: frézování, obráběcí nástroje pro přesné aplikace, přesná obráběcí centra, výroba zrcadlových povrchů, vysoko rychlostní obrábění,
Keywords: high-precision machining centers, high speed cutting, machining of mirror surface, milling, milling tools for precision application,

Abstrakt:

Tato bakalářská práce se zabývá frézováním zrcadlových povrchů. Jak dosáhnout takových povrchů, návrhem optimálních řezných podmínek a technologického postupu pro dosažení zrcadlového povrchu.

Abstract:

This bachelor thesis deals with milling of mirror like surface. How to get mirror surface, proposal of optimal cutting condition and technological process to achieve mirror surface.

Rozsah práce

Počet stran: 55

Počet obrázků: 40

Poděkování

Zde bych rád poděkoval své rodině za cenou podporu v celém studiu a při psaní této práce. Dále bych rád poděkoval Ing. Zdeňku Pitrmucovi za jeho cenné rady, poznatky, připomínky a čas, který mi věnoval při tvorbě této práce.

Obsah

1. Úvod	10
2. Způsoby hodnocení přesnosti obráběcích strojů	11
2.1 Normy zabývající se obráběcími stroji především přesností.....	11
2.2 ČSN ISO 230-1 Geometrická přesnost strojů pracujících bez zatížení nebo za kvazistatických podmínek:	13
2.3 ČSN ISO 230-2 Určení přesnosti a opakovatelnosti nastavení polohy v číslicově řízených osách	14
2.4 Zásady zkoušek obráběcích strojů- Část 4: Zkoušky kruhové interpolace u číslicově řízených obráběcích strojů	16
2.5 Zásady zkoušek obráběcích strojů část 6: Určení přesnosti nastavení polohy na diagonální tělesa a stěn (zkouška diagonálního přestavení)	17
2.6 Zásady zkoušek obráběcích strojů - Část 7: Geometrická přesnost os rotace	17
3. Konstrukční specifika přesných obráběcích strojů	18
3.1 Rám stroje	18
3.2 Vřetena	20
3.3 Typy pohonů.....	21
3.4 Upínání do vřeten.....	24
3.5 Vedení obráběcích strojů	25
3.5.1 Vedení přímočará	25
3.5.2 Vedení kluzná	25
3.5.3 Vedení valivá	26
3.6 Deformace částí obráběcího stroje vlivem teplotního gradientu	27
3.6.1 Senzory	28
3.6.2 Konstrukce.....	28
3.6.3 Chlazení	28
3.6.4 Kompenzace	28
4. Vysoce přesná frézovací centra: výrobci, parametry, srovnání	29
4.1 KERN	29
4.2 Yasda	31
4.3 Mikron	32
4.4 Makino.....	33
4.5 KRAUSE + MAUSER Prazeoplan	35
4.6 Jíngdíao.....	36
5. Průzkum trhu s obráběcími nástroji pro vysoce přesné aplikace	39
5.1 Paul Horn GmbH.....	40
5.2 Pokolm.....	40
5.3 Ceratizit	41

5.4 NS-tool.....	42
6. Technologický postup, výběr nástrojů a tvorba partprogramu pro vybranou součást a CAM software	43
6.1 Zvolené nástroje.....	44
6.2 Technologický postup.....	46
6.3 Obráběcí proces v CAM Fusion 360	47
7. Závěr.....	51
Zdroje	53
Použitá literatura.....	53
Seznam obrázků	55

1. Úvod

Cílem této bakalářské práce je popis způsobu výroby vysoce přesných frézovaných povrchů a návržení optimálního technologického postupu pro výrobu vysoce přesných zrcadlových ploch na dané součásti, kterou je „discokoule“. A to včetně volby materiálu a nástroje pro výrobu vysoce přesného zrcadlového povrchu.

Pro výrobu zrcadlového povrchu je důležité si ujasnit, jaké parametry má tento povrch a kde lze daných parametrů dosahovat. Zrcadlový povrch má kvalitativní parametry R_a obdobné jako leštěný nebo lapovaný tzn. $R_a < 0,2 \mu\text{m}$, tehdy je již povrch dostatečně lesklý. Zároveň je nutné, aby se odebírané vrstvy třísky co neoptimálněji překrývaly a nevznikaly tak otřepy. Přičemž na povrchu nesmí být vidět žádné stopy po nástroji.

Základem pro návržení technologického postupu je znalost možností a parametrů stroje, který máme k dispozici a dle toho pořizovat nástroj i materiál. Pro obrábění zrcadlových povrchů se často volí EN AW 7075 nebo materiály vytvrzené jako maraging oceli.

Teoretická část popisuje optimalizaci vyhodnocování přesnosti dle norem, možností a stavby strojů. Shrnuje dostupná řešení frézovacích center od různých výrobců a je základnou pro část praktickou, která se zaměřuje na výběr nástroje, technologický postup a obrobení. Jako obrobek je volena discokoule z EN AW 7075,

2. Způsoby hodnocení přesnosti obráběcích strojů

2.1 Normy zabývající se obráběcími stroji především přesností

Technická normalizace dnes zasahuje do všech odvětví, kterými je nejen průmysl ale i běžný život. Jinak tomu není ani při hodnocení přesnosti obráběcích strojů, úpravě bezpečnosti práce a manipulace s nimi. Dříve se vlastnosti jako přesnost, upínání, jednotky aj. upravovaly dle normy ČSN. Dnes se řídí především normami ISO, EN, DIN nebo přejatými normami soustavy ISO do ČSN (ČSN ISO).

Normami o obráběcích strojích na kovy se zabývaly normy ČSN řady 20:

- ČSN 2000 - obráběcí stroje obecně
- ČSN 2002 - názvosloví a třídění
- ČSN 2003 - přesnost obráběcích strojů
- ČSN 2004 - základní parametry
- ČSN 2006 - číslicové řízení obráběcích strojů
- ČSN 2007 - bezpečnostní předpisy
- ČSN 2008 - bezpečnost strojů a nástrojů

Dnes jsou jim ekvivalentní normy ČSN ISO 230 s jednotlivými částmi. Mezi další často používané normy se řadí starší norma Německá norma (VDI/DGQ 3441), která je podobná normě ISO 230 tzn. ČSN 2003. Dále výrobci využívají normy NMTBA (norma USA) nebo normy ASME B5.54-92 (USA). Tyto normy vznikaly postupně v různé době a v různých státech dle potřeb jednotlivých zemí. Každý výrobce se řídí normou jinou a uvádí své standardy dle jiné normy. Avšak velmi často se užívá normy ISO 230. **[3]**

Pro snadnější pochopení určité rozdílnosti těchto norem je nutné definovat si základní pojmy:

Přesnost: Těsnost shody mezi naměřenou hodnotou veličiny a pravou hodnotou měřené veličiny.

Směrodatná (standardní) odchylka: Druh nepřesnosti oproti přesné poloze zpravidla jedna směrodatná odchylka = σ zpravidla se pro výpočty používá $\pm 3\sigma$

Rozptyl: Variace v hodnotách cílové vlastnosti, ve vztahu k hodnotě aritmetického (středního) průměru. Směrodatná odchylka je obvykle používána k reprezentaci rozptylu hodnot kolem hodnoty aritmetického průměru. **[2]**

Opakovatelnost: Zahrnuje neměnné podmínky v čase a schopnost děj s určitou přesností zopakovat. Každý ze standardu počítá s jinými hodnotami, což může vyvolávat dojem vyšší přesnosti některých strojů, ačkoliv tomu tak není. Je důležité porovnávat mezi sebou stroje ve správných standardech, protože každý standard počítá přesnost jinak. **[4]**

Pro představu porovnání některých parametrů v Mezinárodní normě a Německé normě.

ISO 230-2	VDI/DGQ 3441	Srovnání
Oboustranná opakovatelnost nastavení polohy v pozici $R \uparrow = \max[4s_i \uparrow]$	Maximální rozptyl polohy $P_{sjmax} = \max[6\bar{s}_j]$	Podobné Udává maximální odchylku při nastavení polohy jednotlivých bodů P_{sjmax} bude větší, jelikož využívá větší směrodatné odchylky místo dvou využívá tří.

<p>Oboustranná přesnost nastavení polohy v ose</p> $A = \max[\bar{x}_i \uparrow + 2s_i \uparrow; \downarrow + 2s_{i_s_i} \downarrow]$ $-\min[\bar{x}_i \uparrow - 2s_i \uparrow; \bar{x}_i \downarrow - 2s_i \downarrow]$	<p>Nejistota polohy</p> $P = \left[[\bar{x}_j + \frac{1}{2}(U_j + P_{s_j})] \right]_{Max}$ $- [\bar{x}_j - \frac{1}{2}(U_j + P_{s_j})]_{Min}$	<p>Podobné</p> <p>Maximální rozsah hodnoty je založen na průměru chyb polohy. Standardních odchylek a nejistot polohy podél osy. P bude opět větší než A.</p>
---	--	--

Kde platí že:

s_i = odhad jednostranné standardní nejistoty nastavení polohy v ose

\bar{x}_i = průměrná jednostranná polohová úchylka v poloze

\bar{x}_j = systémová odchylka od požadované hodnoty v cílové poloze

\bar{s}_j = průměrná standardní odchylka v cílové poloze

U_j = necitlivost v dané poloze $U_j = |\bar{x}_j \uparrow - \bar{x}_j \downarrow|$

\uparrow = nejvyšší

\downarrow = nejnižší

Jak z těchto výpočtů lze vypožorovat, nejistoty vychází podle Německé normy VDI/DQG 3441 větší než podle mezinárodní soustavy ISO 230 z toho důvodu se i značně liší příslušné přesnosti. Proto je nutné vědět při výběru stroje, kterou normou se řídí výrobce a v jaké přesnosti je potřebné mít stroj.

[5]

Další nejčastěji používanou normou v České republice je ČSN ISO 230. Tato norma byla převzata z mezinárodních ISO norem a skládá se z následujících platných deseti částí:

- Část 1: Geometrická přesnost strojů pracujících bez zatížení nebo za kvazistatických podmínek
- Část 2: Stanovení přesnosti a opakovatelnosti nastavení polohy v číslicově řízených osách obráběcích strojů
- Část 3: Určení tepelných vlivů
- Část 4: Zkoušky kruhové interpolace u číslicově řízených obráběcích strojů
- Část 5: Určení emise hluku
- Část 6: Určení přesnosti nastavení polohy na diagonálách tělesa a stěn (Zkouška diagonálního přestavení)
- Část 7: Geometrická přesnost os rotace
- Část 8: Určení úrovně vibrací [Technická zpráva]
- Část 9: Odhad nejistoty měření pro zkoušky obráběcích strojů podle série ISO 230, základní rovnice [Technická zpráva]
- Část 10: Určení měřicích vlastností snímacích systémů číslicově řízených obráběcích strojů

Ke zmíněným deseti částem je plánované doplnění o část 11, která by se měla zabývat měřicími přístroji a jejich aplikací pro zkoušky geometrie obráběcího stroje [Technická zpráva]

[2]

2.2 ČSN ISO 230-1 Geometrická přesnost strojů pracujících bez zatížení nebo za kvazistatických podmínek:

Norma přejetá ze soustavy norem ISO 230-1:2012

Předmět normy:

První část normy specifikuje metody pro zkoušení přesnosti obráběcích strojů, které pracují bez zatížení nebo za kvazistatických podmínek pomocí geometrických zkoušek obrábění. Tyto metody mohou být použity pro další typy průmyslových strojů, kterými jsou např. stroje pro obrábění kovu, dřeva, odebírání třísek nebo odštěpků materiálu, nebo plastickou deformaci. Vztahuje se na zkoušení geometrické přesnosti a není aplikovatelná na provozní zkoušení obráběcího stroje (vibrace, zadržování pohybu součástí) nebo ke kontrole charakteristik (rychlosti, posuvy). Tato část nepokrývá geometrickou přesnost vysokorychlostních pohybů stroje, kde jsou síly při obrábění typicky menší než síly zrychlení.

Norma obsahuje a definuje řadu důležitých pojmů v několika podkapitolách, mezi které patří:

- Definice pro souřadnicový systém stroje a nomenklaturu pohybu
- Termíny pro statistickou shodu a hysterese
- Termíny pro lineární osy
- Termíny pro osy otáčení
- Termíny pro další vztahy mezi průměrnými čarami osy,
- Termíny pro víceosý pohyb nebo kinematické zkoušky,
- Termíny pro geometrickou přesnost funkčních povrchů stroje součástí obráběcího stroje a zkušebních kusů

Termíny lineární osy

Termíny lineární osy obecně definují a zmiňují chyby v relativním pohybu mezi součástmi stroje, která nese řezný nástroj a součástí, která nese obrobek. Tyto chyby jsou definovány a měřeny v poloze nebo v trajektorii funkčního bodu.

Funkční bod (functional point): střed řezného nástroje nebo bod spojený se součástí na obráběcím stroji, kde by se řezný nástroj dotýkal součásti za účelem úběru materiálu.

Lineární úchylka polohování (linear positioning deviation): pozice dosažená funkčním bodem na pohybující se součásti minus cílová pozice.

Chyba lineárního polohování (linear positioning error): hodnota největší pozitivní úchylky lineárního polohování přidané k absolutní hodnotě největší negativní odchylce polohy.

Úhlová chyba pohybu lineární osy (angular error motion of a linear axis): tři nežádoucí rotační pohyby pohybujících se součástí, které se mají pohybovat podél přímkové trajektorie.

Termíny osy otáčení

Kompletní sada definic geometrické přesnosti otáčení (např. vřeten otočných stolů a ostatních os otáčení) jsou v části 7. Některé další důležité pojmy jsou poté opakovány i v této části normy.

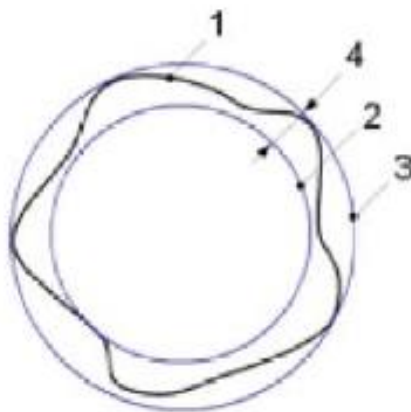
Osa otáčení (axis of rotation): segment čáry, kolem které se objevuje otáčení.

Axiální chyba pohybu (axial error motion): chyba pohybu souosá s průměrnou čarou osy.

Termíny pro víceosý pohyb nebo kinematické zkoušky

Synchronní pohyb (synchronous motion): pohyb obrobku, nebo nástroje podél předem určené cesty v prostoru, zahrnující pohyb dvou nebo více os, současně koordinované řízením stroje.

Kruhová chyba (circular error): minimální radiální vzdálenost mezi dvěma soustřednými referenčními kružnicemi obalujícími skutečnou kruhovou dráhu vyplývající ze synchronního pohybu. [2]



Legenda

- 1 kruhová dráha
- 2, 3 kružnice minimální zóny
- 4 minimální radiální vzdálenost; úchylka kružnice

Obrázek 1- Geometrická přesnost kruhovitost [2]

2.3 ČSN ISO 230-2 Určení přesnosti a opakovatelnosti nastavení polohy v číslicově řízených osách

Tato normová část specifikuje metody zkoušení a hodnocení přesnosti a opakovatelnosti nastavení polohy v osách číslicově řízených strojů přímým měřením jednotlivých os stroje. Tyto metody se použijí jak na lineární osy, tak na osy rotační. Pokud se měří ve více osách současně, tato metoda se nepoužívá. Tato část ISO 230 může být použita při typovém zkoušení, při přijímací zkoušce, při porovnávacím zkoušení, při periodickém ověření korekci stroje, atd.

Použité metody jsou založeny na opakovaném měření v každé poloze:

Zadaná poloha (target position): poloha, do které je programován pohyb pohybující se součástí.

Skutečná poloha (actual position): měření poloha dosažená nastavovanou částí při j-tém nastavení do i-té zadané polohy.

Polohová úchylka (positioning deviation): skutečná poloha dosažená funkčním bodem minus zadaná poloha $x_{ij} = P_{ij} - P_i$.

Jednosměrný (unidirectional): výraz se vztahuje k řadě měření, při kterých se nastavování do zadané polohy v dané ose vykonává vždy ve stejném směru pohybu.

Obousměrný (bi-directional): výraz se vztahuje k měření, při kterých se nastavování do zadané polohy v dané ose vykonává buď ve směru, nebo okolo osy.

Odhad jednosměrné opakovatelnosti osy nastavení polohy v poloze (estimator of the unidirectional axis positioning repeatability at a position): odhad běžné nejistoty polohových úchylek řadou n najetí do polohy P_i v jednom směru

$$s_i \uparrow = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (x_{ij} \uparrow - \bar{x}_i \uparrow)^2}$$

A

$$s_i \downarrow = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (x_{ij} \downarrow - \bar{x}_i \downarrow)^2}$$

Jednosměrná opakovatelnost nastavení polohy v poloze (unidirectional positioning repeatability at a position): rozsah odvozen z odhadu jednosměrné opakovatelnosti osy nastavení polohy v poloze P_i při použití koeficientu rozšíření $k=2$

$$R \uparrow = \max[|4s_i \uparrow|]$$

A

$$R \downarrow = \max[|4s_i \downarrow|]$$

Oboustranná přesnost nastavení polohy v ose (bi-directional positioning error of an axis): rozsah odvozen z kombinace průměrné obousměrné systematické polohové chyby a odhadu pro opakovatelnost při obousměrném nastavení polohy při použití koeficientu rozšíření $k=2$

$$A = \max[\bar{x}_i \uparrow + 2s_i \uparrow; \bar{x}_i \downarrow - 2s_i \downarrow] - \min[\bar{x}_i \uparrow - 2s_i \uparrow; \bar{x}_i \downarrow + 2s_i \downarrow]$$

[6]

Zásady zkoušek obráběcích strojů - Část 3: Určení tepelných vlivů

Třetí část normy ČSN ISO 230 stanovuje tři zkoušky pro určení tepelných vlivů na obráběcí stroj:

- zkouška pro určení chyby vzniklé v důsledku kolísání environmentální teploty (ETVE)
- zkouška tepelných deformací způsobených otáčením vřetena
- zkouška tepelných deformací způsobených pohybem v lineárních osách

Zkouška ETVE

Určena pro zjištění vlivů změn environmentální teploty na stroj a pro odhad chyby způsobené teplotou v průběhu jiných měření provozních vlastností.

Tepelné deformace způsobené otáčením vřetene

Všeobecně

Účelem zkoušky je zjistit vlivy vnitřního tepla, jež vzniká otáčením vřetene a celkového teplotního gradientu na stroji, na deformace stroje pozorované mezi nástrojem a obrobkem. Tato zkouška se provádí jen na strojích s otáčejícími se vřeteny.

Tepelné deformace

Cílem této zkoušky je identifikovat vlivy vnitřního tepla, způsobeného systémem stroje pro nastavování polohy a třením ve vedení na deformace stroje mezi obrobkem a nástrojem. Zkouška je prováděna pouze na číslicově řízených NC strojích. [7]

2.4 Zásady zkoušek obráběcích strojů- Část 4: Zkoušky kruhové interpolace u číslicově řízených obráběcích strojů

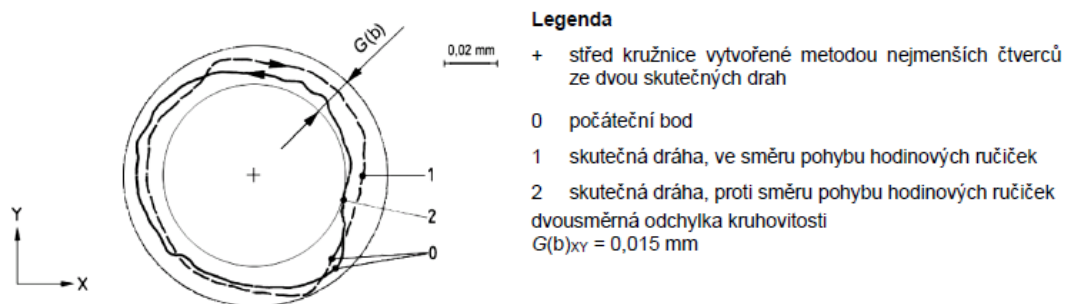
Specifikuje a upřesňuje metody zkoušek a vyhodnocení dvousměrné odchytky kruhovitosti, průměrné dvousměrné radiální odchytky, odchytky kruhovitosti a radiální odchytky kruhové dráhy, která je tvořena současným pohybem ve dvou lineárních osách.

Termíny a definice

Jmenovitá dráha: programovaná kruhová dráha definovaná svým průměrem, polohou svého středu a jeho orientací v pracovním prostoru obráběcího stroje, která může být tvořena úplnou kružnicí nebo její částí a to v minimálním rozsahu 90°.

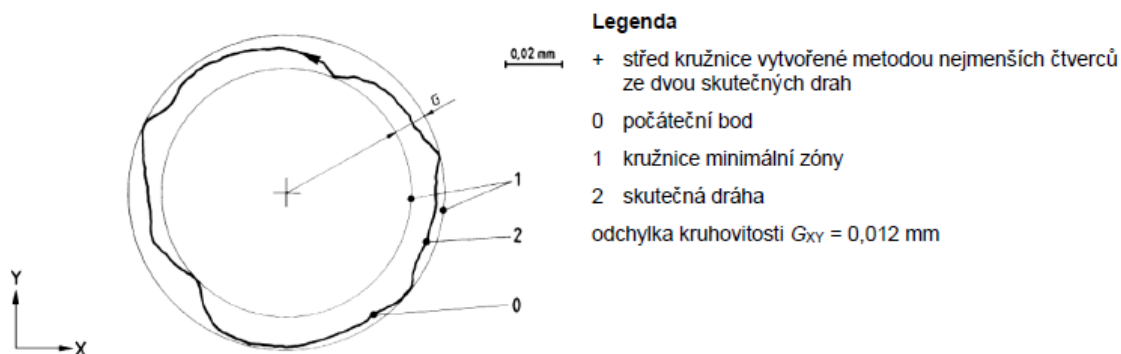
Skutečná dráha: dráha vytvářená stroje při zadaném programu pohybu po jmenovité dráze.

Dvousměrná odchytka kruhovitosti: (bi-directional circular deviation) minimální radiální vzdálenost dvou soustředných kružnic ohraničující dvě skutečné dráhy, kde jedna dráha je tvořena pohybem ve směru hodinových ručiček a druhá protisměru.



Obrázek 2- Dvousměrná odchytka kruhovitosti [9]

Odchytka kruhovitosti (circular deviation): minimální radiální vzdálenost dvou soustředných kružnic ohraničujících skutečnou dráhu ve směru nebo protisměru pohybu hodinových ručiček vrstevnicové dráhy, která může být vyhodnocena jako maximální radiální rozsah okolo kružnice vytvořené metodou nejmenších čtverců



Obrázek 3- Odchylka kruhovitosti [9]

Podmínky zkoušek

Zkušební environment

Je-li možno řídit jeho teplotu, musí být nastavena na 20°C. Jinak musí být výstup měřícího stroje a jmenovité dráhy odečítáním nastaveny tak, aby po opravě dávaly výsledky na 20°C

Zkoušený stroj

Musí být plně funkční a kompletně smontovaný. Veškeré vyrovnání a funkční zkoušky musí být dokončeny před započítáním zkoušek.

Ohřev stroje

Zkouškám musí předcházet vhodný ohřívací postup stroje specifikovaný výrobcem stroje nebo dohodnutý mezi dodavatelem a odběratelem.

[9]

2.5 Zásady zkoušek obráběcích strojů část 6: Určení přesnosti nastavení polohy na diagonální tělesa a stěn (zkouška diagonálního přestavení)

Předmět normy

Tato část stanovuje zkoušky diagonálního přestavení, které umožňují odhadnutí volumetrických vlastností stroje.

[11]

2.6 Zásady zkoušek obráběcích strojů - Část 7: Geometrická přesnost os rotace

Specifikuje normalizované metody specifika a zkoušek geometrické přesnosti os rotace použitých v obráběcích strojích. Vřetena, rotační hlavy, rotující a naklápěcí stoly obráběcích strojů vytvářejí osy rotace, které také mají nechtěné pohyby v prostoru jako výsledek vícenásobných zdrojů chyb.

To pokrývá následující vlastnosti vřeten: Chybné pohyby os rotace, posuny os vyvolané rychlostí.

Chyba pohybů v citlivém směru způsobí chybu tvaru 1:1 a tyto konečné chyby se budou odrážet v obrobku, proto jsou nejvýznamnější pro charakteristiku vlastností obráběcího stroje.

3. Konstrukční specifika přesných obráběcích strojů

U jednotlivých výrobců se nejrůzněji liší konstrukční provedení jejich obráběcích strojů a center.

Pro výrobu vysoce kvalitních povrchů je potřeba mít zejména precizní nástroje a vysokou rychlost vřetene. Ale dosáhnout vysoké rychlosti vřetene přináší mnohá úskalí. Mezi některé z nich určitě patří, že pouze relativně malá vřetena lze roztočit potřebnými otáčkami. Dále je důležité mít pro vysokou přesnost velmi tuhé stroje, precizně řešené vedení a stejně tak se musí klást důraz na upínání nástrojů do vřeten a teplotní kompenzace.

3.1 Rám stroje

Rám výrobního stroje je soustava těles, které mezi sebou přenáší účinky všech působících sil.

Rám obráběcího stroje musí zvládnout přenášet statické i dynamické síly, zároveň musí být tepelně stabilní a musí být řešeny odvozy tepla. Mimo jiné musí být možné snadno manipulovat s výrobkem v pracovním prostoru stroje. Rám by měl být jednoduchý a mít nízkou hmotnost a v neposlední řadě by měl mít správný design, aby byl estetický a ergonomický.

Statická tuhost: musí zaručit, že bude zachována stálá poloha a tvar částí rámu. Vysoká tuhost ve statickém stavu zároveň citelně ovlivňuje i chování při dynamickém zatěžení.

Dynamická tuhost: musí být zabezpečeno, že nebude přenášeno chvění, které způsobuje nekvalitní povrch, navíc snižuje možnost využití instalovaného výkonu stroje.

Tepelná stabilita- Rám musí umožnit dobrý odvod tepla, s tím souvisí odvod třísek, které značně ohřívají stroj.

Rámy lze navrhnout dělené s předpjatými spoji nebo nedělené. Přičemž na větší stroje se používají dělené díly.

Na celkovou tuhost má vliv, jestli je rám otevřený nebo uzavřený, kde uzavřený má větší tuhost, ale nejde ho využít všude, avšak u otevřeného rámu je lepší snáze manipulovat s obrobkem.

Pro konstrukci rámu se využívá materiálů s vysokým Youngovým modulem pružnosti, nízkou hustotou, malou tepelnou roztažností, dobrou tepelnou vodivostí pro rychlý odvod tepla. Zároveň rám nesmí být nákladný. Nejčastější materiál pro výrobu lože je litina popřípadě ocel. Dále mohou být z nekovových materiálů jako polymer-beton, granitu a dalších. V poslední době se začínají uplatňovat i sendvičové struktury. **[10][17]**

Materiály rámu

Konvenční materiály

Šedá litina

Výhody: levná, dobře tlumí rázy, využití nenákladné technologie.

Nevýhody: možnost vzniku pnutí v odlitku, malý modul pružnosti.

Tvárná litina

Výhody: vyšší modul pružnosti.

Nevýhody: vyšší cena.

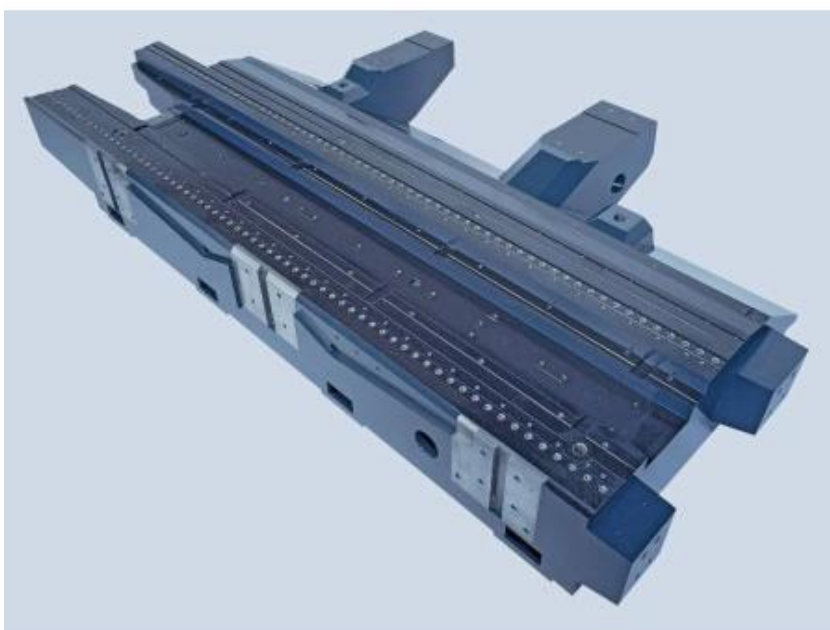
Nekonvenční materiály

Většinou materiály, které mají nižší tuhost, ale lepší teplotní a dynamické vlastnosti.

Minerální litina: polymerbeton. Je směs anorganické látky (kamenivo) a spojovacího činidla (epoxydové hmoty). Vyrábí se smícháním a střešením komponent, poté následuje vytvrzení. Na trhu figurují pod různými obchodními názvy jako granitan, epucet a další.

Granit: přírodní materiál s vysokou teplotní a dynamickou stálostí. Jednotlivé díly spojeny buď lepením, nebo šrouby. Využívají se zejména pro přesná měřicí centra.

Sendvičové konstrukce: tvořeny potahy a výplní. Vrchní vrstvy (potahy) nesou namáhání, výplně přenášejí smykové namáhání a výrazně tlumí rázové účinky. Při konstruování rámu obráběcích strojů se zkouší využití kovových například hliníkových pěn vyrobených z kovového prášku. Výrobou kovových pěn se zabývá mnoho výrobců, ale i přes to tyto konstrukce stále nejsou masově uplatněny v průmyslových obráběcích strojích.



Obrázek 4- Lože z minerálního kompozitu[19]

Ukládání strojů

Způsob uložení se volí dle vlastností stroje, hlavně podle jeho velikosti a hmotnosti, které na něm mají být umístěny a jaké má provozní podmínky. U velmi rozměrných strojů je uložení bráno jako součást stroje.

Možnosti uložení

Na podlahu: pro menší stroje do hmotnosti 10t na tuhé nebo pružné podložky

Na samostatný základ: pro velké a středně velké stroje na zemní nebo pružné prvky

U velkých strojů by uložení mělo umožňovat vyrovnání stroje do vodorovné polohy. Z toho důvodu se lože strojů upevňují na základ pomocí výškově stavitelných základových šroubů. Základy je třeba izolovat.

3.2 Vřetena

Vřeteno obráběcího stroje musí zajistit, aby rozhraní umožnilo rychlou výměnu. Ve chvílích, kdy se obrábí, musí obráběcí centrum zajistit vysokou tuhost a spojení mezi vřetenem stroje a spojkou nástrojového držáku a to i přesto, že účinky řezných sil se ho snaží rozpojit. Je důležité mít rozhraní s dobrou ohybovou tuhostí a schopností přenosu krouticího momentu.

Ohybová tuhost: je nezbytná pro stabilitu obráběcího procesu při práci s dlouhým vyložením vřetena nebo při odebrání třísky s velkým průřezem.

Přenos krouticího momentu: nejchoulostivější jsou operace prováděné na velkých průměrech. Zatížení, které působí v určité vzdálenosti od osy otáčení vřetena (krouticí moment = síla × poloměr) musí být v opačném směru vyrovnáno lepším kontaktem ploch přenášejících hnací sílu.

Přesná osová poloha nástroje: umožňuje dosažení opakovatelnosti a bezpečnosti výroby, což je obzvláště důležité u soustružnických operací.

Parametry spojky, které udávají schopnost odolat ohybovým nebo řezným silám jsou:

Průměr dosedací plochy příruby: dosedací plocha příruby zvyšuje velikost opěrné plochy základny, což snižuje momentové účinky řezné síly.

Upínací síla: s větší upínací silou spojky je možno využít větších řezných sil bez nebezpečí prokluzu.

[13]

Vřetena můžeme rozdělit z konstrukčního hlediska do několika skupin podle:

- typu ložisek
- způsobu mazání ložisek
- typu upínacího kužele
- druhu náhonu a dalších

Typy ložisek:

Vřetena obráběcích strojů jsou ve většině případů (uvádí se až 90 %) ukládána do valivých ložisek.

Obecně lze ložiska rozdělit do několika skupin:



[14]

Obrázek 5-Rozdělení ložisek [14]

Kluzná ložiska

Kluzná ložiska využívají smíšeného a hydrodynamického tření. Z tohoto důvodu se při využití kluzných ložisek častěji využívají hydrodynamická ložiska. Ale jejich hlavní nevýhodou je změna polohy osy otáčení v mezích vůle vřetene a ložiskové pánve s proměnlivostí zatížení. Proto se pánve ložisek navrhují tak, aby pomáhali osu centrovat. Jedním z problémů je vyšší oteplování při vysokých otáčkách **[14] [15]**

Hydrostatická, aerostatická ložiska

Tato ložiska využívají nosného média (olejové nebo vzduchové vrstvy) přiváděného do ložiska pod tlakem. Požadovaný tlak je mazivu dodán ještě před samotným počátkem rotace, čímž je zabráněno kontaktu a opotřebením styčných ploch při rozběhu. Tato ložiska jsou složitější a náročnější na výrobu. Občas se upřednostňují před hydrodynamickými ložisky kvůli absenci tření při rozběhu.

V případě aerostatických ložisek je jako nosné prostředí využit vzduch (aero). Aerostatická ložiska jsou opatřena kompresorem, který přivádí tlakový vzduch. Jsou drahá, složitá a obvyklé využití nacházejí u rychloběžných strojů. Při jejich provozu vzniká velmi malé tření a mají tichý chod a dlouhou životnost.

Často se využívají pro velmi přesné obrábění a mikro-obrábění. Jejich nevýhodou je nižší únosnost.

[15] [16]

Valivá ložiska

Ložiska využívající valivého tření jsou momentálně nejpoužívanější a to zejména díky svým nesporným výhodám, kterými jsou malé tření, nižší ohřívání, vysoká tuhost díky předpětí, je možné minimalizovat vůli a lze využít vysokých otáček. Ovšem každá výhoda na sebe váže i nevýhody. Tento typ ložisek jen těžko dosahuje požadované přesnosti, jsou náchylnější rázům a hůř tlumí chvění, což může někdy činit značné potíže.

[17]

3.3 Typy pohonů

Motory rozdělení:

Podle výstupní energie:

- Elektromotory
- Hydromotory

Podle výstupního pohybu:

- Rotační: krouticí moment a otáčky.
- Lineární: posuvová síla a rychlost pohybu.

Volba typu pohonu závisí na využití motoru, což znamená, zda ho chceme využít pro pohon vřeten nebo pro pohon lineárních posuvných os.

Dle toho se pohony dělí na tři základní:

- pohony vřeten
- pohony posuvů
- pomocné pohony.

Náhon vřetene je realizován pomocí vloženého převodu, přímého náhonu nebo pomocí elektro-vřetene.

Motory na střídavý proud AC Indukční motory

Synchronní motory fungují na principu vinutí na statoru, které je napájeno třífázovým (střídavým proudem) a vytváří točivé elektromagnetické pole. Po doplnění frekvenčním měničem lze otáčky motoru v určitém rozsahu plynule regulovat. Pro pohon vřeten obráběcích strojů se nejvíce používají regulovatelné asynchronní motory, které dávají vysoký konstantní výkon při velkém rozsahu otáček.

[17]

Synchronní motory

„Vinutí na statoru je obdobné jako u asynchronních motorů, ale rotor nese permanentní magnety s póly, které jsou střídavě severní a jižní a je buzen z cizího zdroje. Změnami směru magnetického toku ve statoru se rotor pohybuje. Po doplnění frekvenčním měničem lze otáčky regulovat v určitém rozsahu plynule. Pro posuvové mechanismy obráběcích strojů se nejvíce používají regulovatelné synchronní motory. Pro tyto pohony je důležitý velký rozsah konstantního krouticího momentu, který vyvozuje konstantní posuvovou sílu, vysoké hodnoty zrychlení a zastavení a přesné najetí do požadované pozice.“ **[17] [15]**

Pohon vloženým převodem

Pohon ozubenými koly: Pro přenos velkých krouticích momentů a umožňuje tvorbu vysokých převodových poměrů. Jeho účinnost je oproti ostatním pohonům relativně nízká cca 90 %. Tato energie se přeměňuje na tepelnou a velmi výrazně zahřívá celý stroj, což má nepříznivé účinky na výslednou kvalitu. Navíc samotný převod může způsobit vibrace a tím znovu snižuje přesnost.

Pohon pomocí řemene: Přenos nižších krouticích momentů. Využívá se zde buď klínových řemenů, nebo ozubených řemenů tam kde je třeba zajistit přesnou polohu vřetene. Má větší účinnost než převod ozubenými koly.

Ani jeden z těchto způsobů již dnes není příliš často realizován, ale pořád se s nimi můžeme v praxi setkat zejména v některých starších aplikacích.

[17]

Pohon přímým náhonem

Vřeteno je přímo spojeno s motorem pomocí spojky a má stejné otáčky. Tyto pohony se používají pro moderní obráběcí stroje, kde je třeba vysokorychlostní obrábění, ale nejsou vyžadovány vysoké krouticí momenty. Jde o jakousi alternativu k integrovanému pohonu (elektro-vřetenu).

Pohon elektro-vřetenem (integrovaným vřetenem)

Jak napovídá název elektrovřetena mají motor integrovaný ve vřetenu. Rotor je přímo nalisován na vřeteno a stator se nachází na vnějším plášti vřetene. Díky tomu můžeme dosáhnout snížení možnosti vzniku vibrací. Tato vřetena rovněž jako vřetena s přímým náhonem dosahují vysokých otáček. Tato vřetena se obvykle umísťují na tzv. hybridní ložiska, protože se zde dosahuje velmi vysokých otáček. Za nevýhodu lze považovat samotné umístění motoru na vřeteni, jelikož motor zde vytváří teplo, to je dále rozváděno do vřetene a z toho důvodu jej musíme intenzivně chladit.

[18], [17]

Pohony lineárních os

Pohony lineárních os jsou obvykle složeny z elektrické a mechanické části. Elektrické části jsou dnes na vysoké úrovni, avšak brzdícím prvkem těchto řetězců jsou mechanické součástky. A proto je snaha, je-li to možné, mechanické součástky vynechat jako je tomu např. u některých součástek pomocí lineárních motorů nebo torzních motorů.

Možnosti uspořádání pohonu

Kuličkový šroub

Lineární motory,

Šnek šnekový hřeben

Pastorek a hřeben

Kuličkový šroub- Je stále nejběžnějším způsobem náhonem lineárních os pro středně velké a menší stroje. Šroub může být buď pohyblivý se stojící maticí. Obvykle se pohánějí tímto způsobem osy do 4m. U šroubů dochází zahříváním k tepelné roztažnosti, a proto na jednom konci musí mít lehkou vůli, aby se mohl roztahovat. To snižuje celkovou tuhost mechanismu. Pro snížení tepelného ovlivnění šroubu se šrouby vyrábí s vrtanými kanálky, aby se mohla rozvádět chladicí kapalina a rovnoměrně zchladiť šroub. Další způsob snížení teplot je využití keramických kuliček, které mají nižší součinitel tření a jsou minimálně tepelně vodivé.



Obrázek 6- Kuličkový šroub [23]

Při použití s pohyblivým šroubem musíme šroub kontrolovat na vzpěry a kritické otáčky v závislosti na průměru šroubu. Při dosažení kritických otáček dojde k rozkmitání šroubu, to může poškodit jeho uložení, nebo zničit matici. Zlepšení dynamiky v tomto případě dosahujeme zdvojením pohonu šroubu umístěním motorů na začátek a konec šroubu. **[23][17]**

Lineární motory: Mohou být synchronní i asynchronní a lze je užít pro přímé pohony posuvů. Lineární motory se vyznačují velmi přesným polohováním, jejich nevýhodou je tepelné a elektromagnetické ovlivňování okolí motoru, z tohoto důvodu musí být odstíněny. **[17]**

Pastorek a hřeben: Jedním z mechanismů pro přeměnu rotačního pohybu na přímočarý. Dává menší převod, ale má dobrou účinnost a větší tuhost. Obvykle má menší přesnost. Pokud má být použit pro odměřování polohy, musí se výrobě hřebenu věnovat vyšší pozornost, zuby se upraví broušením a je nutno vymezit vůli vhodným předepnutím. **[17]**

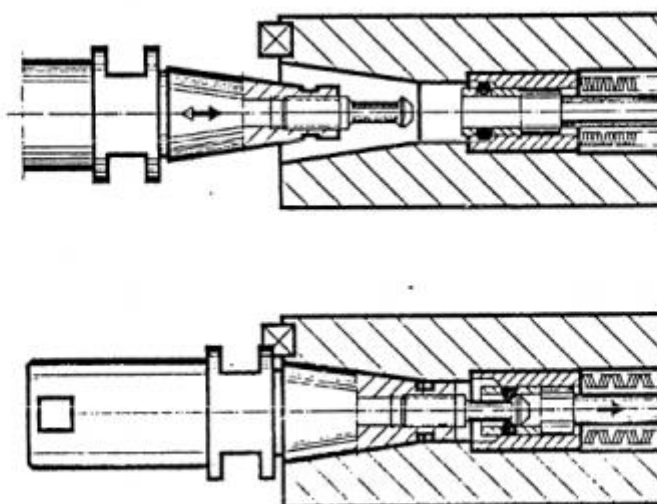
3.4 Upínání do vřeten

Upínací mechanismy se využívají zejména při upnutí nástrojů do stroje, jejich úkolem je umožnit upnutí a opětné uvolnění spojovaných částí.

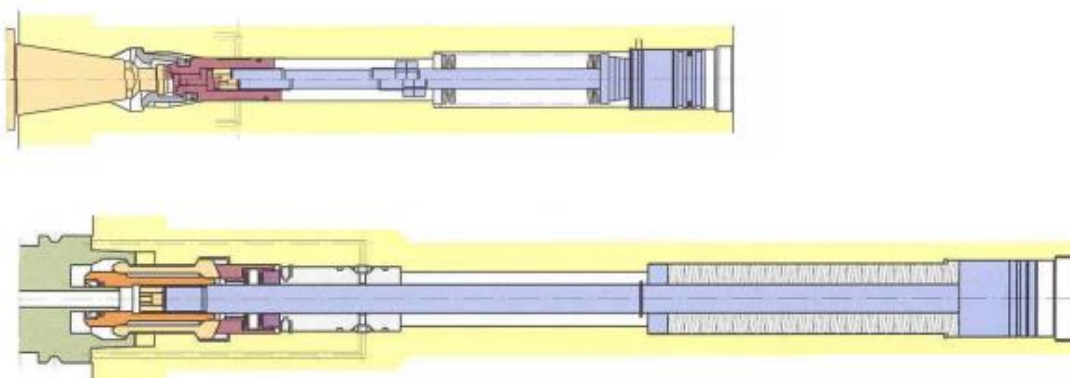
Upínače se dělí na ruční a automatické a musí splňovat několik podmínek:

- bezpečnost,
- tuhost,
- vhodné tlumení.

Rotující nástroj je upnut do vřetene upínáním, kde je obvykle hydraulická síla a pružina. Konce nástrojů jsou provedeny dle norem buď s kuželovou stopkou ISO nebo kuželem HSK. U kuželové stopky ISO je točivý moment přenášen třením na kuželové ploše stopky nástroje a unášecími kameny. U kužele HSK je točivý moment přenesen třením na kuželové ploše i na čele, poněvadž kužel dosedá přesně. Strmé kužely mají vždy stejnou kuželovitost. Drážky pro ruku manipulátoru a závit pro závrtný tažný čep se mohou lišit. K dispozici pro systémy CAT, ISO, DIN nebo MAS BT. **[17] [14]**



Obrázek 7- ISO kužel upnutí [17]



Obrázek 8- Nahoře upnutí ISO kuželem dole upnutí HSK [17]

Pro vysokorychlostní obráběcí stroje se využívá téměř výhradně HSK kuželů a to jmenovitých rozměrů 25-63 mm. Ale i přesto existují některé výjimky, které využívají ISO kužel nebo BT.



Obrázek 9- Upínací prvky [17]

3.5 Vedení obráběcích strojů

Vedení je soustava vodících ploch, kde se setkává vodící pohyblivá a nepohyblivá část, ta má za úkol zajistit geometricky přesné pohyby po drahách.

Podle tvaru rozlišujeme vedení na kruhová a přímá. Další dělení může být podle typu tření na kluzná, valivá, kombinovaná. **[20]**

Vedení obráběcího stroje musí splňovat několik požadavků:

- Musí mít vysokou statickou a dynamickou tuhost.
- Musí být vyrobeno s odchylkou, aby se od ideálního tvaru lišili minimálně a mohlo být dosaženo požadované přesnosti stroje.
- Přesnost vedení dosažená při výrobě má zůstat zachována po maximální možnou dobu, snaha o volbu ideálního materiálu ploch popřípadě i tepelná zpracování materiálu.
- Musí být zajištěno mazání, aby ztráty pohybu a opotřebení vodících prvků byly co nejnižší.
- Tvar by měl být s ohledem na výrobu jednoduše vyrobitelný.
- Odolnost kmitání.

3.5.1 Vedení přímočará

Přímochará vedení můžeme rozdělit dle tvaru a dle druhu vedení, přičemž dle tvaru se jedná např. o válcová, hranolová, trojboká a další. Vedení rozdělovaná dle druhu zahrnují kluzná (hydrodynamická, hydrostatická), valivá (otevřená, uzavřená), kombinovaná a jiná (aerostatická).

3.5.2 Vedení kluzná

Kluzná vedení jsou vhodná pro přenášení vysokých zatížení a pro velké stroje. Zároveň dobře zvládají tlumit chvění **[17] [21]**

Hydrostatické vedení: Princip vychází z dodávání tlakového oleje mezi stykové plochy. Vyznačuje se malým součinitelem tření při vysokých rychlostech.

Mezi jeho výhody lze zahrnout: malý součinitel tření, třecí síla stoupá s rychlostí (kladně ovlivňuje stabilitu při malých rychlostech), nízké opotřebení, velmi vysoké tlumení ve směru na plochy, nemá vůli.

Naopak mezi nevýhody patří: vedení musí být co nejužší, aby byla rovnoměrná vrstva olejového filmu, komplikovaná konstrukce, náklady na provoz a údržbu.

Využívá se u vysoce přesných obráběcích strojů, kde díky malému třecímu odporu umožní přesné najetí cílové polohy. V minulosti byla hydrostatická vedení používána zřídka kvůli vysokým ekonomickým nákladům. **[6][22]**

Hydrodynamické vedení: Tento typ vedení je založen na hydrodynamickém efektu, při kterém vzniká na principu pohybu šikmé desky v proudu kapaliny hydrodynamický vztlak, který desku nadnáší. Pohyb probíhá díky kapalinnému tření, které ovšem vzniká až při vyšších rychlostech a závisí na viskozitě a sklonu desky v kapalině. Vlivem tření materiálů vzájemně o sebe vzniká teplo a materiály se opotřebovávají, což má určité negativní vlivy. Součinitel kluzného pohybu se s rychlostí pohybu kluzu mění. Při určitých nižších kluzných rychlostech se mohou vyskytnout trhavé pohyby vlivem poklesu součinitele tření, což negativně ovlivňuje celý výrobní proces. Velikost poskoku při trhavém pohybu lze snížit buď zvyšováním tuhosti případně snižováním rozdílů tření za klidu a za pohybu. Poskoky můžeme odstranit zcela, když nahradíme hydrodynamické tření hydrostatickým třením.

Vedení bez obložení: Pro tento typ vedení se obvykle volí materiály s rozdílnou tvrdostí, protože se méně opotřebovávají. Koeficient tření u těchto vedení je 0,15-0,3.

Kombinace materiálů:

Litina - litina možnost vzniku trhavého pohybu.

Litina - ocel/bronz vyšší životnost horší kluzné podmínky.

Vedení s obložením: Obložení využito pro zlepšení kluzných vlastností. Obkládá se nejčastěji plastem, kde jsou koeficienty tření (0,04-0,18) – např. Metal s plastem. Snižuje se tak i velikost poskoku a to až 3,5x. **[22][17]**

3.5.3 Vedení valivá

Valivá vedení mají nízké tření nezávislé na rychlosti pohybu a mají provedení bez vůle, vysokou tuhost to však na úkor tlumení chvění a ochrany vnikání nečistot. Použité pro vysoké pracovní přesnosti a střední zatížení.

Rozdělení valivých vedení:

- Otevřená - zachycují jen zatížení působící tlakem, nesmí odléhat
- Uzavřená – přenesou i klopné momenty

Stav při práci:

- Předepnutá – předepnutím se vymezí vůle a zvýší tuhost.
- Nepředepnutá - mohou pracovat ve formě otevřených vedení, uzavřená se používají zásadně s předepnutím.

Dle délky zdvihu

- omezený zdvih
- neomezený.

Malé zdvihy se realizují tak, že obě části, pohyblivá i nepohyblivá jsou stejně dlouhá a valivá tělíska jsou stále v kontaktu s oběma částmi vedení. Pro velké zdvihy se užívá valivých tělísek s recirkulací - valivých hnízd.

Dle tvaru valivých těles se valivá vedení dělí na následující druhy:

- jehlová
- kuličková
- válečková.

Přičemž nejčastěji se využívají kuličková a válečková vedení.

Válečková vedení mají větší stykovou plochu, tudíž větší tuhost, únosnost a životnost. Při nedodržení přesnosti montáže může dojít k vychýlení vodící dráhy, to může mít za následek zatížení hran válečků a to vyvolává nárůst napětí ve válečku. Z tohoto důvodu se konce válečku zaoblují nebo zakřívují.



Obrázek 10- Lineární vedení válečkové [24]

Kuličková vedení: Nižší tuhost a únosnost než válečková vedení, ale nejsou citlivé na vychýlení dotykových ploch. Valivá hnízda jsou připevněna k pohyblivé části, pevné vodící plochy (pojezdové lišty) jsou na pevné části stroje. Valivá hnízda jsou velmi tuhá, používají se předepnutá a součinitel jejich valivého tření je 0,003 – 0,005.

[22][17]

Vedení musí být přesné a z toho důvodu jsou plochy zhotoveny broušením nebo zaškrabováním.

Dříve bylo zaškrabávání obvyklou technologií dokončování vedení. Dnes je s častějším využíváním valivého vedení na ústupu hlavně kvůli své pracnosti a nutnosti mít kvalifikované pracovníky. I přesto stále některé firmy zaškrabávání využívají. Obvykle se využívá valivého vedení pohybujících se částí a zaškrabování nepohyblivých částí. Pro zaškrabávání některých ploch hovoří, že při broušení může vniknout do vedení napětí, což může způsobit deformaci odlitku a ztrátu přesnosti stroje. [17][25]

3.6 Deformace částí obráběcího stroje vlivem teplotního gradientu

Příčin zvyšování teploty v jednotlivých součástích je několik, ale mezi základní lze zařadit vnější zdroje, kdy se v průběhu výroby jednoho dílu teplota vnějšího okolí může měnit ať už působením slunečních paprsků, nebo v zimním období výpadkem vytápění. Mezi vnitřní zdroje poté patří někdy opomíjené

vlivy. Částečně jsou tyto vlivy popsány v předchozí části, kde jsou prezentovány ztráty výkonu motoru, tření vodících částí a samotný obráběcí proces značně zvyšují teplotu ve výrobním zařízení a je nutno s tímto vlivem počítat pro přesnou výrobu.

Vnější vlivy: teplota okolí, tepelné záření, pohyb vzduchu

Vnitřní vlivy: pohony, obráběcí proces

Pro zjišťování teploty se používají snímače (čidla), které mohou být dotykové nebo bezdotykové.

Prvním krokem pro omezení vlivů teploty je zjistit, jak moc velké jsou teplotní gradienty jednotlivých částí. Z toho důvodu se v jednotlivých částech vyhodnocují různými snímači např. odporovými čidly.

3.6.1 Senzory

Dotykové senzory - odporové kovové senzory, odporové polovodičové senzory, NTC termistory, PTC termistory, termoelektrické senzory.

Bezdotykové senzory - tepelné detektory infračerveného záření, termogram, termovize.

3.6.2 Konstrukce

Tepelné deformace mohou být sníženy v konstrukční fázi návrhu obráběcího stroje. Jedna z metod je návrh tepelně symetrické konstrukce. To však není možné u všech součástí.

3.6.3 Chlazení

Minimalizovat tepelnou chybu je možné i řízením množství tepla přenášeného do rámu stroje, lože a dalších. Technicky je postup proveden např. začleněním chladících plášťů kolem vřeten nebo průtokovým chlazením lože a rámu stroje. Chlazení umožňuje lepší odvod tepla a výrazně může snížit tepelné deformace.

3.6.4 Kompenzace

Pasivní kompenzace: Pasivní tepelná kompenzace může spočívat ve volbě materiálu s minimální teplotní roztažností, další metodou pasivní kompenzace je změna konstrukce a chlazení.

Aktivní kompenzace: Aktivní kompenzace tepelné chyby je proces, při kterém je chyba korigována nastavením polohy nástroje a obrobku. Ve srovnání s pasivní kompenzací je výhodnější a hospodárnější. Podstata aktivní kompenzace spočívá v měření či prognóze tepelné chyby v reálném čase a následném zvedení korekcí nástrojů.

Metody kompenzace:

Přímé metody: založeny na snímačích, které měří chyby.

Nepřímé metody: založené na snímačích a prognóze s využitím matematickým modelů.

Hybridní metody: využívají prognózy chyb, které jsou založené na použitých matematických modelech využívající informace jako je odměřování teploty a charakteristické deformace bodů struktury obráběcích strojů. Zároveň berou v potaz vnitřní data, jako jsou rychlost otáčení vřetene, posuv, teplota motoru a další.

Všechny tyto součásti jsou pro precizní chod obráběcích strojů nepostradatelné a výrobci se s nimi podrobně zabývají. Jelikož u precizních strojů je důležitá velmi vysoká přesnost, musí být splněny vysoké otáčky vřetene. Zároveň vřeteno má být tuhé, aby nedocházelo k jeho házení a zbytečnému kmitání, které značně snižuje přesnost. Vysoké rychlosti nejde dosahovat s příliš velkými upínači, a

proto se volí spíše upínače malých velikostí, velmi důležité jsou samotné motory vedení stroje a teplotní kompenzace všechny tyto věci řeší každý výrobce individuálně, i když u většiny precizních výrobců si můžeme všimnout například využití typově stejných motorů, anebo obdobných výrobních technologií pro výrobu lože.

4. Vysoce přesná frézovací centra: výrobci, parametry, srovnání

4.1 KERN

Výkon motoru	7-15 kW
Nominální krouticí moment	1,1-5,9 Nm
Maximální rychlost vřetene	32 000-80 000 ot/min
Maximální krok v ose x	16-60 m/min
Maximální krok v ose y	16-60 m/min
Maximální krok v ose z	16-60 m/min
Vedení	Lineární motor/kuličkový šroub/ hydrostaticky vedený šroub
Přesnost najetí polohy	<2-10 μm
Motor vřetene	Integrovaný elektromotor
Upínač	HSK 40-25

Přesnosti (VDI/DVQ 3441)

Přesnost polohování P:<1,5 μm

Opakovatelnost P_s<1 μm

Přesnosti (ISO 230-4)

Kruhová odchylka G_{yx} <3 μm

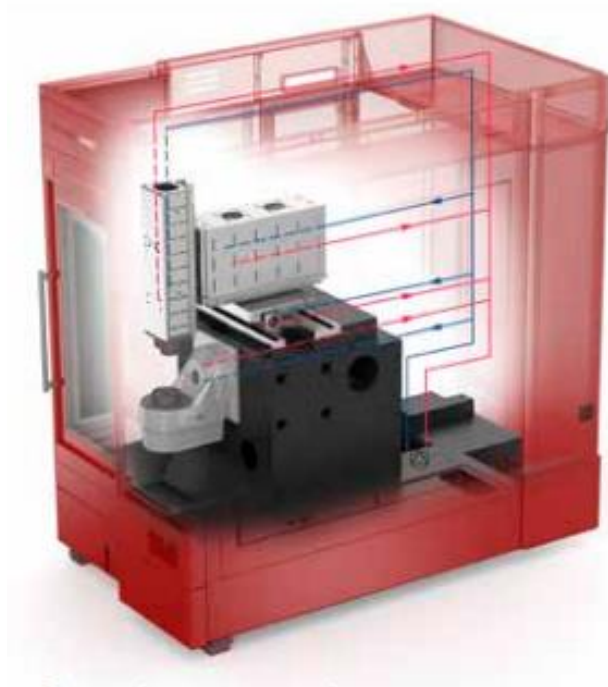
Kruhová odchylka G_{xy} <3 μm

Technologie

Vnitřní teplotní management s přesností teploty ± 80 mK

Pěti-osé simultánní obrábění

Jako každý výrobce se Kern snaží aktivně bojovat s teplotními odchylkami v jednotlivých součástech stroje a to zejména vnitřním chlazením vysoce zahříváných částí. Vedení je vyrobeno z tvrzeného hliníku. Většina strojů vyráběná KERNem má ve standardní výbavě 4 a 5 osu. Případně jsou tyto osy jako volitelné. Řídicí systém všech strojů je Heidenhain. Všechny stroje mají možnost využívat chlazení skrz nástroj.



Obrázek 11- Rozvedení tepla[28]



Obrázek 12- Obráběcí centrum Kern-Micro VARIO [28]

4.2 Yasda

Výkon motoru	7,5-10 kW
Nominální krouticí moment	1,8 Nm
Maximální rychlost vřetene	40 000-50 000 ot/min
Maximální krok v ose x	20 m/min
Maximální krok v ose y	20 m/min
Maximální krok v ose z	20 m/min
Vedení	Lineární motor
Přesnost najetí polohy	<1 μm
Motor vřetene	elektromotor
Upínač	HSK E32-25

Přesnosti (ISO 230-2)

Přesnosti polohování A<1 μm

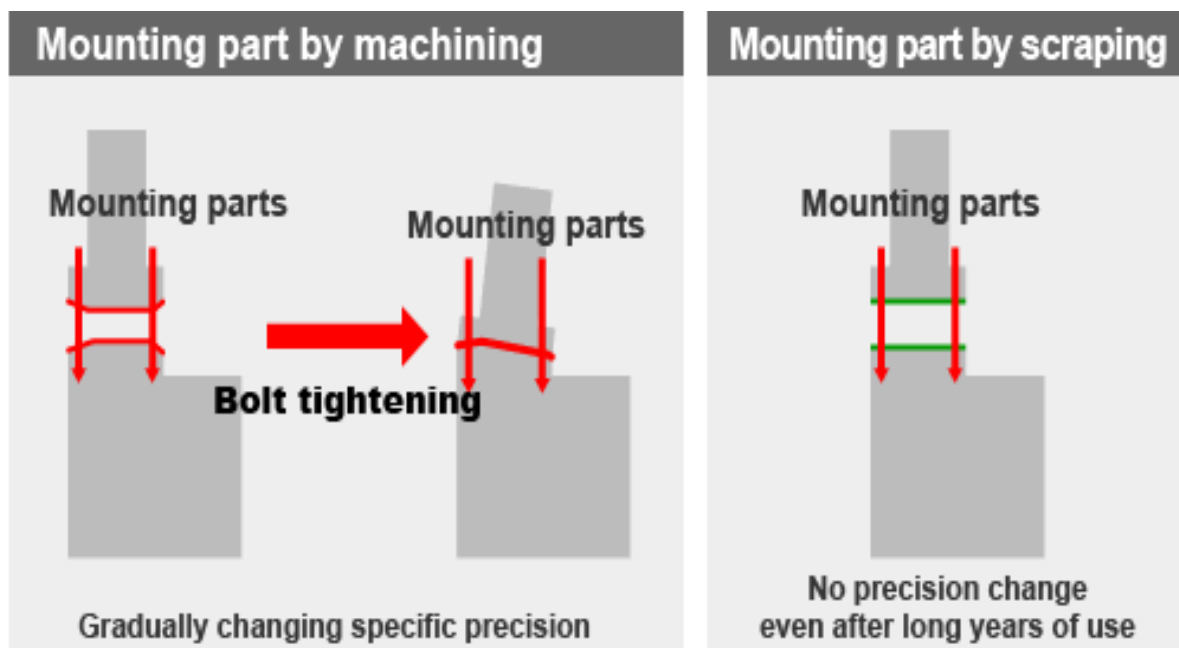
Opakovatelnost R<0,5 μm

Přesnosti (ISO 230-4)

Kruhá odchyška $G_{yx} < 1 \mu\text{m}$

Kruhá odchyška $G_{xz} < 1 \mu\text{m}$

Stejně jako Kern má i Yasda vyvinutý speciální systém chlazení svého stroje pro tepelně nejexponovanější části. Yasda patří mezi jednoho z výrobců, kteří využívají zaškrabávání pro dokončování ploch, jako jsou vodící plochy. Všechny stroje využívají řídicího systému FANUC. Yasda nabízí varianty precizních strojů jak se třemi tak 5 osami.



Obrázek 13- Zaškrabávání [29]



Obrázek 14- Yasda [29]

4.3 Mikron

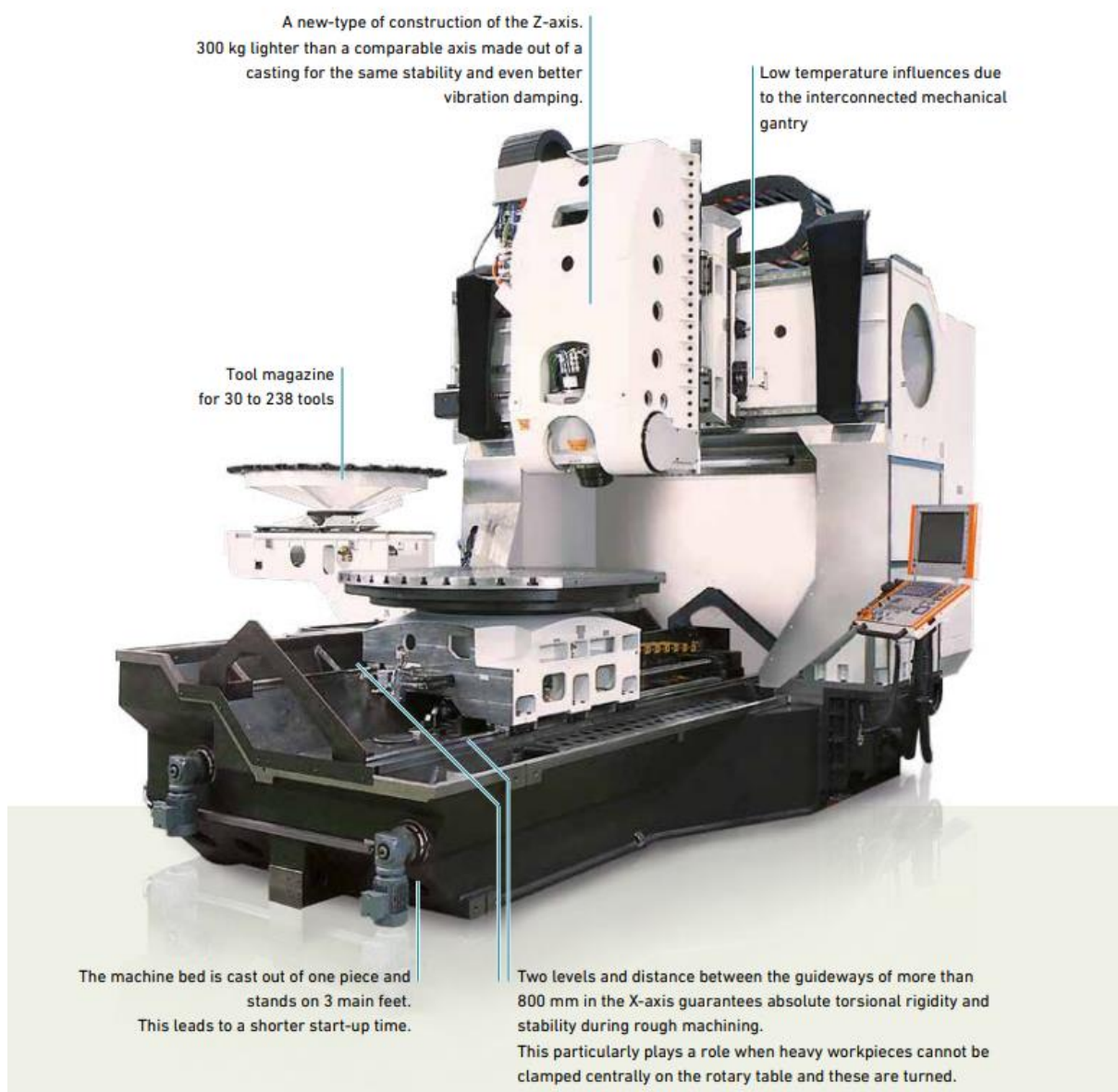
Výkon motoru	30 kW
Maximální rychlost vřetene	24 000 ot/min
Maximální krok v ose x	40 m/min
Maximální krok v ose y	40 m/min
Maximální krok v ose z	40 m/min
Vedení	Lineární motor
Přesnost najetí polohy	<10 μm
Motor vřetene	Integrovaný elektromotor
Upínač	HSK A 63

Přesnosti (ISO 230-2)

Přesnosti polohování A<10 μm

Opakovatelnost R<6 μm

Ačkoliv jde stále o velmi přesný obráběcí stroj, tak přesnost je nižší, ale jsou velmi vhodné pro automatizaci i díky paletovému systému. Využívá se zde buď řídicího systému Heidenhain nebo Siemens.



Obrázek 15- Lože stroje [30]

4.4 Makino

Maximální rychlost vřetene	20 000 ot/min
Maximální krok v ose x	60 m/min
Maximální krok v ose y	60 m/min
Maximální krok v ose z	60 m/min
Vedení	Kuličkové šrouby
Přesnost najetí polohy	<3 μm
Motor vřetene	Integrovaný elektromotor
Upínač	HSK A63

Přesnosti (ISO 230-2)

Přesnosti polohování $A < 1 \mu\text{m}$

Opakovatelnost $R < 3 \mu\text{m}$

Přesnosti (ISO 230-4)

Kruhová odchylka $G_{yx} < 1 \mu\text{m}$

Kruhová odchylka $G_{xz} < 1 \mu\text{m}$

Řízení teploty stroje:

Ballscrews „Core Cooled“

Podpůrné ložisko a hnací motor

Makino dosahuje vysoké přesnosti najetí do polohy a opakovatelnosti. Stejně jako předchozí výrobci má vlastní systém rozvádění tepla do celého stroje, aby nebyly jednotlivé části tepelně přetíženy.



Obrázek 16- Makino 5-osa [36]

4.5 KRAUSE + MAUSER Prazeoplan

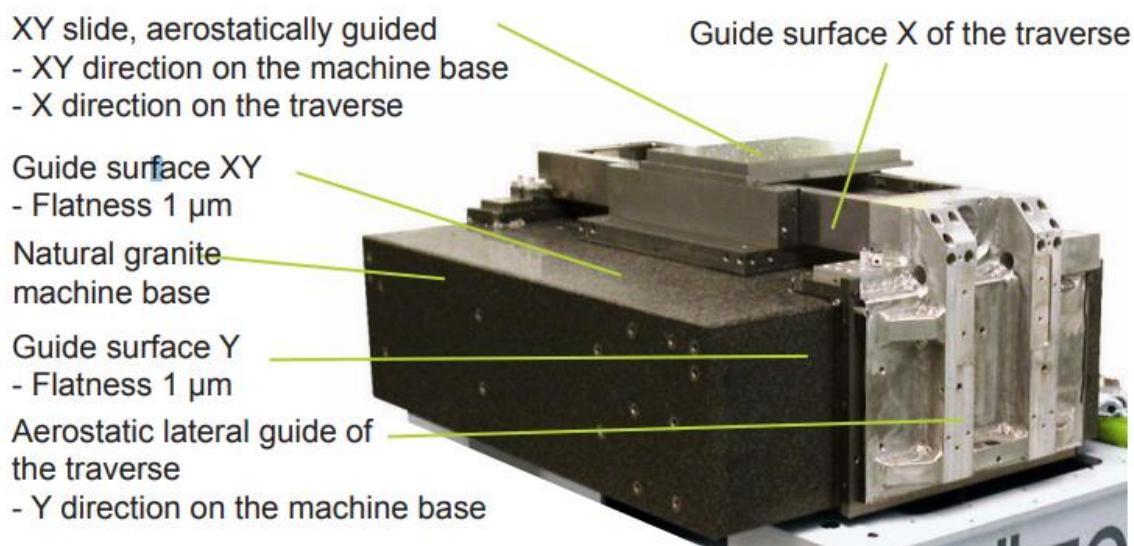
Výkon motoru	5,5-8 kW
Maximální rychlost vřetene	35 000-80 000 ot/min
Maximální krok v ose x	60 m/min
Maximální krok v ose y	60 m/min
Maximální krok v ose z	60 m/min
Vedení	Kuličkové šrouby
Přesnost najetí polohy	<2 μm
Motor vřetene	Integrovaný elektromotor
Upínač	HSK E40-25

Přesnosti (ISO 230-2)

Přesnosti polohování A<2 μm

Opakovatelnost R<1 μm

Krause-Mauser využívá při konstrukci vřetene hybridních nebo aerostatických ložisek. Samozřejmostí je rozvod chladicí kapaliny do tepelně exponovaných částí. U řídicího systému je možnost výběru mezi systémem FANUC nebo Siemens. Lože je vyrobeno z granitu pro vyšší tepelnou stabilitu. Tento typ stroje vyrábí společnost jen v tříosém provedení, což má své výhody i nevýhody. Výhoda je, že se nevnáší nepřesnost 4 a 5 osy do obrábění ale nevýhodou je, že není možné obrábět příliš sofistikované tvary.



Obrázek 17- Krause Mauser Prazeoplan [35]



Obrázek 18- Prazeoplan 300 [35]

4.6 Jingdiao

Výkon motoru	8,9 kW
Maximální rychlost vřetene	24000-36000
Maximální krok v ose x	10 m/min
Maximální krok v ose y	10 m/min
Maximální krok v ose z	10 m/min
Vedení	Servomotor
Přesnost najetí polohy	<2 μm
Motor vřetene	Integrovaný elektromotor
Upínač	BT30/ISO20

Přesnosti (ISO 230-2)

Přesnosti polohování A<2 μm

Opakovatelnost R<2 μm

Přesnosti polohování B/C- 8/8

Opakovatelnost B/C- 5/5

Tento čínský výrobce nabízí vysokootáčkové obráběcí stroje kvalitativně srovnatelné se stroji nabízenými potažmo vyráběnými v Evropě. Samozřejmostí je u nich řešení rozvodu tepla, vysoké otáčky a vysoká kvalita povrchu. Nabízí stroje jak v provedení tříosém tak pěti-osém, kde v pěti-osách stejně jako u většiny výrobců lze obrábět simultánně.



Obrázek 19- Pěti-osí obráběcí stroj [34]



Obrázek 20- vřeteno ISO25 [34]

5. Průzkum trhu s obráběcími nástroji pro vysoce přesné aplikace

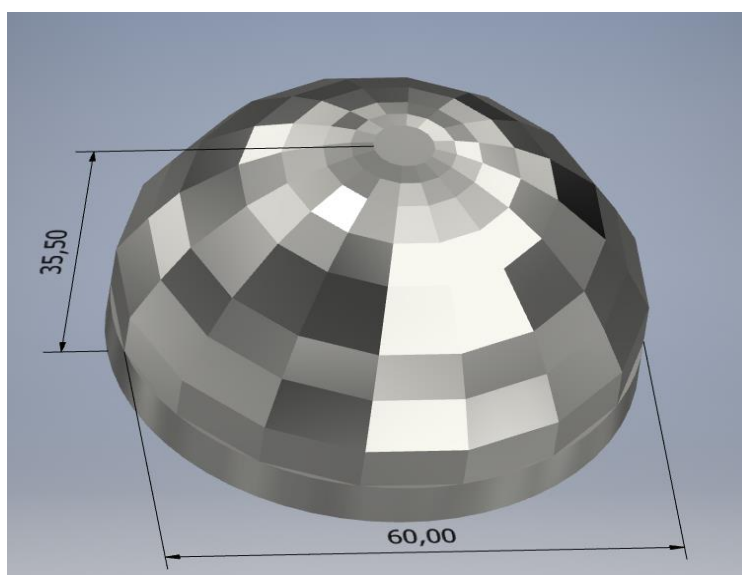
Výběr nástroje pro obrábění zrcadlových ploch je velmi důležitou disciplínou vzhledem k požadavku velmi nízké drsnosti. Tento nástroj musí být tuhý, aby se nechvěl. Zároveň musí být menší z důvodů požadované velké rychlosti při obrábění, abychom byli schopni dosáhnout kvalitního povrchu.

Pro obrábění zrcadlových ploch je vhodným řezným materiálem diamant (PKD), nebo kubický nitrid boru (CBN). Kubický nitrid boru je velmi drahý, z tohoto důvodu se na břitovou destičku nanáší jen tenká vrstvička na špičku vyměnitelné destičky. Cena je i přesto poměrně vysoká, pro některé aplikace je ovšem nepostradatelný například pro obrábění ocelí. Na rozdíl od diamantu nemá CBN afinitu k uhlíku tudíž se nástroj neváže s atomy oceli a nevznikají nežádoucí efekty jako například nárůst.

Pro obrábění vysoce kvalitních lesklých povrchů se obvykle používá lehkých slitin. Většinou jde o slitiny hliníku, mezi něž patří například takzvaný „letecký dural“ EN AW 7075. Další materiály, do kterých se nechá velmi dobře obrábět, jsou například některé druhy maraging ocelí. Na trhu je mnoho kvalitních výrobců zabývajících se speciálně problematikou obrábění zrcadlových povrchů a výrobou nástrojů pro HSC – vysokorychlostní obrábění.

Výběr nástroje je bezpochyby závislý na velikosti obráběné plochy. Liší se i přístupy výroby nástrojů, někteří výrobci se specializují na výrobu frézovacích hlav s definovanou geometrií břitu pro obrábění větších ploch, v tomto případě se často volí větší množství destiček, ale v celkovém důsledku to může mít negativní vliv na finální výsledek. Další výrobci se zase specializují na výrobu velmi malých nástrojů pro dokončování velmi malých ploch.

Zvolenou součástí je součást tvaru discokoule. Tato součást byla volena s ohledem na vlivy distanční výuky, na kterou bylo vedení fakulty vlivy působícího onemocnění nuceno přistoupit. Z tohoto důvodu nebylo možno součást obrábět v univerzitních halových laboratořích a práce se zaměřila zejména na technologický postup výběr nástrojů a programování obrábění v CAM systému Fusion 360 od společnosti Autodesk.

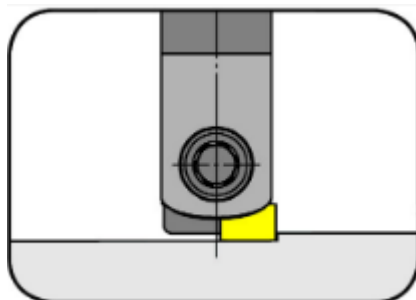


Obrázek 21- model disco-koule

5.1 Paul Horn GmbH

Firma nabízí frézovací nástroje zejména pro frézování středně velkých a velkých ploch neželezných kovů.

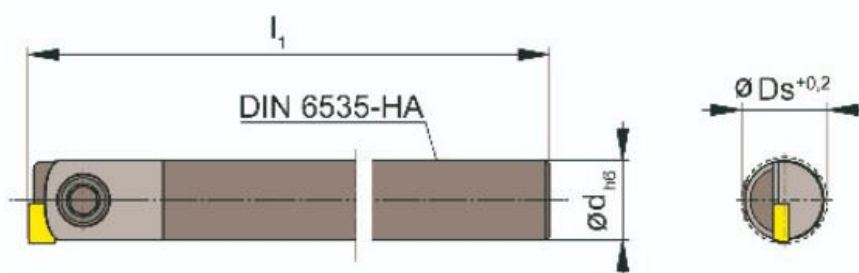
Pro náš případ obrábění EN AW 7075 pro menší plochy je možností volby stopková fréza s jednou vyměnitelnou břitovou destičkou. Jedna destička má velkou výhodu v ceně a v rovnoměrné kvalitě obrobeneho povrchu. Vyměnitelná břitová destička je vyrobena z monokrystalického diamantu.



Obrázek 22- Paul Horn- nástroj stopka[31]

Rozměry řezné části: [Ds] 8-12 mm (větší rozměry jsou realizovány ve formě frézovací hlavy)

Destičky: monokrystalický diamant



Obrázek 23 -Bližší pohled na nástroj [31]

5.2 Pokolm

Firma Pokolm se zabývá výrobou nástrojů vhodných pro obrábění mírně větších ploch. S nízkou drsností $R_z = < 2.5 \mu\text{m}$. Využívá povlakovaných destiček. Na rozdíl od firmy Horn lze tento nástroj využít pro obrábění ocelí i duralu. Protože destičky nejsou z monokrystalického diamantu, ale jsou zhotovené ze slinutého karbidu a povlakované PVTi nebo PVTiH.



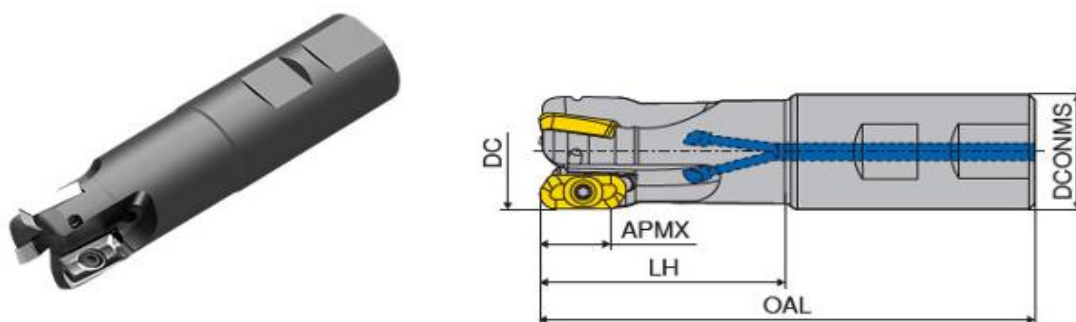
Obrázek 24- Mirroworx Pokolm [32]

Rozměry řezné části: [Ds] 16-35 mm

Destičky: povlakované SK PVTi nebo PVTiH

5.3 Ceratizit

Jeden z dalších výrobců nabízejících nástroje pro HSC. Tyto nástroje jsou konstruované ve formě stopky. Jsou relativně menších rozměrů, takže jsou vhodné i pro obrábění menších dílců. Výrobce opět využívá jen povlakovaných destiček ze slinutého karbidu. Výrobce sice nabízí nástroje pro HSC ovšem aplikačně jsou méně vhodné.



Obrázek 25- Nástroj stopkový ceratizit [37]

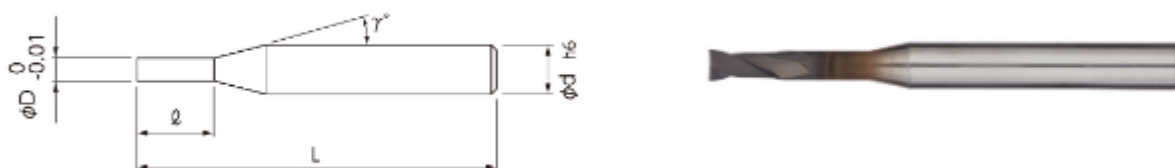
Rozměry řezné části: [Ds] 11-19 mm

Destičky: SK

Pro původní návrh obrábění zrcadlových ploch ve formě velkých ploch by byly tyto nástroje vhodné zejména pro možnost dosáhnout vyšší kvality. Zde by byla lepší možnost vidět vysokou kvalitu povrchu a možnost srovnávat například obrobené povrchy z Aluminia a Maraging oceli. Při obrábění rovinných ploch by volba připadla určitě na nástroje od firmy Horn a nebo Pokolm, které mají dosahovat nejlepších parametrů a zároveň díky umístění destiček je možno obrábět jen s jednou destičkou což snižuje nepřesnost jednotlivých destiček a jejich překrytí. S přihlédnutím na situaci s pandemií a vzniklými důsledky „zejména nedostatečnou kapacitou obrábění“ byla po konzultaci změněna varianta obrábění. Z obrábění rovinných ploch na výrobu respektive tvorbu discokoule z EN AW 7075, která bude obráběna vhodnějšími nástroji od firmy NS tools, které mají větší aplikační vhodnost díky své geometrii a velikosti pro tvorbu takových ploch.

5.4 NS-tool

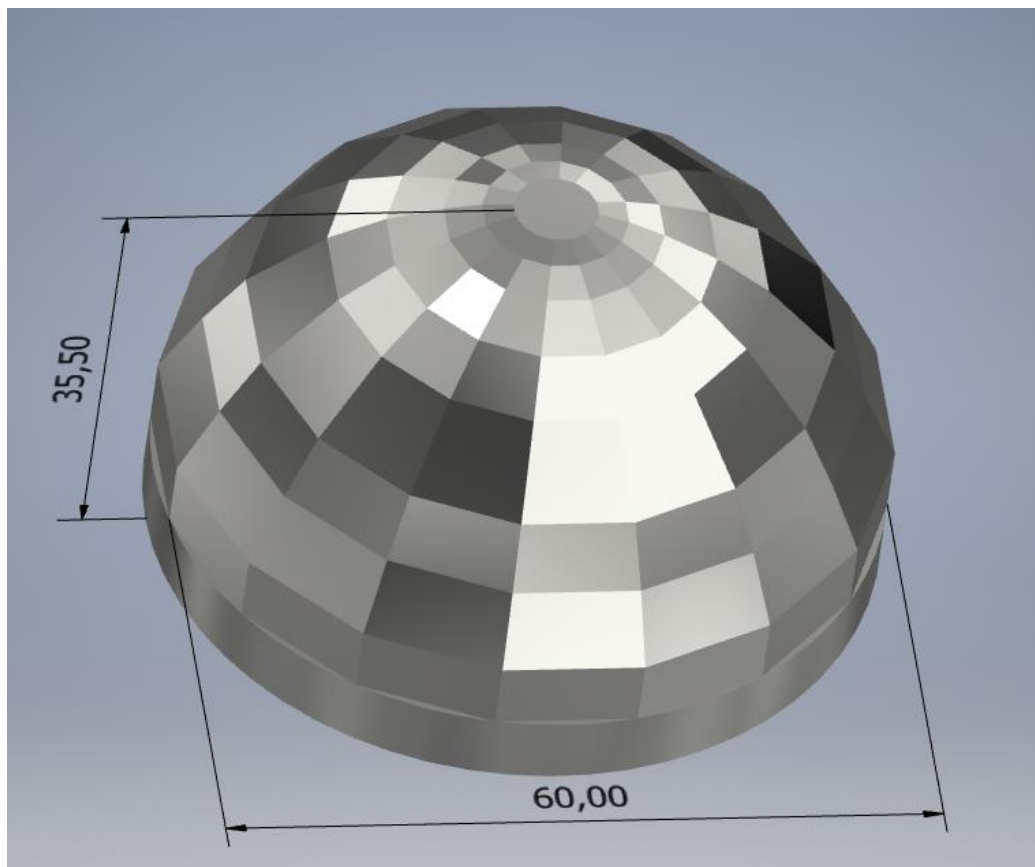
Tento výrobce nabízí širokou škálu stopkových obráběcích nástrojů. Unikátní technologii má zejména co se týče obrábění PCD, kdy vyrábí velmi malé a přesné nástroje. Kdy u svých nejpreciznějších nástrojů je schopen dosahovat při optimálních řezných podmínkách až drsnosti $0,0027 \mu\text{m}$. Jako velmi vhodné se jeví tyto nástroje zejména pro mikroobrábění. Pro tento případ a danou velikost discokoule se nejmenší nejeví jako nejvhodnější varianta. A však nástroje s povlakem z diamantu nebo nástroje s DLC povlaky. Pro plynulé indexované obrábění by bylo vhodné volit spíše nástroje z diamantu, kde by měla být možnost dosáhnout lepší kvality povrchu. Pokud bychom nebyli schopni zajistit plynulé obrábění ve všech osách, bylo by lepší s ohledem na výslednou drsnost volit spíše větší nástroje s DLC povlaky, kdy by nám vznikal větší překryv obroběných ploch a méně neobroběných míst.



Obrázek 26- Ukázka nástroje NS tool [33]

6. Technologický postup, výběr nástrojů a tvorba partprogramu pro vybranou součást a CAM software

Sohledem na situaci vzniklou působením koronaviru na území České republiky a nemožností navštěvovat univerzitní půdu po dobu prakticky celého letního semestru a následného vysokého vytížení halové laboratoře bylo nemožné dostat se k obrábění na fakultním stroji. Z toho důvodu bylo nutno hledat alternativu, jak práci co nejlépe dokončit a porovnat jednotlivé možnosti obrábění. Po konzultaci s vedoucím práce a s ohledem na vzniklou situaci byla vybrána součást k „virtuálnímu“ obrábění a tvorbě výrobního postupu. Obráběným výrobkem je discokoule z EN AW-7075. Cílem je vytvořit optimální a jednoduchý postup pro výrobu kvalitní plochy za správných podmínek všech obráběcích nástrojů. Bohužel s ohledem na situaci, není možnost realizovat předchozí záměr práce, kdy by bylo možno ověřit kvalitativní parametry povrchu. A můžeme ověřit správnost pouze simulací, která neodhalí všechny vady a nepřesnosti. Obzvláště pak nedokáže přesně simulovat kvalitu povrchu.



Obrázek 27- Model Disco-koule [38]

6.1 Zvolené nástroje

Volba nástrojů se odvíjí od možností obrábění pro 3 osé obrábění jsou vhodné jiné nástroje než pro obrábění v pěti osách. Pro tříosé obrábění se využívá kulových fréz. Zatímco pro pětiosé se využívá spíše válcových fréz, protože máme možnost mít nástroj kdykoliv nakloněn k ploše přesně dle požadavků.

Zvolené nástroje jsou od firmy NS-tool nejprve pro hrubování zvolen nástroj s DLC povlakem a pro samotné obrábění na čisto pak zvolen nástroj povlakovaný diamantem.



Obrázek 28- Fréza kulová povlakovaná DLC [33]

	Code No.	(R)Radius	(l)Length of Cut	(l1)Effectiv Length	Type	(D)Dia.	(d2)Neck Dia.	(γ)Neck Taper Angle	(d)Shank Dia.	(L)Overall Length
	01-0066 8-60001	R6	24	–	I	12	–	–	12	110

Doporučené řezné podmínky: Rychlost vřetene 10000 ot/min

Rychlost posuvu : 3000 mm/min

Hloubka řezu a_p : 3 mm

Řezná rychlost v_c :380 m/min



Obrázek 29- DLC povlakovaný nástroj [33]

	Code No.	(D)Dia.	(l)Length of Cut	(γ)Neck Taper Angle	(d)Shank Dia.	(L)Overall Length	Retail Price
	01-0063 5-01200	12	36	–	12	90	21,800

Doporučené řezné podmínky: Rychlost vřetene 10000 ot/min

Krok: 2500 mm/min

Hloubka řezu a_p : 0,4 mm

Řezná rychlost v_c :380 m/min



Obrázek 30- Kulová fréza DLC [33]

Code No.	(D)Dia.	(l)Length of Cut	(γ)Neck Taper Angle	(d)Shank Dia.	(L)Overall Length	Retail Price
01-0066 8-30001	R3	12	–	I	6	–

Doporučené řezné podmínky: Rychlost vřeteně 20000 ot/min

Krok: 2000 mm/min

Hloubka řezu a_p : 0,6 mm

Řezná rychlost v_c : 380 m/min

Výpočty řezných podmínek

Řezné podmínky jsou voleny dle doporučení výrobce volených nástrojů. Stroj je volen Okuma MU 400, kterou je vybavena univerzitní halová laboratoř. Z doporučených hodnot jsou dále dopočteny hodnoty, které výrobce u některých nástrojů neuvádí.

Fréza kulová $\varnothing 12$

$$v_c = \frac{\pi * d * n}{1000}$$

$$v_c = \frac{\pi * 12 * 10000}{1000}$$


$$v_c = 380 \text{ m/min}$$

Fréza kulová $\varnothing 6$

$$v_c = \frac{\pi * 6 * 20000}{1000} = 376,4 \text{ m/min}$$

6.2 Technologický postup

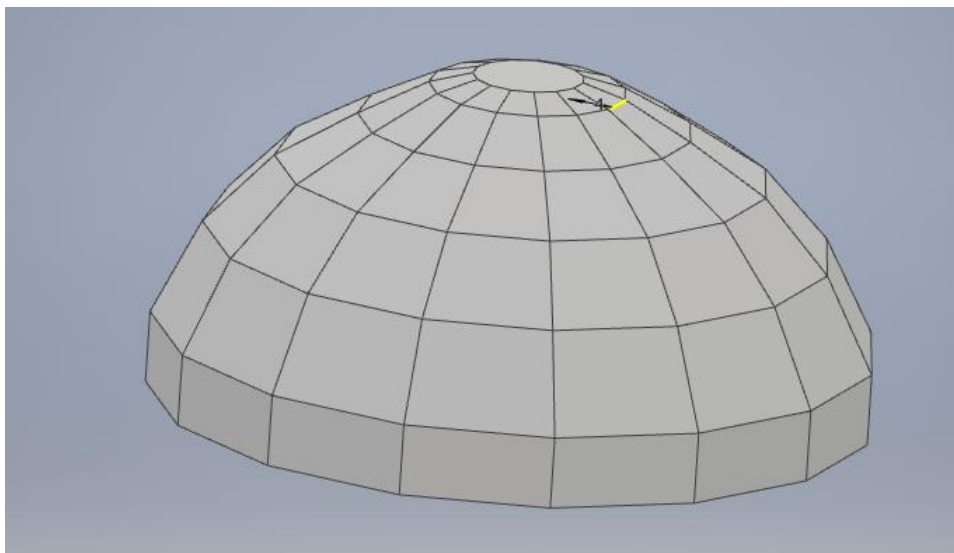
Tabulka 1- Technologický postup

 ČVUT v Praze FAKULTA STROJNÍ Ú12134		<h1>Technologický postup</h1>				Počet listů: List číslo: 1			
Součást: Disco koule Číslo výkresu:			Materiál druh: EN AW-7075 rozměr: KR70-30 EN 754-4			Jméno: Jindřich Kristen Kroužek:			
Č.op.	Pracoviště (stroj)	Úsek	Náčrt - popis práce	Nářadí	Řezné podmínky				
					v_c	f	a_p	i	
10	Pila pásová	a) b) c) d)	Upnutí $\varnothing 70\text{mm}$ Řezání $l=35\text{mm}$ Vyjmutí Mezioperační kontrola délky	Pilový pás Posuvné měřítko					
20	Okuma MU 400	a) b) c) „c“ d) e)	Upnutí do sklíčidla za $\varnothing 70\text{mm}$ Hrubování jednotlivých ploch Obrábění na čisto „Obrábění na čisto“ Vyjmutí obrobku Kontrola kvality povrchu	Fréza Kulová $\varnothing 12$ Fréza stopková $\varnothing 12$ Fréza Kulová $\varnothing 6$	380 380 380	3000 2500 2000	2 1 0,6	0,6 2 1 0,6	

6.3 Obráběcí proces v CAM Fusion 360

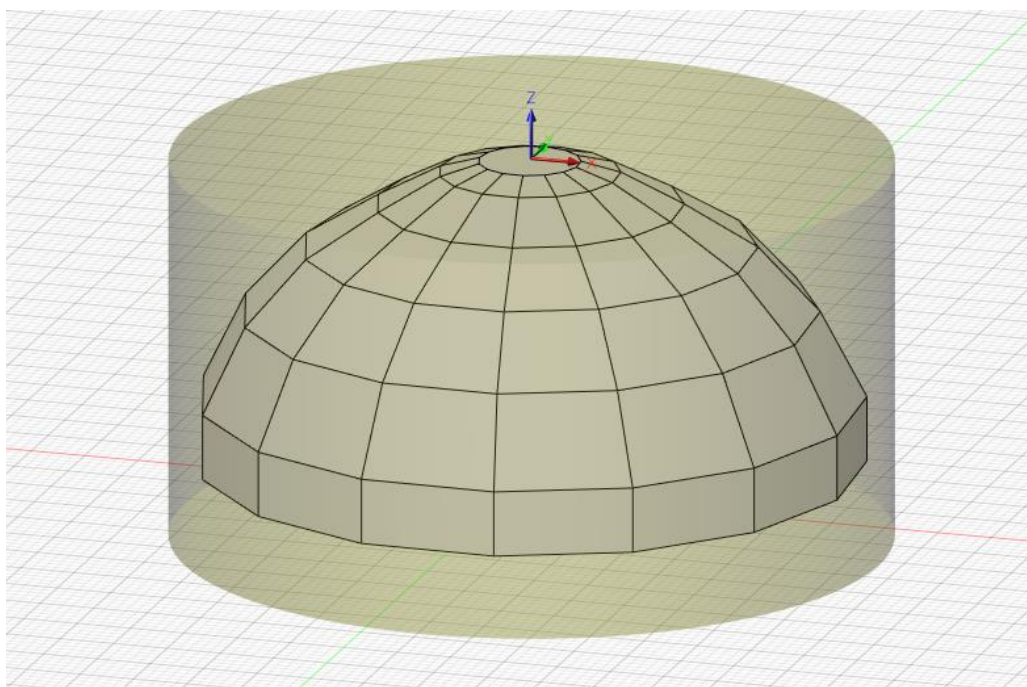
Varianta č. 1

Tato varianta využívá možnosti pouze frézování ve třech osách je tedy využito především kulových nástrojů pro zhotovení. Při obrábění ve třech osách je téměř nemožné dosahovat zrcadlových povrchů, protože plochy nejsou neustále natočeny optimálně k nástroji a kvůli tomu se volí nástroj kulový, který nemá dokonalý překryv drah.



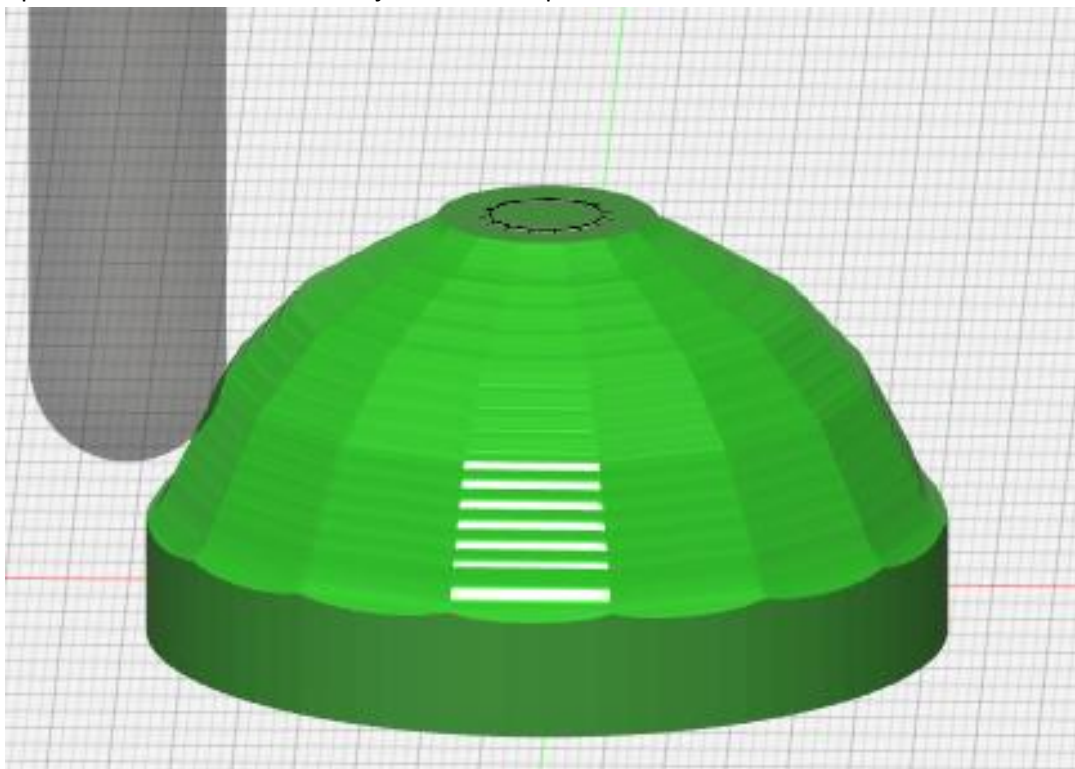
Obrázek 31- Model disco koule [38]

Jak je patrné z technologického postupu nejdříve uřízneme material na příslušnou délku. Následně jej můžeme upnout do sklíčidla a obrobit.

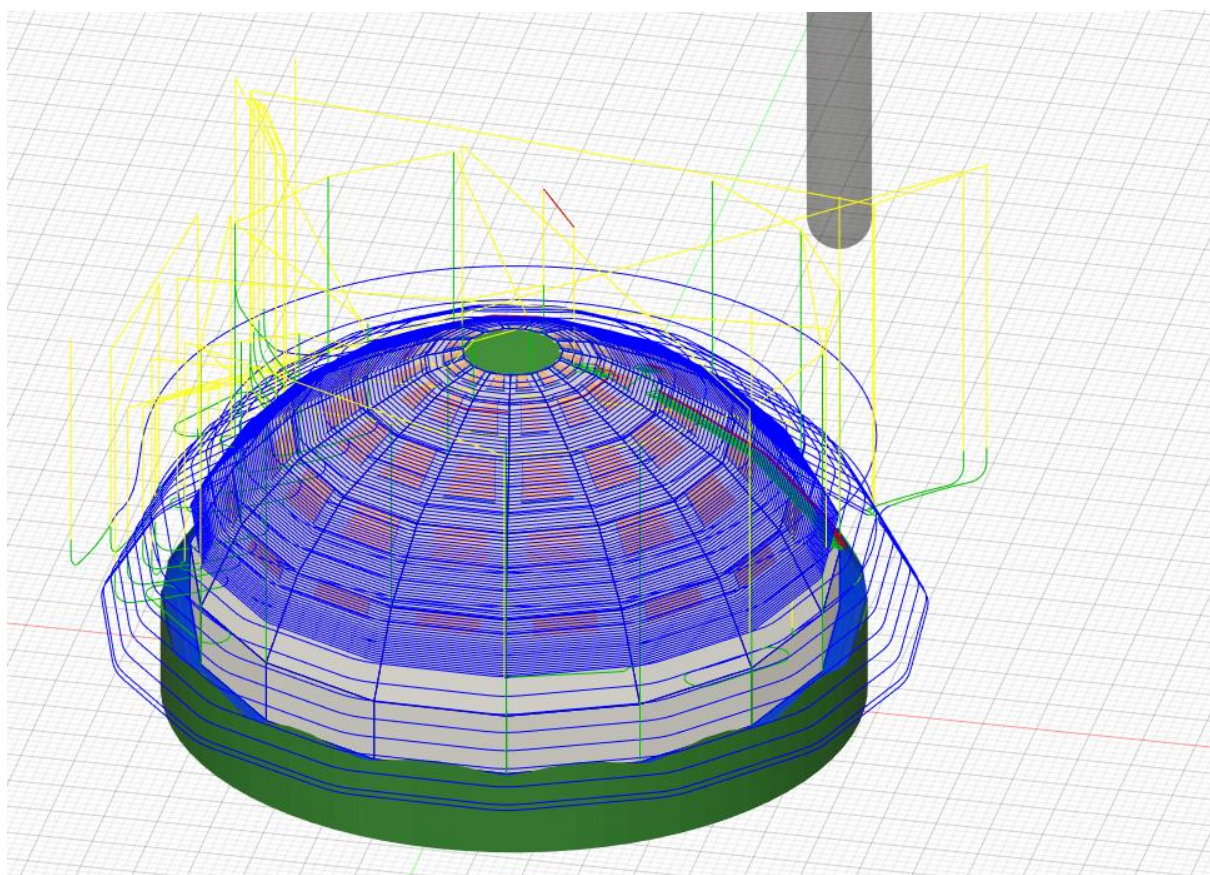


Obrázek 32- Polotovar se zobrazeným modelem ve Fusion [38]

Po upnutí můžeme obrábět. První je hrubovací operace.

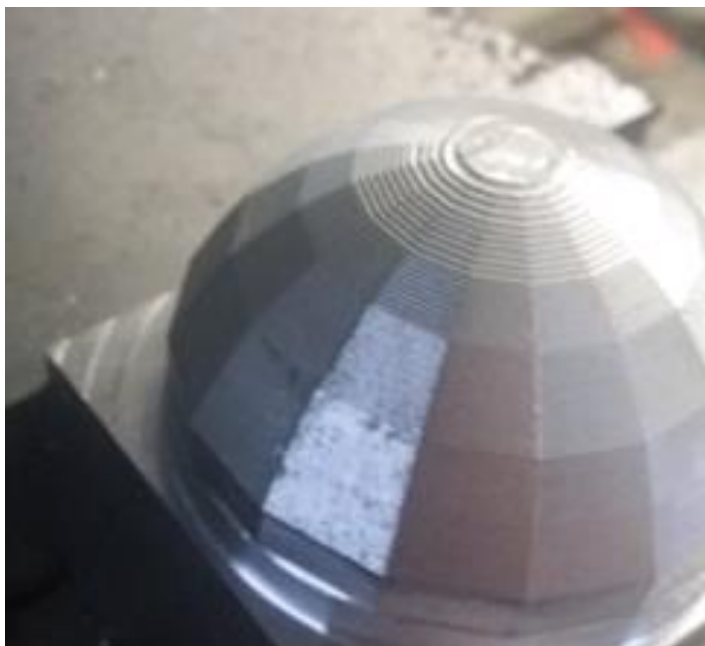


Obrázek 33- Obrobek po hrubování [38]



Obrázek 34- Zobrazení drah nástroje kulová 6 ve Fusion 360 [38]

Na zázorněném obrázku je možné vidět, jak vypadá povrch frézovaný do méně kvalitních materiálů, které není možné tepelně zušlechťovat. V tomto případě se jedná o ukázkou diskokoule frézované na CNC fríze Hartford. Je zde patrné, že není možné dosahovat vlivem volby materiálu ani přesností stroje a nástrojů chtěného zrcadlového lesku povrchu



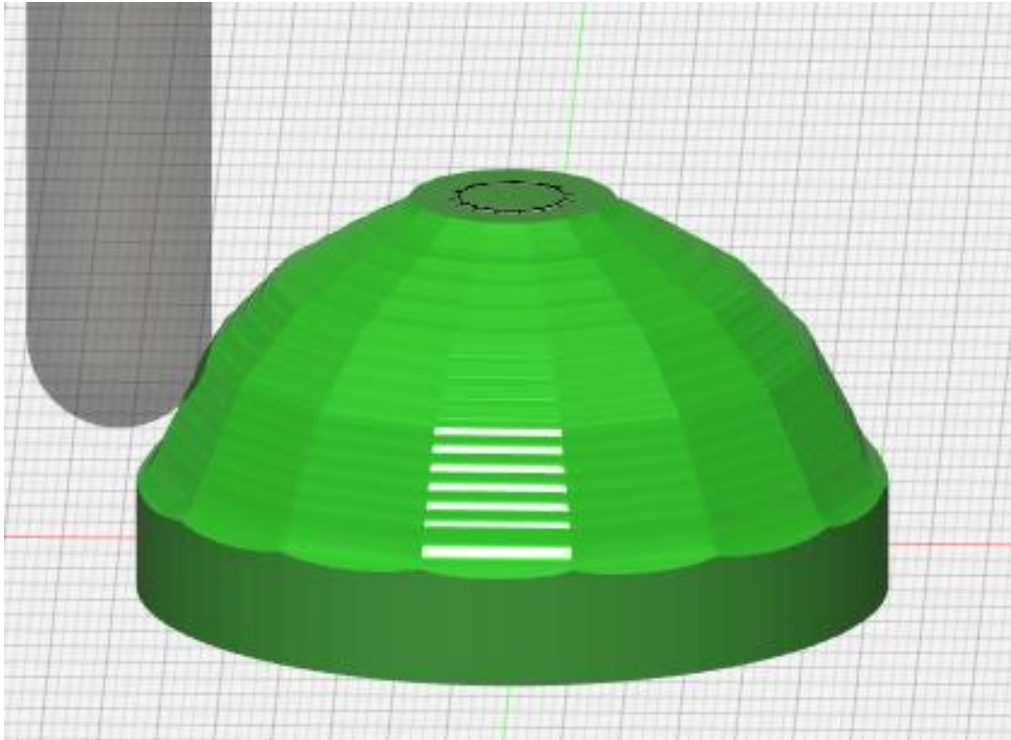
Obrázek 35- Zobrazení diskokoule po hrubování na 3 osém CNC centru [38]



Obrázek 36- Diskokoule po dokončení na 3- osém obráběcím centru

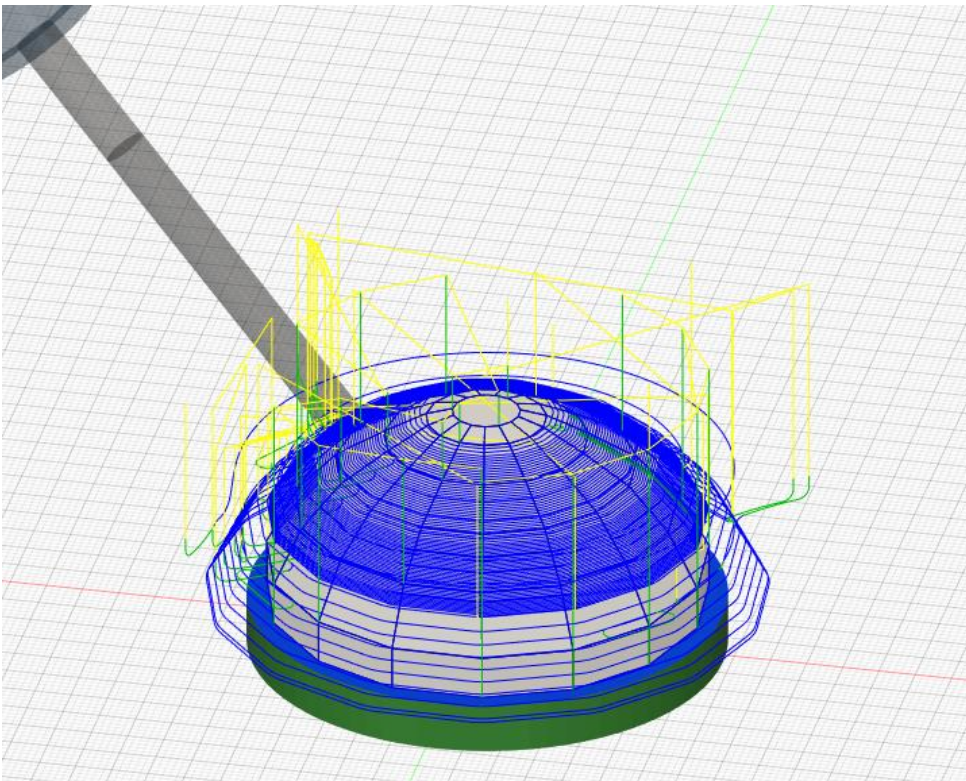
Varianta č. 2

Hrubovací operace se nikterak neliší od předchozí verze a zůstává totožná. Zde ještě není potřeba využít plynulého pěti-osého frézování.

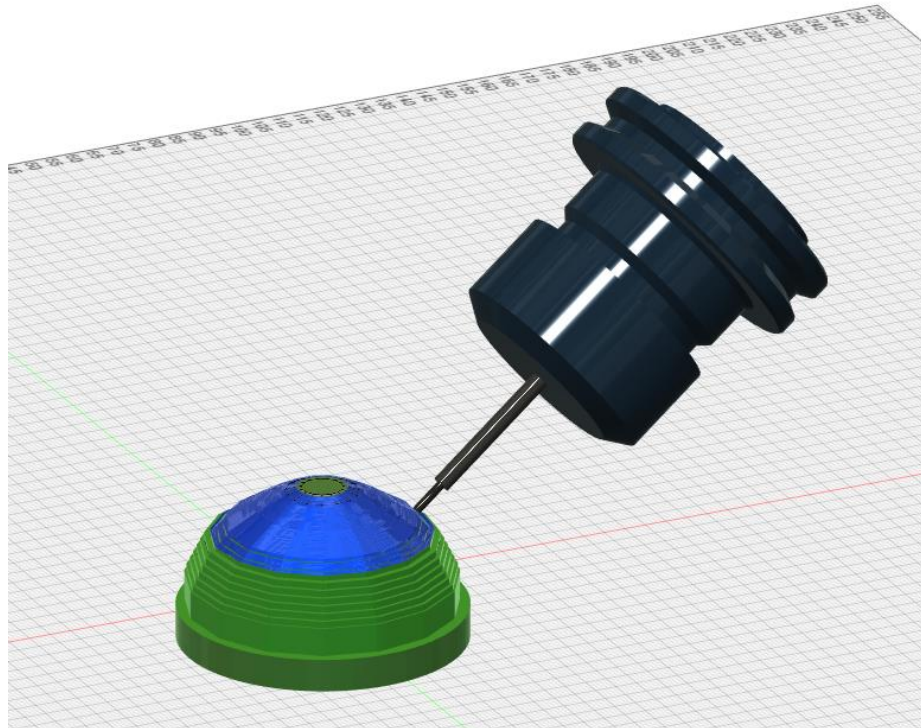


Obrázek 37- Obrobek po hrubování [38]

Jak můžeme vidět, zde plynule obrábíme ve všech osách .

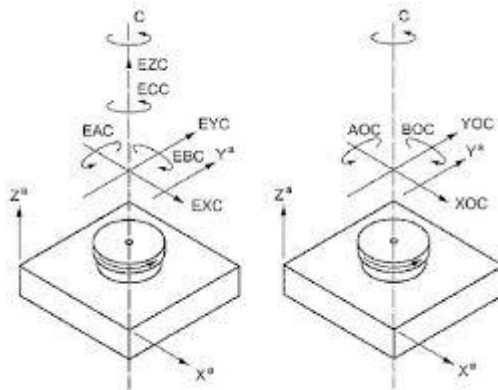


Obrázek 38- Zobrazení drah plynulého pětiosého obrábění [38]



Obrázek 39- Disco- koule obrábění í [38]

V CAM softwaru lze vidět, že nástroj je otočen vždy proti ploše obrobku. Ovšem reálně je stroj vybaven kolébkou, což je znázorněno na obrázku č. 40, na kterém je znázorněn souřadný systém pětiosého stroje. Z toho plyne i rozdíl, kdy se při reálném procesu natáčí kolébka místo nástroje, zatímco v CAM softwaru lze vidět, jak se natáčí právě nástroj.



Obrázek 40- Zobrazení os pěti-osé frézky [39]

Při porovnání jednotlivých metod je časově efektivnější metoda, kdy se obrábí v pětiosách - konkrétně o čtyři minuty. Třiosé obrábění by trvalo až dvacet čtyři minut dle simulace, zatímco pětiosé pouze devatenáct minut. Rozdíl na stroji by se projevil víc, a to s ohledem na to, že každý stroj může využívat jiných posuvů, zejména ve chvílích, kdy neobrábí. Tyto časy lze považovat za optimální a pro výrobu přijatelnější.

7. Závěr

Práce je rozdělena do dvou základních částí – teoretické a praktické. Teoretická část pojednává o způsobu porovnávání velmi přesných obráběcích center zejména pak normě ISO 230 a původních normách ČSN, které jsou dnes nahrazeny normami ISO a EN. Dále pak zmiňuje německou normu VDI/DGQ 3441. Je rozdělena na pět částí, které vysvětlují a definují hlavní pojmy potřebné pro realizaci praktické části.

První část seznamuje čtenáře s normami ISO a ČSN. V druhé části pojednává o konstrukčním řešení velmi přesných obráběcích center zejména o konstrukci vřetene, lože, chlazení a vyrovnávání teplot. Třetí část prezentuje jednotlivé výrobce velmi přesných obráběcích strojů a jejich nabízená řešení některých konstrukčních komponent. Představuje výhody vybraných výrobců a hodnotí přesnost jejich strojů včetně parametrů strojů, jejich otáčkové rychlosti a velikosti upínacích kuželů do vřetene. Ve čtvrté a páté části dochází k výběru nástrojů pro danou aplikaci a daný stroj. Jako obrobek je volena discokoule z EN AW 7075. Dále jsou zde komparováni jednotliví výrobci nástrojů pro velmi přesné obrábění a obrábění zrcadlových povrchů a zmíněna vhodnost pro jednotlivé aplikace. Po zhodnocení je zde zvolen nejvhodnější nástroj, který je s ohledem na typ součásti volen od NS-tool, jenž patří mezi špičkové výrobce zejména díky svým unikátním technologiím. Po zvolení nástroje je v páté části popsán technologický postup a řezné podmínky nástrojů, při čemž řezné podmínky jsou voleny dle doporučení výrobce nástroje.

V praktické části je detailně popsán proces vysoce přesného frézování zrcadlových povrchů, ukázka obrábění v CAM softwaru Fusion 360 od společnosti Autodesk a zhodnocení drah. Bohužel vlivem pandemie a nařízených vládních opatření nebylo možné prakticky ověřit řezné podmínky a výrobu na stroji. Práce v těchto ohledech nesplnila původní cíle a musela být upravena v souladu s možnostmi, které situace velmi razantně zmenšila. Vybraná problematika může být dále rozvíjena obráběním na stroji a zkouškou aplikační vhodnosti materiálu pro obrábění zrcadlových povrchů.

Zdroje

Použitá literatura

- [1] LI, Yang, Wanhua ZHAO, Shuhuai LAN, Jun NI, Wenwu WU a Bingheng LU. A review on spindle thermal error compensation in machine tools. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* [online]. 2015, 95(99), 20–38. ISSN 08906955. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijmachtools.2015.04.008
- [2] ČSN ISO 230-1. *Zásady zkoušek obráběcích strojů: Zásady zkoušek obráběcích strojů*- Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2014.
- [3] Přesnost obráběcích center. *Mmsonline* [online]. [cit. 2020-04-29]. Dostupné z: <https://www.mmsonline.com/articles/how-accurate-is-your-machining-center>
- [4] Metrologická příručka. *Mitoro* [online]. [cit. 2020-04-29]. Dostupné z: <http://mitoro.cz/ke-stazeni/metrologicka-priruccka.pdf>
- [5] MULLANY, Brigid. Evaluation and comparison of the different standards used to define the positional accuracy and repeatability of numerically controlled machining center axes [online]. Charlotte, 2007. 26 s. Oborová práce. University of North Carolina.
- [6] ČSN ISO 230-2. *Zásady zkoušek obráběcích strojů - Část 2: Určení přesnosti a opakovatelnosti nastavení polohy v číslíkové řízených osách*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2015.
- [7] ČSN ISO 230-3. *Zásady zkoušek obráběcích strojů - Část 3: Určení tepelných vlivů*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.
- [9] ČSN ISO 230-4. *Zásady zkoušek obráběcích strojů - Část 4: Zkoušky kruhové interpolace u číslíkově řízených obráběcích strojů*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.
- [10] JIŘÍ MAREK A KOLEKTIV. *Konstrukce CNC obráběcích strojů*. Praha: MM publishing, s.r.o., 2010. ISBN 978-80-254-7980-3.
- [11] ČSN ISO 230-6. *Zásady zkoušek obráběcích strojů - Část 6: Určení přesnosti nastavení polohy na diagonálách tělesa a stěn (Zkouška diagonálního přestavení)*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2003.
- [12] ČSN ISO 230-7. *Zásady zkoušek obráběcích strojů - Část 7: Geometrická přesnost os rotace*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013.
- [13] Výběr vřetene. *Sandvik* [online]. [cit. 2020-04-29]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/machine-tooling-solutions/tooling-considerations/pages/spindle-selection.aspx>
- [14] MAREK, Jiří a kol. *Konstrukce CNC obráběcích strojů*. 2. vyd. Praha: MM publishing s. r. o, 2010, 420 s. ISBN 978-80-254-7980-3
- [15] BORSKÝ, Václav. *Základy stavby obráběcích strojů*. 2. vyd., přeprac. Brno: Nakladatelství Vysokého učení technického v Brně, 1991, 214s. ISBN 80-214- 0361-6
- [16] VENKATESH, V., IZMAN, S. *Precision engineering*. 1.ed. New Delhi: Tata McGraw-Hill Pub. Co., 2007, xvi, 418 p. ISBN 00-706-2090-3.
- [17] LAŠOVÁ, Václava. *KKS/ZSVS základy stavby obráběcích strojů*. 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2012. [153] s. ISBN 978-80-261-0126-0.
- [18] BORSKÝ, Václav. *Základy stavby obráběcích strojů*. 2. vyd., přeprac. Brno: Nakladatelství Vysokého učení technického v Brně, 1991, 214s. ISBN 80-214- 0361-6

- [19] Materiály lože. Mmspektrum [online]. [cit. 2020-04-29]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/loze-z-mineralniho-kompozitu.html>
- [20] BRENÍK, Přemysl, PÍČ, Josef. Obráběcí stroje : konstrukce a výpočty. 1. vyd. Praha : SNTL, 1982. 573 s.
- [21] MAREK, Jiří. Konstrukce CNC obráběcích strojů. 1. vyd. Praha : [s.n.], 2006. 282 s. Dostupný z WWW:<mmspektrum.com>. ISBN 1212-2572.
- [22] BRENÍK, Přemysl, PÍČ, Josef. Obráběcí stroje : konstrukce a výpočty. 1. vyd. Praha : SNTL, 1982. 573 s.
- [23] *Výběr kuličkových šroubů* [online]. [cit. 2020-04-29]. Dostupné z: <https://e-konstrukter.cz/novinka/jak-vybrat-vhodny-kulickovy-sroub>
- [24] *Vedení obráběcích strojů* [online]. [cit. 2020-04-29]. Dostupné z: <https://www.thk.com/?q=cz/node/3748>
- [25] SVOBODA, Ondřej a Pavel BACH. Je zaškrabávání nezastupitelná metoda? *MM průmyslové spektrum* [online]. 2016, (161102) [cit. 2019-11-14]. ISSN 1212-2572. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/je-zaskrabavani-nezastupitelna-metoda-12775.html>
- [26] VYROUBAL, Jiri. Compensation of machine tool thermal deformation in spindle axis direction based on decomposition method. *Precision Engineering* [online]. 2012, 36(1), 58 121–127. ISSN 01416359. Dostupné z: doi:10.1016/j.precisioneng.2011.07.013
- [27] LIU, Kuo, Yu LIU, Mingjia SUN, Yuliang WU a Tiejun ZHU. Comprehensive thermal compensation of the servo axes of CNC machine tools. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. 2016, 85(9–12), 2715–2728. ISSN 14333015. Dostupné z: doi:10.1007/s00170-015-8142-7
- [28] *Brožura KERN microtechnik* [online]. 2019 [cit. 2019-11-16]. Dostupné z: <https://www.kern-microtechnik.com/en/machines/>
- [29] *Kataog Yasda* [online]. [cit. 2020-04-29]. Dostupné z: https://yasda.com/pdfs/Yasda_YBM%207Ti.pdf
- [30] *Stroje Mikron* [online]. [cit. 2020-04-29]. Dostupné z: https://www.gfms.com/content/dam/gfac/proddb/milling/high_performance_machine/en/mikron-hpm-1850u_en.pdf
- [31] *Katalog Horn* [online]. [cit. 2020-04-06]. Dostupné z: <https://www.phorn.de/en/>
- [32] *Katalog Pokolm* [online]. [cit. 2020-04-06]. Dostupné z: https://www.pokolm.de/media/pdf/mirrorworx_en.pdf
- [33] *Nástroje NS-tools* [online]. [cit. 2020-04-29]. Dostupné z: <https://www.ns-tool.com>
- [34] *Stroje. Katalog Jing Diao* [online]. [cit. 2020-04-29]. Dostupné z: <https://us.jingdiao.com/>
- [35] *Katalog Krause-mauser. Krause-mauser* [online]. [cit. 2020-04-29]. Dostupné z: <https://www.krause-mauser.com/>
- [36] *Kataog Makino* [online]. [cit. 2020-04-29]. Dostupné z: <https://www.makino.com/>
- [37] *Obráběcí nástroje ceratizit katalog. Ceratizit* [online]. [cit. 2020-04-29]. Dostupné z: <https://cuttingtools.ceratizit.com/cz/cs.html>
- [38] *Vlastní tvorba*
- [39] HOREJŠ, O., et al. DV#6 (2013-2) Měřicí metody a technická řešení pro kvantitativní posouzení vlivu technologického procesu na celkové teplotní chyby obráběcích strojů. TA ČR. 2013, V-13-033.

Seznam obrázků

Obrázek 1- Geometrická přesnost kruhovitost [2].....	14
Obrázek 2- Dvousměrná odchylka kruhovitosti [9].....	16
Obrázek 3- Odchylka kruhovitosti [9].....	17
Obrázek 4- Lože z minerálního kompozitu[19]	19
Obrázek 5-Rozdělení ložisek [14]	20
Obrázek 6- Kuličkový šroub [23].....	23
Obrázek 7- ISO kužel upnutí [17]	24
Obrázek 8- Nahoře upnutí ISO kuželem dole upnutí HSK [17]	24
Obrázek 9- Upínací prvky [17]	25
Obrázek 10- Lineární vedení válečkové [24]	27
Obrázek 11- Rozvedení tepla[28]	30
Obrázek 12- Obráběcí centrum Kern-Micro VARIO [28]	30
Obrázek 13- Zaškrabávání [29].....	31
Obrázek 14- Yasda [29]	32
Obrázek 15- Lože stroje [30]	33
Obrázek 16- Makino 5-osa [36]	34
Obrázek 17- Krause Mauser Prazeoplan [35].....	35
Obrázek 18- Prazeoplan 300 [35]	36
Obrázek 19- Pěti-osí obráběcí stroj [34]	38
Obrázek 20- vřeteno ISO25 [34].....	38
Obrázek 21- model disco-koule.....	39
Obrázek 22- Paul Horn- nástroj stopka[31].....	40
Obrázek 23 -Bližší pohled na nástroj [31]	40
Obrázek 24- Mirroworx Pokolm [32].....	40
Obrázek 25- Nástroj stopkový ceratizit [37].....	41
Obrázek 26- Ukázka nástroje NS tool [33]	42
Obrázek 27- Model Disco-koule [38].....	43
Obrázek 28- Fréza kulová povlakovaná DLC [33]	44
Obrázek 29- DLC povlakovaný nástroj [33]	44
Obrázek 30- Kulová fréza DLC [33]	45
Obrázek 31- Model disco koule [38]	47
Obrázek 32- Polotovár se zobrazeným modelem ve Fusion [38].....	47
Obrázek 33- Obrobek po hrubování [38]	48
Obrázek 34- Zobrazení drah nástroje kulová 6 ve Fusion 360 [38].....	48
Obrázek 35- Zobrazení diskokoule po hrubování na 3 osém CNC centru [38]	49
Obrázek 36- Diskokoule po dokončení na 3- osém obráběcím centru	49
Obrázek 37- Obrobek po hrubování [38]	50
Obrázek 38- Zobrazení drah plynulého pětiosého obrábění [38]	50
Obrázek 39- Disco- koule obrábění í [38].....	51
Obrázek 40- Zobrazení os pěti-osé frézičky [39]	51