

Návrh zařízení pro magnetoreologické dokončování sférických povrchů

Bc. Lukáš Doležel

Diplomová práce
2022



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

Akademický rok: 2021/2022

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Lukáš Doležel**
Osobní číslo: **T19438**
Studijní program: **N0788A270002 Výrobní inženýrství**
Specializace: **Stroje a nástroje pro zpracování polymerů a kompozitů**
Forma studia: **Kombinovaná**
Téma práce: **Návrh zařízení pro magnetoreologické dokončování sférických povrchů**

Zásady pro vypracování

1. Vypracování rešerše na téma dokončovacích metod obrábění sférických povrchů
2. Popis současného stavu vývoje v oblasti zařízení pro magnetoreologické dokončování povrchů
3. Konstrukční návrh zařízení pro magnetoreologické dokončování sférických povrchů
4. Cenová kalkulace předpokládaných nákladů

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

Seznam doporučené literatury:

1. JAIN, V. *Micromanufacturing Processes*. 1st ed. Boca Raton: CRC Press, 2012. 429 s. ISBN 978-1-4398-5290-3.
2. Kordonski, W.I. a JACOBS, S.D. Magnetorheological Finishing. *International Journal of Modern Physics B*, 1996, 10(23–24), 2837–2848.
3. MARINESCU, I. et al. *Tribology of Abrasive Machining Processes*. 2nd ed. Amsterdam: Elsevier, 2013. 586 s: ISBN 978-1-4377-3467-6.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Michal Sedláčik, Ph.D.**
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce: **3. ledna 2022**
Termín odevzdání diplomové práce: **13. května 2022**

prof. Ing. Roman Čermák, Ph.D. v.r.
děkan

L.S.

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

Ve Zlíně dne 18. února 2022

PROHLÁŠENÍ AUTORA DIPLOMOVÉ PRÁCE

Beru na vědomí, že:

- diplomová práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému a dostupná k nahlédnutí;
- na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- podle § 60 odst. 1 autorského zákona má Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- pokud bylo k vypracování diplomové práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tj. k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové práce využít ke komerčním účelům;
- pokud je výstupem diplomové práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji,

- že jsem diplomové práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou obsahově totožné.

Ve Zlíně dne:

Jméno a příjmení studenta:

.....
podpis studenta

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá konstrukčním návrhem zařízení pro magnetoreologické dokončování. Zařízení má za úkol umožnit dokončování sférických povrchů. Návrh reflektuje snahu o vytvoření cenově dostupného řešení zařízení v podobě přípravku pro CNC frézku. Návrh zařízení řeší jeho možnou využitelnost v budoucích aplikacích v reálném výrobním a výzkumném prostředí.

Klíčová slova: Magnetoreologické dokončování, magnetoreologická kapalina, neželezné materiály, keramický materiál, optické čočky, leštění, nano proces

ABSTRACT

Diploma thesis deals with the structural design of apparatus for magnetorheological finishing. The device has the task of completing the surfaces of spherical surfaces. The design reflects the effort to create an affordable device solution in the form as machine accessory for a CNC milling machine. The design of the apparatus solves its possible solution with regard to future application in research and production applications.

Keywords: Magnetorheological finishing, magnetorheological fluid, non-ferrous materials, ceramic material, optical lens, polishing, nano process

Zde bych rád poděkoval panu doc. Ing. Michalu Sedláčikovi Ph.D. za rady, vedení diplomové práce a možnost pracovat na projektu.

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

OBSAH

ÚVOD	10
TEORETICKÁ ČÁST	11
1 VÝROBNÍ PROCES	12
2 JAKOST POVRCHU	13
2.1 HODNOCENÍ POVRCHU.....	14
2.2 VZNIK NOVÉHO POVRCHU	17
2.3 DOKONČOVACÍ OPERACE	17
2.4 JAKOST OPTICKÝCH KOMPONENTŮ	18
3 ZÁKLADNÍ DOKONČOVACÍ OBRÁBĚNÍ	19
3.1 TVORBA TŘÍSKY	19
3.2 MATERIÁLY NÁSTROJŮ.....	23
3.2.1 Rychlořezné oceli	24
3.2.2 Slinuté karbidy	24
3.2.3 Keramické materiály	25
3.2.4 Supertvrdé materiály	25
3.3 MIKROBRÁBĚNÍ	25
3.3.1 Diamantové mikrosoustružení	26
4 BROUŠENÍ	28
4.1 MATERIÁLY ZRN BRUSNÝCH NÁSTROJŮ	29
4.1.1 Korund.....	30
4.1.2 Granát.....	31
4.1.3 Karbid křemíku	31
4.1.4 Diamant	31
4.1.5 Kubický nitrid boru	32
4.1.6 Velikost zrn	32
4.2 POJIVA BRUSNÝCH NÁSTROJŮ	33
4.2.1 Keramická pojiva	34
4.2.2 Pryskyřičná pojiva.....	34
4.2.3 Železná pojiva	35
4.3 PŘÍPRAVA NÁSTROJŮ.....	35
4.4 TVORBA TŘÍSKY	36
4.5 METODY BROUŠENÍ.....	37
4.5.1 Broušení sférických povrchů.....	38
5 HONOVÁNÍ	40
5.1 ŘÍZENÍ PROCESU HONOVÁNÍ	41
5.2 HONOVÁNÍ SFÉRICKÝCH POVRCHŮ	42
6 LAPOVÁNÍ	44

6.1	METODY LAPOVÁNÍ.....	46
7	SUPERFINIŠOVÁNÍ.....	49
7.1	METODY SUPERFINIŠOVÁNÍ SFÉRICKÝCH POVRCHŮ	51
8	LEŠTĚNÍ.....	52
8.1	MATERIÁLY PAST PRO LEŠTĚNÍ	53
9	POKROČILÉ METODY DOKONČOVÁNÍ	54
9.1	ABRASIVE FLOW FINISHING	54
9.2	ELASTIC EMISSION MACHINING	55
9.3	ELASTIC ABRASIVE FINISHING	57
9.4	MAGNETORHEOLOGICAL FINISHING	58
10	SHRnutí TEORETICKÉ ČÁSTI.....	61
	PRAKTICKÁ ČÁST	62
11	CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE	63
12	VÝVOJ V OBLASTI MAGNETOREOLOGICKÝCH ZAŘÍZENÍ.....	64
12.1	SÍLY PŘI PROCESU MRF	66
13	KONSTRUKCE ZAŘÍZENÍ.....	68
13.1	TECHNOLOGIE VÝROBY A MATERIÁLY	69
13.2	KONSTRUKČNÍ NÁVRH MRF ZAŘÍZENÍ.....	70
13.2.1	Sestava hřídele a kolečka	72
13.2.2	Sestava pinu	73
13.2.3	Dodávání a sběr pasty	74
14	KONSTRUKČNÍ VÝPOČTY	75
14.1	VÝPOČET POHONU.....	75
14.1.1	Výpočet hmotností	77
14.1.2	Výpočet momentu setrvačnosti	77
14.1.3	Výpočet potřebného výkonu	78
14.2	VÝPOČET LOŽISEK.....	79
14.3	FEM ANALÝZA.....	82
15	ŘÍZENÍ A REGULACE	84
15.1	PŘENOS ENERGIE A NASTAVENÍ POZIC SPÍNÁNÍ CÍVEK	84
15.2	ČERPÁNÍ MR PASTY	84
15.3	POHON POHYBŮ.....	86
15.3.1	Vztah otáček vřetene a kolečka	86
15.4	DRÁHY POSUVŮ.....	88
16	CENOVÁ KALKULACE NÁKLADŮ.....	90
	ZÁVĚR	91

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	92
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	96
SEZNAM OBRÁZKŮ	101
SEZNAM TABULEK.....	103
SEZNAM PŘÍLOH.....	104

ÚVOD

Postup na poli moderních technologií vysokým tempem posouvá hranice výrobních možností do dříve nemyslitelných sfér. U výrobních procesů se využívá perspektivnějších technologií ohlížejících se na moderní trendy, jako jsou environmentální stránky výroby produktů, miniaturizace součástí zařízení, nebo i samotná efektivita a kvalita výroby součástí. Největší přínos do zmíněných problematik přidávají globální výrobci z automobilového průmyslu, elektrotechnických podniků, či biomedicíny a těmto podobných. Schopnost obstát na trhu konkurenceschopným dává výrobcům jasný impuls k zavádění nejmodernějších technologií do svých výrobních závodů.

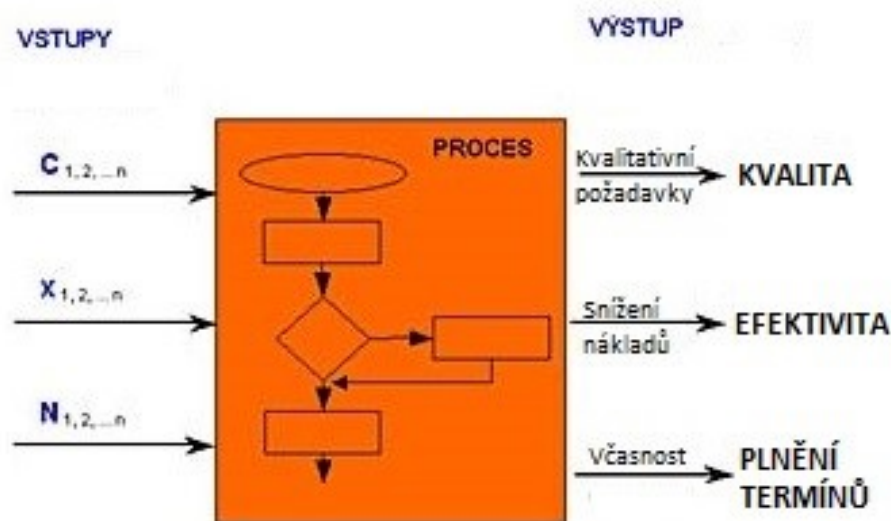
Skvělým příkladem mohou být technologické nadnárodní korporáty zaměřující se na výrobu telekomunikačních prostředků. Každý rok představují výrobci své pokroky s produkty, které uvádějí na trh, a prezentují tak svůj posun v hranicích výpočetního výkonu, vlastností optických prvků, či kvalitativním zpracování součástí svého zařízení. Miniaturizace a komplexnost zpracování zařízení se u telekomunikačních technologií těší velké popularitě, tak jako i v ostatních výrobních odvětvích.

Miniaturizovaným výrobkům klesají rozměry do řádů mikrometrů. V návaznosti se požadují přísnější tolerance a jakosti povrchů. High-tech dokončovací procesy se stávají nezbytnou součástí výroby špičkových produktů.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 VÝROBNÍ PROCES

Výrobní proces je činnost, při které dochází ke zpracování vstupů a jejich přeměně na výstupy se zhodnocením přidané hodnoty produktu. Čím efektivněji činnost probíhá, tím větším se stává výnos z dané součásti za danou prodejní cenu. Volba správných technologických metod zpracování výrobku ovlivňuje přímo hodnotový tok a dává podnět výrobcům k vhodnému nastavení technologického postupu. Optimálně nastavené postupy z finančního pohledu upravují zisk a výnosy. Stejně jak se zdá být podstatná úvaha nad ekonomickou stránkou výrobního procesu, tak je podstatná i stránka celkové zpracování, užitek, či vlastnosti konstrukce produktu a další aspekty. Společnosti musí hledat ideální vyvážená řešení, aby dosáhly správné kombinace, kde je výrobek technologicky a ekonomicky zvládnutelný, a zároveň hodnotou pro konečného zákazníka výhodný. [2,3]



Obrázek 1: Transformace vstupů na výstupy [9]

U high-end výrobků se klade velký důraz na dodržování zásad kvality výrobků. Společnosti pohybující se ve výrobní sféře se zavazují k dodržování kvalitativních norem a řídí se doporučujícími normami metod měření rozměrů, tvarů a povrchů. [2,3]

2 JAKOST POVRCHU

Stavu, při kterém by byla nově vytvořená plocha vždy rovna jmenovitému rozměru, nelze dosáhnout. U upravovaných povrchů je nutnost zabývat se jakostí daného povrchu. Definici jakosti povrchu lze popsat, jako soubor vlastností, které jsou zanechány na upravovaných plochách součásti po technologickém procesu výroby. Zejména může být pod pojmem jakosti chápána přesnost rozměrů, drsnost, přesnost polohy, přesnost geometrického tvaru, chemické a fyzikální změny v povrchu. [1, 2, 3]

Hodnoty ovlivňující jakost povrchu:

- geometrie nástrojů,
- kinematika strojů,
- řezné rychlosti,
- posuvné rychlosti,
- teplo uvolňující se při procesu,
- materiál obrobku,
- a další.

Optimalizace řezného procesu přináší kladný vliv na kvalitu výrobků. Vliv jakosti povrchu se nejvíce projevuje u funkčních ploch součástí, které jsou namáhány, a tak ovlivňuje hlučnost, elektrickou vodivost, ztráty třením, odolnost proti korozi pod napětím, únavovou pevnost, optické vlastnosti a další faktory. Celkově se úroveň dokončení povrchu významně podepisuje na životnosti a spolehlivosti součástí. [2]

Po obrábění se vyskytují nedokonalosti a změny ve struktuře povrchu:

- plasticky deformovaný povrch od mechanických a tepelných účinků,
- rekystalizace povrchu,
- změna tvrdosti povrchu,
- vznik mikrotrhlin a makrotrhlin,
- zbytková napětí v povrchu,
- změny z chemické absorpce.

2.1 Hodnocení povrchu

Základní veličinou při hodnocení povrchu je drsnost obrobené plochy. Stanovit hodnotu drsnosti je možno mnoha způsoby. Mezi základní se řadí střední aritmetická hodnota úchylky profilu (R_a), střední hodnota výšek z absolutních hodnot pěti nejvyšších výstupků a pěti nejnižších prohlubní na profilu (R_z), nebo nejvyšší výška profilu (R_y). Nejčastěji se používá hodnota R_a , která je jednoduše opakovatelná a lehce porovnatelná při výrobě s ohledem na rozmanitost celé plochy, kdy hodnoty z měření se vždy odebírají z plošky menší, než je celá plocha na obrobku. Při více měřeních z jedné plochy se následně mohou hodnoty R_z a R_y výrazně lišit při každém měření. [2, 10]

$$R_a = \frac{1}{l} * \int_0^l |y(x)| dx \quad (1)$$

Kde: R_a – střední aritmetická úchylka profilu [μm]

$y(x)$ – výška výstupku na hodnocené ploše povrchu ve vzdálenosti x [μm]

l – délka měřené části [μm]

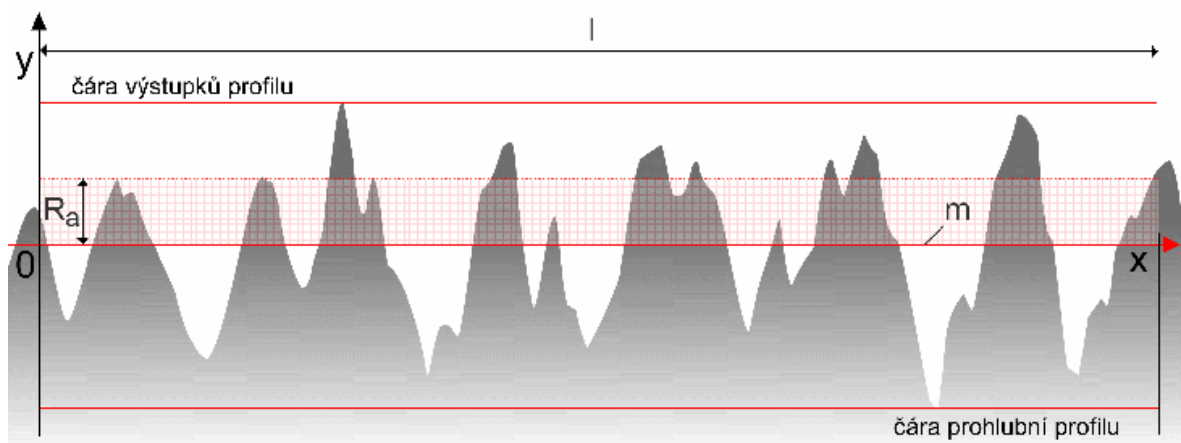
Pro bližší odhad lze také použít vzorec s výpočtem dle počtu nerovností.

$$R_a \cong \frac{1}{n} * \sum_{i=1}^n |y_i| \quad (2)$$

Kde: R_a – střední aritmetická úchylka profilu [μm]

y_i – výška výstupku na hodnocené ploše povrchu [μm]

n – celkový počet profilů na hodnocené ploše povrchu



Obrázek 2: Střední aritmetická úchylka profilu [10]

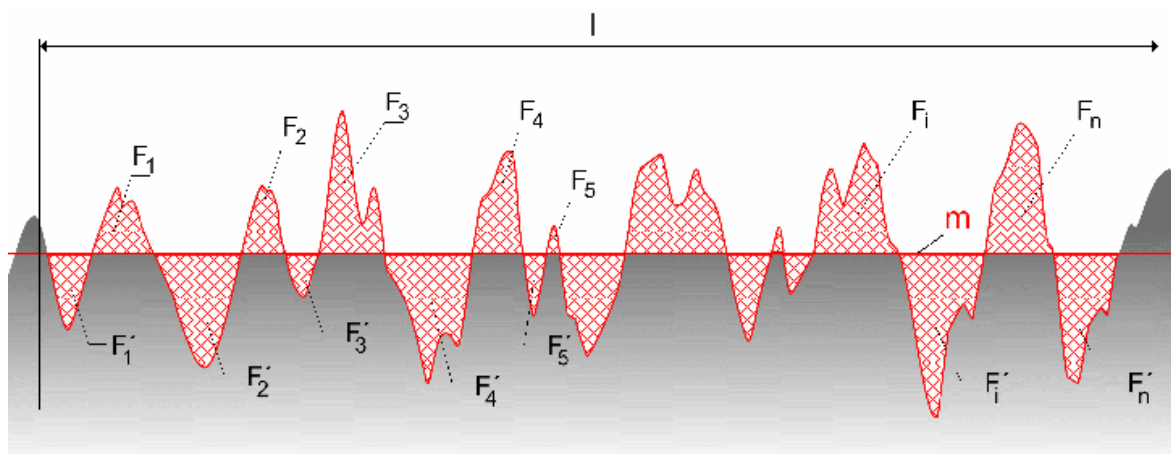
Při zkoumání a hodnocení R_a je vhodné si uvědomit, že se tato hodnota stanovuje pouze z bodů nad střední aritmetickou čarou profilu, a tak udává průměrnou hodnotu výstupků přesahující nominální hodnotu rozměru neboli nulovou úroveň povrchu. Stanovení střední aritmetické čáry profilu se stanovuje vztahem, kdy součty ploch na obou stranách středové čáry jsou stejné. [2, 10]

$$\sum_{i=1}^n F_i = \sum_{i=1}^n F'_i \quad (3)$$

Kde: F_i – obsahy výstupků [μm^2]

F'_i – obsahy prohlubní [μm^2]

n – počet výstupků/prohlubní



Obrázek 3: Střední aritmetická čára profilu [10]

Tabulka 1: Dosažitelné hodnoty R_a dle metod výroby [11]

Průměrná aritmetická odchylka profilu R_a [μm]	Metoda výroby povrchu
0,012 až 0,8	Dokončovací operace (broušení, leštění, jemné soustružení)
1,6 až 12,5	Běžné obrábění, hrubování (soustružení, frézování, hoblování)
25 až 400	Polotovary (výkovky, odlitky, válcované profily)

Tabulka 2: Použití ploch dle hodnoty drsnosti Ra [12]

Ra [μm]	Použití
0,012	Nejhladší funkční plochy, které mají mít co nejmenší opotřebení ve stykových plochách při vysokých tlacích, nebo vysokou zobrazivost. Plochy nejpřesnějších měřidel – základní měrky, metalografické výbrusy.
0,025	Kluzné plochy s velkou kluznou rychlostí a velkým tlakem, které mají mít co nejmenší opotřebení. Funkční plochy valivých ložisek, měřicí plochy přesných měřidel – kalibry.
0,05	Velice přesné funkční plochy, s požadovaným malým opotřebením. Úložné plochy měřících přístrojů, činné plochy kalibrů a měřidel.
0,1	Kluzné plochy hřídelů pro přesné uložení s malou vůlí, čelní opěrné plochy axiálních ložisek, písty a otvory hydraulických zařízení. Činné plochy měřidel, leštěné plochy s malou zobrazivostí.
0,2	Kluzné plochy smykadel a přesných ložiskových pouzder, přesná vedení s občasným pohybem a středící plochy měřících přístrojů a jejich přípravků. Těsnící kuželové plochy, povrchy volné pro zvýšení únavové pevnosti.
0,4	Kluzné plochy se střední kluznou rychlostí a středním tlakem. Vodící plochy obráběcích strojů, stykové plochy nepohyblivých rozebíratelných uložení. Uložení za studena lisované. Funkční plochy ozubených kol, šneků, vaček, strany pohybových závitů.
0,8	Kluzné plochy s menší kluznou rychlostí. Stykové plochy pro narážena a lisovaná uložení, vodící válcové elementy, středění vstřikovacích a střížných nástrojů. Těsnící plochy před zabroušením. Leštěné plochy rukojetí, pák a tlačítek.
1,6	Kluzné plochy hřídelů a ložisek s občasným nebo ručním pohybem. Vodící plochy s občasným vzájemným pohybem – drážky klínů a per. Stykové plochy dělených skříní a vík pro těsnění. Běžné plochy ovlivňující proudění tekutin.

3,2	Kluzné plochy s velmi malou kluznou rychlostí a bez nutnosti přesnosti styku. Těsnící plochy, volné plochy rotačních součástí obrobené pro dynamické vyvážení. Plochy pro netmelené nátěry.
6,3 – 12,5	Plochy po hrubém obrobení. Volně obrobené plochy, které nejsou funkční – čelní plochy hřídelů, čelní plochy ozubených kol. Plochy připravené pro návary, či plochy pro upínání při výrobě.

2.2 Vznik nového povrchu

Vzniklé nedokonalosti na povrchu po obrábění v sobě vždy nesou charakteristické stopy z technologického procesu, které se odvozují od geometrické charakteristiky nástroje a kinematiky řezného procesu. Při určování teoretické výsledné drsnosti povrchu po obrábění se považuje materiál za absolutně nedeformovatelný a ostří nástroje má přesný uvažovaný geometrický tvar. Projevující se nedokonalosti z důvodu působení reálných podmínek procesu v aplikované praxi vytvářejí u povrchů citelné rozdíly výsledných jakostí na reálných výrobcích. Používané nástroje nejsou geometricky dokonalé, na nástroji se projevuje opotřebení mezi jednotlivými cykly, i při cyklu samotném. Stroje nejsou dokonale tuhé, a tím vznikají vibrace mezi obrobkem a nástrojem. Další vliv při odebrání materiálu se připisuje entropii ve struktuře obráběného materiálu, či proměnným vlivům z prostředí. [2, 4]

Technologické vlivy na vlastnosti obrobené plochy lze členit na: [4]

- systematicky konstantní – špatné nastavení procesu, špatně zvolený nástroj,
- systematicky proměnné – opotřebení nástroje,
- náhodné.

2.3 Dokončovací operace

Dokončovací operace bývají aplikovány jako poslední krok při obrábění součástí. Jedná se o důležitou operaci, která učiní na obrobku finální změny rozměrů do požadovaných IT stupňů přesnosti, sníží drsnosti povrchu na požadovanou hodnotu, a geometrické rozměry upraví do požadovaných tolerancí. Časová náročnost dokončovacích procesů je vysoká a společně s ní jsou vysoké i náklady procesu. Míra potřeby dokončení povrchu do určité míry jakosti vždy závisí na zhodnocení potřeb pro správnou funkčnost výrobku. Konstrukční

týmy musí již při návrhu uvažovat nad vhodnou technologickou variantou průběhu procesu výroby se zohledněním potřebné životnosti a kvality výrobku. [2, 5]

2.4 Jakost optických komponentů

U optických komponentů se jakost zpracování povrchů posouvá do přísnějších kvalitativních požadavků. Mnohdy se požadavky přesnosti rozměrů na zrcadlové plochy optických prvků dostávají do desítek nanometrů. Společně se vyžaduje i excelentní průměrná aritmetická úchylka povrchu v hodnotách desítek nanometru (0,025 μm). Těmito dvěma hodnotám se připisuje největší vliv na funkční a pohledovou kvalitu součástí. Materiály pro optické prvky bývají běžně křehké, čemuž se musí stroje při jejich obrábění přizpůsobit. Ačkoli technologický pokrok ve výrobních procesech pokročil, stále se jedná o nákladné a náročné operace, které vyžadují kvalifikované operátory procesu a vysokou znalost problematiky obráběcích strojů. Složitost obrábění se ještě značně zvyšují s komplikovaností obráběné plochy v podobě sférických a asférických geometrií. [1, 16]

3 ZÁKLADNÍ DOKONČOVACÍ OBRÁBĚNÍ

V první řadě je třeba definovat, co je to obrábění. Obrábění je technologický výrobní proces, při kterém je za pomoci pronikání nástroje do materiálu obrobku odebírán materiál z výrobku v podobě třísek. Děj odebírání materiálu břitem nástroje s definovanou geometrií se nazývá řezání. Mechanickým působením nástroje dochází při procesu k změně vstupního stavu polotovaru do podoby finální součásti s plochami požadovaných tvarů, rozměrů, struktury povrchu, vlastností povrchové vrstvy a vzájemné přesnosti polohy ploch. Široké možnosti využití staví obrábění do pozice nejvyužívanějších technologií pro výrobu součástí. Při správně volbě nástrojů, geometrie strojů, při odebírání malých průřezů třísek s malými posuvy po ploše obrobku se může dosahovat vysokých přesností a vysoké jakosti povrchu. [6, 14, 15]

Základní pojmy: [6]

- Polotovar – vstupní materiál, kterému budou obráběny plochy
- Obrobek – obráběná součást s obráběnou, obrobenou, přechodovou plochou
 - obráběná plocha – plocha obrobku, která bude obrobená,
 - obrobená plocha – plocha obrobku, která již je obrobená,
 - přechodová plocha – plocha obrobku, která vzniká přechodně od působení ostří nástroje.
- Nástroj – Umožňuje odebírání v interakci s obrobkem úběr materiálu z obrobku
 - řezná část – část nástroje s prvky umožňující odebírání třísky,
 - základna – tělo nástroje umožňující upnutí nástroje do stroje a orientaci řezné části směrem k obrobku.

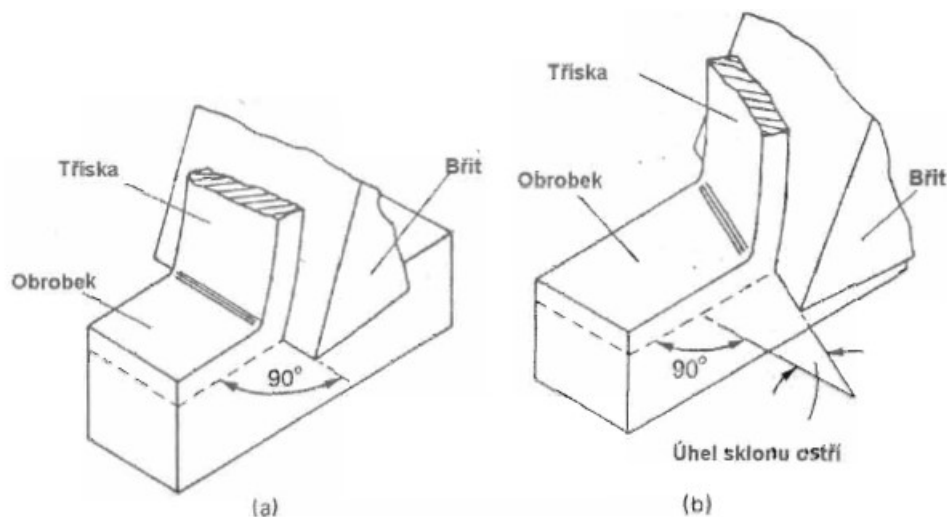
3.1 Tvorba třísky

Oddělení třísky probíhá vnikáním břitu řezné části nástroje do materiálu obrobku. Tříška se odděluje plastickou deformací a odchází po čele nástroje. Aby došlo k oddělení třísky, musí způsobovat nástroj v materiálu velká lokální smyková napětí při vysoké rychlosti smykových deformací. Tvoření třísky má na výsledný povrch velmi značný vliv a lze ho do vysoké míry ovlivnit. Vznik třísky se liší dle materiálu obrobku, zvoleného nástroje a

řezných podmínek. Podle charakteru třísky lze usuzovat obrobitelnost a výkonnost obráběcího procesu pro obráběný materiál. [2, 4, 6, 14, 15]

Dělení třísek: [6]

- Tvářená soudržná
 - tečné napětí dosáhne meze kluzu a meze pevnosti ve smyku dříve než normálové napětí meze pevnosti v tahu,
 - houževnaté materiály (oceli, hliníkové slitiny, tvárné litiny).
- Částečně tvářená
 - tečné napětí dosáhne meze kluzu dříve než normálové napětí meze pevnosti v tahu. Normálové napětí dosáhne dříve meze pevnosti v tahu, než tečné napětí meze pevnosti ve smyku,
 - křehké kovové materiály (bronz, litiny).
- Netvářená
 - normálové napětí dosáhne dříve meze pevnosti v tahu, než tečné napětí dosáhne meze kluzu a meze pevnosti ve smyku,
 - plasty, keramika.

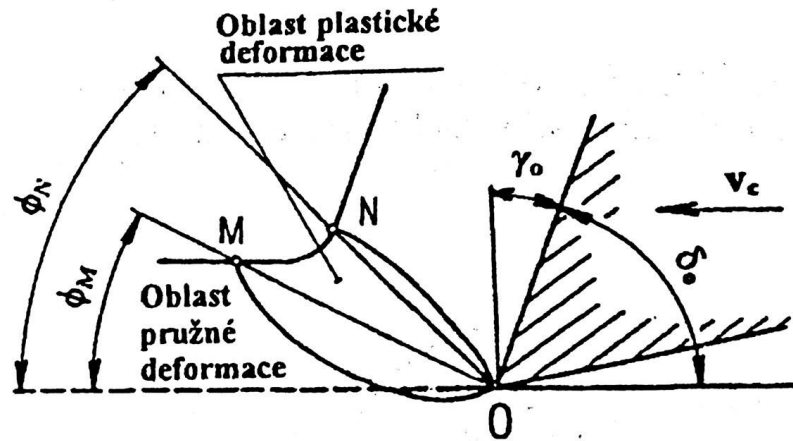


Obrázek 4: Realizace řezného procesu:

a) ortogonální řezání b) obecné řezání [15]

Řezný proces může probíhat jako ortogonální, nebo obecné řezání. Ortogonální řezání probíhá v kolmě nastaveném směru ostří vůči směru řezného pohybu řezných procesů jako

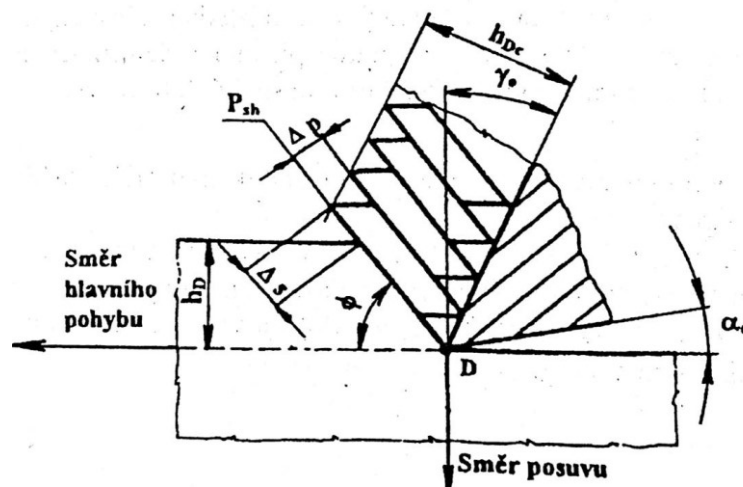
zapichování, frézování, hoblování, či protahování a jedná se o dvourozměrný stav. Obecné řezání probíhá pod úhlem sklonu ostří vůči směru řezného pohybu u vrtání, soustružení a frézování se zuby ve šroubovici a jedná se o prostorový stav. [6, 15]



Obrázek 5: Oblast plastických deformací v odřezávané vrstvě [15]

MO – počátek plastických deformací, NO – konec plastických deformací, δ_0 – ortogonální úhel čela nástroje

Velikost oblasti plastické deformace značně závisí na vlastnostech řezaného materiálu, řezné rychlosti a ortogonálním úhlu řezu. Při vysokých řezných rychlostech se oblast plastické deformace zužuje. Úhly ϕ_N a ϕ_M se překryjí, protože ϕ_M stoupá rychleji než ϕ_N a začíná docházet ke vzniku třísky v bodě stříhu P_{sh} . [6, 15]



Obrázek 6: Model tvorby elementů třísky [6]

h_D – jmenovitá tloušťka řezu, h_{Dc} – tloušťka třísky, P_{sh} – rovina stříhu, ϕ – úhel roviny stříhu, Δp – tloušťka elementu třísky, Δs – posunutí elementu třísky

Při řezání se díky plastickým deformacím tvoří třísky a dochází k jejich pýchování. Pro popis odvodu třísek z prostoru řezání se stanovuje součinitel pýchování. [6, 15]

$$k_s = \frac{A_{Dc}}{A_D} = \frac{v_c}{v_t} \cong \frac{h_{Dc}}{h_D} \geq 1 \quad (4)$$

Kde: A_D – jmenovitá plocha řezu [mm^2]

A_{Dc} – plocha průřezu třísky [mm^2]

v_c – řezná rychlost [m/min]

v_t – rychlost třísky [m/min]

k_s – součinitel pýchování třísky

h_D – jmenovitá tloušťka třísky [mm]

h_{Dc} – tloušťka třísky

Průběh řezu je charakterizován mnoha parametry, které jeho průběh ovlivňují. Kinematické veličiny popisují hlavní pohyb, směry pohybu a rychlosti. Kinematické hodnoty se nastavují podle obráběného materiálu, a především se volí s ohledem na požadavky obrobeného povrchu. Zvyšující se rychlosti velmi významně snižují trvanlivost břitu nástroje, a naopak snižují čas obrábění. V praxi se vždy volí ideální hodnota rychlostí v kompromisu životnosti nástroje versus výkonnosti obrábění. [4, 6, 15]

$$v_c = \frac{\pi * D * n}{10^3} \quad (5)$$

Kde: D – průměr obráběné plochy [mm]

n – otáčky obrobku [ot/min]

v_c – řezná rychlost [m/min]

$$v_f = f * n \quad (6)$$

Kde: n – otáčky obrobku [ot/min]

f – posuv na otáčku obrobku [mm/ot]

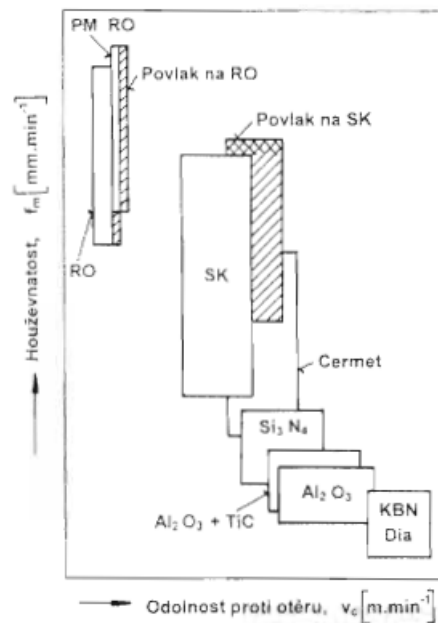
v_f – rychlost posuvu [mm/min]

3.2 Materiály nástrojů

Každý nástrojový materiál by měl splňovat požadavky v podobě vysoké tvrdosti, odolnosti proti opotřebení, vysoké houževnatosti, pevnosti v ohybu, chemické stálosti, dobré tepelné vodivosti a odolnosti při tepelných rázech. Žádný materiál není schopen dosáhnout ideálních výše popsaných vlastností, avšak je nutno vždy volit nejvhodnější materiál nástroje, který je schopen zabezpečit vysoký řezný výkon při vysokých teplotách s dlouhou výdrží a rozumným opotřebením. Při volbě nástroje se zohledňuje složitost tvaru, druh řezné operace, náklady na obrábění, požadované vlastnosti obráběného povrchu, výkon a predispozice stroje. [6, 14, 15]

Nástrojové materiály: [6, 15]

- nástrojové oceli uhlíkové a nízkolegované (ruční nářadí),
- rychlořezné oceli (RO, nebo HSS – High Speed Steel),
- stellite,
- slinuté karbidy (SK),
- povlakované SK,
- cermety,
- keramické materiály (KM),
- kubický nitrid boru (KNB),
- diamant.



Obrázek 7: Vlastnosti nástrojových materiálů [15]

3.2.1 Rychlořezné oceli

Rychlořezné oceli se vyznačují vysokou houževnatostí a odolávají teplotám až 600 °C. Po přesažení teploty 600 °C ztrácejí pevnostní vlastnosti a tím se snižuje jejich výkonnost. Rychlořezné oceli se zpravidla kalí do martenzitických struktur pro zvýšení tvrdosti. Legující prvky obsažené v oceli zlepšují prokalitelnost a po zakalení vytvářejí s uhlíkem tvrdé karbidy. Legujícími prvky bývá wolfram (W), molybden (Mo) a vanad (V). Jsou vhodné pro obrábění běžných ocelí. [6, 15]

3.2.2 Slinuté karbidy

Výroba SK probíhá slinováním (spékáním) metalurgických prášků. Do tvarů břitů se spékají karbidy wolframu (WC), titanu (TiC), tantalu (TaC), niobu (NbC) a dalších kovových prvků. Jako pojivo se využívá kobalt (Co). Oproti rychlořezným ocelím snášejí SK vyšší teploty až do 900 °C a předčí je i svojí tvrdostí. [6, 15]

Skupiny slynutých karbidů: [6, 15]

- P (WC + TiC + Co)
 - vyšší tvrdost a odolnost proti otěru s náchylností ke křehkému lomu,
 - pro materiály s plynulou třískou (oceli, lité oceli, tvárné litiny a křehké kovy).
- M (WC + TiC + TaC/NbC + Co)

- pro materiály s plynulou i krátkou třískou (těžkoobrobitelné oceli a slitiny).
- K (WC + Co)
 - nejhouževnatější SK s nižší odolností proti difúznímu otěru,
 - pro materiály s tvorbou elementární třísky (šedá litina, tvrdý bronz).

Možnost pro zlepšení vlastností řezných destiček z SK je jejich povlakování. Pro povlakování se používají technologie chemického povlakování (CVD) a fyzikálního povlakování (PVD). Povlakování dává možnost využívat větších řezných rychlostí díky zvýšení tvrdosti a odolnosti řezných hran destičky. [6, 15]

3.2.3 Keramické materiály

Základní složka keramických materiálů se nazývá korund (Al_2O_3). Samotný korund je velice křehký, a tak se pro zlepšení vlastností přidávají houževnatější materiály jako nikl, molybden, chrom a karbidy titanu (cermety). Teplotní odolnost dosahuje do $1200\text{ }^\circ\text{C}$ se zachováním vysoké odolnosti proti oděru. Uplatnění keramické destičky nacházejí při obrábění litin, slitin odolných proti žáru, nástrojových a rychlořezných ocelí. [6, 15]

3.2.4 Supertvrde materiály

Existují dva materiály, které lze do skupiny supertvrdých zařadit. Jedná se o kubický nitrid boru (KNB) a diamant (syntetický, přírodní). [6, 15]

Diamantové materiály se využívají při obrábění neželezných materiálů. Jedná se o nejtvrdší řezný materiál s vysokou odolností proti opotřebení. Nevýhodou se u diamantu stává afinita vůči materiálům s obsahem uhlíku a nízká teplota do $650\text{ }^\circ\text{C}$, pak se začíná přeměňovat na grafit. Hojné využití nalézají v obrábění hliníku, keramiky, skla, bronzu, titanu a dalších. [6, 15]

Kubický nitrid boru odolává vyšším teplotám než diamant ($1160\text{ }^\circ\text{C}$) a nevykazuje afinitu vůči uhlíku. Stává se vhodným pro obrábění tvrdých a žáruvzdorných materiálů, kalených ocelí, či úpravu rychlořezných břitů nástrojů.

3.3 Mikroobrábění

Vytváření materiálů s vhodnějšími vlastnostmi pro specifické účely využití dává při konstrukci možnost vytvářet méně rozměrné součástky, a tak efektivněji ovlivňovat spotřebu materiálu ve výrobě. Tímto jsou následně ovlivněny kladně vlastnosti kompletních

výrobků. Se zmenšujícími se rozměry významněji hraje roli povrch namáhaných součástí, který se lehce může stát slabým místem součásti. V místě nevhodné drsnosti plochy narůstá koroze pod napětím na povrchu s následky v podobě únavového lomu, či mikrotrhlin. [2, 6]

Základ tradičních obráběcích technologií spočívá v odebrání materiálu v podobě třísek z obráběného povrchu obrobku rezným nástrojem. Využití technologií při mikroobrábění, či dokončování povrchů lze uvažovat zejména nad mikrofrézováním, mikrovrtáním, nebo mikrosoustružením. Jmenované technologie neustále postupují modernizacím reagujícím na poptávku trhu se zvětšujícími se nároky na preciznější výrobky, efektivitu výroby, či snížení vlivu na životní prostředí spotřebou materiálu. Všechny zmíněné aspekty ovlivňují směr vývoje strojů a nástrojů s možností vyrábět pokročilejší produkty. Postupně se umožňuje miniaturizace výrobků, která s sebou nese zvýšené kvalitativní požadavky. [4, 5, 6, 16]

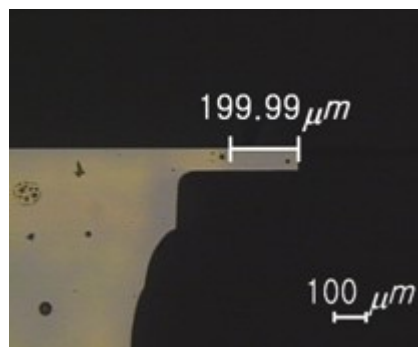
3.3.1 Diamantové mikrosoustružení

Optické prvky, jako jsou například čočky, našli díky pokroku v mikroobráběcích procesech další možnosti aplikace. Hlavními požadavky na kvalitní čočku jsou malá velikost a přesnost. Jako jedna z nejvhodnějších metod se udává metoda mikrosoustružení s jednobodovým diamantovým nástrojem. Univerzálnost metody umožňuje obrábění různorodých tvarů ať už rovinných či asférických. Metoda se používá pro obrábění široké škály materiálů z řad skla, krystalů, kovů, akrylů a dalších. Obrobené optické součástky se využívají v sestavách dalekohledů, televizorů, fotoaparátů a dalších zařízeních. Využit lze metodu i pro kontaktní čočky. V případě složitých tvarů čoček se ovšem neobrábí přímo čočka samotná. Své uplatnění našli výrobky i v hodinářství, odkud se původně vyvíjeli, biomedicíně, nebo automobilovém průmyslu. Zde se obrábí dutina lisovací formy ze slitiny niklu a fosforu. Při mikroobrábění nastává problém v podobě zmenšování prvků do velikostí desítek či stovek mikronů, kdy požadavky na přesnost se dostávají naopak do řádu mikronů. Ačkoli se mikroobráběcí procesy odvozují metodikou od klasických metod, existuje několik rozdílů. [16]

Zásadní rozdíly v mikrosoustružení: [16]

- Průměr obráběné plochy součásti
 - u běžného soustružení je průměr > 1 mm,
 - u mikro soustružení je průměr < 1 mm.
- Řezný mechanismus

- u běžného soustružení dochází k odřezávání vrstvy materiálu z obrobku skládající se z mnoha zrn tvořící celkový průřez třísky,
- u mikrosoustružení se mnohdy neodebírání ani celé zrno. Odebírají se tak malé třísky, že dochází k přeřezávání zrn a tím úběrem pouze části zrna.
- Tuhost obrobku
 - u běžného soustružení může docházet k menším průhybům obrobku. Lze s ním však velmi dobře počítat, nebo ho i eliminovat,
 - u mikrosoustružení se obrobek velmi vychyluje, přičemž mění svůj tvar a velikost od působících sil nástroje.
- Poměr tolerancí
 - u běžného soustružení se reálně dosahuje poměru až 1:700 mezi jmenovitým rozměrem a jeho rozměrovou tolerancí,
 - u mikrosoustružení malých součástí o průměrech 0,1 mm by už tento poměr nebyl možný, protože by se jednalo o toleranci v desetinách nanometru, a to je již nereálné. Snaha je dosáhnout co nejpřesnějších rozměrů.
- Velikost a přesnost stroje
 - u běžného soustružení se obrábí při relativně nízkých rychlostech, s větší hloubkou řezu a větším posuvem,
 - u mikrosoustružení je stroj znatelně menší. Společně s menší velikostí se požaduje zlepšení přesnosti řízení pohybů a zajištění stabilních opakovatelných podmínek. Přesnost pohybů se pohybuje v μm .



Obrázek 8: Diamantový mikrosoustružnický nástroj o šířce 60 μm [17]

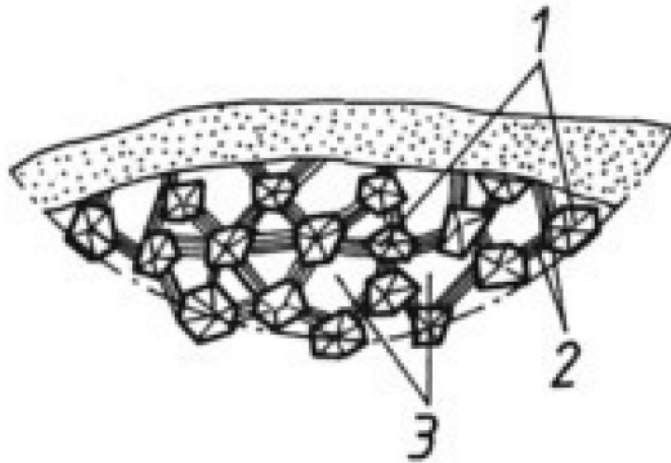
4 BROUŠENÍ

Jedná se o abrazivní metodu obrábění s vysokými řeznými rychlostmi (20 až 45 m/s) a nedefinovatelnou geometrií. U vysokorychlostního broušení se dosahuje řezných rychlostí až 140 m/s. Brusné nástroje se skládají z náhodně uspořádaných zrn spojených v matici (pojivu). Charakteristickým se pro mechanismus odebrání třísky stává děj, kde je velké množství malých třísek (o jmenovité velikosti 0,01 mm²) z povrchu odebráno najednou a k úběru čelem nástroje (zrna) dochází většinou v negativním úhlu. Poloměr zrn se pohybuje při běžném obrábění mezi 5 až 40 μm. [4,6,7]

Brusné procesy se hojně využívají při dokončování rotačních a rovinných ploch z kalených, tvrdých a keramických materiálů, kde je ostatními metodami obtížné obrábět, nebo není možné dosáhnout požadovaných vlastností povrchu. Povrchy obrobků dostávají vysokou geometrickou a rozměrovou přesnost s jemnou drsností povrchu. V určitých případech se stává broušení hlavní metodou obrábění jak při hrubovacích operacích, tak i v dokončování. Hospodárností v určitých případech konkuruje klasickým metodám obrábění. [4,6]

Specifikem broušení se stává mechanické oddělování třísky z obrobku při vysoké rychlosti. S rostoucí rychlostí se snižují primární plastické deformace třísky, tím i třecí síly v podobě sekundárních deformací, a snižuje se doba kontaktu třísky a řezného klínu. Tím se snižuje teplo předávané obrobku a nástroji. Část vytvořeného tepla s sebou odnese tříska. I přes tyto aspekty se při procesu uvolňuje velké množství tepla. Teplo ovlivňuje povrch obrobku a způsobuje v něm změny nejčastěji ve formě vzniku reziduálních napětí ve vrchní vrstvě několika mikrometrů. Reziduální napětí je v přímé úměrnosti se vzniklým teplem při broušení. Dochází zároveň i k změnám ve strukturách povrchu. U reziduálních napětí se hlavně projeví na potenciálním snížení životnosti tahové napětí ve vrstvě materiálu, z kterého mohou vznikat praskliny a tím potenciální slabá místa pro lom pod povrchem. Naopak je tomu u tlakových napětí, tam můžeme očekávat zvýšení odolnosti. Pro dodatečné snížení teplotního namáhání při procesu se využívají oleje ve vodní emulzi a samotné oleje. [4,6,7]

Brusné nástroje se vyskytují ve formách s vázanými nebo volnými zrny. S volnými zrny se vyskytují pasty a prášky. Vázaná zrna s pojivem se objevují ve formách, jako jsou brusné kotouče, tělíška, kameny, pilníky, brusné pásy apod. [4,7]



Obrázek 9: Struktura brusného nástroje [4]

1 – zrna brusiva, 2 – pojivo, 3 – póry

4.1 Materiály zrn brusných nástrojů

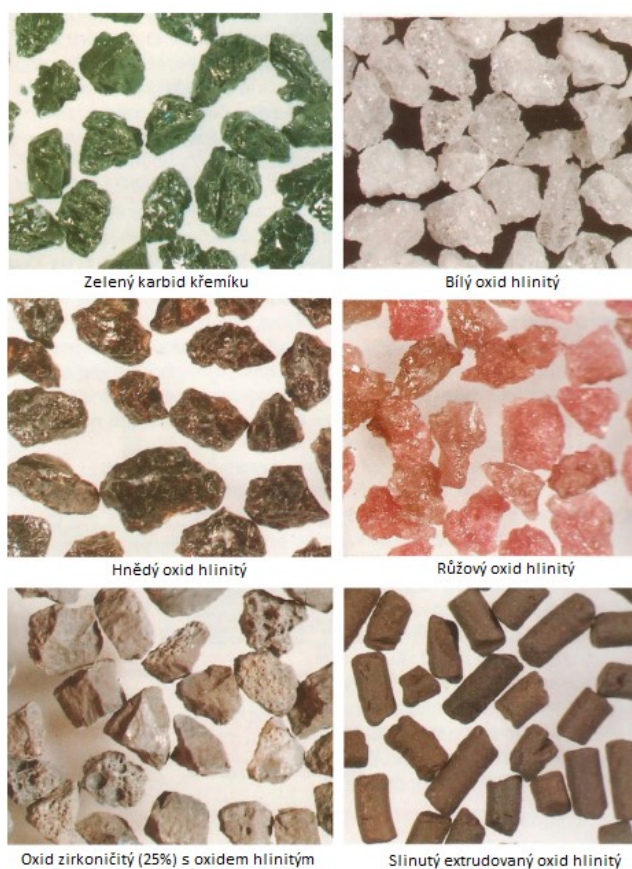
Výroba brusných nástrojů se primárně soustředí na skupinu pěti abrazivních materiálů, kde lze korund (Al_2O_3), karbid křemíku (SiC) a granát řadit jako konvenční abraziva. Syntetický diamant a kubický nitrid bóru (KNB) mezi super-abraziva. Materiály mezi sebou vykazují veliké rozdíly a pro příklad hodnoty tvrdosti na stupnici podle Knoop jsou: [7]

- syntetický diamant - 7000 kg/mm^2 ,
- kubický nitrid bóru - 4500 kg/mm^2 ,
- karbid křemíku - 2700 kg/mm^2 ,
- korund - 2500 kg/mm^2 ,
- granát: - 1400 kg/mm^2 .

Základním předpokladem pro uspokojivý materiál zrn je jejich tvrdost. Tvrdost ovšem není jediným aspektem, který ovlivňuje vhodnost pro obrábění materiálů obrobků. Karbid křemíku je nejpoužívanějším materiálem a zvládá kvalitně obrábět litiny, mědi a podobně. Diamant má vlastnosti projevující se mnohem větší tvrdostí a zvládne efektivně obrábět karbidy, titan, či keramiku. Při obrábění ocelí už jeho efektivita klesá. Dochází k tavení zrn a nadměrnému opotřebení brusného nástroje. [7]

4.1.1 Korund

Korund (oxid hlinitý) se vyskytuje ve formě krystalického materiálu s chemickým vzorcem Al_2O_3 a často obsahuje další příměsi. Často do sebe krystaly korundu substituují cizí oxidy, jako oxid titaničitý (TiO_2), oxid železitý (Fe_2O_3) a oxid křemičitý (SiO_2). V čisté formě má korund transparentní bílou barvu. S narůstajícím množstvím stop jiných prvků se jeho barva mění. Vysoce kvalitní třídy oxidu hlinitého se využívají jako ozdobné kameny šperků (safír, topaz, smaragd). [7, 8]



Obrázek 10: Typy zrn oxidu hlinitého [7]

Syntetický korund se získává tavením slitin hliníku (bauxitu) při teplotě 2000 – 2400 °C. Nečistoty v materiálu se oddělují od roztoku a oxid hlinitý krystalizuje ven. Konkrétní průběh procesu má vliv na výsledný produkt a jeho vlastnosti na brusný výkon. Čím pomalejší je proces chlazení, tím větší zrna vznikají. Obvykle platí, že čím větší jsou výsledná zrna, tím mají větší náchylnost k rozlamování zrna. [4, 7, 8]

4.1.2 Granát

Granát v přírodě krystalizuje v pravidelné formě v podobě kosočtvercového dvanáctistěnu. Vhodně zabarvené krystaly se využívají v klenotnictví.

Abrazivní vlastnosti granátu se vyjímají odolností proti rozlamování než svojí tvrdostí. Využívá se především v dřevozpracovatelském průmyslu v podobě brusného papíru. Využití také nalézá při broušení kůže, ploch zrcadel, lakovaných a malovaných ploch. Většina matric pro pojení granátu je z organických materiálů, které však nejsou vhodné zejména z důvodu nižší teplotní odolnosti pro použití v brusných kotoučích. [7, 8]

4.1.3 Karbid křemíku

Chemickou reakcí oxidu křemičitého (SiO_2) a uhlíku dochází k přeměně na karbid křemíku (SiC) a vedlejší produkty (CO). Výroba probíhá umístěním uhlíkové tyče na lůžko základní suroviny oxidu křemičitého. Následně je do materiálu vpuštěn tepelný proud, který vyvolává teploty okolo $2400\text{ }^\circ\text{C}$. Základní materiál dále obsahuje piliny, které vytvářejí póry pro lepší odvádění oxidu uhelnatého. Po výrobě se karbid křemíku třídí do kategorií podle velikosti zrn a čistoty. Čistota materiálu se projevuje v jeho barvě. Zelené zabarvení značí vysokou čistotu cca 99 %. Vysoce čistý karbid křemíku je určený k opracovávání slinutých karbidů. Jak se čistota snižuje, zabarvení se mění do černa. Černé karbidy mají čistotu pod 95 %. Vhodné využití nalézají v opracovávání tvrdých a křehkých materiálů, jako jsou lité oceli, bronz, hliník a sklo. [7, 8]

4.1.4 Diamant

Diamant se označuje jako jeden z nejtvrděších známých materiálů a vlastní vysokou odolnost proti opotřebení. Diamant má velmi dobré teplo vodivé vlastnosti, avšak při teplotách okolo $700\text{ }^\circ\text{C}$ v prostředí vzduchu rychle degraduje. Pokud se diamant nachází v inertní atmosféře, posouvá se teplota degradace na $1500\text{ }^\circ\text{C}$. Při dosahu teplot degradace se diamant, jakožto nestabilní forma uhlíku, začne přeměňovat v grafit. Protože je diamant forma uhlíku, jeho interakce s železnými kovy urychluje opotřebení, která se projeví ve vzniku Fe_3C sloučenin, a následně má zrno tendenci rychleji vypadávat. Použití diamantových zrn bývá u broušení těžkoobrobitelných a tvrdých materiálů. Dále při jemném dokončovacím broušení nebo ostření nástrojů ze slinutých karbidů. [7, 8]

Původ může být přírodního, nebo syntetického charakteru. [7, 8]

Syntetický diamant může být ve formách monokrystalických nebo polykrystalických. Pro náročné aplikace je využívána monokrystalická drť. Jeho krystalografická struktura je lehce rozeznatelná v krychlové soustavě v podobě krychle nebo osmistěnu. [7, 8]

Polykrystalická diamantová zrna jsou vyráběna zrychlenou nukleační rychlostí včetně tlaku. Geometrické tvary vzniklého produktu jsou nedefinovatelně popsatelné. Je tedy vysoce lomný pro náročnější aplikace. [7, 8]

Přírodní diamant krystalizuje převážně v osmistěnné formě, která poskytuje ostré body ideální pro jednoduché bodové nástroje. V průmyslu se využívají přírodní diamanty, které jsou kvalitativně nevhodné k použití do šperků. Diamant se nejdříve rozdrtí a vzniklá zrna se velikostně třídí přes síta. Zrna získávají náhodné tvary povrchu a tvary řezných hran se zachováním vysoké pevnosti a malé lámavosti. [7, 8]

4.1.5 Kubický nitrid boru

Kubický nitrid bóru se tvrdostí vzdáleně přibližuje diamantu. Jeho krystalografická struktura má podobu šestihranu. Přednosti jsou v teplotní odolnosti větší než u diamantu blíží se k 1900 °C a dobrou chemickou odolností vůči železným litinám. Využití nachází při ostření vysoce kvalitních železných nástrojů z rychlořezné oceli. Broušení kubickým nitridem boru je vhodné provádět společně s chlazením minerálními oleji, což zvyšuje stabilitu a efektivitu úběru. [7, 8]

4.1.6 Velikost zrn

Velikost zrna se tradičně měří a třídí na vibračních sítích, kde se sleduje, kterým sítem je zrno schopno propadnout. Specifikace neříká, že musí být všechna zrna o stejné nominální velikosti, a tím mohou mezi sebou zrna označená pod jednou velikostí obsahovat malé množství hrubších zrn a větší množství jemných zrn. Evropská federace výrobců abraziv (FEPA) udává velikost zrna podle rozměrů zrn. Americký národní normalizační institut (ANSI) udává velikost zrna podle označení síta. [4,7]

Tabulka 3: Příklady značení velikosti zrn [7]

Značení FEPA	ANSI značení	Rozsah velikosti zrn (μm)
1001	18/20	1000/850
91	170/200	90/75

Značení dle ANSI se skládá z označení síta s většími otvory, kterými je zrno ještě schopno propadnout a síta s menšími otvory, na kterém se již zrna zachytí. Označení sít se udává v počtu děr v sítu na jeden palec. Větší hodnota ve značení velikosti zrn udává jemnější síto a menší hodnota značení naopak udává hrubší síto. [7]

Značení dle FEPA udává značení velikosti zrn v mikrometrech neboli v mikronech. Tato velikost odpovídá rozměru otvoru síta, kterým bylo zrno schopno propadnout. [7]

4.2 Pojiva brusných nástrojů

Pro využitelnost brusných zrn je velmi důležitá správná volba pojiva. Hlavním úkolem pojiva je tvoření soudržnosti abrazivních zrn při procesu, přesněji: [4, 7, 8]

- zadržuje zrna v povrchu, který je ve styku s obrobkem, aby nedocházelo k předčasnému uvolňování, a tím nevyužití plného potenciálu zrna,
- ovlivňuje svůj postupný úběr a postupně vystavuje nová zrna do odebíracího kontaktu na nových místech,
- zajišťuje přenos síly působící z vřetene na obrobek,
- poskytuje odvod tepla.

Tabulka 4: Vlastnosti nejčastěji využívaných pojiv [7]

Mechanické vlastnosti	Pryskyřice	Keramické	Železné
Tvrdość Brinell (HB)	228	380	278
Pevnost prasknutí (MPa)	7,2	8,5	14,3
Modul pružnosti (MPa)	1196	4133	5460

Nejčastěji se pro konvenční brusiva používají skelná a pryskyřicová pojiva. Využívají se i pro superabraziva, ale zde se již hledí na jiné aspekty pojiva. U superabraziv se dále dělí zpracování na jednovrstvé a vícevrstvé. Nástroje s jednovrstvým nánosem brusiva s pojivem se praktikují zejména z ekonomických důvodů. Vrstva se nanese ve výšce 50 % velikosti zrna na ocelový náboj. [7]

4.2.1 Keramická pojiva

Využívají se zejména u pojení konvenčních brusných zrn, ale v určitých případech i při pojení kubického nitridu boru. Výroba nástrojů s keramickým pojivem probíhá slinováním za vysokých teplot směsi brusných zrn se skleněnými fritami, jíly, živci a boraxy. Před slinováním se směs stlačuje z původního objemu do nejmenšího možného objemu, aby došlo ke kvalitnímu vyplnění mezer mezi zrny. V nedokonalém vyplnění mezer, či nedostatku pojiva platí, že čím delší, nebo slabší jsou vytvořené můstky (tvořené pojivem) mezi zrny, tím více se stává struktura brusného kotouče slabší. Vazby z pojiva mezi zrny musí být dostatečně pevné, aby udrželi zrna při normálním odebrání materiálu, avšak musí zároveň umožnit kontrolované vylomení zrna z matrice. Pokud by byl materiál pojiva příliš pevný oproti brusnému zrnu, může docházet k jejich spálení. Zároveň póry v kotouči umožňují kapalině chladit kotouč a odvádět zrna. [7]

Vytvořené vlastnosti slinutých keramických (vitřifikovaných) matric vynikají vysokou teplotní stabilitou, přiměřenou křehkostí, tuhostí a odolností vůči pórům ve struktuře. [7]

4.2.2 Pryskyřičná pojiva

Pryskyřicová pojiva se značně využívají při potřebě využití organického pojiva. Vytvoření spojené struktury probíhá stlačením v uzavřeném prostoru pod tlakem společně s abrazivem za relativně nízkých teplot, kde dochází k reakci a navazování nových vazeb mezi molekulami v pojivu a zrny. Broušení s pryskyřičným pojivem se označuje jako měkké broušení. Udržitelnost zrna v matrici závisí na velikosti působící lokální síly, odolnosti vazby okolo zrna, kdy citlivost se zvyšuje se stoupající teplotou a chemickým prostředím. Na rozdíl od vitřifikovaných kotoučů se brusný proces řídí pod určitým tlakem na obrobek než dle posuvu. [7]

Pryskyřičná pojiva lze rozdělit do tří skupin:

- plast,
- fenolová pryskyřice,
- polyamidová pryskyřice.

Plastová pojiva jsou nejměkčí variantou této kategorie pojiv vyrobené z epoxidových, či uretanových pojiv. Velkým benefitem je u těchto pojiv rychlost a jednoduchost výroby. Před zavedením vitřifikovaného kubického nitridu bóru se používala s ním ve spojení k obrábění klikových hřídelí. Forma s plastovým pojivem poskytovala měkký brusný účinek a

poddajnost, která zabraňovala chvění. Dnes se stále používají v nožířském průmyslu. Výhodou je možnost ultrajemného broušení na úkor omezené živostnosti kotouče. [7]

Fenolická pojiva představují po keramických pojivech druhé nejpoužívanější pojivo pro konvenční kotouče pro hrubé broušení, nebo v případech, kdy je třeba zachovávat ostré hrany obrobku. Příkladem může být ostření vrtáků. Stále se fenolické pryskyřice nejčastěji využívají ve spojení s diamantovými zrny využívaných na nástrojárnách. Fenolické pryskyřice mají výhodu v odolávání proti nárazům a možnost udržení malých poloměrů. [7]

Polyamidové pryskyřice začaly svým využitím ve výrobě brusných kotoučů poskytovat jejich vyšší pevnost, tepelnou odolnost a nižší tažnost než fenolová pojiva. Hlavní využití se udává u vysoceproduktivního broušení karbidových nástrojů. Oproti fenolové pryskyřici může brousit při vyšších otáčkách a vyšších teplotách po delší dobu. [7]

4.2.3 Železná pojiva

Využití nalézají zejména u superabraziv jako je diamant nebo kubický nitrid boru. Zrna drží v kovové pojivu pevněji než v pryskyřičných pojivech a kotouč dostává vysokou odolnost proti abrazivnímu opotřebení s vysokou houževnatostí. Brusné kotouče jsou vhodné pro obrábění kamenů, keramických materiálů a k rovnání opotřebovaných brusných kotoučů s měkčími pojivy. [7]

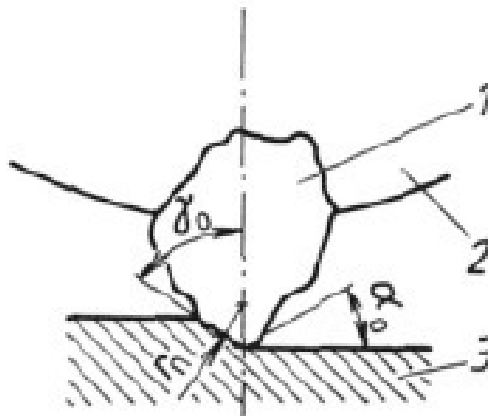
U ekonomických jednovrstvých aplikací se využívá galvanického pokovování za pokojových teplot a dochází k mechanickému spojení náboje se zrny pojiva. Alternativním variantou je chemické spojení pájením natvrdo ze slitin kovu např. Ni/Cr. Zde se ovšem dosahuje vysokých teplot a může docházet k deformacím železného náboje či ovlivnění zrnitosti. Výhodou je větší expozice zrn a tím větší záběr. Využití následně nalézá při hrubovacích a řezných operacích s vysokým úběrem materiálu. [7]

4.3 Příprava nástrojů

Před procesem nebo po procesu je nutné provádět opravu tvaru kotouče. Pro správný průběh rovnoměrného odebrání materiálu a tím dosažení požadovaných vlastností ploch se provádí oprava jeho tvarových nedostatků (profilování), čištění usazeného materiálu v kotouči a ostření. Úprava profilu a následné ostření kotoučů odpovídá požadavkům procesu broušení, na který je kotouč připravovaný, s ohledem na ekonomickou a kvalitativní stránku požadavku. Stálou kvalitu procesu broušení lze udržovat pouze opakovaným procesem přípravy nástroje. [13]

4.4 Tvorba třísky

Základní chápání principu úběru třísky při procesu broušení je prvotním předpokladem pro základní pochopení děje. Pro vytvoření třísky musí být jako první splněna podmínka, že je materiál zrna tvrdší než obráběný materiál. V opačném případě by nedocházelo k chtěnému úběru materiálu. V brusném nástroji jsou náhodně rozmístěna zrna. Zrna, která vyčuhují z kotouče ven se při kontaktu s materiálem obrobku zarývají do materiálu a odebírají jeho malý elementární kousek. Průběžně se při ději z důvodu otupení již opotřebovaných zrn zvyšuje řezná síla na ně působící a dochází k jejich vylomení a obměně za nová zrna. Dochází k takzvanému samoostření. [6,13]



Obrázek 11: Záběr brusného zrna [4]

1 – brousící element, 2 – brousící kotouč, 3 – broušený povrch

α_0 – ortogonální úhel hřbetu, γ_0 – ortogonální úhel čela, r_n – poloměr ostří

Při záběru zrna vázaném v kotouči na zrno působí síly od pojiva, které ho drží na místě a nutí zrno pronikat do materiálu. V první fázi vstupuje zrno pod velkým tupým úhlem do materiálu a začíná materiál obrobku plasticky deformovat. Teprve až se zrno dostane do určité hloubky (hloubky řezu), začíná docházet k tvorbě třísky. Tvorba třísky a její reálná výška oproti výšce zrna pronikajícího do materiálu je značně ovlivněna třecími podmínkami na řezné hraně. K ovlivnění třecích podmínek na řezné hraně se využívá mazání oleji a emulzemi v průběhu samotného procesu. S rostoucím mazáním se zvětšuje výška řezu zrna a dochází tak k prodloužení doby plastické deformace materiálu. V důsledku snížení tření se zlepšuje rovnoměrnost úběru materiálu. [4, 13]

Chladicí kapaliny mají na proces další kladné vlivy: [4]

- odvádí teplo, které vzniká při broušení,

- snižuje tření a tím množství vzniklého tepla.
- odplavuje vzniklé třísky i odlomené části zrn.

Dosažení požadované jakosti povrchu lze dosáhnout pouze s vhodnou kombinací zvoleného brusného nástroje a vstupních parametrů průběhu procesu. Rostoucí rychlost posuvu a hloubka záběru má za důsledek větší tloušťky třísek a rostoucí řezné síly. Se zvyšující se rychlostí dochází ke zvyšování tvoření tepla, zvyšování řezných sil, chemickým změnám, či mikrotrhlinám. Při nadměrném namáhání, nebo špatně zvoleném brusném nástroji může docházet k předčasnému vylamování jednotlivých zrn nebo jejich celých skupin. Efektivita úběru materiálu může být poté značně negativně ovlivněna. [4, 13]

4.5 Metody broušení

Brusné operace se vyznačují kontinuálním úběrem materiálu, který vzniká spolupůsobením řezných a posuvových pohybů nástroje a obrobku. U některých metod lze regulovat i hloubku záběru. [6,7,13]

Dělení podle pohybu stolu vůči broušícímu kotouči: [6]

- axiální broušení – hlavní posuv stolu je rovnoběžný s osou kotouče,
- tangenciální broušení – hlavní posuv stolu je rovnoběžný s vektorem obvodové rychlosti kotouče,
- radiální broušení – hlavní posuv stolu je radiální vzhledem ke kotouči.
- obvodové zápichové broušení – posuv stolu je plynule radiální,
- čelní zápichové broušení – posuv stolu je plynule axiální.

Podle tvaru broušených ploch se dělí: [4]

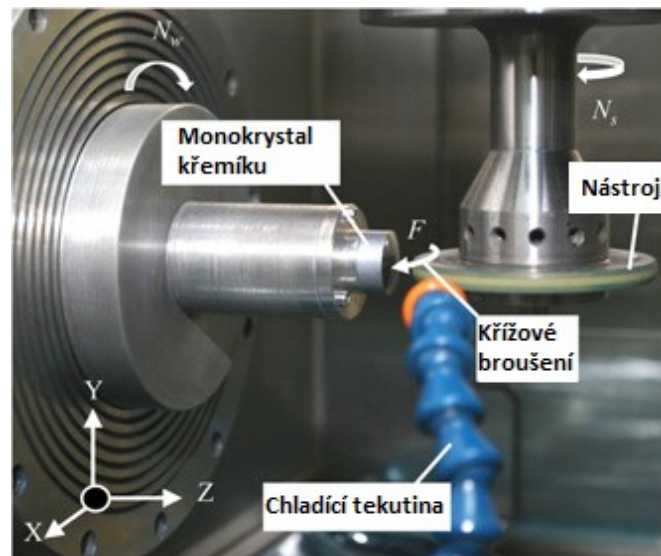
- Broušení do kulata
 - vnější,
 - vnitřní.
- Broušení rovinné
- Broušení tvarové

Tabulka 5: Jakost a přesnost ploch po brusných procesech [6]

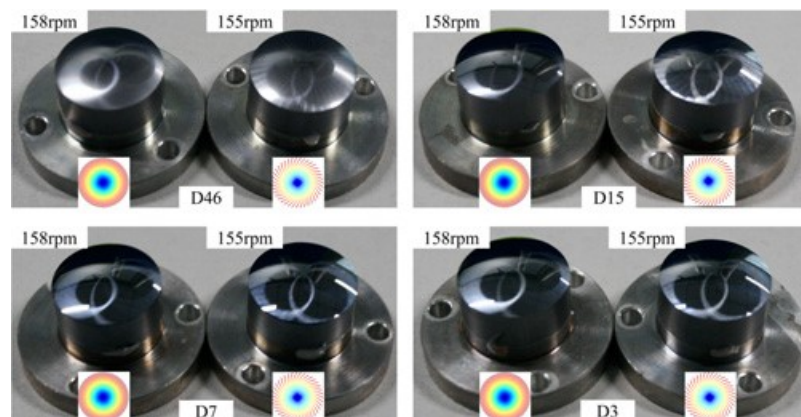
Broušené plochy	Metoda	Přesnost rozměru IT	Průměrná aritmetická odchylka profilu R_a [μm]
Vnější rotační plochy	Hrubování	9 až 11	0,8 – 3,2
	Dokončování	5 až 6	0,2 – 0,6
	Jemné broušení	3 až 5	0,05 – 0,4
Vnitřní rotační plochy	Hrubování	9 až 11	1,6 – 3,2
	Dokončování	5 až 7	0,4 – 1,6
	Jemné broušení	3 až 5	0,05 – 0,4
Rovinné plochy	Hrubování	9 až 11	1,6 – 3,2
	Dokončování	5 až 7	0,4 – 1,6
	Jemné broušení	3 až 6	0,05 – 0,4

4.5.1 Broušení sférických povrchů

S vývojem technologií a požadavků na přesné dokončování sférických a asférických povrchů se posouvají i možnosti v oblasti broušení. Broušení je velice výkonná metoda, u které je možno rychle odebrat velké množství částic materiálu. Při obrábění sférických a asférických zrcadlových ploch však zanechávají zrna na povrchu obrobku charakteristické stopy po broušení. Jelikož jsou zrna v brusném nástroji silně vázána v pojivu, dochází k jejich pevné vazbě, a jejich nahodilost neumožňuje předvídatelnost trajektorie úběru třísky. Následně se musí povrchy dokončovat dalšími abrazivními metodami jako je lapování nebo leštění. I při následném leštění je obtížné stopy po broušení odstranit a je třeba odebrat relativně velkou vrstvu materiálu. Velikost a hloubka stop po broušení má velký vliv na finální geometrickou přesnost a nanotopografii. Jasný mechanismus úběru třísky broušením však zatím nebyl v nanometrových rozměrech u sférických a asférických ploch dostatečně popsán. Využití brusných procesů je vhodné volit v hybridních variantách spojených s dalšími metodami dokončování, pro dosažení požadovaných parametrů v jednom procesu a dosažení výkonnosti výhodné pro průmyslovou výrobu. [19, 20, 21]



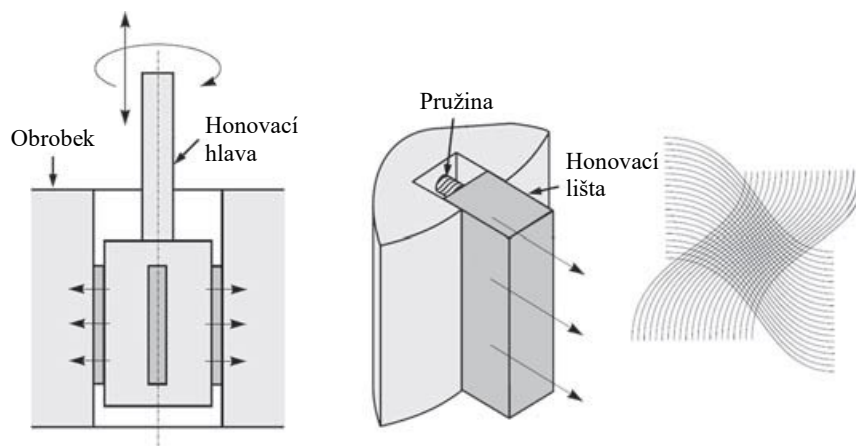
Obrázek 12: Sférické broušení křemíku [20]



Obrázek 13: Obrobky po sférickém broušení a leštění [20]

5 HONOVÁNÍ

Během honování se přitlačují honovací kameny složené z jemného brusiva, které jsou upnuty v honovací hlavě, na stěny obrobku. Honovací hlava koná cyklický vratný přímočarý pohyb po celé délce plochy otvoru s kombinací rotace kolem její osy. Dochází k jemnému broušení ploch. Na rozdíl od broušení má proces honování výrazně nižší řezné rychlosti (0,2 – 2 m/s). Určujícím parametrem procesu je obvodová rychlost, rychlost přímočarého cyklického pohybu a měrný tlak honovacích kamenů na stěny obrobku. [4,5,6]



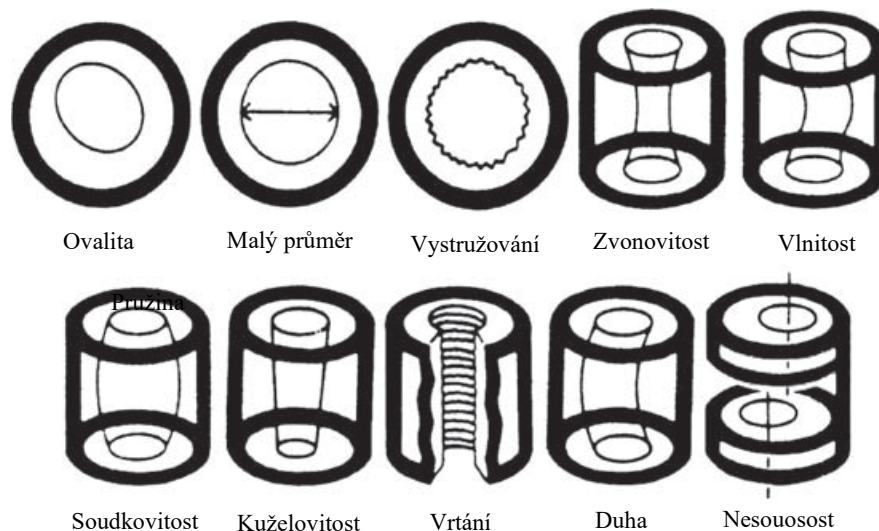
Obrázek 14: Princip honování [5]

Během procesu se honovací hlava pohybuje ve skluzu po obvodních stěnách otvoru se slabým přitlakem honovacích kamenů na stěnu. Samotná stěna otvoru zároveň vede samotnou honovací hlavu ve své ose. Při procesu se primárně musí intenzivně dodávat chladicí a mazací tekutiny. Zejména se používají směsi petroleje s olejem nebo kyselinou olejovou. Plochy po dokončené úpravě nesou charakteristické křížové stopy po rotačně posuvném pohybu honovacích kamenů a oddělených zrn. Křížové rýhy výrobku dávají zlepšené vlastnosti v podobě rozvádění mazacích prostředků po ploše. [4,5,6]

Běžně se honování využívá pro dokončení vnitřních cylindrických tvarů, jako jsou pneumatické válce, válce spalovacích motorů, bubny, ložiska vřeten a podobně. Honování je schopné odstranit mikro geometrické, rozměrové a povrchové nedokonalosti po předchozím obrábění. Honováním však nelze upravit pozici otvoru. Umístění otvoru již musí být v požadované toleranci dané předcházejícím výrobním procesem. Nevhodných materiálů pro obrábění honováním, z běžně používaných materiálů ve strojírenství, není mnoho. Obrábět lze oceli (kalené i nekalené), litinu, bronz, plochy opatřené tvrdým povrchem a podobně. [4,5,6]

Očekávané zlepšení vlastností válcových otvorů se projeví: [5]

- Zlepšení geometrické přesnosti
 - odstranění kuželovitosti, nekruhovitosti, nepřímosti, soudkovitosti, vlnitosti.
- Zlepšení rozměrové přesnosti
 - dosahuje 2 – 5 μm .
- Snížení drsnosti povrchu
 - nejnižší dosažitelná drsnost $R_a = 0,025 \mu\text{m}$,
 - běžně dosažitelná drsnost $R_a = 0,4 \mu\text{m}$.



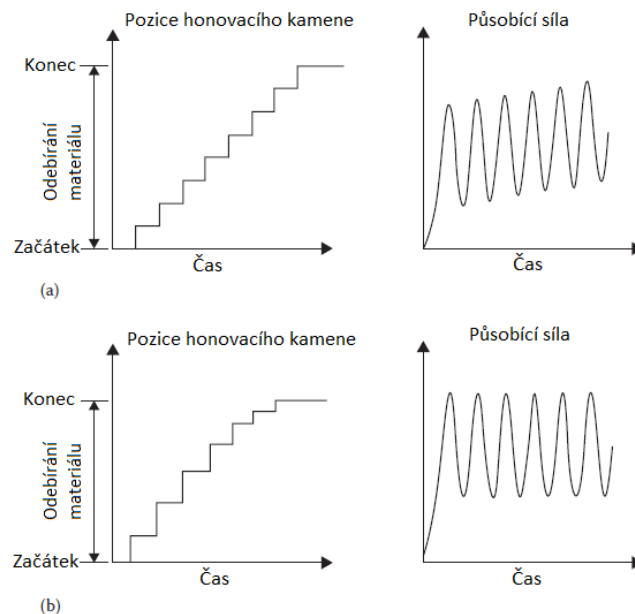
Obrázek 15: Nedokonalosti otvorů [5]

5.1 Řízení procesu honování

Řízení honování v jeho samotném procesu má dvě varianty. První a častěji využívaná varianta zakládá na řízení průběhu honování podle konstantního radiálního posunu brusných kamenů v čase směrem do stěn obrobku. V průběhu opracovávání se postupně zvyšuje síla působící na stěny, a tím se výrazně objevují křížové stopy v povrchu. Strategie se vyznačuje konstantními časy cyklů obrábění a zároveň lze rychlost obrábění během procesu regulovat. [5]

Druhá varianta se řídí podle síly působící honovacími kameny na plochu válce. Velikost síly zůstává konstantní po celou dobu procesu. Rychlost postupu kamenů se během procesu

snižuje. Výhody oproti řízení na základě posuvů se projevují lepšími hodnotami v oblasti zlepšení geometrických tvarů, rozměrů, drsnosti povrchu a dochází k menšímu opotřebení brusných kamenů. Nevýhodné u této varianty může být nemožnost regulovat rychlost procesu při něm samotném. [5]



Obrázek 16: Varianty řízení honování [5]

a) Řízení podle posunu b) Řízení podle síly

Prostorová orientace honovacích zařízení i samotného procesu se odvozuje od velikosti součásti. Pro malé součásti se využívají nejčastěji stroje horizontální. Pro velké předměty se používají stroje vertikální. Dále jsou možné i stroje speciální.

Materiály zrn honovacích kamenů: [7]

- syntetický korund (Al_2O_3), karbid křemíku (SiC),
- syntetický diamant,
- grafit,
- karbid boru, kubický nitrid boru.

5.2 Honování sférických povrchů

Nowicki a kolektiv předvedli netradiční honovací stroj, na kterém probíhá obrábění a dokončování zároveň. Brusný nástroj je plasticky přitlačován na povrch obrobku. Metodou lze dokončovat plochy obrobků různých tvarů i velkých velikostí. [25] Další tým zase

předvedl honování na konkávních a konvexních plochách, kde byl nástroj opět pružně přitlačen. [26] Shiou a kolektiv představili metodu honování na obráběcím centru pro leštění kuliček sférického i volného tvaru. Obrábění probíhalo v částech vstřikovacích forem a došlo k razantnímu zlepšení drsnosti u rovného povrchu o 62,9 % a u různorodých povrchů o 77,8 %. [27, 28] Výroba nástroje na jiné geometrie však může být obtížná. Procesy honování jiných, než válcových ploch zatím nejsou rozšířeny. [21]

6 LAPOVÁNÍ

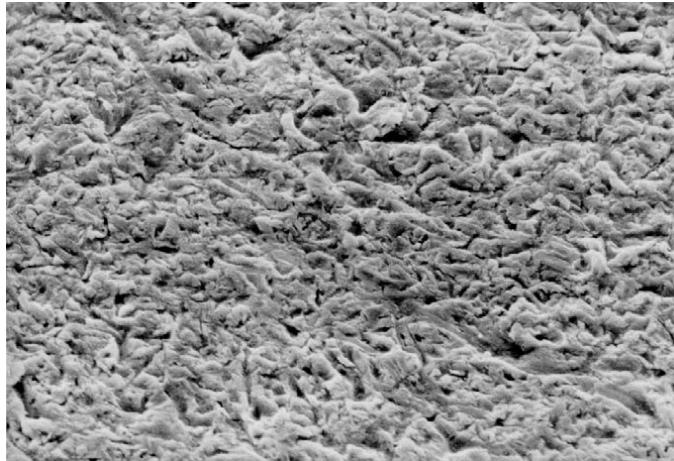
Lapování je dokončovací proces aplikovaný pro zlepšení povrchu, geometrických rozměrů obrobků ploch, a zpřesnění rozměrových tolerancí (méně než 2,5 μm). Obrobek je při procesu vystavován pohybu abrazivních částic s nedefinovanými řeznými hranami volně rozptýlenými v kapalině nebo v pastě (lapovací kaši), umístěných mezi obrobkem a nástrojem. Využití lapování nalézá při dokončování rovinných, válcových a tvarových vnitřních i vnějších ploch. [4, 6, 13, 14]

Lapováním lze dokončovat obrobky plochy kovů, keramiky, skla, mramoru, žuly, drahokamů, plastů, polovodičových materiálů, a dokonce i diamantu.

Hlavní charakteristické výhody procesu lapování spočívají v: [5, 13]

- rychlost úběru je nízká z důvodu malých řezných rychlostí a malé hloubce řezu,
- proces teplotně neovlivňuje obrobky,
- nedochází v obrobku k deformacím, protože nejsou v obrobku od řezu vytvářena napětí,
- při správně nastaveném procesu může být lapováním dosaženo velice přesných rozměrů a nejvyšších požadavků na drsnost povrchu,
- umožňuje dokončovat plochy křehkých materiálů z důvodu nízkého rovnoměrně rozloženého tlaku,
- většinu obrobků lze obrábět bez upnutí, či upevnění,
- doby výměny jsou velmi krátké,
- lze obrábět součástky o tloušťce menší než 0,1 mm,
- v jednom pracovním kroku lze obrábět několik výrobků najednou.

K úběru materiálu dochází odvalováním zrna v kontaktní zóně. Zrna abraziva unášená kapalinou se zabodávají do plochy obrobku. Hloubka zabodnutého zrna v materiálu se pohybuje od 5 % do 10 % velikosti zrna. Velikosti používaných zrn se běžně pohybuje od 5 μm až po 20 μm . V případě tvárných materiálů se zrna opakovaně zabodávají do materiálu až do dosažení jeho únavy a následně dochází k oddělení těchto vystupujících částic. V případě křehkých materiálů se zrna zabodávají a vznikají v povrchu obrobku mikrotrhliny. Vzájemné propojení trhlín vede k odtržení částic. [5, 13]



Obrázek 17: Povrch lapovaného obrobku [5]

Charakteristický vzhled povrchu vzniká od překrývajících se vrubů od zabodnutých zrn. Za normálních podmínek nejsou tyto stopy na ploše obrobku okem viditelné. Pro další snížení drsnosti po lapování je možné využít leštění. [5, 13]

Lapování se rozděluje dle technologického hlediska na hrubovací, jemné a velmi jemné. U hrubovacího dochází k odebrání výstupků a nerovností z povrchu. Využívají se hrubá zrna pro efektivnější úběr a je nutné po hrubování použít jemnější metodu s jemnějšími zrny. U velmi jemného lapování dochází k plastickým deformacím v povrchové vrstvě plochy vystavené abrazivu. [6, 13, 14]

Tabulka 6: Dosažitelné hodnoty povrchů lapováním [4]

Technologické hledisko	Přesnost rozměrů	Tvarová přesnost (μm)	Drsnost povrchu R_a (μm)
Hrubování	IT 4 až IT 6	0,05 – 1	0,1 – 0,4
Jemné	IT 3 až IT 4	0,05 – 0,5	0,05 – 0,1
Velmi jemné	IT 1 až IT 3	0,03 – 0,1	0,005 – 0,05

Tabulka 7: Procesní parametry lapování [14]

Technologické hledisko	Řezné rychlosti (m/min)	Tlak (MPa)
Hrubování	40 – 120	0,1 – 0,2
Jemné	15 – 30	0,05 – 0,1
Velmi jemné	5 – 10	0,01 – 0,1

Dělení způsobu lapování dle pohonu: [4]

- Ruční
 - vykonávání pohybů a vyvolání tlaku probíhá ručně,
 - lapovací kaše se dodává mezi nástroj a obrobek ručně.
- Strojní
 - pohyby vykonává stroj,
 - lapovací kaše se dodává čerpadlem.

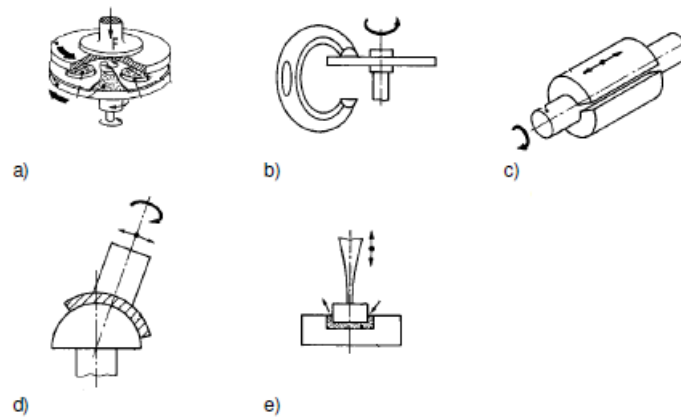
Dělení způsobu lapování dle principu úběru materiálu: [4]

- Mechanické
 - obrábění probíhá pouze zrny abraziva v kaši.
- chemicko-mechanické
 - kapalina v lapovací kaši chemicky rozrušuje tenkou vrstvu povrchu,
 - abrazivní zrna rozrušenou vrstvu odebírají.
- Elektrolytické
 - kombinace mechanického účinku zrn, chemického působení kapaliny na vrstvu povrchu a působení elektrického proudu.

6.1 Metody lapování

Rovinné lapování se využívá pro vytváření kvalitních rovinných povrchů. Obrobky mohou být při procesu volně pohyblivé a vedeny lapovacím kotoučem nebo mohou být umístěny v nosičích, aby se předešlo vzájemnému kontaktu obrobků. Obrobky a lapovací kaše jsou unášeny lapovacím kotoučem. Při dvoudiskovém lapování musí být vloženy minimálně tři obrobky najednou. Výhodou dvoudiskové techniky je obrábění z obou stran. [13]

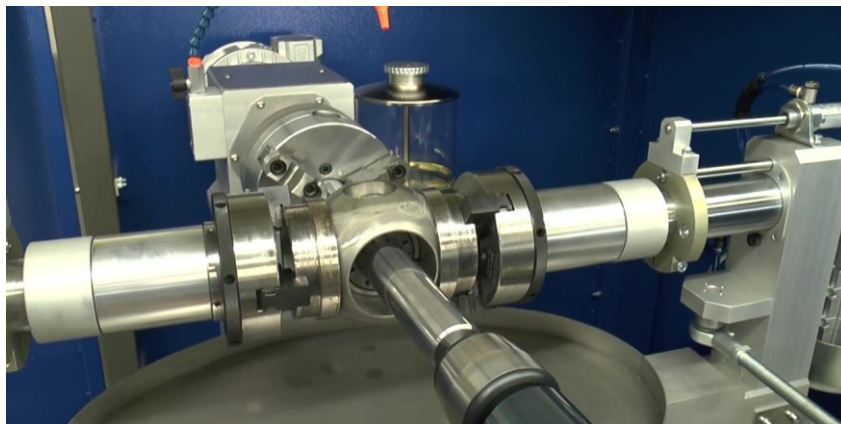
Princip obvodového lapování spočívá ve válcovém tvaru pouzdra, který je rozdělený po délce mezerou. Mezera může být zmenšována nebo zvětšována, čímž dochází k regulaci tlaku a umožnění dosáhnout požadovaných rozměrů. [13]



Obrázek 18: Metody lapování [13]

- a) dvoudiskové rovinné lapování, b) rovinné lapování, c) obvodové lapování,
d) lapování profilu, e) ultrazvukové lapování

Lapování kuliček a sférických profilů je při lapování umožněno. Přizpůsobením tvaru nástroje do negativního tvaru obrobku. Zde je opět cílem dosažení vysoké finální přesnosti díky pohybům, které umožňuje oscilační pohyb stroje. [13]



Obrázek 19: Lapovací zařízení pro kulové ventily [18]

Nejčastěji využívané materiály při lapování: [6, 14]

- Lapování litin, keramiky a skla
 - karbid křemíku (SiC).
- Oceli
 - korund (Al_2O_3).
- Tvrdé materiály (slnuté karbidy, rychlořezné oceli)
 - karbid boru (BC),

- diamant.
- Měkké materiály
 - oxidy železa (Fe_2O_3) a chromu (Cr_2O_3).

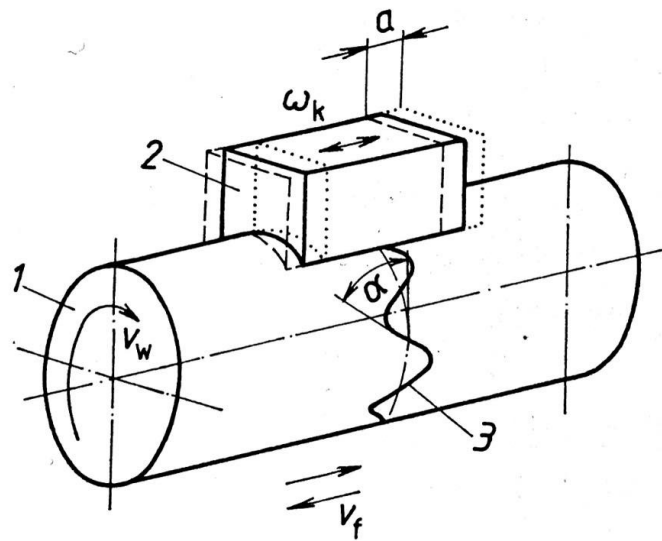
Jako nosné kapaliny se využívají viskózní oleje, kompozitní média vyrobená z oleje, parafínu, ropy a dalších přísad. Volba lapovacího prášku a kapaliny není libovolná. Vzniklá kaše musí mít dobrou mísitelnost bez možnosti následného srážení nebo usazování.

7 SUPERFINIŠOVÁNÍ

Superfinašování lze označit jako zvláštní druh broušení. Metoda umožňuje obrábění válcových, rovinných i tvarových ploch. Obrábět je možné, stejně jako u broušení, litinu, tvrdé oceli, hliník, měď, keramiku a další. Vhodné použití nalézá u obrobků, kde jsou vyžadovány vysoké jakosti obráběných povrchů (valivá ložiska, kluzné plochy vačkových hřídelů, ventily). [4, 6, 14]

Obrábí probíhá jemnozrnými kameny při nízkých řezných rychlostech. Měrné tlaky působící na obrobek jsou velmi nízké. Při obrábění se směr obráběcího pohybu skládá z kmitavého, otáčivého a přímočarého posuvného pohybu. Řezný průběh se dělí na část hrubovací a část leštící. Superfinašovací kámen je na plochu obrobku přitlačován nízkým tlakem 0,1 – 0,4 MPa (hrubování 0,2 – 0,4 MPa, leštění 0,1 – 0,2 MPa). Během procesu se drsnost povrchu snižuje a společně s ní průběžně klesá i tlak působící na plochu. Dochází průběžně k jemnějšímu řeznému procesu. [4, 6, 14]

Jakost povrchu a rychlost obrábění značně závisí na úhlu křížení 2α . Největšího úběru materiálu se dosahuje při velikosti úhlu $\alpha = 40 - 60^\circ$. Při leštění se využívá úhlů $\alpha < 40^\circ$. Superfinašování pod větším úhlem zanechává matný povrch na obrobku. Při menších leštících úhlech se snižuje řezivost a výsledný povrch dostává vysoký lesk. Rychlost otáčení obrobku se nastavuje od 10 do 80 m/min a v poměru s rychlostí posuvu obrobku tvoří tangent úhlu sklonu stopy α . Rychlost posuvu se nastavuje od 2 až 15 m/min. Frekvence kmitavého pohybu se pohybuje mezi 500 až 3000 kmitů/min s amplitudou 0,1 – 10 mm. [6, 14]



Obrázek 20: Schéma kinematiky superfínování [4]

1 – obrobek, 2 – superfínovací kámen, 3 – stopa po zrně brusiva, v_w – rychlost otáčení obrobku, v_f – rychlost podélného posuvu obrobku, ω_k – frekvence kmitavého pohybu, a – amplituda, α – úhel sklonu stopy po jednom zrně

Při dokončovacím procesu se vždy přivádí kapalina do místa obrábění. Kapalina ovlivňuje proces řezání svojí viskozitou. Při hrubovacích operacích se využívají méně viskózní kapaliny (petrolej) pro zlepšení záběru, a naopak u leštících operacích kapaliny s vyšší viskozitou (oleje). Kapalina dále zaručuje dobrou teplotní stabilitu při procesu a dobrý odvod třísek z prostoru obrábění. Používají se směsi petroleje s 10 až 15 % minerálního oleje, petrolej, nebo směsi olejů s aditivy. [4, 6, 14]

Zrnitost brusiva se běžně pohybuje mezi 3 až 6 μm .

Materiály nástrojů: [6, 14]

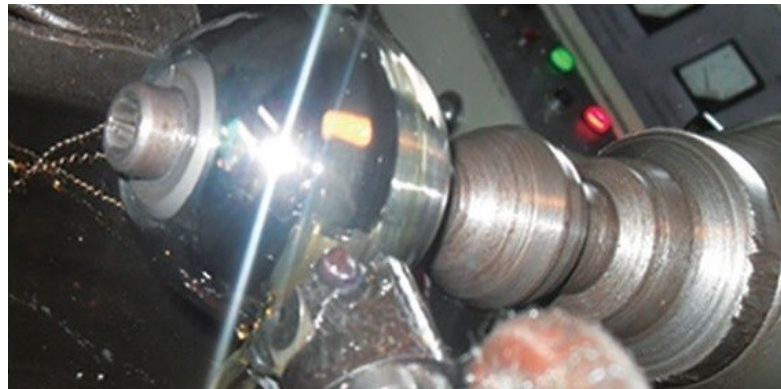
- Litiny, měkké oceli, bronz, hliník
 - korund (Al_2O_3) + keramické pojivo.
- Oceli, temperovaná litina
 - karbid křemíku (SiC) + keramické pojivo.
- Kalené vysokolegované oceli
 - korund + keramické pojivo.
- Slinuté karbidy

- diamant + pryskyřičné pojivo.

Superfinašovací operace mají vysokou efektivitu ve zlepšování drsnosti povrchů ($Ra = 0,025 - 0,15 \mu\text{m}$). Obráběcí procesy jsou velmi rychlé, v řádech desítek sekund. Z důvodu malé odebírané vrstvy materiálu však superfinašování není schopno opravit tvarové nepřesnosti. [4]

7.1 Metody superfinašování sférických povrchů

Dokončování sférických povrchů a zejména kulových tvarů lze provádět i metodou superfinašování. Využívají se speciální superfinašovací frézky. Obrobek se nejdříve opracuje do požadovaného tvaru standardní metodou obrábění a následně se aplikuje superfinašování. Drsnosti po leštění se dostávají pod $Ra 0,1 \mu\text{m}$. [22,23]



Obrázek 21: Sférické superfinašování na stoji Hawking [22]

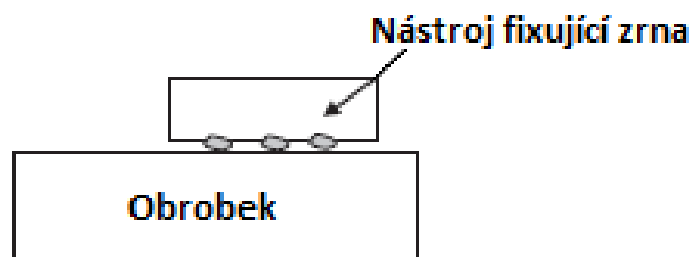


Obrázek 22: Obrobek po superfinašování [22]

8 LEŠTĚNÍ

Při leštění dochází stejně jako u lapování k úběru materiálu volnými zrny a patří do skupiny jemného dokončování. Odebírání probíhá zrny pevně upevněných v nástroji nebo volnými zrny nanesenými mezi nástrojem a obrobkem. Leštění může být prováděno ručně nebo strojově. [4, 7]

Řezný proces na ploše obrobku probíhá třením abraziva. Abrazivum tře o povrch obrobku a téměř se do obráběné plochy nezarává. Tím není způsobována významná hloubka řezu a řezné rychlosti jsou tak zanedbatelné. Řezné síly působících zrn jsou velmi nízké a tím dochází k velmi pomalému odřezávání vystupujících částí na povrchu. Elastická deformace a určitá plastická deformace probíhají na vrcholech nerovností, což se projevuje pomalým vyhlazováním povrchu. Plochy po leštění vykazují jakosti obrobeného povrchu $R_a = 0,01 \mu\text{m}$. Leštění povrchů není schopno opravovat geometrické tvary obráběných ploch. Tření zároveň vyvolává teplo a zrna se postupně opotřebovávají i v případě těch, která při procesu mezi obrobkem a nástrojem doposud nebyla činná. [4, 7, 24]



Obrázek 23: Princip leštění [7]

V případě mechanického leštění povrchu kotouči se přivádí pasta mezi obrobek a kotouč. Kotouče jsou vyráběny z měkkého materiálu, aby nedocházelo jejich účinkem k vrypům, či škrábancům do povrchu obrobku. Vyrábějí se z plsti, skládaných tkanin, bavlny, kůže, gumy, dřeva, korku, papíru, lisované bavlny a měkkých kovů. Proces leštění ovlivňují zvolená leštící pasta, obvodová rychlost kotouče, vyvolávaný tlak kotoučem a materiál kotouče. Obvodové rychlosti se nastavují v rozsahu 20 – 40 m/s. Rychlost se však musí přizpůsobovat podle teploty povrchu obrobku, aby nedocházelo k poškození pojiva v leštící pastě. [4, 7]

V případě leštících kartáčů, prstenců a válců se vyrábí středy z tvrdého materiálu jako kovu, či plastu, do kterých jsou uchyceny dráty z oceli, nylonu, silonu, přírodních vlasů, bavlněné

příze, drátů z bronzu. Obvodové rychlosti kartáčů se nastavují od 10 do 60 m/s a stejně jako u leštění kotouči je potřeba přizpůsobovat rychlost teplotě povrchu obrobku. [4, 7]

Leštěním lze dosahovat až zrcadlových povrchů, a proto se často leštění užívá k dokončování povrchů, které vznášejí jakostní a pohledový požadavek. Největší výhodou leštění je možnost dokončovat povrchy různorodých tvarů. Pro zvýšení rychlosti úběru, nebo pro usnadnění leštění, se používají chemické leštící procesy, elektrolytické leštící procesy, ultrazvukové a další. Kvalitativně se však žádná z alternativních metod nevyrovná mechanickému leštění, které je schopno dosahovat drsnosti R_a až 0,008 μm . Proto se leštění často využívá u dokončování dutin vstřikovacích forem, leštění hliníkových litých kol automobilů a dalších. [4, 7, 24]



Obrázek 24: Leštěná dutina vstřikovací formy [24]

8.1 Materiály past pro leštění

Podle požadovaných rychlostí úběru materiálu při leštění může být požadováno, aby leštící materiály byly tvrdé anebo měkké. Mezi tvrdé materiály se řadí pemza, oxid berylnatý (BeO), oxid chromitý (Cr_2O_3), oxid železitý (Fe_2O_3), granát, korund (Al_2O_3), křemen, karbid křemíku (SiC). Mezi měkké se řadí kaolin, křída, baryt. [4, 7]

K leštění povrchů volnými zrnky se často využívají leštící pasty skládající se ze zrn a média. U pojiv leštících past platí, že čím vyšší je teplota tání či odpařování, tím lepší bude kvalita pasty při procesu. Pro pojiva se využívá parafín, živočišný tuk, vosk, petrolej, kyselina olejová a stearin. Do past se často přidávají povrchově aktivní látky a emulgátory, a to pro zvýšení výkonu leštění a vyšší trvanlivost směsi. Pro zvýšení viskozity se přidávají tixotropní látky. [4, 7]

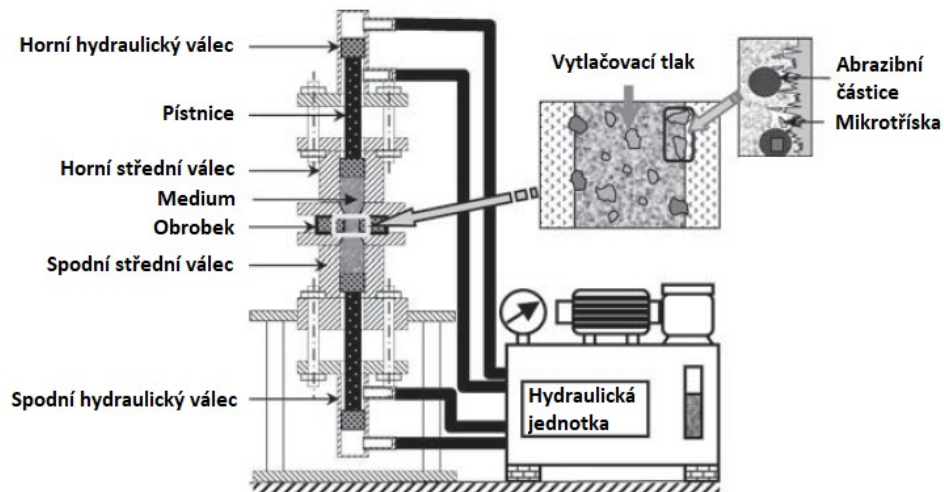
9 POKROČILÉ METODY DOKONČOVÁNÍ

9.1 Abrasive flow finishing

Metoda Abrasive Flow Finishing (AFF) slouží jako univerzální metoda pro různorodé geometrie. Technologie obrábění spočívá v protlačování abrazivního viskoelastického média přes obrobek. Medium působí flexibilně na plochy obrobku jako vícebodový nástroj a obrušuje povrch obrobku. Při protékání obrobkem se částice média chovají pružně a orientují se ve směru tlaku (1 – 20 MPa). Pro obrábění se vždy vyrábí přípravek podle predispozic obrobku. Přípravek upevňuje obrobek, napomáhá řízení průtoku media a zamezuje obrábění v místech, kde není obrábění chtěné. [5, 16]

Konstrukce zařízení pro AFF: [5]

- Jednocestné
 - vytlačovací tlak je vyvoláván pístem v jednom směru,
 - protlačené medium je sbíráno na konci gravitačně, aby se stejné médium mohlo znovu použít pro další kus,
 - využívá se pro dokončování motorových bloků a obrobků s více otvory.
- Dvoucestné
 - dva písty s válci jsou postaveny proti sobě a mezi nimi je upnutý obrobek.
 - tlak je vyvoláván vždy jedním pístem a alternujícím způsobem vyvolávají písty protlačování média přes obrobek,
 - dokončování jednoduchých a složitých součástí do leteckého průmyslu, biomedicíny, automobilového průmyslu.
- Orbitální
 - tlak je vytvářen dvěma písty uloženými na spodní straně, které alternujícím způsobem protlačují médium kolem obrobku,
 - obrobek provádí rovinný oscilační pohyb s malou amplitudou ve filmu protlačovaného média vůči obrobku,
 - používá se k dokončování mincí a raznic.

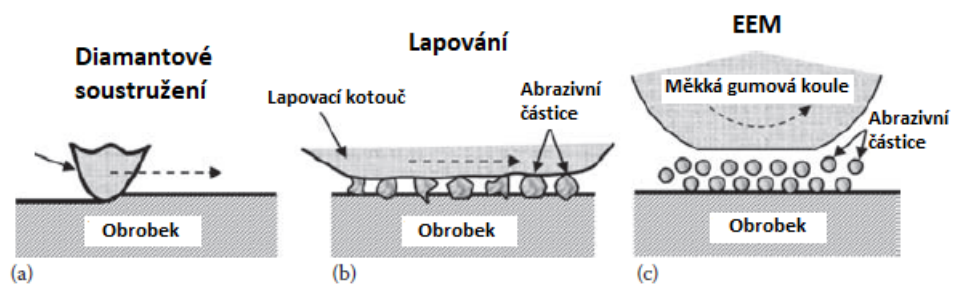


Obrázek 25: Dvoucestné AFF zařízení [16]

Medium se skládá z viskoelastického polymeru, reologických přísad a abrazivních částic. Jelikož má viskoelastický polymer špatné viskózní vlastnosti, přidávají se do směsi plastifikátory a změkčovadla. Média s vyšší viskozitou mají lepší efektivitu v odebrání materiálu. Naopak média s nižší viskozitou mají nižší efektivnost, ale mohou být protlačovány menšími otvory. Protlačováním média s menší viskozitou je možné snáze dosahovat nižších drsností R_a až $0,05 \mu\text{m}$. [5, 16]

9.2 Elastic emission machining

Technologie Elastic Emission Machining (EEM) se využívá zejména pro vytváření ultrahladkých povrchů optických prvků. Použití nalézají u dalekohledů, kamer, čoček do laserových zařízení a dalších. U povrchů optických součástek velice záleží na drsnosti povrchu a jeho tvaru. Nechtěné se stávají zbytková napětí v povrchu, aby nedošlo k nečekanému selhání. Existuje velmi málo technologií s nástroji, které jsou schopny dosáhnout přesnosti obrobených ploch v řádech nanometrů a drsnosti povrchu R_a v hodnotách angstromu ($0,1 \text{ nm}$). Jedna z metod, která je schopna dosahovat jakostních požadavků je právě EEM. [5]



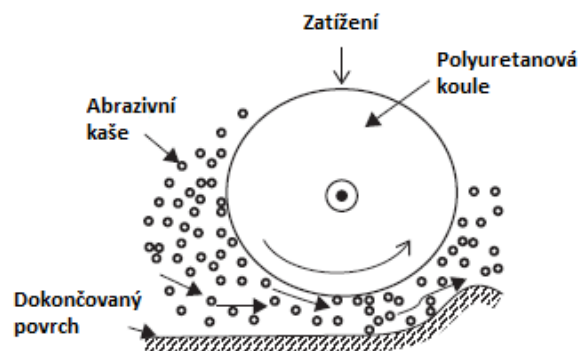
Obrázek 26: Srovnání metod obrábění [5]

a) Diamantové soustružení, b) Lapování, c) EEM

Při obrábění v nanometrových rozměrech se může lehce stát, že se na povrchu vytvoří nepravidelná chyba, která vznikne například chvěním nástroje, vychýlení obrobku, nebo důsledkem vibrací. Při pevně fixovaném nástroji (u diamantového soustružení a broušení) musí být přesně definována trajektorie obráběcího pohybu, ve které jsou již započítány odchylky stroje a obrobku, ke kterým při procesu obrábění dochází. [5]

Výhody technologie EEM:

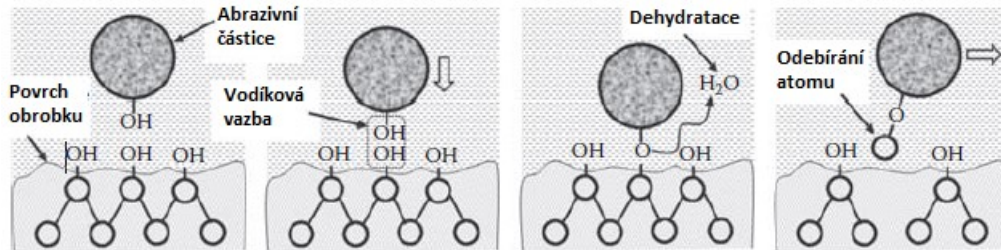
- není vyžadován velmi přesný pohyb,
- průhyb obrobku a vibrace mají velmi malý vliv na výkon procesu



Obrázek 27: Odebírání materiálu technologií EEM [5]

Z benefitů těchto výhod se proces dokončování EEM stává lepší variantou úpravy povrchů. Nástroj ve tvaru koule se vyrábí z polyuretanu kvůli jeho elasticitě a stabilitě vůči vodě a je vyrobena s přesností $0,1 \mu\text{m}$. Brusné částice (ZrO_2 o velikosti $1 \mu\text{m}$) jsou smíchány s deionizovanou vodou. Obrobek je vložen v lázni s částicemi ve vodě a nástroj zařizuje svojí rotací protahování částic po ploše obrobku bez fyzického namáhání částicemi. Při kontaktu částic s povrchem obrobku dochází k odstranění atomu po atomu bez jakékoliv plastické deformace. K odstranění atomu dochází k situaci, kdy naváže atom částice

abraziva vazbu s atomem materiálu obrobku. Silně závisí na vlastnostech materiálu obrobku a zrna podobně jako u chemického leptání. Vybírají se takové částice, které jsou schopné být chemicky aktivní s materiálem obrobku. [5]

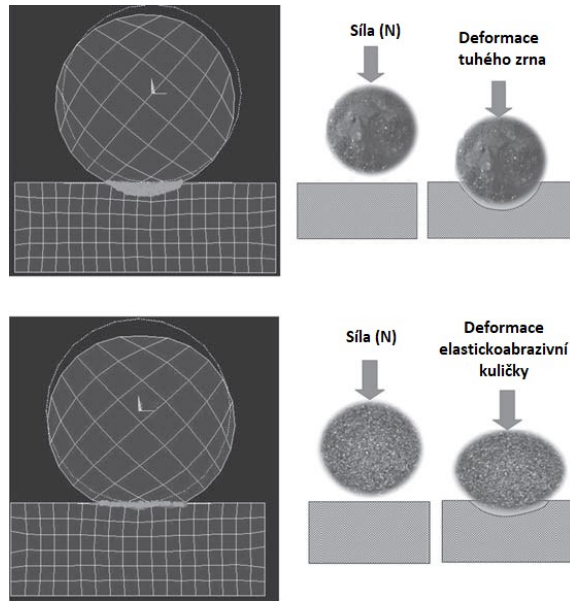


Obrázek 28: Průběh reakce a odebírání atomu [5]

Výkon úběru materiálu je závislý na smykovém napětí, které působí na abrazivní částice. Toto napětí ovlivňuje řada faktorů působících od parametrů procesu (zatížení, rychlost otáčení), parametrů media (viskozita, velikost částic), parametrů nástroje (drsnost povrchu, tvar) a parametrů obrobku (drsnost povrchu a chemické vlastnosti). [5]

9.3 Elastic abrasive finishing

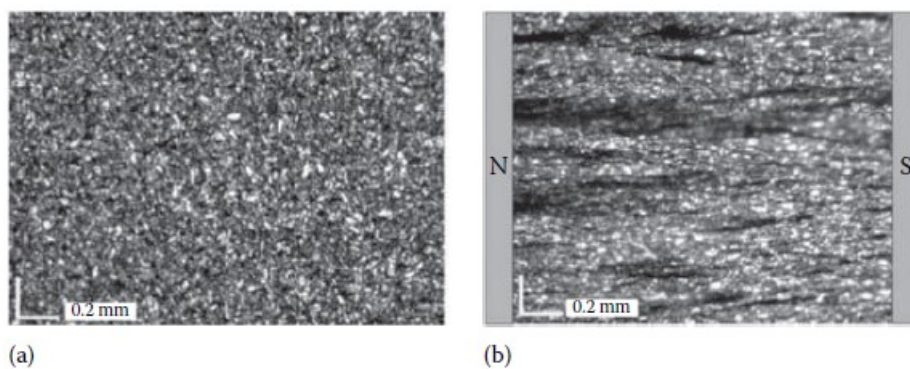
Metoda Elastic Abrasive Finishing (EAF) využívá jako nástroj kuličky vyrobené z elastomeru, ve kterých jsou obsaženy abrazivní zrna. Elastomer umožňuje kuličkám se deformovat s povrchem obrobku a tím nevytvářet napětí v povrchu obrobku při nárazu. Průměr kuliček se pohybuje mezi 3 až 4 milimetry. Zrna v kuličkách jsou vázaná i nevázaná, a tak umožňují procesy spočívající na abrazi i na erozi. Elastické vlastnosti kuliček umožňují dosahovat nanometrových povrchových jakostí povrchu ($R_a = 0,2 \mu\text{m}$) bez změny tvaru plochy obrobku. Do složení kuliček se dále přidává organické rozpouštědlo, aby došlo ještě k většímu změkčení elastomeru. [5]



Obrázek 29: Vliv elasticko-abrazivní kuličky při EAF při dopadu oproti tuhému zrně [5]

9.4 Magnetorheological finishing

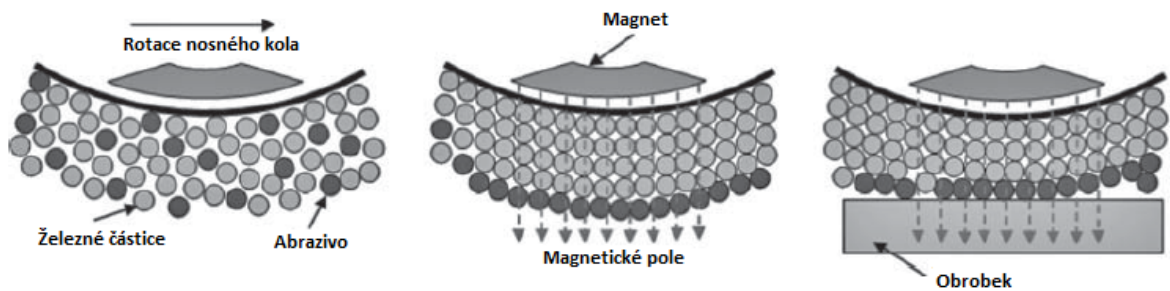
Základem procesu dokončování povrchů technologií MagnetoRheological Finishing (MRF) je magnetoreologická (MR) pasta. Směs se skládá z magnetických mikročástic (železo, elektrolytický prášek, prášek slitiny železa a kobaltu), abrazivních částic (oxid ceru, diamantový prášek, oxid zirkoničitý, oxidu hlinitého a dalších), nosné kapaliny (voda, olej) a aditiv (glycerol, tuk, uhličitan sodný). Magnetoreologická pasta má zásadní vliv na výsledný povrch plochy. Pasta musí být stabilní viskozitou, teplotou a homogenitou. Patří do skupiny ovladatelných materiálů pomocí magnetického pole. V magnetickém poli se vyskládá podél působících magnetických siločar. Regulací síly magnetického pole se jednoduše mění tuhost stavu vrstvy pasty. [5, 16]



Obrázek 30: Rozložení částic magnetoreologické pasty [16]

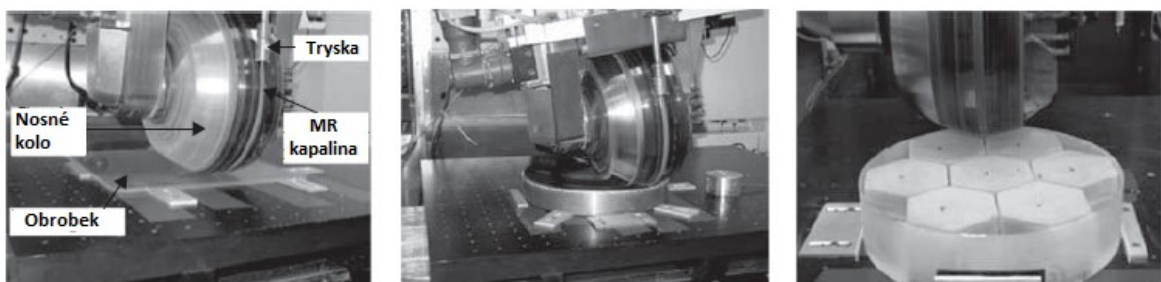
a) Bez magnetického pole, b) S magnetickým polem

Obráběná plocha obrobku se vystaví zmagnetizovanému filmu MR pasty generovanému magnetickým polem na nástroji. Film MR pasty se při obrábění přizpůsobí ploše obrobku, a proto je ideální pro leštění různých typů součástí. Působením malých normálových sil (v řádech mikronevton) se zrna zabodávají do povrchu. Normálové síly jsou o několik řádů níže než síly při běžném leštění. K oddělení částic materiálu následně dochází axiální silou. [5, 16]



Obrázek 31: Schéma odebrání materiálu [16]

Již při nízké koncentraci magnetických částic v pastě se tyto vlivem svého zmagnetizování účinkem aplikovaného magnetického pole shlukují do tenkých řetězovitých struktur. S přibývajícím množstvím magneticky říditelných částic se výsledný film z MR pasty tvoří jako tlustá jednotná vrstva. Pevně sevřené brusivo na povrchu vytvořené vrstvy účinně odebrá materiál (koncentrace pevných částic by neměla překročit 50 % objemu směsi). Pro dosažení vysoké jakosti povrchu je nutné volit rozumný poměr mezi magneticky říditelnými částicemi a abrazivními částicemi konajícími řezný proces. [5, 16]



Obrázek 32: Zařízení MRF [16]

Metoda MRF se využívá u téměř všech úprav keramických materiálů a skel, kdy je možné dosahovat drsnosti $Ra < 1$ nm. Orientace však prozatím zůstává na úzkou skupinu materiálů. Při obrábění kovů dochází k magnetickému ovlivnění samotného obrobku a proces obrábění se značně komplikuje. Technologie MRF využívají další technologie (BEMRF, MRAFF, MFP), které se liší způsobem obrábění, tj. pouze změnou tvaru nástroje, nebo přípravku,

ve kterém je obrobek upevněn. Základní princip založený na vyvolání magnetického pole na MR pastu zůstává totožný. [5, 16, 30]

10 SHRNUÍ TEORETICKÉ ČÁSTI

Přehled technologií v teoretické části pro dokončovací obrábění sférických povrchů ukazuje, že téměř všemi technologickými procesy jde obrábět sféry. Pokud se jedná o technologie, které pro tyto povrchy nejsou zatím silně upevněny ve výrobních závodech, je patrné z publikovaných článků, že existuje velká snaha sestavit efektivní zařízení, u prozatím neprosazených technologií, a tak doplnit či nahradit stávající tradičně využívané metody.

II. PRAKTICKÁ ČÁST

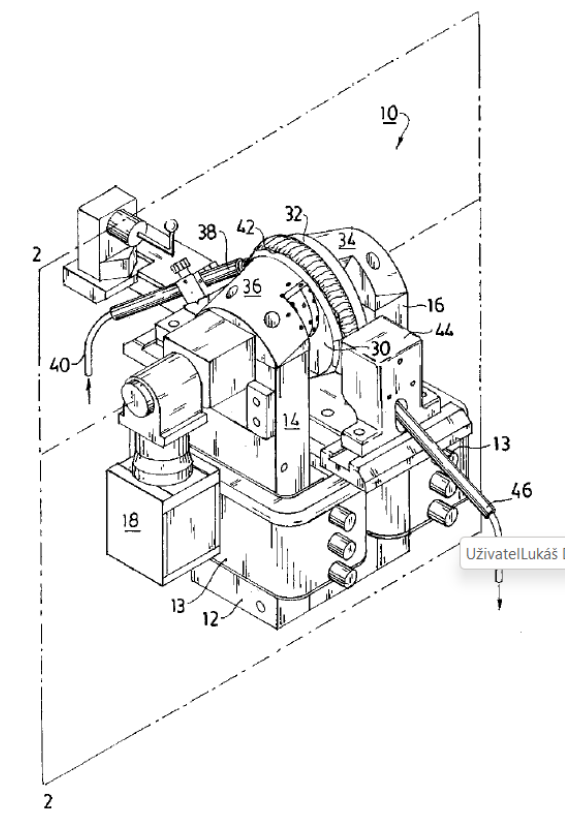
11 CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE

Cílem diplomové práce je návrh magnetoreologického zařízení pro dokončování sférických povrchů, dle zadaných požadavků. Účelem diplomové práce je dosáhnout ekonomicky únosné varianty s následnou aplikací v laboratoři univerzity Tomáše Bati ve Zlíně. Zařízení bude tvořeno ve formě přípravku pro nevyužívanou CNC obráběcí frézku uloženou na univerzitě.

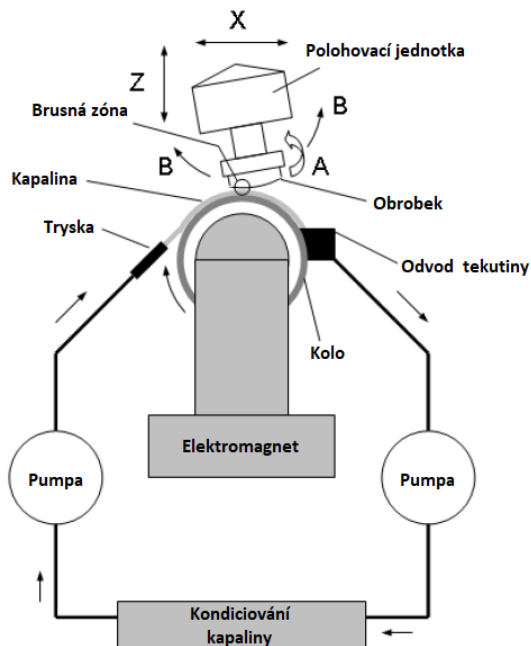
Praktická část se bude zabývat kompletním návrhem magnetoreologického zařízení z hlediska volby materiálu, výrobních technologií, principu zařízení a ekonomické rozvahy.

12 VÝVOJ V OBLASTI MAGNETOREOLOGICKÝCH ZAŘÍZENÍ

V 80. letech vynalezl tým Williama Kordonskiho technologii magnetoreologického dokončování povrchů na Luikovově institutu přenosu tepla a hmoty v běloruském Minsku. Po rozpadu sovětského svazu se studium technologie přesunulo do USA do Centra pro výrobu optiky univerzity Rochester. V roce 1996 členové týmu rozpoznaly potenciál technologie a založily firmu QED Technologies, pod kterou prezentovali první funkční verzi zařízení pro dokončování povrchů pomocí magnetoreologického leštění v roce 1998. Patent na zařízení získali v roce 1999.

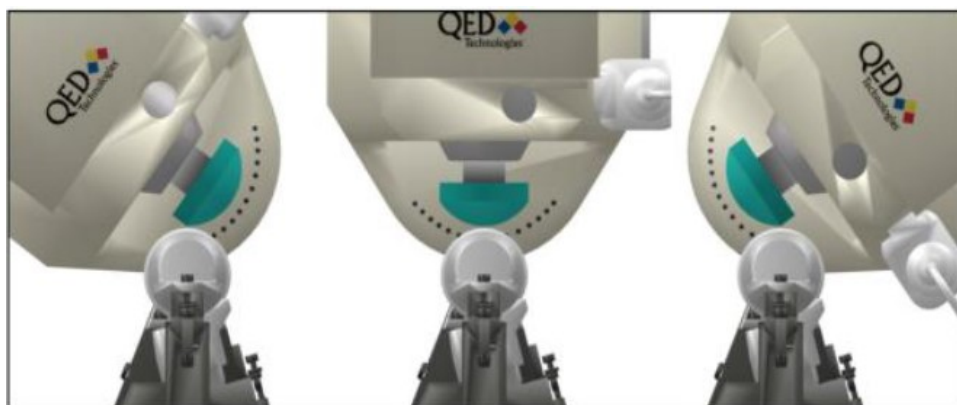


Obrázek 33: Patentované MRF zařízení v roce 1999 [31]



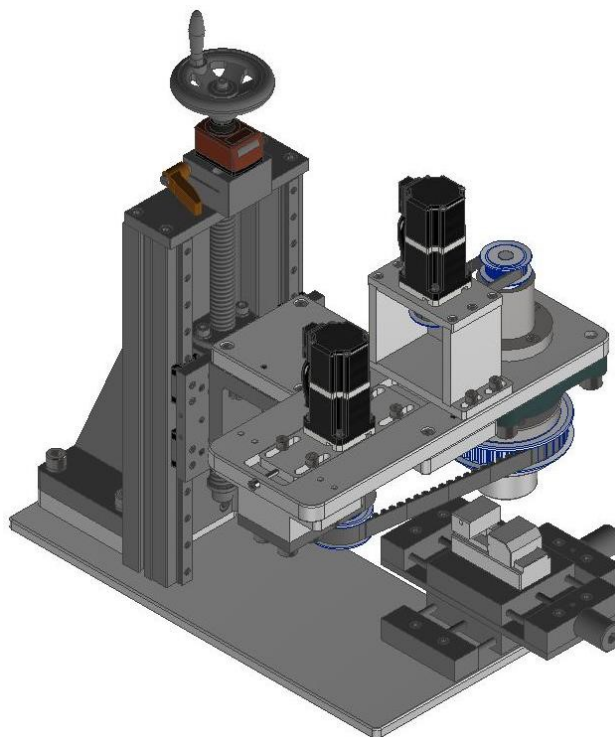
Obrázek 34: Schéma MRF zařízení [29]

Princip zařízení (Obr. 34), na kterém byl již postaven i prototyp z roku 1998, byl postaven na kontinuálním proudu MR pasty dodávané na kolo. Kolo se otáčí a nachází se v magnetickém poli, které vyvolávají dva elektromagnety (každý s jiným pólem). Na kole se tvoří vrstva ovlivněná polem. Do vrstvy se vsouvá za pomoci CNC řízených pohybů obrobek a dochází k obrábění vsunuté plochy. Na vstupní i výstupní straně kola jsou uspořádány výstupy pump, které mají za úkol dodávat a odvádět MR pastu z kola. Výhody technologie spočívají v univerzálnosti a deterministickému průběhu. Při MRF procesech se tato metoda stále těší velké oblibě.



Obrázek 35: Pozicování výrobku na CNC MRF zařízení [32]

V prostorách Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně je již k dispozici zařízení pro magnetoreologické dokončování rovinných povrchů z roku 2018. Zařízení vzniklo z projektu projednávaném v závěrečné práci. [33] Princip zavedeného zařízení spočívá v ovládním MR pasty permanentním magnetem umístěným na hřídeli uvnitř pouzdra. Hřídel i pouzdro mají možnost rotace kolem své osy. Otáčení se řídí za pomoci dvou servomotorů a rychlosti mohou být voleny nezávisle na sobě. Pod zařízením je umístěn svěrák, ke kterému se obráběcí plocha zařízení může přibližovat za pomoci šroubového zvedáku, na kterém je zařízení umístěno. Vrstva MR pasty je u zařízení nanášena ručně před procesem na obrobek. Vlastnosti zařízení jsou limitovány na rovinné dokončování bez možnosti ovládat intenzitu magnetického pole. Uprostřed pouzdra v ose rotace probíhá proces úběru částic pomaleji, než je tomu na okrajích. Rozdíl zapříčiňuje rozdílná rezná rychlost odvozuující se od vzdálenosti od osy rotace.



Obrázek 36: Zařízení na UTB [33]

12.1 Síly při procesu MRF

V roce 2008 provedl tým na univerzitě aplikovaných věd v Deggendorfu měření, při kterém stanovoval síly působící v brusné oblasti při procesu mezi obrobkem a kolem MRF zařízení. [29] Z měření jsou lépe pochopitelné vstupní parametry a jejich vliv na samotný proces.

Byly řešeny závislosti na rychlosti kola, síle magnetického pole, výšce MR pasty, hloubce vniknutí obrobku do MR vrstvy, viskozity MR pasty, nebo složení kapaliny. Lze říci, že se zvyšujícími se parametry rostou i působící síly.

Z měření vychází, že normálové zatížení mezi obrobkem a nástroje se pohybuje do 20 N a ke správnému průběhu přispívá mezera o minimální velikosti 0,4 mm.

Výsledky měření budou brány v potaz při zde řešeném návrhu zařízení.

13 KONSTRUKCE ZAŘÍZENÍ

V potaz bylo při návrhu zařízení bráno mnoho aspektů. Primárním parametrem se při návrhu stala ekonomická náročnost na výrobu zařízení. Aby došlo k co nejlepšímu zhodnocení vložených prostředků, bylo rozhodnuto, že bude zařízení vytvořeno v propojení s nevyužívanou CNC frézku. Frézka zajistí pohyby ve třech osách (X, Y, Z) s dostatečnou přesností. Zprvu bylo uvažováno, že bude MRF zařízení upevněno stejně jako se upínají nástroje (frézy). Z důvodu komplikovanosti bylo od tohoto návrhu upuštěno. Nový návrh počítá s upnutím obrobku na straně obvyklého upnutí nástroje (vřeteno frézky) a upnutí MRF zařízení na straně běžného upnutí obrobku (stůl). Tím bylo možno docílit zkonstruování zařízení a minimalizaci nákladů na pohony pohybů stroje.



Obrázek 37: Frézka FC 16 CNC [34]

Parametry CNC frézky:

- Délka pracovního pohybu
 - osa X = 300 mm,
 - osa Y = 160 mm,
 - osa Z = 250 mm.
- Rychlost posuvu 4 až 3000 mm/min
- Přesnost polohování 0,005 mm
- Otáčky vřetene 100 až 3000 ot/min

- Nosnost stolu 50 kg

13.1 Technologie výroby a materiály

Technologie výroby a samotná volba materiálů hrála v ekonomické výhodnosti značnou roli. Pro snížení předpokládaných nákladů bylo využíváno běžně dostupných materiálů s využitím výrobních kapacit strojního vybavení Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně. Univerzita disponuje běžnými obráběcími stroji a 3D tiskárnami. Jelikož zařízení potřebuje využívat nestandardně tvarové součástky, byla značná část navrhována způsobem, aby bylo možno vyrobit díly 3D tiskem, běžnou obráběcí metodou, nebo bylo možné součástku jednoduše sehnat na trhu. Výhodou dílů tisknutých 3D aditivní technologií z polymerních filamentů bude jednoduchá výroba a v případě potřeby výměny dílů dobrá dostupnost náhrady pro poškozené, nebo opotřebené součásti.

Materiály návrhu zařízení spadají do základních kategorií jako ocel, korozivzdorná ocel, hliníkové slitiny, měď, mosaz a plasty. Výběr materiálů zohledňuje mechanické vlastnosti, chemické odolnosti a hustotu z důvodu celkové váhy přípravku a manipulace s ním.

Pro hřídel byl zvolen materiál 1.0060 běžně využívaný pro výrobu podobných součástí. Zatížení mezi obrobkem bude velice malé (v řádech nižších desítek Newtonu). Není tedy třeba využívat odolnějších materiálů.

Uložení ložisek a základní deska pod zařízením budou vyrobeny ze slitiny hliníku EN AW 6063. Slitina odolává solím a má vysokou chemickou odolnost proti korozi. Projevuje se dále velmi dobrou obrobiteľností a pro pohledové úpravy obrobených povrchů je možné aplikovat eloxování.

Korozivzdorná ocel 1.4021 bude využita v brusné části zařízení. Magnetoreologická pasta se skládá z abrazivních částic, železných částic a kapaliny. Jako kapalina je často využívána voda. Pro zvýšení ochrany proti korozi a rozumné odolnosti proti opotřebení zrnky byla vyhodnocena korozivzdorná ocel jako vhodná. Její vlastnosti mohou být dále vylepšeny kalením.

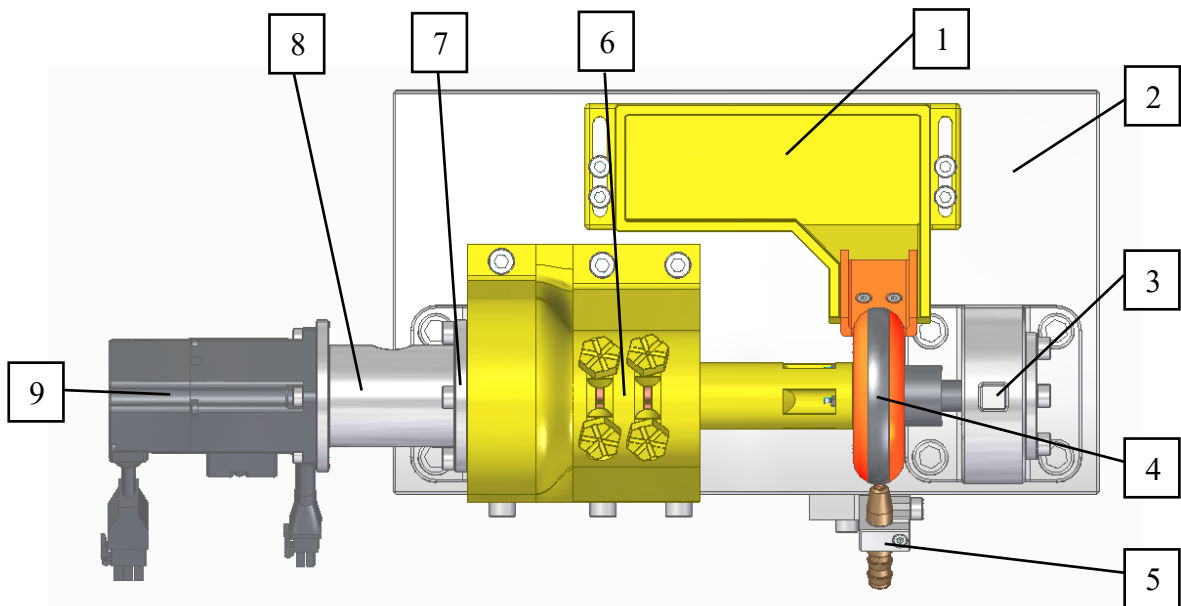
Zařízení obsahuje dva druhy plastových materiálů. Součásti nevystavované abrazivním částicím bez mechanického namáhání, které jsou zároveň v kontaktu s elektrickým systémem, budou vyráběny z filamentu Smartfil Pantone 1205 C. Jedná se o akrylonitrilbutadienstyren (ABS) obsahující v sobě samozhášivé částice. Materiál je testovaný metodou UL94 a splňuje stupeň nehořlavosti V-1.

Součásti vystavované mechanickému namáhání a oděru budou vyrobeny z filamentu PolyMide PA6-GF. Jedná se o materiál polyamid 6 (PA 6), který v sobě obsahuje skelná vlákna (GF). Vlákna zlepšují mechanické vlastnosti materiálu a jsou vhodné pro využití u namáhaných složitých tvarů nástroje zařízení.

Měď (2.0060) se využívá u součástí, které přenáší elektrickou energii. Mosaz (MS 58) se využívá pro trysku přívodu MR pasty.

13.2 Konstrukční návrh MRF zařízení

Celé zařízení, v podobě přípravku pro CNC frézku, je umístěno na základní desce o rozměrech 160 mm × 280 mm. Deska propojuje veškeré části v jeden celek za pomoci upevnění šroubovými spoji. Zároveň slouží k upnutí zařízení na stůl frézky. K upnutí je možno použít upínací prostředky, nebo vytvořit do základní desky otvory a upevnit desku šrouby. Výška kolečka unášející kapalinu dosahuje 135 mm od stolu zařízení.



Obrázek 38: Sestava MRF zařízení – pohled rozmístění

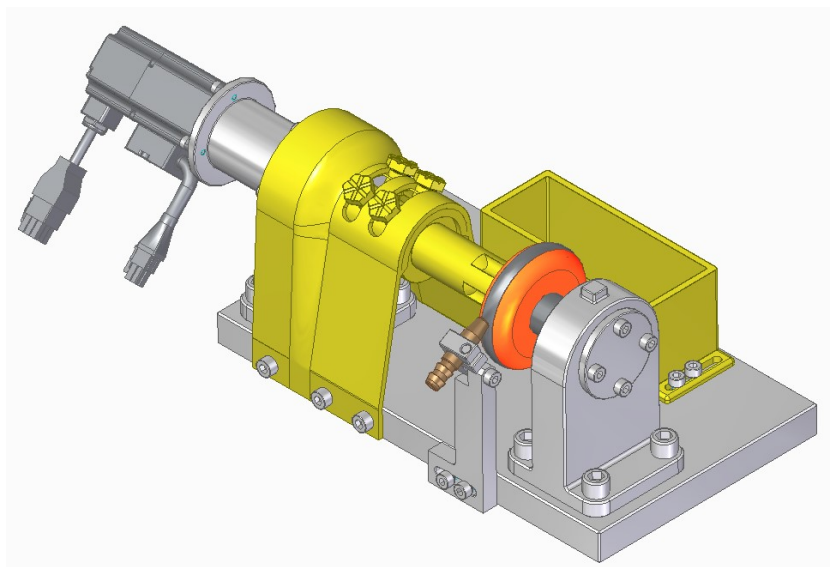
1 – nádoba sběru MR pasty se sběrným plíškem, 2 – základní deska, 3 – uložení zadní s odměřovacím bodem, 4 – sestava kolečka s elektromagnetem a hřídele, 5 – tryska pro přívod MR pasty v držáku, 6 – kryt s upevněním pinů pro přenos elektřiny, 7 – uložení strany motoru, 8 – příruba motoru a uložení s pružnou spojkou, 9 – servomotor

Princip zařízení spočívá v přísunu MR pasty na otáčející kolečko, které je poháněno servomotorem. V kolečku jsou uloženy cívky, které vyvolávají magnetické pole a ovlivňují nanesenou vrstvu pasty. Kolečko dopravuje svojí rotací ztuženou vrstvu MR pasty na obrobek. Obrobek je upnutý ve sklíčidle vřetena frézky. Po kontaktu s obrobkem se odvádí

kapalina do sběrné nádoby se sběračem. Z nádoby je kapalina opět čerpána a dodávána znovu do procesu. Aby docházelo ke sběru z kolečka bez působení větších magnetických sil, jsou umístěny v kolečku čtyři cívky, které jsou průběžně podle aktuální polohy sepnuté, či rozepnuté. O rozpojování se stará mechanicky rozpojovaný kontakt mezi hřídelí a upevněnými piny v krytu. Najednou mohou být sepnuty pouze dvě cívky zároveň, tedy polovina kolečka.

Rotační pohyb koná při procesu kolečko i vřeteno s obrobkem. Kolečko se během procesu otáčí stejnou nastavenou rychlostí. Otáčky vřetene jsou regulovány podle nahraného výrobního programu. Otáčky vřetene je nutno regulovat, aby docházelo ke kompenzaci rozdílu řezných rychlostí podle vzdálenosti (poloměru) od osy rotace vřetene frézky. Při jednotných otáčkách, pro všechny pozice obrábění na obrobku, by jinak nebyl dodržován deterministický model dokončovacího procesu. Na zadním uložení je vytvořen výstupek ve tvaru hranolku, který má sloužit jako bod, od kterého bude na frézce nastavován nulový bod souřadnicového systému zařízení.

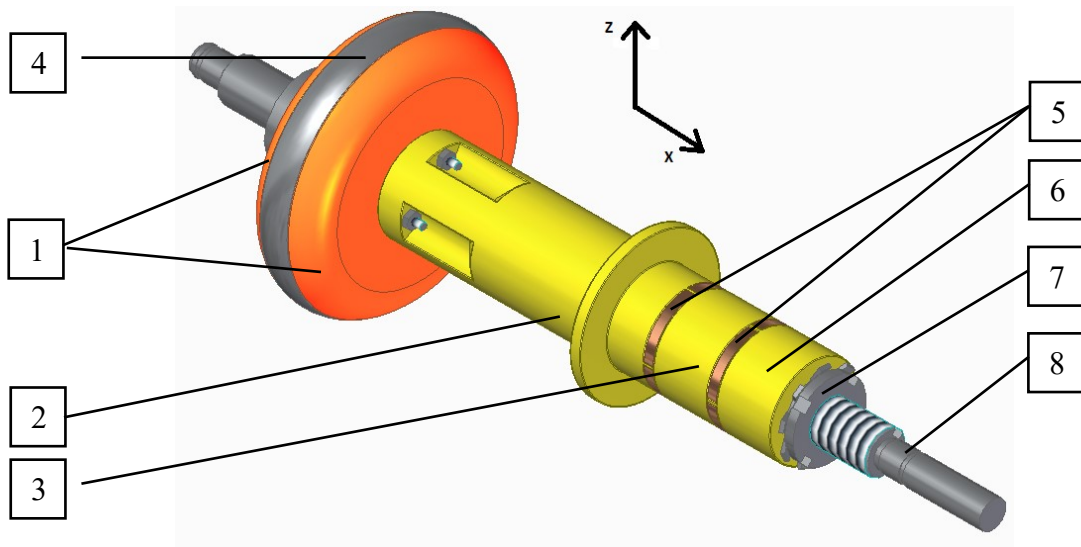
Konstrukce zařízení by měla umožňovat dokončování povrchů obrobků do průměru 60 mm. Maximální průměr obrobku je závislí na vzdálenosti mezi kolečkem a krytem zařízení. Pro větší průměry není zařízení doporučováno. Velikost zařízení limitují parametry CNC frézky, které již neumožňují rozměrnější konstrukci.



Obrázek 39: Sestava MRF zařízení

13.2.1 Sestava hřídele a kolečka

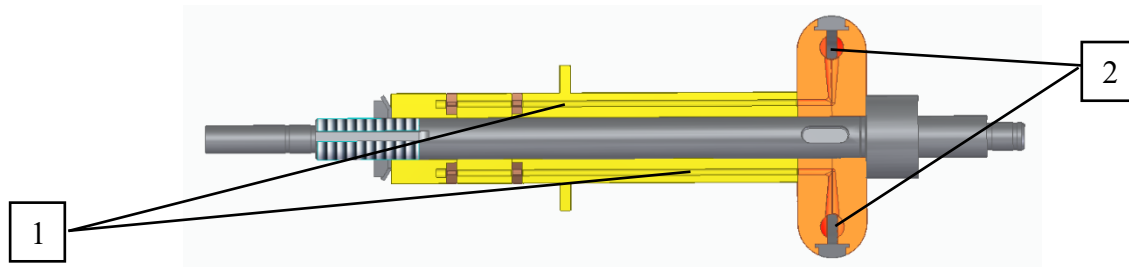
Sestava hřídele a kolečka je základem celého zařízení. Díly se skládají z více druhů materiálů a kompletně řeší přenos rotačního pohybu, vytváří magnetické pole a přenáší elektrickou energii k cívkám. Šířka kolečka dosahuje pouhých 20 mm s rádiusem 10 mm o průměru kolečka 70 mm. Malé rozměry kolečka mají snahu kompenzovat nemožnost frézky natáčení os. S malým rádiusem kolečka si je zařízení schopno vystačit s lineárními pohyby a postupným poklesem v ose Z a posuvem v ose X obrábět i sférické povrchy.



Obrázek 40: Sestava hřídele a kolečka

1 – levá a pravá strana kolečka, 2 – první část tubusu kabeláže, 3 – druhá část tubusu kabeláže, 4 – kroužek kolečka, 5 – měděné destičky, 6 – třetí část tubusu kabeláže, 7 – pojistná matice s podložkou, 8 – hřídel

Samotné kolečko se skládá ze tří částí. Z levé strany, z pravé strany a z kroužku. Kroužek je umístěn na vrcholu kolečka. Přímo on bude v kontaktu s MR pastou, popřípadě obrobkem. Materiál na jeho výrobu je stanovena korozivzdorná ocel. Kroužek svírá pravá a levá strana kolečka v drážce. Jelikož by mohlo docházet u stran kolečka ke kontaktu s MR pastou, stanoven byl plast PA 6 GF. Plněný polyamid dále zaručí menší deformace od sil působících od obrobku.



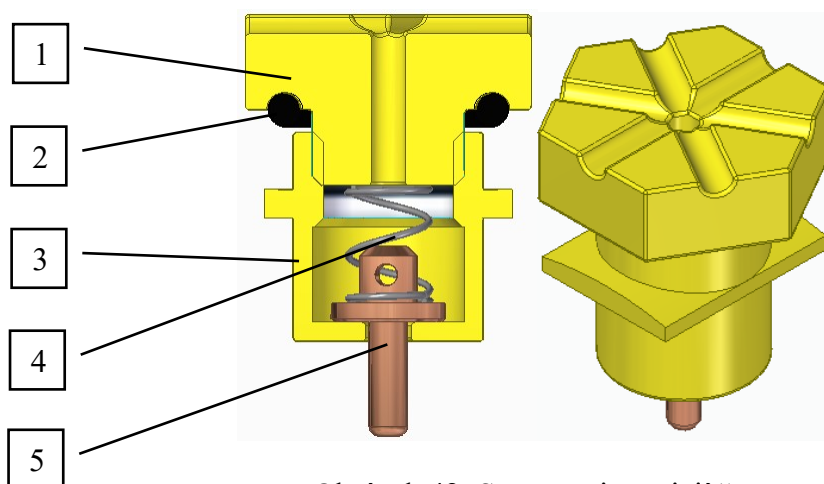
Obrázek 41: Řez se zobrazením kanálů pro vodiče a cívk

1 – kanály pro vodiče cívek, 2 – otvory pro cívk

Pod kroužkem budou umístěny cívk v otvorech uvnitř kolečka. Vodiče pro napájení cívek budou vedeny tubusy k měděným destičkám, kde bude docházet k přenosu elektrické energie. Kanály vedou až k měděným destičkám, kde budou na destičky připájeny. Tubusy oddělují destičky po obvodu na 4 části po 90° a izolují je od přenosu elektrické energie mezi sebou. Jelikož jsou tubusy v oblasti přenosu elektrické energie, budou vyráběny z materiálu ABS se zhášedlem pro snížení rizika vzniku požáru. Na prvním tubusu je zároveň vytvořen výstupek, který má za úkol sloužit jako bariéra, pokud by docházelo k stékání MR pasty po tubusu směrem k měděným destičkám. Celou sestavu hřídele k sobě upevňuje pojistná matice.

13.2.2 Sestava pinu

Sestava pinu zajišťuje přenos elektrické energie směrem k cívkám. Uvnitř válce je vložen pin přitlačovaný pružinou. Zajištění přitlačení pružiny na pin zajišťuje šroub s o-kroužkem a průchozí dírou, kterou bude vést vodič. Je předpokládáno, že bude vodič stejně jako v předchozích příkladech připájen na pin.



Obrázek 42: Sestava pinu a její řez

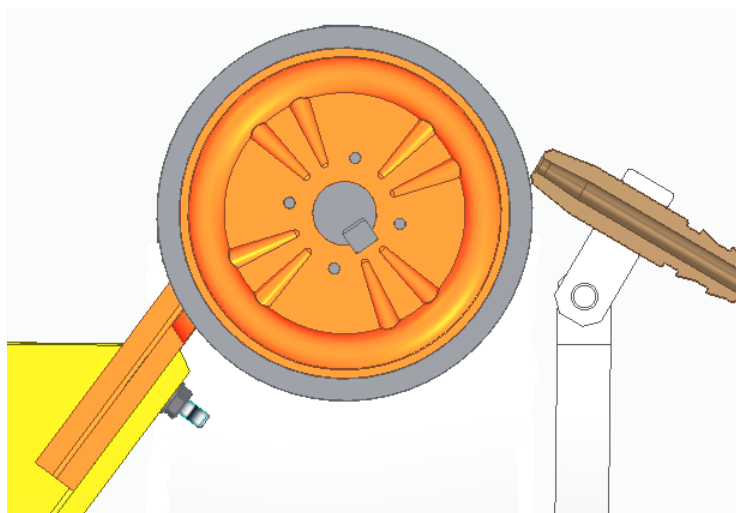
1 – šroub pinu, 2 – o-kroužek, 3 – válec pinu, 4 – pružina, 5 – pin

Pružný pohyb pinu mu umožní přizpůsobovat se v malých mírách povrchu destiček a tubusů.

13.2.3 Dodávání a sběr pasty

Dodávání kapaliny je zamýšleno v návrhu přes trysku z mosazi umístěnou v držáku umožňujícím nastavení úhlu přívodu pasty. Tryska je držena ve svěrném spoji, který umožňuje trysku před sevřením nastavit do vhodné vzdálenosti.

Sběr MR pasty je v návrhu zařízení uvažován v mechanické podobě. Jelikož budou cívky průběžně rozpojovány, neměly by být na kolečku částice udržovány větší magnetickou silou. Sběrač MR pasty je navržen z PA 6 GF, aby vydržel vystavení abrazivu po delší dobu. V případě, kdy by nedocházelo k dostatečnému sběru pasty, může být vyměněn za materiál z pryže. Připevněn je v nádobě pro sběr pasty pouze dvěma šrouby a je zamýšleno, že při opotřebení bude vyměňován za jiný. Celá nádoba i se sběračem může být posouvána směrem ke kolečku, aby bylo možno nastavit správnou vzdálenost mezi kolečkem a sběračem. Sbíraná pasta v nádobce bude opět čerpána čerpadlem do oběhu. Mechanický sběr MR pasty snižuje náklady na pořízení zařízení, které by jinak potřebovalo pro svůj provoz druhou pumpu, která by se starala o sběr MR pasty.



Obrázek 43: Řez systému dodávání MR pasty

14 KONSTRUKČNÍ VÝPOČTY

14.1 Výpočet pohonu

Aby mohl být proces obrábění co nejlépe řízen, je v návrhu uvažován servomotor. Výkon motoru bude stanoven podle potřebné energie pro pohon zařízení.

Základní vztahy pro výpočet potřebného výkonu:

$$P = \frac{A}{t} \quad (7)$$

Kde: P – výkon [W]

A – práce [J]

t – čas [s]

$$A = \Delta W \quad (8)$$

$$\Delta W = W_k - W_p \quad (9)$$

Kde: ΔW – rozdíl kinetické a potenciální energie [J]

W_k – kinetická energie [J]

W_p – potenciální energie [J]

$$W_k = \frac{1}{2} J \omega^2 \quad (10)$$

$$\omega = 2 \pi f \quad (11)$$

$$f = \frac{n}{60} \quad (12)$$

Kde: J – moment setrvačnosti [kg/m²]

ω – úhlová rychlost [rad/s]

f – frekvence [Hz]

n – otáčky za minutu [ot/min]

Moment setrvačnosti lze vyjádřit:

$$J = \int r^2 dm \quad (13)$$

Mezi hmotností a obsahem kruhového průřezu s mezikružím je úměra:

$$\frac{dm}{m} = \frac{dS}{S} \quad (14)$$

$$\frac{dm}{m} = \frac{2 \pi r dr}{\pi (R_2^2 - R_1^2)} \quad (15)$$

$$dm = \frac{m}{(R_2^2 - R_1^2)} r dr \quad (16)$$

Kde: m – hmotnost [kg]

r – poloměr [m]

R_1 – vnitřní poloměr kruhového průřezu [m]

R_2 – větší poloměr kruhového průřezu [m]

S – obsah průřezu [m²]

Po dosazení do vztahu momentu setrvačnosti:

$$J = 2 \frac{m}{(R_2^2 - R_1^2)} \int_{R_1}^{R_2} r^3 dr \quad (17)$$

$$J = \frac{1}{2} m (R_2^2 + R_1^2) \quad (18)$$

Výpočet hmotnosti rotační součásti s mezikružím:

$$m = \rho V \quad (19)$$

$$V = \pi (R_2^2 - R_1^2) s \quad (20)$$

$$m = \rho \pi (R_2^2 - R_1^2) s \quad (21)$$

Kde: ρ – hustota materiálu [kg/m^3]

V – objem tělesa [m^3]

s – tloušťka válce [m]

14.1.1 Výpočet hmotností

$$m_{\text{spojka}} = 2800 \pi (0,0125^2 - 0,004^2) 0,034 = 0,042 \text{ kg}$$

$$m_{\text{hřídel}} = 7850 \pi 0,006^2 0,238 = 0,211 \text{ kg}$$

$$m_{\text{p.matice}} = 7850 \pi (0,011^2 - 0,006^2) 0,004 = 0,01 \text{ kg}$$

$$m_{\text{tubus 1}} = 1170 \pi (0,013^2 - 0,006^2) 0,08 = 0,04 \text{ kg}$$

$$m_{\text{tubus 2,3}} = 1170 \pi (0,013^2 - 0,006^2) 0,016 = 0,008 \text{ kg}$$

$$m_{\text{plíšky}} = 8960 \pi (0,013^2 - 0,007^2) 0,003 = 0,01 \text{ kg}$$

$$m_{\text{kolečko}} = 1350 \pi (0,035^2 - 0,006^2) 0,02 = 0,1 \text{ kg}$$

$$m_{\text{kroužek}} = 8000 \pi (0,035^2 - 0,03^2) 0,01 = 0,08 \text{ kg}$$

14.1.2 Výpočet momentu setrvačnosti

$$J_{\text{spojka}} = \frac{1}{2} 0,042 (0,0125^2 + 0,004^2) = 3,6 \cdot 10^{-6} \text{ kg}/\text{m}^2$$

$$J_{\text{hřídél}} = \frac{1}{2} 0,211 0,006^2 = 3,8 10^{-6} \text{ kg/m}^2$$

$$J_{\text{p.matice}} = \frac{1}{2} 0,01 (0,011^2 + 0,006^2) = 0,785 10^{-6} \text{ kg/m}^2$$

$$J_{\text{tubus 1}} = \frac{1}{2} 0,04 (0,013^2 + 0,006^2) = 4,1 10^{-6} \text{ kg/m}^2$$

$$J_{\text{tubus 2,3}} = \frac{1}{2} 0,008 (0,013^2 + 0,006^2) = 0,82 10^{-6} \text{ kg/m}^2$$

$$J_{\text{plíšky}} = \frac{1}{2} 0,01 (0,013^2 + 0,007^2) = 1,1 10^{-6} \text{ kg/m}^2$$

$$J_{\text{kolečko}} = \frac{1}{2} 0,1 (0,035^2 + 0,006^2) = 63 10^{-6} \text{ kg/m}^2$$

$$J_{\text{kroužek}} = \frac{1}{2} 0,08 (0,035^2 + 0,03^2) = 85 10^{-6} \text{ kg/m}^2$$

Momenty setrvačnosti $J_{\text{plíšky}}$ a $J_{\text{tubus 2,3}}$ se budou v součtu momentů setrvačnosti počítat dvakrát, kvůli jejich dvojímu výskytu v sestavě.

$$J = J_{\text{spojka}} + J_{\text{hřídél}} + J_{\text{p.matice}} + J_{\text{tubus 1}} + 2 J_{\text{tubus 2,3}} + 2 J_{\text{plíšky}} \\ + J_{\text{kolečko}} + J_{\text{kroužek}} = 164,1 10^{-6} \text{ kg/m}^2$$

14.1.3 Výpočet potřebného výkonu

$$f = \frac{1000}{60} = 16,66 \text{ Hz}$$

$$W_k = \frac{1}{2} 164 10^{-6} (2 \pi 16,66)^2 = 0,9 \text{ J}$$

$$P = \frac{0,9}{1} = 0,9 \text{ W}$$

Pro pohon zařízení byl zvolen servomotor Lexium 28 BCH2MBA530CA5C od výrobce Schneider. Jedná se o servomotor bez motorové brzdy s hladkou hřídelí o udávaném výkonu 50 W.

14.2 Výpočet ložisek

Pro uložení hřídele byly zvoleny ložiska 628-2RS1. Jedná se o jednořadá kuličková radiální ložiska utěsněná z obou stran. Síly působící na hřídel budou velice malé. Přesto bude pro nepochybnost správné volby proveden výpočet trvanlivosti ložisek obou uložení v hodinách. Síla působící od brusné části zařízení bude uvažována ve velikosti $F_1 = 20$ N. Jedná se o sílu, kterou lze předpokládat dle výsledků měření. [29] Sílu na hřídel budou působit i piny, které budou přitlačovány pružinou. Tuhost pružin C0180012050M je udávána na $R = 0,63$ N/mm. Předpokládané stlačení jedné pružiny je $s = 2$ mm. Základní dynamická únosnost pro ložisko je $C = 3900$ N. Stanovení rychlosti otáček bude odvozeno od maximální řezné rychlosti při procesu (3,2 m/s) v situaci, kdy by veškerý řezný pohyb provádělo pouze kolečko. Otáčky kolečka odpovídající této rychlosti se rovnají přibližně 1000 ot/min.

Výpočet síly působící od pružin:

$$F_p = R s_p \quad (22)$$

$$F_p = 0,63 \cdot 2 = 1,26 \text{ N}$$

$$F_2 = 1,26 \cdot 4 = 5,04 \text{ N}$$

Kde: F_p – síla konaná stlačením pružiny [N]

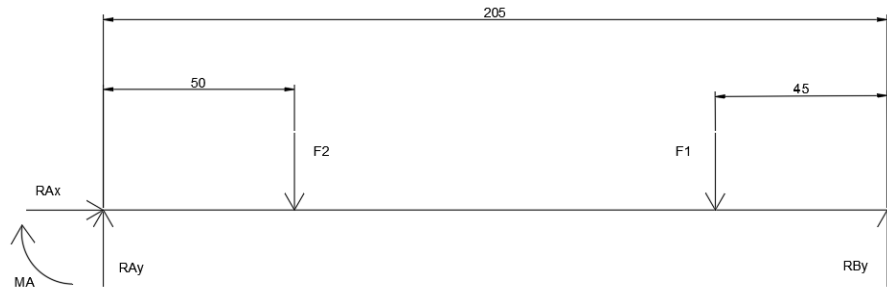
F_2 – síla působící od čtyřech pružin [N]

R – tuhost pružiny [N/mm]

s_p – zdvih pružiny [mm]

Jedná se o staticky určitou úlohu rovinného nosníku (hřídele).

Nosník po uvolnění vazeb s náhradou reakcemi:



Obrázek 44: Uvolněný nosník

Statické rovnice rovnováhy:

$$\sum F_x = 0 \quad (23)$$

$$\sum F_y = 0 \quad (24)$$

$$\sum M = 0 \quad (25)$$

Kde: F_x – síly působící v ose x [N]

F_y – síly působící v ose y [N]

M – ohybový moment [Nmm]

Stanovení reakčních sil z rovnic rovnováhy:

$$R_{Ax} = 0$$

$$R_{Ay} + R_{By} - F_2 - F_1 = 0$$

$$F_2 \cdot 50 + F_1 \cdot 160 - R_{By} \cdot 205 = 0$$

$$R_{By} = \frac{5,04 \cdot 50 + 20 \cdot 160}{205} = 16,84 \text{ N}$$

$$R_{Ay} = F_2 + F_1 - R_{By} = 8,2 \text{ N}$$

Kde: R_{Ax} – reakce v ose X v bodě A [N]

R_{Ay} – reakce v ose Y v bodě A [N]

R_{By} – reakce v ose Y v bodě B [N]

F_2 – síla působící od pružin [N]

F_1 – síla působící od brusné části [N]

Životnost ložiska v hodinách je dána vztahem:

$$L_{10h} = \left(\frac{C}{P}\right)^p \frac{10^6}{60 n} \quad (26)$$

Kde: L_{10h} – základní trvanlivost [h]

C – základní dynamická únosnost [N]

P – dynamické zatížení ložiska [N]

p – mocnitél (pro kuličková ložiska =3)

n – počet otáček [ot/min]

Zatížení ložisek je uvažováno v řešeném případě pouze v radiálním směru. V axiálním směru budou síly mnohem menší než radiální. Proto bude jako dynamické zatížení uvažováno pouze reakční zatížení v radiálním směru.

Stanovení životnosti prvního ložiska:

$$L_{10h1} = \left(\frac{3900}{8,2}\right)^3 \frac{10^6}{60 \cdot 1000} = 1\,793\,085\,561 \text{ h}$$

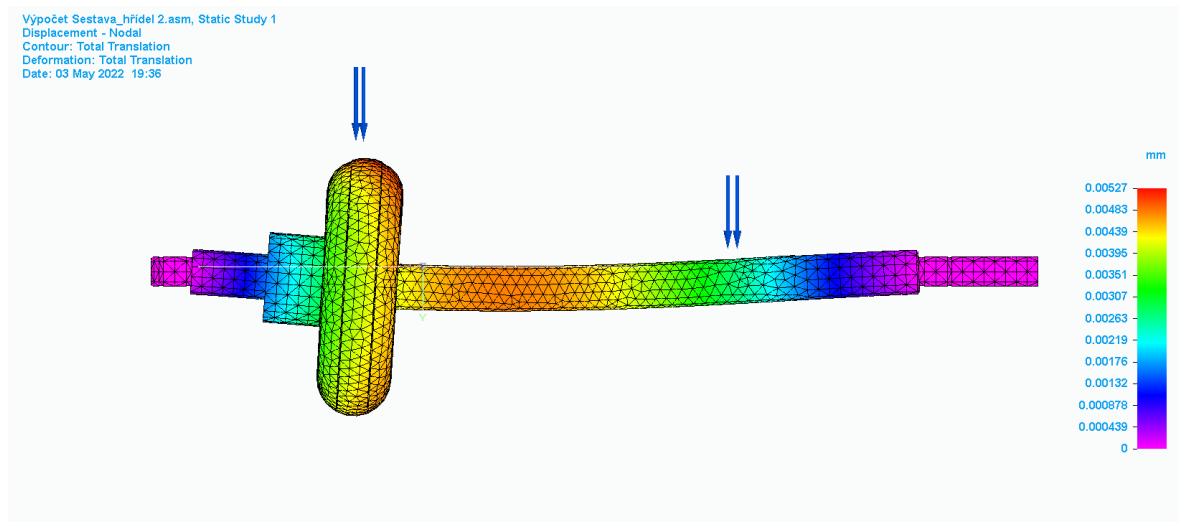
Stanovení životnosti druhého ložiska:

$$L_{10h2} = \left(\frac{3900}{16,84}\right)^3 \frac{10^6}{60 \cdot 1000} = 207\,021\,909 \text{ h}$$

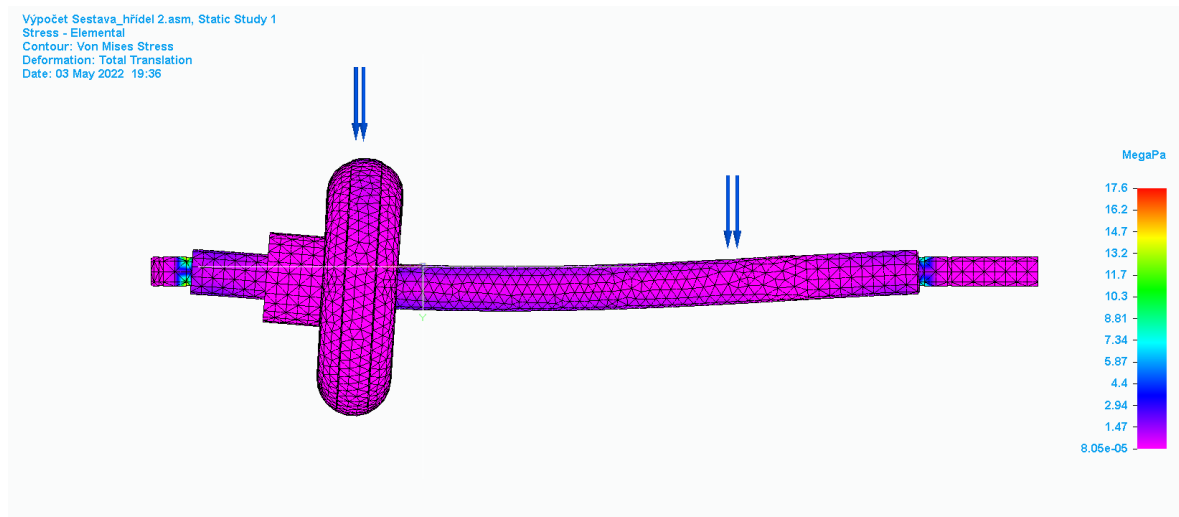
Z výsledků je patrné, že ložiska jsou naprosto vyhovující. Základní požadavek na ložiska byla životnost minimálně 100 000 h. Požadovanou hodnotu ložiska zdaleka překonávají.

14.3 FEM analýza

Pro základní představu o reakci součástí vůči namáhání od procesu obrábění byla provedena FEM analýza sestavy hřídele. Výsledky pomůžou přiblížit deformace s napětím, které na rotačních plochách působí, a tím přiblížit představu, zda jde dosáhnout na zařízení deterministického modelu procesu.



Obrázek 45: Deformace hřídele s kolečkem při zatížení



Obrázek 46: Napětí na hřídeli při zatížení

Na sestavu hřidel, kolečka a kroužku byly nastaveny síly v místech, kde budou při procesu běžně vznikat. Velikost síly působící v brusné části byla stanovena podle měření jako 20 N. [29] Jedná se o maximální sílu, která může na zařízení působit. Stanovená síla byla ve studii změřena na větším profesionálním zařízení, které je schopno unášet na povrchu nosného kola větší vrstvu MR pasty než v tomto návrhu. Tudíž velikost sil zkoumaného návrhu bude

dosahovat menších normálových sil. Druhá síla je uvažována od působení pružin pinů na hřídel. Pružiny jsou stlačeny a vyvozují sílu směrem do hřídele. Velikost součtu sil od čtyř pružin byla stanovena na 5 N.

Z výsledků je patrné, že na sestavu působí malá zatížení a je tak možné uvažovat plastické materiály jako lineárně elastický izotropní materiál. Výsledky deformace sestavy stanovené FEM analýzou ukazují, že je zařízení schopno dodržovat deterministický model. Největší deformace dosahuje dle analýzy 0,005 mm. Tuhost hřídele se tak zdá být dostatečná. Reálně hodnoty deformací budou dále ovlivňovat vlivy z okolí a výrobní kazy.

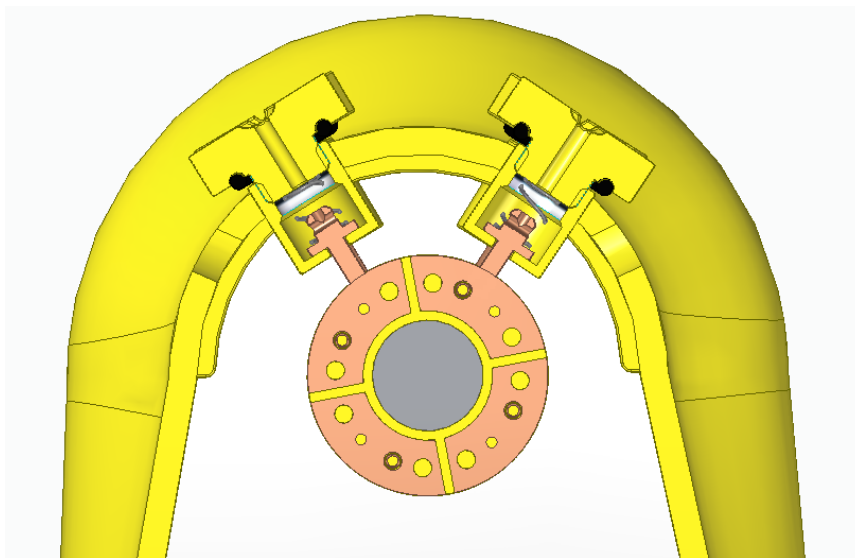
Největší hodnota napětí vzniká v nejdelších ramenech hřídele od působení síly brusné části. Napětí je koncentrováno v zápíchách ploch pro uložení ložisek. Von Misesovo napětí dosahuje hodnoty 17,6 MPa. Mez kluzu materiálu EN 1.0060 je stanovena na 300 MPa. Meze kluz napětí vznikající na hřídeli zdaleka nedosahuje. Zvolené materiály a rozměry součástí lze považovat za vyhovující.

15 ŘÍZENÍ A REGULACE

Parametry průběhu procesu musí mít možnosti řízené regulace. Bez možnosti ovládní otáček, síly magnetického pole, nebo objemového průtoku MR pasty by proces nebyl univerzální a mnohdy by při jeho aplikaci nebylo možno dosahovat požadovaných finálních jakostí dokončovaných povrchů. Předpoklad kvalitní možnosti regulace požaduje regulační členy, které jsou schopny nastavit hodnoty parametrů řízených dějů a udržovat jejich konstantní setrvání na nastavené hodnotě. Základní pohyby posuvů a otáčky vřetene jsou již zajištěni frézkou.

15.1 Přenos energie a nastavení pozic spínání cívek

Pro určení pozic, ve kterých jsou cívky v kolečku aktivní, slouží drážky v krytu, ve kterých mohou být sestavy pinu nastavovány do pozic a tím dříve, či později spínat, nebo rozepínat obvod. Najednou mohou být sepnuty pouze dvě cívky. O-kroužek pod hlavou šroubu zajišťuje fixování pozice vůči krytu. Kontakty zároveň plní bezpečnostní funkci, kdy v případech odejmutí krytu ze zařízení dochází k rozpojení obvodu a není tak možný vznik úrazu proudem, i když je uvažované napětí cívek 12 V DC.



Obrázek 47: Uložení pinů v krytu a kontakt s měděnými destičkami

15.2 Čerpání MR pasty

Magnetoreologická pasta bude dodávána do oběhu peristaltickou pumpou. Peristaltické pumpy vynikají čerpáním kapalin, méně a středně viskózních látek v přesném množství s jednoduchou možností regulace množství přiváděné kapaliny. Při čerpání navíc nedochází ke kontaminaci čerpaného média s jinou příměsí (olej a další) jako u ostatních čerpadel.

Pro čerpání byla zvolena pumpa OEM206 (Obr. 48). Pumpa může dosahovat průtoku 1,3 až 1100 ml/min. Objemový průtok pumpy závisí na zvoleném průměru hadičky v peristaltické hlavě a změně napětí na svorkách motoru. Pumpa disponuje stejnosměrným motorem pro napětí 12 V DC. Pumpa je prodávána v nezakrytovaném stavu, proto bude zapracována do plastové krabičky pro elektrorozvody o krytí minimálně IP 54. Kvůli nedostatku prostoru na základní desce nelze pumpu umístit přímo k zařízení. Bude nutno pumpu umístit na oplechování, nebo stranu stolu CNC frézky.



Obrázek 48: Peristaltická pumpa OEM206 [35]

Regulace rychlosti v první řadě závisí na volbě průměru hadičky. Po správně zvoleném průměru je nutné, aby bylo možno ovládat i otáčky stejnosměrného motoru. K regulaci otáček je vhodné využít některý PWM regulátor. Regulátor zajišťuje změnu napětí na svorkách motoru a efektivně s dobrou přesností reguluje průtok kapaliny. V systému dodávání MR pasty není počítáno s průtokoměry. Objemové průtoky, které je při daném napětí čerpadlo schopno dodávat, by bylo vhodné praktickým testem stanovit pro minimálně 5 hodnot v rozsahu napětí pro jednu hadičku. Bez výsledků měření průtoků podle napětí by byl průtok pouze odhadován a mohlo by docházet k nedokonalému průběhu procesu. Stejný regulátor by bylo možné použít i pro regulaci magnetických cívek.



Obrázek 49: PWM regulátor s digitálním displejem a spínačem [36]

15.3 Pohon pohybů

Hlavní rotační pohyb zařízení obstará servomotor ovládaný frekvenčním měničem (servo driver). Volba servomotoru se opírá o zpětnou vazbu, kterou motory dávají zpět a jsou schopny dosahovat konstantních otáček. Enkodér na motoru snímá úhel natočení motoru, ze kterého je možno kontrolovat, zda pohyb opravdu probíhá, jak má. Servomotor byl vybrán od kvalitního francouzského výrobce elektronických zařízení a komponent Schneider Electric. Servomotor spadá do řady malých servomotorů Lexium 28.



Obrázek 50: Servomotor Schneider Lexium 28 40 mm [37]

15.3.1 Vztah otáček vřetene a kolečka

Výše již bylo popsáno, že pro deterministický model a rovnoměrné dokončení procesu je nutno nastavit otáčky vřetene a kolečka, aby došlo ke stejným rezným rychlostem

při obrábění na okraji obrobku i v jeho středu. Kinematika procesu může probíhat v podobě, kdy vřeteno i kolečko udává souhlasný směr vektoru obvodové rychlosti. Tím bude docházet ke snížení řezné rychlosti z pohledu rozdílu jejich obvodových rychlostí. Pro představu, čím více se bude obvodová rychlost v obráběném bodě obrobku podobat obvodové rychlosti vrstvy MR pasty (kolečka), tím víc se bude zmenšovat řezná rychlost po částic strhávající částice po ploše obrobku.

Druhá kinematika může probíhat v podobě, kdy vřeteno koná opační směr pohybu. Opačný směr pohybu zvyšuje řeznou rychlost se zvyšujícím se rozdílem protijdoucích obvodových rychlostí. Pokud bude úvaha směřovat do pohledu, kdy vektory rychlostí působí na stejné přímce, platí vztah:

$$v_c = v_r - \omega_v \int_0^{r_v} dr_v \quad (27)$$

Kde: v_c – řezná rychlost [m/s]

v_r – obvodová rychlost kolečka [m/s]

r_v – poloměr vzdálenosti od osy vřetene [m]

ω_v – úhlová rychlost vřetene [rad/s]

Nastavení parametrů zařízení a přizpůsobení programu bude velmi zásadní. Pro zjednodušení určování rychlostí vřetene, neboli udržení konstantní řezné rychlosti, byly stanoveny empirické vztahy pro výpočet otáček vřetene.

Při nesouhlasném pohybu vřetene a kolečka pro poloměr vzdálenosti od osy vřetene:

$$n_v = \frac{60 v_c - 2 \pi n_r r_r}{2 \pi r_v} \quad (28)$$

Při souhlasném pohybu vřetene a kolečka pro poloměr vzdálenosti od osy vřetene:

$$n_v = \frac{60 v_c + 2 \pi n_r r_r}{2 \pi r_v} \quad (29)$$

Kde: n_v – otáčky vřetene [ot/min]

n_r – otáčky kolečka [ot/min]

r_v – poloměr vzdálenosti od osy vřetene [m]

r_r – poloměr kolečka [m]

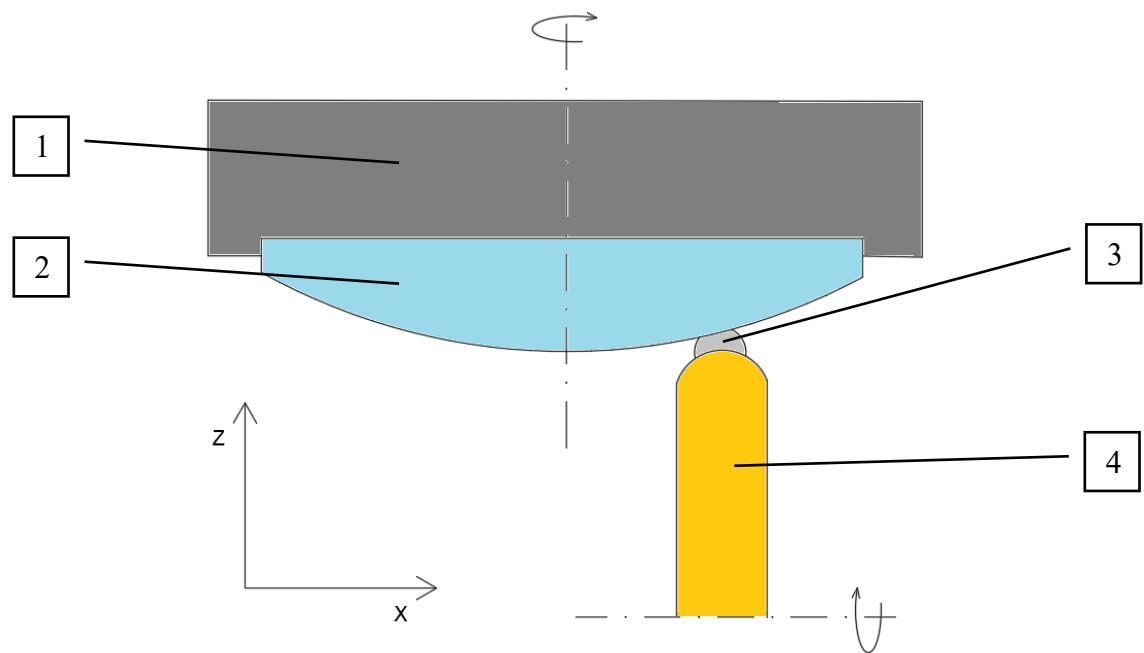
Při volbě otáček obou prvků se musí brát v potaz, že je frézka i kolečko limitováno maximálními rychlostmi. V případě frézky existuje dokonce i minimální hranice otáček za minutu. Ta je stanovena na 100 ot/min. Maximální otáčky vřetene frézky se pohybují do 3000 ot/min a u kolečka 1000 ot/min. Pro představu volby rychlostí jsou příkladně uvedeny hodnoty v tabulce pro řeznou rychlost 1,6 m/s při nesouhlasném směru sil a při zvolených otáčkách kolečka 350 ot/min.

Tabulka 8: Otáčky vřetene pro konstantní řeznou rychlost – nesouhlasný pohyb

Řezná rychlost [m/s]		Otáčky kolečka [ot/min]	
1,6		350	
Otáčky vřetene (ot/min)	Vzdálenost bodu od osy (mm)	Řezná rychlost od kolečka (m/s)	Řezná rychlost od vřetene (m/s)
3029	1	1.28	0.32
606	5	1.28	0.32
303	10	1.28	0.32
202	15	1.28	0.32
151	20	1.28	0.32
121	25	1.28	0.32
101	30	1.28	0.32

15.4 Dráhy posuvů

Dráhy posuvů se mohou psát například v G-kódu, nebo lze využít softwaru pro tvorbu programů pro běžné frézování. Pro využití softwaru stačí myšlenka, kdy se obrobek (sférická obráběná plocha) uvažuje jako nástroj (fréza) a kolečko jako obrobek. V softwaru se vytvoří nová fréza s tvarem a rozměry rovnající se tvarům a ploše obrobku. Obrobek se namodeluje podle kolečka a nastaví se zakázané prostory, aby nedošlo například k nárazu do hřídele. Následně se vygeneruje pohyb, který bude konán v ose Z a X cyklicky od středu k okraji obrobku a zpět. Pohyb charakterizuje děj, jako kdyby se obrobek (čočka) snažil obrábět nástroj (kolečko).



Obrázek 51: Kinematika obráběcího procesu

1 – sklíčko, 2 – sférický obrobek, 3 – zmagnetizovaná vrstva MR pasty, 4 – kolečko

V případě, kdy by využití softwaru nevyhovovalo, může být kód napsán „ručně“. Pro sférické plochy se ovšem metoda, kdy je kód „ručně“ psán, příliš nehodí, protože je náročná a zdlouhavá. Navíc vzrůstá riziko lidské chyby.

16 CENOVÁ KALKULACE NÁKLADŮ

Odhadované náklady na zařízení činí 132 052 Kč s DPH. V kalkulacích byly některé díly počítány za cenu materiálu, protože se pro výrobu využijí výrobní stroje na Univerzitě Tomáše Bati ve Zlíně. U ostatních dílů byly ceny převzaty od prodejců, nebo byly odborně odhadnuty. Celková cena za zařízení se může ještě značně lišit. Návrh je z technologického a mechanického hlediska vyřešen. Pokud bude rozhodnuto o realizaci zařízení kladně, je třeba aby návrh dále rozvinul konstruktér elektronických obvodů, který navrhne cívky, vodiče a celý elektrický obvod zařízení. Pro správnou funkci bude dále potřeba naprogramování HMI, nebo podobné zařízení, které bude umožňovat ovládání procesu.

V aktuální situaci může finální cenu odlišit i doba, která uběhne od tohoto návrhu, po zadání do výroby. Ceny na trhu jsou aktuálně obtížně předvídatelné do budoucna. Cena a dostupnost materiálu se každý měsíc mění.

Tabulka 9: Odhadované náklady (včetně DPH) na zařízení

Č. položky	Položka	Množství	Cena za kus [Kč]	Celková cena [Kč]
1	Hřídel	1	3200	3200
2	Ložiska	2	80	160
3	Kroužek	1	1300	1300
4	Základní deska	1	3800	3800
5	Příruba motoru	1	2400	2400
6	Tryska	1	350	350
7	Stojan trysky	1	500	500
8	Držák trysky	1	400	400
9	Uložení zadní	1	3500	3500
10	Uložení strany motoru	1	3500	3500
11	Víčko ložiska	1	1200	1200
12	Pin kontaktu	4	150	600
13	Pružiny Sodeman C01800120250M	4	103	412
14	O-kroužek	4	20	80
15	Měděné destičky	8	500	4000
16	Spojovací materiál / pero / pojistné kroužky	1	1500	1500
17	Filament Smartfil Pantone 1205 C	1	950	950
18	Filament PolyMide PA6-GF	1	1200	1200
19	Servomotor Schneider BCH2MBA530CA5C	1	15000	15000
20	Servoměnič Schneider LXM28AUA5M3X	1	21500	21500
21	Spojka pružná Coup-link LK20-C25	1	700	700
22	Elektroinstalace a cívky	1	60000	60000
23	Peristaltická pumpa OEM206	1	5000	5000
24	Hadičky	1	1000	1000
Celková cena				132052

ZÁVĚR

Diplomová práce zobrazuje návrh magnetoreologického zařízení na dokončování sférických povrchů. Zařízení se postupně vyvíjelo a probíhaly úpravy, které ho dovedly do představované podoby. Jeho součásti byly úspěšně navrženy s velkým podílem dílů, které je schopna vyrobit sama univerzita na svých výrobních zařízeních.

V teoretické části byly představeny technologie a metody, kterými lze dosahovat vysokých jakostí sférických povrchů.

V praktické části je představena konstrukce samotného zařízení s principy, na kterých je postaveno. Následně jsou prezentovány nezbytné výpočty a analýzy pro ověření správnosti návrhu. Praktickou část zakončují metodiky práce se zařízením s odhadovanou sumou nákladů na pořízení zařízení, která činí 132 052 Kč s DPH.

Jako poslední a největší benefit zařízení lze vyzdvihnout jeho potenciál v univerzálnosti. Zařízení dokáže s propojením vlastností s CNC frézku obrábět široké spektrum tvarů rotačních ploch do průměrů 60 mm. Je možno obrábět jak sférické, tak i rovinné plochy rotačních součástí při dodržení deterministického modelu dokončovací operace.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] BAKER, Lionel R. *Metrics for high-quality specular surfaces*. Bellingham: SPIE—The International Society for Optical Engineering, 2004. ISBN 0-8194-5576-8.
- [2] BUMBÁLEK, Bohumil, Vladimír ODVODY a Bohuslav OŠŤÁDAL. *Drsnost povrchu*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1989.
- [3] CHROMJAKOVÁ, Felicita a Rastislav RAJNOHA. *Řízení a organizace výrobních procesů: kompendium průmyslového inženýra*. Žilina: Georg, 2011. ISBN 978-80-89401-26-0.
- [4] ŘASA, Jaroslav a Vladimír GABRIEL. *Strojírenská technologie 3*. Praha: Scientia, 2000. ISBN 80-7183-207-3.
- [5] JAIN, Vijay Kumar. *Nanofinishing science and Technology: Basic and Advanced Finishing and Polishing Processes*. London: CRC Press, 2017. ISBN 978-1-4987-4594-9.
- [6] KOČMAN, K. *Technologické procesy obrábění*. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011. 330 s. ISBN 978-80-7204-722-2
- [7] MARINESCU, Ioan D., W. Brian ROWE, Boris DIMITROV a Hitoshi OHMORI. *Tribology of Abrasive Machining Processes*. Druhé vydání. Waltham: ELSEVIER, 2004. ISBN 978-1-4377-3467-6.
- [8] CHADIMOVÁ, Vlasta, Marek CHVÁTAL, Jiří KÜHN a Dobroslav MATĚJKA. *Mineralogie pro školy* [online]. Praha: Přírodovědecká fakulta Univerzity Karlovy v Praze [cit. 2022-02-20]. Dostupné z: <https://web.natur.cuni.cz/ugmnz/mineral/tvary.html>
- [9] Diagram vstup-proces-výstup s jednotlivými typmi vstupov procesu. *Management Systems* [online]. Bratislava: Management Systems [cit. 2022-02-20]. Dostupné z: http://www.msys.sk/nastroje_diagvstprovyst.htm
- [10] Drsnost povrchu: Drsnost povrchu – základní pojmy a vysvětlení veličin m, Ra, Rz, Ry. *ATRYX* [online]. Praha [cit. 2022-04-20]. Dostupné z: <https://atryx.cz/prakticka-prirucka/2-drsnost-povrchu>
- [11] *E-konstruktor: Portál pro strojní konstruktéry* [online]. Brno: Vydavatelství Nová média [cit. 2022-04-21]. Dostupné z: <https://e-konstrukter.cz/>

- [12] Drsnost povrchu. *Odborné vzdělávání s moderní technikou* [online]. Brno: Střední škola strojírenská a elektrotechnická, 2012 [cit. 2022-04-21]. Dostupné z: https://ovmt.webnode.cz/_files/200000030-3094f328a0/Drsnost%20povrchu.pdf
- [13] KLOCKE, Fritz. *Manufacturing process 2: Grinding, Honing, Lapping*. Aachen: RWTHedition, 2009. ISBN 978-3-540-92258-2.
- [14] KŘÍŽ, Rudolf a Pavel VÁVRA. *Strojírenská příručka: 24 oddílů v osmi svazcích*. Praha: Scientia, 1996. ISBN 80-718-3024-0.
- [15] MÁDL, Jan. *Technologie obrábění*. Vyd. 2., přeprac. V Praze: Nakladatelství ČVUT, 2007, c1999. ISBN 978-80-01-03752-2
- [16] JAIN, V. *Micromanufacturing Processes*. 1st ed. Boca Raton: CRC Press, 2012. 429 s. ISBN 978-1-4398-5290-3.
- [17] PARK, Eun-Suk, Hwan-Jin CHOI, Han-Hee KIM, Eun-Chae JEON a Tae-Jin JE. Study on Machining High-Aspect Ratio Micro Barrier Rib Array Structures using Orthogonal Cutting Method. *Journal of the Korean Society of Precision Engineering* [online]. 2012, 29(12), 1272-1278 [cit. 2022-04-23]. ISSN 1225-9071. Dostupné z: doi:10.7736/KSPE.2012.29.12.1272
- [18] ROTAGO: Stationary machine for ball valves. *EFCO* [online]. Charlotte [cit. 2022-04-23]. Dostupné z: <https://www.efcousa.com/products/grinding-lapping-equipment/stationary/rotago/>
- [19] YIN, Ling, E.Y.J VANCOILLE, L.C LEE, H HUANG, K RAMESH a X.D LIU. High-quality grinding of polycrystalline silicon carbide spherical surfaces. *Wear* [online]. 2004, 256(1-2), 197-207 [cit. 2022-04-24]. ISSN 00431648. Dostupné z: doi:10.1016/S0043-1648(03)00406-X
- [20] CHEN, Bing, Shichun LI, Zhaohui DENG, Bing GUO a Qingliang ZHAO. Grinding marks on ultra-precision grinding spherical and aspheric surfaces. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology* [online]. 2017, 4(4), 419-429 [cit. 2022-04-24]. ISSN 2288-6206. Dostupné z: doi:10.1007/s40684-017-0047-5
- [21] NAGDEVE, Leeladhar, V.K. JAIN a J. RAMKUMAR. Nanofinishing of freeform/sculptured surfaces: state-of-the-art. *Manufacturing Review* [online]. 2018, 5 [cit. 2022-04-24]. ISSN 2265-4224. Dostupné z: doi:10.1051/mfreview/2018005

- [22] Hawking Superfinishing Technology(Spherical). *Huawin Hawking* [online]. SHANDONG HUAWIN ELECTRICAL & MECHANICAL TECHNOLOGY CO., 2012 [cit. 2022-04-24]. Dostupné z: <http://www.huawinhawking.com/products/superfinishing/spherical-superfinishing.html>
- [23] ZAKHAROV, O. V., A. F. BALAEV a A. P. BOCHKAREV. Shaping of spherical surfaces on centerless superfinishing machines with longitudinal supply. *Russian Engineering Research* [online]. 2015, **35**(4), 264-266 [cit. 2022-04-24]. ISSN 1068-798X. Dostupné z: doi:10.3103/S1068798X15040255
- [24] How to Polish an Injection Mold?. *ECOMOLDING* [online]. Eco molding Co. [cit. 2022-04-24]. Dostupné z: <https://www.injectionmould.org/2019/08/17/injection-mold-polishing/>
- [25] DYNAROWSKI, Robert a Bogdan NOWICKI. Investigation on non-conventional honing of sculptured surfaces for parts made of alloy steel. *Journal of Materials Processing Technology* [online]. 2001, **109**(3), 270-276 [cit. 2022-04-28]. ISSN 09240136. Dostupné z: doi:10.1016/S0924-0136(00)00810-4
- [26] BRINKSMEIER, Ekkard, Oltmann RIEMER a Alexander GESSENHARTER. Finishing of structured surfaces by abrasive polishing. *Precision Engineering* [online]. 2006, **30**(3), 325-336 [cit. 2022-04-28]. ISSN 01416359. Dostupné z: doi:10.1016/j.precisioneng.2005.11.012
- [27] SHIOU, Fang-Jung, Chao-Chang A. CHEN a Wen-Tu LI. Automated surface finishing of plastic injection mold steel with spherical grinding and ball burnishing processes. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. 2006, **28**(1-2), 61-66 [cit. 2022-04-28]. ISSN 0268-3768. Dostupné z: doi:10.1007/s00170-004-2328-8
- [28] SHIOU, Fang-Jung a Chien-Hua CHEN. Freeform surface finish of plastic injection mold by using ball-burnishing process. *Journal of Materials Processing Technology* [online]. 2003, **140**(1-3), 248-254 [cit. 2022-04-28]. ISSN 09240136. Dostupné z: doi:10.1016/S0924-0136(03)00750-7
- [29] SCHINHAERL, Markus, Pantazis Z. MOUROULIS, Warren J. SMITH, et al. *Forces acting between polishing tool and workpiece surface in magnetorheological finishing* [online]. In: . 2008-8-28, s. 706006- [cit. 2022-04-28]. Dostupné z: doi:10.1117/12.794196

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

MO	Počátek plastických deformací
NO	Konec plastických deformací
RO	Rychlořezná ocel
HSS	High speed steel (rychlořezná ocel)
SK	Slinuté karbidy
KM	Keramické materiály
KNB	Kubický nitrid boru
W	Wolfram
Mo	Molybden
V	Vanad
Co	kobalt
Ni	Nikl
Cr	Chrom
WC	Karbid wolframu
TiC	Karbid titanu
NbC	Karbid niobu
Fe ₃ C	Karbid železa
SiC	Karbid křemíku
BC	Karbid boru
BeO	Oxid berylnatý
Al ₂ O ₃	Oxid hlinitý (korund)
ZrO ₂	Oxid zirkoničitý
Fe ₂ O ₃	Oxid železitý
SiO ₂	Oxid křemičitý
Cr ₂ O ₃	Oxid chromitý

CVD	Chemické povlakování
PVD	Fyzikální povlakování
IT	Toleranční stupeň
FEPA	Evropská federace výrobců abrasiv
ANSI	Americký národní normalizační institut
AFF	Abrasive flow finishing
EEM	Elastic emission machining
EAF	Elastic abrasive finishing
MRF	Magnetoreologické dokončování (Magnetorheological finishing)
MR	magnetoreologická kapalina
BEMRF	Ball end magnetorheological finishing
MRAFF	Magnetorheological abrasive flow finishing
MFP	Magnetic flow finishing
CNC	Computer numerical control
3D	Tři dimenze
ABS	Akrylonitrilbutadienstyren
PA 6	Polyamid 6
GF	Skelná vlákna
DC	Stejnoseměrný proud
IP	Stupeň krytí
DPH	Daň z přidané hodnoty
PWM	Pulzní šířková modulace (Pulse width modulation)
R_a	Střední aritmetická úchylka profilu [μm]
R_z	Výška nerovností profilu z deseti bodů [μm]
R_y	Maximální nerovnost profilu [μm]
$y(x)$	výška výstupků ve vzdálenosti x [μm]

n	celkový počet profilů na hodnocené ploše povrchu
l	délka měřené části plochy [μm]
y_i	výška výstupků na hodnocené ploše povrchu [μm]
F_i	Obsahy výstupků [μm^2]
F_i'	Obsahy prohlubní [μm^2]
Φ_M	Úhel začátku plastické deformace [$^\circ$]
Φ_N	Úhel konce plastické deformace [$^\circ$]
Φ	Úhel roviny stříhu [$^\circ$]
P_{sh}	Bod stříhu
A_D	Jmenovitá plocha řezu [mm^2]
A_{Dc}	Plocha průřezu třísky [mm^2]
v_c	Řezná rychlost [m/min]
v_c	Rychlost třísky [m/min]
k_s	Součinitel pěchování třísky
δ_o	Ortogonální úhel čela [$^\circ$]
h_D	Jmenovitá tloušťka řezu [mm]
h_{Dc}	Tloušťka třísky [mm]
Δp	Tloušťka elementu třísky [mm]
Δs	Posunutí elementu třísky [mm]
n	Otáčky obrobku [ot/min]
D	Průměr obráběné plochy [mm]
f	Posuv na otáčku [mm/ot]
v_f	rychlost posuvu [mm/min]
α_o	Ortogonální úhel hřbetu [$^\circ$]
γ_o	Ortogonální úhel čela [$^\circ$]
r_n	Poloměr ostří [μm]

v_w	Rychlost otáčení obrobku [m/min]
ω_k	Frekvence kmitavého pohybu [Hz]
a	Amplituda
α	Úhel sklonu stopy po jednom zrně [°]
P	Výkon [W]
A	Práce [J]
t	Čas [s]
ΔW	Rozdíl kinetické a potenciální energie [J]
W_k	Kinetická energie [J]
W_p	Potenciální energie [J]
J	Moment setrvačnosti [kg/m ²]
ω	Úhlová rychlost [rad/s]
f	Frekvence [Hz]
m	Hmotnost [kg]
r	Poloměr [m]
R_1	Vnitřní poloměr kruhového průřezu [m]
R_2	Vnější poloměr kruhového průřezu [m]
S	Obsah průřezu [m ²]
ρ	Hustota [kg/m ³]
V	Objem [m ³]
s	Tloušťka válce [m]
F_p	Síla konaná stlačením pružiny [N]
F_2	Síla působící od čtyř pružin [N]
F_1	Síla působící od brusné části [N]
F_x	Síla v ose X [N]
F_y	Síla v ose Y [N]

M	Ohybový moment [Nmm]
R	Tuhost pružiny [N/mm]
s_p	Zdvih pružiny [mm]
R_{Ax}	Reakce v ose x v bodě A [N]
R_{Ay}	Reakce v ose y v bodě A [N]
R_{By}	Reakce v ose y v bodě B [N]
L_{10h}	Základní trvanlivost ložiska [h]
C	Základní dynamická únosnost ložiska [N]
P	Dynamické zatížení ložiska [N]
p	Mocnitel
v_r	obvodová rychlost kolečka [m/s]
r_v	poloměr vzdálenosti od osy vřetene [m]
ω_v	úhlová rychlost vřetene [rad/s]
n_v	otáčky vřetene [ot/min]
n_r	otáčky kolečka [ot/min]
r_r	poloměr kolečka [m]

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Transformace vstupů na výstupy [9].....	12
Obrázek 2: Střední aritmetická úchylka profilu [10].....	14
Obrázek 3: Střední aritmetická čára profilu [10].....	15
Obrázek 4: Realizace řezného procesu:	20
Obrázek 5: Oblast plastických deformací v odřezávané vrstvě [15]	21
Obrázek 6: Model tvorby elementů třísky [6]	21
Obrázek 7: Vlastnosti nástrojových materiálů [15]	24
Obrázek 8: Diamantový mikrosoustružnický nástroj o šířce 60 μm [17].....	27
Obrázek 9: Struktura brusného nástroje [4].....	29
Obrázek 10: Typy zrn oxidu hlinitého [7]	30
Obrázek 11: Záběr brusného zrna [4]	36
Obrázek 12: Sférické broušení křemíku [20].....	39
Obrázek 13: Obrobky po sférickém broušení a leštění [20]	39
Obrázek 14: Princip honování [5].....	40
Obrázek 15: Nedokonalosti otvorů [5]	41
Obrázek 16: Varianty řízení honování [5]	42
Obrázek 17: Povrch lapovaného obrobku [5]	45
Obrázek 18: Metody lapování [13].....	47
Obrázek 19: Lapovací zařízení pro kulové ventily [18]	47
Obrázek 20: Schéma kinematiky superfinišování [4].....	50
Obrázek 21: Sférické superfinišování na stoji Hawking [22].....	51
Obrázek 22: Obrobek po superfinišování [22]	51
Obrázek 23: Princip leštění [7]	52
Obrázek 24: Leštěná dutina vstřikovací formy [24]	53
Obrázek 25: Dvoucestné AFF zařízení [16]	55
Obrázek 26: Srovnání metod obrábění [5].....	56
Obrázek 27: Odebírání materiálu technologií EEM [5].....	56
Obrázek 28: Průběh reakce a odebírání atomu [5]	57
Obrázek 29: Vliv elasticko-abrazivní kuličky při EAF při dopadu oproti tuhému zrn [5]	58
Obrázek 30: Rozložení částic magnetoreologické pasty [16].....	58
Obrázek 31: Schéma odebírání materiálu [16]	59
Obrázek 32: Zařízení MRF [16]	59
Obrázek 33: Patentované MRF zařízení v roce 1999 [31].....	64
Obrázek 34: Schéma MRF zařízení [29]	65

Obrázek 35: Pozicování výrobku na CNC MRF zařízení [32].....	65
Obrázek 36: Zařízení na UTB [33]	66
Obrázek 37: Frézka FC 16 CNC [34]	68
Obrázek 38: Sestava MRF zařízení – pohled rozmístění.....	70
Obrázek 39: Sestava MRF zařízení	71
Obrázek 40: Sestava hřídele a kolečka	72
Obrázek 41: Řez se zobrazením kanálů pro vodiče a cívky	73
Obrázek 42: Sestava pinu a její řez.....	73
Obrázek 43: Řez systému dodávání MR pasty	74
Obrázek 44: Uvolněný nosník	80
Obrázek 45: Deformace hřídele s kolečkem při zatížení	82
Obrázek 46: Napětí na hřídeli při zatížení	82
Obrázek 47: Uložení pinů v krytu a kontakt s měděnými destičkami	84
Obrázek 48: Peristaltická pumpa OEM206 [35].....	85
Obrázek 49: PWM regulátor s digitálním displejem a spínačem [36].....	86
Obrázek 50: Servomotor Schneider Lexium 28 40 mm [37].....	86
Obrázek 51: Kinematika obráběcího procesu.....	89

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Dosažitelné hodnoty Ra dle metod výroby [11].....	15
Tabulka 2: Použití ploch dle hodnoty drsnosti Ra [12]	16
Tabulka 3: Příklady značení velikosti zrn [7].....	32
Tabulka 4: Vlastnosti nejčastěji využívaných pojiv [7].....	33
Tabulka 5: Jakost a přesnost ploch po brusných procesech [6].....	38
Tabulka 6: Dosažitelné hodnoty povrchů lapováním [4].....	45
Tabulka 7: Procesní parametry lapování [14].....	45
Tabulka 8: Otáčky vřetene pro konstantní řeznou rychlost – nesouhlasný pohyb	88
Tabulka 9: Odhadované náklady (včetně DPH) na zařízení.....	90

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha PI: Výkresová dokumentace