

Konstrukce zařízení pro magnetoreologické dokončování povrchů

Bc. Martin Kovařík

Diplomová práce
2018



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2017/2018

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: Bc. Martin Kovařík

Osobní číslo: T16249

Studijní program: N3909 Procesní inženýrství

Studijní obor: Konstrukce technologických zařízení

Forma studia: prezenční

Téma práce: Konstrukce zařízení pro magnetoreologické dokončování povrchů

Zásady pro vypracování:

- 1. Teoretická studie na téma dokončovacích metod obrábění vnějších povrchů**
- 2. Rešerše aktuálního stavu vývoje v oblasti přístrojů pro magnetoreologické dokončování povrchů**
- 3. Návrh a konstrukce zařízení pro magnetoreologické dokončování**
- 4. Cenová kalkulace daného řešení**

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

1. SHIGLEY, J., MISCHKE, CH. a BUDYNAS, R. Konstruování strojních součástí. Přel. M. Hartl, M. Vlk, et al. 1. vyd. Brno: VUTUM, 2010. 1159 s. Přel. z: Mechanical Engineering Design. ISBN 978-80-214-2629-0.
2. MARINESCU, I. et al. Tribology of Abrasive Machining Processes. 2nd ed. Amsterdam: Elsevier, 2013. 586 s. ISBN 978-1-4377-3467-6.
3. JAIN, V. Micromanufacturing Processes. 1st ed. Boca Raton: CRC Press, 2012. 429 s. ISBN 978-1-4398-5290-3.
4. HALLIDAY, D., RESNICK, R. a WALKER, J. Fyzika. Přel. M. Černý, P. Dub, et al. 2., přeprac. vyd. Brno: VUTUM, 2013. 1248 s. Přel. z: Fundamentals of Physics. ISBN 978-80-214-4123-1.

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Ondřej Bílek, Ph.D.

Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce:

2. ledna 2018

Termín odevzdání diplomové práce:

18. května 2018

Ve Zlíně dne 25. dubna 2018

doc. Ing. František Buňka, Ph.D.
děkan



prof. Ing. Berenika Hauspěrová, Ph.D.
ředitel ústavu

Příjmení a jméno: KOVAŘÍK MARTIN

Obor: KTZ

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby ¹⁾;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou 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 ²⁾;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou 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);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považuji se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně 18.5.2018.

Martin Kovařík

¹⁾ zákon č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, § 47 Zveřejňování závěrečných prací:

(1) Vysoká škola nevydávalečně zveřejňuje disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce, u kterých proběhla obhajoba, včetně posudků oponentů a výsledku obhajoby prostřednictvím databáze kvalifikačních prací, kterou spravuje. Způsob zveřejnění stanoví vnitřní předpis vysoké školy.

(2) Disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce odevzdané uchazečem k obhajobě musí být též nejméně pět pracovních dnů před konáním obhajoby zveřejněny k nahlížení veřejnosti v místě určeném vnitřním předpisem vysoké školy nebo není-li tak určeno, v místě pracoviště vysoké školy, kde se má konat obhajoba práce. Každý si může ze zveřejněné práce pořizovat na své náklady výpisy, opisy nebo rozmnoženiny.

(3) Platí, že odevzdáním práce autor souhlasí se zveřejněním své práce podle tohoto zákona, bez ohledu na výsledek obhajoby.

²⁾ 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, § 35 odst. 3:

(3) Do práva autorského také nezasahuje škola nebo školské či vzdělávací zařízení, užije-li nikoli za účelem přímého nebo nepřímého hospodářského nebo obchodního prospěchu k výuce nebo k vlastní potřebě dílo vytvořené žákem nebo studentem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či vzdělávacímu zařízení (školní dílo).

³⁾ 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, § 60 Školní dílo:

(1) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení mají za obvyklých podmínek právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla (§ 35 odst. 3). Odpírá-li autor takového díla udělit svolení bez vážného důvodu, mohou se tyto osoby domáhat nahrazení chybějícího projevu jeho vůle u soudu. Ustanovení § 35 odst. 3 zůstává nedotčeno.

(2) Není-li sjednáno jinak, může autor školního díla své dílo užít či poskytnout jinému licenci, není-li to v rozporu s oprávněnými zájmy školy nebo školského či vzdělávacího zařízení.

(3) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení jsou oprávněny požadovat, aby jim autor školního díla z výdělku jím dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence podle odstavce 2 přiměřeně přispěl na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložily, a to podle okolností až do jejich skutečné výše; přitom se přihlídí k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

ABSTRAKT

Předkládaná diplomová práce se zabývá konstrukcí zařízení pro magnetoreologické dokončování povrchů. Pojednává se zde o dokončovacích metodách obrábění, mechanických nano-dokončovacích procesech a nano-dokončovacích procesech s podporou magnetického pole. V práci bylo zkonstruováno zařízení pro magnetoreologické dokončování povrchů. Závěrem je uvedena cenová kalkulace daného zařízení.

Klíčová slova: MRF, dokončovací obrábění, jakost povrchu, konstrukce zařízení.

ABSTRACT

The submitted diploma thesis deals with construction of magnetorheological device intended for surface finishing. Theoretical review includes the traditional finishing processes, mechanical nanofinishing and nanofinishing processes with assistance of magnetic field. As a result of the practical part the magnetorheological device for finishing of flat surfaces was designed. Moreover, conclusion consists of price calculation of overall device.

Keywords: MRF, Finishing processes, Surface roughness, Device construction.

Rád bych touto cestou vyjádřil dík Ing. Ondřeji Bílkovi, Ph.D. za jeho cenné připomínky, trpělivost a ochotu při vedení mé diplomové práce.

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

OBSAH

ÚVOD.....	9
I TEORETICKÁ ČÁST.....	10
1 JAKOST POVRCHU	11
2 VYSOCE PŘESNÉ OBRÁBĚNÍ	17
3 BROUŠENÍ.....	21
3.1 MECHANISMUS VZNIKU TŘÍSKY	22
3.2 BROUSICÍ PROSTŘEDKY	24
3.3 METODY BROUŠENÍ	29
4 HONOVÁNÍ.....	38
4.1 HONOVACÍ PROSTŘEDKY	41
4.2 METODY HONOVÁNÍ.....	43
5 LAPOVÁNÍ.....	46
5.1 LAPOVACÍ PROSTŘEDKY	47
5.2 METODY LAPOVÁNÍ.....	49
6 SUPERFINIŠOVÁNÍ.....	53
6.1 SUPERFINIŠOVACÍ PROSTŘEDKY	54
6.2 ZÁKLADNÍ METODY SUPERFINIŠOVÁNÍ.....	54
7 VÁLEČKOVÁNÍ.....	57
7.1 VÁLEČKOVACÍ PROSTŘEDKY	59
7.2 METODY VÁLEČKOVÁNÍ.....	63
8 LEŠTĚNÍ A OMÍLÁNÍ	70
9 POKROČILÉ DOKONČOVACÍ PROCESY	74
9.1 MECHANICKÉ NANO-DOKONČOVACÍ PROCESY	74
9.2 NANO-DOKONČOVACÍ PROCESY S PODPOROU MAGNETICKÉHO POLE.....	81
10 SHRNUTÍ TEORETICKÉ ČÁSTI A CÍLE ČÁSTI PRAKTICKÉ.....	86
II PRAKTICKÁ ČÁST	87
11 VÝVOJ V OBLASTI PŘÍSTROJŮ PRO MRF	88
12 URČENÍ POHONU MAGNETU.....	92
13 URČENÍ POHONU NOSIČE	108
14 VOLBA OS	119
15 KONTROLNÍ VÝPOČET.....	120
16 CENOVÁ KALKULACE	127
ZÁVĚR	129
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	130
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	134
SEZNAM OBRÁZKŮ	138
SEZNAM TABULEK.....	141
SEZNAM PŘÍLOH.....	142

ÚVOD

Cílem předkládané diplomové práce je konstrukce zařízení pro magnetoreologické dokončování povrchů.

První kapitola se zabývá jakostí povrchu. Druhá kapitola podává úvod do problematiky vysoce přesného obrábění. Další kapitoly pojednávají o dokončovacích metodách obrábění. Devátá kapitola se zabývá pokročilými dokončovacími procesy. Popisuje mechanické nano-dokončovací procesy a nano-dokončovací procesy s podporou magnetického pole. Jedenáctá kapitola popisuje vývoj v oblasti přístrojů pro magnetoreologické dokončování povrchů. Dvanáctá a třináctá kapitola určují pohony zařízení. Patnáctá kapitola provádí kontrolní výpočet namáhaných částí zařízení. Šestnáctá kapitola uvádí cenovou kalkulaci zařízení.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 JAKOST POVRCHU

S rozvojem vědy a techniky a s uplatňováním jejich výsledků má stále větší význam problematika jakosti strojních součástí. Pod pojmem jakosti z hlediska technologie výroby je třeba chápat přesnost rozměrů, přesnost geometrického tvaru, polohy a drsnosti povrchu. K těmto hodnotám přistupuje ještě sledování chemických a fyzikálních změn vlastností materiálu v povrchové vrstvě obrobenej součásti, vzniklých v důsledku vlastního procesu řezání. Jakost povrchu a vlastnosti povrchové vrstvy, ovlivňují velmi výrazně životnost a spolehlivost provozu součástí. Na drsnosti povrchu závisí přesnost chodu strojních součástí, jejich hlučnost, doba záběhu, ztráty třením, elektrická vodivost, přestup tepla, únavová pevnost, odolnost proti opotřebení, odolnost proti korozi apod. Drsnost povrchu tedy ovlivňuje průběhy chemických a fyzikálních jevů, které provázejí činnost funkčního povrchu dané součásti. Sledování, hodnocení a využívání znalostí o drsnosti povrchu pro zvyšování jakosti, a tedy i efektivnosti strojních součástí je jedním ze základních úkolů vyplývajících ze zabezpečení spolehlivosti.

Moderní konstrukce jsou z velké části namáhány dynamicky. Proto je řada konstrukcí limitována únavovými činiteli, vlastnostmi materiálu, jeho strukturou apod. Příklady z provozů a analýza lomů dynamicky namáhaných součástí ukazují, že únavový lom vzniká obvykle na povrchu nebo těsně pod povrchem součásti. Bere-li se u součásti v úvahu její odolnost proti korozi pod napětím, pak je nutné zdůraznit, že povrch součásti, jeho stav a jeho mikrogeometrie jsou prvotními činiteli, které ovlivňují podmínky vzniku koroze a následující únavový lom. Z toho vyplývá, že kromě jiných vlastností je odolnost proti únavě přímo závislá na jakosti povrchu dokončené plochy.

Vztah mezi funkcí a jakostí povrchu plochy, která je vytvořena určitou technologickou metodou, je možné hodnotit ze dvou hledisek. Prvním je prostorové uspořádání (textura, morfologie) povrchu, které je vyjadřováno především jeho drsností. Druhým hlediskem jsou fyzikální a chemické vlastnosti povrchové vrstvy součásti. Jejich ovlivnění metodami výroby ve vztahu k funkci lze vyjádřit pojmem integrita povrchu. Integrita povrchu tak v sobě zahrnuje podmínky, za kterých funkční povrch vzniká, účinky technologických metod a jejich vliv na vlastnosti nově vytvořené plochy, a dává je do vztahu s funkčními požadavky na výrobek.

Během výroby mohou v důsledku výrobního procesu vzniknout na opracované ploše následující změny:

- a) povrch je plasticky deformován v důsledku mechanického a tepelného účinku,
- b) dochází k rekrystalizaci
- c) mění se tvrdost povrchové vrstvy,
- d) vznikají mikrotrhliny a makrotrhliny,
- e) vznikají zbytková napětí v povrchové vrstvě,
- f) dochází ke změnám vlastností povrchové vrstvy v důsledku chemické absorpce.

Tyto změny vznikají nejen při běžných hrubovacích operacích, ale i při operacích dokončovacích a mohou být možnými příčinami poruch, které snižují spolehlivost strojních součástí.

Z hlediska řízení jakosti funkčních ploch je nutné soustředit pozornost do oblasti:

- A. konstrukce,
- B. výroby,
- C. měření a kontroly.

Zásady pro konstruktéra:

1. Znat funkční požadavky na jakost povrchu součástí, které jsou navrhovány.
2. Volit nejen doporučené údaje z literatury, ale sledovat jejich vhodnost na navrhovaných součástech a korigovat je podle výsledků z provozu.
3. Nenavrhovat povrchy jemnější, než je nutné z hlediska funkce, protože takové povrchy jsou ekonomicky nákladnější.
4. Mít na mysli, že správně dokončené plochy zlepšují funkci, stejně jako velmi hrubé dokončení vede k nesprávné funkci.
5. Nepředepisovat na výkresu více kontrol, než je skutečně nutné.
6. Jestliže jen část dokončených ploch je významná z hlediska funkce, naznačit to na výkresu tak, že se dílenská kontrola bude starat o to, aby požadavky na tyto plochy byly dodrženy a nedošlo k jejich poškození.
7. Kde nejsou požadavky na drsnost povrchu zvlášť výrazné, ponechat na vůli dílny, aby je upravila podle svých zvyklostí.
8. Uvědomit si, že hodnoty drsnosti povrchu nemohou být změřeny přesně.
9. Čím nižší drsnost povrchu je předepsána na výkresu, výroba je nákladnější a také měření nemůže být tak přesné.

10. Při zjištění, že drsnost povrchu předepsaná na výkresu, okamžitě provést její opravu. Brát v úvahu připomínky z dílny, pokud vyplynou z provozních zkoušek.
11. Vést záznamy o navrhovaných a zkoušených površích, které splnily požadované funkční vlastnosti.

Zásady pro technologa:

1. Seznámit se s nejefektivnějším způsobem výroby ploch a požadovanou drsností povrchu.
2. Seznámit se s významem charakteristik drsnosti povrchu na výkresech, aby je bylo možné správně zabezpečit.
3. Z ekonomických a časových důvodů nevyrábět plochy hladší, než je nutné pro funkci dané součásti.
4. Uvědomit si, že hodnoty drsnosti povrchu nejsou přesná čísla. Je proto nutné se k nim co nejvíce přiblížit.
5. Zajistit bezpečnou ochranu součástí s významnými přesně dokončenými funkčními plochami, které nesmějí být poškozené. Také při montáži kontrolovat, zda tyto významné funkční plochy nejsou poškozené.
6. Při jakékoliv nejistotě o významu a hodnotě drsnosti povrchu tento údaj porovnat s konstrukcí.
7. Uvědomit si, že každá drsnost povrchu má svůj určitý směr nerovností. Je-li předepsán směr nerovností, pak to znamená, že drsnost by měla být orientována převážně v tomto směru.

Zásady pro kontrolora:

1. Správné pochopení a posouzení drsnosti povrchu kontrolou musí vycházet z funkčních požadavků na hodnocenou plochu.
2. Není nutné trvat na absolutním dodržení výkresové hodnoty drsnosti povrchu, je-li zjištěná hodnota dostatečná ke splnění funkce, např. je-li nižší.
3. Při každodenní práci je třeba si uvědomit, že výrobky musí správně plnit svoji funkci. Je proto nutné zajímat se i o výsledky provozu, a nejen o naměřené číselné hodnoty.
4. Při zjištění, že kontrolované plochy jsou zbytečně hladké je třeba o tom informovat konstruktéra, který součást navrhoval. [1]

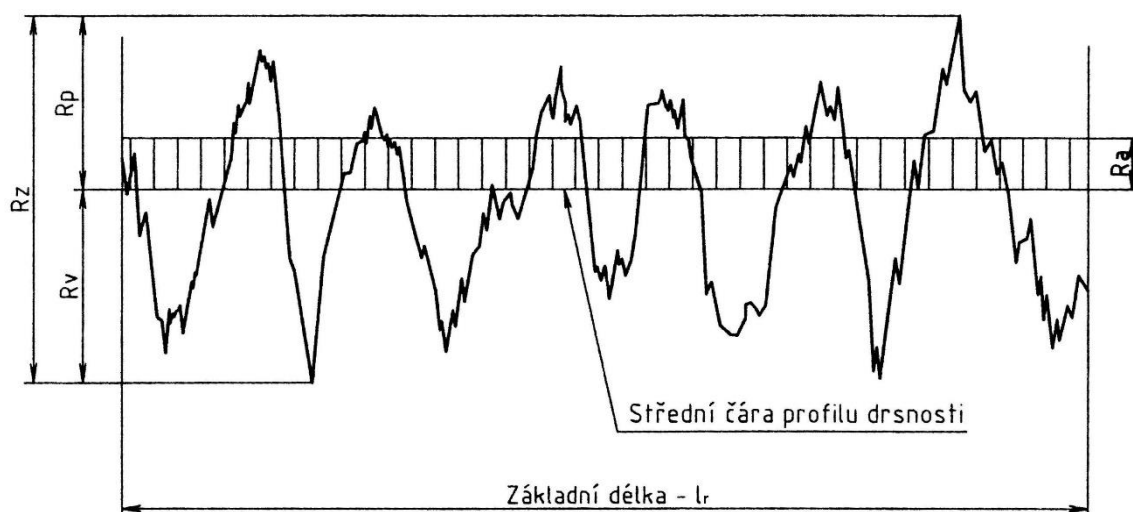
Pro současnou praxi je rozhodující technicky známý a výrobou ověřený parametr drsnosti R_a . Je to parametr profilu drsnosti povrchu ve směru výšky. Střední aritmetická úchylka profilu R_a je aritmetický průměr absolutních hodnot pořadnic $Z(x)$ v rozsahu základní délky l_r . Definici je možno vyjádřit rovnicí

$$R_a = \frac{1}{l_r} \int_0^{l_r} |Z(x)| dx \quad [\mu\text{m}]. \quad (1)$$

R_a – střední aritmetická úchylka profilu $[\mu\text{m}]$,

$Z(x)$ – hodnota pořadnice – výška posuzovaného profilu v libovolné poloze x $[\mu\text{m}]$,

l_r – základní délka $[\text{mm}]$.



Obr. 1. Průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu R_a [2]

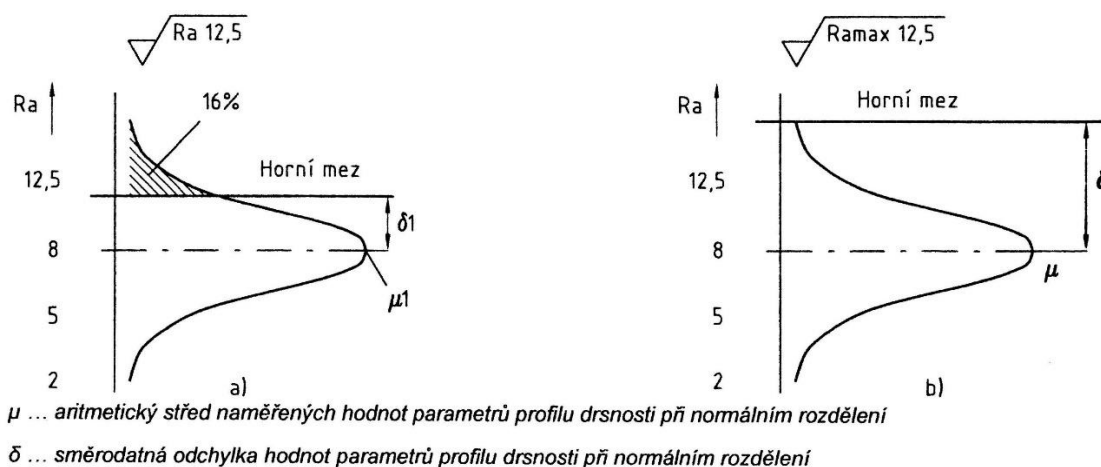
Střední čára je čára probíhající středem vrcholů a prohlubní, kdy součet ploch ohraničených profilem nerovnosti nad touto čarou je roven součtu ploch pod touto čarou.

Parametr R_a nereaguje citlivě na extrémní výšky hrotů profilu a hloubky rýh profilu.

Největší výška profilu R_z (součet výšky nejvyššího výstupku profilu R_p a hloubky nejnižší prohlubně profilu R_v v rozsahu základní délky). Dřívější parametr R_z byl definován jako výška nerovností profilu z deseti bodů (pěti nejvyšších výstupků a pěti nejnižších prohlubní v rozsahu základní délky).

Při vyhodnocování platí pravidlo 16 %, které říká, že povrch je považován za přijatelný, jestliže uvedenou horní mez přesáhne maximálně 16 % naměřených hodnot a uvedenou

dolní mez nedosáhne maximálně 16 % naměřených hodnot. Při předpisu maxima nesmí žádná z naměřených hodnot přesáhnout uvedenou hodnotu. [1, 2]



Obr. 2. Vyhodnocování drsnosti povrchu [2]

a) pravidlo 16 % při jednostranném tolerování horní meze, b) pravidlo maxima při jednostranném tolerování horní meze

Tab. 1. Směrnice pro použití parametru R_a [2]

R_a [μm]	Směrnice pro použití
0,012	Nejhladší funkční plochy, které mají mít co nejmenší opotřebení při vysokých tlacích nebo vysokou zobrazivost. Měřicí plochy nejpřesnějších měřidel, např. základních měrek, metalografické výbrusy.
0,025	Kluzné plochy s velkou kluznou rychlostí a s velkým tlakem, které mají co nejmenší opotřebení, funkční plochy valivých ložisek. Měřicí plochy přesných měřidel, např. některých kalibrů.
0,05	Velmi přesné funkční plochy, které mají mít malé opotřebení, úložné plochy měřicích přístrojů, činné plochy kalibrů a některých měřidel. Volné plochy se stupnicemi k optickému odečítání.
0,1	Kluzné plochy hřídelí pro přesná uložení s malou vůlí, čelní opěrné plochy axiálních ložisek, lapované písty a díry hydraulických zařízení. Činné plochy měřidel. Leštěné plochy s nízkou zobrazivostí, základní povrch pro ozdobné elektrolytické pokovování těžkými neželeznými kovy.
0,2	Kluzné plochy smykadel a přesných ložiskových pouzder, přesná vedení s občasným pohybem a středící plochy měřicích přístrojů, přípravků. Těsnicí kuželové plochy. Volné povrchy leštěné pro zvýšení únavové pevnosti. Přesné technologické základny pro další operace a kontrolu.
0,4	Kluzné plochy se střední kluznou rychlostí a středním tlakem, vodící plochy u obráběcích strojů. Stykové plochy nepohyblivých rozebíratelných uložení a za studena lisovaných uložení menších rozměrů. Funkční plochy broušených ozubených kol, šneků, vaček, boky závitů pohybových šroubů.

0,8	Kluzné plochy s menší kluznou rychlostí (běžné provedení). Stykové plochy pro narážená a lisovaná uložení, válcové středící plochy rozebíratelné. Těsnicí plochy před zabroušením. Funkční plochy řemenic pro obvodovou rychlost nad $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Leštěné plochy rukojetí, pák a tlačítek.
1,6	Kluzné plochy hřídelí a ložisek s občasným nebo ručním pohybem. Vodicí plochy s občasným vzájemným pohybem, např. drážky pro klíny a pera. Stykové plochy dělených skříní a vík pro tenká a tvrdší těsnění.
3,2	Kluzné plochy s velmi malou kluznou rychlostí a bez nároku na přesnost uložení. Stykové plochy bez velkých požadavků na těsnost a přesnost styku, těsnicí plochy pro měkká těsnění, volné plochy otáčejících se součástí obrobené pro dynamické vyvážení, plochy pro netmelené nátěry.
6,3 12,5	Hrubě obrobené dosedací plochy bez vzájemného pohybu. Volné obrobené plochy, které nejsou funkční, např. čelní plochy hřídelí, ozubených kol a řemenic, obrobené plochy pro upínání při výrobě, plochy pro návary.

2 VYSOCE PŘESNÉ OBRÁBĚNÍ

Obrábění zůstává stále nejdůležitější technologickou operací při výrobě přesných strojních součástí. Obráběním vytvořený povrch ale ovlivňuje funkční spolehlivost a životnost těchto součástí. Na něm, nebo těsně pod ním začínají procesy poruch, únavy, koroze apod. Obráběním vzniká povrch a povrchová vrstva určitého charakteru s rozdílnými vlastnostmi od vnitřní hmoty materiálu součástí. Vzniklé změny se týkají nejen textury povrchu, ale i změn z hlediska fyzikální metalurgie.

Vysoce přesné technologické procesy dnes zajímají konstruktéry, technology, metrology i pracovníky provozů. Konstruktéry, protože tyto vysoce přesné technologické procesy jsou cestou k úspěšnému zavádění moderních konstrukcí, a při uplatňování miniaturizace výrobků.

Technologům tyto procesy umožňují dokončovat součásti s tolerancemi v nanometrech a se zrcadlově lesklým povrchem. Takové povrchy se uplatní nejen ve strojírenství, ale především v oborech jako je elektronika, optika, biomedicína apod.

Metrologové mají možnost využívat nové kontrolní a měřicí metody, které zaručují vysokou jakost výrobků, a tak přispívat k vyšší spolehlivosti a životnosti zařízení.

Pracovníci provozů budou moci spoléhat na to, že výrobky, které budou využívat a obhospodařovat budou funkčně na požadované úrovni.

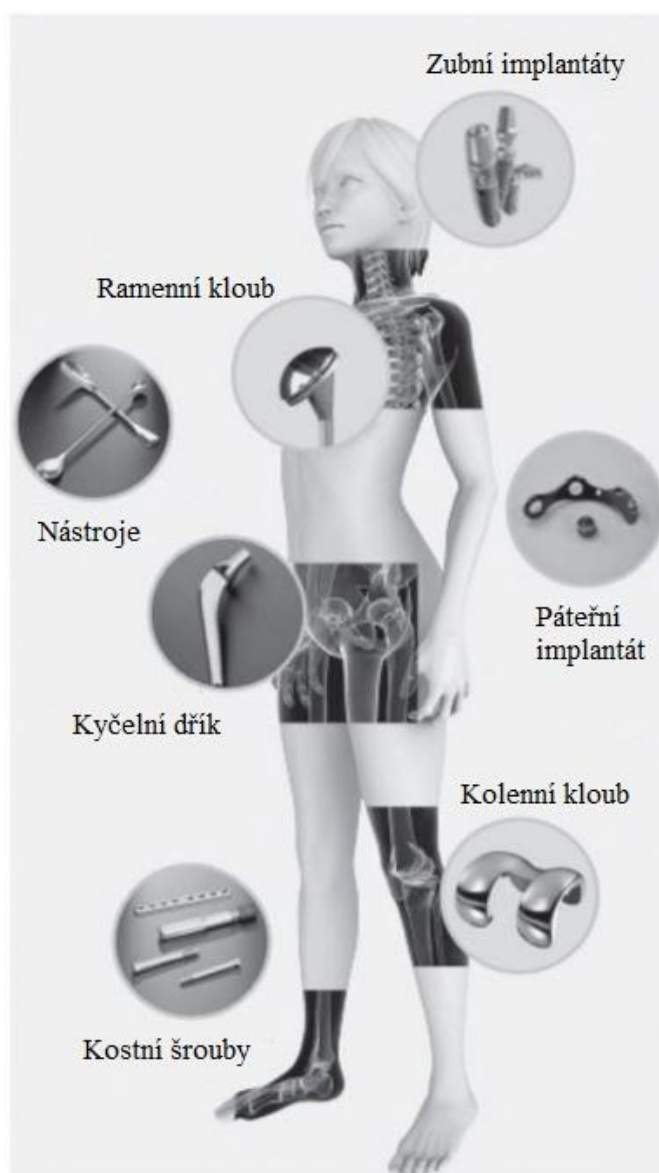
Podstatou těchto vysoce přesných technologických procesů je odebrání malých rozměrů přídavků, tj. malých třísek u operací s malými posuvy a malými hloubkami řezu. Tím vznikají jisté problémy, které musí být řešeny správnou volbou materiálu obrobku, geometrie nástroje a pracovními podmínkami.

Znalosti mechanismu oddělování materiálu při vysoce přesných technologických operacích přispívají nejen ke stanovení vlastností nově vytvářeného povrchu, ale slouží i ke snižování vzniku možných poruch na povrchu a v podpovrchové vrstvě.

Nové požadavky na strojní součásti, které se uplatňují v posledních letech, vycházejí ze snahy o zvyšování přesnosti výroby, ze snahy o zavádění nových, pokrokových výrobních technik a ze snahy uplatňovat přesnější kontrolní metody. Přesnější výroba znamená zlepšování provozních vlastností výrobků, především těch, které pracují v extrémních podmínkách zatěžování anebo na které jsou kladeny zvláštní funkční požadavky. Rozsah

přesného strojírenství a zavádění vysoce přesných technologických procesů růste, protože jsou klíčem k rozvoji průmyslu i obchodu.

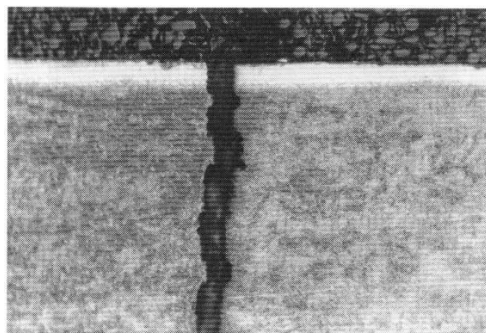
Výsledná přesnost výrobku je dána jeho úchylkami, které jsou vyvolány geometrickými, kinematickými a dynamickými účinky výrobních procesů. Výsledná přesnost není ovlivněna jen makroskopickými chybami tvaru a rozměru, ale i mikroskopickými úchylkami, které se promítají do vlastností povrchové vrstvy. Ukazuje se, že u řady funkčních vlastností je to rozhodující údaj. [3]



Obr. 3. Biomedicínské implantáty vyžadující vysokou jakost povrchu [4]

Požadovaná miniaturizace rozměrů součástí klade vysoké nároky na výrobní procesy a technologie. Množství odebíraného materiálu při vysoce přesném obrábění se pohybuje pod 1 μm nebo méně. Dosažitelná přesnost až 1 nm se dá dosáhnout jak řeznými nástroji, tak i metodami abrazivními a procesy, které využívají svazek elektronů a laser. Z hlediska obráběného materiálu je hlavním a důležitým úběr velmi malého množství materiálu (často o rozměrech atomové mřížky), minimalizovat nebo vyloučit křehký lom při vysoce přesném dokončování, dále požadavek tvarové přesnosti a vysoké požadavky na integritu povrchu. Tyto požadavky na integritu povrchu zahrnují minimální změny v povrchu dokončované plochy, nebo těsně pod ní, včetně metalurgických změn, zbytkových napětí, vad, jakou jsou mikrotrhliny apod.

Základní problém vysoce přesných metod obrábění je v množství poruch v povrchové vrstvě, které se projevují trhlinami.



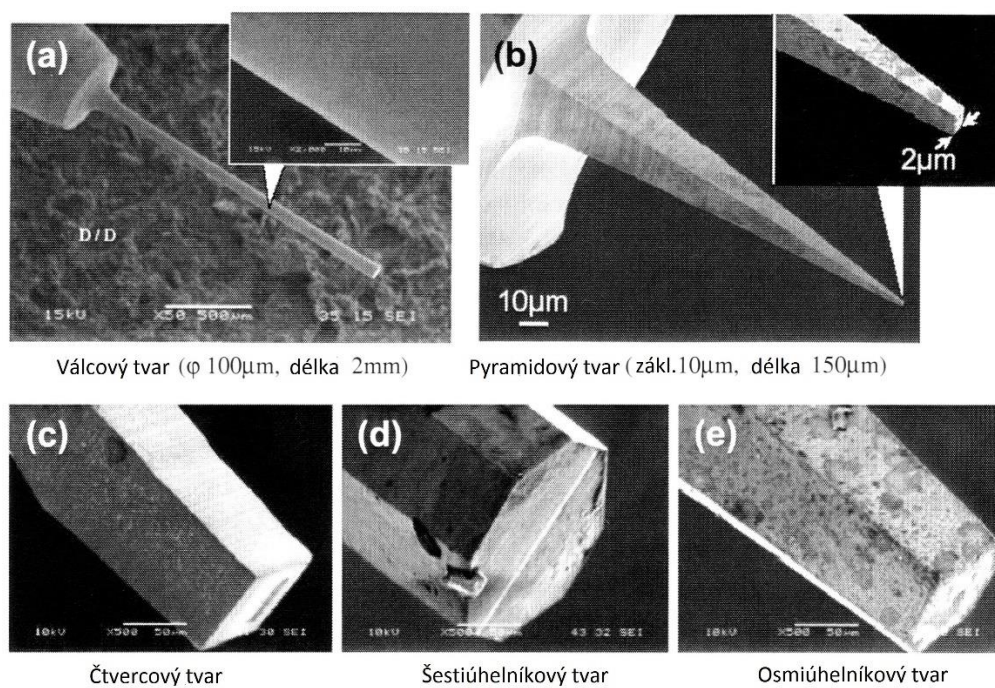
Obr. 4. Povrchová trhлина vzniklá broušením [5]

Vysoce přesné integrované systémy vycházejí z respektování následujících předpokladů nutných pro realizaci vysoce přesného obrábění:

- a) vysoce přesné, velmi tuhé stroje bez chvění,
- b) vysoká tuhost mezi nástrojem a obrobkem,
- c) vysoká rozlišitelnost při řízení pracovních pohybů,
- d) tepelná stabilita,
- e) řízení zpětné vazby,
- f) vysoce čisté pracovní prostředí,
- g) vysoce přesné a výkonné metrologické systémy,
- h) miniaturní rozměry zrn brusiva,
- i) orovnávaní brousicích kotoučů během broušení.

Při vysoce přesném obrábění jednobřitým nástrojem se dosahuje drsnosti povrchu

$$R_a = (0,2 \text{ až } 1) [\mu\text{m}]. [3]$$



Obr. 5. Mikro-nástroje [5]

3 BROUŠENÍ

Broušení je dokončovací metoda obrábění rovinných, válcových a tvarových vnějších a vnitřních ploch nástrojem, jehož břity jsou tvořeny zrna tvrdých materiálů, vzájemně spojených vhodným pojivem. Při broušení dochází k hromadnému oddělování malých částí povrchových vrstev těles zrna brusiva (mikrořezání), které jsou volné nebo stmelené pojivem v nástroj. Hlavní řezný pohyb je rotační a jeho rychlost je nejčastěji $35 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. V současné době plní broušení ve strojírenské výrobě tyto hlavní funkce:

- a) Opracování součástí na přesný geometrický tvar a rozměry, s vysokou jakostí povrchové vrstvy – používá se téměř pro všechny funkční plochy v sériové a hromadné výrobě strojních součástí, kde se vyžaduje jejich vzájemná vyměnitelnost.
- b) Opracování součástí a materiálů, pro něž je jiný způsob obrábění obtížný nebo nemožný – největší část operací spadajících do této skupiny se vztahuje na broušení obrobků z kalené oceli, z těžko obrobitelných žárovevných ocelí a slitin speciálních řezných materiálů, nekovových těžko obrobitelných materiálů apod. Spadá sem také např. celý rozsáhlý obor broušení skla.
- c) Opracování součástí a materiálů, pro něž je broušení nejehospodárnější – s vývojem výkonných broušicích nástrojů a brusek se význam broušení rozšiřuje z původní funkce při dokončování i na vysloveně hrubovací operace. Ukazuje se, že z hlediska produktivity i výrobních nákladů může broušení konkurovat ostatním metodám obrábění. Hlavní úspory času i nákladů vyplývají z nižších nároků na upínání a manipulaci s obrobkem, na výměnu a údržbu nástrojů a odvod třísek. Při výkonném broušení lze většinou vhodným režimem dosáhnout toho, že hrubovací a dokončovací fáze výrobního postupu mohou proběhnout na stejném stroji při jediném upnutí. Zpravidla je to možné a výhodné na tepelně zpracovaném obrobku.

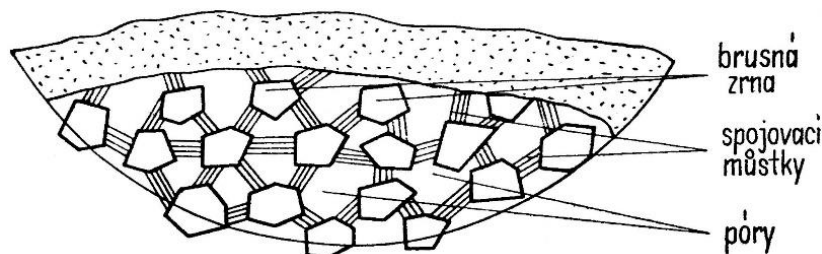
Lze očekávat, že význam broušení bude i nadále vzrůstat, neboť se širším uplatňováním metod přesného kování, lití a práškové metalurgie bude zřejmě hospodárné opracovávat tyto polotovary na čisto již jen broušením. [6, 7, 8, 9, 10, 11]

3.1 Mechanismus vzniku třísky

Rozbor jevů při obrábění extrémně velkými řeznými rychlostmi a malými průřezy třísek ukázal, že je i pro broušení možné předpokládat stejné zákonitosti a vztahy jako pro jiné způsoby obrábění. Je však nutno brát v úvahu tyto zvláštnosti procesu broušení:

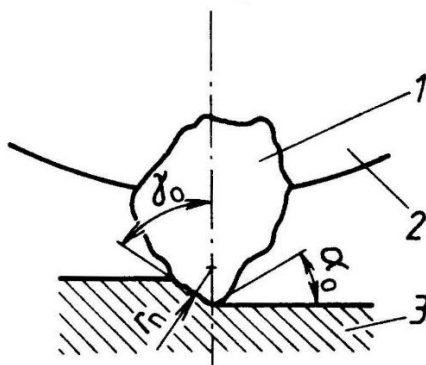
- 1) Různovitost geometrické formy zrn brusiva a neurčitost jejich vzájemné polohy, které mají za následek nepravidelný úběr třísky jednotlivými zry.
- 2) Nestejné, ale všeobecně velké záporné úhly čela zrn brusiva, silně ovlivňující charakter jejich práce (primární plastické deformace a tření v oblasti vzniku třísky).
- 3) Poměrně slabé upevnění zrna ve vazbě brousicího kotouče, čímž je omezena maximální řezná síla, kterou je toto uložení zrna schopno přenést. Samovolné uvolňování zrn brusiva při broušení, tzv. samoostření, je další charakteristickou vlastností práce brousicího nástroje.
- 4) Malé průřezy třísek (řádově 10^{-3} mm^2) a vysoké řezné rychlosti ($30 \text{ až } 100 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$). Doba záběru zrna brusiva s obrobkem je (10^{-4} až 10^{-5}) s.

Mechanismus vzniku třísky při broušení závisí především na tom, zda je zrno brusiva v brousicím nástroji vázáno (brousicí kotouče, tělíska, kameny) nebo je volné.



Obr. 6. Schéma struktury brousicího nástroje [6]

Při vázaném zru brusiva lze charakterizovat vznik třísky obdobně jako při frézování. Při mikroskopickém sledování třísek při broušení plastických materiálů je vidět, že vzniká tříska plynulá, která se v podstatě neliší od třísky vytvořené záběrem jiných nástrojů s kovovým břitem. Určitá část třísek, která byla odebrána břity se zvlášť nevhodnou geometrií, se v důsledku velkých plastických deformací a tření (vnějšího i vnitřního) ohřeje natolik, že se roztaví a vytvoří kapky, nebo dokonce shoří (jiskření).



Obr. 7. Záběr zrna brusiva [10]

1 – zrno, 2 – brousicí kotouč,
 3 – obrobek, α_o – ortogonální
 úhel hřbetu, γ_o – ortogonální
 úhel čela, r_n – poloměr ostří

Při správně zvolených řezných podmínkách a režimu broušení se otupená zrna z brousicího nástroje vylamují, a uvolňují tak místo novým, ostrým zrnům. Jestliže je řezný odpor působící na zrno příliš malý nebo je pevnost pojivových můstků příliš velká, otupená zrna se neuvolní, kotouč špatně řeže a nadměrně zahřívá broušený povrch. V opačném případě se předčasně vylamují ještě dostatečně ostrá zrna brusiva a kotouč se nadměrně opotřebovává.

Patří ke zvláštnostem a také k výhodám broušení, že mechanismus samoostření lze regulovat nejen vlastnostmi brousicího nástroje (tvrdostí, strukturou atd.), ale také vlastními řeznými podmínkami. Vhodnou změnou řezných podmínek lze totiž ovlivnit řezné síly působící na jednotlivá zrna, a tím intenzitu jejich vylamování z pojiva. Řezná síla působící na jedno zrno je úměrná průřezu (tloušťce) třísky odebírané tímto zrnem.

Důležitým ukazatelem hospodárnosti a účinnosti broušení je poměrný úbytek broušení (brusný poměr), který je dán poměrem objemu odbroušeného materiálu V_m a objemového úbytku kotouče V_k , $k = \frac{V_m}{V_k}$. Poměrný úbytek broušení závisí na mnoha činitelích procesu broušení. Jsou to hlavně vlastnosti brousicího kotouče ve vztahu k vlastnostem materiálu, řezné podmínky při broušení, druh, způsob přívodu a množství řezné kapaliny, tuhost soustavy stroj – nástroj – obrobek – přípravek a další okolnosti. Průměrná velikost tohoto poměru se pohybuje od hodnoty 10 a menší pro materiály těžko obrobitelné až k hodnotě 100 pro dobře obrobitelné materiály a vhodné podmínky broušení. [6, 7, 8, 9, 10, 11]

3.2 Brousicí prostředky

Brousicí prostředky rozdělujeme na:

- a) brousicí nástroje,
- b) brousicí pomůcky.

U brousicích nástrojů jsou zrna vázána pevně v tuhých nebo pružných tělesech různých velikostí a tvarů. Brousicí pomůcky jsou volná zrna brusiva, používaná jako brousicí, lešticí a lapovací prášky a pasty.

Brousicí nástroje mají velký rozsah použití:

- A. brousicí, řezací a drážkovací kotouče,
- B. brousicí tělíka,
- C. superfinišovací a honovací kameny,
- D. brousicí a obtahovací kameny a segmenty,
- E. brousicí pilníky,
- F. brousicí a lešticí plátna a papíry.

Všeobecná charakteristika brousicího nástroje (kotouče) je dána:

- 1) druhem brousicího materiálu,
- 2) zrnitostí brousicího materiálu,
- 3) tvrdostí,
- 4) strukturou nástroje,
- 5) druhem pojiva,
- 6) rozměry kotouče.

Brousicí materiály

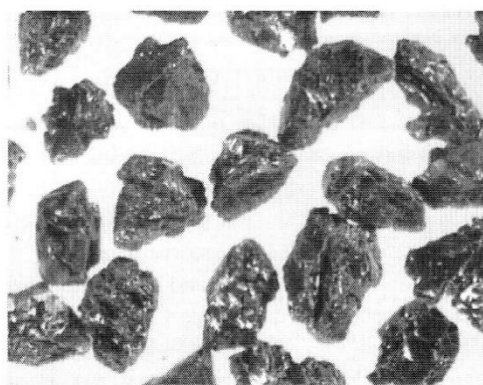
Jako brousicí materiál lze označit každou látku, které se pro její vyšší tvrdost používá k opracování povrchu jiných těles oddělováním malých částic.

Podle původu se dělí brusivo na přírodní a umělé. Mezi přírodní brusiva patří diamant, křemičitý písek, pískovec, přírodní korund, smírek, pazourek, pemza a granát.

Kromě diamantu se tato přírodní brusiva pro nestejnou kvalitu používají průmyslově jen výjimečně a pro méně náročné práce (brousicí papíry a plátna pro broušení dřeva apod.).

Broušení se v průmyslu významně rozšířilo uvedením uměle vyráběných brusiv: karbidu křemíku SiC a oxidu hlinitého Al_2O_3 .

Umělý korund je krystalická látka, která kromě hlavní složky – oxidu hlinitého Al_2O_3 – obsahuje malá množství příměsí a nečistot. Nejčastěji používané druhy umělého korundu jsou: bílý A99, růžový A98 a hnědý A96. Jako brusivo se vyrábějí dva druhy karbidu křemíku: zelený C49 a černý C48. Dále se používají: karbid boru B_4C , kubický nitrid boru KNB a syntetický diamant.



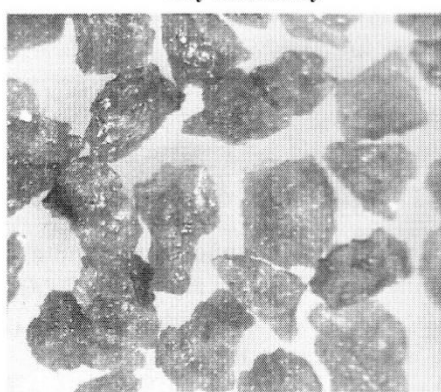
Zelený karbid křemíku



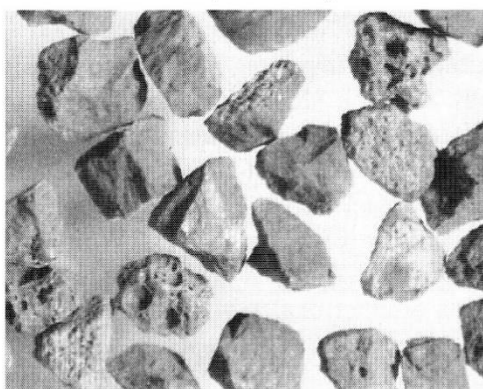
Bílý oxid hlinitý



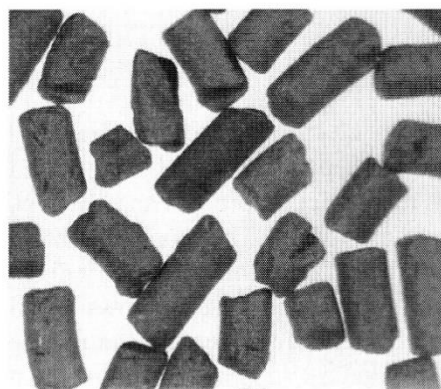
Hnědý oxid hlinitý



Růžový oxid hlinitý



25% Oxid zirkoničitý-oxid hlinitý



Sintrovaný vytlačovaný oxid hlinitý

Obr. 8. Broušící materiály [5]

Pojiva brousicích nástrojů

Pojivo spojuje zrna brusiva do požadovaného tvaru brousicího nástroje.

Pro brousicí kotouče z umělého korundu a karbidu křemíku všech druhů se nejčastěji používají pojiva keramická (označení V). Keramická pojiva obsahují v různém poměru směsi keramických surovin, jako je živec, kaolin a mastek. V zásadě se používají tři typy keramických pojiv:

- skelná – hlavně pro brousicí nástroje z umělých korundů,
- porcelánová – pro brousicí nástroje z karbidů křemíku a zvlášť rozměrné nástroje z umělých korundů,
- hlinitá – pro speciální účely.

S keramickými pojivy lze vyrábět nástroje ve všech zrnitostech, tvrdostech a struktuře. Důležitou předností keramických pojiv je možnost dosažení širokého rozmezí struktury, od hutné struktury s prakticky nulovým obsahem pórů až do obsahu pórů nad 60 % objemu nástroje. Tato pojiva nejsou citlivá na vlhkost a teplotu, což umožňuje neomezenou dobu skladování. Tato pojiva jsou však křehká, což zvyšuje jejich citlivost vůči rázům a bočním tlakům, a tím i nebezpečí destrukce. Také nižší pevnost nedovoluje bez zvláštních úprav překročit obvodové rychlosti kotoučů $60 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Keramická pojiva jsou odolná vůči chemickému působení řezných kapalin a dobře snáší i působení vysokých teplot vznikajících při broušení.

Magnezitové pojivo se vyrábí ze směsi uhličitanu hořečnatého, vypáleného v tzv. kaustický magnezit, a chloridu hořečnatého. Toto pojivo se nevypaluje ani nesusí, takže lze jednoduchým způsobem vyrábět kotouče velkých rozměrů. Tato pojiva jsou citlivá na vlhkost, čímž dochází při skladování k poklesu pevnosti. Jeho hlavní výhodou je, že pracuje s nižšími teplotami při broušení (tzv. chladný výbrus), a používá se proto především k ostření nástrojů z uhlíkové oceli. Povolené obvodové rychlosti se pohybují v rozmezí (15 až 25) $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$.

Kovová pojiva se používají u nástrojů s brusivem z diamantu a z kubického nitridu boru.

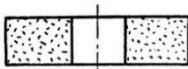
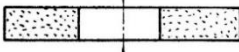
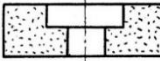
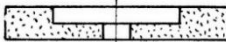
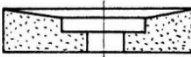
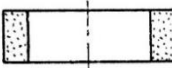
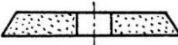
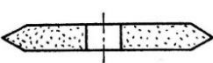
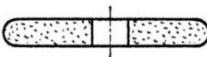
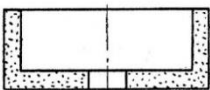
Ze skupiny organických pojiv jsou nejrozšířenější pojiva z umělých pryskyřic a pojiva pryžová. Pojiva z umělých pryskyřic se vyznačují vysokou pevností, což je předurčuje pro výrobu řezacích kotoučů (bývají vyztuženy sklotextilní výztuží). S rostoucí teplotou při broušení organické pojivo měkne, a tím se dosáhne ve spojení s jemnými zrny brousicího

materiálu nízké drsnosti a vysokého lesku broušené plochy. Kotouče mohou pracovat při obvodových rychlostech (45 až 80) $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, řezací a drážkovací kotouče až $100 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

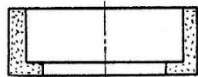
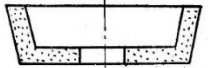
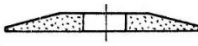

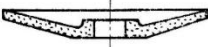
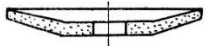
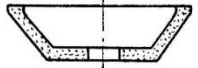
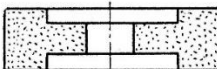
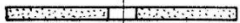

Pryžová pojiva se vyrábějí z přírodního nebo umělého kaučuku, síry a urychlovače k vytvrzování. Vyznačují se vysokou pružností, a používají se proto na výrobu řezacích a drážkovacích kotoučů, leštících kotoučů a podávacích kotoučů pro bezhroté brusky.

Tvrдость

Jednou z charakteristik broušícího nástroje, které nejvýznamněji ovlivňují průběh a výsledky broušení, je tzv. tvrdost broušícího nástroje. Tato tvrdost nevyjadřuje skutečnou tvrdost broušícího materiálu, ale je mírou houževnatosti a pružnosti pojivových můstků mezi zrnny, jakož i soudržnosti pojiva se zrnny. Závisí tedy nejen na vlastnostech pojiva, ale i na počtu a velikosti můstků, velikosti, počtu a tvaru zrn. Je definována jako odpor, který klade pojivo broušícího nástroje proti vylomení nebo uvolnění zrn broušícího materiálu.

Broušící kotouče — ploché ČSN 22 4510	
— ploché Průměr 1 000 až 2 000 mm ČSN 22 4515	
— s jednostranným vybráním ČSN 22 4520	
— na ostření vrtáků ČSN 22 4521	
— se zkoseným vybráním ČSN 22 4522	
— prstencové ČSN 22 4530	
— jednostranně zkosené ČSN 22 4540	
— oboustranně zkosené ČSN 22 4541	
— zaoblené ČSN 22 4542	
— hrncovité ČSN 22 4550	

Obr. 9. Základní tvary broušících kotoučů a tělísek [6]

— hrncovité s velkou dírou ČSN 22 4551	
— miskovité ČSN 22 4552	
— kuželovité ČSN 22 4560	
— na ostření nožů žacíh strojů ČSN 22 4562	
— talířovité ČSN 22 4580	
— talířovité na broušení ozubených kol ČSN 22 4582	
— na frézy na dřevo ČSN 22 4581	
Podávací kotouče pro bezhroté brusky ČSN 22 4524	
Řezací a drážkovací kotouče ČSN 22 4513	
Řezací kotouče na kámen ČSN 22 4590	

Obr. 10. Základní tvary brousicích kotoučů a tělísek [6]

[6, 7, 8, 9, 10, 11]

3.3 Metody broušení

Metody broušení a typy brousicích strojů jsou charakterizovány tvarem broušených ploch, způsobem upnutí obrobku a kinematikou pracovních pohybů.

Při strojním broušení se při volbě řezných podmínek rozlišují tyto způsoby:

Broušení vnějších rotačních ploch

Při broušení vnějších rotačních ploch na hrotových bruskách se doporučuje obvodová rychlost brousicího kotouče pro ocel (25 až 35) $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, pro litinu 25 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$.

Při jemném broušení a leštění se obvykle snižuje obvodová rychlost brousicího kotouče až na 15 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$. Obvodová rychlost obrobku se volí pro ocel broušenou na hrubo (15 až 20) $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$, na čisto (8 až 15) $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$, pro litinu broušenou na hrubo (15 až 22) $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$, na čisto (12 až 16) $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ a pro hliník (20 až 30) $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$.

Podélný posuv (šířka kotouče na jednu otáčku obrobku) se volí (2/3 až 3/4) šířky kotouče, při jemném broušení 1/2, při zvlášť jemném broušení (1/10 až 1/5) šířky kotouče.

Přísuv (při zapichovacím způsobu) v mm na otáčku má být při broušení na hrubo (0,002 až 0,075) mm, při broušení na čisto (0,001 až 0,005) mm.

Při bezhrotém broušení se používá: obvodová rychlost brousicího kotouče

(30 až 35) $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, obvodová rychlost podávacího kotouče (0,3 až 9) $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, přísuv podle materiálu a posuvu (0,005 až 0,3) $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$.

Broušení děr

Při broušení vnitřních rotačních ploch rozeznáváme dva případy:

- a) obrobek se otáčí,
- b) obrobek je nehybný.

Do druhého způsobu je řazeno planetové broušení. Brousící kotouč koná planetový pohyb i podélný posuv. U broušení vnitřních ploch se předpokládají stejné pohyby jako u broušení vnějšího. Obvodová rychlost brousicího kotouče je pro materiály houževnaté (25 až 30) $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, pro materiály křehké (18 až 25) $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, obvodová rychlost obrobku (15 až 35) $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$. Posuv je 3/4 šířky brousicího kotouče na 1 otáčku obrobku. Brousící kotouč má být co největší, asi (3/4 až 4/5) průměru broušeného otvoru. Brousící vřeteno má být co

nejtužší, aby bylo zabráněno chvění. Podle možnosti se má brousit s použitím řezné kapaliny.

Rovinné broušení

Rovinné plochy se brousí buď obvodem kotouče, nebo jeho čelem. Obrobek koná posuv přímočarý nebo otáčivý, v některých případech posuv koná nástroj. Zrnitost a tvrdost broušícího nástroje se volí podle velikosti styčné plochy mezi kotoučem a obrobkem. Všeobecně platí, že čím větší je styčná plocha, tím má být broušící kotouč měkčí a hrubší. Obvodová rychlost kotouče se volí pro materiály houževnaté (25 až 32) $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, pro materiály křehké (18 až 25) $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$. U širšího kotouče a většího průměru se volí zrnitost hrubší a tvrdost měkčí, u užšího kotouče se volí tvrdost poměrně vyšší.

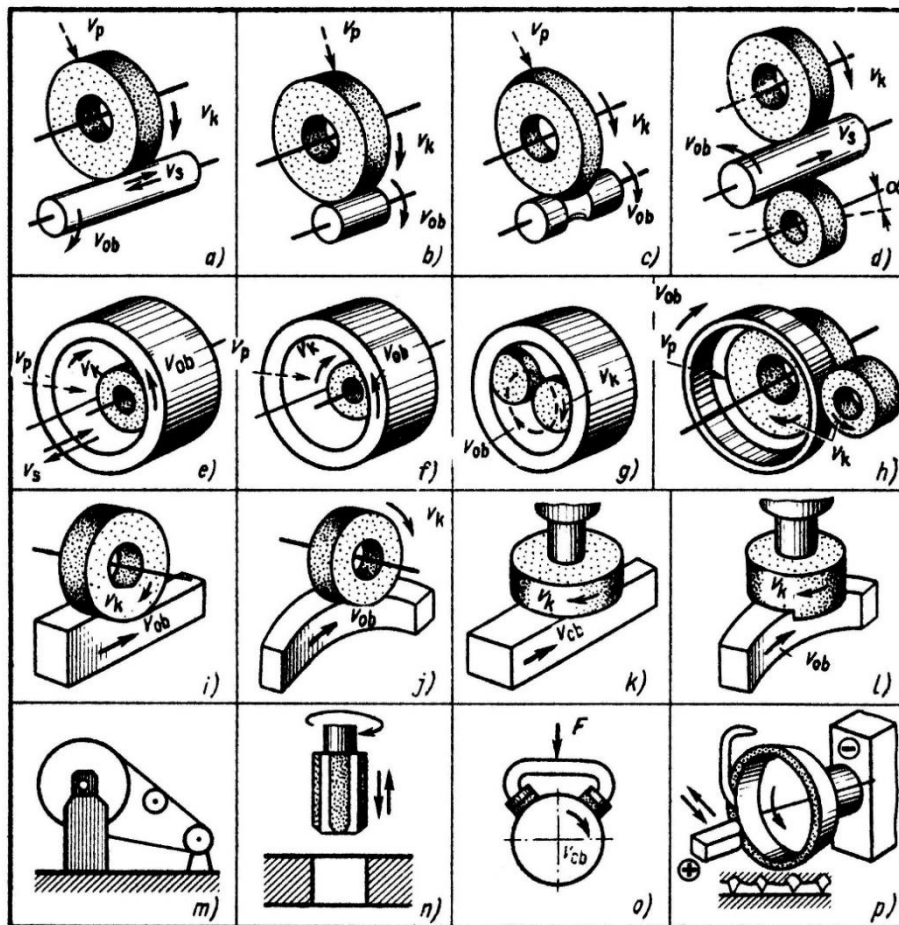
Tab. 2. Hodnoty řezných podmínek pro rovinné broušení obvodem kotouče [6]

Podélný vratný pohyb stolu	
Měkká ocel	(10 až 18) $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$
Tvrdá ocel	(8 až 12) $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$
Litina	(10 až 15) $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$
Příčný posuv	
Při broušení na hrubo	(2/3 až 4/5) šířky kotouče
Při broušení na čisto	(1/2 až 2/3) šířky kotouče
Při zvlášť jemném broušení	(1/10 až 1/5) šířky kotouče
Přísuv na zdvih	
Při broušení na hrubo	(0,015 až 0,04) mm
Při broušení na čisto	(0,005 až 0,015) mm
Kruhový pohyb stolu	
Obvodová rychlost při broušení na hrubo	(20 až 60) $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$
Obvodová rychlost při broušení na čisto	(40 až 60) $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$
Přísuv na zdvih	
Při broušení na hrubo	(0,005 až 0,015) mm
Při broušení na čisto	(0,005 až 0,01) mm

Při broušení čelem hrncovitého nebo segmentového kotouče se volí průměr broušícího kotouče obvykle větší, než je šířka broušené plochy. Broušící kotouč se na konci každého zdvihu přisouvá do záběru. Plocha styku kotouče s obrobkem je velká, volí se proto rychlost pohybu stolu menší než při broušení obvodem kotouče.

Tab. 3. Hodnoty řezných podmínek pro rovinné broušení čelem kotouče [6]

Rychlost stolu	
Při broušení na hrubo	(4 až 12) m · min ⁻¹
Při broušení na čisto	(2 až 3) m · min ⁻¹
Přísuv v úvrati na zdvih	
Při broušení na hrubo	(0,015 až 0,04) mm
Při broušení na čisto	(0,005 až 0,01) mm
Při broušení na kruhovém stole se volí	
Obvodová rychlost stolu	(10 až 40) m · min ⁻¹
Přísuv na otáčku	
Při broušení na hrubo	(0,015 až 0,03) mm
Při broušení na čisto	(0,005 až 0,02) mm



Obr. 11. Základní metody broušení [7]

a) s podélným posuvem, b) zapichovací, c) tvarové zapichovací, d) bezhroté broušení vnitřních válcových ploch, e) s podélným posuvem, f) zapichovací, g) planetové, h) bezhroté rovinné broušení, i) obvodem kotouče s posuvným pohybem obrobku, j) obvodem kotouče s otáčivým pohybem obrobku, k) čelem kotouče s posuvným pohybem obrobku, l) čelem kotouče s otáčivým pohybem obrobku, m) pásové, n) honování, o) superfinišování, p) elektrochemické broušení

Druh broušení		Kinematické schéma
Hrotové broušení vnějších rotačních ploch	s podélným posuvem a radiálním přísuvem	
	zapichovací s radiálním přísuvem	
	zapichovací se šikmým přísuvem	
	zapichovací s tangenciálním přísuvem	
Broušení rovinných ploch obvodem kotouče	přímočarý vratný pohyb obrobku, příčný posuv obrobku, radiální přísuv kotouče	
	rotační pohyb obrobku, radiální přísuv kotouče	
Broušení roviných ploch čelem kotouče	přímočarý vratný pohyb obrobku, osový přísuv kotouče	

Obr. 12. Základní metody broušení [6]

Druh broušení		Kinematické schéma
Broušení rovinných ploch čelem kotouče	rotační pohyb obrobku, osový přísuv kotouče	
Bezhraté broušení	průchozí	
	zapichovací	
Broušení vnitřních rotačních ploch	s podélným posuvem a radiálním přísuvem	
	zapichovací s radiálním přísuvem	

Obr. 13. Základní metody broušení [6]

Druh broušení		Kinematické schéma
Broušení vnitřních rotačních ploch	planetové s podélným posuvem a radiálním přísuvem	

Obr. 14. Základní metody broušení [6]

Tab. 4. Volba druhu broušícího materiálu podle broušeného materiálu [10]

Broušený materiál	Broušící materiál
Ocel Ocel na odlitky Temperovaná litina Tvrdé bronzy	Oxid hlinitý Al_2O_3
Šedá litina Mosaz Měkké bronzy Měď Lehké kovy a jejich slitiny Slinuté karbidy Sklo Keramické hmoty Kámen	Karbid křemíku SiC

Pro volbu broušícího kotouče platí tyto všeobecné zásady:

1. Pro větší úběr materiálu se volí hrubší zrnitost.
2. Pro tvrdší obrušovaný materiál se volí měkký kotouč.
3. Pro broušení materiálu se sklonem k zanášení kotouče (měď, mosaz, hliník) se volí broušící kotouč měkký s hrubou zrnitostí.
4. Čím větší je styčná plocha (stykový oblouk násobený šířkou kotouče) mezi broušícím kotoučem a obrobkem, tím hrubší se volí zrnitost a nižší tvrdost broušícího kotouče.
5. Pro materiál citlivý na teplotní změny se volí měkký broušící kotouč.
6. Pro broušení přerušovaných ploch se volí kotouč tvrdší.
7. Pro broušení otvorů se volí kotouč měkký než pro broušení vnějších válcových ploch.
8. Pro broušení obrobku čelem kotouče se obvykle volí kotouč měkký než pro broušení obvodem kotouče.

Volba pracovní obvodové rychlosti se řídí druhem broušící operace, druhem (rozměrem, tvarem, pojivem) broušícího kotouče, druhem broušícího materiálu apod. Je dovoleno

používat jen takové kotouče, které jsou označeny nejvyšší dovolenou pracovní obvodovou rychlostí.

Tab. 5. Dosahovaná přesnost rozměrů a jakost broušených ploch [6]

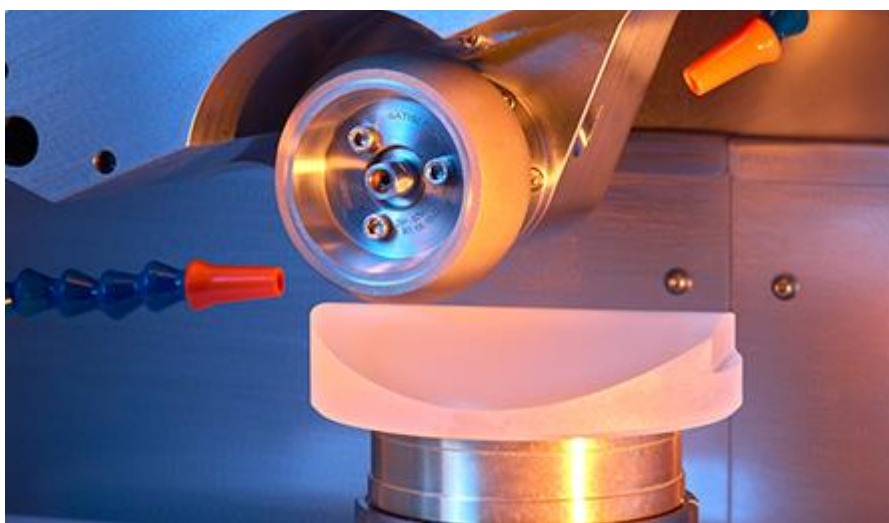
Tvar broušené plochy	Způsob broušení	Přesnost rozměrů IT	Drsnost povrchu R_a [μm]
Rovinná	Na hrubo čelem	9 až 11	0,8 až 6,3
	Na hrubo obvodem	8 až 11	0,8 až 3,2
	Na čisto čelem	5 až 7	0,2 až 1,6
	Na čisto obvodem	5 až 7	0,2 až 1,6
	Jemné broušení	3 až 5	0,025 až 0,4
Vnitřní válcová	Na hrubo	9 až 11	1,6 až 3,2
	Na čisto	5 až 7	0,4 až 1,6
	Jemné broušení	3 až 6	0,05 až 0,4
Vnější válcová	Na hrubo	9 až 11	1,6 až 3,2
	Na čisto	5 až 7	0,4 až 1,6
	Jemné broušení	3 až 6	0,025 až 0,4

Při broušení je nutné dodržovat následující bezpečnostní předpisy:

- 1) Pracovní obvodová rychlost nesmí překročit dovolené hodnoty uvedené na štítku kotouče. U stojanových brusek při nesterjné velkých kotoučích se otáčky řídí podle kotouče většího průměru.
- 2) K upínání brousicích kotoučů se má používat jen předepsaných přírub a podložek. Obě příruby musí mít stejný průměr.
- 3) Před upnutím se musí kotouč pečlivě prohlédnout, zda nemá trhliny. Jasný zvuk při lehkém poklepu je důkazem, že kotouč nebyl poškozen dopravou. Používá se zvláště pro kotouče s keramickým pojivem.
- 4) Brousicí kotouč musí jít nasunout na hřídel volně, bez násilí.
- 5) Šrouby nebo matice upínacích přírub se mají přitahovat rovnoměrně, bez násilí.
- 6) Brousicí stroje musí být opatřeny ochranným krytem, stojanové brusky též stavitelnou podpěrkou.
- 7) Vůle mezi podpěrkou a brousicím kotoučem se musí rovnat nejvýše polovině šířky brousicího kotouče, nanejvýš však 3 mm.

- 8) Před broušením je nutné nově upnutý kotouč vyzkoušet při chodu naprázdno při pracovních otáčkách nejméně po dobu 5 min, a to při uzavřeném ochranném krytu. Při této zkoušce musí stát brusič mimo rovinu rotace kotouče.
- 9) Brousicí kotouče je dovoleno orovnávat jen zvlášť k tomu určeným orovnávacím nástrojem.
- 10) Při broušení i orovnávání brousicích kotoučů je nutné používat ochranných brýlí.

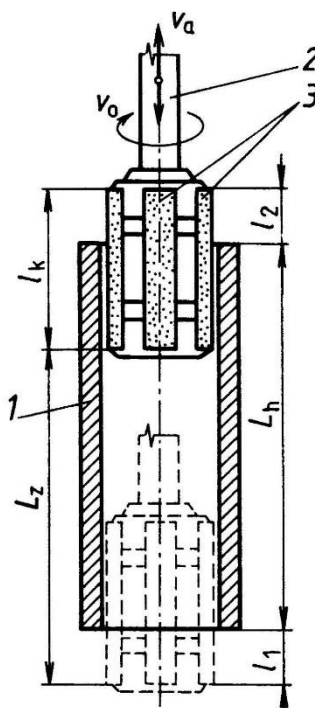
[6, 7, 8, 9, 10, 11]



Obr. 15. Broušení skla [12]

4 HONOVÁNÍ

Honování je dokončovací metoda obrábění, při níž se obrobené povrchy zlepšují jemným přebroušováním honovacími kameny (lištami), které jsou upevněny v honovací hlavě. Honováním se dosahuje vysoká jakost obrobeného povrchu, přesnost rozměrů a geometrického tvaru (odstranění kuželovitosti, ovality, soudkovitosti) obráběné součásti.

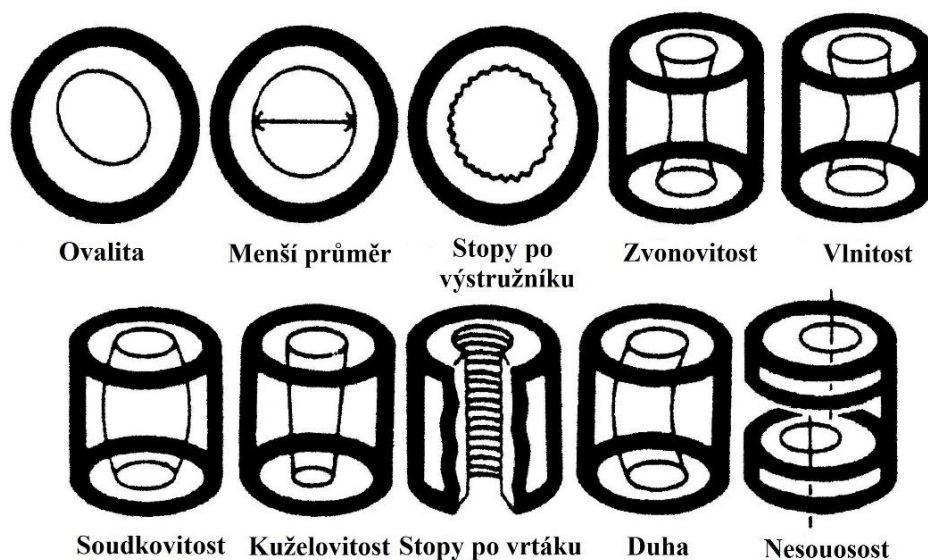


Obr. 16. Princip honování [10]

1 – obrobek, 2 – honovací hlava, 3 – honovací kameny

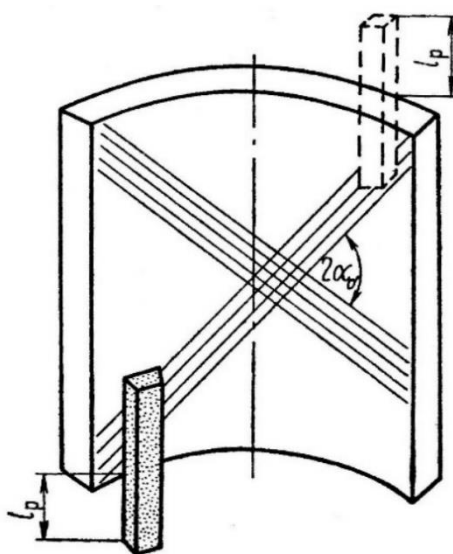
Honovací hlava se otáčí obvodovou rychlostí v_o [$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$] a ve směru osy se vratně posouvá rychlostí v_a [$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$]. Honovací kameny jsou přitlačovány k obrobenému povrchu mechanicky, hydraulicky nebo pneumaticky přitlakem p_k [MPa], vykonávají malý radiální posuv s_h [mm], jehož velikost je určena přídatkem na honování. Poměr počtu dvojzdvihů honovací hlavy k jejím otáčkám nesmí být celé číslo, neboť potom by se každé zrno pohybovalo vždy po stejné dráze a nedosáhlo by se požadované jakosti obrobené plochy, přesnosti rozměrů a geometrického tvaru. Charakteristickým znakem honování je malý tlak mezi honovanou plochou a brousicími kameny honovací hlavy. Při broušení je tlak mezi brousicím kotoučem a broušenou plochou (0,7 až 7,5) MPa, při honování pouze (0,35 až 1,4) MPa. Polohu osy díry nelze honováním opravit, protože pracovní hlava je ve vřetenu honovacího stroje upnuta na kloub a je vedena honovanou dírou.

Honováním se dokončují zejména vnitřní válcové plochy (válce spalovacích motorů, pneumatické a hydraulické válce, ložiska). Honují se válcové díry průchozí i slepé, s drážkami různých velikostí a tvarů, v širokém rozsahu průměrů a délek.

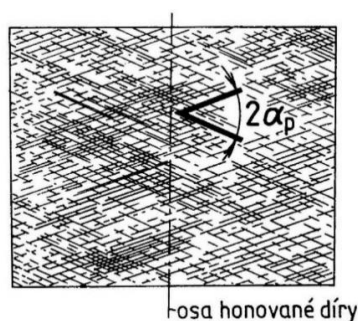


Obr. 17. Geometrické nepřesnosti tvaru opravitelné honováním [4]

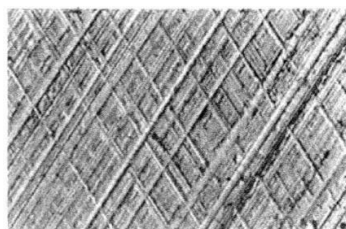
S přídatným kopírovacím zařízením je možno honovat i díry kuželové. Vnější válcové plochy se honují méně často, a to tak, že oba řezné pohyby (rotační a vratný posuvný) vykonává obrobek. Honovací hlava je upevněna na stole a zajišťuje pouze přítlak a radiální posuv honovacích kamenů. Kombinací a vazbou rotačního a posuvného pohybu se dráhy zrn překrývají a na honovaném povrchu se objeví charakteristické křížové stopy (rysky), které svírají úhel $2\alpha_p$, kde $\tan \alpha_p = \frac{v_a}{v_o}$.



Obr. 18. Schéma záběru zrn při honování otvoru [6]

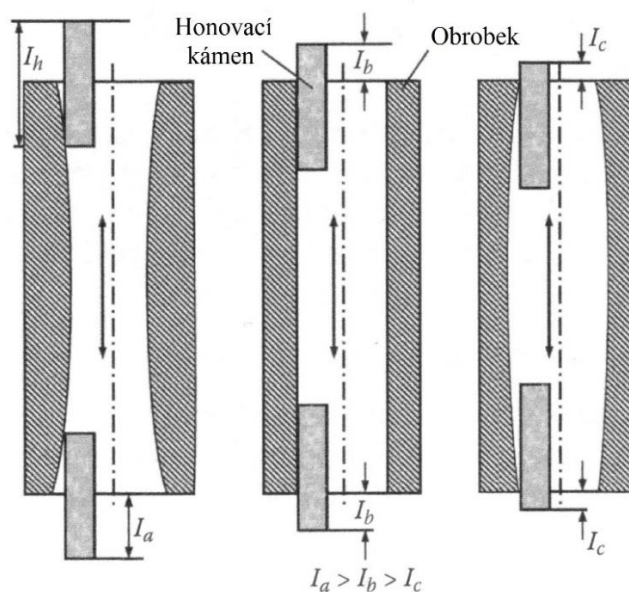


Obr. 19. Charakteristický vzhled honované plochy [10]



Obr. 20. Charakteristický vzhled honované plochy [4]

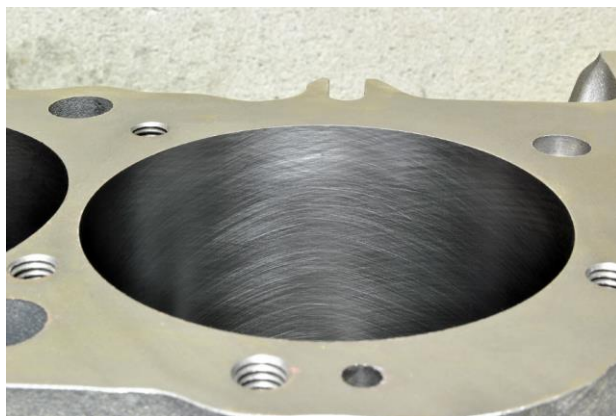
Pro dodržení správného geometrického tvaru ve směru osy je důležité, aby byla nastavena správná velikost přeběhu honovacích kamenů l_p (1/4 až 1/3 délky kamene) přes oba okraje díry. Malý přeběh má za následek vznik konvexně soudkovitého tvaru. Velký přeběh má za následek vznik konkávně soudkovitého tvaru. Při nestejném přeběhu vznikne díra kuželovitá. Při honování slepých děr je nutno upravit kinematiku pohybu honovací hlavy, nebo použít honovací kameny, které mají v okrajové části větší tvrdost a tím se nahradí přeběh honovacích kamenů, který u dna díry nelze realizovat.



Obr. 21. Chyby geometrického tvaru způsobené nesprávnou velikostí přeběhu [4]

Charakteristickou vlastností honování je částečná nebo plná vzájemná vazba polohy obráběného povrchu a aktivního povrchu honovacích kamenů. Té se dosahuje dvěma nebo čtyřmi stupni volnosti upnutí obrobku nebo honovacího nástroje. Jestliže je např. honovací hlava upnuta pevně ve vřetenu stroje, musí mít obrobek volný pohyb (dva stupně volnosti) v rovině kolmé na osu díry a vřetena, přičemž ustavovací plocha obrobku musí být rovněž kolmá k ose díry.

Při honování děr v těžkých a rozměrných součástech, jako jsou např. bloky válců spalovacích motorů, u nichž nelze realizovat jejich volný pohyb, je honovací hlava vedena dírou, ale krouticí moment od vřetena honovacího stroje je na ni nutno přenášet spojovací hřídelí s jedním kloubem při nesouososti díry a vřetena menší než (0,03 až 0,05) mm, při větší nesouososti hřídelem a dvěma klouby. [4, 6, 9, 10, 11, 13]



Obr. 22. Honovaný válec spalovacího motoru [14]

4.1 Honovací prostředky

Řeznou činnost vykonává sada brousicích kamenů (honovacích lišt a honovacích kamenů), které jsou v rovnoměrných roztečích upevněny na obvodu tělesa honovací hlavy. Hlavice má mechanismus, který umožňuje malý radiální posuv honovacích kamenů v rozsahu několika milimetrů a reguluje velikost přitlaku a konečný rozměr díry. Mechanismus pro rozpínání kamenů je řízen hydraulicky, pneumaticky nebo mechanicky.

Jako brusivo se při výrobě honovacích kamenů používá umělý korund pro zakalenou ocel, karbid křemíku pro měkkou ocel, litinu, hliníkové slitiny a neželezné kovy. Brusivo má tvar kamenů o čtvercovém průřezu nebo obdélníkovém průřezu.

Dále se jako brusivo syntetický diamant a kubický nitrid boru, jejichž předností ve srovnání s klasickým brusivem je vysoká mechanická pevnost a lepší řezivost. Dosahuje se

jimi zvýšení trvanlivosti kamenů při několikanásobném zvýšení produktivity, vyšší přesnosti rozměrů a tvarů, stálosti a reprodukovatelnosti technologického procesu, lepší jakosti povrchu a povrchové vrstvy. Vazba diamantových honovacích lišt bývá nejčastěji kovová.

Honovací kameny se k hlavám připevňují na nosiče, buď mechanicky (příšroubováním, pružinami), nebo se lepí. Celková šířka kamenů na honovací hlavě bývá (0,15 až 0,35) obvodu honované díry. Se zvětšující se šířkou kamenů roste produktivity, avšak zhoršuje se odvod třísek a přívod řezné kapaliny. U děr s drážkami musí být honovací kámen široký tak, aby vždy přesahoval nejméně dvě drážky. Délka honovacích kamenů l_k se volí (0,7 až 1) délky honované díry.

Při daném typu honovacích kamenů, průměru díry a velikosti přídavku je nutno nastavit vhodnou velikost obvodové a osově rychlosti honovací hlavy a velikosti přitlaku. Na poměru osově a obvodové rychlosti $\tan \alpha_o$ je závislý průběh odebírání třísky při honování. Ovlivňuje jak produktivitu operace, tak dosažené kvalitativní výsledky. Směrné hodnoty se pohybují v rozmezí (30 až 55) °, optimální velikost se najde pro konkrétní případ experimentálně. Při velkých úhlech $2\alpha_o$ se dosáhne většího úběru, při malých menší drsnosti honovaného povrchu.



Obr. 23. Honovací hlava [15]



Obr. 24. Honovací kameny [16]

Řezné kapaliny

Řezná kapalina vhlášená mezi nástroj a obrobek má při honování významný vliv na produktivitu honování a dosahovanou jakost povrchu. Snižuje teplo a řezné odpory, ale především vyplachuje a odvádí z pórů honovacích kamenů odebrané třísky a uvolněné částice brusiva a pojiva, a udržuje tak jejich řezivost.

V zásadě se volí pro dosažení vysokého úběru při honování kalených ocelí kapalina o nižší viskozitě. S kapalinou o vyšší viskozitě se dosáhne lepší drsnosti povrchu. Pro jednotlivé materiály se doporučují tyto kapaliny:

- Litina a kalená ocel – petrolej nebo petrolej s přídavkem (10 až 20) % strojního oleje.
- Měkká ocel – petrolej s přídavkem (2 až 25) % oleinu (olejové kyseliny) nebo vřetenového oleje.
- Bronz – voda nebo emulzní kapaliny.
- Hliníkové oleje – organické oleje.

[4, 6, 9, 10, 11, 13]

4.2 Metody honování

Metody honování můžeme rozdělit:

Podle tvaru obráběné plochy na honování:

- a) vnitřní válcové,
- b) vnější válcové,
- c) rovinné.

Podle pracovního režimu na honování:

- a) mechanické,
- b) elektrochemické,
- c) vibrační.

Podle použití na honování:

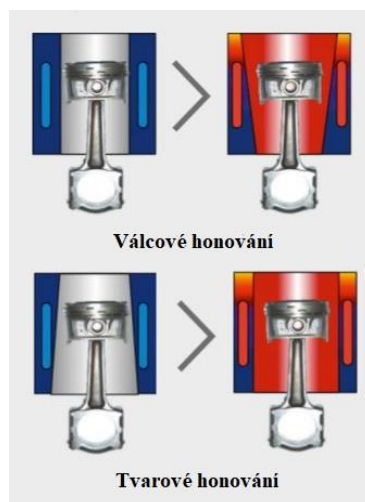
- a) jednostupňové,
- b) dvoustupňové.

Při jednostupňovém honování se pracuje jedním nástrojem při hrubovací i dokončovací fázi honovacího procesu. Dokončovací fáze nastane, sníží-li se přtlak (nejčastěji), nebo zmenšením úhlu α_o (zvýšení v_o nebo snížení v_a).

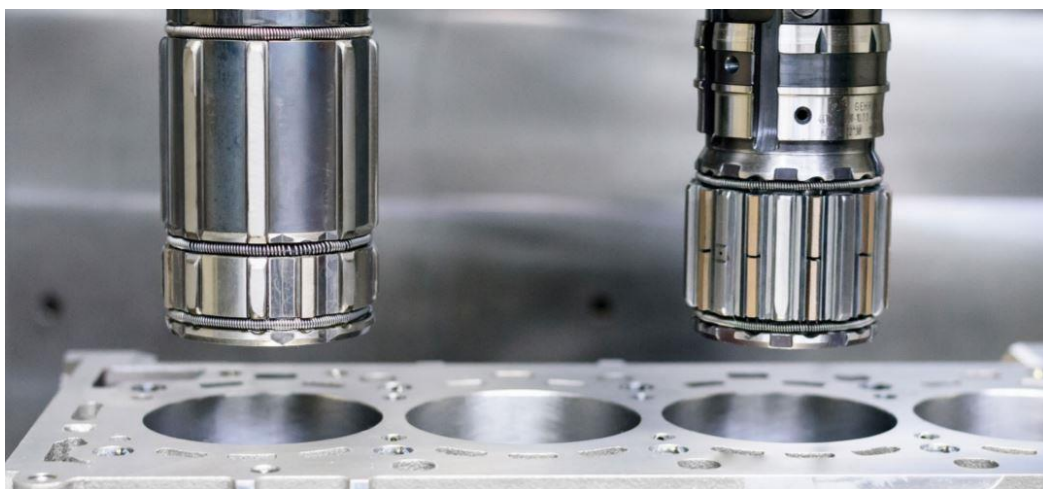
Při dvoustupňovém honování, které se používá při nejvyšších nárocích na výsledek honování, se používá hrubozrnější nástroj pro rychlé odstranění přídavku a jemnozrný pro zlepšení geometrického tvaru a drsnosti povrchu.

Elektrochemické honování je vysoce produktivní způsob dokončování při použití stejné kinematiky jako u klasického honování. Honovací kameny mechanického honování jsou odizolovány. Proud prochází přes elektrody umístěné mezi kameny tak, že mezi elektrodami a obrobkem vzniká pracovní mezera. Elektrody nepodléhají opotřebení, a proto mohou být využitelné jako pneumatické snímače pro kontrolu procesu. Při elektrochemickém honování je až 90 % materiálu odebráno elektrochemickým rozpouštěním, čímž dochází ke snížení mechanické síly působící na povrch obrobku. Snížení mechanické síly působící na obrobek je výhodné zejména při honování tenkostěnných obrobků. U málo tuhých součástí se mechanickým honováním velkého zlepšení tvaru nedosáhne, neboť i při nízkých přtlacích dochází k deformaci a kopírování. Výhodou elektrochemického honování je odstranění otřepů a nižší hlučnost. Elektrochemické honování je až šestkrát produktivnější než honování mechanické.

Speciální metodou je tvarové honování, jehož cílem není válcová plocha. Tvarové honování se používá pro dokončování válců spalovacích motorů, u nichž dochází při zahřátí ke změně geometrie vlivem teplotní napjatosti. Pomocí tvarového honování se zhotovuje takový tvar válce, aby se za provozních podmínek dosáhlo válcového tvaru.



Obr. 25. Princip tvarového honování válců [17]



Obr. 26. Tvarové honování [17]

Přesnost geometrického tvaru, dosažená drsnost honované plochy i produktivita honování závisí na řadě činitelů, které souvisí se stanovením přídavku na honování. Honují se plochy broušené, vystružené, jemně soustružené, protahované a vyvrtávané, které podle druhu operace a řezných podmínek mají rozdílnou geometrickou přesnost a drsnost povrchu. Velikost přídavku na honování má být stanovena tak, aby se předepsané tvarové a rozměrové přesnosti dosáhlo v okamžiku, kdy byly odstraněny stopy po předchozí operaci. Velikost přídavku je tedy určena především chybou geometrického tvaru, která se má odstranit (ovalita, soudkovitost, vlnitost, kuželovitost). Podle zkušenosti je nutné, aby přídavek byl asi 2krát větší než chyba geometrického tvaru.

Hlavní předností honování je, že se jím dosáhne vysoké přesnosti geometrického tvaru. Pro odstranění nepřesnosti tvaru díry ve směru osy (kuželovitost, osová křivost, soudkovitost) je nutno nastavit přeběh hlavy $(0,25 \text{ až } 0,35) l_0$.

Při honování se dosahuje drsnosti povrchu $R_a = (0,2 \text{ až } 0,4) [\mu\text{m}]$, ve zvláštních případech $R_a = 0,025 [\mu\text{m}]$. Dosahovaná přesnost rozměrů je IT5 až IT7, ve zvláštních případech IT2 až IT4. [4, 6, 9, 10, 11, 13, 18]

5 LAPOVÁNÍ

Lapování je proces obrábění rovinných i tvarových ploch, vnějších i vnitřních, při kterém je materiál obrobku odebírán pohybem brousicích zrn volně rozptýlených v kapalině nebo pastě, umístěných mezi obrobkem a nástrojem. Určujícími parametry procesu jsou velikost přídavku, druh brusiva a měrný tlak nástroje. Lapováním se dosahuje snížení drsnosti povrchu lapované plochy a zvýšení přesnosti rozměrů a geometrického tvaru.

Lapováním vzájemně zabírajících nebo těsnících součástí, jako jsou ozubená kola (např. kuželová se zakřivenými zuby, globoidní šneková soukolí), závitová spojení, kohouty, ventily apod., se zlepšuje jejich funkce a podstatně zkracuje doba záběhu.

Mezi pohybujícími se nástroji a obrobkem jsou v kapalině nebo v pastě volně rozptýlena zrna brusiva. Svým pohybem vyvolává nástroj pohyb zrn, která neustále mění svou dráhu a svými různě orientovanými řeznými hranami odebírají z povrchu obrobku materiál ve tvaru jemných třísek.

Lapováním je možno dokončovat povrchy tvrdých i měkkých materiálů ručně v kusové a malosériové výrobě, nebo strojně v sériové a hromadné výrobě. Dokončovací proces při lapování má dvě fáze: hrubovací lapování, při němž dochází k mikrořezání (mikroodírání) nerovností a výstupků obráběného povrchu velkým počtem zrn brusiva, a velmi jemné lapování, při němž se povrch dokončuje plastickou deformací povrchové vrstvy, popř. se leští chemickým účinkem kapaliny nesoucí brusivo. Poměr mezi fázemi mikrořezání a fází leštění lze regulovat řeznými podmínkami. Záleží na rychlosti relativního pohybu v_1 , přítlaku p_1 a viskozitě nosného média brousicích zrn.

Lapováním lze opracovávat kalenou ocel, nitridované povrchy, slitiny hliníku, slitiny mědi (bronz, mosaz), těžkoobrobitelné materiály, slinuté karbidy a tvrdé otěruvzdorné povlaky. Typickými představiteli lapovaných součástí jsou koncové (základní) měrky, doteky měřidel, kalibry, díry velmi přesných kluzných ložisek, oběžné dráhy valivých ložisek, povrchy valivých tělísek ložisek (kuličky, válečky, kuželíky, jehly), přesné závity, boky zubů přesných ozubených kol, dosedací plochy součástek těsnících proti unikání plynu nebo kapaliny, válce a písty vstřikovacích čerpadel a břity tvarových nástrojů.

Velmi důležitou součástí technologického postupu lapování je po jeho ukončení dokonalé očištění lapované součásti od zbytků brousicích zrn, kapaliny a pasty. K čištění lze použít např. petrolej, roztok trinátriumfosfátu, roztok nitridu sodného apod.

Při rozhodování o použití lapování je nutné uvážit, že se jedná o nákladnou operaci trvající poměrně dlouho a že předcházející obrábění musí být přesné. Lapování je účelné použít tam, kde se vyžaduje vysoká jakost obrobeného povrchu, přesné rozměry a geometrický tvar. [4, 6, 9, 10, 11, 13]

5.1 Lapovací prostředky

Při lapování je nástroj tvořen dvěma částmi: lapovacím nástrojem a lapovacím prostředkem. Funkcí lapovacího nástroje je vést lapovací prostředek po ploše obrobku. Lapovací prostředek je tvořen brusnými zrny rozptýlenými v kapalině nebo pastě.

Podle tvaru lapované plochy lze rozdělit lapovací nástroje na:

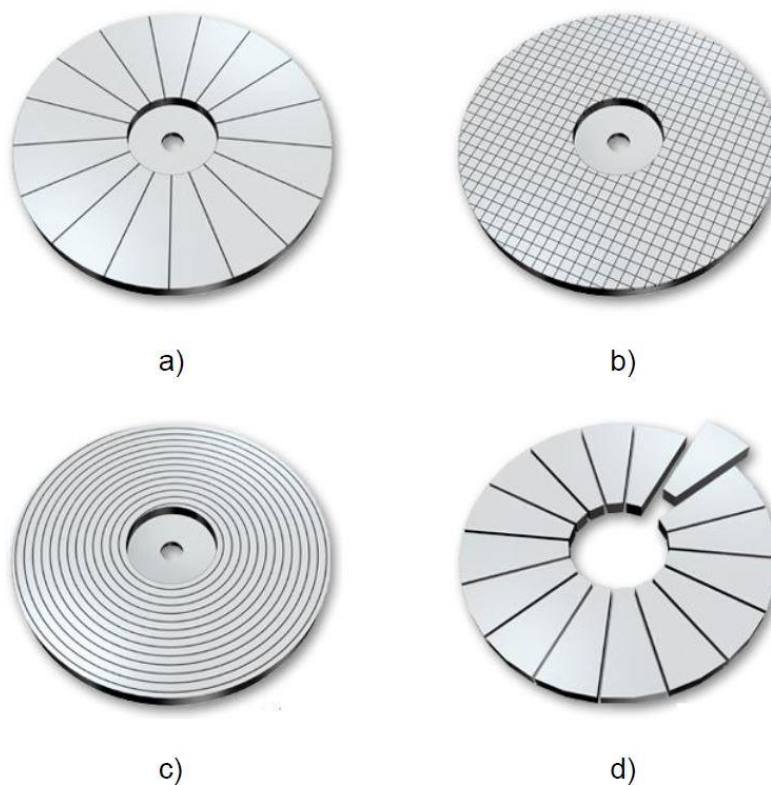
- a) Desky a kotouče – používají se pro lapování rovinných ploch. Pro hrubovací operace mají na činné ploše vytvořeny rýhy, pro dokončovací lapování je činná plocha hladká.
- b) Pevná nebo stavitelná pouzdra – používají se pro lapování vnějších válcových ploch. Délka pouzdra musí být minimálně rovna průměru obrobku.
- c) Pevné nebo rozpínací trny – používají se pro lapování vnitřních válcových ploch. Na činné části nástroje jsou vytvořeny drážky (nejčastěji ve tvaru šroubovice), které tvoří zásobník pro lapovací prostředek.

Materiál nástroje má být měkčí než materiál obrobku. Lapovací nástroje se vyrábějí nejčastěji z kvalitní jemnozrné perlitické litiny, feritické litiny se zvýšeným obsahem fosforu, nebo šedé litiny s přísadou titanu. Pro lapování velmi tvrdých materiálů nebo pro jemné lapování se používají lapovací nástroje z kalené oceli nebo tvrdě chromované. Pro lapování měkkých materiálů se používají lapovací nástroje z mědi a jejích slitin, skla, olova, někdy i tvrdého dřeva nebo plastů. Materiál nástroje musí být zvolen tak, aby byl dobrým nositelem lapovacího prostředku, po celou dobu práce si zachoval svůj tvar a u chemicko-mechanického lapování odolával chemickému působení lapovacího prostředku.

Brousící zrna, která jsou součástí lapovacích prostředků, mohou být z karbidu křemíku SiC, oxidu hlinitého Al_2O_3 , syntetického nebo přírodního diamantu a kubického nitridu boru. Zrnitost brusiva se volí podle výchozí a požadované drsnosti povrchu a podle velikosti přídatku na lapování. Střední velikost brousících zrn bývá (1 až 100) μm , pro hrubování se používají velká zrna, pro dokončovací jemné lapování zrna o velikosti (2 až

3) μm . Velmi důležitý je tvar zrn brusiva. Zrna mají být izotermická a musí mít velkou rovnoměrnost granulometrického složení.

Nositelem volného brusiva je kapalina, nejčastěji petrolej s přídavkem oleje. Pro jemné lapování se někdy používá benzin, nafta, benzol, pro bronz voda s přídavkem oleinu, pro vysoký lesk kalené oceli líh s vídeňským vápnem. Tuhé lapovací pasty obsahují tuky a různé příměsi, jako parafin, stearin, kyselinu olejovou. Přísada plastického maziva nebo oleje zvyšuje odolnost lapovacího nástroje proti zadření, k němuž při lapování, probíhající v podmínkách mezního tření, může docházet. Suspenzi (pastu nebo kapalinu) je nutné volit tak, aby se brousící zrna lepila na nástroj a mezera mezi nástrojem a obrobkem byla rovna střední velikosti zrn. [4, 6, 9, 10, 11, 13]



Obr. 27. Lapovací kotouče [19]

a) radiální drážky, **b)** křížové drážky, **c)** spirálové drážky, **d)** segmentovaný kotouč

5.2 Metody lapování

Metody lapování můžeme rozdělit:

Podle pohonu nástroje na lapování:

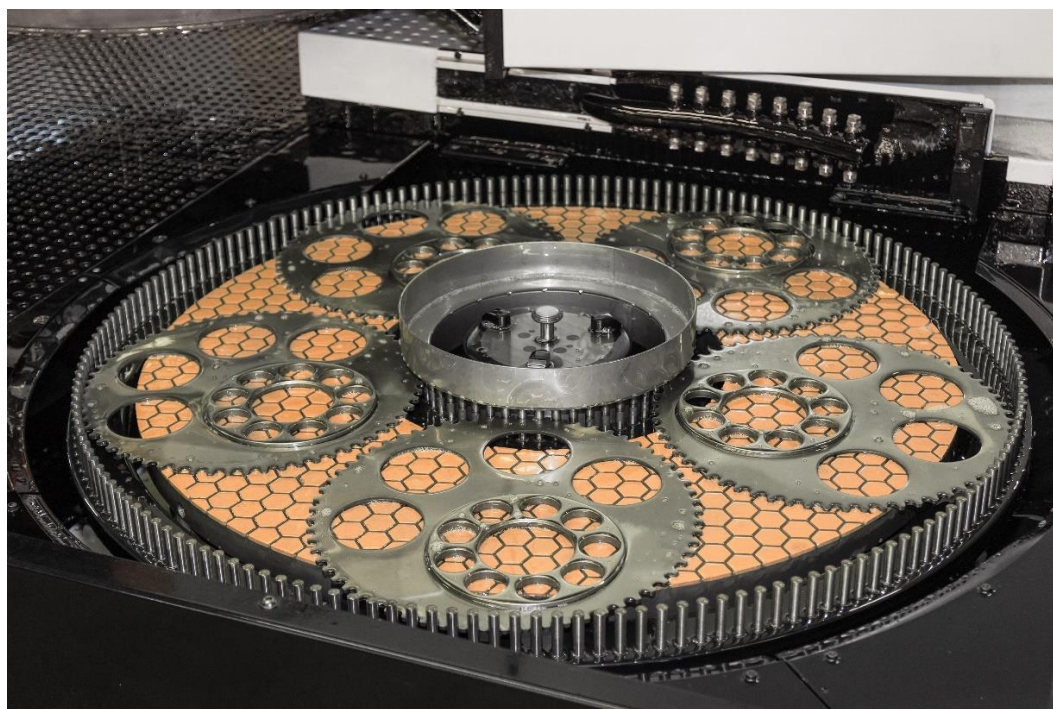
- a) ruční,
- b) strojní.

Podle pracovního režimu na lapování:

- a) mechanické,
- b) chemicko-mechanické,
- c) elektrochemické.

Strojní lapování se používá v sériové výrobě měřidel a v hromadné výrobě přesných strojních součástí jako jsou např. valivá ložiska. Lapovací stroje jsou jednokotoučové a dvoukotoučové. U jednokotoučových strojů se obrobky upínají v unášecích držácích, které je ke kotouči přitlačují a při tom s nimi konají přídavný výstředný pohyb. Při použití kotoučových unášecích přípravků lze obrobkům udělit pohyb otáčivý, a to buď samočinný, nebo nucený. Samočinného pohybu se dosáhne tím, že je unášecí kotouč s obrobky otočně uložen na čepu nad lapovacím kotoučem. Držák je umístěn výstředně a lapovací kotouč mu uděluje samočinný otáčivý pohyb, který je dán rozdílem obvodových rychlostí na vnějším a vnitřním okraji lapovacího kotouče. Tam, kde nelze samočinného pohybu dosáhnout, je nutné použít pohyb nucený.

Rovinné plochy a vnější válcové plochy se lapují na dvoukotoučových lapovacích strojích. Lapované obrobky jsou obvykle ve vhodných unášecích deskách, které jim udělují nucený pohyb. Desky mají vnější ozubení a nucený pohyb jim udělují kolíky vnitřního kotouče, které jsou v záběru se zuby vnitřního kotouče. Po vnějším kolíkovém věnci se desky odvalují.



Obr. 28. Princip lapování [20]



Obr. 29. Dvoukotoučový lapovací stroj [21]

Při lapování se dosahuje velmi vysoké přesnosti geometrického tvaru. Například u základních měrek je odchylka rovnoběžnosti ploch (0,07 až 0,3) μm .

Obvykle dosahovaná přesnost geometrického tvaru se pohybuje v rozmezí IT5 až IT6 pro hrubovací, IT3 až IT4 pro jemné a IT1 až IT3 pro velmi jemné lapování.

Produktivita lapování závisí na velikosti přídavku a na požadované drsnosti povrchu, již se řídí volba zrnitosti brusiva. Lepších drsností povrchu lze dosáhnout vícestupňovým lapováním, kdy se postupně snižuje zrnitost brusiva. Produktivita lapování silně závisí na tlaku a zrnitosti brusiva. Přítlak nesmí přesáhnout hodnotu, při níž se brusivo silně drtí. Produktivita je závislá také na počtu a uspořádání lapovaných součástí v unášecí kleci, tzv. masce.

Základní faktory, které řídí proces lapování, jsou přítlak p_1 (tlak v místě styku lapovacího nástroje s obrobkem), rychlost pracovního pohybu v_1 a doba lapování t_1 . Pro hrubovací lapování kalené oceli je optimální přítlak (0,1 až 0,2) MPa, pro jemné lapování (0,05 až 0,1) MPa. Při strojním lapování většího počtu součástí současně a při $v_1 > 80 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ se volí přítlak (0,05 až 0,07) MPa, pro jemné lapování (0,02 až 0,05) MPa. Při lapování měkkých materiálů se doporučuje přítlak (0,02 až 0,03) MPa, u křehkých materiálů pouze (0,005 až 0,02) MPa.

Rychlost pracovního pohybu při hrubovacím lapování se volí (40 až 120) $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$, při jemném (15 až 30) $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ a při velmi jemném (5 až 10) $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$. Při hrubovacím lapování rovinných ploch lapovacími kotouči se používá rychlost (250 až 350) $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$.

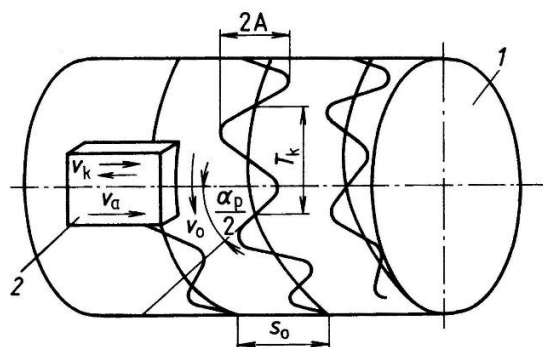
Se zvýšením přítlaku a rychlosti do určitých mezí produktivita lapování roste, po jejich dosažení se již nemění, nebo klesá. [4, 6, 9, 10, 11, 13]

Tab. 6. Dosahovaná přesnost rozměrů a jakost lapovaných ploch [10]

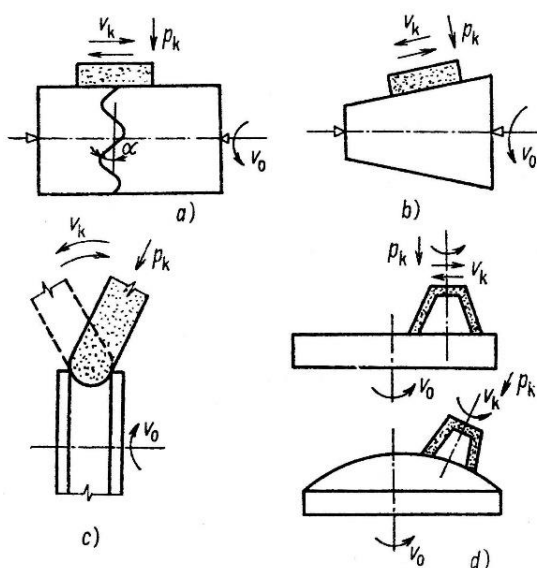
Tvar lapované plochy	Způsob lapování	Přesnost rozměrů IT	Drsnost povrchu R_a [μm]
Rovinná	Normální	4 až 6	0,1 až 0,4
	Jemné	3 až 4	0,05 až 0,1
	Velmi jemné	1 až 3	0,005 až 0,05
Vnitřní válcová	Normální	4 až 6	0,1 až 0,4
	Jemné	3 až 4	0,05 až 0,1
	Velmi jemné	1 až 3	0,005 až 0,05
Vnější válcová	Normální	5 až 6	0,1 až 0,2
	Jemné	3 až 4	0,05 až 0,1
	Velmi jemné	1 až 2	0,025 až 0,05

6 SUPERFINIŠOVÁNÍ

Superfinišování je obrábění jemnozrnnými brousicími kameny při nízkých řezných rychlostech, malých měrných tlacích nástroje na obráběnou plochu a při kombinaci kmitavého, otáčivého a přímočarého posuvného pohybu. Superfinišováním se nejčastěji dokončují válcové plochy (valivá ložiska, klikové a vačkové hřídele). Při hrubování dochází k úběru přímým stykem superfinišovacích kamenů s výstupky na obráběném povrchu. Styková plocha se postupně zvětšuje a tlak zmenšuje. Styková plocha obrobku s kameny se postupně zvětší natolik, že je tlak, jímž se kameny přitlačují k obráběné ploše menší, než odpor kapalinového filmu a kameny začnou tzv. plavat, čímž přestanou brousit, přestože pracovní pohyby pokračují. V dokončovací fázi se vytvoří mezi kameny a povrchem kapalinový film, takže se povrch již jen dolešťuje plastickou deformací výstupků a chemickým působením řezné kapaliny. Přídavek na superfinišování se volí v rozsahu (2 až 8) μm , a proto superfinišováním nelze opravit geometrický tvar součásti.



Obr. 30. Princip superfinišování [10]



Obr. 31. Schéma různých způsobů superfinišování [6]

Řezný pohyb při superfinišování vzniká superpozicí rotačního pohybu součásti o rychlosti v_o (10 až 80) $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ a kmitavého pohybu superfinišovacích kamenů o frekvenci ω_k (500 až 3 000) dvojzdvihů za minutu, který je kolmý na směr pohybu součásti.

Superfinišovací kámen je na dokončovanou plochu přitlačován hydraulicky (u přídavných superfinišovacích zařízení mechanicky) tak, aby na ploše styku nastal přitlak (0,1 až 0,4) MPa. Do stykové plochy se přivádí řezná kapalina, obvykle petrolej, olej nebo jejich směs. [6, 9, 10, 11, 13]

6.1 Superfinišovací prostředky

Superfinišovací broušící kameny se vyrábějí s brusivem z oxidu hlinitého Al_2O_3 pro superfinišování oceli, z karbidu křemíku SiC pro obrábění litiny a ocelí nižších pevností, korozivzdorných ocelí, neželezných kovů a slitin. Pro superfinišování vysokolegovaných nástrojových nebo konstrukčních ocelí se používá kubický nitrid boru, pro slinuté karbidy diamant. Tvrdost kamene se volí podle tvrdosti superfinišovaného materiálu tak, že čím je materiál měkčí, tím tvrdší je superfinišovací kámen.

Délka kamene při zapichovacím způsobu musí být rovna šířce superfinišované plochy. Při superfinišování s podélným posuvem se volí délka kamene přibližně trojnásobek průměru obrobku. Kameny se do superfinišovacích hlav upevňují mechanicky, ve zvláštních případech se lepí. Kameny je nutno předběžně vytvarovat podle obráběné plochy. To se provádí jejich přebroušením broušícím plátnem, které se vloží mezi obrobek a kámen. Pro vytvarování kamenů s brusivem z diamantu a kubického nitridu boru se místo plátna používá volného brusiva karbidu křemíku SiC . [6, 9, 10, 11, 13]

6.2 Základní metody superfinišování

Podle pracovního režimu rozlišujeme superfinišování:

- a) kamenem,
- b) pásem,
- c) elektrochemické.

Průběh superfinišování lze řídit změnou obvodové rychlosti součásti v_o , rychlostí kmitavého pohybu v_k , velikostí přitlaku p_k a viskozitou řezné kapaliny. Vhodnou kombinací těchto podmínek lze nastavit dvě hlavní fáze procesu. Při hrubování, nastavením $v_k = v_o$ se kříží dráhy zrn se stopami po předchozích záběrech pod úhlem

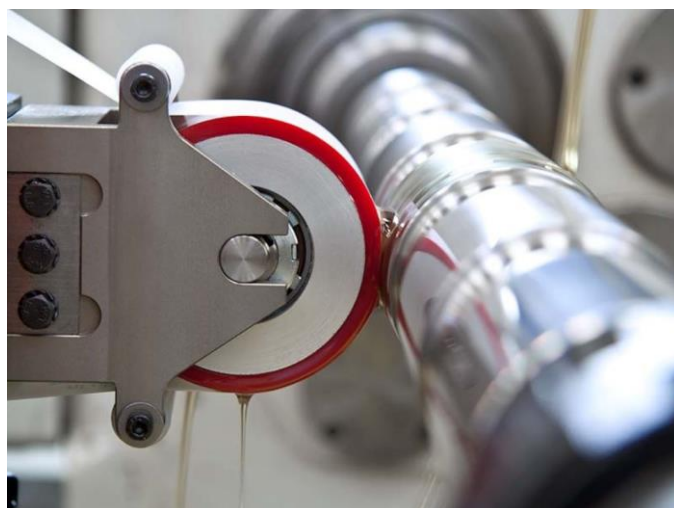
$2\alpha = 90^\circ$, kde $\tan \alpha = \frac{v_{k\max}}{v_o} = 1$, zrna se snadno zařezávají, snadno se odplavují vzniklé krátké třísky, superfinišovací kámen se dobře samoostří. Obrobený povrch má dobrou jakost, ale je matný. Při menším úhlu α (okolo 20°), jenž se získá obvykle zvýšením v_o , zrna brusiva již prakticky neřeže, ale zahlazuje malé nerovnosti plastickou mikrodeformací. Při určitém přitlaku p_k , maximální výsledné rychlosti při superfinišování $v_s = \sqrt{v_o^2 + v_{k\max}^2}$, viskozitě řezné kapaliny a drsnosti stykových ploch se vytvoří souvislý kapalinový film, takže se kámen již s povrchem vůbec nestýká a superfinišování nepokračuje. Po této lešticí fázi dostane povrch charakteristický vysoký lesk. Jiná možnost dosažení lešticí fáze pracovního cyklu spočívá ve snížení přitlaku p_k nebo ve zvýšení viskozity vyplachovací kapaliny. Jako řezná (vyplachovací) kapalina se nejčastěji používá petrolej, směs petroleje s (10 až 15) % minerálního oleje nebo minerální lehký olej s různými aditivy, které mají velmi nízkou viskozitu. Pro dosažení jemnějších povrchů s vysokým leskem a pro měkčí materiály je vhodná kapalina s vyšší viskozitou, pro větší úběry s nižší.



Obr. 32. Bezhraté superfinišování [23]



Obr. 33. Superfinišování hřídele kamenem [23]

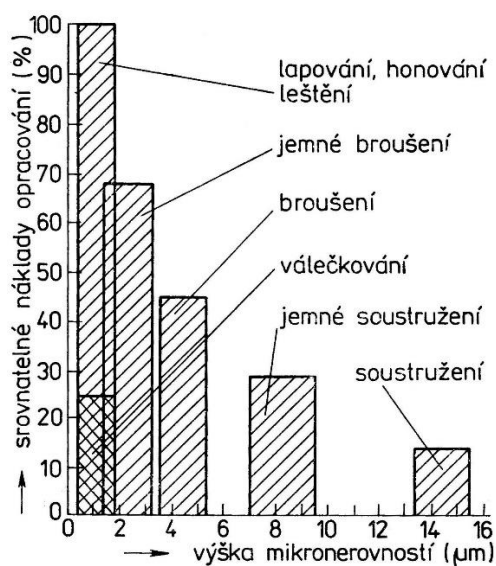


Obr. 34. Superfinišování hřídele pásem [23]

Při superfinišování se dosahuje drsnosti povrchu $R_a = (0,02 \text{ až } 0,1) [\mu\text{m}]$. Předchozí operací bývá nejčastěji broušení, ale dobře se dokončují i plochy jemně soustružené nebo vyvrtávané. Nejvhodnější výchozí drsnost povrchu je $R_a = (0,5 \text{ až } 1) [\mu\text{m}]$. Plochy předpracované na příliš vysokou jakost povrchu se pro superfinišování nehodí, protože příliš hladký povrch omezuje možnost úběru a pochod může skončit dříve, než je odstraněna potřebná vrstva. Významnou vlastností povrchové vrstvy superfinišované plochy je, že nejen odstraní vrstvu narušenou broušením, ale také vyvolá příznivé tlakové zbytkové pnutí těsně při povrchu. Produktivita superfinišování závisí na řezných podmínkách, zejména přítlaku p_k , na velikosti přídávku, výchozí drsnosti povrchu a na zrnitosti superfinišovacích kamenů. Průměrný čas pro superfinišování bývá podle velikosti plochy (10 až 60) s. [6, 9, 10, 11, 13]

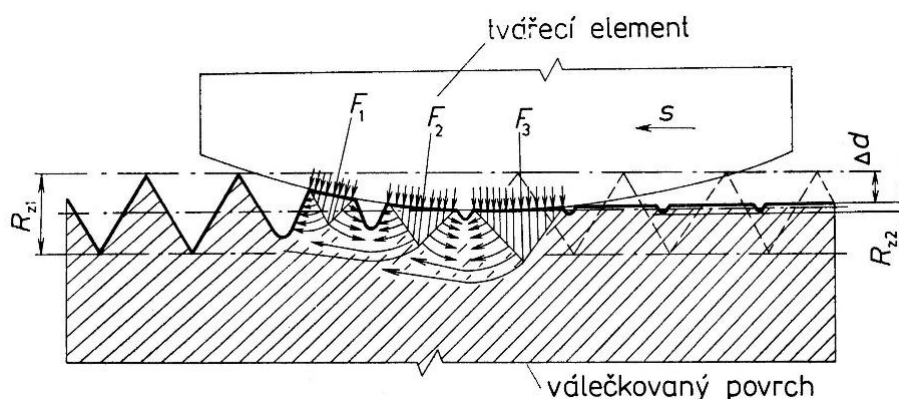
7 VÁLEČKOVÁNÍ

Válečkování je dokončovací metoda založené na principu tváření povrchových vrstev materiálu za studena prostřednictvím tvrdého tvářecího prvku (kulička, váleček, kotouč, hladicí trn), při němž dochází k plastické deformaci těchto vrstev. Tato technologie má oproti některým dokončovacím metodám třískového obrábění řadu specifických předností, spočívajících v tom, že povrchová vrstva není ovlivňována tepelnými režimy a vrubovými účinky, které vznikají při třískovém obrábění. Povrch dokončovaný tvářením za studena je vlivem příznivých tlakových pnutí a uspořádáním vláken ve struktuře materiálu odolnější proti únavovým lomům. Lepší mechanické vlastnosti kovů (zvýšení pevnosti a tvrdosti), snížení mikronerovností, zvýšení únosnosti a odolnosti proti korozi a další příznivé funkční vlastnosti lze získat při relativně nízkých výrobních nákladech. Těmito procesy se dosahuje vysoká jakost povrchu, přesnost rozměrů i geometrického tvaru. Válečkováním a kuličkováním se dosahuje snížení drsnosti povrchu a zvýšení přesnosti rozměrů a geometrického tvaru.



Obr. 35. Srovnatelné výrobní náklady jednotlivých metod obrábění [24]

Technologie dokončování a zpevňování strojních součástí válečkováním povrchových vrstev materiálů je založena na schopnosti těchto materiálů plasticky se deformovat. Podstata této technologie spočívá v tom, že na povrch strojní součásti, která je již předem převážně třískově opracována, působí prostřednictvím tvrdého tvářecího prvku tlak, který v místě styku povrchů tvářené součásti a tvářecího nástroje způsobuje plastickou deformaci. V průběhu postupného tváření za studena dochází k řadě specifických změn původních vlastností povrchové vrstvy materiálu u válečkované součásti.



Obr. 36. Schéma průběhu napětí, geometrických a objemových změn materiálu [24]

V místě styku tvářecího nástroje a tvářeného povrchu vzniká v materiálu součásti tlakový klín, který způsobuje, že dochází k postupnému snižování vrcholů mikronerovností od předcházejícího opracování a k jejich přemísťování do prohlubní těchto mikronerovností. Vlivem koncentrace napětí na vrcholcích mikronerovností dochází při překročení meze kluzu tvářeného materiálu k jeho posunu po skluzových rovinách ve směru nejmenšího odporu do prostoru prohlubní mikronerovností plochy a k jejich vyplňování (vytlačování) směrem vzhůru. Stupeň plastické deformace tvářeného povrchu u srovnatelných materiálů závisí především na velikosti tlaku mezi tvářecím nástrojem a tvářeným povrchem. Při optimální velikosti tlaku dochází v souladu se zákonem o zachování objemů k zatlačení vrcholů a k vytlačení prohlubní mikronerovností do přibližně stejné úrovně, čímž je dosaženo vysokého stupně vyhlazení povrchů. Při nedostatečné velikosti tlaku dojde k neúplnému zatlačení vrcholů mikronerovností. Při vysokém tlaku dochází k intenzivnímu zpevnění materiálu provázenému výraznou změnou rozměrů válečkované plochy, k jeho přemísťování a při překročení meze pevnosti k porušení jeho soudržnosti.

V procesu válečkování povrchových vrstev materiálu dochází nejenom ke snižování hodnot mikronerovností jeho povrchu, ale rovněž k podstatným změnám metalurgické struktury ovlivněné vrstvy materiálu a k jeho zpevnění. Vnější síly vyvozené válečkovacím nástrojem, vyvolávají v tvářeném kovu deformaci krystalové mřížky a při určitém stupni napětí způsobují trvalé přemísťování jednotlivých vrstev atomů. Vzniká textura, která se vyznačuje prodloužením zrn a jednotným usměrněním krystalografických os.

Při tváření povrchových vrstev materiálu za studena v průběhu válečkování dochází k jeho zpevnění. Toto zpevnění se projevuje u tvárných kovů v rozdílné míře, neboť jednotlivé kovy mají odlišné stavby krystalových mřížek. Povrchové vrstvy kovu, které jsou ve styku s tvářecím prvkem nástroje, se zpevňují více než vrstvy vnitřní. Při zpevňování kovů

válečkováním nastávají určité změny jejich mechanických vlastností: růst meze pevnosti, růst tvrdosti, pokles tažnosti a vrubové houževnatosti.

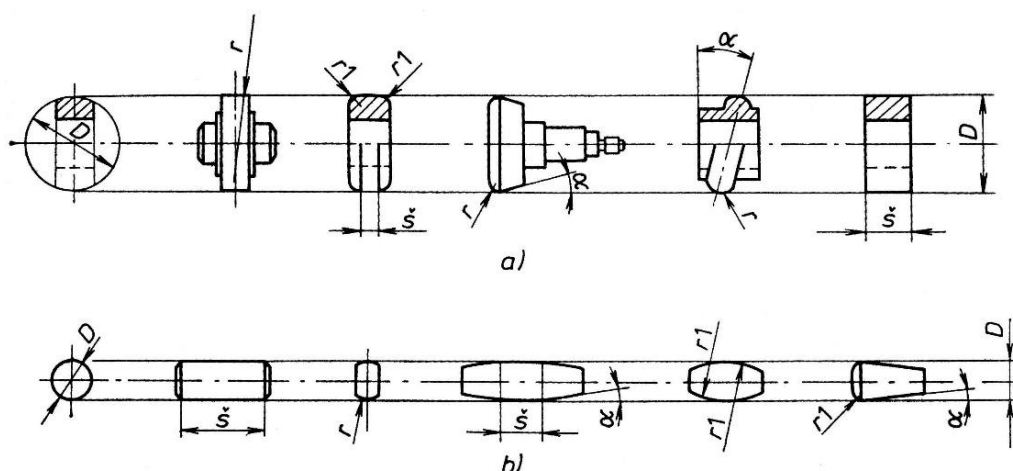
Dosažená mikronerovnost a mechanické vlastnosti kovů po válečkování jsou závislé na řadě dalších materiálových, pracovních a provozních podmínek, jakož i na konkrétní použité metodě válečkování. [3, 9, 10, 11, 24]

7.1 Válečkovací prostředky

Důležitým znakem metod dokončování a zpevňování strojních součástí válečkováním jsou rozměry a geometrický tvar funkčních ploch tvářecího nástroje, které jsou ve styku s válečkováným povrchem součásti. Obecně lze tyto části válečkovacích nástrojů nazvat tvářecí prvky.

Nevhodně zvolené rozměry a geometrický tvar tvářecích prvků, popřípadě i jejich ustavení vůči válečkové ploše, jsou nezřídka hlavní příčinou neúspěchu při aplikaci technologie válečkování. Nedostatky se projevují zejména nepříznivým průběhem plastické deformace povrchové vrstvy materiálu, jež způsobuje nízkou kvalitu válečkové plochy, vznik vizuálních stop, vlnitost válečkové plochy nebo její rozrušení. Nevhodně zvolený rozměr a geometrický tvar tvářecího prvku je často příčinou vzniku vysokých ztrát vlivem třecích a valivých odporů, nepřijatelného zahřívání nástroje a opotřebení jeho funkčních ploch.

Mezi rozměrem, geometrickým tvarem tvářecího prvku a dalšími podmínkami válečkování (geometrický tvar, rozměr a výchozí drsnost válečkové součásti, mechanické vlastnosti válečkováného materiálu, kinematika vzájemného pohybu tvářecího prvku a válečkové plochy, tvářecí síla, velikost přídavku pro válečkování, podélný posuv nástroje, rychlost válečkování, způsob mazání a chlazení) existují složité závislosti, které nelze jednoznačně shrnout do jednoho obecně platného pravidla nebo zásady.



Obr. 37. Typické geometrické tvary tvářecích prvků [24]

První skupinu tvoří tvářecí prvky ve tvaru různých kotoučů a válečků, jejichž společným konstrukčním znakem je, že jsou při válečkování neseny středovým čepem, který zachycuje jednotlivé složky tvářecí síly. Otočné uložení pracovní části tvářecího prvku je nejčastěji řešeno pomocí valivých ložisek. Zachycení axiální složky tvářecí síly je většinou řešeno kluzným uložením, pouze u nástrojů pro intenzivní zpevňování a pro vysoké obvodové rychlosti tvářecího prvku je použito pro axiální uložení valivých ložisek.

Druhou skupinu tvoří tvářecí prvky ve tvaru válečku, soudečku, kuželíku, které se při válečkování odvalují po vodící dráze válečkovacího nástroje. Vodicí dráha zachycuje jednotlivé složky tvářecích sil, které působí na tvářecí prvky. U nástrojů s více tvářecími prvky konají tyto tvářecí prvky planetový pohyb, přičemž rychlost odvalování tvářecích prvků je určena rychlostí a směrem otáčení obrobku a vodící dráhy nástroje. Jiné konstrukční řešení, používání zejména pro válečkování vnějších rotačních ploch, tvoří soustavu nejčastěji dvou opěrných válců, které vedou tvářecí prvek po válečkováném povrchu a současně zachycují složky tvářecí síly.

Do třetí skupiny lze zahrnout ostatní typy tvářecích prvků, které se používají především při hladicím válečkování smykem nebo při metodách válečkování s dynamickým účinkem tvářecí síly. Dále se používají pevné, tvarově upravené hladicí trny, které se po tvářené ploše smýkají při současném působení tvářecí síly statického nebo dynamického charakteru.

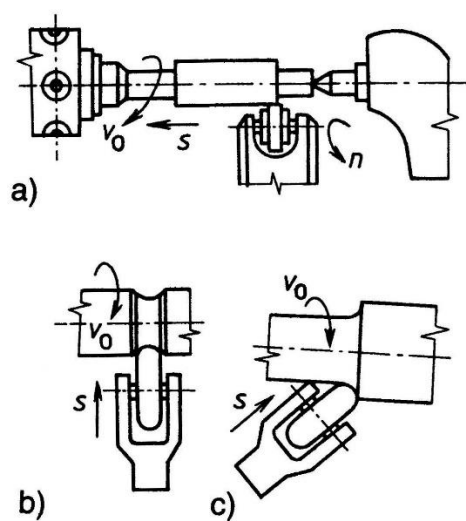
Na vlastní proces plastické deformace povrchu válečkované součásti, a tím i na konečné účinky metody válečkování mají značný vliv rozměry a geometrický tvar funkční části tvářecího prvku, která je ve styku s válečkováným povrchem. Z tohoto důvodu je u

jednotlivých tvářecích prvků posuzován zejména vliv rozměru vnějšího průměru D a geometrického tvaru pracovní plochy v příčném řezu. Tento tvar pracovní plochy bývá nejčastěji určen poloměrem zaoblení r , šířkou válcové části s , poloměrem náběhové hrany r_1 a úhlem zkosení α . Uvedené parametry mají vliv rovněž na volbu pracovních podmínek při válečkování, zejména na velikost tvářecí síly a posuv nástroje.

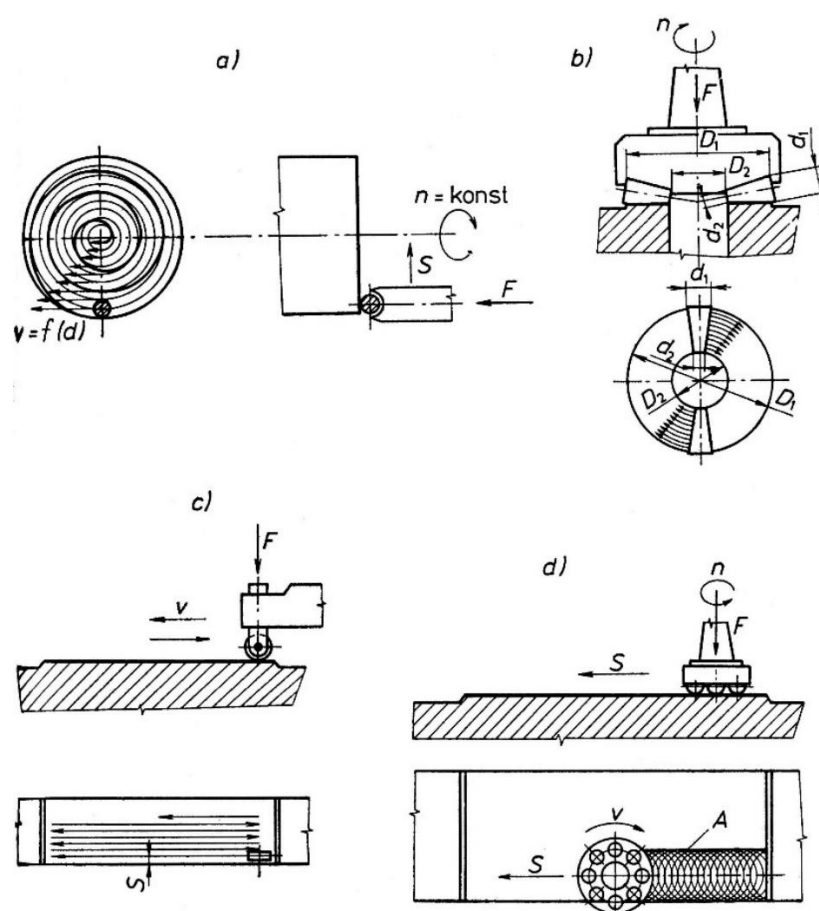
S rostoucím průměrem D , poloměrem zaoblení r nebo šířkou válcové části s se při stejné hloubce vtláčení a u shodného válečkovaného materiálu zvyšuje rovněž velikost tvářecí síly F . S rostoucím průměrem D současně klesá tangenciální složka tvářecí síly, nutná k překonávání valivého odporu, což vede ke snížení krouticího momentu při válečkování. Větší průměr D , poloměr zaoblení r nebo šířka válcové části s se projevuje při stejných hodnotách tvářecí síly nižšími hodnotami zpevnění a rovnoměrnějším rozložením napětí na ploše styku, což částečně snižuje u delších a málo tuhých součástí nebezpečí jejich deformace.

Velikost poloměru zaoblení r tvářecího prvku má mimo již uvedené závislosti ve vztahu k tvářecí síle značný vliv rovněž na hodnoty výsledné drsnosti povrchu válečkované plochy, neboť při stejných hodnotách posuvu tvářecího prvku lze zvětšením poloměru zaoblení r dosáhnout nižších hodnot drsnosti povrchu. U tvářecích prvků pro intenzivní zpevňování, při němž má dosažená drsnost povrchu až druhořadý význam, je výhodnější naopak zmenšovat poloměr zaoblení r , neboť to umožňuje pracovat s nižšími hodnotami tvářecích sil. V řadě případů, zejména při válečkování tvarových ploch (zaoblených přechodů), je poloměr zaoblení tvářecího prvku již předem určen geometrickým tvarem válečkované plochy.

Zvětšení šířky válcové části s na pracovním profilu tvářecího prvku se projevuje zvětšením plochy styku s válečkovaným povrchem, což při konstantní tvářecí síle vede ke zhoršení drsnosti povrchu a k nižšímu zpevnění válečkované součásti. [3, 9, 10, 11, 24]



Obr. 38. Schéma různých způsobů válečkování rotačních ploch [10]



Obr. 39. Principy nástrojů pro statické válečkování rovinných ploch [24]

7.2 Metody válečkování

Při volbě konkrétní technologické metody válečkování jsou rozhodující požadované vlastnosti plochy po válečkování. Z tohoto hlediska se technologie válečkování používá zejména pro:

- 1) Vyhlazení povrchu strojní součásti – snížení výšky výchozí mikronerovnosti po předcházejícím opracování.
- 2) Zpevnění povrchové vrstvy materiálu strojní součásti – zejména dosažení vyšší meze únavy, pevnosti a tvrdosti.
- 3) Kalibraci rozměru strojní součásti – dosažení požadované přesnosti rozměrů, geometrického tvaru a polohy válečkované plochy.

Hlazení povrchů strojních součástí

Výsledná drsnost válečkováného povrchu je závislá na řadě konkrétních podmínek a činitelů, které ovlivňují proces válečkování. Mezi nejdůležitější patří:

- A. Velikost tlaku mezi tvářecím prvkem válečkovacího nástroje a povrchem součásti.
- B. Výchozí drsnost povrchu a tvar mikronerovností od předcházejícího opracování.
- C. Mechanické vlastnosti válečkováného materiálu.
- D. Geometrický tvar a jakost funkční plochy tvářecího prvku válečkovacího nástroje.
- E. Pracovní posuv válečkovacího nástroje.

V menší míře ovlivňují výslednou drsnost válečkováného povrchu rychlost válečkování, počet předválečkování, způsob chlazení a mazání. Hladicí účinky válečkování jsou příznivé proto, že tato technologie do značné míry eliminuje nepříznivý vliv nerovnoměrných plastických deformací, chvění soustavy stroj – nástroj – obrobek – přípravek a vliv opotřebení břitů na drsnost povrchu, který se projevuje u metod třískového obrábění.

Na výslednou drsnost povrchů po válečkování mají vliv i metalurgické vady materiálu, poruchy od předcházejícího obrábění a poškozené plochy na činné části tvářecího nástroje. Tyto vady se projevují na válečkované ploše buď místně v určitých oblastech, nebo se pravidelně kopírují po celé ploše. Na rozdíl od technologií dokončovacího obrábění (broušení, honování, superfinišování a lapování), kdy nejsou tyto vady materiálu v řadě případů vizuálně zřetelné, technologie dokončování válečkováním tyto vady na vzniklé lesklé ploše zvyrazňuje.

Metody válečkování, jejichž hlavním účinkem je snížení drsnosti povrchu, jsou charakteristické především tím, že nástroj působí na válečkovaný povrch prostřednictvím pružného članku, tvářecí síla má statický charakter a její hodnota je volena minimální, pouze taková, aby došlo k zatlačení a vyhlazení vrcholků mikronerovností od předcházejícího opracování. K podstatnému snížení drsnosti povrchu dochází i při aplikaci metod válečkování založených na principu dynamického působení tvářecí síly a nástrojů, které nejsou odpruženy. U těchto metod však dochází vedle vyhlazení povrchu i k podstatně vyššímu zpevnění povrchové vrstvy materiálu, a lze je podle technologického účelu a konstrukčního provedení zařadit mezi metody hladicí, zpevňovací i kalibrovací. Válečkováním lze běžně dosahovat u tvárných materiálů drsnosti povrchu $R_a = (0,1 \text{ až } 0,8) [\mu\text{m}]$.



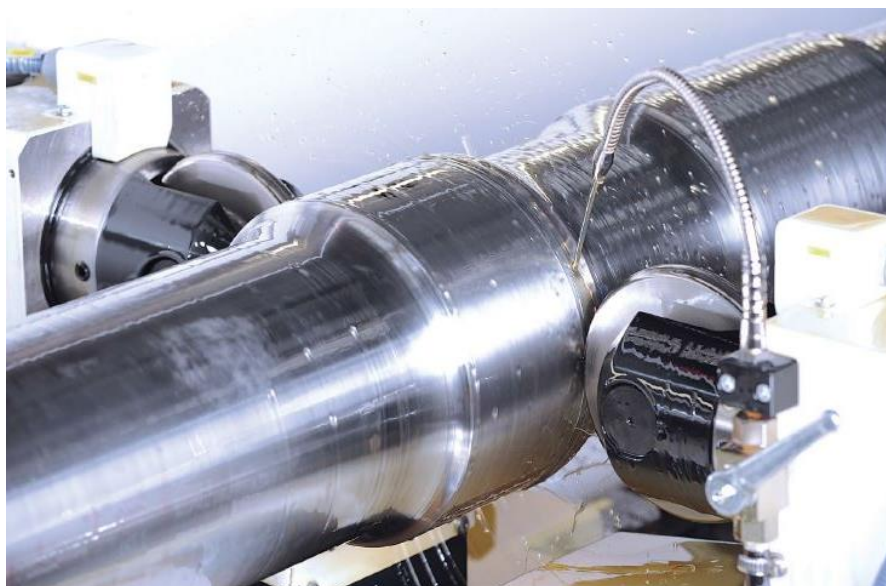
Obr. 40. Diamantový hladicí trn [25]

Zpevňování povrchové vrstvy materiálu strojních součástí

Další kategorii tvoří metody, jejichž rozhodující účinek spočívá v intenzivním zpevnění válečkované plochy, čímž dochází k výraznějším změnám mechanických vlastností této plochy do hloubky až několika milimetrů. Do povrchové vrstvy materiálu jsou těmito metodami vnášena příznivá tlaková pnutí.

U převážné většiny součástí je v první fázi vzniku únavových trhlin rozhodující především povrchová vrstva materiálu a zbývající část objemu tělesa má na únavovou pevnost malý vliv. Pro zvýšení únavové pevnosti strojních součástí má podstatný význam především velikost a rozložení vnitřních pnutí v povrchové vrstvě součástí. Tlaková pnutí na povrchu válečkované plochy uzavírají cestu korozi, zpomalují rozvoj trhlin a eliminují vliv mikrovrubů. Tento příznivý vliv tlakových pnutí na únavovou pevnost se výrazně projevuje zejména u střídavě namáhaných součástí s místy koncentrovaného napětí.

Koncentrace napětí u strojních součástí může být způsobena náhlou změnou geometrického tvaru i nekvalitním opracováním. Z tohoto hlediska má i nekvalitní obrábění v řadě případů značně nepříznivý vliv na únavovou pevnost strojních součástí, protože řezání vede ke značnému narušení povrchové vrstvy materiálu řadou vrubů, kde mohou vznikat zárodky únavového lomu.



Obr. 41. Zpevňování zaoblených přechodů válečkováním [26]

Na zvýšení únavové pevnosti strojních součástí mají příznivý vliv i vyšší tvrdost a pevnost plochy po válečkování. K intenzivnímu zpevnění dochází především u ocelí s nižší výchozí pevností. Tvrdost válečkovaného povrchu se v závislosti na hloubce ovlivněné vrstvy snižuje. Maximální tvrdost válečkovaného materiálu však není přímo na povrchu, nýbrž asi (0,01 až 0,3) mm pod povrchem válečkované součásti. Okrajová vrstva materiálu účinkem adhezní síly ulpívá na tvářecích prvcích. K vlastní plastické deformaci (tečení) dochází teprve pod touto stykovou vrstvou. Nižší tvrdost okrajové vrstvy je částečně ovlivněna i účinky pružné deformace materiálu. Válečkováním lze dosáhnout zvýšení tvrdosti povrchové vrstvy materiálu o (20 až 100) %. Válečkováním se také zvyšuje odolnost třecích ploch proti opotřebení.

Kalibrování strojních součástí válečkováním

Z hlediska kvalitativních účinků metod válečkování patří do třetí skupiny metody, u nichž je rozhodující zejména dosažení požadované přesnosti rozměrů, geometrického tvaru a polohy, při odpovídajícím vyhlazení povrchu strojní součásti. Odpružené válečkovací nástroje způsobují pouze změnu rozměru o hodnotu trvalé plastické deformace. Přesnost

geometrického tvaru a polohy válečkových ploch po předcházejícím obrábění prakticky nejsou těmito nástroji ovlivněny. Technologie kalibrování válečkováním má ve strojírenské praxi podstatně užší okruh využití než hladicí nebo zpevňovací válečkování. Tato technologie vyžaduje náročnější přípravu polotovaru před válečkováním, přesné seřízení stroje a dodržení konstantních pracovních podmínek v průběhu válečkování.

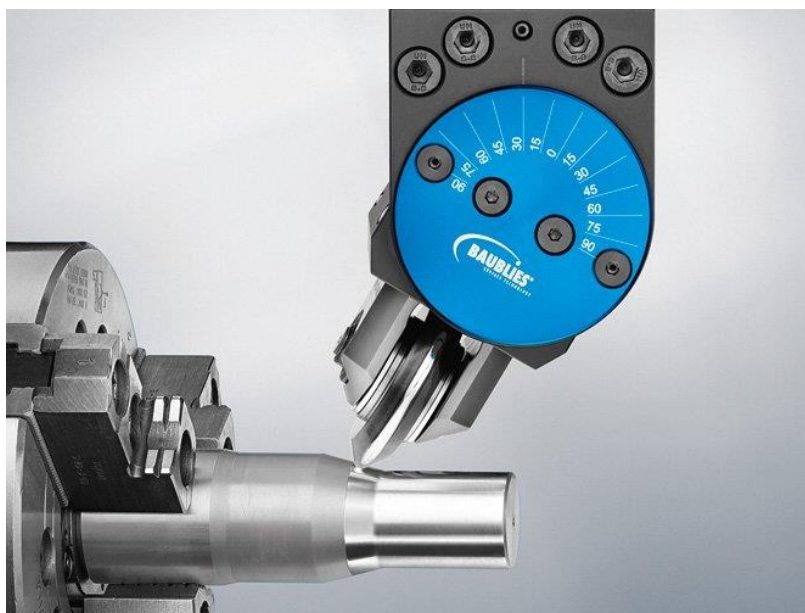
Charakter a směr působení tvářecí síly při válečkování

Důležitým znakem, který od sebe podstatně odlišuje jednotlivé metody válečkování, je časový průběh velikosti tvářecí síly působící na povrch strojní součásti v procesu válečkování.

Z tohoto hlediska lze metody válečkování do dvou základních skupin:

- a) Statické válečkování – metody válečkování, při nichž k plastické deformaci povrchu dochází působením tvářecích sil, které působí na tvářený povrch staticky.
- b) Dynamické válečkování – metody válečkování, při nichž k plastické deformaci povrchu dochází působením časově omezeného silového impulsu tvářecího prvku, který zvolenou frekvencí působí na tvářený povrch.

Metody statického válečkování jsou charakteristické tím, že je tvářecí nástroj s tvářeným povrchem v průběhu válečkování v nepřetržitém styku. Velikost tvářecí síly je konstantní, nebo se v průběhu válečkování plynule mění. Statické válečkování, u něhož dochází k plynulé změně velikosti tvářecí síly, se vyskytuje zejména u metod pracujících zapichovacím způsobem. V těchto případech postupně roste velikost tvářecí síly v závislosti na stupni plastické deformace válečkováného povrchu, přičemž působení této síly neztrácí svůj statický charakter. Nerovnoměrný průběh velikosti tvářecí síly se rovněž projevuje vlivem nestejnomyšerného přídavku pro válečkování, úchylkami geometrického tvaru válečkové součásti nebo nepřesností stroje, na němž válečkování probíhá. Tyto vlivy se projevují zejména u statických válečkovacích nástrojů tuhé (neodpružené) konstrukce, kde změny velikosti tvářecí síly vyvolané těmito vlivy mohou způsobit poruchy na válečkováném povrchu (nedostatečně vyválečkováná plocha, překročení mezi pevnosti a odlupování materiálu, vlnitost povrchu). Z uvedených důvodů se nástroje pro statické válečkování často konstruují s odpruženým tvářecím prvkem.



Obr. 42. Nástroj pro statických válečkovací vnějších ploch [25]

Podstata metod dynamického válečkování spočívá v tom, že k plastické deformaci povrchu tvářené součásti dochází působením řady časově omezených silových impulsů. Vzhledem k tomu, že tvářecí síla působí na tvářený povrch ve velmi krátkém časovém intervalu, lze proces dynamického válečkování přirovnat k tváření rázem. Při rázu dochází rovněž k úbytku kinetické energie, kterou získá tvářecí nástroj z vnějšího zdroje. Kinetická energie tvářecího tělesa se částečně mění v energii potenciální, jejímž projevem je napjatost v tvářeném kovu, a částečně v teplo. Významným parametrem, který ovlivňuje proces dynamického válečkování, je frekvence silových impulsů. Frekvence silových impulsů, používaná u metod dynamického válečkování, se podle zdroje silových impulsů pohybuje ve značném rozsahu. Mechanické zdroje, založené na principu rotace nevyvážených hmot, excentrů, vaček pneumatických pulsátorů, dosahují frekvence (10 až 5 000) Hz. Mnohonásobně vyšších frekvencí se dosahuje ultrazvukovými zdroji kmitů, které pracují s frekvencí až 30 kHz. Metody dynamického válečkování jsou s výhodou využívány zejména pro hladicí a zpevňovací válečkování, neboť dynamické účinky tvářecích nástrojů umožňují dosáhnout velké hloubky zpevnění tvářeného materiálu při nižším statickém zatížení válečkovacího zařízení a válečkované součásti.

Volba pracovních podmínek při válečkování

K rozhodujícím pracovním podmínkám technologie válečkování patří:

- a) Tvářecí síla – má vliv na drsnost povrchu po válečkování, na hloubku plastické deformace a zpevnění povrchu, na velikost napětí vznikajícího v ovlivněné zóně styku a na řadu dalších mechanických, geometrických a fyzikálních vlastností válečkovaného materiálu i řadu souvisejících podmínek válečkování. Velikost tvářecí síly ovlivňuje v určitých případech i produktivitu válečkovací metody, neboť při nedostatečné velikosti tvářecí síly nedojde k zahlázení výchozí drsnosti povrchu nebo zpevnění na požadované hodnoty a je nutno volit vícenásobné převálečkování (více průchodů), snížení pracovního posuvu nebo snížení hodnot výchozí drsnosti povrchu, což ve všech případech vede ke snížení produktivity.
- b) Pracovní posuv nástroje – výrazně ovlivňuje zejména drsnost válečkovaného povrchu a produktivitu válečkování. Neúměrné zvyšování posuvu se nepříznivě projevuje na kvalitě válečkovaného povrchu.
- c) Přídavek pro válečkování.
- d) Přesnost rozměrů a geometrického tvaru.
- e) Drsnost povrchu před válečkováním.
- f) Rychlost válečkování – rychlost, kterou se tvářecí prvek válečkovacího nástroje přemísťuje po válečkové ploše. Při statickém válečkování ploch rotačním způsobem s malým podélným posuvem nebo zapichováním je rychlost válečkování dána přibližně obvodovou rychlostí plochy válečkované součásti. U válečkovacích metod pracujících na principu staticky působících sil má rychlost válečkování na kvalitativní účinky metody poměrně malý vliv. Rovněž u zpevňovacího válečkování je vliv rychlosti válečkování na dosažené hodnoty meze únavy válečkované součásti nevýrazný. U metod pracujících s dynamickým účinkem tvářecí síly má rychlost válečkování podstatně větší význam.
- g) Počet převálečkování – jestliže je již jednou převálečkovaný povrch součásti znovu válečkován jedním nebo několika dalšími průchody (pracovními cykly) válečkovacího nástroje za stejných nebo rozdílných pracovních podmínek, hovoříme o tzv. vícenásobném převálečkování. Zlepšení drsnosti povrchu v průběhu hladicího válečkování lze v určitém rozsahu pozorovat při druhém pracovním cyklu. Při dalších cyklech se drsnost povrchu v podstatě nemění a při určitém počtu cyklů se naopak vlivem rozrušení povrchové vrstvy podstatně zhoršuje. Větší význam má vícenásobné

převálečkování při zpevňování součástí, při němž počet pracovních cyklů válečkovacího nástroje vede ke zvýšení pevnění válečkováného materiálu. Vícenásobným převálečkováním se dosahuje především větší hloubky zpevněné vrstvy a do určité hranice i větší drsnosti povrchové vrstvy materiálu.

- h) Mazání a chlazení tvářecích prvků – při válečkování vznikají na povrchu součásti značné tangenciální složky sil, jejichž velikost je dána především hodnotami součinitele valivého a smykového tření mezi tvářecím prvkem a válečkováným povrchem. Přítomností maziva v místě styku tvářecího prvku s válečkováným povrchem se potlačují místní špičky napětí na vrcholcích mikronerovností, průběh napětí při plastické deformaci má rovnoměrnější charakter a snižuje se množství práce potřebné na dosažení požadovaného stupně deformace. Stejně významným faktorem je při válečkování účinné chlazení válečkovacího nástroje, protože růst teploty v průběhu plastické deformace povrchu snižuje viskozitu použitého maziva, a tím i tloušťku mazací vrstvy, omezuje rychlost použitelnou při válečkování a produktivitu válečkovacího procesu. [3, 9, 10, 11, 24]



Obr. 43. Nástroj pro válečkování vnitřních ploch [27]

Otryskávání

Při otryskávání je na povrch součásti vrhán proud tvrdých tělísek (kuliček z kalené oceli nebo bílé litiny, skleněných kuliček, zrněk písku), čímž dochází ke zpevnění povrchu součásti, a tím ke zvýšení únavové pevnosti a trvanlivosti součásti. Dochází ke zlepšení vzhledu a drsnosti povrchu. Tělíska jsou při otryskávání unášena proudem vzduchu, kapaliny nebo jsou na povrch vrhána metacím kolem s lopatkami. Podle použitých tělísek se jedná o brokování, balotinování nebo pískování. Přesnost rozměrů a geometrického tvaru obrobku se nezlepšuje. Dosahovaná drsnost povrchu je $R_a = (0,1 \text{ až } 0,8) [\mu\text{m}]$. [10]

8 LEŠTĚNÍ A OMÍLÁNÍ

Pro dosažení lesklého povrchu s menšími nároky na přesnost rozměru, tj. úpravy povrchu převážně z důvodu jejich vzhledu, se používají nejrozličnější druhy dokončovacích operací, které se souhrnně nazývají leštění. Úběr materiálu je u těchto operací minimální, odstraňují se pouze stopy po předchozím obrábění. Z povrchu se kromě mikronerovností odstraňují nečistoty, vrstvy oxidů a jiných chemických sloučenin. Leštěním se získá zrcadlový lesk součástí. Přesnost rozměrů a geometrického tvaru obrobku se nezlepšuje.

Leštění se obvykle provádí ve třech krocích:

- 1) hrubování brousicími zrnky pevně vázanými na textilní podklad (brousicí plátna, pásy, kotouče),
- 2) jemné leštění zrnky volně rozptýlenými v kapalině (oleje), nebo lešticí pastě (tuky, vosky), které se nanášejí na textilní kotouče nebo pásy,
- 3) dolešťování bez brusiva přitlakem textilního kotouče nebo pásu, za vyšších rychlostí dochází třením k zahřátí (změknutí) a plastické deformaci (rozleštění) vrcholů nerovností.

Podle pracovního režimu rozlišujeme leštění:

- a) mechanické,
- b) chemické,
- c) elektrochemické.

Mechanické leštění kotouči

Před leštěním se povrch kotouče nasytí lešticím prostředkem některým z těchto způsobů:

- nanesením směsi oleje a brusiva,
- přidáním zrn brusiva do základního materiálu kotouče,
- nanesením lešticí past,
- poléváním kotouče po dobu leštění lešticím prostředkem.

Parametry ovlivňující výsledek leštění jsou následující: druh a zrnitost použitého brusiva, obvodová rychlost kotouče, tlak součásti na kotouč, materiál kotouče a jeho vlastnosti, druh a množství mazací nebo chladicí kapaliny.

Obvodová rychlost kotouče v_0 se volí v rozsahu (25 až 40) $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$.

Mechanické leštění kartáči

Optimální pracovní podmínky závisí na charakteru práce, výchozí a požadované jakosti, materiálu obrobku, druhu kartáče a použitého stroje.

Obvodová rychlost kartáče v_0 se volí v rozsahu (10 až 60) $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, maximální hodnota je omezena teplotou na povrchu součásti, která nemá být větší než 60 °C. Nejlepší jakost povrchu se dosahuje při v_0 přibližně 25 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, závisí však na materiálu činné části nástroje.

Mechanické leštění pásy

Optimální pracovní podmínky závisí na měrném tlaku mezi pásem a leštěným povrchem, na materiálu a rozměrech obrobku, na obvodové rychlosti a šířce pásu.

Obvodová rychlost pásu v_0 se volí v rozsahu (10 až 40) $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, optimální hodnota v_0 je 25 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$. Měrný tlak mezi pásem a leštěným povrchem se volí v rozsahu (0,05 až 0,075) MPa. Leštění pásy je dokonalejší a výkonnější než leštění kotouči.

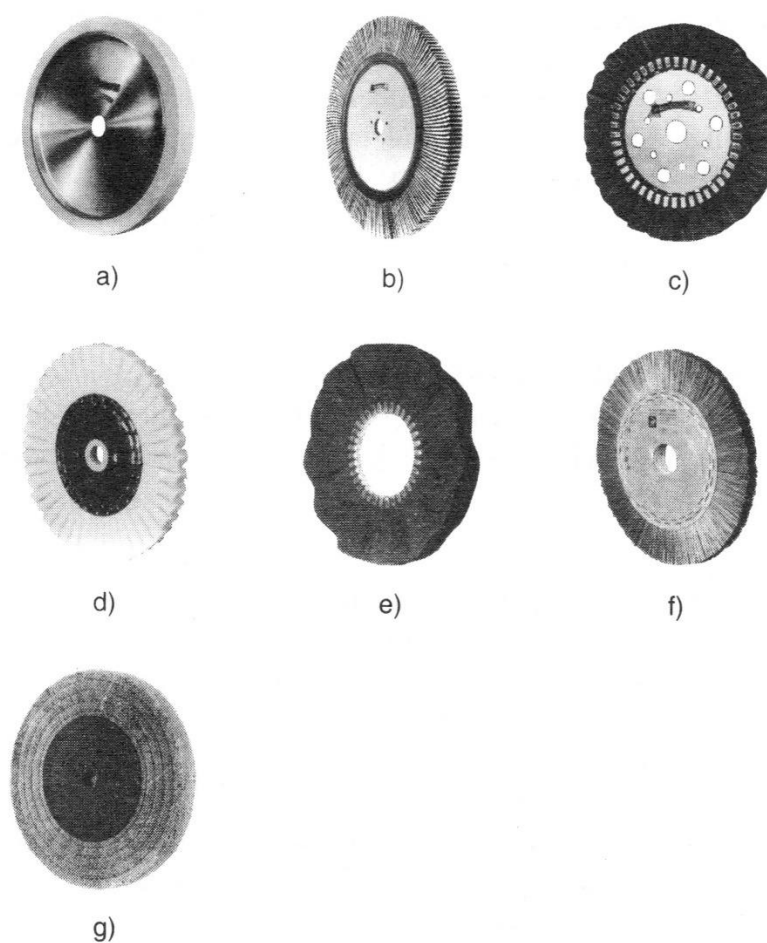
Nástroje

Nástroj pro mechanické leštění se skládá z leštícího nástroje a leštícího prostředku.

Jako leštící prostředky se používají zrna tvrdých brousicích materiálů, která jsou buď pevně uchycena na činné ploše nástroje, nebo se volně pohybují mezi povrchem nástroje a povrchem obrobku. Nejčastěji používanými leštícími prostředky jsou: oxid hlinitý, karbid křemíku, křída, oxid chromitý, oxid železitý, vídeňské vápno, stearin, kaolin atd. Leštící prostředky se dodávají buď jako volná zrna, nebo ve formě speciálně připravovaných leštících past.

Leštícími nástroji jsou kotouče, kartáče, pásy a speciální nástroje. Leštící kotouče jsou zhotoveny z plsti, skládaných tkanin, bavlny, gumy, kovu apod. Leštící kartáče, prstence a válce mají střed kotouče vyroben z kovu, plastu nebo gumy, do kterého jsou pevně uchycena vlákna z ocelového drátu, polyamidu, bavlněné příze, drátů z bronzu apod. Uspořádání vláken může být radiální, tangenciální, v řadách, ve šroubovici nebo nepravidelné. Leštící pásy jsou vyráběny z polyamidu, bavlněné tkaniny, gumy apod.

Při leštění se dosahuje drsnosti povrchu $R_a = (0,1 \text{ až } 0,4) [\mu\text{m}]$.



Obr. 44. Lešticí kotouče [10]

a), b) bavlna, **c)** guma, **d)** příze, **e)** nylonová tkanina, **f)** nylonová vlákna, **g)** vlněná tkanina



Obr. 45. Leštění skla [28]

Omílání

Omílání je speciální proces leštění, při kterém se obrobky a leštící prostředek dostávají do vzájemného pohybu otáčením nebo vibrační strojního zařízení. Úběr materiálu se děje třením a nárazy leštícího prostředku na povrchu obrobku.

Do otáčejícího se nebo vibrujícího bubnu se vloží leštící prostředek a leštěné obrobky. Pohybem bubnu dochází ke vzájemnému pohybu leštícího prostředku a obrobků, a tím k leštění.

Omílání se provádí tam, kde by byl jiný způsob leštění pracný a drahý, dále u součástí, kde požadujeme vysokou jakost celého povrchu součásti, bez požadavku na přesnost rozměrů a geometrického tvaru. Omíláním se také odstraňují otřepy.

Při omílání je nástrojem leštící prostředek, který je složen z abrazivního materiálu a aktivní kapaliny. Jako abrazivní materiály se používají úlomky brousicích kotoučů, úlomky porcelánu, kalené ocelové kuličky, drcená žula, litinová drť, úlomky keramiky, vídeňské vápno apod. Jako aktivní kapaliny se používá chlorid sodný, nitrid sodný apod.

Při omílání se dosahuje drsnosti povrchu $R_a = (0,1 \text{ až } 0,4) [\mu\text{m}]$. [10, 11]



Obr. 46. Omílání [30]

9 POKROČILÉ DOKONČOVACÍ PROCESY

V současné době se ve špičkových průmyslových odvětvích zvyšuje poptávka po nano-dokončování povrchů součástí. Tyto procesy se provádí za účelem zvýšení jakosti povrchu, odstranění povrchové vrstvy po obrábění, nebo odstranění povrchových a podpovrchových defektů. Výsledkem je nízký koeficient tření, delší životnost a efektivnost strojních součástí. Stejně důležité je estetické hledisko povrchu výrobku.

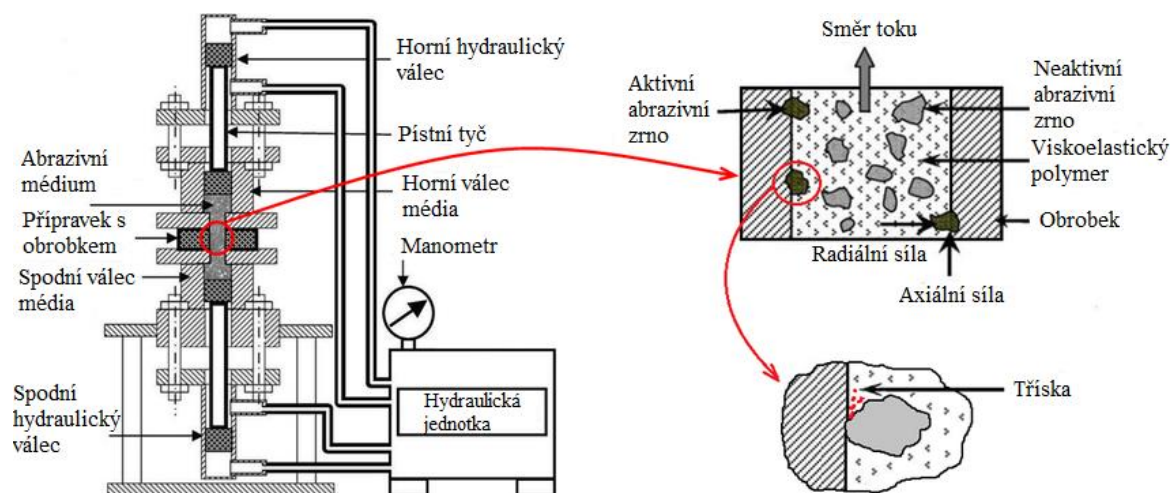
9.1 Mechanické nano-dokončovací procesy

Následující typy pokročilých nano-dokončovacích procesů nepotřebují v průběhu dokončovací operace podporu magnetického pole.

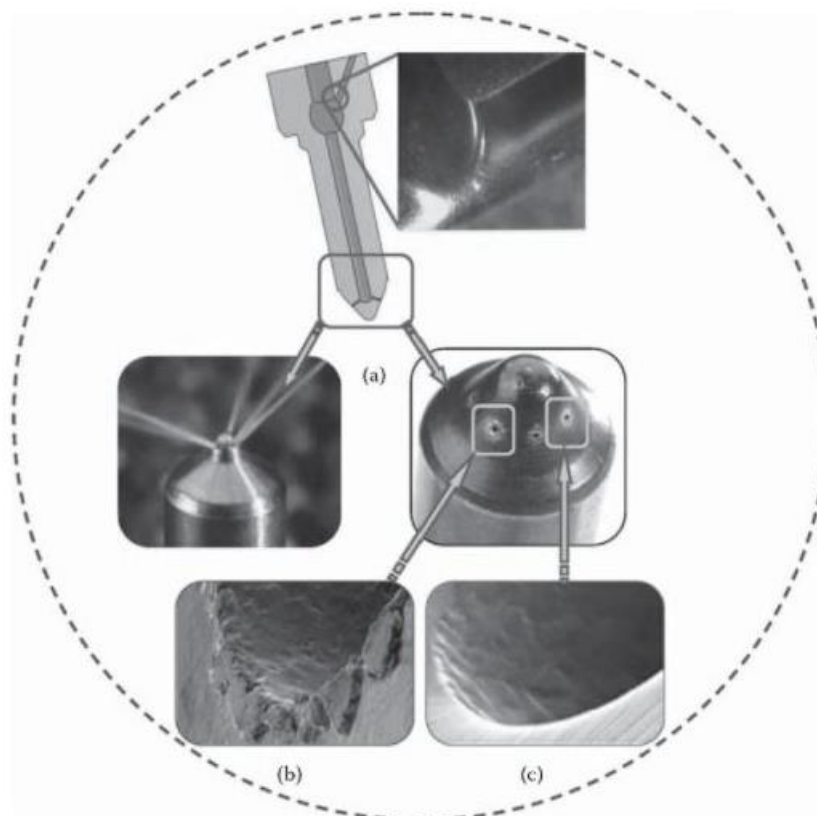
Abrasive flow machining (AFM)

AFM je vysoce univerzální dokončovací proces, který umožňuje dokončovat součásti bez ohledu na složitost jejich geometrického tvaru. Lze jím dokončovat vnější i vnitřní povrchy (včetně konkávních a konvexních). Tento proces umožňuje dokončovat jednoduché i velmi složité tvary ploch na drsnost povrchu okolo $R_a = 0,05 \text{ } [\mu\text{m}]$. Přesnost rozměrů a geometrického tvaru obrobku se nezlepšuje.

Tento proces využívá viskoelastické abrazivní médium (elastomerní polymer + abrazivní zrna + plastifikátor + přísady), které je protlačováno pístem přes přípravek, ve kterém je umístěna dokončovaná součást. Přípravek slouží k upevnění obrobku, k usměrnění toku média a pomáhá při vytváření vhodného průchodu média. Přípravek zároveň zamezuje proudění média v oblastech, které nemají být dokončovány. Tok média přes přípravek zajišťují dva vertikálně protilehlé písty dolního a horního hydraulického válce, které přetlačují abrazivní médium tam a zpět. Pracovní cyklus je dán počtem dvojzdvihů. Počet cyklů ovlivňuje míru úběru materiálu. K brusnému účinku dochází pouze v místech, kde je omezeno proudění média. Průtok média je závislý na protlačovacím tlaku, viskozitě média a konstrukci přípravku. Velikost třísky je závislá na velikosti sil působících na obrobek. Radiální síla způsobuje průnik abrazivní částice do povrchu obrobku a axiální síla odebírá materiál ve formě mikro-trísek. Tento proces se používá pro dokončování součástí letadel a plynových turbín, v automobilovém průmyslu a biomedicíně.



Obr. 47. Princip Abrasive flow machining (AFM) [31]



Obr. 48. Vstřikovací tryska paliva dokončená procesem AFM [32]

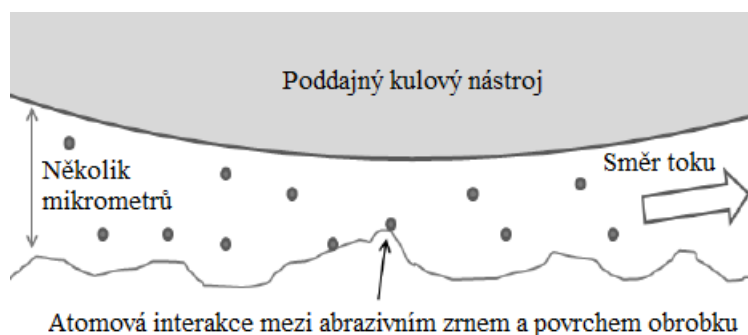
- a) vstřikovací tryska paliva, b) díra vyrobená technologií EDM,
c) díra dokončená procesem AFM

Elastic emission machining (EEM)

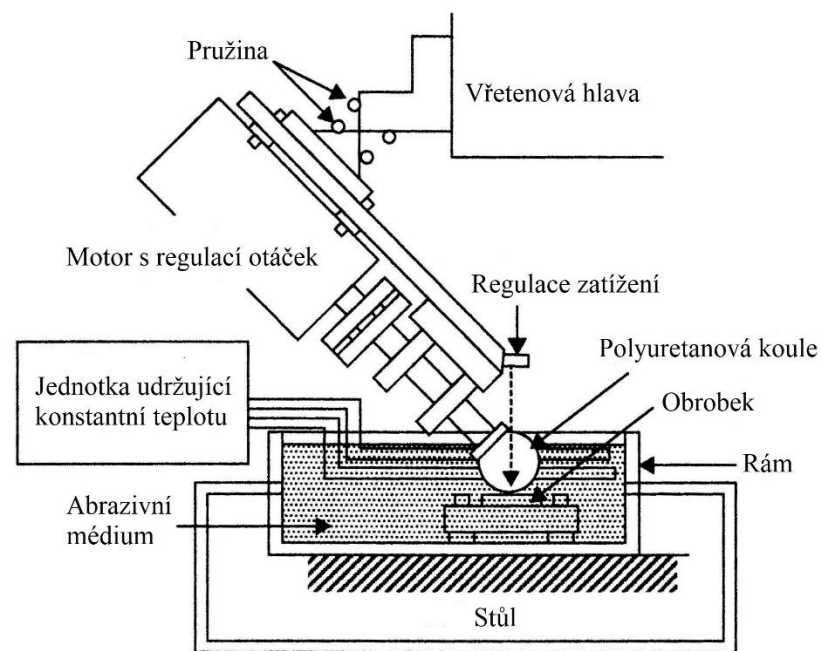
Požadavky na ultra hladké povrchy v oblasti optiky se neustále zvyšují. Optické materiály jsou využívány v mnoha technologiích, jako jsou dalekohledy, kamery, astronomická zrcadla, metrologie, navigace, systémy strojového vidění, modulace energetických paprsků a mnoho dalších. Tyto aplikace optiky vyžadují extrémní přesnost geometrického tvaru a drsnosti povrchu. Vedle geometrického tvaru a drsnosti povrchu je stejně důležitá výroba ploch bez napětí, aby se snížila pravděpodobnost neočekávaného selhání optických materiálů. Velmi málo procesů je schopno opracovávat optické materiály, u nichž je požadována přesnost geometrického tvaru v řádu pod mikrometr a drsnosti povrchu v řádu angstromů. Jedním takovým procesem je EEM.

Při tomto procesu se materiál odebírá mechanicky, ale na atomární úrovni. V ideálním případě odebírá každé nanočásticové abrazivní zrnko materiál z povrchu obrobku atom za atomem. Tento proces je schopen dosáhnout drsnost povrchu R_a v řádu angstromů, ale je velmi pomalý. Za určitých podmínek je to jediný mechanický a poměrně jednoduchý proces, který může dokončovat součásti, u nichž je vyžadována drsnost povrchu na nano úrovni.

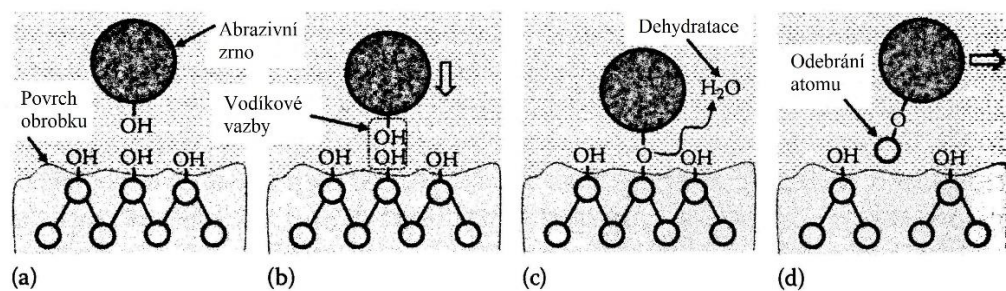
V tomto procesu jsou brusná zrna (ZrO_2) unášena proudem kapaliny (deionizovaná voda) nad povrchem obrobku (nejsou nástrojem přímo přitlačována na obrobek). Při proudění zrn je vysoká pravděpodobnost, že nanočásticové abrazivní zrnko oddělí některé atomy z povrchu obrobku. Pokud tento proces probíhá po dlouhou dobu, může být materiál obrobku odebrán atom za atomem bez použití velké mechanické síly. Mechanismus úběru materiálu silně závisí na vlastnostech materiálu obrobku a abrazivních zrn.



Obr. 49. Princip Elastic emission machining (EEM) [33]



Obr. 50. Schéma EEM zařízení [4]



Obr. 51. Princip interakce mezi abrazivními zrny a povrchem obrobku [4]

a) před interakcí, b) vodíkové vazby, c) dehydratace, d) odebrání atomu

Faktory ovlivňující smykové napětí:

Parametry obrábění:

- aplikované normálové zatížení,
- otáčky nástroje,
- čas obrábění.

Parametry média:

- viskozita,
- průměrná velikost abrazivních zrn,
- mechanické a chemické vlastnosti abrazivních zrn a kapaliny,
- objemový podíl abrazivních zrn a kapaliny.

Parametry nástroje:

- zakřivení,
- drsnost povrchu,
- tvar,
- modul pružnosti,
- odolnost proti opotřebení.

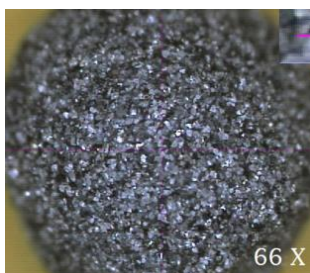
Parametry obrobku:

- mechanické a chemické vlastnosti,
- drsnost povrchu,
- geometrické parametry.

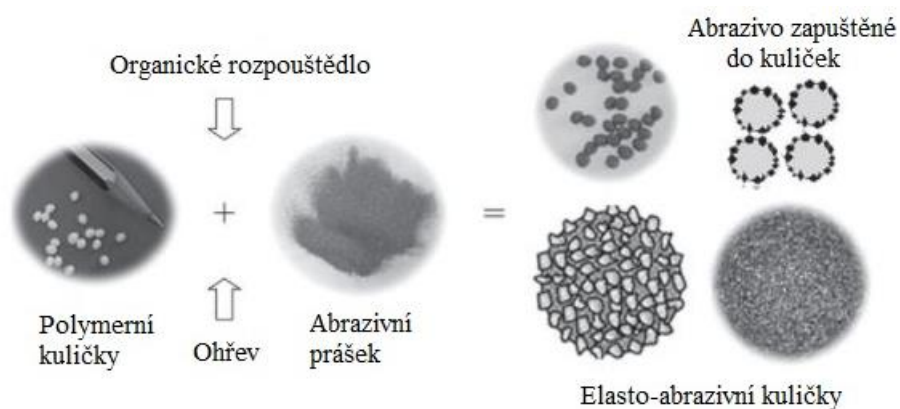
Elastic abrasive finishing (EAF)

V tomto procesu jsou abrazivní zrna zapuštěna do elastomerních kuliček, čímž vzniká elastomerní abrazivo ve formě kuliček (průměr v rozsahu 3 až 4 mm), s nímž se snadno zachází. Elasto-abrazivní kuličky mají výhody jak volných, tak vázaných abrazivních částic. Když tyto kuličky zasáhnou vrcholky drsného povrchu obrobku, jsou schopny odebrat velmi malé množství materiálu ustříhnutím vrcholků mikronerovností, ale zároveň jsou kuličky dostatečně pružné, aby nepronikly příliš hluboko, čímž by zhoršily stávající povrchovou úpravu. Elasto-abrazivní kuličky mohou přidáním částic železa spolu s abrazivními zrny získat magnetické vlastnosti. Přidáním feromagnetických částic se pružnost kuliček snižuje, avšak je realizovatelné řízení síly působící na obrobek. Dosahovaná drsnost povrchu je okolo $R_a = 0,02 \text{ } [\mu\text{m}]$.

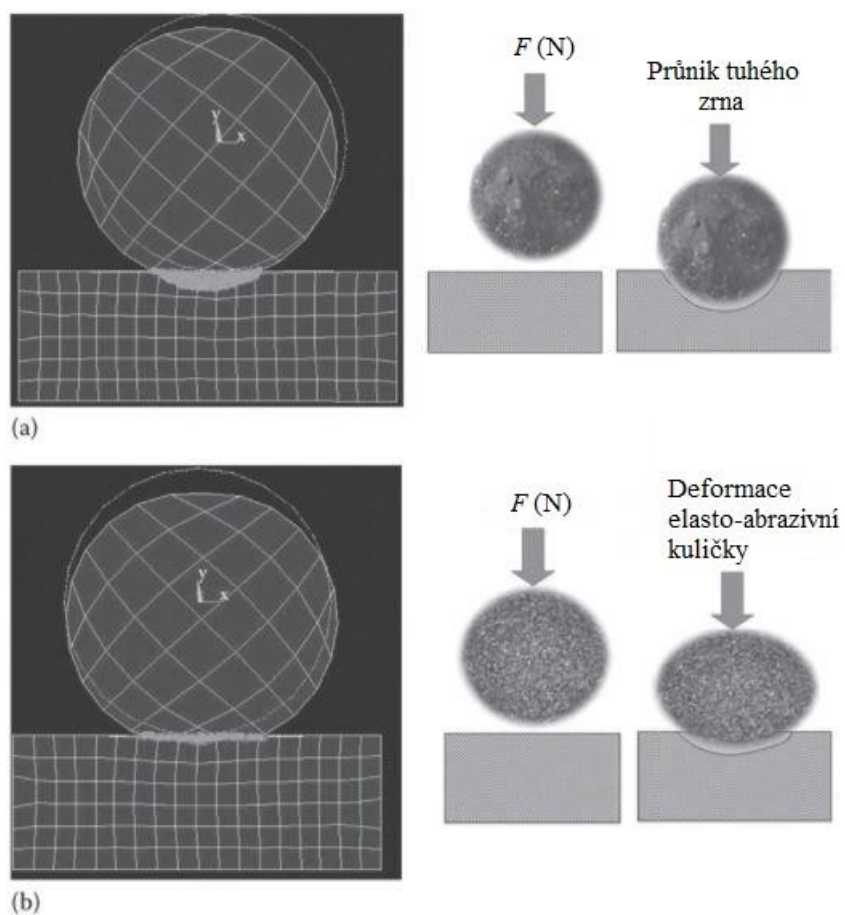
Hlavními složkami elasto-abrazivní kuličky jsou kulička z elastomerního polymeru, jemná abrazivní zrna a vhodné organické rozpouštědlo. Úlohou organického rozpouštědla je změkčit polymerovou kuličku a učinit ji tak poddajnou k zapuštění abrazivních zrn, ke kterému dochází prostřednictvím vhodného teplotního cyklu.



Obr. 52. Elasto-abrazivní kulička s brusnými zrny z karbidu křemíku [34]



Obr. 53. Princip výroby elasto-abrazivních kuliček [4]

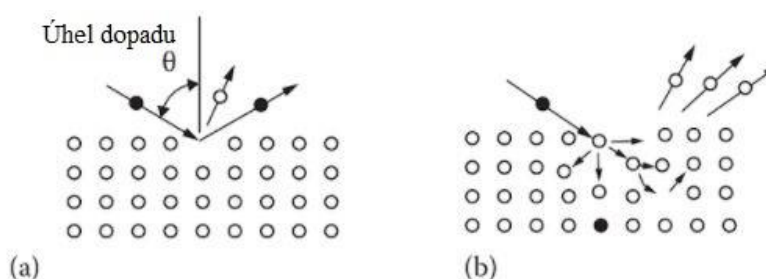


Obr. 54. Vliv elastomerního média během kontaktu s povrchem obrobku [4]

a) tuhé zrno z karbidu křemíku, b) elasto-abrazivní kulička

Focused ion beam machining (FIBM)

Ve srovnání s předchozími třemi procesy se jedná o mírně odlišný proces. Tento proces nelze použít pro dokončení povrchu o velkém obsahu plochy, dokonce ani o velikosti několika mm^2 , protože je poměrně velmi pomalý. Tento proces je vhodný zejména pro nano-procesy nebo mikro-procesy. Tato technologie využívá proud iontů (iontový paprsek), který bombarduje povrch obrobku. Teoreticky se předpokládá, že energie nesená jednotlivým iontem, když zasáhne povrch obrobku je o něco vyšší než vazebná energie atomů na povrchu obrobku. Výsledkem je, že když iont zasáhne atom, je atom vyražen z povrchu obrobku a iont je odražen. Avšak jestliže je energie nesená iontem menší než vazebná energie atomů, pak bude iont odražen bez odstranění atomu z povrchu obrobku. Pokud je energie nesená iontem mnohem větší než vazebná energie atomů, pak namísto jednoho atomu vyrazí v daném okamžiku z povrchu obrobku mnoho atomů, tento iont se vstřípí do povrchu obrobku a vytvoří povrchovou vadu. Tento proces svou povahou odstraňování materiálu dosahuje drsnosti povrchu R_a v řádu angstromů, ale na velmi malé ploše (obvykle v μm^2 nebo nm^2). Tento proces je také znám jako Ion Beam Figuring. [4]



Obr. 55. Focused ion beam machining [4]

a) optimální energie nesená iontem, **b)** vysoká energie nesená iontem

9.2 Nano-dokončovací procesy s podporou magnetického pole

V této důležité třídě nano-dokončovacích procesů je používáno magnetické pole k řízení sil působících na obrobek, aby byl materiál z obrobku odebrán ve formě nano-tríšek, za účelem dosažení drsnosti povrchu v řádu nanometrů.

Tyto procesy lze rozdělit do dvou podkategorií:

- 1) Magnetic abrasive finishing (MAF),
 - Double-disk MAF (DDMAF).
- 2) Magnetorheological finishing (MRF),
 - Magnetorheological AFF (MRAFF),
 - Nano-dokončovací zakřivených povrchů za použití magnetoreologického nástroje s kulovým zakončením (BEMRF),
 - Magnetic float polishing (MFP).

Magnetic abrasive finishing (MAF)

V těchto procesech jsou feromagnetické částice smíchány s požadovanými abrazivními zrnny. Tato směs se přivádí do blízkosti magnetu a povrchu obrobku, který má být dokončen. Díky působení magnetického pole vytváří tato směs flexibilní magnetický brusný kartáč (flexible magnetic abrasive brush FMAB), který je tvořen řadou řetězových struktur, které mohou měnit svůj tvar podle tvaru obrobku, samozřejmě v určitých mezích velikosti a tvaru. Když je tento kartáč přiveden do těsné blízkosti povrchu, který má být dokončen, vyvine malou normálovou sílu, která částečně vtlačí abrazivní zrna do povrchu obrobku. Pokud dochází k relativnímu pohybu mezi FMAB (zejména abrazivními zrnny) a obrobkem, brusná zrna ustříhnou vrcholky mikronerovností na povrchu obrobku a dojde ke snížení drsnosti povrchu. Střížná síla je vyvozena rotací FMAB pomocí elektromotoru. Proces MAF může používat buď směs abrazivních zrn a feromagnetických částic nebo slinuté feromagnetické abrazivní částice. Nicméně v mnoha případech se namísto směsi abrazivních zrn a feromagnetických částic dává přednost použití slinutých feromagnetických abrazivních částic, které vykazují vyšší míru úběru materiálu nebo vyšší rychlost dokončování. Použitím tohoto procesu bylo na obrobku z nitridu křemíku dosaženo drsnosti povrchu nižší než $R_a = 10$ [nm]. V procesech této kategorie se pro vytvoření magnetického pole obvykle používají elektromagnety. Nicméně elektromagnety jsou těžké, rozměrné a jejich rotace se obtížně realizuje. Proto je pro vytvoření magnetického pole výhodné použít permanentní magnety, které jsou díky svým malým

rozměrům snadno zakomponovatelné do malého prostoru. Byly provedeny mnohé úspěšné výzkumy používající permanentní magnety namísto elektromagnetů. Nevýhodou permanentních magnetů je, že neumožňují řídit hustotu magnetického toku v reálném čase, což umožňují elektromagnety.

Double-disk MAF (DDMAF) je modifikovaná verze MAF procesu. Tato modifikovaná verze byla vyvinuta tak, aby mohla být zvýšena produktivita procesu. V tomto případě je obrobek kotoučového typu dokončován na obou stranách zároveň tak, že je FMAB vytvořen na obou stranách dvěma nezávislými sadami magnetů (nebo elektromagnetů), takže doba potřebná k dokončení obrobku se sníží přibližně na polovinu.

Magnetorheological finishing (MRF)

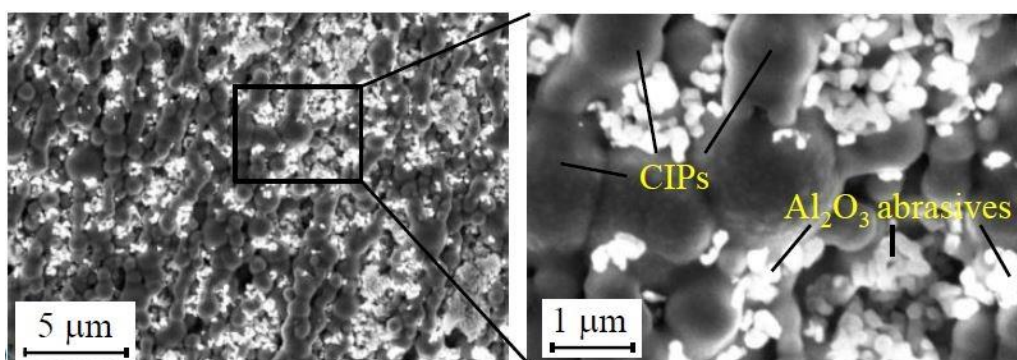
V těchto procesech se jako dokončovací médium používá magnetoreologická kapalina (MR fluid). Tato kapalina je suspenze složená z částic pentakarbonylového železa (Carbonyl Iron Powder CIP) nebo částic železa jako magnetických částic, abrazivních zrn, nosné kapaliny a některých aditiv (aby kapalina získala specifické vlastnostmi, například antikorozi vlastnosti). Namísto směsi železných a abrazivních částic lze také použít slinuté feromagnetické abrazivní částice pro vyšší výkon dokončování. Přivedením magnetoreologické kapaliny do zóny magnetického pole vzniká FMAB, jehož síla závisí na složení média, intenzitě magnetického pole a parametrech dokončování.



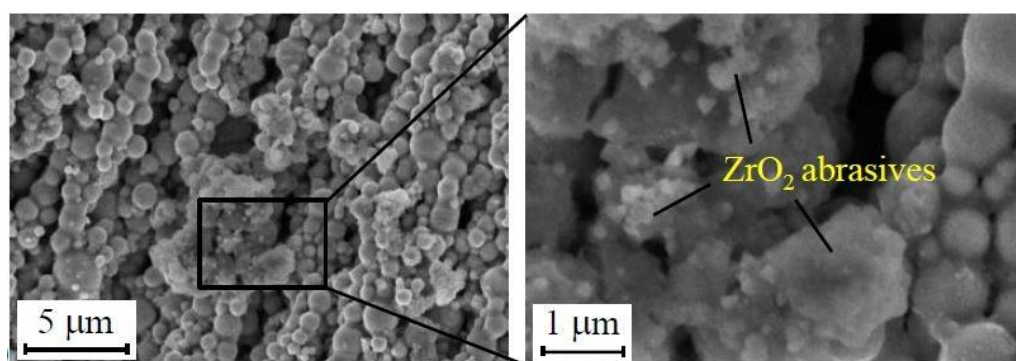
Obr. 56. Práškové pentakarbonylové železo [35]

Pokud se magnetoreologická kapalina dostane pod vliv magnetického pole, její viskozita se zvýší. Během přítomnosti magnetického pole se částice pentakarbonylového železa uspořádají podél magnetických siločar do řetězců a abrazivní zrna jsou zapletena mezi těmito řetězci nebo uvnitř těchto řetězců. Pokud dochází k relativnímu pohybu mezi magnetoreologickou kapalinou a obrobkem, působí na abrazivní zrna normálová síla a

reakční střižná síla odebírá materiál ve formě mikro nebo nano-trísek. Tyto třísky se mísí s magnetoreologickou kapalinou a snižují účinnost obrábění, pokud se stejná kapalina používá dlouhou dobu. Aby se tento účinek minimalizoval, nahrazuje se použitá MR kapalina určitým intervalu času dokončování novou MR kapalinou. Obdobně lze postupovat i v procesu MAF. Použitím tohoto procesu bylo na skleněném povrchu dosaženo drsnosti povrchu nižší než $R_a = 1$ [nm]. Výkonnost procesů v této třídě závisí také na tom, zda je materiál obrobku magnetický nebo nemagnetický. Mezi ostatními procesy dokončování volným brusivem má MRF proces několik výhod, což jej činí vhodnějším pro nano-dokončování obecně a pro nano-dokončování zakřivených povrchů zvláště. Mezi výhody patří možnost řízení řezné síly v reálném čase změnou proudu (v případě elektromagnetu) nebo pracovní mezery (v případě permanentního magnetu). Dále lze řídit řeznou sílu změnou teploty, na níž je závislá viskozita MR kapaliny.



Obr. 57. Směs abrazivních zrn a feromagnetických částic [36]



Obr. 58. Slinuté feromagnetické abrazivní částice [36]

Magnetorheological AFF (MRAFF) je modifikovaná verze MRF procesu, který je omezen na dokončování hlavně poměrně měkkých materiálů a vnějších povrchů. K překonání těchto omezení byl vyvinut postup, při kterém se v AFF procesu aplikuje magnetické pole. Jako abrazivního média se používá MR kapalina, aby bylo možno dokončovat velmi tvrdé

a součásti složitého tvaru včetně zakřivených povrchů. Tento modifikovaný postup byl použit k dokončení zakřivených povrchů (implantáty kolenního kloubu) z titanové slitiny. Tento proces lze snadno použít pro vnitřní i vnější zakřivené a další složité povrchy vyrobené z těžkoobrobitelných materiálů.

Nano-dokončovací zakřivených povrchů za použití magnetoreologického nástroje s kulovým zakončením (BEMRF) je modifikovaná verze MRF procesu, ve kterém je FMAB kulového tvaru vytvořen pomocí permanentního magnetu nebo elektromagnetu. FMAB koná rastrový pohyb vzhledem k povrchu obrobku, který má být dokončen. Tento proces je výhodný zejména v případě dokončování ploch složitých tvarů.

Předešlé MRF procesy nemohou efektivně dokončovat obrobky kulového tvaru, jako jsou keramické nebo nerezové kuličky, například pro ložiska. Magnetic float polishing (MFP) je proces, který umožňuje efektivně dokončovat obrobky kulového tvaru. V tomto procesu se používá MR kapalina spolu s plovákem, zásobníkem magnetů a hřídelí, která tlačí MR kapalinu dolů a otáčí se kolem vlastní osy. Vztlková síla způsobuje, že se abrazivní zrna třou o dokončované kuličky. Střížná síla odebírá materiál ve formě mikro nebo nano-trísek.

Složky MR kapaliny:

Magnetické částice:

- práškové pentakarbonylové železo,
- práškové elektrolytické železo,
- prášek ze slitiny železa a kobaltu.

Abrazivní zrna:

- oxid ceričitý,
- diamantový prášek,
- oxid zirkoničitý,
- oxid hlinitý,
- karbid křemíku,
- karbid boru.

Nosná kapalina:

- voda,
- olej.

Aditiva:

- glycerol,
- uhličitan sodný,
- tuky,
- kyselina olejová,
- xanthanová guma.

[4]

10 SHRUTÍ TEORETICKÉ ČÁSTI A CÍLE ČÁSTI PRAKTICKÉ

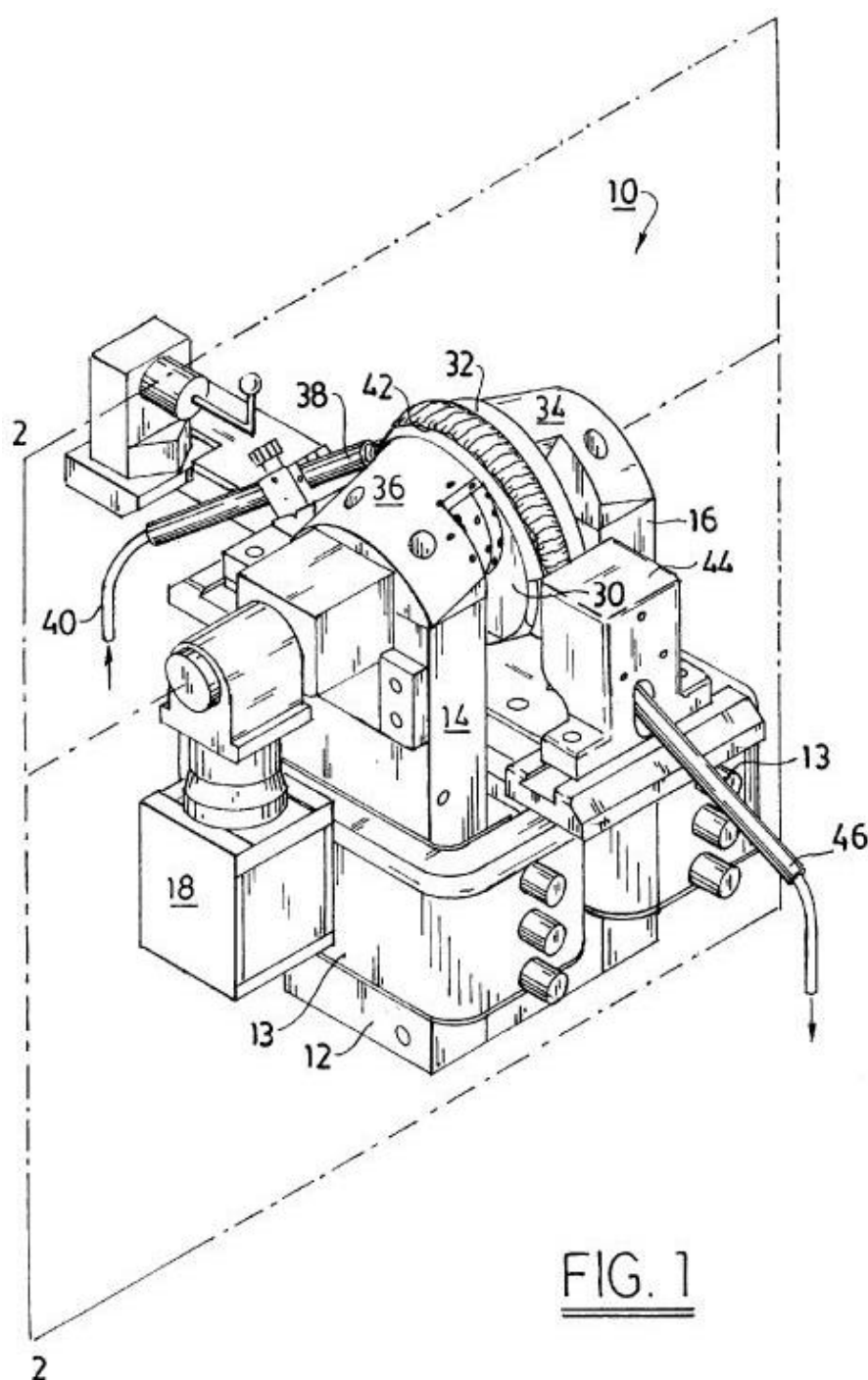
V teoretické části práce byl podán přehled o dokončovacích metodách obrábění a pokročilých dokončovacích procesech.

Cílem praktické části práce je návrh a konstrukce zařízení pro magnetoreologické dokončování povrchů.

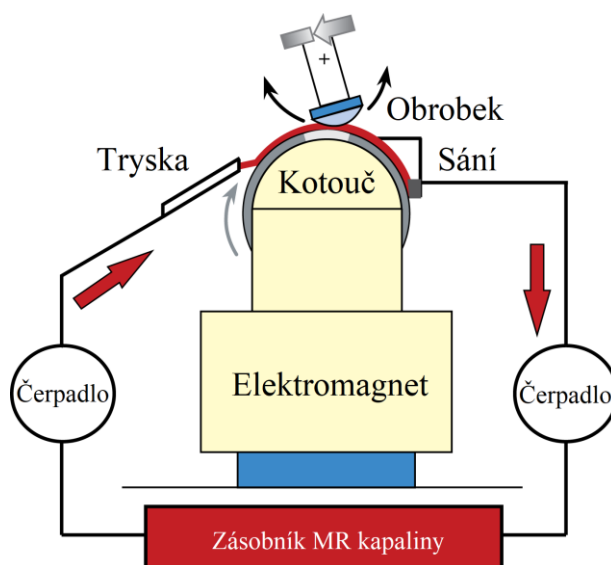
II. PRAKTICKÁ ČÁST

11 VÝVOJ V OBLASTI PŘÍSTROJŮ PRO MRF

Proces MRF byl vynalezen v běloruském Minsku na A.V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute v osmdesátých letech 20. století týmem vedeným Williamem Kordonskim. Proces byl dále vyvíjen v Center for Optics Manufacturing na University of Rochester v USA. V roce 1998 byl společností QED Technologies uvedeno na trh první komerční zařízení pro MRF.



Obr. 59. Systém pro MRF patentovaný v roce 1999 [37]



Obr. 60. Schéma MRF zařízení [38]

Principem tohoto typu zařízení je kontinuální průtok MR kapaliny. Obrobek je instalován v pevné vzdálenosti od pohybujícího se kulovitěho kotouče. Elektromagnet umístěný pod povrchem kotouče vytváří magnetické pole v mezeře mezi kotoučem a obrobkem. Jakmile je MR kapaliny nanášena na kotouč, je magnetickým polem zmagnetizována. K dokončování dochází při ponoření obrobku do proužku MR kapaliny. Propracovaný počítačový program určuje plán pro změnu polohy obrobku.

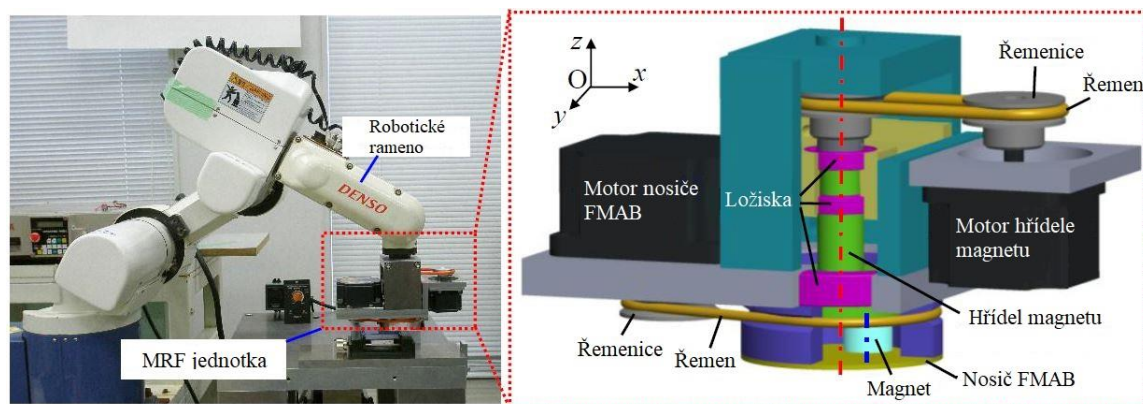
Výhodou tohoto principu je vysoký výkon dokončování, automatizace procesu a opakovatelnost.

Nevýhodou je vysoká cena zařízení.

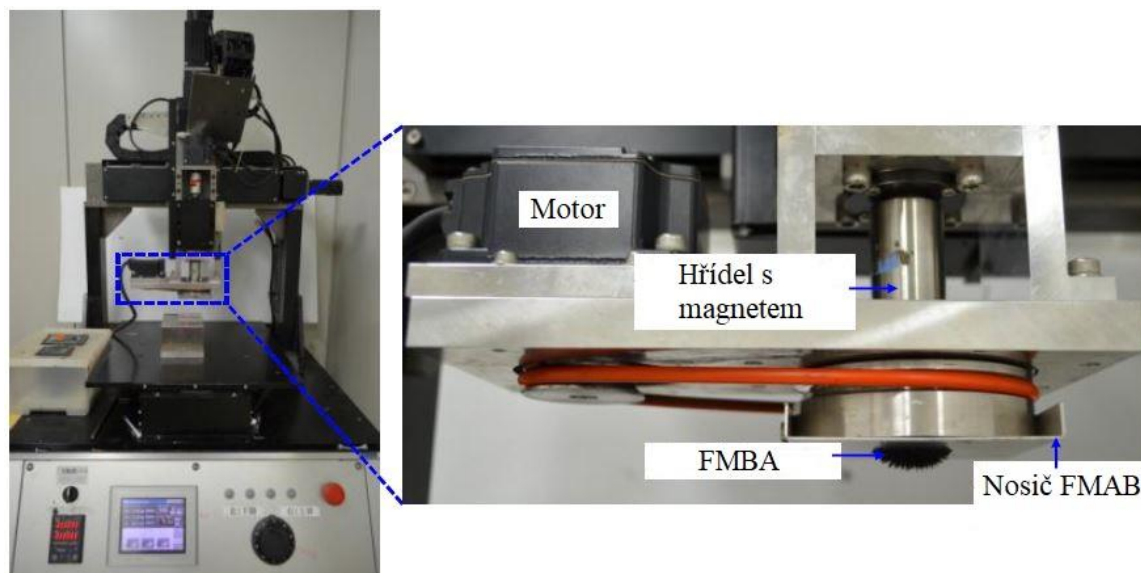


Obr. 61. Magnetoreologické dokončování zrcadla [39]

V Japonsku na Akita Prefectural University bylo zkonstruováno zařízení pro magnetoreologické dokončování povrchů, kde je nosičem FMAB rovinná plocha.



Obr. 62. Zařízení pro magnetoreologické dokončování povrchů [36]



Obr. 63. Zařízení pro magnetoreologické dokončování povrchů [36]

Permanentní magnet válcového tvaru je připevněn ke spodní čelní straně hřídele s excentricitou r . Paramagnetický nosič, kterým je hliníková deska, je umístěn mezi magnetem a obrobkem ve vzdálenosti 1 mm od magnetu. Když se hřídel s magnetem otáčí otáčkami n_m , magnet se otáčí kolem osy hřídele, čímž se vytváří rotační magnetické pole. Za použití rotačního magnetického pole je MRF proces mnohem výkonnější než za použití statického magnetického pole. Hustota magnetického toku je konstantní, ale magnetické siločáry se neustále otáčejí kolem osy hřídele. Nosič FMAB se otáčí otáčkami n_n , které mají opačný smysl otáčení než otáčky hřídele s magnetem n_m .

Výhodou tohoto principu je, že odpadá nutnost nákladného čerpání MR kapaliny.

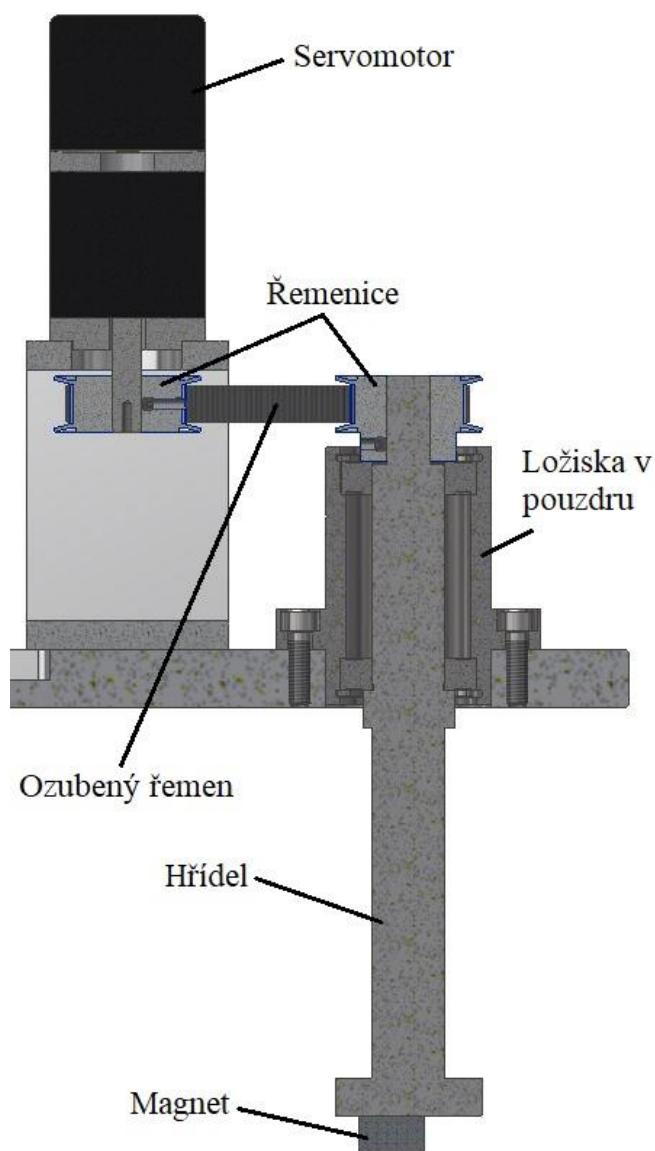
Nevýhodou je nižší řezná rychlost, která je v ose rotace nulová. Proto se magnet umísťuje vzhledem k ose rotace excentricky.

Návrh MRF zařízení pro rovinné dokončování povrchů

S ohledem na vysokou cenu profesionálně používaného MRF zařízení s čerpáním MR kapaliny byl zvolen princip s rovinným nosičem. Tento typ MRF zařízení je vhodný pro laboratorní výzkum, při kterém se dokončují vzorky o malém obsahu plochy. Zařízení je určeno pro vzorky kruhového průřezu o průměru 20 mm nebo pro vzorky čtvercového průřezu o délce strany 20 mm.

12 URČENÍ POHONU MAGNETU

Pro přenos krouticího momentu byly zvoleny převody ozubenými řemeny, které zaručují vysokou přesnost přenosu krouticího momentu. Výhodou těchto převodů je tvarová vazba, při které pracují bez skluzu, nejsou hlučné a mohou přenášet velká zatížení při malých nárocích na prostor. Nevyžadují předpětí, čímž snižují namáhání ložisek. Nevyžadují mazání a údržbu. Proti bočnímu skluzu řemenu, což je nevýhoda ozubených řemenů, musí být alespoň jedna řemenice opatřena přírubami. Při svislé poloze os řemenic musí být vodicími přírubami opatřeny obě řemenice. Pro zajištění klidného běhu řemenu je nutné dodržet především dostatečnou rovnoběžnost os řemenic. Průměrná přípustná hodnota je $\pm 0,25^\circ$.



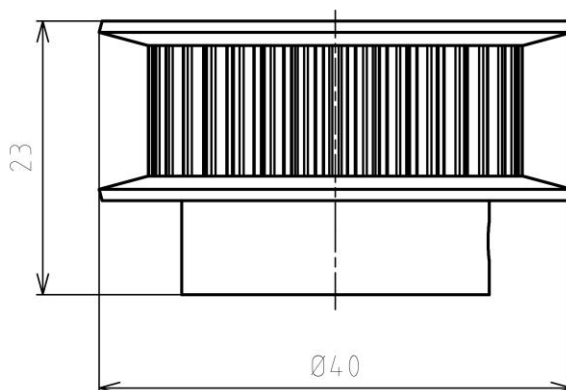
Obr. 64. Pohon magnetu

Převodové číslo je

$$u = \frac{z_2}{z_1} [1],$$

$$u = \frac{34}{34} [1],$$

$$u = 1 [1].$$



Obr. 65. Řemenice

Pro výpočet momentu setrvačnosti řemenic bylo uvažováno pro zjednodušení, že obě řemenice mají stejný tvar a rozměry, a to tvar a rozměry větší z nich, redukované na plný válec.

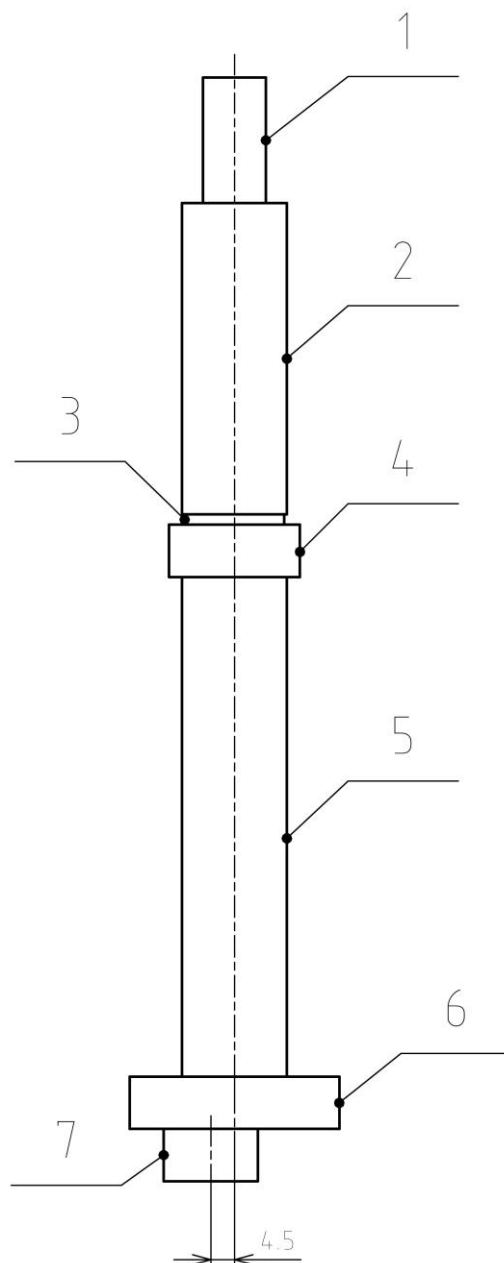
Pro řemenice z hliníkové slitiny byla uvažována

$$\rho_h = 2\,780 \text{ [kg} \cdot \text{m}^{-3}\text{]}.$$

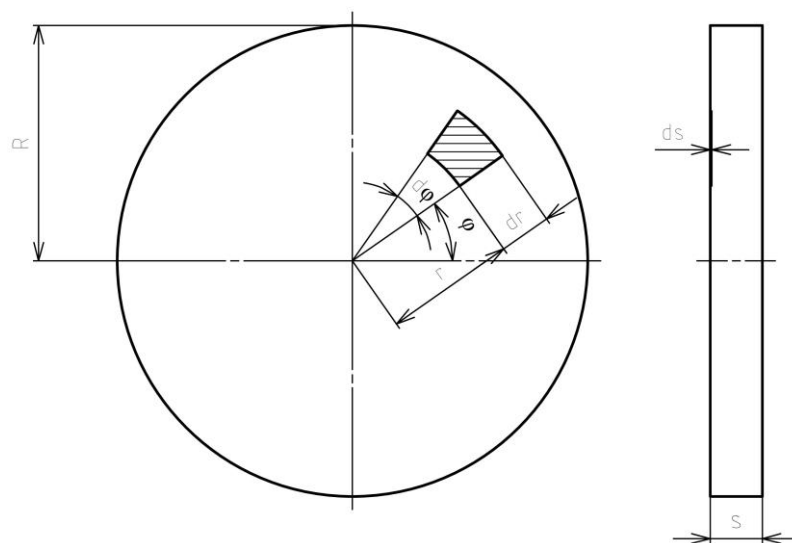
Pro ocelovou hřídel a magnet byla uvažována

$$\rho = 7\,850 \text{ [kg} \cdot \text{m}^{-3}\text{]}.$$

Materiálem hřídele byla zvolena nízkouhliková ocel W.Nr. 1.0038. Válec 6, na němž je připevněn magnet má tloušťku 10 mm. Tím jsou zaručeny stejné podmínky, za kterých je výrobcem změřena odtrhová síla magnetu.



Obr. 66. Hřídel s magnetem



Obr. 67. Schéma pro výpočet momentu setrvačnosti válce

Objem elementu válce je dán vztahem

$$dV = r d\varphi dr ds \text{ [m}^3\text{]}. \quad (2)$$

Integrací (2) se obdrží

$$\int dV = \int_0^{2\pi} r d\varphi \int_0^R dr \int_0^s ds,$$

$$V = [\varphi]_0^{2\pi} [s]_0^s \int_0^R r dr,$$

$$V = 2\pi s \left[\frac{r^2}{2} \right]_0^R,$$

$$V = \pi s R^2.$$

Celková hmotnost válce je potom

$$m = \rho V \text{ [kg]}. \quad (3)$$

Po dosazení se obdrží hmotnosti jednotlivých poháněných částí

$$V_1 = \pi 0,024 \cdot 0,006^2 \text{ [m}^3\text{]},$$

$$V_1 \doteq 0,000\,002\,7 \text{ [m}^3\text{]}.$$

$$m_1 = 7\,850 \cdot 0,000\,002\,7 \text{ [kg]},$$

$$m_1 \doteq 0,02 \text{ [kg]}.$$

$$V_2 = \pi 0,0595 \cdot 0,01^2 [\text{m}^3],$$

$$V_2 \doteq 0,000019 [\text{m}^3].$$

$$m_2 = 7850 \cdot 0,000019 [\text{kg}],$$

$$m_2 \doteq 0,15 [\text{kg}].$$

$$V_3 = \pi 0,002 \cdot 0,0095^2 [\text{m}^3],$$

$$V_3 \doteq 0,0000006 [\text{m}^3].$$

$$m_3 = 7850 \cdot 0,0000006 [\text{kg}],$$

$$m_3 \doteq 0,005 [\text{kg}].$$

$$V_4 = \pi 0,01 \cdot 0,0125^2 [\text{m}^3],$$

$$V_4 \doteq 0,000005 [\text{m}^3].$$

$$m_4 = 7850 \cdot 0,000005 [\text{kg}],$$

$$m_4 \doteq 0,04 [\text{kg}].$$

$$V_5 = \pi 0,0955 \cdot 0,01^2 [\text{m}^3],$$

$$V_5 \doteq 0,00003 [\text{m}^3].$$

$$m_5 = 7850 \cdot 0,00003 [\text{kg}],$$

$$m_5 \doteq 0,24 [\text{kg}].$$

$$V_6 = \pi 0,01 \cdot 0,02^2 [\text{m}^3],$$

$$V_6 \doteq 0,000013 [\text{m}^3].$$

$$m_6 = 7850 \cdot 0,000013 [\text{kg}],$$

$$m_6 \doteq 0,1 [\text{kg}].$$

$$V_7 = \pi 0,01 \cdot 0,009^2 [\text{m}^3],$$

$$V_7 \doteq 0,000003 [\text{m}^3].$$

$$m_7 = 7850 \cdot 0,000003 [\text{kg}],$$

$$m_7 \doteq 0,02 [\text{kg}].$$

$$V_8 = \pi 0,023 \cdot 0,02^2 [\text{m}^3],$$

$$V_8 \doteq 0,000029 [\text{m}^3].$$

$$m_8 = 7\,850 \cdot 0,000\,029 \text{ [kg]},$$

$$m_8 \doteq 0,08 \text{ [kg]}.$$

Moment setrvačnosti homogenního tělesa je dán vztahem

$$I = \int_{(m)} r^2 dm \text{ [kg} \cdot \text{m}^2\text{]}. \quad (4)$$

Při výpočtu momentu setrvačnosti válce se vychází z prosté úměry

$$\frac{dm}{m} = \frac{dS}{S}. \quad (5)$$

Obsah plochy elementu válce je dán vztahem

$$dS = r d\varphi dr \text{ [m}^2\text{]}. \quad (6)$$

Integrací (6) se obdrží

$$\int dS = \int_0^{2\pi} r d\varphi \int_0^R dr,$$

$$S = [\varphi]_0^{2\pi} \int_0^R r dr,$$

$$S = 2\pi \left[\frac{r^2}{2} \right]_0^R,$$

$$S = \pi R^2.$$

Dosazením do (5) se obdrží

$$\frac{dm}{m} = \frac{r d\varphi dr}{\pi R^2},$$

$$dm = \frac{m r d\varphi dr}{\pi R^2}.$$

Po dosazení do (4) se obdrží

$$I = \int_{(m)} r^2 \frac{m r d\varphi dr}{\pi R^2},$$

$$I = \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^R r^3 dr \frac{m}{\pi R^2},$$

$$I = [\varphi]_0^{2\pi} \left[\frac{r^4}{4} \right]_0^R \frac{m}{\pi R^2},$$

$$I = 2\pi \frac{1}{4} R^4 \frac{m}{\pi R^2},$$

$$I = \frac{1}{2} m R^2 \text{ [kg} \cdot \text{m}^2\text{]}.$$

Po dosazení se obdrží momenty setrvačnosti jednotlivých poháněných částí

$$I_1 = \frac{1}{2} \cdot 0,02 \cdot 0,006^2 \text{ [kg} \cdot \text{m}^2\text{]},$$

$$I_1 \doteq 0,000\,000\,36 \text{ [kg} \cdot \text{m}^2\text{]}.$$

$$I_2 = \frac{1}{2} \cdot 0,15 \cdot 0,01^2 \text{ [kg} \cdot \text{m}^2\text{]},$$

$$I_2 \doteq 0,000\,007\,5 \text{ [kg} \cdot \text{m}^2\text{]}.$$

$$I_3 = \frac{1}{2} \cdot 0,005 \cdot 0,009\,5^2 \text{ [kg} \cdot \text{m}^2\text{]},$$

$$I_3 \doteq 0,000\,000\,23 \text{ [kg} \cdot \text{m}^2\text{]}.$$

$$I_4 = \frac{1}{2} \cdot 0,04 \cdot 0,012\,5^2 \text{ [kg} \cdot \text{m}^2\text{]},$$

$$I_4 \doteq 0,000\,003\,1 \text{ [kg} \cdot \text{m}^2\text{]}.$$

$$I_5 = \frac{1}{2} \cdot 0,24 \cdot 0,01^2 \text{ [kg} \cdot \text{m}^2\text{]},$$

$$I_5 = 0,000\,012 \text{ [kg} \cdot \text{m}^2\text{]}.$$

$$I_6 = \frac{1}{2} \cdot 0,1 \cdot 0,02^2 \text{ [kg} \cdot \text{m}^2\text{]},$$

$$I_6 = 0,000\,02 \text{ [kg} \cdot \text{m}^2\text{]}.$$

$$I_7 = \frac{1}{2} m_7 R^2 + m_7 0,004\,5^2 \text{ [kg} \cdot \text{m}^2\text{]},$$

$$I_7 = \frac{1}{2} \cdot 0,02 \cdot 0,009^2 + 0,02 \cdot 0,004\,5^2 \text{ [kg} \cdot \text{m}^2\text{]},$$

$$I_7 \doteq 0,000\,001\,2 \text{ [kg} \cdot \text{m}^2\text{]}.$$

$$I_8 = \frac{1}{2} \cdot 0,08 \cdot 0,02^2 \text{ [kg} \cdot \text{m}^2\text{]},$$

$$I_8 = 0,000\,016 \text{ [kg} \cdot \text{m}^2\text{]}.$$

Celkový moment setrvačnosti poháněných částí je

$$I_c = I_1 + I_2 + I_3 + I_4 + I_5 + I_6 + I_7 + 2I_8 \text{ [kg} \cdot \text{m}^2\text{]},$$

$$I_c = 0,000\,000\,36 + 0,000\,007\,5 + 0,000\,000\,23 + 0,000\,003\,1 + \\ + 0,000\,012 + 0,000\,02 + 0,000\,001\,2 + 2 \cdot 0,000\,016 \text{ [kg} \cdot \text{m}^2\text{]},$$

$$I_c \doteq 0,000\,076\,4 \text{ [kg} \cdot \text{m}^2\text{]}.$$

Práce je rovna změně kinetické energie

$$A = \Delta E \text{ [J]}. \quad (7)$$

Změnu kinetické energie vyjadřuje vztah

$$\Delta E = E_k - E_p \text{ [J]}. \quad (8)$$

Kinetická energie rotujícího tělesa je dána vztahem

$$E_k = \frac{1}{2} I \omega^2 \text{ [J]}. \quad (9)$$

Úhlová rychlost

$$\omega = 2\pi n \text{ [rad} \cdot \text{s}^{-1}\text{]}. \quad (10)$$

Požadované otáčky hřídele s magnetem jsou

$$n_m = 3\,000 \text{ [min}^{-1}\text{]}.$$

Převedou se $n_m \text{ [min}^{-1}\text{]}$ na $n_m \text{ [s}^{-1}\text{]}$

$$n_m = 3\,000 \text{ [min}^{-1}\text{]},$$

$$n_m = \frac{3\,000}{60} \text{ [s}^{-1}\text{]},$$

$$n_m = 50 \text{ [s}^{-1}\text{]}.$$

Při nulové počáteční úhlové rychlosti hřídele, kdy $E_p = 0 \text{ [J]}$ se obdrží po dosazení

$$\Delta E = \frac{1}{2} I \omega^2 - 0 \text{ [J]},$$

$$\Delta E = \frac{1}{2} I \omega^2 \text{ [J]}.$$

Po úpravě podle (7) se obdrží

$$A = \frac{1}{2} I \omega^2 \text{ [J]},$$

a po dosazení se obdrží

$$A = \frac{1}{2} \cdot 0,000\,076\,4(2\pi 50)^2 \text{ [J]},$$

$$A \doteq 3,8 \text{ [J]}.$$

Výkon je dán vztahem

$$P = \frac{A}{t} \text{ [W]}. \quad (11)$$

Jestliže je požadováno dosažení úhlové rychlosti ω za čas

$$t = 1 \text{ [s]},$$

výkon potřebný k dosažení úhlové rychlosti hřídele ω za čas t je po dosazení

$$P = \frac{3,8}{1} \text{ [W]},$$

$$P = 3,8 \text{ [W]}.$$

Celkový výkon potřebný k pohonu zařízení

$$P_c = \frac{P}{\eta_m} \text{ [W]}. \quad (12)$$

Mechanická účinnost η_m charakterizuje hospodárnost mechanických převodů mezi motorem a výstupním členem. Lze ji přibližně vypočítat z dílčích účinností jednotlivých členů převodové soustavy.

Pro převod ozubeným řemenem byla zvolena

$$\eta_r = 0,98 \text{ [1]}.$$

Pro hřídel uloženou ve valivých ložiscích byla zvolena

$$\eta_l = 0,95 \text{ [1]}.$$

Mechanická účinnost stroje se určí ze vztahu

$$\eta_m = \eta_i \eta_l [1]. \quad (13)$$

Po dosazení se obdrží

$$\eta_m = 0,98 \cdot 0,95 [1],$$

$$\eta_m = 0,931 [1].$$

Dosazením do (12) se obdrží

$$P_c = \frac{3,8}{0,931} [W],$$

$$P_c \doteq 4 [W].$$

Pro pohon zařízení byl zvolen servomotor značky HIWIN

FRLS 50 W.



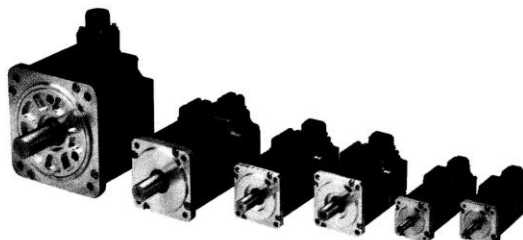
Obr. 68. Servomotor FRLS 50 W [40]

Frekvenční měniče a servomotory

Střídavé servomotory

2. Střídavé servomotory

Vysoce dynamické synchronní střídavé servomotory HIWIN FR zajišťují vysoký točivý moment v celém rozsahu otáček. Protože mají minimální moment setrvačnosti, jsou také vhodné pro náročné činnosti dynamického pohonu, například pro vysokofrekvenční reverzování. Zvláštní struktura statoru/rotoru řady FR dosahuje velmi malého zvlnění momentu a vysoké výkonové hustoty v kompaktní formě.



2.1 Charakteristiky

Tabulka 2.1 Všeobecné charakteristiky

Velikost	50 W	100 W	200 W	400 W	750 W	1 000 W
Typ motoru	Permanentně buzený synchronní servomotor					
Magnety	Neodymové magnety NdFeB					
Kryt	Hliníkový					
Barva	Černá					
Stupeň krytí motoru	IP65					
Stupeň krytí konektorů	IP20					IP65
Stupeň krytí hřídele motoru	IP40 (volitelně IP65)					
Třída izolace	Třída A					
Zakončení hřídele	S drážkou na pero nebo bez ní, se středovým závitovým otvorem					
Špičkový točivý moment	3x jmenovitého momentu					
Životnost	> 20 000 h (při jmenovitém zatížení)					
Připojení motoru	Kabel (300 mm) s namontovaným konektorem					Konektor
Připojení enkodéru	Kabel (300 mm) s namontovaným konektorem					Konektor
Chlazení	Konvekční					
Monitorování teploty	Není k dispozici					
Enkodér	Inkrementální enkodér TTL, 10 000 pulzů na otáčku					

Tabulka 2.2 Okolní podmínky

Velikost	50 W	100 W	200 W	400 W	750 W	1 000 W
Okolní teplota	0 °C až 40 °C					
Teplota při skladování	-15 °C až 70 °C					
Vlhkost vzduchu	Relativní vlhkost vzduchu až 80 %					
Max. výška instalace	1 000 m n. m.					

Obr. 69. Všeobecné charakteristiky servomotorů značky HIWIN [41]

Frekvenční měniče a servomotory

Střídavé servomotory

2.3 Specifikace motoru

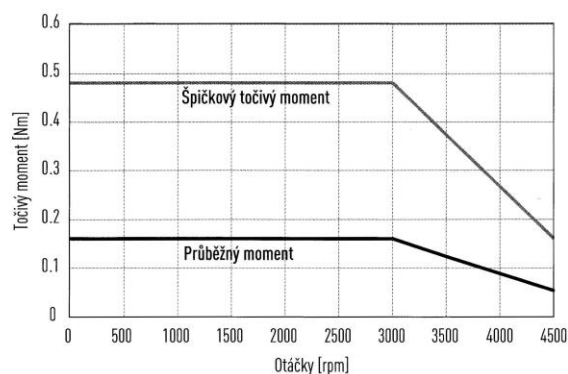
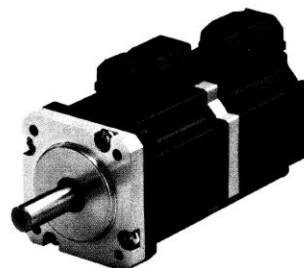
2.3.1 Střídavý servomotor FRLS 50 W

Tabulka 2.3 Technická specifikace servomotoru FRLS 50 W

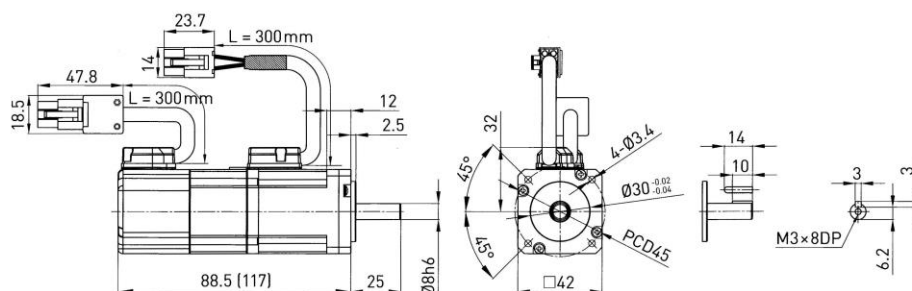
Specifikace motoru	Symbol	Jednotka	FRLS052 __A4 __
Jmenovité napětí	V	V AC	220
Jmenovitý výkon	W	W	50
Jmenovitý točivý moment	T_C	Nm	0,16
Jmenovitý proud	I_C	A _{ef}	0,9
Špičkový točivý moment po dobu 1 s	T_P	Nm	0,48
Špičkový proud po dobu 1 s	I_P	A _{ef}	2,7
Jmenovité otáčky	n_N	ot/min	3 000
Maximální otáčky po dobu 1 s	n_{max}	ot/min	4 500
Momentová konstanta	K_T	Nm/A _{ef}	0,178
Napěťová konstanta	K_e	V _{ef} /(1 000 ot/min)	10,74
Odpor vinutí ¹⁾	R	Ω	4,7
Indukčnost vinutí ¹⁾	L	mH	4,7
Moment setrvačnosti rotoru	J	kgm ² × 10 ⁻⁴	0,02
Moment setrvačnosti rotoru s brzdou	J	kgm ² × 10 ⁻⁴	0,022
Hmotnost motoru	M	kg	0,45
Hmotnost motoru s brzdou	M	kg	0,58
Třída izolace motoru			A
Motorová brzda (volitelná) ²⁾			
Brzdový moment (statický)	T_b	Nm	0,3
Napájení	V	V DC	24 ± 10 %
Spotřeba energie	A	A	0,3
Jmenovitý příkon	W	W	6,0
Doba odezvy, rozepnutí	t_0	ms	30,0
Doba odezvy, sepnutí	t_R	ms	20,0

¹⁾ Měřeno mezi fázemi

²⁾ Motorové brzdy jsou jen aretační, nikoli pracovní



Obr. 2.1 Závislost momentu na otáčkách, FRLS 50 W



Obr. 2.2 Rozměry, FRLS 50 W

Hodnoty v závorkách platí pro model s motorovou brzdou

Obr. 70. Technická specifikace servomotoru FRLS 50 W [41]

Jmenovité otáčky servomotoru jsou

$$n_j = 3\,000 \text{ [min}^{-1}\text{]}.$$

Jmenovitý výkon servomotoru je

$$P_j = 50 \text{ [W]}.$$

Účinnost servomotoru není v technické specifikaci uvedena, proto byla uvažována

$$\eta_s = 0,9 \text{ [1]}.$$

Výkon servomotoru je potom

$$P_s = P_j \eta_s \text{ [W]},$$

$$P_s = 50 \cdot 0,9 \text{ [W]},$$

$$P_s = 45 \text{ [W]}.$$

Výkon servomotoru P_s musí být větší než celkový výkon potřebný k pohonu zařízení P_c

$$P_s > P_c \text{ [W]},$$

$$45 > 4 \text{ [W]}.$$

Výkon servomotoru $P_s = 45 \text{ [W]}$ vyhovuje.

[43, 44]

Pro provoz servomotoru je nutný frekvenční měnič D2, kabel servomotoru o délce 3 m a kabel enkodéru o délce 3 m. Dále je potřeba PC s USB portem.

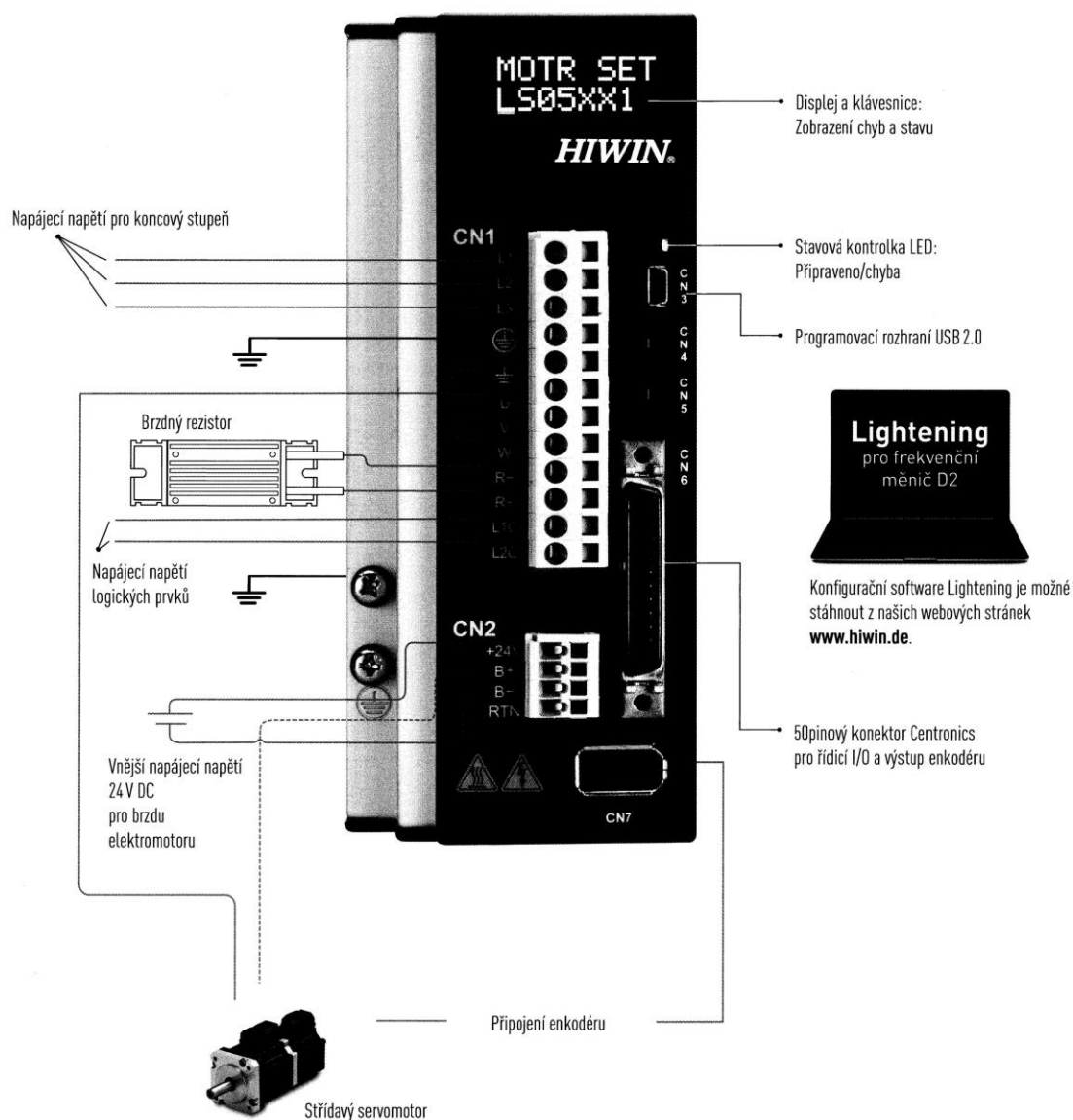
Frekvenční měniče a servomotory

Frekvenční měnič D2

1.6 Frekvenční měnič D2

Plně digitální frekvenční měniče HIWIN D2 s vektorovým řízením jsou speciálně navrženy pro použití se servomotory HIWIN. Pro různé druhy použití jsou k dispozici různá provedení a třídy výkonnosti. Pro snadnou instalaci a uvedení do provozu jsou motor a kabely enkodéru předem smontované a zdarma je k dispozici konfigurační software firmy HIWIN „Lightening“.

1.6.1 Rozhraní frekvenčního měniče D2



Obr. 71. Frekvenční měnič D2 [41]



Obr. 72. Frekvenční měnič D2 [42]

1.6.3 Technická specifikace frekvenčního měniče D2

Tabulka 1.8 Technická specifikace

Typ: D2		D2-0123	D2-0423	D2-1023	
Napájení	Napájecí napětí a frekvence pro koncový stupeň		200 až 240 V AC (± 10 %) / 50 až 60 Hz (± 5 %)		
	Počet fází		1 nebo 3		
	Spotřeba energie koncového stupně		1,5 A _{ef}	4,1 A _{ef}	7,5 A _{ef}
	Napájecí napětí a frekvence logických prvků		200 až 240 V AC (± 10 %) / 50 až 60 Hz (± 5 %) pouze 1fázové		
Výstupní proud	Spotřeba energie napájení logických prvků		Max. 0,5 A		
	Stejnosměrný proud (efektivní)		0,9 A	2,5 A	5,1 A
	Špičkový proud (efektivní)		2,7 A	7,5 A	15,3 A
	Maximální doba trvání špičkového proudu		1 sekunda		
Typ řízení		Vektorové řízení IGBT PWM			
Vzorkovací frekvence kontroléru		Kontroléry proudu, otáček a polohy: 15 kHz			
Podporované druhy motorů		Střídavé servomotory			
Stavová kontrolka LED		Červená: chyba; zelená: připraveno			
Pracovní režimy	Řízení polohy	Vstupy/výstupy		Vstupy pomalých pulzů (Piny CN6: 3, 4, 5, 6) Vstupy rychlých pulzů (Piny CN6: 44, 45, 46, 47)	
		Funkce		Krok/směr; směr vpravo/vlevo Signály AB (4x hodnocení)	
		Maximální vstupní frekvence		Pomalá (optočten): 500 kHz Rychlá (diferenc.): 4 MHz	
		Elektrické zařízení		Poměr: pulzy/počet: pulzy: 1–2147483647, počet: 1–2147483647	
	Řízení otáček/momentu	Analogové	Vstupní odpor	10 kΩ	
			Vstupní napětí	±10 V DC	
		Digitální	Rozlišení	12bitové	
			PWM	Prostřednictvím vstupů pomalých pulzů	
			Frekvence	Min. 36,5 kHz; max. 100 kHz	
			Min. doba trvání pulzu	220 ns	

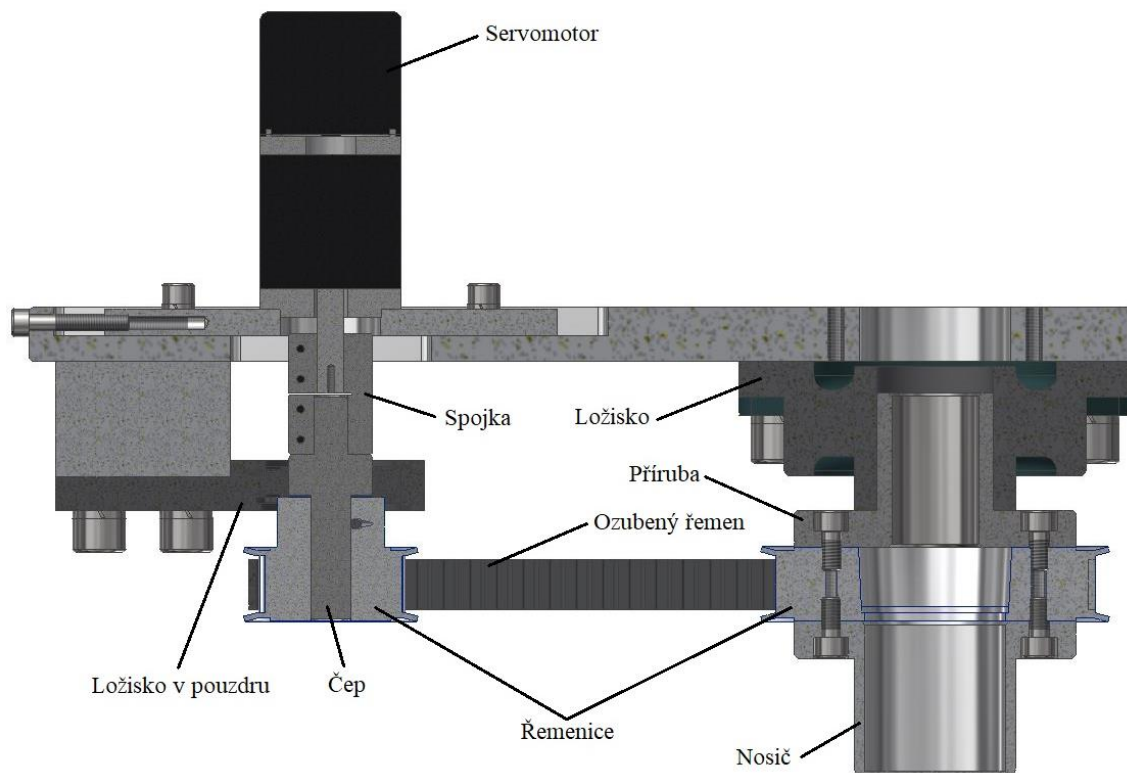
Obr. 73. Technická specifikace frekvenčního měniče D2 [41]

Tabulka 1.8 Technická specifikace (pokračování)

Typ: D2			D2-0123	D2-0423	D2-1023
Rozhraní enkodéru	Pracovní napětí		+5 V DC $\pm 5\%$ při 400 mA		
	Vstup	Druh signálu	A/A, B/B, Z/Z, diferenciální signály		
		Šířka pásma	Po 4x hodnocení 5 mil. inkr./s		
		Výstup	Druh signálu	A/A, B/B, Z/Z, diferenciální TTL	
	Rozlišení		Po 4x hodnocení 8 mil. inkr./s		
Výstup simulace enkodéru			Max. 18 mil. inkr./s, RS422 diferenciální; nastavitelné škálování		
Komunikace	Rozhraní		USB 2.0		
Parametrizovatelné rozhraní I/O	Digitální vstupy		[11 až 19], (jednoduché, optočten)		
	Digitální výstupy		[01 až 04], (optočten)		
	Výstup brzdy		BRAKE [CN2_BRK], max. 1 A DC		
	Odpor		Vnější		
Zpětná vazba	Práh aktivace		+HV > 370 V DC		
	Práh deaktivace		+HV < 360 V DC		
	Tolerance		$\pm 5\%$		
Monitorovací funkce			Zkrat, přepětí (> 390 V DC $\pm 5\%$), podpětí (< 60 V DC); chyba polohy, chyba enkodéru, monitorování fáze motoru, přehřátí frekvenčního měniče D2 (IGBT > 90 °C $\pm 1^\circ$ C), přehřátí motoru		
Automatické ladění			S automatickým výpočtem setrvačné hmotnosti		
Mapování chyb	Metoda		Kompenzační tabulka pro korekci chyb polohy lineární interpolací		
	Tabulkové hodnoty		Max. 16 000		
	Aktivace		Po úspěšném referencování nebo přes digitální vstupní signál		
VSF (potažení vibrací)			0,1 Hz až 200 Hz		
Další funkce			Kompenzace tření, kompenzace vůle zařízení		
Vnější adaptér rozhraní EtherCAT (volitelný prvek)			EtherCAT s protokolem mega-ulink		
Okolní podmínky	Pracovní teplota		0 až 40 °C (nad 55 °C jen s klimatizací)		
	Teplota při skladování		-20 °C až 65 °C		
	Vlhkost vzduchu		20 až 85 % (nekondenzující)		
	Nadmořská výška za provozu		< 1 000 m n. m.		
	Vibrace		5,88 m/s ² (10 až 60 Hz)		
	Stupeň krytí		IP20		

Obr. 74. Technická specifikace frekvenčního měniče D2 [41]

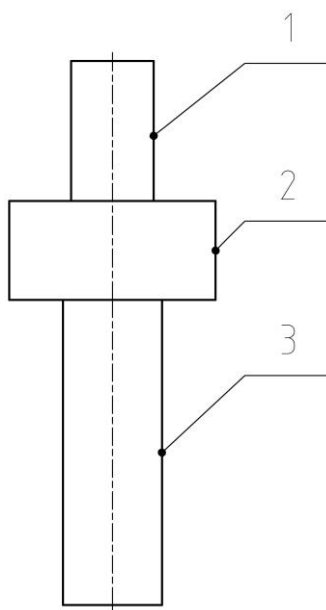
13 URČENÍ POHONU NOSIČE



Obr. 75. Pohon 2

Spojka byla redukována na plný válec. Pro čep, přírubu a spojku z korozi-vzdorné oceli byla uvažována

$$\rho = 7\,850 \text{ [kg} \cdot \text{m}^{-3}\text{]}.$$

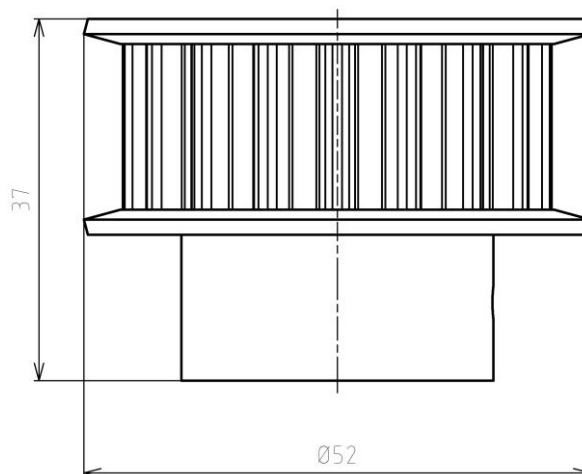


Obr. 76. Čep

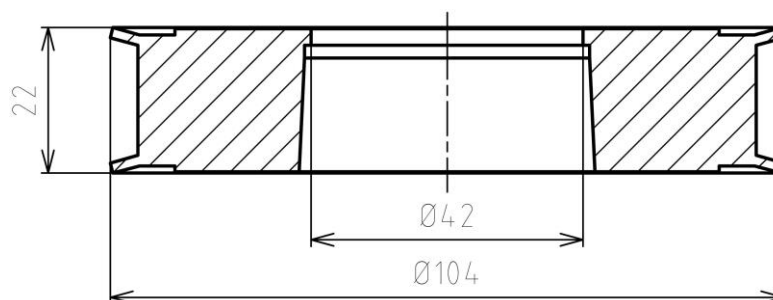
Menší řemenici byla redukována na plný válec.

Pro řemenice z hliníkové slitiny byla uvažována

$$\rho_h = 2\,780 \text{ [kg} \cdot \text{m}^{-3}\text{]}.$$



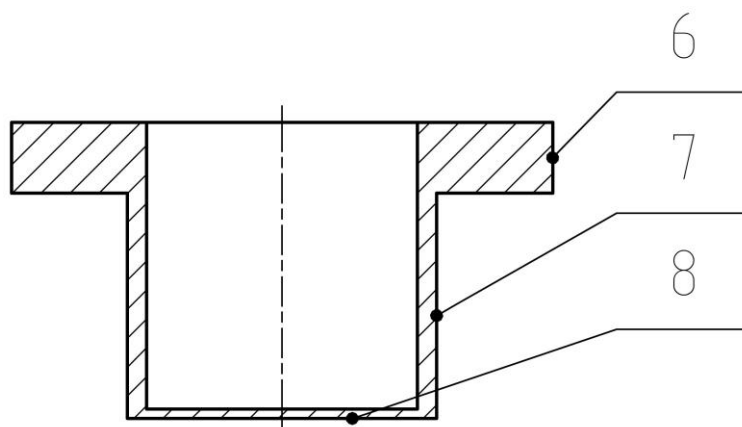
Obr. 77. Menší řemenice



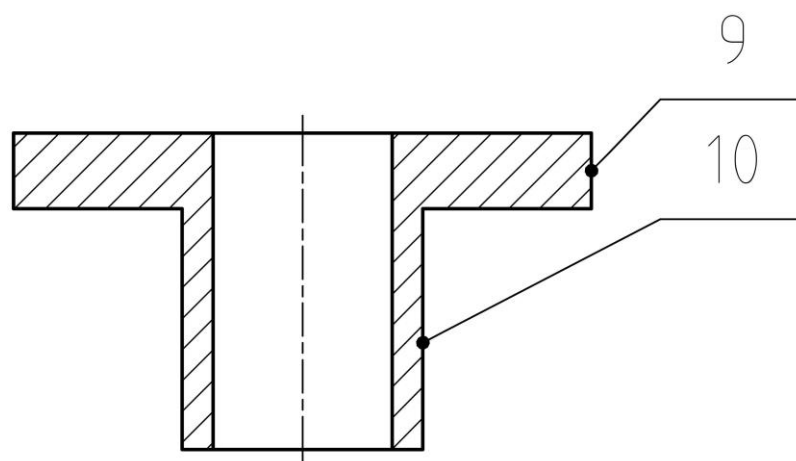
Obr. 78. Řemenice

Pro nosič z hliníkové slitiny byla uvažována

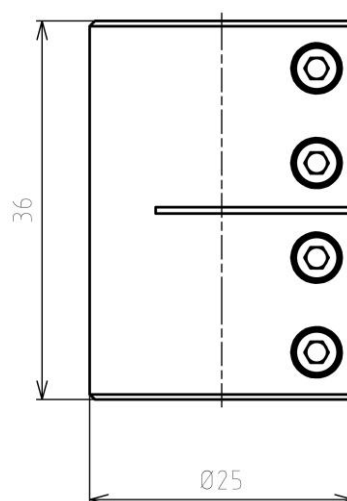
$$\rho_h = 2\,780 \text{ [kg} \cdot \text{m}^{-3}\text{]}.$$



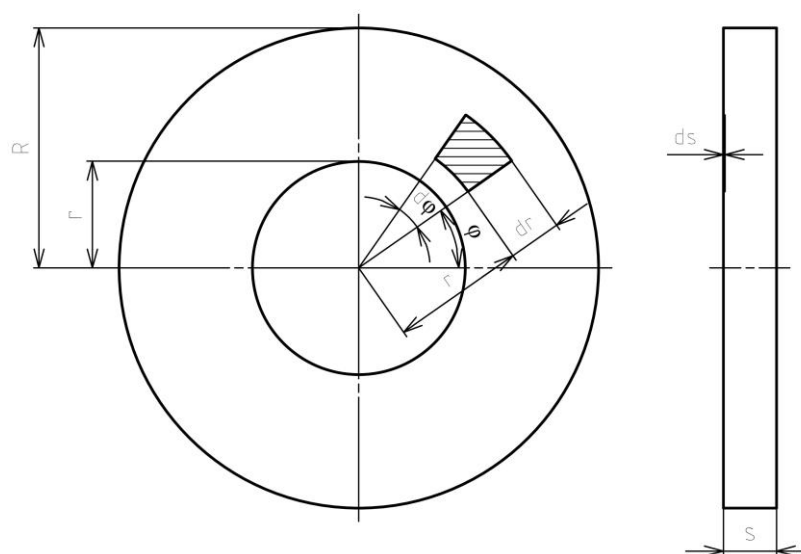
Obr. 79. Nosič



Obr. 80. Příruba



Obr. 81. Spojka



Obr. 82. Schéma pro výpočet momentu setrvačnosti dutého válce

Objem elementu dutého válce je dán vztahem

$$dV = r d\varphi dr ds \text{ [m}^3\text{]}. \quad (14)$$

Integrací (14) se obdrží

$$\int dV = \int_0^{2\pi} r d\varphi \int_r^R dr \int_0^s ds,$$

$$V = [\varphi]_0^{2\pi} [s]_0^s \int_r^R r dr,$$

$$V = 2\pi s \left[\frac{r^2}{2} \right]_r^R,$$

$$V = \pi s (R^2 - r^2).$$

Celková hmotnost dutého válce je potom

$$m = \rho V \text{ [kg]}. \quad (15)$$

Po dosazení se obdrží hmotnosti jednotlivých poháněných částí

$$V_1 = \pi 0,017 \cdot 0,005^2 \text{ [m}^3\text{]},$$

$$V_1 \doteq 0,000\,001\,3 \text{ [m}^3\text{]}.$$

$$m_1 = 7\,850 \cdot 0,000\,001\,3 \text{ [kg]},$$

$$m_1 \doteq 0,01 \text{ [kg]}.$$

$$V_2 = \pi 0,012 \cdot 0,012\,5^2 \text{ [m}^3\text{]},$$

$$V_2 \doteq 0,000\,006 \text{ [m}^3\text{]}.$$

$$m_2 = 7\,850 \cdot 0,000\,006 \text{ [kg]},$$

$$m_2 \doteq 0,05 \text{ [kg]}.$$

$$V_3 = \pi 0,037 \cdot 0,006^2 \text{ [m}^3\text{]},$$

$$V_3 \doteq 0,000\,004\,2 \text{ [m}^3\text{]}.$$

$$m_3 = 7\,850 \cdot 0,000\,004\,2 \text{ [kg]},$$

$$m_3 \doteq 0,03 \text{ [kg]}.$$

$$V_4 = \pi 0,037 \cdot 0,026^2 \text{ [m}^3\text{]},$$

$$V_4 \doteq 0,000\ 08\ [\text{m}^3].$$

$$m_4 = 2\ 780 \cdot 0,000\ 08\ [\text{kg}],$$

$$m_4 \doteq 0,22\ [\text{kg}].$$

$$V_5 = \pi 0,022(0,052^2 - 0,021^2)\ [\text{m}^3],$$

$$V_5 \doteq 0,000\ 16\ [\text{m}^3].$$

$$m_5 = 2\ 780 \cdot 0,000\ 16\ [\text{kg}],$$

$$m_5 \doteq 0,44\ [\text{kg}].$$

$$V_6 = \pi 0,011(0,042^2 - 0,021^2)\ [\text{m}^3],$$

$$V_6 \doteq 0,000\ 046\ [\text{m}^3].$$

$$m_6 = 2\ 780 \cdot 0,000\ 046\ [\text{kg}],$$

$$m_6 \doteq 0,13\ [\text{kg}].$$

$$V_7 = \pi 0,033\ 5(0,024^2 - 0,021^2)\ [\text{m}^3],$$

$$V_7 \doteq 0,000\ 014\ [\text{m}^3].$$

$$m_7 = 2\ 780 \cdot 0,000\ 14\ [\text{kg}],$$

$$m_7 \doteq 0,04\ [\text{kg}].$$

$$V_8 = \pi 0,001\ 5 \cdot 0,024^2\ [\text{m}^3],$$

$$V_8 \doteq 0,000\ 002\ 7\ [\text{m}^3].$$

$$m_8 = 2\ 780 \cdot 0,000\ 002\ 7\ [\text{kg}],$$

$$m_8 \doteq 0,008\ [\text{kg}].$$

$$V_9 = \pi 0,011(0,042^2 - 0,013^2)\ [\text{m}^3],$$

$$V_9 \doteq 0,000\ 055\ [\text{m}^3].$$

$$m_9 = 7\ 850 \cdot 0,000\ 055\ [\text{kg}],$$

$$m_9 \doteq 0,43\ [\text{kg}].$$

$$V_{10} = \pi 0,035(0,017\ 5^2 - 0,013^2)\ [\text{m}^3],$$

$$V_{10} \doteq 0,000\ 16\ [\text{m}^3].$$

$$m_{10} = 7\ 850 \cdot 0,000\ 015\ [\text{kg}],$$

$$m_{10} \doteq 0,12 \text{ [kg]}.$$

$$V_{11} = \pi 0,036 \cdot 0,012^2 \text{ [m}^3\text{]},$$

$$V_{11} \doteq 0,000\,018 \text{ [m}^3\text{]}.$$

$$m_{11} = 7\,850 \cdot 0,000\,018 \text{ [kg]},$$

$$m_{11} \doteq 0,14 \text{ [kg]}.$$

Integrací (6) se obdrží

$$\int dS = \int_0^{2\pi} r d\varphi \int_r^R dr,$$

$$S = [\varphi]_0^{2\pi} \int_r^R r dr,$$

$$S = 2\pi \left[\frac{r^2}{2} \right]_r^R,$$

$$S = \pi(R^2 - r^2).$$

Dosazením do (5) se obdrží

$$\frac{dm}{m} = \frac{r d\varphi dr}{\pi(R^2 - r^2)},$$

$$dm = \frac{m r d\varphi dr}{\pi(R^2 - r^2)}.$$

Po dosazení do (4) se obdrží

$$I = \int_{(m)} r^2 \frac{m r d\varphi dr}{\pi(R^2 - r^2)},$$

$$I = \int_0^{2\pi} d\varphi \int_r^R r^3 dr \frac{m}{\pi(R^2 - r^2)},$$

$$I = [\varphi]_0^{2\pi} \left[\frac{r^4}{4} \right]_r^R \frac{m}{\pi(R^2 - r^2)},$$

$$I = 2\pi \frac{1}{4} (R^4 - r^4) \frac{m_k}{\pi(R^2 - r^2)},$$

$$I = \frac{1}{2} m \frac{(R^2 - r^2)(R^2 + r^2)}{(R^2 - r^2)},$$

$$I = \frac{1}{2} m (R^2 + r^2) \text{ [kg} \cdot \text{m}^2\text{]}.$$

Po dosazení se obdrží momenty setrvačnosti jednotlivých poháněných částí

$$I_1 = \frac{1}{2} \cdot 0,01 \cdot 0,005^2 \text{ [kg} \cdot \text{m}^2\text{]},$$

$$I_1 \doteq 0,000\,000\,13 \text{ [kg} \cdot \text{m}^2\text{]}.$$

$$I_2 = \frac{1}{2} \cdot 0,05 \cdot 0,012\,5^2 \text{ [kg} \cdot \text{m}^2\text{]},$$

$$I_2 \doteq 0,000\,004 \text{ [kg} \cdot \text{m}^2\text{]}.$$

$$I_3 = \frac{1}{2} \cdot 0,03 \cdot 0,006^2 \text{ [kg} \cdot \text{m}^2\text{]},$$

$$I_3 = 0,000\,000\,54 \text{ [kg} \cdot \text{m}^2\text{]}.$$

$$I_4 = \frac{1}{2} \cdot 0,22 \cdot 0,026^2 \text{ [kg} \cdot \text{m}^2\text{]},$$

$$I_4 \doteq 0,000\,074 \text{ [kg} \cdot \text{m}^2\text{]}.$$

$$I_5 = \frac{1}{2} \cdot 0,44 (0,052^2 + 0,021^2) \text{ [kg} \cdot \text{m}^2\text{]},$$

$$I_5 \doteq 0,000\,7 \text{ [kg} \cdot \text{m}^2\text{]}.$$

$$I_6 = \frac{1}{2} \cdot 0,13 (0,042^2 + 0,021^2) \text{ [kg} \cdot \text{m}^2\text{]},$$

$$I_6 \doteq 0,000\,14 \text{ [kg} \cdot \text{m}^2\text{]}.$$

$$I_7 = \frac{1}{2} \cdot 0,04 (0,024^2 + 0,021^2) \text{ [kg} \cdot \text{m}^2\text{]},$$

$$I_7 \doteq 0,000\,02 \text{ [kg} \cdot \text{m}^2\text{]}.$$

$$I_8 = \frac{1}{2} \cdot 0,008 \cdot 0,024^2 \text{ [kg} \cdot \text{m}^2\text{]},$$

$$I_8 \doteq 0,000\,002\,3 \text{ [kg} \cdot \text{m}^2\text{]}.$$

$$I_9 = \frac{1}{2} \cdot 0,43 (0,042^2 + 0,013^2) \text{ [kg} \cdot \text{m}^2\text{]},$$

$$I_9 \doteq 0,000\,42 \text{ [kg} \cdot \text{m}^2\text{]}.$$

$$I_{10} = \frac{1}{2} \cdot 0,12 (0,017\,5^2 + 0,013^2) \text{ [kg} \cdot \text{m}^2\text{]},$$

$$I_{10} \doteq 0,000\,03 \text{ [kg} \cdot \text{m}^2\text{]}.$$

$$I_{11} = \frac{1}{2} \cdot 0,14 \cdot 0,012\,5^2 \text{ [kg} \cdot \text{m}^2\text{]},$$

$$I_{11} \doteq 0,000\,01 \text{ [kg} \cdot \text{m}^2\text{]}.$$

Moment setrvačnosti poháněných částí hnacího členu je

$$I_{c1} = I_1 + I_2 + I_3 + I_4 + I_{11} \text{ [kg} \cdot \text{m}^2\text{]},$$

$$I_{c1} = 0,000\,000\,13 + 0,000\,004 + 0,000\,000\,54 + 0,000\,074 + 0,000\,01 \text{ [kg} \cdot \text{m}^2\text{]},$$

$$I_{c1} \doteq 0,000\,09 \text{ [kg} \cdot \text{m}^2\text{]}.$$

Moment setrvačnosti poháněných částí hnaného členu je

$$I_{c2} = I_5 + I_6 + I_7 + I_8 + I_9 + I_{10} \text{ [kg} \cdot \text{m}^2\text{]},$$

$$I_{c2} = 0,000\,7 + 0,000\,14 + 0,000\,02 + 0,000\,002\,3 + 0,000\,42 + 0,000\,03 \text{ [kg} \cdot \text{m}^2\text{]},$$

$$I_{c2} \doteq 0,001\,3 \text{ [kg} \cdot \text{m}^2\text{]}.$$

Převodové číslo je

$$u = \frac{z_2}{z_1} [1],$$

$$u = \frac{38}{18} [1],$$

$$u \doteq 2,1 [1].$$

Požadované otáčky hnaného členu jsou

$$n_n = 1\,000 \text{ [min}^{-1}\text{]}.$$

Převedeme $n_n \text{ [min}^{-1}\text{]}$ na $n_n \text{ [s}^{-1}\text{]}$

$$n_n = 1\,000 \text{ [min}^{-1}\text{]},$$

$$n_n = \frac{1\,000}{60} \text{ [s}^{-1}\text{]},$$

$$n_n \doteq 17 \text{ [s}^{-1}\text{]}.$$

Otáčky hnacího členu jsou

$$u = \frac{n_h}{n_n} [1],$$

$$n_h = u n_n [\text{min}^{-1}],$$

$$n_h = 2,1 \cdot 1\,000 [\text{min}^{-1}],$$

$$n_h \doteq 2\,100 [\text{min}^{-1}].$$

Převědou se $n_h [\text{min}^{-1}]$ na $n_h [\text{s}^{-1}]$

$$n_h = 2\,100 [\text{min}^{-1}],$$

$$n_h = \frac{2\,100}{60} [\text{s}^{-1}],$$

$$n_h = 35 [\text{s}^{-1}].$$

Při nulové počáteční úhlové rychlosti hřídele, kdy $E_p = 0 [\text{J}]$ se obdrží po dosazení

$$\Delta E = \frac{1}{2} I \omega^2 - 0 [\text{J}],$$

$$\Delta E = \frac{1}{2} I \omega^2 [\text{J}].$$

Po úpravě podle (7) se obdrží

$$A = \frac{1}{2} I \omega^2 [\text{J}],$$

a po dosazení se obdrží

$$A_1 = \frac{1}{2} \cdot 0,000\,09 (2\pi 35)^2 [\text{J}],$$

$$A_1 \doteq 2,2 [\text{J}].$$

$$A_2 = \frac{1}{2} \cdot 0,001\,3 (2\pi 17)^2 [\text{J}],$$

$$A_2 \doteq 7,4 [\text{J}].$$

$$A_c = A_1 + A_2 [\text{J}],$$

$$A_c = 2,2 + 7,4 [\text{J}],$$

$$A_c \doteq 10 [\text{J}].$$

Jestliže je požadováno dosažení úhlové rychlosti ω za čas

$$t = 1 \text{ [s]},$$

výkon potřebný k dosažení úhlové rychlosti hřídele ω za čas t je po dosazení do (11)

$$P = \frac{10}{1} \text{ [W]},$$

$$P = 10 \text{ [W]}.$$

Pro převod ozubeným řemenem byla zvolena

$$\eta_{\text{ř}} = 0,98 \text{ [1]}.$$

Pro hřídel uloženou ve valivém ložisku byla zvolena

$$\eta_{\text{l}} = 0,95 \text{ [1]}.$$

Pro hřídel uloženou ve valivém ložisku byla zvolena

$$\eta_{\text{l}} = 0,95 \text{ [1]}.$$

Mechanická účinnost stroje se určí ze vztahu

$$\eta_{\text{m}} = \eta_{\text{ř}} \eta_{\text{l}} \eta_{\text{l}} \text{ [1]}. \quad (16)$$

Po dosazení se obdrží

$$\eta_{\text{m}} = 0,98 \cdot 0,95 \cdot 0,95 \text{ [1]},$$

$$\eta_{\text{m}} \doteq 0,884 \text{ [1]}.$$

Dosazením do (12) se obdrží

$$P_{\text{c}} = \frac{10}{0,884} \text{ [W]},$$

$$P_{\text{c}} \doteq 11 \text{ [W]}.$$

Pro pohon zařízení byl zvolen servomotor značky HIWIN

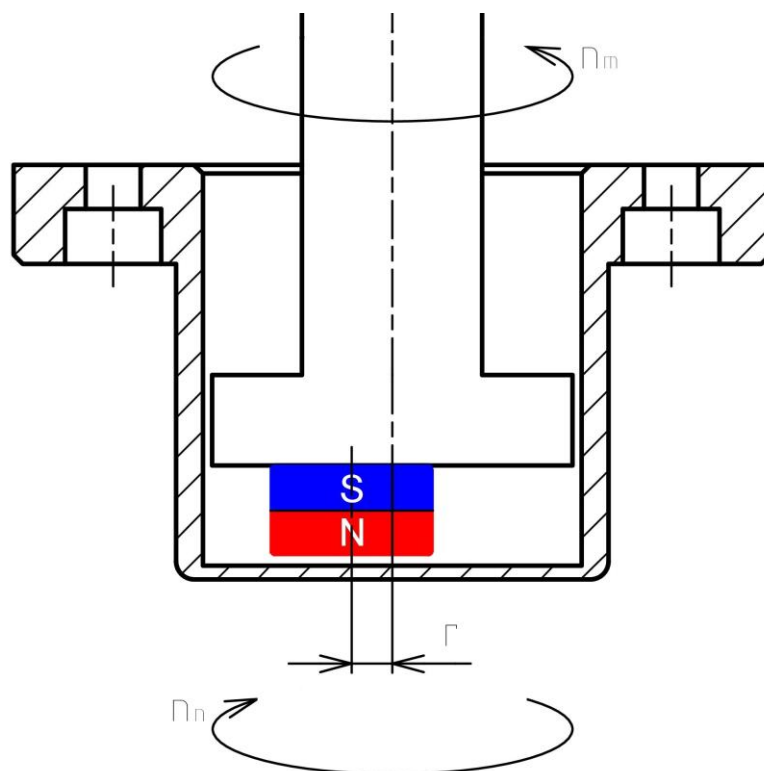
$$\text{FRLS 50 W.}$$

Výkon servomotoru P_{s} musí být větší než celkový výkon potřebný k pohonu zařízení P_{c}

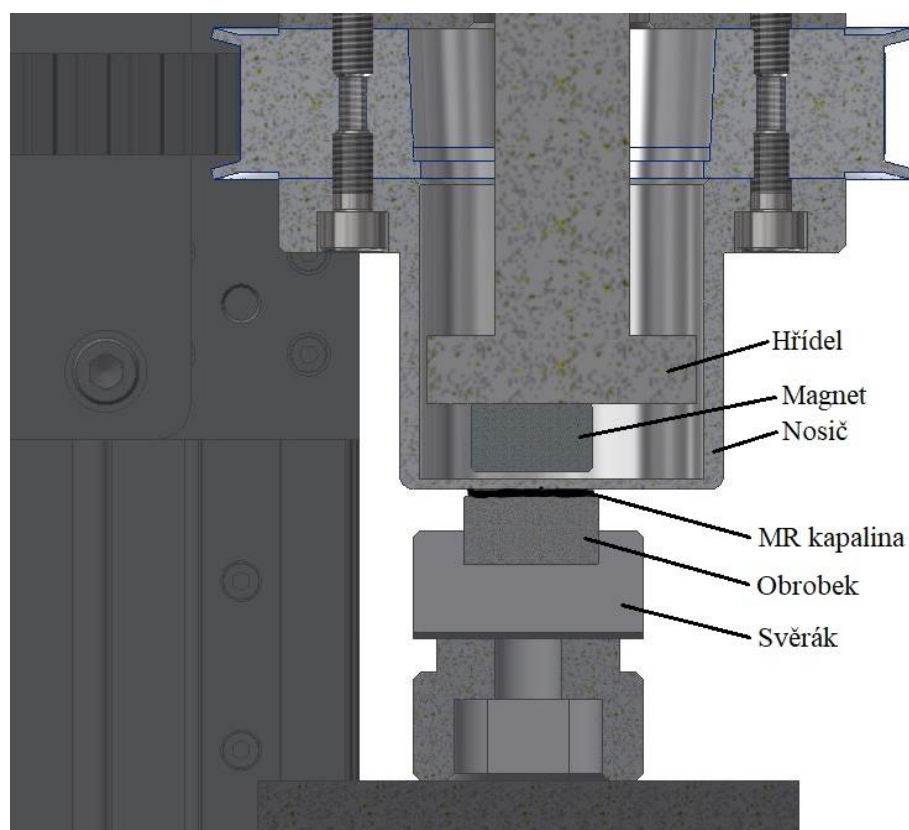
$$P_{\text{s}} > P_{\text{c}} \text{ [W]},$$

$$45 > 11 \text{ [W]}.$$

Výkon servomotoru $P_{\text{s}} = 45 \text{ [W]}$ vyhovuje. [43, 44]



Obr. 83. Kinematické schéma zařízení

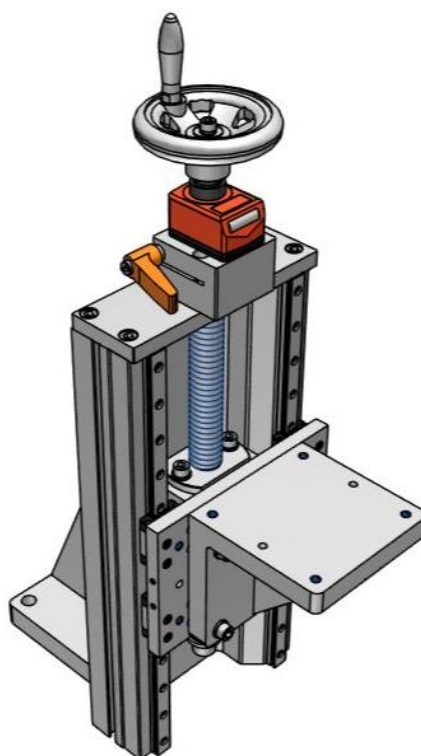


Obr. 84. Princip MRF procesu

14 VOLBA OS

Osa Z

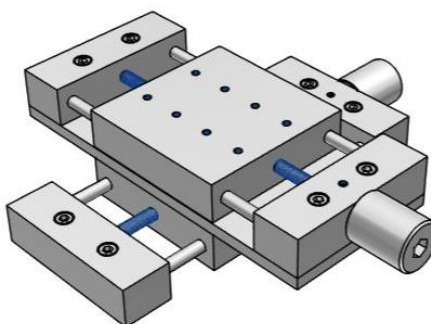
Pro zajištění opakovatelnosti nastavení vzdálenosti nosiče od obrobku byla zvolena osa značky MISUMI, která je vybavena indikátorem polohy s rozlišitelností 0,01 mm. K přeměně otáčivého pohybu na posuvný slouží trapézový šroub Tr 20x4. Zdvih osy je 212 mm.



Obr. 85. Osa Z [45]

Osy X a Y

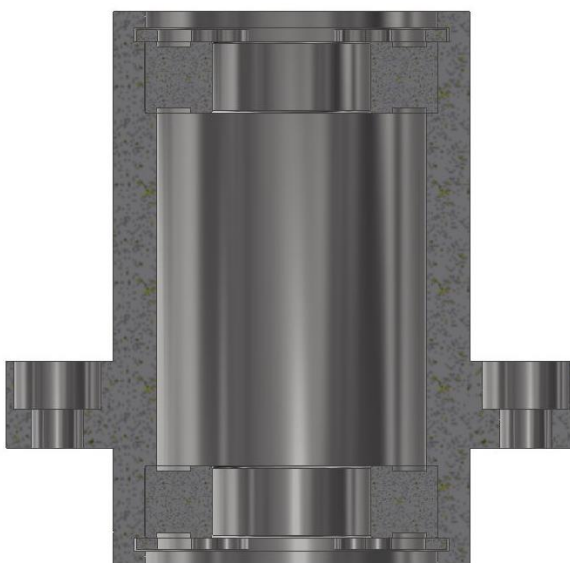
Svěrák bude upnut na čtvercovém stole značky MISUMI o délce strany 80 mm. Osy X a Y umožňují pohyb stolu ± 25 mm.



Obr. 86. Osy X a Y [46]

15 KONTROLNÍ VÝPOČET

Pro uložení rotačních částí byla zvolena kuličková ložiska, která jsou většinou určena pro malá a středně velká zatížení. Mohou přenášet kromě radiálního zatížení i určité axiální zatížení. Ložiska s velkou tuhostí, jako např. kuličková a válečková ložiska, nemohou vyrovnávat nesouosost anebo vyrovnávají pouze velmi malou nesouosost, avšak pouze v případě, že na ně nepůsobí zatížení.



Obr. 87. Ložiska v pouzdru

Požadovaná životnost ložisek je

$$L_p = 20\,000 \text{ [h]}.$$

Typ pevnostního výpočtu		Vlastnosti ložiska		Výsledky	
Kontrolní výpočet		Jmenovitý úhel dotyku	α 5 deg	L_{10}	1435971 hr
Zatížení		Základní dynamická únosnost	C 6370 N	L_{na}	1435971 hr
Radiální zatížení	F_r 100 N	Základní statická únosnost	C_0 3650 N	L_{10r}	258475 ul
Axiální zatížení	F_a 0 N	Součinitel dynamického radiálního zatížení	X 1,00 ul > 0,56 ul	L_{nar}	258475 ul
Otáčky	n 3000 rpm	Součinitel dynamického axiálního zatížení	Y 0,00 ul > 0,00 ul	S_{0c}	36,50000 ul
		Mezní hodnota F_a/F_r	e 0,40 ul	P_z	0,47124 W
		Součinitel statického radiálního zatížení	X_0 0,60 ul	F_{min}	37 N
		Součinitel statického axiálního zatížení	Y_0 0,60 ul	P_0	100 N
		Exponent pro určení životnosti	p 3,00000 ul	P	100 N
		Připustné otáčky pro mazání tukem	n_{Lim1} 12000 rpm	k_n	4,000 ul
		Připustné otáčky pro mazání olejem	n_{Lim2} 12000 rpm	a_1	1,00 ul
Požadovaný součinitel statické bezpečnosti S_0 2,0 ul		Výpočet životnosti ložiska Výpočet dle ANSI/AFBMA 9-1990 (ISO 281-1990)		f_t	1,00 ul
Mazání Součinitel tření μ 0,0015 ul Způsob mazání Tuk		Požadovaná životnost L_{req} 20000 hr Požadovaná spolehlivost R_{req} 90 ul Součinitel zvláštních vlastností ložiska a_2 1,00 ul Součinitel provozních podmínek a_3 1,00 ul Provozní teplota T 25 c Součinitel přidávných sil f_d 1,00 ul		η_e	3000 rpm
				η_{min}	3000 rpm
				η_{max}	3000 rpm
				Ložisko	
				D	37,000 mm
				d	20,000 mm
				B	9,000 mm

Obr. 88. Kontrolní výpočet ložisek

Vypočtená životnost ložisek je

$$L_h = 1\,435\,971 \text{ [h]}.$$

$$L_h > L_p \text{ [h]},$$

$$1\,435\,971 > 20\,000 \text{ [h]}.$$

Životnost ložisek vyhovuje.



Obr. 89. Ložisko v pouzdru

Požadovaná životnost ložiska je

$$L_p = 20\,000 \text{ [h]}.$$

Typ pevnostního výpočtu		Vlastnosti ložiska		Výsledky									
Kontrolní výpočet		Jmenovitý úhel dotyku	α	5 deg									
Zatížení		Základní dynamická únosnost	C	6630 N									
Radiální zatížení		Základní statická únosnost	C_0	4300 N									
Axiální zatížení		Součinitel dynamického radiálního zatížení	X	1,00 ul	0,56 ul								
Otáčky		Součinitel dynamického axiálního zatížení	Y	0,00 ul	0,00 ul								
Požadovaný součinitel statické bezpečnosti		Mezní hodnota F_a/F_r	e	0,40 ul									
Mazání		Součinitel statického radiálního zatížení	X_0	0,60 ul									
Součinitel tření		Součinitel statického axiálního zatížení	Y_0	0,60 ul									
Způsob mazání		Exponent pro určení životnosti	p	3,00000 ul									
		Přípustné otáčky pro mazání tukem	$nLim_1$	10000 rpm									
		Přípustné otáčky pro mazání olejem	$nLim_2$	10000 rpm									
Výpočet životnosti ložiska		Výpočet dle ANSI/AFBMA 9-1990 (ISO 281-1990)											
Požadovaná životnost		L_{req}	20000 hr										
Požadovaná spolehlivost		R_{req}	90 ul										
Součinitel zvláštních vlastností ložiska		a_2	1,00 ul										
Součinitel provozních podmínek		a_3	1,00 ul										
Provozní teplota		T	25 c										
Součinitel přidavných sil		f_d	1,00 ul										
		<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Ložisko</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>D</td> <td>42,000 mm</td> </tr> <tr> <td>d</td> <td>25,000 mm</td> </tr> <tr> <td>B</td> <td>9,000 mm</td> </tr> </tbody> </table>				Ložisko		D	42,000 mm	d	25,000 mm	B	9,000 mm
Ložisko													
D	42,000 mm												
d	25,000 mm												
B	9,000 mm												

Obr. 90. Kontrolní výpočet ložiska

Vypočtená životnost ložiska je

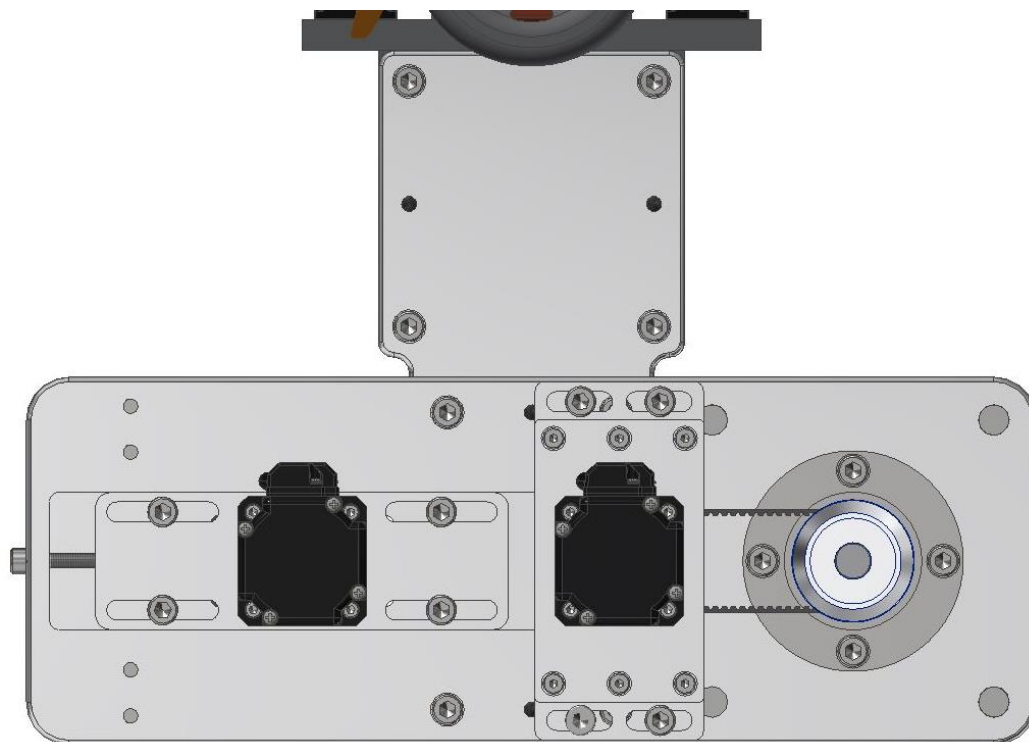
$$L_h = 4\,857\,237 \text{ [h]}.$$

$$L_h > L_p \text{ [h]},$$

$$4\,857\,237 > 20\,000 \text{ [h]}.$$

Životnost ložiska vyhovuje.

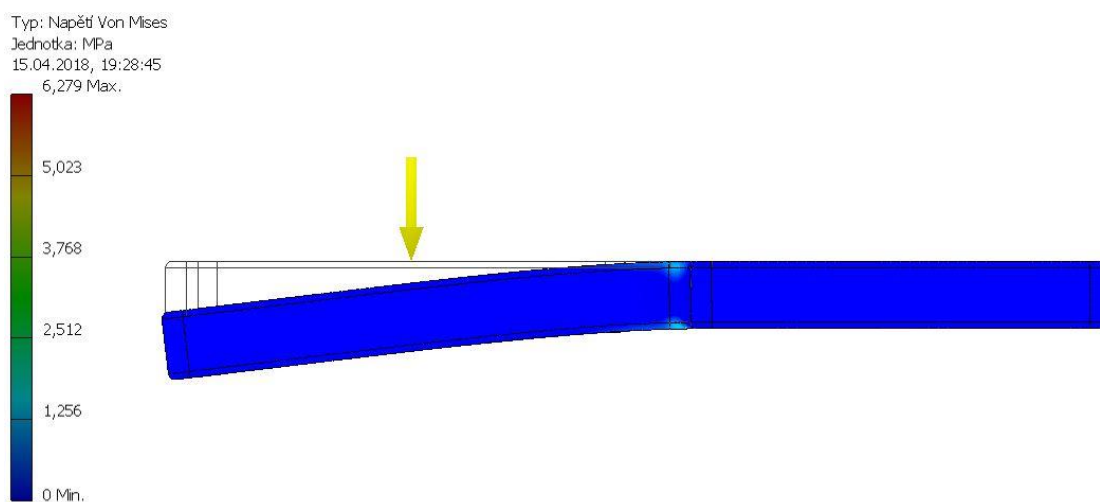
Nejvíce namáhanou deskou je deska, která nese pohony.



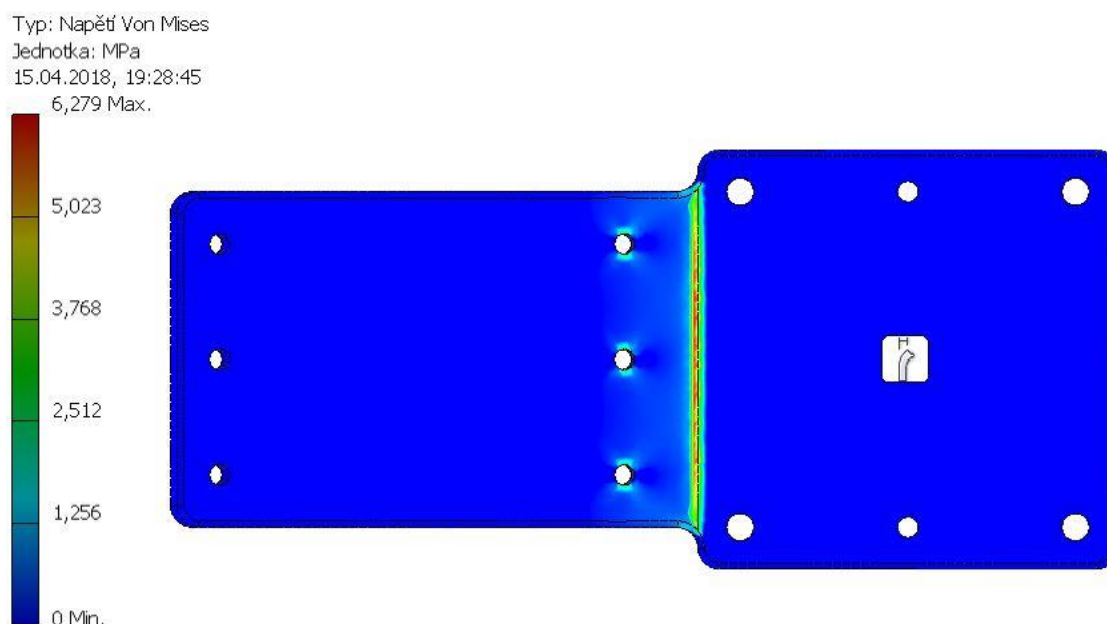
Obr. 91. Zatížení desky

Desku zatížíme silou

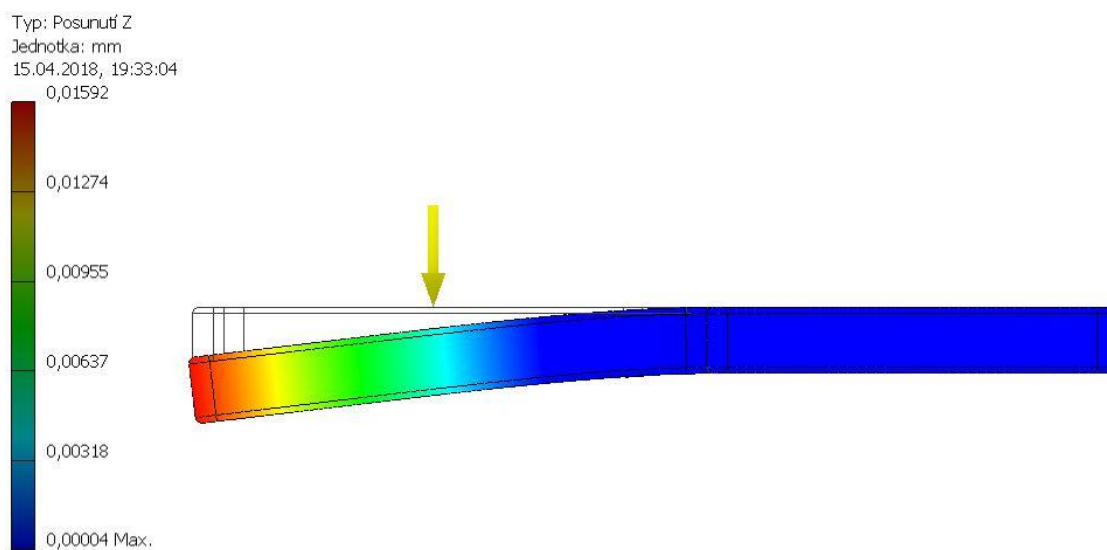
$$F_1 = 100 \text{ [N]}.$$



Obr. 92. Napjatost dle hypotézy pevnosti HMM



Obr. 93. Napjatost dle hypotézy pevnosti HMM



Obr. 94. Posunutí v ose z

Materiálem desky byla zvolena válcovaná hliníková slitina EN AW 5083, jež má dle materiálových listů mez kluzu v tahu

$$\sigma_{Kt} = 120 \text{ [MPa]}.$$

Součinitel bezpečnosti vůči mezi kluzu je dán vztahem

$$k_K = \frac{\sigma_{Kt}}{\sigma_{\text{redHMM}}} \text{ [1]}, \quad (17)$$

a volí se v intervalu

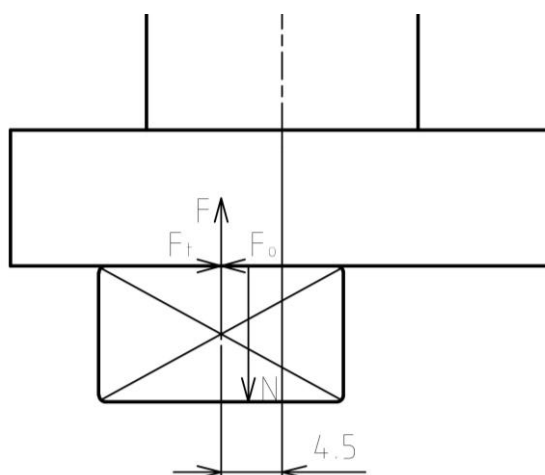
$$k_K = (1,5 \text{ až } 2) [1].$$

Po dosazení se obdrží

$$k_K = \frac{120}{6,3} [1],$$

$$k_K \doteq 19 [1].$$

Součinitel bezpečnosti vyhovuje.



Obr. 95. Schéma působení sil při rotaci

Na magnet rotující konstantní úhlovou rychlostí ω [$\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$] působí odstředivá síla

$$F_o = mr\omega^2 [\text{N}]. \quad (18)$$

Hmotnost magnetu je

$$m = 0,02 [\text{kg}].$$

Odtrhová síla magnetu je

$$F = 85 [\text{N}].$$

Normálová reakce N se určí z rovnice statické rovnováhy

$$\sum_{i=1}^n F_{iy} = 0. \quad (19)$$

$$F - N = 0,$$

$$F = N.$$

Po dosazení do (10) se obdrží

$$\omega = 2\pi 50 [\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}],$$

$$\omega \doteq 314 [\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}].$$

Po dosazení do (18) se obdrží

$$F_o = 0,02 \cdot 0,0045 \cdot 314^2 [\text{N}],$$

$$F_o \doteq 9 [\text{N}].$$

Třecí síla F_t je určena Coulombovým zákonem

$$F_t = Nf [\text{N}]. \quad (20)$$

Součinitel smykového tření mezi ocelovou hřídelí a poniklovaným magnetem byl uvažován

$$f = 0,2 [1].$$

Po dosazení do (20) se obdrží

$$F_t = 85 \cdot 0,2 [\text{N}],$$

$$F_t = 17 [\text{N}].$$

Aby nebyl magnet při rotaci uveden do pohybu, musí být třecí síla F_t větší než odstředivá síla F_o

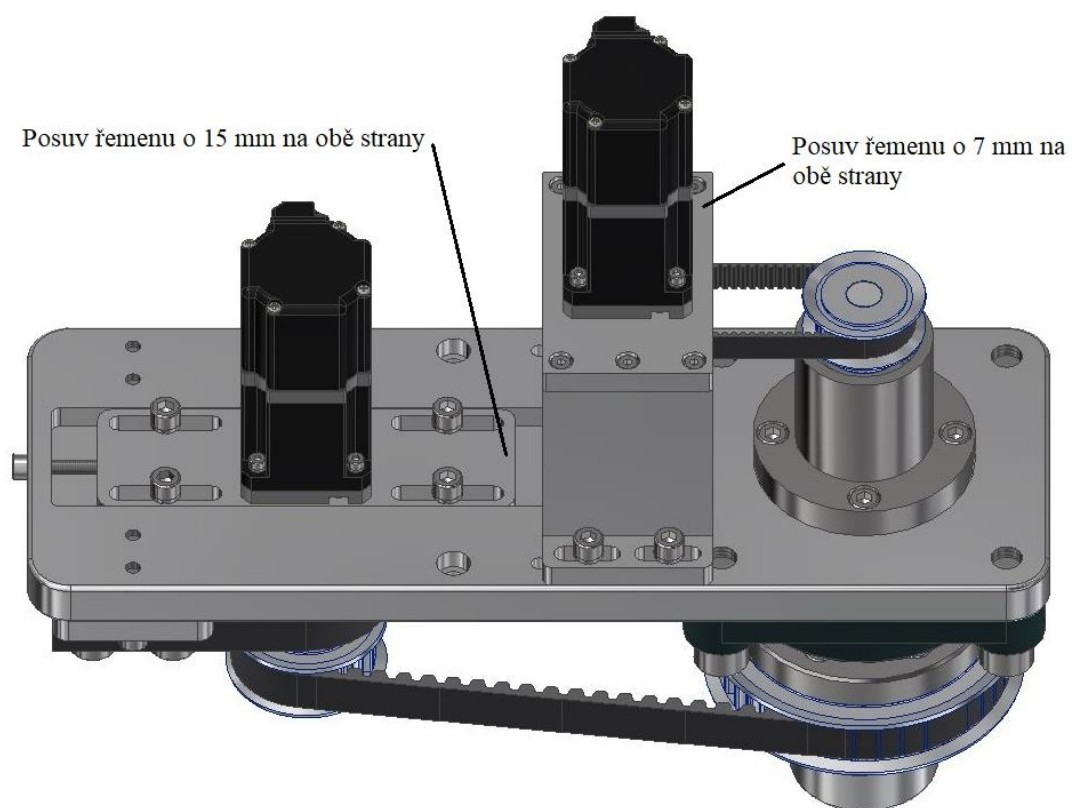
$$F_t > F_o [\text{N}],$$

$$17 > 9 [\text{N}].$$

Třecí síla $F_t = 17 [\text{N}]$ vyhovuje.

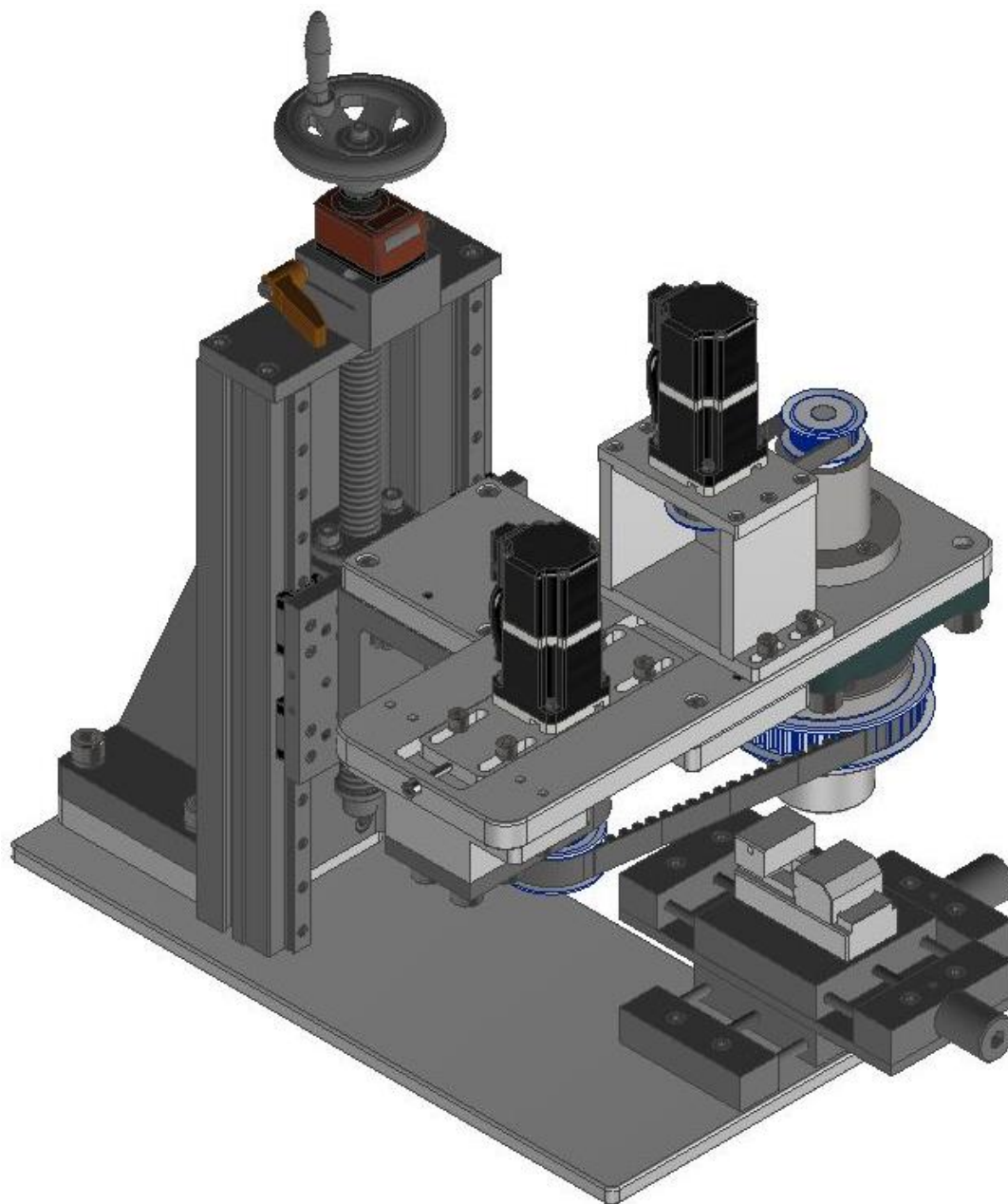
[43, 44, 47]

Z důvodu nasazování a napínání řemenů je nutné zajistit možnost jejich posuvu na obě strany.



Obr. 96. Posuv řemenů

16 CENOVÁ KALKULACE



Obr. 97. MRF zařízení

Čísla položek v následující tabulce jsou shodná s čísly položek v kusovníku a výkresu sestavení, které jsou přiloženy v příloze.

Tab. 7. Cenová kalkulace

Číslo položky	Položka	Množství	Celková cena [Kč]
1	Hřídel	1	2 230
2	Příruba	1	3 580
3	Nosič	1	1 800
4	Čep	1	950
5	Držák ložiska	1	1 950
6	Deska	1	2 850
7	Deska 2	1	1 250
8	Deska 3	1	5 850
9	Deska 4	1	1 750
10	Deska 5	1	2 450
11	Deska 6	1	1 950
12	Deska 7	2	1 960
13	Deska 8	1	2 250
14	NdFeB magnet	1	45
15	Servomotor s příslušenstvím	2	36 402
16	Osa Z	1	19 700
17	Osy X a Y	1	4 775
18	Ozubený řemen	1	468
19	Řemenice	1	3 116
20	Ložisko	1	425
21	Ložiska v pouzdru	1	2 348
22	Řemenice	1	543
23	Ozubený řemen	1	148
24	Řemenice	1	474
25	Spojka	1	875
26	Ložisko v pouzdru	1	1 985
27	Řemenice	1	935
28	Přesný svěrák	1	1 185
29 až 44	Spojovací materiál	1	320
Celková cena			102 114

ZÁVĚR

Předložená diplomová práce vznikla za účelem návrhu a konstrukce zařízení pro magnetoreologické dokončování povrchů.

V teoretické části práce byl podán přehled o dokončovacích metodách obrábění, mechanických nano-dokončovacích procesech a nano-dokončovacích procesech s podporou magnetického pole.

V praktické části práce byly nastíněny základní principy přístrojů pro magnetoreologické dokončování povrchů. Výpočtem byly určeny pohony zařízení a zkontrolována životnost ložisek. Dále byla provedena pevnostní kontrola namáhané desky.

Zařízení je určeno pro vzorky kruhového průřezu o průměru 20 mm nebo pro vzorky čtvercového průřezu o délce strany 20 mm.

Maximální otáčky hřídele s magnetem jsou $n_m = 3\,000 \text{ [min}^{-1}\text{]}$.

Maximální otáčky nosiče jsou $n_n = 1\,000 \text{ [min}^{-1}\text{]}$.

Otáčky lze regulovat pomocí frekvenčních měničů připojených k PC.

V práci bylo zkonstruováno zařízení pro magnetoreologické dokončování povrchů, jehož cena činí 102 114 Kč.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] BUMBÁLEK, B., ODVODY, V. a OŠŤÁDAL, B. *Drsnost povrchu*. 1. vyd. Praha: SNTL – Nakladatelství technické literatury, 1989. 338 s.
- [2] SVOBODA, P., BRANDEJS, J. a DVOŘÁČEK, J. *Základy konstruování*. 6. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2015. 230 s. ISBN 978-80-7204-921-9.
- [3] PÍŠKA, M. et al. *Speciální technologie obrábění*. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2009. 247 s. ISBN 978-80-214-4025-8.
- [4] JAIN, V. *Nanofinishing Science and Technology: Basic and Advanced Finishing and Polishing Processes*. 1st ed. Boca Raton: CRC Press, 2017. 429 s. ISBN 978-1-4398-5290-3.
- [5] MARINESCU, I. et al. *Tribology of Abrasive Machining Processes*. 2nd ed. Amsterdam: Elsevier, 2013. 586 s. ISBN 978-1-4987-4594-9.
- [6] VIGNER, M., PŘIKRYL, Z. a kol. *Obrábění*. 1. vyd. Praha: SNTL – Nakladatelství technické literatury, 1984. 800 s.
- [7] MASLOV, J. *Teorie broušení kovů*. Přel. J. Klůna. a F. Neckář. 1. vyd. Praha: SNTL – Nakladatelství technické literatury, 1979. 246 s. Přel. z: *Těorija šlifovanija matěrialov*.
- [8] MÁDL, J. et al. *Jakost obráběných povrchů*. 1. vyd. Ústí nad Labem: Univerzita J. E. Purkyně, 2003. 179 s. ISBN 80-7044-539-4.
- [9] KOCMAN, K. *Technologické procesy obrábění*. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011. 330 s. ISBN 978-80-7204-722-2.
- [10] ŘASA, J. a GABRIEL, V. *Strojírenská technologie 3 – 1. díl, Metody, stroje a nástroje pro obrábění*. 2. vyd. Praha: Scientia, 2005. 256 s. ISBN 80-7183-337-1.
- [11] MÁDL, J. et al. *Technologie obrábění 3. díl*. 1. vyd. 1. vyd. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2000. 81 s. ISBN 80-01-02091-6.
- [12] Satisloh AG [online]. [cit. 11.4.2018]. Dostupné z: <http://www.satisloh.com/home/precision-optics/grinding/spm-200>
- [13] DRIENSKY, D. a TOMADIES, J. *Strojní obrábění II – Broušení*. Přel. P. Vávra. 1. vyd. Praha: SNTL – Nakladatelství technické literatury, 1991. 94 s. Přel. z: *Strojové obrábanie II – Brúsenie*. ISBN 80-03-00413-6.

- [14] Hot Rod Engine Tech [online]. [cit. 11.4.2018]. Dostupné z: http://d23c3kq2pqf30j.cloudfront.net/wp-content/uploads/2014/05/Dart_13.jpg
- [15] Gehring Technologies GmbH [online]. [cit. 11.4.2018]. Dostupné z: https://www.gehring.de/sites/default/files/text/honing_tools_-_pt_series_en-en-ww.pdf
- [16] Gehring Technologies GmbH [online]. [cit. 11.4.2018]. Dostupné z: <https://www.gehring.de/en-ww/standard-honing-stone>
- [17] Gehring Technologies GmbH [online]. [cit. 11.4.2018]. Dostupné z: https://www.gehring.de/sites/default/files/text/formhonen_en_web-en-ww.pdf
- [18] SADÍLEK, M. *Nekonvenční metody obrábění I*. 1. vyd. Ostrava: VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2009. 146 s. ISBN 978-80-248-2107-8.
- [19] Gontermann-Peipers GmbH [online]. [cit. 11.4.2018]. <http://www.gontermann-peipers.de/en/products/cast-products/lapping-tools>
- [20] Supfina Grieshaber GmbH & Co. KG [online]. [cit. 11.4.2018]. <http://www.supfina.de/aktuelles/pressespiegel/detailansicht/191-ncfertigung-neue-dimension-der-oberflaechenqualitaet>
- [21] PR Hoffman [online]. [cit. 11.4.2018]. <http://www.prhoffman.com/catalog-request.html>
- [22] Hot Rod Engine Tech [online]. [cit. 11.4.2018]. Dostupné z: http://d23c3kq2pqf30j.cloudfront.net/wp-content/uploads/2014/05/Dart_13.jpg
- [23] Supfina Grieshaber GmbH & Co. KG [online]. [cit. 11.4.2018]. <https://www.supfina.com/products/technology/superfinish>
- [24] VAJSKEBR, J., ŠPETA, Z. *Dokončování a zpevňování povrchu strojních součástí válečkováním*. 1. vyd. Praha: SNTL – Nakladatelství technické literatury, 1984. 181 s.
- [25] BAUBLIES AG [online]. [cit. 11.4.2018]. Dostupné z: <https://www.baublies.com/index-en.html>
- [26] KOVOSVIT MAS, a.s. [online]. [cit. 11.4.2018]. Dostupné z: https://www.kovosvit.cz/download/FileUploadComponent-502448294/1456992042_cs_26515e230a630276b4127617876a7589.pdf
- [27] Wenaroll GmbH [online]. [cit. 11.4.2018]. Dostupné z: <https://www.wenaroll.de>

- [28] Satisloh AG [online]. [cit. 11.4.2018]. Dostupné z: <http://www.satisloh.com/home/precision-optics/polishing/sps-200>
- [29] Satisloh AG [online]. [cit. 11.4.2018]. Dostupné z: <http://www.satisloh.com/home/precision-optics/polishing/gi-ap>
- [30] PDJ Vibro Ltd. [online]. [cit. 11.4.2018]. Dostupné z: <https://www.vibratoryfinishing.co.uk/superfinishing.html>
- [31] ResearchGate [online]. [cit. 11.4.2018]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/Description-of-the-abrasive-flow-machining-process-Description-du-procede-de-polissage_fig6_270776690
- [32] JAIN, V. *Micromanufacturing Processes*. 1st ed. Boca Raton: CRC Press, 2012. 429 s. ISBN 978-1-4398-5290-3.
- [33] ResearchGate [online]. [cit. 11.4.2018]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/Principle-of-elastic-emission-machining_fig4_267378137
- [34] ASME [online]. [cit. 11.4.2018]. Dostupné z: <http://manufacturingscience.asmedigitalcollection.asme.org/article.aspx?articleid=2085414>
- [35] BASF [online]. [cit. 11.4.2018]. Dostupné z: https://www.dispersions-pigments.basf.com/portal/load/fid827906/CIP_General_PO_e.pdf
- [36] HUIRU, G. *Fundamental Investigation on Nano-precision Surface Finishing Using MCF (Magnetic Compound Fluid) Slurry*. 1st ed. Akita: Akita Prefectural University, 2014. 132 s.
- [37] KORDONSKI, W. et al. Systém for Magnetorheological finishing of substrates. United States Patent. Patent Number 5,951,369. 14.9.1999.
- [38] QED Technologies [online]. [cit. 27.4.2018]. Dostupné z: <https://qedmrf.com/en/mrfpolishing/mrf-technology/how-it-works>
- [39] QED Technologies [online]. [cit. 27.4.2018]. Dostupné z: <https://qedmrf.com/en>
- [40] HIWIN s.r.o. [online]. [cit. 27.4.2018]. http://www.hiwin.cz/cz/produkty/polohovaci-systemy-new/motory/servo-motory/116_servo-motor-frls-50w
- [41] *Frekvenční měniče a servomotory*. HIWIN s.r.o., 42 s.

- [42] HIWIN s.r.o. [online]. [cit. 27.4.2018].
http://www.hiwin.cz/cz/produkty/polohovaci-systemy-new/servo-kontrolery/290_frekvencni-menic-hiwin-d2
- [43] HALLIDAY, D., RESNICK, R. a WALKER, J. *Fyzika*. Přel. M. Černý, P. Dub, et al. 2., přeprac. vyd. Brno: VUTIUM, 2013. 1248 s. Přel. z: *Fundamentals of Physics*. ISBN 978-80-214-4123-1.
- [44] DOSTÁL, J. a JANÁČEK, Z. *Fyzika*. 2. vyd. Zlín: Univerzita Tomáše Bati, 2003. 265 s. ISBN 80-7318-115-0.
- [45] MISUMI Corporation [online]. [cit. 27.4.2018]. <https://uk.misumi-ec.com/vona2/detail/110302277130/?PNSearch=KULDP20-C-320&HissuCode=KULDP20-C-320&searchFlow=suggest2products&Keyword=KULDP20-C-320>
- [46] MISUMI Corporation [online]. [cit. 27.4.2018]. <https://uk.misumi-ec.com/vona2/detail/110302197240/?PNSearch=XYKSL80L&HissuCode=XYKSL80L&searchFlow=suggest2products&Keyword=XYKSL80L>
- [47] SHIGLEY, J., MISCHKE, CH. a BUDYNAS, R. *Konstruování strojních součástí*. Přel. M. Hartl, M. Vlk, et al. 1. vyd. Brno: VUTIUM, 2010. 1159 s. Přel. z: *Mechanical Engineering Design*. ISBN 978-80-214-2629-0.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

R_a	Střední aritmetická úchylka profilu.
l_r	Základní délka.
R_z	Největší výška profilu.
R_p	Výška nejvyššího výstupku profilu.
R_v	Hloubka nejnižší prohlubně profilu.
α_o	Ortogonální úhel hřbetu.
γ_o	Ortogonální úhel čela.
r_n	Poloměr ostří.
V_m	Objem odbroušeného materiálu.
V_k	Objemový úbytek kotouče.
k	Poměrný úbytek broušení.
SiC	Karbid křemíku.
Al ₂ O ₃	Oxid hlinitý.
B ₄ C	Karbid boru.
KNB	Kubický nitrid boru.
v_o	Obvodová rychlost.
v_a	Posuvová rychlost.
p_k	Přítlak.
s_h	Radiální posuv.
l_p	Přeběh honovacích kamenů.
l_k	Délka honovacích kamenů.
l_o	Délka honované plochy.
α_p	Úhel ovlivňující honování.
p_1	Tlak v místě styku lapovacího nástroje s obrobkem.

v_1	Rychlost pracovního pohybu při lapování.
t_1	Doba lapování.
ω_k	Frekvence kmitavého pohybu superfinišovacích kamenů.
v_k	Rychlost kmitavého pohybu.
α	Úhel ovlivňující superfinišování.
v_s	Maximální výsledná rychlost při superfinišování.
AFM	Abrasive flow machining.
EEM	Elastic emission machining.
ZrO ₂	Oxid zirkoničitý.
EAF	Elastic abrasive finishing.
FIBM	Focused ion beam machining.
MAF	Magnetic abrasive finishing.
DDMAF	Double-disk MAF.
MRF	Magnetorheological finishing.
MRAFF	Magnetorheological AFF.
BEMRF	Ball end MRF.
MFP	Magnetic float polishing.
FMAB	Flexible magnetic abrasive brush.
CIP	Carbonyl Iron Powder.
u	Převodové číslo.
z_2	Počet zubů hnané řemenice.
z_1	Počet zubů hnací řemenice.
ρ_h	Hustota hliníkové slitiny.
ρ	Hustota oceli.
V	Objem.

s	Tloušťka.
R	Poloměr.
m	Hmotnost.
I	Moment setrvačnosti.
S	Obsah plochy.
A	Práce.
ΔE	Změna kinetické energie.
E_k	Kinetická energie koncová.
E_p	Kinetická energie počáteční.
ω	Úhlová rychlost.
n_m	Otáčky hřídele s magnetem.
P	Výkon potřebný k roztočení.
t	Čas, za který má být dosažena požadovaná úhlová rychlost.
P_c	Celkový výkon potřebný k pohonu stroje.
η_m	Mechanická účinnost.
$\eta_{\dot{r}}$	Účinnost ozubeného řemenu.
η_l	Účinnost valivých ložisek.
n_j	Jmenovité otáčky servomotoru.
P_j	Jmenovitý výkon servomotoru.
η_s	Účinnost servomotoru.
P_s	Výkon servomotoru.
n_n	Otáčky hnaného členu.
n_h	Otáčky hnacího členu.
L_p	Požadovaná životnost ložiska.
L_h	Životnost ložiska.

F_1	Síla.
σ_{Kt}	Mez kluzu v tahu.
k_K	Součinitel bezpečnosti vůči mezi kluzu.
$\sigma_{red_{HMH}}$	Výsledné napětí dle hypotézy pevnosti HMH.
F_o	Odstředivá síla.
r	Poloměr.
F	Odtrhová síla magnetu.
N	Normálová reakce.
F_t	Třecí síla.
f	Součinitel smykového tření.

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1. Průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu Ra [2]</i>	14
<i>Obr. 2. Vyhodnocování drsnosti povrchu [2]</i>	15
<i>Obr. 3. Biomedicínské implantáty vyžadující vysokou jakost povrchu [4]</i>	18
<i>Obr. 4. Povrchová trhлина vzniklá broušením [5]</i>	19
<i>Obr. 5. Mikro-nástroje [5]</i>	20
<i>Obr. 6. Schéma struktury brousícího nástroje [6]</i>	22
<i>Obr. 7. Záběr zrna brusiva [10]</i>	23
<i>Obr. 8. Brousící materiály [5]</i>	25
<i>Obr. 9. Základní tvary brousících kotoučů a tělísek [6]</i>	27
<i>Obr. 10. Základní tvary brousících kotoučů a tělísek [6]</i>	28
<i>Obr. 11. Základní metody broušení [7]</i>	32
<i>Obr. 12. Základní metody broušení [6]</i>	33
<i>Obr. 13. Základní metody broušení [6]</i>	34
<i>Obr. 14. Základní metody broušení [6]</i>	34
<i>Obr. 15. Broušení skla [12]</i>	37
<i>Obr. 16. Princip honování [10]</i>	38
<i>Obr. 17. Geometrické nepřesnosti tvaru opravitelné honováním [4]</i>	39
<i>Obr. 18. Schéma záběru zrn při honování otvoru [6]</i>	39
<i>Obr. 19. Charakteristický vzhled honované plochy [10]</i>	40
<i>Obr. 20. Charakteristický vzhled honované plochy [4]</i>	40
<i>Obr. 21. Chyby geometrického tvaru způsobené nesprávnou velikostí přeběhu [4]</i>	40
<i>Obr. 22. Honovaný válec spalovacího motoru [14]</i>	41
<i>Obr. 23. Honovací hlava [15]</i>	42
<i>Obr. 24. Honovací kameny [16]</i>	42
<i>Obr. 25. Princip tvarového honování válců [17]</i>	44
<i>Obr. 26. Tvarové honování [17]</i>	45
<i>Obr. 27. Lapovací kotouče [19]</i>	48
<i>Obr. 28. Princip lapování [20]</i>	50
<i>Obr. 29. Dvoukotoučový lapovací stroj [21]</i>	50
<i>Obr. 30. Princip superfinišování [10]</i>	53
<i>Obr. 31. Schéma různých způsobů superfinišování [6]</i>	53
<i>Obr. 32. Bezhruté superfinišování [23]</i>	55

<i>Obr. 33. Superfinišování hřídele kamenem [23]</i>	56
<i>Obr. 34. Superfinišování hřídele pásem [23]</i>	56
<i>Obr. 35. Srovnatelné výrobní náklady jednotlivých metod obrábění [24]</i>	57
<i>Obr. 36. Schéma průběhu napětí, geometrických a objemových změn materiálu [24]</i>	58
<i>Obr. 37. Typické geometrické tvary tvářecích prvků [24]</i>	60
<i>Obr. 38. Schéma různých způsobů válečkování rotačních ploch [10]</i>	62
<i>Obr. 39. Principy nástrojů pro statické válečkování rovinných ploch [24]</i>	62
<i>Obr. 40. Diamantový hladicí trn [25]</i>	64
<i>Obr. 41. Zpevňování zaoblených přechodů válečkováním [26]</i>	65
<i>Obr. 42. Nástroj pro statických válečkovací vnějších ploch [25]</i>	67
<i>Obr. 43. Nástroj pro válečkování vnitřních ploch [27]</i>	69
<i>Obr. 44. Leštící kotouče [10]</i>	72
<i>Obr. 45. Leštění skla [28]</i>	72
<i>Obr. 46. Omílání [30]</i>	73
<i>Obr. 47. Princip Abrasive flow machining (AFM) [31]</i>	75
<i>Obr. 48. Vstřikovací tryska paliva dokončená procesem AFM [32]</i>	75
<i>Obr. 49. Princip Elastic emission machining (EEM) [33]</i>	76
<i>Obr. 50. Schéma EEM zařízení [4]</i>	77
<i>Obr. 51. Princip interakce mezi abrazivními zrny a povrchem obrobku [4]</i>	77
<i>Obr. 52. Elasto-abrazivní kulička s brusnými zrny z karbidu křemíku [34]</i>	78
<i>Obr. 53. Princip výroby elasto-abrazivních kuliček [4]</i>	79
<i>Obr. 54. Vliv elastomerního média během kontaktu s povrchem obrobku [4]</i>	79
<i>Obr. 55. Focused ion beam machining [4]</i>	80
<i>Obr. 56. Práškové pentakarbonylové železo [35]</i>	82
<i>Obr. 57. Směs abrazivních zrn a feromagnetických částic [36]</i>	83
<i>Obr. 58. Slinuté feromagnetické abrazivní částice [36]</i>	83
<i>Obr. 59. Systém pro MRF patentovaný v roce 1999 [37]</i>	88
<i>Obr. 60. Schéma MRF zařízení [38]</i>	89
<i>Obr. 61. Magnetoreologické dokončování zrcadla [39]</i>	89
<i>Obr. 62. Zařízení pro magnetoreologické dokončování povrchů [36]</i>	90
<i>Obr. 63. Zařízení pro magnetoreologické dokončování povrchů [36]</i>	90
<i>Obr. 64. Pohon magnetu</i>	92
<i>Obr. 65. Řemenice</i>	93

<i>Obr. 66. Hřídel s magnetem.....</i>	<i>94</i>
<i>Obr. 67. Schéma pro výpočet momentu setrvačnosti válce</i>	<i>95</i>
<i>Obr. 68. Servomotor FRLS 50 W [40]</i>	<i>101</i>
<i>Obr. 69. Všeobecné charakteristiky servomotorů značky HIWIN [41].....</i>	<i>102</i>
<i>Obr. 70. Technická specifikace servomotoru FRLS 50 W [41]</i>	<i>103</i>
<i>Obr. 71. Frekvenční měnič D2 [41]</i>	<i>105</i>
<i>Obr. 72. Frekvenční měnič D2 [42]</i>	<i>106</i>
<i>Obr. 73. Technická specifikace frekvenčního měniče D2 [41]</i>	<i>106</i>
<i>Obr. 74. Technická specifikace frekvenčního měniče D2 [41]</i>	<i>107</i>
<i>Obr. 75. Pohon 2.....</i>	<i>108</i>
<i>Obr. 76. Čep.....</i>	<i>108</i>
<i>Obr. 77. Menší řemenice.....</i>	<i>109</i>
<i>Obr. 78. Řemenice</i>	<i>109</i>
<i>Obr. 79. Nosič.....</i>	<i>109</i>
<i>Obr. 80. Příruba</i>	<i>110</i>
<i>Obr. 81. Spojka</i>	<i>110</i>
<i>Obr. 82. Schéma pro výpočet momentu setrvačnosti dutého válce</i>	<i>110</i>
<i>Obr. 83. Kinematické schéma zařízení</i>	<i>118</i>
<i>Obr. 84. Princip MRF procesu</i>	<i>118</i>
<i>Obr. 84. Osa Z [45].....</i>	<i>119</i>
<i>Obr. 85. Osy X a Y [46]</i>	<i>119</i>
<i>Obr. 86. Ložiska v pouzdru</i>	<i>120</i>
<i>Obr. 87. Kontrolní výpočet ložisek</i>	<i>120</i>
<i>Obr. 88. Ložisko v pouzdru</i>	<i>121</i>
<i>Obr. 89. Kontrolní výpočet ložiska</i>	<i>121</i>
<i>Obr. 90. Zatížení desky</i>	<i>122</i>
<i>Obr. 91. Napjatost dle hypotézy pevnosti HMM</i>	<i>122</i>
<i>Obr. 92. Napjatost dle hypotézy pevnosti HMM</i>	<i>123</i>
<i>Obr. 93. Posunutí v ose z.....</i>	<i>123</i>
<i>Obr. 95. Schéma působení sil při rotaci</i>	<i>124</i>
<i>Obr. 96. Posuv řemenů</i>	<i>126</i>
<i>Obr. 97. MRF zařízení</i>	<i>127</i>

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1. Směrnice pro použití parametru Ra [2]</i>	<i>15</i>
<i>Tab. 2. Hodnoty řezných podmínek pro rovinné broušení obvodem kotouče [6]</i>	<i>30</i>
<i>Tab. 3. Hodnoty řezných podmínek pro rovinné broušení čelem kotouče [6]</i>	<i>31</i>
<i>Tab. 4. Volba druhu brousícího materiálu podle broušeného materiálu [10].....</i>	<i>35</i>
<i>Tab. 5. Dosahovaná přesnost rozměrů a jakost broušených ploch [6].....</i>	<i>36</i>
<i>Tab. 6. Dosahovaná přesnost rozměrů a jakost lapovaných ploch [10].....</i>	<i>52</i>
<i>Tab. 7. Cenová kalkulace.....</i>	<i>128</i>

SEZNAM PŘÍLOH

P I Výkresová dokumentace