

**Česká zemědělská univerzita v Praze**

**Technická fakulta**

**Katedra materiálu a strojnictví**



**Bakalářská práce**

**Dokončovací metody obrábění**

**Martin Olšanský**

© 2023 ČZU v Praze

# ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Martin Olšanský

Zemědělské inženýrství

Inženýrství údržby

Název práce

**Dokončovací metody obrábění**

Název anglicky

**Surface finishing processes of machining**

---

## Cíle práce

Cílem bakalářské práce je shromáždit a analyzovat aktuální poznatky o možnostech a limitách dokončovacích metod obrábění. Student shromáždí literární a vlastní poznatky o předmětné problematice. Zaměří se na rozdělení a definování dokončovacích metod obrábění s přihlédnutím k jakosti obráběné plochy. Na základě závěrů z literárního rozboru a vlastní práce stanoví bakalář přínos práce.

## Metodika

Současný stav řešeného problému (literární rešerše).

Závěry a přínos práce.

## **Doporučený rozsah práce**

cca 30 stran

## **Klíčová slova**

Dokončovací operace, drsnost povrchu, obrábění.

---

## **Doporučené zdroje informací**

Časopis: International Journal of Machining and Machinability of Materials, Machining, Science and Technology, Journal of Cleaner Production, Materials, Manufacturing Technology, International Journal of Solids and Structures, Journal of Materials Processing Technology, Surface and Coating Technology, Journal of Industrial and Engineering Chemistry, Wear atd.  
DAS, S., KIBRIA, G., DOLOI, B., BHATTACHARYVA, B.: Advances in Abrasive Based Machining and Finishing Processes. Springer, 2020.  
DAVIM, J. P.: Surface integrity in machining. London: Springer, 2010  
FIALA, J., MENTL, V., ŠUTTA, P.: Struktura a vlastnosti materiálů. Praha: Academia, 2003.  
GAMBLIN, R.: Machine tools: specification, purchase, and installation. New York: McGraw-Hill Education, 2014.  
GUPTA, K., NEELESH, K. J., LAUBSCHER, R. F.: Hybrid Machining Processes: Perspectives on Machining and Finishing. Springer, 2015.  
HOCKEY, B. J.: The Science of Ceramic Machining and Surface Finishing II. Forgotten Books, 2019.  
KIBRIA, G., RATHOD, V. U.: Introduction to Advanced Machining and Finishing Processes. Alpha Science International, 2019.  
KOCMAN, K.: Technologické procesy obrábění. Brno: CERM, 2011.

---

## **Předběžný termín obhajoby**

2022/2023 LS – TF

## **Vedoucí práce**

prof. Ing. Miroslav Müller, Ph.D.

## **Garantující pracoviště**

Katedra materiálu a strojírenské technologie

Elektronicky schváleno dne 26. 1. 2021

**prof. Ing. Miroslav Müller, Ph.D.**

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 10. 2. 2021

**doc. Ing. Jiří Mašek, Ph.D.**

Děkan

V Praze dne 17. 02. 2023

---

### **Čestné prohlášení**

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci "Dokončovací metody obrábění" jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu použitých zdrojů na konci práce. Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušil autorská práva třetích osob.

V Praze dne \_\_\_\_\_

### **Poděkování**

Rád(a) bych touto cestou poděkoval(a) prof. Ing. Miroslavovi Müllerovi, Ph.D za poskytnutí odborných rad, připomínek a zkušeností během vedení mé bakalářské práce.

# Dokončovací metody obrábění

## Abstrakt

Jedná se o literární rešerši z oblasti dokončovacích metod obrábění s cílem shromáždit aktuální informace v této problematice. Přínosem je seznámení s novými poznatky v daném odvětví. Práce čerpá jak z české literatury a článků tak i ze zahraniční, tak je tomu hlavně v oblasti vývoje metod.

V úvodu první kapitoly jsou shrnuty účely dokončovacích metod a základní rozdělení podle principu zlepšení kvality povrchu. Dle toho je práce členěna do třech hlavních kapitol.

První skupina obsahuje abrazivní metody, kdy dochází ke zlepšení kvality povrchu pomocí úběru materiálu. Mezi abrazivními metodami je zaznamenán vývoj nových nástrojů a řezných kapalin, dále je zde uveden vývoj v metodě honování a odjehličkování.

Následující kapitola je věnována metodám bez úběru materiálu. Tedy metodám, kdy dochází k řízené plastické deformaci. Zde je například popsána nová optimalizace válečkování.

Třetí kapitola obsahuje nekonvenční dokončovací metody. Zejména elektrochemické metody, ale také metody pracující principu magnetismu.

V závěru je stanovené shrnutí vývoje jednotlivých skupin.

**Klíčová slova:** dokončování, povrchová úprava, úběr materiálu, drsnost povrchu, geometrická přesnost, tvrdost, broušení, leštění, nekonvenční metody.

# Surfing finishing process of machining

## Abstract

This thesis is a literature search in the field of finishing methods of machining to gather current information in this field. The contribution is the introduction of new knowledge in the field. The thesis draws on Czech literature and articles as well as on foreign literature, especially in the field of method development.

In the introduction of the first chapter, the purposes of finishing methods are summarized and the basic division according to the principle of surface quality improvement is presented. Accordingly, the thesis is divided into three main chapters.

The first group contains abrasive methods, where surface quality improvement is achieved by material removal. Among the abrasive methods, the development of new tools and cutting fluids is noted, as well as developments in honing and deburring methods.

The following chapter is devoted to methods without material removal. That is, methods where controlled plastic deformation takes place. Here, for example, a new optimisation of rolling is described.

The third chapter contains unconventional finishing methods. In particular, electrochemical methods, but also methods operating on the principle of magnetism.

Finally, a summary of the development of each group is provided.

**Keywords:** finishing, surface finish, material removal, surface roughness, geometric accuracy, hardness, grinding, polishing, unconventional methods.

## Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod</b> .....	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Cíl práce a metodika</b> .....	<b>2</b>
2.1	Cíl práce .....	2
2.2	Metodika .....	2
<b>3</b>	<b>Dokončovací metody obrábění</b> .....	<b>3</b>
<b>3.1</b>	<b>Metody s úběrem materiálu</b> .....	<b>4</b>
3.1.1	Broušení .....	5
3.1.1.1	Vývoj drážkových brusných kotoučů .....	7
3.1.2	Honování .....	8
3.1.2.1	Variabilní honování .....	10
3.1.3	Superfinašování .....	10
3.1.3.1	Vodní řezné kapaliny .....	12
3.1.4	Lapování .....	14
3.1.5	Leštění .....	15
3.1.6	Tryskání .....	16
3.1.6.1	Tryskání kapalinou (FJP), vývoj trysek .....	16
3.1.6.2	Tryskání zvlhčeným abrazivem .....	17
3.1.7	Omílání .....	18
3.1.8	Odjehlování .....	18
<b>3.2</b>	<b>Metody bez úběru materiálu</b> .....	<b>20</b>
3.2.1	Vyhlazování .....	20
3.2.2	Válečkování .....	20
3.2.2.1	Optimalizace statického vnitřního válečkováním .....	21
3.2.3	Kalibrování .....	22
3.2.4	Otryskávání .....	22
<b>3.3</b>	<b>Nekonvenční metody dokončování</b> .....	<b>24</b>
3.3.1	Abrazivní průtokové obrábění .....	24
3.3.2	Lešticí metoda BEMRF .....	26
3.3.3	Magnetické leštění .....	27
3.3.4	Elektrochemické metody .....	28
3.3.4.1	Elektrochemické broušení .....	28
3.3.4.2	Elektrochemické honování .....	29
3.3.4.3	Elektrochemické superfinašování .....	31
3.3.4.4	Elektrochemické odjehlování .....	32
<b>4</b>	<b>Závěr</b> .....	<b>33</b>
<b>5</b>	<b>Seznam použitých zdrojů</b> .....	<b>35</b>



## Seznam obrázků

Odkazovaný seznam obrázků

Obrázek 1 – Přehled brusných kotoučů (M. Hejl, P. Jalůvka).....	6
Obrázek 2 – Drážkové kotouče (R. Vignesh).....	7
Obrázek 3 – Výsledné plochy broušení (R. Vignesh) .....	8
Obrázek 4 – Schéma honování hlava (M. E. Mansori).....	9
Obrázek 5 – Schéma řezných pohybů superfinišování (H. Yamaguchi).....	11
Obrázek 7 – Povrch při použití kapaliny na bázi vody (T. Enomoto).....	12
Obrázek 6 – Povrch při použití kapaliny na bázi oleje (T. Enomoto) .....	12
Obrázek 8 – FJP kinematika (C.F. Cheun) .....	17
Obrázek 9 – Tryska se čtyřmi otvory (C.F. Cheun).....	17
Obrázek 10 – Dvousměrné abrazivní průtokové dokončování (R.K. Jain) .....	25
Obrázek 11 – Schéma toku částic SPION (M. Amir).....	26
Obrázek 12 – Schéma principu magnetického leštění (J. Zhang).....	27
Obrázek 13 – Nástroj na elektrické honování (K. Gupta) .....	30
Obrázek 14 – Komora na obrábění ozubených kol (K. Gupta) .....	30
Obrázek 15 – Princip elektrochemického superfinišování (K. Gupta).....	31

## Seznam tabulek

Odkazovaný seznam tabulek

Tabulka 1 – Přehled dosahovaných parametrů dokončovacích metod.....	4
Tabulka 2 – Přehled brusných materiálů a jejich použití.....	6
Tabulka 3 – Porovnání výsledků za použití daných kapalin .....	13

# 1 Úvod

Obrábění je výrobní metoda jejíž podstavou je odebrání materiálu polotovaru s cílem dosáhnout požadované konstrukční, rozměrové a technické kvality. Výrobními metodami nelze hospodárně nebo technologicky dosáhnout konečných kvalit. Z tohoto důvodu se ve výrobním postupu uplatňují dokončovací metody.

Dokončovací metody slouží k odstranění geometrických nepřesností, povrchových vad ve struktuře, dosažení konečného vzhledu a finálních vlastností. Vzhledem k široké rozmanitosti a rozdílnosti součástí požadující odpovídající konečnou kvalitu od běžných strojních součástí přes komponenty leteckého průmyslu až po medicínské implantáty a nástroje existuje celá řada odlišných dokončovacích metod. K tomuto faktu přispívá i skutečnost, že neexistuje univerzální dokončovací metoda, která by splňovala všechny konečné požadavky na vlastnosti povrchu. Právě analýzou dokončovacích metod se zabývá tato práce se zaměřením na aktuální poznatky a vývoj jednotlivých metod, což je hlavním přínosem. Práce je dle způsobu dosažení požadované změny povrchu členěna do třech kapitol.

První z kapitol udává metody, u kterých ke změně vlastností povrchu dochází pomocí úběru materiálu. Většina těchto abrazivních metod slouží ke zlepšení geometrické přesnosti a drsnosti. V této skupině je zaznamenán vývoj nástrojů, řezných kapalin či nového přístupu k odstraňování otřepu a honování.

Druhá kapitola se zabývá metodami bez úběru materiálu. Předmětem těchto metod je dosažení plastické deformace díky, které dokončovaná plocha získá žádanou změnu povrchu. Metodami bez úběru materiálu je možné docílit vedle zlepšení přesnosti a drsnosti také zvýšení povrchové tvrdosti. Mezi těmito metodami není přílišný vývoj, avšak je zde prostor v optimalizaci s cílem dosáhnout nejvyšších možných kvalit.

Závěrečná kapitola se zabývá nekonvenčními dokončovacími metodami. Hlavní vlastností této skupiny metod je, že nedochází k primárně mechanickému úběru nýbrž k úběru vyvolanému fyzikálními nebo chemickými pochody. Zejména tato problematika zaznamenává během posledních let značný vývoj, ať už se jedná o nové mechanismy úběru či nové kombinace energií. Důvodem vývoje, je fakt, že nekonvenčními metody umožňují dokončovat těžko obrobitelné materiály a součásti se specifickými požadavky, ať už se jedná o malé rozměry, míru přesnosti a drsnosti či složitý geometrický tvar.

## **2 Cíl práce a metodika**

### **2.1 Cíl práce**

Cílem bakalářské práce je seskupit dokončovací metody obrábění, rozebrat jejich využití, přednosti a nedostatky. Dále seznámit čtenáře s aktuálním vývojem metod stávajících, ale i s metodami pracujících na nových principech dosažení zlepšení jakosti dokončované plochy.

### **2.2 Metodika**

Prvotní zdroje informací byly hledány na základě klíčových slov a doporučené literatury uvedené v zadání od vedoucího práce. Dále také dle klíčových slov vycházející ze základní znalosti této problematiky a následně z postupné rešerše během vypracování závěrečné práce.

Základní citované informace vychází z českých odborných knih. Informace ohledně inovací a vývoje metod byly čerpán z internetových odborných článků a zahraničních doporučené literatury. Z českých webů se jednalo o MM Průmyslové spektrum, což je medium vydávající stejnojmenný časopis v papírové i elektronické podobě. Dalším zdrojem byl web Google Scholar, respektive weby Sciencedirect.com, Tandfonline.com a Mdpi.com. Zmíněné weby shrnují odborné články zahraničních časopisů v elektronické podobě.

### 3 Dokončovací metody obrábění

Důvodem zavedení a používání dokončovacích metod obrábění je, že při běžném konvenčním obrábění nelze technologicky nebo hospodárně dosáhnout konečného požadovaného stavu ať už se jedná o oblast geometrické přesnosti, jakosti povrchu nebo vzhledu. Dalším důvodem zařazení dokončovacích metod do technologického postupu je odstranění drobných geometrických vad nebo i úspora času během výroby.

Shrnutí účelů dokončovacích metod:

- Zvýšit přesnost rozměrů (rovinnost, kruhovitost, kolmost aj.) a mikrogeometrii povrchu.
- Snížit drsnost povrch.
- Zdokonalit fyzikální a mechanické vlastnosti povrchové vrstvy (tvrdost, přestup tepla, odolnost proti otěru a korozi).
- Zbavit se zbytkového pnutí, vad ve struktuře a povrchu.
- Odstranit ostré hrany a otřepy.
- Dosáhnout konečného vzhledu (lesk, matný vzhled).

Žádná dokončovací metoda nesplňuje všechny tyto požadavky, proto se volí kombinace metod, která ovlivní povrchovou vrstvu s ohledem na předpokládanou funkci [1].

Dokončovací metody obrábění se provádějí jako poslední technologická operace v technologickém postupu. Používají se tehdy, kdy nelze při obrábění hospodárně dosáhnout konečné přesnosti a jakosti. Po dokončování zpravidla následují již jen netechnologické operace (tj. konečná kontrola a konzervace) [2].

Rozdělení podle základního principu:

- 1) metody s úběrem materiálu,
- 2) metody bez úběru materiálu,
- 3) nekonvenční dokončovací metody.

[1]

### 3.1 Metody s úběrem materiálu

Při těchto metodách dochází k úběru předem stanoveného přídatku na dokončování. Úběr musí být odebrán za jemných podmínek, aby nedošlo k tepelnému ovlivnění nově vzniklé vrstvy. Do této kategorie patří:

- broušení,
- honování,
- superfinišování,
- lapování,
- leštění,
- tryskání,
- omílání,
- odjehlování.

Tyto metody se označují jako abrazivní. Nástroj nemá definovanou geometrii břítu. V tabulce 1 jsou zaznamenány dosahované parametry základních abrazivních metod. Hlavní využití těchto metod je u součástí, u kterých je kladen důraz na drsnost povrchu a přesnost rozměrů [3].

Tabulka 1 – Přehled dosahovaných parametrů dokončovacích metod

Obráběná plocha	Metoda	Fáze metody	Přesnost IT	Drsnost Ra [ $\mu\text{m}$ ]
Vnější rotační	Broušení	Hrubovací	9 až 11	0,8 až 3,2
		Dokončovací	5 až 6	0,2 až 0,6
		Jemné	3 až 5	0,05 až 0,4
	Lapování	Normální	3 až 4	0,05 až 0,4
		Jemné	1 až 2	0,025 až 0,1
	Superfíniš	Dokončovací	3 až 5	0,05 až 0,4
		jemné	2 až 4	0,025 až 0,1
Vnitřní rotační	Broušení	Hrubovací	9 až 11	1,6 až 3,2
		Dokončovací	5 až 7	0,4 až 1,6
		Jemné	3 až 6	0,05 až 0,4
	Honování	Hrubovací	6 až 8	0,2 až 0,5
		Dokončovací	5 až 7	0,1 až 0,2
		Jemné	3 až 6	0,025 až 0,1
Lapování	Dokončovací	3 až 5	0,01 až 0,4	
	Jemné	1 až 3	0,012 až 0,05	
Rovinná	Broušení	Hrubovací	9 až 11	1,6 až 3,2
		Dokončovací	5 až 7	0,4 až 1,6
		Jemné	3 až 6	0,05 až 0,4
	Lapování	Normální	3 až 5	0,1 až 0,4
		Jemné	1 až 3	0,012 až 0,05

Zdroj: KOČMAN, Karel. In: Speciální technologie: obrábění. 3. přeprac. v dopl. vyd., V Akademickém nakladatelství CERM 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004. ISBN 80-214-2562-8.

### 3.1.1 Broušení

Broušení je jednou ze základních metod dokončování povrchu nejen po obrábění, ale i po dalších výrobních metodách. Zároveň princip broušení je základem dalších dokončovacích metod (honování, lapování, superfinišování). Jedná se o metodu, kterou lze dosáhnout rozměrové i tvarové přesnosti. K úběru materiálu dochází brusným kotoučem nebo pásem. Během úběru vzniká nežádoucí teplo, tomu přispívá zanášení pórů nástroje třískou což vede k tvorbě nárůstku. Během broušení je tedy nutné používat řezné kapaliny.

Broušení má mnoho variant použití, různé polohy nástroje vůči obrobku, různé tvary obrobku i nástroje, dle toho je možná broušení klasifikovat. Z toho plyne i široké možnosti použití broušení, lze brousit rovinné i rotační plochy a lze provádět vnější i vnitřní broušení.

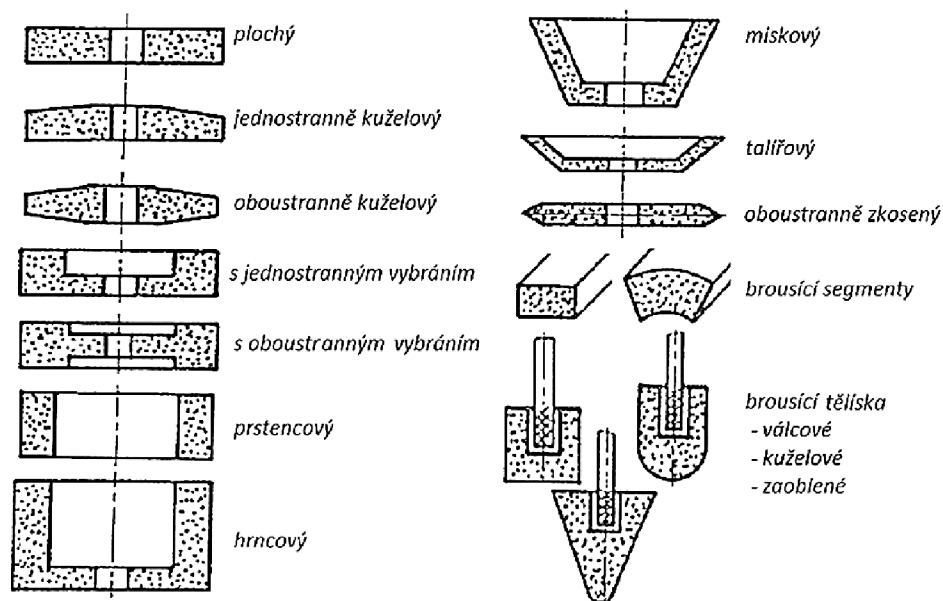
Broušení lze rozdělit na:

- rovinné broušení,
- broušení do kulata,
- vnitřní broušení,
- vnější broušení,
- tvarové broušení (např. broušení závitů),
- obvodové,
- čelní,
- radiální, axiální, tangenciální.

[3, 10]

#### Nástroj

U broušení nemá nástroj definován úhel břitu. Brusný nástroj je tvořen brusnými zrny (brusivem) a pojivem mezi těmito částicemi jsou póry. Nástrojem může být brusný kotouč nebo pás. V případě, že nástrojem není kotouč jsou brusná zrna nanášena a přilepena k plátnu nebo papíru. Základní rozdělení kotoučů je se stopkou a bez stopky. Obrázek 1 udává základní tvary brusných kotoučů.



Obrázek 1 – Přehled brusných kotoučů (M. Hejl, P. Jalůvka)

Materiál brusiva může být přírodní nebo syntetický. V technologické praxi se z přírodních materiálu používá pouze diamant, syntetické materiály používané na brusiva zobrazuje tabulka 2.

Tabulka 2 – Přehled brusných materiálů a jejich použití

Brusný materiál	Broušený materiál
Umělý korund	Ocel, ocel na odlitky, tvrdé bronzy
Karbid křemíku	Šedá litina, nitridované oceli, mosaz, měď, měkké kovy, sklo, kámen
Karbid boru	Slinuté karbidy (leštění diamantu)
Kubický nitrid boru	Rychlostní broušení

Zdroj: HLUCHÝ, Miroslav a Václav HANĚK. Strojírenská technologie 2. 2., upr. vyd. Praha: Scientia, 2001. ISBN 80-718-3245-6.

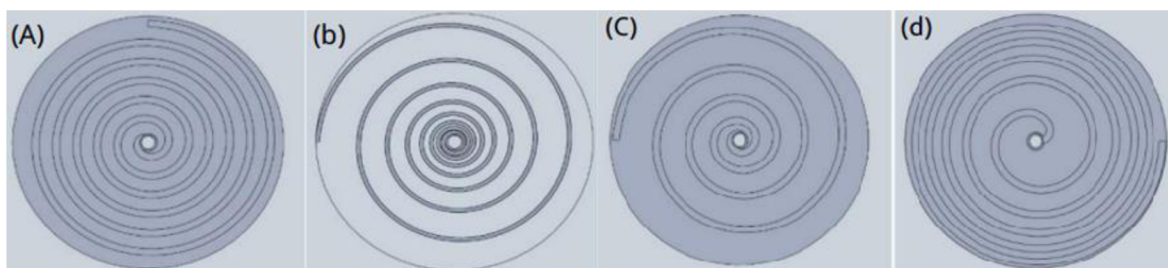
Pojivo tvoří můstky (vazbu) mezi brusnými zrny. Používaným materiálem pojiva je keramika, ta je velmi křehké a citlivé na boční tlak. Dalším materiálem pojiva je magnezitové pojivo, které se používá na jemný výbrus při požadavku na minimální tepelné ovlivnění, avšak toto pojivo je citlivé na vlhké, zásadité i kyselé prostředí. Na hrubovací broušení se používá pryskyřicové pojivo. Pryžové pojivo má využití pro elastické nástroje vhodné na čištění a leštění. Dalším druhem materiálem pojiva je šelak (tj. přírodní výměšek červce lakového). Pro diamantové nástroje se používá kovové nebo pryskyřičné pojivo [10].

### Řezné kapaliny

Jak již bylo zmíněno, během broušení v místě úběru vzniká nežádoucí zahřívání. Vysoká teplota, která přechází do obrobku. Řezná kapalina při broušení musí mít především chladicí účinek u běžného broušení se používají emulze o koncentraci 2 až 5% [2].

#### **3.1.1.1 Vývoj drážkových brusných kotoučů**

U použití řezné kapaliny je také důležitý její přívod do daného místa. Studie publikovaná Katedrou strojního inženýrství Technologického institutu v Madras (Indie) zkoumala vývoj drážkových kotoučů pro vertikální broušení v souvislosti s rozložením napětí (tangenciální, normálové a odstředivé síly) a drsnost povrchu. Drážka by měla zaručit optimální přívod řezné kapaliny. Pro studii byly navrženy kotouče se čtyřmi druhy drážek obrázek 2 (A) Archimedova spirála, (b) Logaritmická spirála, (c) Fermatova spirála a (d) Poloměr= t, avšak již z úvodní analýzy metodou konečných prvků v softwaru Ansys bylo zjištěno, že rozložení napětí je menší u kotouče s Archimédovou spirálou, proto se studie dále zabývala porovnáním kotouče bez drážky a kotoučem s Archimédovou drážkou.



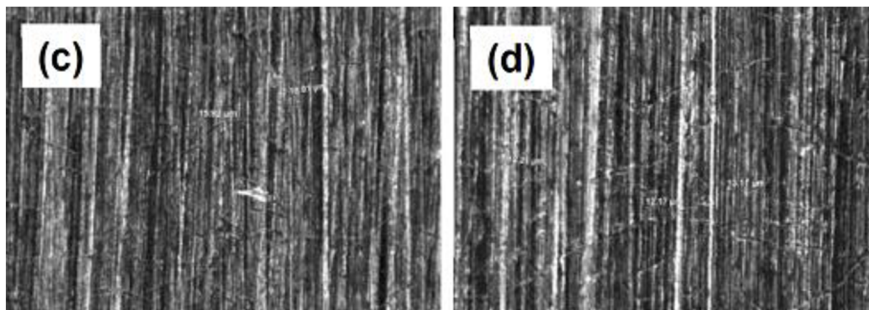
Obrázek 2 – Drážkové kotouče (R. Vignesh)

Závěry studie hovoří o tom, že broušení kotoučem bez drážky je normálová síla nižší než u běžného kotouče, to je způsobeno menší kontaktní plochou při broušení.

Výsledky měření výkonu ukázaly, že při použití drážkovaného kotouče se spotřebovává méně energie. Dále bylo změřeno, že u běžného kotouče dochází k rychlejšímu opotřebení a nižší rychlosti úběru než u drážkovaného kotouče, což může být způsobeno menší brusnou plochou.



Dosahovaná drsnost povrchu byla u drážkovaného kotouče vyšší a to bez ohledu na rychlost posuvu, s tím souvisí i to, že povrch měl méně stop po opálení i méně škrábanců, jak lze vidět na obrázku 3, levá část (c) značí plochu broušenou drážkovaným kotoučem a pravá část (d) značí plochu broušenou běžným kotoučem [12].



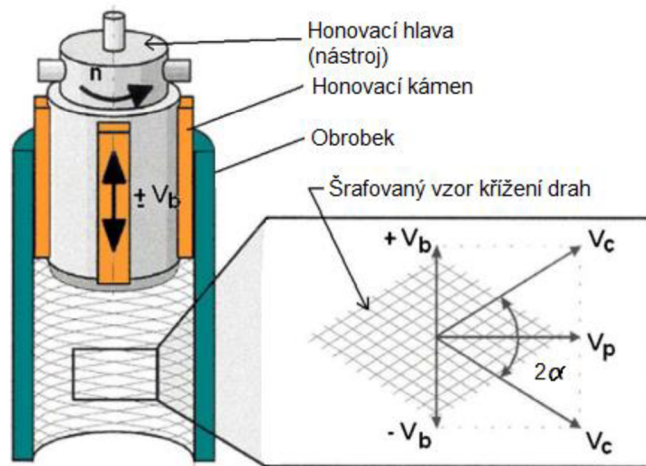
Obrázek 3 – Výsledné plochy broušení (R. Vignesh)

### 3.1.2 Honování

V podstatě se jedná o metodu broušení v malých rychlostech. Honování je metoda, používaná převážně pro dokončování vnitřních rotačních ploch, ale lze honovat i vnější rotační plochy. Mimo snížení drsnosti se honování používá k odstranění soudkovitosti, válcovitosti, kuželovitosti a osové nepřesnosti. Typickým příkladem pro vnitřní honování jsou plochy válců motorových vozidel, pneumatické a hydraulické brzdové válce, ložiska vřeten apod. Lze honovat průchozí i neprůchozí díry.

#### Technologická charakteristika

Obrázek 4 zobrazuje honovací nástroj. Během tohoto procesu nástroj vykonává rotační a lineární vratný pohyb. Cílem je vytvořit šrafovaný vzor potřebný k souměrnému zlepšení kvality povrchu. Lineární vratný pohyb dosahuje rychlosti  $4\text{--}20\text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$  a obvodové rychlosti  $20\text{--}80\text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ . Úhel křížení  $2\alpha$  se volí  $1,5\text{--}4^\circ$ . Brusné kameny jsou upevněny v honovací hlavě a pomocí mechanicky nebo hydraulicky vyvolaného tlaku o velikosti  $0,2\text{--}1,5\text{ MPa}$  dochází k úběru. Výše uvedené podmínky procesu honování, dále velikost brusných částic a typ řezné kapaliny se volí podle konečných požadavků a typu dokončovaného materiálu [1, 2, 23].



Obrázek 4 – Schéma honovací hlavy (M. E. Mansori)

$n$  – otáčky,  $v_b$  – rychlost lineárního vratného pohybu,  $v_c$  – řezná rychlost,  $v_p$  – obvodová rychlost,  $2\alpha$  – úhel křížení

### Druhy honování

Požadavek na finální povrch nám určuje počet honovacích fází. Dle tohoto hlediska rozdělit honování na jednofázové a vícefázové. Během jednofázového honování se používá jeden nástroj pro hrubovací i dokončovací honování a pro dokončení se sníží přítlak nebo zmenší úhel  $2\alpha$ . Naopak při vícefázovém honování se mění nástroje s postupně snižující se zrnitostí. mění nástroje. Hrubovacím honováním se provádí úběr o  $0,006\text{--}0,06\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ , dosahuje se přesnosti IT 5–6 a drsnosti  $R_a = 0,2\text{--}0,5\text{ }\mu\text{m}$ . Dokončovacím honováním se dosahuje přesnosti IT 4–5, úběru  $0,001\text{--}0,002\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$  a drsnosti  $R_a = 0,1\text{--}0,2\text{ }\mu\text{m}$ . Velmi jemným honováním docílujeme přesnosti až IT 3–4 a drsnosti  $R_a = 0,025\text{--}0,1\text{ }\mu\text{m}$  [2].

Dalším možné dělení je na honování s konstantními rychlostmi nebo s proměnnými tzn. variabilní kinematikou viz kapitola 3.1.2.1 [25].

### Materiál nástrojů

Kameny na dokončovací honování mají zrnitost 280–500, na hrubovací honování jsou to kameny o zrnitosti 80–160. Pro dosažení vyšších požadavků na přesnost a drsnost se jako materiál kamenů používá kubický nitrid bóru a syntetický diamant. Pojivo pro tyto materiály je většinou kovové, u kamenů s nižší tvrdostí je pojivo keramické a na dokončovací honování se používá pryskyřičná vazba [2].

### Řezné kapaliny

Řezná kapalina je během honování nutná kvůli chlazení, snížení řezných sil, očištění a od třísky a obroušených částic kotouče. Při důrazu na větší úběr se používají kapaliny s nižší viskozitou, při požadavcích na přesnost jsou vhodné kapaliny s vyšší viskozitou.

Dle honovaného materiálu se volí následující poměry:

- litiny, kalené oceli – kombinace petroleje a 10–20 % strojního oleje,
- měkké oceli – kombinace petroleje a 2–25 % olejové kyseliny,
- hliníkové slitiny – organické oleje.

[3]

### 3.1.2.1 Variabilní honování

Nové studie (2021) prokázaly, že použití variabilní kinematiky má pozitivní dopad na účinnost a přesnost procesu honování. Dále variabilní kinematika umožňuje dosáhnout lepší kvality povrchu, nižší teploty honovaných obrobků a tím i menší odchylky. Variabilní posuv honovací hlavy minimalizuje odchylky v dokončovaných otvorech přibližně o 12,77 % (ve srovnání s tradičním honováním). Tepelné ovlivnění bylo zkoumáno na obrobku o průměru 100 mm a vyšlo najevo, že při proměnné rychlosti otáčení honovací hlavy v rozsahu 20–80 min<sup>-1</sup> docházelo k nejmenšímu tepelnému ovlivnění. Změna rychlosti otáčení honovací hlavy v rozsahu 100 až 200 min<sup>-1</sup> měla za následek zvýšení teploty povrchu honovacího kamene o téměř 23 °C/min což sebou nese rychlejší opotřebení honovacích kamenů.

Honování s proměnnými kinematickými parametry může být prvkem ovlivňujícím další vývoj CNC obráběcích strojů používaných k honování. Jednou z možností implementace v průmyslu je přidat k tradičnímu řízení CNC obráběcích strojů možnost generování dráhy úběru podle konkrétního matematického vzorce, jejíž podoba by byla výsledkem rozboru obráběcího systému, tloušťka stěny, způsob montáže honovaných obrobků [25].

### 3.1.3 Superfinašování

Superfinašování je metoda, jejichž účelem je snížení drsnosti a dosažení lesklého vzhledu, ale nelze touto metodou výrazněji ovlivnit geometrický tvar. Jedná se o metodu, kterou je možné používat na vnitřní, vnější rotační i rovinné plochy. Konkrétně se používá na dokončování hřídelí, pístních čepů, klikových hřídelí, dříků ventilů, oběžných drah kroužků ložisek. Možno superfinašovat kalené i nekalené oceli, litinu, slitiny těžkých kovů i plasty. Výhodou superfinašování je, že lze jím zrychlit výrobní proces.

Příkladem úspory času je například adaptace superfinašovací jednotky do obráběcího centra, tím splnit požadavky na obrobek během jednoho upnutí místo obrábění a následným

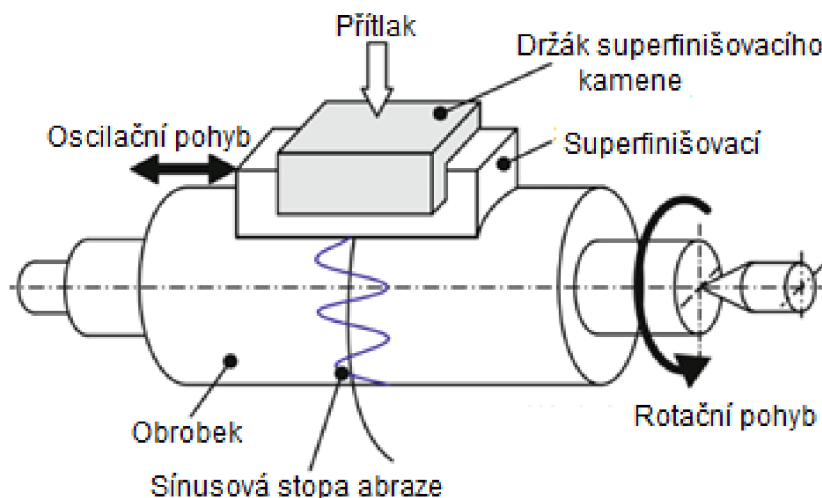
broušení na separátním stroji. Superfinašovací jednotka vyvozuje potřebný pŕitlak a lze ji rychle seřizovat. Východou této jednotky je i úspora energie. Naopak nutností je sladění časů obrábění a superfinašování [4].

### Technologická charakteristika

Podobně jako při honování k úběru materiálu dochází postupným odřezáváním vrcholků nerovností účinkem superfinašovacích (brusných) kamenů, které jsou k dokončované ploše pŕitlačovány hydraulicky nebo mechanicky a to o tlaku 0,1–0,4 MPa. Počet kamenů je 1 až 4. Jak je vyobrazeno na obrázku 5, řezný pohyb vzniká superpozicí pohybů obrobku a nástroje. Brusný kámen (nástroj) koná současně kmitavý pohyb o frekvenci 5–60 HZ s amplitudou 2–6 mm a pŕimočarý vratný pohyb o rychlosti 6–18 m.min<sup>-1</sup>, obrobek pak koná rotační pohyb o obvodové rychlosti 10–80 m.min<sup>-1</sup>.

Superfinašování se provádí ve dvou fázích. Hrubovací a leštící, během hrubovací se obvodová rychlost obrobku rovná rychlosti nástroje, stopy dráh brusného kamene se s těmi pŕedešlými mĕjí pod úhlem  $2\alpha = 90^\circ$ , v této fázích vzniká krátká tříška a dochází k největšímu úběru. Následuje fáze leštění, kdy se řezivost snižuje, protože nedochází ke styku povrchu kamene s plochou obrobku. Dojde ke snížení pŕitlačného tlaku, ke změně rychlostí ( $v_o > v_k$ ) a úhlu kŕížení  $\alpha < 40^\circ$  (obvykle  $\alpha = 20^\circ$ ). Důsledkem toho na ploše obrobku dochází pouze k mikrodeformacím a tím se docílí zahlazeného lesklého povrchu.

Velikost pŕídavku na superfinašování závisí na pŕedešlé operaci a na požadované kvalitě povrchu, obvykle činí 2–12  $\mu\text{m}$ , pŕičemž možno dosáhnout drsnosti  $R_a = 0,05\text{--}0,1\mu\text{m}$  [1, 2].



Obrázek 5 – Schéma řezných pohybů superfinašování (H. Yamaguchi)

### Materiál nástrojů

Zrnatost nástroje je obvykle 180–600. Tvrdost nástroje se volí podle počáteční a kýžené drsnosti a především dle tvrdosti dokončovaného materiálu. Umělý korund s pryskyřičným nebo keramickým pojivem se používá jako brusivo pro superfinašování nízkopevnostní oceli, litiny, nerezové oceli, slitin a neželezných kovů. Pro superfinašování vysocelegovaných ocelí se jako abrazivní materiál používá kubický nitrid boru v kombinaci s keramickým pojivem. Pro broušení extrémně tvrdých materiálů (slinuté karbidy) se jako brusivo používá diamant se syntetickým pojivem [1, 2, 3].

### Řezné kapaliny

Řezné kapaliny mají v této dokončovací metodě primárně vyplachovací účel.

Při hrubovací fázi se používá petrolej nebo 10–15 % směs minerálního oleje s petrolejem nebo směs oleje s aditivou. Ve fázi leštění, pro superfinašování měkkých materiálu nebo při větších úběrech se používají kapaliny o vyšší viskozitě, například olej [2].

#### **3.1.3.1 Vodní řezné kapaliny**

Řezné kapaliny na bázi oleje mají dopad na životní prostředí, proto někteří výrobci tyto řezné kapaliny nahrazují mléčnými kapalinami na bázi vody.

Studie provedena japonskou univerzitou v Ósace, kdy se porovnávaly řezné kapaliny na bázi oleje (SG-103 M, Daido Chemical Industry Co., atd) a na bázi vody (SG-103 M, Daido Chemical Industry Co., atd) během procesu superfinašování kalené oceli a zjištěné výsledky posloužily k vývoji nové řezné kapaliny.

Kapaliny na bázi vody byly zředěny na 10 hm% vodou z vodovodu, což je běžně používaná koncentrace v procesech mletí.

Při vyhodnocování stavu zatížení byly superfinašovací kameny podrobeny zkouškám odlupování. Výsledkem bylo, že kameny, u kterých byla použita kapalina na bázi oleje došlo k rovnoměrnému odlupování třísky, tuto skutečnost zobrazuje obrázek 6, zatímco obrázek 7 vyobrazuje povrch kamene po použití kapaliny na bázi vody. Tříška se na některých místech neodloupala a na povrchu zůstaly hrudky nahromaděné třísky, což má za následek nerovnoměrné zatížení a špatný odvod třísky.



Obrázek 7 – Povrch při použití kapaliny na bázi oleje (T. Enomoto)



Obrázek 6 – Povrch při použití kapaliny na bázi vody (T. Enomoto)

Z výsledků vyplívá, že kapaliny na vodní bázi mají velmi špatnou smáčivost, což vede ke zmíněným negativním jevům a ke skutečnosti, že nedochází k žádné změně drsnosti. Dosahovaný úběr a drsnost při použití jednotlivých brusných kapalin zobrazuje tabulka 3. Pro zvýšení smáčivosti se do kapaliny na bázi vody přidávají povrchově aktivní látky (tj. hydrofilní a hydrofobní látky s dlouhým uhlovodíkovým řetězcem<sup>1</sup>). Zároveň by obsah povrchově aktivních látek neměl překročit 10 hm% kvůli nežádoucím reakcím s povrchem strojů i lidskou pokožkou, avšak s vyšším hmotnostním procentem roste i kvalita povrchu.

V uvedené studii zvýšení obsahu povrchově aktivních látek bylo dosaženo metodou, kdy se do kapaliny na bázi vody vstříkávaly bubliny o průměru větším než 1  $\mu\text{m}$ . Z experimentu vyšlo najevo, že velikost ani hustota bublin se po dobu jednoho měsíce nezměnily. Zároveň po zavedení bublin zůstala stejná úroveň sedimentace i tekutost jako u olejnatých kapalin. Neměnné po vstříku bublin zůstaly také vlastnosti (mazivost) a vzhled kapaliny. Naopak došlo k požadovanému zlepšení v oblasti úběru materiálu i výsledné drsnosti.

Tabulka 3 – Porovnání výsledků za použití daných kapalin

Brusná kapalina	Úběr [ $\mu\text{m}$ ]	Drsnost Ra [ $\mu\text{m}$ ]
Kapalina s olejovou bází	2,9 až 3,2	0,045 až 0,055
Kapalina na vodní bázi	> 0,1	0,045 až 0,055 Ra
Kapalina na vodní bázi s bublinou	3,1 až 3,3	0,038 až 0,044 Ra

Zdroj: New water-based fluids as alternatives to oil-based fluids in superfinishing processes. In: <https://www.sciencedirect.com/> [online]. [cit. 2023-02-25]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2020.04.106>

Aby bylo možné nahradit brusné kapaliny na bázi oleje, které se běžně používají v procesech superfinišování, mlecími kapalinami na bázi vody, je třeba zlepšit jejich výsledné vlastnosti. To lze zvýšením obsahu povrchově aktivních látek. Zvýšení je možné dosáhnout například vstříkáváním bublin [13].

<sup>1</sup> Hydrofilní látky pozitivně reagují s vodou, absorbují nebo se rozpouští ve vodě. Opakem jsou hydrofobní látky, ty vodu odpuzují či se v ní nedokáží rozpustit, příkladem hydrofobní látky je tuk.

### 3.1.4 Lapování

Je metoda, kterou je možné zlepšit rozměrovou přesnost (0,1–0,5 mm) a drsnost až na  $R_a = 0,01–0,15 \mu\text{m}$ . V praxi se lapují především vnější plochy, ale tato metoda je použitelná jak pro vnitřní rotační tak i rovinné a tvarové plochy. Konkrétně se tato využívá k dokončování závitů, funkčních ploch měřidel, ozubení apod. Tato metoda se může využívat k dokončování měkkých i tvrdých materiálů a provádí se v kusové (díleňské) i sériové výrobě. Nevýhodou, této dokončovací metody je složitost a nízká efektivita proto, pokud je to technologicky možné se lapování nahrazuje superfinišováním nebo honováním. Podmínkou nahrazení je také požadovaná drsnost a geometrická přesnost.

Základní faktory ovlivňující proces lapování jsou rychlost pracovního pohybu, přítlak, doba lapování a zrnitost brusiva.

#### Technologická specifikace

Nástrojem jsou lapovací kotouče mezi, které je umístěn obrobek. Přičemž oba tyto kotouče se otáčí. Mezi nástroj a obrobek je přiváděna brusná pasta, která je unášena po povrchu obrobku, tím je dosaženo úběru. Aby bylo dosaženo plynulejšího úběru kotouče jsou k sobě přitlačovány. Při velmi jemném lapování přispívají k vylepšení povrchu i plastické deformace vrcholků nerovností.

Přítlační tlak se volí podle materiálu a fáze lapování, při hrubovací fázi je tlak 0,1–0,2 MPa, při dokončování měkkých materiálů se pohybuje mezi 0,05–0,1 MPa a pro lapování křehkých materiálů pouze 0,05–0,02 MPa.

#### Lapovací nástroje – tvar, materiál

Vlastnosti lapovacích nástrojů jsou dány druhem lapování. Tvar nástroje může být deskovitý pro rovinné lapování, lapovací trn pro díry nebo tvar prstence pro vnější rotační plochy. Materiálem kotouče pro strojní lapování je litina, pro jemné lapování kalená nebo chromovaná ocel. Vazba je obvykle keramická.

#### Brusivo

Druh materiálu brusiva určuje lapovaný povrch. Vhodná zrnitost je 1–40  $\mu\text{m}$ . Pro ocel se používá brusivo z umělého korundu. Na dokončování křehkých materiálů se používá brusivo z křemíku. Pro dokončování tvrdých materiálů se volí tvrdší brusiva, například prášky z karbidu boru, diamantu nebo kubického nitridu boru u měkkých materiálů jsou to brusiva z oxidu chromitého a železitého anebo hydroxidu železitého. Důležitým aspektem brusiva je jeho tvar.

K šíření volného brusiva se ve většině případů využívá petrolej s olejovým přídavkem nebo s přídavkem kyseliny olejové. Během jemného lapování se k šíření používá benzín či nafta. Při požadavku lesku se používá líh s vídeňským vápnem.

#### Lapovací pasty

Účelem lapovacích past je přivedení brusiva do místa úběru, v některých případech i narušení mikroskopické vrstvy s účelem zajištění snadnějšího úběru. K narušení povrchu se do past přidává kyselina sterinová nebo olejová, v opačném případě se do pasty přidává tuk, olej nebo petrolej [1, 2].

### **3.1.5 Leštění**

Jako leštění se označují dokončovací operace jejichž hlavním účelem je vylepšení vzhledu. Leštěné povrchy mají menší nároky na přesnost a úběr je minimální. Zpravidla dochází k odstranění mikronerovností a nečistot po předešlém zpracování.

#### Technologická specifikace

Mechanické leštění lze provádět strojně nebo manuálně. Strojní leštění má široké využití pro kovové části interiéru (nábytek, lišty, zábradlí) i exteriéru. Manuální leštění má uplatnění například při renovacích.

Leštění se obvykle provádí ve třech fázích:

1. hrubování kotouči s pevně vázaným abrazivem,
2. jemné leštění volným abrazivem unášeným v kapalině,
3. dolešťování pomocí textilního kotouče nebo pásu.

Hrubovací fáze se provádí kotouči s ocelovými dráty. Při požadavku na jemnější reliéf se používají dráty z mosazi nebo bronzu.

#### Nástroje mechanického leštění

Nástroj se volí v závislosti s tvarem dokončovaného povrchu. Dva základní druhy jsou kotouče a pásy.

Kotouče jsou složeny z lamel buď orientovanými radiálně pro případ, kdy leští pouze obvod kotouče nebo s šikmo lepenými lamelami, kdy lešticí účinek probíhá obvodem i bokem. Materiál tvoří vrstvené textilie, vlákna z umělých hmot či žíní, případně z jejich kombinací. Speciální tuhé kotouče mají zevnějšek pokrytý plstí a tuhé dřevěné, gumové nebo kovové jádro.



V případě použití pásu jsou pásy spojeny za sebou, tudíž tvoří tzv. nekonečný pás, který je přitlačovat tvarovou opěrkou. Možné je také použití bez opěrky. Větší pružnost a řezivost umožňuje větší přitlačné síly i vyšší obvodovou rychlost.

Zrnitost je opět závislá na požadavcích leštěného povrchu, obvykle se pohybuje mezi 80–600 [1].

### **3.1.6 Tryskání**

Jedná se o metodu, kdy je úběr dosažen pomocí tryskání volných abrazivních částic pomocí proudu stlačeného vzduchu nebo kapaliny. Tato metoda zlepšuje drsnost povrchu, je možné dosahovat drsnosti  $R_a = 0,1\text{--}0,8 \mu\text{m}$ , dále slouží k úpravě vzhledu a k vytvrzení povrchu. Naopak tryskáním nelze zlepšit geometrickou přesnost. Častým využitím této metod je odstranění otřepu. Metodu je možné použít pro vnější i vnitřní plochy, avšak u vnitřních ploch je omezení ve velikosti tryskané součásti. Možným řešením tohoto problému je vývoj speciálních trysek viz kapitola 3.1.6.1. Další nevýhodou je prašnost, na to reaguje metoda tryskání zvlhčeným abrazivem.

Množství odebraného materiálu závisí na době působení (tzn. rychlost vzájemného pohybu trysky vůči dokončované ploše), počtu průchodů trysky, úhlu dopadu abraziva (volí se  $10\text{--}45^\circ$ ), velikosti unášejícího tlaku a druhu brusiva. Tlak se volí 0,1–10 MPa.

#### **Brusivo**

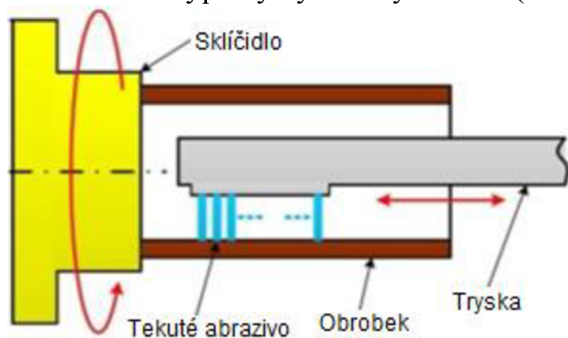
Kovové částice (např. ocelová drť, litinová zrna) se používají jako brusivo pro dosažení lepší drsnosti. Naopak na hrubší operace jako je čištění je používán křemičitý písek. Ohledně tryskání křemičitého písku jsou kvůli prašnosti přísné normy, avšak v průmyslu jsou dostupné takové písky, které těmto normám vyhovují. Zrnitost brusiva je 80–600 [1].

#### **3.1.6.1 Tryskání kapalinou (FJP), vývoj trysek**

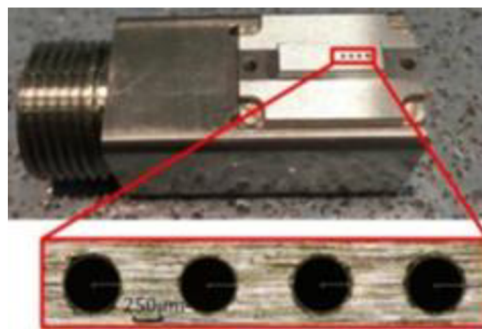
Tryskání kapalinou (Fluid Jet Polishing, FJP) je přesná metoda, kdy dochází k tryskání abrazivních částí unášených vodním proudem přímo do cílového místa. Metoda se využívá k otryskávání dutin a vnitřních povrchů. Výhodou metody je vysoká přesnost, vhodnost pro tryskání složitých povrchů, nástroj nepodléhá opotřebení ani nezpůsobuje žádné tepelné ovlivnění. Nevýhodou je časová náročnost a s tím spojená nízká produktivita. To ovšem řeší vývoj speciálních trysek.

Obrázek 8 zobrazuje kinematiku během procesu FJP, kdy obrobek koná otáčivý pohyb, zatímco nástroj koná posuvný pohyb podél stěny vnitřního povrchu.

Nástrojem této metody je tryska s jedním nebo více otvory. Jedná se tedy o tyč jež má na boku daný počet otvorů. Nástroj musí mít přesnou geometrii a pokud má více otvorů tak počet, rozmístění a velikost otvoru musí být navržen tak, aby docházelo k rovnoměrnému otryskávání po celé ploše. Speciální konstrukce trysky se čtyřmi otvory je znázorněna na obrázku 9. K předpovězení úběru se a ke konstrukci trysek se používají softwary na modelové výpočty dynamiky tekutin (Ansys Fluent) [6].



Obrázek 8 – FJP kinematika (C.F. Cheun)



Obrázek 9 – Tryska se čtyřmi otvory (C.F. Cheun)

### 3.1.6.2 Tryskání zvlhčeným abrazivem

Jak již bylo zmíněno, nevýhodou tryskání suchým abrazivem (zejména křemičitým pískem) je vysoká prašnost. Řešením je tryskání zvlhčeným abrazivem, kdy se prašnost sníží až o 95 %.

Jedná se tedy o metodu, kdy je abrazivní směs zvlhčena v tlakové nádobě a následně unášena proudem vzduchu do potřebného místa. Vedle snížení prašnosti je výhodou také možnost řízení tlaku, což umožňuje oprýskávat tvrdší materiály. Tryskací tlak pro tvrdší materiály je 0,5–0,8 MPa a pro měkčí materiály jako je hliník se tlak sníží na 0,3MPa. Rychlost abraziva na konci trysky se pohybuje kolem 300 m.s<sup>-1</sup>. Další výhodou je mobilita, jelikož je potřeba jen zdroj stlačeného vzduchu a vody a díky použití hadic lze otryskat součásti, které se nenachází přímo u zdroje.

#### Tryskací směs

Tryskací směs tvoří křemičitý písek a voda v poměru 80 % písku ku 20 % vody, ale je možné tryskat strusku, skleněné perly či granuláty podmínkou je, aby částice byly těžší než voda. Do tryskací směsi je podle potřeby možné přidat protikorozní látky [8, 9].

### 3.1.7 Omílání

Metoda omílání je vysoce produktivní metoda pro dokončování většího počtu menších předmětů. Používá se k odstranění ostrých hran, otřepů, k vylepšení vzhledu i k očištění.

#### Princip

Podstavou metody je, že se do pracovního prostoru (bubnu) vloží větší počet obrobků a zasype se abrazivem. K úběru dochází, pomocí pohybu bubnu. Ve většině případů buben koná oscilační pohyb, ale může se jednat i o pohyb rotační (odstředivé omílání). Omílání může probíhat zcela za sucha nebo s přidáním kapaliny. Ve variantě s kapalinou jsou dodávána protikorozní a urychlující aditiva. Doba omílání se pohybuje zpravidla od 1 do 4 hodin.

Proces omílání může být prováděn souvisle nebo přerušovaně. Při přerušovaném procesu se postupně mění částice se zvyšující se zrnitostí. Jedná se o fáze čištění, obrušování (zrnitost 60–120.), leštění (240–500) a doleštění. V poslední fázi se jako brusivo používají pomocné částice (dřevěné piliny, korková drť, plastové kuličky apod), které na sobě mají jemné brusivo, například oxidy kovů nebo vápno [1].

Vývoj nových omílacích tělísek umožňuje spojení fází a tím urychlení procesu. Například brusná tělíška s plastovým pojivem (od firmy Rösler) disponují zároveň keramickými a elastickými vlastnostmi. Což umožňuje použití ve fázi broušení a díky elastickým vlastnostem se proces urychlí. Výhodou elastických částic je i zamezení ulamování i u křehkých obrobků z barevných kovů [7].

#### Pracovní prostor – buben

Velikost omílacího bubnu je závislá na velikosti součástí, avšak pohybuje se od 1 do 10 m. Tvar pracovního bubnu může být kruhový, šesti nebo osmihranný. Buben může mít přihrádky, závěsy nebo jiné přípravky pro umístění obrobků [1].

### 3.1.8 Odjehlování

Odjehlování (též odjehličkování) je metoda sloužící k odstranění ostrých hran a přebytku materiálu po obrábění. Metoda se v minulosti prováděla jako dodatečný krok prováděn lidmi. Firma Balák vyvinula pracoviště, které sloužilo pouze k manipulaci na robotické pracoviště, které během manipulace provede optické měření a odjehlování. Čímž se dosáhne zjednodušení a zrychlení procesu.

Pracoviště se skládá ze dvou robotů, na které byly přidány silové snímače potřebné k regulaci tlaku během odjehlení. První robot převezme obrobek ze zásobníku a pomocí dvou vřeten provede odjehlení na jedné straně a předá obrobek druhému robotu, který odjehlí zbývající stranu, následně ho ofukováním zbaví špon a předá do dalšího procesu [21].

## 3.2 Metody bez úběru materiálu

Při metodách bez úběru materiálu dochází k úpravě povrchu prostřednictvím řízené plastické deformace. Plastická deformace probíhá v řádech setin až desetin milimetrů a dochází k ní pokud je překročena mez kluzu daného materiálu. Principem tedy není odřezávání nerovností nýbrž jejich zatlačení do povrchu (zhuštění). Z toho plyne výhoda oproti metodám s úběrem materiálu, že nevzniká žádná tříska. Plastickou deformaci je možné vyvolat za studena nebo za tepla, při dokončovacích operacích se ve většině případů docílí plastické deformace za studena, což přináší výhodu mechanického zpevnění. Mezi metody bez úběru materiálu s plastickou deformací patří:

- vyhlazování,
- válečkování,
- kalibrování,
- otryskávání.

[1]

### 3.2.1 Vyhlazování

Jedná se o metodu, kdy dochází k úpravě povrchu pomocí pevného členu (nástroje), který je přitlačován na povrch obrobku. Nástroj může mít různé kuželovité tvary se zaobleným pracovním hrotem, jeho materiál se volí především podle materiálu vyhlazované plochy. Používaným materiálem tělísek je: kalená ocel, slinutý karbid, spékaný korund, kubický nitrid boru, syntetický nebo přírodní diamant. Při dokončování vzniká nežádoucí teplo proto je důraz na použití řezných kapaliny.

Vedle, již zmíněného tvaru nástroje a materiálu nástroje dosahované výsledky závisí na velikosti přitlačné síly, počtu přejezdů a rychlosti posuvu [1].

### 3.2.2 Válečkování

Principem úpravy povrchu je odvalování valivých tělísek po dokončované ploše za působení přitlačné síly. Válečkování, je možné uplatit při dokončování rovinných i rotačních vnějších a zejména vnitřních plochách. Přitlačnými tělisky mohou být kuličky, soudečky nebo válečky, vzhledem k ploše valení a dosahované drsnosti jsou nejvhodnější válečky. Přitlačná síla může působit staticky tak i dynamicky. Podle potřeby jsou dostupné různé typy nástrojů (nástrojových hlav), hlava s jedním válečkem, planetová otočná hlava s více válečky nebo kombinovaná vyvrtávací hlava s válečky.

Vedle zlepšení drsnosti se metoda využívá ke zvýšení odolnosti proti korozi, zlepšení mechanických vlastností proti dynamickému namáhání a dosažení lesklého vzhledu. Dále se jím odstraňují škrábance a vnitřní napětí po předchozím obrábění. Na zpevnění do větší hloubky se používají menší průměry tělísek, naopak větší průměry se používají k dosažení nižší drsnosti.

#### Statická přitlačná síla

Síla působí konstantně, obvykle o velikosti 500–5000 N. Na válečkované ploše vzniká valivé tření, proto je nutné používat vřetenové oleje či olejové emulze. Podmínkou statického válečkování je tažnost alespoň 8 % a pevnost v tahu  $R_m < 1250$  MPa. Dosahovaná přesnost je IT 6–8 a drsnost  $R_a = 0,05–0,40$   $\mu\text{m}$  [2].

#### Dynamická přitlačná síla

Přitlačná síla působí v impulzech. Nástrojem je rotující trn nebo hlava, která vytváří mechanicky nebo magneticky silové impulzy potřebné k dokončování.

Dynamická síla může být tvořena i tvarovými výstupky (vačky) na opěrní ploše. Dynamickým válečkováním se dosahuje drsnosti  $R_a = 0,2–0,8$   $\mu\text{m}$  [1, 3].

#### Výhody a nevýhody

Výhodou popisované metody je nenáročnost na pracovní stroj, jelikož válečkování je možné provádět na strojích (centrech), na kterých se provádí předešlé operace pouze s rozdílnou hlavou, s tím souvisí i snížení času manipulace i samotné operace. Například firma Yamatoroll udává dobu operace na obrobku o průměru 30 mm a délce 100 mm, 10–15 s [14].

### **3.2.2.1 Optimalizace statického vnitřního válečkováním**

Publikace vydaná v roce 2018 vietnamskou univerzitou je zaměřena na optimalizaci válečkování vnitřních rotačních ploch na CNC stroji. Expertíza byla provedena pro průmyslově používanou ocel s obsahem uhlíku 0,43–0,50 %.

Článek zkoumá nelineární závislost mezi požadavky na drsnosti povrchu, tvrdost povrchu a hloubku tvrdosti metodou, kdy je zkoumán povrch v závislosti na parametrech válečkování, tzn. na rychlosti otáčení vřetena, rychlosti posuvu a hloubce válečkování.

Pro generování souboru proveditelných a kvalitativně přípustných řešení byl použit evolventní mechanismus, z kterého vyšlo najevo, že je možné vytvořit kvalitativně vyhovující kompromis mezi těmito třemi požadovanými parametry. Následně byly použité matematické

a statistické metody a analýzy (ANOVA, Paretovy diagramy, pravděpodobnostní modely) na výpočet optimálních podmínek a provázanosti mezi jednotlivými požadavky a parametry válečkování.

### Výsledky studie

Po sestavení regresivních rovnic bylo vypočteno, že nejnižší dosažitelná drsnost je  $R_a = 0,071 \mu\text{m}$  a lze ji dosáhnout při otáčkách vřetena 1364 ot/min, rychlosti posuvu 247 mm/min při hloubce válečkování 0,065 mm.

Dále z naměřených a vypočtených hodnot vyplývá, že hodnoty drsnosti povrchu klesají se zvyšujícími se otáčkami vřetena nebo zvýšením hloubky válečkování až do výše zmíněných optimálních hodnot. Překročením těchto hodnot dochází k chvění a následnému odlupování povrchu materiálu, což vede ke zvýšení drsnosti.

Tvrdoost povrchu a její hloubka se zvyšuje s rostoucí rychlostí posuvu a hloubkou válečkování. Nejvýraznější zlepšení povrchové tvrdosti a její hloubky je při nejvyšších otáčkách vřetena.

Přínosem publikace je nalezení optimálních parametrů, což je důležité pro operátory výroby v dané oblasti. Další zdokonalení metody válečkování se dá očekávat v rychlosti metody a energetické účinnosti [15].

### **3.2.3 Kalibrování**

Kalibrování, též označováno jako protlačování je metoda sloužící na dokončování vnitřních rotačních ploch. Plastickou deformaci tvoří kalibrovací trn, který koná přímočarý pohyb. Tvar nástroje může být kulička nebo speciální oválný trn. Proces může být jednostupňový nebo vícestupňový, kdy se postupně zvětšuje průměr nástroje. Rychlost posuvu se pohybuje od 8–80 m.min<sup>-1</sup>.

Kalibrováním se snižuje drsnost povrchu na  $R_a = 0,4\text{--}0,005 \mu\text{m}$  a zlepšuje přesnost IT 6–4. Dosahované parametry závisí na předešlém stavu, tvaru nástroje, mazání, rychlosti nástroje a tuhosti stroje u kalibrovacích strojů je důraz na přesnost montáže, aby nedocházelo k nežádoucímu chvění. [1].

### **3.2.4 Otryskávání**

Metoda otryskávání spočívá v tryskání pevných částic, avšak u tryskání popsané v kapitole 3.1.6 dochází k úběru materiálu (např. využívá se k odstranění otřepu), v této metodě dochází k úpravě povrchu primárně plastickou deformací. Úhel sklonu trysky vůči

otryskávané ploše je větší než u tryskání s úběrem materiálu, obvykle činí 50–80°. Dalším rozdílem je, že pevné částice nemají ostré hrany.

Tlak unášející pevné částice se volí 0,1–20 MPa, jeho velikost se volí v souvislosti s mezerou mezi tryskou a otryskávaným povrchem a typem částic. Částice mohou být ocelové nebo skleněné kuličky (balotina) případně broky z bílé litiny. Podle částic jsou tyto metody označovány jako kuličkování, balotinování a brokování. Metoda může probíhat za sucha, kdy pevné částice unáší vzduch nebo za mokra, kdy jsou částice unášeny proudem vody. Těmito procesy dosahujeme drsnosti  $R_a = 0,8\text{--}1,6 \mu\text{m}$  [1, 3].



### 3.3 Nekonvenční metody dokončování

Nekonvenční metody obrábění a dokončování (dále NMO, NMD) jsou vzájemně provázané. Některými NMO lze dosáhnout finálních vlastností naproti tomu jsou NMD, které následují po konvenčním obrábění.

Nekonvenční metoda je souhrnné označení pro metodu, kdy k nedochází převážně mechanickému úběru materiálu obrobku pomocí nástroje. K úběru dochází vlivem působení chemických a fyzikálních jevů nebo jejich kombinacemi, některé metody kombinují tyto jevy s mechanickým úběrem.

Důvody použití, i samotného vývoje nekonvenčních metod, jsou rostoucí požadavky na geometrickou i tvarovou přesnost, drsnost povrchu, miniaturní rozměry a na (mechanické) vlastnosti, čímž se materiály stávají těžko opracovatelnými běžnými metodami.

Některé NMO poskytují větší potenciál na zautomatizování výroby, avšak u některých metod je to opakem vzhledem k jejich složitosti. Další nevýhodou jsou vysoké náklady na stroje, přípravu a elektrické energie.

Jak již bylo částečně zmíněno je složité metody kategorizovat, jelikož se vzájemně kombinují. V zásadě by se dle energie vynaložené pro úběr dali rozdělit na:

- elektrické,
- magnetické,
- chemické,
- tepelné.

[3, 24]

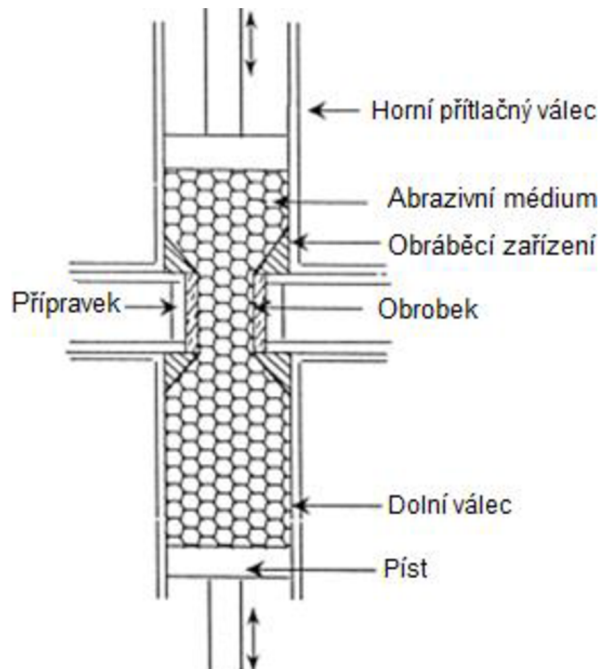
#### 3.3.1 Abrazivní průtokové obrábění

Abrazivní průtokové obrábění (AFM, Abrasive Flow Machining) je dokončovací metoda, při které dochází k úběru pomocí tlakového toku abrazivního média. Výslednou kvalitu povrchu ovlivňuje počet cyklů, vytlačovací tlak, koncentrace abraziva, viskozita a velikost zrna.

Průtok abrazivního média může být prováděn třemi možnostmi:

- jednosměrně,
- dvousměrně,
- orbitálně (oscilačně).

Při jednosměrném průtoku je proces poháněn pístovým čerpadlem. Díky pohybu dochází působení media na dokončovaný povrch. Dvousměrný proces je zobrazen na obrázku 10, je zpravidla nejpoužívanější. Provádí se pomocí dvou hydraulických válců, kdy abrazivní médium je vytlačováno nahoru a dolů [19].



Obrázek 10 – Dvousměrné abrazivní průtokové dokončování (R.K. Jain)

### Využití, výhody a nevýhody

Metodu lze uplatnit k dokončování vnitřních i vnějších povrchů u součástí se složitou geometrií. Používá se k odstranění otřepu a snížení drsnosti. Nachází uplatnění v automobilovém, medicínském (dokončování implantátů) a leteckém průmyslu.

Limity jsou v podobě vysokých nároků na energie, složitosti, nerovnoměrné drsnosti a rychlosti úběru [19].

Vzhledem ke zmíněným omezením má metoda několik inovací nebo různých provedení. Například zavedení otočného pohyblivého trnu (metoda AFMmm, abrasive flow machining with a movable mandrel) pro lepší regulaci tlaku media a rychlosti úběru což je vhodné u obrobků, kde je požadován větší úběr.

Další inovací je použití feromagnetického abraziva a elektromagnetů v místě dokončované plochy (metoda MAFM, magnetického abrazivního průtokového obrábění) [18].

### 3.3.2 Leštící metoda BEMRF

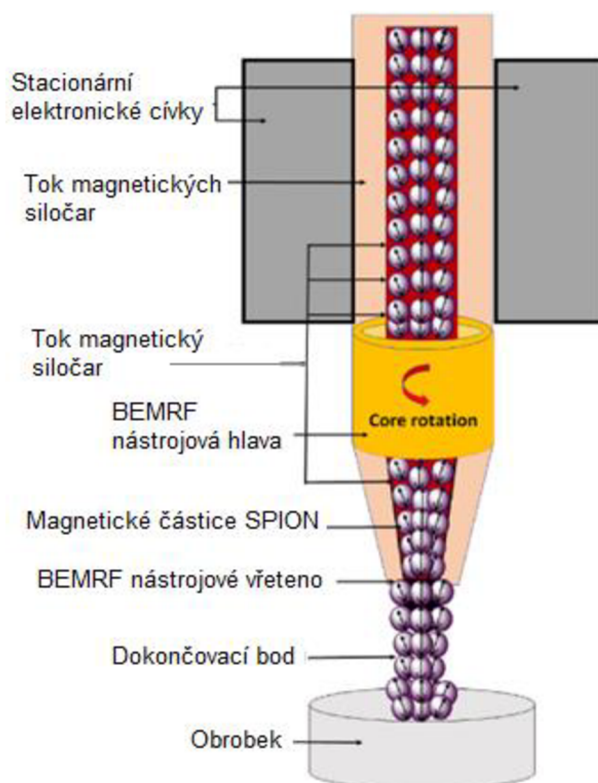
Metoda BEMRF (ball end magnetorheological finishing) je speciální metoda v oblasti nanodokončování. Metoda se využívá k dokončování diamagnetických a feromagnetických materiálů. Ty jsou potřebné v astronomickém a leteckém průmyslu, jako součástky navigací, vysokovýkonných laserů, laserových senzorů a v oblasti rentgenové optiky. Metoda se provádí pomocí 5osého magnetoreologického kulového nástroje, lze ji využít k leštění plochých i tvarových povrchů.

Povrchová úprava se provádí za působení normálové síly indukované magnetickým polem, kdy magnetické částice obklopují leštící částice a ty jsou vlivem působení magnetického pole přitlačovány k dokončované ploše, tím dochází k úběru vrcholků obrobku, toto schematicky zobrazuje obrázek 11. Jako materiál magnetických částic se používá oxid hlinitý, oxid zirkoničitý nebo oxid ceričitý. Brusné (leštící) částice jsou obvykle z karbonylu železitého. V metodě BEMRF se využívají nanoabraziva SPION (=superparamagnetické nanočástice oxidu železitého), což je nově vznikající materiál, který lze opakovaně zmagnetovat již při pokojové teplotě.

#### Výhody a nevýhody

Výhodou nového brusiva je, že brusivo SPION je možné využít opakovaně a lze jej recyklovat což u současných brusů provést jen těžko.

Naopak nevýhodou této metody je nízká účinnost. Jelikož, magnetické částice tvoří překážku pro leštící částice a tím nedochází k přímému kontaktu k dokončované ploše. Řešením by byl vývoj brusiva, které může být přímo v kontaktu s obrobkem. Tedy částice, které by byly magnetické zároveň plnily leštící účinek [5].



Obrázek 11 – Schéma toku částic SPION (M. Amir)

### 3.3.3 Magnetické leštění

Jedná se o metodu využívanou na dokončování vnitřních rotačních povrchů. Typickými příklady použití jsou sanitární potrubí, plynové láhve, olejové potrubí.

Výhodou oproti metodám s tokem abraziva (Abrazivní průtokové obrábění a jeho inovace) je, že při této metodě je vyloučen lokální pokles tlaku a zároveň je aplikovatelná i pro neferomagnetické materiály.

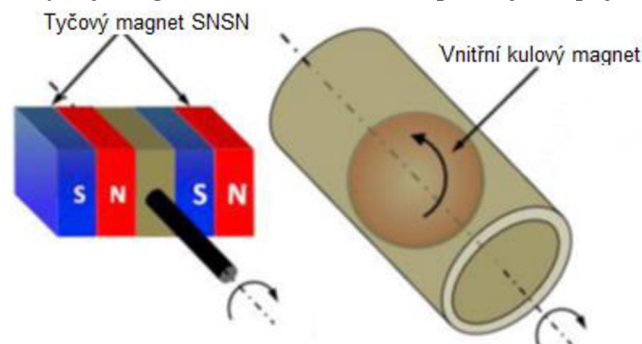
#### Princip

Princip je založen na vzájemném působení magnetů, zobrazuje ho obrázek 12. První (kulový) magnet je vložen do dutiny dokončované součásti a zatímco druhý magnet je umístěn rovnoběžně. Jedná se rotační tyčový magnet s konfigurací SNSN (tzn. dva magnety spojené k sobě opačnými póly). Tyčový magnet rotuje a tím pohání kulový magnet uvnitř součásti v opačném směru než působí magnetické síly a zároveň přitahuje kulový magnet uvnitř součásti, což způsobí normálovou sílu na vnitřní plochu válce. To znamená, že úběr materiálu tvoří normálové síly (tlak) v kombinaci s tangenciálním pohybem mezi kulovým a tyčovým magnetem.

Leštění může být prováděno s magnetickým abrazivem (dále MA), stejně tak bez něj. Z experimentální studie vyplývá, že leštěním bez MA je možné dosáhnout nejnižší drsnosti (až  $0,053 \mu\text{m}$ ) ale dochází k rychlému opotřebení kulového magnetu. Naopak přidáním MA se zvýší rychlost úběru a vytvoří se relativně dobrá povrchová úprava,  $R_a = 0,078 \mu\text{m}$ . Materiálem MA je suspenze SiC.

#### Omezení, očekávaný vývoj

Jedná se o novou metodu (publikace z r. 2022), která byla prováděna experimentálně (při zjednodušené kinematice) tzn., že vyvinutý nástroj nebyl aplikován na složitých výrobcích, avšak tento problém řeší použití šestiosých robotů. Další nevýhodou je nízká účinnost úběru, na což je zaměřen vývoj magnetického abraziva s pevnějším pojivem [20].



Obrázek 12 – Schéma principu magnetického leštění (J. Zhang)

### 3.3.4 Elektrochemické metody

Všechny elektrochemické metody kombinují elektrochemické procesy a mechanický úběr. Jejich společnou nevýhodou je použitelnost pouze u vodivé materiálů a vysoké náklady.

Princip mají všechny elektrochemické metody velmi podobný. Proces má vždy stejnosměrný napájecí zdroj, jenž má připojenou kladnou svorku k obrobku, ten tedy plní roli anody a zápornou k nástroji, který tak tvoří katodu. Během úběru nástroj zcela nedoléhá na dokončovanou plochu, tuto mezeru vyplňuje přiváděný elektrolyt. Úběr materiálu je tvořen z většiny elektrochemickými reakcemi a zbytek úběru probíhá mechanicky. Elektrochemické reakce probíhají vlivem působení elektrického proudu na elektrolyt. Mechanický úběr slouží k odstranění nežádoucí pasivační vrstvy, která brání průběhům reakcí.

#### 3.3.4.1 Elektrochemické broušení

Z konvenčních metod broušení lze brousit obtížně obrobitelné materiály pouze diamantovými nástroji, což sebou přináší nevýhodu v nákladné výrobě syntetického diamantu. Proto je možnou alternativou elektrochemické broušení, kterým lze dosáhnout i přesnějších rozměrů.

##### Popis metody

Brusný kotouč má nevodivé brusné částice s kovovým pojivem. Materiálem pojiva je obvykle měď, nikl, mosaz nebo pryskyřice s naimpregnovanou měděnou vrstvou, která zajišťuje vodivost. Brusivo je z oxidu hlinitého. Nevodivé částice lehce vyčnívají z kotouče, díky tomu udržují mezeru v řádech setin mm a zároveň izolují obrobek od kotouče, čímž zamezují vzniku nežádoucí pasivní vrstvy.

V mezní vrstvě probíhají tyto reakce: anodické rozpouštění, vývoj kyslíku na anodě a vodíku na katodě a oxidace-redukce. V elektrolytu probíhá srážení, chemické kombinace a komplexní formace. Elektrochemickým broušením lze dosáhnout drsnosti povrchu až  $Ra = 0,1\mu\text{m}$  [16, 17].

##### Využití

Touto metodou je možné dokončovat materiály se specifickými vlastnostmi jako jsou titanové slitiny, kovové kompozity, slitin odolné proti tečení (např. Inconel, Nimonic) i nástroje ze slinutého karbidu. Metoda vykazuje vysokou přesnost, díky níž nachází uplatnění v úpravách křehkých, tenkostěnných a tvarově složitých součástí.

Konkrétní využití je například: broušení podkožních jehel, reprofilace (tj. vložení opravných výztuží) opotřebených ozubených kol bez ovlivnění jejich tvrdosti, odstranění únavových trhlin z ocelových konstrukcí používaných pod mořskou hladinou a povrchová úprava lopatek turbín.

#### Výhody a nevýhody

Výhody této metody jsou: nedochází k tepelnému poškození obrobku, až 10krát nižší opotřebení brusného kotouče (jelikož dochází pouze k nepatrnému kontaktu mezi povrchy), nedochází ke strukturálním změnám což vylučuje vznik mikrotrhlin nebo jiných defektů.

Limity jsou: metoda je nevhodná pro měkké materiály, vyšší spotřeba energie, nebezpečí vzniku koroze na zařízení, které jsou v kontaktu s elektrolytem a vysoké investiční náklady díky speciálním brusným kotoučům [16].

#### **3.3.4.2 Elektrochemické honování**

Jedná se opět o metodu kombinující elektrochemické procesy s mechanickým úběrem. Metoda se uplatňuje zejména na dokončování vnitřních rotačních ploch, ale i na ozubená kola. Parametry ovlivňující výkon, účinnost a efektivnost procesu jsou: typ napájení (kontinuální nebo pulzní), aplikované napětí a proud, druh, složení, koncentrace, průtok, teplota a tlak elektrolytu, druh a velikost brusiva používaných v honovacím nástroji, tvrdost honovacího nástroje, honovací tlak, rychlost otáčení a/nebo vratného pohybu honovacího nástroje u dokončování vnitřních válcovitých povrchů či rychlost vratného pohybu během dokončování ozubených kol. Dále to jsou elektrochemické vlastnosti obrobku.

#### Využití

Obecné využití má tato metoda v automobilovém průmyslu, letectví, petrochemickém průmyslu, výrobě energie a fluidních energetických odvětví. Využívá se ke zlepšení drsnosti povrchu, lze dosáhnout drsnosti až  $R_a = 0,05 \mu\text{m}$ , zvýšení životnosti namáhaných součástí. Lze metodu uplatnit u tenkostěnných součástí. Elektrochemickým honováním lze dosáhnout tolerance až  $\pm 0,002 \text{ mm}$ .

Tato metoda se využívá u dokončování vnitřních válcovitých ploch jako jsou vnitřní válce, převodová kola, karbidová pouzdra, válce, tlakové nádoby. S použitím ozubeného nástroje ji lze využít i na ozubená kola.

### Dokončování vnitřních válcovitých ploch

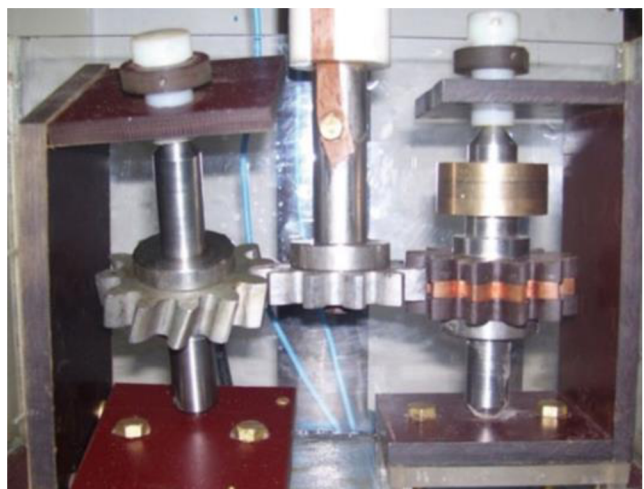
Stroj na dokončování se skládá z pěti hlavních částí: stejnosměrného napájení, nástroje, kinematického systému pohybu nástroje, systému na dodávku a čištění elektrolytu a z obráběcí komory pro držení a polohování obrobku. Napájecí zdroj má napětí 3–40 V a konstantní proud až 200 A. Nástroj pro dokončování válcových obrobků je zobrazen na obrázku 13, jeho materiál je teflon, přes který je umístěna objímka z nerezové oceli, která slouží k rozmístění honovacích tyčinek a k nastavení honovacího tlaku. Účelem tyčinek je udržení mezery mezi jednotlivými elektrodami a odstranění pasivní vrstvy oxidu kovu. Nástroj umožňuje přesné řízení kombinace rotačního a vratného pohybu. Vratný pohyb zajišťuje krokový motor, rotační pohyb zajišťuje stejnosměrný servomotor.

### Dokončování ozubených kol

Zařízení na dokončování ozubených kol je shodné s tím na válcovité vnitřní plochy, kromě obráběcí komory, tu zobrazuje obrázek 14. Skládá se z katodického a honovacího ozubeného kola, mezi těmito dvěma koly je dokončované kolo. Všechny tyto kola mají rovnoběžnou osu, měla by mít shodný modul a evolventní profil. Katodové kolo je navrženo a vyrobeno tak, aby při záběru s elektricky vodivým anodickým kolem nedocházelo k žádnému zkratu, což je zabezpečeno nevodivým materiálem, mezi který je vložen i materiál vodivý. Protože celá čelní šířka katodového ozubeného kola není elektricky vodivá je pro její dokončení nutný vratný pohyb, který je realizován krokovým motorem nebo servomotorem.



Obrázek 14 – Nástroj na elektrické honování (K. Gupta)



Obrázek 13 – Komora na obrábění ozubených kol (K. Gupta)

### Výhody a nevýhody

Metodu je možné využít na zlepšení tvrdosti, geometrické nepřesnosti (kruhovitost, zkosení, axiální deformace) u ozubených kol na snížení odchylek stoupání a kuželovitosti. Během procesu nedochází k výraznému tepelnému ovlivnění (lze dokončovat materiály náchylné k tepelné deformaci). Ve srovnání s mechanickým honováním je popisovaná metoda 5–10krát rychlejší a 4krát rychlejší než broušení.

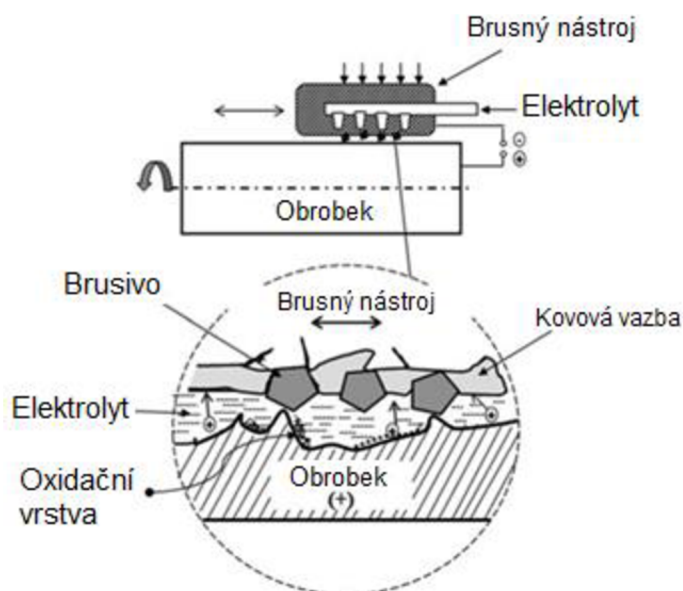
Nevýhodou je ekonomická náročnost (elektrické prvky, prvky na manipulaci s elektrolytem, protikorozní ochrana), proto je vhodná pro větší série. Nelze dokončovat neprůchozí otvory [16].

### **3.3.4.3 Elektrochemické superfinišování**

Mechanismus úběru zobrazuje obrázek 15. Kinematika nástroje a obrobku je shodná jako během konvenčního superfinišování popsané v kapitole 3.1.3 tzn. nástroj koná současně kmitavý a přímočarý vratný pohyb, zatímco obrobek koná rotační pohyb. Touto metodou lze dosáhnout přesnosti tolerance  $\pm 0,013$  mm kruhovitosti a přímosti v až na 0,007 mm.

### Výhody a nevýhody

Výhodou elektrochemického superfinišování oproti konvenčnímu je eliminace potřeby počátečního broušení. Úběr vyvolává chemická reakce čili nevzniká tepelné ovlivnění, k tomu přispívá i přítomnost elektrolytu [16].



Obrázek 15 – Princip elektrochemického superfinišování (K. Gupta)



#### **3.3.4.4 Elektrochemické odjehlování**

Při elektrochemickém odjehlení se anodický obrobek ponoří do elektrolytu a opět dochází k elektrochemickým reakcím, během kterých se kationty elektrolytu slučují s anionty kovu a dochází k úběru materiálu obrobku. Katodu představuje nástroj (elektroda), který přesně kopíruje tvar obrobku. Mezi katodou a anodou je udržována mezera v řádech desetin milimetru.

Mezera je nutná aby bylo zamezení zkratu zároveň však nesmí být příliš velká aby bylo dosaženo úběru. Proces odjehlování probíhá v řádech sekund a pro dosažení optimálních výsledků je žádoucí neprodlené umytí v roztocích a následné usušení.

##### Výhody

Existuje více metod nekonvenčního odjehlení, nicméně tato varianta představuje výhodu v přesnosti, jelikož dochází k úběru pouze v požadovaném místě. To je výhodou i při výpočtu přídavků, protože konstruktéři nemusí počítat s přídavkem po celé ploše jako je to při chemickém odjehlení ponorem.

Dalšími výhodami jsou: nevzniká kořen hrotu, proces je bezkontaktní tudíž nedochází k tepelnému ani mechanickému namáhání, možné použití bez ohledu na stupeň tvrdosti a strukturu [22].

## 4 Závěr

Cílem práce bylo shromáždit aktuální poznatky o problematice dokončovacích metod obrábění s ohledem na jejich využití, přednosti a nedostatky. Dále analyzovat jejich vývoj.

Dokončovací metody s úběrem materiálu se využívají zejména ke snížení drsnosti, zlepšení přesnosti a odstranění geometrických vad. Jedná se o metody, kde jsou zavedené postupy a principy, ale určitý vývoj u nich lze zaznamenat.

Metody bez úběru materiálu mají oproti metodám s úběrem materiálu větší využití ve zlepšování vlastností, jelikož při plastické deformaci vzniká deformační zpevnění. Tato skupina má dané postupy bez významných změn, nýbrž i zde jsou jisté inovace v podobě zautomatizování a optimalizace metod, což s sebou přináší výhody urychlení a dosažení lepších výsledků.

Nekonvenční dokončovací metody se zpravidla využívají v případech, kde nelze dosáhnout požadované konečné kvality povrchu vinou obtížné obrobitelnosti. Dalším možným důvodem použití nekonvenčních metod dokončování jsou velmi malé rozměry nebo tenkostěnné součásti. Neméně podstatným důvodem použití jsou složité geometrické tvary, velmi často se jedná o kombinaci více zmíněných důvodů. Některé dokončovací metody spadající do této kategorie jsou založeny na principech konvenčních metod, ale úběru je dosaženo pomocí fyzikálních nebo chemických jevů či jejich vzájemné kombinaci. Vývoj těchto metod je žádaný, a to z důvodu vyšších nákladů a v některých případech i kvůli složitosti a časové náročnosti. Zároveň se vývoj i nejvíce nabízí, jelikož existuje mnoho možností, jak vzájemně propojovat a kombinovat fyzikální a chemické jevy i s těmi mechanickými.

Přínosem práce je objasnění nových postupů a seznámení s novými poznatky. V kapitole věnované metodám s úběrem materiálu se jedná o vývoj nástrojů, abraziva, řezný kapalin, ale i nové variabilní kinematiky u metody honování. V kapitole týkající se metod bez úběru materiálu je objasněna optimalizace válečkování s účelem dosažení nejvyšších možných požadavků na materiál. V kapitole věnované nekonvenčním dokončovacím metodám je přínosem představení nových metod. Jedná se o prezentaci abrazivního průtokového obrábění včetně inovací. Dále o nové metody leštění využívající princip magnetismu. Tato kapitola také objasňuje metody využívající elektrochemické procesy.

Jelikož je neustálý vývoj v oblasti materiálů i řezných kapalin tak je možný vývoj i u konvenčních dokončovacích metod, ale jak již je naznačeno. Největších inovací a vývoje

nových postupů nastává v oblasti nekonvenčních dokončovací metod, proto se tímto směrem mohou ubírat další práce z oblasti dokončování.

## 5 Seznam použitých zdrojů

- [1] MÁDL, Jan. Technologie obrábění. Vyd. 2., přeprac. V Praze: Nakladatelství ČVUT, 2007, c1999. ISBN 978-80-01-03752-2.
- [2] KOČMAN, Karel. Technologické procesy obrábění. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011. ISBN 978-80-7204-722-2.
- [3] HUMÁR, Anton. TECHNOLOGIE I TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ – 3. část [online]. 2005, 57 s. [cit. 2022-11-01]. Dostupné z: [http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/studijni-opory/Dokoncovaci\\_a\\_nekonvencni\\_metody\\_obrabeni/TI\\_TO-3.cast.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/studijni-opory/Dokoncovaci_a_nekonvencni_metody_obrabeni/TI_TO-3.cast.pdf)
- [4] Kombinace soustružení a superfinišování snižuje čas obrábění o 43%. Mmspektrum [online]. [cit. 2022-11-09]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/kombinace-soustruzeni-a-superfinisovani-snizuje-cas-obrabeni-o-43>
- [5] AMIR, Md, Vinod MISHRA, Rohit SHARMA, Faiz IQBAL, S. Wazed ALI, Shravana KUMAR a Gufran S. KHAN. Development of magnetic nanoparticle based nanoabrasives for magnetorheological finishing process and all their variants. Ceramics International [online]. 2022, 2022(48) [cit. 2022-11-14]. ISSN 0272-8842. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.11.033>
- [6] CHEUNG, C.F., C.J. WANG, Z.C. CAO, L.T. HO a M.Y. LIU. Development of a multi-jet polishing process for inner surface finishing. Precision Engineering [online]. 2018, 2018(vol. 52), 112-121 [cit. 2023-02-16]. ISSN 01416359. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2017.11.018>
- [7] MM Průmyslové spektrum: Lepší a efektivnější omílání [online]. 2022. 1. [cit. 2023-02-15]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/lepsi-a-efektivnejsi-omilani>
- [8] JANČA, Ing. Ladislav. Tryskání zvlhčeným abrazivem. MM Průmyslové spektrum [online]. 23. 04. 2008, 2008 [cit. 2022-11-20]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/tryskani-zvlhcenym-abrazivem>
- [9] JANČA, Ing. Ladislav. Tryskání zvlhčeným abrazivem. MM Průmyslové spektrum [online]. 2009, 15. 04. 2009, 2009 [cit. 2022-11-20]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/tryskani-zvlhcenym-abrazivem-2>
- [10] KOČMAN, Karel. Speciální technologie: obrábění. 3. přeprac. v dopl. vyd., V Akademickém nakladatelství CERM 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004. ISBN 80-214-2562-8.
- [11] HLUCHÝ, Miroslav a Václav HANĚK. Strojírenská technologie 2. 2., upr. vyd. Praha, 2001. ISBN 80-718-3245-6.

- [12] VIGNESH, R. a N. ARUNACHALAM. Design and development of spiral grooved grinding wheel and their influence on the performance of vertical. *Procedia Manufacturing* [online]. 2021, 2021(53), 251-259 [cit. 2022-11-22]. ISSN 2351-9789. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2021.06.028>
- [13] ENOMOTO, Toshiyuki, Urara SATAKE a Xin MAO. New water-based fluids as alternatives to oil-based fluids in superfinishing processes. *CIRP Annals* [online]. 2020, 2020(vol. 69), 297-300 [cit. 2023-01-17]. ISSN 00078506. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2020.04.106>
- [14] Yamatoroll: Art of Roller Burnishing. In: Yamatoroll [online]. Sasso Marconi (ITA) [cit. 2023-02-02]. Dostupné z: <https://www.yamatoroll.eu/art-of-roller-burnishing-yamato/>
- [15] NGUYEN, Trung-Thanh a Xuan-Ba LE. Optimization of interior roller burnishing process for improving surface quality. *Materials and Manufacturing Processes* [online]. 2017, 2017(vol. 33), 1233-1241 [cit. 2023-02-16]. ISSN 1042-6914. Dostupné z: <https://doi.org/10.1080/10426914.2018.1453159>
- [16] GUPTA, Kapil, Neelesh K JAIN a R. F LAUBSCHER. *Hybrid Machining Processes: Perspectives On Machining and Finishing*. Switzerland: Springer International Publishing, 2015, 75 s. ISBN 978-3-319-25920-8.
- [17] Electro-Chemical Grinding: working. In: Adtwlearn [online]. Indie: ADTW Learn, 2021 [cit. 2023-02-02]. Dostupné z: <https://adtwlearn.com/machining-processes/electro-chemical-grinding/>
- [18] PUSAVEC, Franci a Jani KENDA. The transition to a clean, dry, and energy efficient polishing process: an innovative upgrade of abrasive flow machining for simultaneous generation of micro-geometry and polishing in the tooling industry. *Journal of Cleaner Production* [online]. 2014, 2014(vol. 76), 180-189 [cit. 2023-02-16]. ISSN 09596526. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.03.071>
- [19] SINGH, Swarn, Harish KUMAR, Santosh KUMAR a Saurabh CHAITANYA. A systematic review on recent advancements in Abrasive Flow Machining (AFM). *Materials Today: Proceedings* [online]. 2022, 56, 3108-3116 [cit. 2023-02-16]. ISSN 22147853. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.12.273>
- [20] ZHANG, Jiong, Julian HU, Hao WANG, A. Senthil KUMAR a Akshay CHAUDHARI. A novel magnetically driven polishing technique for internal surface finishing. *Precision Engineering* [online]. 2018, 54, 222-232 [cit. 2023-02-16]. ISSN 01416359. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2018.05.015>
- [21] MM Průmyslové spektrum: Robotické odjehlování hran. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2021 [cit. 2023-02-15]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/roboticke-odjehlovani-hran>

- [22] MM Průmyslové spektrum: Elektrochemické odjehlování a jeho výhody [online]. 2023 [cit. 2023-02-16]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/elektrochemicke-odjehlovani-a-jeho-vyhody>
- [23] NGUYEN, Trung-Thanh, The-Chien VU a Quoc-Dung DUONG. Multi-responses optimization of finishing honing process for surface quality and production rate. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering [online]. 2020, 42(11) [cit. 2023-02-17]. ISSN 1678-5878. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s40430-020-02690-y>
- [24] DWIVEDI, Kamal. Manufacturing Process: Unconventional Machining Process:Types,Working,Uses. In: Mechical.com [online]. 2021, October 07, 2021 [cit. 2023-02-25]. Dostupné z: <https://www.mechical.com/2021/10/unconventional-machining-process.html>
- [25] SENDER, Piotr a Irene BUJ-CORRAL. Influence of Honing Parameters on the Quality of the Machined Parts and Innovations in Honing Processes. Metals [online]. 2023, 13(1) [cit. 2023-02-28]. ISSN 2075-4701. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/met13010140>

### Seznam zdrojů obrázků

Obrázek 1 – HEJL, Miroslav, Petr JALŮVKA. Tvar brusných kotoučů.

In: Eluc.ikap.cz/ [online]. [cit. 2023-02-14]. Dostupné z:

<https://eluc.ikap.cz/verejne/lekce/1256>

Obrázek 2; 3 – VIGNESH, R. a N. ARUNACHALAM. Schematic view of groove

patterns designed on grinding wheel. In: Sciencedirect.com [online]. 2021 [cit. 2023-02-14]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2021.06.028>

Obrázek 4 – MANSORI, Mohamed El, Benoit GOELDE a Leila SABRI. Performance impact of honing dynamics on surface finish of precoated cylinder bores.

In: hal.science [online]. 2014 [cit. 2023-03-02]. Dostupné z: <https://hal.science/hal-00965833>

Obrázek 5 – YAMAGUCHI, Hitomi. Superfinishing. In: Researchgate.net [online].

Berlín: Springer, 2016 [cit. 2023-02-14]. Dostupné z:

[https://www.researchgate.net/figure/Schematic-diagram-of-superfinishing-process-96-Reprinted-with-permission-from-96\\_fig12\\_343234441](https://www.researchgate.net/figure/Schematic-diagram-of-superfinishing-process-96-Reprinted-with-permission-from-96_fig12_343234441)

Obrázek 6; 7 – ENOMOTO, Toshiyuki, Urara SATAKE a Xin MAO. New water-based fluids as alternatives to oil-based fluids in superfinishing processes. In: CIRP

Annals [online]. 2020, s. 297-300 [cit. 2023-01-17]. ISSN 00078506. Dostupné z:

[doi:10.1016/j.cirp.2020.04.106](https://doi.org/10.1016/j.cirp.2020.04.106)

Obrázek 8; 9 – CHEUNG, C.F., C.J. WANG, Z.C. CAO, L.T. HO a M.Y. LIU. Development of a multi-jet polishing process for inner surface finishing. In: Precision Engineering [online]. 2018, s. 112-121 [cit. 2023-02-16]. ISSN 01416359. Dostupné z: [doi:10.1016/j.precisioneng.2017.11.018](https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2017.11.018)

Obrázek 10 – JAIN, J.K, V.K JAIN a P.K. KALRA. Modelling of abrasive flow machining process: a neural network approach. In: <https://www.sciencedirect.com/> [online]. Kanpur, 1999 [cit. 2023-02-25]. Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(99\)00129-5](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(99)00129-5)

Obrázek 11 – AMIR, Md, Vinod MISHRA, Rohit SHARMA, Faiz IQBAL, S. Wazed ALI, Shravana KUMAR a Gufran S. KHAN. Development of magnetic nanoparticle based nanoabrasives for magnetorheological finishing process and all their variants. In: Ceramics International [online]. 2022 [cit. 2022-11-14]. ISSN 0272-8842. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.11.033>

Obrázek 12 – ZHANG, Jiong, Julian HU, Hao WANG, A. Senthil KUMAR a Akshay CHAUDHARI. A novel magnetically driven polishing technique for internal surface finishing. In: Precision Engineering [online]. 2018, s. 222-232 [cit. 2023-02-09]. ISSN 01416359. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2018.05.015>

Obrázek 13; 14; 15 – GUPTA, Kapil, Neelesh K JAIN a R. F LAUBSCHER. Hybrid Machining Processes: Perspectives On Machining and Finishing. Switzerland: Springer International Publishing, 2016, 75 s. ISBN 978-3-319-25920-8. Dostupné z: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-25922-2\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-319-25922-2_1)