

# ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ – ÚSTAV TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ,  
PROJEKTOVÁNÍ A METROLOGIE



## BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

DOKONČOVÁNÍ POVRCHU – MODERNÍ TECHNOLOGIE

SURFACE FINISHING – MODERN TECHNOLOGIES

**Autor:**

**Štěpán Kopačka**

**Vedoucí práce:**

**Ing. Vítězslav Rázek, CSc.**

**Rok:**

**2021**

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení:	<b>Kopačka</b>	Jméno: <b>Štěpán</b>	Osobní číslo: <b>476830</b>
Fakulta/ústav:	<b>Fakulta strojní</b>		
Zadávací katedra/ústav:	<b>Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie</b>		
Studijní program:	<b>Teoretický základ strojního inženýrství</b>		
Studijní obor:	<b>bez oboru</b>		

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Název bakalářské práce anglicky:

Pokyny pro vypracování:

1. Rozbor zadané problematiky
2. Dosahované kvalitativní parametry povrchů
3. Zhodnocení metod s ohledem na dokončování povrchů v letecké výrobě

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

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

Datum zadání bakalářské práce: **30.04.2021** Termín odevzdání bakalářské práce: **29.07.2021**

Platnost zadání bakalářské práce: \_\_\_\_\_

Ing. Vítězslav Rázek, CSc. podpis vedoucí(ho) práce	Ing. Libor Beránek, Ph.D. podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry	prof. Ing. Michael Valášek, DrSc. podpis děkana(ky)
--	--	--

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

_____	_____
Datum převzetí zadání	Podpis studenta

## Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto práci „Dokončování povrchu – moderní technologie“ vypracoval samostatně a veškeré literární prameny a zdroje informací, které jsem použil, cituji a uvádím v seznamu použité literatury a zdrojů informací.

Dále prohlašuji, že nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 zákona č. 121/ 2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne .....

.....

Štěpán Kopačka

## Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat svému vedoucímu, panu Ing. Vítězslavu Rázkovi, CSc., za jeho čas při konzultacích a za jeho rady při vypracování této práce. Také bych chtěl poděkovat Heleně Holé a panu Vladimíru Odstrčilovi z AERO Vodochody za zprostředkování odborné konzultace, která mi pomohla při dokončování této práce.

## Abstrakt

Tato bakalářská práce se zaměřuje na problematiku dokončování povrchu – moderní technologie.

V rešeršní části se zabývám problematikou moderních technologií dokončování povrchů a jejich dosahovanými kvalitami povrchu spolu s technologiemi používanými v leteckém průmyslu.

V praktické části tyto metody mezi sebou porovnávám z hlediska dosahovaných kvalit povrchu.

## Klíčová slova

Dokončovací technologie, laser shock peening, abrasive flow machining, magnetic abrasive flow, broušení, kuličkování, zpevnění povrchu, drsnost povrchu, tvrdost povrchu

## Abstract

This bachelor thesis is focused on Finishing surface – modern technologies.

In the theoretical part the problems of finishing surface modern technologies and finishing technologies used in aviation industry are described.

In the practical part, I compared these technologies' finished surface quality.

## Key words

Finishing technologies, laser shock peening, abrasive flow machining, magnetic abrasive flow, grinding, shot peening, surface reinforcement, surface roughness, surface hardness

## Obsah

Úvod .....	8
1. Metody dokončování povrchů .....	9
2. Moderní metody dokončování povrchu .....	10
2.1 Laser shock peening (LSP).....	10
2.1.1 Princip metody LSP .....	10
2.1.2 Dosahované kvalitativní parametry povrchu .....	11
2.1.3 3D Laser shock peening .....	12
2.2 Abrasive flow machining – Abrazivní průtokové obrábění .....	15
2.2.1 Inovace AFM – AFMmm .....	16
2.2.2 Kvalitativní parametry metody AFMmm .....	18
2.2.2 Inovace AMF tool bar (tyčový nástroj) .....	19
2.2.3 Dosahované parametry drsnosti povrchu .....	19
2.3 Magnetic abrasive finishing process – Proces magnetického abrasivního dokončování (Magnetické broušení).....	22
2.3.1 Princip magnetického broušení (MAF) .....	22
2.3.2 Výhody procesu MAF.....	24
2.3.3 Drsnost povrchu MAF .....	24
2.3.4 Inovace nástroje procesu MAF .....	26
3. Technologie dokončování povrchu AERO Vodochody .....	29
3.1 Kuličkování .....	29
3.3 Broušení.....	31
4. Porovnání dokončovacích metod .....	34
4.1 Kuličkování x Laser shock peening.....	34
4.1.1 Aktivní částice .....	34

4.1.2 Energetická náročnost.....	34
4.1.3 Kvalita povrchu.....	34
4.1.4 Shrnutí.....	35
4.2 Broušení x Abrasive flow machining movable mandler x tool bar .....	36
4.2.1 Obráběcí nástroj .....	36
4.2.2 Kvalita povrchu.....	36
4.2.3 Shrnutí.....	37
4.3 Broušení x Magnetické broušení s inovací nástroje .....	38
4.3.1 Obráběcí nástroj .....	38
4.3.2 Kvalita povrchu.....	38
4.3.3 Shrnutí.....	39
5. Závěr .....	40
Seznam tabulek .....	41
Seznam obrázků .....	42
Zdroje .....	43

## Úvod

Metody dokončování povrchů jsou nedílnou součástí výroby, ať už jde o výrobu pomocí aditivních technologií, obráběním, tvářením, či odléváním. Tyto metody jsou poslední fází výroby, pomocí nichž dosahujeme požadovaných parametrů výrobku jako jsou rozměrové a geometrické tolerance, drsnost povrchu, odolnost vůči únavě materiálu a v neposlední řadě vzhled. Všechny tyto parametry mají nemalý vliv na celkové funkční vlastnosti výrobku, například drsnost povrchu, která se nejvíce snižuje právě díky dokončovacím metodám, ovlivňuje přesný a hladký chod výrobku. V potaz musíme vzít i zvýšení odolnosti vůči korozi a opotřebení, které zvyšují životnost výrobku. Stále však neexistuje univerzální metoda, díky které bychom dosáhli všech těchto parametrů najednou, a tak se různé metody kombinují, abychom získali co nejlepší výsledný produkt s vysokou jakostí povrchu, a tak zvýšili i jeho efektivitu v praxi. V dnešní době se používají různé metody, některá na základě úběru materiálu, čímž se zbavujeme vrstvy, která může být nevyhovující pro finální produkt, proto se při formování výrobního postupu uvažuje přídavek na obrábění, či využíváním plastických deformací za studena, kdy dochází ke zlepšení jakost povrchu.

Cílem této práce je zpracování problematiky moderních technologií dokončování povrchu či inovace aktuálně používaných metod s vyhodnocením jejich dosažitelných kvalitativních hodnot jakosti povrchu v porovnání s metodami využívaných v leteckém průmyslu. Pro tuto problematiku jsem zkontaktoval AERO Vodochody pro případnou spolupráci při řešení problematiky aktuálně používaných technologií pro dokončování povrchu.



## 1. Metody dokončování povrchů

Kvalita povrchu je jednou z nejdůležitějších charakteristik, která ve finální fázi určuje celkovou kvalitu, životnost a efektivní využití součásti v praxi. Abychom byli schopni získat všechny tyto vlastnosti, potřebujeme, aby produkt výroby prošel v poslední fázi procesem dokončování povrchu. Při tomto procesu se zvyšuje jakost povrchu produktu snižováním drsnosti povrchu a zbavováním se povrchových nečistot vzniklých při výrobě produktu a zpevňováním povrchu pro zlepšení mechanických vlastností součásti.

Obecně se dají metody dokončování rozdělit do dvou skupin, s úběrem materiálů a bez úběru materiálu. Rozdíl je patrný už z názvů skupin. Mezi metody s úběrem materiálu patří například broušení, jemné obrábění, honování, superfinišování, lapování, leštění, tryskání, omílání. Principem těchto metod je úběr materiálu z povrchu výrobku, čímž se zbavujeme vrstvy, která může být nevyhovující pro finální produkt. Proto se při formování výrobního postupu uvažuje přídavek na obrábění. Mezi metody bez úběru materiálu patří hlazení, válečkování, kalibrování, tryskání, vibrační zpevnění, kuličkování. Tato skupina funguje na principu plastických deformací za studena, kdy dochází ke zlepšení kvality povrchu, jeho zpevnění a zmenšení jeho drsnosti povrchu. Dále se dají dělit na konvenční a nekonvenční způsoby.[1] [2]

Tabulka 1 Příklady dokončovacích metod a dosahované jakostní parametry<sup>1</sup>

Dokončovací metoda	IT	Ra [ $\mu\text{m}$ ]
Obrábění jemné	7 až 8	0,4 až 1,6
Obrábění diamantem	5 až 6	0,2 až 0,8
Jemné frézování	7 až 8	0,8 až 1,6
Broušení na čisto	5 až 7	0,2 až 1,6
Jemné broušení	3 až 4	0,025 až 0,4
Honování (dvoufázové)	3 až 5	0,1 až 0,2
Leštění	3 až 7	0,1 až 0,4
Tryskání		0,1 až 0,8
Omílání	7 až 11	0,4 až 1,6

<sup>1</sup> HORÁK, Zdeněk. *Beztržkové obrábění materiálů* [online]. Praha, 2017 [cit. 2020-11-27]. Dostupné z: <https://core.ac.uk/download/pdf/128479694.pdf>. Bakalářská práce. ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE. Vedoucí práce Ing. BcA. Jan Podaný, Ph.D. MÁDL, Jan a Jaroslav BARCAL. *Základy technologie II*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2002. ISBN 80-010-2610-8.

## 2. Moderní metody dokončování povrchu

### 2.1 Laser shock peening (LSP)

Jedná se o inovativní metodu a jednu z neprogresivnějších metod dokončování povrchů bez úběru materiálu. Ke své funkci využívá plastické deformace způsobené vysoce intenzivním krátkodobým pulzem laserového paprsku na rozhraní kovového terče a transparentní vrstvou, nejčastěji vodou, které zvyšují odolnost proti únavě, korozi pod napětím, kavitaci a zjemňování povrchu kovového terče (upravovaného povrchu), podobný účinek má například i konvenční metoda kuličkování, ale pomocí LSP můžeme dosáhnout až desetinásobné hloubky zpevnění povrchu. Nejčastěji metoda LSP využívá vysokovýkonný Q-switched Nd:YAG laser, který disponuje výkonem větším jak  $1 \text{ GW/cm}^2$  a pulzem trvajícím méně než 50 ns. [3] [4]

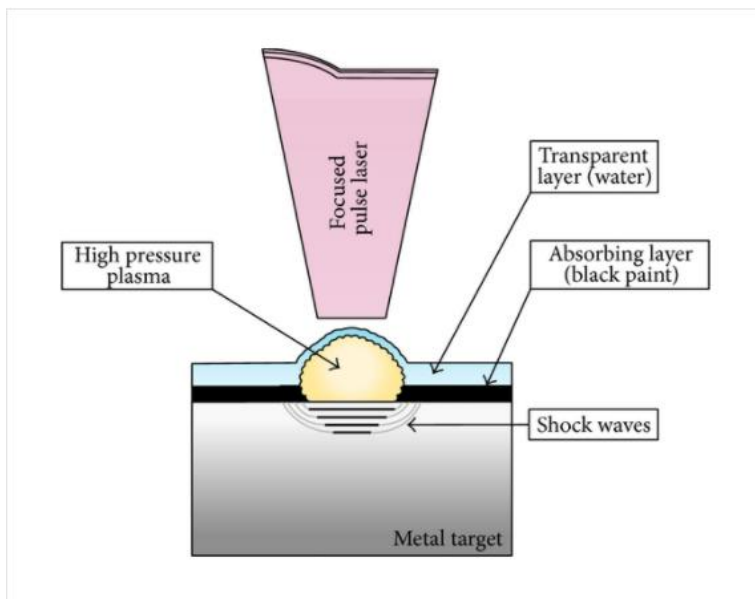
#### 2.1.1 Princip metody LSP

Ještě před tím, než se na součást bude aplikovat metoda LSP, musí projít důkladnou přípravou, která se skládá ze dvou kroků pro zvýšení efektivity procesu:

1. Dokončované součásti se povlakuji absorpční, nebo také ablační vrstvou, která lépe absorbuje dopadající světlo laseru, a tak zvyšuje účinnost celého procesu. Jako materiál absorpční (ablační) vrstvy se používá hliník, měď, zinek, černá páska nebo brava.
2. Na již povlakovanou součást je nanесena transparentní vrstva, která má zabránit plazmatu v rozptýlení se do okolí a tím opět zvýší účinek na materiál součásti. Jako transparentní vrstva se může použít křemen, sklo či plexisklo, ale nejčastěji se součást zcela ponoří do deionizované vody.

Po přípravě je povrch součásti ozařován paprskem laseru s intenzitou větší než  $1 \text{ GW/cm}^2$ , který prochází skrze transparentní vrstvu a dopadá na součást. Při dopadu krátkého laserového pulzu na povrch se okamžitě vypařuje absorpční vrstva spolu s tenkou vrstvou povrchu a vytvoří se plazma o vysokém tlaku a teplotě. Rychle expandující plazma je zadržena mezi povrchem součásti a transparentní vrstvou, a to způsobuje, že plazma dosahuje vysokého tlaku více než 1 GPa. Tento vznikající extrémní tlak se pak šíří do součásti jako rázové vlny, které jej plasticky deformují, dokud jejich amplituda neklesne pod hodnotu dynamické meze kluzu materiálu. Plastická deformace pak způsobí nárůst deformačního zpevnění a tlakového zbytkového napětí v povrchové vrstvě součásti. [3] [4]

Obrázek 1: LSP (laser shock peening)<sup>2</sup>[3]

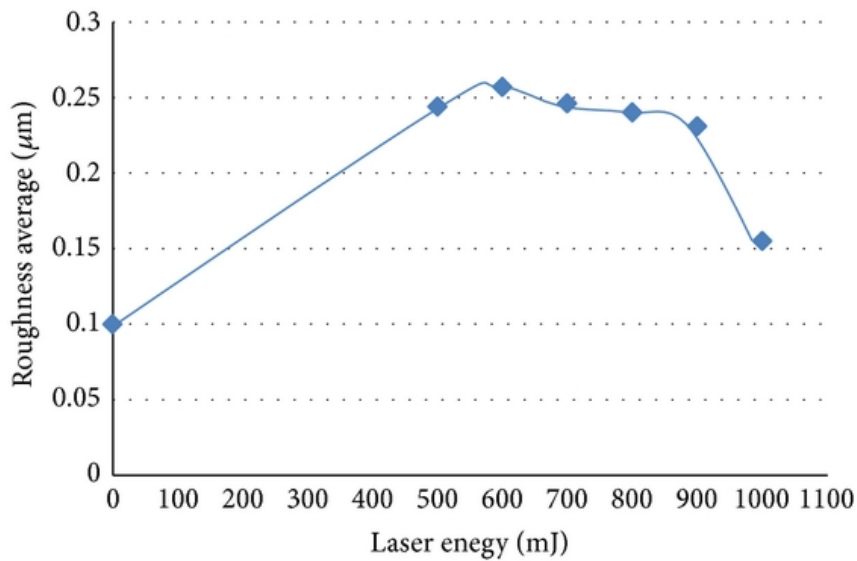


### 2.1.2 Dosahované kvalitativní parametry povrchu

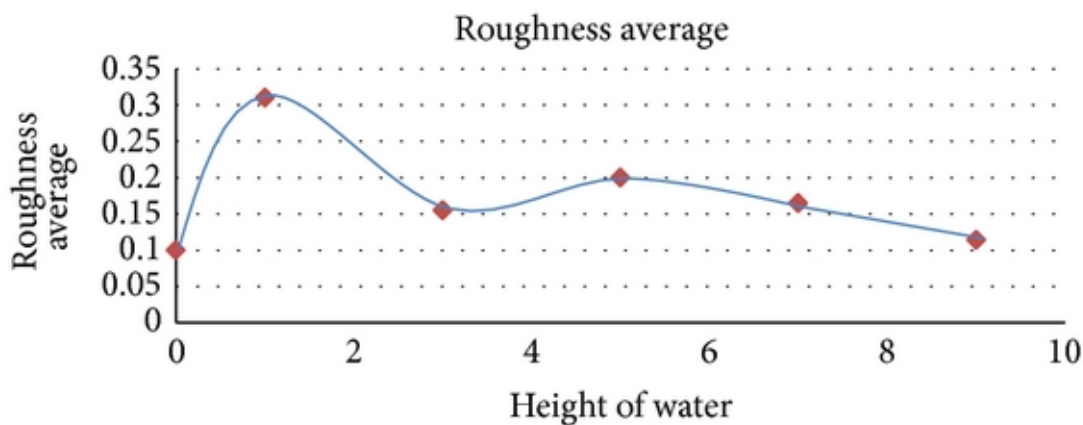
Zásadním vlivem metody LSP je zpevňování povrchu pomocí plastických deformací generujících se vysokotlakou plazmou vznikající na absorpční vrstvě. Oproti klasické zpevňovací metodě kuličkování dochází ke zpevnění v hloubkách od 1 mm až po desetinásobek hloubky zpevnění získané kuličkováním. V experimentu [3], kdy se metodou LSP upravoval povrch hliníkové slitiny 2024 - T3, jejíž drsnost byla před použitím laseru snížena leštěním na hodnotu  $R_a = 0.1 \mu\text{m}$ , se zjišťoval vliv LSP na drsnost zpevňovaného povrchu. Z obrázku č. 2 je vidět, že se po aplikaci laseru drsnost povrchu zvýšila v závislosti na velikosti energie laseru. To je způsobeno tavením a ablací materiálu po ošetření povrchu laserem. Z obrázku č. 3 je pak vidět zvýšení drsnosti v závislosti na hloubce transparentní vrstvy (voda). S rostoucí výškou hladiny transparentní vrstvy se snižuje drsnost ošetřeného povrchu. To může být způsobeno závislostí rychlosti ablace materiálu, která se snižuje zvyšováním hloubky transparentní vrstvy, v našem případě vody. [3]

<sup>2</sup> Shock waves = šokové vlny, metal target = kovový terč, absorbing layer (black paint) = absorpční vrstva (černý nátěr), high pressure plazma = vysokotlaká plazma, transparent layer (water) = transparentní vrstva (voda), Focused pulse laser = zaměřený pulzní laser

Obrázek 2: Graf závislosti drsnosti povrchu na velikosti energie laseru



Obrázek 3: Graf průměrné drsnosti povrchu v závislosti na hloubce transparentní vrstvy

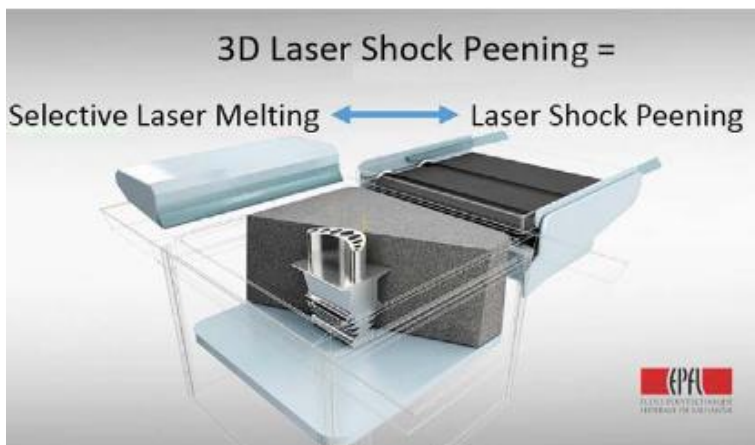


### 2.1.3 3D Laser shock peening

3D tisk je dnes jedna z nejprogressivnějších výrobních technologií pro výrobu komplexních součástí. Velkými nevýhodami této technologie, které omezují její použití, jsou zbytková napětí koncentrující se v bocích součástí a pórovitost vzniklá z fáze budování. Zbytková napětí mají velký negativní vliv na životnost vyrobených součástí, především tahová zbytková napětí snižují jejich životnost a narušují geometrii dílů, podporují růst trhlin v materiálu a mohou dokonce způsobit i selhání procesu budování. Pomocí metody kuličkování se znásobila životnost 2,7krát ve srovnání se stavem po výstavbě, zatímco použití metody laser shock peening vedlo k navýšení životnosti až 20krát. [16]

3D Laser shock peening je nová hybridní aditivní technologie, která funguje na principu opakované aplikace ošetřování laserem mezi výstavbou vrstev vyráběného dílu. Experiment s touto metodou poukazuje na to, že vrstvy vystavěné na již ošetřené vrstvy laserem nesnižují indukované tlakové zbytkové napětí, které je mnohem více žádoucí než tahové zbytkové napětí. Naopak opakovaná aplikace laser shock peening na následně vystavěné vrstvy dílu vedou k akumulaci a navýšení velikosti tlakového zbytkového napětí spolu se zlepšením geometrické přesnosti vyrobeného dílu. Při použití metody 3D laser shock penning při výstavbě dílu ze slitiny hliníku CM247LC, který je náchylný k praskání při 3D tisku, se snížila koncentrace trhlin o více než 95 %, čímž se opět zvyšuje životnost dílu vystavěného z této slitiny.

Obrázek 4: 3D LSP technologie

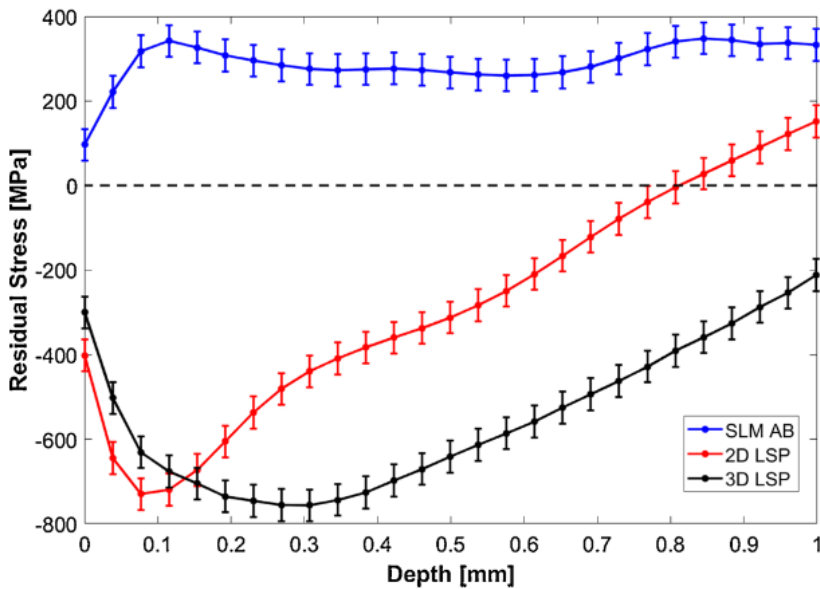


Pro ukázkou toho, jak moc je metoda 3D laser shock peening efektivnější než konvenční metoda, jsem vyhledal experiment, kde se tyto dvě metody porovnávají při ošetření povrchu dílů z nerezové oceli 316 L. V grafu, který je znázorněn na obrázku č. 5, jsou znázorněny hodnoty zbytkového napětí získané po ošetření povrchu konvenční metodou LSP<sup>3</sup> a za použití nové metody 3D LSP<sup>4</sup> v závislosti na měřené hloubce povrchu. Je patrné, že za použití obou metod se téměř okamžitě z počátku tahové napětí přeměňuje na požadované tlakové napětí. Největší dosažené hodnota tlakového napětí byla -730 MPa při použití konvenční metody (2D) LSP a -756 MPa při použití 3D LSP. Zásadním rozdílem těchto dvou metod je však hloubka povrchu, do které zůstává zbytkové napětí tlakové. V tomto případě se u konvenční metody LSP tlakové napětí mění na tahové v hloubce 0,8 mm a pro metodu 3D LSP zůstává napětí tlakové až do hloubky 1 a více mm, bohužel měření bylo přednastaveno na hloubky max 1 mm. [16]

<sup>3</sup> Laser shock peening

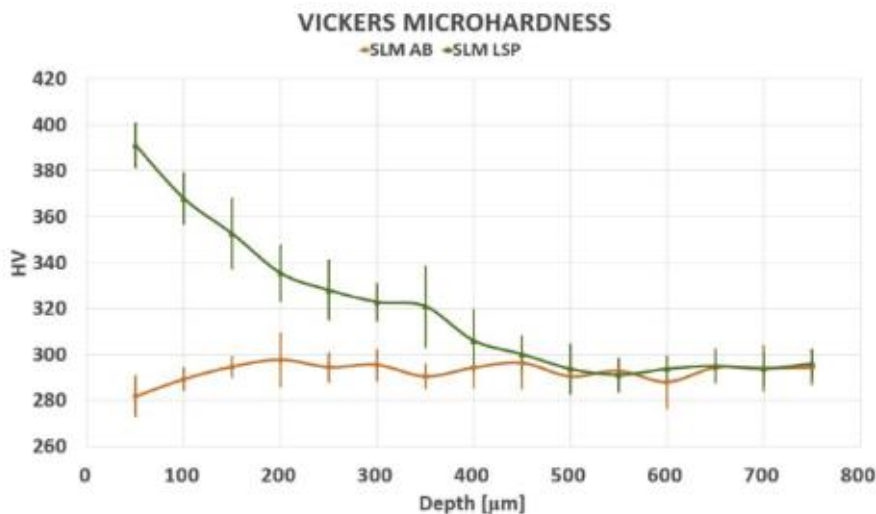
<sup>4</sup> 3D Laser shock peening

Obrázek 5: Zbytková napětí v závislosti na hloubce ošetřované plochy LSP



Kromě vyvolávání vysokých hodnot tlakového zbytkového napětí ve vystavených dílech metodou 3D tisku tato metoda snižuje pórovitost a zvyšuje tvrdost. To má za důsledek drastické zlepšení životnosti dílů vyrobených 3D tiskem. Z experimentu [16] se došlo k závěru, že byla zvýšena životnost tištěného dílu v ohybu 14krát a 57krát oproti součástem vyrobených konvenčními metodami. V obrázku č. 6 je znázorněn vliv metody LSP na tvrdost povrchu, měřenou metodou podle Vickerse, vyrobeného dílu z nerezové oceli 316 L. Zde je rozeznatelné zvýšení tvrdosti při použití 3D LSP oproti neošetřenému dílu. Při ošetření se dosáhlo tvrdosti povrchu 391 HV v hloubce 50  $\mu\text{m}$  oproti 282 HV neošetřeného povrchu a zůstává vyšší až do hloubky 400  $\mu\text{m}$ , od které je již vytvrzení pomocí 3D LSP zanedbatelné. [17]

Obrázek 6: Tvrdost povrchu podle Vickerse



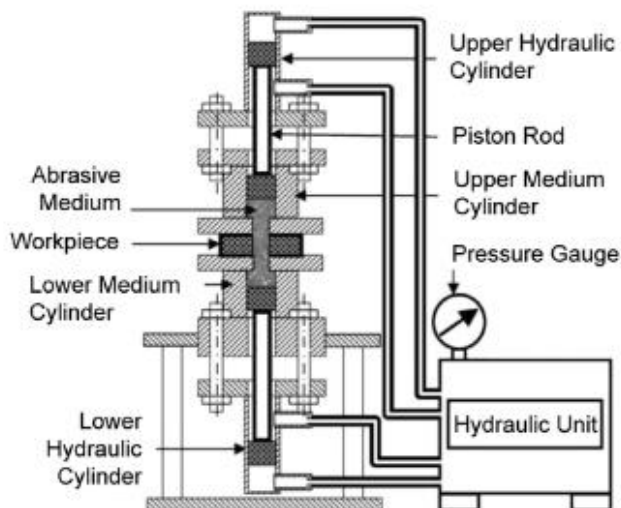
## 2.2 Abrasive flow machining – Abrazivní průtokové obrábění

Jedná se o dokončovací metodu s úběrem materiálu, která využívá tok natlakovaného abrazivního média, proudícího skrze výrobek, k odstranění přebytečného materiálu po obrábění. Je vhodná pro dokončování vnějších i vnitřních povrchů, které jsou často komplexní a nepřístupné. Obzvláště je metoda AFM vhodná pro součásti se složitou geometrií a vysokými požadavky na integritu povrchu výrobku. Lze jej použít k leštění, odstraňování otřepů a odstraňování přetavených vrstev.

Abrazivní médium metody AMF se skládá z viskoelastického polymeru, který funguje jako nosné médium spolu s abrazivními částicemi působící jako řezný nástroj. Takovými běžně používanými polymerními médii jsou polyborosiloxan a silikonový kaučuk. Jako abrasivum se nejčastěji používá karbid křemíku, oxid hlinitý, karbid boru a polykrystalický diamant.

Avšak i přes její výhody se technologové potýkají také se spoustou nevýhod. Mezi ty nejdůležitější nevýhody patří celková složitost metody a její vysoká energetická náročnost. Proces není robustní, nezajišťuje rovnoměrnou integritu podél obrobeného povrchu a má relativně nízkou produktivitu. Proces však jde vylepšit pomocí moderní (inovativní) kinematiky, která by měla zajistit plně kontrolovatelný tok abrazivního média na takovou úroveň, abychom získali větší kvalitu povrchu výrobku, zkrátili výrobní čas, a tak zvýšili produktivitu, snížili energetickou náročnost metody. A přesně na tuto inovaci se zaměřuje studie autorů Franci Pusavec a Jeni Kenda s názvem *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*. [5]

Obrázek 7: AFM

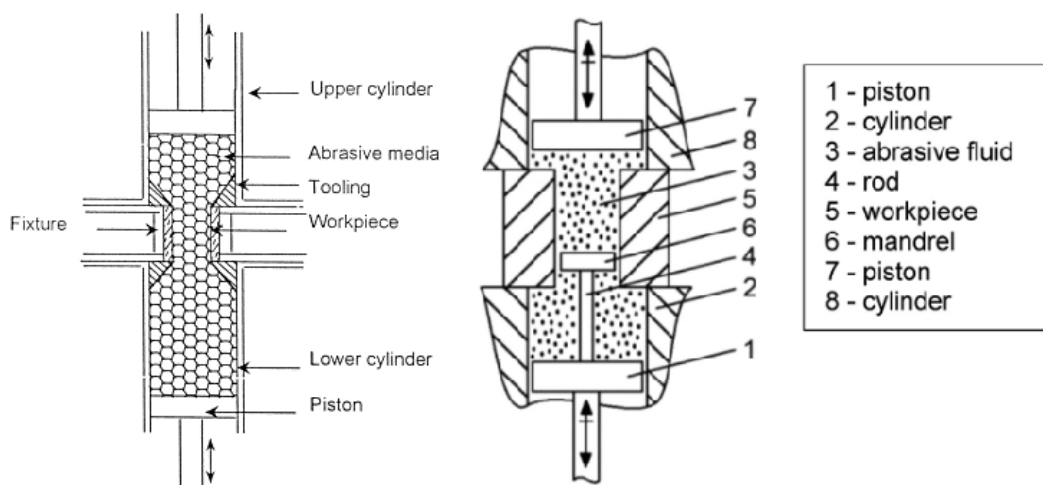




### 2.2.1 Inovace AFM – AFMmm

AFMmm znamená Abrasive flow machining rotatable/movable mandler. Tento název vznikl ze snahy zlepšit původní metodu AFM pomocí pohyblivé/rotační součásti, takzvaný mandler, kterou si nechali patentovat Kenda, J., Pusavec, F., Kopac, J. v roce 2013. Po přidání pohyblivé/rotační součásti se dosahuje kontrolovatelné, vyšší rychlosti abrazivního (leštícího) média a vyšší efektivity procesu, a zároveň se tím dosahuje drasticky menšího rozdílového tlaku mezi přítokem a odtokem abrazivního (leštícího) média na leštěné součásti, který je způsoben relativně malou výškou připojeného dílu viz. obrázek č. 8.

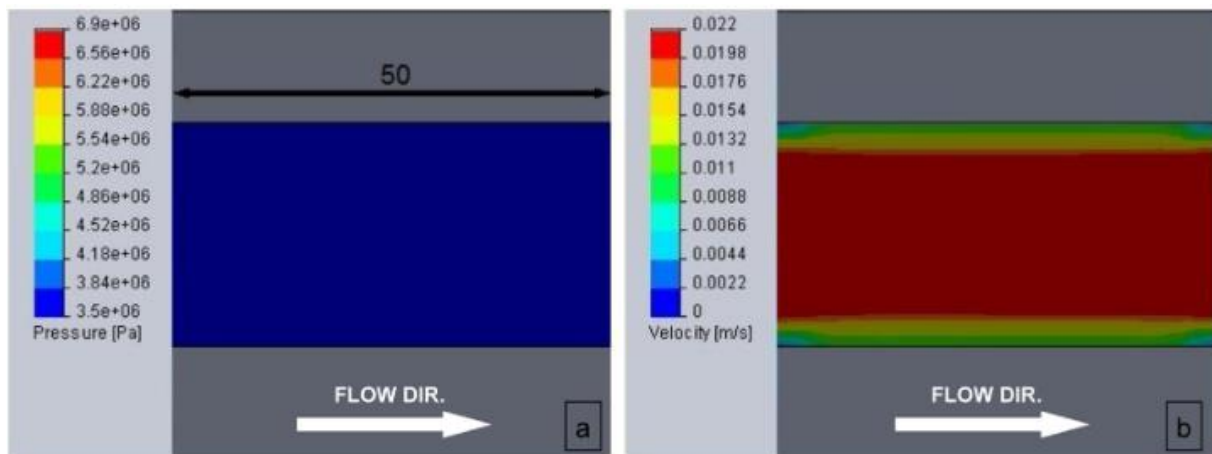
Obrázek 8: porovnání mechanismu AFM x AFMmm



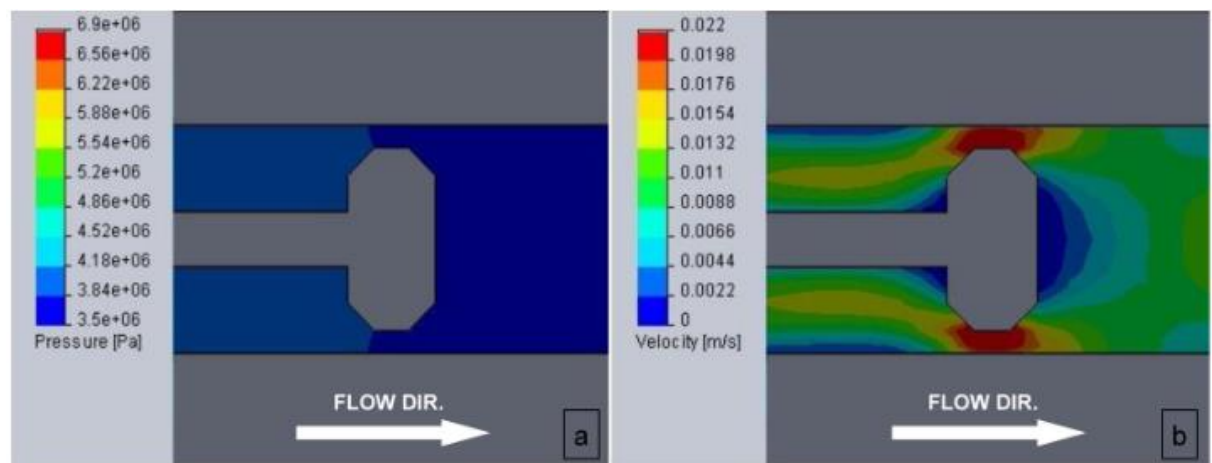
Na tomto obrázku je vidět patrný rozdíl ve složení hlavního mechanismu metody AFM (vlevo) a metody AFMmm (vpravo), kde je vidět mandrel, který je připojen ke spodnímu pístu mechanismu. Základním pohybem hydraulického mechanismu se usměřňuje proud abrazivního prostředí skrze obrobek. U metody AFMmm s přidáním mandrelem je však tímto pohybem rychlost abrazivního prostředí řízena lokálně, a to způsobuje zvýšení rychlosti proudu abraziva, ale snižuje tlak, kterým působí na obrobek. Toto zlepšení bylo prokázáno v simulaci, kterou provedli Kenda J., Pusavec F., Kopac J..



Obrázek 9: Simulace proudu abraziva-AFM



Obrázek 10: Simulace proudu abraziva-AFMmm



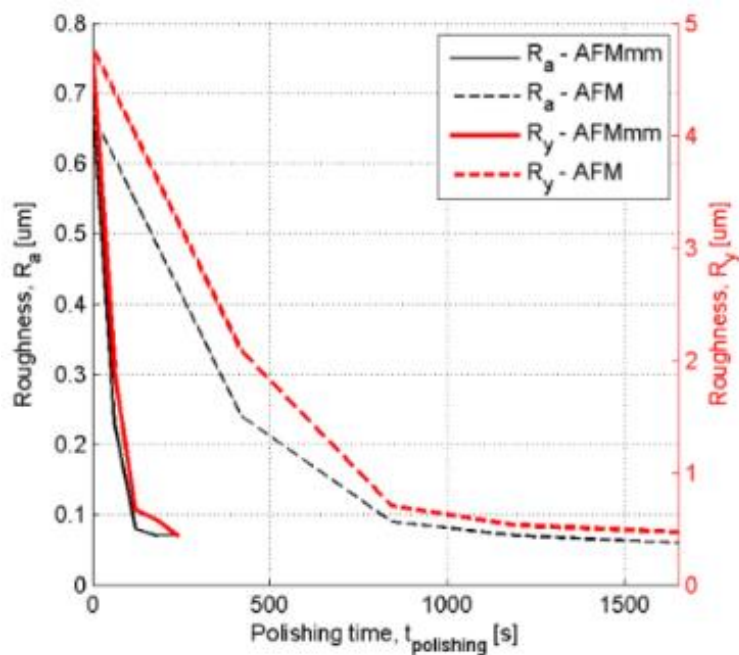
Z těchto snímků je vidět zlepšení rychlosti proudu částic. U metody AFM se rychlost abraziva pohybuje kolem 0,0076 m/s a u metody AFMmm s pohybovým mandrelem se rychlost zvýšila na 0,05 m/s. Z tohoto důvodu se očekává vyšší objem odstraněného materiálu ve střední části formy, aby se vytvořil požadovaný konkávní tvar. (*For this reason, a higher volume of removed material is expected in the middle portion of the mold, to generate the desired concave shape.*)<sup>5</sup>.

<sup>5</sup> PUSAVEC, Franci a Jeni 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

## 2.2.2 Kvalitativní parametry metody AFMmm

Pro zjištění kvality drsnosti povrchu a získání požadovaného konkávního tvaru byl proveden experiment, ve kterém byly porovnávány hodnoty získané metodou AFM a metodou AFMmm na obrobku z materiálu AISI H11 s pevností 52 HRC a počáteční drsností povrchu  $R_a \approx 0,68 \mu\text{m}$ . Dokončování bylo provedeno na Kennametal Extrude Hone PROFILE 80. Výsledek experimentu je znázorněn na obrázku č. 11.

Obrázek 11: porovnání drsnosti povrchu za čas metod AFM a AFMmm

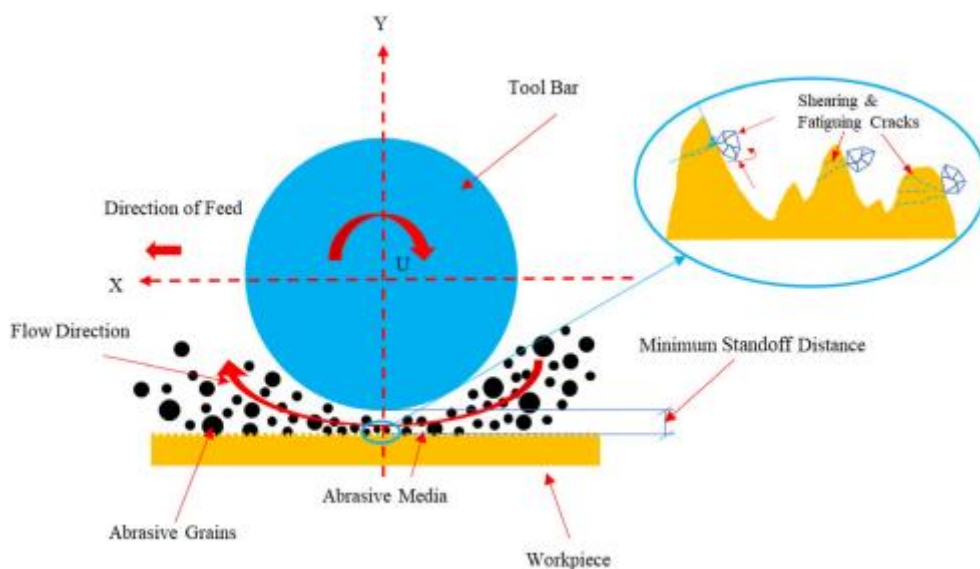


Z výsledků experimentu je patrné, že metoda AFMmm je efektivnější než klasická metoda AFM, protože pomocí AFM lze dosáhnout požadované drsnosti  $R_a = 0,07 \mu\text{m}$  za čas 1650 s, zatímco pomocí AFMmm můžeme dosáhnout tak hladkého povrchu za mnohem kratší dobu, a to 240 s. Zkušenému pracovníkovi trvalo leštění obrobku přibližně 9 000 s (150 minut), aby se povrch dostal na požadovanou drsnost povrchu. (*It has taken the skilled worker, to polish the workpiece, approximately 9000 s (150 min) to turn the surface into the desired surface roughness*)<sup>6</sup>. [5]

<sup>6</sup> PUSAVEC, Franci a Jeni 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

### 2.2.2 Inovace AMF tool bar (tyčový nástroj)

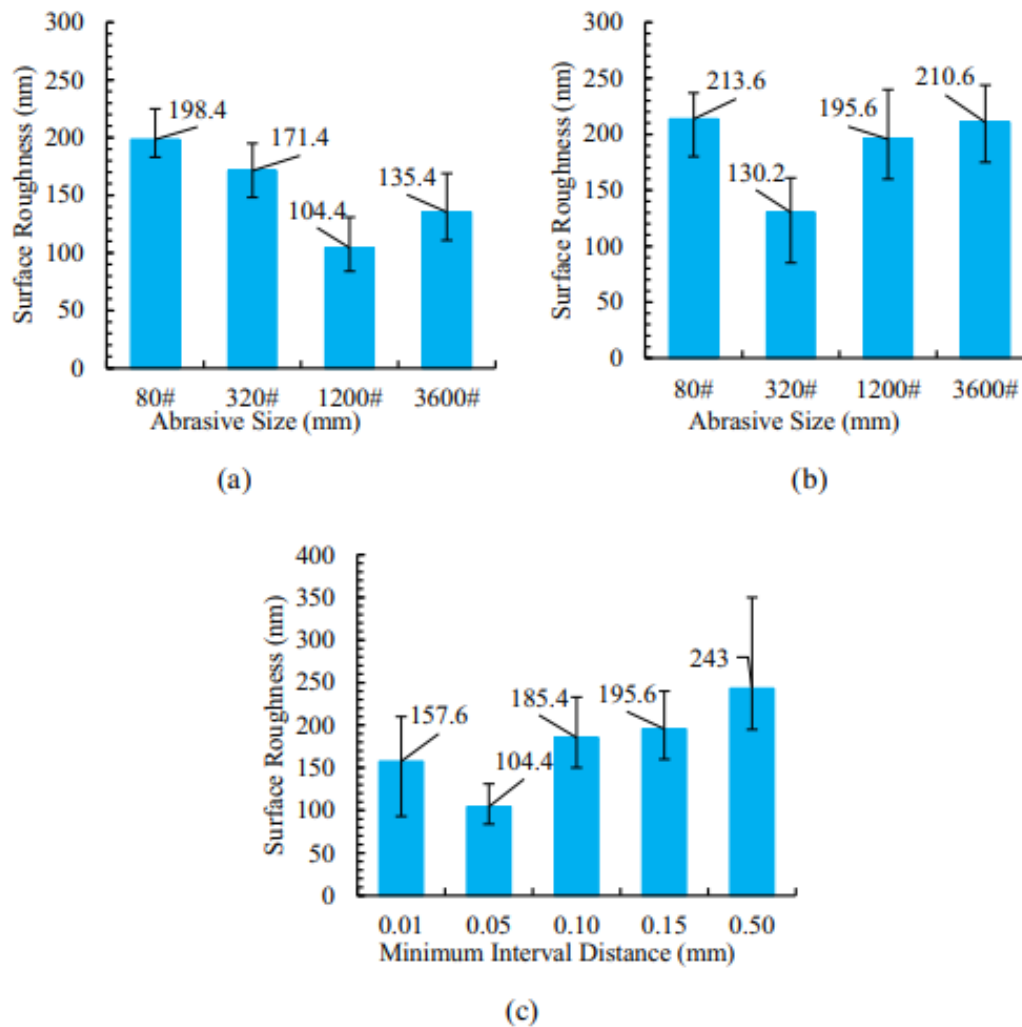
Novější inovací metody AMF se zabývala práce Study on key parameters of a new abrasive flow machining (AFM) process for surface finishing. V této práci se inovovaly konvenční metody AMF, které vyžadují speciální a drahé stroje limitující využití této metody. Cílem tedy bylo vymyslet metodu, která pořizování speciálních strojů eliminuje. Toho se dosáhlo přidáním tyčového nástroje, který svou rotací urychluje abrazivní médium. Pro aplikování této metody se dají využít CNC nebo NC stroje, do jejichž vřetene se tento tyčový nástroj snadno upne. Stále však zůstává podmínka, že obráběná součást musí být zcela ponořena v abrazivním médiu.



### 2.2.3 Dosahované parametry drsnosti povrchu

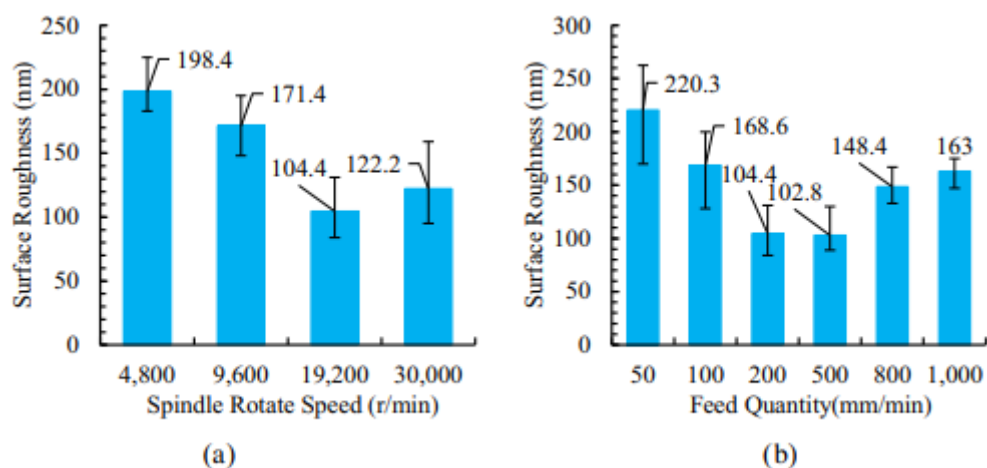
Na výslednou hodnotu drsnosti povrchu mají obrovský vliv klíčové parametry rychlosti otáčení nástroje, velikost abraziva, velikost pracovní mezery, posuv pojezdu. Vliv těchto parametrů byl otestován a zjišťovalo se optimální nastavení pro získání nejnižší hodnoty drsnosti povrchu. Metodou AMF tool bar se obráběl povrchu obrobku vyrobeného z Ti-5Al-2.5Sn, jako abrazivo byl použit karbid křemíku a jako nosné médium byla použita anti-korozní emulze. Dosahované hodnoty drsnosti povrchu v závislosti na již zmíněných parametrech jsou znázorněny n obrázcích č.12; 13; 14. Z těchto měření bylo zjištěno optimální nastavení procesu AFM tool bar rychlosti otáčení nástroje 19 200 ot/min, posuvu pojezdu 500 mm/min a 500 cyklů. Z tohoto nastavení se dosáhlo drsnosti povrchu  $R_a = 0,1028 \mu\text{m}$ . [18]

Obrázek 12: Drsnost povrchu AMF tool bar



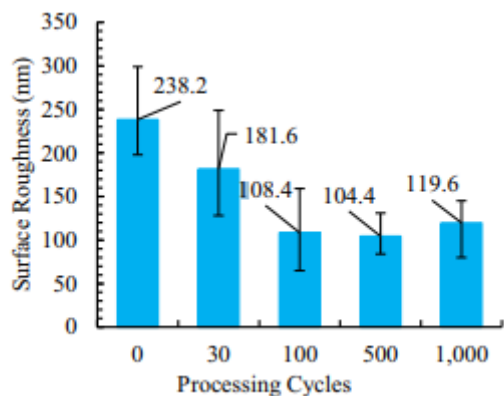
V grafu (a) jsou znázorněny hodnoty drsnosti povrchu dosažené za použití různých velikostí abrazivních částic získaných při obrábění s pracovní mezerou mezi tyčovým nástrojem a obrobkem 0,05 mm a v grafu (b) při pracovní mezeře 0,15 mm viz obrázek č. 12. Z grafů (a) a (b) je patrné, menší pracovní mezera zvyšuje efektivitu této metody. Nejnižší naměřená drsnost povrchu je 0,01044  $\mu\text{m}$  při obrábění abrazivním zrnem o velikosti 1200# a pracovní mezeře 0,05 mm. V grafu (c) je tento aspekt znázorněn na naměřených hodnotách drsnosti povrchu v závislosti na velikosti pracovní mezery. Tyto hodnoty byly dosaženy obráběním abrazivního zrna o velikosti 1200# viz. obrázek č. 12. [18]

Obrázek 13: Drsnost povrchu v závislosti na rychlostech AMF tool bar



V grafech (a) a (b) je znázorněna závislost drsnosti povrchu na rychlostech otáčení tyčového nástroje a posuvu pojezdu. Nejnižších hodnot drsnosti povrchů  $R_a = 0,1044 \mu\text{m}$  se dosáhlo za 19 200 ot/min tyčového nástroje a posuvu pojezdu 500 mm/min. Obě tyto hodnoty pak byly vybrány jako optimální nastavení obráběcích parametrů metody AMF tool bar pro obrábění dílu z Ti-5Al-2,5Sn.

Obrázek 14: Drsnost povrchu v závislosti na počtu pracovních cyklů AMF tool bar



Závislost drsnosti povrchu na počtu pracovních cyklů je znázorněna na obrázku č. 14. Z té vyplývá, že nejnižší hodnoty drsnosti povrchu  $R_a = 0,1044 \mu\text{m}$  při 500 pracovních cyklech. Opět byla tato hodnota vybrána jako optimální parametr obrábění pro získání nejnižší drsnosti povrchu  $R_a 0,1028 \mu\text{m}$ . [18]

## 2.3 Magnetic abrasive finishing process – Proces magnetického abrasivního dokončování (Magnetické broušení)

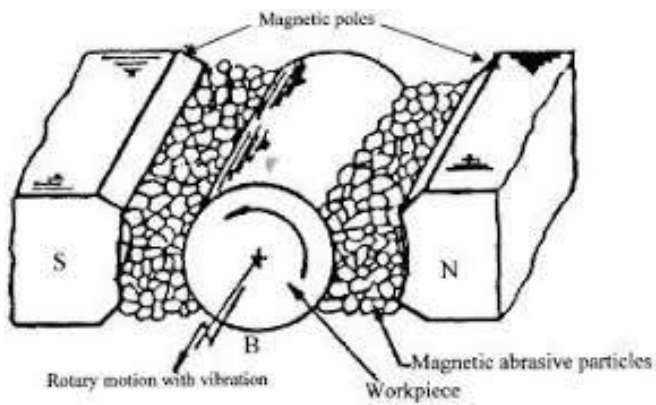
Při běžných dokončovacích procesech jako jsou broušení, lapování, honování, se používá tuhý obráběcí nástroj, který může obráběním vyvolat v obrobku normálové napětí, a tím způsobit vznik mikrotrhlin. Mikrotrhliny snižují pevnost a spolehlivost obrobku. Magnetické broušení (MAF) je pokročilý dokončovací proces, kde je obrobek upnut mezi dva opačné magnetické póly a mezera mezi obrobkem a magnety je vyplněna abrazivními magnetickými částicemi tvořící takzvaný flexibilní magnetický kartáč, jehož řezná síla je přímo řízená magnetickým polem. V důsledku malých řezných sil působících na abrazivní částice se minimalizuje vznik mikrotrhlin na povrchu obrobku. Obzvláště pak u obrobků tvrdého, nebo křehkého materiálu. [6]

### 2.3.1 Princip magnetického broušení (MAF)

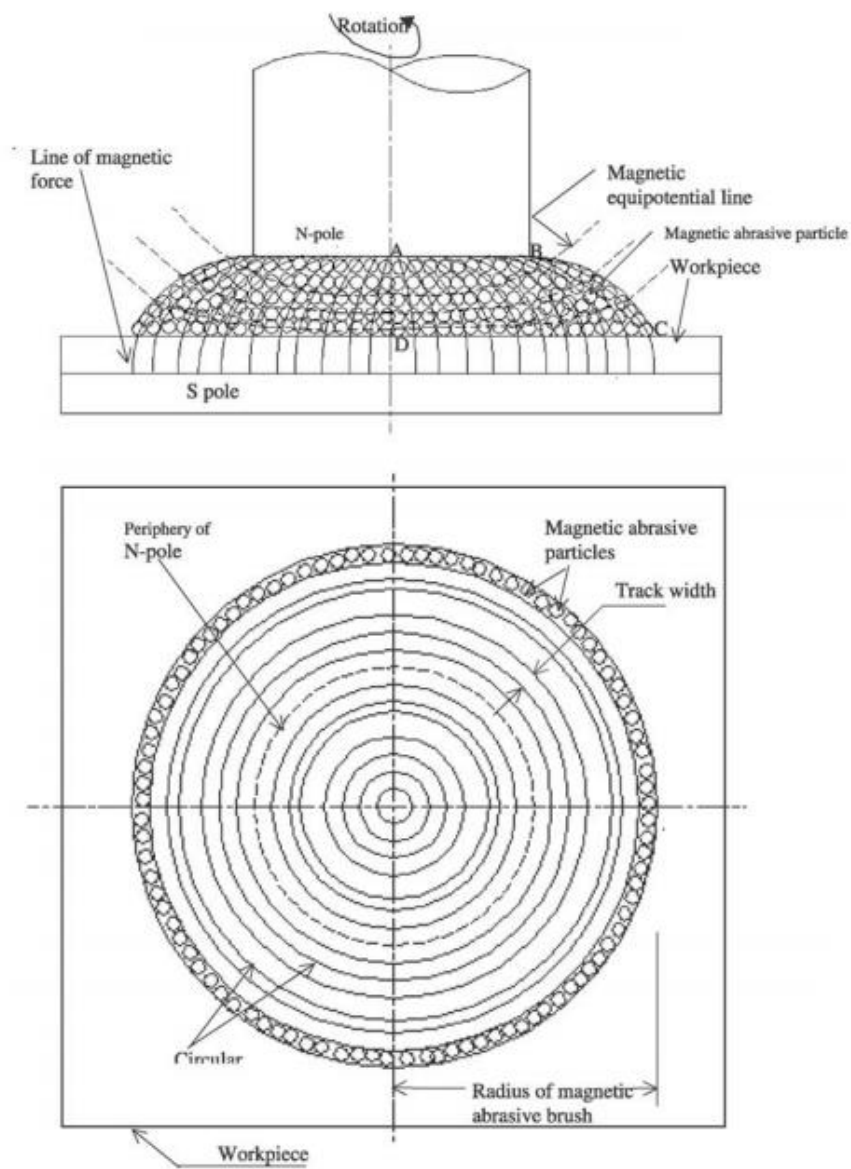
Jak jsem se již zmínil, při použití magnetického broušení je obrobek upnut mezi dva opačné magnetické póly s mezerou mezi obrobkem a magnety vyplněnou abrazivními magnetickými částicemi tvořící flexibilní magnetický kartáč. Ten může být buď vázaný nebo nevázaný. Vázaný je tvořen slinutými feromagnetickými částicemi a abrazivním práškem, zatímco nevázaný je tvořen mechanickou směsí feromagnetických částic, abrazivním práškem s malým množstvím maziva.

Odebírání materiálu v podobě lupínek je založeno na mikro řezech, vznikajících pomocí magnetické a mechanické energie. Magnetické pole svými účinky vytváří magnetický abrazivní pružný kartáč v mezeře pracovní soustavy. Pomocí rotace N pólu magnetu (plošné broušení), nebo obrobku (válcové broušení vnitřních i vnějších ploch) se generuje tangenciální síla  $F_t$  na břitech abrazivních částic, zatímco magnetická energie vyvíjí normálovou  $F_z$  a radiální  $F_r$  sílu. Normálová síla způsobuje tlakovou reakci s povrchem obrobku. Tento tlak je odpovědný za vnikání řezných hran do obrobku. Výslednice těchto sil, působících na abrasivo, zajišťuje odstraňování materiálu obrobku po kruhových drahách. Válcové magnetické broušení je vidět na obrázku č. 15 a plošné magnetické broušení je vidět na obrázku č. 16.

Obrázek 15: Upnutí rotačního obrobku (MAP) [7]



Obrázek 16: Upnutí plošného obrobku (MAP) [6]





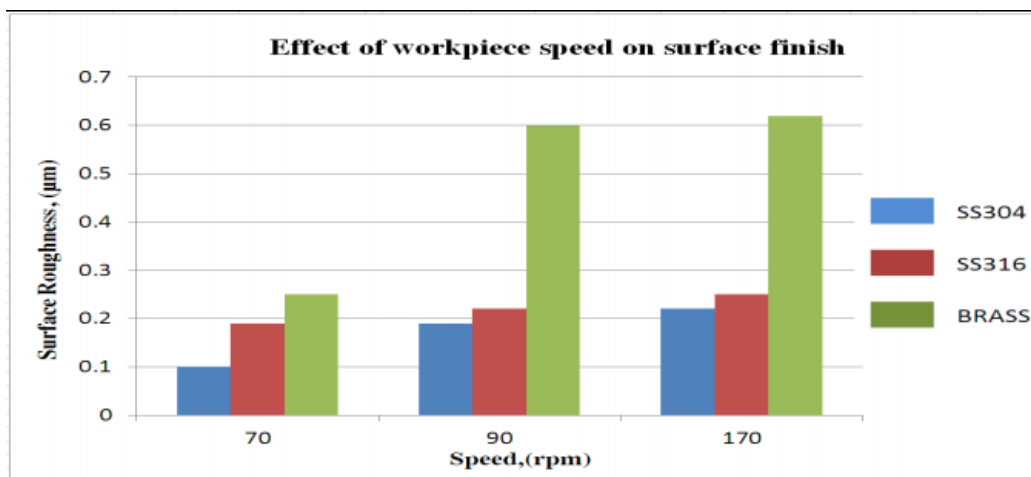
### 2.3.2 Výhody procesu MAF

Tato metoda dokončování povrchu se dá použít jak na broušení plošných obrobků, tak i na broušení vnitřních i vnějších ploch rotačních obrobků. Při broušení je nízká pravděpodobnost výskytu mikrotrhlin na povrchu obrobku. Dosahuje vysokých kvalit drsnosti povrchu až v nm. Proces MAF nabízí také mnoho dalších výhod, jako je ostření abrasiva při broušení obrobku, přizpůsobivost tvaru obrobku a ovladatelnost.[6] [7]

### 2.3.3 Drsnost povrchu MAF

Dosahované hodnoty drsnosti povrchu získané aplikováním metody MAF jsou závislé na čtyřech základních brousících parametrech, a to na tvrdosti materiálu, ze kterého je obrobek vyroben, rychlosti, kterou se obrobek otáčí, mezeře mezi obrobkem a magnetem (pracovní mezeře) a velikosti magnetické indukce. Tyto závislosti drsnosti povrchu ozkoušených na obrobkách z materiálu SS304, SS316, Brass Tubes jsou zvýrazněny na obrázcích č. 17; 18; 19; 20.

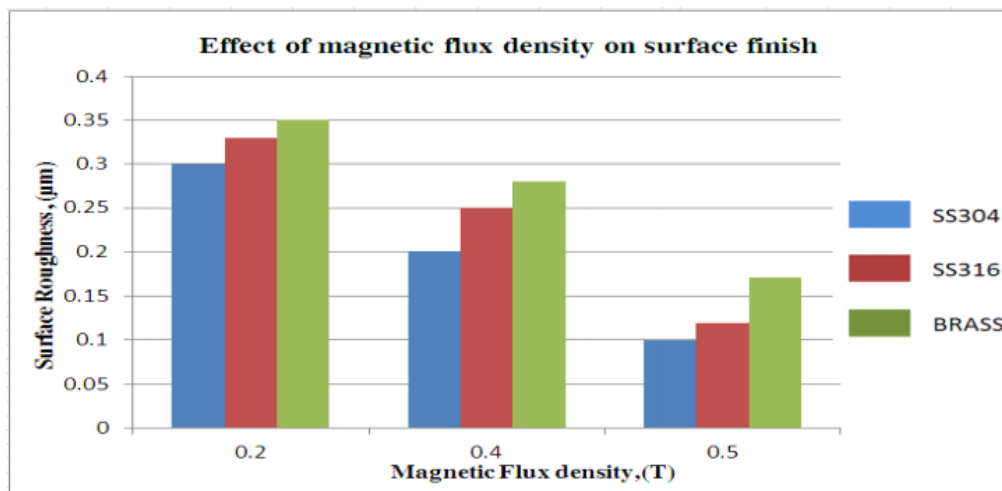
Obrázek 17: Drsnost povrchu v závislosti na rychlosti otáčení obrobku



V tomto grafu je znázorněn vliv rychlosti otáčení obrobku na výslednou hodnotu drsnosti povrchu. Čím nižší byla rychlost obrobku, tím se dosáhlo nižších hodnot drsnosti povrchu, a tak i zvýšení jakosti broušeného povrchu. Zatímco za vyšších otáček obrobku nedochází k tak výraznému snížení drsnosti jako při malých rychlostech obrobku.

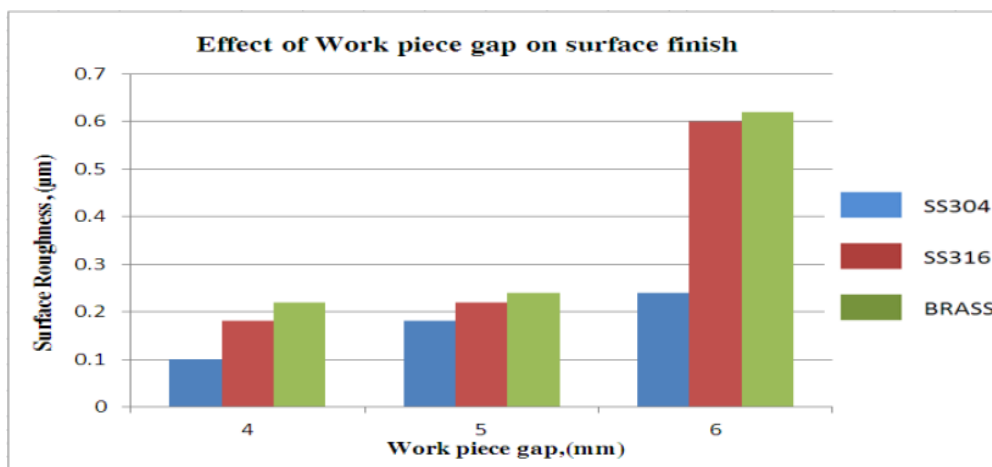


Obrázek 18: Drsnost povrchu v závislosti na velikosti magnetické indukce



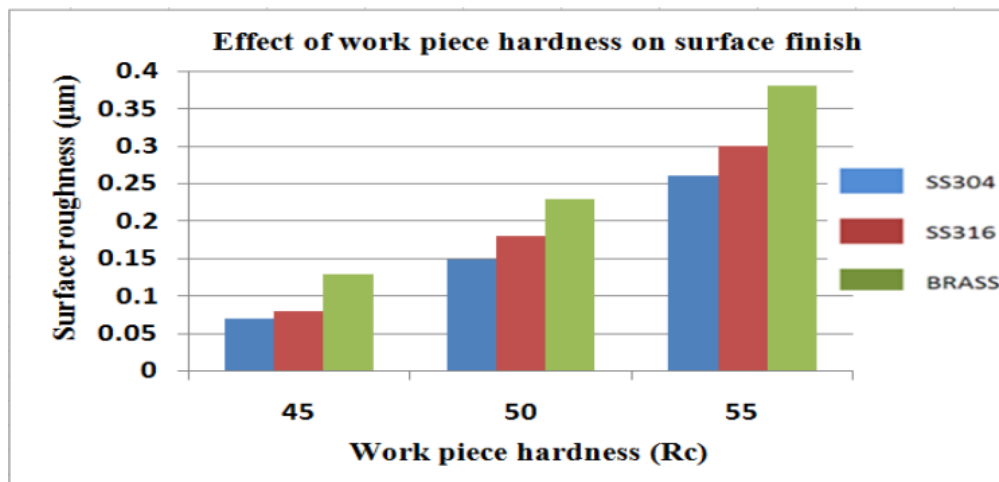
Velikost magnetické indukce ovlivňuje magnetickou sílu, a tak zvyšuje celkovou efektivitu flexibilního magnetického kartáče. Čím vyšší je magnetická indukce broušení, tím se dosahuje nižších hodnot drsnosti povrchu viz. obrázek č. 18.

Obrázek 19: Drsnost povrchu v závislosti na pracovní mezeře



Z tohoto grafu je patrné, že velikost pracovní mezery také ovlivňuje drsnost povrchu. Čím je menší velikost pracovní mezery mezi magnetem a obrobkem, tím jsou dosaženy menší hodnoty drsnosti povrchu. Dokonce dochází až ke snížení o 0,4 µm při zmenšení pracovní mezery ze 6 mm na 5 mm při broušení materiálů SS316 a BRASS. Při dalším snížení pracovní mezery dochází už jen k nepatrnému snížení drsnosti povrchu.

Obrázek 20: Drsnost povrchu v závislosti na tvrdosti dokončovaného povrchu



Obecně u technologií broušení platí, že čím pevnější a tvrdší materiál, tím se hůře brousí kvůli odporu materiálu a generování vysokých teplot, které poškozují brousící nástroj. Zde je znázorněno, že s nízkou tvrdostí materiálu se dosahuje mnohem nižších hodnot drsnosti než u broušení tvrdých materiálů. [15]

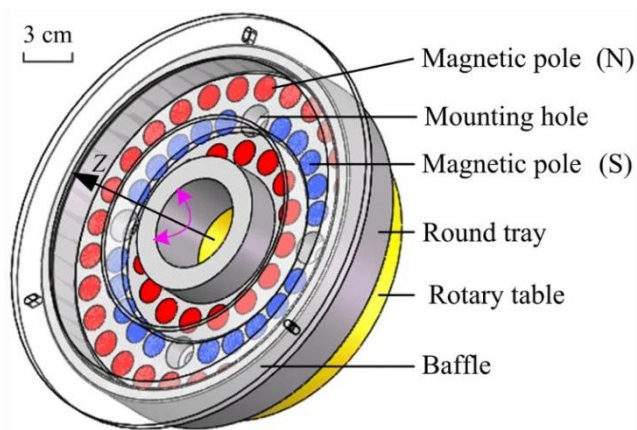
#### 2.3.4 Inovace nástroje procesu MAF

V článku *Experimental investigations on magnetic abrasive finishing of Ti-6Al-4V using a multiple pole-tip finishing tool* se autoři Yebing Tian, Chen Shi, Zenghua Fan pokusili vylepšit nástroj pro magnetické broušení. Cílem celého pokusu bylo zefektivnění celého magnetického broušení prováděného na široce využívané slitině titanu Ti-6Al-4V, který se pro své vlastnosti používá jako implantáty a protézy, v leteckém a zbrojním průmyslu, obzvláště v letadle Boeing 787, lodním průmyslu a chemickém průmyslu.[8]

##### 2.3.4.1 Design nástroje

Nástroj se skládá z kulatého podnosu, šedesáti čtyř otvorů ve třech kruzích pro umístění permanentních magnetů a čtyři montážních otvorů. Kulatý podnos nástroje se připevňuje pomocí montážních otvorů k otočnému stolu, čímž se zajišťují potřebné otáčky. Magnety jsou umístěny na spodní straně kulatého podnosu do šedesáti čtyř děr ve třech kruzích, každý kruh s jedním magnetickým pólem. V případě tohoto experimentu byla použita kombinace magnetických pólů NSN. Abrasivum se umísťuje do přepážky vyrobené z akrylové desky viz. obrázek č. 21.[8]

Obrázek 21: Inovativní nástroj MAF



#### 2.3.4.1 Dosažené výsledky

Účelem tohoto pokusu bylo prozkoumat (stanovit) vlastnosti inovativního nástroje pro metodu MAF. Bylo provedeno mnoho měření k porovnání vlivu pracovního času na drsnosti povrchu [Ra] obrobku. Celý experiment byl prováděn za těchto podmínek viz. tabulka 2. Měření účinků nastavení rychlosti otáčení vřetene, rychlosti rotačního stolu a pracovní mezery bylo prováděno zvlášť a drsnosti povrchu se měří každých 10 minut pomocí komerčního drsnoměru (TR200). [8]

Tabulka 2 Podmínky pokusu

materiál obrobku	Ti-6Al-4V
počáteční drsnost [ $\mu\text{m}$ ]	~ 1,2
rychlost otáčení vřetena [n/min]	300, 500, 700
rychlost rotačního stolu [n/min]	100, 130, 160
pracovní mezera (prostor) [mm]	0,7; 1,1; 1,5
mazivo	No.64
velikost částic karbidu železa [ $\mu\text{m}$ ]	250
velikost částic SiC [ $\mu\text{m}$ ]	150
poměr železo: SiC	9:1

### 1) Variace rychlostí otáčení vřetene.

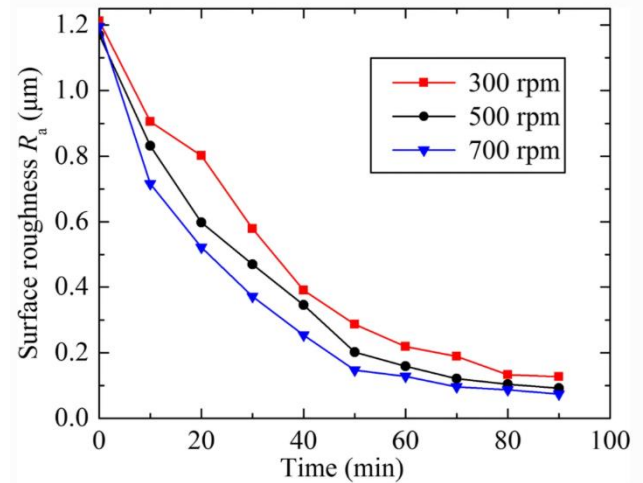
Otáčky rotačního stolu byly nastaveny na 160 n/min a pracovní mezera 0,7 mm. Po 90 min pracovního času nástroje se dosáhlo drsností povrchu 0,127  $\mu\text{m}$  při otáčkách vřetene 300 n/min, pak 0,091  $\mu\text{m}$  při 500 n/min a 0,073  $\mu\text{m}$  při 700 n/min viz. obrázek č. 22. *The surface roughness of 0.073  $\mu\text{m}$  on the finished surface was obtained from initial value of 1.195  $\mu\text{m}$  under the action of 700 - rpm spindle rotational feed, which improved by over 94 %.*<sup>7</sup>[8]

### 2) Variace rychlosti rotačního stolu

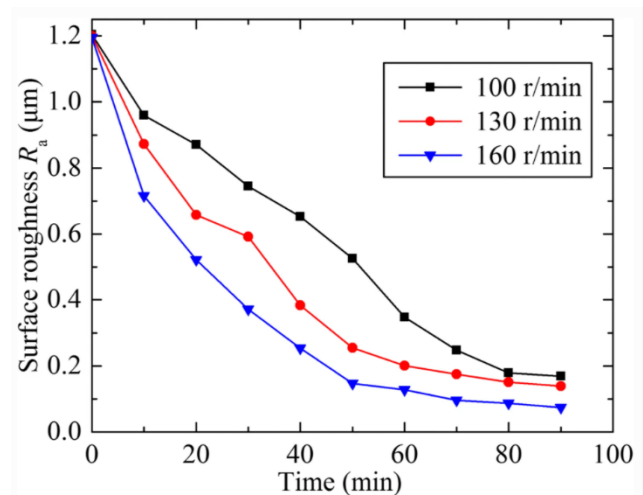
Otáčky vřetene byly nastaveny na 700 n/min a pracovní mezera 0,7 mm. Po 90 min pracovního času nástroje se dosáhlo drsností povrchu 0,169  $\mu\text{m}$  při rychlosti rotačního stolu 100 n/min, pak došlo ke snížení drsnosti na 0,138  $\mu\text{m}$  při 130 n/min a na 0,073  $\mu\text{m}$  při 160 n/min viz. obrázek č. 23. [8]

### 3) Variace velikosti pracovní mezery

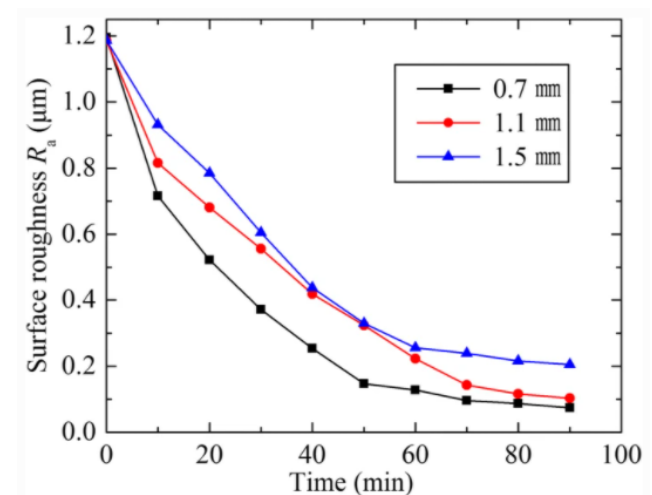
Otáčky vřetene byly nastaveny na 700 n/min a rychlost rotačního stolu na 160 n/min. Po 90 min pracovního času nástroje se dosáhlo drsností povrchu 0,073  $\mu\text{m}$  při pracovní mezeře nastavené na 0,7 mm, pak 0,102  $\mu\text{m}$  při 1,1 mm a 0,205 při 1,5 mm pracovní mezery viz. obrázek č. 24. [8]



Obrázek 22: Drsnost povrchu závislá na variaci otáček vřetene



Obrázek 23: Drsnost povrchu závislá na rychlosti rotačního stolu



Obrázek 24: Drsnost povrchu závislá na velikosti pracovní mezery

<sup>7</sup> Tian, Y., Shi, C., Fan, Z. *et al.* Experimental investigations on magnetic abrasive finishing of Ti-6Al-4V using a multiple pole-tip finishing tool. *Int J Adv Manuf Technol* **106**, 3071–3080 (2020). <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04871-z>

### 3. Technologie dokončování povrchu AERO Vodochody

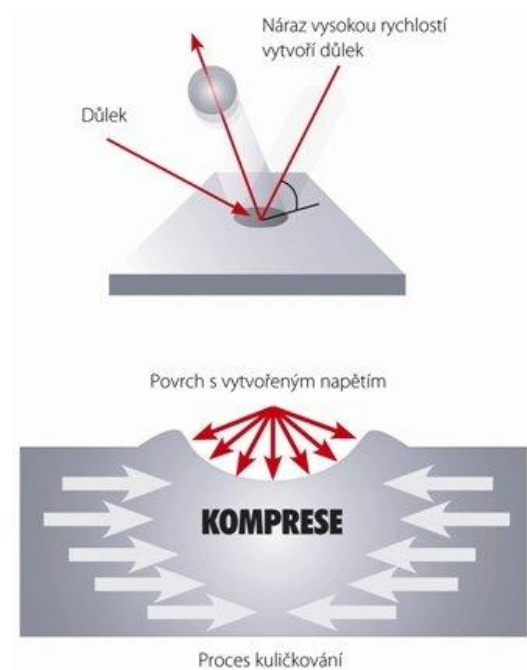
V této části práce se chci zaměřit na popis principu technologií dokončování povrchů a jejich dosahované parametry jakosti povrchu, které používá AERO Vodochody ve své výrobě, pro následné porovnání s hodnotami dosahovanými s výše uvedenými moderními a modernizovanými technologiemi. Zaměřil jsem se především na technologie, které si byly podobné použitím a vlivem na výslednou jakost povrchu jako je zpevnění povrchu, zlepšení geometrie výrobku a snížení drsnosti povrchů. Mezi tyto technologie patří kuličkování a broušení.

#### 3.1 Kuličkování

Jedná se o proces tváření za studena používaný k povrchové úpravě kovových součástí, aby se zabránilo únavě, koroznímu praskání a mezikrystalové korozi, a tak se zvýšila životnost součástí, které jsou cyklicky namáhány, jako jsou třeba součásti v automobilovém, leteckém nebo lodním průmyslu, a zároveň snižuje drsnost povrchu. Abychom docílili této úpravy povrchu, je povrch součásti ostřelován velkým množstvím tvrdých kulovitých částic o vysokých rychlostech až 150 m/s pomocí proudu stlačeného vzduchu nebo kapaliny. Při dopadu těchto částic na ostřelovaný povrch dochází k nárazům o velikém tlaku fungujícím jako dopad kladiva, který tak vytvoří prohlubeň v místě dopadu, pod kterou se koncentruje tlakové napětí. Při dalších dopadech částic se vytváří mnoho takových překrývajících se prohlubní. Vzniklé koncentrované tlakové napětí zpevňuje povrch ostřelované součásti. Celý tento proces se provádí ve speciálních komorách.

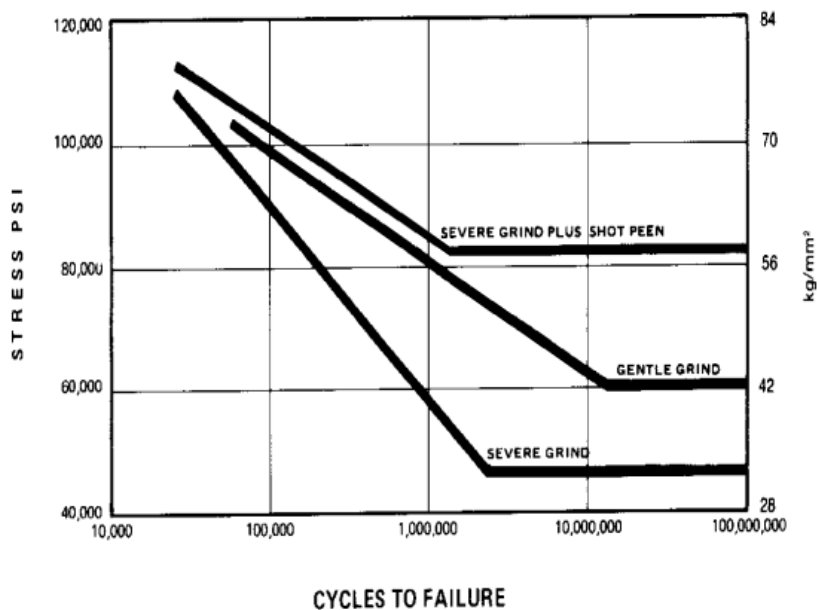
Obrázek 25: Princip kuličkování

Jako aktivní částice se používají kuličky vyrobené z různých organických nebo minerálních či kovových materiálů. Nejčastěji se používají kuličky z litiny nebo oceli o průměru 0,3 – 3 mm. Pro metodu balotínování se například používají skleněné kuličky o velikostech 0,03 – 0,8 mm. Výhodou kovových kuliček od organických či minerálních je jejich vyšší pevnost, která zaručuje, že se po nárazu na ostřelovaný povrch tolik nepoškozují. Jejich nevýhodou je, že zanechávají stopy otěru a mohou způsobit korozi. Keramické a skleněné oproti kovovým nezanechávají stopy po otěru, ale jsou křehčí, a tak se při dopadu poškozují.



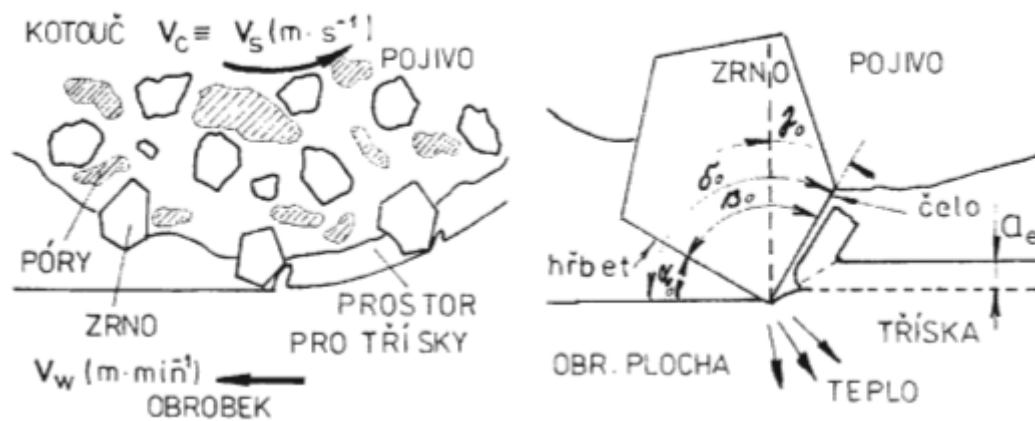
Základním přínosem této metody je zpevnění povrchu a zlepšení mechanických vlastností materiálu. Kuličkovaná součást dokáže ustát vyšší hodnoty napětí po vyšší počet cyklů, během kterých byla namáhána, než nekuličkované součásti. K tomuto zpevnění dochází až do hloubky 0,25 mm u měkkých materiálů, jako jsou třeba hliníkové slitiny, a do menší hloubky v případě pevných materiálů. Zbytková napětí v tahu a křehkost povrchu, které snižují celkovou odolnost materiálu proti únavě, mohou být generovány například vysokou teplotou povrchu způsobené hrubovacím broušením. Hodnoty zbytkového napětí se mohou blížit maximální pevnosti v tahu broušeného materiálu. Proto se po broušení aplikuje kuličkování, jehož vliv na broušenou plochu může zamezit škodlivým vlivům zbytkového tahového napětí viz. obrázek č.26. Metodou kuličkování se také snižuje drsnost povrchu, ta se po kuličkování pohybuje v rozmezí mezi 0,8 až 1,6  $\mu\text{m}$ . [11] [14]

Obrázek 26: Graf poukazující na zvýšení životnosti povrchu po použití kuličkování



### 3.3 Broušení

Jedná se o jednu z nejstarších metod obrábění materiálů. Materiál je odebrán z povrchu záběrem vícebřitého nástroje s geometricky neurčitými břity vyrobených z náhodně umístěných zrn brusiva spojených pojivem v brusný kotouč. Můžeme brousit buď vnější rotační plochy, vnitřní rotační plochy nebo rovinné plochy. Velkou nevýhodou této metody je vysoké vyvinuté teplo při úběru materiálu způsobené velkým počtem záběrů v závislosti na počtu zrn v aktivní části nástroje. Proto se při broušení používají procesní kapaliny, které snižují ono vyvolané teplo. U broušení leteckých materiálů se setkáváme především s obráběním titanových slitin. Zde vzniká velké namáhání brousícího nástroje způsobené malou tepelnou vodivostí titanu, protože v místě řezu dochází k vysokému nárůstu teploty. Další výhodou titanu je jeho pevnost, což je ale zároveň problém při jeho obrábění, kdy narůstají složky řezné síly a spolu s vysokou teplotou v místě řezu způsobují opotřebení brousících kotoučů.[9] [10]



Obrázek 27: Záběrové podmínky břítu brousícího kotouče

Brusné materiály se dělí na přírodní a syntetické. Nejčastěji se však používají materiály jako oxid hlinitý, umělý korund, karbid křemíku. Druh brusného materiálu se volí v závislosti na broušeném materiálu. V případě broušení ocelí, temperované litiny, tvrdých bronzů je vhodný umělý korund, zatímco pro broušení šedých litin, mosazi, mědi a lehkých kovů se používá karbid křemíku. Nedílnou součástí brusného kotouče je pojivo, které musí splňovat určité podmínky, například odolávání vůči vlivům vysokých teplot a chladících kapalin. To stmeluje brusná zrna v požadovaný tvar brusného kotouče. Jako pojiva se používá keramické, silikonové, magnezitové pojivo nebo pojiva z umělé pryskyřice. [11]

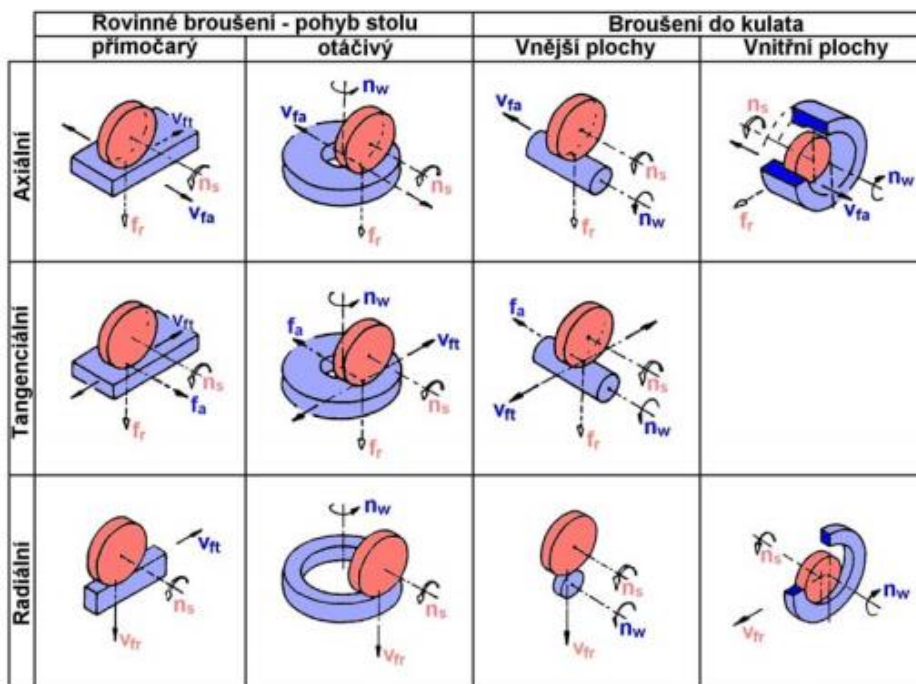


Dosahované parametry přesnosti rozměrů a drsnosti povrchů, které jsme schopni dosáhnout pomocí dokončovací metody broušení, jsou znázorněny v tabulce číslo 3. S těmito hodnotami se již při porovnání technologií dá počítat. Pro nás však bude nejdůležitější poslední řádek, a to rovinné broušení, protože samotný pokus inovace magnetického broušení byl prováděn na rovinné ploše.

Tabulka 3 Přesnost rozměrů a drsnost povrchu broušení [11]

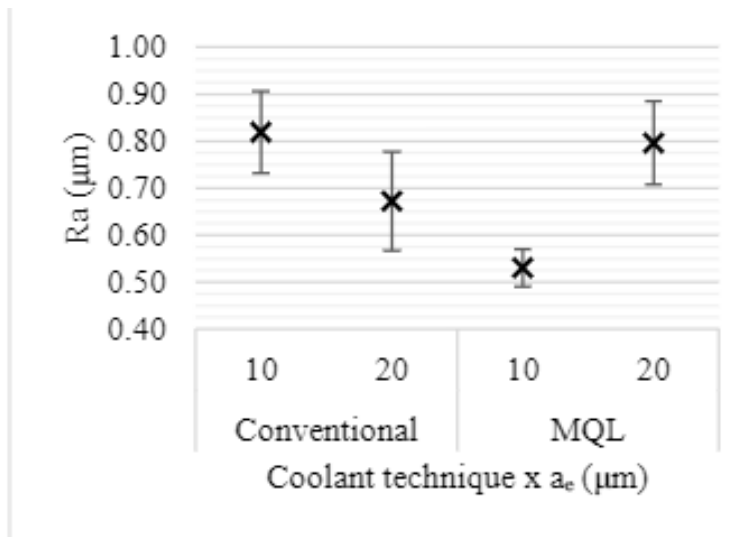
Metoda broušení		Přesnost rozměrů		Drsnost povrchu	
		IT		Ra [ $\mu\text{m}$ ]	
		střední	rozsah	střední	rozsah
Vnější rotační	Hrubovací	10	9 – 11	2,4	0,8 - 3,2
	Dokončovací	5	5 – 6	0,4	0,2 - 0,6
	Jemné	4	3 – 5	0,2	0,05 - 0,4
Vnitřní rotační	Hrubovací	10	9 – 11	2,4	1,6 - 3,2
	Dokončovací	6	5 – 7	0,8	0,4 - 1,6
	Jemné	5	3 – 6	0,2	0,05 - 0,4
Rovinné	Hrubovací	10	9 – 11	2,4	1,6 - 3,2
	Dokončovací	6	5 – 7	0,8	0,4 - 1,6
	Jemné	5	3 – 6	0,2	0,0 - 0,4

Obrázek 28: Typy broušení





Abychom měli porovnání co nejvíce kvalitní, je potřeba zvážit kvalitativní výsledky na stejném materiálu, na kterém byl pokus s magnetickým broušením prováděn, tedy na slitině titanu Ti-6Al-4V, a se stejným brousícím materiálem, kterým je v tomto případě karbid křemíku. Z tohoto důvodu jsem našel experiment, v němž se brousí povrch titanové slitiny Ti-6Al-4V brousícím kotoučem z karbidu křemíku v různých podmínkách. Během tohoto experimentu se měřila drsnost obráběného povrchu titanu za použití dvou různých metod přívodu chladicí kapaliny (maziva), a to konvenční metodou a MQL metodou (minimální množství maziva – Minimum quantity of Lubrication). Dále se pro každou metodu provádělo dvojce broušení s hloubkou třísky 10 a 20  $\mu\text{m}$ . Výsledky tohoto experimentu byly znázorněny v grafu obrázek č. 29. Z tohoto grafu je viditelné, že u konvenční metody chlazení docházelo k mnohem nižší drsnosti při variantě s hloubkou třísky o velikosti 20  $\mu\text{m}$ , zatímco u metody MQL se dosáhlo úplně nejnižší drsnosti povrchu při hloubce třísky o velikosti 10  $\mu\text{m}$ . [13]



Obrázek 29: Drsnost povrchu broušení titanové slitiny

## 4. Porovnání dokončovacích metod

V této části práce porovnávám dokončovací metody laser shock peening (3D LSP), abrasive flow machining moving mandrel a magnetické broušení s inovací nástroje s metodami dokončování povrchu, které se používají v leteckém průmyslu. Přesněji jsou to technologie, kterými disponuje AERO Vodochody a aplikují je ve výrobě. Mezi tyto metody patří již výše zmíněné a popsané metody kuličkování, honování a broušení. Porovnávám metody, které jsou si podobné principem použití, a hlavně výsledným efektem na obrobený povrch výrobku.

### 4.1 Kuličkování x Laser shock peening

Tyto dvě metody jsou téměř totožné z hlediska principu použití. Oběma metodami zpevňujeme povrch součástí pomocí plastických deformací vzniklých z ostřelování povrchu aktivními částicemi o vysokých rychlostech, čímž se zvyšuje životnost povrchu. Zde však jejich podobnost končí.

#### 4.1.1 Aktivní částice

Základním rozdílem mezi těmito metodami je typ aktivní částice dopadající na povrch součásti. Jako aktivní částice se pro kuličkování používají kulovité částice z různých materiálů, nejčastěji z keramiky a oceli, mohou však být i například ze skla. Oproti tomu metoda využívající vysokovýkonný laser má za aktivní částice emitované fotony v podobě koherentních paprsků.

#### 4.1.2 Energetická náročnost

Pro udělení rychlosti aktivních částic při kuličkování se používá proud vody nebo stlačeného vzduchu, ale k využití laseru je třeba zdroj velké energie pro emitování fotonů.

#### 4.1.3 Kvalita povrchu

Obě tyto metody se používají pro zpevnění povrchu a zvýšení mechanických vlastností ostřelované součásti, přeměňují zbytkové tahové napětí na tlakové, snižují pórovitost a zvyšují tvrdost povrchu. Při použití konvenční metody kuličkování dosahujeme zpevnění povrchu v hloubce do 0,25 mm, ale kuličkováním měkkých materiálů, jako jsou například slitiny hliníku, tato metoda způsobuje zvýšení drsnosti povrchu dopadajícími aktivními částicemi. Při kuličkování pevnějších materiálů se hloubka zpevněné vrstvy snižuje. Oproti tomu metoda LSP<sup>8</sup> zpevňuje materiál až do desetinásobné hloubky kuličkování, v tomto případě tedy až do 2,5 mm.

---

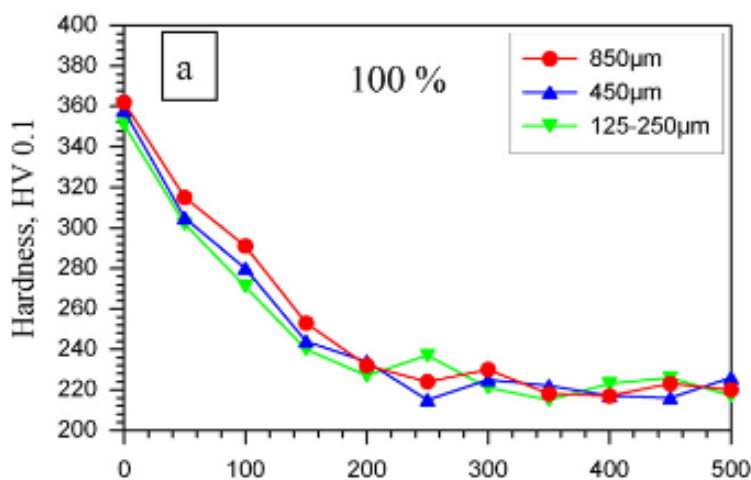
<sup>8</sup> Laser shock peening

#### 4.1.4 Shrnutí

Metoda LSP je velice progresivní metoda zpevňování povrchů. Dosahuje vyšších hloubek zpevnění než konvenční metoda kuličkování. Při zpevňování povrchu měkčích materiálů je mnohem výhodnější využít metodu LSP, protože při použití kuličkování se může zvýšit drsnost povrchu a je třeba ji následně snížit, čímž se může narušit kvalita zpevněného povrchu. Velkou nevýhodou oproti metodě kuličkování je energetická a cenová náročnost metody LSP. Důvodem je pořizovací cena technologie a zároveň spotřeba veliké energie pro emitování fotonů laseru.

Mezi modernější verze technologie LSP patří i technologie 3D LSP, která umožňuje ošetřovat vystavované vrstvy dílu vyráběných 3D tiskem přímo v procesu tisku. Tato metoda oproti post výrobnímu ošetření kuličkováním nebo metodou LSP navyšuje koncertované tlakové napětí do hloubek větších než 1 mm, snižuje pórovitost součásti a zvyšuje geometrickou přesnou tisknutého dílu, čímž zvyšuje efektivnost a přesnost aditivní výroby a prodlužuje životnost vyrobených součástí až 57krát oproti dílům vyrobených konvenčními metodami. Zvyšuje také tvrdost ošetřovaného povrchu blíže k jeho hranici, příkladem je ošetření povrchu nerezové oceli 316 L viz. obrázek č. 6, kde nejvyšší tvrdost povrchu byla 391 HV v hloubce 50  $\mu\text{m}$ . Při použití konvenční metody kuličkování na stejné nerezové oceli 316 L je z grafu, viz. obrázek č. 30, viditelné, že se dosahované hodnoty tvrdosti v hloubce 50  $\mu\text{m}$  v závislosti na velikosti aktivních částic pohybují pod hodnotou 320 HV, tedy menších hodnot než při použití metody 3D LSP. [17]

Obrázek 30: Tvrdost 316 L po kuličkování



## 4.2 Broušení x Abrasive flow machining movable mandler x tool bar

Obě tyto metody dokončování povrchu se používají pro snížení drsnosti úběrem vícebřitého nástroje. Broušení se dá použít jak na vnitřní, tak vnější válcové plochy a rovinné plochy. AMFmm<sup>9</sup> se používá především na tvarově složité vnitřní plochy, zatímco inovace AFM tool bar byla použita na obrábění rovinné plochy. Při broušení se řezné síly vyvolávají pohybem nástroje i obrobku, zatímco při dokončování povrchu metodou AFMmm se řezné síly vyvolávají pohybem natlakovaného abrazivního brusiva ve speciálním zařízení. V případě metody AMF tool bar se natlakované abrazivum pohybuje pomocí rotace tyčového nástroje, který může být zapojen do vřetene CNC nebo NC strojů, a tak není vyžadováno žádné speciální zařízení pro použití této metody.

### 4.2.1 Obráběcí nástroj

Jako brousící nástroj se při konvenční metodě broušení používají brusná zrna karbidu křemíku, oxidu uhličitého a umělého korundu spojená pojivem v brusný kotouč požadovaného tvaru. Metoda AMF využívá jako obráběcí nástroj natlakované abrazivní médium, které se skládá z viskoelastického polymeru spolu s abrazivními částicemi. Běžně používanými polymerními médii jsou polyborosiloxan a silikonový kaučuk. Jako abrazivní částice se nejčastěji používají částice karbidu křemíku, oxidu hlinitého, karbidu boru a polykrystalického diamantu. V případě experimentu nové metody AFM tool bar se nepoužívá natlakované abrazivní médium, ale i přesto do něj musí být obrobek zcela ponořen.

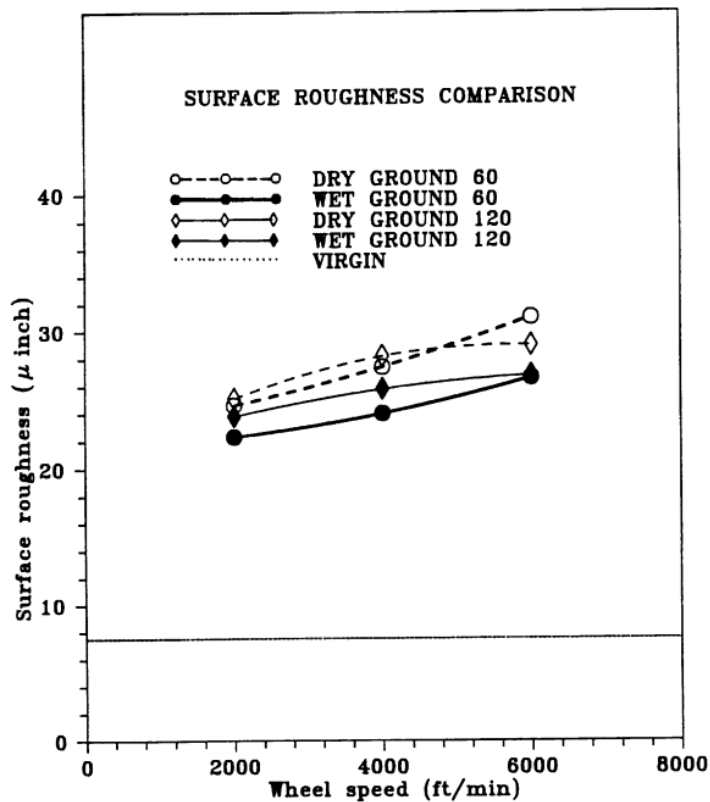
### 4.2.2 Kvalita povrchu

Dokončovacím broušením rovinných a vnitřních válcových ploch jsme schopni dosáhnout hodnot drsností povrchu v rozmezí  $R_a = 0,4 - 1,6 \mu\text{m}$ . Při jemném broušení rovinných ploch se dosahuje hodnot  $R_a = 0,0 - 0,4 \mu\text{m}$  a vnitřních válcových ploch  $R_a = 0,05 - 0,4 \mu\text{m}$ . Metodou AMFmm se při obrábění obrobku z materiálu AISIS H11 se dosáhlo nejnižší drsnosti povrchu  $R_a = 0,07 \mu\text{m}$ . Touto dosaženou hodnotou drsnosti povrchu se AFM mm rovná drsnostem dosahovaných jemným broušením vnitřních válcových ploch. Při použití metody AFM tool bar se dosáhlo nejnižší drsnosti povrchu  $R_a = 0,1028 \mu\text{m}$ , takže obdobně jako metoda AFMmm dosahuje obdobných kvalit jako metoda jemného broušení. Avšak broušení titanových slitin je velmi náročné z hlediska pevnosti a tepelné vodivosti obráběného povrchu, a tak se dosahované hodnoty mohou lišit. Proto jsem vyhledal práci, ve které se měřila drsnost povrchu titanové slitiny Ti-5Al-2.5Sn broušené karbidem křemíku viz. obrázek č. 31.

---

<sup>9</sup> Abrasive flow machining movable mandler

Obrázek 31: Drsnost povrchu Ti-5Al-2.5Sn



Z tohoto grafu je patrné, že drsnost povrchu Ra neklesla pod 20  $\mu$ inch, tedy 0,508  $\mu$ m (1  $\mu$ inch = 0,0254  $\mu$ m). Takže se metodou AFM tool bar dosáhlo nižších hodnot drsnosti povrchu, a to 4,94krát nižší hodnotu než hodnoty získané broušením karbidem křemíku. [19]

#### 4.2.3 Shrnutí

Metody AFMmm a AFM tool bar jsou inovativními metodami konvenční metody AFM. Obě tyto metody se vyvinuly za účelem zvýšení použití konvenční metody v průmyslu. Metoda s pohyblivým mandlerem byla vyvinuta především pro zvýšení produktivity celého procesu dokončování povrchu, zatímco metoda AFM tool bar byla vyvinuta pro zjednodušení konvenční metody z hlediska strojů, ve kterých se tato metoda dá aplikovat. Obě inovativní technologie dosahují kvalitních hodnot drsností povrchu, které se rovnají hodnotám získaných metodou jemného broušení. V případě AFM tool bar a konvenčního broušení slitiny Ti-5Al-2.5Sn dosahuje metoda AFM tool bar mnohem vyšší kvality drsnosti povrchu.

### 4.3 Broušení x Magnetické broušení s inovací nástroje

Obě tyto dokončovací metody jsou založeny na úběru materiálu vícebřitým nástrojem. Řezné síly jsou vyvolány jak pohybem nástroje, tak i pohybem broušené součásti, nebo stolu, na kterém je broušená součást upevněna. Broušení a magnetické broušení se dají použít jak na broušení rovinných, tak i rotačních vnitřních a vnějších ploch. Základním rozdílem těchto metod je typ brousícího nástroje.

#### 4.3.1 Obráběcí nástroj

Metoda broušení pro úběr materiálu využívá vícebřitý tuhý nástroj s náhodně umístěnými zrny brusiva spojovanými pojivem. Magnetické broušení však využívá volné feromagnetické abrazivní částice, které pomocí magnetických sil vytvářejí flexibilní brousící magnetický kartáč. Výhodou tohoto nástroje je jeho flexibilita, tedy přizpůsobivost tvaru broušené plochy, oproti tuhému brousícímu kotouči, jehož poloha se musí přizpůsobovat tvaru broušené plochy. Další výhodou brousícího magnetického kartáče je jeho ostření i během broušení velmi pevných materiálů, jako jsou třeba titanové slitiny. Brousící kotouč se při broušení titanových slitin zahřívá a spolu s velkými řeznými silami způsobené odporem materiálu dochází k opotřebení kotouče, který je potřeba vyměnit.

#### 4.3.2 Kvalita povrchu

Základním účelem využití těchto metod je snížení drsnosti povrchu broušených součástí. Pomocí magnetického broušení jsme schopni dosáhnout drsnosti povrchů o hodnotách až v nanometrech. Této drsnosti můžeme dosáhnout metodou jemného broušení, a to o nejnižší drsnosti  $R_a = 0,025 \mu\text{m}$  tedy 25 nm viz. tabulka č. 1. Pokud se jedná o inovaci nástroje magnetického broušení, je třeba zohlednit materiál obrobku a materiál brousícího nástroje. Proto zde porovnám drsnosti povrchu získané broušením a magnetickým broušením titanové slitiny Ti-6Al-4V nástrojem z SiC (karbidu křemíku).

Magnetickým broušením s inovativním nástrojem bylo docíleno snížení drsnosti  $R_a = 0,073 \mu\text{m}$  při variaci otáček vřetene 700 n/min, otáčkách pracovního stolu 160 n/min a pracovní mezery 0,7 mm z původní drsnosti  $R_a = 1,2 \mu\text{m}$  viz. obrázek č. 22; 23; 24. V experimentu [13] proběhlo broušení spolu s konvenční metodou chlazení a s metodou MQL. Dosažené hodnoty drsnosti jsou znázorněny v obrázku č.29, z něhož vyplývá, že ani nejnižší naměřená drsnost povrchu není pod hodnotou  $R_a = 0,4 \mu\text{m}$ . Obdobné hodnoty byly získány pomocí dokončování magnetickým broušením během prvních 20 minut broušení. Dále se už jen drsnost povrchu snižovala až na  $R_a = 0,073 \mu\text{m}$ .

### 4.3.3 Shrnutí

Na základně výše rozebraného porovnání základních rozdílů metody broušení a magnetického broušení vyplívá, že metoda magnetického broušení je velice flexibilní metodou dokončování povrchu za účelem snížení drsnosti povrchu vnitřních a vnějších jak válcových, tak i rovinných ploch. Dosahuje stejných hodnot jako metoda jemného broušení. Obrovskou výhodou oproti broušení je brousící nástroj, takzvaný flexibilní magnetický kartáč, kterým se brousí povrch součástí. Tento kartáč se přizpůsobuje tvarům broušené součásti a během broušení se sám ostří, čímž zvyšuje životnost brousícího nástroje a nemusí se měnit tak často jako brusné kotouče. Magnetické síla, která drží abrazivní materiál při sobě v podobě kartáče, přímo řídí řezné síly abrazivních částic. Tyto řezné síly jsou oproti klasickým metodám dokončování povrchu, jako jsou honování, lapování a broušení, menší, a tak se snižuje pravděpodobnost vzniku mikrotrhlin na broušeném povrchu. Z tohoto důvodu je metoda magnetického broušení vhodnější variantou pro broušení křehkých a pevných materiálů, například slitin titanu. To bylo podpořeno porovnáním dosažených hodnot broušeného obrobku z Ti-6Al-4V karbidem křemíku SiC v 4.3.2 *Kvalita povrchu*, kde jsem porovnával metodu broušení s metodou magnetického broušení pomocí inovativního nástroje.

## 5. Závěr

Cílem této práce bylo rozebrat problematiku moderních metod dokončování povrchu a porovnat je s metodami kuličkování a broušení, aktuálně používanými v letectví. Při rozboru této problematiky jsem určil dva základní druhy dokončování povrchů, s úběrem materiálu a bez úběru materiálu. Rozebral jsem technologie bez úběru materiálu, jako je technologie Laser shock peening, a s úběrem materiálu, jako jsou technologie Abrasive flow machining a Magnetic abrasive finishing, a jejich inovace. Inovací pro laser shock peening je metoda 3D LSP. Tato metoda funguje na principu zpevňování vrstev mezi fázemi vystavování dílu 3D tiskem pomocí plastických deformací a zvyšuje tak jeho životnost v ohybu 14krát a 57krát oproti dílům vyrobených konvenčními metodami. Oproti kuličkování se dosahuje mnohem vyššího a stálějšího zpevnění přeměnou tahových zbytkových napětí na tlaková napětí v hloubkách až 10krát větších. Výhodou je i nižší drsnost při ošetřování povrchu měkčích materiálů, jako jsou slitiny hliníku. Metoda AFMmm je inovací konvenční metody AFM, která je neproduktivní a cenově náročná z důvodu pořizovací ceny složitých zařízení. Pomocí přidání pohyblivého mandleru se snížil výrobní čas, a tak se navýšila produktivita této metody. Kvalitou drsnosti povrchu  $R_a = 0,07 \mu\text{m}$  za 240 s se rovná drsnostem získaných jemným broušením  $R_a = 0,05-0,4 \mu\text{m}$ . Výhodou této metody oproti metodě broušení je její využití při obrábění komplexních vnitřních ploch, na které by bylo třeba broušení přednastavit, nebo zvolit odpovídající tvar brusného kotouče. Obdobnou inovací AMF je přidání otáčivého tyčového nástroje, který se dá upevnit do vřetene NC a CNC strojů, čímž se eliminuje potřeba speciálních strojů. Drsnost povrchu z Ti-5Al-2.5Sn po obrobení touto metodou byla  $R_a = 0,1028 \mu\text{m}$ , což je 4,9krát nižší hodnota než drsnost  $R_a = 0,508 \mu\text{m}$  po konvenčním broušení stejného materiálu stejným obráběcím materiálem, karbidem křemíku. Další moderní metodou, kterou jsem se zaobíral, je inovace metody MAF novým upraveným nástrojem. Ten umožnil broušením, obrobku z Ti-6Al-4V nástrojem z SiC, dosáhnout nejnižší drsnosti  $R_a 0,073 \mu\text{m}$ . Při porovnání dosahovaných hodnot drsnosti povrchu s metodou konvenčního broušení bylo zjištěno, že minimálních hodnot drsnosti povrchu dosahujeme již při prvních 20 minutách broušení inovovanou metodou MAF a dále se již hodnoty drsnosti zmenšují až na již zmíněných  $R_a = 0,073 \mu\text{m}$ . Jako návrh na rozšíření této práce bych určitě doporučil zorganizovat vlastní měření hodnot drsnosti povrchu metod používaných v letectví, které se mi z důvodu COVIDu nepodařilo zorganizovat. Vlastní měření by mohlo umožnit věnovat se i jiným aspektům ovlivňujících výslednou efektivnost a produktivitu těchto metod oproti moderním metodám.



## Seznam tabulek

Tabulka 1 Příklady dokončovacích metod a dosahované jakostní parametry .....	9
Tabulka 2 Podmínky pokusu.....	27
Tabulka 3 Přesnost rozměrů a drsnost povrchu broušení [11] .....	32

## Seznam obrázků

Obrázek 1: LSP (laser shock peening)[3] .....	11
Obrázek 2: Graf závislosti drsnosti povrchu na velikosti energie laseru .....	12
Obrázek 3: Graf průměrné drsnosti povrchu v závislosti na hloubce transparentní vrstvy .....	12
Obrázek 4: 3D LSP technologie.....	13
Obrázek 5: Zbytková napětí v závislosti na hloubce ošetřované plochy LSP.....	14
Obrázek 6: Tvrdost povrchu podle Vickerse.....	14
Obrázek 7: AFM.....	15
Obrázek 8: porovnání mechanismu AFM x AFMmm .....	16
Obrázek 9: Simulace proudu abraziva-AFM .....	17
Obrázek 10: Simulace proudu abraziva-AFMmm .....	17
Obrázek 11: porovnání drsnosti povrchu za čas metod AFM a AFMmm .....	18
Obrázek 12: Drsnost povrchu AMF tool bar.....	20
Obrázek 13: Drsnost povrchu v závislosti na rychlostech AMF tool bar .....	21
Obrázek 14: Drsnost povrchu v závislosti na počtu pracovních cyklů AMF tool bar .....	21
Obrázek 15: Upnutí rotačního obrobku (MAP) [7].....	23
Obrázek 16: Upnutí plošného obrobku (MAP) [6] .....	23
Obrázek 17: Drsnost povrchu v závislosti na rychlosti otáčení obrobku.....	24
Obrázek 18: Drsnost povrchu v závislosti na velikosti magnetické indukce.....	25
Obrázek 19: Drsnost povrchu v závislosti na pracovní mezeře .....	25
Obrázek 20: Drsnost povrchu v závislosti na tvrdosti dokončovaného povrchu .....	26
Obrázek 21: Inovativní nástroj MAF .....	27
Obrázek 22: Drsnost povrchu závislá na variaci otáček vřetene.....	28
Obrázek 23: Drsnost povrchu závislá na rychlosti rotačního stolu.....	28
Obrázek 24: Drsnost povrchu závislá na velikosti pracovní mezery .....	28
Obrázek 25: Princip kuličkování.....	29
Obrázek 26: Graf poukazující na zvýšení životnosti povrchu po použití kuličkování .....	30
Obrázek 27: Záběrové podmínky břitu brousícího kotouče.....	31
Obrázek 28: Typy broušení .....	32
Obrázek 29: Drsnost povrchu broušení titanové slitiny .....	33
Obrázek 30: Tvrdost 316 L po kuličkování .....	35
Obrázek 31: Drsnost povrchu Ti-5Al-2.5Sn .....	37

## Zdroje

- [1] MÁDL, Jan a Jaroslav BARCAL. Technologie obrábění. Vyd. 2., přeprac. V Praze: Nakladatelství ČVUT, 2007, c1999. ISBN 978-80-01-03752-2.
- [2] ŠUPA, Jan. Nové metody dokončování rovinných ploch [online]. Brno, 2011 [cit. 2020-11-27]. Dostupné z: <https://core.ac.uk/download/pdf/30291707.pdf>. Bakalářská práce. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Vedoucí práce Ing. Oskar Zemčík, CSC.
- [3] SCHOUKENS, G, ed. Effect of Multipath Laser Shock Processing on Microhardness, Surface Roughness, and Wear Resistance of 2024-T3 Al Alloy [online]. 2014 [cit. 2020-11-30]. Dostupné z: <https://www.hindawi.com/journals/tswj/2014/490951/>
- [4] ŠTEFANÍK, Filip. Vliv metody laser shock peening na vybrané materiálové vlastnosti [online]. Praha, 2020 [cit. 2020-11-30]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/10467/89595>. Bakalářská práce. ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE. Vedoucí práce Ing. Jan Brajer, Ph.D.
- [5] PUSAVEC, Franci a Jeni 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 [online]. Elsevier Ltd, 2014 [cit. 2020-12-09]. Dostupné z: <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0959652614003047?token=ABB000FAE1F8A92B9EE8FF6896268125DDC070F7B7C5834B5608477896C0D248B983862BD141DCEF178ADB84FD7F71D7>
- [6] JAYSWAL, S.C., V.K. JAIN a P.M. Modeling and simulation of magnetic abrasive finishing process [online]. Londýn: Springer-Verlag London Limited, 2005 [cit. 2021-02-06]. Dostupné z: doi:10.1007/s00170-004-2180-x
- [7] VISHWANATH, Patil a Ashtekar JAYDEEP. MAGNETIC ABRASIVE FINISHING [online]. Novateur Publication's International Journal of Innovation in Engineering, Research and Technology [cit. 2021-02-06]. ISSN 2394-3696. Dostupné z: [https://www.ijert.org/admin/papers/1451749760\\_ICITDCEME-15.pdf](https://www.ijert.org/admin/papers/1451749760_ICITDCEME-15.pdf)
- [8] Tian, Y., Shi, C., Fan, Z. *et al.* Experimental investigations on magnetic abrasive finishing of Ti-6Al-4V using a multiple pole-tip finishing tool. *Int J Adv Manuf Technol* **106**, 3071–3080 (2020). <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04871-z>

- [9] SMOLA, Vojtěch. *TECHNOLOGIE BROUŠENÍ TITANOVÝCH SUPERSLITIN* [online]. Praha, 2017 [cit. 2021-7-15]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/73076/F2-BP-2017-Smola-Vojtech-Bakalarska%20prace%20-%20Smola%20Vojtech.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Bakalářská práce. ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE. Vedoucí práce Ing. Zdeněk Pitrmuc.
- [10] MÁDL, Jan a Jaroslav BARCAL. *Základy technologie II*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2002. ISBN 80-010-2610-8.
- [11] [online]. [cit. 2021-7-19]. Dostupné z: [http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/skripta\\_Technologie\\_II\\_2dil.pdf](http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/skripta_Technologie_II_2dil.pdf)
- [12] [online]. [cit. 2021-7-19]. Dostupné z: <https://jurgal.com.pl/cs/prumyslove-honovani/>
- [13] DE MELLO, AntonioVitor, Rosemar Batista DE SILVA, Álisson Rocha MACHADO, Rogério Valentim GELAMO, Anselmo Eduardo DINIZ a Rodolfo Fischer Moreira DE OLIVEIRA. Surface Grinding of Ti-6Al-4V Alloy with SiC Abrasive Wheel at Various Cutting Conditions. *Procedia Manufacturing* [online]. 2017, **10**, 590-600 [cit. 2021-7-20]. ISSN 23519789. Dostupné z: doi:10.1016/j.promfg.2017.07.057
- [14] CHAMPAIGNE, Jack. *Shot Peening Overview* [online]. 2001 [cit. 2021-7-22]. Dostupné z: <https://www.shotpeener.com/library/pdf/2001012.pdf>
- [15] MAGNETIC ABRASIVE FINISHING [online]. Novateur Publication's International Journal of Innovation in Engineering, Research and Technology [cit. 2021-7-23]. ISSN 2394-3696. Dostupné z: [https://zenodo.org/record/1473270/files/1451749760\\_ICITDCEME-15.pdf](https://zenodo.org/record/1473270/files/1451749760_ICITDCEME-15.pdf)
- [16] *3D laser shock peening – A new method for improving fatigue properties of selective laser melted parts*, *Additive Manufacturing* [online]. 2020. [cit. 2021-7-24]. ISSN 2214-8604. Dostupné z: <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S2214860419316926?token=F9265AF5F7E6FF01DFF9A3BD4F5209B85AF6CC776E2FF459AD65226DC2C8D4AD86113DC9CF8296F4863E805392D85F26&originRegion=eu-west-1&originCreation=20210724164419>
- [17] He effect of shot peening parameters and hydroxyapatite coating on surface properties and corrosion behavior of medical grade AISI 316L stainless steel, *Surface and Coatings Technology* [online]. 2015 [cit. 2021-7-26]. ISSN 0257-8972. Dostupné z: [www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0257897215302644](http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0257897215302644)

[18] WANG, Tingting, De CHEN, Weihua ZHANG a Luling AN. *Study on key parameters of a new abrasive flow machining (AFM) process for surface finishing* [online]. 2019, 30.10. 2019 [cit. 2021-7-27]. Dostupné z: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s00170-018-2914-9.pdf>

[19] RANGASWARNY, Partha, Hendra TERUTUNG a Shaik JEELANI. Effect of grinding on the fatigue life of titanium alloy (5Al-2.5Sn) under dry and wet conditions [online]. Alabama: NASA-HBCU Space Science and Engineering Research Forum Proceedings, 1989 [cit. 2021-7-27]. Dostupné z: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19910018807/downloads/19910018807.pdf>