

Vliv procesních parametrů technologie AFM na účinek dokončování pomocí zařízení AFM

Radim Kunčar

Bakalářská práce
2025



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická
Ústav výrobního inženýrství

Akademický rok: 2024/2025

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	Radim Kunčar
Osobní číslo:	T23824
Studijní program:	B0788A270001 Procesní inženýrství
Forma studia:	Kombinovaná
Téma práce:	Vliv procesních parametrů technologie AFM na účinek dokončování pomocí zařízení AFM

Zásady pro vypracování

- Vypracovat literární studii zabývající se řešenou tematikou.
- Návrh a výroba zkušebních těles.
- Zvolení procesních parametrů pro experiment.
- Měření drsnosti zkušebních těles.

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

Seznam doporučené literatury:

1. TOTTEN, George E. (ed.), [2007]. *Steel heat treatment: metallurgy and technologies*. Second edition. Boca Raton: CRC, Taylor & Francis, Taylor & Francis Group. ISBN 9780849384554.
2. MACHEK, Václav, 2011. *Zpracování a zkoušení kovových materiálů*. V Praze: České vysoké učení technické. ISBN 9788001046838.
3. MILEWSKI, John O., 2017. *Additive Manufacturing of Metals: From Fundamental Technology to Rocket Nozzles, Medical Implants, and Custom Jewelry*. Springer Series in Materials Science. Cham: Springer International Publishing. Dostupné z: <https://doi.org/9783319582054>.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Jan Hanzlík, Ph.D.**
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání bakalářské práce: **2. ledna 2025**
Termín odevzdání bakalářské práce: **16. května 2025**

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

L.S.

doc. Ing. Martin Bednařík, Ph.D. v.r.
ředitel ústavu

Ve Zlíně dne 10. února 2025

PROHLÁŠENÍ AUTORA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Beru na vědomí, že

- odevzdáním bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., v platném znění bez ohledu na výsledek obhajoby;
- bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému a bude dostupná k nahlédnutí;
- jedno vyhotovení bakalářské práce v listinné podobě bude ponecháno Univerzitě Tomáše Bati ve Zlíně k uložení;
- na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- podle § 60 odst. 1 autorského zákona má Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- podle § 60 odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – bakalářskou práci – nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- pokud bylo k vypracování bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tj. k nekomerčnímu využití), nelze výsledky bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- pokud je výstupem bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá; neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji, že

- jsem na bakalářské práci pracoval(a) samostatně a použitou literaturu jsem řádně citoval(a); v případě publikace výsledků budu uveden(a) jako spoluautor;
- odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou obsahově totožné.

Ve Zlíně, dne

.....
podpis autora

ABSTRAKT

Podnětem pro vypracování bakalářské práce bylo poskytnout seznámení s metodami technologie dokončování povrchu se zaměřením na nekonvenční typy těchto metod. Blíže se práce zaměřuje právě na technologii AFM. Byl proveden výzkum, který tuto technologii ověřuje jako vhodný způsob dokončování povrchů vnitřních ploch produktů aditivní výroby kovů. Práce poskytuje teoretický základ pro seznámení s tímto typem výroby a také pro seznámení s mikroskopickými metodami, díky kterým je možné zkoumat vlastnosti dokončených povrchů. V rámci práce byl proveden experiment, který ověřuje dopad změny dokončovacích cyklů technologie AFM na kvalitu dokončeného povrchu. Bylo prokázáno, že vyšší počet cyklů zvyšuje účinnost dokončování, výrazně snižuje výslednou drsnost povrchu a tím se významně podílí na kvalitě povrchu.

Klíčová slova: AFM, Dokončování, Obrábění, 3D tisk kovů, ADAM, DMLS

ABSTRACT

The intent for the bachelor thesis was to provide an introduction to surface finishing technology methods with a focus on unconventional types of these methods. The thesis focuses more closely on AFM technology. Research has been carried out to validate this technology as a suitable method of surface finishing of internal surfaces of metal additive manufacturing products. The thesis provides a theoretical basis for an introduction to this type of fabrication and also for an introduction to microscopic methods that make it possible to investigate the properties of finished surfaces. An experiment was carried out to verify the impact of changing the finishing cycles of the AFM technology on the quality of the finished surface. It was shown that a higher number of cycles increases the finishing efficiency, significantly reduces the resulting surface roughness and thus contributes significantly to the surface quality.

Keywords: AFM, Finishing, Machining, 3D metal printing, ADAM, DMLS

Rád bych poděkoval především Ing. Janu Hanzlíkovi, Ph.D za jeho rady, připomínky a asistenci během experimentu a tvorby této práce. Dále pak prof. Dr.Ing. Vladimíru Patovi za jeho pomoc k získání potřebných dat během experimentu.

OBSAH

ÚVOD.....	11
I TEORETICKÁ ČÁST	12
1 TECHNOLOGIE DOKONČOVÁNÍ POVRCHŮ	13
1.1 PŘÍKLADY KONVENČNÍCH METOD	13
1.1.1 Metody s úběrem materiálu.....	13
1.1.2 Metody bez úběru materiálu.....	13
1.2 PŘÍKLADY NEKONVENČNÍCH METOD	14
2 TECHNOLOGIE AFM	16
2.1 ZÁKLADNÍ PRINCIPY A METODY PROCESU AFM.....	16
2.1.1 Jednosměrné AFM	17
2.1.2 Dvousměrné AFM.....	18
2.1.3 Vícesměrné AFM	19
2.1.4 Orbitální AFM.....	19
3 OBLASTI VYUŽITÍ AFM	20
3.1 APLIKACE V PRŮMYSLU.....	20
3.1.1 Aplikace v automobilovém průmyslu	20
3.1.2 Aplikace v leteckém průmyslu.....	20
3.1.3 Aplikace v lékařském průmyslu.....	20
3.1.4 Ostatní aplikace	20
3.2 SROVNÁNÍ S JINÝMI DOKONČOVACÍMI METODAMI	21
4 PROCESNÍ PARAMETRY AFM	22
4.1 POČET CYKLŮ.....	22
4.2 ABRAZIVNÍ MATERIÁL	22
4.2.1 Materiály abrazivních částic	23
4.2.2 Polymerní nosič.....	23
5 TECHNOLOGIE 3D TISKU KOVŮ	24
5.1 PRINCIP TECHNOLOGIE 3D TISKU KOVŮ	24
5.1.1 DMLS.....	24
5.1.2 ADAM.....	25
6 MIKROSKOPICKÉ METODY MĚŘENÍ DRSNOSTI POVRCHU	29
6.1 KONTAKTNÍ.....	29
6.1.1 Mikroskopie atomárních sil.....	29
6.1.2 Dotykové profilometry	30
6.2 BEZKONTAKTNÍ.....	30
6.2.1 Konfokální mikroskopie.....	30
6.2.2 Interferenční mikroskopie	32
6.2.3 Skenovací elektronová mikroskopie	32

6.3	SROVNÁNÍ UVEDENÝCH PŘÍKLADŮ MIKROSKOPICKÝCH METOD	33
II	PRAKTICKÁ ČÁST	34
7	CÍLE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE.....	35
8	POUŽITÉ ZAŘÍZENÍ, POPIS EXPERIMENTU A ZKUŠEBNÍCH TĚLES	36
8.1	ZKUŠEBNÍ TĚLESA	36
8.2	ZAŘÍZENÍ AFM.....	37
8.3	POSTUP DOKONČOVACÍHO PROCESU	39
8.4	MOŽNÉ ZÁVADY	45
8.5	VOLBA PROCESNÍCH PARAMETRŮ	46
8.6	SHRNUTÍ HLAVNÍCH PROCESNÍCH PARAMETRŮ	48
8.7	POUŽITÝ OPTICKÝ PROFILOMETR.....	48
8.8	METODIKA MĚŘENÍ DRSNOSTI POVRCHU ZKUŠEBNÍCH TĚLES	49
9	VÝSLEDKY MĚŘENÍ.....	51
10	DISKUZE VÝSLEDKŮ	56
10.1	SROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ	57
10.2	PARAMETRY DRSNOSTI POVRCHU PO 60 CYKLECH	58
10.3	SROVNÁNÍ S PŘEDCHOZÍMI STUDIEMI	58
	ZÁVĚR.....	60
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	61
	SEZNAM OBRÁZKŮ	65
	SEZNAM TABULEK.....	67
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	68

ÚVOD

S rostoucími nároky na kvalitu povrchu v oblasti strojírenství nabývá na významu problematika efektivního dokončování funkčních ploch. Povrchová kvalita se projevuje nejen na vzhledu a rozměrové přesnosti součástí, ale také na tribologické vlastnosti, životnosti a funkční spolehlivosti. Z toho důvodu se v moderním strojírenství stále více aplikují kromě konvenčních metod obrábění i metody nekonvenční. Mezi ty patří i abrazivní průtokové obrábění známé pod zkratkou AFM.

Tato technologie využívá průtok abrazivního média skrze opracovávané těleso a umožňuje cílené dokončování geometricky složitých a špatně přístupných vnitřních ploch a kanálů. Významným faktorem, který se podílí na efektivitě AFM je vhodná volba procesních parametrů, jako jsou typ média, rychlost proudění, počet dokončovacích cyklů nebo i konstrukce samotného zařízení.

Tato bakalářská práce cílí na hodnocení vlivu vybraných procesních parametrů AFM na výsledné vlastnosti dokončených povrchů. Teoretická část práce poskytuje přehled konvenčních a nekonvenčních metod dokončování povrchů, popisuje princip a varianty technologie AFM a uvádí specifika 3D tisku kovů, zejména i metodu DMLS (Direct Metal Laser Sintering), která byla využita při přípravě zkušebního tělesa. Součástí teoretického přehledu je také shrnutí mikroskopických metod, které lze využít pro měření drsnosti povrchu.

V praktické části byl proveden experiment, během kterého byly vnitřní dutiny 3D tištěného kovového zkušebního tělesa opracovány pomocí unikátního zařízení na obousměrné AFM, které bylo vyvinuto na Fakultě technologické, Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně. Toto zařízení se od běžně používaných zařízení AFM liší využitím elektromotorů namísto hydraulického systému. Tato skutečnost přináší nové možnosti v řízení a monitorování dokončovacího procesu. Výsledky měření drsnosti byly analyzovány a porovnány s předchozími studiemi. Tím tato práce přispívá k hlubšímu pochopení vlivu jednotlivých parametrů AFM na kvalitu dokončeného povrchu.

TEORETICKÁ ČÁST

1 TECHNOLOGIE DOKONČOVÁNÍ POVRCHŮ

Povrchové vlastnosti součásti se významně podílejí na životnost, funkčnost, spolehlivost a kvalitu výrobku. V praxi tak kvalita povrchů součástí stroje úzce souvisí s jeho celkovým výkonem a životností. Požadovaných vlastností je dosahováno volbou vhodné technologie dokončování povrchu. Ta má za cíl kromě dosažení požadované povrchové kvality výrobku i zajištění tvaru a rozměrů v rámci požadované tolerance. Technologie dokončování je z pravidla užívána ve finální fázi procesu výroby. [3, 21, 24, 25, 26]

1.1 Příklady konvenčních metod

Běžně používané metody pro dokončování povrchů zahrnují technologie, které využívají strojů a nástrojů. Ty jsou používány pro úběr materiálu z výrobku nebo pro řízenou deformaci za účelem dosažení požadovaných rozměrů a kvality povrchové vrstvy. Dělení takových metod se určuje právě na základě skutečnosti, zda-li při dokončování dochází k úběru materiálu a vzniku třísky. [3, 21, 24, 25, 26]

1.1.1 Metody s úběrem materiálu

Metody dokončování, při kterých je ubírán materiál se nazývají abrazivní. Během dokončování vytváří třísky z technologického přídavku na obrábění na výrobku. Při návrhu rozměrů je tak třeba s tímto přídavkem počítat. [3, 21, 24, 25, 26]

Mezi metody s úběrem materiálu patří:

- Broušení.
- Jemné obrábění.
- Tryskání.
- Honování.
- Lapování.
- Omílání.

1.1.2 Metody bez úběru materiálu

Během dokončování povrchu metodami bez úběru materiálu prochází výrobek takzvaným zhutňováním. Jedná se o proces, při kterém je využívána plastická deformace k odstranění

nerovností na povrchu výrobku jejich zatlačením do povrchu. Zhutňování může probíhat i za studena, čímž lze dosáhnout většího mechanického zpevnění výrobku [21, 24, 25, 26]

Mezi metody bez úběru materiálu patří

- Kalibrování.
- Otryskávání.
- Vibrační zpevnění.
- Válečkování.
- Hlazení.
- Kuličkování.

1.2 Příklady nekonvenčních metod

Během nekonvenčního dokončování povrchu je zpravidla místo konvenčního nástroje používáno fyzikálních a chemických principů. Ty jsou využívány za účelem ekonomického dosažení přesnějších geometrií i na mikroskopické úrovni v řádu mikrometrů, na které se na výrobním trhu kladou stále větší nároky. Právě díky jejich přesnosti se zasluhují o časté zavedení v automobilovém, leteckém, lékařském a mikroelektronickém průmyslu. Mezi jejich přednosti patří snížení zbytkových napětí a zvýšení únavové pevnosti, zatímco jiné metody by mohly způsobovat mikrotrhliny či zvyšovat zbytkové napětí. [1, 20, 21, 22]

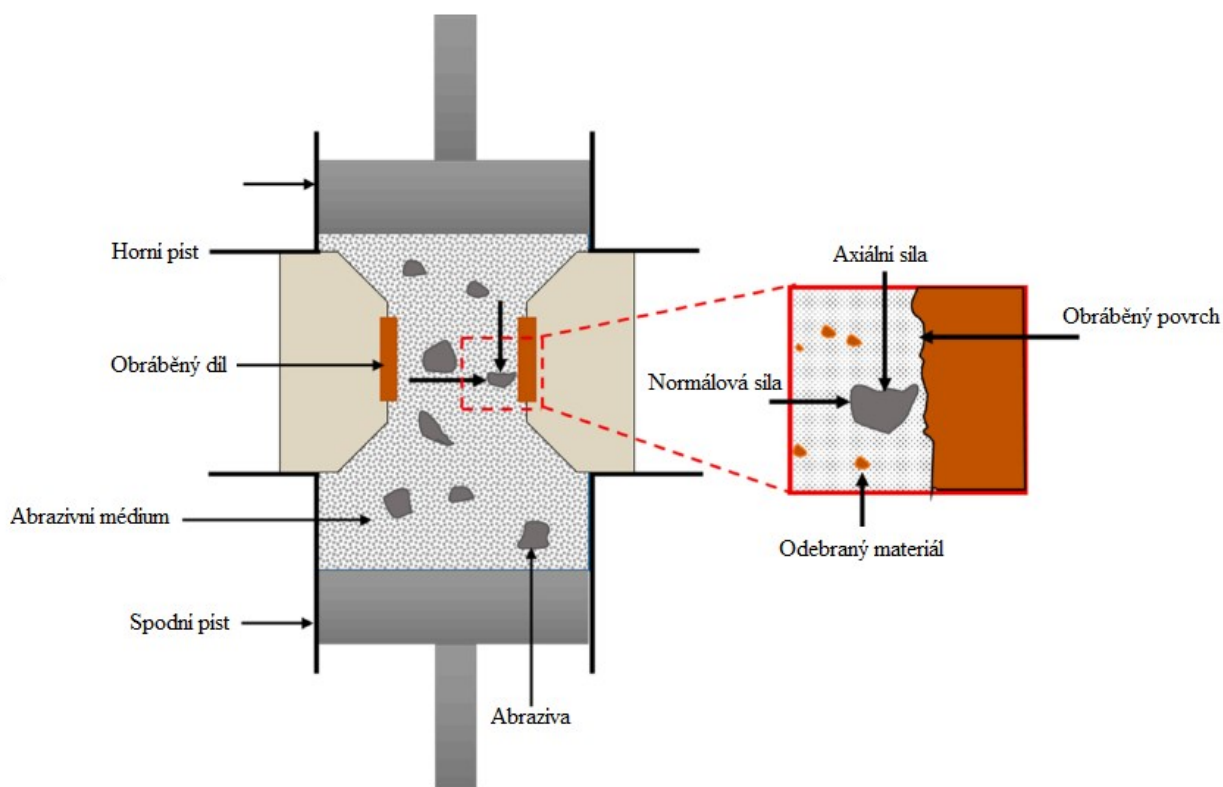
Nekonvenční metody lze rozdělit následovně:

- Mechanické – ultrazvukové obrábění, obrábění vodním paprskem, AFM.
- Chemické – chemické obrábění.
- Termoelektrické – elektroerozivní obrábění, obrábění laserovým paprskem, obrábění paprskem plazmy, obrábění iontovým paprskem, obrábění elektronovým paprskem.
- Elektrochemické – elektrochemické obrábění.

Nekonvenční metody dokončování povrchů si zpravidla žádají vysokou energetickou i časovou náročnost a nabízejí malou produktivitu. Potřebné stroje bývají drahé a pro jejich malý rozsah účelnosti i velice nepraktické a neekonomické. [1, 20, 21, 22]

2 TECHNOLOGIE AFM

Technologie AFM, celým názvem Abrasive flow machining (česky Obrábění proudem abraziva nebo průtočné lapování) patří mezi nekonvenční metody dokončování povrchů. Je využívána zejména pro broušení dutin a jiných špatně dostupných míst na výrobku. Užitím této metody lze také v jednom momentu opracovávat více míst na výrobku. Jedná se tak o spolehlivou a přesnou metodu s jejímž použitím lze efektivně dosáhnout vysoké kvality povrchu, a to s minimálním úběrem materiálu. [4, 10, 15, 20, 23]



Obrázek 1 Schéma mechanismu odběru materiálu v AFM [4]

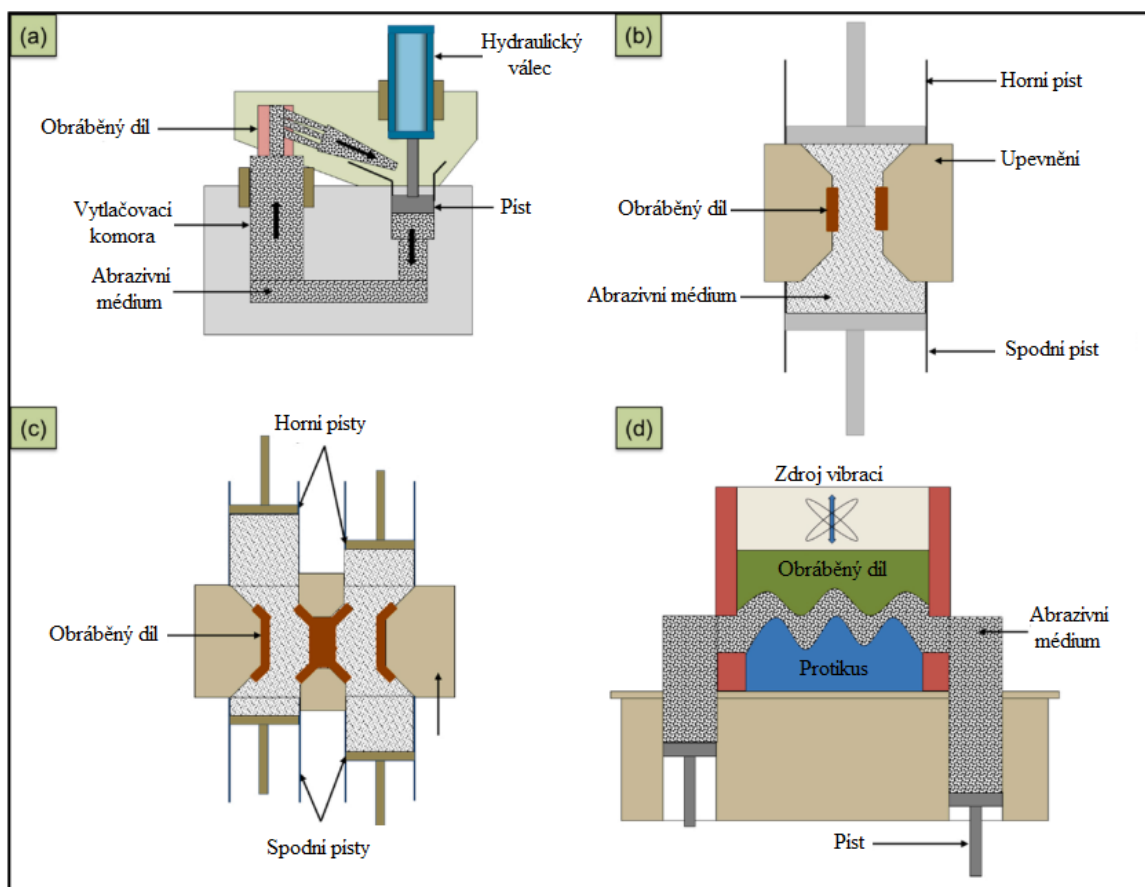
2.1 Základní principy a metody procesu AFM

Základní princip technologie AFM spočívá v průtoku abrazivního média přes obráběnou plochu. Toto médium tvoří kombinace vysokoelastického polymeru a částí abraziva, které jsou v něm volně rozprostřené. Nahrazuje tak klasický nástroj, který je přítomen v jiných dokončovacích metodách. Působením vysokého tlaku je médium hnáno přes obráběný díl a zrna abraziva ubírají materiál. [4, 10, 20, 23]

Inovace tohoto principu vedou k rozdělení technologie AFM do třech základních kategorií

- Jednosměrné.
- Dvousměrné.
- Orbitální.

V odborných periodikách vydavatelství Elsevier se do základního rozdělení také často uvádí AFM vícesměrné, které je znázorněno na obrázku 2(c) a vychází z jednosměrného AFM. Používá se pro obrobení tvarů se složitější geometrií. [4, 10, 20, 23]



Obrázek 2 Schéma (a) Jednosměrného AFM, (b) Dvousměrného AFM, (c) Vícesměrného AFM, (d) Orbitálního AFM [4]

2.1.1 Jednosměrné AFM

Jedná se o základní a nejjednodušší variaci metody AFM. V tomto případě s pomocí hydraulicky ovládaného pístu působíme tlak na abrazivní médium ve vytláčovací komoře. Abrazivní médium je tak protlačováno skrze obrobek pouze v jednom směru a následně se shromažďuje ve sběrném prostoru. Odtud jej lze doplnit do vytláčovací komory pro

opětovné použití v provozu, nebo ho z něj vyřadit. Uvedení již použitého média opět do procesu však významně ovlivňuje abrazivní účinek a vyžaduje větší počet cyklů. To posluhuje jako podnět ke snahám o inovaci. [4, 10]

V případě jednosměrného AFM jsou výhodami jednoduchost zařízení, snadný provoz a ve srovnání s ostatními metodami AFM jsou konstrukční náklady nejnižší.

Při použití této metody je však nutné očekávat nerovnoměrné opracování, neboť tok abrazivního média pouze v jednom směru způsobuje větší ubírání materiálu ve vtokové části obrobku než na části výtokové. U menších výrobků lze tento problém řešit otočením obrobku v upínacím systému. Zároveň tato metoda není vhodná pro použití na obrobky se složitější geometrií nebo v případě dutin s křížícími se kanály. Významnou nevýhodou je i omezená regulace a kontrola toku abrazivního média, jehož je navíc vyžadováno větší množství než u ostatních metod AFM. [4, 10, 20, 23]

2.1.2 Dvousměrné AFM

Princip je stejný jako v případě jednosměrného AFM ale jak název napovídá, tok abrazivního média je uskutečňován ve dvou směrech. Toho je dosaženo použitím dvou hydraulických pístů a dvou vytlačovacích komor. Abrazivní médium je v průběhu cyklu písty tlačeno z jedné komory do druhé a následně je v druhé části cyklu tlačeno v druhém směru. Během toku mezi komorami tak dochází k ubírání materiálu z obrobku. [4, 10]

Jelikož je abrazivní médium po celou dobu dokončovacího procesu udržováno uvnitř systému není třeba jej manuálně doplňovat, což umožňuje snadnou automatizaci procesu. Tok ve dvou směrech umožňuje rovnoměrnější působení dokončování než v případě jednosměrného AFM. Kontrola toku je snazší a metoda je jednodušeji uplatnitelná i pro složitější geometrie obrobku. [4, 10]

Konstrukce dvousměrného AFM je však značně složitější. Zvyšují se tak náklady na zařízení i provoz. Kromě konstrukce zařízení je složitá i konstrukce upínacího systému. Pokud by došlo ke špatné konfiguraci, hrozí výskyt problémů v procesu jako například únik abrazivního média ze systému během dokončování. [4, 10, 20]

I přes nevýhody se však stále jedná o v praxi nejčastěji používanou metodu technologie AFM. [4, 10, 20, 23]

2.1.3 Vícesměrné AFM

V tomto případě je v procesu dokončování využito nejméně dvou hydraulických pístů a nejméně dvou vytlačovacích komor. Písty mohou pracovat s navzájem různými parametry, čímž je umožněn tok v různých směrech a obrábění různých ploch obrobku nezávisle na sobě. [4, 10, 20]

Vícesměrné AFM je používáno v náročných podmínkách díky své schopnosti dokončování složitých geometrií obrobku jako jsou například křížící se kanálky. Oproti jiným metodám dosahuje nejvyšší rovnoměrnosti povrchové úpravy. Umožňuje snazší automatizaci a zkrácení cyklu díky eliminaci nutnosti měnit upínání obrobku. [4, 10, 20]

Celý proces je však velmi složitý a oproti ostatním metodám jsou náklady na zařízení a provoz nejvyšší. [4, 10, 20, 23]

2.1.4 Orbitální AFM

Orbitální AFM, známé také jako oscilační AFM, je metoda, při které kromě dokončovacího účinku toku abrazivního média využíváme také orbitálního pohybu samotného obrobku. Stroj uvádí obrobek spolu s protikusem do kmitavého pohybu s amplitudou v rozmezí 0,5 mm až 5 mm, zatímco abrazivní médium tvoří vrstvu mezi obrobkem a protikusem. Kmitání zajišťuje vyšší účinek abrazivního média na obráběnou plochu. Pro správnou funkci této metody je nutné použít abrazivní médium o vyšší viskozitě, než se používá v jednosměrných a dvousměrných AFM. [4, 10, 20, 23]

S použitím orbitálního AFM lze dosáhnout vysoké abrazivní účinnosti a vysoké rovnoměrnosti opracování, a to i při složité geometrii obrobku, kterou by nebylo možné obrábět s použitím jiných metod. Celková doba opracovávání se zároveň významně snižuje. [4, 10, 20, 23]

Obecně se ale jedná o vysoce nákladnou metodu vzhledem k nutnosti speciálních zařízení a konfigurace. Také kvůli nutnosti použití protikusu není možné obrábět na některých geometriích. [4, 10, 20, 23]

3 OBLASTI VYUŽITÍ AFM

Z obecného hlediska je technologie AFM využívána pro zlepšení povrchové kvality v případech, kdy jiné metody nedokážou dosáhnout požadované drsnosti a kvality. Případně v situacích, kdy tvar obrobku neumožňuje přístup nástroje k obráběné ploše. Bývá tak zejména používána pro obrábění dutin, kanálků či průchodů. V případě menších obráběných ploch je vhodná pro užití v sériové výrobě díky jednotnosti výsledného povrchu. [4] [10] [15, 20]

3.1 Aplikace v průmyslu

Své uplatnění si tato metoda našla v automobilovém, leteckém i lékařském průmyslu. [4, 10, 20, 23]

3.1.1 Aplikace v automobilovém průmyslu

Zavedení této metody pro úpravy sacích a výfukových kanálů vede ke zvýšení efektivity proudění plynů a celkovému výkonu motoru. V automobilovém sektoru lze tuto metodu využít i pro dokončování dutých součástí, které vyžadují vysokou přesnost a jemnou drsnost povrchu. Mezi ty patří například vstřikovací trysky, ventily a mnoho jiných. [4, 10, 20, 23]

3.1.2 Aplikace v leteckém průmyslu

Zejména v leteckém průmyslu je kladen velký důraz na dosažení hladkých povrchů pro snížení aerodynamického odporu a tím i zlepšení životnosti součástí. Mezi touto metodou obráběné součásti patří například turbínové lopatky, palivové trysky a rozváděcí kola. Jedná se o součásti motorů, které se významně podílí na jeho funkci a jejich správným dokončováním se minimalizuje riziko selhání v provozu. [4, 10, 20, 23]

3.1.3 Aplikace v lékařském průmyslu

Hladkost povrchu a precizní dokončení povrchu je zásadní pro správnou funkci implantátů (zejména kyčelních a kolenních) a chirurgických i mikrochirurgických nástrojů. Je kladen velký důraz na biokompatibilitu a bezchybný povrch výrobku snižuje riziko infekce. [4, 10, 20, 23]

3.1.4 Ostatní aplikace

Vstřikování plastů do forem je jedna z nejběžněji užívaných metod výroby, a i při ní nalézá metoda AFM své využití. Temperační kanálky ve formě zajišťují správný průběh

vstřikovacího procesu a pomocí metody AFM při dokončování těchto špatně dostupných dutin lze dosáhnout vhodné drsnosti pro bezproblémový průchod temperačního média. [4, 10, 20, 23]

Metodu AFM lze využít i pro dokončování součástí velmi malých rozměrů, jejichž dokončování by bylo velice obtížné pomocí konvenčních metod. Tato skutečnost se projevuje například při zpracovávání mikroelektronických součástí jako jsou konektory, kontakty či mikromechanické součásti. [4, 10, 20, 23]

3.2 Srovnání s jinými dokončovacími metodami

Tabulka 1 Srovnání metody AFM s jinými dokončovacími metodami

Metoda	Výhody	Nevýhody
AFM	Možnost obrábět složité tvary, velmi malé výrobky a dutiny, vysoká přesnost	Vysoké pořizovací náklady, malý rozsah použití strojů, pomalý cyklus
Broušení	Univerzální metoda, široká dostupnost	Obtížné použití pro složité tvary a dutiny
Elektroerozivní obrábění	Možnost obrábět tvrdé materiály	Nutnost užití elektricky vodivých materiálů
Laserové obrábění	Možnost obrábět velmi malé výrobky, vysoká přesnost	Obrábění probíhá za vysokých teplot a ovlivňuje kvalitu materiálu
Chemické leptání	Možnost obrábět velmi malé výrobky	Nutnost použití specifických materiálů

4 PROCESNÍ PARAMETRY AFM

Aby se dosáhlo kvalitních výsledků dokončování, je nezbytně nutné zvolit vhodnou kombinaci parametrů AFM stroje s ohledem na aplikaci, materiál obrobku a požadované drsnosti dokončovaných ploch. Pro optimální výsledek je zásadní, nejen abychom tyto parametry zvolili před začátkem dokončovacího cyklu, ale zároveň je i vhodně regulovali během něj. Ve většině případech tyto parametry spolu souvisí a navzájem se ovlivňují. [4, 15, 20, 23]

4.1 Počet cyklů

Během procesu dokončování pomocí metody AFM se počet cyklů pohybuje v rozmezí 5-50. O počtu cyklů je rozhodnuto podle několika kritérií, a to podle:

- Požadované drsnosti povrchu – pro nižší drsnost povrchu je nutno, aby proběhlo více cyklů. Tím obráběný povrch dosáhne požadované kvality.
- Použitého materiálu obrobku – s rostoucí tvrdostí materiálu obrobku roste i počet potřebných cyklů.
- Použitého materiálu abrazivního média – jemnější abrazivní částice nebo částice s menší koncentrací v médiu vyžadují větší počet cyklů pro dosažení požadované kvality. Při obrábění hrubšími částicemi a menším počtem cyklů se značně zhoršuje kvalita povrchu.
- Geometrii obrobku – aby bylo dosaženo rovnoměrného obrobení všech ploch v geometricky složitém materiálu, je často třeba většího počtu cyklů.
- Přebytkového materiálu na obráběné ploše – s velkým množstvím přebytkového materiálu, který vystupuje z roviny obráběné plochy je pro jeho odstranění třeba většího počtu cyklů. [4, 15, 20, 23]

4.2 Abrazivní materiál

Abrazivní materiál je tvořen ze dvou složek – polymerního nosiče a abrazivních částic. Materiály a poměr těchto složek mají velký dopad na dokončovací proces skrze ovlivnění abrazivního účinku, rychlosti cyklu a toku média ve složitých geometriích. S rostoucí koncentrací abrazivních částic roste i schopnost ubírat materiál. Proto se využívá médií o

nižších koncentracích pro dosažení precizních výsledků u jemných operací jako je jemné leštění. [4, 15, 18]

4.2.1 Materiály abrazivních částic

Pro složku abrazivních částic je využíváno materiálů, které disponují vysokou tvrdostí a případně i dalšími vhodnými vlastnostmi. Velikosti těchto zrn dosahují maximálně 200 μm , přičemž zrna o rozměru nižším než 50 μm se používají pro precizní a jemné operace.

- Karbid křemíku – disponuje vysokou tvrdostí a využívá se při obrábění tvrdých kovů i slitin. Umožňuje velmi rychlý úběr materiálu z obráběné plochy.
- Oxid hlinitý – využívá se v několika stupních tvrdosti a zrnitosti v závislosti na obráběném materiálu. Využívá se pro oceli, hliník i plasty.
- Nitrid boritý – chemicky i termicky stabilní materiál o vysoké tvrdosti, který se používá pro obrábění zejména kalených ocelí.
- Karbid boru – disponuje vysokou tvrdostí při nízké hustotě, čímž umožňuje minimalizaci hmotnosti média. I přes tuto skutečnost nabízí vysokou abrazivní účinnost.
- Diamant – prášek z diamantu nabízí nejvyšší tvrdost ze všech známých materiálů a umožňuje použití v precizních případech jako je obrábění dílů optických zařízení. [4,18]

4.2.2 Polymerní nosič

Zpravidla se jedná o elastomer, který splňuje potřebné podmínky na viskozitu a pružnost. Tyto podmínky zajišťují efektivní tok skrze obráběný výrobek složitých geometrií. Pro funkci polymerního nosiče mohou být použity materiály na bázi silikonu, polymerních gelů nebo olejových emulzí. [4, 18]

5 TECHNOLOGIE 3D TISKU KOVŮ

Aditivní výrobní procesy (aditive manufacturing) s každou inovací poskytují konstruktérům větší volnost při navrhování výrobků jednoduchých i složitých tvarů a zjednodušují jejich výrobu. Jejich hlavní výhoda spočívá v absenci potřeby specifického nástroje či matrice. O tyto výrobní procesy je v průmyslu vysoký zájem zejména při výrobě kovových součástí. Součásti vyrobené těmito technologiemi dosahují vynikajících materiálových vlastností i při velmi složitých geometriích a z výroby vychází s kvalitní hustou strukturou. [2, 11]

5.1 Princip technologie 3D tisku kovů

První stroje pro AM byly neefektivní, jelikož se při výrobě využívala směs kovového prášku s polymerním pojivem. Toto pojivo bylo odstraněno teplem. Současné stroje využívají z pravidla kovový prášek, který je selektivně taven pro vytvoření požadovaného tvaru. [2, 11]

5.1.1 DMLS

Celým názvem Direct metal laser sintering, česky Přímé spékání kovu, je technologie aditivní výroby, která zpracovává kovový prášek za pomoci laseru. Vychází z technologie SLS, která se ale obecně více používá pro zpracování polymerních prášků. Produktem technologie DMLS mohou být složité kovové součásti, které disponují dobrými mechanickými vlastnostmi a jsou vyráběny s vysokou přesností. [11]

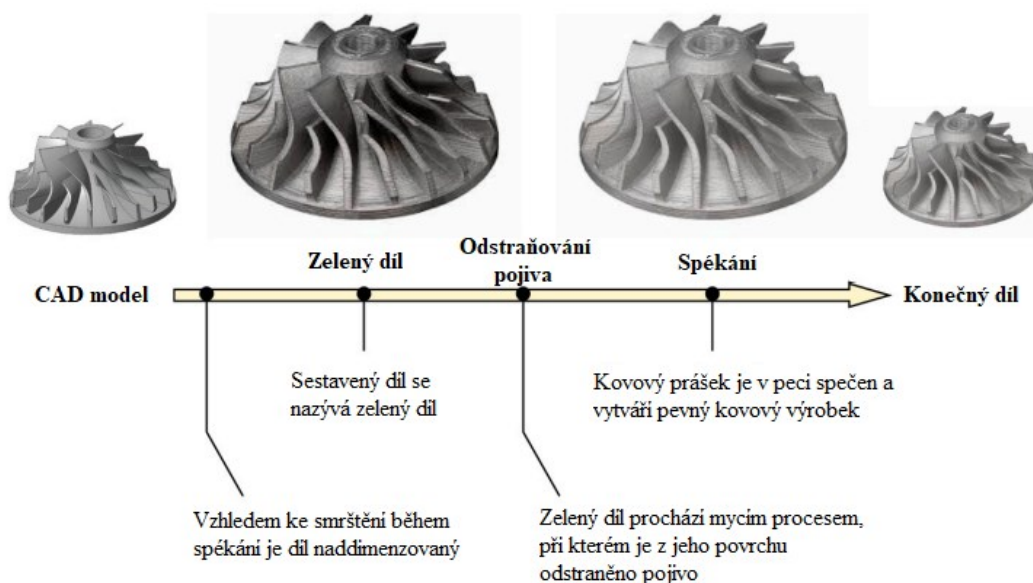
Proces technologie DMLS začíná stejně jako u většiny moderních aditivních technologií tvorbou modelu požadovaného výrobku v digitální podobě. Model je zpracován pomocí příslušného CAD softwaru a rozdělen na vrstvy. Tento proces se nazývá slicing a slouží k postupnému zpracování výrobku. Na pracovní plochu stroje se rovnoměrně nanáší kovový prášek do tenké vrstvy. Podle informace, která je při slicing generována, následně laserový paprsek selektivně roztaví prášek v současně vytvářené vrstvě počínaje základní vrstvou. Po ztuhnutí vrstvy do pevného stavu je pracovní plocha posunuta směrem dolů o tloušťku vrstvy. Ta se obvykle pohybuje ve velmi malých rozměrech (v řádech desítek mikrometrů). Proces se opakuje, dokud nejsou spečeny všechny vrstvy výrobku. Na konci vychází z výroby finální výrobek a nespečený přebytečný kovový prach, který může být znovu využit. Výrobek následně ve většině případů prochází vhodně zvolenou metodou dokončování pro zvýšení kvality jeho povrchu a zlepšení mechanických vlastností. [11]

Technologie DMLS dokáže pracovat s širokou škálou kovových materiálů a s vysokou přesností z nich vytvářet díly se složitou geometrií. Díky znovupoužitelnosti většiny zbylého prášku nabízí tato technologie vysokou efektivitu výroby. [11]

Pořizovací náklady jsou však velmi vysoké, a to nejen pro stroj ale i na materiál. Vzhledem ke spékání po vrstvách je celý proces výroby velmi časově náročný, zejména u větších dílů. Jejich velikost je zároveň omezena velikostí pracovní plochy. Při nevhodném návrhu geometrie součásti je také třeba uvažovat užití podpor, které slouží k tvorbě vrstev s větším přesahem. Tyto podpory musí být z výrobku odstraněny. Navíc zanechávají stopy, které je nutno obrobit a materiál ze kterého jsou vyrobeny již nelze znovu použít ve výrobě. [11]

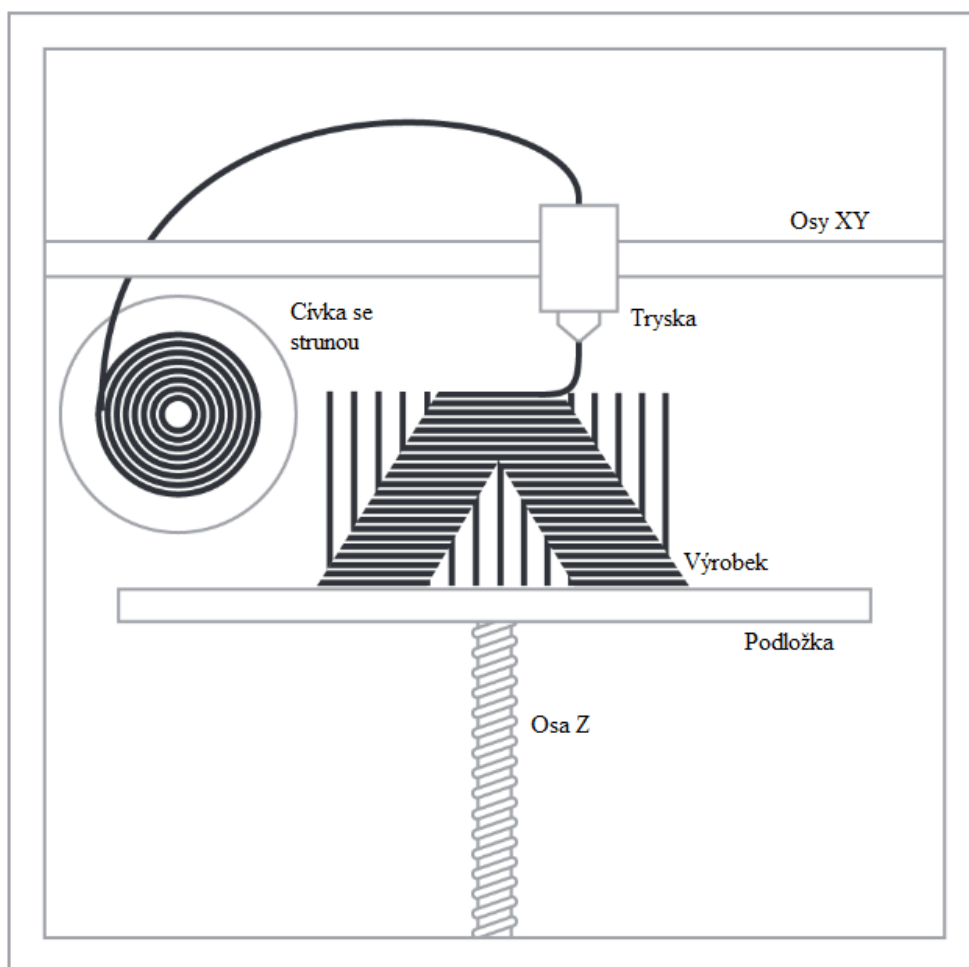
5.1.2 ADAM

Celým názvem Atomic Diffusion Additive Manufacturing, česky Aditivní výroba atomární difuzí je metoda 3D tisku kovů vyvinutá společností Markforged. Je kombinací moderní aditivní výroby s tradičními metodami zpracování kovů. Při procesu výroby prochází díl třemi stádii a zároveň je využíváno třech samostatných strojů. Při návrhu a zpracování modelu společnost Markforged vyvinula vlastní CAM software pod názvem Eiger. [6, 11]

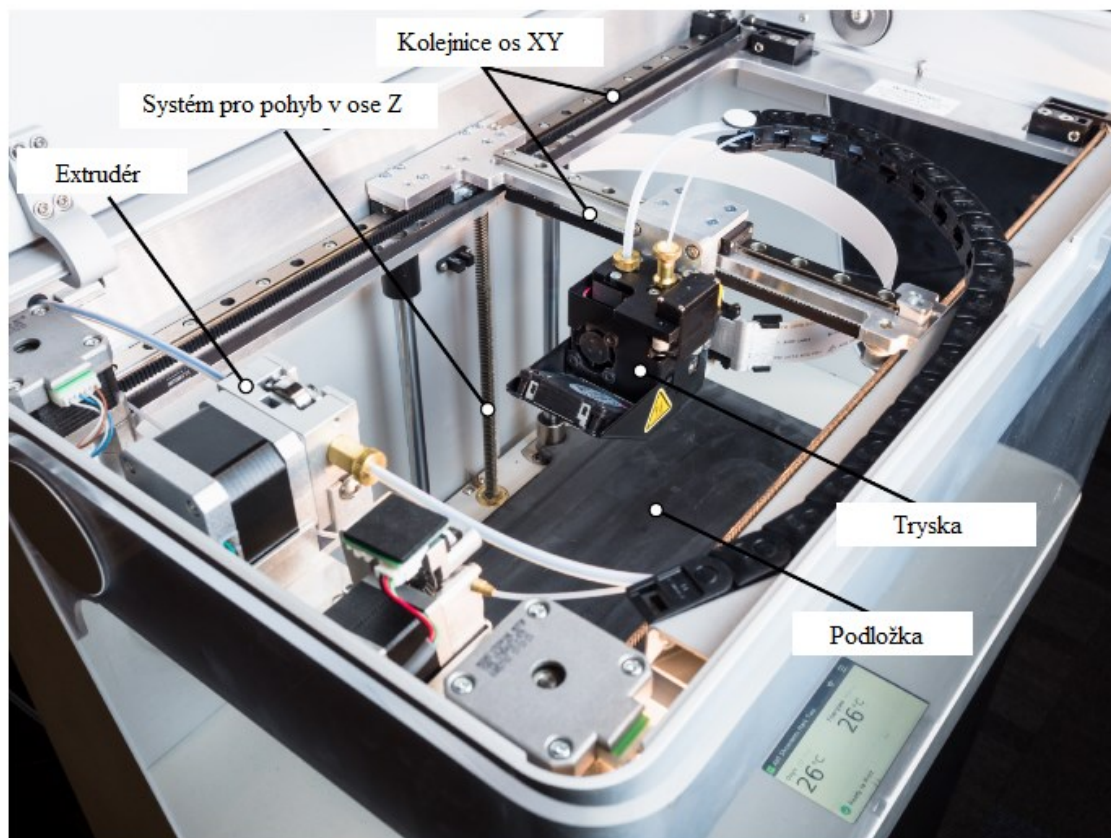


Obrázek 3 Proces výroby technologie ADAM [6]

První fáze výroby pomocí technologie ADAM je ve své podstatě velmi podobná tisku plastu, kupříkladu tím, že materiál je podáván ve formě struny. Tento materiál tvoří směs polymerního pojiva a převažujícího množství kovového prášku. Struna je v trysce natavena při teplotách, potřebných pro natavení polymerního pojiva, zatímco kovový prášek zachovává svou pevnou fázi. Za stálého doplňování materiálu se tryska pomocí krokových motorů pohybuje v rovině a nanáší vrstvu nataveného materiálu na podložku. Ta svým posunem ve vertikální ose umožňuje postupné nanášení vrstev, které tak vytváří zelený díl požadovaného tvaru. Celý proces probíhá ve vyhřívané komoře a zároveň musí být vyhřívána i podložka, aby se zamezilo deformaci dílu nebo jeho předčasnému oddělení od podložky. Konečný výrobek má mechanické vlastnosti podobné plastovému výrobku. [6, 11]

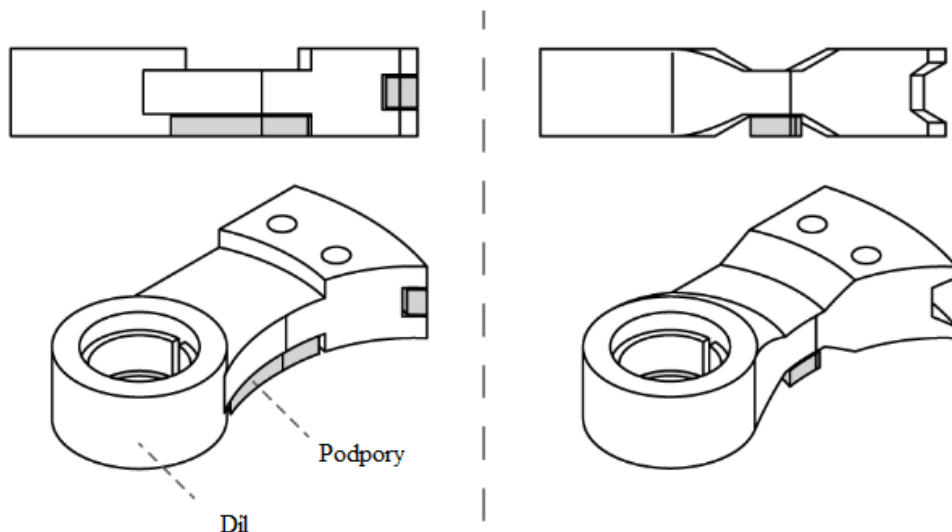


Obrázek 4 Schéma aditivní výroby technologie ADAM [11]



Obrázek 5 Konstrukce stroje pro aditivní výrobu technologie ADAM [11]

Pro získání požadovaného tvaru výrobku a zamezení chyb tisku je nutno tisknout s přesahem vrstvy pod 45° . Při větším přesahu musíme využít podpor, které zamezují propadnutí vrstev. Podpory jsou zpravidla generovány automaticky při slicingui ale dle potřeby mohou být upraveny či vytvořeny ručně na míru. Mezi podpory a stěny výrobku se nanáší keramická vrstva, která minimalizuje nežádoucí adhezi podpor k výrobku a usnadňuje tak oddělení. [11]



Obrázek 6 Princip užití podpory při aditivní výrobě [11]

V druhé fázi výroby díl prochází omýváním, ve kterém je z dílu za zvýšené teploty odstraňováno pojivo. Využíváme k tomu rozpouštědlo, které pojivo odstraňuje povrchově i v celém objemu dílu. Tento proces je časově náročný a v závislosti na velikosti dílu může trvat několik hodin případně i více než den. Výsledkem je křehký díl s minimálním množstvím polymeru. To je následně odstraněno v další fázi. [11]

V poslední fázi výroby vkládáme díl do pece, kde je při vysokých teplotách spékán a zároveň je zbaven většiny zbylého pojiva. Zároveň však v této fázi dochází ke značnému smrštění, které může dosahovat přibližně až 17 %, s čímž je nutno při návrhu dílu počítat. [11]



Metal X
Aditivní výroba



Wash-1
Vymývací systém



Sinter-1
Spékací systém

Obrázek 7 Stroje společnosti Markforged pro výrobu technologií ADAM [6]

6 MIKROSKOPICKÉ METODY MĚŘENÍ DRSNOSTI POVRCHU

Ve výrobním procesu je kontrola kvality finální a zásadní fáze postupu. Při vysokých požadavcích na přesnost geometrie výrobku a kvalitu jeho povrchu je pro správné plnění funkce využíváno mikroskopických metod, které nabízejí přesné a spolehlivé informace o topografii povrchu.

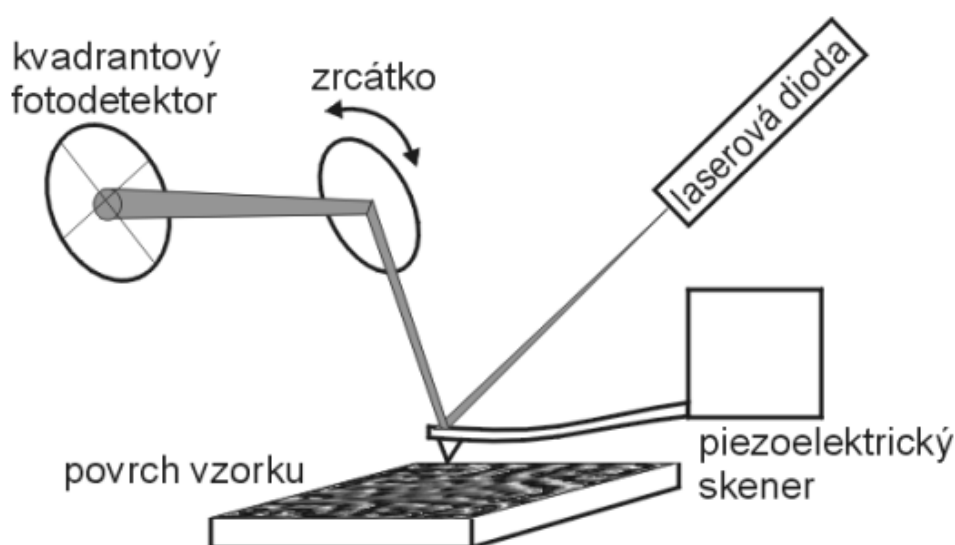
Mikroskopické metody lze podle způsobu analýzy povrchu rozdělit na kontaktní a nekontaktní metody. [5, 19]

6.1 Kontaktní

Během užití těchto metod dochází k přímému kontaktu mezi zkoumaným povrchem a měřicí sondou mikroskopu. Pomocí těchto metod lze dosáhnout vysoké přesnosti, ale vzhledem k fyzickému kontaktu s povrchem vzniká riziko narušení původního stavu povrchu. [9, 16]

6.1.1 Mikroskopie atomárních sil

Tato metoda využívá principu vzájemné meziatomové přitažlivosti. Ultrajemná jehla je posouvána s jemným přtlakem blízko povrchu vzorku a dochází k interakci mezi atomy. Nerovnosti způsobují výchylky raménka, na kterém je jehla upevněna. Tyto výchylky jsou zaznamenány pomocí odrazu laserového paprsku od zadní strany raménka, který dopadá na fotodetektor. Výstupem je 3d topografie povrchu s velmi jemným rozlišením. [9]



Obrázek 8 Schéma mikroskopie atomárních sil [9]

6.1.2 Dotykové profilometry

Jedná se o nejčastěji používanou metodu zkoumání povrchu. Sonda v podobě diamantového hrotu je umístěna na ramenu a malém elektromotoru. Pohybuje se po povrchu a při styku s nerovnostmi dochází k vychýlení ramena. Mechanický pohyb je pak pomocí elektromotoru převeden na elektrický signál. Výstupem je 2D profil zkoumaného povrchu. [16]



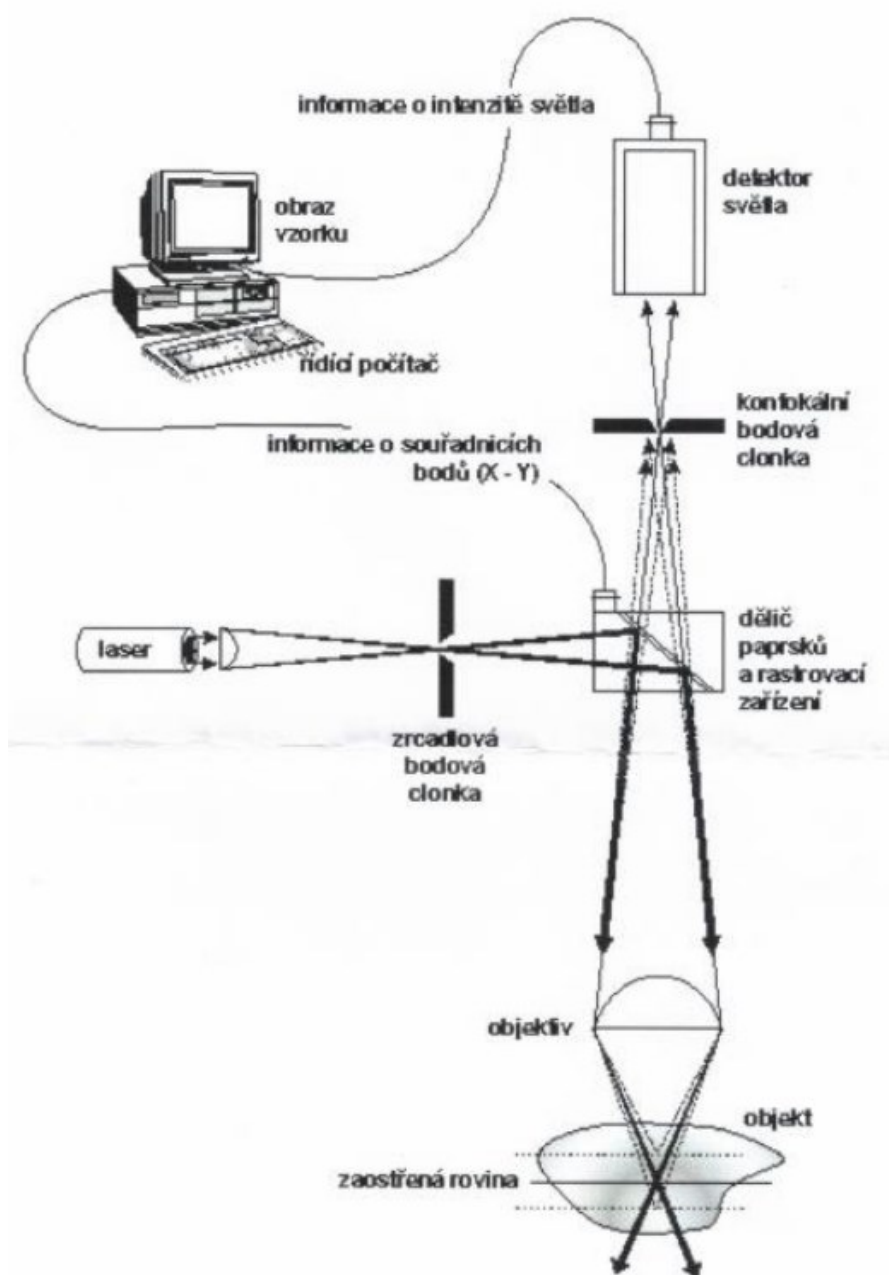
Obrázek 9 Dotykový profilometr [16]

6.2 Bezkontaktní

Bezkontaktní metody využívají optických, magnetických či jiných fyzikálních principů, při kterých nedochází k fyzickému kontaktu se zkoumaným povrchem a tím se minimalizuje riziko mechanického poškození povrchu. Zároveň tyto metody nabízí vysokou rychlost měření povrchu, a to i při zkoumání velkých ploch. [12, 14, 19]

6.2.1 Konfokální mikroskopie

Povrch je při snímání nasvícen zdrojem světla, nejčastěji laserovým paprskem, který postupně po vrstvách nasvěcuje jednotlivé body vzorku. Z bodu odražené světlo putuje skrze malý otvor na fotodetektor. Tento otvor se nazývá pinhole clona a zajišťuje ostrý obraz a zlepšuje kontrast. Pomocí snímacích zrcadel je laserový paprsek zaměřen na jednotlivé body a vzniká velmi přesná 2D topografie vzorku. Opakováním snímání ve vrstvách následně topografie získává třetí rozměr. [14]



Obrázek 10 Schéma konfokálního mikroskopu [14]

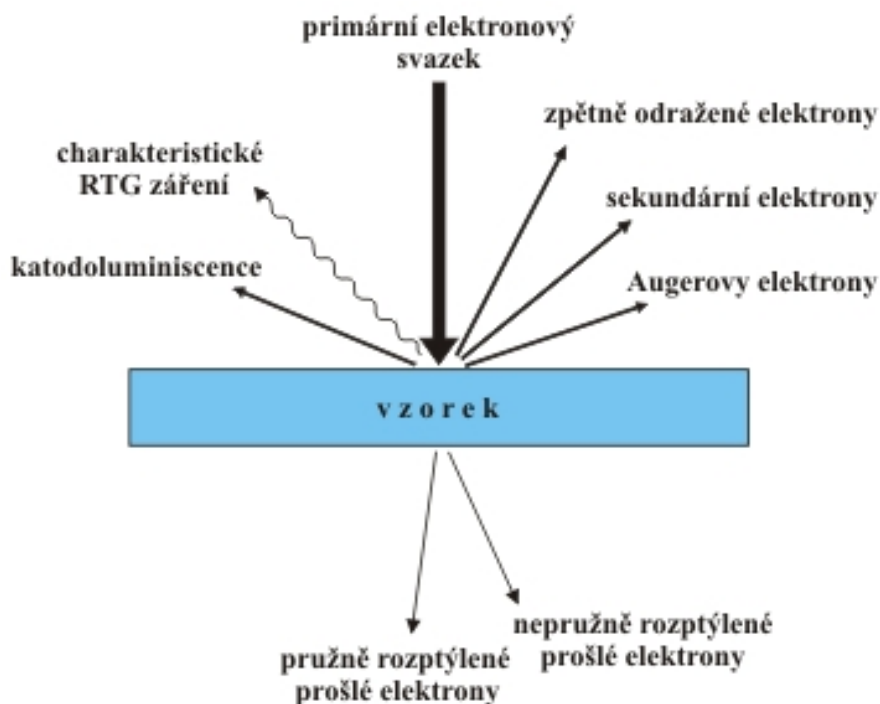
6.2.2 Interferenční mikroskopie

Bílé světlo (případně laserový paprsek) je rozděleno na dva svazky, z nichž jeden prochází zkoumaným vzorkem a druhý je referenční. Své jméno tato metoda získala podle interference, která probíhá mezi svazky po průchodu vzorkem. Následně je vykreslen obrazec, který zobrazuje rozdíl optické dráhy procházejícího svazku od referenčního. Tím je umožněn vznik topografie, která mapuje výškové rozdíly bodů na povrchu. [14]

6.2.3 Skenovací elektronová mikroskopie

Tato metoda, známá pod zkratkou SEM, patří mezi metody elektronové mikroskopie. Využívá elektronových svazků pro zkoumání povrchu vzorku a vytváření detailních snímků.

Elektrony jsou generovány v katodě, pomocí vysokého napětí jsou následně urychleny a následně nasměrovány pomocí elektrostatické a magnetické čočky. Po řádcích je pomocí elektronového svazku snímán povrch vzorku. Detektory snímají signály z interakcí mezi atomy na povrchu vzorku a dopadajícími elektrony a zpracováním těchto signálů se vytváří výsledný obraz vzorku. [12, 19]



Obrázek 11 Odražené elektrony při aplikaci metody SEM [12]

6.3 Srovnání uvedených příkladů mikroskopických metod

Tabulka 2 Srovnání mikroskopických metod na měření drsnosti

Název	Výhody	Nevýhody
Mikroskopie atomárních sil	Velmi vysoké rozlišení výstupu, možnost měření více vlastností materiálu	Nutnost náročné přípravy vzorku, nízká rychlost procesu měření, vysoké náklady
Dotykové profilometry	Vysoká přesnost, dostupnost, rozsah uplatnění	Nízká rychlost procesu měření, riziko mechanického poškození povrchu
Konfokální mikroskopie	Vysoké rozlišení výstupu, vysoká rychlost procesu měření, zachovává funkci i při zkoumání transparentních materiálů	Nutnost specifického stupně odrazivosti plochy, vysoké náklady
Interferenční mikroskopie	Velmi vysoká přesnost, zachovává funkci i při zkoumání velmi hladkých povrchů	Omezené použití na specifický rozsah drsností povrchu, nutnost úplného zamezení pohybu vzorku
Skenovací elektronová mikroskopie	Vysoké rozlišení výstupu	Nutnost vakua kolem vzorku, vysoké náklady

I PRAKTICKÁ ČÁST

7 CÍLE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Hlavním cílem této práce je zhodnocení vlivu zvolených procesních parametrů na výslednou drsnost povrchu zkušebních těles.

- Vypracovat literární studii zabývající se řešenou tematikou – v rámci teoretické části byl vypracován souhrn informací, který slouží pro seznámení s technologiemi použitých v experimentu a pro pochopení jeho problematiky.
- Návrh a výroba zkušebních těles – v první sekci praktické části je cílem práce návrh a výroba zkušebních těles, která budou sloužit k experimentálnímu ověření teoretických předpokladů. Tělesa byla vyrobena v souladu s požadavky na tvar, rozměry a materiál s cílem umožnit objektivní hodnocení vlivu zvolených parametrů.
- Zvolení procesních parametrů pro experiment – dalším cílem je zvolení vhodných parametrů, které umožní sledovat jejich dopad na výslednou drsnost povrchu, a tím i určit optimální podmínky dokončovacího procesu.
- Měření drsnosti zkušebních těles – ve finální části je cílem měření drsnosti povrchu těles, která prošla dokončováním pomocí metody AFM. K tomuto účelu je nutno vhodně zvolit mikroskopickou metodu, pomocí které bude možné povrchy měřit a dosáhnout přesných výsledků. Ty pak budou následně analyzovány a zhodnoceny s ohledem na zvolené procesní parametry.

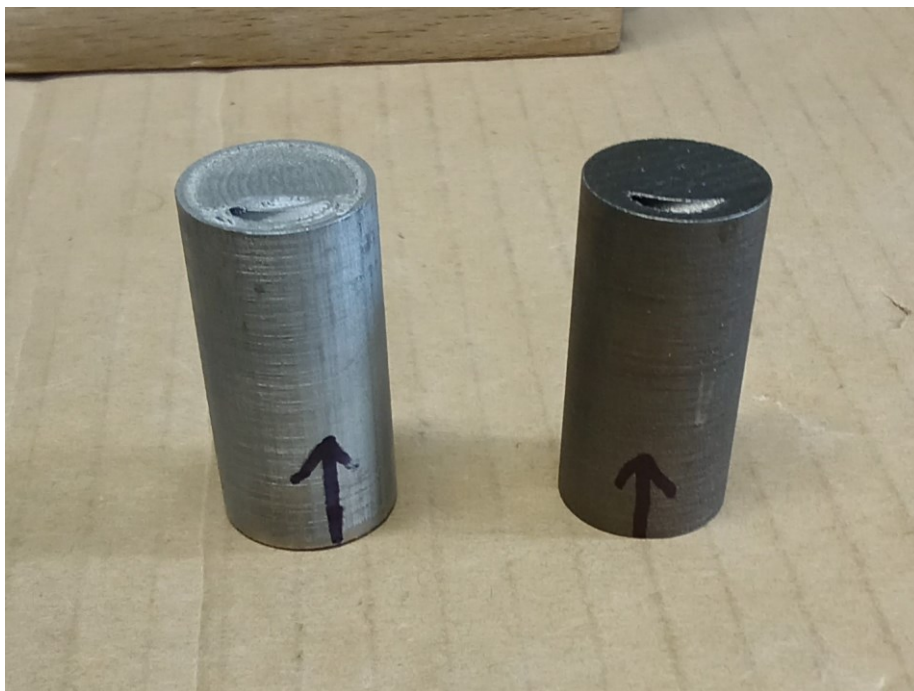
Výsledkem práce bude poskytnutí praktických poznatků o vlivu procesních parametrů na kvalitu povrchu.

8 POUŽITÉ ZAŘÍZENÍ, POPIS EXPERIMENTU A ZKUŠEBNÍCH TĚLES

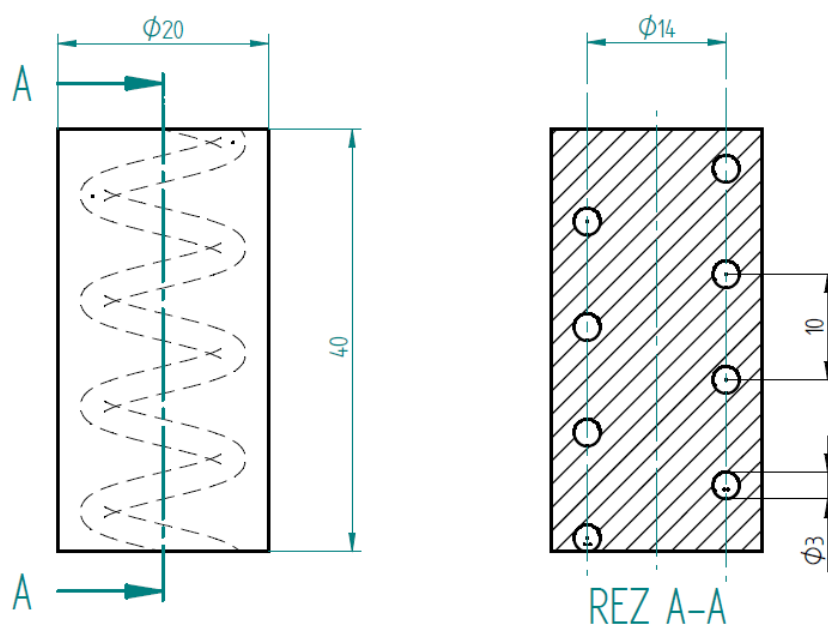
Tématem praktické části je vliv parametrů zařízení AFM na účinek dokončování pomocí metody AFM. Experiment se zabývá návrhem a konstrukcí zkušebních těles, popisuje postup dokončovacího procesu pomocí unikátního typu zařízení na obousměrné průtokové obrábění a z dat získaných pomocí optického profilometru Zygo Newview 8 000 zkoumá vliv počtu cyklů na výsledných povrchových vlastnostech temperančních kanálků, které byly obrobeny pomocí metody obousměrného AFM. Cílem je navázat na práci Ing. Jana Hanzlíka, Ph.D s názvem „Využití aditivních technologií výroby v oblasti temperace vstřikovacích forem“ z roku 2024 a srovnat výsledky zmíněné práce s výsledky, kterých bylo dosaženo během experimentu za mnohonásobného zvýšení počtu cyklů.

8.1 Zkušební tělesa

V rámci prvního kroku byla navrhnutá zkušební tělesa vhodná pro aditivní výrobu. Jedná se o válcovitá tělesa s vnitřními dutinami ve tvaru šroubovice. Šroubovice má stoupání 10 mm a kruhový profil o průměru 3 mm. Parametry vnitřních dutin umožňují aditivní výrobu bez užití podpor a jsou vhodně dimenzovány pro bezproblémový průtok abrazivního média. První těleso bylo vyrobeno z oceli 12344 pomocí metody ADAM a druhé bylo vyrobeno z oceli 12709 pomocí metody DMLS.



Obrázek 12 Zkušební tělesa vyrobená metodami ADAM (vlevo) a DMLS (vpravo)



Obrázek 13 Výkres návrhu zkušebního tělesa

8.2 Zařízení AFM

K experimentu bylo využito zařízení, které bylo na Technologické fakultě Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně navrženo a zkonstruováno v rámci disertační práce „Využití aditivních technologií výroby v oblasti temperace vstřikovacích forem“ vypracované Ing. Janem Hanzlíkem, Ph.D. v roce 2024.

Zařízení bylo zkonstruováno za účelem dokončování a zvýšení kvality vnitřních ploch kanálků u konformních temperančních systémů vstřikovacích forem. Zároveň byl jeho návrh vytvořen s ohledem na univerzální použití, které umožňuje obrábět díly různých geometrií a velikostí. [27]

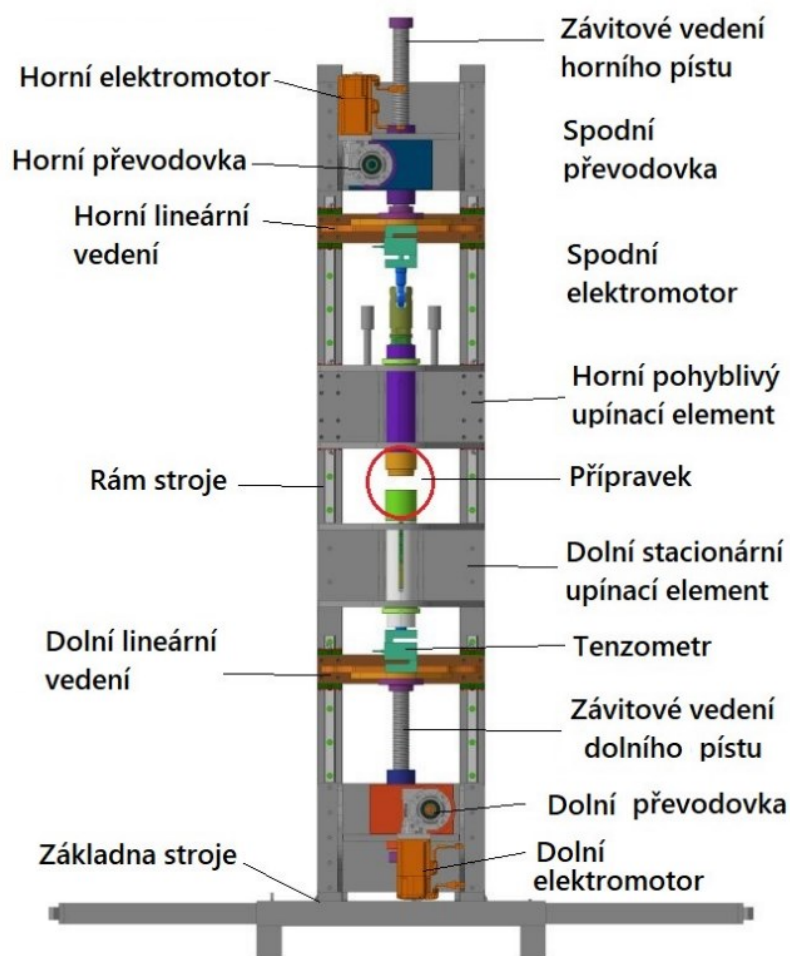


Obrázek 14 Zařízení AFM použité v experimentu

Principem, který zařízení využívá, je technologie obousměrného AFM. Tato technologie je vhodná k obrábění drobnějších dílů. Pro díly větších rozměrů umožňuje zařízení využít i technologii jednosměrného AFM. V takovém případě lze s využitím dalších specifických přípravků vytvořit bypass, který umožní protlačování abrazivního média mimo upínací systém zařízení. [27]

Zařízení je oproti běžným AFM strojům unikát vzhledem ke způsobu generace tlaku v pracovních válcích. Zatímco běžné AFM stroje využívají hydraulických pístů k protlačování média, použité zařízení využívá dvou elektromotorů, které jsou spolu s převodovkami umístěny v horní a dolní části stroje. Pro převod na lineární pohyb jsou využívány dvě závitové tyče. Ty jsou zajištěny horním a dolním lineárním vedením. Horní i

dolní část stroje je vybavena tenzometry, potřebnými pro monitorování mechanického zatížení, což je klíčové pro kontrolu přesnosti, stabilitu pohybu a spolehlivost zařízení během dokončovacího procesu. Přípravek je upnut mezi upínací elementy, z nichž horní je pohyblivý, aby bylo umožněno vložení a vyjmutí přípravku. Tyto elementy jsou po vložení přípravku a před začátkem dokončovacího procesu pevně spojeny. [27]



Obrázek 15 Schéma sestavy použitého zařízení AFM [27]

8.3 Postup dokončovacího procesu

Prvním krokem procesu dokončování je příprava zkušební tělesa. Těleso je vloženo a zajištěno v upínacím přípravku. Ten je ve většině případů vyroben přímo pro konkrétní zkušební vzorek a nelze jej využít na obrábění těles jiných tvarů či rozměrů. Po zkompletování upínacího přípravku s vloženým tělesem jsou na obou stranách přípravku v místech styku s pracovními válci vloženy měděné těsnící kroužky. Pro ještě větší snížení

rizika úniku média jsou kontaktní plochy upínacího přípravku pokryty mazivem či silikonovou pastou.



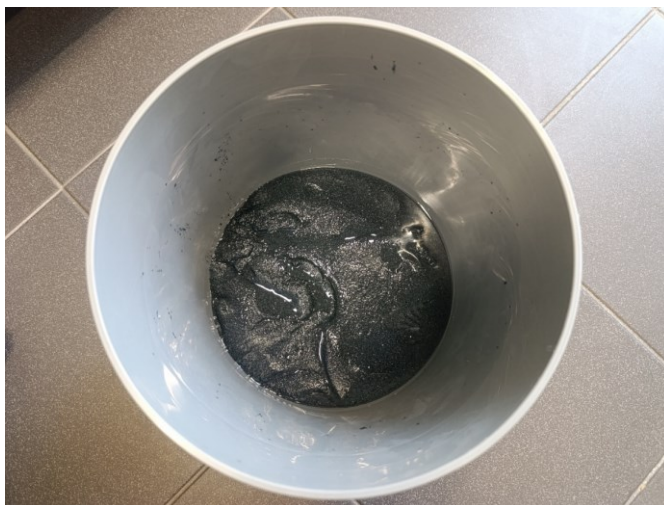
Obrázek 16 Upínací přípravek před vložením tělesa



Obrázek 17 Upínací přípravek po vložení a zajištění tělesa

V dalším kroku je nutná příprava abrazivního média, kterým bude těleso obráběno. Během experimentu bylo využito médium EM25021, které poskytla společnost Extrude Hone LLC, USA. Pro spolehlivý abrazivní účinek je nutno před vložením do pracovního válce směs homogenizovat. Toho je docíleno mechanickým mícháním za pokojové teploty do konzistence homogenní pasty. Díky tomu zároveň dojde k zapracování separovaného oleje. Následně je nutno odvážit vhodné množství média pro experiment a před použitím zkontrolovat jeho čistotu. Tou je myšlena absence cizích částic jako jsou špony a jiné

nečistoty, které by negativně ovlivňovaly abrazivní účinek nebo by mohly poškodit obráběný díl a samotné zařízení AFM.



Obrázek 18 Abrazivní médium EM25021



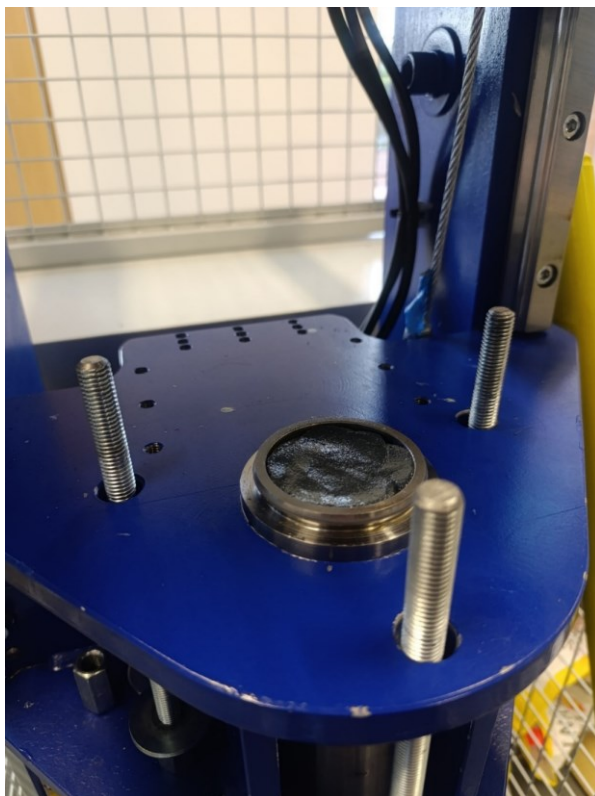
Obrázek 19 Množství abrazivního média použité pro experiment

Po kompletaci upínacího přípravku a odvážení $100\,000\text{ mm}^3$ abrazivního média je zařízení AFM uvedeno do výchozí pozice, ve které nejsou dolní stacionární element a horní pohyblivý element ve spojení. Tím je umožněn snadný přístup do pracovních válců. Oba písty jsou v otevřené poloze.



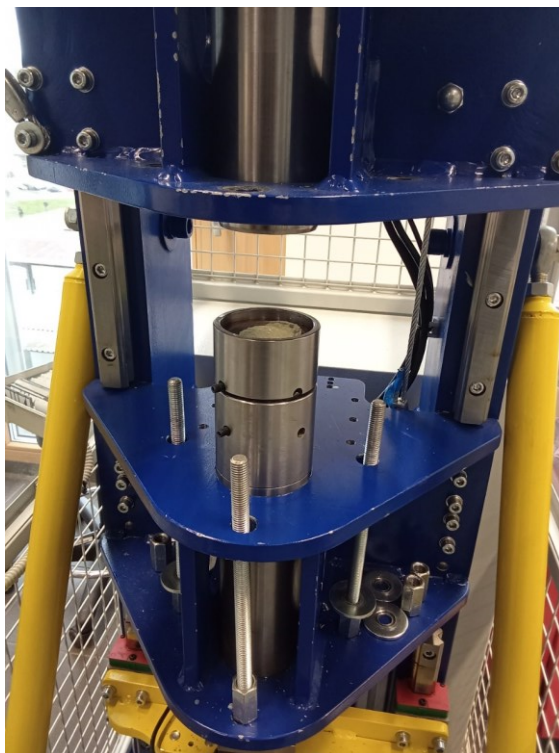
Obrázek 20 Zařízení AFM ve výchozí pozici

Do spodního pracovního válce je posléze vloženo odvážené množství připraveného homogenizovaného abrazivního média. Po jeho doplnění je nutno zkontrolovat, že médium nepřesahuje vrchní hranici pracovního válce a nikterak nezabraňuje umístění upínacího přípravku.



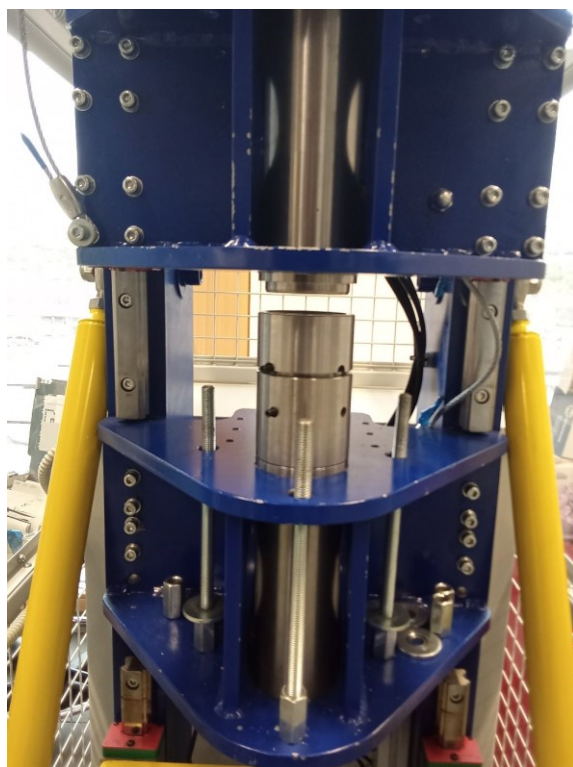
Obrázek 21 Dolní pracovní válec po naplnění abrazivním médiem

V dalším kroku je připravený upínací přípravek nasazen na pracovní válec. V tomto bodě je třeba zkontrolovat funkčnost těsnících prvků.



Obrázek 22 Zařízení AFM po vložení upínacího přípravku

Následně je v řídicí jednotce spuštěn příkaz pro uzavření upínacích elementů. Horní upínací element je posunut směrem dolů a zastaví se těsně nad vloženým přípravkem. Následuje krátká prodleva, která slouží k vystředění upínacího přípravku, aby bylo možné zajistit bezproblémové spojení s vrchním pracovním válcem. Vzhledem k vysokým silám, kterými upínací elementy působí při sevření upínacího přípravku by mohlo při chybném vystředění dojít k deformaci upínacího přípravku či poškození pracovních válců a samotného AFM stroje.



Obrázek 23 Pozice horního pohyblivého elementu před úplným uzavřením upínacích elementů pro vystředění upínacího přípravku

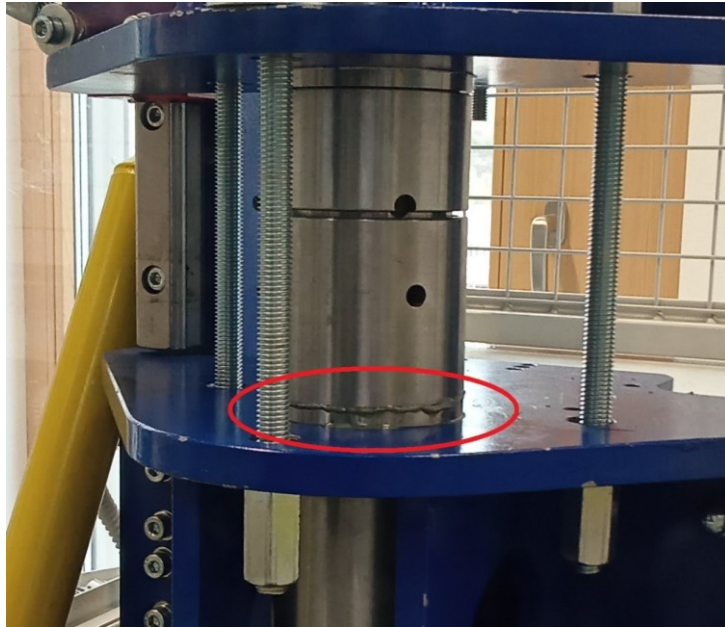
Po úplném sevření upínacích elementů, jsou tyto elementy manuálně spojeny pomocí třech závitových tyčí. Tímto krokem se zabrání jejich nežádoucímu pohybu i za působení velkých sil během protlačování abrazivního média. Po spojení upínacích elementů je v řídicí jednotce spuštěn příkaz, který vrchní píst uvede do startovní polohy.



Obrázek 24 Zařízení AFM po spojení upínacích elementů

8.4 Možné závady

Častým problémem, který se může během dokončovacího procesu vyskytnout je únik abrazivního média. Dochází k němu zejména v případě selhání těsnění v dotykových plochách mezi upínacím přípravkem a upínacími elementy. Během experimentu se tato závada vyskytla během prvních zkušebních cyklů v oblasti dotykových ploch mezi upínacím přípravkem a dolním upínacím elementem. Možným řešením je snížení rychlosti protlačování.

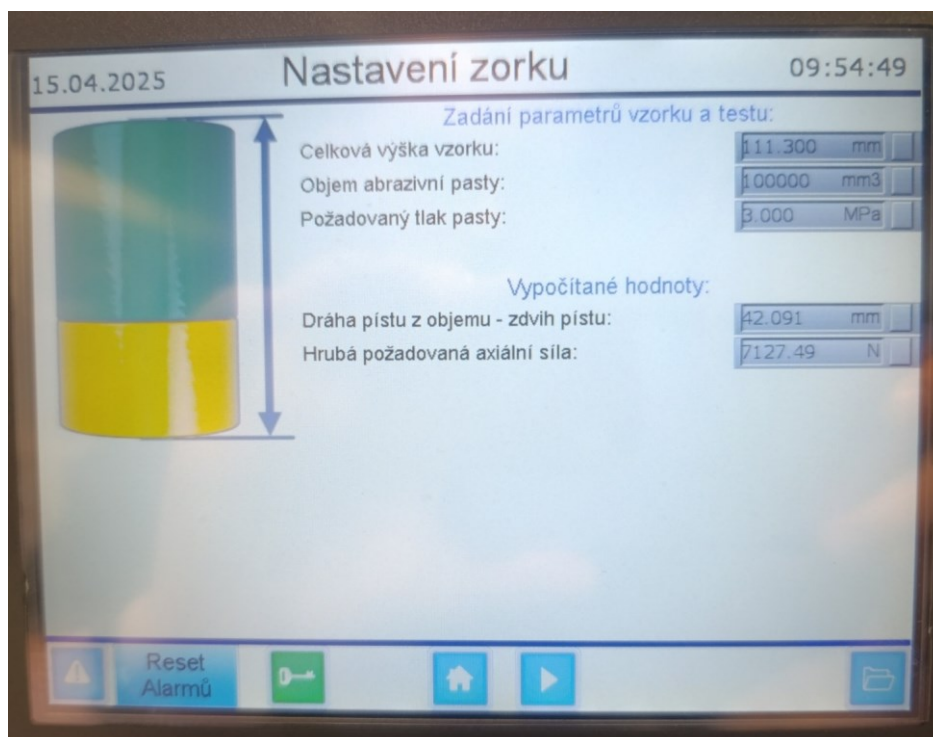


Obrázek 25 Únik abrazivního média

8.5 Volba procesních parametrů

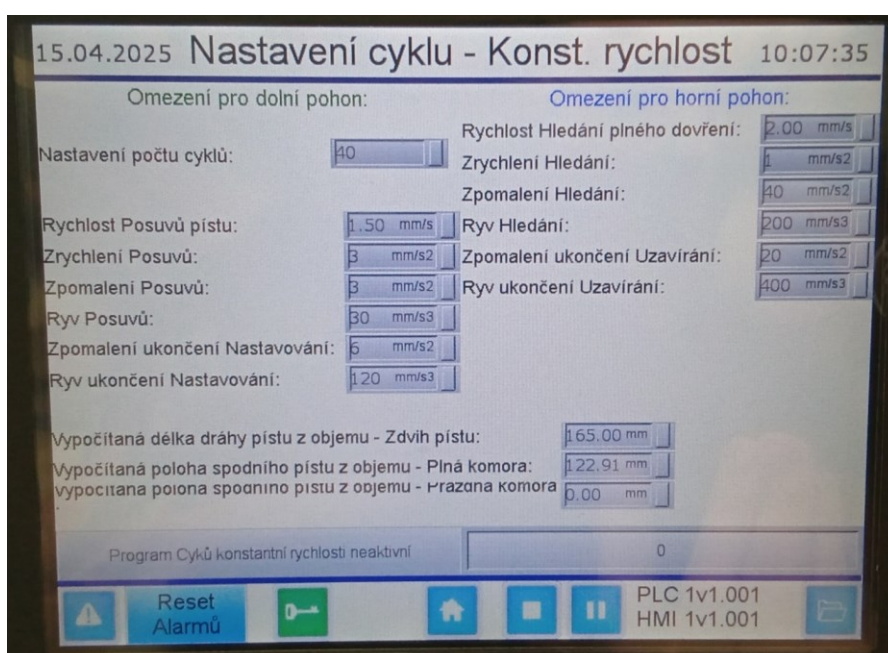
Součástí sestavy použitého AFM zařízení je Řídící jednotka. Během experimentu byla využita pro zadání parametrů dokončovacího procesu a monitorování jeho průběhu.

Pro správnou funkci zařízení je zásadní zadat do řídicí jednotky parametry upínacího přípravku, objem použitého abrazivního média a tlak, kterým bude médium protlačováno. Po zadání těchto parametrů proběhne v řídicí jednotce výpočet dráhy pístu a požadované axiální síly. Všechny parametry jsou upravitelné.



Obrázek 26 Nastavení vzorku v řídicí jednotce

V rámci experimentu je další zásadní oblast parametrů v nastavení cyklu. Zejména se zde nachází nastavení počtu cyklů, které je v této práci hlavním zkoumaným parametrem ve smyslu vlivu na účinek dokončování. Během experimentu byly provedeny 3 série po 40 cyklech s průběžnými kontrolami výskytu závad. Před zkoumáním povrchových vlastností tak bylo celkově provedeno 120 cyklů.



Obrázek 27 Nastavení cyklu v řídicí jednotce

8.6 Shrnutí hlavních procesních parametrů

Procesní parametry byly voleny pro vytvoření stejných podmínek jako ve studiích Ing. Jana Hanzlíka, Ph.D. Změna nastala ve volbě počtu cyklů pro srovnání výsledků obou prací. Experiment tedy proběhl za těchto hlavních procesních parametrů:

Tabulka 3 Procesní parametry [27]

Parametry testování	
Rychlost protlačování [mm/s]	1,5
Objem abrazivního média [dl]	1
Délka dráhy jednoho cyklu [mm]	84
Typ obráběcího média [-]	EM25021
Počet testovaných cyklů [-]	120
Čas jednoho cyklu [s]	56
Technologie výroby zkušebních těles [-]	DMLS
Stoupání šroubovice zkušebního tělesa [mm]	10
Směr protlačování v počátku cyklu [-]	Rovnoběžně se směrem tisku těles

8.7 Použitý optický profilometr

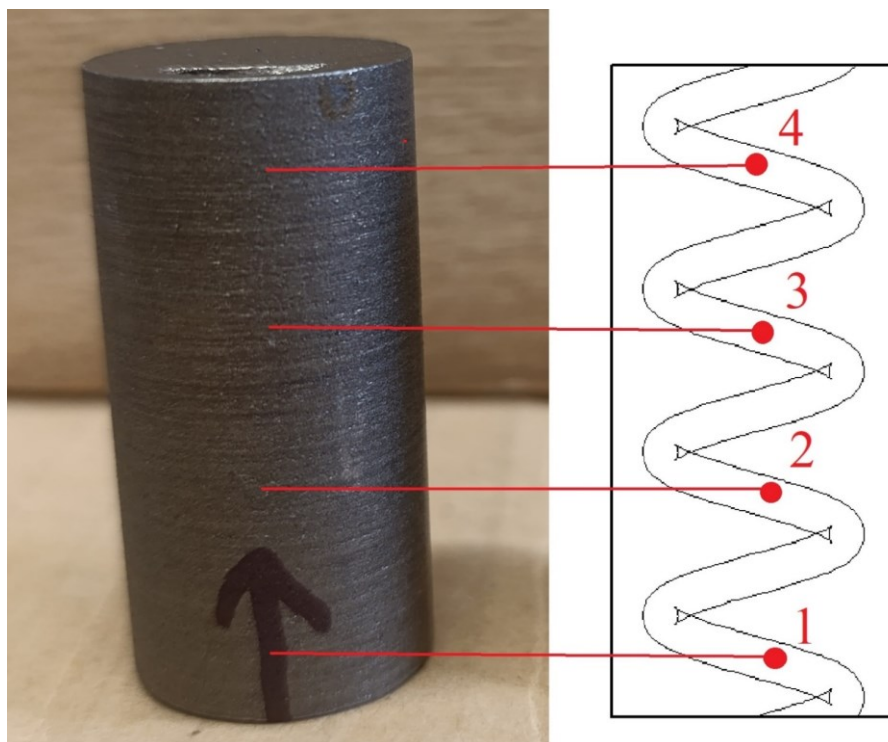
K dosažení následujících výsledků byl použit optický 3D profilometr Zygo NewView 8000, který vlastní Ústav výrobního inženýrství univerzity Tomáše Bati ve Zlíně. Využívá technologii Coherence Scanning Interferometry a je vhodný k měření povrchů transparentních i netransparentních materiálů. Mimo jiné je vhodný pro měření povrchů kovů, což z něj činí vhodnou volbu pro experiment v této práci. Disponuje opakovatelností až 0,12 mm, rychlostí vertikálního skenování $96 \mu\text{m.s}^{-1}$, rozsahem výšky skenovaného profilu od 150 μm do 20 000 μm a zorným polem od 0,04 mm do 16 mm. [28]



Obrázek 28 Optický 3D profilometr Zygo NewView 8000

8.8 Metodika měření drsnosti povrchu zkušebních těles

Měření pomocí optického profilometru bylo provedeno ve 4 bodech na plošných úsecích kanálku ve zkušebním tělese. Pořadí těchto bodů je číslováno ve směru aditivní výroby vždy po jednom stoupání šroubovice. Každá naměřená plocha byla rozdělena na 50 tzv. řezů a naměřené parametry drsnosti povrchu byly mezi řezy statisticky zpracovány. Vzhledem k nepřístupnosti měřených ploch na tělese bylo nejprve nutné provést soustružení do hloubky, při niž byly kanálky odhaleny a bylo tak umožněno měření pomocí výše zmíněného optického profilometru. Měřenými parametry byla aritmeticky průměrná odchylka R_a a průměrná hloubka R_z .



Obrázek 29 Číslování měřených ploch uvnitř zkušebního tělesa

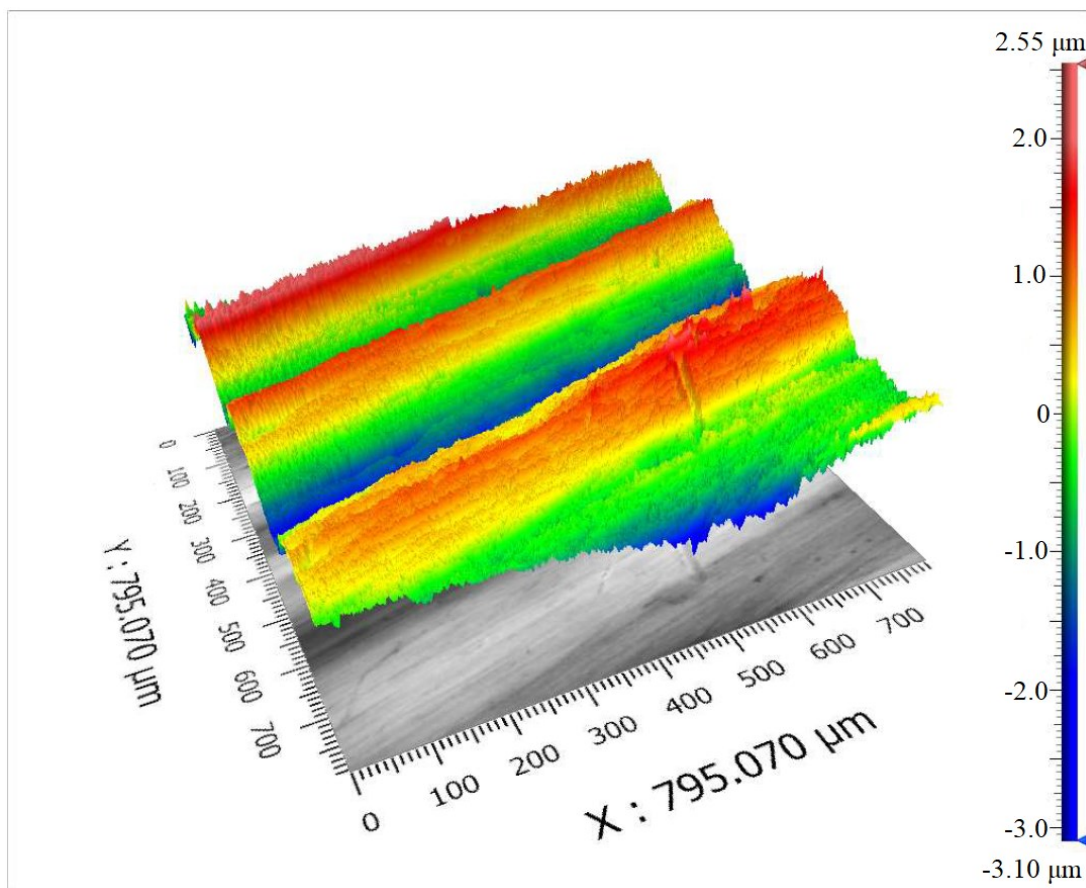
9 VÝSLEDKY MĚŘENÍ

Během prvního měření byly naměřeny následující hodnoty parametrů drsnosti povrchu.

Tabulka 4 Statistické údaje naměřených parametrů Ra a Rz na ploše č.1

Parametr	Ra (μm)	Rz (μm)
Průměr	0,364	0,963
Směrodatná odchylka	0,135	0,234

Na projekci naměřených dat z prvního měření (obrázek 29) lze rozeznat tzv. peaks a valleys. Peaks jsou části povrchu, které vyčnívají nad průměrnou nebo referenční hladinou a valleys jsou části, které se nachází pod touto hladinou. Maximální naměřená hodnota drsnosti povrchu je $2,55 \mu\text{m}$ a minimální hodnota tohoto parametru je $-3,10 \mu\text{m}$. Po dokončovacím procesu s počtem cyklů 120 bylo dosaženo průměrné hodnoty parametru Rz $0,963 \mu\text{m}$. Již během tohoto měření lze při porovnání této hodnoty s hodnotou stejného parametru při měření po 60 cyklech usoudit, že došlo ke značnému úběru materiálu a snížení celkové drsnosti.



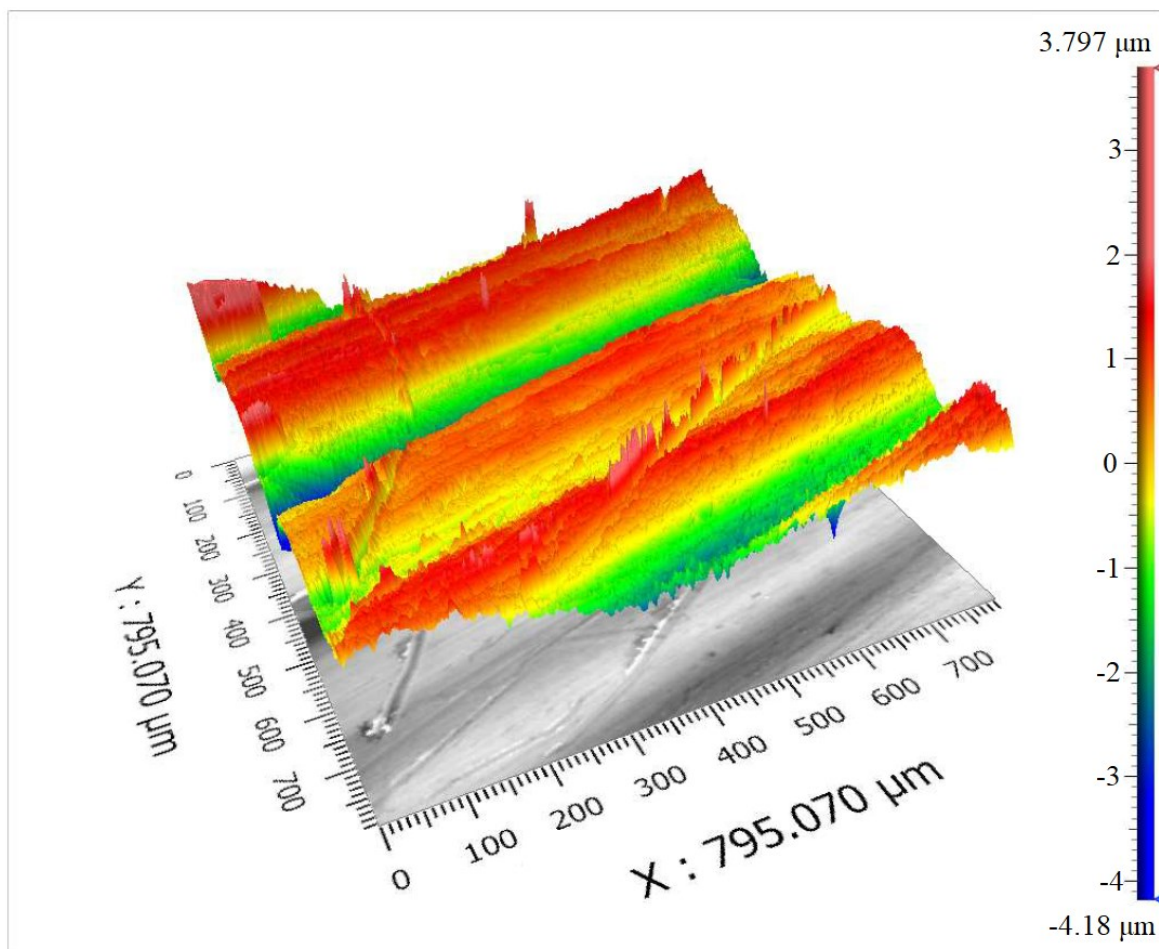
Obrázek 30 Projekce naměřených dat povrchu kanálu zkušebního tělesa (technologie: DMLS, počet cyklů: 120, plocha č.1)

Během druhého měření byly naměřeny následující hodnoty parametrů drsnosti povrchu.

Tabulka 5 Statistické údaje naměřených parametrů Ra a Rz na ploše č.2

Parametr	Ra (μm)	Rz (μm)
Průměr	0,566	1,515
Směrodatná odchylka	0,244	0,347

Na projekci naměřených dat z druhého měření (obrázek 30) lze na povrchu opět vidět peaks a valleys. Stejně jako u prvního měření bylo dosaženo nižší průměrné hodnoty než po 60 cyklech. Hodnota je však větší než při prvním měření.



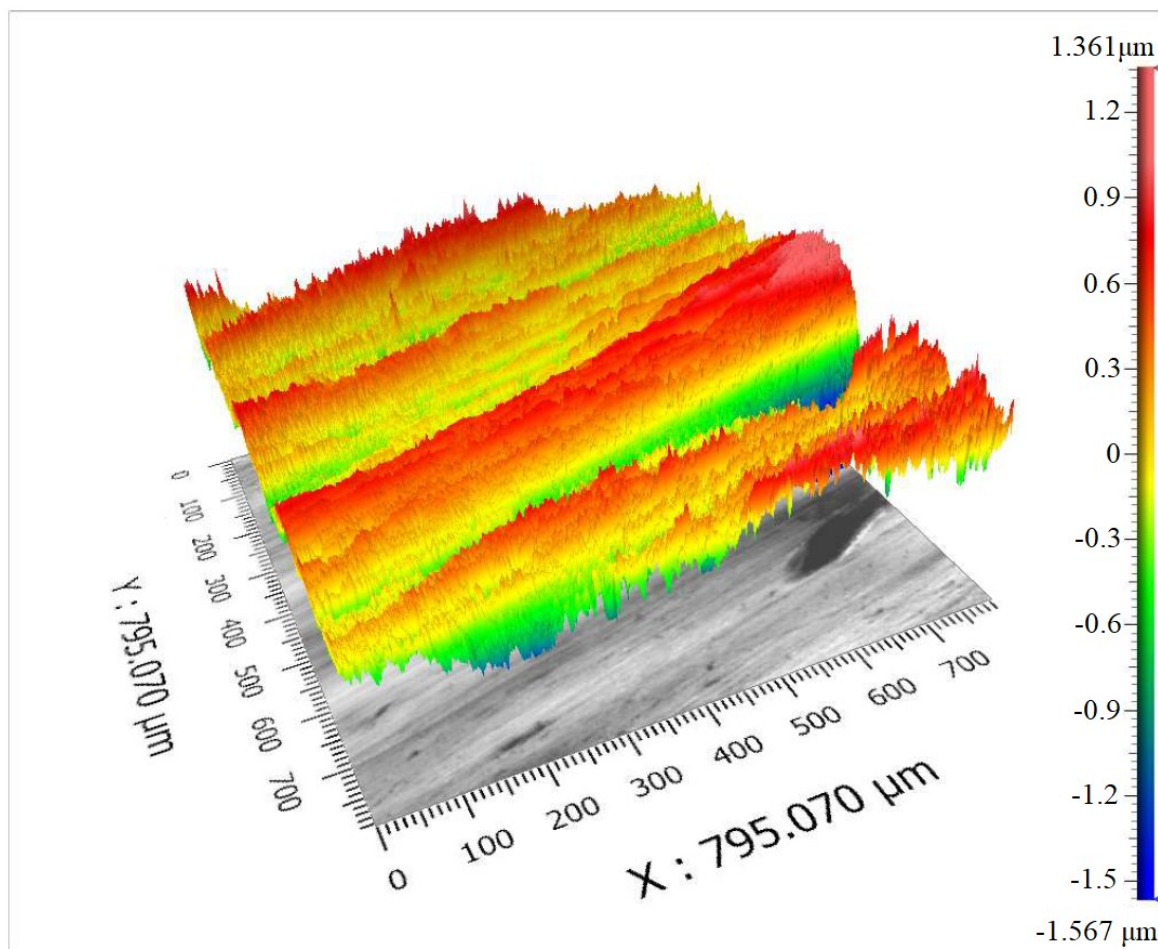
Obrázek 31 Projekce naměřených dat povrchu kanálu zkušebního tělesa (technologie: DMLS, počet cyklů: 120, plocha č.2)

Během třetího měření byly naměřeny následující hodnoty parametrů drsnosti povrchu.

Tabulka 6 Statistické údaje naměřených parametrů Ra a Rz na ploše č.3

Parametr	Ra (μm)	Rz (μm)
Průměr	0,217	0,8
Směrodatná odchylka	0,058	0,161

Stejně jako při projekcích předchozích měření je i na projekci naměřených dat z třetího měření (obrázek 31) patrný výskyt peaks a valleys. V tomto případě bylo dosaženo nejnižší průměrné hodnoty parametru Rz ze všech měření. Z toho vyplývá, že na měřené ploše č.3 došlo k nejefektivnějšímu účinku obrábění.



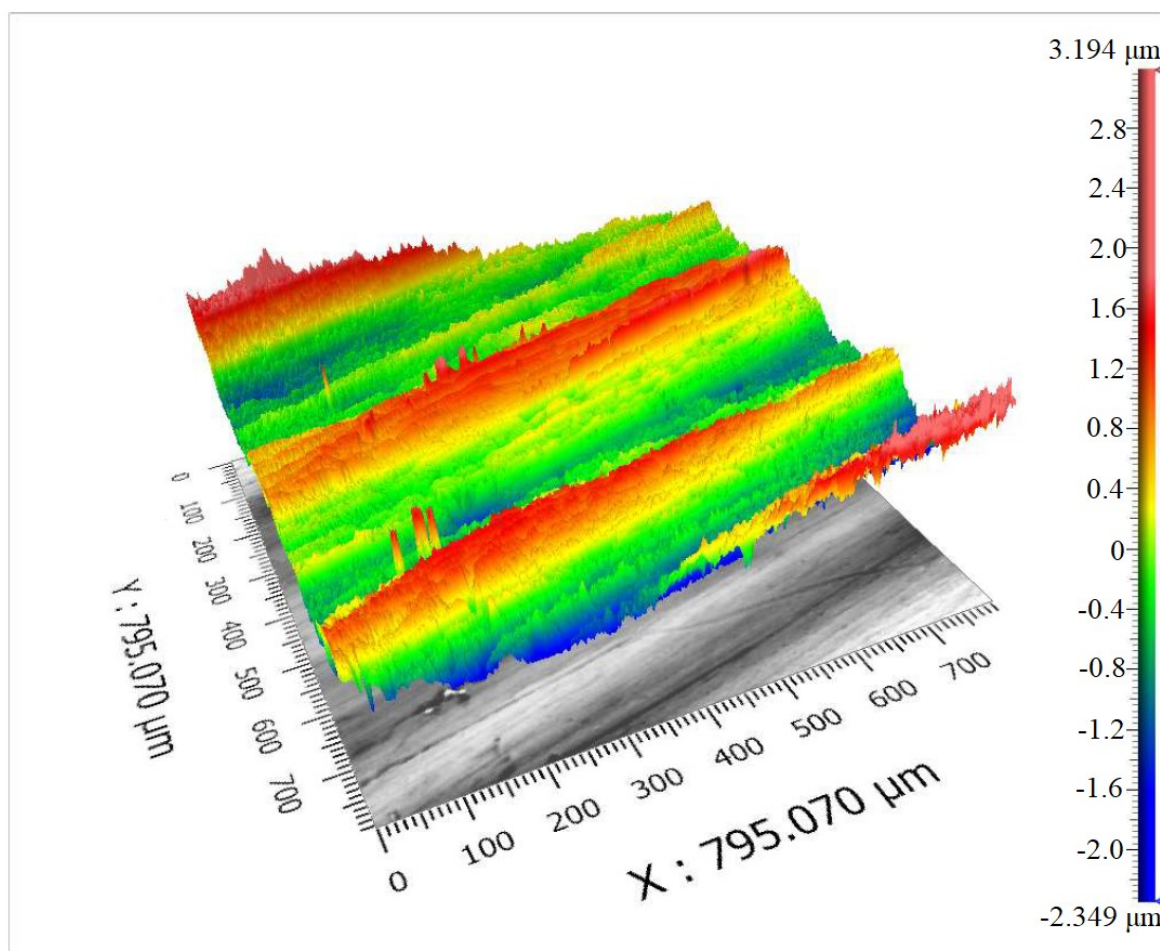
Obrázek 32 Projekce naměřených dat povrchu kanálu zkušebního tělesa (technologie: DMLS, počet cyklů: 120, plocha č.3)

Během čtvrtého měření byly naměřeny následující hodnoty parametrů drsnosti povrchu.

Tabulka 7 Statistické údaje naměřených parametrů Ra a Rz na ploše č.4

Parametr	Ra (μm)	Rz (μm)
Průměr	0,33	1,061
Směrodatná odchylka	0,14	0,276

V případě projekce naměřených dat z čtvrtého měření (obrázek 32) byla průměrná hodnota parametru Rz srovnatelná s měřením na ploše č. 1. Toto tvrzení vychází ze skutečnosti, že plocha č.1 i plocha č.4 se nachází nejbližší k otvorům temperačního kanálku ve zkušebním tělese a účinek obrábění za použití obousměrného AFM by měl dosahovat obdobných hodnot.



Obrázek 33 Projekce naměřených dat povrchu kanálu zkušebního tělesa (technologie: DMLS, počet cyklů: 120, plocha č.4)

10 DISKUZE VÝSLEDKŮ

Tento experiment byl zaměřen na procesní parametry technologie AFM a ověření vlivu, který mají na účinek dokončování pomocí této technologie. Parametrem, u něhož byl testován vliv jeho změny byl počet dokončovacích cyklů. V experimentu byl srovnán účinek 120 dokončovacích cyklů na výsledné vlastnosti povrchu s účinkem 60 dokončovacích cyklů. Pro tyto účely bylo navrženo a metodou DMLS vyrobeno zkušební těleso s temperančním kanálkem ve tvaru šroubovice.

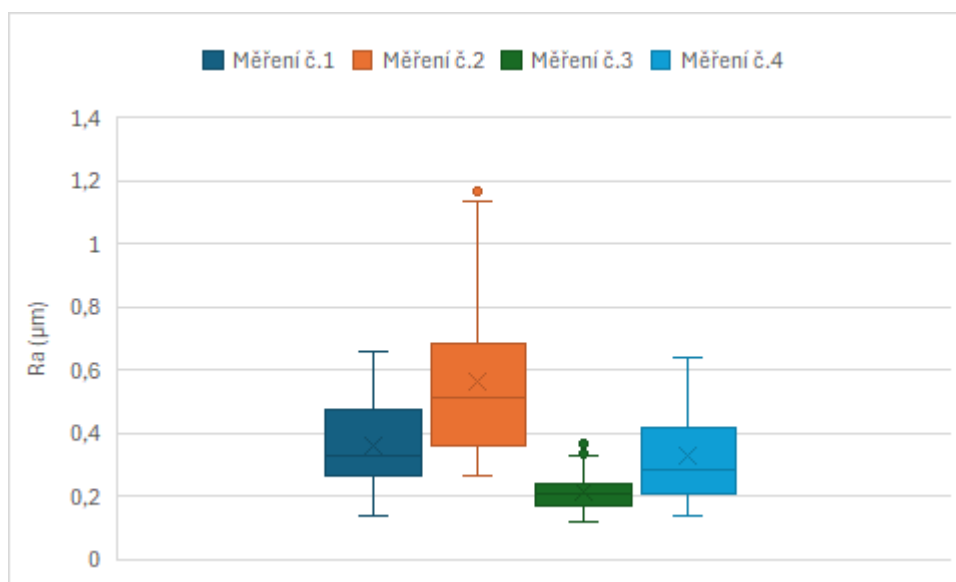
Experiment byl proveden na zařízení AFM, které bylo navrženo a zkonstruováno během vzniku disertační práce „Využití aditivních technologií výroby v oblasti temperace vstříkovacích forem“ vypracované Ing. Janem Hanzlíkem, Ph.D. v roce 2024. Jedná se o zařízení na principu obousměrného AFM, které ve své konstrukci využívá místo běžného hydraulického pohonu dvou elektromotorů. Tato skutečnost činí z tohoto zařízení plně elektrické zařízení AFM a tím i unikát mezi konstrukčními řešeními jiných studií. Během experimentu proběhlo 120 dokončovacích cyklů na tomto zařízení bez problému a však během prvních zkušebních cyklů došlo k úniku abrazivního média z upínacího přípravku. Tomuto úkazu lze zabránit snížením rychlosti protlačování abrazivního média za cenu nižší rovnoměrnosti obrábění. Tuto skutečnost ve své práci potvrzuje autor Ing. Jan Hanzlík, Ph.D. [27]

Po 120 dokončovacích cyklech bylo zkušební těleso soustruženo na úroveň odhalení kanálků, aby bylo umožněno provést měření povrchových vlastností pomocí optického profilometru. Toto měření proběhlo ve 4 bodech vždy po jednom stoupání šroubovice. Výstupem měření byly hodnoty parametru Ra a Rz na 50 řezech pro každou ze 4 měřených ploch. Pomocí těchto hodnot byly vypočteny průměr, směrodatná odchylka a rozsah parametrů Ra a Rz na celé měřené ploše. Tyto hodnoty a jejich projekce byly srovnány mezi sebou a také s daty z předchozích studií [27].

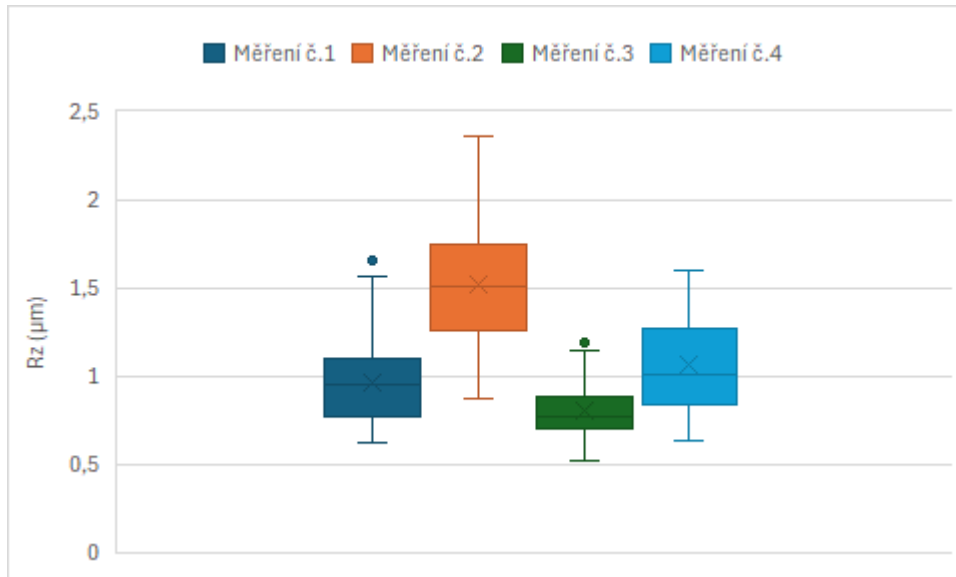
V případě, že je žádoucí měřit povrchové vlastnosti bez destrukce tělesa, je možné využít metodu CT skenování pomocí počítačové tomografie. Nevýhodou je nižší přesnost měření, složitější zpracování dat a vysoké náklady. Z těchto důvodů byla tato metoda shledána nevhodnou pro využití v experimentu. V případě nutnosti bližšího zkoumání struktury povrchu kanálků v tělese by bylo možné využít analýzu SEM. Z výstupu této analýzy by bylo možné odhalit skryté defekty vzorku a bylo by možné výstup srovnat s výstupy optického mikroskopu a rozhodnout o topologické shodě.

10.1 Srovnání výsledků

Pro srovnání výsledných průměrných hodnot parametrů Ra a Rz byly vytvořeny následující grafická znázornění.



Obrázek 34 Graf hodnot parametru Ra

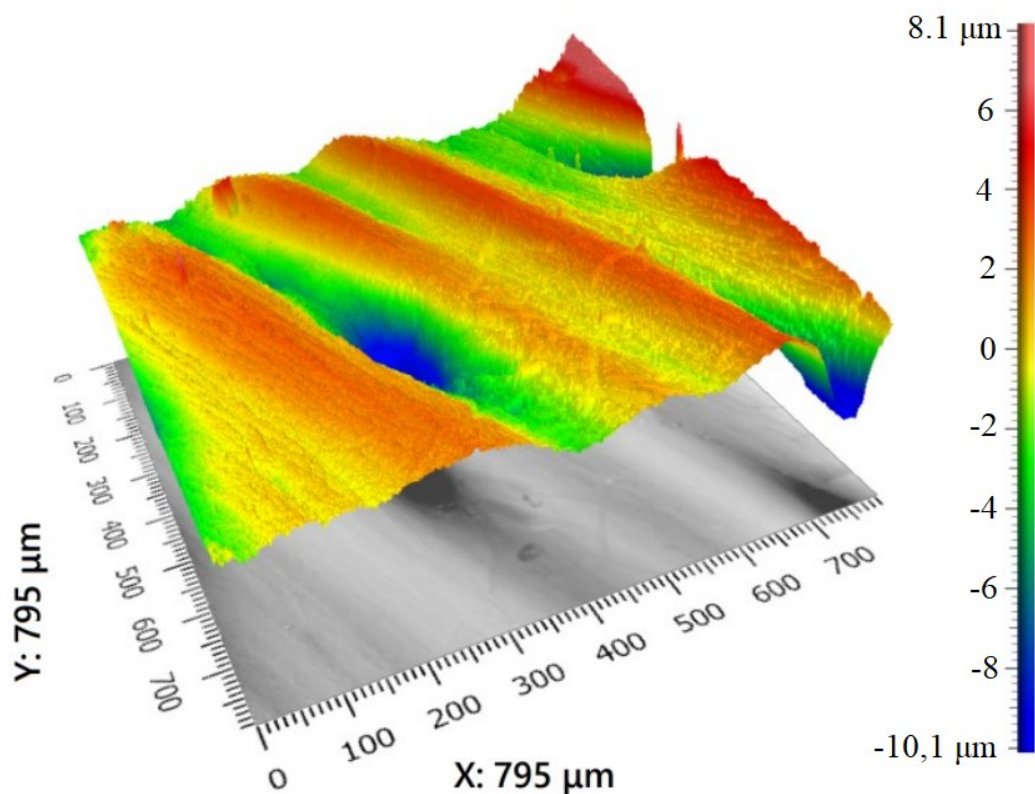


Obrázek 35 Graf hodnot parametru Rz

Z těchto grafických znázornění je patrné, že naměřené hodnoty z jednotlivých ploch nejsou odlehlé. Lze tedy předpokládat, že došlo k rovnoměrnému dokončení povrchu. Dosažení jednoznačného výsledku by však vyžadovalo více statistického testování.

10.2 Parametry drsnosti povrchu po 60 cyklech

Výsledky byly srovnány s daty, které získal Ing. Jan Hanzlík, Ph.D pro dříve zmíněnou práci na totožném tělese za stejných parametrů obrábění pouze po 60 obráběcích cyklech.

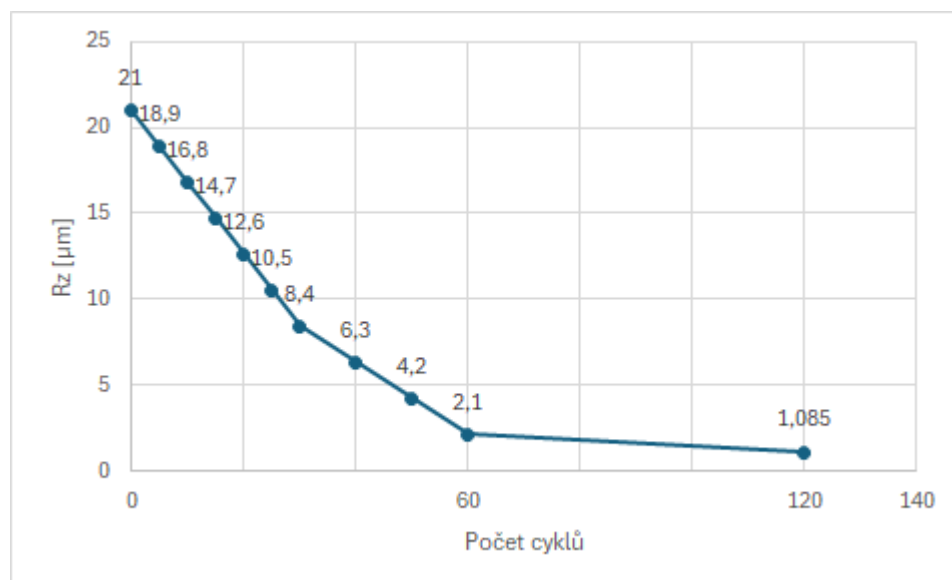


Obrázek 36 Projekce naměřených dat povrchu kanálu zkušebního tělesa (technologie: DMLS, počet cyklů: 60) [27]

Z této projekce (obrázek 27) lze vyčíst maximální a minimální hodnoty drsnosti povrchů zkušebního tělesa. Na zkoumané ploše kanálků tělesa DMLS bylo naměřené maximum $8,1 \mu\text{m}$ a minimum $-10,1 \mu\text{m}$. Nejnižší uvedená průměrná hodnota parametru R_z je $2,1 \mu\text{m}$.

10.3 Srovnání s předchozími studiemi

Průměrná hodnota parametru R_z ze všech 4 měření je $1,086 \mu\text{m}$. Pro srovnání této hodnoty s předchozími studiemi bylo vytvořeno následující grafické znázornění.



Obrázek 37 Graf závislosti parametru Rz na počtu cyklů

Při srovnání výsledků experimentu s předchozími studiemi, které se zabývaly účinkem dokončování za stejných podmínek pouze se změnou počtu dokončovacích cyklů je patrné, že vyšší počet dokončovacích cyklů výrazně snižuje drsnost dokončeného povrchu. Předchozí studie udávají nejnížší dosaženou průměrnou hodnotu parametru Rz po 60 dokončovacích cyklech 2,1 μm a během tohoto experimentu bylo po 120 dokončovacích cyklech dosaženo průměrné hodnoty parametru 1,086 μm . Za dvojnásobného počtu dokončovacích cyklů tedy bylo dosaženo o téměř 48% nižší průměrné hodnoty parametru Rz. [27]

ZÁVĚR

Tato práce se zabývala vlivem procesních parametrů technologie AFM na účinek dokončování pomocí této technologie. Zvoleným procesním parametrem pro výzkum byl počet dokončovacích cyklů. Výsledky dokazují, že změna tohoto parametru výrazně ovlivňuje účinek dokončování. Změnou počtu dokončovacích cyklů lze výrazně ovlivnit výslednou kvalitu dokončovaného povrchu a docílit potřebného úběru materiálu.

Dokončovací proces byl proveden pomocí unikátního zařízení AFM, které bylo navrženo a otestováno v předchozích studiích [27]. Jeho funkceschopnost byla během experimentu potvrzena a byla ověřena jeho účinnost pro dokončování povrchů temperančních kanálků, jejichž dokončování by bylo s využitím konvenčních metod náročné a neefektivní.

Ze zpracování a srovnání dat popisujících kvalitu obrobeného povrchu, kdy tato data byla získána pomocí optického profilometru, bylo ověřeno tvrzení, že vyšší počet dokončovacích cyklů se výrazně podílí na poklesu drsnosti dokončeného povrchu.

Tato bakalářská práce zkoumala hypotézy o změnách parametrů z předchozích studií, rozšířila pole ověřených účinků změn parametrů a poskytuje data, která mohou sloužit jako základ pro další výzkum této tematiky.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] BARCAL, Jaroslav. Nekonenční metody obrábění. Praha: České vysoké učení technické, 1989.
- [2] BRENT STUCKER. Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing. Second edition. Springer, 2015. ISBN 9781493921126. Dostupné také z: <https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=nlebk&an=2532852&scope=site>.
- [3] BRYCHTA Josef, SADÍLEK Marek, ČEP Robert, PETRŮ Jana. Progresivní metody v obrábění. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava. 2011. Online. Dostupné z: https://projekty.fs.vsb.cz/019/dokumenty/Progresivni_metody_v_obrabeni_FINAL.pdf
- [4] DIXIT, Nitin; SHARMA, Varun a KUMAR, Paradeep. Research trends in abrasive flow machining: A systematic review. Procedia Technology. 2021, vol. 64, s. 1434-1461. ISSN 1526-6125.
- [5] DRÁBEK, Michal. MĚŘENÍ DRSNOSTI ŘEZNÝCH HRAN PŘI LASEROVÉM DĚLENÍ KOVŮ. Online, Bakalářská práce, vedoucí RNDr. LIBOR MRŇA, Ph.D. BRNO: VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ, 2012. Dostupné z: https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php. [cit. 2025-03-17].
- [6] GALATI, Manuela a MINETOLA, Paolo. Analysis of Density, Roughness, and Accuracy of the Atomic Diffusion Additive Manufacturing (ADAM) Process for Metal Parts. Online. Materials 2019. 2019, roč. 12, č. 24, s. 1-15. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/ma12244122>. [cit. 2025-02-05].
- [7] Jemná mechanika a optika: vědecko-technický časopis. Praha: Fyzikální ústav AV ČR, 1999-. ISSN 0447-6441.
- [8] KOPAČKA, Štěpán. Dokončování povrchu – Moderní technologie. Online, Bakalářská práce, vedoucí Ing. Vítězslav Rázek, CSc. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2021. Dostupné

- z: https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/97258/F2-BP-2021-Kopacka-Stepan-Kopacka%20Stepan_Bakalarska%20prace_29.7.2021.pdf [cit. 2025-03-17].
- [9] KUBÍNEK Roman, VŮJTEK Milan, HOLUBOVÁ Renata. Mikroskopie atomárních sil. Katedra experimentální fyziky přírodovědecké fakulty Univerzity Palackého v Olomouci, 2001. Online. Dostupné z: <http://atmilab.upol.cz/texty/mfi.pdf> [cit 17. 3. 2025].
- [10] KUMAR, S. Santhosh a HIREMATH, Somashekhar S. A Review on Abrasive Flow Machining (AFM). *Procedia Technology*. 2016, vol. 25, s. 1297-1304. ISSN 2212-0173.
- [11] MARKFORGED. *Learning Library*. Online. Markforged. 2025. Dostupné z: <https://markforged.com/resources/learning-library>. [cit. 2025-04-09].
- [12] MATCA. Skenovací elektronový mikroskop (SEM). Online. 2025. Dostupné z: <https://matca.cz/technologie/analyticke-metody/sem/>. [cit. 2025-03-17].
- [13] NĚMEČEK Jiří. Metody skenovací elektronové mikroskopie SEM a analytické techniky. ČVUT Praha, Fakulta stavební. 2018. Online. Dostupné z: http://ksm.fsv.cvut.cz/~nemecek/teaching/dmpo/lectures/D32MPO_02.pdf
- [14] SOMMER, Pavel. Konfokální mikroskopie. Online, Bakalářská práce, vedoucí Ing. BcA. Jan Podaný, Ph.D. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2022. Dostupné z: <https://theses.cz/id/q8vqdo/BP.pdf>. [cit. 2025-03-17].
- [15] VESELÝ, Martin. Obrábění ultrazvukem a obrábění proudem abraziva. Online, Bakalářská práce, vedoucí Ing. Pavel Novák, Ph.D. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2022. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/103341/F2-BP-2022-Vesely-Martin-Martin%20Vesely%20Bakalarska%20prace%202022.pdf>. [cit. 2025-03-17].
- [16] VRZAL, Jan. APLIKACE MĚŘICÍCH SOND V PROCESU OBRÁBĚNÍ. Online, Bakalářská práce, vedoucí Ing. ALEŠ POLZER, Ph.D. Brno: VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ, 2013. Dostupné z: <https://theses.cz/id/q8vqdo/BP.pdf>. [cit. 2025-03-17].

- [17] YANG, Shengqiang a LI, Wenhui. Surface Finishing Theory and New Technology. Online. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2018. ISBN 978-3-662-54131-9. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/978-3-662-54133-3>.
- [18] RHOADES, Larry. Abrasive flow machining: a case study. *Journal of Materials Processing Technology*. 1991, č. 28, s. 107-116.
- [19] Trends in physics: 8. general conference of the European Physical Society in collaboration with the Netherlands Physical Society, Amsterdam, September 4-8 1990 : proceedings. Prague: Union of Czechoslovak Mathematicians and Physicists, 1991. ISBN 80-7015-252-4. Dostupné také z: <http://kramerusndk.nkp.cz/search/handle/uuid:3036cc60-5592-11e2-8888-005056827e51> - Part 1.
- [20] TAN, Kai Liang; YEO, Swee-Hock a ONG, Chin Hwee. Nontraditional finishing processes for internal surfaces and passages: A review. Online. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. 2017, roč. 231, č. 13, s. 2302-2316. ISSN 0954-4054. Dostupné z: <https://doi.org/10.1177/0954405415626087>. [cit. 2025-04-10].
- [21] HUMÁR, Anton. TECHNOLOGIE I TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ – 3.část [online]. 2005, 57 s. [cit. 2022-11-01]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/studijniopory/Dokoncovaci_a_nekonvencni_mety_obrabeni/TI_TO-3.cast.pdf
- [22] BARCAL, Jaroslav a České vysoké učení technické v Praze. Strojní fakulta. Nekonvenční metody obrábění. 1. vyd. Praha: Ediční středisko Českého vysokého učení technického, 1989
- [23] A Review on Abrasive Flow Machining (AFM). *Procedia Technology* [online]. 2016, 2016, 1297-1304 [cit. 2022-05-06]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.protcy.2016.08.224>.
- [24] MÁDL, Jan a Jaroslav BARCAL. *Základy technologie II*. Vyd. 2. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2007. ISBN 978-80-01-03733-1.
- [25] MÁDL, Jan. *Technologie obrábění*. 1. díl. Vyd. 2., přeprac. Praha: ČVUT, 2007. 80 s. ISBN 978-80-01-03752-2.

- [26] MÁDL, Jan. *Technologie obrábění*. 3. díl. Vyd. 2., přeprac. Praha: ČVUT, 2007. 88 s. ISBN 978-80-01-03752-2.
- [27] HANZLÍK, Jan. *Využití aditivních technologií výroby v oblasti temperace vstřikovacích forem*. Teze disertační práce. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta technologická, 2024.
- [28] UNIVERZITA TOMÁŠE BATI VE ZLÍNĚ. *Profiloměr optický 3D Zygo – NewView 8000*. Online. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. 2025. Dostupné z: <https://ft.utb.cz/o-fakulte/ustav-vyrobnihoinzenyrstvi/veda-avyzkum/pristrojovevybaveni/profilomer-opticky-3d-zygo-newview-8000/>. [cit. 2025-05-14].

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 Schéma mechanismu odběru materiálu v AFM [4]	16
Obrázek 2 Schéma (a) Jednosměrného AFM, (b) Dvousměrného AFM, (c) Vícesměrného AFM, (d) Orbitálního AFM [4]	17
Obrázek 3 Proces výroby technologie ADAM [6]	25
Obrázek 4 Schéma aditivní výroby technologie ADAM [11]	26
Obrázek 5 Konstrukce stroje pro aditivní výrobu technologie ADAM [11]	27
Obrázek 6 Princip užití podpor při aditivní výrobě [11]	28
Obrázek 7 Stroje společnosti Markforged pro výrobu technologií ADAM [6].....	28
Obrázek 8 Schéma mikroskopie atomárních sil [9].....	29
Obrázek 9 Dotykový profilometr [16]	30
Obrázek 10 Schéma konfokálního mikroskopu [14]	31
Obrázek 11 Odražené elektrony při aplikaci metody SEM [12]	32
Obrázek 12 Zkušební tělesa vyrobená metodami ADAM (vlevo) a DMLS (vpravo).....	37
Obrázek 13 Výkres návrhu zkušební tělesa	37
Obrázek 14 Zařízení AFM použité v experimentu	38
Obrázek 15 Schéma sestavy použitého zařízení AFM [27].....	39
Obrázek 16 Upínací přípravek před vložením tělesa.....	40
Obrázek 17 Upínací přípravek po vložení a zajištění tělesa	40
Obrázek 18 Abrasivní médium EM25021	41
Obrázek 19 Množství abrasivního média použité pro experiment	41
Obrázek 20 Zařízení AFM ve výchozí pozici	42
Obrázek 21 Dolní pracovní válec po naplnění abrasivním médiem.....	43
Obrázek 22 Zařízení AFM po vložení upínacího přípravku	43
Obrázek 23 Pozice horního pohyblivého elementu před úplným uzavřením upínacích elementů pro vystředění upínacího přípravku	44
Obrázek 24 Zařízení AFM po spojení upínacích elementů	45
Obrázek 25 Únik abrasivního média	46
Obrázek 26 Nastavení vzorku v řídicí jednotce.....	47
Obrázek 27 Nastavení cyklu v řídicí jednotce.....	47
Obrázek 28 Optický 3D profilometr Zygo NewView 8000	49
Obrázek 29 Číslování měřených ploch uvnitř zkušební tělesa	50
Obrázek 30 Projekce naměřených dat povrchu kanálu zkušební tělesa (technologie: DMLS, počet cyklů: 120, plocha č.1).....	52
Obrázek 31 Projekce naměřených dat povrchu kanálu zkušební tělesa (technologie: DMLS, počet cyklů: 120, plocha č.2).....	53

Obrázek 32 Projekce naměřených dat povrchu kanálu zkušebního tělesa (technologie: DMLS, počet cyklů: 120, plocha č.3)	54
Obrázek 33 Projekce naměřených dat povrchu kanálu zkušebního tělesa (technologie: DMLS, počet cyklů: 120, plocha č.4)	55
Obrázek 34 Graf hodnot parametru Ra	57
Obrázek 35 Graf hodnot parametru Rz	57
Obrázek 36 Projekce naměřených dat povrchu kanálu zkušebního tělesa (technologie: DMLS, počet cyklů: 60) [27]	58
Obrázek 37 Graf závislosti parametru Rz na počtu cyklů	59

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Srovnání metody AFM s jinými dokončovacími metodami.....	21
Tabulka 2 Srovnání mikroskopických metod na měření drsnosti.....	33
Tabulka 3 Hlavní procesní parametry	48
Tabulka 4 Statistické údaje naměřených parametrů Ra a Rz na ploše č.1	51
Tabulka 5 Statistické údaje naměřených parametrů Ra a Rz na ploše č.2.....	52
Tabulka 6 Statistické údaje naměřených parametrů Ra a Rz na ploše č.3.....	53
Tabulka 7 Statistické údaje naměřených parametrů Ra a Rz na ploše č.4.....	54

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

AFM	Abrasive flow machining
ADAM	Atomic diffusion additive manufacturing
DMLS	Direct metal laser sintering
SEM	Scanning electron microscopy
CT	Computer tomography
μm	mikrometr
MPa	megapaskal