

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Kvalita povrchu u dílů vyrobených metodou DMLS
Surface quality of parts produced by DMLS method

AUTOR: Lucie Halmelová

STUDIJNÍ PROGRAM: Výroba a ekonomika ve strojírenství

VEDOUCÍ PRÁCE: Ing. Barbora Bryksí Stunová, Ph.D.

PRAHA 2019



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Halmelová** Jméno: **Lucie** Osobní číslo: **438341**
 Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
 Zadávající katedra/ústav: **Ústav strojírenské technologie**
 Studijní program: **Výroba a ekonomika ve strojírenství**
 Studijní obor: **Technologie, materiály a ekonomika strojírenství**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Kvalita povrchu u dílů vyrobených metodou DMLS

Název bakalářské práce anglicky:

Surface quality of parts produced by DMLS method

Pokyny pro vypracování:

- 1) Úvod do aditivních technologií v relaci s kvalitou povrchu dílů
- 2) Metody úprav povrchu po 3D tisku metodou DMLS
- 3) Experimentální hodnocení kvality vytištěných vzorků
- 4) Vyhodnocení experimentu a doporučení
- 5) Závěry

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Barbora Bryksí Stunová, Ph.D., ústav strojírenské technologie FS


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

Datum zadání bakalářské práce: **30.04.2019**

Termín odevzdání bakalářské práce: **30.11.2019**

Platnost zadání bakalářské práce: **31.12.2019**


 Ing. Barbora Bryksí Stunová, Ph.D.
 podpis vedoucí(ho) práce

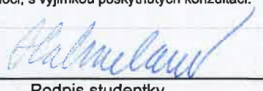

 doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D.
 podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry


 prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
 podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Studentka bere na vědomí, že je povinna 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.


 25.11.2019
 Datum převzetí zadání


 Podpis studentky

Poděkování

Děkuji své vedoucí Ing. Barboře Bryksí Stunové PhD. za cenné rady a přínosné konzultace. Dále za trpělivost, kterou během vedení mé práce projevila. Děkuji též Ing. Monice Vitvarové a Ing. Václavovi Novotnému za velkou pomoc při měření a zpracování hodnot potřebných pro experimentální část bakalářské práce.

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracovala samostatně a výhradně s použitím citovaných pramenů, literatury a dalších odborných zdrojů v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací, vydaným ČVUT v Praze 1. 7. 2009.

Beru na vědomí, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorského zákona v platném znění, zejména skutečnost, že České vysoké učení technické v Praze má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona.

V Praze dne

.....

Lucie Halmelová

Název práce: Kvalita povrchu u dílů vyrobených metodou DMLS

Autor: Lucie Halmelová

Ústav: Ú12133 – Ústav strojírenské technologie

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Barbora Bryksí Stunová, Ph.D.

Anotace: V první, teoretické části bakalářské práce, jsou popsány vybrané metody 3D tisku kovů, spadající pod LPBF - *Laser Powder Bed Technology*, a jednotlivé tiskové parametry, které mají vliv na kvalitu povrchu. Dále jsou uvedeny konvenční i více specializované možnosti následného post – processingu a úpravy povrchu součásti. Experimentální část se zabývá zkoumáním charakteru drsností povrchu tištěné součásti a jejich vlivu na účinnost miniturbíny na měřící trati.

Klíčová slova: 3D tisk, aditivní technologie, DMLS, kvalita povrchu, drsnost, Direct Metal Laser Sintering, Laser Powder Bed Technology

Name of thesis: Surface quality of parts produced by DMLS method

Abstract: The theoretical part of the bachelor thesis describes selected methods of 3D printing metal, that fall in the Laser Powder Bed Technology category, and individual printing parameters, which influence the final surface quality. Also there are described conventional and also less ordinary methods of post – processing that improve surface quality. The experimental part of this thesis examines technical properties of 3D printed metal parts and their influence on efficiency of a microturbine.

Keywords: 3D printing, additive technology, DMLS, surface quality, roughness, Direct Metal Laser Sintering, Laser Powder Bed Technology

Obsah

Obsah	5
1. Úvod	6
2. Úvod do aditivních technologií v relaci s kvalitou povrchu.....	7
2.1. Selektivní laserové sintrování	7
2.1.1. Nepřímé laserové sintrování	7
2.1.1. Přímé laserové sintrování.....	7
Výkon laseru.....	8
Kompenzace laserového paprsku a tloušťka laseru.....	9
Hatch distance, point distance.....	9
Rychlost pohybu laseru	10
Tloušťka práškové vrstvy.....	11
3. Metody úprav povrchu po 3D tisku metodou DMLS	12
3.1. Tryskání	12
3.2. Omílání	13
3.3. Obrábění	14
3.3.1. Broušení	14
3.3.2. Obrábění abrazivními proudy	15
3.3.3. Pulzní elektrochemické obrábění.....	18
3.3.4. Mikroobrábění MMP.....	19
4. Experimentální hodnocení kvality vytištěných vzorků.....	20
4.1. Úvod do projektu ZETA	20
4.2. Měřicí trať	20
4.3. Tištěná rozváděcí kola	21
4.3.1. Rotor.....	22
4.3.2. Stator.....	23
4.4. Měření drsnosti.....	24
4.5. Drsnost povrchu měřená mikroskopem	26
5. Závěr.....	29
6. Seznam použitých zdrojů:	31
7. Přílohy	35

1. Úvod

Aditivní výroba je proces formování materiálů vrstvu po vrstvě za účelem výroby součástí, jejíž podoba je dána 3D modelem. 3D tisk je považován za metodu výroby, jež má konkurovat konvenčním postupům a nutí člověka přistupovat k produkci a jejímu plánování zcela jinak, než na co byl do této doby zvyklý. Tímto způsobem lze vyrobit i geometricky velmi složité objekty, a to bez potřeby použití mnoha specializovaných strojů a nástrojů. Metody aditivní výroby také produkují méně odpadního materiálu, což je v souladu se současnými ekologickými tendencemi. Tento proces tak zajišťuje přímou výrobu plně funkčních strojních součástí, které se uplatní v oborech, jako jsou aeronautika a automotive.

Za hlavní přínos 3D tisku je považována schopnost produkovat různě geometricky složité konstrukce, jejichž výroba konvenčními metodami je buď velmi náročná časově i finančně, nebo přímo absolutně nemožná. Aditivní výrobou a s pomocí použití podpěr při tisku je ale možné dosáhnout téměř jakéhokoliv tvaru. To umožňuje zjednodušovat konstrukci modelů a nahrazovat komplexní sestavy jedním celistvým komponentem.

S tímto novým odvětvím výroby se objevila možnost tzv. rapid prototypingu, tedy výroby prototypů, kde je vytisknutá součást již po několika hodinách od dokončení 3D modelu fyzicky vyrobená a připravená k otestování. Urychlení celého procesu přetvoření modelu do hmotné podoby vede k rychlejšímu vývoji prototypu a případným iteracím ve výpočtu a změnám v konstrukčním oddělení. S každou další změnou je tak možné vyprodukovat další, částečně pozměněný prototyp, a to za relativně nízkou cenu, oproti delšímu a finančně náročnějšímu procesu obrábění, frézování apod.“

Metody 3D tisku kovů nás nutí kompletně změnit přístup k výrobě daných součástí. Neplatí již dogma říkající, že tvarově složitý objekt musí být nutně náročný a drahý. Na druhou stranu, 3D tisk není všemocná metoda výroba, která by ihned po dokončení tisku produkovala hotové díly, ihned schopné splňovat svou funkci. Kvalita povrchu surového výtisku bývá tak nízká, že je stále nutné podrobit ho dodatečným úpravám, které se mohou ukázat náročnější než samotná výroba. [1] [2] [3]

Hlavním cílem bakalářské práce je experimentální zhodnocení kvality povrchu kovových součástí, tištěných metodou DMLS, a zmapování možností úprav jejich povrchu k dosažení lepších vlastností povrchu.

2. Úvod do aditivních technologií v relaci s kvalitou povrchu

2.1. Selektivní laserové sinterování

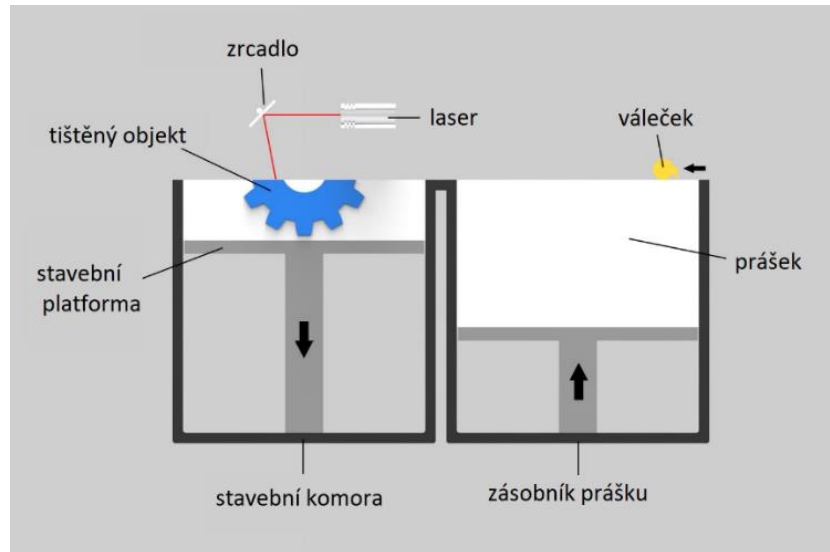
Jeden z nejpoužívanějších typů aditivní výroby je selektivní laserové sinterování – SLS – *selective laser sintering*, během které je součást vytvořena po jednotlivých vrstvách. Vrstvy jsou nataveny z práškových částic kovového (nebo jiného) materiálu za působení laserového paprsku. Paprsek postupuje po ploše práškového materiálu dle zpracovávaného CAD modelu. Vrstva prášku je nanášena na plochu platformy a následně je ohřata na teplotu blízkou bodu tání. Laser poté využije energii k sinterování, ne však už k ohřevu materiálu. Jak paprsek osvítl příslušnou plochu, klesne stavěcí platforma o tloušťku jedné stavební vrstvy níže a nanese se další práškový pokryv. Tento proces se opakuje tak dlouho, dokud není dosaženo vrcholku stavby. Sloučení částic materiálu nastává vlivem působení difuze nebo fúzí jednotlivých částic. Součást je po celou dobu výroby obklopena zbytkovým nesintrovaným práškem, díky kterému není potřeba používat žádné dočasné opory. Sinterování se neomezuje pouze na zhotovení výrobků ze specifických kovů, jako jsou nízkouhlíkové oceli, korozivzdorné oceli, měď nebo superslitiny, produkty mohou být tvořeny i z polymerových materiálů jako jsou např. akrylonitrilbutadienstyren – ABS, nylon nebo polykarbonáty. Tvorby kovových součástí pomocí SLS lze dosáhnout dvěma způsoby – přímým a nepřímým laserovým sinterováním. [4] [5]

2.1.1. Nepřímé laserové sinterování

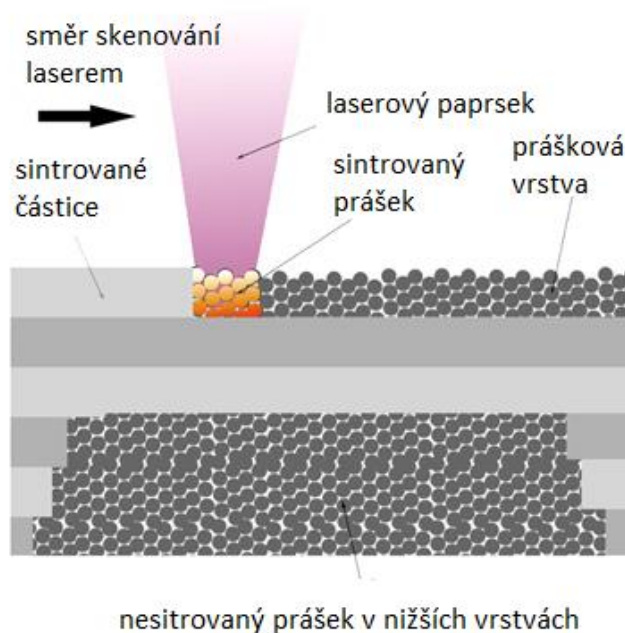
Nepřímé laserové sinterování spočívá ve spékání kovového prášku, který je smíchán s pojivem nebo pokryt polymerem. Během natavení jsou kovové částice spojeny tavenými polymery s nízkými teplotami tavení. Ty se nakonec vypálí a vazby mezi částicemi kovu zůstanou, protože volná místa jsou postupně vyplňována kovem s nízkým bodem tavení. [6]

2.1.1. Přímé laserové sinterování

DMLS – *Direct Metal Laser Sintering* je podkategorií SLS. Tento druh 3D tisku bývá označován také jako LPBF – *Laser Powder Bed Fusion*. Při přímém laserovém sinterování (DMLS) je produkt vyroben pouze z kovového prášku bez přidání aditiv. Při této metodě je možné použít také reaktivní materiály, jako jsou hliník nebo titan, a to bez jakýchkoliv pojiv, což do vývoje této metody nebylo možné. Potenciál DMLS spočívá mimo jiné v jeho vhodném použití coby velmi rychlého způsobu výroby kovových funkčních prototypů. Při správné volbě parametrů tisku je dokonce možné dosáhnout produkce částí, jejichž mechanické vlastnosti jsou odpovídající nebo alespoň podobné jako při konvenčních metodách výroby. Hlavní výhodou DMLS tak spočívá v schopnosti produkování tvarově složitých kovových součástí v jednom procesu bez nutnosti rozdělení celé operace do více kroků. Skýtá samozřejmě také určité nevýhody, týkající se tiskových parametrů, kde je potřeba pečlivá kontrola celého procesu. Další nevýhodou je obecně použití práškového polotovaru a s ním spojená manipulace, možná škodlivost apod. [6]



Obr. 1 Schéma stroje provádějícího SLS [8]



Obr. 2 Schéma procesu sinterování [32]

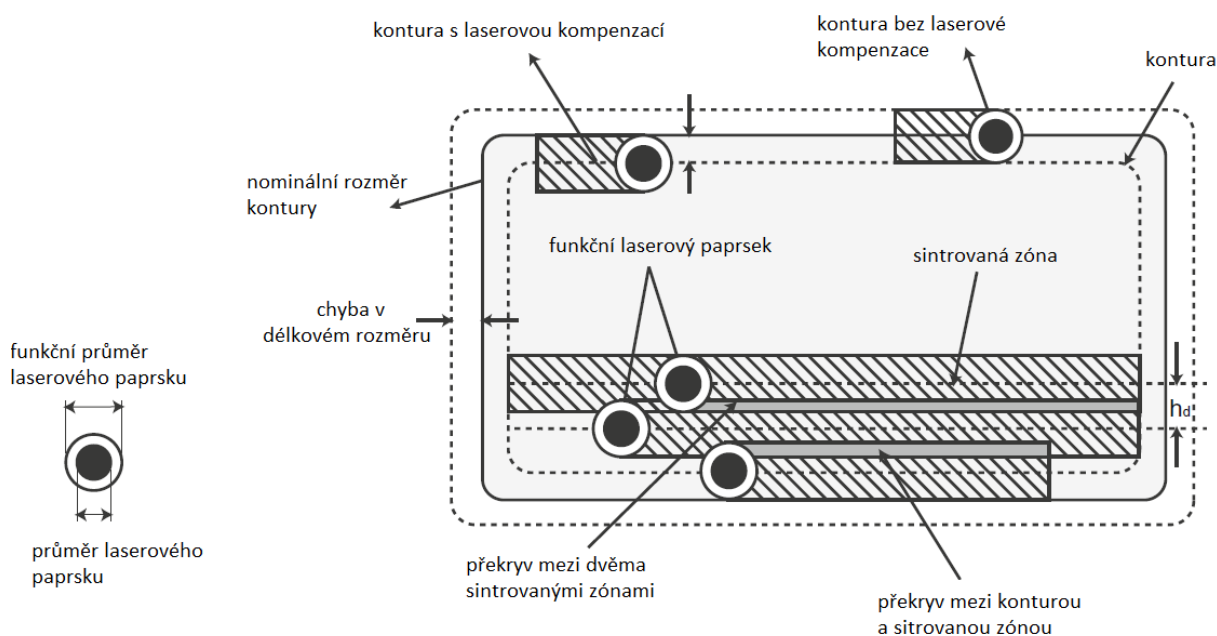
Výkon laseru

Nastavením laserového paprsku na vyšší výkon můžeme dosáhnout určitého vlivu na vyrovnání hladiny natavené oblasti. To má za následek lepší přilnutí jednotlivých vrstev k sobě a zlepšení smáčivost taveniny. Lepší smáčivost snižuje hodnoty vzniklého vnitřního napětí a tím i nebezpečí vzniku kulových útvarů na okrajích natavených oblastí. Příliš výkonný laserový paprsek naopak může ve velkém vypařovat materiál jako následek vzniklého zpětného rázu, který naruší natavené oblasti. To je opět příčinou vzniku vysokých hodnot Ra. Tato kvalita může být podpořena i malou vzdáleností jednotlivých čar spečeného prášku. [6][7]

Kompenzace laserového paprsku a tloušťka laseru

Při spékání práškového materiálu je průměr oblasti, ve které jsou částice natavovány, větší než průměr laserového paprsku. Tento rozměr nazýváme průměrem sintrovacího rozsahu a jeho hodnota je větší než průměr paprsku. Ten je přímo úměrný výkonu laseru a nepřímo úměrný rychlosti pohybu laseru. Aby byl rozdíl těchto dvou parametrů, který vede k tvarovým chybám, vykompenzován, paprsek by měl být posunut o poloviny hodnoty vytvářené vzdálenosti od obrysu směrem k vnitřku práškového pole. Tuto korekci polohy někdy nazýváme laserový offset.

Pokud je hodnota offsetu nižší nebo vyšší než vhodná, prášek nacházející se mimo plochu, danou CAD daty, může být sintrován a výrobek by tak neodpovídal skutečným požadovaným rozměrům. Podobný případ by nastal v situaci, kdy by naopak prášku bylo spékáno méně za vzniku dílu s menšími rozměry než požadovanými. [6][7]



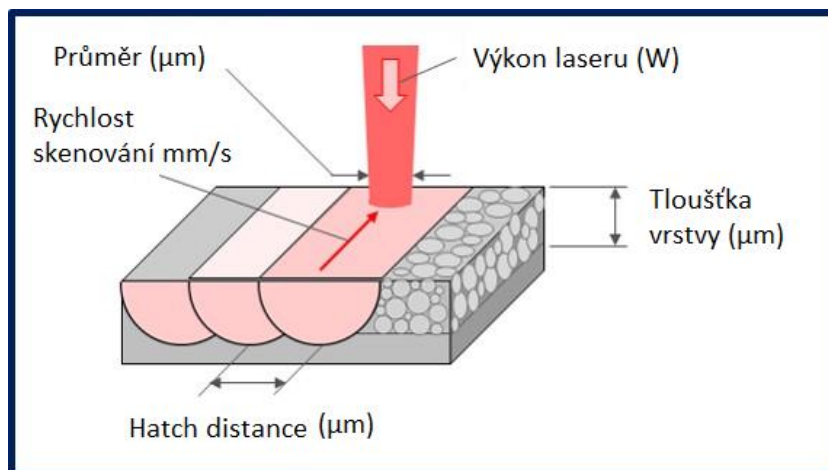
Obr. 3 Schéma kontur sintrované součásti [6]

Hatch distance, point distance

Při tisku laserový paprsek nejdříve speče prášek po obvodu tvaru, následně po liniích provede to samé s materiálem uvnitř tohoto obrysu. Vzdálenost mezi dvěma sousedními čarami by měla mít hodnotu přibližně jedné čtvrtiny hodnoty průměru laserového paprsku. Pokud je tato vzdálenost větší jak průměr průřezu laseru, vazby mezi jednotlivými částicemi kovu se špatně formují a výsledný výrobek je nekvalitní. Naopak pokud je vyšší, ale stále menší než průměr paprsku, zajišťuje nám lepší mechanické vlastnosti, konkrétně pevnost materiálu, protože částice pohlí větší množství energie. [6]

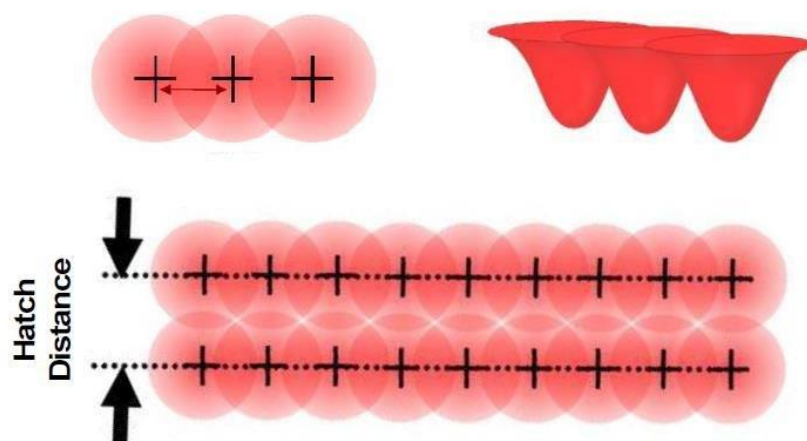
Po prvním spékání kontury obrazce je tento proces opakován z důvodu zajištění přesného tvaru, který bude odpovídat geometrickým údajům, odebraným z CAD modelu. Vnější

obrys má tendenci se po prvním působení laseru zmenšit svůj rozměr vlivem působícího tepla. Pokud je díl navrhnut s výběžky a výstupky, druhé spékání je provedeno za působení vyšší výkonu laseru, jinak by nebyla možná tvarová korekce již ztuhlé kontury z předešlého cyklu. Spodní vrstva přesně odpovídající modelu zaručuje větší celkovou přesnost celého tisku. Nižší hodnota hatch distance vede k nižší dosažené hodnotě Ra povrchu. [6][7]



Obr. 4 Schéma sintrovaného místa a související veličiny [9]

Point Distance



Obr. 5 Hatch distance a point distance [10]

Rychlost pohybu laseru

Nižší rychlost, se kterou se laser pohybuje po vrstvě prášku, zaručuje také vyšší kvalitu povrchu, konkrétně nižší Ra. Při pohybu laseru vzniká mezi samotným paprskem a tavícím se práškem teplotní gradient. To má za následek vznik stříhového napětí na tekutém povrchu, na který v tu chvíli působí i povrchové napětí. Pomalý pohyb laseru poskytuje nataveným oblastem více času na vyrovnání povrchů při tuhnutí, které je ovlivněno gravitací a silami na povrchu taveniny, působících proti stříhovému momentu. [6][7]

Nižší rychlost pohybu laseru skýtá ale i nevýhody. Příliš nízká rychlost může natavit více materiálu v jednotlivých oblastech, což má za následek rozšíření této oblasti. Širší rozměr má za následek velké teplotní rozdíly napříč celou oblastí a tím pádem i různé hodnoty

povrchového napětí. Tavenina má tendenci se tomuto vyhnout a rozdělit se na několik menších částí za vytvoření kulovitých útvarů. Kulovité tvary se utvoří na okrajích natavených oblastí a zvyšují celkovou drsnost povrchu. [6][7]

Tloušťka práškové vrstvy

Nevhodná tloušťka práškové vrstvy může vést ke zdeformovanému a nevyhovujícímu dílu nebo k přerušení procesu samotného tisku. Pokud je vrstva příliš tlustá, mezi částicemi jednotlivých vrstev bude docházet k nedokonalé adhezi vlivem velkého rozměru, na kterém nelze materiál laserem uspokojivě vytvrdit. Při mechanickém zatížení jedné z vrstev navíc může následně dojít k oddělení vrstvy spodní. Vrstva nesmí být ani příliš tenká. V takovém případě hrozí při nanášení dalšího materiálu odtržení celého, právě sintrovaného, povrchu pravítkem tiskárny, jež na něj nanáší nový povrch prášku. [6]

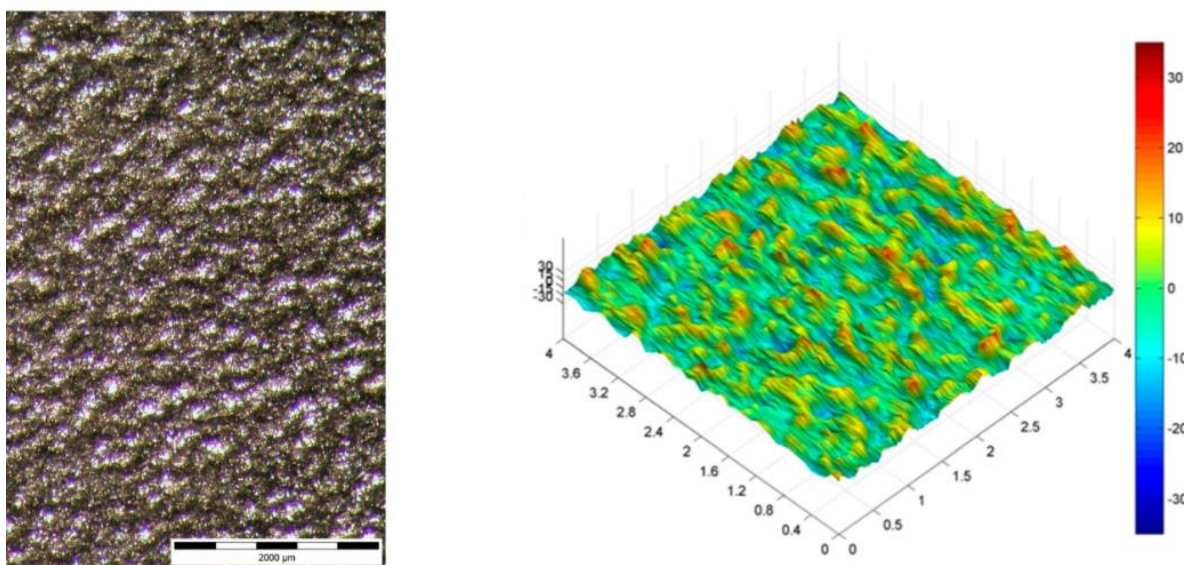
3. Metody úprav povrchu po 3D tisku metodou DMLS

3.1. Tryskání

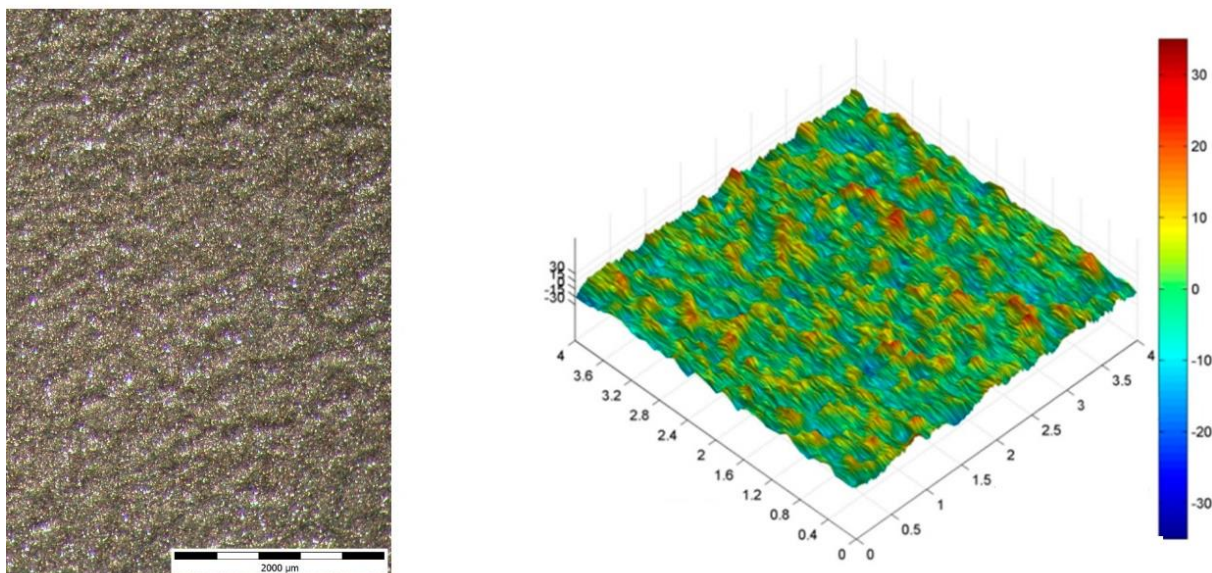
Pískování neboli tryskání je jednou z nejpoužívanějších metod povrchových úprav. Při tryskání je díl nebo opracovaný proudem abrazivních částic, které dopadají na plochu součásti, kterou přetvářejí. Tryskání bývá jednou z posledních povrchových úprav a po něm následuje zpravidla finální úprava, například lakování. [11] [12]

Při tryskání je materiál dopravován na povrch opracovávaného dílu buď pomocí stlačeného vzduchu při tzv. tlakovzdušném tryskání nebo metán mechanicky lopatkami metacích kol v uzavřené kabině. Abraziva se dělí na ostrá a tupá, konkrétně se využívají například broky, písek, korund, struska nebo ocelová drť. Výběr materiálu a tvaru abraziva a dalších parametrů, týkajících se celého procesu vždy záleží na konkrétní aplikaci, pro kterou je díl určen. [13]

Ze zkoumání použití tryskání konkrétně na kovovou součást vyrobenou metodou DMLS se obecně jeví jako přínosnější použití abraziva tupého – konkrétně bylo porovnáváno tryskání abrazivem ostrým, které představovala látka Zirblast, a abrazivem tupým, kde byl použit syntetický bílý korund. Zirblast je abrazivum ve formě tavených keramických mikrokuliček, které má větší hustotu než skleněné abrazivum, což vede k větší účinnosti celého procesu. Má ale nižší hustotu než ocelové abrazivum, takže nedochází k deformacím povrchu. Syntetický korund obecně patří mezi nejtvrďší abraziva. Oba druhy byly použity za tlaku 0,6 MPa, tryskáno bylo ze vzdálenosti 200 mm a pod úhlem 75°. Po analýze povrchů byly zjištěny podobné hodnoty rozličných veličin drsnosti a vlnitosti, hodnota Ra ale byla v případě použití tupého abraziva nižší. [13][14]



Obr. 6 3D profil povrchu po otryskání tupým abrazivem – Zirblastem [13]



Obr. 7 3D profil povrchu po otryskání ostrým abrazivem – korundem [13]

3.2. Omílání

Dalším způsobem povrchové úpravy je omílání. Pod omíláním rozumíme předúpravu a opracování povrchu součástí. Jedná se o vyhlazování povrchu, odstraňování otřepů, zaoblování hran, odstraňování okují, leštění a zpevňování povrchu. Výsledek omílání můžeme zlepšit dodatečnou chemickou úpravou. Úběr materiálu je založen na principu tření omílacích tělísek o povrch obrobků. [21] [22] [36]

Tvar a velikost omílacích tělísek je nutné zvolit s ohledem na geometrii omílané součásti. Vzhledem k tenkosti některých částí rotoru i statoru, jakou můžeme pozorovat například na hraně lopatek, musí být omílání šetrné a prováděné tělísky malého rozměru. Požadavek na šetrnost splňuje omílání vibrační, které je charakterizováno jako mechanické opracování povrchu součástí vibracemi se současnou rotací jak celého obsahu v pracovním prostoru, tak omílaných součástí a omílacích tělísek. [16] [22] [36]

Omílací tělíška a případná aditiva vybíráme také s ohledem na požadovanou kvalitu povrchu součásti, které chceme dosáhnout. Pro dosažení lesklého povrchu je vhodné použít abraziva ve formě kuliček, která mají tu výhodu, že díl mechanicky nepoškozují. Roli hraje také velikost tělísek, kdy velká vyvíjejí tlak a malá tělíška součást brousí. Více šetrné je omílání za mokra, kde voda nebo vodní roztok tlumí nárazy předmětů a omílacích tělísek a zabraňují mechanické poškození povrchu. Velmi důležitým činitelem je objem kapaliny v omílacím bubnu. Změny v objemu roztoku mají vliv na rychlost omílání a na jakost dosaženého povrchu. Při větším objemu roztoku je omílání pomalejší, avšak povrch je hladký, při malém objemu je proces omílání rychlejší, ale výsledný povrch dílu je hrubší. Pro zrychlení procesu je vhodné použít abraziva za mokra se speciálními lešticími pastami. [36]



Obr. 8 Zirkonové kuličky [20]

3.3. Obrábění

Obrábění je hojně používané při post – processingu funkčních ploch aditivně produkovaných součástí. Jeho nevýhodou může být špatná možnost upnutí součásti, obzvláště, pokud se jedná o tvarově složitý díl. Na případné úpravy, následující po samotném tisku, je tak nutné myslet již během konstrukce. S ohledem na geometrii tištěných kol nebude klasické strojní obrábění vhodnou operací post – processingu, a to kvůli nedostatku místa pro nástroj.

3.3.1. Broušení

Další možností je broušení ručním nářadím. Vzhledem k komplexní geometrii lopatek a nedostatku místa (vzdálenost lopatek od sebe u rotoru 2–3 mm, u statoru 1–2 mm), je nemožné kola brousit na konvenčních kotoučových bruskách. Proto je nutné na dolní straně rotoru použít ruční nářadí s minimálním válcovým brusným tělískem na trhu – 2 mm a na velice tenkých místech bude třeba pracovat s ostrou špičatou frézou o průměru 2 mm. Pro stator je vhodnější použít brusky ogiválního tvaru. [36]



Obr. 9 Ogivální brusný nástroj [18]

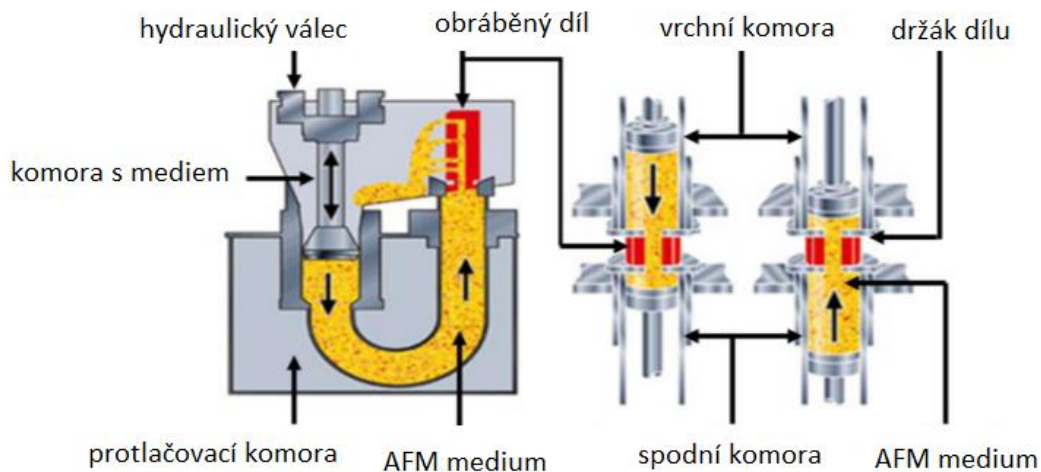


Obr. 10 Fréza „KULATÝ OBLOUK“ s diamantovým povlakem [19]

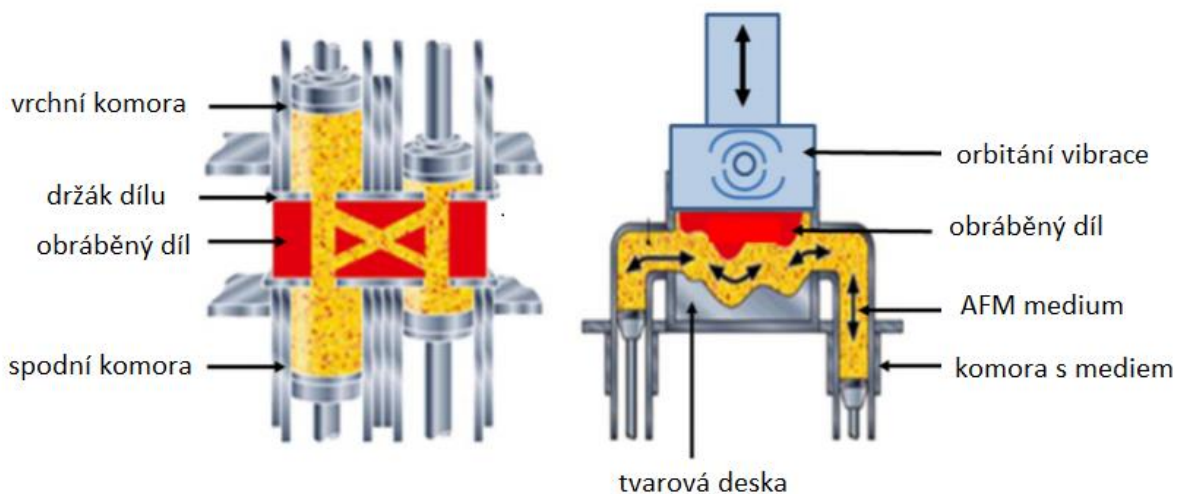
3.3.2. Obrábění abrazivními proudy

Obrábění abrazivními proudy je považováno za jeden z nejlepších způsobů úpravy povrchu dílů se složitou a členitou konstrukcí, produkovaných metodami LPBF. Jeho principem je protlačování pasty, složené z tekutiny na bázi polymerů obsahující abrazivní částice, skrz vnitřní strukturu finišovaného dílu. Tato metoda je vhodná k leštění a odstraňování otřepů a ostřin. Jako u ostatních úprav zde dochází k úběru materiálu a změnám v rozměrech, je tedy nutné počítat s určitým přírůstkem. K předvídání průběhu procesu a chování pasty uvnitř součásti se používají numerické modely. Dle pohybu media se obrábění abrazivními proudy rozděluje na: [23]

1. Jednosměrné – Pasta je vtlačena do vymezeného prostoru hydraulikou ovládaného válce. Po extruzi je medium na druhém konci vyjmuto a vloženo opět na začátek. Tento způsob je spojen s většími ztrátami a delším časem potřebným k dokončení celého procesu. Nutnost přemísťování pasty z konce na začátek vede ke složitějším konstrukčním řešením celého stroje.
2. Dvousměrné – Medium je hnáno pracovním prostorem z jednoho konce na druhý pomocí dvou pístů. Obráběný objekt je umístěn mezi nimi. Stroj schopný dvousměrného abrazivního obrábění je zpravidla velký a těžký a složitě konstrukčně řešený.
3. Víceproudé – Pasta se pohybuje mezi čtyřmi hydraulickými válci, nacházejícími se naproti sobě. Komplexnost celého zařízení se zvyšuje.
4. Orbitální – AFM medium se pohybuje tam a zpět mezi dvěma válcovými prostory, zásobujícími pracovní objem pastou. Prostor je zvrchu vymezený opracovávaným dílem a zespoda tvarově přizpůsobenou deskou. Na součást působí orbitální vibrace v příčném směru od této součásti. Tento proces vyžaduje výrobu tohoto specifického dílu, tvarově přizpůsobeného geometrii objektu, který je obráběn. [24]



Obr. 11 Schéma jednosměrného a dvousměrného AFM procesu [24]

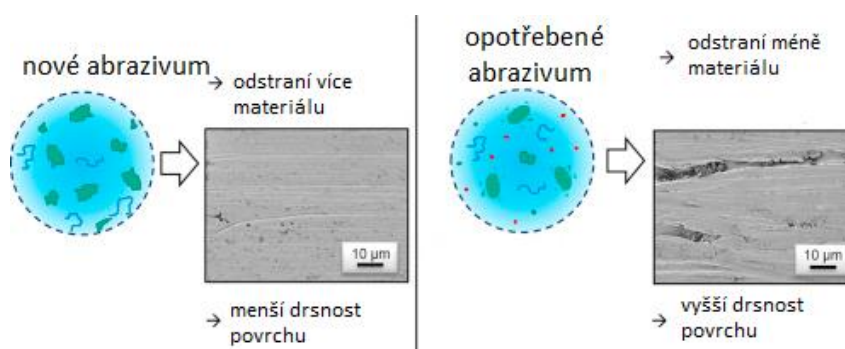


Obr. 12 Schéma víceproudeho a orbitálního AFM procesu [24]

Úspěšnost celého procesu a dosažených hodnot závisí na více než 25 různých parametrech, které lze rozdělit do tří skupin:

- Parametry stroje
 - Tlak extruze – tlak působící na jednotku kontaktní plochy, potřebný k překonání tření mezi pístem a válcovým prostorem. Jeho hodnoty se pohybují mezi 0,7 – 20 MPa a jsou nepřímo úměrné vznikajícím hodnotám R_a .
 - Objem – Množství media nacházejícího se ve válcové komoře. Větší výška komory způsobuje větší abrazi a větší odběr materiálu z obráběného objektu.
 - Tok media – Je spojen s viskozitou a tlakem extruze pasty. Vyšší tok produkuje nesourodý povrch, zatímco s nižšími hodnotami dochází k jednotnému odebrání materiálu a kvalitnějšímu finiši povrchu.

- Počet cyklů – Za jeden cyklus je považován pohyb z horní úvratě pístu do dolní. Při volení počtu je nutné brát v potaz opotřebení abrazivních částí po prvních několika cyklech, kdy také dochází k největšímu odběru materiálu.
- Parametry media
 - Typ, velikost a hustota abrazivních částí – Odvíjí se na materiálu obráběného objektu. Často používanými abrazivy je oxid hlinitý, karbid křemíku, kubický nitrid boru, diamant nebo směs několik různých složek. Oxid hlinitý se používá především pro materiály měkkší, zbytek pro tvrdší. Větší částice mají schopnost zbavit díl ostřin a otřepů, drobná abraziva upravují drsnost povrch na nízké hodnoty Ra. Poměry částic ku polymeru se pohybují mezi 1:4 až 4:1, nejlepších výsledků se však dosahuje při koncentraci 1:1.



Obr. 13 Účinky nového a opotřebeného abraziva na povrch součásti [25]

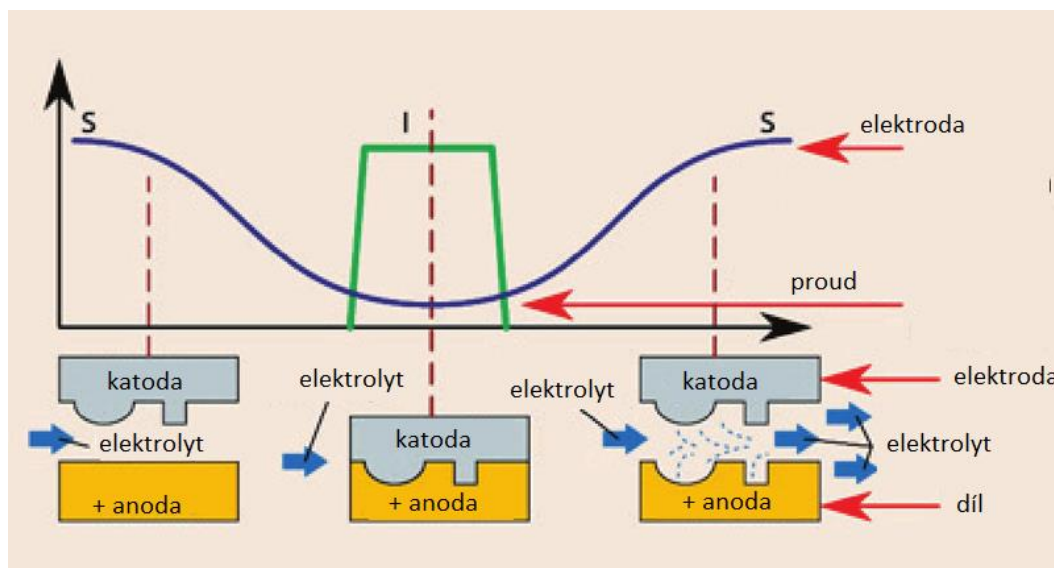
- Typ a množství mísícího oleje – Olej se používá ke řádnému smíšení a vytvoření vazeb mezi abrazivními zrny a polymerovou pastou. K tomuto účelu se používají silikonové a terpentýnové oleje nebo oleje na bázi hydrokarbonů.
- Viskozita AFM media – Záleží na druhu použité polymerové pasty a na množství mísícího oleje. Vyšší viskozita zvyšuje přilnavou sílu mezi polymerem a abrazivními zrny, což vede k odběru více materiálu z povrchu a tím také k jeho lepší kvalitě. Nižší viskozita působí, že abrazivní částice vlivem malých přilnavých sil rotují a jejich působení na díl je tak menší. Z toho důvodu je takové medium používáno spíše pro odstraňování ostřin a otřepů.
- Teplota – Výrazně ovlivňuje reologické veličiny, jako jsou viskozita, viskoelasticita nebo tixotropie. Během operace se může zvýšit až o 30–70 °C. Viskozita se snižuje s rostoucí teplotou, ta by neměla být vyšší jak 100 °C kvůli riziku usazujících se částic abraziva na dně válcových komor.
- Způsob přípravy AFM media – Pasta a abrazivum může být smíšeno hnětením, rotačním mixováním či vytlačováním. Jakákoliv metoda

- ale musí produkovat medium s rovnoměrně rozloženou pastou i zrnny.
- Trvanlivost – Přesná doba závisí na tvaru, velikosti a požadované kvalitě povrchu opracovávaného dílu. Průměrně se pohybuje kolem 250 h pracovního času. [24][25]
 - Parametry obráběné součásti
 - Mechanické vlastnosti použitého materiálu – AFM může být použito jak na kovové, tak nekovové materiály. Dokončování povrchu je výrazně ovlivněno houževnatostí a tvrdostí materiálu a účinnost AFM procesu. Materiály s vyšší houževnatostí podléhají vyšším hodnotám odběru **hmoty abrazivními zrnny, ale výsledná kvalita povrchu je nižší. To je** způsobeno schopností částic vytvořit hlubší indentaci.
 - Metoda výroby opracovávané součásti – AFM může být použito k úpravě frézovaných, soustružených, 3D tištěných dílů a dílů zhotovených elektroerozivním drátovým řezáním.
 - Stav povrchu před procesem – Nesourodá kvalita povrchu má za následek větší úběr materiálu, ale i malý rozdíl ve zlepšení hodnot drsnosti. Abrazivní částice totiž působí hlavně na vysoké profily, které zarovávají. [24]

3.3.3. Pulzní elektrochemické obrábění

PECM – *Pulse Electrochemical Machining* je nekonvenční druh obrábění, založený na principu rozpouštění anody při elektrolýze. O jeho rozvoj se přičinil obor letectví, kde roste potřeba monolitických struktur, jejichž složitá geometrie a použité, těžce obrobitelné, materiály jsou překážkou pro použití běžných technologií. Oproti více tradičním procesům lze tuto metodu využít kdekoliv, bez ohledu na tvrdost materiálu, trvanlivost nástrojů, vznik prnutí nebo ostatní mechanické vlivy. Pomocí PECM lze získat povrch s velmi nízkou hodnotou Ra. Nachází uplatnění na polích jako jsou aerospace a mikrofabrikace. [26][27]

Principem je přívod proudu k zpracovávanému dílu a elektrodě, ten způsobí rozpouštění materiálu ve formě iontů a elektrolyt proudí skrz mezeru mezi elektrodou a součástí, aby z dílu odebral vzniklé elektrochemické produkty. Správné nastavení polohy vede k větší přesnosti, je žádoucí umístit celý systém tak, aby mezera mezi součástí (ta působí jako anoda) a katodou, byla co nejmenší, v opačném případě může dojít ke korozi anody. Dalšími parametry, které mají vliv na kvalitu výsledku procesu je nastavení proudu a druh elektrolytu. Bylo dokázáno, že střídavý proud spolu s pasivačním elektrolytem zmírňují produkci kalu a přispívají tak k větší přesnosti. Elektrolytu také musí být umožněno kontinuální a rovnoměrné proudění, jinak může docházet k tvorbě nechtěných defektů způsobených kavitací. [27] [28] [29]



Obr. 14 Schéma PECM procesu [29]

Hlavní nevýhodou metody PECM je především určitá nepředvídatelnost průběhu procesu. Rozložení elektrického pole mezi anodou a katodou je složité ovládat, což může vést k nežádoucí korozi nepracovaného povrchu obráběného dílu. Tento problém by mohl být vyřešen použitím pulsního vysokofrekvenčního zdroje místo klasického zdroje DC proudu. [27] [28] [29]

3.3.4. Mikroobrábění MMP

Metoda Mikroobrábění, registrovaná firmou MMP, je schopna produkovat velmi hladké, zrcadlově lesklé, povrchy. Výsledek procesu jde výrazně lépe ovlivňovat oproti klasickému leštění. Principem je laserové obrábění dané součásti a komplexní přístup a examinační původního povrchu pomocí metody mechanicko – fyzického katalyzátoru. Stroj produkuje vysokoenergetický pohyb. Agregované částice jsou uvedeny v relativní pohyb. Povrch tak má přesně frekvenci vhodnou pro mikrořezání, který koresponduje s topologií drsnosti, která má být odstraněna. Technologii je možné použít pro materiály jako jsou slinuté karbidy, slinuté karbidy s diamantovým povlakem nebo s povlakem PCD a další klasické materiály. [30][31]



Obr. 15 Povrch dosažitelný při použití MMP [30]

4. Experimentální hodnocení kvality vytištěných vzorků

4.1. Úvod do projektu ZETA

Praktická část této bakalářské práce byla řešena v rámci projektu TA ČR ZETA v rámci laboratoří Ústavu energetiky, Ústavu strojírenské technologie FS ČVUT v Praze a Univerzitního centra energeticky efektivních budov. Kovové výtisky byly dodány firmou Metal 3D. Předmětem zkoumání projektu byly možnosti užití 3D tisku pro výrobu součástí potřebných pro nízkoteplotní aplikace turboexpanderů decentralizované energetiky. Zapojení 3D tisku do výrobního procesu modulárních komponentů, ze kterých by se mikrosystém skládal, by znamenalo výraznou změnu ekonomické dostupnosti celé sestavy.

Koncept decentralizované energetiky spočívá v energetickém osamostatnění určitých funkčních nebo oblastních celků, jako jsou například odlehle končiny, kam je složité zavést klasickou elektrickou síť, dále domácnosti, malé podniky a některé sektory služeb. Aktuální je také debata o změně klimatu, kde k určitému řešení může decentralizovaný energetický systém přispět diverzifikací zdrojů elektřiny. Velkou překážkou globálního použití je však dosud cena. [33]

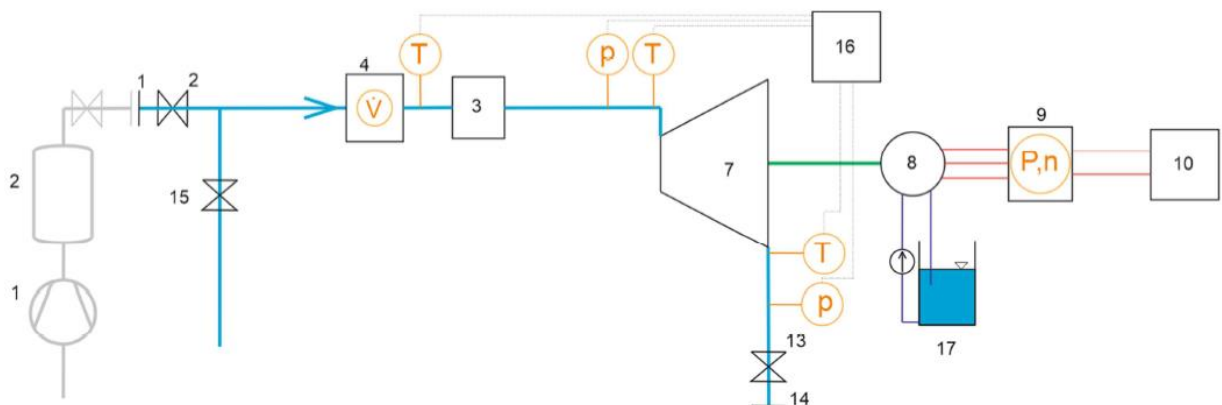
Plynové mikroturbíny skrývají vysoký potenciál využití v decentralizovaných energetických systémech, co se týče jejich kompaktní velikosti, nízkých emisí, nenáročnosti na údržbu, nízké hlučnosti, vysoké spolehlivosti a možnosti pohonu širokou škálu paliv. Kombinace mikroturbíny a pohonu systému palivovými články s tuhými oxidy může vést až k účinnosti více než 60 %. Jako palivo lze dále využít zemní plyn, naftu, biomasu a syntetický plyn (syngas). Použití rekuperátorů, předehřívajících stlačený vzduch teplem získaný z plynu odvedeného z turbíny, vede k nižší spotřebě paliva a zvýšení účinnosti celého systému o 16 – 30 %. K dosažení tohoto účinku je potřeba konkrétně nízkotlaký rekuperátor s vysokou účinností. [33][34]

3D tisk může do konceptu decentralizované energetiky přinést finanční úsporu na pořizovacích nákladech, celý modulární systém by tak mohl být dostupnější a více rozšířený. Praktická část této práce se zaměřuje na kvalitu povrchu tištěných rozváděcích kol, která jsou důležitou součástí mikroturbíny, případné úpravy dílů při post-processingu a na vliv kvality povrchu na celkovou účinnost celé soustavy. [33]

4.2. Měřicí trať

Měřicí trať se sestává z vlastního expandéru, přívodního potrubí k připojení do systému tlakového média, systému pro případný ohřev pracovního média, výstupního potrubí k připojení do systému pro odvod pracovního média, systému pro měření termodynamických veličin, průtokoměru, systému pro měření elektrických veličin, usměrňovače, řízení zátěže a vyvedení výkonu (disipativní, nebo pomocí střídače přímo do elektrické sítě). Na trati byla měřena účinnost celého systému mikroturbíny a dalších prvků, při různých pokusech byly

použity různé kombinace plastových a kovových rotorů a statorů. Některé z nich měly upravený povrch, jiné byly v surovém stavu po tisku. [35]



Obr. 16 Schéma měřící trati pro vzduch [35]

Komponenty trati [35]:

- 1 - přípojně místo na vstupní medium
- 2 - uzavírací a kontrolní armatura
- 3 - systém elektrického ohřevu pro případnou úpravu teploty media
- 4 - průtokoměr
- 7 - expandér
- 8 - generátor
- 9 - usměrňovač a systém měření výkonu a otáček
- 10 - zátěž generátoru
- 13 - uzavírací armatura
- 14 - přípojně místo na vystup media
- 15 - řídicí ventil pro bypass
- 16 - řídicí systém
- 17 - systém chlazení

4.3. Tištěná rozváděcí kola

Obě rozváděcí kola – rotorové i statorové – byla vyrobena zvolenou metodou 3D tisku DMLS. Jde tedy o tisk pouze ze spékaného kovového prášku, bez aditiv. [36]

Tisk byl uskutečněn na zařízení Renishaw AM250 s objemem pracovního prostoru 250 × 250 × 300 mm a prášek z nerezové oceli 316L (EN 1.4404), která je charakterizovaná jako chrom – nikl – molybdenová ocel s nízkým obsahem uhlíku do 0,03, odolná proti korozi, velmi dobře svařitelná. [36][37]

Tab. 1 Chemické složení oceli 316L/EN 1.4404 [15]

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	V
≤ %	≤ %	≤ %	≤ %	≤ %	%	%	%	%
0,03	1	2	0,045	0,015	16,5-18,5	2,0-2,5	10,0-13,0	-
Nb	Ti	Al	Co	Cu	N	Fe	Ce	Y
%			≤ %	≤ %	≤ %		%	≤ %
					0,11			

Tab. 2 Parametry sintrovaného vzorku vyrobeného firmou Renishaw z materiálu 316L, převzato z katalogu firmy [38]

Veličina	Hodnota
Hustota [g/cm ³]	7,99
Tepelná vodivost [W/mK]	16,2
Rozsah tavicích teplot [°C]	1371–1399
Mez pevnosti v tahu (vodorovný směr XY) [MPa]	676 ± 2
Mez pevnosti v tahu (svislý směr Z) [MPa]	624 ± 17
Mez kluzu v tahu (vodorovný směr XY) [MPa]	547 ± 3
Mez kluzu v tahu (svislý směr Z) [MPa]	494 ± 14
Tažnost (vodorovný směr XY) [%]	43 ± 2
Tažnost (svislý směr Z) [%]	35 ± 8
Modul pružnosti (vodorovný směr XY) [GPa]	197 ± 4
Modul pružnosti (svislý směr Z) [GPa]	190 ± 10
Tvrdoost dle Vickerse (vodorovný směr XY) [HV0,5]	198 ± 8
Tvrdoost dle Vickerse (svislý směr Z) [HV0,5]	208 ± 6
Drsnost povrchu dle parametru R _a (XY) [μm]	4–6
Drsnost povrchu dle parametru R _a (Z) [μm]	4–6

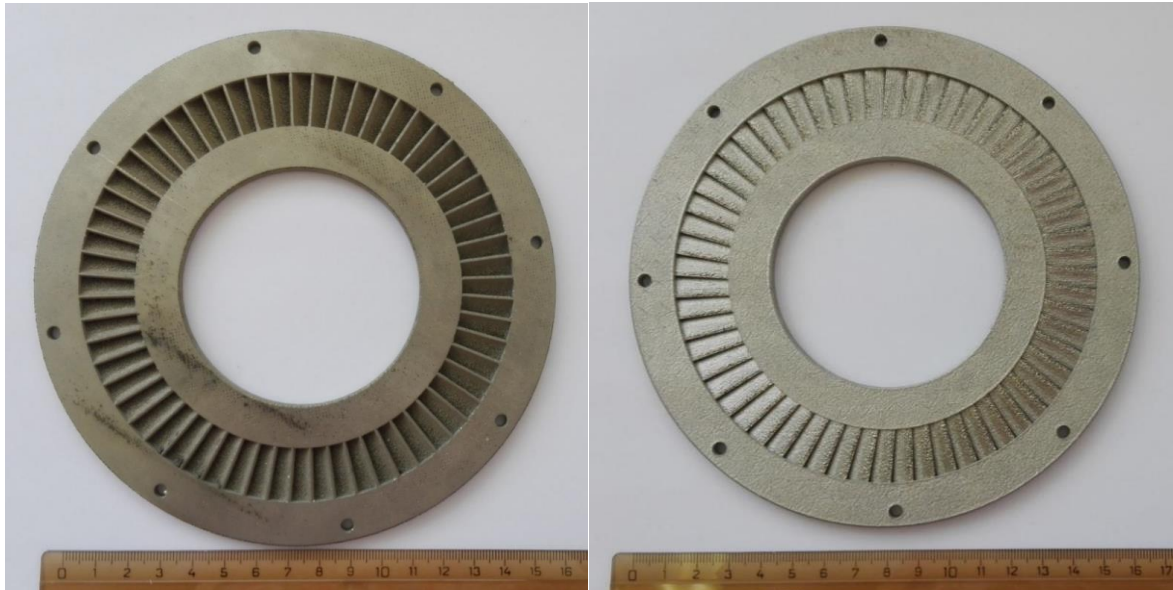
Obě kola byla vytištěna za použití tiskové strategie šachovnice. Laser skenující nepoužitý práškový materiál tak postupuje po menších dílech, což vede ke nižší tvorbě zbytkového napětí. Toto nastavení je vhodné pro díly s rozměrem stěny větším jak 5 mm. Další nastavení tiskárny bylo zvoleno s ohledem na co nejmenší finanční zátěž, což vedlo k nižší homogenitě a celkové kvalitě dílů. [36]

4.3.1. Rotor

Rotorové kolo bylo vytištěno s následujícími parametry:

Tab. 3 Geometrické a tiskové parametry rotoru [36]

Geometrie	
úhel tělivy lopatky [°]	35
délka tělivy [mm]	8,06
délka lopatky [mm]	17,2
Nastavení tisku	
Scanning distance [mm]	0,045
Hatching distance [mm]	0,095



Obr. 17 Spodní a vrchní pohled na rotor [36]

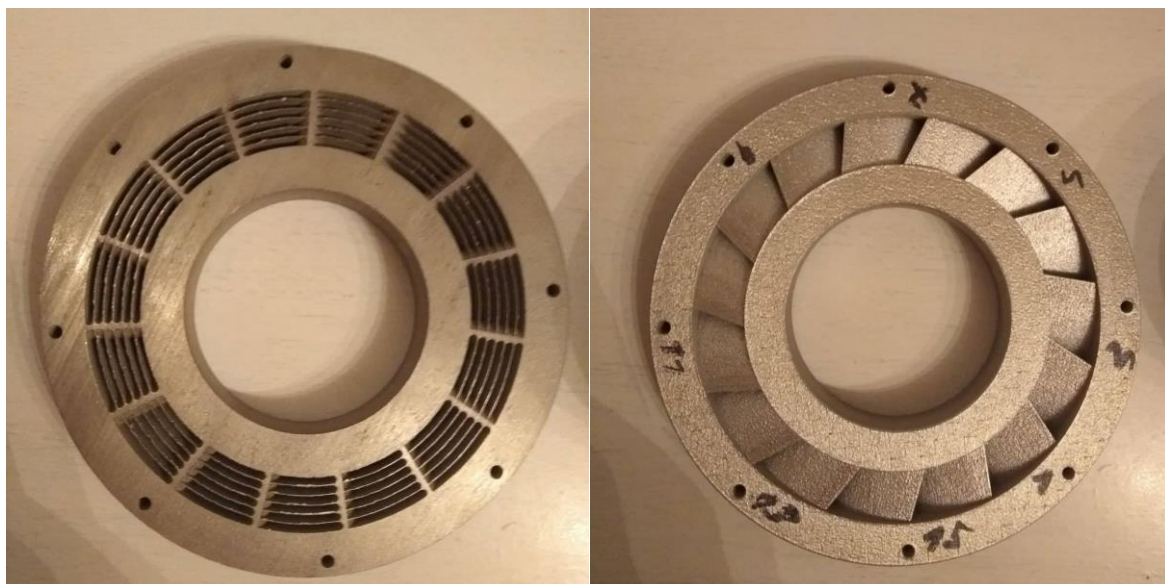
4.3.2. Stator

Statorové kolo bylo vytištěno s následujícími parametry:

Tab. 4 Geometrické a tiskové parametry statoru [36]

Geometrie	
úhel třetivy lopatky [°]	35
délka třetivy [mm]	32,2
délka lopatky [mm]	32,2
střední průměr lopatkování [mm]	120
Nastavení tisku	
Scanning distance [mm]	0,045
Hatching distance [mm]	0,07

Výsledná tištěná kola se ukázala jako materiálově nehomogenní, aby bylo vůbec možné je použít nainstalovaná na měřící trati, musela podstoupit vyvažování. Jejich povrch se ukázal jako velmi drsný. Vysoká drsnost spodních míst lopatek by mohla mít za následek nežádoucí změnu průtokových parametrů. Pro praktické využití kol je tak vhodné podrobit je post – processingu zejména v oblasti úpravy povrchu. [36]



Obr. 18 Spodní a vrchní pohled na stator

4.4. Měření drsnosti

Měření drsnosti bylo provedeno v metrologickém středisku FS ČVUT v Praze na stroji MarTalk od firmy Mahr. Dále byl použit snímač LD C 24-20-5 a posuvná jednotka Marsurf LD120 od téhož výrobce. Měřenými objekty byly kovový rotor (tenký) a stator s plochami v nezměněném stavu po samotném tisku a s plochami upravenými ručním broušením a případně ručním leštěním. Drsnost byla naměřena na různých místech rotoru a statoru.

Na plochách bez jakéhokoliv post - processingu byla naměřena často velmi rozdílná drsnost R_a , kde byly větší rozdíly i v rámci jednotlivých pokusů měření na té samé lopatce, a to z důvodu nedokonalého vytištění, co se týče povrchu součásti. R_a a další atributy týkající se drsnosti vykazují na neupravených plochách velmi vysoké a nežádoucí hodnoty, pohybující se nejčastěji zhruba kolem $R_a = 20 \mu\text{m}$.

Nejlepší výsledky přinesla úprava surového povrchu jemným ručním broušením / leštěním statoru pomocí protahování smirkového papíru (lze aplikovat pouze na konkávních plochách). Podařilo se dosáhnout $R_a = 0,9 \mu\text{m}$, což je nejlepší hodnota naměřená vůbec. Podobné drsnosti se dosáhlo také pomocí ručního broušení s brusku pro domácí využití. Stejným způsobem byl na statoru upraven povrch na hodnotu $R_a = 7,1 \mu\text{m}$. Nebroušený povrch na statoru vykazoval drsnost okolo $R_a = 13,2 \mu\text{m}$ a na rotoru $R_a = 14,6 \mu\text{m}$.

Následující tabulky obsahují střední hodnoty ze třech pokusů měření pro jednotlivá zkoumaná místa na rotoru i statoru. Kompletní naměřené hodnoty se nacházejí v příloze 1.



Obr. 19 Měření statorového kola – nebroušeno



Obr. 20 Měření statorového kola – broušeno



Obr. 21 Měření rotorového kola – nebroušeno



Obr. 22 Měření rotorového kola – broušeno

Tab. 5 Vybrané naměřené hodnoty pro povrch statoru a rotoru

Měřený povrch - stator	Střední hodnota Ra [μm]
Lopatka č. 1	23,754
Lopatka č. 3	17,221
Lopatka č. 5	18,509
Lopatka č. 7	16,760
Lopatka č. 9	19,591
Lopatka č. 11	23,787
Lopatka č. 13	22,224
Lopatka č. 15	20,036
Nebroušená plocha (po odstranění podpor)	13,661
Broušená plocha (po odstranění podpor)	8,258
Hladká plocha lopatky	1,049

Tab. 6 Vybrané naměřené hodnoty pro povrch rotoru

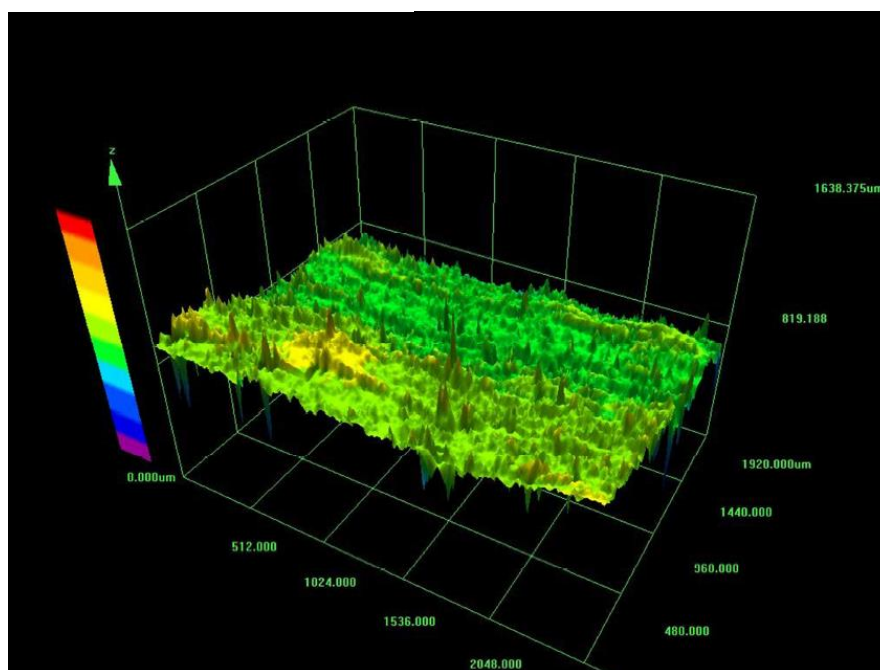
Měřený povrch - rotor	Střední hodnota Ra [μm]
Nebroušená lopatka	14,355
Broušená lopatka	2,045

Tab. 7 Naměřené hodnoty účinnosti na měřicí trati

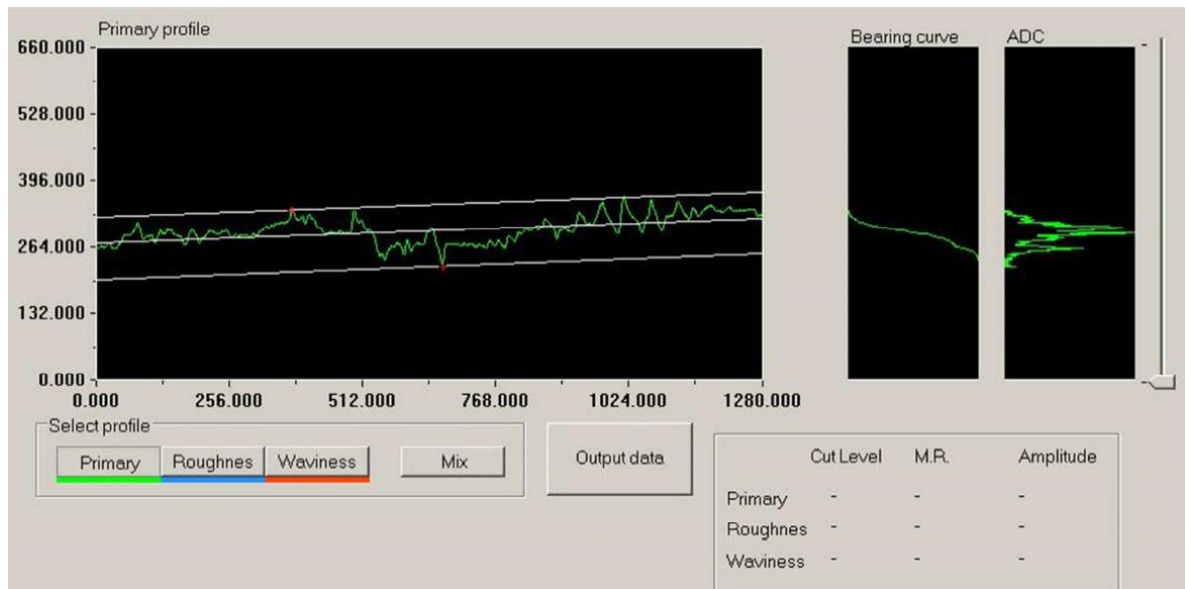
Součást použitá na trati	Účinnost mikroturbíny [%]
Stator broušený + rotor nebroušený	62
Stator nebroušený + rotor nebroušený	58

4.5. Drsnost povrchu měřená mikroskopem

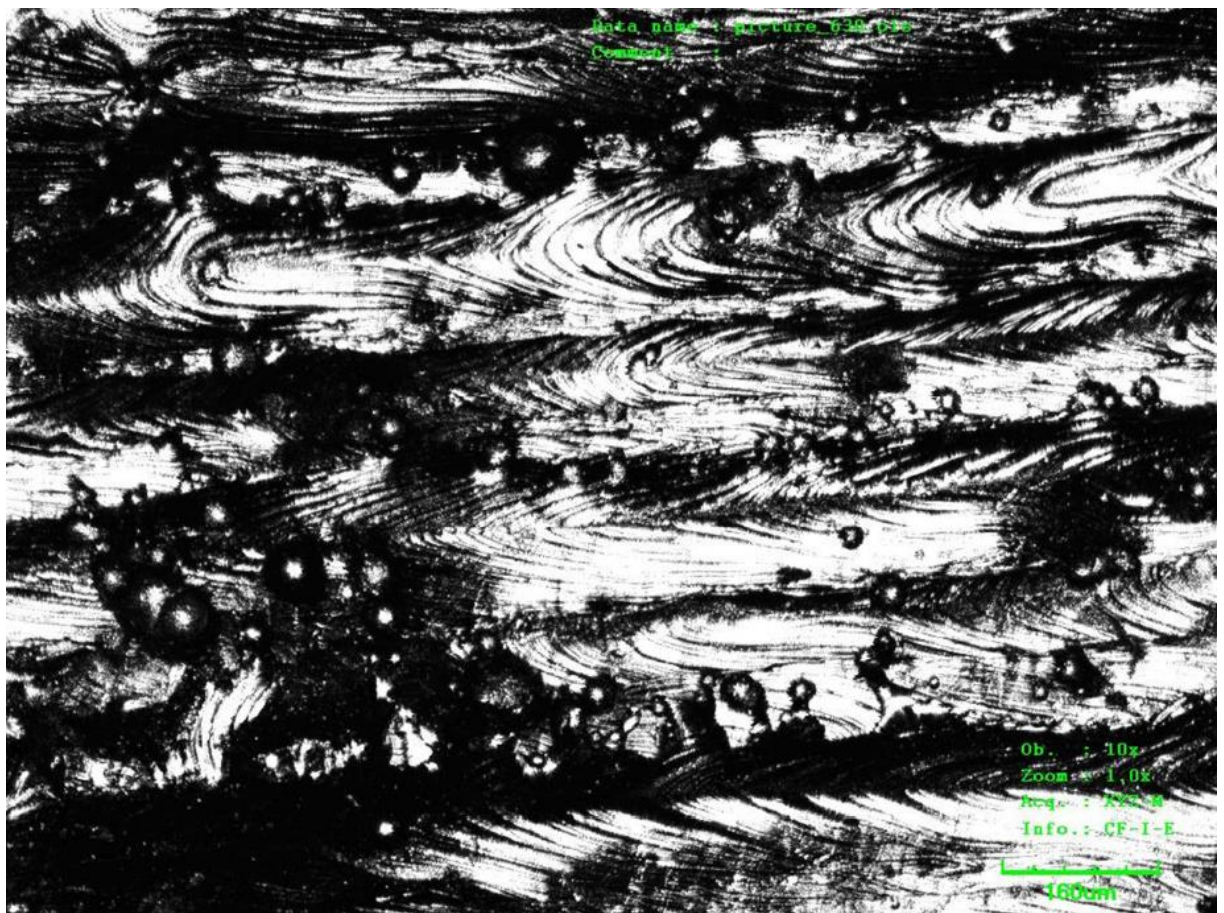
Další zvolený přístup hodnocení kvality povrchu bylo jeho sledování na konfokálním laserovém mikroskopu. Byl použit mikroskop Olympus LEXT OLS 3100. Byl použit zejména pro sledování charakteru povrchu, ale zároveň i pro zmapování drsnosti povrchu. Pro její přesné vyhodnocení je potřeba poskládání hodnot z více snímků (delší vzdálenost). Vzhledem k tomu, že drsnost byla hodnocena jinými metodami (viz výše), výpočty drsností nebyly provedeny, pouze byly brány v potaz drsnosti z jednotlivých snímků. [35]



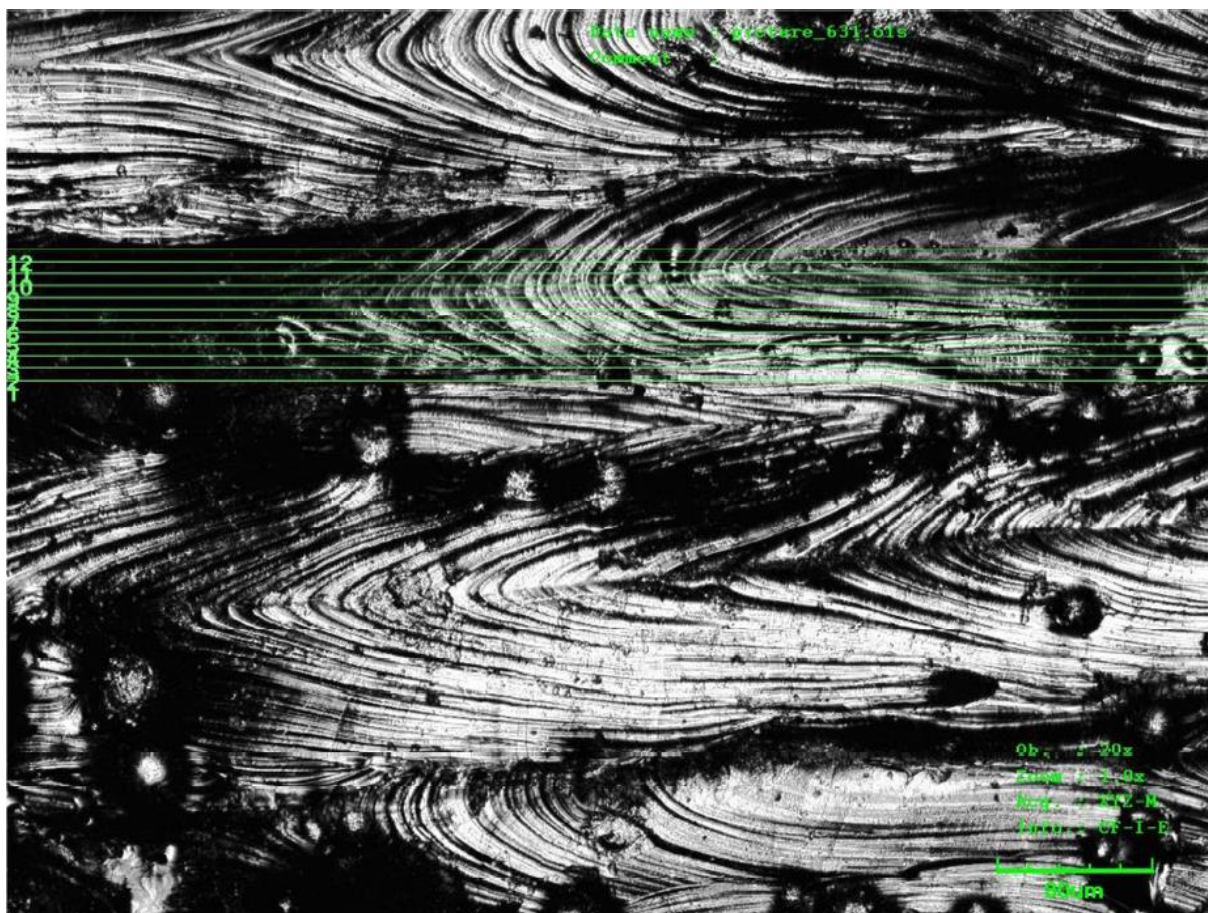
Obr. 23 3D profil nebroušeného povrchu rotoru [35]



Obr. 24 3D profil nebroušeného povrchu rotoru [35]



Obr. 25 Nebroušený povrch rotoru – povrchová struktura se zjevnými charakteristickými stopami po tisku [35]



Obr. 26 Nebroušený povrch rotoru – vyznačena místa měření [35]

5. Závěr

Začátek této práce je věnován obecnému úvodu do tématu aditivních technologií a dále konkrétně technologie přímého laserového sintrování. Uvedeny jsou také charakteristiky přímého i nepřímého laserového sintrování a jednotlivých tiskových parametrů a to, jak parametry ovlivňují strukturu a kvalitu výsledného povrchu tištěného dílu.

Třetí část práce je věnovaná tématu post – processingu, a to konkrétně úpravám, jež zlepšují kvalitu povrchu, která je u tištěných součástí v původním stavu velmi často nedostačující, co se týče jejich aplikace. Uvedeny jsou různé konvenční metody jako obrábění, omílání a tryskání a dále několik druhů méně běžných obráběcích metod. U každého druhu je uveden vliv nastavení samotného procesu na výslednou kvalitu povrchu.

V další části je představen ve zkratce projekt Zeta a jeho účel a motivace. Je ukázáno rozložení měřící trati a hlavní komponenty, které byly vytištěné a jejichž povrch se zkoumal v závislosti na účinnost celého systému s mikroturbínou. Uvedena byla obě rozváděcí kola, tiskové parametry, které byly použity při jejich výrobě, a hlavní délkové a úhlové hodnoty důležitých konstrukčních parametrů. Kola byla vytištěna s nedostačující kvalitou povrchu a nehomogenním rozložením materiálu. Po jejich vyvážení, které bylo nutné provést pro správné fungování měřící tratě, byly některé části upraveny tak, aby bylo možné porovnat hodnoty průtoku a účinnosti pro povrchy opracované i ty v původním stavu.

Stator i rotor bez jakékoliv úpravy povrchu vykazují velmi vysoké hodnoty drsnosti, pohybující se okolo $R_a = 20 \mu\text{m}$. Ručním broušením a leštěním lze hodnotu snížit až na $R_a = 0,9 \mu\text{m}$.

Dle očekávání se při měření na trati systému s turbínou ukázalo, že kombinace kol, kde bylo alespoň jedno z nich ručně obroušeno, vede k vyšší účinnosti celého systému. Rozdíl je v řádu jednotek procent, avšak stále je celková účinnost relativně nízká – fluktuuje kolem 60 %. Jako účinnější se ukázala kola plastová, ta však nebyla předmětem zkoumání této práce.

Seznamy

Seznam obrázků

Obr. 1 Schéma stroje provádějícího SLS.....	8
Obr. 2 Schéma procesu sintrování	8
Obr. 3 Schéma kontur sintrované součásti	9
Obr. 4 Schéma sintrovaného místa a související veličiny.....	10
Obr. 5 Hatch distance a point distance	10
Obr. 6 3D profil povrchu po otryskání tupým abrazivem - Zirblastem	12
Obr. 7 3D profil povrchu po otryskání ostrým abrazivem - korundem.....	13
Obr. 8 Zirkonové kuličky.....	14
Obr. 9 Ogívalní brusný nástroj	14
Obr. 10 Fréza „KULATÝ OBLOUK“ s diamantovým povlakem	15
Obr. 11 Schéma jednosměrného a dvousměrného AFM procesu	16
Obr. 12 Schéma víceproudeho a orbitálního AFM procesu	16
Obr. 13 Účinky nového a opotřebeného abraziva na povrch součásti	17
Obr. 14 Schéma PECM procesu	19
Obr. 15 Povrch dosažitelný při použití MMP	19
Obr. 16 Schéma měřicí trati pro vzduch	21
Obr. 17 Spodní a vrchní pohled na rotor	23
Obr. 18 Spodní a vrchní pohled na stator	24
Obr. 19 Měření statorového kola – nebroušeno	25
Obr. 20 Měření statorového kola – broušeno	25
Obr. 21 Měření rotorového kola – nebroušeno.....	25
Obr. 22 Měření rotorového kola – broušeno.....	25
Obr. 23 3D profil nebroušeného povrchu rotoru.....	26
Obr. 24 3D profil nebroušeného povrchu rotoru.....	27
Obr. 25 Nebroušený povrch rotoru – povrchová struktura se zjevnými charakteristickými stopami po tisku.....	27
Obr. 26 Nebroušený povrch rotoru – vyznačena místa měření.....	28

6. Seznam použitých zdrojů:

- [1] Co je 3D tisk [online]. [cit. 2019-11-11]. Dostupné z: <https://josefprusa.cz/o-3d-tisku/>
- [2] Pros and Cons of 3D Printing. 3space [online]. 22.10.2019 [cit. 2019-11-09]. Dostupné z: <https://3space.com/blog/pros-and-cons-of-3d-printing/>
- [3] Pros and Cons of 3D Printing. Infinity 3D Printing [online]. 11.4.2017 [cit. 2019-11-09]. Dostupné z: <https://www.infinity3dprinting.com/blog/posts/pros-and-cons-of-3d-printing/>
- [4] Selective Laser Sintering. 3D-Tisk.cz [online]. 30. 4. 2013 [cit. 2019-11-09]. Dostupné z: <https://www.3d-tisk.cz/selective-laser-sintering/>
- [5] Přehled dostupných materiálů. NA3D.cz [online]. [cit. 2019-11-09]. Dostupné z: <https://www.na3d.cz/blog/prehled-dostupnych-materialu>
- [6] CALIGNANO, F., D. MANFREDI, E. P. AMBROSIO, L. IULIANO a P. FINO. Influence of process parameters on surface roughness of aluminum parts produced by DMLS. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. 2013, 67(9-12), 2743-2751 [cit. 2019-11-11]. DOI: 10.1007/s00170-012-4688-9. ISSN 0268-3768. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s00170-012-4688-9>
- [7] DELGADO, Jordi, Joaquim CIURANA a Ciro A. RODRÍGUEZ. Influence of process parameters on part quality and mechanical properties for DMLS and SLM with iron-based materials. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. 2012, 60(5-8), 601-610 [cit. 2019-11-11]. DOI: 10.1007/s00170-011-3643-5. ISSN 0268-3768. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s00170-011-3643-5>
- [8] *Laser sintering, melting and others – SLS, SLM, DMLS, DMP, EBM, SHS* [online]. [cit. 2019-11-12]. Dostupné z: <https://www.additive.blog/knowledge-base/3d-printers/laser-sintering-melting-sls-slm-dmls-dmp-ebm-shs/>
- [9] *Closed-Loop Feedback Control of Powder Based Additive Manufacturing Using Optical Monitoring System and Infrared Imaging* [online]. [cit. 2019-11-19]. Dostupné z: <https://www.mechameg.com/short-course-closed-loop-feedback-control-of-powder-based-am/>
- [10] *Process Development for Selective Laser Melting of Molybdenum* [online]. [cit. 2019-11-19]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/Point-or-spot-Distance-and-Hatch-Distance-Images-Courtesy-of-Renishaw-AMPD_fig1_331110596
- [11] *PÍSKOVÁNÍ / TRYSKÁNÍ* [online]. [cit. 2019-11-19]. Dostupné z: <https://povrchoveupravydilu.cz/piskovani-tryskani/>

- [12] KLÁR, Pavel. *NÁVRH A REALIZACE KONSTRUKČNÍHO ŘEŠENÍ ÚPRAVY PÍSKOVACÍHO STROJE* [online]. [cit. 2019-11-19]. Dostupné z: <https://core.ac.uk/download/pdf/30291235.pdf>. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ.
- [13] BREZINOVÁ, Janette, Radovan HUDÁK, Anna GUZANOVÁ, Dagmar DRAGANOVSKÁ, Gabriela IŽARÍKOVÁ a Juraj KONCZ. Direct Metal Laser Sintering of Ti6Al4V for Biomedical Applications: Microstructure, Corrosion Properties, and Mechanical Treatment of Implants. *Metals* [online]. 2016, 6(7) [cit. 2019-11-19]. DOI: 10.3390/met6070171. ISSN 2075-4701. Dostupné z: <http://www.mdpi.com/2075-4701/6/7/171>
- [14] *Abrazivo zirblast B 040* [online]. [cit. 2019-11-20]. Dostupné z: <https://www.tryskani-lakovani-metalizace.cz/abrazivo-zirblast-b40-pytel-25-kg>
- [15] *Chemical composition* [online]. [cit. 2019-11-20]. Dostupné z: <http://www.m-woite.de/en/materials/14404.shtml>
- [16] GURKINA, Daria. *VLIV NAVODÍKOVÁNÍ V TECHNOLOGII OMÍLÁNÍ* [online]. [cit. 2019-11-24]. BAKALÁŘSKÁ PRÁCE. ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE.
- [17] OTEC. *OMÍLACÍ STROJE A TECHNOLOGIE PROCESU* [online]. [cit. 2019-11-20]. Dostupné z: <https://www.otec.de/cz/>
- [18] *Tělisko ogivální 20x40-6 48C4004V40 436235 TYROLIT* [online]. [cit. 2019-11-24]. Dostupné z: <https://www.prodejbrusiva.cz/telisko-ogivalni-20x40-6-48c40o4v40-436235-tyrolit>
- [19] Fréza „KULATÝ OBLOUK“ s diamantovým povlakem, 2×10. In: FRÉZA „KULATÝ OBLOUK“ TECHNICKÁ S DIAMANTOVÝM POVLAKEM, CROMWELL [online]. [cit. 2018-07-30]. Dostupné z: <https://www.nakol.cz/freza-kulaty-oblouk-technicka-s-diamantovym-povlakem-cromwell>
- [20] Zirkonové kuličky [online]. [cit. 2019-11-28]. Dostupné z: <https://advantage-fl.cz/prumysl/povrchova-uprava/procesni-media/obrabeni-za-mokra/zirkonove-kulicky>
- [21] Omílání. ELUC. *Druhy dokončovacích operací /Omílání* [online]. [cit. 2018-07-31]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1388>
- [22] *Praktické využití technologie omílání* [online]. [cit. 2019-11-30]. Dostupné z: <http://omilani.cz/omilani>
- [23] BOULAND, C., V. URLEA, K. BEAUBIER, M. SAMOILENKO a V. BRAILOVSKI. Abrasive flow machining of laser powder bed-fused parts: Numerical modeling and experimental validation. *Journal of Materials Processing Technology* [online]. 2019, 273 [cit. 2019-11-07]. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2019.116262. ISSN 09240136. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0924013619302341>

- [24] PETARE, Anand C, Neelesh Kumar JAIN, K. BEAUBIER, M. SAMOILENKO a V. BRAILOVSKI. A critical review of past research and advances in abrasive flow finishing process: Numerical modeling and experimental validation. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. 2018, 97(1-4), 741-782 [cit. 2019-11-07]. DOI: 10.1007/s00170-018-1928-7. ISSN 0268-3768. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s00170-018-1928-7>
- [25] BREMERSTEIN, Tina, Annegret POTTHOFF, Alexander MICHAELIS, Christian SCHMIEDEL, Eckart UHLMANN, Bernhard BLUG a Tobias AMANN. Wear of abrasive media and its effect on abrasive flow machining results. *Wear* [online]. 2015, 342-343, 44-51 [cit. 2019-11-10]. DOI: 10.1016/j.wear.2015.08.013. ISSN 00431648. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0043164815003853>
- [26] CHEN, Yuanlong, Ming FANG a Lijun JIANG. Multiphysics simulation of the material removal process in pulse electrochemical machining (PECM). *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. 2017, 91(5-8), 2455-2464 [cit. 2019-11-12]. DOI: 10.1007/s00170-016-9899-z. ISSN 0268-3768. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s00170-016-9899-z>
- [27] ZHU, Dong, Yaowu ZHOU, Ronghui ZHANG a Peng QIN. Investigation of leveling ability improvement in pulse electrochemical machining for aero structural components. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. 2016, 86(5-8), 1723-1732 [cit. 2019-11-12]. DOI: 10.1007/s00170-015-8295-4. ISSN 0268-3768. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s00170-015-8295-4>
- [28] HAN, Fuzhu, Wei CHEN, Weicheng YING a Jin ZHANG. Effects of Polarization on Machining Accuracy in Pulse Electrochemical Machining. *Procedia CIRP* [online]. 2018, 68(5-8), 493-498 [cit. 2019-11-12]. DOI: 10.1016/j.procir.2017.12.080. ISSN 22128271. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2212827117310211>
- [29] Electrochemical Machining – Special Equipment and Applications in Aircraft Industry [online]. [cit. 2019-11-13]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/Scheme-of-precise-electrochemical-machining-with-application-of-pressure-chamber-and_fig3_304670389
- [30] The finishing solution for a promising technology [online]. [cit. 2019-11-13]. Dostupné z: <http://mmptechnology.com/site/additive-manufacturing/>
- [31] Tools with mirror-smooth surfaces: HAM polished even more thoroughly [online]. [cit. 2019-11-13]. Dostupné z: http://mmptechnology.com/site/wp-content/uploads/2017/06/17-09-18_HAM_MMP_press-releas_E.pdf
- [32] Selective laser melting system schematic [online]. [cit. 2019-11-13]. Dostupné z: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Selective_laser_melting_system_schematic.jpg

- [33] XIAO, Gang, Tianfeng YANG, Huanlei LIU, et al. Recuperators for micro gas turbines: A review. *Applied Energy* [online]. 2017, 197, 83-99 [cit. 2019-11-17]. DOI: 10.1016/j.apenergy.2017.03.095. ISSN 03062619. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0306261917303367>
- [34] SHIH, Hsin-Yi, Yen-Chin HUANG, Huanlei LIU, et al. Thermal design and model analysis of the Swiss-roll recuperator for an innovative micro gas turbine: A review. *Applied Thermal Engineering* [online]. 2009, 29(8-9), 1493-1499 [cit. 2019-11-17]. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2008.06.029. ISSN 13594311. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359431108002895>
- [35] Možnosti aditivní výroby (3D tisku) pro expandéry do energetických nízkoteplotních aplikací [online]. Identifikační číslo: VZP36/2019/01: Interní identifikace: TJ01000090-V3-VZP/36/2019/1 [cit. 2019-11-17].
- [36] SCHASTLIVTSEVA, Elizaveta. Použití aditivních technologií při výrobě dílů pro energetiku [online]. [cit. 2019-11-17]. FS ČVUT V PRAZE.
- [37] CHARAKTERISTIKA KOROZIVZDORNÝCH MATERIÁLŮ A ZÁKLADNÍ INFORMACE O POUŽITÍ, ZPRACOVÁNÍ, SVAŘOVÁNÍ A MOŽNÉ KOROZI [online]. [cit. 2019-11-17]. Dostupné z: <http://www.italinox.cz/plechy/charakteristika-materialu/strana-2>
- [38] Katalogové listy – Aditivní výroba: Data sheet: SS 316L-0407 powder for additive manufacturing [online]. [cit. 2019-11-17]. Dostupné z: <http://www.renishaw.cz/cs/katalogove-listy-aditivni-vyroba--17862>

7. Přílohy

Tab. 8 Naměřené hodnoty pro povrch statoru

Lopatka č. 1	Ra	Rz	Rt	Rp	Rv	Rsm	Rsk	Rku
	μm	μm	μm	μm	μm	μm	μm	μm
1: měření	21,273	118,190	161,954	70,420	47,769	698,063	0,520	3,326
2: měření	25,440	138,023	181,116	65,473	72,550	708,125	-0,026	2,791
3: měření	24,549	132,266	165,941	77,312	54,954	656,875	0,752	3,088
Střední hodnota	23,754	129,493	169,670	71,068	58,424	687,688	0,415	3,068
Minimum	21,273	118,190	161,954	65,473	47,769	656,875	-0,026	2,791
Maximum	25,440	138,023	181,116	77,312	72,550	708,125	0,752	3,326
Rozpětí	4,167	19,833	19,162	11,839	24,781	51,250	0,778	0,535

Lopatka č. 3	Ra	Rz	Rt	Rp	Rv	Rsm	Rsk	Rku
	μm	μm	μm	μm	μm	μm	μm	μm
1: měření	16,891	107,670	126,266	55,322	52,348	496,023	0,119	2,939
2: měření	15,872	93,790	124,569	56,790	37,000	572,079	0,640	3,118
3: měření	18,900	117,040	162,485	65,664	51,376	566,289	0,308	3,777
Střední hodnota	17,221	106,167	137,773	59,259	46,908	544,797	0,356	3,278
Minimum	15,872	93,790	124,569	55,322	37,000	496,023	0,119	2,939
Maximum	18,900	117,040	162,485	65,664	52,348	572,079	0,640	3,777
Rozpětí	3,028	23,250	37,916	10,342	15,348	76,056	0,521	0,838

Lopatka č. 5	Ra	Rz	Rt	Rp	Rv	Rsm	Rsk	Rku
	μm	μm	μm	μm	μm	μm	μm	μm
1: měření	20,660	114,861	150,447	71,384	43,477	547,175	0,932	4,071
2: měření	17,204	106,786	130,459	60,839	45,947	548,275	0,207	3,080
3: měření	17,662	109,249	141,192	60,973	48,277	420,980	0,284	3,297
Střední hodnota	18,509	110,299	140,699	64,399	45,900	505,477	0,474	3,483
Minimum	17,204	106,786	130,459	60,839	43,477	420,980	0,207	3,080
Maximum	20,660	114,861	150,447	71,384	48,277	548,275	0,932	4,071
Rozpětí	3,456	8,075	19,988	10,545	4,800	127,295	0,725	0,991

Lopatka č. 7	Ra	Rz	Rt	Rp	Rv	Rsm	Rsk	Rku
	μm	μm	μm	μm	μm	μm	μm	μm
1: měření	17,196	114,275	156,188	69,037	45,238	526,048	0,515	3,944
2: měření	16,448	99,578	124,699	55,933	43,645	348,344	0,445	3,067
3: měření	16,635	102,047	137,102	55,644	46,404	491,068	0,358	3,643
Střední hodnota	16,760	105,300	139,330	60,205	45,096	455,153	0,439	3,551
Minimum	16,448	99,578	124,699	55,644	43,645	348,344	0,358	3,067
Maximum	17,196	114,275	156,188	69,037	46,404	526,048	0,515	3,944
Rozpětí	0,748	14,697	31,489	13,393	2,759	177,704	0,157	0,877

Lopatka č. 9	Ra	Rz	Rt	Rp	Rv	Rsm	Rsk	Rku
	μm	μm	μm	μm	μm	μm	μm	μm
1: měření	19,678	114,752	167,571	60,851	53,901	516,524	0,354	3,629
2: měření	19,075	105,355	144,271	58,054	47,300	454,440	0,303	3,051
3: měření	20,021	102,482	124,434	54,765	47,717	763,821	0,306	2,662
Střední hodnota	19,591	107,530	145,425	57,890	49,639	578,262	0,321	3,114
Minimum	19,075	102,482	124,434	54,765	47,300	454,440	0,303	2,662
Maximum	20,021	114,752	167,571	60,851	53,901	763,821	0,354	3,629
Rozpětí	0,946	12,270	43,137	6,086	6,601	309,381	0,051	0,967

Lopatka č. 11	Ra	Rz	Rt	Rp	Rv	Rsm	Rsk	Rku
	μm	μm	μm	μm	μm	μm	μm	μm
1: měření	23,645	134,087	172,705	77,388	56,699	667,406	0,595	3,423
2: měření	24,542	128,930	160,688	66,449	62,481	700,813	0,416	2,809
3: měření	23,174	127,185	171,040	66,493	60,692	653,235	0,262	2,834
Střední hodnota	23,787	130,067	168,144	70,110	59,957	673,818	0,424	3,022
Minimum	23,174	127,185	160,688	66,449	56,699	653,235	0,262	2,809
Maximum	24,542	134,087	172,705	77,388	62,481	700,813	0,595	3,423
Rozpětí	1,368	6,902	12,017	10,939	5,782	47,578	0,333	0,614

Lopatka č. 13	Ra	Rz	Rt	Rp	Rv	Rsm	Rsk	Rku
	μm	μm	μm	μm	μm	μm	μm	μm
1: měření	24,265	138,684	177,273	85,362	53,322	545,500	0,884	3,879
2: měření	18,324	98,391	123,521	59,204	39,187	519,048	0,716	3,229
3: měření	24,082	133,902	199,859	78,239	55,663	603,889	0,828	4,389
Střední hodnota	22,224	123,659	166,884	74,268	49,391	556,146	0,809	3,832
Minimum	18,324	98,391	123,521	59,204	39,187	519,048	0,716	3,229
Maximum	24,265	138,684	199,859	85,362	55,663	603,889	0,884	4,389
Rozpětí	5,941	40,293	76,338	26,158	16,476	84,841	0,168	1,160

Lopatka č. 15	Ra	Rz	Rt	Rp	Rv	Rsm	Rsk	Rku
	μm	μm	μm	μm	μm	μm	μm	μm
1: měření	17,464	100,195	147,823	56,038	44,157	396,804	0,609	3,833
2: měření	21,652	119,989	145,751	64,157	55,832	533,643	0,483	2,978
3: měření	20,992	111,559	131,058	62,798	48,761	607,118	0,189	2,489
Střední hodnota	20,036	110,581	141,544	60,998	49,583	512,522	0,427	3,100
Minimum	17,464	100,195	131,058	56,038	44,157	396,804	0,189	2,489
Maximum	21,652	119,989	147,823	64,157	55,832	607,118	0,609	3,833
Rozpětí	4,188	19,794	16,765	8,119	11,675	210,314	0,420	1,344

Stator nebr.	Ra	Rz	Rt	Rp	Rv	Rsm	Rsk	Rku
	μm	μm	μm	μm	μm	μm	μm	μm
1: měření	13,161	68,932	99,124	65,973	56,258	53,698	0,5124	6,421
2: měření	15,475	78,145	109,148	73,615	62,125	68,198	0,564	7,471
3: měření	12,347	58,623	93,174	60,987	49,265	60,181	0,4821	5,514
Střední hodnota	13,661	68,567	100,482	66,858	55,883	60,692	0,520	6,469
Minimum	12,347	58,623	93,174	60,987	49,265	53,698	0,4821	5,514
Maximum	15,475	78,145	109,148	73,615	62,125	68,198	0,564	7,471
Rozpětí	3,128	19,522	15,974	12,628	12,86	14,5	0,0819	1,957

Stator broušený	Ra	Rz	Rt	Rp	Rv	Rsm	Rsk	Rku
	μm	μm	μm	μm	μm	μm	μm	μm
1: měření	9,102	77,124	91,347	45,124	47,331	40,231	-0,412	5,142
2: měření	8,541	40,363	85,699	40,841	33,472	46,871	0,369	4,215
3: měření	7,132	65,744	95,111	50,746	39,101	34,962	0,471	6,357
Střední hodnota	8,258	61,077	90,719	45,570	39,968	40,688	0,143	5,238
Minimum	7,132	40,363	85,699	40,841	33,472	34,962	-0,412	4,215
Maximum	9,102	77,124	95,111	50,746	47,331	46,871	0,471	6,357
Rozpětí	1,97	36,761	9,412	9,905	13,859	11,909	0,883	2,142

Stator hladký	Ra	Rz	Rt	Rp	Rv	Rsm	Rsk	Rku
	μm	μm	μm	μm	μm	μm	μm	μm
1: měření	0,936	4,528	21,541	5,847	3,213	6,214	0,197	2,145
2: měření	1,055	5,012	19,621	6,217	4,012	8,012	0,320	2,601
3: měření	1,157	4,987	20,258	6,514	3,947	7,587	0,201	2,714
Střední hodnota	1,049	4,842	20,473	6,193	3,724	7,271	0,239	2,487
Minimum	0,936	4,528	19,621	5,847	3,213	6,214	0,197	2,145
Maximum	1,157	5,012	21,541	6,514	4,012	8,012	0,32	2,714
Rozpětí	0,221	0,484	1,92	0,667	0,799	1,798	0,123	0,569

Tab. 9 Naměřené hodnoty pro povrch rotoru nebroušeného

Rotor nebr.	Ra	Rz	Rt	Rp	Rv	Rsm	Rsk	Rku
	μm	μm	μm	μm	μm	μm	μm	μm
1: měření	14,613	75,214	105,214	71,768	62,852	58,297	0,502	6,671
2: měření	16,241	81,612	118,397	79,314	65,967	68,201	0,528	7,209
3: měření	12,212	62,988	102,258	65,778	51,727	55,904	0,452	5,833
Střední hodnota	14,355	73,271	108,623	72,287	60,182	60,801	0,494	6,571
Minimum	12,212	62,988	102,258	65,778	51,727	55,904	0,452	5,833
Maximum	16,241	81,612	118,397	79,314	65,967	68,201	0,528	7,209
Rozpětí	4,029	18,624	16,139	13,536	14,24	12,297	0,076	1,376

Tab. 10 Naměřené hodnoty pro povrch rotoru broušeného

Rotor broušený	Ra	Rz	Rt	Rp	Rv	Rsm	Rsk	Rku
	μm	μm	μm	μm	μm	μm	μm	μm
1: měření	1,926	13,515	42,324	11,214	6,831	11,678	0,521	4,521
2: měření	1,854	12,478	39,477	9,478	5,241	20,477	-0,021	3,001
3: měření	2,354	10,927	35,547	8,078	5,977	25,441	0,324	2,598
Střední hodnota	2,045	12,307	39,116	9,590	6,016	19,199	0,275	3,373
Minimum	1,854	10,927	35,547	8,078	5,241	11,678	-0,021	2,598
Maximum	2,354	13,515	42,324	11,214	6,831	25,441	0,521	4,521
Rozpětí	0,5	2,588	6,777	3,136	1,59	13,763	0,542	1,923

Tab. 11 Kompletní naměřené hodnoty – stator nebroušený, část 1.

Měření	Průměrný proud [A]	Průměrný výkon [W]	Průměrné otáčky [ot/min]	Vstupní tlak [bar]	Vstupní teplota [°C]	Výstupní tlak [bar]	Entropie [J/K]	Ideální entalpie [J]	Ideální entropie [J/K]	Ideální výkon [W]	Průtok [m ³ /h]	Průtok [m ³ /s]	Hustota [kg/m ³]
1	6,140	73,353	4004,413	1,398	19,697	0,995	419008,6	3769,807	391760,7	617,790	57,658	0,016	1,664
2	5,426	69,076	4248,935	1,397	19,723	0,995	419035	3770,003	391812,8	617,066	57,658	0,016	1,663
3	4,482	60,123	4313,229	1,399	19,799	0,995	419111,2	3769,966	391802,8	692,152	64,444	0,018	1,664
4	2,102	29,902	4402,444	1,398	19,915	0,995	419227,5	3770,443	391929,6	691,652	64,444	0,018	1,663
5	4,124	56,171	4357,327	1,398	19,923	0,995	419236,3	3770,461	391934,5	691,756	64,444	0,018	1,663
6	8,307	70,823	3154,381	1,399	20,009	0,995	419322,1	3770,589	391968,4	693,167	64,444	0,018	1,664
7	8,306	42,976	2240,214	1,395	20,025	0,995	419339,6	3771,463	392201,1	686,720	64,444	0,018	1,659
8	8,293	35,432	1996,286	1,399	20,041	0,995	419354,7	3770,751	392011,5	692,805	64,444	0,018	1,663
9	8,949	7,785	1087,667	1,393	20,060	0,995	419375,1	3772,002	392344,5	683,450	64,444	0,018	1,656
10	0,680	6,361	2997,755	1,121	19,395	0,995	418770,6	3832,325	408896,3	236,777	68,063	0,019	1,335
11	0,582	5,429	2995,619	1,116	19,407	0,995	418784	3833,584	409252,6	228,066	68,063	0,019	1,330
12	2,820	35,587	3997,556	1,252	19,611	0,995	418956,2	3801,217	400236,7	396,689	56,933	0,016	1,491
13	7,491	32,543	2285,384	1,395	20,064	0,995	419378,2	3771,633	392246,2	610,071	57,273	0,016	1,658

Tab. 12 Kompletní naměřené hodnoty – stator nebroušený, část 2.

Korigovaný průtok [m ³ /s]	Průtok [kg/s]	Čistá elektrická účinnost [%]	Ztrátový výkon na usměrňovači [W]	Výkon z generátoru [W]	Zdánlivý kroučící moment [Nm]	Účinnost [%]	Iterační kroučící moment [Nm]	Kroučící moment [Nm]	Iterace	Mechanický výkon turbíny [W]	Termodynamická účinnost turbíny [%]
0,014	0,023	11,873	9,209	82,563	0,197	67	0,197	0,296	0,296	124,154	20,097
0,014	0,023	11,194	8,138	77,214	0,174	64	0,174	0,273	0,272	121,215	19,644
0,015	0,025	8,686	6,722	66,845	0,148	62	0,148	0,240	0,240	108,339	15,653
0,015	0,025	4,323	3,153	33,055	0,072	50	0,072	0,145	0,145	66,642	9,635
0,015	0,025	8,120	6,185	62,357	0,137	59	0,137	0,232	0,231	105,511	15,253
0,015	0,025	10,217	12,460	83,283	0,252	70	0,252	0,360	0,361	119,146	17,189
0,015	0,025	6,258	12,459	55,435	0,236	70	0,237	0,340	0,340	79,648	11,598
0,015	0,025	5,114	12,439	47,871	0,229	69	0,229	0,332	0,332	69,378	10,014
0,015	0,025	1,139	13,423	21,208	0,186	65	0,186	0,285	0,285	32,453	4,748
0,018	0,024	2,687	1,020	7,381	0,024	33	0,023	0,070	0,071	22,165	9,361
0,018	0,024	2,380	0,873	6,301	0,020	32	0,021	0,065	0,063	19,692	8,634
0,014	0,021	8,971	4,229	39,817	0,095	55	0,096	0,176	0,175	73,058	18,417
0,014	0,022	5,334	11,237	43,780	0,183	66	0,184	0,280	0,278	66,636	10,923

Tab. 13 Kompletní naměřené hodnoty – stator broušený, část 1.

Měření	Průměrný proud [A]	Průměrný výkon [W]	Průměrné otáčky [ot/min]	Vstupní tlak [bar]	Vstupní teplota [°C]	Výstupní tlak [bar]	Entropie [J/K]	Ideální entalpie [J]	Ideální entropie [J/K]	Ideální výkon [W]	Průtok [m ³ /h]	Průtok [m ³ /s]	Hustota [kg/m ³]
1	6,154	46,755	2810,476	1,254	20,033	0,995	419381,313	3802,169	400497,777	415,964	59,172	0,016	1,491
2	6,624	19,653	1577,486	1,258	20,071	0,995	419418,392	3801,501	400314,667	418,531	58,773	0,016	1,495
3	6,626	33,051	2124,786	1,285	20,107	0,995	419448,416	3795,469	398665,927	460,177	58,773	0,016	1,527
4	4,952	66,032	4303,451	1,315	20,085	0,995	419419,277	3788,711	396830,124	508,050	59,006	0,016	1,563
5	2,457	34,926	4418,330	1,315	20,195	0,995	419529,261	3789,136	396945,377	566,313	65,806	0,018	1,562
6	6,150	77,364	4163,314	1,317	20,252	0,995	419586,805	3788,860	396870,580	501,298	57,870	0,016	1,565
7	6,144	73,080	3989,143	1,317	20,262	0,995	419596,590	3789,002	396909,005	500,563	57,870	0,016	1,564
8	7,461	56,944	2878,889	1,313	20,302	0,995	419637,246	3789,881	397147,181	495,532	57,870	0,016	1,560
9	8,293	32,347	1881,214	1,312	20,359	0,995	419695,672	3790,216	397237,898	494,654	57,870	0,016	1,559
10	8,294	30,146	1826,531	1,314	20,380	0,995	419716,500	3789,986	397175,535	496,729	57,870	0,016	1,560
11	2,457	31,322	4005,831	1,196	19,648	0,995	419006,922	3814,572	403921,704	309,713	56,444	0,016	1,423
12	1,157	16,454	4334,398	1,195	19,632	0,995	418991,676	3814,782	403979,880	308,073	56,444	0,016	1,422
13	2,461	31,522	4029,278	1,192	19,719	0,995	419079,401	3815,658	404223,534	304,521	56,444	0,016	1,419

Tab. 14 Kompletní naměřené hodnoty – stator broušený, část 2.

Korigovaný průtok [m ³ /s]	Průtok [kg/s]	Čistá elektrická účinnost [%]	Ztrátový výkon na usměrňovači [W]	Výkon z generátoru [W]	Zdánlivý kroučící moment [Nm]	Účinnost [%]	Iterační kroučící moment [Nm]	Kroučící moment [Nm]	Iterace	Mechanický výkon turbíny [W]	Termodynamická účinnost turbíny [%]
0,015	0,022	11,240	9,230	55,985	0,190	67	0,190	0,286	0,286	84,189	20,239
0,015	0,022	4,696	9,936	29,589	0,179	66	0,179	0,274	0,273	45,173	10,793
0,014	0,022	7,182	9,939	42,990	0,193	66	0,193	0,291	0,291	64,744	14,069
0,014	0,022	12,997	7,428	73,460	0,163	63	0,163	0,258	0,258	116,051	22,842
0,016	0,025	6,167	3,686	38,612	0,083	52	0,084	0,161	0,160	74,111	13,087
0,014	0,022	15,433	9,225	86,589	0,199	67	0,200	0,300	0,298	129,916	25,916
0,014	0,022	14,600	9,216	82,295	0,197	66	0,197	0,297	0,297	123,939	24,760
0,014	0,022	11,492	11,192	68,136	0,226	69	0,225	0,326	0,328	98,892	19,957
0,014	0,022	6,539	12,440	44,786	0,227	69	0,227	0,330	0,330	65,096	13,160
0,014	0,022	6,069	12,441	42,586	0,223	69	0,224	0,326	0,325	62,079	12,498
0,014	0,021	10,113	3,686	35,008	0,083	52	0,083	0,161	0,162	67,976	21,948
0,014	0,021	5,341	1,735	18,189	0,040	41	0,041	0,100	0,099	44,911	14,578
0,014	0,020	10,351	3,691	35,213	0,083	52	0,084	0,161	0,160	67,717	22,237