

**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

FAKULTA STROJNÍ



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Elizaveta Schastlivtseva 2018

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Schastlivtseva** Jméno: **Elizaveta** Osobní číslo: **452773**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav strojírenské technologie**
Studijní program: **Teoretický základ strojírenského inženýrství**
Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Použití aditivních technologií při výrobě dílů pro energetiku

Název bakalářské práce anglicky:

Use of additive technologies in the production of parts for power industry

Pokyny pro vypracování:

Teoretický úvod do aditivních technologií.
Požadavky na díl pro energetiku.
Experiment - výroba vzorku 3D tiskem.
Vyhodnocení experimentu.
Závěry.

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

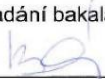
Ing. Barbora Bryksí Stunová, Ph.D., ústav strojírenské technologie FS


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


Datum zadání bakalářské práce: **23.04.2018**

Termín odevzdání bakalářské práce: **10.08.2018**

Platnost zadání bakalářské práce: **10.08.2018**


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.

9.05.2018

Datum převzetí zadání



Podpis studentky

Poděkování

Chtěla bych poděkovat vedoucí mé bakalářské práce paní Ing. Barboře Bryksí Stunové, Ph.D., za trpělivé vedení, podporu, cenné rady a čas, který mi věnovala ke konzultacím.

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

.....
Elizaveta Schastlivtseva

Název práce: Použití aditivních technologií při výrobě dílů pro energetiku

Autor: Elizaveta Schastlivtseva

Ústav: Ú12133 – Ústav strojírenské technologie

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

Anotace: V první teoretické části bakalářské práce jsou popsány obecné základy a principy metod aditivní výroby z kovů. Dále následuje rešeršní část, která je věnovaná realizovaným projektům aditivních technologií v energetice. Experimentální část obsahuje popis výsledku experimentu 3D tisku dílů pro malý turboexpandér. Poslední část zahrnuje stručný návrh povrchových úprav dílů k dosažení odpovídající kvality povrchu u prototypu i pro sériovou výrobu.

Klíčová slova: 3D tisk, aditivní technologie, turboexpandér, povrchové úpravy

Abstract: The first theoretical part of the bachelor thesis describes the general foundations and principles of four types of additive production from metals. Then follows the research part, which is devoted to realized projects of additive technology in energetics. The experimental part contains a description of the results of the experiment of 3D printing part for a small turboexpander. The last part includes a brief solution proposal of the surface finishing methods to achieve appropriate surface quality both for prototype and serial production.

Keywords: 3D printing, additive technology, turboexpander, surface finishing

Obsah

1. Úvod	7
2. Charakteristika jednotlivých metod	8
2.1. Selektivní laserové spékání (SLS)	8
2.2. Selektivní laserové tavení práškových kovů (SLM).....	10
2.3. Přímé laserové slinování kovů (DMLS).....	11
2.4. Tavení elektronovým paprskem (EBM).....	12
2.5. Přímé energetické nanášení (DED)	15
2.6. Tryskání pojiva (Binder Jetting).....	16
3. Použití aditivních technologií v energetice	18
3.1. Výzkumné projekty v dnešní době	18
3.2. Nová perspektiva energetiky.....	21
3.3. Představení projektu	21
3.4. Návrh turboexpandéru	22
4. Experiment	25
4.1. Analýza prvních výtisků.....	25
4.2. Tisk reálných dílů statoru a rotoru.....	27
4.3. Analýza statorového kola	28
4.4. Analýza rotorového kola.....	30
5. Možností povrchových úprav oběžných kol	33
5.1. Tryskání	33
5.2. Broušení.....	34
5.3. Omílání	35
5.4. Technologie obrábění abrazivními proudy (AFM)	36
5.5. Elektrochemické leštění	38
5.6. Shrnutí	39
6. Závěr	40
Seznamy	41
Seznam tabulek.....	41
Seznam obrázků.....	41
Seznam použitých zdrojů.....	43

1. Úvod

Před dvěma desítkami let do našich životů vstoupily nové, od klasických metod odlišné technologie aditivní výroby. Jejich hlavní přínos spočívá v postupném nanášení materiálu po jednotlivých vrstvách v průběhu stavby dílu, zatímco u klasických konvenčních metod se produkt vyrábí z polotovaru pomocí obrábění.

Hlavními výhodami 3D tisku jsou možnost výroby složitých součástí a prvků, u nichž běžné výrobní postupy mají určitá omezení, úspora času – 3D tisk může výrazně snížit čas strávený na každém projektu. Místo klasické výroby během několika týdnů nebo dnů je většina součástí vytištěna v kratším čase. Další výhodou je minimální ztráta materiálu, nepoužitý prášek u technologií spékání lze z 95 % znovu aplikovat. Lze také měnit velikost hmotností součástek, když to dovolí konstrukce a pevnost pro další použití výrobku. Díky vytvoření modelu v 3D programu je možné ho aktivně modifikovat v aktuálním výrobním procesu. Skutečnost, že materiály jsou relativně levné a vytváření prototypů na moderních 3D tiskárnách vyžaduje mnohem méně času, je velmi užitečná ve fázi prototypování, podpořené současnou komunikací mezi vývojáři a zákazníky. [1]

V posledním desetiletí výrazně vzrostl vliv 3D tisku kovů na průmyslovou výrobu. Vyvinutí nových materiálů a výzkum v oblasti aditivní výroby kovových dílů s vysokou pevností vede k širšímu využití technologie pro výrobu reálných sériových součástek. 3D tisk kovových součástek je ideální alternativou pro výrobu dílů složitého tvaru a designu, které nelze reprodukovat pomocí technologie odlévání nebo CNC obrábění. Mechanické vlastnosti materiálů získaných pomocí 3D tisku odpovídají vysokým standardům inženýrství. [2]

V dnešní době existují převážně 4 typy výrobních procesů, které se používají k tisku kovových dílů, a to [3]:

- spékání práškové vrstvy laserem (*Direct Metal Laser Sintering – DMLS, Selective Laser Sintering – SLS, Selective Laser Melting – SLM*)
- spékání práškové vrstvy elektronovým paprskem (*Electron Beam Melting – EBM*)
- přímé energetické nanášení (*Directed Energy Deposition – DED, Laser Metal Deposition – LMD*)
- tryskání pojiva (*Binder Jetting*),

kteří budou uvedeny v dalším textu.

Hlavním cílem bakalářské práce je nalézt informace o projektech realizovaných použitím aditivní technologie v energetice. Cílem praktické části je zaměření na popis návrhu a 3D tisku kovových součástí mini turboexpandéru pro malou energetiku, popis a analýza provedených experimentů a návrh možných úprav kvality povrchu vytištěných dílů.

2. Charakteristika jednotlivých metod

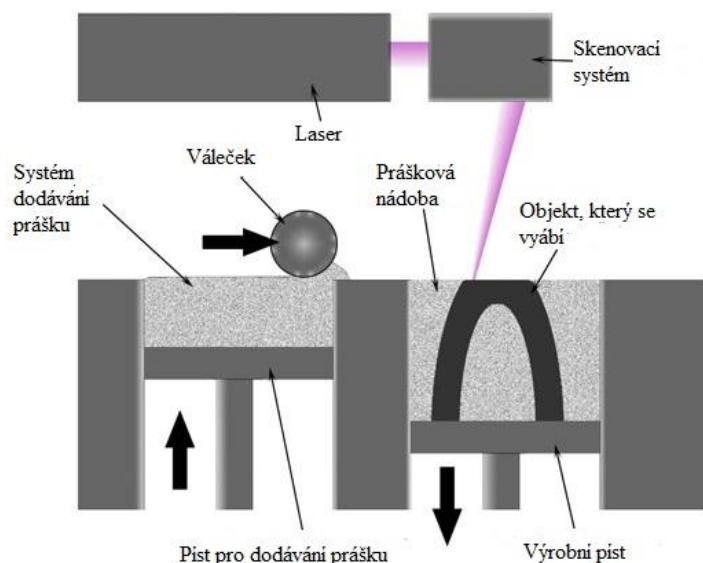
Výběr nejvhodnějších technologií záleží na požadovaných vlastnostech modelu a oblastí jeho použití. Každá technologie se odlišuje nejen používaným materiálem, ale i pevnostními charakteristikami, hustotou, možnými nepřesnostmi vlivem rozdílu teplot u vytvářeného modelu, drsností povrchu.

2.1. Selektivní laserové spékání (SLS)

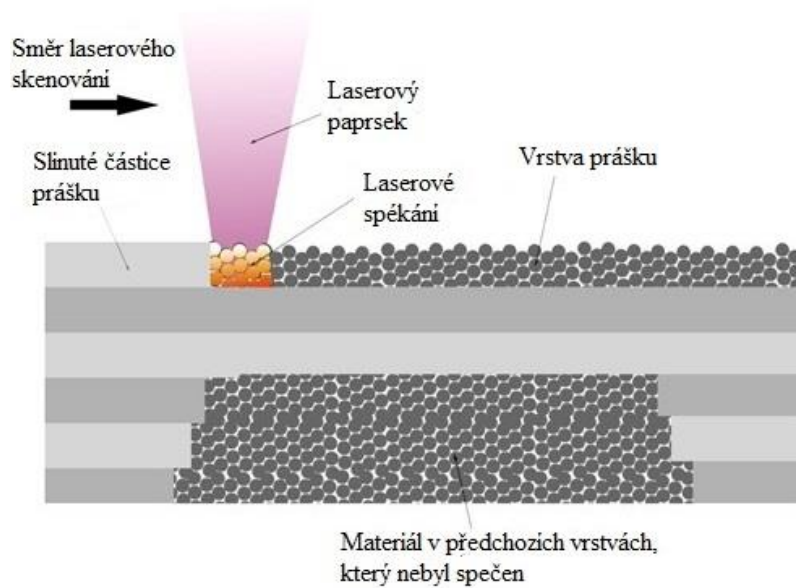
Jednou z nejstarších, často používanou, ale poměrně náročnou metodou výroby prototypů z hlediska energie je selektivní laserové spékání (Selective Laser Sintering). Autorem této metody byl Dr. Carl Deckard ve spolupráci se skupinou studentů univerzity v Austinu v Texasu. Metoda byla poprvé patentována v roce 1989 společností DTM Corporation, která byla v roce 2001 zakoupena společností 3D Systems. [4]

Tiskový proces zahrnuje použití trojrozměrných modelů ve formátu STL jako výkresy pro vytváření fyzických modelů. Trojrozměrný model je předmětem digitálního zpracování pro virtuální rozdělení na tenké vrstvy o tloušťce odpovídající tloušťce vrstvy aplikované tiskovým zařízením. Dokončený soubor ve standardním formátu STL se používá jako konstrukční model pro budování fyzického modelu. [5]

Technologický postup se skládá ze dvou fází: na začátku se tenká vrstva prášku (průměr částic 50–100 μm) roznáší rovnoměrně po celé pracovní oblasti (pomocí válečku nebo pomocí nastříkávání prášku na povrch), potom se aktivizuje laser a peče oblast, která odpovídá řezu zamýšleného objektu. Pracovní stůl dále sjíždí dolů na vzdálenost rovnající se tloušťce vrstvy a algoritmus se opakuje, dokud nedosáhne nejvyššího bodu modelu. [4] [6] [7]



Obr. 2.1.1 Selektivní laserové spékání (schéma pracovního stroje) [4]



Obr. 2.1.2 *Selektivní laserové spékání (schéma spékání vrstvy) [4]*

Pro snížení energie potřebné pro slinování se teplota pracovní komory obvykle udržuje na úrovni těsně pod bodem tavení pracovního materiálu a pro zabránění oxidace prochází proces v prostředí bez kyslíku. [8]

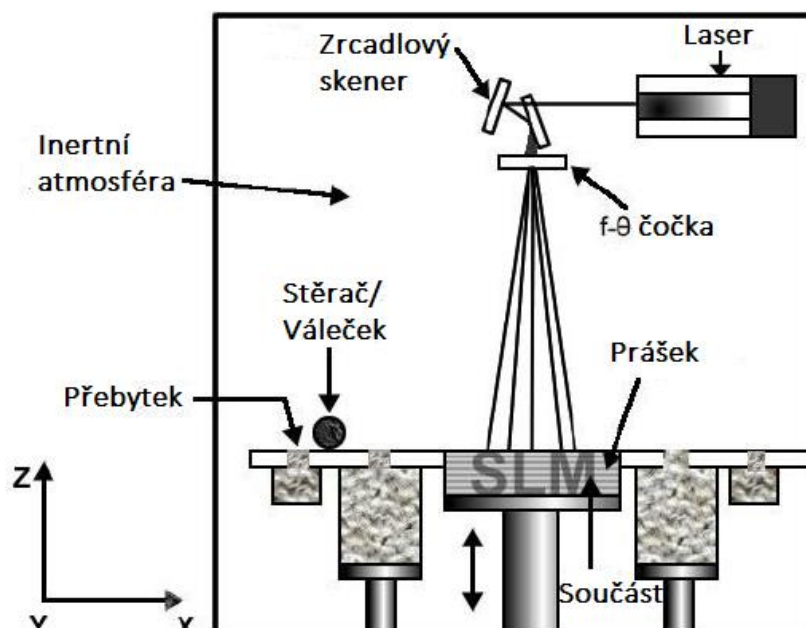
Tiskárny pracující technologií SLS mají proměnné nastavení. V závislosti na přiřazených úkolech lze regulovat parametry jako je teplota, hloubka a doba působení. Uživatel může také nastavit práci buď pouze s přechodovými hranicemi, nebo spékání celé hloubky modelu. [6] Ve srovnání s jinými způsoby výroby pomocí aditivních technologií je SLS vysoce pružná technologie, pokud jde o výběr spotřebního materiálu. Patří sem různé polymery (například nylon nebo polystyren), kovy a slitiny (ocel, titan, drahé kovy, slitiny kobaltu a chromu atd.). [7] Velké plus pro tisk složité geometrie představuje to, že není potřeba nosná konstrukce. Roli nosné konstrukce zastává samotný prášek, který nebyl vystaven působení laserového paprsku. Díky tomu ji lze použít na modelování nejsložitějších geometrií (jak pro vnější, tak i pro vnitřní prvky), jíž nelze dosáhnout použitím tradičních metod obrábění. Kromě toho je vyloučeno riziko poškození produktu. [6]

Za nevýhody této metody lze označit vysokou energetickou náročnost, cenu zařízení, které v sobě nese karbon-dioxidový zdroj paprsku, a nemožnost tisku uzavřených dutin, ve kterých po ukončení tisku prášek zůstane uzavřen. Další nevýhodou této technologie je pórovitost výsledných dílů, která omezuje mechanické vlastnosti a nedovoluje dosažení pevnosti na úrovni odlitých součástí. Při výrobě jednotlivých vrstev dílu nedochází k plnému protavení materiálu, čímž je dosahováno hustoty 70 %. [10]

2.2. Selektivní laserové tavení práškových kovů (SLM)

Další technologií je technologie SLM (*Selective Laser Melting*), která je podobná SLS, ale s některými zásadními rozdíly. Zatímco v SLS jsou částice prášku navzájem spékány, zde jsou kovové částice přivedeny do stavu tání a svařeny dohromady a tvoří tuhý rám. Tato metoda pochází z Fraunhoferova institutu laserových technologií v Německu (Fraunhofer-Institut für Lasertechnik). V roce 1995 vznikl výzkumný projekt, který realizovali Wilhelm Miners a Kurt Wissenbach. Později tito vědci spojili síly s Dieterem Schwarzem a Mattiasem Fokelem ze společnosti F & S Stereolithographietechnik GmbH, kde byla tato metoda oficiálně patentována. Začátkem roku 2000 začala F & S spolupracovat s další německou společností MCP HEK GmbH. Nakonec se vědci dostali do vedení společností SLM Solutions GmbH a Realizer GmbH a navazali na všechny předchozí práce. [11]

Výrobní cyklus se skládá z nanášení tenké vrstvy prášku na pracovní plochu – obvykle kovový stůl, který se může pohybovat ve svislém směru. Tiskový proces probíhá v pracovní komoře v inertní atmosféře, která je obvykle tvořena dusíkem a díky níž je možné deklarovat čistotu zpracovávaného materiálu. Nepřítomnost kyslíku zabraňuje oxidaci tiskového materiálu, což umožňuje tisknout materiály, jako je titan. Každá vrstva modelu je tavená a kopíruje obrysy vrstev digitálního modelu. Tavení se provádí pomocí vysokovýkonného laserového paprsku, který pracuje ve směru os X a Y, kovové částice taví a svařuje je dohromady. Na obrysech průřezu probíhá kontinuální svařování a vnitřní stěny objektu mohou být svařeny v souladu s výplňovým vzorem. Zbytky prášku z výroby dílu mohou být znovu použity pro tisk dalšího modelu. Při výrobě jednotlivých vrstev dílu dochází k plnému protavení materiálu, čímž je dosahováno hustoty až 99.9 %. [11] [12]



Obr. 2.2.1 Schematický přehled cyklu selektivního laserového tavení (SLM) [13]

Typickými zástupci přístrojů SLM jsou pracovní komory o rozměrech 250 mm v jednom rozměru, i když neexistují žádná technologická omezení velikosti stavebního prostoru. Nejoblíbenější materiály jsou práškové kovy a slitiny, včetně nerezové oceli, nástrojové oceli, slitiny kobaltu, chromu, titanu, hliníku, zlata atd. [14]

Díky technologii SLM je možné vytvořit duté kovové modely nejkompexnější konstrukce. Výhodou je možnost vytvářet díly nejnáročnějšího tvaru, často se stěnami o minimální tloušťce a s množstvím dutin, v jednom modelu je povolena kombinace porézních a monolitických slitin. [15]

Laserové svařování se používá při konstrukci letadel a v kosmické oblasti, protože je založeno na výrobě dílů s vysokou pevností, které nelze vyrobit konvenčním způsobem obrábění, jež je v rozporu s jejich konstruktivní složitostí. Dalším pozitivním faktorem této technologie je obrovský ekonomický efekt, který se nejvíce projevuje v energetické náročnosti v potřebných pracovních prostorech, množství pracovníků a také v materiálech. Dobře popisují vlastnosti dílu vyrobeného touto metodou američtí vědci: „Prvky motorů pro rakety postavené z niklu na technologii SLM jsou o něco slabší, pokud jde o hustotu dílů vyráběných pevným odléváním s klasickým svařováním součástí. Současně díky bezproblémovému svařování v místech, kde jsou obvykle spárovány spoje, se pevnost zvyšuje mnohokrát“. [15]

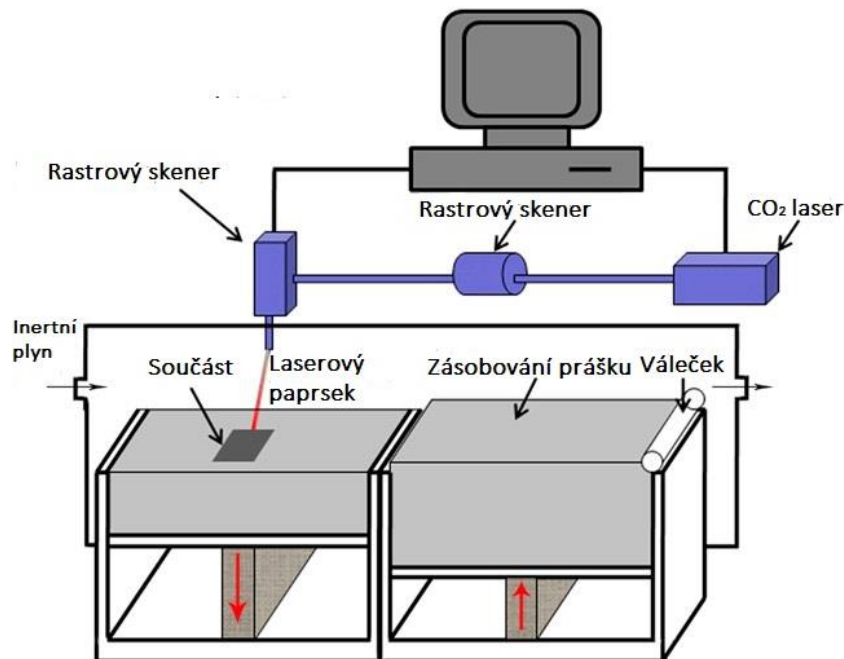
2.3. Přímé laserové slinování kovů (DMLS)

Přímé laserové slinování kovů DMLS (Direct Metal Laser Sintering) je aditivní výrobní technologie pro kovové výrobky, která byla vyvinuta v roce 1995 německou firmou Electro Optical Systems (EOS) ve spolupráci se společností Rapid Product Innovations (RPI). [17]

Podle zprávy Wohlers 2015 roku, bázi na základě technologie DMLS má největší počet celosvětově instalovaných tiskáren 3D tisku z kovu. Tato technologie udává kombinaci optimálních metod návrhu a následného snadného zpracování, tím získává nejlepší výsledky aditivní výroby kovové součásti. [2]

Jako topný prvek pro slinování kovového prášku se používá optický laser s poměrně vysokým výkonem – řádově 200 W. Některá zařízení používají výkonnější lasery se zvýšenou rychlostí skenování (tj. pohybem paprsku laseru) pro vyšší výkon. Práškový materiál se přivádí do pracovní komory v množství potřebném pro aplikaci jedné vrstvy. Speciální válec zarovnává dodaný materiál do rovinné vrstvy a odstraňuje jeho přebytek z komory, potom laserová hlava spéká čerstvý prášek s předchozí vrstvou podle obrysů definovaných digitálním modelem. Po dokončení vrstvy se děj opakuje: válec přivádí čerstvý materiál a laser začíná spékat další vrstvu. Hlavní odlišující vlastností této technologie je velmi vysoké rozlišení v průměru asi 20 mikrometrů. Jednou z důležitých podmínek pro laserový tisk je vytvoření ochranného prostředí zabraňujícího

oxidaci prášku. Za daným účelem se používá argon nebo dusík. Nicméně dusík jako inertní plyn může při neomezeném použití způsobit tvorby nitridů (například nitridů hliníku nebo titanu), které vedou ke snížení plasticity materiálu. [5]



Obr. 2.3.1 Schéma zařízení DMLS [16]

Hlavní výhodou technologie DMLS je možnost použití k vytvoření objektů téměř z jakékoliv kovové slitiny, na rozdíl od jiných metod 3D tisku, které pracují pouze s materiály založenými na polymerech nebo specifických kovových slitinách. Další velkou výhodou této technologie je docela vysoká kvalita povrchu a při správném návrhu modelu tato technologie také nevyžaduje žádné následné tepelné zpracování pro zmenšení vnitřního pnutí, protože nedochází k úplnému tavení materiálu. [19]

Nedostatky technologie DMLS spočívají v tom, že části vyrobené laserovým slinováním nemají monolitické vlastnosti, a proto nedosahují stejných pevnostních charakteristik jako části vyrobené konvenčními metodami. Rychlost tisku je pomalejší než u podobných metod tisku. Kromě toho musí být pro danou metodu použity zvláštní stroje. Jinak pomocí povrchových úprav (např. pískování) nebo zahříváním na určitou teplotu lze docílit mnohem větší pevnost materiálu, ale horší únavové vlastnosti než při výrobě litím. [20] [21]

2.4. Tavení elektronovým paprskem (EBM)

EBM (Electron Beam Melting) – další metoda 3D tisku, která se používá pro výrobu kovových výrobků. Výroba dílů pomocí elektronového paprsku ve vakuu svým principem připomíná technologii SLS nebo DMLS, ale má vyšší kvalitu hotových výrobků. [22] Tato metoda byla vyvinuta v roce 1997 švédskou

společností Arcam AB, která zlepšila technologii SLS a dala jí název tavení elektronovým paprskem (Electron Beam Melting, EBM). Hlavním směrem její činnosti je výroba implantátů, protéz a částí pro letecký a kosmický průmysl z titanu a jeho slitin. [23]

Metoda elektronového paprsku (EBM) je podobná selektivnímu tavení laserem (SLM) – hlavní rozdíl spočívá v použití elektronických emitörů (tzv. elektronických pistolí) namísto laseru jako zdroje energie pro tavení. [24] Elektronová pistole se skládá z vakuové baňky, ve které se přehřeje elektroda (katoda) s vysokým napětím na vysokou teplotu, a na druhém konci je instalována anoda. Za těchto podmínek vzniká fenomén termionické emise – jinými slovy začne katoda vydávat proud elektronů. Pomocí řízeného magnetického pole je tento proud zaměřen a umístěn. [24]

Použitím elektronových paprsků s vysokým výkonem ve vakuové komoře se kovové prášky roztavují vrstvou po vrstvě a v důsledku toho se získají kontury digitálního modelu. [25]

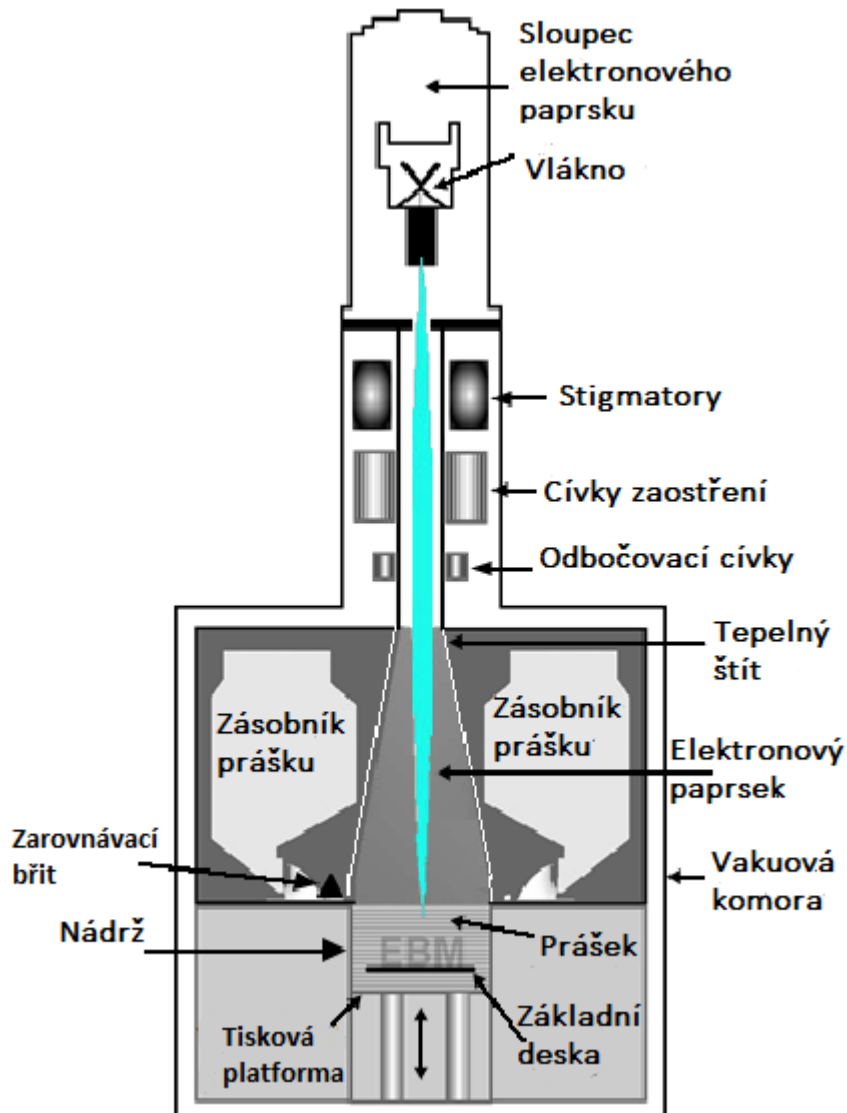
Technologicky se proces skládá z následujících kroků:

- 1) speciální vrstva vzniká tak, že na pracovní plochu stroje se nasype nebo nastříká kovový prášek a následně se tato vrstva vyrovnává nožem nebo válečkem;
- 2) podle souřadnic získaných z počítačového modelu bombarduje elektronový paprsek získaný povrch elektrony.

Důležitá je skutečnost, že najednou se může „ozářit“ několik kusů výrobků. To podstatně zrychluje proces výroby výrobku.

Vakuum vytvořené v komoře má tlak menší než 1×10^{-4} bar a podporuje proces ohřevu kovu, protože jakékoliv plynové nebo vzduchové médium vytváří příliš vysokou odolnost vůči elektronům. V takovém vakuovém prostředí zůstávají vlastnosti materiálu, které by byly ztraceny během tavení. [25]

Teplota v komoře při tisku je 640–700 °C. Díky tomu se celá část rovnoměrně zahřívá a proces chlazení po dokončení tisku probíhá současně po celém povrchu. Navíc plné roztavení spotřebního prášku umožňuje výrobu monolitických produktů – tedy o maximální síle a bez potřeby tepelného zpracování. Daná technologie umožňuje vytvářet součásti, které netrpí zbytkovým mechanickým namáháním způsobeným teplotním gradientem mezi již ochlazenými a ještě horkými vrstvami. [25] [29]



Obr. 2.4.1 Schematické znázornění EBM systému [18]

Tiskovým materiálem pro EBM je kovový prášek, obvykle titanový, ve formě granulí, které mají velikost 20–60 mikronů. Používá se i slitina na bázi kobaltu. Zvláště je to obvyklé při výrobě prvků plynových turbín, lékařských protéz a implantátů. Rovněž se používají prášky z nerezových, nástrojových a vysokorychlostních ocelí, různých slitin na bázi mědi. Spotřební materiál se skládá z čistého kovového prášku bez pojiva a dokončené modely nejsou pórovité. [25] [29]

Výhody této technologie jsou nepopiratelné. Struktura produktů získaných v důsledku fúze elektronovým paprskem se pozitivně liší od struktury částí vyrobených odléváním. Chyba je pouze $\pm 0,2$ mm v délce 100 mm. To je způsobeno velikostí elektronového paprsku, což je 0,2–1,0 mm. Další výhodou je to, že nedochází ke smršťování a vnitřnímu pnutí výrobku, to znamená, že není vyžadováno žádné další tepelné zpracování. [25] Nicméně aspekty jako velikost

částic prášku, tloušťka vrstvy a drsnost povrchu větší než u analogických technologií spékání prášku.

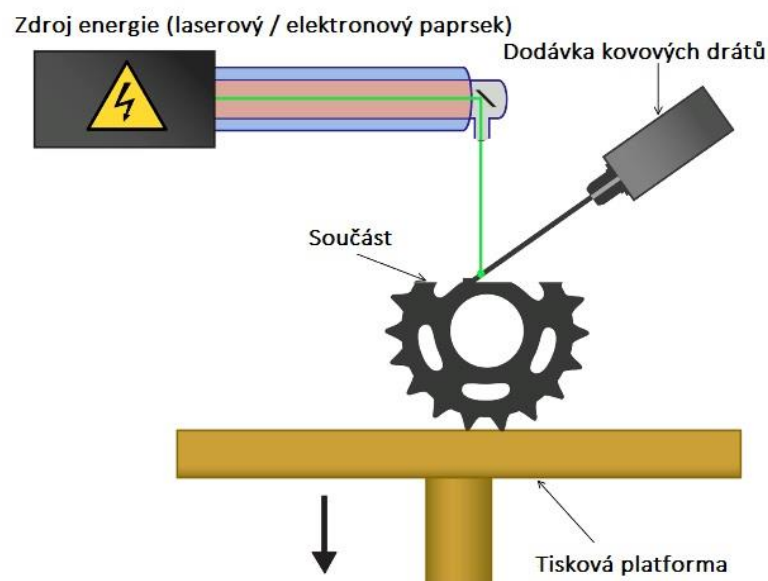
Důležité je také poznamenat, že tuto technologii je možné použít pouze s vodivými materiály. A také je nutná ochrana proti rentgenovému záření. [30]

2.5. Přímé energetické nanášení (DED)

DED (Directed Energy Deposition) – další technologie aditivní výroby, při které v důsledku působení tepelné energie (např. laser, elektronový paprsek atd.) dochází ke sloučení materiálu tavením během jeho nanášení. Tato technologie je také známa pod názvy *Laser Metal/Melting Deposition – LMD*, *Direct Metal Deposition – DMD*, *Direct Laser Deposition – DLD*, *Laser Engineered Net Shaping – LENS* atd. [26]

V letech 1994–1997 vyvinula v New Mexico USA společnost Sandia National Laboratories novou metodu aditivní výroby, kterou nazvali LENS a která se lišila od všech podobných technologií této doby. To způsobilo vznik řady dalších technologií s různými názvy (DMD, DED, LMD atd.), ale se stejným principem jako LENS. [26]

Proces přímého elektrického nanášení se může lišit pro každou z metod, ale v zásadě je to stejný princip, který spočívá v ukládání roztaveného kovového prášku nebo drátu na tiskovou platformu. Tryska, která materiál ukládá, je typicky namontována na pětiosé rameno a poté je tavena laserovým nebo elektronovým paprskem. Metody DED jsou schopny vytvářet značně velké části a jsou oblíbené kvůli velké rychlosti nanášení, protože se velmi podobá svařování, DED se běžně používá k opravě a údržbě stávajících součástí. [26] [27] [28]



Obr. 2.5.1 Schéma přímého energetického nanášení [27]

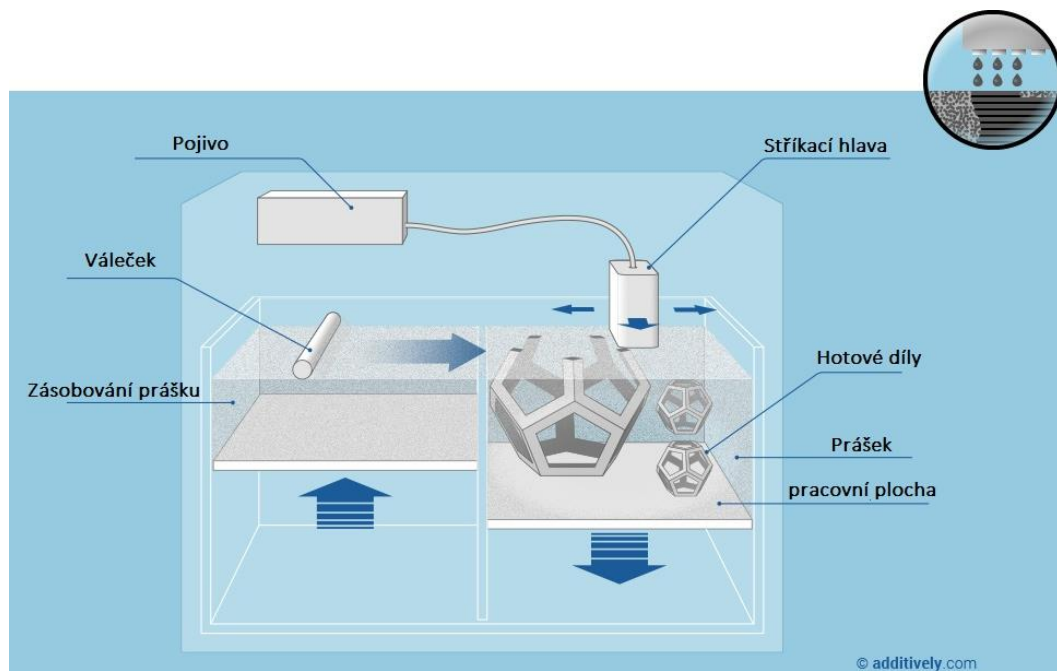
Výhodou metody je to, že DED je jediná aditivní technologie, která může být účinně použita k přidávání kovových materiálů k existujícím kovovým dílům, včetně použití při svařování a opravách. Hlavní výhodou DED je rychlost, která umožňuje rychlou tvorbu velkých částí.

Nevýhodou DED procesů používajících drát je menší přesnost nanášení materiálu vzhledem k použití předem upraveného tvaru, ale díly mají mnohem lepší materiálové vlastnosti než při tisku práškem, protože se používá pouze požadovaný materiál. V procesu ochlazování nechává kovový materiál velmi drsnou texturu povrchu, která se neliší od pasty vycházející z trubice. Z tohoto důvodu většina dílů DED vyžaduje následnou úpravu povrchu. [28]

2.6. Tryskání pojiva (Binder Jetting)

Tryskání pojiva, které je také známo jako „Binder Jetting“ nebo prostě „3D printing“ – metoda aditivní výroby, která byla vyvinuta v roce 1989 v Massachusetts Institute of Technology (MIT) a potom v roce 1993 byla licencovaná pro řadu různých firem. [68]

Binder Jetting používá materiál dvou typů: stavební materiál na bázi prášku a pojivo tekuté formy, které působí jako lepidlo mezi práškovými vrstvami. Tisková hlava stroje se pohybuje vodorovně podél os x a y, při tom nanáší střídavé vrstvy stavebního materiálu a pojiva. Po každé vrstvě je tištěný objekt spuštěn dolů a proces se opakuje, dokud konstrukční část nedosáhne své konečné výšky. Konstrukční materiál neslepený pojivem slouží jako podpora pro stavěný díl a proto tato technologie nevyžaduje žádné nosné konstrukce. [69]



Obr. 2.6.1 Schéma technologie Binder Jetting [70]

Binder Jetting pracuje s téměř jakýmkoliv materiálem, který je k dispozici ve formě prášku, a to buď kov, keramika nebo polymery. Proces je rychlý, jednoduchý a levný vzhledem k tomu, že částice prášku jsou lepeny dohromady pojivem při teplotě 200 °C a nedošlo k úplnému tavení materiálu. Některé stroje umožňují vyrábět barevné součásti a najednou používat různé materiály. Vzhledem k tomu, že vyráběné části jsou v podstatě částičky prášku slepené dohromady, výsledkem technologií je křehký díl s omezenými mechanickými vlastnostmi (pokud není dále zpracováván). [70]

Na dalším obrázku je uveden příklad tisku statoru metodou Binder Jetting vyrobeného společností ExOne, kde je vidět nespojitost materiálu, která způsobí malou pevnost součástí.



Obr. 2.6.2 Stator turbíny pro ropu a plyn vytištěný technologií Binder Jetting. ExOne [71]

3. Použití aditivních technologií v energetice

3.1. Výzkumné projekty v dnešní době

V oblasti energetiky je 3D tisk velice perspektivní metoda, která má širokou škálu aplikací, například pro výrobu strojů k těžbě nerostných surovin nebo v oblasti obnovitelných zdrojů energie. Lze ji použít k výrobě turbín, vrtule pro větrné elektrárny, zejména pro výrobu prototypu. Díky uplatnění 3D technologie mohou být konstrukce původně složené z několika částí vyrobeny najednou v kuse, což zvyšuje jeho pevnost a trvanlivost a tím pádem bude zlepšená stabilita a vyvažování celkové konstrukce.

Díky zavedení technologie 3D tisku v energetice lze vyrábět součásti a díly všech velikostí v mnohem kratším čase při nižších nákladech a díky zjednodušenému procesu výroby ve srovnání s klasickým způsobem lze snadno modifikovat konstrukční rysy v digitálním formátu CAD.

V dané oblasti aktivní výzkum a vývoj provádí společnost Siemens. V roce 2017 společnost dokončila první testy lopatek plynové turbíny s plným zatížením motoru, vyrobené pomocí aditivních technologií. [31]

Úspěšně vyzkoušeny byly různé rozměry turbínových lopatek při plném výkonu. To znamená, že lopatky byly definované tak, aby vydržely 13000 otáček za minutu a teplotu vyšší než 1250 °C. Kromě toho společnost Siemens vyzkoušela nový design lopatek s úplně změněnou a zlepšenou geometrií pro vnitřní chlazení lopatek. [31] [32]



Obr. 3.1.1 Lopatky vytištěné na 3D tiskárně firmou Siemens [32]

Na vývoji dílů s použitím 3D metod pro průmyslovou výrobu intenzivně pracuje i velká americká společnost GE (General Electric), která má obrovské celosvětové projekty. Už před 7 lety začala investovat do rozvoje aditivních technologií na výrobu prototypu, dnes využívá aditivní technologii pro hromadnou výrobu některých důležitých dílů, které potom budou použity v tisících proudových

motorů. Technologie výroby 3D tiskem pomáhá společnosti vyrábět komplexní součásti levněji a rychleji. [33]



Obr. 3.1.2 GE Additive lopatkové kolo (DMLS) [34]

GE dokonce vyčlenila samostatnou větev GE Additive, která představila vlastní 3D tiskárnu, umožňující tisknout díly o průměru až 1 m na základě údajů z počítačového souboru. Stroj používá laser s výkonem 1 kW pro vytvoření potřebných součástí z kovového prášku. S jeho pomocí už byla vytištěna spalovací komora a samotná technologie může být aplikovaná v automobilovém, energetickém a kosmickém průmyslu. V současné době se společnost GE Aviation zabývá vývojem komerčního leteckého motoru Advanced Turboprop, ve kterém bude značná část dílů vytištěna na 3D tiskárně. [35]

Současně společnost MAN Diesel & Turbo dodává po desetiletí výzkumu a vývoje plynové turbíny s 3D vytištěnými komponenty nejen pro zkušební provozy, ale i pro sériovou výrobu. Jde o dodatečně vyráběné segmenty vodicích lopatek, které nyní používají v plynových turbínách typu MGT6100. „Stejně jako zkrácené vývojové cykly 3D tisk dává více prostoru pro inovativní, nadstandardní konstrukční prvky, snižuje dobu výroby a dodávek a umožňuje nám servisně vyrábět náhradní díly na zakázku,“ vysvětluje Dr. Roland Herzog, vedoucí technologické výroby v strategické obchodní jednotce Turbomachinery. [36]



Obr. 3.1.3 Část lopatek pro plynovou turbínu MAN Diesel & Turbo [36]

Společnost TURBOCAM již téměř třicet let obsluhuje turbostroje s pokročilými výrobními řešeními. Po desetiletí navrhování a vývoje projektů umožnila technologie DMLS „převrátit paradigma v hlavě v reálný objekt s konstrukcemi dříve nemožnými vytvořit“. Dnes společnost nabízí výrobu turbín pomocí aditivní technologie a její další povrchové úpravy. [37]



Obr. 3.1.4 TURBOCAM součást turbíny vyrobené pomocí technologie DLMS [37]

V průběhu sběru informací nebyly nalezené detaily o geometrii lopatkových kol, tiskových parametrech ani o vyskytnutých problémech povrchu vzhledem k tomu, že tyto projekty tvoří know-how firem a tyto informace jsou tajemstvím.

3.2. Nová perspektiva energetiky

Mezi nové specifikace energetického oboru patří rozvoj decentralizované energetiky. Smyslem je produkování elektřiny s vysokou účinností blízko místa spotřeby. Výhody generování energie v místě použití jsou v podstatě termodynamické. Při spalovacích procesech se většina energie uvolňuje jako teplo, zatímco jen asi 30 až 40% může být přeměněno na elektřinu. Výroba elektřiny je proto málo účinná, pokud nějakým způsobem nebude použit tepelný výkon. [38]

Uvedené nové řešení má snahu podpořit hlavní elektrárny a zmenšit ztráty elektřiny při jejím přenosu na velké vzdálenosti a také snahou využívat obnovitelné či alternativní zdroje energie, což má kladný dopad na životní prostředí. [39]

Decentralizovaná energetika zahrnuje široký rozsah technologií, instalovaného výkonu a zdrojů energie a patří do ní zejména:

- kogenerační zdroje s vysokou účinností, s instalovaným výkonem od 1 kW až přes 400 MW, využívající spalovací motory a turbíny, parní turbíny, Stirlingovy motory, mikroturbíny a palivové články;
- místní energetické systémy, využívající obnovitelné zdroje energie, odpadní teplo nebo jiné formy dosud nevyužívané energie.

Výzkum v této oblasti má na starosti nově vzniklá světová aliance pro decentralizovanou energetiku WADE (World Alliance for Decentralized Energy). [38] [39]

3.3. Představení projektu

Tato bakalářská práce je řešená v rámci projektu TAČR ZÉTA «Výzkum možností aditivní výroby (3D tisku) pro expandéry do nízkoteplotních aplikací v decentralizované energetice».

Za účelem rozvoje malé energetiky a v rámci širokého spektra možných nasazení pro rozličné zdroje tepla, teplotní a tlakové úrovně, výkony a pracovní látky je nepraktické navrhovat širokou řadu standardních turbín. Výrazně vhodnější je vyvinout modulární stavebnicový systém mikroturbín umožňující přizpůsobení parametrů pro požadovaný výkon ($<10 \text{ kW}_e$), libovolné okolní podmínky a zároveň rychlou a cenově efektivní výrobu a montáž. [41] Typický

mikroplynový turbínový systém sestává hlavně z odstředivého kompresoru, turbíny, spalovací komory, rekuperátoru a vysokorychlostního generátoru. [40]

Klíčovým komponentem výrazně ovlivňujícím cenu a účinnost organického Rankinova cyklu tepelného oběhu i akumulacích systémů je expandér. Proto je projekt primárně zaměřen na miniaturní turboexpandéry, které mají perspektivu vysoké účinnosti i flexibility ve vztahu k provozním parametrům, ale jejichž aplikace vzhledem k vysoké ceně při výrobě tradičními technologiemi zatím nemají velkou komerční perspektivu. [41]

Hlavním cílem projektu je zaměřit se na nízké náklady na výrobu turboexpanderů pro decentralizované mikroenergetické systémy. Toho lze dosáhnout zejména použitím cenově dostupných komponent (ložiska – omezené otáčky), použitím standardních 3D tiskových systémů, nalezením nejlevnější technologie s přijatelným výkonem turbíny, jako jsou:

- Kov – lepidlo s přímým kovovým laserem;
- Plast / pryskyřice – selektivní laserové slinování (SLS), stereolitografie (SLA);
- Plastové – fúzované modelování (FDM). [42]

Turboexpandér představuje průtokovou turbínu, přes kterou je vysokotlaký plyn expandován tak, aby zcela nebo částečně přeměnil energii stlačeného plynu na kinetickou energii v řídicím zařízení a poté přeměnil energii plynu na mechanickou práci pohonu kompresoru. To znamená, že turboexpandér přeměňuje zbytečnou energii plynu na čistou elektřinu. [43] [44]

3.4. Návrh turboexpandéru

Při návrhu turboexpandéru v první generaci projektu byla uvažovaná axiální koncepce rozložení lopatek s dimenzováním turbíny na nejmenší počet součástí (např. jednotný tisk pro rotorové kolo). Velikost je také omezena velikostí uvažovaných 3D tiskáren – v pracovní oblasti. [42]

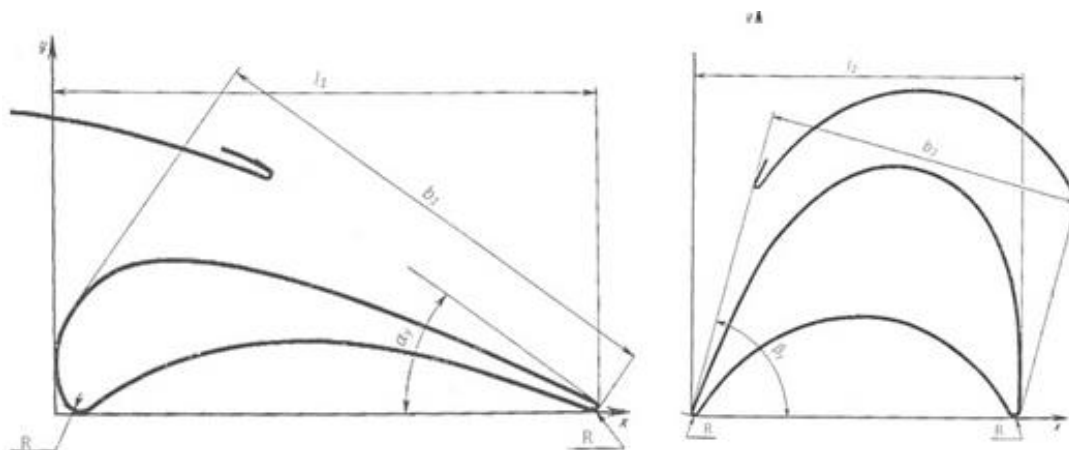
Základní parametry turboexpandéru jsou následující:

- Pracovní kapalina – stlačený vzduch při 100 °C;
- Úbytek entalpie je 30 kJ/kg;
- Rychlost rotoru 10 000 ot/min;
- Isoentalpický výkon 4 kW;
- Průměrný průměr kotouče 120 mm. [42]

Aditivní technologie jsou uvažované pro výrobu statoru a rotoru turbíny, které mají parametry uvedené v tabulce (3.4.1), získané v procesu optimalizačních návrhových výpočtů.

Tab. 3.4.1 Základní rozměry součástí pro tisk u vybraných geometrických tvarů profilů pro rozváděcí mříž S-90-12A a pro rotorovou mříž R-26-17A [41]

Název parametru	Hodnota
Výstupní úhel z rozváděcí mříže α_1 [°]	12
Výstupní úhel z rozváděcí mříže β_1 [°]	16,2
Výstupní uhel z oběžné mříže β_2 [°]	16,3
Úhel tětivy α_y [°]	32
Úhel tětivy β_y [°]	79,8
Tětiva statoru b_1 [mm]	8,06
Tětiva rotoru b_2 [mm]	9,79
Střední průměr d [mm]	120
Délka lopatky l_1 [mm]	17,2
Délka lopatky l_2 [mm]	18,2
Počet lopatek statoru z_1 [1]	60
Počet lopatek rotoru z_2 [1]	55
Ostřík lopatek [%]	40



Obr. 3.4.1 Zvolený tvar lopatky, vlevo statorové mříže, vpravo oběžné mříže [41]

Navržené účinnosti, vybrané vstupní a výstupní parametry uvedené v tabulce (3.4.2)

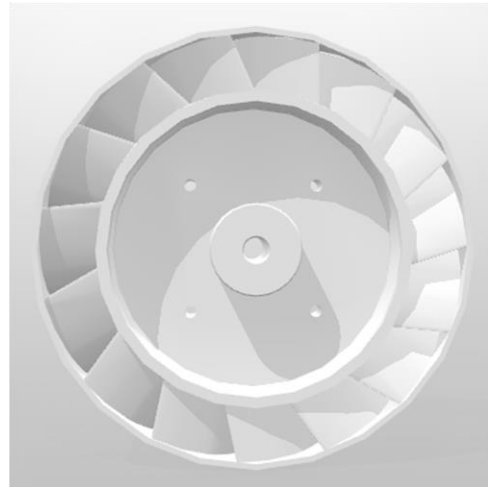
Tab. 3.4.2 Výkonnostní a termodynamické parametry (základní obecné výstupy z modelu) [41]

Název parametru	Hodnota
Vstupní tlak [kPa]	135,7
Hmotnostní tok vzduchu [kg/s]	0,133
Obvodová účinnost [%]	70
Účinnost na hřídeli (bez mech. ztrát) [%]	52
Výkon na hřídeli (bez mech. ztrát) [kW]	2,1
Výstupní teplota [°C]	84

Zkonstruované modely prototypu před jejich výrobou mají níže uvedený tvar.



Obr. 3.4.2 Rozváděcí kolo statoru



Obr. 3.4.3 Oběžné kolo rotoru

4. Experiment

Pro výrobu uvedených součástí byla zvolena dostupnější metoda tisku DMLS, která je charakterizovaná přímým spékáním prášku působením laseru a bez úplného tavení materiálu, tím nevzniká zbytkové napětí a vnitřní defekty, které mohou nastat při tradiční výrobě kovové součásti nebo při tisku metodou SLM [19], a taky nemá pórovitost dílů získaných z tiskárny SLS nebo Binder Jetting.

V rámci experimentu byl použit stroj Renishaw AM250 s objemem pracovního prostoru 250 × 250 × 300 mm [45] a prášek z nerezové oceli 316L, která je charakterizovaná jako kyselinovzdorná chromnikmolybdenová ocel s nízkým obsahem uhlíku do 0,03. Je vysoce odolná proti koncentrovaným kyselinám jak organickým, tak i anorganickým, a to při dodržení nižší koncentrace a při střední úrovni teplot. Má výrazně zvýšenou odolnost proti všem typům koroze. Je velmi dobře svařitelná a lešitelná, což je důležité pro technologii laserové spékání prášku. [47]

Tab. 3.4.1 Parametry vzorového detailu vyrobeného z prášku korozi-vzdorné oceli 316L metodou DMLS, s tloušťkou vrstvy nanášení 50 μm, vzaty z katalogového listu výrobce Renishaw aktuální dle roku 2018 [48]

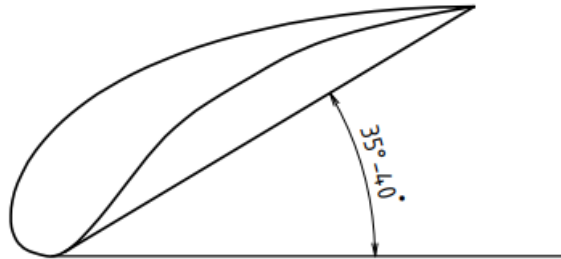
Název parametrů	Hodnota
Hustota [g/cm ³]	7,99
Tepelná vodivost [W/mK]	16,2
Rozsah tavicích teplot [°C]	1371 - 1399
Mez pevnosti v tahu (vodorovný směr XY) [MPa]	676 ± 2
Mez pevnosti v tahu (svislý směr Z) [MPa]	624 ± 17
Mez kluzu v tahu (vodorovný směr XY) [MPa]	547 ± 3
Mez kluzu v tahu (svislý směr 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

4.1. Analýza prvních výtisků

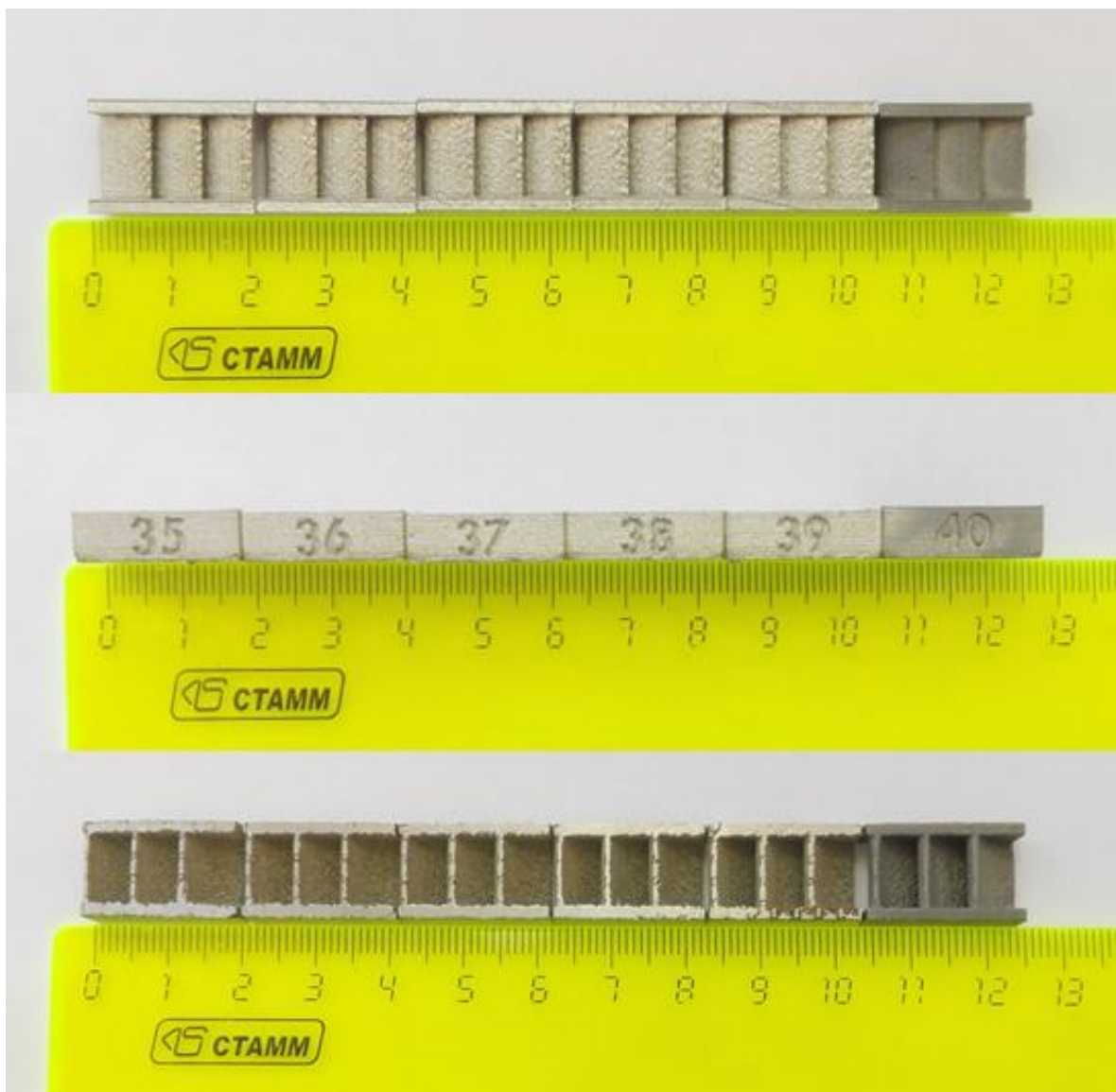
Technologický proces 3D tisku přináší několik omezení. Rozhodujícím technologickým faktorem je definice tiskové polohy dílu. Toto nastavení musí být provedeno po zvážení geometrie dílu, maximálního počtu vytištěných částí současně (podle pracovní plochy stroje), možnosti technologické podpory, možnosti řezání a vhodných povrchů na straně atd. [42]

Pro turboexpandér a vybraný tisk jsou nejdůležitější sklon mezi vrstvami tištěných ploch a drsnost povrchu. Minimální úhel sklonu mezi vrstvami pro tištění bez podpory pro ocel a metodu DMLS může dosáhnout 30° od horizontální základny.

Při nižších úhlech sklonu dojde k úplnému spadání prášku. [49] Za optimální mezní úhel sklonu se považuje 45° . Pro určení nejvhodnější polohy lopatek vůči horizontální základně s ohledem na lepší drsnost byly vytištěny vzorky s úhly sklonu 35° – 40° .



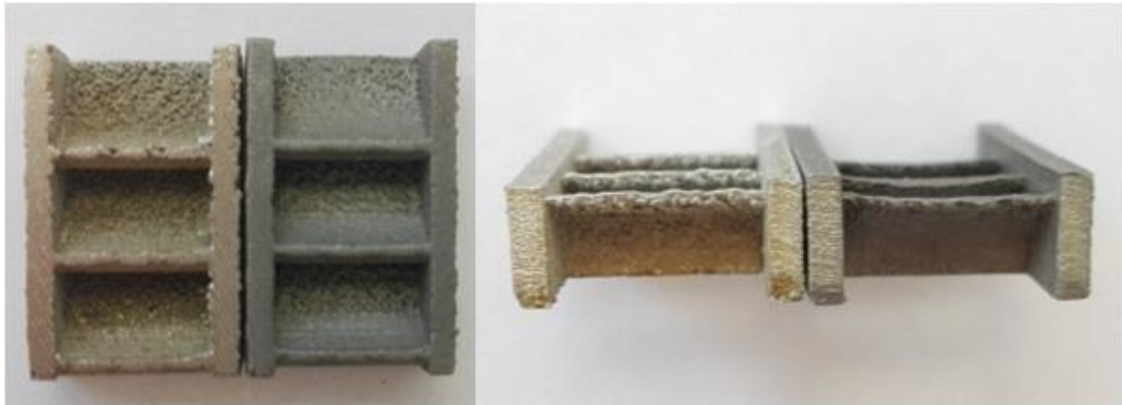
Obr. 4.1.1 Definice úhlu sklonu lopatek



Obr. 4.1.2 Vzorky segmentu rozváděcího kola statoru metodou DMLS

Z experimentu je zřetelně vidět, že na spodní ploše dochází ke vzniku povrchových vad ve formě hrubých kovových tvarů u všech vzorků, ale menší zrnitost mají lopatky s větším úhlem tětivy. Přesto povrch ani u dílů s úhlem 40° není postačující pro další aplikace.

Jeden z vytištěných segmentů byl zkušebně otryskán, aby se zjistilo, zda se tryskáním odstraní zmíněné povrchové vady a vznikne hladší povrch s lepšími hydraulickými parametry. Výsledek nebyl uspokojivý, protože tloušťka čepele je malá a otryskávání způsobilo deformaci okraje lopatky viz obrázek (4.1.3).



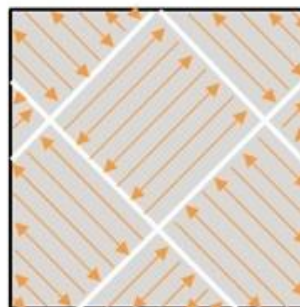
Obr. 4.1.3 Neotryskaný (vlevo) a otryskaný (vpravo) vzorky

4.2. Tisk reálných dílů statoru a rotoru

Při pokračování experimentu tisku reálných dílů statoru a rotoru byla vybrána strategie chessboard (šachovnice). Skenování šachovnicí umožňuje zkrátit délku jednotlivých částí skenování, což snižuje tvorbu zbytkového napětí [46], je optimální variantou pro díly s větší tloušťkou stěny než cca 5 mm. Nastavení parametrů bylo pro díly bez požadavku na maximální homogenitu, s cílem zmenšit náklady. Ve výsledku se očekávala hustota kolem 99,9 %.

Schéma šrafování šachovnice

- Každá vrstva je rozdělena na segmenty 5x5 mm
- Otáčení celého vzorku a každého segmentu po nanášení vrstvy odpovídá 67 stupňům
- Homogenní rozložení zbytkových napětí
- Vhodné pro velké součásti



Obr. 4.2.1 Šachovnice [46]

4.3. Analýza statorového kola

První bylo vytištěno statorové kolo s uvedenou v tabulce (4.3.1) geometrií a hlavními nastaveními 3D tisku uvedenými v tabulce (4.3.2).

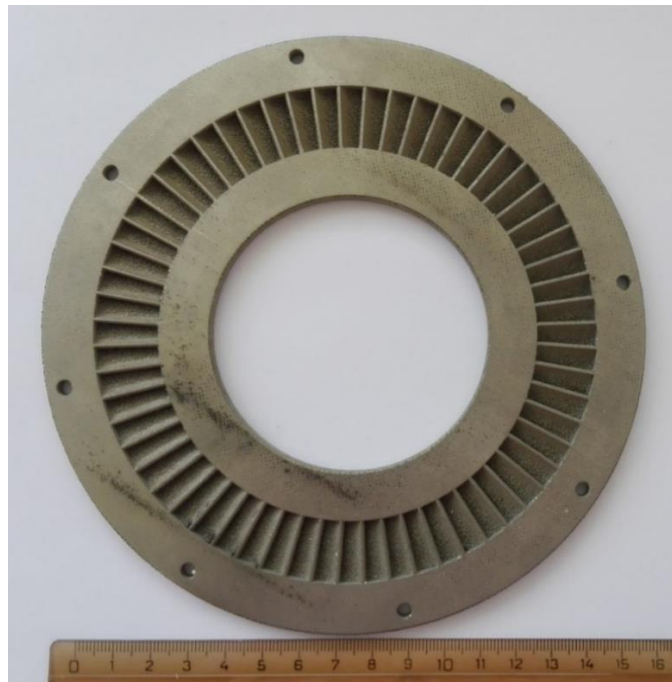
Tab. 4.3.1 Parametry geometrií detailu ve skutečné velikosti

Statorové kolo	
Název parametrů	Hodnota
úhel tělivy lopatky [°]	35
délka tělivy [mm]	8,06
délka lopatky [mm]	17,2
střední průměr lopatkování [mm]	120

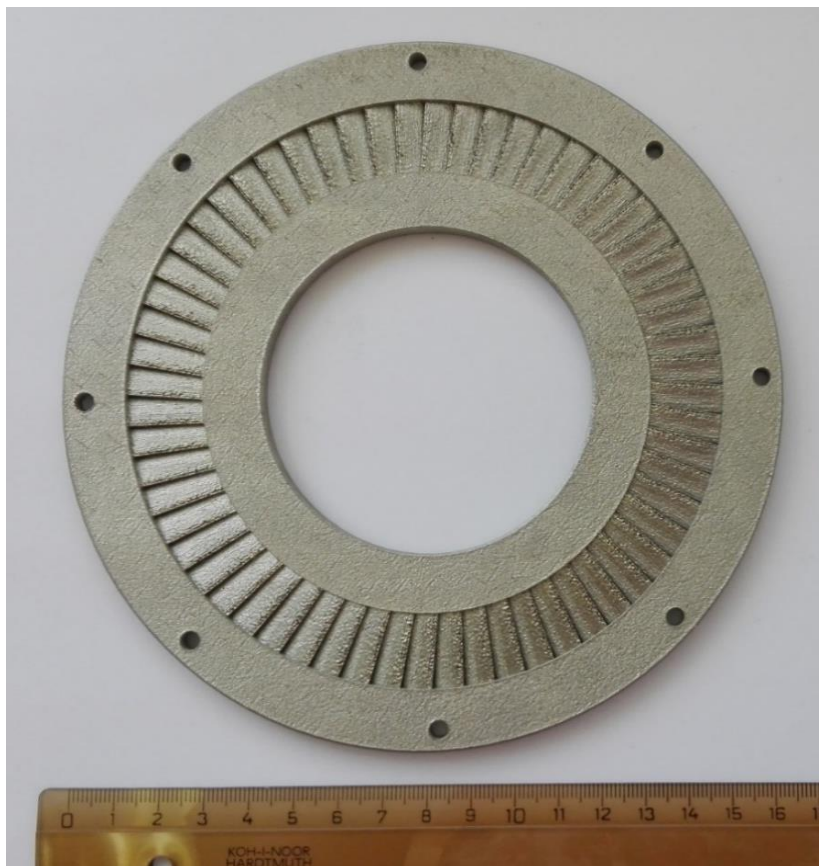
Tab. 4.3.2 Hlavní nastavené parametry tisku

Chessboard	
/Scanning/Hatches/Point Distance [mm]	0,045
/Hatching/Volume/Hatching/Hatch Distance [mm]	0,095

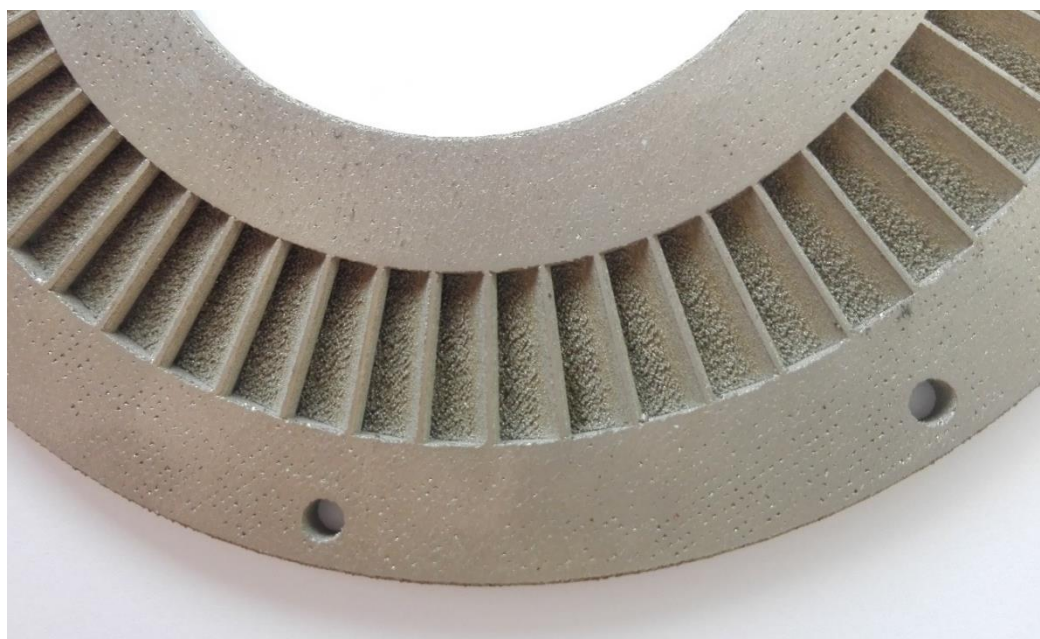
Kolo bylo umístěno v poloze s vertikální osou rotaci. Lopatky byly tištěny bez podpor kvůli složité geometrii a nemožnosti jejich dalšího odstraňování. Tím došlo k problému na spodní straně jako u malinkých vzorků – vznik povrchové vady ve formě hrubých kovových tvarů. Jak je patrné z následujících obrázků, povrchová kvalita tištěných dílů není dostatečná ani na horní části tištěné součásti. Hrana lopatky na horní straně statoru vyšla velice tenká s průsvitvostí a s výraznou nespojitostí prášku.



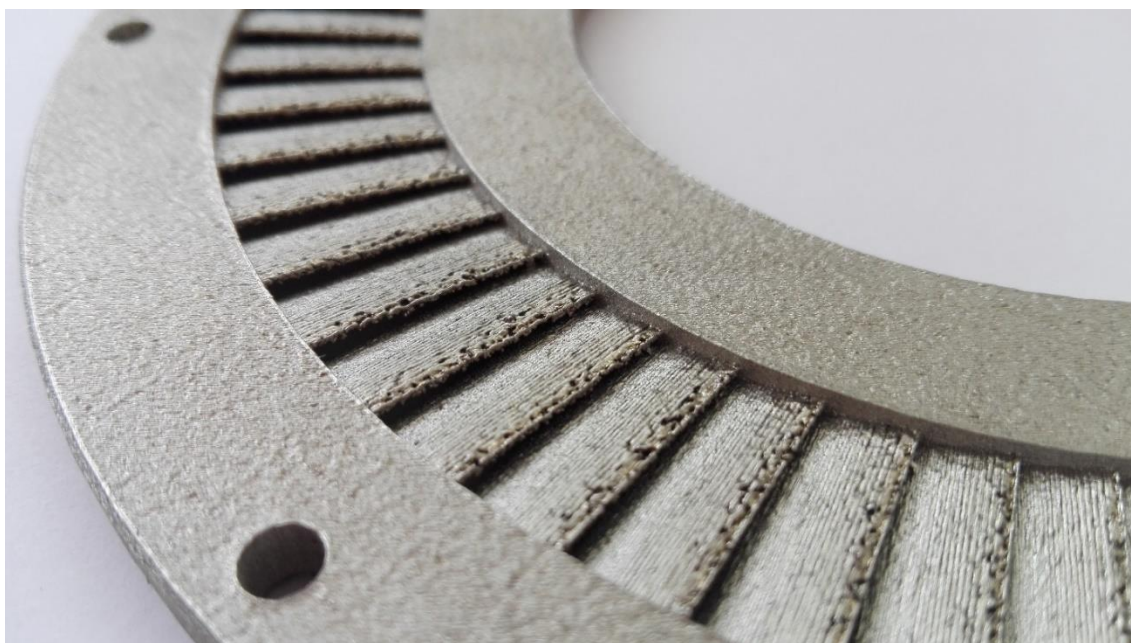
Obr. 4.3.1 Spodní strana statoru



Obr. 4.3.2 Horní strana statoru



Obr. 4.3.3 Ukázka zrnitosti lopatek spodní strany statoru



Obr. 4.3.4 Ukázka průsvitů horní strany lopatek statoru

Pro řešení těchto problémů a dalšího zlepšení povrchu lze navrhnout změny geometrie lopatek, například zvětšit tloušťku okrajové hrany horní části statoru a vytvořit přechod mezi vrstvami pozvolnější (doplnit 1–2 vrstvy na podporu problematické hrany) a také změnit parametry tisku.

4.4. Analýza rotorového kola

Další bylo tisknuto rotorové kolo, s uvedenou v tabulce (4.4.1) geometrií a hlavními nastavními 3D tisku uvedenými v tabulce (4.4.2).

Tab. 4.4.1 Parametry tisku detailu ve skutečné velikosti

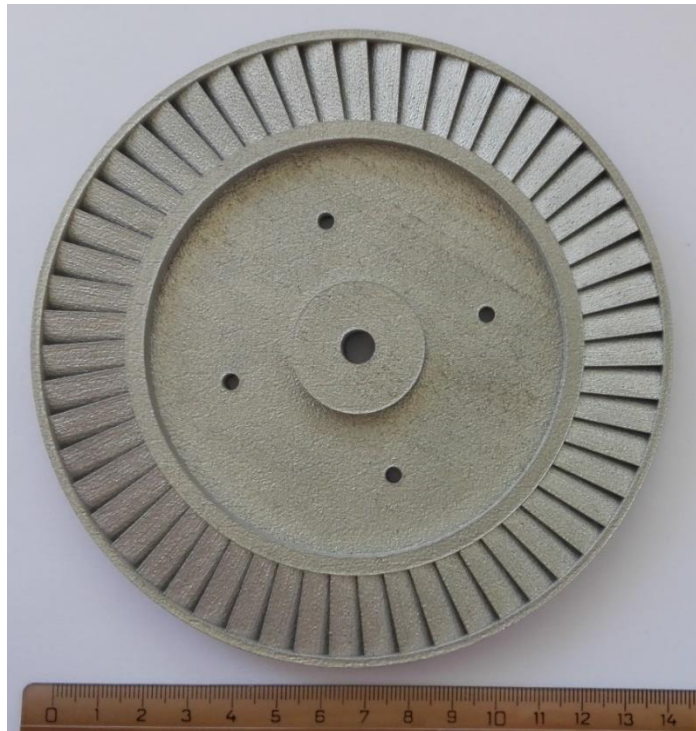
Rotorové kolo	
Název parametrů	Hodnota
úhel tělivy lopatky [°]	82,8
délka tělivy [mm]	9,79
délka lopatky [mm]	18,2
střední průměr lopatkování [mm]	120

Tab. 4.4.2 Hlavní parametry tisku

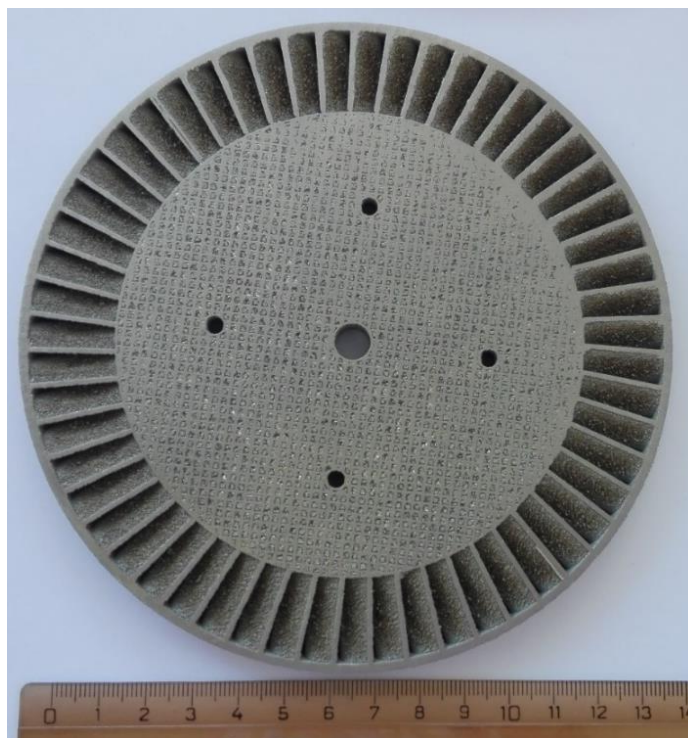
Chessboard	
/Scanning/Hatches/Point Distance [mm]	0,045
/Hatching/Volume/Hatching/Hatch Distance [mm]	0,07

Kolo bylo umístěno stejně jako první díl v poloze s vertikální osou rotace bez

30dpory pro stavbu lopatek. Při jejich tisku s uvedeným navrženým úhlem tětivy 82,2° došlo k neúplnému spékání prášku. Uprostřed lopatek se prášek odloupl kvůli nedostatečné podpoře a ve výsledku došlo k necelostnímu tvaru lopatek a degradace jejich povrchu.



Obr. 4.4.1 Horní strana rotoru



Obr. 4.4.2 Spodní strana rotoru



Obr. 4.4.3 Ukázka zrnitosti lopatek dolní strany rotoru



Obr. 4.4.4 Ukázka horní části lopatek rotoru

Při návrhu možných změn pro odstranění daných vad při další generaci tisku lze také uvažovat změnu geometrie lopatek. Zvětšit uhel sklonů lopatek a charakter křivky tak, aby se minimalizovalo materiál staveny bez podpory. To by vedlo k menšímu počtu lopatek, ale jejich větší pracovní ploše.

5. Možností povrchových úprav oběžných kol

Po první etapě experimentu lze říct, že výsledek tisku s danou geometrií a s uvedenými parametry tisku nebyl uspokojivý. To zejména kvůli vysoké drsnosti horní části oběžného kola a velice hrubé zrnitosti lopatek spodní částí, která by způsobila změnu průtokových parametru.

Pro pokračování v experimentu, aby se mohlo provést nějaké měření, je potřebná povrchová úprava dílů. Lze navrhnout několik typů povrchových úprav, které budou popsány v následujících odstavcích.

5.1. Tryskání

Standardní možností mechanické povrchové úpravy součástí vyrobených aditivní technologií je tryskání. I přesto, že při tryskání malého vzorečku lopatek statoru došlo k prohnutí, lze zvážit tuto metodu s nějakými změnami.

Pro tryskání jsou používána různá abraziva, která jsou přiváděna na povrch součástky pomocí tlaku vody, stlačeným vzduchem nebo kombinací obou uvedených způsobů. Výsledkem otryskávání je sjednocení a zpevnění povrchu součástí (dosažení únavové pevnosti a trvanlivosti), a očištění součástky od okuje a atd.

Tryskání můžeme rozdělit na:

- pneumtické tryskání – může být tlakové (abrazivo je vytlačováno z tlakové nádoby), nebo sací (abrazivo je nasáváno injektorově);
 - tryskání pomocí tlaku vody (hydrofinašování) – jedná se o období pneumtického tryskání, kdy tryskací abrazivo je v suspenzi s vodou.
- [66]

Vzhledem k další aplikaci částí turbíny, pro zmenšení tření pohybující se kapaliny je potřeba mít co nejhladší povrch. Pro tento účel lze použít skleněné kuličky (balotina), které charakterizují jemný způsob čištění, zabraňující nadměrnému odstranění zpracovaného materiálu. [65] Z hlediska malého rozměru obroběných součástí je potřebné mít kuličky co nejmenšího rozměru, například 80–150 μm .

Skleněné kuličky jsou průmyslové abrazivní materiály, které se běžně používají při dokončování výroby: matování, satinování, odstranění stop mechanického a tepelného zpracování. Tryskání skleněnými kuličkami umožňuje zvýšení tvrdosti povrchu a efektivně připravuje výrobky pro další povrchové úpravy, jako je například leštění či pokovení. Skleněné kuličky jsou jedním z nejčastěji používaných abrazivních materiálů pro zpracování nerezové oceli. [65]



Obr. 5.1.1 Skleněné kuličkové abrazivo (balotina) [65]

5.2. Broušení

Další možností je broušení ručním náradím. Vzhledem k tomu, že lopatky mají tvar (vzdálenost lopatek od sebe u rotoru 2–3 mm, u statoru 1–2 mm), jenž je obtížný opracovat strojně, na dolní straně rotoru bude vhodné použít ruční náradí 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.



Obr. 5.2.1 Tělísko brusné na stopce pr. 2×6 mm, zr. 100, válcové 321 [51]



Obr. 5.2.2 Fréza „KULATÝ OBLOUK“ s diamantovým povlakem, 2×10 [55]



Obr. 5.2.3 Tělísko brusné na stopce pr. 6×10mm, zr. 80, ogivální 327 [53]

Kvůli tomu, že povrchová úprava ručním náradím je náročná na specialisty a čas, je vhodné tuto metodu použít jen pro kusovou výrobu prototypu.

5.3. 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 prostředků, neboli tělísek o povrch obrobků. [56]

Při omílání je důležitý tvar součástí. U našeho modelu statoru je hrana lopatek horní části výtisků moc tenká s průhledy, kromě toho rozteč lopatek u statoru i u rotoru je poměrně malá. Z toho vyplývá, že omílání musí být velice šetrné s malinkými tělísky. Těmto požadavkům odpovídá vibrační omílání, které je charakterizováno jako mechanické opracování povrchu součástí vibracemi se současnou rotací jak celého obsahu v pracovním prostoru, tak omílaných součástí a omílacích tělísek. Hlavní výhodou je menší opotřebení součástí. [57]



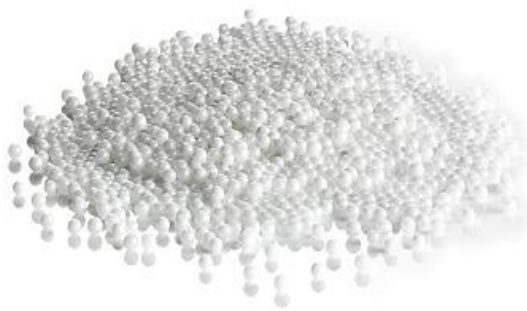
Obr. 5.3.1 Vibrační omílací zařízení [58]

Při volbě tělísek přídavných omílacích prostředků se musí přihlížet k očekávané kvalitě opracovaných předmětů. [59] Pro dosažení lesklého povrchu je vhodné použít abraziva ve formě kuliček, která nemohou mechanicky poškodit součástku. Kromě toho velká tělíska jsou vhodná spíše k broušení součástí. U součástky s otvory mohou být použita omílací tělíska větší, než je průměr

největšího otvoru, nebo menší, aby se nemohly ucpat. Důležité také je, aby se tělíska uvnitř našich lopatek mohla volně pohybovat a působit. Někdy je vhodné kombinovat velká a malá tělíska, aby velká vyvíjela tlak a malá stejnoměrně brousila [57], což je možná vhodné v našem případě.

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 omílání rychlejší, ale povrch je hrubší. [57]

Z mého pohledu pro daný prototyp bude vhodné použít korund s velikostí zrn 0,3–0,5 mm, při kterém může docházet k úbytku materiálu, anebo keramické lešticí kuličky stejného průměru. Pro zrychlení procesu a více účinnosti je vhodné použít tato abraziva za mokra se speciálními lešticími pastami nebo jinými prostředky.



Obr. 5.3.2 Zirkonové kuličky [67]



Obr. 5.3.3 Omílací granulát z ušlechtilého korundu [67]

Samozřejmě první varianty povrchových úprav budou jen zkušební a existuje i zde velké riziko prohnutí lopatek.

Při správně zvolených podmínkách může být tato technologie prioritní jak při kusové, tak i při sériové výrobě, a to vzhledem k dostupné a levné technologii, mnohonásobnému použití abraziva a umístění několika dílů najednou s omezením jen na velikostí pracovního prostoru stroje.

5.4. Technologie obrábění abrazivními proudy (AFM)

Jinou možností obrábění je nová patentovaná německá technologie obrábění abrazivními proudy (AFM) společnosti EXTRUDE HONE.

Při procesu AFM je viskoelastický polymer impregnován abrazivy a následně prochází obrobkem. Jak polymer protéká, brusiva v něm leští vnitřní plochy součástky, dokonce i v komorách, kam nemohou dosáhnout prsty (může snadno

opracovávat otvory o průměru přibližně 0,41 mm). Celý proces je automatický, opakovatelný a předvídatelný a může být „naladěn“ tak, aby splňoval specifické požadavky na pevnost a toleranci: teplota, tlak, typ a velikost broušení a rychlost polymeru jsou přizpůsobitelné.

AFM také odstraňuje body koncentrace napětí, jako jsou třeba škrábance a ostré rohy, čímž zvyšuje únavovou pevnost a životnost rychleji a důsledněji než při běžných leštících operacích. Testy také ukázaly, že AFM přidává na obrobené povrchy malé zbytkové napětí, což taky zvyšuje únavovou pevnost.

Tato technologie se provádí ve speciálním stroji EasyFlow & -EOS-M-280. [60]



Obr. 5.4.1 EasyFlow & -EOS-M-280 [60]

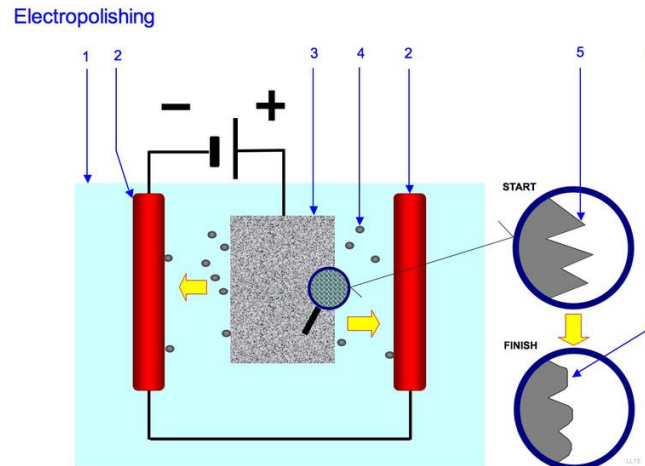
K příkladu pracovního výsledku lze uvést stator, upravený touto technologií, po objednavce společnosti MORRIS.



Obr. 5.4.2 Stator z materiálu IN718, Morris [60]

5.5. Elektrochemické leštění

Další variantou lze navrhnout elektrochemické leštění, které je definováno jako metoda, která dokončuje povrchy obrobku pomocí anodického rozpouštění kovu. Obráběcím nástrojem je katoda (-), která působí stejnosměrným proudem a za přítomnosti elektrolytové kapaliny pro vytvoření anodické reakce, která odstraňuje povrchový materiál obrobku (+). [61]



Obr. 5.5.1 Princip elektrolytického pole : 1. Elektrolyt, 2. Katoda, 3. Obrobek na leštění (Anoda), 4. Přemístění částic z obrobku na katodu, 5. Povrch před leštěním, 6. Povrch po leštění [62]

Proces se používá namísto abrazivního jemného leštění v mikrostrukturním přípravku a je cenově výhodnou volbou pro projekty DMLS, které nejsou závislé na toleranci a vytvářejí jasnou jednotnou povrchovou úpravu. [64]

Typické hodnoty úběru materiálu touto technologií se pohybují v rozsahu od 10 do 35 μm . [61] Je vhodnou metodou pro ocel 316 L. [63]

Příklad aplikace technologie elektrochemického řešení uvádí obrázek (5.5.2).



Obr. 5.5.2 Oběžné kolo čerpadla neleštěný (vlevo) a leštěný (vpravo) vzorky. HENKEL [63]

5.6. Shrnutí

Uvedené technologie úprav povrchu jsou buď konvenční nebo nové technologie, používané pro díly vyrobené aditivními technologiemi. Pro další experimenty se sestavou turboexpandéru bude nutné uvedené technologie vyzkoušet a zvolit tu nejvhodnější z hlediska výsledné kvality povrchu a nákladu.

6. Závěr

V dané práci začátek je věnován popisu v této době dostupných aditivních technologií výroby součástí z kovu. V textu jsou probrány nejpoužívanější technologie, uveden je jejich princip se schematickými obrázky a hlavní specifika.

Druhá část rešerše je věnovaná realizovaným projektům aplikace aditivních technologií v energetice. Bylo vyhledáno několik konkrétních projektů lopatkových kol či jejich segmentů od významných společností s oblastí energetického průmyslu. Nalezené příklady mají však pouze informativní charakter a nelze dohledat konkrétní technické parametry k daným projektům, neboť tvoří know-how firem.

Experimentální část vychází z projektu TAČR ZÉTA «Výzkum možností aditivní výroby (3D tisku) pro expandéry do nízkoteplotních aplikací v decentralizované energetice», ve kterém je prováděn vývoj mini turboexpandéru, kde se předpokládá tisk lopatkových kol.

Při zkušebním tisku prototypů se ukázalo, že i přesto, že stator i rotor byly konstruované s ohledem na technologii 3D tisku, je jejich výsledná kvalita nedostačující. V práci byly tyto vady popsány, analyzovány a byly formulovány návrhy možných změn geometrie lopatek.

Za účelem použití již vytisknutých dílů statoru a rotoru v sestavě turboexpandéru je nutné upravení pracovní plochy lopatek. Pro úpravu prototypu bylo navrženo broušení ručním náradím a jiné technologie vhodné i pro sériovou výrobu:

- Tryskání (obrábění skleněnými kuličkami pod tlakem);
- Omílání (zvoleno několik typů omílacích tělísek ve vibračním zařízení);
- Technologie obrábění abrazivními proudy (nová technologie protlačování speciální hmoty s abrazivními částicemi pod tlakem);
- Elektrochemické leštění (leštění součástí pomocí elektrochemické reakce odstraňování částic materiálu).

Seznamy

Seznam tabulek

Tab. 3.4.1 Základní rozměry součástí pro tisk u vybraných geometrických tvarů profilů pro rozváděcí mříž S-90-12A a pro rotorovou mříž R-26-17A [37]	23
Tab. 3.4.2 Výkonnostní a termodynamické parametry (základní obecné výstupy z modelu) [37]	23
Tab. 4.1.3 Parametry vzorového detailu vyrobeného z prášku korozivzdorné oceli 316L metodou DMLS, s tloušťkou vrstvy nanášení 50 μm , vzatý z katalogového listu výrobce Renishaw aktuální dle roku 2018 [43]	25
Tab. 4.3.1 Parametry geometrií detailu ve skutečné velikosti	28
Tab. 4.3.2 Hlavní nastavené parametry tisku	28
Tab. 4.4.1 Parametry tisku detailu ve skutečné velikosti	30
Tab. 4.4.2 Hlavní parametry tisku	30

Seznam obrázků

Obr. 2.1.1 Selektivní laserové spékání (schéma pracovního stroje) [4]	8
Obr. 2.1.2 Selektivní laserové spékání (schéma spékání vrstvy) [4]	9
Obr. 2.2.1 Schematický přehled cyklu selektivního laserového tavení (SLM) [13]	10
Obr. 2.3.1 Schéma zařízení DMLS [16]	12
Obr. 2.4.1 Schematické znázornění EBM systému [18]	14
Obr. 2.5.1 Schéma přímého energetického nanášení [27]	15
Obr. 2.6.1 Schéma technologie Binder Jetting [63]	16
Obr. 2.6.2 Stator turbíny pro ropu a plyn vytištěný technologií Binder Jetting. ExOne [70]	17
Obr. 3.1.1 Lopatky vytištěné na 3D tiskárně firmou Siemens [32]	18
Obr. 3.1.2 GE Additive lopatkové kolo (DMLS) [31]	19
Obr. 3.1.3 Část lopatek pro plynovou turbínu MAN Diesel & Turbo [33]	20
Obr. 3.1.4 TURBOCAM součást turbíny vyrobené pomocí technologie DLMS [34]	20
Obr. 3.4.1 Zvolený tvar lopatky, vlevo statorové mříže, vpravo oběžné mříže [37]	23
Obr. 3.4.2 Rozváděcí kolo statoru	24
Obr. 3.4.3 Oběžné kolo rotoru	24
Obr. 4.1.1 Definice úhlu sklonu lopatek	26
Obr. 4.1.2 Vzorky segmentu rozváděcího kola statoru metodou DMLS	26
Obr. 4.1.3 Neotryskaný (vlevo) a otryskaný (vpravo) vzorky	27
Obr. 4.2.1 Šachovnice [46]	27
Obr. 4.3.1 Spodní strana statoru	28
Obr. 4.3.2 Horní strana statoru	29
Obr. 4.3.3 Ukázka zrnitosti lopatek spodní strany statoru	29

Obr. 4.3.4 Ukázka průsvitů horní strany lopatek statoru	30
Obr. 4.4.1 Horní strana rotoru	31
Obr. 4.4.2 Spodní strana rotoru.....	31
Obr. 4.4.3 Ukázka zrnitostí lopatek dolní strany rotoru	32
Obr. 4.4.4 Ukázka horní části lopatek rotoru	32
Obr. 5.1.1 Skleněné kuličkové abrazivo (balotina) [61]	34
Obr. 5.2.1 Tělísko brusné na stopce pr. 2×6 mm, zr. 100, válcové 321 [46] .	34
Obr. 5.2.2 Fréza „KULATÝ OBLOUK" s diamantovým povlakem, 2×10 [51] ..	34
Obr. 5.2.3 Tělísko brusné na stopce pr. 6×10mm, zr. 80, ogivální 327 [48].	34
Obr. 5.3.1 Vibrační omílací zařízení [53].....	35
Obr. 5.3.2 Zirkonové kuličky [63].....	36
Obr. 5.3.3 Omílací granulát z ušlechtilého korundu [63]	36
Obr. 5.4.1 EasyFlow & -EOS-M-280 [55]	37
Obr. 5.4.2 Stator z materiálu IN718, Morris.....	37
Obr. 5.5.1 Princip elektrolytického pole [57]	38
Obr. 5.5.2 Oběžné kolo čerpadla neleštěné (vlevo) a leštěné (vpravo) vzorky. HENKEL [58].....	38

Seznam použitých zdrojů

- [1] *10 preimušcestv 3D-printera: 10 výhod 3D tiskárny* [online]. [cit. 2018-07-28]. Dostupné z: <https://3dpt.ru/page/3d-printer-efficiency>
- [2] *Technologii 3D-pečati metallov. Ograničenia i vozmožnosti: Technologie 3D tisku z kovu. Omezení a možnosti* [online]. 2017 [cit. 2018-07-28]. Dostupné z: <https://www.logeeks.ru/articles/dmls-technologies-limitations-and-opportunities>
- [3] LOCKER, Anatol. *2018 Metal 3D Printer Guide – All About Metal 3D Printing* [online]. Mar 30, 2018 [cit. 2018-07-28]. Dostupné z: <https://all3dp.com/1/3d-metal-3d-printer-metal-3d-printing/>
- [4] DANILOV, Roman. SLS pečet ili selektivnoje lazernoje spekanije: SLS-tisk nebo selektivní laserové spekání [online]. 2013 [cit. 2018-07-28]. Dostupné z: <http://3dwiki.ru/sls-pechat-ili-selektivnoe-lazernoje-spekanie/>
- [5] SHKURO, A. E. a P. S. KRIVONOGOV. *Technologii i materialy 3D pečati: Technologie a materiály 3D-tisku* [online]. . Uralskij gosudarstvennyj lesotechničeskij universitet: Uralská státní lesotechnická univerzita. Ekaterinburg, 2017 [cit. 2018-07-28]. ISBN 978-5-94984-616-2.
- [6] KUDRIASHOV, Nikita. 6 osobennostej selektivnogo lazernogo spekanija (SLS): 6 zvláštností selektivního laserového spekání (SLS) [online]. Sep 15, 2017 [cit. 2018-07-28]. Dostupné z: <http://blog.iqb-tech.ru/sls-technology>
- [7] SHEPHERD, Valera. *Selektivní laserové slinování (SLS)). Selektivnoje lazernoje spekanije: Selektivní laserové spekání (SLS)* [online]. Jan 15, 2017 [cit. 2018-07-28]. Dostupné z: [https://cnc3d-printer.com/index.php?TM_TC=1&TM_TX=Selektivnoe_lazernoje_spekanie_\(SLS\)](https://cnc3d-printer.com/index.php?TM_TC=1&TM_TX=Selektivnoe_lazernoje_spekanie_(SLS))
- [8] *Technologii ispolzujemyje v 3D pečati: Používané technologie 3D tisku*[online]. [cit. 2018-07-28]. Dostupné z: <https://3dcorp.ru/tehnology-3dprint.html>
- [9] *SLS – detali iz vysokotemperaturnych plastikov i splavov: SLS - díly z vysokoteplotních plastů a slitin* [online]. [cit. 2018-07-28]. Dostupné z: <http://www.3d-format.ru/technologies/sls/>
- [10] *3D-pečet metallami: 3D-tisk kovů* [online]. [cit. 2018-07-28]. Dostupné z: http://3dtoday.ru/wiki/3dprint_metal/
- [11] *SLM – proizvodstvo detalej iz metalličeskich splavov: SLM - výroba dílů z kovových slitin* [online]. [cit. 2018-07-28]. Dostupné z: <http://www.3d-format.ru/technologies/slm/>
- [12] *Technologija 3D pečati SLM: 3D technologie tisku SLM* [online]. [cit. 2018-07-28]. Dostupné z: <http://www.jetcom-3d.ru/technology/3d-pechat-slm/>
- [13] SIDAMBE, Alfred. Schematický přehled cyklu selektivního tavení laserem (SLM). In: *Biocompatibility of Advanced Manufactured Titanium*



- Implants—A Review* [online]. [cit. 2018-07-31]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/269836411_Biocompatibility_of_Advanced_Manufactured_Titanium_Implants-A_Review?_sg=-64wBiyueChteoq6bnLO_8GVzx9oIH7QP8cGRofimyPARazHpvAyocEgC2aMYtdmroE93CwTYQ
- [14] *Vyboročnaja lazernaja plavka (SLM): Selektivní laserové tavení (SLM)* [online]. [cit. 2018-07-28]. Dostupné z: http://3dtoday.ru/wiki/SLM_print/
- [15] *Vnedrenije vyboročnoj lazernoj plavki (SLM) v sovremennoje proizvodstvo: Zavedení selektivního tavení laserem (SLM) do moderní výroby* [online]. 2014 [cit. 2018-07-28]. Dostupné z: <http://3dprofy.ru/vnedrenie-vyborochnoj-lazernoj-plavk/>
- [16] CHANG, Kun a Dongdong GU. Schéma zařízení DMLS. In: *Direct metal laser sintering synthesis of carbon nanotube reinforced Ti matrix composites: Densification, distribution characteristics and properties* [online]. Journal of Materials Research [cit. 2018-07-31]. Dostupné z: <https://www.cambridge.org/core/journals/journal-of-materials-research/article/direct-metal-laser-sintering-synthesis-of-carbon-nanotube-reinforced-ti-matrix-composites-densification-distribution-characteristics-and-properties/3B20C10582954C3BDE72D32639E06C61/core-reader>
- [17] LOUCKÝ, Milan. *Jak funguje 3D tisk metodou Direct Metal Laser Sintering* [online]. 2015 [cit. 2018-07-29]. Dostupné z: <https://www.konstrukter.cz/jak-funguje-3d-tisk-metodou-direct-metal-laser-sintering/>
- [18] SIDAMBE, Alfred. Schematické znázornění EBM systému. In: *Biocompatibility of Advanced Manufactured Titanium Implants—A Review* [online]. [cit. 2018-07-31]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/269836411_Biocompatibility_of_Advanced_Manufactured_Titanium_Implants-A_Review?_sg=-64wBiyueChteoq6bnLO_8GVzx9oIH7QP8cGRofimyPARazHpvAyocEgC2aMYtdmroE93CwTYQ
- [19] CASTELLS, Ryan. *ARTICLE DMLS vs SLM 3D Printing for Metal Manufacturing* [online]. 2016 [cit. 2018-07-29]. Dostupné z: <https://www.element.com/nucleus/2016/06/29/dmls-vs-slm-3d-printing-for-metal-manufacturing>
- [20] *Čto takoe prjamoje lazernoje spekanije metallov (DMLS)?: Co znamená přímé laserové spékání kovů?* [online]. 2017 [cit. 2018-07-29]. Dostupné z: <https://3d-expo.ru/ru/article/chto-takoe-pryamoe-lazernoje-spekanie-metallov-dmls-79843>
- [21] SHEPHERD, Valera. *Prjamoje lazernoje spekanije metallov (DMLS): Přímé laserové spékání kovů (DMLS)* [online]. 2015 [cit. 2018-07-29]. Dostupné



- z: [https://cnc3d-printer.com/index.php?TM_TC=1&TM_TX=Pryamoe_lazernoe_spekanie_metallov_\(DMLS\)](https://cnc3d-printer.com/index.php?TM_TC=1&TM_TX=Pryamoe_lazernoe_spekanie_metallov_(DMLS))
- [22] *Technologii 3D pečati: EBM: Technologie 3D tisku: EBM* [online]. 2014 [cit. 2018-07-29]. Dostupné z: <https://www.foroffice.ru/articles/74510/>
- [23] *Elektronno-lučevaja plavka (EBM): Tavení elektronovým paprském (EBM)* [online]. 2014 [cit. 2018-07-29]. Dostupné z: <http://3dprofy.ru/ehlektronno-luchevaya-plavka-ebm/>
- [24] *Elektronno-lučevaja plavka (EBM): Tavení elektronovým paprskem (EBM)* [online]. [cit. 2018-07-29]. Dostupné z: http://3dtoday.ru/wiki/EBM_print/
- [25] *Elektronno-lučevaja plavka (EBM): Tavení elektronovým paprskem (EBM)* [online]. [cit. 2018-07-29]. Dostupné z: <http://spt.tpu.ru/technology/ebm/>
- [26] SILBERNAGEL, Cassidy. *Additive Manufacturing 101-2: What is directed energy deposition?* [online]. [cit. 2018-08-03]. Dostupné z: <http://canadamakes.ca/what-is-directed-energy-deposition/>
- [27] PEELS, Joris. *Comparison of Metal 3D Printing — Part Two: Directed Energy Deposition* [online]. Jul 28, 2017 [cit. 2018-08-03]. Dostupné z: <https://3dprint.com/182367/directed-energy-deposition/>
- [28] *Metal 3D Printing Processes - Directed Energy Deposition (DED)* [online]. March 22, 2018 [cit. 2018-08-03]. Dostupné z: <https://news.3deo.co/metal-3d-printing-processes-directed-energy-deposition-ded>
- [29] SHEPHERD, Valera. *Elektronno-lučevaja plavka (EBM): Tavení elektronovým paprském (EBM)* [online]. 2015 [cit. 2018-07-29]. Dostupné z: [https://cnc3d-printer.com/index.php?TM_TC=1&TM_TX=Elektronno-luchevaya_plavka_\(EBM\)](https://cnc3d-printer.com/index.php?TM_TC=1&TM_TX=Elektronno-luchevaya_plavka_(EBM))
- [30] KUCHEROV, V. V. *Promyšlennye 3D printery dlja pečati metallom po technologii elektronolučevoj plavki EBM: Průmyslové 3D tiskárny pro kovový tisk s technologií tavení elektronovým paprskem EBM* [online]. 2017 [cit. 2018-07-29]. Dostupné z: http://www.mosinductor.ru/productsiya/oborudovanie_dlya_3d_prototipirovaniya/promyshlennye-3d-printery-dlya-pechati-metallom-po-tekhnologii-elektronoluchevoy-plavki-ebm/
- [31] *Additivnoje proizvodstvo: Siemens ispolzujet innovacionnuju technologii dlja proizvodstva gazovykh turbin: Aditivní výroba: Společnost Siemens používá pro výrobu plynových turbín inovativní technologie* [online]. 2017 [cit. 2018-07-29]. Dostupné z: https://w5.siemens.com/web/ua/ru/news_press/news/2017/pages/3d-printed-gas-turbine-blades.aspx

- [32] ANNER, Niels. *Additive manufacturing revolution for gas turbines* [online]. 2016 [cit. 2018-07-29]. Dostupné z: <https://www.siemens.com/customer-magazine/en/home/energy/bringing-power-to-the-people/additive-manufacturing-revolution-for-gas-turbines.html>
- [33] *General Electric vnedrjajet 3D-pečat v svoj pervyj závod v Indii: General Electric zavádí 3D tisk do své první továrny v Indii* [online]. 2014 [cit. 2018-07-29]. Dostupné z: <http://3dtoday.ru/industry/general-electric-vnedryaet-3d-pechat-v-svoy-pervyy-zavod-v-indii.html>
- [34] GE Additive Swirler. In: *An AMazing® Exclusive Interview with Prabhjot Singh, Manager of GE's Additive Manufacturing Lab* [online]. [cit. 2018-07-31]. Dostupné z: <http://additivemanufacturing.com/2014/03/07/an-amazing-exclusive-interview-with-prabhjot-singh-manager-of-ge-additive-manufacturing-lab/>
- [35] AGEEV, Aleksandr. Ogromnyj 3D-printer kompanii General Electric pečatajet detali samoljetov: *Obrovská 3D tiskárna od General Electric tiskne letadlové díly* [online]. 2017 [cit. 2018-07-29]. Dostupné z: <https://www.techcult.ru/technology/4765-ogromnyj-3d-printer-kompanii-general-electric>
- [36] *MAN Diesel & Turbo: 3D printing becomes a standard* [online]. 2017 [cit. 2018-07-29]. Dostupné z: <https://corporate.man-es.com/press-media/news-overview/details/2017/04/19/man-diesel-turbo-3d-printing-becomes-a-standard>
- [37] *Direct Metal Laser Sintering* [online]. [cit. 2018-07-29]. Dostupné z: <http://www.turbocam.com/direct-metal-laser-sintering-dmls>
- [38] WADE. *Efficiency Benefits* [online]. [cit. 2018-07-29]. Dostupné z: http://www.localpower.org/ben_efficiency.html
- [39] NOSKIEVIČ, Pavel. *DECENTRALIZACE V ENERGETICE - UJEDE NÁM VLAK?* [online]. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, Výzkumné energetické centrum [cit. 2018-07-29]. Dostupné z: <http://www.cogen.cz/decentralizace-v-energetice.html>
- [40] *Applied Energy: Recuperators for micro gas turbines: A review* [online]. Elsevier B.V., 2017(197) [cit. 2018-08-03]. ISSN 0306-2619.
- [41] NOVOTNÝ, Václav, Barbora BRYKSÍ STUNOVÁ, Monika VITVAROVÁ a Petr ZIKMUND. *Odborná zpráva o postupu prací a dosažených výsledcích za rok 2017: Číslo projektu: TJ01000090*. Praha, 2018.
- [42] NOVOTNÝ, Václav, Barbora BRYKSÍ STUNOVÁ a Petr ZIKMUND. *3D Printed Parts for Power Industr: Technological forum 2018*. Praha, 2018.
- [43] NIKOLAEV, V.V., N.V. BUSYGINA a I.G. BUSYGIN. *Osnovnyje processy fizičeskoj i fiziko-chimičeskoj pererabotki gaza: Hlavní procesy fyzikálního a fyzikálně chemického zpracování plynu* [online]. Orenburg: Nedra: Nedra, 1998, s. 129 [cit. 2018-07-29]. ISBN S-247-03813-4.

- [44] *Turboexpander* [online]. [cit. 2018-07-29]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Turboexpander>
- [45] *Systémy pro aditivní výrobu z kovu: AM250* [online]. [cit. 2018-07-29]. Dostupné z: <http://www.renishaw.cz/cs/am250--15253>
- [46] *Design for metal AM - a beginner's guide* [online]. Aug 17, 2017 [cit. 2018-08-10]. Dostupné z: <http://www.renishaw.com/en/design-for-metal-am-a-beginners-guide--42652>
- [47] *CHARAKTERISTIKA KOROZIVZDORNÝCH MATERIÁLŮ A ZÁKLADNÍ INFORMACE O POUŽITÍ, ZPRACOVÁNÍ, SVAŘOVÁNÍ A MOŽNÉ KOROZI* [online]. [cit. 2018-07-29]. Dostupné z: <http://www.italinox.cz/plechy/charakteristika-materialu/strana-2>
- [48] *Katalogové listy – Aditivní výroba: Data sheet: SS 316L-0407 powder for additive manufacturing* [online]. [cit. 2018-07-29]. Dostupné z: <http://www.renishaw.cz/cs/katalogove-listy-aditivni-vyroba--17862>
- [49] *Design guidelines for Direct Metal Laser Sintering (DMLS)* [online]. Crucible Design, 2015 [cit. 2018-07-29]. Dostupné z: <https://www.crucible-design.co.uk/images/uploaded/guides/bs7000-part-2-a-management-guide-download-original.pdf>
- [50] Tělísko brusné na stopce pr. 6×10mm, zr. 80, ogivální 327ní. In: *Landsmann. Tělíska ogivální* [online]. [cit. 2018-07-30]. Dostupné z: http://www.landsmann.cz/brusivo-pro-prime-brusky-vrtacky-teliska-na-stopce-teliska-ogivalni_c606.html
- [51] Tělísko brusné na stopce pr. 2×6mm, zr. 100, válcové 321. In: *Landsmann. Tělíska Válcová* [online]. [cit. 2018-07-30]. Dostupné z: http://www.landsmann.cz/carborundum-32161-0229-00-telisko-brusne-na-stopce-pr-2x6mm-zr-100-valcove-321-_d23770.html
- [52] 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>
- [53] Tělísko brusné na stopce pr. 6×10mm, zr. 80, ogivální 327ní. In: *Landsmann. Tělíska ogivální* [online]. [cit. 2018-07-30]. Dostupné z: http://www.landsmann.cz/brusivo-pro-prime-brusky-vrtacky-teliska-na-stopce-teliska-ogivalni_c606.html
- [54] Tělísko brusné na stopce pr. 2×6mm, zr. 100, válcové 321. In: *Landsmann. Tělíska Válcová* [online]. [cit. 2018-07-30]. Dostupné z: http://www.landsmann.cz/carborundum-32161-0229-00-telisko-brusne-na-stopce-pr-2x6mm-zr-100-valcove-321-_d23770.html
- [55] 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>
- [56] Omílání. *ELUC. Druhy dokončovacích operací /Omílání* [online]. [cit. 2018-07-31]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1388>
- [57] KREJČÍK, Vladimír. *Povrchová úprava kovů I pro 2. ročník středních odborných učilišť*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1987.
- [58] Vibrační omílací zařízení. In: *RUNDVIBRATOREN: Gleitschleifen in 1000fach bewährter Art* [online]. [cit. 2018-07-31]. Dostupné z: <https://de.rosler.com/de-de/produkte/gleitschlifftechnik/rundvibratoren/>
- [59] PŘÁDA, Otakar. *Zlepšování pracovního prostředí při povrchové úpravě kovů: příručka pro provozní techniky a mistry, pro bezpečnostní techniky a inspektory práce*. Praha: Práce, 1960. Knižnice ochrany a bezpečnosti při práci.
- [60] AFM: HIGH-QUALITY FINISHING FOR INDUSTRIAL 3D PRINTING. *COMPANY NEWS MACHINING PROCESS: 3D METAL PRINTING, 3D Printing, additive layer manufacturing, AFM, ALM, Automotive, Electrochemical Machining, Engineering, Extrude Hone, laser sintering* [online]. 2016 [cit. 2018-07-31]. Dostupné z: <https://extrudehone.com/afm-high-quality-finishing-industrial-3d-printing>
- [61] *ELECTROCHEMICAL MACHINING (ECM)* [online]. [cit. 2018-07-31]. Dostupné z: <https://extrudehone.com/products/electrochemical-machining-ecm>
- [62] Princip elektronického leštění. In: *Electropolishing* [online]. 2011 [cit. 2018-07-31]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Electropolishing>
- [63] Elektrolytické leštění. *HENKEL* [online]. [cit. 2018-08-02]. Dostupné z: <https://henkel-epol.com/cs/sluzby/elektrolyticke-lestni/#1471961250599-607471ea-a119>
- [64] *DMLS – Direct Metal Laser Sintering* [online]. [cit. 2018-07-31]. Dostupné z: <https://gpiprototype.com/dmls-direct-metal-laser-sintering>
- [65] *Kakoj abraziv vybrat dlja peskostrujnoj očistky?: Jaký druh brusiva lze zvolit pro pískování?* [online]. [cit. 2018-08-01]. Dostupné z: http://xn----8sbcejdaf0adk1bgfccbbgixicy0aj.xn--p1ai/vybor_abraziva
- [66] Otryskávání. *ELUC. Druhy dokončovacích operací* [online]. [cit. 2018-08-01]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1389>
- [67] OTEC. *OMÍLACÍ STROJE A TECHNOLOGIE PROCESU* [online]. [cit. 2018-08-03]. Dostupné z: <https://www.otec.de/cz/>
- [68] SILBERNAGEL, Cassidy. Additive Manufacturing 101-1: What is binder jetting?. *Additive Manufacturing 101* [online]. Mar 13, 2018 [cit. 2018-08-01]. Dostupné z: <http://canadamakes.ca/what-is-binder-jetting/>



- [69] Binder Jetting. *About Additive Manufacturing* [online]. [cit. 2018-08-01]. Dostupné z: <http://canadamakes.ca/what-is-binder-jetting/>
- [70] Binder Jetting. *Binder Jetting (BJ)* [online]. [cit. 2018-08-01]. Dostupné z: <https://www.additively.com/en/learn-about/binder-jetting#read-advantages>
- [71] BOURNIAS VAROTSIS, Alkaios. Stator turbíny pro ropu a plyn vytištěné technologií Binder Jetting. In: *Introduction to Binder Jetting 3D printing* [online]. [cit. 2018-08-01]. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-binder-jetting-3d-printing#work>