



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

VYUŽITÍ ADITIVNÍCH TECHNOLOGIÍ (3D TISK) PRO VÝROBU KONSTRUKČNÍCH ČÁSTÍ TURBÍN

USE OF ADDITIVE TECHNOLOGIES (3D PRINT) FOR THE PRODUCTION OF TURBINE COMPONENTS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Alexander Vaculka

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Ladislav Šnajdárek

BRNO 2019

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Energetický ústav
Student:	Alexander Vaculka
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Energetika, procesy a životní prostředí
Vedoucí práce:	Ing. Ladislav Šnajdárek
Akademický rok:	2018/19

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Využití aditivních technologií (3D tisk) pro výrobu konstrukčních částí turbín

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Hlavní náplní práce je provedení rešerše aditivních technologií pro výrobu konstrukčních částí energetických zařízení, zejména jednotlivých komponent plynových a parních turbín. Dále následuje popis vybraných technologií aditivní výroby a na základě provedené rešerše zhodnocení mechanických vlastností a predikce životnosti takto vyrobených komponent.

Cíle bakalářské práce:

- Popis vybraných aditivních technologií
- Uvedení a popis vybraných komponent vyrobených pomocí aditivní technologie
- Zhodnocení mechanických vlastností a životnosti komponent vyrobených pomocí aditivní technologie

Seznam doporučené literatury:

YANG, L., K. HSU, B. BAUGMAN, D. GODFREY, F. MEDINA, M. MENON a S. WIENER. Additive manufacturing of metals: the technology, materials, design and production. New York, NY: Springer Berlin Heidelberg, 2017. ISBN 978-331-9551-272.

WIMPENNY, D., P. PANDEY a L. KUMAR. Advances in 3d printing. 1. New York, NY: Springer Berlin Heidelberg, 2016. ISBN 978-981-1008-115.

MATTINGLY, J., W. HEISER a D. PRATT. Aircraft Engine Design, 2002. Second edition. Reston: American Institute of Aeronautics and Astronautics, ISBN 1-56347-538-3

KAMRANI, A. K. a E. A. NASR. Engineering design and rapid prototyping. 1. New York: Springer, c2010. ISBN 978-0-387-95862-0.

WANG, J., B. ANTOUN, E. BROWN, W. CHEN, I. CHASIOTIS, E. HUSKINS-RETZLAFF, S. KRAMER a P.R. THAKRE. Mechanics of additive and advanced manufacturing, volume 9. 1. New York, NY: Springer Science Business Media, 2017. ISBN 978-3-319-62833-2.

KRBEK, J. Tepelné turbíny a turbokompresory, 1990. 3. vydání. Brno: Vysoké učení technické v Brně, ISBN 80-214-0236-9

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Bakalářská práce se ve svém úvodu zabývá aditivními technologiemi. Popisuje jejich princip, technologická řešení, dále také jejich výhody a nevýhody i oblasti kde se využívají. Následuje popis vybraných komponent parních a plynových turbín z hlediska náročnosti výroby, mechanických vlastností a designu. V poslední části se věnuje zhodnocení a porovnání mechanických vlastností komponentů vyrobených pomocí aditivních technologií s konvenční metodami.

Klíčová slova

Aditivní technologie, 3D tisk, lopatka, plynová turbína, mechanické vlastnosti

ABSTRACT

In the first part of my bachelor thesis I deal with types of additive manufacturing technologies. Describing principle, technological solutions, bring up some advantages and disadvantages and typical area of their usage. Following part describes chosen turbine components and their mechanical property, shapes, and manufacturing aspects. Last part compares mechanical properties of additive manufactured components with components produced in conventional ways.

Key words

Additive technologies, 3D print, blade, gas turbine, mechanical properties

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

VACULKA, Alexander. *Využití aditivních technologií (3D tisk) pro výrobu konstrukčních částí turbín*. Brno, 2019. 48s. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/113206>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. Vedoucí práce Ladislav Šnajdárek.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma *Využití aditivních technologií (3D tisk) pro výrobu konstrukčních částí turbín* vypracoval(a) samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum

Jméno a příjmení

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto Ing. Ladislavovi Šnajdárkovi za jeho trpělivost, cenné připomínky a rady, které mi poskytl při vypracování závěrečné práce.

OBSAH

ÚVOD	11
1 Aditivní technologie	12
1.1 Historie 3D tisku	12
1.2 Postup procesu	14
2 Přehled metod	15
2.1 SLS – Selective Laser Sintering	15
2.1.1 Laser Sintering Plastic	17
2.1.2 Laser Sintering Metal.....	17
2.1.3 Laser Sintering Foundry Sand.....	18
2.1.4 Laser Sintering Ceramic	18
2.2 DMLS – Direct Metal Laser Sintering	19
2.3 SLM – Selective Laser Melting	20
2.4 EBM – Electron Beam Melting	20
3 Lopatkové stroje.....	23
3.1 Lopatky.....	23
3.2 Konstrukce lopatek.....	23
3.3 Návrh lopatek.....	25
3.4 Materiály vhodné na výrobu lopatek.....	25
3.5 Technologie výroby lopatek	26
3.6 Výroba lopatek aditivní technologií.....	27
3.6.1 Hořáky.....	28
4 Výměníky tepla	30
4.1 Topologická optimalizace.....	30
4.2 Využití aditivních technologií na výrobu výměníků tepla	30
5 Mechanické vlastnosti	32
5.1 Drsnost.....	32
5.2 Pevnost	34
5.3 Životnost.....	35
ZÁVĚR	38
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	39
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	44

ÚVOD

Turbíny či už plynové nebo parní tvoří velice důležitou část v dnešní době zejména při výrobě elektřiny nebo dopravě. A proto se snažíme neustále zdokonalovat účinnost těchto zařízení. To ovšem ale sebou přináší neustálé zvyšování nároků na technologii turbín jako lepší mechanické vlastnosti nebo turbíny jako technologického celku.

Jednou z nejvíce namáhaných částí je lopatka. Lopatka v turbíně musí vydržet obrovské síly které vznikají z velkého počtu otáček a popří tom je navíc teplotně namáhána. Z toho důvodu jsou na materiály a jejich mechanické vlastnosti kladeny velké nároky. Dále musí být perfektně tvarovaná kvůli aerodynamice, která taky hodně ovlivňuje celkovou účinnost. Kombinace skvělých mechanických vlastností a složitého tvaru z ní dělá jednu z nejhůře obrobitelnou součást v strojírenské praxi.

Z tohoto důvodu se stále hledají nové výrobní procesy a technologie která by výrobu takovýchto komponent ulehčila. Jedním z nich jsou aditivní technologie neboli 3D tisk. Hlavní výhodou aditivních technologií, je že dokážou vyrábět komponenty se složitými tvary za kratší čas než konvenční metody. Taky při nich nevzniká skoro žádný odpadový materiál. Protože nevyužitý materiál se dá znovu použít.

Díky těmto výhodám jsou aditivní technologie příslib do budoucnosti jak by se mohla výroba těchto komponent zefektivnit.

1 Aditivní technologie

Pojem aditivní technologie (AM) označuje proces, při kterém se postupným nanášením a spékáním vrstvy vyrábí součásti. V podstatě se jedná o trojrozměrný tisk dále zkráceně jen 3D tisk nebo někdy také může být v literatuře označován jako „rapid prototyping“. Název rapid prototyping nejčastěji označuje proces, při kterém vznikají prototypy nikoli však technologie na výrobu konstrukčních součástí. Pomocí 3D tisku můžeme troj rozměrné objekty podle CAD předlohy. Nevzniká tím žádný odpad jako například při třískovém obrábění. A i když jde o relativně novou technologii, tak díky jejím výhodám se v poslední době dostávají aditivní technologie do popředí [6].

1.1 Historie 3D tisku

Vývoj aditivních technologií se v posledních letech posunul hodně dopředu ačkoli si hodně lidí myslí, že jedná o technologii 21. století, tak počátky vzniku aditivních technologií se datují do 19. století.

V následujícím textu jsou vyznačeni milníky a chronologický vývoj aditivních technologií od fotografie až po stavbu budov pomocí 3D tisku.

- 1859 – Francouzský fotograf Francois Willéme použil 24 kamer k tomu aby zaznamenal objekt z různých uhlů. Je to považované za vůbec první 3D skenování.
- 1892 – Vynálezce Joseph E. Blather si nechal patentovat techniku vytváření 3D topografických map metodou vrstvením materiálu na sebe, která je podobna dnešním aditivním technologiím.
- 1980 – Dr. Hideo Kodama se stal prvním kdo použil techniku vrstvení k výrobnímu účelu.
- 1984 – Vznik 3D tisku. Vytvoření prvního funkčního zařízení na principu stereolitografie.
- 1988 – Vznik metody SLS (Selective Laser Sintering). Spékání prášku za pomocí laseru.
- 1989 – Scott Grump si patentoval technologii FDM (Fused Deposition Modeling).
- 1990 – Společnost 3D Systems vytváří první zařízení s využitím aditivních technologií. Zařízení pracuje s fotopolymery vytvrzované UV laserem. Ačkoli to není dokonalé tak zařízení dokáže vyrábět složité tvary v krátkém čase.
- 1992 – Představení 3D tisku široké veřejnosti.
- 1993 – Nástroj CAD (Computer Aided Design) se začal používat na zdokonalení a rozvoj 3D tisku.
- 1999 – První transplantace orgánu (močový měchýř), při kterém byla využita aditivní technologie.
- 2004 – Dr. Adrian Bowyer založil RepRap open-source projekt s cílem kdy si zařízení vyrábí vlastní komponenty.
- 2006 – Bylo vytvořeno první zařízení, které bylo schopno pracovat s více materiály. To znamená že jedno zařízení dokáže vyrobit věc z různých typů materiálů, která mají různé vlastnosti.

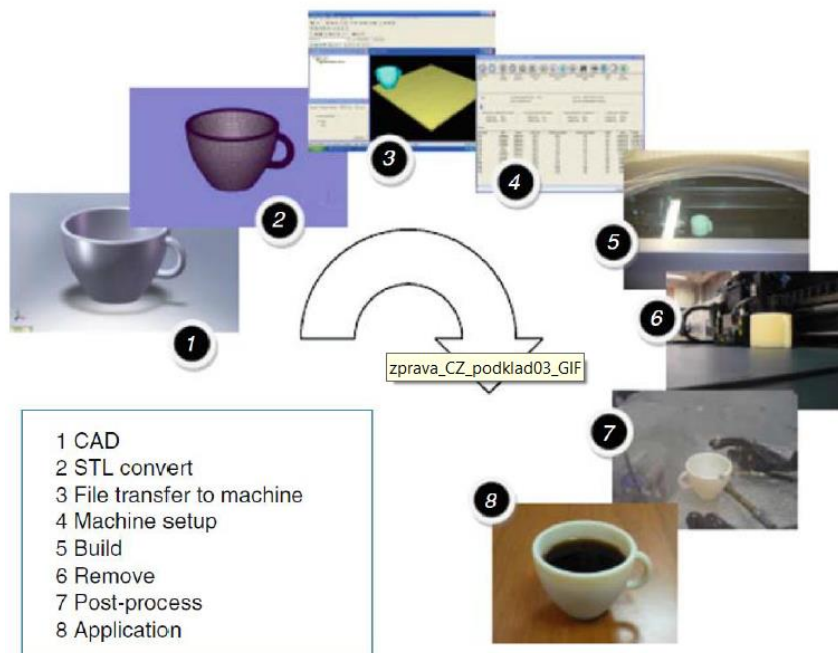
- 2007 – První samo se replikující zařízení, tj. uživatelé, kteří vlastní už jedno zařízení si mohou vyrobit další.
- 2008 – První protéza vyrobena za pomoci 3D tisku.
- 2011 – První letadlo vyrobeno aditivními technologiemi.
- 2014 – NASA začala používat 3D tiskárnu na vesmírné stanici.
- 2018 – Aditivní technologie jsou už tak rozšířené, že se běžně používají v mnoha odvětvích jako medicína, sport, stavitelství, letectví a v mnoha dalších technických odvětvích [7].



Obrázek 1: První letadlo vyrobené pomocí 3d tisku [11]

1.2 Postup procesu

Proces výroby aditivními technologiemi lze rozdělit do několika kroků znázorněných na obrázku č.1.



Obrázek 2: Postup výroby pomocí aditivních technologií [6]

CAD - Všechny části jsou popsány modelem, který plně popisuje povrch modelovaných objektů. Tento požadavek splňuje pravděpodobně jakýkoliv profesionální CAD software, ale i celá řada volně dostupných programů.

Konverze STL - Téměř všechna AM zařízení umí pracovat s STL formátem vstupních souborů, který se stal pro AM standardem. Každý CAD software umí generovat takový výstupní formát souborů. STL soubory popisují uzavřené plochy originálního CAD modelu.

Import STL do AM zařízení - STL soubory jsou nahrány do AM zařízení a je možnost jednoduchých úprav jako je velikost a orientace při tisku.

Nastavení zařízení AM - Nastavení procesu tisku (teploty, množství materiálu, rychlosti, časování, atd.)

Tisk objektu - Automatický proces, který většinou probíhá samostatně bez obsluhy.

Odstranění objektu - Po tisku musí být vytištěný objekt ze zařízení AM

Postprocessing - Vytištěný objekt je nutné většinou upravit, odstranit přebytečný materiál a odstranit podpory pokud byly využity.

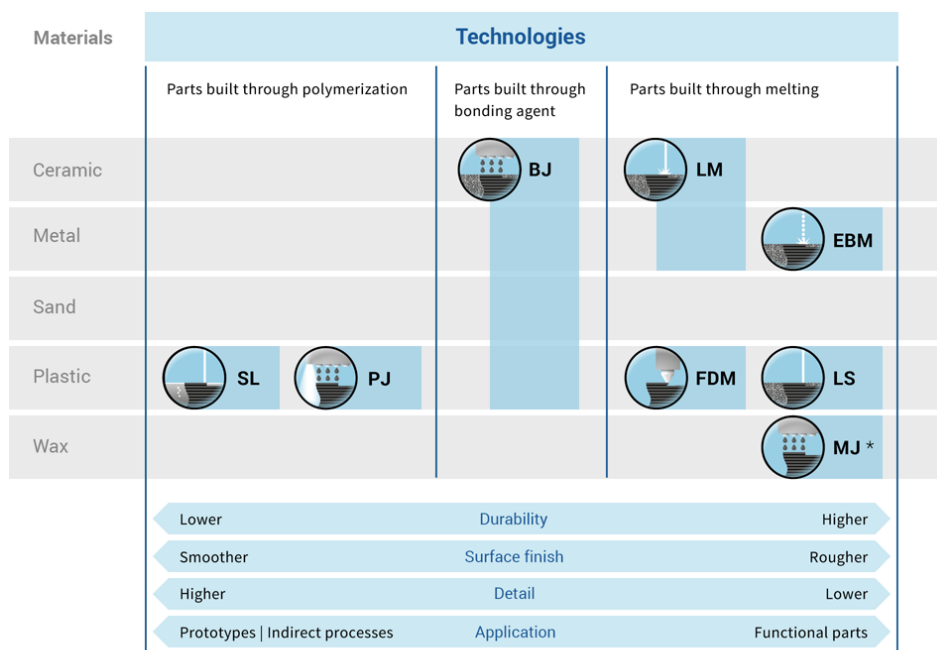
Použití - Vytištěný objekt je připravený pro použití [6].

2 Přehled metod

Tato kapitola popisuje nejpoužívanější metody z oblasti výroby produktů aditivními technologiemi. Existuje celá řada klasifikace aditivních metod. Asi nejvíce rozlišitelný parametr, kterým se od sebe metody nejvíce rozeznávají je typ materiálu a zdroj tepla. Jedná se především o metody SLS (Selective Laser Sintering), DMLS (Direct Metal Laser Sintering), SLM (Selective Laser Melting), EBM (Electron Beam Melting).

Přesto že se aditivní technologie od sebe navzájem liší vlastnostmi jako jsou např. vlastnosti vyrobených součástí, druhy materiálů nebo výrobní podmínky, tak technologický princip je stejný. Technologie je založená na zdroji tepla, kde při kovových materiálech se jedná prakticky vždy o laser, který zabezpečuje potřebné teplo na roztavení prášku. Prášek je nanášen postupně po vrstvách. Tloušťka vrstvy se pohybuje v řádu mikrometrů a u kovových materiálů nepřesahuje velikost 100 mikrometrů. Tloušťka vrstvy je při aditivních technologiích důležitý a pozorně sledovaný parametr v porovnání s jinými parametry. Postupným navyšováním vrstvy a spékáním zrn prášku dosáhneme výsledku v podobě součásti které vynikají různorodostí tvarů, které bychom konvenčními metodami dosahovali velmi těžce a složitě [1].

Při výrobě konstrukčních částí různých strojů nás bude nejvíce zaujímat také metoda, která je schopna vyrábět součásti s požadovanými mechanickými vlastnostmi. To jsou převážně ocelové a slitinové materiály. Ale pro větší přehled uvedu i některé nekovové, které jsou rovněž zajímavé.

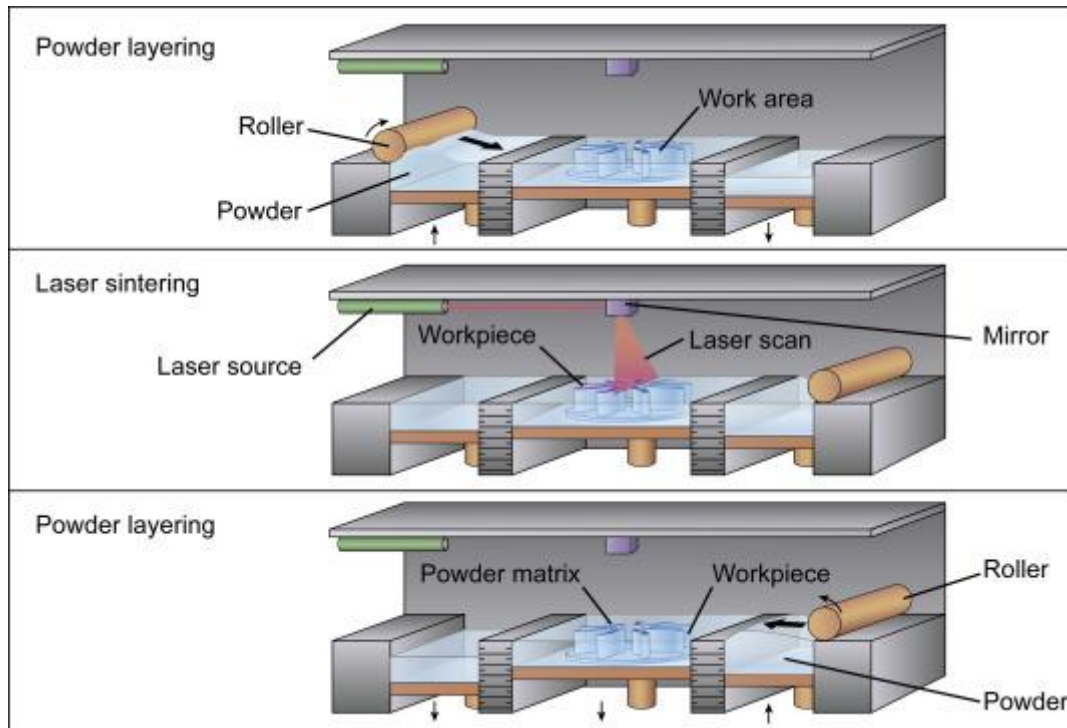


Obrázek 3: Přehled metod a materiálů, které se nejčastěji používají [16]

2.1 SLS – Selective Laser Sintering

SLS neboli metoda, která je založena na postupném spékání prášku zahrnující pryskyřici, pryž, keramika, polymerní a kovové materiály. Metoda SLS je založená na vysoce-energetickém CO₂ laserovém paprsku, který spéká částice aditivního prášku k sobě do jednoho celku částečným tavením [2].

Vrstva je nanášena na základovou desku v inertní atmosféře. Podle výpočetních souřadnic bodů rovin je řízena skenovací hlava, která vede laserový paprsek nad povrchem prášku. Prášek je tavený jen na jednom místě a zbytek zůstává neroztavený. Neroztavený prášek v okolí slouží jako opora tomu zatavenému. Po dokončení jedné vrstvy se základní deska posune o tloušťku vrstvy, která byla právě natavena a celý proces se opakuje až do požadovaného tvaru výrobku. [6]



Obrázek 4: Proces spékání prášku metodou SLS [3]

Na rozdíl od jiných metod můžeme používat jakýkoli materiál, který je schopen se tavit a znova spékat. V současnosti se v komerčních oblastech používají např. termoplastické materiály jako polyamid, polyamid plněný skleněnými vlákny, polykarbonát, polystyrén dále speciální nízkotavitelné slitiny z niklových bronzů nebo polymerem povlakovaný ocelový prášek. Většinou ale není možné přecházet na jednom zařízení od jednoho materiálu k jinému neboť jejich vytvrzení si vyžaduje výrazně odlišné podmínky [6].

Tento typ technologie vyniká velkou geometrickou různorodostí a flexibilitou komponentů, stejně tak i vysokou pevností. Na druhou stranu je proces energeticky náročný a má slabší kvalitu povrchu čili je nutná úprava povrchu [4].

Podle druhu taveného materiálu se odlišují metody na:

- Laser Sintering – Plastic
- Laser Sintering – Metal
- Laser Sintering – Foundry Sand
- Laser Sintering – Ceramic

2.1.1 Laser Sintering Plastic

Podobně jako u FDM (Fused Deposition Modeling) je možno volit z několika druhů plastů a podle jejich daných vlastností se odvíjí i využití finálního výrobku. Některé druhy mají dobré mechanické vlastnosti jako například za pomoci použití nylonu. Nejčastěji se však pomocí této metody vyrábí prototypy k návrhům a vizuální prezentaci [6].



Obrázek 5: Typický produkt Laser Sintering Plastic [6]

2.1.2 Laser Sintering Metal

Tento typ je založen výrobu modelů z kovových nebo slitinových materiálů. Výrobky vynikají skvělými mechanickými vlastnostmi a proto jsou využívány v technické praxi jako konstrukční komponenty.

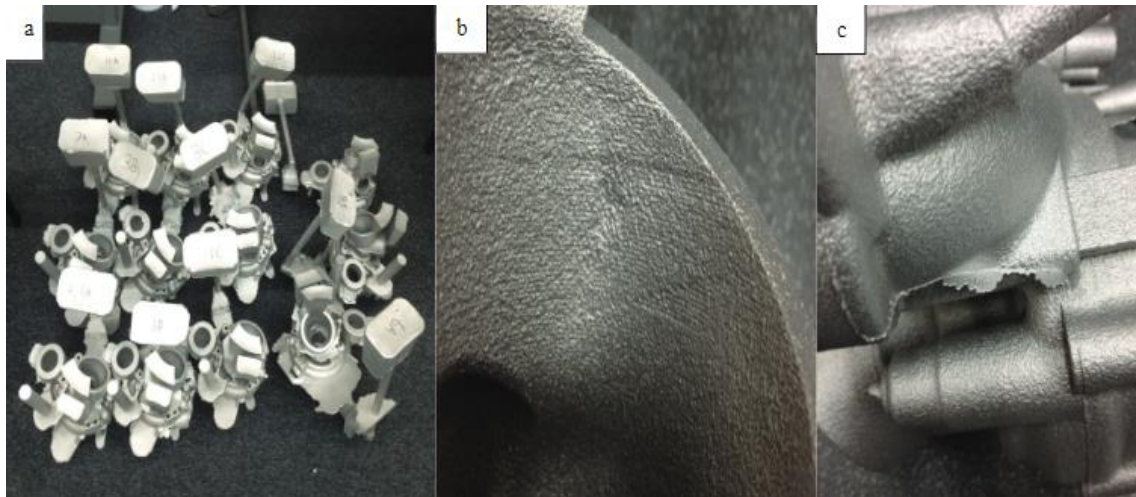


Obrázek 6: Komponenty vyrobené pomocí Laser Sintering Metal [8]

2.1.3 Laser Sintering Foundry Sand

Jedná se o novější metodu, při které se používá upravený slévárenský písek. Vytvrzováním písku vznikne bez dalších mezikroků slévárenská forma. [6]

Rozsah materiálů které se můžou bez sebemenších komplikací odlívat se pohybuje od hořčíkových a hliníkových slitin až po některé druhy ocelí. Výroba odlitků pomocí této metody je daleko rychlejší než při konvenčních metodách používaných na výrobu licích forem. [9]



Obrázek 7: a) odlitky, b) a c) ukázka kvality povrchu odlitků [9]

2.1.4 Laser Sintering Ceramic

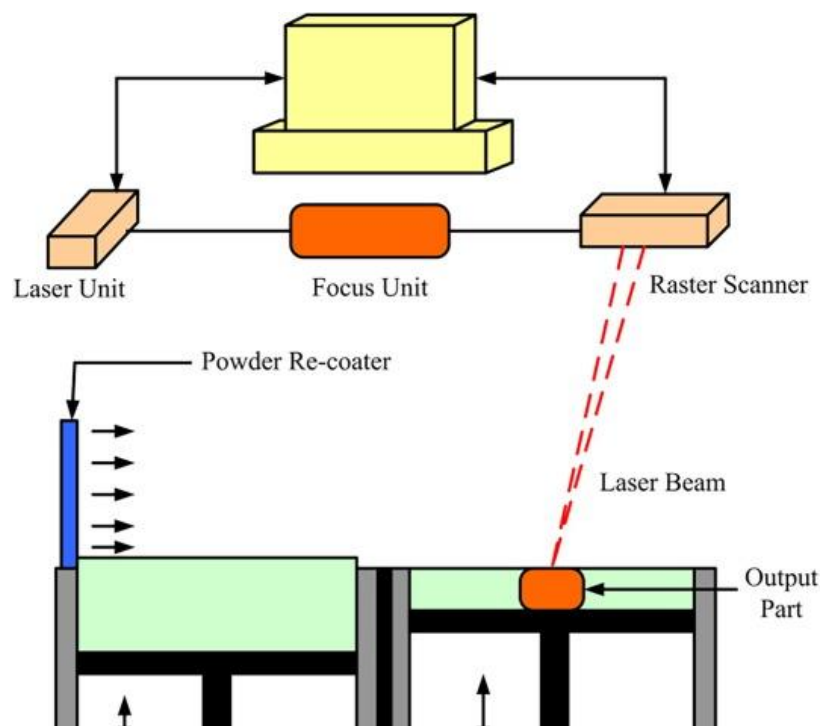
Aditivní technologie, které jako základný materiál používají keramiku jsou nejméně rozšířené kvůli malé dostupnosti zařízení vhodných na tento typ metody. Keramický prášek je spojovaný pomocí tekutého pojiva. Pojivo je nanášeno tzv. In-jet tryskou. Výrobky, které nejsou tvarově složité je výhodnější vyrábět jinou konvenční cestou. Ke keramickému 3D tisku se výrobci uchylují až při složitějších tvarech. Výhodou jsou mechanické vlastnosti hlavně vysoká tvrdost a též fakt biokompatibility s lidským tělem. Z těchto důvodů nachází uplatnění ve velké míře v medicíně. [10]



Obrázek 8: Dolní čelist vyrobená z hydroxyapatitu [6]

2.2 DMLS – Direct Metal Laser Sintering

Jak už název napovídá DMLS patří k přímým metodám aditivních technologií. Dávkovací zařízení nastaví přesné množství prášku, které je potřeba na výrobu jedné vrstvy. Keramické rameno s ocelovým břitem pak prášek rovnoměrně rozprostře po povrchu celé platformy s požadovanou tloušťkou vrstvy. Tloušťka vrstvy se pohybuje v rozmezí 0,02 až 0,04 mikrometru. Prášek se taví v místě dopadu laseru a současně dochází i k protavení podkladové vrstvy na kterou byl prášek nanesen. Materiál tuhne rychleji protože dochází k odvodu tepla ocelovou



Obrázek 9: Schématický diagram procesu metody DMLS [5]

platformou. Nespečený prášek v okolí modelu tvoří funkci podpory. Pracovní komora bývá vyplněna dusíkem aby nedocházelo k oxidaci materiálu [4].

K největším výhodám této metody patří zejména velký teplotní rozsah s kterým může být prášek tavený. To znamená velkou flexibilitu používaných materiálů a tvarů. Výroba součástí pomocí DMLS je taky šetrná k životnímu prostředí kvůli menšímu množství emisí a odpadního materiálu. Při výrobě není potřeba pomocných konstrukcí jako u jiných metod čím se snižují finanční náklady [5].

DMLS a SLS jsou si sobě navzájem podobné s tím rozdílem, že SLS lze použít na více druhů materiálů jako sklo, plast, kov, keramika. Zatímco DMLS se doporučuje na slitiny kovu.

2.3 SLM – Selective Laser Melting

Rozdíl kterým se liší SLM od DMLS a SLS je jakým způsobem se jednotlivá zrnka prášku navzájem spojují. Při SLS a DMLS se jednotlivá zrnka spékají tzn. že slinování prášek zahřeje jen do také míry kdy se zrnka mírně nataví a spojí se na molekulární úrovni. [12]

Na druhé straně SLM může dělat to samé co slinování a dokonce ještě víc. S použitím laseru se dosáhne úplného roztavení. To má za následek, že z prášku vznikne tekutá homogenní hmota. Tato metoda se používá pro jeden druh materiálu protože když máme jeden materiál tak máme taky jeden bod tání. Kdežto při metodách kde se pracuje s více materiály, tak každý materiál má jiný bod tání. [12]

V praxi to znamená, že když se pracuje se slitinou tak používáme SLS nebo DMLS. A když vyrábíme z čistého titanu například tak je vhodné použít SLM. [12]

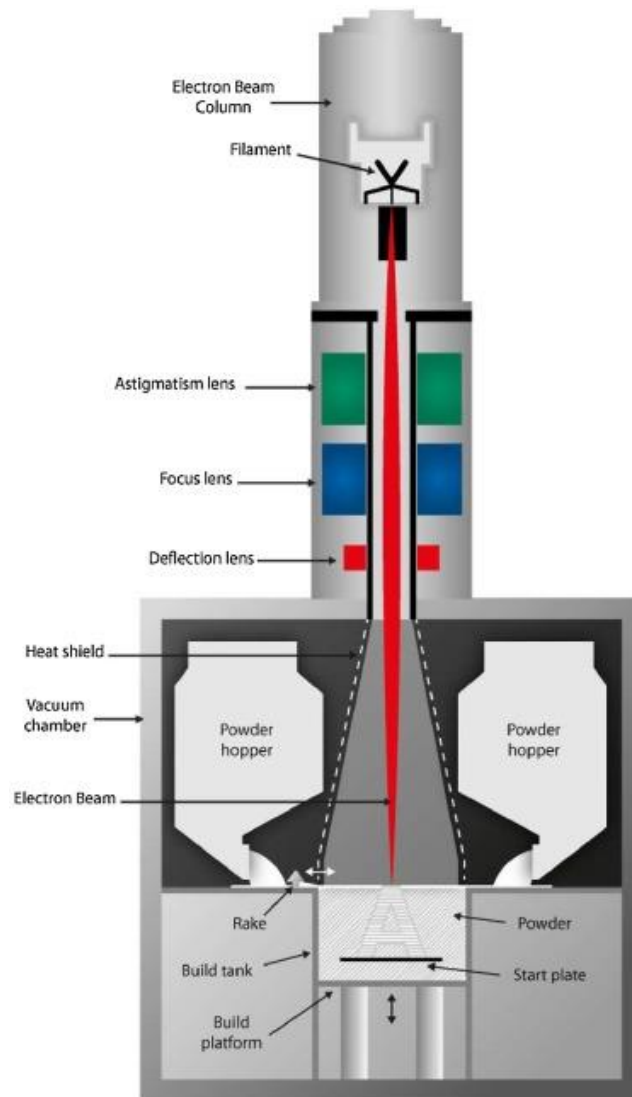
2.4 EBM – Electron Beam Melting

Aditivní technologie EBM je hodně podobná SLM ale namísto laseru používá elektronový paprsek, který taví prášek ve vakuu. [13], [15]

EBM je založen na principu podkladové desky, která je tvořena práškovým materiálem. Po nanesení je prášek tavený pomocí elektronového paprsku. Paprsek prášek zahřívá a taky zvyšuje jeho elektrickou vodivost. Materiál se lokálně spojí a tím vzniká produkt. Pak se celá deska posune a celý proces se znovu opakuje. Schéma toho procesu je znázorněna na obrázku 9. [14]

Při EBM se používají jenom kovové prášky, nejčastěji titan. Velikost titanové vrstvy která je nanášena se pohybuje v rozmezí od 45 do 110 mikrometrů. Často se nanáší velikost střední vrstvy, která bývá zhruba 75 mikrometrů. [14]

Na konci procesu je výrobek je součástí obklopena přebytečným práškem, někdy se to označuje jako „koláč“. Přebytečný prášek musí být odstraněn abychom získali finální výrobek. Tento proces se označuje PRS (Powder Recovery System). [14]



Obrázek 10: Schéma EBM procesu [14]

Přebytečný odstraněný prášek může být znovu použit na výrobu jiného produktu. Někdy může být proces odstraňování prášku docela složitá a těžká věc kvůli komplikovanosti tvaru daného výrobku. Proto se už při návrhu CAD modelu počítá s tímto faktorem. [14]

Na rozdíl od SLM nebo SLS je pomocí EBM vytvářet objekty s vysokou hustotou, a které jsou hodně pevné. Dále EBM neprodukuje tolik tepelného namáhání a nepotřebuje tolik podpor.

Avšak EBM je stále pomalý a nákladný proces, který produkuje výrobky s potřebou projít dokončovacími pracemi, protože nedosahuje potřebné kvality povrchu jako u SLS nebo SLM. EBM se používá v letectví a dalších specializovaných odvětvích. [13], [15]



Obrázek 11: Píst vyrobený pomocí EBM [16]

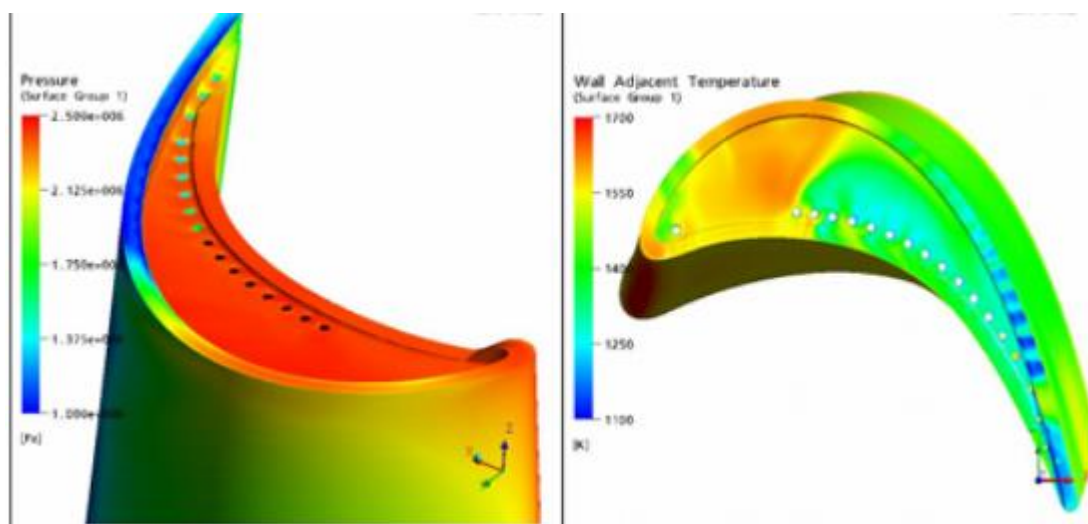
3 Lopatkové stroje

Lopátkové stroje je souhrnný název pro širokou skupinu strojů, kde charakteristickým rysem je rotor s lopatkami, v některé literatuře označován jako oběžné kolo. Lopatky jsou umístěny na rotoru tak aby vytvářely tzv. lopátkový kanál cez který proudí pracovní tekutina. K přenosu energie dochází vzájemným silovým působením mezi pracovní látkou a oběžným kolem. [17]

Pro lopátkové stroje je typický rozdíl tlaku před a za rotorem nebo rozdíl rychlosti pracovní látky, popřípadě jejich kombinace. Podle druhu pracovní látky se lopátkové stroje dále dělí do menších skupin parní a plynové turbíny, vodní turbíny a další. [17]

3.1 Lopatky

Lopátka je jedny z nejdůležitějších a nejvíce namáhaných částí turbíny, protože od aerodynamiky a tvaru lopatek se odvíjí i samotná účinnost stroje. Na základě toho se určuje nejvýhodnější tvar lopátkových mříží, velikost lopatek, rozteč lopátkové mříže, uhel nastavení lopatek v mříži, povrchová úprava a další. Především u velkých turbín i nepatrná zlepšení ve tvaru lopatky, mříže či jiných částí stroje mohou mít ve výsledku vysoké přínosy pro účinnost stroje. [19]

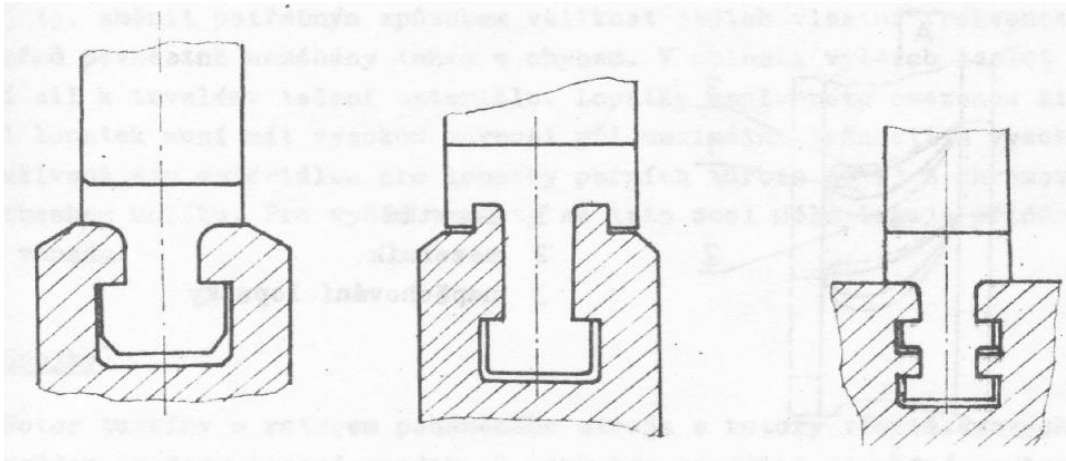


Obrázek 12: Profil lopatek v parních a plynových turbínách [22]

3.2 Konstrukce lopatek

Konstrukce a provedení lopatek úzce souvisí s jejich umístěním v parní turbíně, s parametry páry i s výrobními možnostmi a zvyklostmi výrobce. U rotorových lopatek je velmi důležité jejich uchycení do rotoru, neboť závěs lopatky je jednou z nejvíce namáhaných částí turbíny. Upevnění lopatek v rotoru může být buď ve formě obvodového nebo axiálního závěsu.

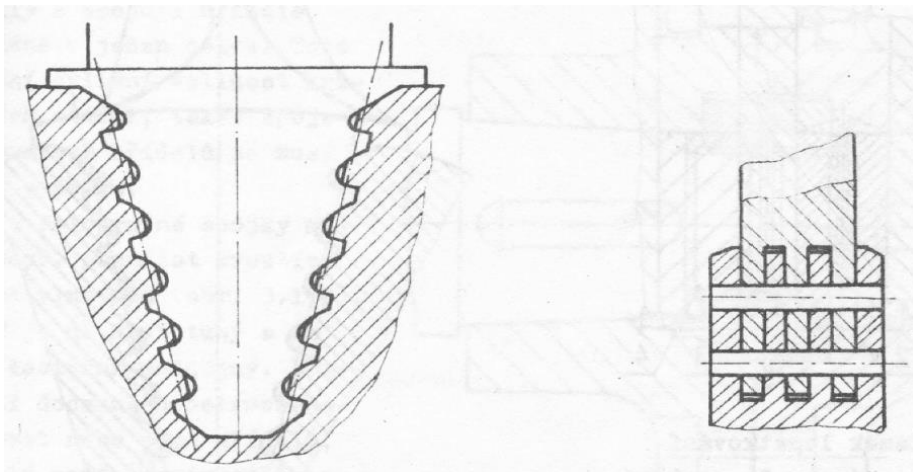
U obvodového závěsu je v rotoru vysoustružena drážka do níž jsou lopatky s příslušně tvarovanou nohou zasunovány. [18]



Obrázek 13: "T" závěs v různých provedeních [18]

Nejrozšířenější závěs je kladívkový závěs neboli tzv. „T závěs“, který je znázorněn na Obrázku 13. Tento závěs značně zmenšuje namáhání lopatek a proto se používá na nejvíce namáhané lopatky. Dalšími typy závěsů jsou stromečkové a vidlicové závěs. Tyto závěsy se používají na méně namáhané řady lopatek. [18]

Pro největší namáhání jsou určeny axiální stromečkové závěsy zobrazeny na Obrázku 14, které jsou výrobně nejnáročnější. Každá lopatka je zasunuta do drážky vyfrézované samostatně na disku.



Obrázek 14: Profil stromečkového a vidlicového závěsu [18]

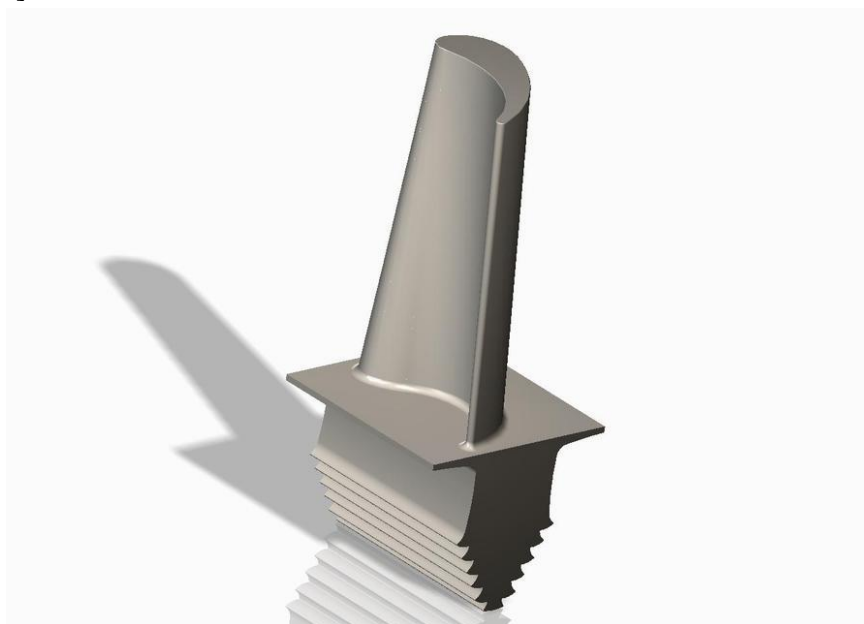
Lopatky v turbíně jsou vystaveny statickému, dynamickému a teplotnímu namáhání. Jsou značně pevnostně namáhány tahem a ohybem. A v oblasti vyšších teplot dochází při působení těchto sil k trvalému tečení materiálu. Proto mají lopatky omezenou životnost. Materiál lopatek musí mít vysokou pevnost při maximální tažnosti a vysokou mez únavy materiálu. [18]

3.3 Návrh lopatek

Koncové lopatky jsou kritickou a limitující součástí parní turbíny z pohledu bezpečnosti, a tím i flexibility provozu. Návrh koncových lopatek můžeme rozdělit na dvě fáze.

První se týká aerodynamického návrhu vlastního listu lopatky. Při využití 3D numerických analýz a optimalizačních výpočetních postupů je navržen a optimalizován pracovní list lopatky, a to zejména na maximální účinnost. [23]

Další fází je mechanický návrh, který zahrnuje optimální frekvenční naladění lopatky, zajištění dostatečných bezpečností z pohledu pevnosti lopatky a taktéž návrh závěsu a vazebních členů. Obě tyto fáze návrhu se časově prolínají, protože se vzájemně významně ovlivňují. Vývoj nové koncové lopatky zahrnuje až několik desítek návrhových iteračních kroků, které vedou k optimálnímu konstrukčnímu řešení splňujícímu náročné požadavky na její provozování. [23]



Obrázek 15: Návrh lopatky v CAD programu [24]

Doba potřebná pro vývoj nové koncové lopatky přímo souvisí s její délkou. Čím je delší lopatka, tím náročnější je řešení jejího návrhu. Jedná se například o stanovení účinku supersonického proudu pracovní páry u špičky pracovního listu dlouhých lopatek nebo o vyřešení pevnosti lopatky zatížené kromě ohybového momentu od výkonu i extrémní odstředivou silou od rotace, kde koncová lopatka může být namáhána silou 5000 kN což odpovídá tíhové síle přibližně 400 automobilů. [23]

3.4 Materiály vhodné na výrobu lopatek

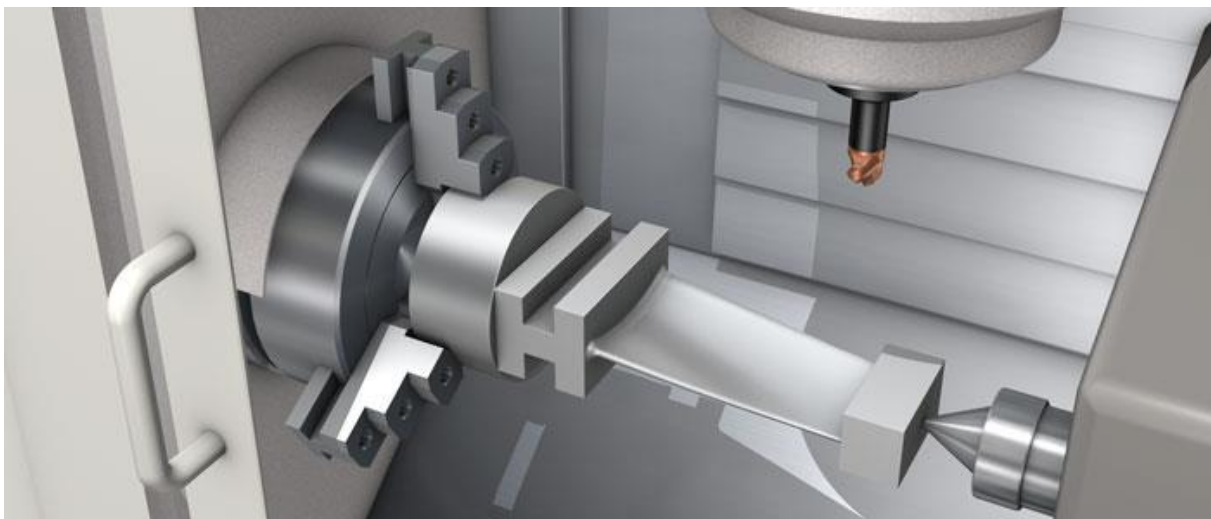
Velmi důležitou součástí návrhu lopatky je vhodný výběr materiálu. V dnešní době se pro lopatky používají zejména vysokopevnostní martenzitické oceli, které dosahují při zachování akceptovatelných plastických vlastností vysokých pevností až 1250 MPa. V ojedinělých případech jsou pro koncové lopatky využívány i slitiny titanu. Zavedení nového typu materiálu s perspektivou lepších vlastností (mechanických, korozních, erozních atd.) s sebou nese znalostní rizika. [23]

Proto jsou nově zaváděné materiály vždy podrobeny rozsáhlému souboru zkoušek a testů, které musí prověřit jejich vhodnost pro použití na koncové lopatky. Jedná se např. o zkoušky mikrostruktury materiálu, mechanických vlastností, testy vysoko-cyklové a nízko-cyklové únavy na různě tvarovaných zkušebních vzorcích, testy korozní a erozní odolnosti a další. [23]

3.5 Technologie výroby lopatek

Dosažení optimálního tvaru je při výrobě lopatek pro parní a plynové turbíny skutečně náročným úkolem, protože jejich opracování je spojeno s vůbec nejvyšší náročností, s jakou se lze při obrábění kovů setkat: [25]

- část materiálů se vyznačuje proměnnou obrobiteľností (některé z nich velmi špatnou, vyžadující použití specializovaných břitových destiček).
- požadováno je odebrání značného množství materiálu a dosažení velmi dobré kvality obrobenej plochy (aniž by při tom docházelo k negativnímu ovlivnění lopatky, např. pokud jde o zbytková pnutí).
- složitý tvar součástí (v některých případech vyžaduje použití vyspělých CAM programů a nejlepších metod),
- lopatky jsou během obrábění náchylné k vibracím (dlouhé, štíhlé, tenkostěnné součásti vyžadující nástroje s lehkým řezem a schopností tlumit vibrace).
- důležitá je efektivita výroby (velké vyráběné množství).
- nezbytné je použití a správná aplikace několika různých nástrojů (od přímočarého čelního frézování po 4- až 5-ti osově tvarové obrábění). [25]



Obrázek 16: 5-ti osově obrábění turbínové lopatky [25]

Málo namáhané lopatky, zejména u přetlakových stupňů, je možno nejjednodušeji vyrábět tažením tyčí požadovaného profilu. Z těchto tyčí se řezou potřebné délky. Další opracování je omezeno na úpravu konce lopatky a její paty tzv. závěs pro uchycení v drážce rotoru. [18]

Výroba nejvíce namáhaných lopatek je velmi náročná na přesnost a probíhá na několika pracovištích. Lopatky se třískově obrábějí a brousí na speciálních CNC centrech. Finální operací je rozměrová kontrola 3D souřadnicovým měřicím přístrojem, kde se s přesností na setiny milimetru proměřují kritické tvarové části lopatky. [23]

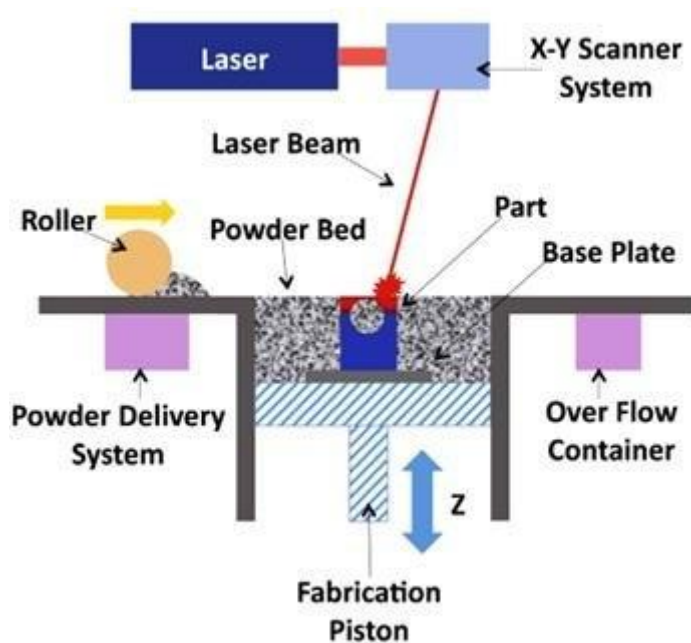
3.6 Výroba lopatek aditivní technologií

Kvůli časové, finanční a technologické náročnosti konvenčních způsobů výroby lopatek se začíná přecházet na aditivní technologie. A těch důvodů je několik.

Dosud se lopatky pro spalovací turbíny buď odlévaly, kovaly, tahali, nebo obráběli pomocí CNC programu. Odlévání je o to komplikovanější, že je k němu třeba zkonstruovat formu, což je složitý, časově náročný a nákladný postup. Při aditivní výrobě se laserovým paprskem ozařují a žhívají tenké vrstvy kovového prášku, který se tak spéká do požadovaného tvaru. Díky tomuto postupu se podařilo zkrátit dobu od návrhu nové lopatky až po její výrobu. [30]

Aditivní technologie dokážou zkrátit čas až o 40 %. Výhodou je že nemusí používat žádné speciální nástroje. Výrobky se vyznačují lepší mechanickou integritou a intervaly pro údržbu se zkrátily. [32]

Celý proces probíhá tak, že laser transponuje prášek do tekuté formy a software podle CAD modelu určuje jaký tvar mají tištěné formy mít. Většina zařízení vyrábí součástky o rozměrech 25 x 25 x 32 cm. Existují ale i větší zařízení s více lasery, kde můžou vznikat i rozměrnější díly a je to taky rychlejší. Výhoda SLM je, že zvládá i složité tvary. [30]



Obrázek 17: Schéma výroby 3D tiskem [34]

3.6.1 Hořáky

Nejsou to jenom lopatky, ale aditivní technologie se hojně využívají při výrobě hořáků. Tato technologie umožnila konstruktérům aplikovat moderní technologicko-konstrukční zásady s pozitivním dopadem na životní prostředí. [33]

Aerodynamické tvary v 3D tisku pomáhají při návrzích odlehčení prostřednictvím miniaturních příhradových konstrukcí a stěnami dílů vedou kanálky, které mají za úkol odvádět teplo. Toto řešení pozitivně ovlivňuje dopad na životní prostředí, kdy konstrukční řešení hlavice hořáku snižuje produkci emisí oxidu uhličitého. [33]



Obrázek 18: Porovnání hořáků vyrobených 3D tiskem (vlevo) a tradičním způsobem (vpravo) [33]

Technologie 3D tisku se ale dobře hodí také k opravě poškozených komponent. Například český Siemens ji použil k opravě spalovací turbíny v brněnské teplárně Červený mlýn. Vyrobili zde metodou selektivního tavení laserem tři hlavice hořáků, které při generální opravě turbíny nahradily poškozené původní hlavice. [30]

Díky této technologii bylo možné provést výměnu komponent za několik dnů, zatímco kdyby se měly obrábět klasickým způsobem z kovového polotovaru, celý proces by trval téměř rok. Takto tvarově složité díly totiž nelze klasicky vyrobit najednou, ale musejí se obrábět po částech. Naproti tomu technologie 3D tisku z hlediska tvarů v podstatě žádná omezení nemá. V tom spočívá jedna z jejích hlavních předností. [30]



Obrázek 19: Hořáky vyrobené v Brně pomocí 3D tisku [31]

4 Výměníky tepla

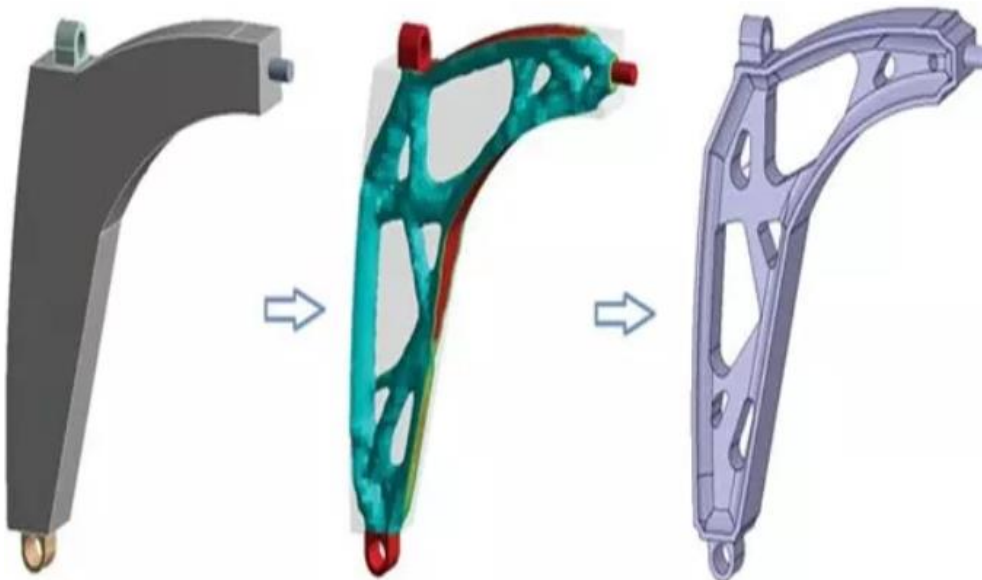
Výměníky tepla jsou zařízení, která slouží průběžnému nebo přerušovanému předávání tepelné energii pomocí proudících médií. [29]

Jedním nejnovějších trendů je spojení topologické optimalizace a aditivních technologií při výrobě výměníků tepla.

4.1 Topologická optimalizace

Topologická optimalizace je numerická metoda. Jejím cílem je zajistit co nejlepší požadované statické a dynamické parametry při využití minimum materiálu. Topologická optimalizace se primárně používá v mechanice ale v poslední době se rozšířila i do jiných odvětví jako akustika, hydromechanika, výměna tepla a dalších.

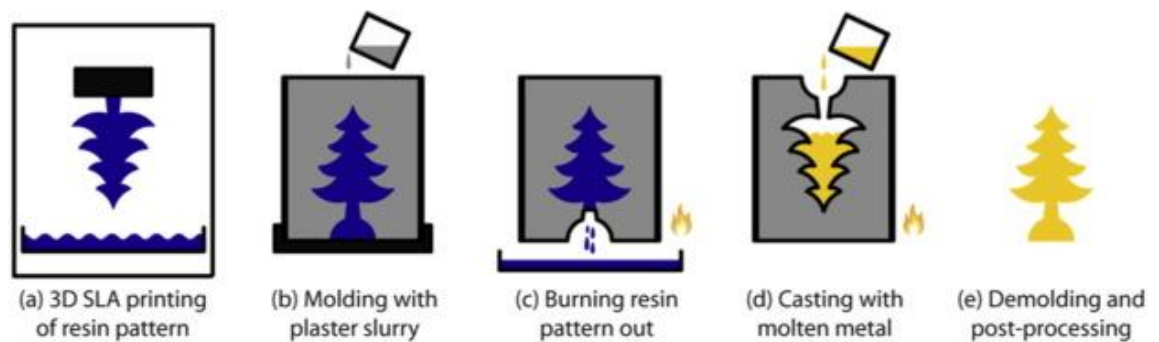
Výpočet optimalizace je poměrně náročný a provádí se v programech založených na principu konečných prvků. [26]



Obrázek 20: Příklad topologické optimalizace [27]

4.2 Využití aditivních technologií na výrobu výměníků tepla

Topologická optimalizace se u výměníků v nedávné době začala využívat při snaze najít také rozložení materiálu a tvar výměníku při kterém dojde k optimálnímu poměru mezi objemovým průtokem a množstvím předaného tepla. To má za následek že většina takto navržených výměníků má komplikovaný tvar. A proto nejjednodušší cesta je vytvořit pomocí 3D tisku model z kterého se následně vyrobí licí forma za pomoci, které se dosáhneme finální produkt. [26]

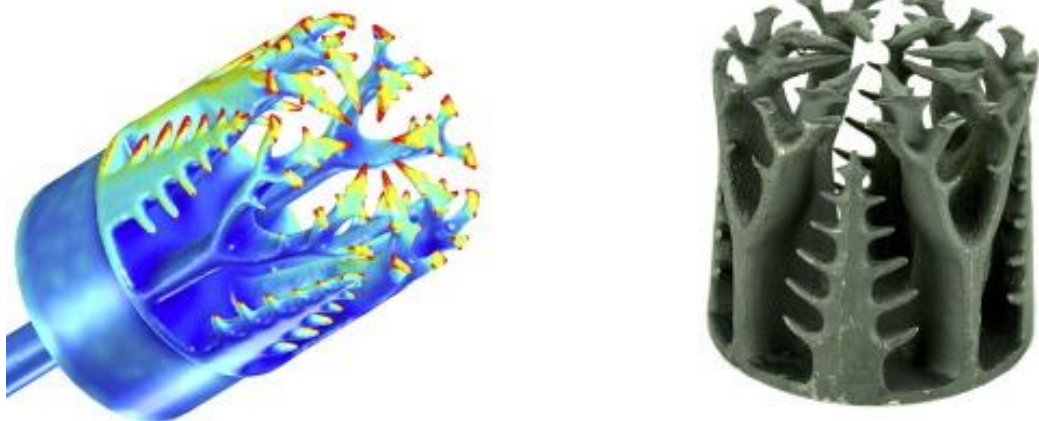


Obrázek 21: Postup výroby odlitku pomocí SLA [26]

Výrobu tohoto odlitku můžeme rozdělit do pěti kroků znázorněných na Obrázku 17. Nejprve se pomocí stereolitografie (SLA) vytvoří model. [26]

Stereolitografie patří do kategorie aditivních technologií, kde se vytváří model postupným vytvrzováním fotopolyméru pomocí UV laseru. [6]

Takto vytvořený model se dále vloží do nádoby a zalije sádrovou suspenzí. Po zatvrdnutí se forma začne postupně zahřívat až dojde k roztavení a vytečení modelu a zůstane jen forma která je připravená odlívání. [26]



Obrázek 22: Výměník vyrobený aditivní technologií [26]

5 Mechanické vlastnosti

Fakt že použitím aditivních technologií na výrobu konstrukčních turbín se podstatně zkrátí čas a zjednoduší výroba je skvělý, ale abychom mohly konvenční metody nahradit aditivními technologiemi, musí mít produkty také dobré mechanické vlastnosti na to aby dokázali vydržet podmínky které vznikají v parních a plynových turbínách. Nejdůležitějšími charakteristikami jsou kvalita povrchu neboli drsnost a pevnost.

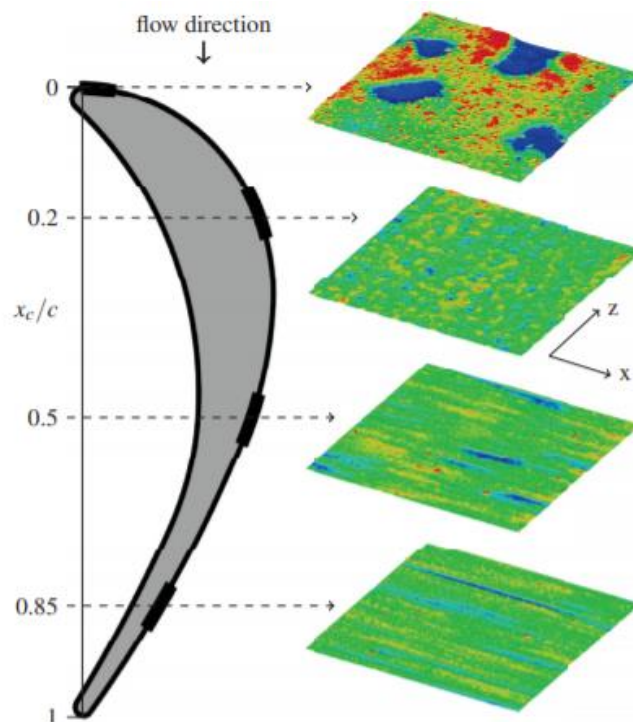
Proto se v této kapitole se budu zabývat zhodnocením těchto mechanických vlastností součástí vyrobených pomocí aditivních technologií a porovnáním s tradičními výrobními postupy.

5.1 Drsnost

Drsnost je soubor nerovností povrchu s relativně malou vzdáleností, které vznikají při obrábění. [36]

Sledování drsnosti povrchu je důležitá z hlediska ovlivňování aerodynamických a proudících parametrů. Zejména u komponent jako hlavice hořáků je kladen velký důraz na striktní dodržování vlastností povrchu. [35]

Na obrázku níže je možno vidět jak se mění drsnost povrchu lopatky podél obtokové hrany. [37]

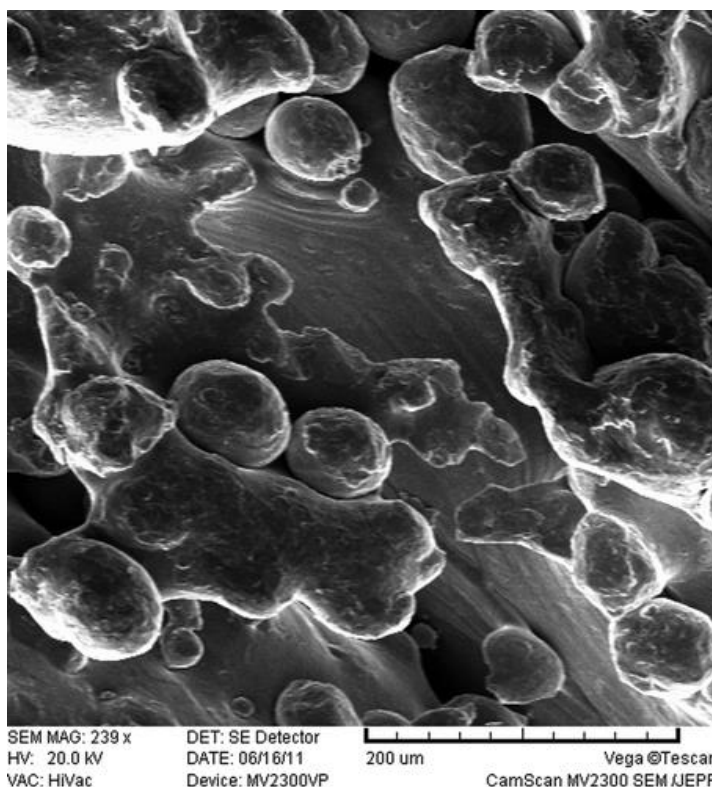


Obrázek 23: Drsnost povrchu lopatky změřené na různých pozicích [37]

Pozice X/c	Ra [μm]	Rz [μm]	Rq [μm]
0	4,0	5,4	28,4
0,2	2,2	2,8	16,1
0,5	1,9	2,5	16,0
0,85	2,3	3,0	18,4

Tabulka 1: Naměřené hodnoty drsnosti povrchu [37]

V tabulce 1 jsou zaznamenány hodnoty drsnosti povrchu na různých místech běžné lopatky která se používá v parních a plynových turbínách. [37]



Obrázek 24: Kvalita povrchu součástí vyrobených metodou EBM zvětšená 500-krát [38]

Č. Experimentu	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ra [μm]	24,18	24,09	22,59	23,79	25,46	25,11	23,28	22,97	23,66	23,87

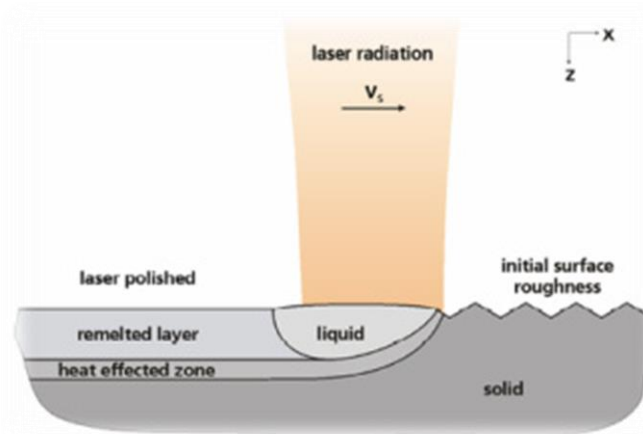
Tabulka 2: Změřené drsnosti povrchu [38]

Pomocí elektronového paprsku byli vyrobeny součásti a experimentálně změřeny drsnosti povrchů, které jsou uvedeny v tabulce 2. Na výrobu byl použit prášek o velikosti zrněk 45 až 100 mikrometrů. Zkoušeným materiálem byla slitina titanu a hliníku (Ti6Al4V-E). [38]

Protože kvalita povrchu u aditivních technologií není dostatečná je nutno komponenty dále opracovávat nebo hledat nové technologie na jejich úpravu. [35]

Jednou z těchto technologií je tzv. „laser polishing“, kde se pomocí laseru zahlužuje povrch. Obvykle laserové zahlužování, aby mohlo zajistit hladší povrch potřebuje větší hustotu materiálu. [35]

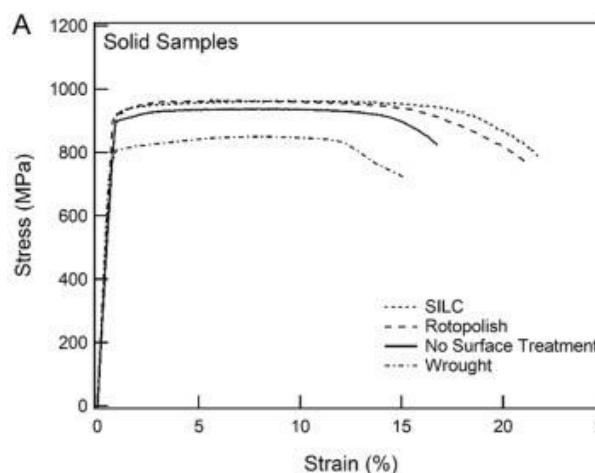
Tato technologie používá pulzující nebo kontinuální působení laseru na povrch. A tím povrch jemně roztaví zhruba do hloubky 100 mikrometrů a tím vyrovná nerovnosti. [35]



Obrázek 25: Schéma laserového vyhlazování [35]

5.2 Pevnost

Rotující konce lopatek mohou dosahovat rychlosti až 500 m/s. Díky tomu na ty největší lopatky v posledních řadách působí síly rovnající až 930 kN. [42] Lopatky jsou nejvíce namáhány tahem a ohybem. Proto je zkouška tahem důležitá k získání znalostí o mechanických vlastnostech o součástech vyrobených aditivními technologiemi.



Obrázek 26: Zkouška tahem slitiny Ti-6Al-4V ELI [41]

Na obrázku 26 je vidět záznam z tahové zkoušky našeho materiálu (Ti-6Al-4V ELI) a vliv různých způsobů úpravy povrchu na konečnou pevnost. Mechanické vlastnosti slitin titanu

a hliníku jsou jedny z nejlepších, avšak jsou vysoce závislé na podmínkách při výrobě, to jak jsou tepelně namáhány nebo způsobu typ dokončovacích prací a tak dále. [41]

Z tahové zkoušky můžeme odečíst že vliv to jakým způsobem se komponenty z titanových slitin obrábí není vůbec zanedbatelný a může se lišit řádově stovkách megapascalů.

Materiál	Úprava povrchu	Re [MPa]	Rm [MPa]
Ti-6Al-4V ELI	Ne	897.0 ± 2.0	937.5 ± 1.3
	Ano	895.6 ± 1.1	963.0 ± 3.4

Tabulka 3: Pevnost v tahu [41]

Při uhlové rychlosti s jakou se točí rotor turbíny vznikají v lopatkách napětí 120 MPa

5.3 Životnost

Vývoj nových velkých turbín přináší nejen zvýšení účinnosti, ale i problémy, k nimž patří i únavové poškození oběžných lopatek zejména posledních stupňů.

Pro sledování tohoto problému se zavádí měření kmitání všech lopatek vybraných stupňů metodou označovanou jako BTT (Blade Tip Timing) založenou na přesném měření časů průchodů špiček lopatek kolem čidel umístěných ve statoru stroje. Touto metodou lze zjišťovat úroveň vibrací jednotlivých lopatek měřeného oběžného kola a jejich rezonanční frekvence. [3]

Životnost komponentu vyrobenou 3D tiskem byla odzkoušena experimentem na intermetalickém materiálu v složení titanu, chromu, hliníku a niobu (Ti-48Al-2Cr-2Nb). [40]

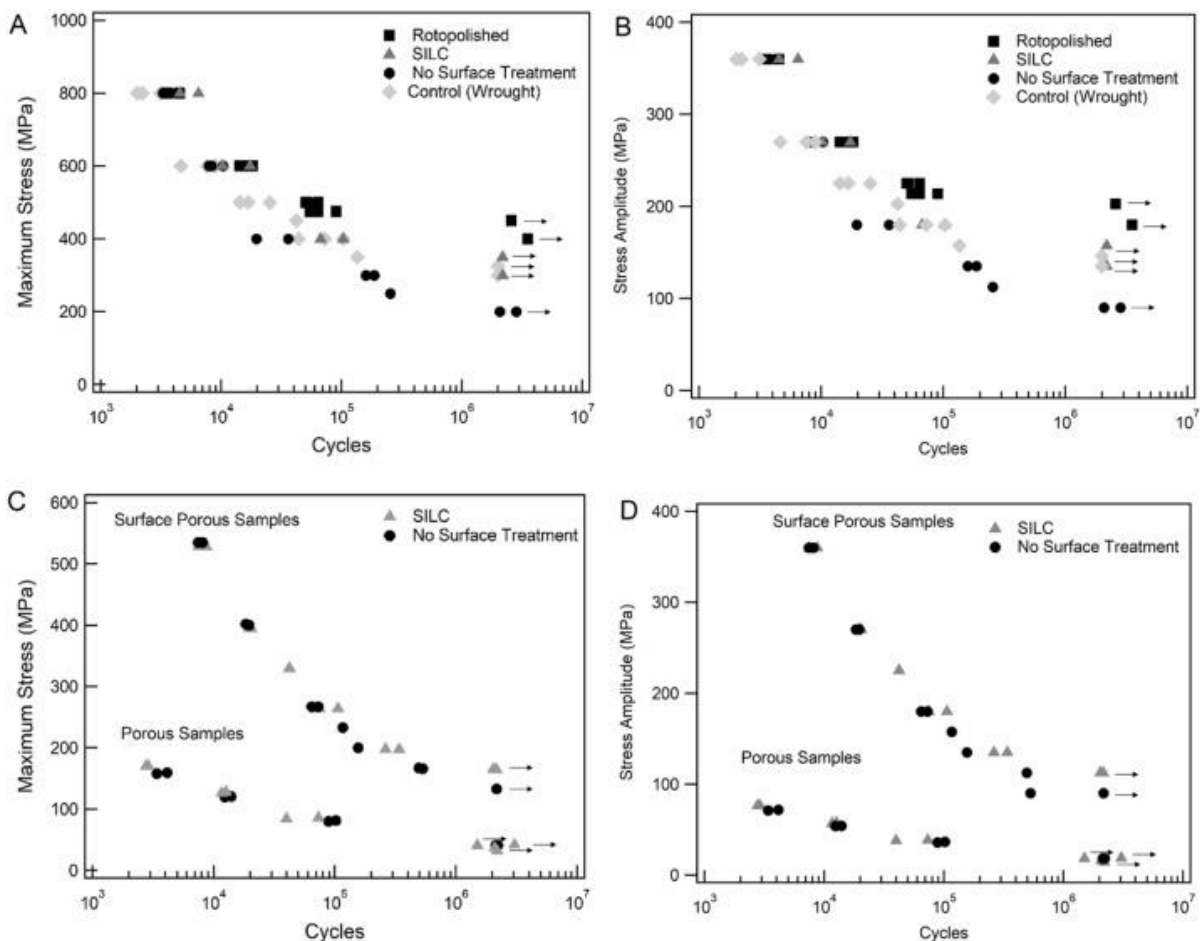
č. Testu	F _h [kN]	F _d [kN]	F _a [kN]	F _c [kN]	N _c [-]
1	20	0,5	10,25	9,75	414
2	18	0,5	9,25	8,75	13 814
3	16	0,5	8,25	7,75	30 183

Tabulka 4: Výsledky testu při 640°C [40]

Výsledky testu jsou v tabulce 3. Z které vyplývá že zkoušený model vydržel zhruba 30 000 cyklů než došlo k poškození. Protože v turbínách jsou i vysoké teploty tak zkouška byla vykonána při teplotě 640 °C. [40]

Struktúra materiálu	Typ úpravy povrchu	Σ_h [MPa]	Σ_a [MPa]
Kovaný	žádná	325	146.25
Pevný	žádná	200	90
Pevný	Rotopolish	450	202.5
Pevný	SILC clean	350	157.5
Porézní	žádná	40	18
Porézní	SILC clean	40	18
Povrchově porézní	žádná	133	59.85
Povrchově porézní	SILC clean	165	74.25

Tabulka 5: Únavové chování při $2 \cdot 10^6$ cyklech [41]



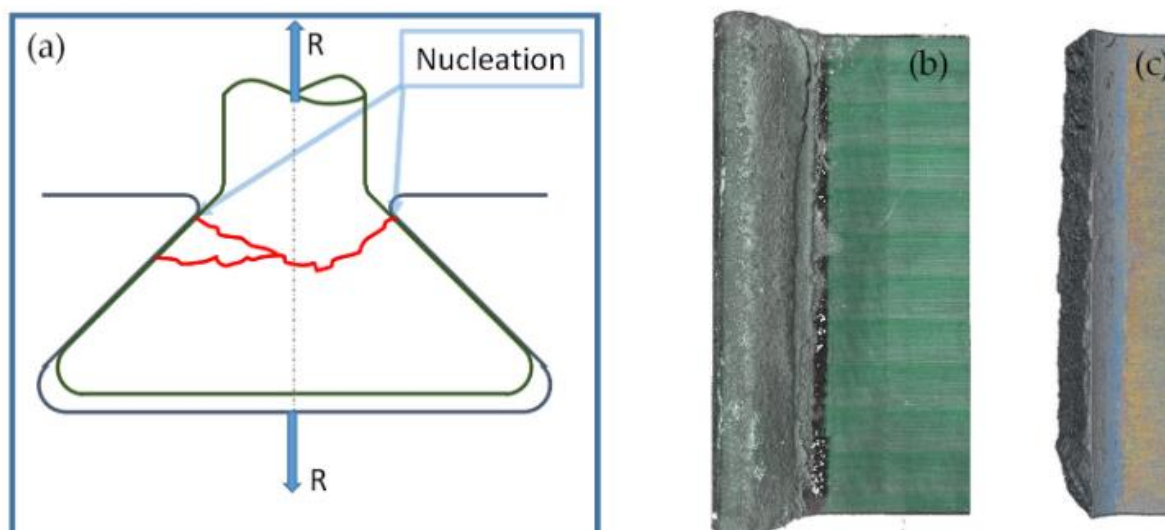
Obrázek 27: S-N křivka únavového chování vzorků [41]

Na obrázku 27 jsou znázorněny tzv. Whólerove křivky vzorků materiálu Ti-6Al-4V ELI. Vzorků je několik vždy s různým typem opracování a strukturou. Všechny vzorky jsou uvedeny v tabulce 5 i s jejich experimentálně naměřenými hodnotami.

Únavu materiálu neboli životnost se dá ovlivnit několika parametry. Jedním z nich je teplota. Teplota zásadně ovlivňuje životnost součástí, příklad toho je když se koukneme výše na tabulku 4 kde testovaný vzorek byl zahřátý na vysokou teplotu konkrétně 640 °C a výrazně se snížil počet cyklů. V porovnání běžné pokojové teploty vzorků experimentálně zkoumaných a vypsanych v tabulce 5 jde o značný rozdíl nejen co se velikosti namáhání týče ale i počtu cyklů.

Dalším faktorem důležitým faktorem je drsnost povrchu a jiné nedokonalosti. Lom vzorku nastává vždy v místě největší koncentrace napětí. Proto je úprava povrchu důležitá protože právě tyto nedokonalosti a nerovnosti slouží jako koncentrátoři napětí. Aditivní technologie produkuje komponenty s kvalitou povrchu nespĺňující požadavky nato aby mohli být rovnou zařazeny například na rotor turbíny a proto před tím putují na dokončovací práce.

Konstrukční návrh je taky jednou z věcí ovlivňující životnost. Proto se už při návrhu musí přistupovat k řešení jak minimalizovat riziko vzniku koncentrace napětí. Příklad je uveden na obrázku 28.



Obrázek 28: a) vývoj únavového lomu, b) před testem, c) po testu [40]

Nejvíce namáhanou částí u lopatek je oblast blízko disku co se potvrdilo i na konci testu kde došlo k únavového lomu v podobném místě. To je znázorněno na obrázku 26a. A na snímcích 26b a 26c skutečná vizualizace tvaru lomu. [40]

ZÁVĚR

Cílem mé bakalářské bylo shrnutí a popis vybraných metod aditivních technologií hlavně takové technologie které využívají kovové materiály. Dále v práci popisují vybrané komponenty parních a plynových turbín. Jsou to hlavně také komponenty které přicházejí do kontaktu s proudící tekutinou proto potřebují mít vynikající aerodynamické vlastnosti. Lopatky a hlavice hořáků v spalovacích komorách proto mají složitý tvar. Malou pozornost jsem věnoval taky využití aditivních technologií při výrobě výměníků tepla. Tento trend se v poslední době stává dosti populární, jde to ruku v ruce stále většího záběru využívání numerického výpočtového modelování v různých odvětví od sportu až po potravinářství.

Asi největší výhoda nebo přednost 3D tisku, je že dokáže vyrábět ve velice krátkém časovém úseku díly, které mají složitý tvar. A navíc to ani není finančně nákladné, kdy nejdražší část procesu je samotný materiál.

Mechanické vlastnosti které nás nejvíce zajímají jsou pevnost drsnost a životnost těchto strojních součástí. Pevnost se nijak zásadně neliší od hodnot, které by lopatky nebo jiné díly měli mít. U životnosti je to trochu komplikovanější, protože tam hraje roli více faktorů např. teplota, konstrukční návrh a v neposlední řadě kvalita povrchu. Ta mimochodem dopadla nejhůře ze všech tří vlastností.

Drsnosti povrchů vzorků vyrobených aditivní technologií měli velký odklon od požadovaných hodnot jaké by měla mít lopatka při průchodu páry. Když má nějaká součástka velké nerovnosti povrchu a je zatěžována cyklickým namáháním, což lopatky turbín často jsou, tak tyto nerovnosti se stávají koncentrátory napětí a vznikají tam místa odkud se začíná šířit lom. A by se toto riziko minimalizovalo a zvýšila se životnost, tak komponenty po skončení procesu v tiskárně pokračují na dokončovací práce. A potom už jsou připraveny na pracovní podmínky.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] YANG, L., K. HSU, B. BAUGMAN, D. GODFREY, F. MEDINA, M. MENON a S. WIENER. Additive manufacturing of metals: the technology, materials, design and production. New York, NY: Springer Berlin Heidelberg, 2017. ISBN 978-331-9551-272.
- [2] John Ryan C. DIZON, Alejandro H. EESPERA, Qiyi CHEN, Rigoberto C. ADVINCULA, Mechanical characterization of 3D-printed polymers, Additive Manufacturing, Volume 20, 2018, Pages 44-67, ISSN 2214-8604.
- [3] J.H. KOO, R. ORTIZ, B. ONG, H. WU, 8 - Polymer nanocomposites for laser additive manufacturing, Editor(s): Milan Brandt, In Woodhead Publishing Series in Electronic and Optical Materials, Laser Additive Manufacturing, 2017, Pages 205-235, ISBN 9780081004333,
- [4] *ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE* [online]. Copyright ©z [cit. 23.01.2019]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/podklady/sto_bak/cv_STV_04_Aditivni_technologie_metody_Rapid_Prototyping.pdf
- [5] Seshadev SAHOO, An approach toward multiscale modeling of direct metal laser sintering process, Metal Powder Report, Volume 74, Issue 2, 2019, Pages 72-76, ISSN 0026-0657
- [6] Aditivní technologie. Zpráva o stavu 3D tisku pro Českou technologickou platformu STROJÍTENSTVÍ, o.s. Josef Hodek - PDF. *Představujeme Vám pohodlné a bezplatné nástroje pro publikování a sdílení informací.* [online]. Copyright © DocPlayer.cz [cit. 19.05.2019]. Dostupné z: <http://docplayer.cz/18792004-Aditivni-technologie-zprava-o-stavu-3d-tisku-pro-ceskou-technologickou-platformu-strojitenstvi-o-s-josef-hodek.html>
- [7] History of Additive Manufacturing: Through the Years - Wazp. *Supply Chain for 3D Printing - Wazp* [online]. Dostupné z: <https://www.wazp.io/2018/07/25/history-of-additive-manufacturing-through-the-years/>
- [8] Selective Laser Sintering 3D Printing Services For Metal Prototype Printing. *CNC Machined Prototypes, China CNC Plastic Machining supplier* [online]. Dostupné z: <http://m.cncmachinedprototypes.com/sale-7497347d-selective-laser-sintering-3d-printing-services-for-metal-prototype-printing.html>
- [9] G. CASALINO, L.A.C. De FILIPPIS, A. LUDOVICO, A technical note on the mechanical and physical characterization of selective laser sintered sand for rapid casting, Journal of Materials Processing Technology, Volume 166, Issue 1, 2005, Pages 1-8, ISSN 0924-0136

- [10] Ph. BERTRAND, F. BAYLE, C. COMBE, P. GOEURIOT, I. SMUROV, Ceramic components manufacturing by selective laser sintering, Applied Surface Science, Volume 254, Issue 4, 2007, Pages 989-992, ISSN 0169-4332
- [11] World's first 3D printed plane 'Thor' unveiled in Berlin by Airbus' | Daily Mail Online. [online]. Copyright © dmg media [cit. 21.05.2019]. Dostupné z: <https://www.dailymail.co.uk/sciencetech/article-3627187/World-s-3D-printed-plane-unveiled-Airbus-windowless-Thor-aircraft-pave-way-cheaper-faster-flights.html>
- [12] BURGEROVÁ, Karla. Analýza defektů 3D tištěného kovového produktu. Praha, 2016. Bakalářská práce (Bc.). České Vysoké Učení v Praze, Fakulta Strojní, Ústav Technologie. 2016-08-05.
- [13] BARNATT, Christopher. 3D printing: Third Edition. 3. dopl. vyd. CreateSpace Independent Publishing Platform, 2016. ISBN 978-1539655466
- [14] Aurélien CARRÉ, Matthieu MUSEAU, Pierre-Thomas DOUTRE, Frédéric VIGNAT, A method to determine the depowdered height in lattices manufactured by electron beam melting, Journal of Manufacturing Processes, Volume 34, Part A, 2018, Pages 1-6, ISSN 1526-6125.
- [15] GIBSON, I., D. W. ROSEN a B. STUCKER. Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping and direct digital manufacturing. Second edition. Springer, 2015. ISBN 978-1-4939-2112-6.
- [16] Electron Beam Melting (EBM). In: <https://www.additively.com> [online]. [cit. 2019-05-22]. Dostupné z: <https://www.additively.com/en/learn-about/electron-beam-melting>
- [17] ŠKORPÍK, Jiří. Lopatkový stroj, *Transformační technologie*, 2009-08, [last updated 2018-09-26]. Brno: Jiří Škorpík, [on-line] pokračující zdroj, ISSN 1804-8293. Dostupné z <http://www.transformacni-technologie.cz/11.html>. English version: Turbomachine. Web: http://www.transformacni-technologie.cz/en_11.html.
- [18] KRBEK, J. Tepelné turbíny a turbokompresory, 1990. 3. vydání. Brno: Vysoké učení technické v Brně, ISBN 80-214-0236-9
- [19] ŠKORPÍK, Jiří. Základy aerodynamiky profilů lopatek a lopatkových mříží, *Transformační technologie*, 2009-10, [last updated 2019-01-10]. Brno: Jiří Škorpík, [on-line] pokračující zdroj, ISSN 1804-8293. Dostupné z <http://www.transformacni-technologie.cz/16.html>.
- [20] Lopatka turbíny . *Document Moved* [online]. Copyright © Sandvik Coromant [cit. 22.05.2019]. Dostupné z: https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/industrysolutions/condensing_power/gas_turbines/pages/turbine-blade.aspx

- [21] Jet Engine Theory and Design, Chapter 1.[online]. Copyright © [cit. 22.05.2019]. Dostupné z: http://navybmrc.com/study%20material/14008a/14008A_ch1.pdf
- [22] Gas Turbine Cfd | www.bilderbeste.com. *www.bilderbeste.com - die beste bilder seite!* [online]. Copyright © [cit. 22.05.2019]. Dostupné z: <https://bilderbeste.com/foto/gas-turbine-cfd-e4.html>
- [23] Trend vývoje nových oběžných koncových lopatek pro kondenzační parní turbíny Doosan Škoda Power | Technický týdeník. *TT | Technický týdeník* [online]. Copyright © Business Media CZ, Nádražní 32, 150 [cit. 22.05.2019]. Dostupné z: https://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv/trend-vyvoje-novych-obeznich-koncovych-lopatek-pro-kondenzacni-parni-turbiny-dooan-skoda-power_36982.html
- [24] 3D CAD Model Collection | GrabCAD Community Library. *GrabCAD: Design Community, CAD Library, 3D Printing Software* [online]. Copyright © 2019 GrabCAD, a STRATASYS solution [cit. 22.05.2019]. Dostupné z: <https://grabcad.com/library/turbine-blade--15>
- [25] Gas turbine blade manufacturing. *Document Moved* [online]. Copyright © Sandvik Coromant [cit. 22.05.2019]. Dostupné z: https://www.sandvik.coromant.com/en-gb/industrysolutions/condensing_power/gas_turbines/pages/turbine-blade.aspx
- [26] Tian LEI, Joe ALEXANDERSEN, Boyan S. LAZAROV, Fengwen WANG, Jan H.K. HAERTEL, Salvatore De ANGELIS, Simone SANNA, Ole SIGMUND, Kurt ENGELBRECHT, Investment casting and experimental testing of heat sinks designed by topology optimization, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Volume 127, Part B, 2018, Pages 396-412, ISSN 0017-9310
- [27] 307 Temporary Redirect. *307 Temporary Redirect* [online]. Dostupné z: <https://www.fiverr.com/aakcounselling/do-a-topology-optimization-for-your-design>
- [28] Turbine blade radial loading spring segment, turbine rotor and blade assembly and method of mounting turbine blade on rotor. *Patent search, search patents and inventions, was in the registers of intellectual property and inventions of the Russian Federation and the USSR* [online]. Copyright © Patent and invention search [cit. 23.05.2019]. Dostupné z: <https://russianpatents.com/patent/233/2331774.html>
- [29] PARA, Marcel. *Návrh výměníku tepla*. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2018. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/108814?zp_id=108814
- [30] JECHORT, Petr. Turbíny 3D tiskárny ob stojí [online]. cit. [23.05.2019]. Dostupné z: <https://energetika.tzb-info.cz/elektroenergetika/16017-turbiny-z-3d-tiskarny-obstoji>
- [31] Brennerköpfe für Gasturbinen aus dem 3D-Drucker von Siemens. *KEM Konstruktion - Technikportal für Konstrukteure* [online]. Copyright © 2019 Konradin Mediengruppe [cit. 23.05.2019]. Dostupné z: <https://kem.industrie.de/themen-digitalisierung/additive-manufacturing/brennerkoepfe-fuer-gasturbinen-aus-dem-3d-drucker-von-siemens/>

- [32] Siemens už tiskne díly pro turbíny | ENERGY-HUB. *ENERGY-HUB* [online]. Copyright ©ENERGY [cit. 23.05.2019]. Dostupné z: <https://admin.energyhub.eu/articles/detail?quick=18853-siemens-uz-tiskne-dily-pro-turbiny&category=4&locale=cz>
- [33] Siemens při výrobě plynových turbín spoléhá na 3D tisk kovů – Konstrukter.cz. *Konstrukter.cz – CAD/CAM, 3D tisk a konstruování výrobků* [online]. Copyright © Všechna práva vyhrazena. [cit. 23.05.2019]. Dostupné z: <https://www.konstrukter.cz/siemens-pri-vyrobe-plynovych-turbin-spoleha-na-3d-tisk-kovu/>
- [34] The Powder Bed Fusion-Laser process [Thompson, 2015] | Download Scientific Diagram. *ResearchGate / Share and discover research* [online]. Copyright © ResearchGate 2019. All rights reserved. [cit. 23.05.2019]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/The-Powder-Bed-Fusion-Laser-process-Thompson-2015_fig6_322745270
- [35] 400 Bad Request. [online]. Copyright © 2016 cPanel, Inc. [cit. 23.05.2019]. Dostupné z: <http://www.insidemetaladditivemanufacturing.com/blog/how-to-optimise-top-surface-roughness-of-high-value-metal-components#>
- [36] NEZDAŘILÍKOVÁ, M. Metrologická konfirmace měřidla. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 36 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Petr Koška, Ph.D..
- [37] GILGE Philipp, HOHENSTEIN Sebastian, SEUME Jorge R.. Experimental Investigation of Aerodynamic Effect of Local Surface Roughness on Turbine Blade. Volume 9, Number 3. Institute of Turbomachinery and Fluid Dynamic Leibniz Universitat Hannover. 2017.
- [38] KLINGVALL Rebeca Ek, RANNAR Lars-Erik, BACKSTROM Mikael, CARLSSON Peter, (2016) "The effect of EBM process parameters upon surface roughness", *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 22 Issue: 3, pp.495-503, <https://doi.org/10.1108/RPJ-10-2013-0102>
- [39] *Informační portál časopisu All for Power* [online]. Copyright © [cit. 24.05.2019]. Dostupné z: http://www.allforpower.cz/UserFiles/file/baltus_clanek.pdf
- [40] LAVELLA M., BOTTO Daniele. (2018). Fretting Fatigue Analysis of Additively Manufactured Blade Root Made of Intermetallic Ti-48Al-2Cr-2Nb Alloy at High Temperature. *Materials*. 11. 1052. 10.3390/ma11071052.
- [41] KELLY Cambre N., EVANS Nathan T., IRVIN Cameron W., CHAMPAN Savita C., GALL Ken, SAFRANSKY David L., The effect of surface topography and porosity on the tensile fatigue of 3D printed Ti-6Al-4V fabricated by selective laser melting, *Materials Science and Engineering: C*, Volume 98, 2019, Pages 726-736, ISSN 0928-4931

- [42] *Home - Royal Academy of Engineering* [online]. Copyright ©P [cit. 24.05.2019].
Dostupné z: <https://www.raeng.org.uk/publications/other/22-blade-forces>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbol	Veličina	Jednotka
Ra	Střední aritmetická úchylka profilu	μm
Rz	Největší výška profilu	μm
Rq	Průměrná kvadratická úchylka profilu	μm
F _h	Maximální zatížení	kN
F _d	Minimální zatížení	kN
F _a	Průměrná hodnota zatížení	kN
F _c	Cyklycké zatěžování	kN
N _c	Počet cyklů	-
Σ _h	Horní napětí	MPa
Σ _a	Amplituda napětí	MPa