



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

METODY PRO ÚPRAVU JAKOSTI POVRCHU KOMPONENT VYTVOŘENÝCH 3D KOVOVÝM TISKEM

METHODS FOR SURFACE IMPROVEMENT OF COMPONENTS PROCESSED USING SELECTIVE LASER
MELTING

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Martin

Krontorád

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Martin Malý

BRNO 2022

Assignment Bachelor's Thesis

Institut: Institute of Machine and Industrial Design
Student: **Martin Krontorád**
Degree programm: Engineering
Branch: Fundamentals of Mechanical Engineering
Supervisor: **Ing. Martin Malý**
Academic year: 2021/22

As provided for by the Act No. 111/98 Coll. on higher education institutions and the BUT Study and Examination Regulations, the director of the Institute hereby assigns the following topic of Bachelor's Thesis:

Methods for surface improvement of components processed using Selective Laser Melting

Recommended bibliography:

SANAEI, Niloofar a Ali FATEMI. Analysis of the effect of surface roughness on fatigue performance of powder bed fusion additive manufactured metals. Theoretical and Applied Fracture Mechanics [online]. 2020, 108(March), 102638. ISSN 01678442. Dostupné z: doi:10.1016/j.tafmec.2020.102638

DENTI, Lucia a Antonella SOLA. On the Effectiveness of Different Surface Finishing Techniques on A357.0 Parts Produced by Laser-Based Powder Bed Fusion: Surface Roughness and Fatigue Strength. Metals [online]. 2019, 9(12), 1284. ISSN 2075-4701. Dostupné z: doi:10.3390/met9121284

Deadline for submission Bachelor's Thesis is given by the Schedule of the Academic year 2021/22

In Brno,

L. S.

prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.
Director of the Institute

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.
FME dean

ABSTRAKT

Ať už v automobilovém a leteckém průmyslu, nebo snad i při výrobě kloubních implantátů, 3D kovový tisk nabízí spoustu využití. Povrch takto vytvořených komponent má nedostatečnou kvalitu, a tím přímo ovlivní únavovou životnost komponenty. Některé standardně používané metody na úpravu povrchu jsou pro komponenty vytvořené aditivní technologií se složitou geometrií nevhodné. Bakalářská práce nabízí přehled povrchových úprav, které jsou vhodné pro použití na aditivně vyrobené komponenty. Hlavním zaměřením jsou materiály Ti-6Al-4V a Inconel 718. Je popsán vliv jednotlivých metod na mechanické vlastnosti. Posledním částí je návrh vhodného zpracování pro modelové typy komponent. Užitek práce se dá najít v seznámení čtenáře s problematikou a jejím vývojem, kritickém posouzení jednotlivých možností úpravy povrchu a pomoci při důkladném výběru vhodné povrchové úpravy pro specifickou komponentu.

KLÍČOVÁ SLOVA

úprava povrchu, aditivní technologie, Selective Laser Melting, vliv na mechanické vlastnosti

ABSTRACT

Power bed fusion is advantageously being used for manufacturing of not only critical automotive and aerospace components, but even for biomedical implants. As-built components suffer from poor surface quality. The quality of surface directly affects fatigue behaviour. Some of the commonly used surface finishing methods are not suitable for additively manufactured components with intricate geometries. This bachelor thesis is focused on description of suitable methods for such components. The centre of attention is on Ti-6Al-4V and Inconel 718. The impact of each one of the methods on mechanical properties is discussed. Lastly a procedure of surface finishing for model cases of theoretical components is proposed. The main takeaway from this paper is understanding the obstacle that poor quality of surface to additively manufactured parts is and different solutions, to this problem, that described methods offer. Subsequently a critical analysis of the usability of the methods and help with designing a surface treatment procedure is offered.

KEYWORDS

surface finish, additive manufacturing, Selective Laser Melting, impact on mechanical properties

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KRONTORÁD, Martin. *Metody pro úpravu jakosti povrchu komponent vytvořených 3D kovovým tiskem*. Brno, 2022. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/139688>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování. Vedoucí práce Martin Malý.

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Martinu Malému za odborné vedení, trpělivost, ochotu a přínosné rady.

PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE

Prohlašuji, že bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně, pod odborným vedením Ing. Martina Malého. Současně prohlašuji, že všechny zdroje obrazových a textových informací, ze kterých jsem čerpal, jsou řádně citovány v seznamu použitých zdrojů.

.....
Podpis autora

OBSAH

1	ÚVOD	13
1.1	Úvod	13
2	ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE	15
2.1	Analýza problému	15
2.2	Cíl práce	16
3	PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ	17
3.1	Mechanické vlastnosti	18
3.1.1	Vliv kvality povrchu na únavovou životnost	18
3.1.2	Tepelné zpracování	19
3.2	Mechanické metody	20
3.2.1	Obrábění	20
3.2.2	Omílání	22
3.2.3	Pískování	24
3.2.4	Kuličkování	26
3.3	Tepelně ovlivňující metody	28
3.3.1	Laserové leštění	28
3.3.2	Elektronový paprsek	31
3.4	Chemické a Elektrochemické metody	33
3.4.1	Elektrolytické leštění	33
4	DISKUZE	36
4.1.1	Interpretace informací	36
4.1.2	Obrábění	36
4.1.3	Omílání	37
4.1.4	Pískování	38
4.1.5	Kuličkování	38
4.1.6	Laserové leštění	39
4.1.7	Elektronový paprsek	41
4.1.8	Elektrolytické leštění	41
4.1.9	Návrh povrchových úprav	43
5	ZÁVĚR	45
6	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	47

7	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN	54
7.1	Příklady použitých fyzikálních veličin	54
8	SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ	55

1 ÚVOD

1.1 Úvod

S využitím aditivních technologií jsme schopni vytvořit součást přímo z 3D modelu. Technologie nabízí spoustu výhod, mimo jiné třeba možnost vytvoření komplikovaných tvarů a úsporu materiálu oproti třískovému obrábění. Atraktivní jsou i možnosti nižších hmotností u součástí se srovnatelnou pevností, nebo třeba možnost ušetření času při vytváření modelu nebo prototypu [1].

3D kovový tisk spojuje standardní výhody aditivních technologií s možností použití materiálů s výbornými pevnostními vlastnostmi. Výsledkem je přímé tvoření komponent nabízejících unikátní mechanické vlastnosti. 3D kovový tisk je nejenom vděčným výzkumným tématem, ale je aktivně používán při výrobě dílů, například pro letecký a automobilový průmysl, nebo také pro výrobu kloubních náhrad [2].

Přes značné množství výhod, má technologie své vlastní limity, které je potřeba vyřešit pro úspěšné použití vytvořených komponent. Významnými překážkami jsou například zbytková napětí vnesená do komponent, nižší kvalita povrchu, defekty, omezené množství zpracovatelných materiálů nebo horší mechanické vlastnosti. Hlavním tématem této práce bude kvalita povrchu a s ní související mechanické vlastnosti, především únavová životnost. Stěžejním budou povrchové úpravy komponent z materiálů používaných mimo jiné pro účely leteckého průmyslu, tedy Ti-6Al-4V a Inconel 718.

Hlavním důvodem pro potřebu hledání nových metod pro úpravy jakosti povrchu je samotná komplexní geometrie vytvořených dílů. Možnost pomocí aditivních technologií vytvářet složité tvary je významnou výhodou této technologie, omezuje však vhodnost použití standardních dokončovacích operací na povrch komponenty. Těchto operací, jako například obrábění, broušení nebo lapování je však možné a doporučeno použít na úpravu funkčních ploch komponenty. Funkční plochy lze s výhodou upravit až po provedení úprav povrchu nefunkčních ploch. Hlavním důvodem je schopnost standardních technologií nabídnout v mnoha případech lepší poměr rozměrové přesnosti a drsnosti povrchu, nemusí to však být vždy pravidlem.

Drsnost povrchu vytvořené komponenty se může standardně pohybovat v rozmezí od Ra 8 do 40 μm [3]. Kvalita povrchu vytvořené komponenty je výrazně závislá na procesních parametrech, geometrických specifikacích dané plochy a velikosti zrn použitého prášku. Proces postupného vrstvení materiálu může vést ke schodovému efektu na povrchu. Natavení okolních částic k povrchu také přispívá ke zvýšení jeho drsnosti.

Dále jakost povrchu není na celé komponentě zcela shodná. Ovlivní ji úhel sklonu, pod kterým je daná plocha vytvořena, nebo orientace plochy. Spodní plocha má výrazně nižší kvalitu povrchu, protože je stavěna na samotný prášek, který má nižší tepelnou vodivost. Pomalejší odvod energie zapříčiní částečné natavení více okolních částic k povrchu [4].

Hrubý povrch se chová jako koncentrátor napětí materiálu, ze kterého mohou být postupně iniciovány trhliny a významně tak snižuje únavovou odolnost komponenty [3]. Ovlivní také například proudění tekutin okolo dílu, rozměrovou přesnost a je celkově ve většině potenciálních použití nežádáný.

Cílem práce je zpracovat metody povrchové úpravy aditivně vyráběných kovových komponent. Při zpracování je kladen důraz na vliv úpravy na mechanické vlastnosti a použitelnost úprav pro určené materiály a geometrie. Výsledkem bude návrh konkrétních metod pro modelové případy komponent, které usnadní čtenáři výběr povrchové úpravy jeho dané komponenty. Modelové případy budou reflektovat geometrii komponenty a její požadavky na kvalitu povrchu a únavové vlastnosti.

2 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

2.1 Analýza problému

Ať už v automobilovém a leteckém průmyslu, nebo snad i při výrobě kloubních implantátů, 3D kovový tisk nabízí spoustu využití. Přímému implementování takto vytvořené součásti brání horší kvalita povrchu. Samotný povrch je důležitý kvůli rozměrové přesnosti, proudění tekutin nebo únavovým vlastnostem komponenty.

Standardně používané metody nejsou vhodné pro úpravu složitých tvarů nefunkčních povrchů. Ruční leštění je jednou z používaných možností [5], vyžaduje ale kvalifikované pracovníky a je časově velmi náročné. Z těchto důvodů je snaha o používání nových metod. Aditivní technologie jsou stále rostoucím atraktivním tématem. Tímto problémem se zajímá už nepřeberné množství studií a přehled usnadňující náhled do problematiky je žádoucí.

Každý materiál může reagovat na metodu jinak, jinak ovlivnit mechanické vlastnosti a úprava může přinést jiné výsledky drsnosti povrchu. Technologií na 3D kovový tisk je několik, komponenty vytvořené rozdílnými technologiemi mají odlišné vlastnosti. Je potřeba zhodnotit, zda výsledky povrchových úprav na komponenty vytvořené jinou technologií mají smysl, a odhadnout na kterých se to podepíše.

Při úpravách drsnosti povrchu se dají sledovat výrazné změny mechanických vlastností. Tvrdost povrchu může být snížena použitím chemikálií a čas omílání tím zkrácen [6]. Je možné do povrchu zavést kuličkováním zbytková napětí, která zlepšují únavovou životnost komponenty [7]. Použit se na jednu komponentu dají dokonce obě metody. Stanovení posloupnosti metod nebo kritické zhodnocení jejich synergického využití je potřebné pro optimální návrh povrchových úprav splňujících specifické požadavky dané komponenty. Na základě důkladné rešerše bude navrhnout postup úpravy povrchu pro několik modelových případů potenciálních komponent.

2.2 Cíl práce

Cílem práce je zpracovat současný stav poznání v oblasti metod pro úpravu povrchů aditivně vyráběných kovových komponent.

Dílčí cíle bakalářské práce:

- zpracovat rešerši o metodách pro úpravu povrchu komponent
- stanovit vliv jednotlivých metod úpravy povrchu na mechanické vlastnosti komponent.
- navrhnout vhodné zpracování povrchu pro daný materiál a typ zatížení.

3 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

Tato kapitola je dělena do 4 částí, v první je věnována pozornost vlivu kvality povrchu na mechanické vlastnosti. V této části je vyzdvihnuta důležitost povrchové úpravy pro dosažení vysoké pevnosti a vysoko-cyklové únavové životnosti komponent vytvořených aditivní technologií. Je sledován důvod tohoto efektu a je poukázáno na řešení pro komponenty, na které máme nejvyšší nároky.

Další tři části obsahují zkoumané metody pro úpravy povrchu. Byly rozděleny do tří kapitol popisujících způsob úpravy povrchu. První kapitola obsahuje metody, které povrch ovlivňují za použití mechanických sil. V druhé kapitole jsou popsány metody upravující povrch výrazným tepelným působením. V třetí kapitole jsou metody fungující na chemickém principu případně elektrochemické bázi. Některé metody se překrývají a rozdělení není absolutní, nýbrž reflektuje subjektivní pohled autora.

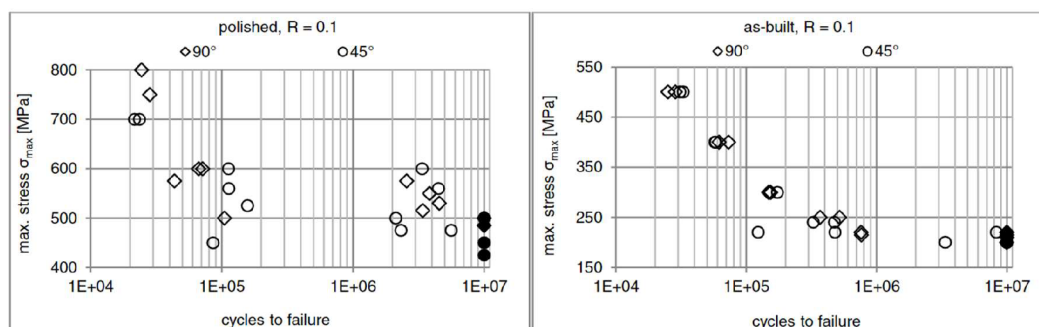
Ideální posloupnost operací závisí na použitých metodách. Každá ovlivní komponentu jiným způsobem a optimální postup je závislý na konkrétní aplikaci a požadavcích na danou komponentu. Obecně platí, že je výhodné provést případné tepelné zpracování před úpravou povrchu. Je tomu tak kvůli deformacím, které by mohly vzniknout, mírnému zhoršení povrchu, snížení tvrdosti povrchu. Dále by tepelné zpracování mohlo odstranit povrchové napětí, které jsme do komponenty mohli cíleně zavést například kuličkováním. Platí pro většinu metod, že výsledná kvalita povrchu je závislá na kvalitě povrchu před operací, je tedy dobré použít ty nejpřesnější metody v pozdější fázi procesu. Nakonec je výhodné zvážit vliv na mechanické vlastnosti komponenty. V některých případech jsme ochotni provést takovou poslední úpravu, která může i zvýšit drsnosti povrchu, ale například výrazně zvýší únavovou pevnost.

3.1 Mechanické vlastnosti

3.1.1 Vliv kvality povrchu na únavovou životnost

Ve studii [3] bylo pozorováno porušování součástí vyrobených z Ti-6Al-4V technologií 3D kovového tisku s neupraveným povrchem. K lomu došlo po propojení mnoha odlišných únavových trhlin šířících se z povrchu. Šíření kritických trhlin z povrchu naznačuje, že limitující faktor k lepším únavovým vlastnostem je v tomto případě kvalita povrchu. Ve studii [2] bylo však sledováno, že u podobně vyrobených dílů, ale s obrobeným povrchem, se většinou jedná o růst z jednoho defektu vyskytujícího se pod povrchem. Růst kritických trhlin z defektů pod povrchem vypovídá o tom, že limitujícím faktorem únavové životnosti v tomto případě už není kvalita povrchu. Další zlepšování kvality povrchu tedy už nepovede k výraznému zlepšení únavové životnosti.

Bylo sledováno, že dostatečným zvýšením kvality povrchu, v tomto případě pomocí leštění, je možné dosáhnout až dvojnásobné únavové pevnosti u z Ti-6Al-4V viz. (Obr. 3-1) [8]. Samotné obrobení je nejčastější a velice efektivní způsob úpravy povrchu. Ačkoliv zlepšení kvality povrchu výrazně zvýší únavové vlastnosti, nebude vliv takovéto úpravy tak markantní, jako u součástí zcela vyrobených úběrem třísky. Bude tomu tak kvůli už zmíněným defektům chovajícím se jako koncentrátor napětí [4].



Obr. 3-1 Grafy popisující únavovou životnost komponenty [8]

Dále bylo sledováno, že reakce na cyklické namáhání, kterou vzorky vyrobené 3D kovovým tiskem Ti-6Al-4V s upraveným povrchem budou mít, nebude jednotná. Významné rozdíly v počtech cyklů, které vzorky vydržely, jsou přičítány rozdílným velikostem a umístěním vnitřních defektů, z kterých vznikly kritické trhliny [8]. V práci je uvedeno, že výsledky pro díly s upraveným povrchem, které se zlomily v intervalu napětí od 400 MPa do 600 MPa, se přibližně shlukují okolo podobných počtů cyklů viz. (Obr. 3-1). Jedna skupina vzorků vydrží výrazně méně než 1×10^6 cyklů a druhá hodnotu přesvědčivě překoná. Po dalším zkoumání bylo zjištěno, že u vzorků, u kterých došlo k předčasnému porušení, tak došlo v blízkosti povrchu. U ostatních vzorků kritická trhlina postupovala z místa více vzdáleného povrchu. Únavová životnost je tedy také významně definována vnitřní strukturou a je problematické ji po použití pouze povrchových úprav bezpečně určit.

Nízká kvalita povrchu tedy významně ovlivní únavovou životnost, ale úprava povrchové kvality není v mnoha případech dostatečná. K dosažení lepších únavových vlastností je potřeba využít dalších technologií, efektivní v tomto směru se zdá být tepelné zpracování [9, 10].

3.1.2 Tepelné zpracování

Tepelné zpracování se provádí například za účelem snížení zbytkových napětí, sjednocení mikrostruktury komponenty nebo zvýšení creepové odolnosti. Často zmiňovanou metodou, vhodnou pro komponenty vytvořené metodou Selective Laser Melting (SLM), je izostatické lisování za tepla (HIP). Reference na tuto metodu se vyskytují v publikacích sledovaných v této práci, metoda je používána v kombinaci s těmito povrchovými úpravami. Hlavním důvodem je snížení vlivu podpovrchové porozity na sledovaný výsledek mechanických vlastností.

HIP je metoda, při které působí inertní plyn o vysoké teplotě, až 0,7 násobek teploty tavení, a vysokém tlaku na komponentu. Takto snižuje porozitu součásti, zbavuje ji zbytkových napětí a snižuje množství a rozměry materiálových defektů [9]. Dále metoda pomáhá sjednotit mechanické vlastnosti vytištěných dílů. Původní výrazné rozdíly mechanických vlastností mezi jednotlivými stejně vyrobenými díly, způsobené porozitou, defekty a nehomogenitou, jsou tedy sníženy [11]. Sjednocení mechanické odezvy dílů je důležité pro použití dílů v kritických aplikacích a snížení nejistoty konstrukce.

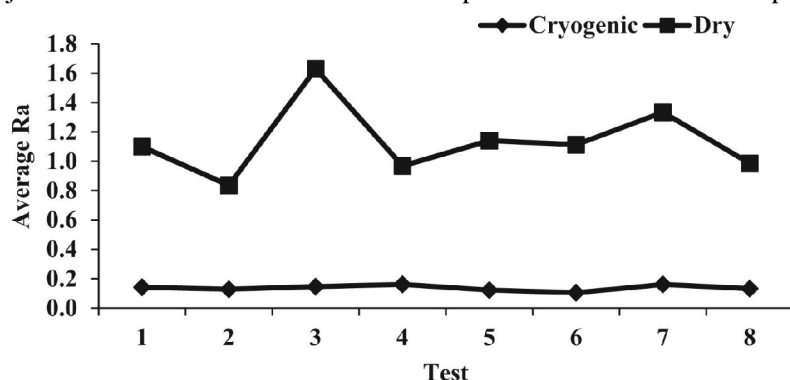
3.2 Mechanické metody

3.2.1 Obrábění

Obrábění je standardním postupem, pomocí kterého je možné dosáhnout vysokých kvalit povrchu a výborné rozměrové přesnosti. Používáno bude na úpravu funkčních ploch, které pro to mají vhodnou geometrii. Právě geometrie je jasným omezením použitelnosti metody.

Obrábění slitiny Inconel 718 je problematické. Materiál je většinou používán kvůli nízké tepelné roztažnosti a zachování pevnosti i za vysokých teplot. Jeho vysoká pevnost, nízká tepelná vodivost a tendence se zpevňovat je ale překážkou k takovému zpracování. Dochází k významnému hromadění tepla na nástroji a ten podléhá rychlému opotřebení. Dalším problémem je abrazivní opotřebení od velice tvrdých, přitavených, částic na povrchu. Výsledkem je kratší životnost nástrojů, která celou operaci významně prodraží [12].

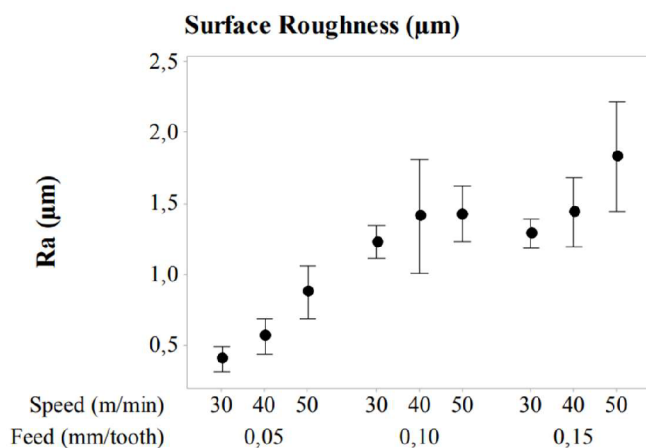
Jsou vyvíjeny metody pro lepší možnosti úpravu povrchu tohoto materiálu. Ve článku [13] je sledován vliv na obrábění pod přívodem tekutin kryogenních teplot, v tomto případě tekutého dusíku. Bylo dosaženo opravdu uspokojivých výsledných drsností povrchu nižších než Ra 0,2 μm a zároveň prodloužení životnosti použitého nástroje. To je významný pokrok, protože standardní mazání se v tomto případě nezdá být dostatečně efektivní [14]. Hlavním úskalím konvenčního mazání jsou obrovské teploty, které vypaří mazivo. Vytvořené výpary tvoří ochranný oblak, který brání vstupu dalšího maziva a efektivnímu chlazení. Výhodou kryogenního chlazení je také, že vypařený dusík neohroží zdraví pracovníků, takže rizika jsou snížena a není potřeba tolik bezpečnostních opatření.



Obr. 3-2 Výsledná drsnost povrchu obrábění při kryogenní teplotě [13]

Obrábění Ti-6Al-4V provázejí podobné problémy. Ve studii [15] bylo pozorováno soustružení daného materiálu za kryogenních teplot. Bylo dosaženo drsnosti povrchu komponenty po soustružení Ra 0,66 μm , o 22 % nižší než při použití standardního maziva.

K obrábění Inconelu 939 je limitované množství informací. Ve studii [16] je popsán proces s použitím karbidových nástrojů a relativně nízkých řezných rychlostí. Po použití tepelného zpracování dochází ke zvýšení tvrdosti povrchu až o 30 % a po obrábění dochází ke dalšímu zvýšení. Materiál, který byl nejdříve tepelně upraven a poté obroben, skončil se znatelně nižší výslednou drsností povrchu než ten, který TZ neprošel. Dále byl sledován vliv posuvné a řezné rychlosti na výslednou drsnost povrchu viz. (Obr. 3-3). Byl sledován trend znatelně lepší kvality povrchu pro nižší posuvné a řezné rychlosti.



Obr. 3 3 Závislost výsledné drsnosti povrchu na řezné a posuvné rychlosti [16]

3.2.2 Omílání

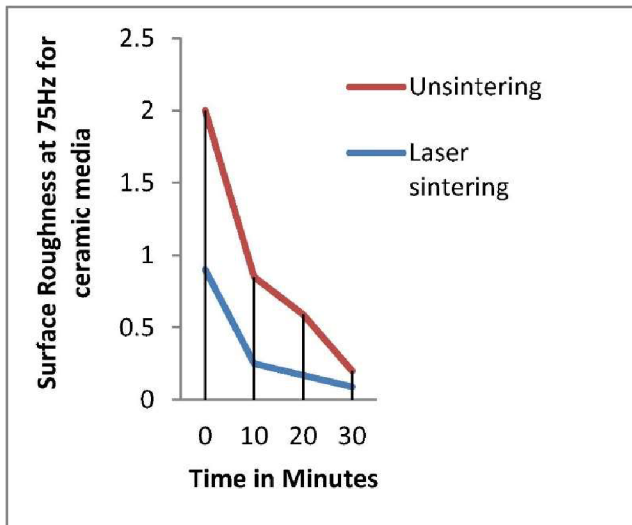
Jedná se o proces, ve kterém je dutá nádoba naplněna většinou keramickými tělísky. Tělíska vibračně rozpožbuje pomocí vnějšího vibračního pohonu připojeného k nádobě přes pružiny. Nejčastější variantou je použití elektromotoru s nevývahou [17]. Do nádoby jsou umístěny díly, jejichž povrch je opakovanými nárazy upravován mechanismy abrazivního opotřebenění a plastických deformací. Pomocí plastických deformací jsou do povrchu komponenty zaváděny zbytková napětí, dále upravující mechanické vlastnosti komponenty. Proces většinou probíhá za frekvenci mezi 10-75 Hz a při amplitudě od 1-10 mm. Je časté přidání procesní látky, ať už vody, pasty nebo chemické sloučeniny [18, 19].

Výsledná drsnost povrchu je významně ovlivněna procesními parametry a je přímo závislá na časové délce procesu. Čím déle jsou díly omílány, tím lepší mají zpravidla povrch. Zároveň se ale dá sledovat větší úbytek materiálu. Dále proces ovlivní typ a rozměry tělísek a případně použitá přísada. Často je omílání používáno jako mezikrok při použití několika operací ke zlepšení výchozí drsnosti, ale není dosaženo dostatečné kvality povrchu. Toto se dá sledovat ve studii [7], kde bylo dosaženo změny drsnosti povrchu Ti-6Al-4V z původní Ra 6,83 μm na Ra 4,96 μm . Zároveň bylo sledováno zlepšení v únavové pevnosti přes 40% počáteční hodnoty.

Ve studii [20] byly komponenty ze stejného materiálu podrobeny podobné metodě s rozdílnými výsledky. Je uvedeno snížení drsnosti povrchu z počáteční hodnoty Ra 17,9 μm na Ra nižší než 1,6 μm . Komponenty byly upravovány ve dvou cyklech. První, a podle autora pro výslednou drsnost významnější, trval 39 hodin. Je uvedeno, že byly použity drobné abrazivní částice vhodné právě pro daný materiál a tekutá sloučenina, ale přesné detaily nebyly uvedeny.

Možnost dosáhnout nízké drsnosti u komponent z Ti-6Al-4V na rovné ploše je potvrzena i ve studii [21]. Na základě omílání chemikálií oslabeného povrchu, bylo dosaženo drsnosti povrchu Ra nižší než 0,5 μm z průměrné původní hodnoty Ra 6,5 μm . Jedná se o komerčně využívanou technologii, specifické informace nebyly ve studii přímo uvedeny. Technologie je dohledatelná pod komerčním názvem: Isotropic Superfinishing (ISF). Metoda se zdá být účinná i na komponenty z jiných materiálů. Ve studii je dále zmíněn Inconel 625, sledována byla změna Ra z 5,4 μm na 0,18 μm . Společnost REM nabízí povrchovou úpravu i pro Inconelu 718 [22].

Povrch u součásti vytvořené kovovým 3D tiskem Inconelu 718, metodou Selective Laser Sintering (SLS), během omílání byl monitorován ve studii [18]. Byl sledován efekt frekvence, pod kterou aparát vibroval, na konečnou drsnost povrchu komponent. Dále byl do grafu viz. (Obr. 3-4) vyznačen vliv časové délky úpravy. Celou historii úprav autor neuvádí, vyznačena je pouze skupina vzorků, jejichž povrch byl laserem upraven pro lepší natažení částic a nižší vstupní drsnost povrchu. Nejlepší výsledky byly dosaženy za nejvyšší studované frekvence 75 Hz.



Obr. 3-4 Výsledná drsnost povrchu při 75 Hz v závislosti na čase [18]

Z výsledků uvedených v grafu viz. (Obr. 3-4) je patrné, že už po 30 minutách bylo u obou skupin vzorků dosaženo drsností nižších než Ra 0,5 μm . S ohledem na počáteční drsnost se zdá být efekt povrchové úpravy na dané díly srovnatelný. Rozdíl mezi skupinami komponent byl v tvrdosti na povrchu dílu. Na laserem upraveném povrchu byla naměřena až od 50% větší tvrdost a také byla sledována snížená porozita.

3.2.3 Pískování

Pískování je jedna s dalších možností úpravy povrchů s obtížnou geometrií. Funguje na základě narážení jemných keramických částic s velkou kinetickou energií na povrch tělesa. Je výborná na vyrovnávání vyvýšenin a větších prohlubní, které by mohly být po vytisknutí [23]. Samo o sobě pískování nedosáhne nejvyšších kvalit povrchu, ale je rychlé, velice jednoduché a dobré pro použití jako mezikrok.

Od pískování se dá očekávat změna drsnosti povrchu například z 39,8 μm na 24,3 μm [24]. Sledována byla u komponent vytvořených technologií Electron Beam Melting (EBM) z Ti-6Al-4V. V další studii [25] byla popsána změna drsnosti povrchu z Ra 17,9 μm na Ra 10,1 μm . Komponenty byly vytvořeny metodou SLM ze stejného materiálu. Výsledná drsnost závisela významně na původní drsnosti, ale bylo možné ji ovlivnit parametry pískování a použité keramiky.

Ovlivněním drsnosti pomocí změny parametrů pískování se zabývali [26]. Studie samotná není zaměřená na maximální možné snížení povrchové drsnosti pomocí pískování, nýbrž dosáhnouti specifické drsnosti povrchu Ti-6Al-4V. Drsnosti povrchu blíží se 3,5 μm se ve studii snaží dosáhnout, protože právě při této hodnotě autor očekává optimální výsledky při následujícím povlakování. V experimentu byly využity 2 keramiky, Al_2O_3 a SiO_2 .

Pro oba materiály byla sledována nižší drsnost povrchu při použití částic menších rozměrů, v intervalech od 300 do 700 μm , než u částic rozměrů vyšších. Testováno bylo za dvou rozdílných tlaků, 650 kPa a 500 kPa. Nižších drsností bylo dosaženo při tlaku 500 kPa. V kombinaci použití menších částic a tlaku 500 kPa bylo možné se spolehlivě přiblížit k drsnosti nižší než 4 μm . Nejnižší naměřená drsnost byla dokonce 2,29 μm . Drsnosti povrchů upravených pomocí SiO_2 byly znatelně nižší, dá se tedy očekávat, že typ použité keramiky ovlivní výsledky. Sledována byla i závislost dalších parametrů. Pomocí Cauchyho metody byly poté navrženy možné postupy a bylo dosaženo drsnosti povrchu 3,5 μm s tolerancí 0,2 μm . Efekt změny parametrů pískování na výslednou drsnost povrchu se tedy dá spolehlivě určit. Dokonce je možné navrhnout procesní parametry tak, aby bylo přibližně dosaženo specifické hodnoty drsnosti povrchu [26].

Kvůli abrasivnímu charakteru procesu, pískování nabízí nejenom šanci snížit drsnost povrchu, ale zároveň napomáhá odstranění případných připečených nečistot a nedostatečně natavených částic na povrchu komponenty. To dělá metodu vhodnou a často používanou před tepelnými úpravami, které by homogenizovaly povrchovou i vnitřní strukturu [27].

Další výhody dokážeme nalézt v tom, že pískování do materiálu zanáší drobné povrchové napětí, které zlepšuje únavové vlastnosti. Toto sledovali [28]. Byly sledovány vzorky z titanu 35A. Výroby vzorků není blíže popsána. Jejich povrch byl upravován pomocí SiO₂ částic o rozměrech 200-300 μm. Před pískováním byla Ra 0,3 μm, procesem byla zvýšena na Ra 1,1 μm. To se dá vysvětlit tím, že samotný proces pískování není vytvořený na dosahování nejvyšších přesností. Do povrchu narážejí částice s velkou kinetickou energií o velikostech stovkách mikrometrů a na povrchu vytváří drobné rýhy. Abrasivní opotřebení pomůže s odstraněním větších nerovností, ale zároveň drobné opotřebení vytváří. Vzorky byly poté testovány a pískované se vyznačovali o 10% vyšší únavovou pevností. Únavová pevnost procesu tedy byla zvýšena, a to i přes to, že metoda zvýšila drsnost povrchu. Zhoršení kvality povrchu, jak už bylo zmíněno, má přímý vliv na snižování únavové pevnosti. Při použití pískování na povrch s takovou kvalitou, kterou bude metoda schopná ještě zlepšit, je tedy možné očekávat o to lepší výsledky.

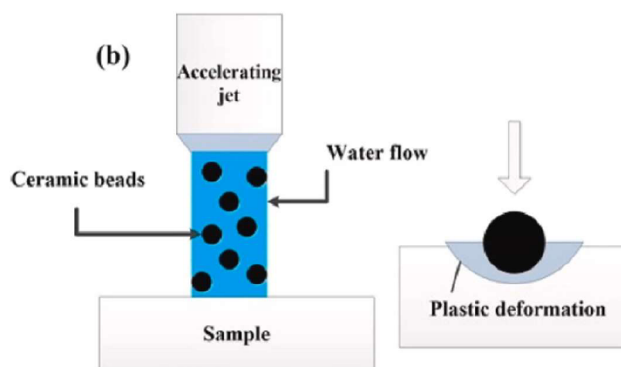
Mimo jiné se očištěním povrchu od nečistot také zlepší jeho korozní odolnost. Ačkoliv dokáže pískování povrch očistit od částic, může i proces vést k zanášení některých částic použité keramiky do materiálu, což může vést k nečekané chemické odezvě materiálu. Proces úpravy povrchu fungující na chemické bázi se zdá být účinným řešením odstranění případného problému [29].

3.2.4 Kuličkování

Kuličkování funguje na základě vysílání sférických tělísek na povrch komponenty. Nárazy povrchu plasticky deformují a vytváří v něm prohlubně. Zároveň při nárazu na vyvýšeninu tuto vyvýšeninu srovnají. Toto dokáže být užitečné pro snížení drsnosti povrchu. Dá se to vysvětlit tak, že v případě vyvýšeniny všechna síla dopadající kuličky působí na zdatně menší plochu a vede k větším tlakům a deformacím. Tato metoda je efektivnější na povrchy s nižší kvalitou.

Například v případě studie [30] bylo sledováno zlepšení kvalitu povrchu z $Ra = 14,7\mu\text{m}$ na $Ra = 5,2 - 6,3\mu\text{m}$ v závislosti na použitých parametrech a materiálu kuliček. Pro experiment byly použity vzorky z hliníkové slitiny A357.0, vytvořené 3D kovovým tiskem.

Čím lepší byl povrch tím více ve většině případů efektivita klesá a u dílů s vysokou původní kvalitou povrchu může dokonce dojít k jejímu zhoršení. Ve studii [31] byl sledován nárůst Ra z $0,31\mu\text{m}$ na hodnotu $Ra = 1,12\mu\text{m}$. Experiment byl proveden s 3 mm širokými pláty z Ti-6Al-4V. Vzorky byly před kuličkováním tepelně zpracovány a vyleštěny na $Ra 0,31\mu\text{m}$. Tělesa použité na kuličkování byly keramické kuličky z Al_2O_3 o průměru $300\mu\text{m}$. Zvýšení drsnosti povrchu je ve studii přičítáno nerovnoměrnému rozdělení prohlubní vytvořených samotným procesem na upraveném povrchu. Na povrchu vzorků bylo sledováno zvýšení tvrdosti o 7,5 %. Do povrchu bylo procesem také zavedeno zbytkové napětí, které má vliv na únavovou pevnost. Vliv už ale nebyl ve studii dále sledován.

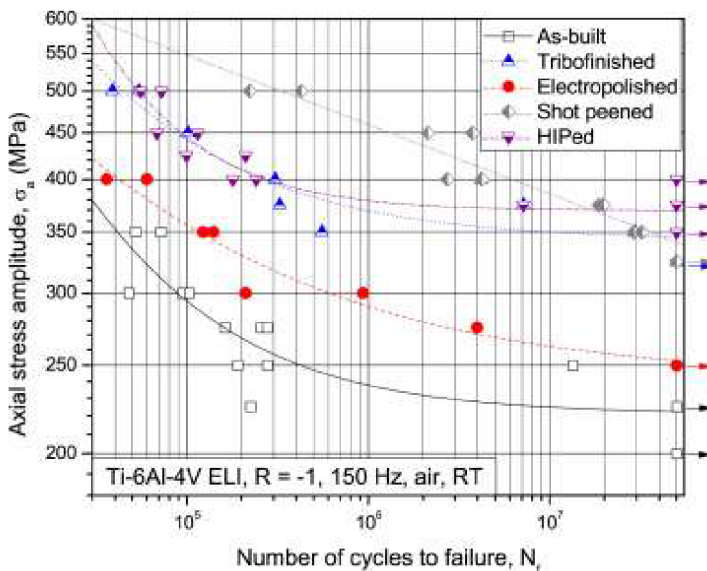


[4]

Samotný proces ale může být použitý k dosáhnutí dobré kvality upraveného povrchu. Ve studii [32] bylo sledováno snížení hodnoty Ra z $4,01\mu\text{m}$ na hodnotu $Ra = 1,16\mu\text{m}$. Úprava byla prováděna na dílech vytvořených technologií SLM z 17-4 nerezové oceli. Nejdříve byl povrch pískován Al_2O_3 keramikou a poté byly použity drobná sférická tělesa o průměrech od 70 do $140\mu\text{m}$. Každý z procesů byly prováděn po dobu 30 s.

Zároveň se jedná o velice efektivní způsob zlepšení únavových vlastností. Funguje na základě plastické deformace vrstvy materiálu u povrchu, vedoucí ke snížení porozity u povrchu a celkové změně mechanických vlastností [7]. Výsledkem je výraznému snížená šance vytvoření a šíření trhliny z povrchové části.

Vliv kuličkování na únavové vlastnosti komponenty vytvořené pomocí metody SLM z Ti-6Al-4V byl sledován [7]. Díly byly po vytvoření tepelně zpracovány. Při procesu byla dále snížena drsnosti povrchu z Ra 6,83 na Ra 3,36 μm , použité byly tělíska o rozměrech 300-425 μm . Výsledná únavová životnost byla porovnána v grafu s dalšími úpravami viz. (Obr. 3-5). Pro účel této kapitoly bude pozornost zaměřena na kuličkované díly, označené jako „Shot peened“, a na kontrolní skupinu vzorků, která je pod pojmem „as-built“.



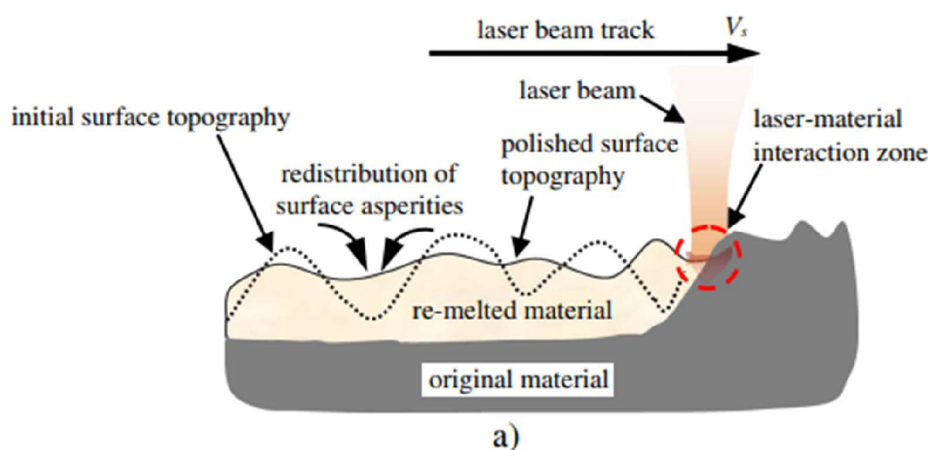
Obr. 3-5 Graf únavové životnosti Ti-6Al-4V vzorků [7]

Autor uvádí, že na při 5×10^6 cyklech byla únavová životnost kuličkované součásti dvojnásobná a při 50×10^6 cyklech byla stále o více než 45% vyšší. S vyšším počtem cyklů se tedy rozdíl snižoval, ale stále bylo dosaženo výrazného zlepšení. Částečný vliv na zvýšení únavové životnosti mělo i zlepšení kvality povrchu, ale v tomto případě minoritní. Další sledovaná skupina, upravená elektrolytickým leštěním totiž dosáhla na výrazně lepší kvalitu povrchu Ra 0,54 μm , ale přínos únavové odolnosti byl výrazně nižší než u kuličkování.

3.3 Tepelně ovlivňující metody

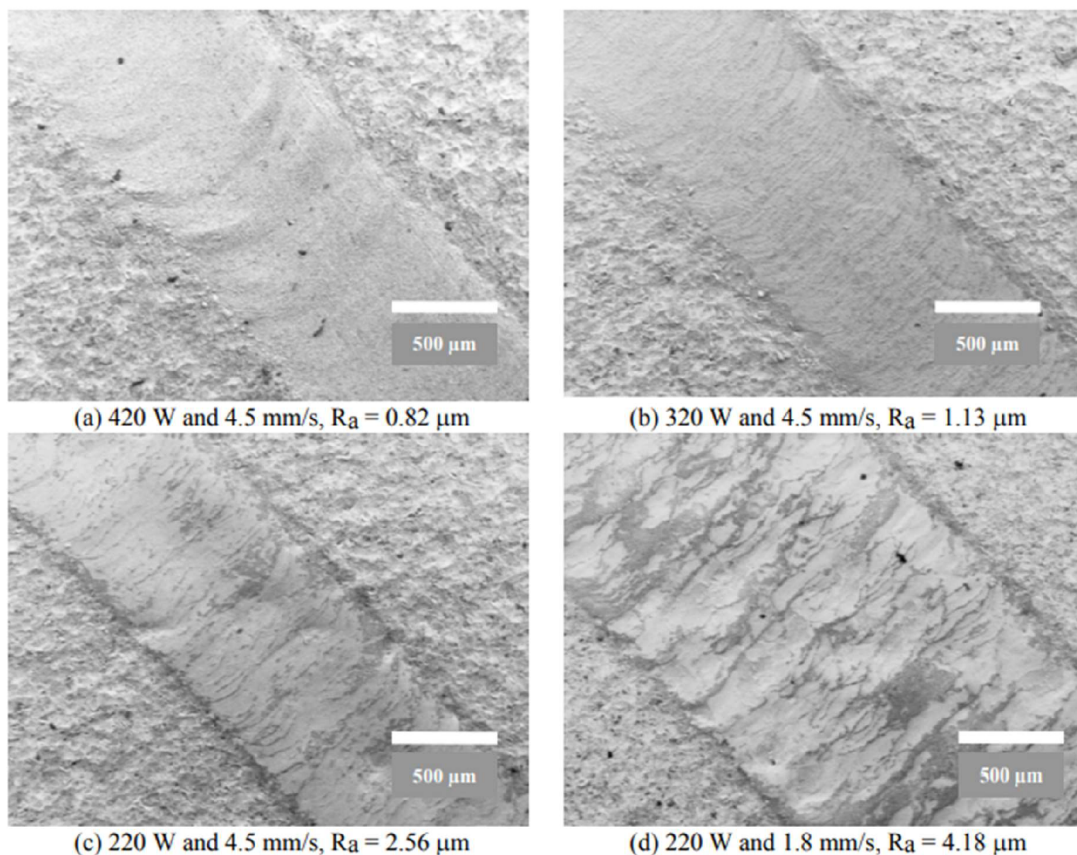
3.3.1 Laserové leštění

Laserové leštění je metoda fungující na základě natavení povrchové vrstvy laserovým paprskem. Jedná se o rychlou a efektivní metodu, která funguje na základě rychle se pohybujícího paprsku na povrchu materiálu. Pohyb je tak rychlý, aby se předalo jen takové množství energie, které nataví z většiny vrcholky mikrostruktury. Zároveň je důležité, aby nedošlo k významnému teplotnímu ovlivnění. Natavený materiál je poté pomocí působení laseru, gravitační síly a povrchového napětí vtačován do mikro prohlubní, což snižuje celkovou drsnost povrchu. Lepší protavení částic na povrchu se také podílí na lepší drsnosti [33, 34].



Obr. 3-6 Schéma laserového leštění [35]

V studii [33] bylo dosaženo snížení drsnosti dílu vytvořeného SLS technologií z 420 nerezové oceli s 40 % bronzu z hodnoty $Ra = 9,0 \mu m$ na hodnotu $3 \mu m$. V následujícím měření byl změřen vliv parametrů samotného procesu na výsledný povrch. Byl použit CO_2 laser s proměnnou rychlostí a výkonem. Výkon v rozmezí od 220 W do 420 W. Původní díl měl drsnost $Ra = 2,38 \mu m$. Nejlepší výsledek byl sledován při použití 420 W, drsnost klesla na $0,82 \mu m$. Nejméně uspokojivý výsledek měl laser s nejnižším výkonem, byla naměřena dokonce vyšší hodnota: $Ra = 2,56 \mu m$. Dále byl sledován vliv rychlosti posuvu laseru na hodnotu Ra . Byl použit stejný výkon 220 W, ale byla snížena rychlost posuvu z původních 4,5 mm/s na 1,8 mm/s. Výsledná drsnost na takto upraveném povrchu byla dokonce $Ra 4,18 \mu m$, naznačující, že příliš nízké rychlosti mohou vést k přetavení a horší výsledné struktuře.



Obr. 3-7 Povrch po laserovém leštění v závislosti na parametrech [33]

V další studii [35] bylo na titanových slitinách změřeno zlepšení drsnosti povrchu, z hodnoty $R_a 7,21 \mu\text{m}$ na hodnotu $R_a 0,73 \mu\text{m}$, v argonové atmosféře. První vzorek byl z materiálu TC11. U druhé ho vzorku z Ti-6Al-4V bylo dosaženo snížení na $R_a 0,375 \mu\text{m}$ z původní $R_a 5,23 \mu\text{m}$. Použitý byl pulzní vláknový laser pracující na vlnové délce 1060 nm s frekvencí 550 kHz. Úpravě povrchu komponenty vytvořené z Ti-6Al-4V technologií SLM se věnovala i studie [36]. Byla sledována změna R_a z $6,53 \mu\text{m}$ na $0,32 \mu\text{m}$. Byl použit vláknový laser s plynulým výdejem energie fungující na stejné vlnové délce o výkonu 90 W a rychlosti posuvu 150 mm/s v argonové atmosféře. Dále bylo sledováno zvýšení tvrdosti povrchu o 25 %.

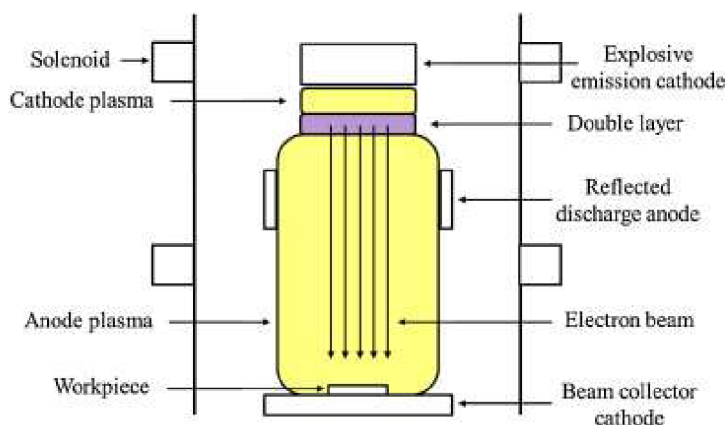
Ve studii [37] byla sledována povrchová úprava plochého vzorku vytvořeného SLM technologií z Inconelu 718. Samotný proces probíhal v argonové atmosféře při výkonu laseru 90 W o vlnové délce 1060 nm. Výsledkem bylo snížení hodnoty R_a z $7,5 \mu\text{m}$ na $0,1 \mu\text{m}$. Tvrdost povrchu byla procesem zvýšena o více než 25 %.

Vliv laserového leštění na únavovou životnost bez použití atmosféry inertního plynu byl sledován ve studii [38]. Natavení povrchu laserem může vést k významnému snížení únavové pevnosti materiálu. Snížení bylo sledováno v rozmezí blížící se 30 % až 50 % u komponent vytvořených 3D kovovým tiskem z Ti-6Al-4V, i přes významné zlepšení drsnosti povrchu. Problém je vysvětlován možností vzniku porozity. Pod laserem natavenou částí se uvězní plyn. Po opětovném ztuhnutí materiálu vytvoří kulovité póry, které pak mohou mít významný vliv na koncentraci napětí [38, 39]. Je pravděpodobné, že v inertní atmosféře bude množství snížení únavových vlastností výrazně menší [40].

To potvrdila studie [41], kde byl sledován vliv laserového leštění na únavovou pevnost komponenty. Komponenty byla vytvořena podobným způsobem ze stejného materiálu. Samotný proces leštění však probíhal v argonové atmosféře. Autor odůvodňuje využití atmosféry inertního plynu k zabránění oxidaci povrchu. Dále byla část komponent tepelně zpracována pro odstranění zbytkových napětí. Tepelně nezpracované komponenty dosahovaly podobné únavové pevnosti jako ty, které nebyly leštěny, při 10^7 cyklech. Tepelně zpracované komponenty, při stejném počtu cyklů, vykazovaly významně vyšší únavové pevnosti. Výrazný pokles únavové životnosti po laserovém leštění je tedy možné vyřešit využitím inertní atmosféry při procesu a následným tepelným zpracováním.

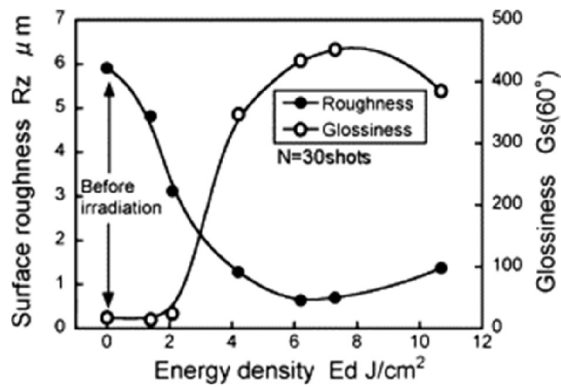
3.3.2 Elektronový paprsek

Metody využívající elektronového paprsku fungují na základě vytvoření plazmy v blízkosti anody a následném urychlování elektronů magnetickým polem, vytvořeným pulsním napětím v katodě. Takto urychlené elektrony jsou směřovány na povrch materiálu, na který působí velice krátký časový úsek. Úsek je dlouhý v řádu jednotek mikrosekund, během kterého nataví vrchní část povrchu, v řádu desítek mikrometrů. Ovlivněna je tedy pouze vrchní část materiálu. Natavený materiál je působením paprsku postupně přesouván z vyvýšenin do prohlubní, což má za následek postupně se zlepšující kvalitu povrchu. Tento proces je opakován v předem definovaném počtu cyklů vedoucím k optimálním výsledkům [42, 43].



Obr. 3-8 Schéma pro metody využívající elektronový paprsek [44]

Metodu je možné použít k dokončení přesných dílů, lze ji automatizovat, ale je nákladná. Sledovány byly změny drsnosti povrchu u materiálu Ti-6Al-4V z hodnoty $R_a 0,57 \mu\text{m}$ na hodnotu $R_a 0,19 \mu\text{m}$ [43]. Dále například u zušlechtěných ocelí hodnoty R_z z počáteční hodnoty $6 \mu\text{m}$ až na hodnotu $0,7 \mu\text{m}$ viz. (Obr. 3-9) [42] v závislosti na vstupních parametrech. Sledována byla závislost na množství energie působící na dané místo, která bylo definována vzdáleností od středu paprsku. Mimo drsnost povrchu byla sledována i jeho lesklost, která se snižující se hodnotou R_a rostla.



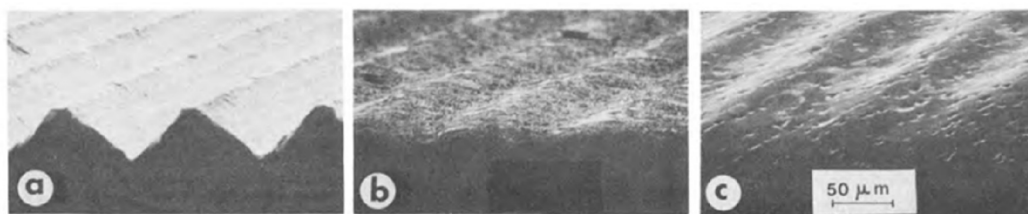
Obr. 3-9 Graf sledující kvalitu povrchu v závislosti na množství absorbované energie [42]

Výhodou metody je možnost automatizace, nízká hloubka ovlivnění materiálu, nevnašení cizích částic do povrchu a výrazné zvýšení korozní odolnosti materiálu [42, 44].

3.4 Chemické a Elektrochemické metody

3.4.1 Elektrolytické leštění

Elektrolytické leštění (EL) je proces, při němž je díl zapojený do elektrolytické lázně, zatímco jím prochází stejnosměrný elektrický proud. Metoda je podobná galvanickému pokovování, ale s tím rozdílem, že obvod je zapojený naopak. Díl je tedy zapojený jako anoda a ubývá na úkor druhé elektrody. [45, 46]. Drsnost je možné snížit, díky rozdílu rychlosti úběru materiálu mezi vyvýšeninami a prohlubněmi povrchu, takzvanému anodickému vyrovnávání. Nejdříve ubývají větší výběžky povrchu, hlavní úběr materiálu je na nich, postupem času jsou leštěny i ostatní části [47, 45].



Obr. 3-10 Progres elektrolytického leštění povrchu vzorku [47]

Výsledná drsnost povrchu je závislá hned na několika parametrech. Důležitými se zdají být parametry: původní drsnost povrchu, teplota elektrolytu, použité napětí, čas leštění, vzdálenost elektrod a použitý elektrolyt [45]; [46].

Ačkoliv je ve studiích sledováno vždy několik výsledků, v závislostech na změnách těchto parametrů, budou prezentovány ty úspěšnější. Pro účely této práce je v této části prezentován efekt na díly vytisknuté z Ti-6Al-4V.

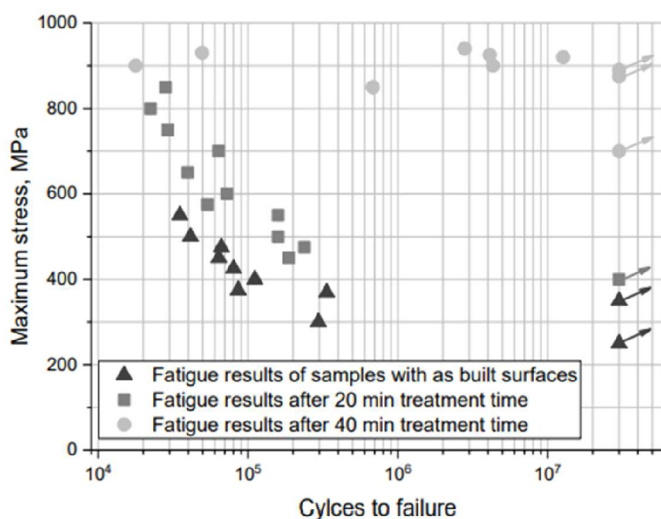
Celá reakce je exotermická, je tedy během ní generováno teplo. Je potřeba aby byla teplota elektrolytu kontrolována pro dosažení předvídatelných výsledků. S rostoucí teplotou se zrychluje proces rozpouštění a při lokálním navýšení teploty by mohlo dojít k narušení ucelenosti povrchu [48].

Oxid, který titan na svém povrchu tvoří, je za standardních podmínek korozivzdorný a velice odolný. To je důvod proč bychom si takový materiál chtěli zvolit, ale pokud chceme kvalitu povrchu upravit, je potřeba použít odpovídající elektrolyt, který bude tuto vrstvu schopen narušit [46, 49].

Studie [50] se zabývá vlivem úhlu, pod kterým byl původní díl vytisknut, na drsnost povrchu. Bylo dosaženo snížení drsnosti povrchu z hodnot od Ra 3,9 – 22,7 μm na hodnoty Ra 0,9 – 3,8 μm . Pod úhlem 0°, pod kterým je prezentována většina studií, bylo dosaženo změny z Ra 3,9 μm na Ra 1,28 μm . Použit byl roztok kyseliny chloristé.

Při použití NaCl-ethylen glykolu, jako elektrolytu, bylo dosaženo hodnoty Ra 1,74 z původních 7,23 μm . Hlavní výhodou tohoto elektrolytu je, že je, oproti pro titan standardně používaným elektrolytům, výrazně méně nebezpečný a toxický [49].

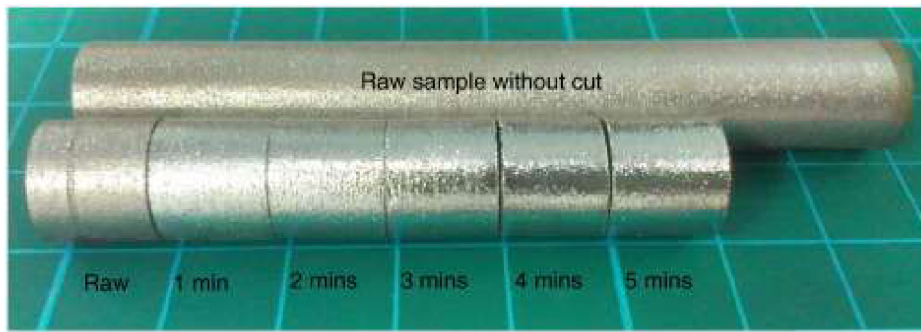
Dále ve studii [51] byl použit přípravek pro úpravu povrchu autory nazývaný 3D SurFin na vzorky z Ti-6Al-4V, vyrobené SLM technologií. Pracováno s ním bylo v odlišných podmínkách oproti standardnímu EL. Všimnout se dá hlavně významně vyššího pracovního napětí, mezi 200-400 V. Ve studii bylo dosaženo změny Ra z 17,6 na 2,6 μm . Překvapivé bylo, že dále bylo sledováno významné zvýšení únavové odolnosti dílu viz. (Obr. 3-11). Autor uvádí, že došlo přibližně o 174% zlepšení oproti neupravenému dílu. Takové výsledky byly pozorovány po 40 minutách EL. Takto dlouhá doba procesu však zároveň zapříčinila úběr materiálu převyšující hodnoty 25% původní hmotnosti materiálu. Ačkoliv to u EL metod není výjimkou, může to být významným omezením procesu.



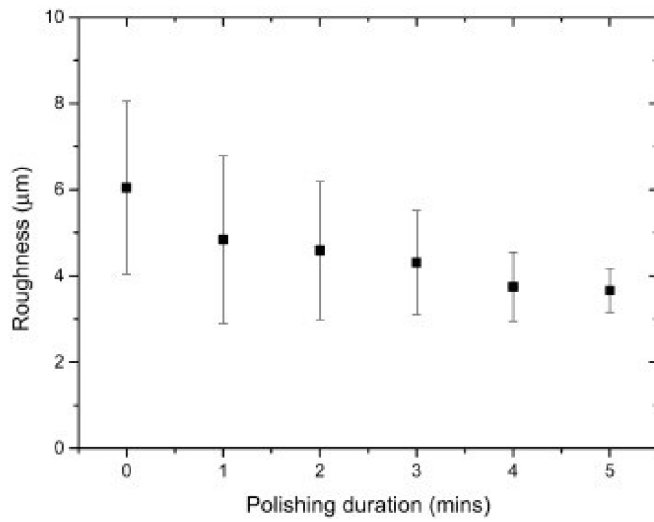
Obr. 3-11 Únavová životnost elektrolyticky leštěných vzorků [51]

Autor mluví o únavové pevnosti 820 MPa při 3×10^7 cyklech. Kromě vyhlazení nerovností na povrchu a zvýšení jeho kvality není výsledná hodnota dále odůvodněna.

Dále bylo sledováno použití procesu EL na slitinu Inconel 718. Ve studii [52] byly vzorky vytvořené pomocí technologie SLM ponořeny do elektrolytu tvořeného z roztoku kyseliny sírové a metanolu. Byla sledována závislost drsnosti povrchu na délce procesu viz. (Obr. 3-13). Už po dvou minutách bylo sledováno odstranění částic přitavených na povrch. Po pěti minutách bylo dosaženo výsledné změny Ra z 6,05 μm na Ra 3,66 μm .



Obr. 3-12 Kvalita povrchu a úběr materiálu v závislosti na čase [52]



Obr. 3-13 Drsnost povrchu v závislosti na délce procesu [52]

4 DISKUZE

4.1.1 Interpretace informací

Bakalářská práce je zaměřená na popis povrchových úprav materiálu Ti-6Al-4V a Inconel 718 vytvořených technologií SLM. Metody jsou představeny ve vztahu k těmto materiálům a jsou uvedeny hodnoty, kterých je možno dosáhnout. Ve studii jsou ale popsány i další materiály. Přesné hodnoty hlavně mechanických vlastností nebudou zcela platit pro materiály, na které je studie primárně zaměřená. Pomocí těchto informací je však stále možné pochopit a popsat metody. Dá se sledovat například vliv změn procesních parametrů na výsledky, nebo samotné problémy a výhody metod. V některých studiích byl sledován efekt i na komponenty, které byly vytvořeny buď jinou technologií 3D kovového tisku – třeba SLS, nebo dokonce nebyly ani vytvořeny aditivní technologií. U takovýchto vzorků se dají očekávat rozdílné hodnoty u mechanických vlastností, hlavně únavové pevnosti. Takové studie stále dokáží být přínosné, například sledovaná změna kvality povrchu bude minimálně ovlivněna. Dále například HIP může výrazně snížit vliv rozdílů vzorků na výsledky tím, že zmenší velikost defektů a jejich počet [11]. Při uvážení vlivu výroby vzorku na výsledné hodnoty je možné stále čerpat relevantní informace.

4.1.2 Obrábění

Standardně používané obrábění na odpovídajících plochách je oblíbenou možností úpravy povrchů. V porovnání s dílem vytvořeným pomocí aditivní technologie jsme schopni dosáhnout velice dobré kvality povrchu relativně jednoduchým postupem a rychle. Je možné upravit povrch i tvrdých materiálů při použití odpovídajících nástrojů. Kvůli složitosti dílů vytvořených technologií 3D kovového tisku nedokážeme obrobít většinu povrchů. Z toho důvodu hledáme další technologie, ale na upravení přesně definovaných částí a funkčních ploch je metoda excelentní.

Obrábění je zařazeno do sledovaných metod, protože nabízí pravděpodobně nejlepší možnost dosažení přesných tolerancí na rozměrových plochách. Oproti ostatním metodám dosahuje na lepší nebo srovnatelnou kvalitu povrchu a únavová odolnost takto upravených vzorků je většinou vyšší než po použití ostatních úprav [25]. Obrábění je známé, reakce na materiály je prozkoumaná, jedná se tedy o spolehlivé řešení. Ve většině případů bude výhodné obrábět plochy až po použití ostatních povrchových úprav, právě kvůli přesnosti, kterou obrábění nabízí. Obrábění sledovaných materiálů však má své úskalí.

Inconel 718 i Ti-6Al-4V jsou obě tepelně odolné slitiny. Při jejich obrábění lze sledovat nadměrné hromadění tepla v místě řezu. Používané kapaliny nezvládají odvádět teplo dostatečně rychle [12]. Nedostatečná rychlost odvodu tepla vede k vypaření řezné kapaliny a páry této řezné kapaliny brání efektivnímu přístupu další řezné kapaliny. Uvolněné plyny při vypařování některých používaných mazání mohou být pro zdraví pracovníků škodlivé [15]. Navrhovaným řešením tohoto problému je použití zkapalněného dusíku, který dosahuje kryogenních teplot pro efektivnější odvod tepla z místa řezu. Byly sledovány rozdílné výsledky na životnost nástroje při použití takového chlazení [13, 15], ale popsané studie se shodovaly na zlepšení výsledné kvality povrchu oproti konvenčnímu obrábění.

4.1.3 Omílání

Omílání je praktická a používaná technologie, není náročná ani příliš drahá, nemá významně negativní vliv na mechanické vlastnosti. Byl dokonce sledován pozitivní vliv na únavové vlastnosti v publikaci [7]. Nevýhodou je možná časová náročnost, někdy dosažení lepších kvalit povrchu může trvat i desítky hodin [25], případně hlučnost procesu. Možnost redukování času samotného omílání bylo provedeno pomocí použití chemické sloučeniny, která oslabovala povrch materiálu, čímž zjednodušovala jeho úběr z povrchu [21].

Při optimalizaci parametrů, například frekvence, při které soustava vibrovala na 75 Hz. Při současném požití drobných tělísek, bylo možné sledovat velice slušné kvality povrchu. Bylo sledováno dokonce Ra nižší než 0,5 μm u slitiny Inconelu 718 [21] vyrobené technologií SLS. Laserová úprava povrchu některých vzorků před omíláním zlepšila výslednou kvalitu povrchu po omílání, tvrdost a snížila jejich pórovitost. Je ale důležité zmínit, že metoda SLS trpí na významně větší pórovitost než metoda SLM. Komponenta vytvořená metodou SLM má lépe natavené částice a je pravděpodobné, že tavení jejího povrchu před omíláním by nedosáhlo takového vylepšení. Dále je důležité zmínit, že tvrdost Inconelu 718 se po tepelném zpracování zvyšuje, takže sledované zvýšení tvrdosti povrchu není pro Laserovou úpravu unikátní. Dalo by se ho dosáhnout i jiným tepelným zpracováním. Vzorky z Ti-6Al-4V dosahovaly podobných hodnot, také u nich bylo tedy možné dosáhnout vysoké kvality povrchu.

Jeden z důvodů, proč byly výsledné drsnosti některých metod tak nízké, může být rovinná geometrie komponent, na kterých byla drsnost měřena. Je pravděpodobné, že pro složitější geometrie metoda dosáhne nižších kvalit povrchu a před použitím na komponenty by bylo vhodné další testování. Jedná se však o vhodnou metodu i pro malosériové použití, je efektivní, jednoduchá a má málo, jasně definovaných negativ.

4.1.4 Pískování

Pískování je vcelku jednoduchá a rychlá metoda, která je vhodná i pro malosériové použití. Bez větších problémů je možné zlepšit kvalitu povrchu z vysokých drsností o desítky procent. Například ve studii [25] byla sledována změna u komponent vytvořených technologií SLM z Ti-6Al-4V z Ra 17,9 μm na Ra 10,1 μm . Při optimalizaci parametrů jako velikost použité keramiky, tlaku, času působení, nebo typu samotné keramiky bylo možné dosáhnout u stejného materiálu na Ra 2,29 μm [26].

Metoda do komponenty zanáší zbytková napětí, které mohou vést ke zvýšení únavové pevnosti. Metoda abrazivně čistí povrch od nečistot, což může vést ke zvýšení korozní odolnosti. Dále mohou být zachytávány částice keramiky v povrchu. Bylo sledováno, že dalším tepelným zpracováním, které může být i nižší než 300 °C, je možné dosáhnout transformaci povrchové vrstvy a zvýšení korozní odolnosti [28]. Ačkoliv se dá metoda použít na komponenty složitých tvarů, příliš překrývající se geometrie nebo některé úzké vnitřní geometrie mohou být nedosažitelné.

4.1.5 Kuličkování

Jedná se o relativně nekomplikovanou technologii, která je využitelná pro úpravu komponent různorodých tvarů. Problémové pro kuličkování budou povrchy, které se budou navzájem významně překrývat nebo budou vnitřní [30]. Největší výhodou kuličkování je zlepšení únavových vlastností a tvrdosti na základě vzniklých povrchových napětí.

Ačkoliv takto zavedená povrchová napětí jsou většinou hodnocena kladně, je potřeba uvážit tloušťku komponenty. Při příliš nízkých tloušťkách by totiž povrchové napětí mohlo deformovat vlastní tvar komponenty. Úprava povrchu kuličkováním nelze provést bez zavedením zbytkových napětí do komponenty. Problém může nastat i u komponent s velkým množstvím pór a defektů. Komponenty vytvořené technologií SLM mají oproti komponentám vytvořeným ostatními technologiemi vysokou relativní hustotu materiálu, i přes 99,9 % [37]. V komponentách vytvořených pomocí SLM je tedy množství defektů nižší, a proto bude odezva na zbytkové napětí zavedené do komponenty kuličkováním lepší. Stále se ale dá množství defektů a jejich velikost snížit pomocí HIP. HIP je ale relativně drahá metoda a využít ji se vyplatí spíše v kritických aplikacích.

Důležitá je synergie s tepelným zpracováním. Zajistí větší spolehlivost v ohledu únavové odolnosti a znatelně ji navýší. V některých případech může být dokonce kontraproduktivní kuličkovat bez využití tepelného zpracování nebo HIP, protože může dojít k významné koncentraci napětí na defektech ve vnitřních částech vzorku [53].

Kuličkování je většinou používáno k částečnému zvýšení kvality povrchu, ale nutně nedosahuje nejvyšších jakostí. Bylo však sledováno, že při použití dostatečně malých částic a při delším časovém úseku je možné dosáhnout drsností povrchu až Ra 1,16 μm [30]. V tomto případě bylo kuličkování použito hned po pískování. Spojení těchto dvou metod by mohlo vést k výraznému synergickému efektu.

Vytvoření drobných, ale pravidelných, rýh po velké části povrchu, které je typické pro pískování, zanechá v povrchu ostré výčnělky a nerovnosti. Kuličkování na druhou stranu velice efektivně plastickými deformacemi zarovná vyvýšeniny. Samotný problém kuličkování je, že při použití větších těles a při menší době působení jsou místa plastických deformací nerovnoměrně rozložena na povrchu [31]. Při pískování jsou však nerovnosti na povrchu rozloženy rovnoměrně, a tedy plasticky deformovaná místa po nárazu sférických těles tolik nevyčnívají nad okolí a relativní rozdíl oproti místu nezasazenému kuličkou je menší.

Dále bylo u obou metod sledováno zanášení zbytkového napětí do povrchu [28, 31]. To znamená, že pro obě metody bude výhodou předešlé tepelné zpracování nebo HIP, které sníží vliv vnitřních defektů na únavovou životnost. Další výhodou je, že obě metody jsou použitelné pro přibližně podobnou geometrii.

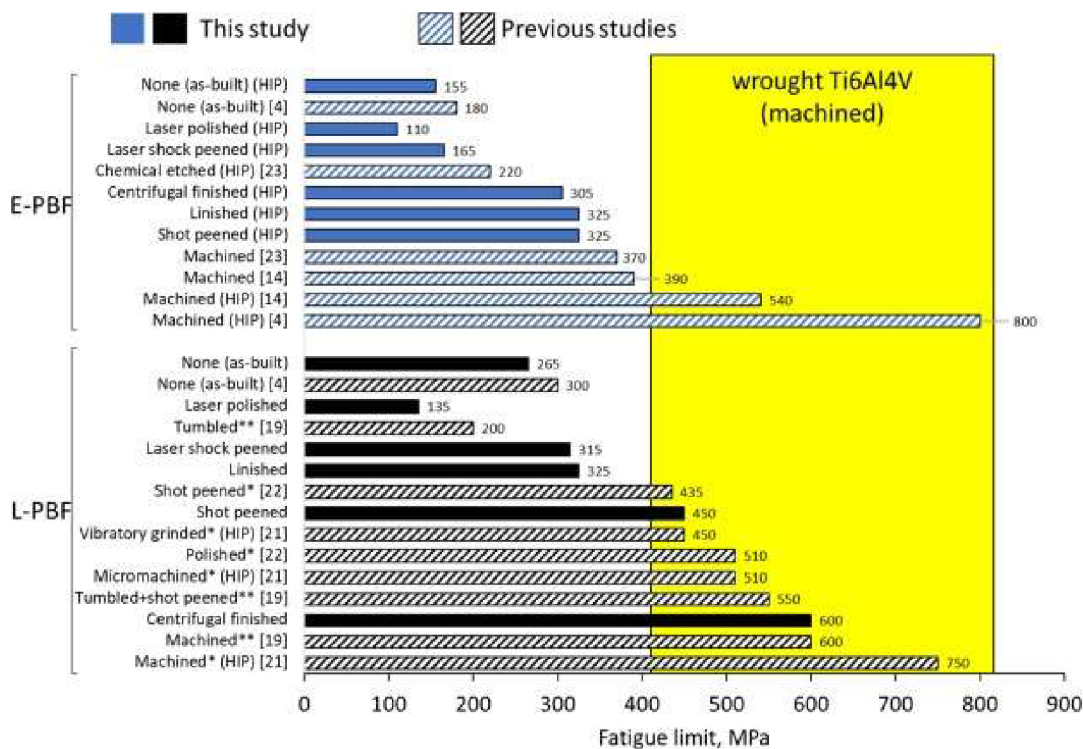
4.1.6 Laserové leštění

Laserové leštění je zajímavou alternativou k už zmíněným metodám. Zvládá složitější geometrie, ale rovinné plochy jsou preferované. Oproti ostatním metodám je velice rychlé, dosahuje dobrých výsledků a je výhodné hlavně pro sériové aplikace. Výhodou je, že proces může být plně automatizován. Při použití na menší počty kusů nemusí být vyhovující metodou, protože vytvořit program pro samotný proces u složité komponenty může být nákladné a optimalizace pro dosažení nejlepších kvalit jednotlivých povrchů může být u složitého dílu iteračním procesem.

V některých případech po optimalizaci parametrů bylo dosaženo velice dobré výsledné kvality povrchu. Ve studii [37] bylo sledováno snížení Ra z 7,5 μm na 0,1 μm u vzorků vytvořených z Inconelu 718. Pro praktické použití se složitou geometrií měnící se vzdáleností a dalšími omezeními pravděpodobně nebude možné takové kvality povrchu dosáhnout, ale stále bude pravděpodobně znatelně lepší než při použití ostatních metod. Možnosti této metody by stálo za to experimentálně prověřit.

Výhodou procesu je zarovnání a dostatečné natavení částic, které se k tisknutým dílům připekly. Další výhodou je zvýšení tvrdosti materiálu na povrchu [34].

Zároveň ale byly sledovány problémy. Ve studii [38] bylo sledováno výrazné snížení únavové pevnosti vzorku, a to i přesto, že byla významně zlepšena kvalita povrchu. Většina neupravených komponent trpí na nízkou únavovou pevnost z důvodu iniciace trhlin z povrchové části. V takovémto případě je omezujícím faktorem, k dosažení dobré únavové pevnosti, kvalita povrchu. Právě samotné zlepšení kvality povrchu je schopné zvýšit únavovou životnost o desítky procent viz. (Obr. 4-1).



Obr. 4-1 Porovnání metod na únavovou životnost vzorků [38]

V tomto případě však bylo sledováno významné snížení únavové životnosti laserem leštěné komponenty. Autor výsledky odůvodňuje tím, že natavení vrstvy vedlo k uvěznění plynu pod natavenou částí a vytvoření pórů v těsné blízkosti povrchu. To vedlo ke snížení únavové odolnosti vzorku vytvořeného laserovým 3D kovovým tiskem na polovinu své původní hodnoty.

V další studii [41] byl sledován proces laserového leštění na podobně vytvořené komponenty ze stejného materiálu, ale v inertní atmosféře. Výsledkem bylo, že upravený díl měl naopak o něco vyšší únavovou pevnost než neupravený, tedy více než dvojnásobnou, oproti tomu upravenému ve studii [38]. Některé z takových vzorků pak byly ještě tepelně zpracovány pro snížení zbytkových napětí. To vedlo zase k významnému zlepšení únavové pevnosti, téměř na dvojnásobek. Z toho vyplývá, že pokud nám záleží na únavových vlastnostech komponenty zpracovávané touto technologií, měl by samotný proces probíhat v inertní atmosféře. Po procesu by komponenta měla být, pokud možno, ještě tepelně zpracována.

4.1.7 Elektronový paprsek

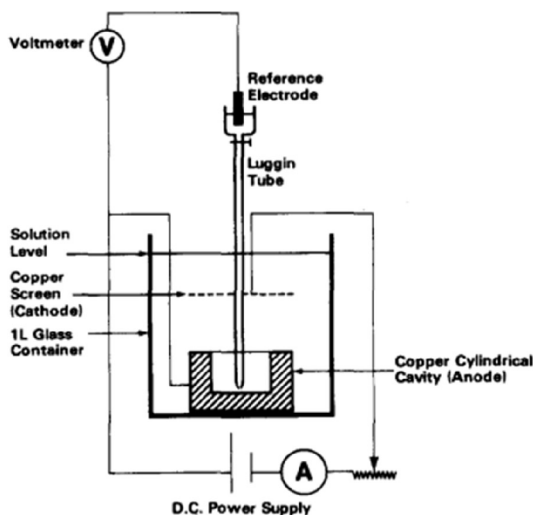
Samotná metoda je velice podobná laserovému leštění. Je používána pro dosažení vysoké kvality povrchu a bylo sledováno, že dokáže znatelně zvýšit korozní odolnost [44]. Také má snížené tepelné ovlivnění povrchové vrstvy materiálu. To by mohlo být užitečné, protože by komponenty nemusely vykazovat problémy ze strany snížení únavové odolnosti. V tom případě by nebylo potřeba dalších opatření a tepelných zpracování jako u laserového leštění. Toto je pouze hypotéza, pro dostatečné pochopení vlivu metody na mechanické vlastnosti bude potřeba dalšího bádání.

Jedná se o jednu z novějších metod, množství informací na téma je omezené. Pro průmyslové použití bude potřebné další úsilí, ale jde o slibnou metodu, kterou by stálo za to do budoucna sledovat.

4.1.8 Elektrolytické leštění

Jedná se o povrchovou úpravu, která do komponenty nezavádí velká zbytková napětí a ani ji významně tepelně neovlivní. To může být výhodou, protože není potřeba následných úprav. Také je dobré zvážit použití metody v případech, kde se jedná o částice s optimalizovanou hmotností a úzkými stěnami, u kterých by zbytková napětí mohla vyvolat deformace tvaru. Velkou výhodou metody je, že se dá použít na povrchovou úpravu vnitřních kanálků v komponentě, čehož ostatní metody nemusí být schopné dosáhnout.

Samotná úprava vnitřních částí ale neprobíhá sama o sobě, vnitřní části ve standardním zapojení většinou nejsou dostatečně upraveny [54]. Pro efektivní úpravu vnitřních částí je potřebné buď jiné, specifické zapojení, nebo použití elektrody uvnitř otvoru. Příklad možného zapojení viz. (Obr. 4-2).



Obr. 4-2 Schéma pro možný aparát elektrolytického leštění vnitřních prostorů [55]

Další nevýhodou metody je, že pro dostatečné zvýšení povrchové kvality je ve většině případech sledován významný úběr materiálu [51]. Mohl by vést ke špatně předvídatelnému chování konstrukčních částí dílu, změně geometrie a přesnosti dílu. Úběr materiálu může být kritický hlavně pro ostré hrany a místa s nízkou tloušťkou stěn [46]. Pro aplikace vnitřních kanálků to nemusí být velký problémem. U nízkého času v elektrolytu je úběr významně nižší, zároveň ale není dosaženo takové kvality povrchu.



Obr. 4-3 Původně vzorek kvádrového tvaru po 20 minutách elektrolytického leštění [46]

Problém s úběrem materiálu by se dal vyřešit vytvořením komponenty větší. Následným elektrolytickým úběrem na nefunkčních plochách, který je možný předvídat a určit, a finálním dokončením funkčních ploch, například obráběním pro vysokou rozměrovou přesnost.

Samotný vliv na únavovou pevnost komponent plyne z většiny ze zvýšení kvality povrchu. U elektrolytického leštění nebyly popsány další mechanismy, které by únavové vlastnosti dále zlepšovaly. Ve studii [51] bylo však sledováno dosažení až překvapivě vysoké únavové životnosti pro díly Ti-6Al-4V, vytvořené 3D kovovým tiskem. Byla použita komerční varianta elektrolytického leštění. Díly byly po vytisknutí tepelně zpracovány pro uvolnění zbytkových napětí, následně byla použita technologie HIP. Toto zlepšuje únavovou životnost komponenty, protože snižuje množství a velikost vnitřních defektů. Po elektrolytickém leštění měly díly Ra 2,7 μm . To je dobrá kvalita povrchu, ale stále významně nižší než u některých dalších technologiích.

Autor uvádí, že výsledná únavová životnost při 3×10^7 cyklech byla 820 MPa. To významně převyšuje únavovou životnost dosáhnoutou ostatními technologiemi viz. (Obr. 4-1). Technologiemi, které dosáhly i lepší kvality povrchu, navíc ještě mohly například zavádět zbytková napětí do povrchu. Zbytková napětí by dále zlepšovala jejich únavovou odolnost. Samotný fenomén nebyl ve studii dostatečně dobře vysvětlen. Ačkoliv výsledky autora vypadají slibně, myslím, že před použitím dané technologie by bylo potřebné výsledky znovu experimentálně ověřit. Pokud se ale výsledné únavové vlastnosti alespoň přiblíží k těm, které prezentuje autor, bude dané zpracování výbornou možností povrchové úpravy.

4.1.9 Návrh povrchových úprav

Pro standardní komponenty, od kterých očekáváme dobré celkové mechanické vlastnosti, ale které zároveň nejsou kritické pro funkci sestavy. Takové, které nemají omezení vnesená konstrukcí, jako příliš úzké stěny nebo velké množství vnitřní geometrie je ideální použití omílání. Ačkoliv časově náročná technologie nabízí možnost velice dobré povrchové kvality, zvyšuje únavovou pevnost a není drahá ani příliš složitá.

U komponent, u kterých omílání nebude dosahovat uspokojivých výsledků. Například kvůli složitější geometrii, na které budou mít omílací tělíska problém efektivně snížit drsnost povrchu. V případech, kdy budeme chtít vysokou únavovou pevnost při vysokém počtu cyklů, nebo významně vyšší únavovou pevnost u menšího počtu cyklů, je výhodné použít kuličkování. Kuličkování zvyšuje celkovou únavovou pevnost zaváděním zbytkového napětí do komponenty. Samo o sobě má průměrné výsledky. Použitím tepelného zpracování, nejlépe HIP, před samotným procesem zlepši únavovou životnost v závislosti na vnitřních defektech. Kuličkování také zvyšuje tvrdost na povrchu komponenty. Bez dalších zásahů má však problémy dostat se na vysoké kvality povrchu. Proto by bylo výhodné povrch před kuličkováním upravit na lepší kvalitu. Jednou z nabízejících se možností na úpravu před kuličkováním je pískování kvůli už dříve zmíněným synergickým efektům. Takovýto postup nabízí dobrou kvalitu povrchu a několik možností zlepšení vlastností komponenty. Zároveň je ale využití HIP drahé a náročné, takže použití je vhodné spíše pro kritické aplikace.

Komponenty, u kterých vyžadujeme vysokou kvalitu povrchu, které nemají příliš složitou geometrii a kterých bychom chtěli upravit velké množství, bude dobré upravit za použití laserového leštění. Metodu je možné automatizovat a je možné dosáhnout Ra v řádu desetin mikrometru. Zvýšíme tvrdost a vyřešíme připečené částice. Zároveň je potřeba mít jasně určenou únavovou životnost, kterou od komponenty očekáváme. Metoda, pokud není provedena v inertní atmosféře, snižuje únavovou životnost dílů. Použitím inertní atmosféry je možné dostat díly na lepší vlastnosti a následující tepelnou úpravou jsme schopni je přiblížit k únavové životnosti ostatních metod. Metoda vyniká pro sériové použití a dosažení nejvyšších kvalit povrchu.

Některé komponenty mohou mít hluboké kanálky, jejichž povrch bude potřeba upravit, které jsou pro ostatní metody špatně přístupné. V takových situacích se dá s výhodou využít elektrolytického leštění. Při změnách ke standardnímu rozmístění aparátu, například použití elektrody uvnitř, je možné spolehlivě upravit vnitřní plochy. Zároveň je takto možné se vyhnout přílišnému ovlivnění geometrie vnějších částí.

Vnější povrchy má ale také smysl pomocí této technologie upravovat. Je dosaženo odstranění nečistot a zvýšení kvality povrchu bez tepelného ovlivnění a zbytkových napětí. To je vhodné hlavně pro komponenty s optimalizovanou geometrií pro snížení hmotnosti a postupnými přechody. Takovéto komponenty, které nebudou mít ostré hrany, nebudou tolik trpět na změny geometrie při úběru materiálu. Zároveň se komponenty vyhnou tvarovým deformacím, zapříčiněným zbytkovým napětím, uváděným do komponenty pomocí mechanicky pracujících metod. Jejich složitá geometrie, která by mohla být omezením při úpravě laserem, nemusí být pro elektrochemické leštění překážkou.

5 ZÁVĚR

Bakalářská práce se zabývá povrchovými úpravami komponent vytvořených 3D kovovým tiskem, hlavně pomocí technologie SLM. Jedná se atraktivní technologii, pomocí které jsme schopni vytvořit součásti složitých tvarů, ale přímému použití brání nízká kvalita povrchu. Protože jsou standardně používané metody nevhodné, bylo cílem najít a popsat metody, které budou pro úpravu vhodné. Byly popsány metody pro úpravy povrchu s důrazem na materiály, Ti-6Al-4V a Inconel 718, využívané mimo jiné v leteckém průmyslu. Byla prozkoumána problematika závislosti únavové pevnosti na kvalitě povrchu a vnitřních defektech, které komponenty vyrobené touto technologií mají.

Samotná kvalita povrchu má výrazný vliv na únavovou životnost, ale většina povrchových úprav má výrazný vliv nejenom na ni, ale zároveň i na další vlastnosti materiálu. Toto dokáže být velice výhodné, protože správným zvolením metody povrchové úpravy, je možné dosáhnout vylepšení specifických vlastností, které po komponentě požadujeme. Další možností je metody kombinovat pro minimalizování negativ daných metod nebo dosáhnutí synergického účinku.

Samotný návrh zpracování povrchu odrážel výhody a omezení jednotlivých metod, a to ať už z hlediska ovlivnění materiálových vlastností, geometrické omezení, nebo časovou náročnost daných operací. Pro většinu metod bylo možné najít vlastní uplatnění i když některé metody dosahovaly v průměru lepších výsledků než jiné. Všechny metody jsou ve stálém vývoji. Bylo popsáno rozmanité spektrum publikací, od těch, vydaných ještě v minulém tisíciletí, k těm, které vyšly méně než měsíc před odevzdáním práce. Často bylo v nových publikacích dosaženo až překvapivě dobrých výsledků, například tím, že ve studiích optimalizovali procesní parametry jednotlivých metod. U většiny metod je stále k vidění vývoj a pokrok.

Byly vybrány relevantní metody, ale spousta dalších funkčních a neméně zajímavých metod nedostalo svůj prostor. Při další příležitosti rozvíjet toto téma, by bylo užitečné nejenom popsat další metody a porovnat je se stávajícími, ale zpracovat je i pro další materiály. Většina experimentů je provozována v laboratorních podmínkách na vzorcích malých velikostí a často plošných tvarů. Takto získané výsledky jsou důležité pro popsání metody, ale pro technické použití další možnost rozvoje tématu by bylo vyzkoušet dané metody na vzorky složitějších, neideálních tvarů, v podmínkách lépe odpovídajících realitě.

Metody mají mezi sebou pozorovatelné rozdíly, některé dosahují lepších výsledků, ale porovnávání výsledků jednotlivých metod není finálním a jednoznačným faktorem rozhodujícím o použitelnosti metody. Pro spoustu metod bude nejdůležitějším kritériem použitelnosti jejich náročnost provedení a cena. Ačkoliv některé metody dosahují přesnosti v desetinách mikrometru a po několika tepelných zpracováních nabídnou i dobré mechanické vlastnosti, neznamená to, že tyto metody budou pro reálný trh atraktivní. Důkladná analýza výhod některých metod a cena, kterou za ně budeme muset zaplatit. Porovnání k tomu, co poskytnou jiné metody a za kolik. To je další meta, kam je případně možné pokračovat, a jeden z posledních kroků pro opravdu svědomité ovládnutí problematiky povrchových úprav aditivně vytvořených kovových komponent.

6 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] TODD, Grimm. Overview. In: *User's Guide to Rapid Prototyping*. B.m.: Society of Manufacturing Engineers (SME), 2004, p. 1. ISBN 0872636976.
- [2] PEGUES, Jonathan, Michael ROACH, R WILLIAMSON and Nima SHAMSAEI. Volume Effects on the Fatigue Behavior of Additively Manufactured Ti-6Al 4V Part. In: . 2018.
- [3] SANAEI, Niloofar and Ali FATEMI. Analysis of the effect of surface roughness on fatigue performance of powder bed fusion additive manufactured metals. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics* [online]. 2020, **108**, 102638. ISSN 01678442. Available at: doi:10.1016/j.tafmec.2020.102638
- [4] FATEMI, Ali, Reza MOLAEI, Jutima SIMSIRIWONG, Niloofar SANAEI, Jonathan PEGUES, Brian TORRIES, Nam PHAN and Nima SHAMSAEI. Fatigue behaviour of additive manufactured materials: An overview of some recent experimental studies on $\langle \text{Ti-6Al-4V} \rangle$ considering various processing and loading direction effects. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures* [online]. 2019, **42**(5), 991–1009. ISSN 8756-758X. Available at: doi:10.1111/ffe.13000
- [5] DULEBA, Branislav and Janusz W SIKORA. MATERIALS & FINISHING METHODS OF DMLS MANUFACTURED PARTS. In: . 2011.
- [6] WITKIN, David B., Dhruv N. PATEL, Henry HELVAJIAN, Lee STEFFENEY and Agustin DIAZ. Surface Treatment of Powder-Bed Fusion Additive Manufactured Metals for Improved Fatigue Life. *Journal of Materials Engineering and Performance* [online]. 2019, **28**(2), 681–692. ISSN 1059-9495. Available at: doi:10.1007/s11665-018-3732-9
- [7] BENEDETTI, M., E. TORRESANI, M. LEONI, V. FONTANARI, M. BANDINI, C. PEDERZOLLI and C. POTRICH. The effect of post-sintering treatments on the fatigue and biological behavior of Ti-6Al-4V ELI parts made by selective laser melting. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials* [online]. 2017, **71**, 295–306. ISSN 17516161. Available at: doi:10.1016/j.jmbbm.2017.03.024
- [8] WYCISK, Eric, Andreas SOLBACH, Shafaqat SIDDIQUE, Dirk HERZOG, Frank WALTHER and Claus EMMELMANN. Effects of Defects in Laser Additive Manufactured Ti-6Al-4V on Fatigue Properties. *Physics Procedia* [online]. 2014, **56**, 371–378. ISSN 18753892. Available at: doi:10.1016/j.phpro.2014.08.120
- [9] ATKINSON, H. v. and S. DAVIES. Fundamental aspects of hot isostatic pressing: An overview. *Metallurgical and Materials Transactions A* [online]. 2000, **31**(12), 2981–3000. ISSN 1073-5623. Available at: doi:10.1007/s11661-000-0078-2

- [10] EDWARDS, P. and M. RAMULU. Fatigue performance evaluation of selective laser melted Ti–6Al–4V. *Materials Science and Engineering: A* [online]. 2014, **598**, 327–337. ISSN 09215093. Available at: doi:10.1016/j.msea.2014.01.041
- [11] KOBRYN, P and S SEMIATIN. Mechanical Properties of Laser-Deposited Ti-6Al-4V. *Solid Freeform Fabrication Proceedings*. 2001.
- [12] KHANNA, Navneet, Chetan AGRAWAL, Manu DOGRA and Catalin Iulian PRUNCU. Evaluation of tool wear, energy consumption, and surface roughness during turning of inconel 718 using sustainable machining technique. *Journal of Materials Research and Technology* [online]. 2020, **9**(3), 5794–5804. ISSN 22387854. Available at: doi:10.1016/j.jmrt.2020.03.104
- [13] MUSFIRAH, A.H., J.A. GHANI and C.H. Che HARON. Tool wear and surface integrity of inconel 718 in dry and cryogenic coolant at high cutting speed. *Wear* [online]. 2017, **376–377**, 125–133. ISSN 00431648. Available at: doi:10.1016/j.wear.2017.01.031
- [14] DUDZINSKI, D, A DEVILLEZ, A MOUFKI, D LARROUQUÈRE, V ZERROUKI and J VIGNEAU. A review of developments towards dry and high speed machining of Inconel 718 alloy. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* [online]. 2004, **44**(4), 439–456. ISSN 08906955. Available at: doi:10.1016/S0890-6955(03)00159-7
- [15] AGRAWAL, Chetan, Jwalant WADHWA, Anjali PITRODA, Catalin Iulian PRUNCU, Murat SARIKAYA and Navneet KHANNA. Comprehensive analysis of tool wear, tool life, surface roughness, costing and carbon emissions in turning Ti–6Al–4V titanium alloy: Cryogenic versus wet machining. *Tribology International* [online]. 2021, **153**, 106597. ISSN 0301679X. Available at: doi:10.1016/j.triboint.2020.106597
- [16] SEN, Ceren, Levent SUBASI, Ozan Can OZANER and Akin ORHANGUL. The Effect of Milling Parameters on Surface Properties of Additively Manufactured Inconel 939. *Procedia CIRP* [online]. 2020, **87**, 31–34. ISSN 22128271. Available at: doi:10.1016/j.procir.2020.02.072
- [17] MATULA, Petr. *Návrh konstrukce omíláčiho stroje* [online]. 2014. Available at: <http://hdl.handle.net/11012/31666>
- [18] KARTHIK, R., K. ELANGO VAN, S. SHANKAR and K.G. GIRISHA. An experimental analysis on surface roughness of the selective laser sintered and unsintered Inconel 718 components using vibratory surface finishing process. *Materials Today: Proceedings* [online]. 2022. ISSN 22147853. Available at: doi:10.1016/j.matpr.2022.04.448

- [19] WONG, B. J., K. MAJUMDAR, K. AHLUWALIA and S. H. YEO. Effects of high frequency vibratory finishing of aerospace components. *Journal of Mechanical Science and Technology* [online]. 2019, **33**(4), 1809–1815. ISSN 1738-494X. Available at: doi:10.1007/s12206-019-0333-y
- [20] BAGEHORN, S., J. WEHR and H.J. MAIER. Application of mechanical surface finishing processes for roughness reduction and fatigue improvement of additively manufactured Ti-6Al-4V parts. *International Journal of Fatigue* [online]. 2017, **102**, 135–142. ISSN 01421123. Available at: doi:10.1016/j.ijfatigue.2017.05.008
- [21] WITKIN, David B., Dhruv N. PATEL, Henry HELVAJIAN, Lee STEFFENEY and Agustin DIAZ. Surface Treatment of Powder-Bed Fusion Additive Manufactured Metals for Improved Fatigue Life. *Journal of Materials Engineering and Performance* [online]. 2019, **28**(2), 681–692. ISSN 1059-9495. Available at: doi:10.1007/s11665-018-3732-9
- [22] ISF PROCESS. *REM'S ISF PROCESS ALLOY CAPABILITIES INCLUDE* [online]. [accessed. 2022-05-16]. Available at: <https://www.remchem.com/technology/processes/isf-process/>
- [23] SZYMCZYK-ZIÓŁKOWSKA, Patrycja, Viktoria HOPPE, Malgorzata RUSIŃSKA, Jolanta GAŚIOREK, Grzegorz ZIÓŁKOWSKI, Karolina DYDAK, Joanna CZAJKOWSKA and Adam JUNKA. The Impact of EBM-Manufactured Ti6Al4V ELI Alloy Surface Modifications on Cytotoxicity toward Eukaryotic Cells and Microbial Biofilm Formation. *Materials* [online]. 2020, **13**(12), 2822. ISSN 1996-1944. Available at: doi:10.3390/ma13122822
- [24] MUTHAIAH, V.M. Suntharavel, Sushma INDRAKUMAR, Satyam SUWAS and Kaushik CHATTERJEE. Surface engineering of additively manufactured titanium alloys for enhanced clinical performance of biomedical implants: A review of recent developments. *Bioprinting* [online]. 2022, **25**, e00180. ISSN 24058866. Available at: doi:10.1016/j.bprint.2021.e00180
- [25] BAGEHORN, S., J. WEHR and H.J. MAIER. Application of mechanical surface finishing processes for roughness reduction and fatigue improvement of additively manufactured Ti-6Al-4V parts. *International Journal of Fatigue* [online]. 2017, **102**, 135–142. ISSN 01421123. Available at: doi:10.1016/j.ijfatigue.2017.05.008
- [26] MOHAMMADI, Z., A.A. ZIAEI-MOAYYED and A. Sheikh-Mehdi MESGAR. Grit blasting of Ti-6Al-4V alloy: Optimization and its effect on adhesion strength of plasma-sprayed hydroxyapatite coatings. *Journal of Materials Processing Technology* [online]. 2007, **194**(1–3), 15–23. ISSN 09240136. Available at: doi:10.1016/j.jmatprotec.2007.03.119

- [27] SINGLA, Anil Kumar, Mainak BANERJEE, Aman SHARMA, Jagtar SINGH, Anuj BANSAL, Munish Kumar GUPTA, Navneet KHANNA, A.S. SHAHI and Deepak Kumar GOYAL. Selective laser melting of Ti6Al4V alloy: Process parameters, defects and post-treatments. *Journal of Manufacturing Processes* [online]. 2021, **64**, 161–187. ISSN 15266125. Available at: doi:10.1016/j.jmapro.2021.01.009
- [28] JIANG, X.P., X.Y. WANG, J.X. LI, D.Y. LI, C.-S. MAN, M.J. SHEPARD and T. ZHAI. Enhancement of fatigue and corrosion properties of pure Ti by sandblasting. *Materials Science and Engineering: A* [online]. 2006, **429**(1–2), 30–35. ISSN 09215093. Available at: doi:10.1016/j.msea.2006.04.024
- [29] PARIKIA, Farhang, Pupak AMINI and Sirous ASGARI. Influence of mechanical and chemical surface treatments on the formation of bone-like structure in cpTi for endosseous dental implants. *Applied Surface Science* [online]. 2012, **259**, 283–287. ISSN 01694332. Available at: doi:10.1016/j.apsusc.2012.07.033
- [30] DENTI, Lucia and Antonella SOLA. On the Effectiveness of Different Surface Finishing Techniques on A357.0 Parts Produced by Laser-Based Powder Bed Fusion: Surface Roughness and Fatigue Strength. *Metals* [online]. 2019, **9**(12), 1284. ISSN 2075-4701. Available at: doi:10.3390/met9121284
- [31] ZHOU, Liucheng, Xinlei PAN, Xiaosong SHI, Tianhan DU, Lingfeng WANG, Sihai LUO, Weifeng HE and Peiming CHEN. Research on surface integrity of Ti-6Al-4V alloy with compound treatment of laser shock peening and shot peening. *Vacuum* [online]. 2022, **196**, 110717. ISSN 0042207X. Available at: doi:10.1016/j.vacuum.2021.110717
- [32] ALMANGOUR, Bandar and Jenn-Ming YANG. Improving the surface quality and mechanical properties by shot-peening of 17-4 stainless steel fabricated by additive manufacturing. *Materials & Design* [online]. 2016, **110**, 914–924. ISSN 02641275. Available at: doi:10.1016/j.matdes.2016.08.037
- [33] RAMOS, J, Jeremy MURPHY, Kristin WOOD, David BOURELL and Joseph BEAMAN. Surface Roughness Enhancement of Indirect-SLS Metal Parts by Laser Surface Polishing. 2001.
- [34] MA, C.P., Y.C. GUAN and W. ZHOU. Laser polishing of additive manufactured Ti alloys. *Optics and Lasers in Engineering* [online]. 2017, **93**, 171–177. ISSN 01438166. Available at: doi:10.1016/j.optlaseng.2017.02.005
- [35] MA, C.P., Y.C. GUAN and W. ZHOU. Laser polishing of additive manufactured Ti alloys. *Optics and Lasers in Engineering* [online]. 2017, **93**, 171–177. ISSN 01438166. Available at: doi:10.1016/j.optlaseng.2017.02.005

- [36] LI, Yu-Hang, Bing WANG, Cheng-Peng MA, Zhi-Hao FANG, Long-Fei CHEN, Ying-Chun GUAN and Shou-Feng YANG. Material Characterization, Thermal Analysis, and Mechanical Performance of a Laser-Polished Ti Alloy Prepared by Selective Laser Melting. *Metals* [online]. 2019, **9**(2), 112. ISSN 2075-4701. Available at: doi:10.3390/met9020112
- [37] ZHIHAO, Fang, Lu LIBIN, Chen LONGFEI and Guan YINGCHUN. Laser Polishing of Additive Manufactured Superalloy. *Procedia CIRP* [online]. 2018, **71**, 150–154. ISSN 22128271. Available at: doi:10.1016/j.procir.2018.05.088
- [38] KAHLIN, M., H. ANSELL, D. BASU, A. KERWIN, L. NEWTON, B. SMITH and J.J. MOVERARE. Improved fatigue strength of additively manufactured Ti6Al4V by surface post processing. *International Journal of Fatigue* [online]. 2020, **134**, 105497. ISSN 01421123. Available at: doi:10.1016/j.ijfatigue.2020.105497
- [39] KHAIRALLAH, Saad A., Andrew T. ANDERSON, Alexander RUBENCHIK and Wayne E. KING. Laser powder-bed fusion additive manufacturing: Physics of complex melt flow and formation mechanisms of pores, spatter, and denudation zones. *Acta Materialia* [online]. 2016, **108**, 36–45. ISSN 13596454. Available at: doi:10.1016/j.actamat.2016.02.014
- [40] AVILÉS, R., J. ALBIZURI, E. UKAR, A. LAMIKIZ and A. AVILÉS. Influence of laser polishing in an inert atmosphere on the high cycle fatigue strength of AISI 1045 steel. *International Journal of Fatigue* [online]. 2014, **68**, 67–79. ISSN 01421123. Available at: doi:10.1016/j.ijfatigue.2014.06.004
- [41] LEE, Seungjong, Zabihollah AHMADI, Jonathan W. PEGUES, Masoud MAHJOURI-SAMANI and Nima SHAMSAEI. Laser polishing for improving fatigue performance of additive manufactured Ti-6Al-4V parts. *Optics & Laser Technology* [online]. 2021, **134**, 106639. ISSN 00303992. Available at: doi:10.1016/j.optlastec.2020.106639
- [42] UNO, Yoshiyuki, Akira OKADA, Kensuke UEMURA, Purwadi RAHARJO, Toshihiko FURUKAWA and Kosaku KARATO. High-efficiency finishing process for metal mold by large-area electron beam irradiation. *Precision Engineering* [online]. 2005, **29**(4), 449–455. ISSN 01416359. Available at: doi:10.1016/j.precisioneng.2004.12.005
- [43] SANKARA NARAYANAN, T.S.N., Jisoo KIM and Hyung Wook PARK. High performance corrosion and wear resistant Ti-6Al-4V alloy by the hybrid treatment method. *Applied Surface Science* [online]. 2020, **504**, 144388. ISSN 01694332. Available at: doi:10.1016/j.apsusc.2019.144388

- [44] WALKER, J.C., J.W. MURRAY, M. NIE, R.B. COOK and A.T. CLARE. The effect of large-area pulsed electron beam melting on the corrosion and microstructure of a Ti6Al4V alloy. *Applied Surface Science* [online]. 2014, **311**, 534–540. ISSN 01694332. Available at: doi:10.1016/j.apsusc.2014.05.105
- [45] LASSELL, Austin. *The electropolishing of electron beam melting, additively manufactured Ti6Al4V titanium : relevance, process parameters and surface finish*. [online]. B.m., 2016. University of Louisville. Available at: doi:10.18297/etd/2369
- [46] YANG, Li, Hengfeng GU and Austin LASSELL. Surface treatment of Ti6Al4V parts made by powder bed fusion additive manufacturing processes using electropolishing. In: . 2014.
- [47] LANDOLT, Dieter. Fundamental aspects of electropolishing. *Electrochimica Acta* [online]. 1987, **32**, 1–11. Available at: doi:10.1016/0013-4686(87)87001-9
- [48] CLERC, C., M. DATTA and D. LANDOLT. On the theory of anodic levelling: model experiments with triangular nickel profiles in chloride solution. *Electrochimica Acta* [online]. 1984, **29**(10), 1477–1486. ISSN 00134686. Available at: doi:10.1016/0013-4686(84)87031-0
- [49] TEIXEIRA, Alexandre. Development of an Electropolishing Method for Titanium Materials. In: . 2011.
- [50] URLEA, V. and V. BRAILOVSKI. Electropolishing and electropolishing-related allowances for powder bed selectively laser-melted Ti-6Al-4V alloy components. *Journal of Materials Processing Technology* [online]. 2017, **242**, 1–11. ISSN 09240136. Available at: doi:10.1016/j.jmatprotec.2016.11.014
- [51] BAGEHORN, S, Jürgen WEHR, S Keith NIXON, A BALASTRIER, Tobias MERTENS and Hans Jürgen MAIER. ELECTROCHEMICAL ENHANCEMENT OF THE SURFACE MORPHOLOGY AND THE FATIGUE PERFORMANCE OF Ti-6 Al-4 V PARTS MANUFACTURED BY LASER BEAM MELTING. In: . 2017.
- [52] BAICHENG, Zhang, Lee XIAOHUA, Bai JIANGMING, Guo JUNFENG, Wang PAN, Sun CHEN-NAN, Nai MUILING, Qi GUOJUN and Wei JUN. Study of selective laser melting (SLM) Inconel 718 part surface improvement by electrochemical polishing. *Materials & Design* [online]. 2017, **116**, 531–537. ISSN 02641275. Available at: doi:10.1016/j.matdes.2016.11.103
- [53] WYCISK, Eric, Claus EMMELMANN, Shafaqat SIDDIQUE and Frank WALTHER. High Cycle Fatigue (HCF) Performance of Ti-6Al-4V Alloy Processed by Selective Laser Melting. *Advanced Materials Research* [online]. 2013, **816–817**, 134–139. ISSN 1662-8985. Available at: doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.816-817.134

- [54] TYAGI, Pawan, Tobias GOULET, Christopher RISO, Robert STEPHENSON, Nitt CHUENPRATEEP, Justin SCHLITZER, Cordell BENTON and Francisco GARCIA-MORENO. Reducing the roughness of internal surface of an additive manufacturing produced 316 steel component by chempolishing and electropolishing. *Additive Manufacturing* [online]. 2019, **25**, 32–38. ISSN 22148604. Available at: doi:10.1016/j.addma.2018.11.001
- [55] SEDAHMED, G.H. and L.W. SHEMILT. Electropolishing of cylindrical cavities under natural convection conditions. *Surface and Coatings Technology* [online]. 1986, **27**(3), 279–285. ISSN 02578972. Available at: doi:10.1016/0257-8972(86)90107-6

7 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

7.1 Příklady použitých fyzikálních veličin

σ	napětí	[Mpa]
f	frekvence	[Hz]
t	čas	[s]
R_a, R_z, R_s	charakteristiky povrchu	[μm]
p	tlak	[Pa]
λ	vlnová délka	[nm]
t	teplota	[°C]
v	rychlost	[m/s]
d	průměr	[mm]
P	výkon	[W]
U	napětí	[V]
SLS	Selective Laser Sintering	
SLM	Selective Laser Melting	
HIP	Hot Isostatic Pressing	
EBM	Electron Beam Melting	
EL	elektrolytické leštění	
3D	trojrozměrné	

8 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

Obr. 3-1 Grafy popisující únavovou životnost komponenty [8]	18
Obr. 3-2 Výsledná drsnost povrchu obrábění při kryogenní teplotě [13]	20
Obr. 3 3 Závislost výsledné drsnosti povrchu na řezné a posuvné rychlosti [16].....	21
Obr. 3-4 Výsledná drsnost povrchu při 75 Hz v závislosti na čase [18]	23
Obr. 3-5 Graf únavové životnosti Ti-6Al-4V vzorků [7]	27
Obr. 3-6 Schéma laserového leštění [35]	28
Obr. 3-7 Povrch po laserovém leštění v závislosti na parametrech [33]	29
Obr. 3-8 Schéma pro metody využívající elektronový paprsek [44]	31
Obr. 3-9 Graf sledující kvalitu povrchu v závislosti na množství absorbované energie [42]	32
Obr. 3-10 Progres elektrolytického leštění povrchu vzorku [47]	33
Obr. 3-11 Únavová životnost elektrolyticky leštěných vzorků [51].....	34
Obr. 3-12 Kvalita povrchu a úběr materiálu v závislosti na čase [52]	35
Obr. 3-13 Drsnost povrchu v závislosti na délce procesu [52]	35
Obr. 4-1 Porovnání metod na únavovou životnost vzorků [38]	40
Obr. 4-2 Schéma pro možný aparát elektrolytického leštění vnitřních prostorů [55]	41
Obr. 4-3 Původně vzorek kvádrového tvaru po 20 minutách elektrolytického leštění [46]	42