

České vysoké učení technické v Praze

Fakulta strojní

Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie



**Aplikace technologie LSP na díly vyráběné aditivními
technologiemi**

**Laser shock peening technique application on parts
made by additive manufacturing**

Bakalářská práce

Autor: Jan Dedek

Vedoucí práce: Ing. Libor Beránek, Ph.D.

Studijní program: Výroba a ekonomika ve strojírenství

Praha 2021

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Dedek** Jméno: **Jan** Osobní číslo: **483357**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**
Studijní program: **Výroba a ekonomika ve strojírenství**
Studijní obor: **Technologie, materiály a ekonomika strojírenství**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Aplikace technologie LSP na díly vyráběné aditivními technologiemi

Název bakalářské práce anglicky:

Laser shock peening technique application on parts made by additive manufacturing

Pokyny pro vypracování:

1. Princip technologie LSP a její vliv na integritu povrchu
2. Aplikace LSP v průmyslu a používané technické prostředky
3. Aplikace technologie LSP na precipitačně vytvrditelnou nerezovou ocel 17-4 PH
4. Vyhodnocení vliv LSP na vybrané kvalitativní parametry u dílů vyráběných technologií PBF-LB

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Libor Beránek, Ph.D. ústav technologie obrábění, projektování a metrologie FS

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

Ing. Ondřej Stránský ústav technologie obrábění, projektování a metrologie FS

Datum zadání bakalářské práce: **25.03.2022** Termín odevzdání bakalářské práce: **29.07.2022**

Platnost zadání bakalářské práce: _____

Ing. Libor Beránek, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

Ing. Libor Beránek, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

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

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně a to výhradně s použitím pramenů a literatury, uvedených v seznamu citovaných zdrojů. Souhlasím s publikací výsledků vedoucím práce, pokud budu uveden jako spoluautor.

V Praze dne:

.....

Podpis

Anotace

Tato bakalářská práce se zaměřuje na popis procesu Laser shock peening, jeho historii a vliv na zbytková napětí v materiálu, tvrdost, texturu povrchu, únavovou životnost a porovnání s procesem kuličkování. Dále popisuje možnosti využití v aditivní výrobě na zlepšení tahových napětí, porozity, textury povrchu a mikrostruktury. Praktická část je věnována porovnání vlastností ozubených kol před a po účincích procesu LSP.

Klíčová slova

LSP, laser, zbytková napětí, 3D tisk, profil, textura povrchu, porozita

Annotation

This bachelor's thesis focuses on the description of the Laser shock peening process. Among the subjects of interest are its history and effect on the residual stress in the material, as well as its hardness, surface texture and fatigue life. What follows is a comparison with the shot peening process. The thesis also describes the possibilities of use in additive manufacturing to improve tensile stresses, porosity, surface texture and microstructure. The practical part of the thesis is a properties comparison of gears before and after the effects of the LSP process.

Keywords

LSP, laser, residual stress, 3D printing, profile, surface texture, porosity

Poděkování

V rámci tvorby této bakalářské práce bych tímto rád poděkoval vedoucímu práce Ing. Liboru Beránkovi, Ph.D. a konzultantovi Ing. Ondřeji Stránskému za vstřícné jednání, poskytnuté rady a veškerou pomoc při zhotovování mé bakalářské práce. Také bych rád poděkoval své rodině za podporu a trpělivost potřebnou pro vznik této práce.

Seznam použitých symbolů a zkratek

σ_y^{dyn}	dynamická mez kluzu
3D	trojrozměrný
AM	additive manufacturing
b	šířka věnce ozubeného kola
BHC	Beam Hardening Correction
c	rychlost zvuku elastických vln
CAD	computer-aided design
C_{el}	elastická rychlost deformace
CLFA	Cooperation Laser Franco-Allemande-Arcueil Cedex
CMM	Coordinate measuring machine (souřadnicový měřicí stroj)
CNC	počítačem řízený obráběcí stroj
C_{pl}	plastická rychlost deformace
CT	Computed Tomography (výpočetní tomografie)
d	průměr roztečné kružnice
d_a	průměr hlavové kružnice
d_b	průměr základní kružnice
d_f	průměr patní kružnice
DMLS	Direct Metal Laser Sintering
EBM	Electron Beam Melting
FEM	finite element method
f_{α}	úchylka tvaru profilu
F_{β}	úchylku tvaru sklonu
$f_{H\alpha}$	úchylka úhlu profilu
$F_{H\beta}$	úchylku úhlu sklonu
F_{α}	celková úchylka profilu
F_{β}	celková úchylku sklonu
GPS	Geometrical product specification
HEL	Hugoniotův elastický limit
HP	hammer peening
HRC	tvrdost dle Rockwella
HV	tvrdost dle Vickerse
KDP	dihydrogenfosforečnan draselný

LALP Cedex	Laboratoire d'Application des Lasers de Puissance-Arcueil
Lp	plasticky ovlivněná hloubka
LPwC	laser peening without coating
LSP	Laser shock peening
LULI	Laboratoire d'Utilisation des Lasers Intenses-Ecole Polytechnique, Palaiseau Cedex
MKP	metoda konečných prvků
m_n	modul kola
Nd:glass	neodynem dopované sklo
P	tlak
P	základní profil
p, q	materiálové poměry
Pa	střední aritmetická hodnota základního profilu
PBF-LB	Powder bed fusion-Laser beam
Pp	největší výška výstupku základního profilu
P_{sw}	kritický tlak
Pv	největší hloubka prohlubně základního profilu
Pz	největší výška základního profilu
R	profil drsnosti
r	rádus ovlivněné oblasti
Ra	střední aritmetická hodnota profilu drsnosti
Rp	největší výška výstupku profilu drsnosti
Rv	největší hloubka prohlubně profilu drsnosti
Rz	největší výška profilu drsnosti
s	směrodatné odchyly
Sa	aritmetický průměr výšky omezené stupnice povrchu
SCC	stress corrosion cracking
SEM	elektronový skenovací mikroskop
S-F	povrch po aplikaci S-filtru a F-operace
S-L	povrch vzniklý aplikací L filtru na S-F povrch
SLM	Selective Laser Melting
SLS	Selective Laser Sintering
Sp	maximální výška piku omezené stupnice povrchu

SP	shot peening (kuličkování)
Sv	maximální hloubka prohlubně omezené stupnice povrchu
Sz	maximální výška omezené stupnice povrchu
TEM	transmisní elektronový mikroskop
V _{mc}	jádro objemu materiálu omezené stupnicí povrchu
V _{mp}	pík objemu materiálu omezené stupnicí povrchu
W	profilu vlnitosti
Wa	střední aritmetická hodnota profilu vlnitosti
WEDM obrábění)	wire electric discharge machining (drátové elektricky vybíjecí
W _p	největší výška výstupku profilu vlnitosti
W _v	největší hloubka prohlubně profilu vlnitosti
W _z	největší výška profilu vlnitosti
\bar{x}	průměrné hodnoty
x	součinitel posunutí profilu (korekce)
YAG	yttrito-hlinitý granát
z	počet zubů kola
α_n	úhel záběru kola v normálné rovině
β	úhel sklonu ozubení
δ_{max}	maximální napětí
δ_{min}	minimální napětí
λ	Laméovův koeficient
λ_c	základní délka
μ	Laméovův koeficient
ρ_0	hustota materiálu
σ_{surf}	maximální povrchové zbytkové napětí
T	délka pulzu
ν	Poissonovo číslo

Obsah

Úvod.....	12
1 Metody dokončování povrchu bez úběru materiálu	13
1.1 Válečkování	13
1.2 Hlazení.....	13
1.3 Kuličkování.....	14
1.4 Vibrační zpevňování.....	15
1.5 Machine hammer peening.....	15
1.6 Laser shock processing.....	15
2 Laser shock peening	16
2.1 Historie	16
2.2 Popis technologie LSP.....	17
2.3 Procesní parametry	19
2.4 Charakteristika zbytkových napětí vyvolaných LSP	21
2.5 Elasticko-plastický model pro zbytková napětí.....	22
2.6 Zbytková napětí a absorpční vrstva	23
2.7 Vliv laseru na zbytková napětí	24
2.8 Porovnání LSP a SP.....	27
2.9 Vliv LSP na morfologii a mikrostrukturu	28
2.10 Vliv LSP na mechanické vlastnosti	29
3 LSP v aditivní výrobě	32
4 Použité metody měření	36
5 Praktická část	40
5.1 Textura povrchu před LSP	41
5.1.1 Postup vyhodnocení v softwaru Mountains	42
5.1.2 Získané hodnoty.....	48
5.2 CT skenování	57

5.2.1	Nastavení CT	58
5.2.2	Pozorování porozity	62
5.2.3	Měření geometrie ozubení	65
5.3	LSP proces	69
5.4	Textura povrchu po LSP	70
	Závěr	73
	Seznam použité literatury	75
	Seznam obrázků	79
	Seznam tabulek	83
	Seznam grafů	84

Úvod

Ve strojním průmyslu je kladen důraz na inovace. Jsou čím dál vyšší nároky na životnost dílů, bezpečnost a užité vlastnosti. Proto vznikají stále nové technologie, které umožňují vytvářet výrobky se stále lepšími vlastnostmi, které se projeví i nižší ekonomickou náročností.

Z důvodu životnosti a zlepšení funkčních vlastností se používají dokončovací operace. Existují dokončovací operace s úběrem materiálu, jako jsou jemné obrábění, broušení, honování, lapování, leštění nebo omílání. Tyto operace slouží k vytvoření finální kvality povrchu součásti. Zlepšuje se především textura povrchu a geometrické vlastnosti. [4]

Dokončovací operace bez úběru materiálu (válečkování, hlazení, kuličkování, vibrační zpevňování nebo machine hammer peening) mají za úkol vytváření zbytkových napětí v součásti. Zbytková napětí zlepšují především únavovou životnost a zabraňují vzniku trhlin.

Mezi nekonvenční metody dokončování bez úběru materiálu je řazen proces LSP (Laser shock peening), který používá laser k vytváření rázových vln na povrchu materiálu. Rázové vlny se šíří součástí a indukují zbytková napětí. Metoda LSP byla vyvinuta v 70. letech 20. století v USA. Samotný proces závisí nejen na parametrech laseru, ale také na prostředí, na povrchu součásti a materiálu.

Se zvyšující se popularitou 3D tisku začal proces LSP mít uplatnění také na tištěných výrobcích z různých materiálů, kde ovlivňuje vliv tahových napětí, porozitu a mikrostrukturu.

Cílem práce je porovnat texturu povrchu na konfokálním mikroskopu, porozitu a geometrii ze získaných CT dat před a po procesu LSP a ukázat, jestli je v tomto ohledu LSP proces prospěšný či nikoliv.

1 Metody dokončování povrchu bez úběru materiálu

Zpevněním je dosahováno zlepšení některých vlastností kovů, jako jsou tvrdost, únavová pevnost, odolnost proti korozi a otěru. Proces se řadí mezi dokončování bez úběru materiálu a je založen na indukování zbytkových tlakových napětí do materiálu. Často je to potřeba u součástí dříve tepelně zpracovaných, které ztrácejí tlaková napětí. [3], [20]

1.1 Válečkování

Princip válečkování spočívá v přitlačování rotujícího tvářecího prvku na materiál. Tímto prvkem je často váleček nebo kulička. Válečkování můžeme rozdělit na statické a dynamické. U statického válečkování je prvek přitlačován konstantně k povrchu. Dynamické válečkování spočívá v přerušovaném stlačování. U statického zatěžování je dosahováno lepších drsností, ale lepší jakosti dosahují dynamicky válečkované součásti. Válečkováním se zarovná nerovný povrch, kdy se výstupky zatlačují a prohlubně vyplňují. Dosahuje se drsnosti Ra 0,05 - 0,4 μm . Čím je průměr válečku menší tím se zvyšuje zpevnění a také drsnost. Tvrdost se zlepšuje o 20 až 100 %. Válečkování se používá také jako druh kalibrace součástky. Statické válečkování je vidět na obrázku 1. [3], [21]



Obrázek 1: Statické válečkování [3]

1.2 Hlazení

Princip je podobný jako u válečkování, ale u hlazení nedochází k odvalování nástroje, ale ke kluznému tření mezi nástrojem a součástí. Jako nástroj se používá diamant s kuželovou špičkou. Hlazením dochází ke zpevnění materiálu a odstranění

nerovností. Hlavní předností hlazení vůči válečkování je možné použití na tvrdší materiály. Povrchy upravené hlazením dosahují tvrdostí až 65 HRC a drsností mezi Ra 0,1 a 0,4 μm . Metoda hlazení je vidět na obrázku 2. [3], [20], [21]



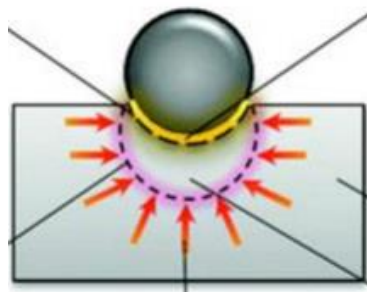
Obrázek 2: Vnější hlazení diamantem

1.3 Kuličkování

Kuličkování pod anglickým názvem shot-peening (SP) je metoda, kde se malé částice v podobě broků vrhají na povrch součásti a tím je vyvolána plastická deformace. Broky nemají abrazivní účinek, jak je tomu u tryskání. Při SP dochází k tvorbě zbytkového tlakového napětí, které má příznivý vliv na zlepšení vlastností součásti. Princip je vidět na obrázku 3. [3], [22]

Důležitými parametry u kuličkování jsou úhel dopadu, rychlost vyvolaná tlakem, kterým jsou kuličky hnány a vlastnostmi kuličky (průměr, hmotnost, tvrdost, materiál). Úhel dopadu částic je 50° až 80° . Tlak vyhánějící kuličky se volí mezi 0,1 až 2 MPa. Tím je dosahována rychlost až $60 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. S větším průměrem kuličky je zlepšována drsnost. Touto technologií se dosahuje drsností Ra 0,4 – 1,6 μm a hloubka zpevnění se pohybuje 0,05 až 0,5 mm. [3], [22]

Výhodou kuličkování oproti válečkování nebo hlazení je možnost dokončování tvarově složitějších součástí jako jsou například ozubená kola a lopatky turbín. Zlepšuje mechanické vlastnosti, korozní odolnost, únavovou životnost a snižuje pórovitost. [3], [22]



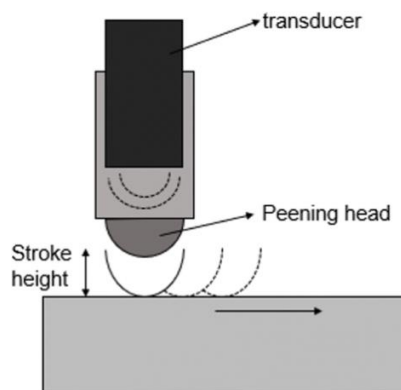
Obrázek 3: Tvorba plastické deformace kuličkováním

1.4 Vibrační zpevňování

Vibrační zpevňování neboli také vibrační kuličkování je podobné SP. V tomto procesu je potřeba zajistit přípravek, do kterého je upevněna naše zpevňovaná součást. Do přípravku je následně dán ocelový nebo litinový granulát. Přípravek je následně upnut do rámu vibračního stroje a díky asynchronnímu motoru je rozkmitán. Kuličky uvnitř přípravku narážejí na povrch součásti a dochází k vyvolání plastické deformace. Kuličky je možné rozkmitat takto mechanicky nebo ultrazvukem. Frekvence vibrací je okolo 30 kHz. Tato metoda je často využívána na tvarově složitě součásti. [3], [22]

1.5 Machine hammer peening

Machine hammer peening zkráceně hammer peening (HP) využívá karbidové nebo kalené kuličky, která je upnuta na tělo nástroje. Kulička kmitavým pohybem s frekvencí 50-500 Hz v osovém směru naráží na materiál. Poloha nástroje je řízena robotickým ramenem nebo CNC řízeným strojem. Zdvih nástroje je 1 mm a rychlost při nárazu je v řádech několika metrů za minutu. Nárazy způsobují zpevnění povrchu do hloubky desetin milimetru. Na povrchu naměříme napětí až 1000 MPa. Tato technologie se využívá například u dokončování forem pro vstřikování plastů. Technologie je vidět na obrázku 4. [3]



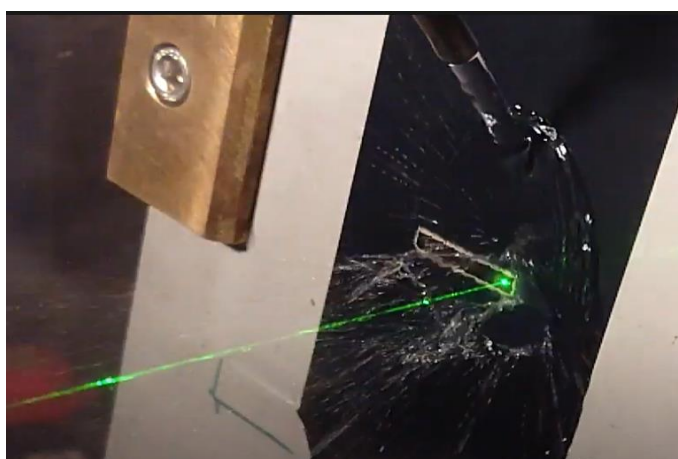
Obrázek 4: Schématický obrázek technologie HP

1.6 Laser shock processing

Laser shock processing popisuje úpravu povrchu pomocí laseru a jeho vyvolaném tlaku. Laser shock processing můžeme rozdělit na dílčí podskupiny. Nejvýznamnější je Laser shock peening založena na vnášení zbytkových napětí do materiálu. Dalšími skupinami jsou Laser shock bending, která má za úkol ohýbání materiálů, Laser shock drawing a laserové tažení. [3]

2 Laser shock peening

Laser shock peening (LSP) je technologie využívající pulzní laserový svazek, který naráží na povrch součásti a tím ho vytvrzuje. Laserový paprsek musí mít vysokou energetickou hodnotu pohybující se v řádech GW/cm^2 a krátkou vlnovou délku. Ta je v řádu několika desítek nanosekund. Tento laserový impuls pak působí na povrch tak, že vytvoří rázovou vlnu, při které dochází k plastické deformaci materiálu a vzniku tlakových zbytkových napětí. To má za následek nejen zvýšení tvrdosti, ale i odolnosti proti únavě, kavitaci a korozi. Snižuje se pravděpodobnost vzniku a šíření povrchových trhlin. Podobný účinek lze dosáhnout i konvenčními způsoby jako je například kuličkování. Při něm ale zpevnění nedosahuje takové hloubky, která je u technologie LSP až desetkrát větší. Hloubka zpevnění je 1-2 mm. Laser shock peening se nejčastěji používá na slitiny železa, titanu, hliníku, niklu a dalších kovových materiálů. Obrázek 5 ukazuje laser narážející na povrch. [1], [2], [3]



Obrázek 5: LSP použití v praxi s absorpční vrstvou (černá páska) a transparentní vrstvou (tekoucí voda)

2.1 Historie

Možnost využití pulzního laserového svazku k vytváření rázových vln a tvorbě plastických deformací byl poprvé objeven v roce 1963 v USA. Proces nazývaný LSP byl vyvinut až o pět let déle v roce 1968 v Battelle Memorial institutu (Columbus, OH, USA). Mezi lety 1968-1981 byl proces původně prováděn za účelem prozkoumání jeho použití pro otvory pro šrouby a další upevňovací prvky. Prováděny byly také výzkumné práce na hliníkových slitinách a ocelích pro letecké aplikace. [3], [5]

Od roku 1986 se studií technologie LSP začali věnovat více systematicky i další země, převážně Francie, Čína a Japonsko. Ve Francii se vývojem technologie LSP zabývali v laboratořích CLFA (Cooperation Laser Franco-Allemande-Arcueil Cedex), LALP (Laboratoire d'Application des Lasers de Puissance-Arcueil Cedex) a LULI (Laboratoire d'Utilisation des Lasers Intenses-Ecole Polytechnique, Palaiseau Cedex), z důvodů dalšího průmyslového využití. [3], [4], [5]

Od počátku vývoje LSP bylo kvůli marketingu vydáno mnoho patentů. První byl vydán v roce 1973 v Americe společností Industrial materials Limited. O rok déle v roce 1974, poté co byly zjištěny nesporné výhody tohoto procesu, byl vydán další patent, a to pánům Philip J. Mallozzimu a Barry P. Fairandovi z Battelle Memorial institutu. Dále například laserově vytvrzované komponenty turbíny po pájení a sváření opravované komponenty turbín byly patentovány díky jasným vylepšením vlastností. Další patenty následovaly. Například v roce 1983 byl registrován americkou společností armádního výzkumu a mezi lety 1996 a 2001 bylo 23 amerických patentů připsáno společnosti General Electric, kde se technologii LSP věnovali hlavně Seetharamaiah Mannava a Stephen J. Ferrigno. [3], [4], [5], [6]

2.2 Popis technologie LSP

LSP řadíme mezi procesy tváření za studena. Proces tedy probíhá celou dobu pod rekrytalizační teplotou kovu, a tak nedochází k tvorbě a růstu nových zrn. Je to metoda dokončování bez úběru materiálu, při které je vylepšován povrch součástí. [3], [8]

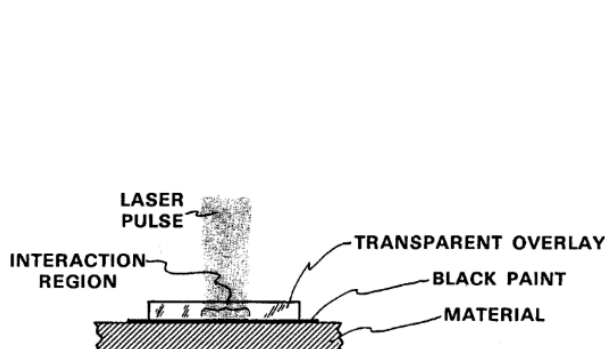
V prvotních experimentech byl laserem ozařovaný cíl ve vakuu. Vytvořené plazma však volně proudilo do okolí. Doba trvání rázové vlny byla stejně dlouhá jako trvání laserového pulsu kvůli rychlému adiabatickému ochlazení plazmatu ve vakuu. Bylo zjištěno, že použitím speciálních povlaků se zvyšuje intenzita rázové vlny až o dva řády, a i délka působení tlaku plazmy ve srovnání s plazmou generovanou ve vakuu. [3], [4]

U technologie LSP se tedy začali využívat speciální vrstvy. Abláční neboli také absorpční vrstva není po celou dobu součástí povrchu. Během procesu totiž dochází působením laseru ke zničení této vrstvy, a proto je nutné pro další aplikaci LSP vrstvu nahradit. Vrstva je laserem odpařována a díky tomu se na povrchu tvoří plazma, která tlačí na součást a tím ho vytvrzuje (tvoří se rázové vlny). Plazma je na povrchu pouze po dobu dopadajícího laseru. Absorpční vrstva je tvořena nejčastěji z černé barvy nebo

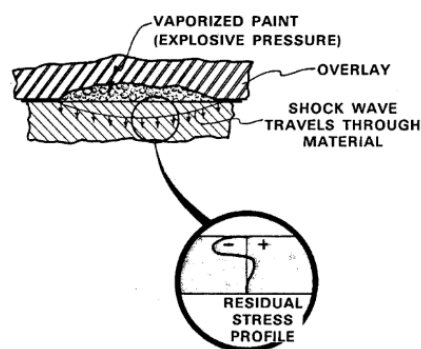
černého pásku. Černá barva umožňuje téměř 100 % absorpci laserového záření, a díky tomu je možné ze 100 % využít intenzity laseru ke generaci plazmatu. Lze použít ale také vrstvy z hliníku, zinku, mědi, olova či vinylové pásy. Černá vinylová páska je hojně využívána z důvodu jednoduchosti použití a časové nenáročnosti oproti černé barvě, kterou je potřeba vždy nechat uschnout. Profesor Hong a jeho spolupracovníci dokázali, že účinnost absorpce hliníku je asi o 20 % nižší než u černé barvy. Absorpční vrstva chrání základní materiál před laserovou ablací a tavením. Tím se zachová kvalita povrchu. Proces LSP lze použít i bez této vrstvy, ale technologie pak ztrácí efektivitu, kvůli nižšímu procentu přeměny energie laseru na vytvoření plazmy. Povrch bez použití absorpční vrstvy nedosahuje takových kvalit, jako u součástí, kde je vrstva použita, jelikož povrch zůstane popálený. I přesto se najdou aplikace bez využití této vrstvy. [3], [4], [5], [7]

Druhá vrstva je vždy nutná použít a nazývá se transparentní, překrývající, těsnící vrstva nebo také bonding medium. Jejím hlavním úkolem je zabránit šíření plazmatu pryč z povrchu. Tímto je dosaženo i zvýšení intenzity rázové vlny. Bonding médium může být například voda. Používají se ale i olovnatá, borosilikátová skla a plexiskla. Dále také křemeny a pryže ze silikonu. Použité médium závisí na volbě základního materiálu součásti, na druhu aplikace LSP a akustické rychlosti (rychlost kmitavého pohybu částic prostředí kolem rovnovážné polohy). Princip je vidět na obrázcích 6, 7. [3], [4], [5], [7], [9]

Jakmile je na povrchu překročena dynamická pevnost na mezi kluzu, dochází k plastické deformaci a tím i požadovaného efektu zpevnění. Tento kritický tlak značený P_{sw} závisí na hustotě materiálu (ρ_0) a na rychlosti zvuku elastických vln (c). Pak platí: $P_{sw} = \rho_0 \cdot c^2$ [3], [4], [5], [7], [9]



Obrázek 6: Povrch ošetřovaný technologií LSP, zobrazení vrstev [7]



Obrázek 7: Působení laserového svazku [7]

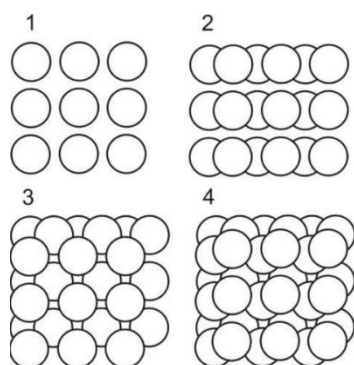
2.3 Procesní parametry

Hlavní roli v procesu LSP hraje samotný laser. Je tedy velmi důležité vybrat vhodný laserový systém, tak aby odpovídal všem požadavkům. Hlavními parametry je hustota výkonu, která se pohybuje mezi 1-100 GW/cm². Energie laserového svazku by měla být okolo 100 J a doba trvání rázové vlny (délka pulzu laseru) se obvykle pohybuje v rozmezí od 10 do 100 ns. Dalšími parametry, které u laseru sledujeme jsou frekvence vysílaných pulzů a vlnová délka. Vlnové délky laseru, které se u LSP využívají jsou: 355 nm (ultrafialová), 532 nm (zelená) nebo 1064 nm (infra-červená). Frekvence by se měla pohybovat pod 1 kHz. [3], [4], [5]

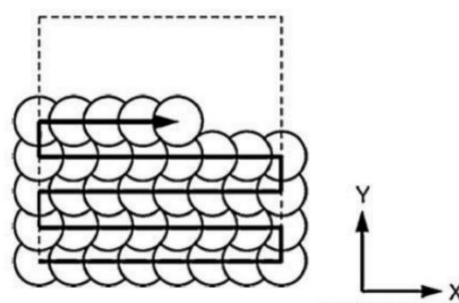
Na rozdíl od běžných laserů na bázi hélia-neon nebo oxid uhličitý, které mají kontinuálně generovaný paprsek, technologie LSP využívá tzv. Q-spínací systém, kde laserový puls rezonuje skrz laserové médium a pak opouští prostor laseru s mnohokrát větší intenzitou. Intenzita je až 1000x vyšší než u kontinuálních CO₂ laserů. Q-spínací laserový systém je založen na bázi neodinem dopovaného skla (Nd:glass), yttrito-hlinitém granátu (YAG) nebo lze také použít krystal dihydrogenfosforečnanu draselného (KDP). Typické procesní parametry jsou zaznamenány v tabulce 1. [4]

Během procesu tvoří laser určitý vzor (pattern). Využívá se více sekvencí. Nejprve laser postupuje určitým pohybem po vzorku a pečuje určitou část. Další sekvencí se překrývá ošetřená vrstva (overlapping), tak aby byl následně upravený celý povrch. Výhodou je zajištění homogenního rozložení zbytkového napětí. Nevýhodou je, že ochranný povlak musí být vždy nahrazen mezi jednotlivými sekvencemi. Možností je také postupovat překrýváním jednotlivých pulzů za sebou. Obě možnosti jsou vidět na obrázcích 8, 9. [3], [10]

Profil laserového svazku může mít různé tvary: eliptický, úhelníkový, obdélníkový, kruhový, ale největší využití má čtvercový profil díky rovnoměrnému rozložení intenzity a dobrému překryvu při vytváření patternu. [3]



Obrázek 8: LSP strategie overlapping ze čtyř sekvencí [10]



Obrázek 9: Strategie s překrýváním jednotlivých pulzů [3]

Tabulka 1: Běžné procesní parametry při LSP u některých materiálech

Materiál	Hustota výkonu [GW/cm ²]	Délka pulzu [ns]	Absorpční vrstva	Transparentní vrstva
Ti-6Al-4V	5	10	Al fólie	Voda
Ti-17	3, 6, 9	9, 27	Al	Voda
Hliníková slitina AA2195	5	18	Al	Voda
Hliníková slitina Al2024 T3	5	18	Černá barva	Voda
Ocel 316 L SS	2.5	10	Žádná	Voda
Ocel 2204 Duplex SS	900, 1600, 2500 [pulsů/cm ²]	8	Žádná	Voda
Alloy 22	10	25	Al	Voda
Inconel 600	10 [J/cm ²]	12	-	Voda
Ocel 17-4PH	5.97	10	Žádná	Voda

2.4 Charakteristika zbytkových napětí vyvolaných LSP

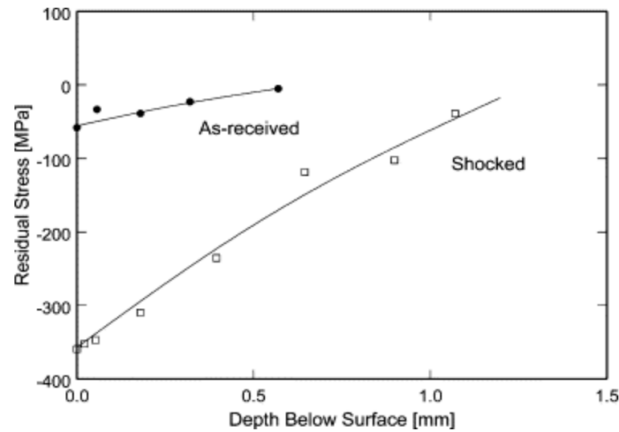
Při operaci laserového šokového zpracování s absorpčním povlakem a krycím médiem se ve směru rázové vlny vytváří jednoosé tlakové napětí. Jak se rázová vlna šíří do materiálu dochází k plastické deformaci. K plastické deformaci dochází po dobu, kdy tlak převyšuje Hugoniotův elastický limit (HEL). HEL tedy vyjadřuje maximální napětí, při kterém ještě v materiálu nedochází k plastické deformaci.

$$HEL = \frac{1 - \nu}{1 - 2\nu} \sigma_y^{dyn}$$

Kde ν je Poissonovo číslo a σ_y^{dyn} je dynamická mez kluzu. [3], [4]

Velká většina výzkumů se soustředí na stanovení povrchových a hloubkových zbytkových napětí, která jsou indukována různými typy laserů na průmyslových kovech. Těmi jsou především hliníkové slitiny, oceli a slitiny titanu. K měření zbytkového napětí se využívají dvě metody. Nedestruktivní metoda zkoumá povrch zasažený laserem pomocí rentgenového difraktovaného záření. Metodou používanou k určení hloubky, směru a velikosti zbytkového napětí je měření pomocí tenzometrické růžice. Tenzometr se nejprve nainstaluje na povrch. Uprostřed tenzometrické růžice se začne odvíjet otvor malého průměru (1 až 4 mm). Odebíráním materiálu se začnou uvolňovat zbytková napětí a dojde k jejím přerozdělením. Na povrchu tělesa jsou měřeny příslušné deformace. Metoda se někdy označuje jako Matharova metoda podle autora, který ji v roce 1934 poprvé publikoval. [3], [4]

Zbytková napětí na ošetřované ploše po LSP jsou relativně rovnoměrně rozložena. Nejvyšší je na povrchu a se vzdáleností pod povrchem se postupně snižuje. Na obrázku 10 je vidět typický profil rozložení zbytkového napětí v hliníkové slitině 2024-T3. [4]



Obrázek 10: Hloubka zbytkového napětí v hliníkové slitině 2024-T3 [4]

2.5 Elasticko-plastický model pro zbytková napětí

Vliv rázové vlny a zbytková napětí v materiálu je obtížné analyzovat, kvůli diskontinuitě čela rázové vlny a trojrozměrnosti napěťového systému. Nejprve analýza spočívala v porovnávání s leptanými vzorky nebo s dříve získanými daty. [4]

Podrobnější elasticko-plastický model byl vyvinut pro výpočet povrchových zbytkových napětí vyvolaných laserem s rázovou vlnou šířící se do elasticko-dokonale plastického poloprostoru. Využívá rovinnou rázovou vlnu. Vyvolaná deformace je považovaná za jednoosou a rovinnou a předpokládá, že odlehčování rázové vlny je elastické. [4]

Model uvažuje, že plastická deformace roste lineárně mezi $1 \times HEL$ a $2 \times HEL$. Nad $2 \times HEL$ plastická deformace dosáhne maximálního limitu. Plasticky ovlivněnou hloubku L_p a maximální povrchové zbytkové napětí σ_{surf} lze vypočítat podle Ballarda a kol. [4], [5]

$$L_p = C_{el} C_{pl} \tau C_{el} - C_{pl}$$

$$\sigma_{surf} = -P21 + \lambda 2\mu 1 - 42\pi r(1 + \nu) C_{el} C_{pl} \tau C_{el} - C_{pl}$$

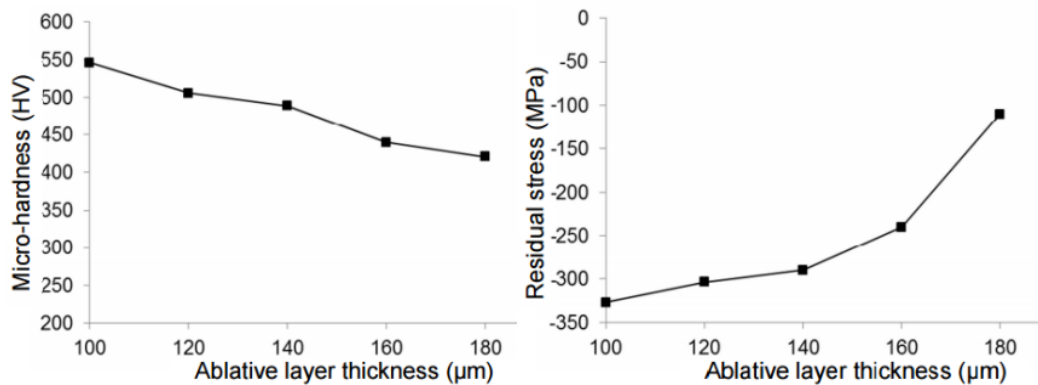
C_{el} a C_{pl} jsou elastické a plastické rychlosti deformace, τ délka pulzu, λ a μ Laméovy koeficienty a r rádius ovlivněné oblasti. Tyto rovnosti platí jen pokud P , tlak rázové vlny je větší než $2 \times HEL$. [4]

K analýze a predikci zbytkových napětí se také používá metoda konečných prvků (MKP), anglicky finite element method (FEM). Je to numerická metoda sloužící k simulaci a výpočtu deformací, napětí, průběhu tepla atd. na základě okrajových podmínek. Zjišťované parametry jsou určovány v uzlových bodech vytvořené sítě. K simulaci šíření rázové vlny lze například použít program ABAQUS/Explicit MKP

a program ABAQUS/Standard MKP pro výpočet výsledných zbytkových napětí. [3], [4]

2.6 Zbytková napětí a absorpční vrstva

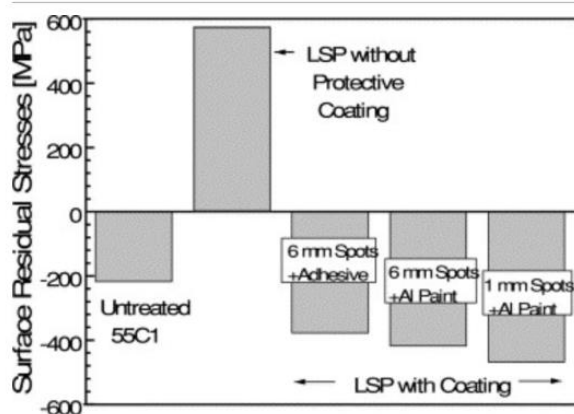
Tloušťka absorpční vrstvy je důležitým parametrem pro to, aby nedocházelo k tlumení rázové vlny a aby součást byla chráněna před tepelnými účinky ablace. Ideální tloušťka ablační vrstvy je okolo 0,1 mm. Na obrázku 11 je vidět, jak tloušťka ovlivňuje některé vlastnosti materiálu. [3], [4]



Obrázek 11: Závislost mikrotvrdosti (vlevo) a zbytkových napětí (vpravo) na tloušťce ablační vrstvy [3]

Vzorky, které mají absorpční vrstvu vykazují vysoká tlaková napětí. Naopak vzorky bez použité ablační vrstvy (LPwC-laser peening without coating) mají vyšší hodnoty tahového napětí. Tato tahová napětí jsou přičítána roztavení povrchu během LSP. Peyre a kol. se zabývali účinky ablační vrstvy na zbytková napětí v oceli 55C1 s vodní transparentní vrstvou. Vše je znázorněno na obrázku 12. [3], [4]

Ke snížení nákladů na povlaky je důležité, aby měl laserový pulz správné parametry, které sníží nebo odstraní nežádoucí ablaci povrchu. Experimenty na hliníkovém vzorku 2024-T62 bylo zjištěno, že ideální délka pulzu je 30 ns. Při nárazu a vytváření zbytkových tlakových napětí nedochází k roztavení povrchu. Při 13 ns nevyvolá pulz vhodný ráz pro vznik tlakových napětí a při délce pulzu 50 ns dojde k roztavení povrchu. [3], [4]



Obrázek 12: Hodnoty zbytkových napětí stanovené na povrchu oceli 55C1 [3], [4]

2.7 Vliv laseru na zbytková napětí

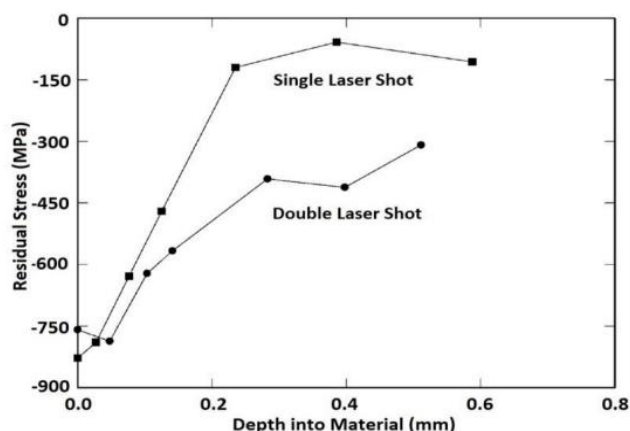
Tvar a velikost laserové stopy je také důležitým parametrem v LSP. Tvar stopy je nejčastěji kruhový, ale studie dokázaly, že čtvercový průřez dosahuje častokrát lepších výsledků. Velikost stopy se mění s hustotou výkonu. Změna velikosti určuje ovlivněnou oblast materiálu. Pokusy například probíhaly na ocelové fólii 55C1 o tloušťce 620 μm . Průměr laserové stopy byl 1,2 a 5 mm. Rázová vlna vyvolána menším průměrem expanduje sféricky a útlum činí $1/r^2$. U většího průměru dochází k rovinnému šíření o útlumu $1/r$. Výsledkem je, že díky menšímu útlumu u většího průměru stopy se rázová vlna šíří hlouběji do materiálu. U menších stop při stejném výkonu jsou vyvolána vyšší zbytková napětí z důvodu nepřímé úměry velikosti stopy a hustoty výkonu. Trdan a kol. pozorovali zbytková napětí ve slitině AW 6082 s použitím laserové stopy a průměru 1.5, 2.0 a 2.5 mm. Hustota pulzů byla 900 pulzů/ cm^2 . Nejvyšší napětí bylo vygenerováno při nejnižším průměru, jak je vidět v tabulce 2. [3], [4]

Tabulka 2: Podpovrchové zbytkové napětí ve slitině AW 6082 [3]

Vzorek	Průměr svazku [mm]	δ_{min} [MPa]	δ_{max} [MPa]
1	Před ovlivněním	22 ± 17	45 ± 22
2	1.5	-362 ± 31	-199 ± 27
3	2.0	-347 ± 28	-142 ± 23
4	2.5	-258 ± 24	-138 ± 22

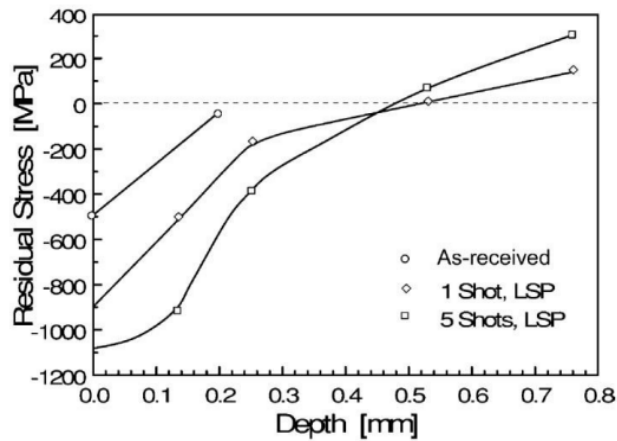
Amplituda povrchového napětí roste s hustotou výkonu laseru až do kritické hodnoty. Jakmile hustota výkonu překročí tento práh, rostou hloubková zbytková napětí, ale klesají povrchová. Existuje tedy optimální hustota výkonu, při které je povrchové napětí maximální. Například povrchová tlaková zbytková napětí u slitiny A356-T6 vzrostla na 145 MPa při zvýšení hustoty výkonu z 1,5 GW/cm² na 2 GW/cm². Další zvýšení na 3 GW/cm² mělo za následek snížení napětí na 100 MPa, zatímco hloubkové zbytkové napětí stále rostlo. [4]

Vyššího zpevnění lze dosáhnout pomocí několikanásobného průchodu laseru. Dochází k tomu kvůli zvyšující se plastické deformaci. Také je možné zbytková tlaková napětí vnést hlouběji do materiálu. Na obrázku 13 je vidět, že na titanové slitině Ti-6Al-4V po dvojném působení laseru mají zbytková napětí vyšší hodnoty. U hliníkové slitiny 7075 za působení laseru o výkonu 4 GW/cm² bylo vyvoláno zbytkové napětí 170 MPa po prvním nárazu laseru, 240 MPa po druhém a 340 MPa po třetím. [3], [4]



Obrázek 13: Hloubka tlakových zbytkových napětí při použití jednoho nebo dvou přejezdů laseru u slitiny Ti-6Al-4V při použití laseru s hustotou energie 200 J/cm² a délce pulzu 30ns [3][4]

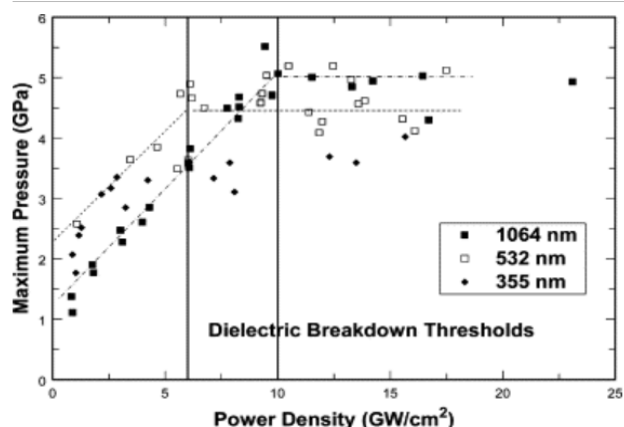
U tenkých součástí, jako jsou například lopatky turbín není vhodné použití kuličkování z důvodu možného poškození. LSP je vhodnější způsob. Masse a Barreau provedli pozorování u ocelového plechu 4340 o tloušťce 1,5 mm. Plech byl ošetřen 1 a 5 šoky z obou stran. Hloubka tlakových napětí dosáhla 0,5 mm pro oba způsoby, ale velikost byla vyšší pro 5 šoků. Výsledky jsou zpracovány na obrázku 14. Pro malé tloušťky vzorků je typické, že se rázová vlna odráží od spodního povrchu a dojde k tvorbě zbytkových tahových napětí. Proto se používá oboustranné zpracování, kde se rázové vlny navzájem vyruší. [4]



Obrázek 14: Závislost zbytkových napětí a jejich hloubky v 1,5mm tlustém plechu z oceli 4340 [3], [4]

Laserové systémy jsou omezeny v oblasti pokrytí jedním pulzem. Proto je nutné použít metodu overlapping, neboli překrývání jednotlivých laserových pulzů. Zkoumání vlivu překrytí bylo zkoumáno například u oceli 1026, slitiny hliníku 7075, oceli 55C1 a titanu. Výsledky ukázaly, že došlo k rovnoměrnému rozložení zbytkových tlakových napětí a nebyly vidět žádné známky tahových zbytkových napětí. [4]

Vlastnosti povrchu materiálu ovlivňuje také použitá vlnová délka. LSP využívá nejčastěji laser o vlnové délce 355 nm (ultrafialová), 532 nm (zelená) a 1064 nm (infračervená). Vlnová délka blízká infračervené má nízký absorpční koeficient ve vodních vrstvách, dostatečnou interakci s povrchem a vysoký práh dielektrického průrazu. Vlnová délka 532 nm má nejnižší absorpci ve vodě, ale společně s vlnovou délkou 355 nm při jejich generování slábne energie pulzu 2krát i vícekrát. Přestože kovy mohou vysoce odrážet světlo, při zachování hustoty výkonu laseru a snížení vlnové délky z 1064 nm na 355 nm dochází ke zvýšení interakce mezi fotonem a kovem. S tím roste i tvorba rázových vln. To však může mít za následek snížení působícího tlaku, jelikož snížením vlnové délky dojde ke snížení hodnoty kritické hustoty výkonu pro průraz dielektrika. Na obrázku 15 je vidět, že se snížením vlnové délky z 1064 na 532 nm se sníží práh průrazu dielektrika z 10 na 6 GW/cm², což vede ke zmenšení vyvolaného tlaku z 5,5 na 4,5 GPa. [3][4]

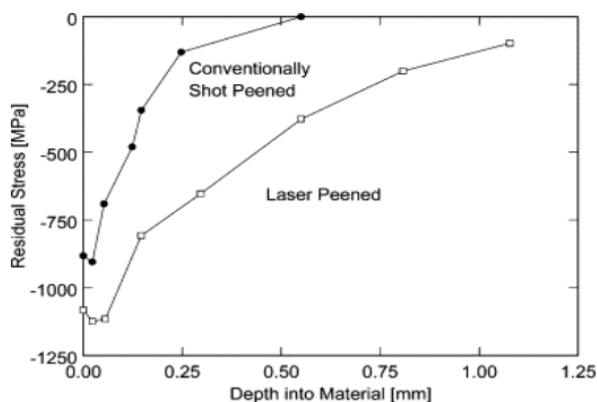


Obrázek 15: Vyvolaný tlak v závislosti na hustotě výkonu při vlnových délkách 1064 nm, 532 nm a 355 nm [4]

2.8 Porovnání LSP a SP

Technologie SP (shot peening) nazývaná někdy také kuličkování je podobná metoda pro zpevňování materiálu. Metody se liší především rozdílným principem tvoření rázových vln. U LSP je používán laser. Při SP se tryskají ocelové kuličky na povrch součásti. [4]

Hlavní výhodou LSP je především hloubka a velikost indukovaných zbytkových napětí. Hloubka napětí vyvolané LSP se liší v závislosti na podmínkách zpracování a vlastnostech materiálu a nejčastěji dosahuje od 0,5 do více než 1 mm. Po laserovém peeningu jsou navíc povrchová napětí vyšší. Zbytková napětí vyvolaná LSP a SP u slitiny Inconel 718 jsou znázorněna na obr. 16. Zbytková pnutí jsou mnohem hlubší u laserového peeningu než u konvenčního kuličkování. [3], [4]



Obrázek 16: Zbytková napětí ve slitině Inconel 718 vyvolaná technologiemi LSP a SP [3][4]

Americké letectvo se zaměřilo na snížení vysokocyklového únavového selhání lopatky turbíny. Povrch ošetřovaný LSP vykazoval lepší vlastnosti než kuličkový povrch, který nespĺňoval požadavky na únavovou životnost. Dalším velmi výrazným

rozdílem je, že doba působení tlaku na povrch je u SP 10 - 20krát delší. Kuličkované povrchy jsou vystaveny více osovému a intenzivnějšímu zatížení než LSP povrchy. Některé rozdíly jsou zaznamenány v tabulce 3. [4]

Tabulka 3: Srovnání zatěžovacích parametrů LSP a SP [4]

Proces	Působící tlak [GPa]	Hloubka zbytkových napětí [mm]	Doba působení tlaku [μ s]	Impuls síly [GPa· μ s]	Rychlost deformace [s^{-1}]
LSP	0-6	1-15	0.05	0-0.3	10^6
SP	3-10	0.2-1	0.5-1	1-10	10^4

Výzkum prováděný na hliníkové slitině 7075 kombinující LSP a SP technologii ukázal, že tato kombinace může vést k lepším vlastnostem se zvýšením jak hloubkových, tak povrchových tlakových zbytkových napětí. [4]

2.9 Vliv LSP na morfologii a mikrostrukturu

Morfologie povrchu má velký vliv na únavové chování. U povrchu zpracovaného technologií LSP, je pozorována drsnost a mikrostruktura povrchu pod mikroskopy. Často se využívá elektronový skenovací mikroskop (SEM). Pokud není použit absorpční povlak, laser způsobuje vážné povrchové roztavení a odpařování, zejména u hliníku. To může vést k vytvoření ztuhlých kapiček a kráterů, které způsobují vysokou drsnost. Absorpční povlaky tomuto jevu zamezují. [4]

Kuličkováný povrch vykazuje vyšší hodnoty středních a maximálních drsností. To může být výhodné pro přilnavost barev, ale nevhodné pro únavové vlastnosti. Rozdíly v drsnostech po účincích LSP a SP jsou uvedeny v tabulce 4. Pro aplikace v průmyslu je odstranění povrchu s vyšší než požadovanou drsností nutnost. [4]

Tabulka 4: Porovnání drsností po LSP a SP na hliníkových slitinách A356 a 7075 [4]

Materiál a technologie	Ra [μ m]	Rt [μ m]
A356(frézováno)	0.7	6.2
A356(LSP, 2GW/cm ² , dva dopady svazku)	1.1	7.5
A356(SP, 0.3 mm broky)	5.8	33
7075(frézováno)	0.6	5.2
7075(LSP, (4GW/cm ² , tři dopady svazku)	1.3	11
7075(SP, 0.6 mm broky)	5.7	42

Pro vhodné vlastnosti je nutné drsnost snížit, ale přitom dochází ke zmenšení vrstvy, která obsahuje tlaková zbytková napětí. Vyšší dopad to má u kuličkových povrchů, jelikož napětí nedosahují takové hloubky. [4]

Proces LSP je doprovázen mikrostrukturními a fázovými změnami. Tyto změny souvisí s procesními parametry a jsou zkoumány pomocí SEM, TEM (transmisní elektronový mikroskop) a difrakční rentgenové analýzy. [4]

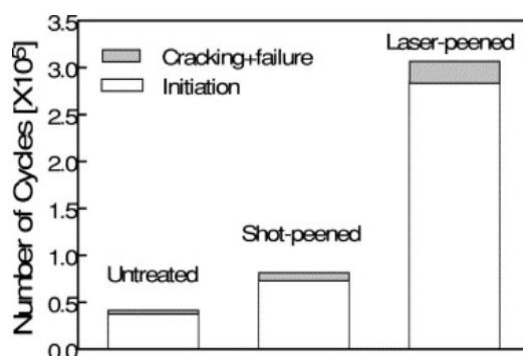
U nízkouhlíkových ocelí a hliníkových slitin se po LSP zjemňuje zrno. Hranice jsou nepropustné pro dislokace a ty se na nich hromadí, zvyšuje se hustota dislokací. V oceli Hadfield dochází k rozsáhlé tvorbě martenzitu. Mikrostruktura se také mění při použití LSP na svary u martenzitické oceli, kdy dochází k přeměnám austenitového svaru zpět na martenzit. V některých nerezových ocelích se zase vytvářejí nové zárodky a probíhá dvojčatění. [4]

2.10 Vliv LSP na mechanické vlastnosti

Díky LSP se zlepšují mnohé mechanické vlastnosti materiálů. Tlaková napětí a kvalita povrchu zlepšují únavovou životnost a oddalují rozvoj únavových trhlin.

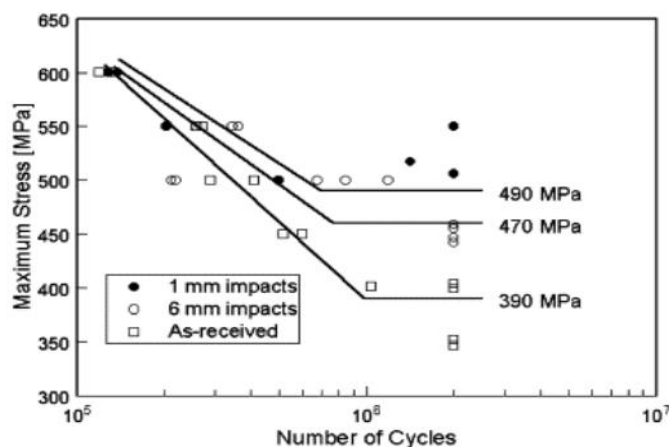
Počáteční výzkumné práce se zaměřily na vliv laserového peeningu na růst již existujících trhlin. Vzorek z hliníkové slitiny 2024-T3 měl v sobě otvor. Oblast kolem otvoru byla šokována. Výsledky ukázaly, že vzorky měly únavovou životnost až 40krát větší než vzorky bez použití LSP. [4]

Materiál, který byl šokován laserem vydrží až 7krát více cyklů namáhání než běžně dodaný kus bez mechanického zpracování. Technologie SP oproti tomu zlepšuje únavové vlastnosti zhruba 3krát. Tento rozdíl je přisuzován většímu zdrsnění povrchu u SP. Obrázek 17 ukazuje chování při růstu únavové trhliny u dodaných, kuličkových a laserem opracovaných vzorků. [4]



Obrázek 17: Porovnání iniciací trhlin a lomů u SP a LSP při maximálním napětí 250 MPa na vzorku hliníkové slitiny 7075-T7351 [4]

Na únavové vlastnosti má také vliv velikost laserového svazku. Toto zkoumali Peyre a kol. Stopa laseru o průměru 1 mm měla nižší hloubku zbytkových napětí ve srovnání s laserovou stopou o průměru 6 mm za použití stejných procesních parametrů. Mez únavy při 10^6 cyklech byla však lepší pro menší průměr svazku. U malé laserové stopy (1 mm) dosáhla mez únavy 490 Mpa a u 6 mm svazku 470 Mpa. Jedná se o výrazné zlepšení únavové pevnosti 380 MPa u neošetřovaného materiálu. Naměřené hodnoty ukazuje obrázek 18. [4]



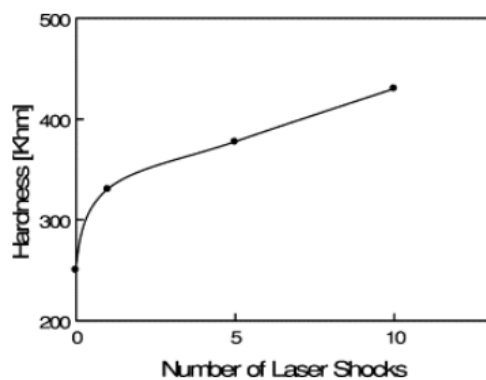
Obrázek 18: S-N křivka pro vzorek oceli 55Cr1 zpracovaná LSP [4]

LSP má také vliv na kontaktní únavu třením. Pokusy probíhají na vzorcích typu psí kosti. Výsledky ukazují, že životnost se zvýší více než dvakrát. [4]

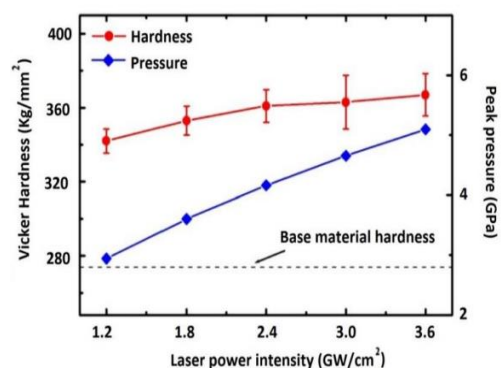
Další vlastností, kterou LSP zlepšuje je korozní praskání pod napětím (stress corrosion cracking-SCC). To je zapříčiněno agresivním prostředím a cyklickým namáháním. Profesor Scherpereel a kol. zkoumali SCC u austenitické a martenzitické korozivzdorné oceli. Po užití LSP na vzorky se snížil proudový potenciál a indukce tlakových napětí způsobila částečné zastavení trhlin. Laserový peening je navíc výrazně účinnější než konvenční způsob zpracování. [3], [4]

Dalšími důvody použití LSP je zvýšení tvrdosti a mezí pevnosti povrchů. Velikost zpevnění závisí na podmínkách zpracování (hustota výkonu, počet dopadů, ...), materiálu vzorku a mikrostrukturu. Vyšší tvrdost a zpevnění jsou přičítána zvyšující se hustotě dislokací. Byly prováděny experimenty na hliníkových slitinách (2024-T3, 7075-T73) a ty dokázaly, že svarové zóny díky LSP nabývají zpět svých mezí kluzu ztracených při svařování. Zlepšily se také vlastnosti přestárých a tepelně nezpracovaných slitin. [3], [4]

Tvrdość se zlepřuje se zvyšujícím se počtem laserových šoků, jak ukazuje obrázek 19. Zásadní vliv má také hustota výkonu a tlak na povrchu. Z obrázku 20 je patrné, že nejvyšší tvrdość korozivzdorné oceli 304 byla dosažena při hodnotách výkonu 2,4 GW/cm² a tlaku 4 GPa. Další zvyšování tlaku již nemá žádné výrazné zlepřující účinky. [3], [4]



Obrázek 19: Závislost tvrdości na počtu laserových šoků u korozivzdorné oceli 304 [4]



Obrázek 20: Tvrdość při různých hustotách výkonu a tlacích na povrchu [3]

3 LSP v aditivní výrobě

LSP má nesporné výhody použití u aditivně vyráběných dílů (AM-additive manufacturing), často označované také jako 3D tištění, které je v dnešní době jedno z nejrychleji rostoucích odvětví v průmyslu. [11], [12]

Nejčastěji je 3D tisk založen na technologii PBF-LB (Powder bed fusion-Laser beam) mezi které patří dílčí technologie jako jsou SLS (Selective Laser Sintering), SLM (Selective Laser Melting), DMLS (Direct Metal Laser Sintering), EBM (Electron Beam Melting). Proces spočívá v tavení kovového prášku laserem nebo elektronovým svazkem po jednotlivých vrstvách (layer by layer) a tím se vytváří součást libovolného tvaru, kterou by bylo konvenčními způsoby vyrobit velice složité. Nezbytným předpokladem pro výrobu jsou 3D CAD data dílu. [11], [12]

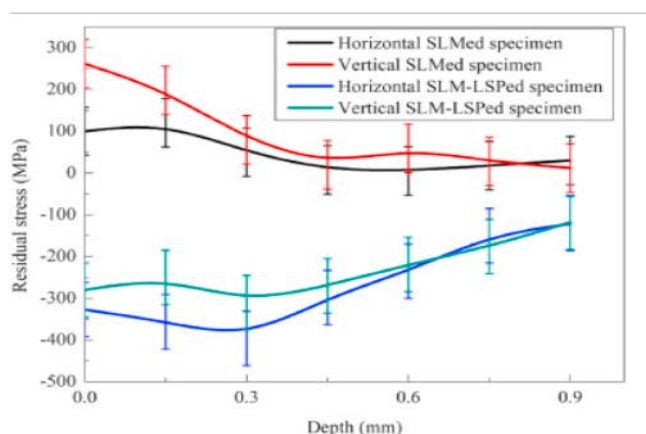
Nevýhodami, které zužují aplikaci PBF-LB jsou stav zbytkových tahových napětí a poréznost. Tahová zbytková napětí snižují únavovou životnost, podporují růst trhlin, narušují geometrii a někdy způsobují delaminaci dílu během tištění. To je nepřijatelné pro budoucí použití součástí. Proto je nutné tahová pnutí odstranit nebo snížit. To lze například tepelným zpracováním, předehřátím základní desky a dalšími technologiemi. Nicméně tyto procesy nedokážou zavést do materiálu tlaková zbytková napětí, což lze vyřešit použitím SP nebo LSP. SP s většími průměry kuliček jen těžko použít pro složitější tvary součástí, jelikož broky se nedostanou do všech zákoutí. LSP lze efektivně používat i během procesu tištění a lze vytvrdit i úzká, geometricky složitá a tenkostěnná místa. [11], [12]

LSP se využívá jak na již hotové AM díly, tak i na součásti v procesu tištění. Peenováním během výroby jednotlivých vrstev se říká 3D Laser shock peening (3D LSP). Tento proces byl patentován Laboratoří termomechanické metalurgie na švýcarské univerzitě EPFL. Proces sestává z opakované aplikace LSP mezi výrobou jednotlivých vrstev. Zároveň ale nelze použít absorpční a transparentní vrstvu, a tak není dosahováno nejlepších možných výsledků. [11], [12]

Jako u konvenčně vyráběných součástí, také u AM dílů je technologií LSP dosahováno zlepšení mechanických vlastností, únavové životnosti, odolnosti proti korozi, ale i snížení poréznosti. Dochází k indukci zbytkových tlakových napětí do materiálu, ke zjemňování zrn, dvojčatění a zvyšuje se hustota dislokací. [11], [12]

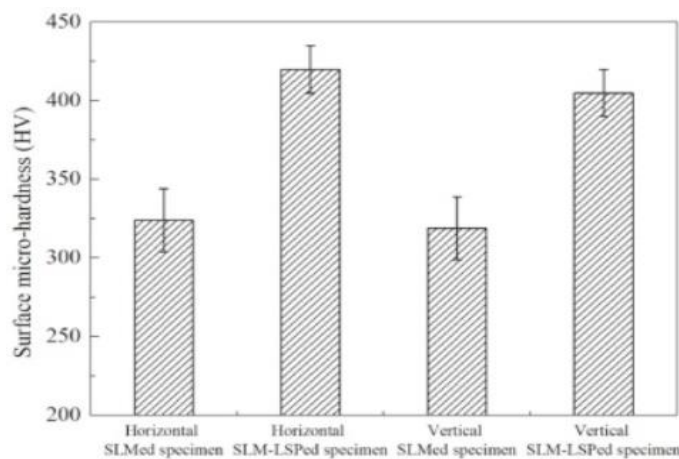
V důsledku vysokých teplotních gradientů a rychlého ochlazování během PBF-LB vzniká tahové zbytkové napětí na povrchu vzorků. Vliv na velikost tohoto napětí

má orientace vzorku, jestli je tištěn horizontálně či vertikálně. Vertikálně tisknuté díly mají vyšší hodnoty tahových zbytkových napětí. Po použití LSP vykazují vzorky tisknuté z Ti-6Al-4V hloubku vnesených tlakových zbytkových napětí větší než 0,9 mm. Nejvyšší napětí jsou dosahována těsně pod povrchem v hloubce 300 μm . Na LSP nemá vliv orientace tištěného vzorku. Obrázek 21 ukazuje rozdíl mezi ošetřeným a neošetřeným materiálem. [11]



Obrázek 21: Křivky zbytkových napětí SLM tištěných dílů s a bez použití LSP [11]

Porovnání mikrotvrdotí bylo prováděno opět na dvou vzorcích vertikálně a horizontálně tištěných. Výsledky jsou znázorněny na obrázku 22. Mikrotvrdoti obou vytvrzených vzorků se pohybují přes 400 HV, kdežto původní hodnoty SLM vzorků jsou zhruba o 100 HV nižší. Orientace má minimální vliv na hodnoty mikrotvrdoti vzorků. [11]



Obrázek 22: Rozdíl mikrotvrdotí SLM vzorků před a po úpravě LSP [11]

AM díly vykazují podobné nebo lepší meze pevnosti v tahu než konvenčně vytvořené součásti. Tisk z Ti-6Al-4V dosahuje hodnot okolo 1000 MPa, ale

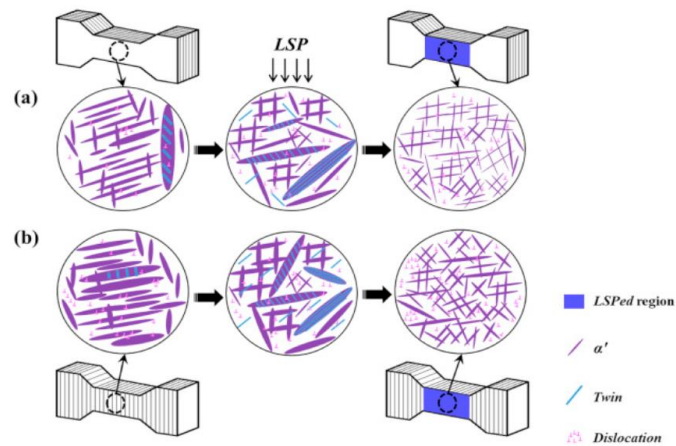
technologie LSP zlepši mez pevnosti až na 1300 MPa. Zvyšuje se i tažnost a relativní prodloužení. [11]

Během PBF-LB se často objevují mikro nebo makrotrhliny a zbytková napětí v tahu se nejvíce tvoří v překrývajících se oblastech mezi sousedními tavnými vrstvami. Mechanický účinek rázové vlny způsobuje transformaci lomového mechanismu ze smíšeného lomu na tvárný lom. Lomové plochy jsou pozorovány pod mikroskopem. Na povrchu se jeví mikrodůlky, které byly vytvořeny v procesu tištění jako dutiny. Po ošetření LSP se důlky zmenšují, roste jejich počet, zobrazují se jako rovnoosé a jsou rovnoměrněji rozptýlené v materiálu. To má za následek lepší meze pevnosti v tahu a lepší tažnost. [11], [12]

Průměry póru se po aplikaci LSP snižují až o 68 %. Kromě toho se póry stávají kulovitější, protože LSP má tendenci nejprve uzavírat tenčí zóny póru. Škodlivý vliv mikropórovitosti je způsoben koncentrací napětí kolem nich. To snižuje především únavovou životnost materiálu [12]

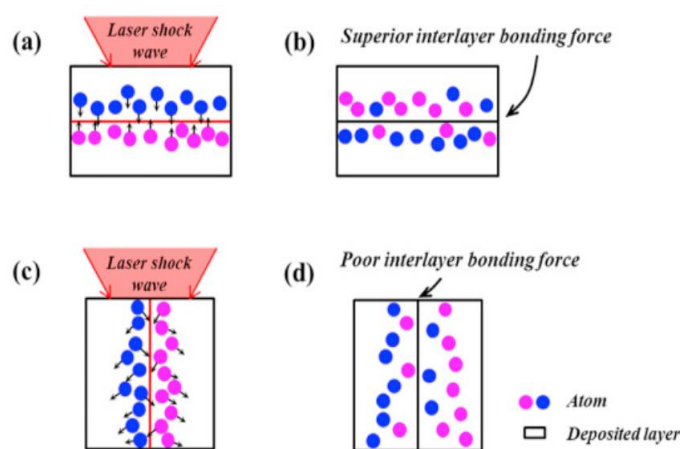
Při tisku PBF-LB horizontálních vzorků z Ti-6Al-4V vznikají dlouhá β zrna rovnoběžná se směrem stavby. Ke vzniku takovýchto zrn dochází kvůli postupnému ochlazení materiálu od spodu. Tvoření dalších vrstev vede k opětovnému roztavení bývalých sloupcových β zrn, které slouží jako jádra pro epitaxní růst texturovaných zrn a uvnitř vzniká mnoho jemných jehličkovitých martenzitů. To má za následek zlepšení mikrotvrdomosti PBF-LB vzorků. LSP mění nevyhovující dlouhá β zrna na jemnější rovnoosá zrna, která mají více hranic nepropustných pro pohyb dislokací a zároveň se zvyšuje hustota jehlicovitých martenzitů v povrchové vrstvě což vede k dalšímu zpevnování. [11]

Při bližších pozorováních pod TEM jsou vidět jehlicovité a lamelární martenzity, dvojčata tvořená v lamelách martenzitu a dislokační struktury (dislokační čáry, stěny a spleti). Při účinku rázové vlny laseru se zmenšuje průměrná šířka dvojčat a vzdálenost mezi sousedními dvojčaty. Hrubé martenzity jsou rozděleny do menších submikrostruktur. Dvojčata se objevují v hrubých zrnech martenzitu a pohybující se dislokační struktury mají za následek zjemňování struktury. Jemnozrnější povrchová vrstva se zbytkovým napětím v tlaku účinně zabraňuje počáteční iniciaci trhlín. Obrázek 23 ukazuje vliv LSP a orientace tištění. [11]



Obrázek 23: Schematické znázornění mikrostruktur Ti-6Al-4V horizontálně a vertikálně tištěného dílu před a po LSP [11]

Existuje také vztah mezi tahovými vlastnostmi vzorků a procesem atomové difúze mezi vrstvami s různými stavebními směry. Obrázek 24 znázorňuje proces mezivrstevové atomové difúze za použití LSP. U horizontálního vzorku je rázová vlna kolmá k rovině tištění. Mechanickým účinkem laseru začnou atomy koncentrující se na rozhraní mezi dvěma vrstvami difundovat. Atomy v horní vrstvě přechází do spodní vrstvy a některé se jen odrážejí od rozhraní zpět. Rázová vlna přechází přes rozhraní a aktivuje atomy ve spodní vrstvě, které se šíří do horní vrstvy. To vede k výborné mezivrstevové spojovací síle. U vertikálního vzorku je rázová vlna rovnoběžná k rovině tištění. To má za následek nižší difuzi atomů mezi levou a pravou stranou, a tak je mezivrstevová vazebná síla slabší. Rázová vlna působícího laseru může někdy u AM dílů způsobovat, že se sousední vrstvy oddělí od spojovacího rozhraní. [11]



Obrázek 24: Schématické znázornění difuze atomu za použití LSP [11]

4 Použité metody měření

V práci jsou již uvedeny některé analytické metody jako například elektronová mikroskopie SEM, TEM, rentgenová difrakce, měření tenzometry, ale používají se i další technologie na měření především integrity povrchu (tvrdost, geometrická přesnost, porozita) a zbytkových napětí. [3], [13]

Pojmem integrita povrchu se rozumí soubor vlastností povrchové vrstvy. Zásadní vlastností je určitě tvrdost povrchu, která se měří zkouškami tvrdosti dle Brinella, Rockwella, Vickerse a Knoopu. Princip je založen na vtlačování malého indentoru do povrchu součásti určitým zatížením a měření odporu povrchu vůči vniknutí. [3], [13]

V rámci hodnocení kvality dílů z pohledu jejich rozměrové přesnosti je dnes zásadní systém ISO GPS (Geometrical product specification). Jedná se o systém zabývající se popisem rozměrových a geometrických tolerancí a parametrů textury povrchu i jejich způsobem měření a vyhodnocování. Tyto parametry jsou zásadní pro funkci součástí. Proto se v rámci své práce chci zabývat popisem vlivu technologie LSP i na tyto parametry.

Rozměrové a geometrické tolerance se dnes již běžně kontrolují s využitím souřadnicové měřicí techniky (CMM-Coordinate measuring machine). Princip je založen na zaznamenávání bodů a jejich souřadnic, které jsou vztaženy k základnímu souřadnému systému stroje. Výhody, které CMM přináší jsou rychlost, flexibilita, přesnost a univerzálnost pro mnoho měřených dílů, ale nevýhodou je vysoká pořizovací cena. Příklad stroje CMM je vidět na obrázku 25. [14]



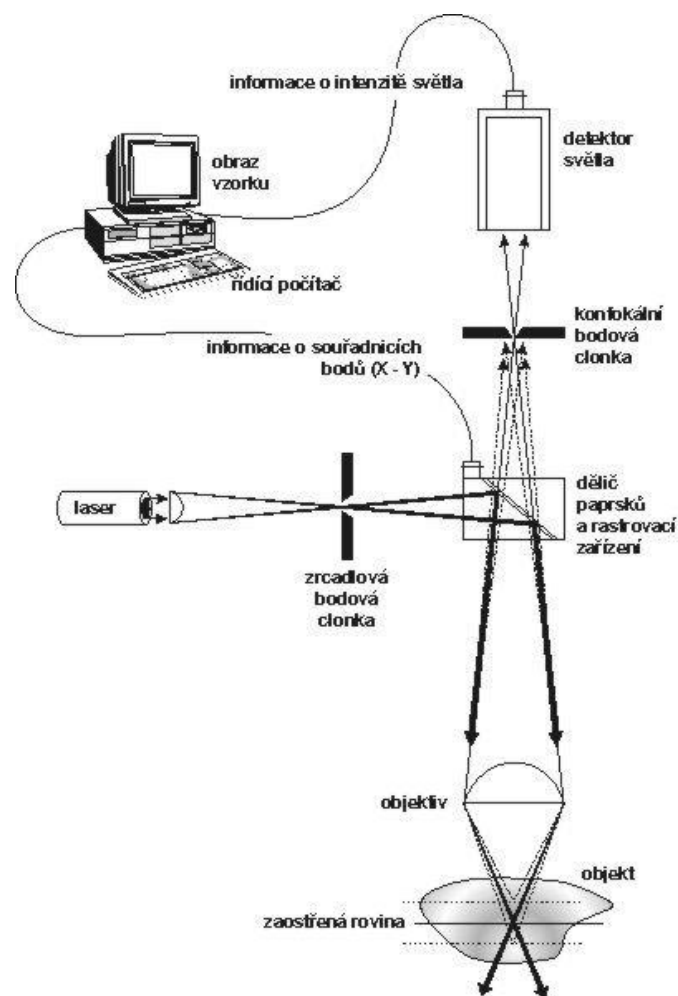
Obrázek 25: Souřadnicový měřicí stroj (CMM) [14]

Metody měření textury povrchu lze rozdělit na profilové, plošné a metody integrování plochy. Profilová metoda sleduje jeden určitý profil povrchu. Plošné metody rozšiřují profilovou metodu do třetího rozměru. Přístroje pracují dotykově nebo bezdotykově. Pro určování textury povrchu se z velké části využívá kontaktní profilometrie, a to pro profilové i plošné měření. Dalšími využívanými bezdotykovými metodami jsou: Interferometrie, Optická diferenciální profilometrie, konfokální mikroskopie a další. [19]

Konfokální mikroskop funguje na principu vysílání bodového zdroje světla (laser) přes bodovou (konfokální) clonu a objektiv na preparát. Objektiv sbírá odražené, rozptýlené světlo nebo fluorescenční částí vzorku. Po odrazu je světlo dále detekováno druhou konfokální clonou, která nesnímá záření z jiných nezaostřených rovin a fotonásobičem, který světlo zesiluje. Obraz je získán rastrováním bod po bodu. Pokud je nasnímáno více rovin, získáme tím 3D vzhled povrchu. [15]

Rastrování lze provádět třemi možnostmi. Rozmítáním laserového paprsku, posouváním vzorku před objektivem nebo posouváním objektivu nad vzorkem. [15]

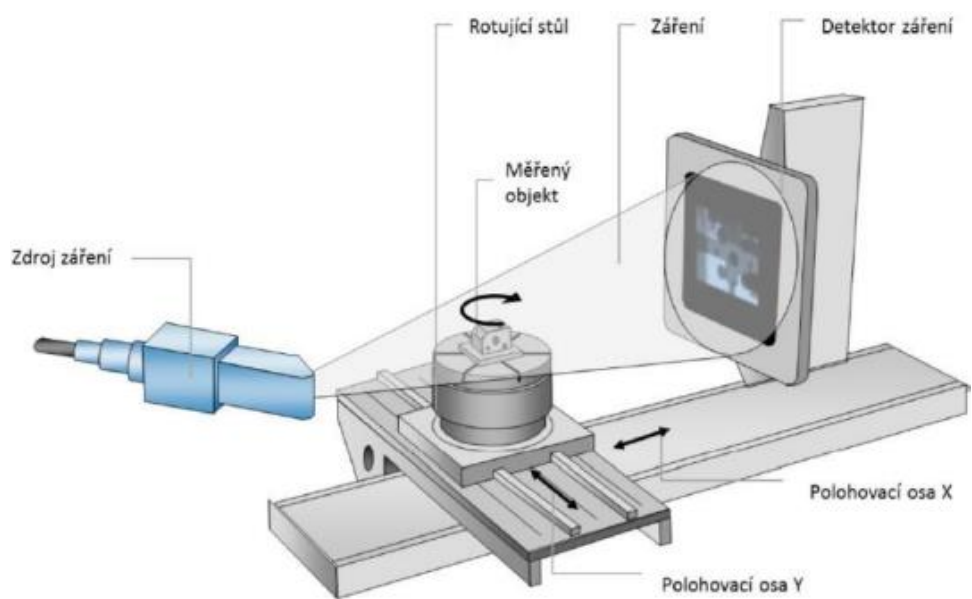
Hlavními výhodami konfokálního mikroskopu jsou: vždy zaostřený obraz, optická tomografie (zobrazování rovinných řezů) a dobrá rozlišovací schopnost. Princip je vidět na obrázku 26. [15]



Obrázek 26: Princip konfokálního mikroskopu [15]

Vnitřní struktura a defekty vzniklé u dílů vyráběných aditivními technologiemi mohou být zkoumány výpočetní tomografií neboli CT (Computed Tomography). Je to nedestruktivní zkouška, která využívá průchodu rentgenového záření měřeným objektem. Objekt se otáčí kolem své osy o 360 stupňů, a tak vznikají 2D snímky ze všech stran. Pomocí softwaru jsou 2D snímky převedeny do 3D. Lze využít i otáčení rentgenového zdroje okolo objektu. [16]

Software umožňuje barevné zobrazení vzniklých pórů uvnitř vzorků. Vidíme jejich velikost, pozici a počet. CT umožňuje také rozměrovou kontrolu, která není tak přesná jako třeba u CMM, ale lze měřit i špatně přístupná místa. Princip CT zobrazuje obrázek 27. [16]

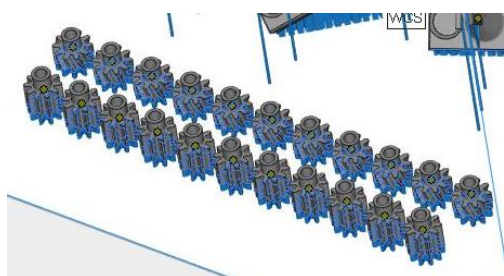


Obrázek 27: Princip a uspořádání CT [16]

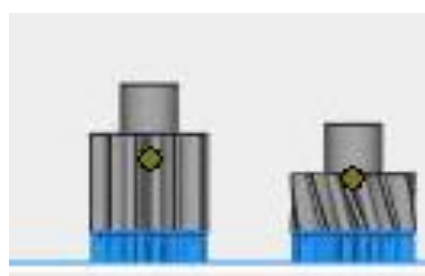
5 Praktická část

V praktické části se budu věnovat porovnáním vlastností textury povrchu, porozity a geometrických vlastností součástí před a po účincích LSP na ozubených kolech s přímými a šikmými zuby. Textura povrchu bude zkoumána na konfokálním mikroskopu, porozita a geometrie ozubení na CT.

Pozorování proběhlo na ozubených kolech vytištěných na 3D tiskárně Concept laser M2 Cusin metodou PBF-LB. Návrh stavby ukazují obrázky 28, 29 a parametry tisku jsou vidět v tabulkách 5, 6. Materiál součástí je nerezová ocel 17-4PH. Kola byla dvojího druhu, s přímými a šikmými zuby.



Obrázek 28: Navržení stavby ozubených kol



Obrázek 29: Navržení stavby ozubených kol s podporami (modrá část)

Tabulka 5: Parametry tisku (nanášec, prášek, plyn), v jazyce řídicího systému stroje

Coater speed values	
Before and after exposure surface area [mm/s]	150
Above exposure surface area [mm/s]	50
Empty run [mm/s]	300
Lower build plate by [mm]	0.5
Lower dose plate by [mm]	0.5
Security distance [mm]	30
Powder	
Dose factor [%]	200
Start layers	5
Start factor [%]	300
Gas	
Inert gas	Nitrogen

Tabulka 6: Parametry tisku na kontuře, vnitřní ploše a na podporách součásti

	surface area	contour	lattice support
Power [W]	300	140	200
Speed [mm/s]	800	467	3000
Spot size [μm]	130	75	50
Offset to original contour [mm]	0,13	0,06	0,1
Trace spacing [mm]	0,13	-	-

LSP bude aplikováno na dna zubových mezer, jelikož v těchto místech dochází nejčastěji k vylovení.

Součásti byly odříznuty od kovové desky pomocí technologie drátového řezání WEDM v rámci podpor, zbytky podpor lze pozorovat v levé části obr. 30, 31. V tabulce 7 jsou zapsány parametry ozubení.



Obrázek 30: Ozubené kolo s přímými zuby



Obrázek 31: Ozubené kolo s šikmým ozubením

Tabulka 7: Parametry ozubení ($\beta=20^\circ$ pro šikmé zuby)

z	10	α_n	20°	d_f/d_a	7 mm/12 mm
m_n	1,000 mm	β	$0^\circ/20^\circ$	d	10 mm
x	0	b	10 mm	d_b	9,397 mm

5.1 Textura povrchu před LSP

Textura povrch byla měřena na konfokálním mikroskopu MarSurf CM expert (obrázek 30). Mikroskop poskytuje měření plošných 3D dat povrchu. Zvolené zvětšení objektivu bylo 20krát.

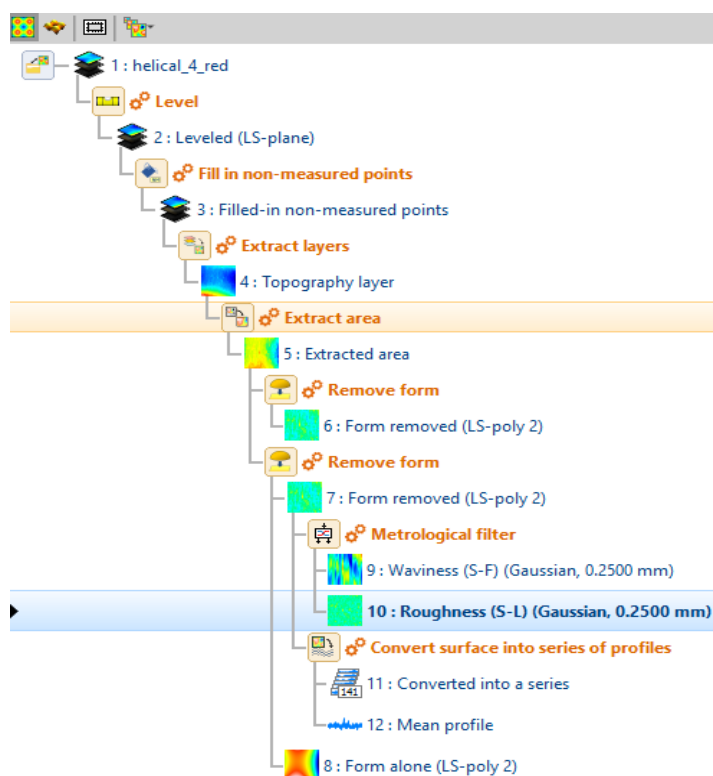


Obrázek 32: Konfokální mikroskop MarSurf CM expert

Textura povrchu byla hodnocena na čtyřech kolech s přímými zuby a na čtyřech kolech se šikmými zuby. Na každém kole proběhlo pozorování na třech zubových mezerách označených barevně (blue, green, red).

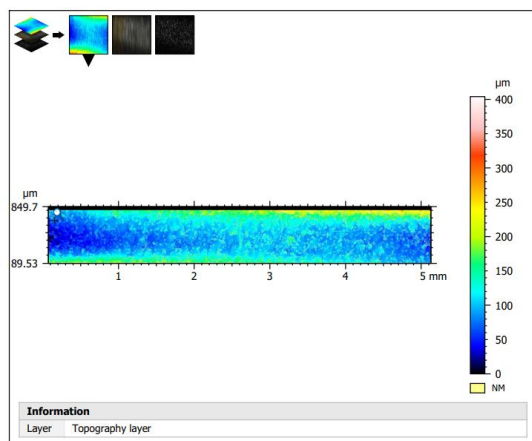
5.1.1 Postup vyhodnocení v softwaru Mountains

Z konfokálního mikroskopu je potřeba naměřená data vyhodnotit, ale je potřeba je upravit do takové podoby, aby to bylo možné. Ke zpracování byl využit software Mountains. Data, která získáme z mikroskopu jsou často nakloněna nebo jsou zde plochy, které nelze měřit (tečné roviny). Proto je nutné externího softwaru, který nám umožní upravit měřená data, tak aby byla vhodná k vyhodnocení drsnosti, vlnitosti, plošných, objemových parametrů a dalších věcí. Ukázka vyhodnocení je vidět na kole číslo 4 se šikmým ozubením a zubovou mezerou označenou red (helical_4_red). Pracovní postup (Workflow) je v softwaru zaznamenáván do samostatného okna viz. na obrázku 33.

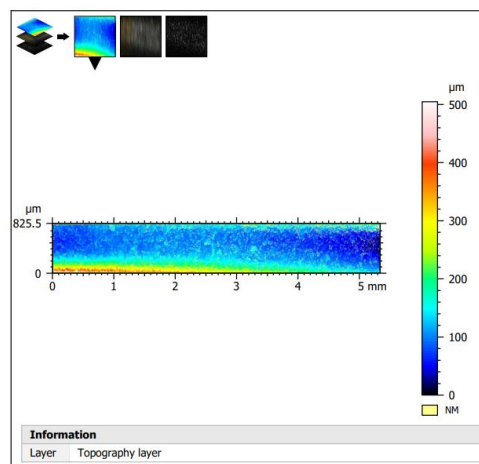


Obrázek 33: Workflow (pracovní postup) v softwaru Mountains

Na začátku jsou vstupní data (obrázek 34). Měřilo se na délce 5 mm a je zde vidět mírné naklonění měřeného povrchu na stolku mikroskopu. Je tedy nutné vyrovnání dat. To jde pomocí funkce level v softwaru. Data po vyrovnání jsou vidět na obrázku 35.

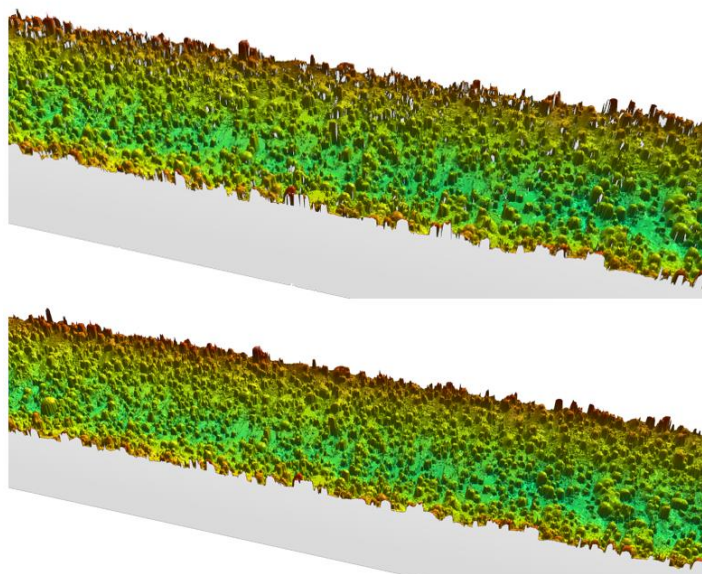


Obrázek 34: Vstupní data



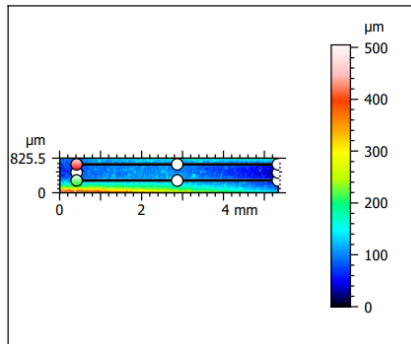
Obrázek 35: Povrch po vyrovnání

Když je povrch vyrovnán je použita funkce „fill in non-measured points“ tedy zaplnění nenaměřených bodů. Jedná se o společnou problematiku pro veškeré optické metody měření, kdy není prakticky možné vyhodnotit body na površích, které jsou téměř rovnoběžné s optickou osou objektivu (vodorovné stěny), obrázek 36.

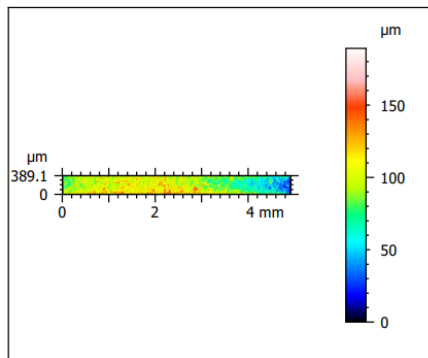


Obrázek 36: Data před (nahore) a po (dole) použití funkce: fill in non-measured points

Jelikož chceme vyhodnocovat pouze na dně zubové mezery je potřeba vybrat plochu pro to vhodnou. Výběr je vidět na obrázku 37 a 38.

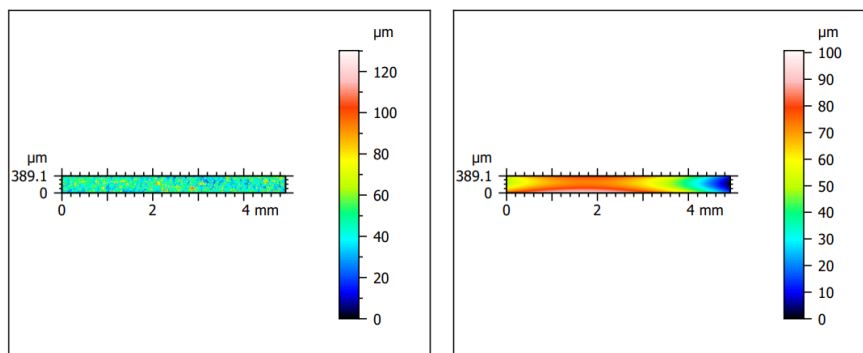


Obrázek 37: Výběr plochy



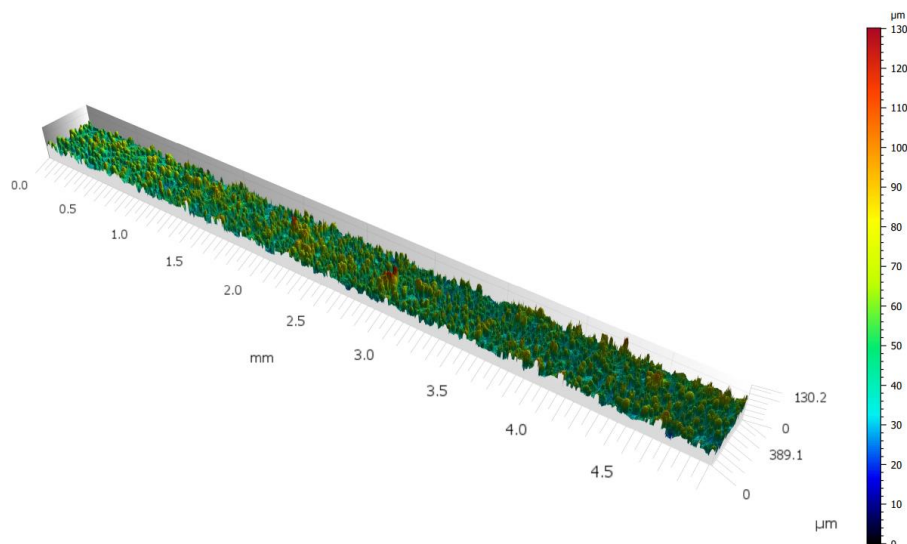
Obrázek 38: Vybraná plocha

Poté je použit další filtr pro zarovnání, jelikož data nejsou jen úhlově naklopena, ale i zaoblena. Filtr „remove form“ odstraní tyto plochy. Na obrázku 39 je vidět povrch po použití filtru a odstraněná data. Tím se snažíme o potlačení vlivu úchylek tvaru na hodnocení textury povrchu.



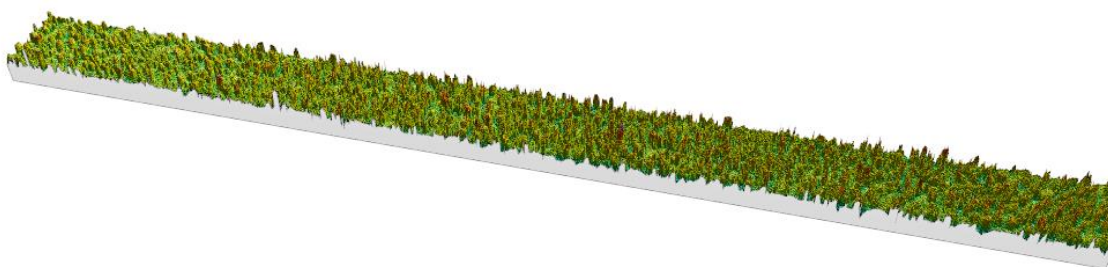
Obrázek 39: Povrch po použití filtru "remove form" (vlevo), odstraněná data (vpravo)

Výsledek po všech provedených úpravách je vidět na obrázku 40 ve 3D zobrazení. Výsledkem je základní povrch součásti (Primary surface).

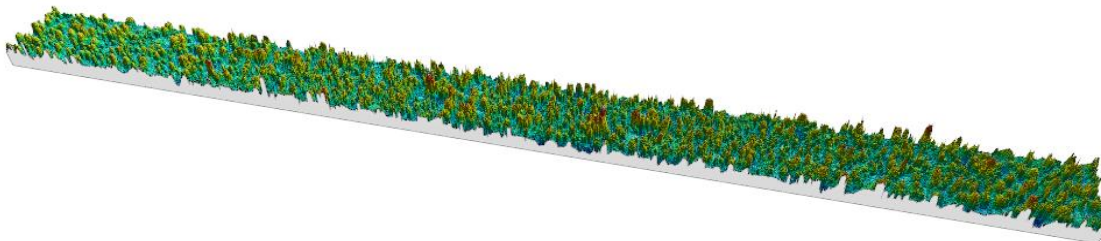


Obrázek 40: 3D zobrazení vyhodnocovaného povrchu po úpravě dat, základní povrch

Dále je použit metrologický filtr (metrological filter), kde je určena základní délka (λ_c). Ta se zpravidla volí podle tabulek, ale jelikož je kratší vzdálenost povrchu jen necelých 0,4 mm (obrázek 40) byla λ_c zvolena 0,08mm a 0,25mm. Základní délka λ_c určuje hranici mezi drsností a vlnitostí. Při nižší hodnotě λ_c je zahrnuto méně složek do S-L povrchu (drsnost) a více do S-F povrchu (vlnitost). Při zvyšování hodnoty λ_c se více složek dostává do S-L povrchu. Rozdíl při použití $\lambda_{c1}=0,08\text{mm}$ a $\lambda_{c2}=0,25\text{mm}$ je vidět na obrázcích 41, 42.

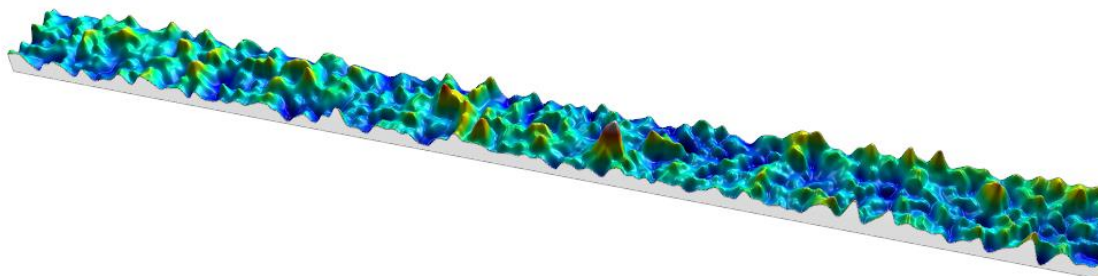


Obrázek 41: S-L povrch při použití metrologického filtru se základní délkou $\lambda_{c1}=0,08\text{ mm}$

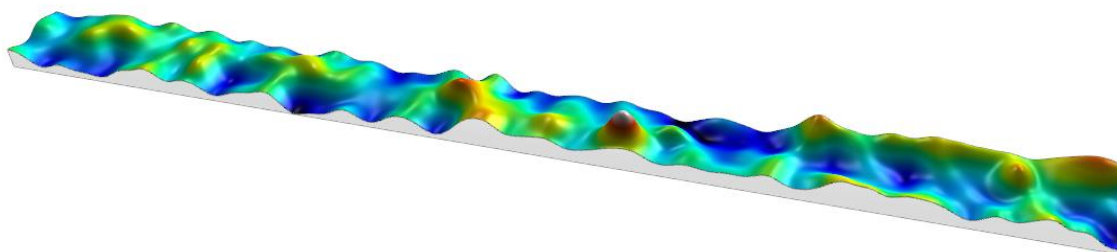


Obrázek 42: S-L povrch při použití metrologického filtru se základní délkou $\lambda_{c2}=0,25\text{ mm}$

Lépe rozpoznatelné je to na S-F povrchu, kde je jasně vidět rozdílná členitost povrchu. Když se $\lambda_{c1}=0,08$ mm je vidět složitější struktura, jelikož spadá více složek do S-F povrchu než u $\lambda_{c2}=0,25$ mm. Rozdíl je vidět na obrázcích 43, 44.

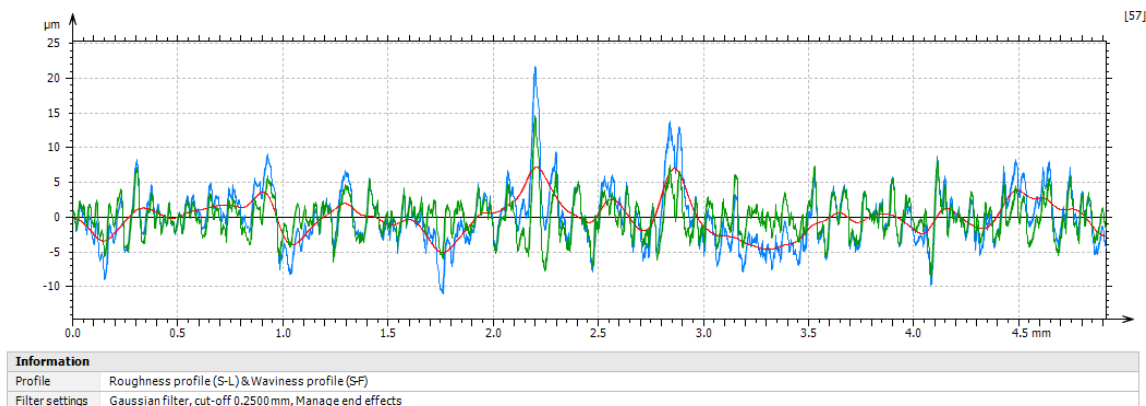


Obrázek 43: S-F povrch při použití metrologického filtru se základní délkou $\lambda_{c1}=0,08$ mm

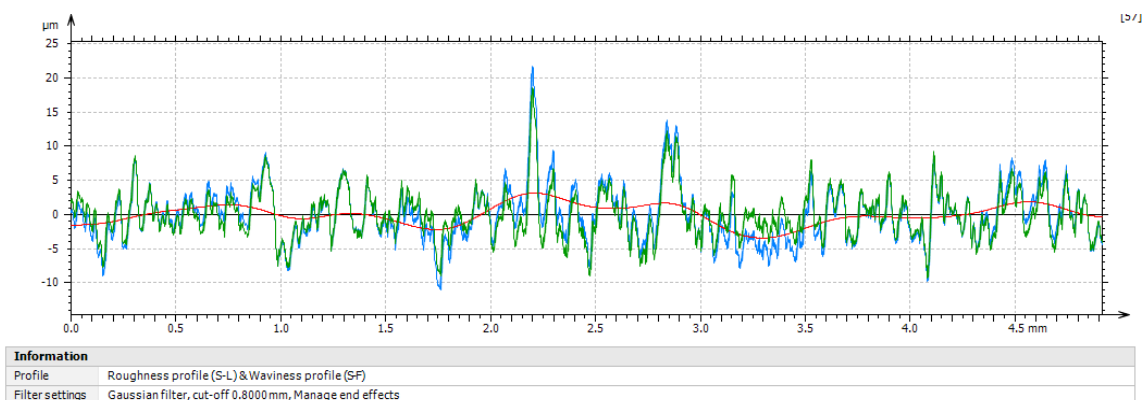


Obrázek 44: S-F povrch při použití metrologického filtru se základní délkou $\lambda_{c2}=0,25$ mm

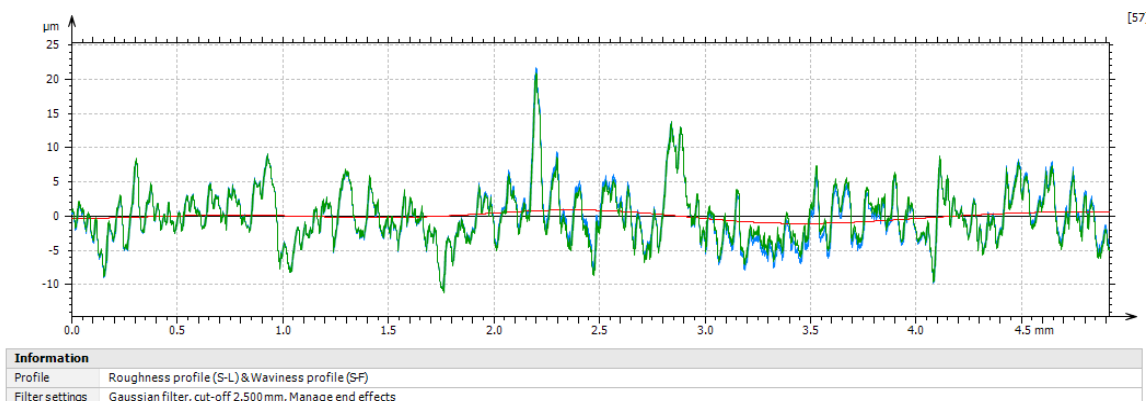
To stejné lze pozorovat také na profilech povrchu. Zde je možné již zadávat větší hodnoty základní délky, jelikož je možné zvolit profil rovnoběžný s osou x. Hodnoty základních délek jsou: $\lambda_{c1}=0,25$ mm, $\lambda_{c2}=0,800$ mm, $\lambda_{c3}=2,500$ mm. Na obrázcích 45, 46, 47 je vidět porovnání základního profilu (P), profilu drsnosti (R) a profilu vlnitosti (W). Pro vyšší hodnoty λ_c se profil drsnosti liší méně od základního profilu, profil vlnitosti se přibližuje přímce.



Obrázek 45: základní profil (modře), profil drsnosti (zeleně) a profil vlnitosti (červeně) pro hodnotu základní délky $\lambda_{c1}=0,25$ mm



Obrázek 46: základní profil (modře), profil drsnosti (zeleně) a profil vlnitosti (červeně) pro hodnotu základní délky $\lambda_{c2}=0,800$ mm



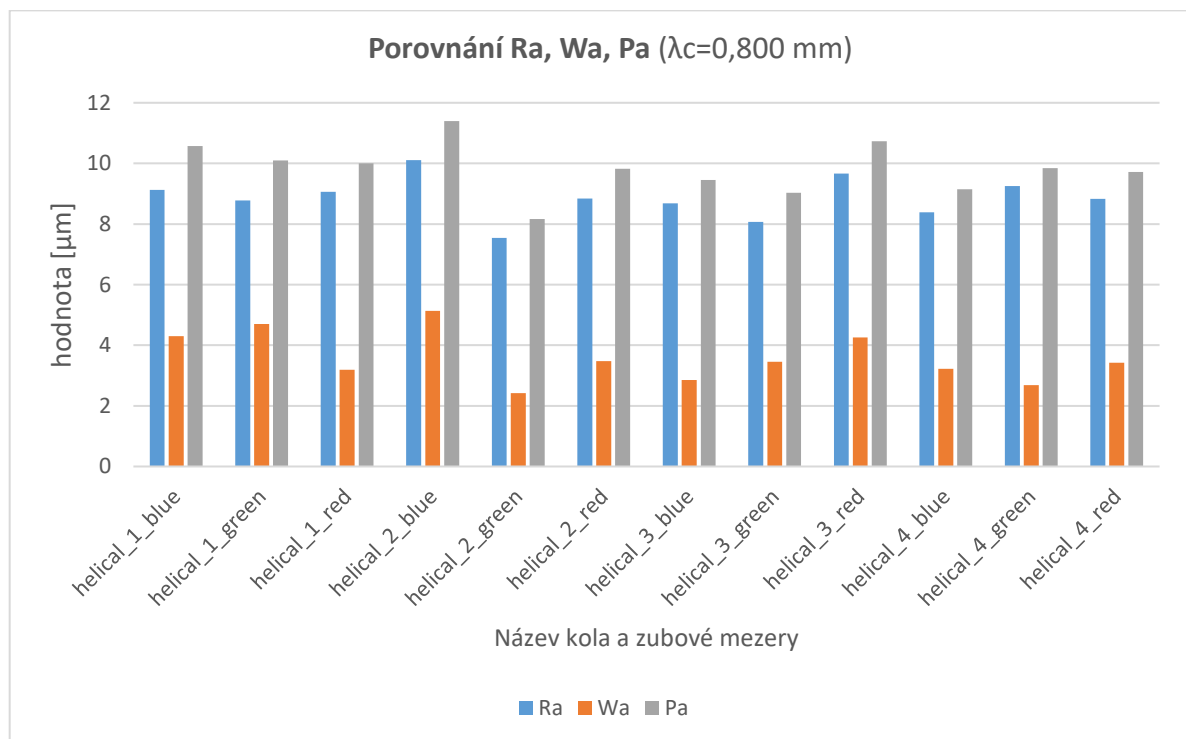
Obrázek 47: základní profil (modře), profil drsnosti (zeleně) a profil vlnitosti (červeně) pro hodnotu základní délky $\lambda_{c3}=2,500$ mm

Pro takto upravená data je možné vyhodnocovat jednotlivé parametry základního profilu, vlnitosti, drsnosti, plošné a objemové parametry. Takovéto zpracování lze poté aplikovat na další měření.

5.1.2 Získané hodnoty

Ze softwaru Mountains jsme získali výsledné hodnoty parametrů a ty jsme zanesli do grafu pro jejich porovnání. Mezi sebou jsme porovnávali stejné parametry pro základní profil, profil drsnosti a profil vlnitosti pro tři zubové mezery na čtyřech kolech se šikmým ozubením. Důvod k vyhodnocování více parametrů je, že nevíme, který parametr bude procesem LSP ovlivněn více a který méně. Profily byly z naměřených dat extrahovány s rozstupem 10 bodů, což na naměřených datech vedlo na 141 vyhodnocovaných profilů. Veškeré parametry jsou tak prezentovány jako průměrné hodnoty (\bar{x}) a k nim přiřazené směrodatné odchylky (s) viz. tabulky 8, 9, 10, 11, 12. Znázorněno je to také na grafech 1, 2, 3, 4, 5.

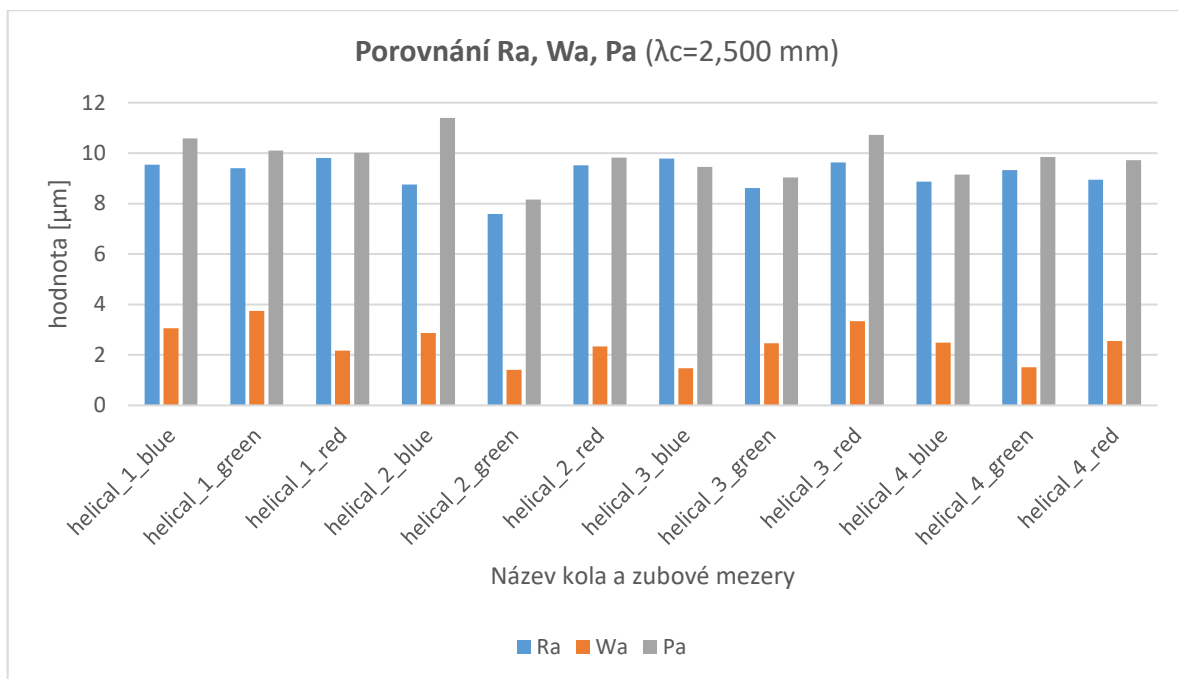
Opět je potřeba zvolit zde λc . Na grafu 1 bylo zvoleno $\lambda c_1=0,800$ mm, na grafu 2 je základní délka $\lambda c_2=2,500$ mm. Rozdíl je vidět ve velikosti parametrů Ra (modré sloupce) a Wa (oranžové sloupce). Na druhém grafu je více složek zahrnuto do parametru Ra. Toto platí i u dalších parametrů Rz, Wz, Rp, Wp, Rv, Wv.



Graf 1: Hodnoty parametrů Ra, Wa a Pa pro dvanáct zubových mezer se základní délkou $\lambda c_1=0,800$ mm

Tabulka 8: Prům. hodnoty a směrodatné odchylky pro 12 zubových mezer a parametry Ra, Wa, Pa pro $\lambda_{c1}=0,800$ mm

	Ra (\bar{x}) [μm]	Ra (s) [μm]	Wa (\bar{x}) [μm]	Wa (s) [μm]	Pa (\bar{x}) [μm]	Pa (s) [μm]
helical_1_blue	9,122	0,916	4,305	1,113	10,576	1,138
helical_1_green	8,773	1,044	4,706	1,352	10,096	1,386
helical_1_red	9,059	0,572	3,188	0,640	10,006	0,549
helical_2_blue	10,105	2,195	5,136	1,848	11,392	2,190
helical_2_green	7,544	0,716	2,418	0,496	8,165	0,762
helical_2_red	8,838	0,464	3,474	0,535	9,819	0,536
helical_3_blue	8,685	0,634	2,858	0,507	9,456	0,735
helical_3_green	8,074	0,508	3,458	1,012	9,032	0,783
helical_3_red	9,668	0,947	4,260	1,123	10,728	1,424
helical_4_blue	8,383	0,806	3,224	1,380	9,149	1,294
helical_4_green	9,256	0,514	2,686	0,705	9,842	0,576
helical_4_red	8,826	0,527	3,424	0,925	9,721	0,612

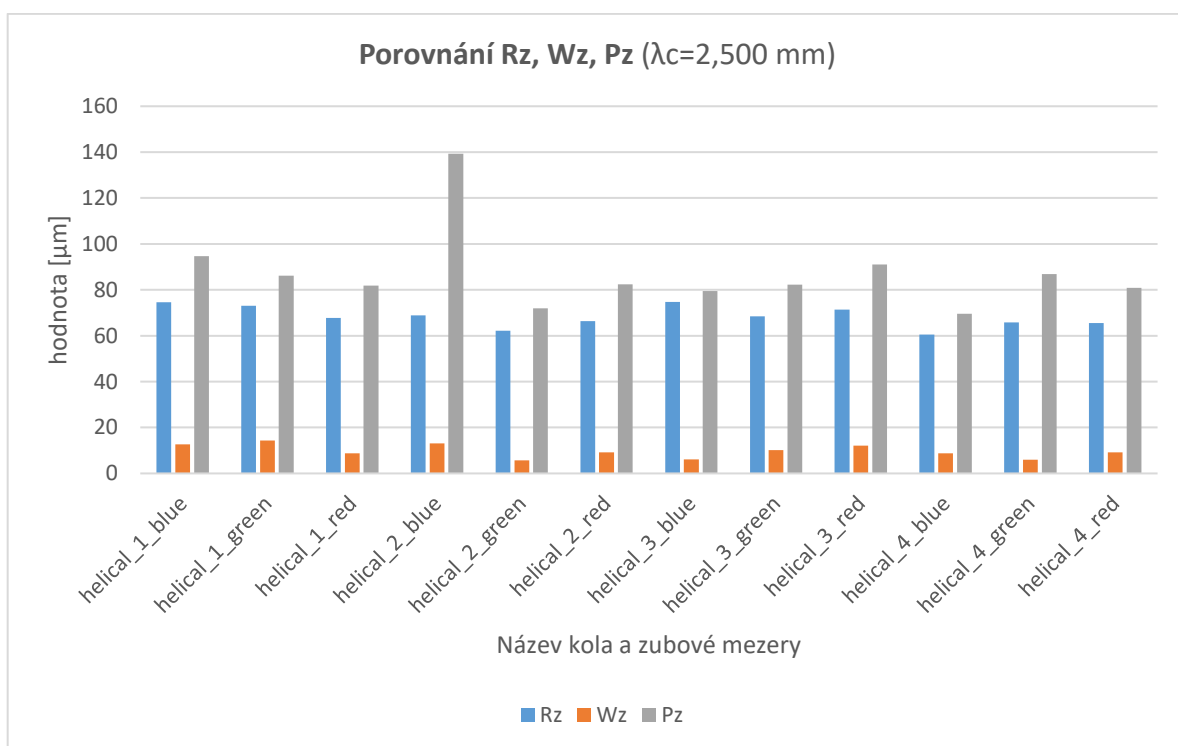


Graf 2: Hodnoty parametrů Ra, Wa a Pa pro dvanáct zubových mezer se základní délkou $\lambda_{c2}=0,800$ mm

Tabulka 9: Prům. hodnoty a směrodatné odchylky pro 12 zubových mezer a parametry Ra, Wa, Pa pro $\lambda c_2=2,500$ mm

	Ra (\bar{x}) [μm]	Ra (s) [μm]	Wa (\bar{x}) [μm]	Wa (s) [μm]	Pa (\bar{x}) [μm]	Pa (s) [μm]
helical_1_blue	9,538	1,236	3,056	0,979	10,576	1,138
helical_1_green	9,407	1,637	3,746	1,285	10,096	1,386
helical_1_red	9,808	0,825	2,166	0,764	10,006	0,549
helical_2_blue	8,750	1,022	2,866	1,137	11,392	2,190
helical_2_green	7,592	0,713	1,410	0,517	8,165	0,762
helical_2_red	9,514	0,854	2,337	0,634	9,819	0,536
helical_3_blue	9,780	1,075	1,475	0,467	9,456	0,735
helical_3_green	8,617	0,777	2,464	0,833	9,032	0,783
helical_3_red	9,625	0,780	3,343	1,038	10,728	1,424
helical_4_blue	8,869	1,144	2,491	1,262	9,149	1,294
helical_4_green	9,327	0,762	1,509	0,674	9,842	0,576
helical_4_red	8,946	0,753	2,556	0,905	9,721	0,612

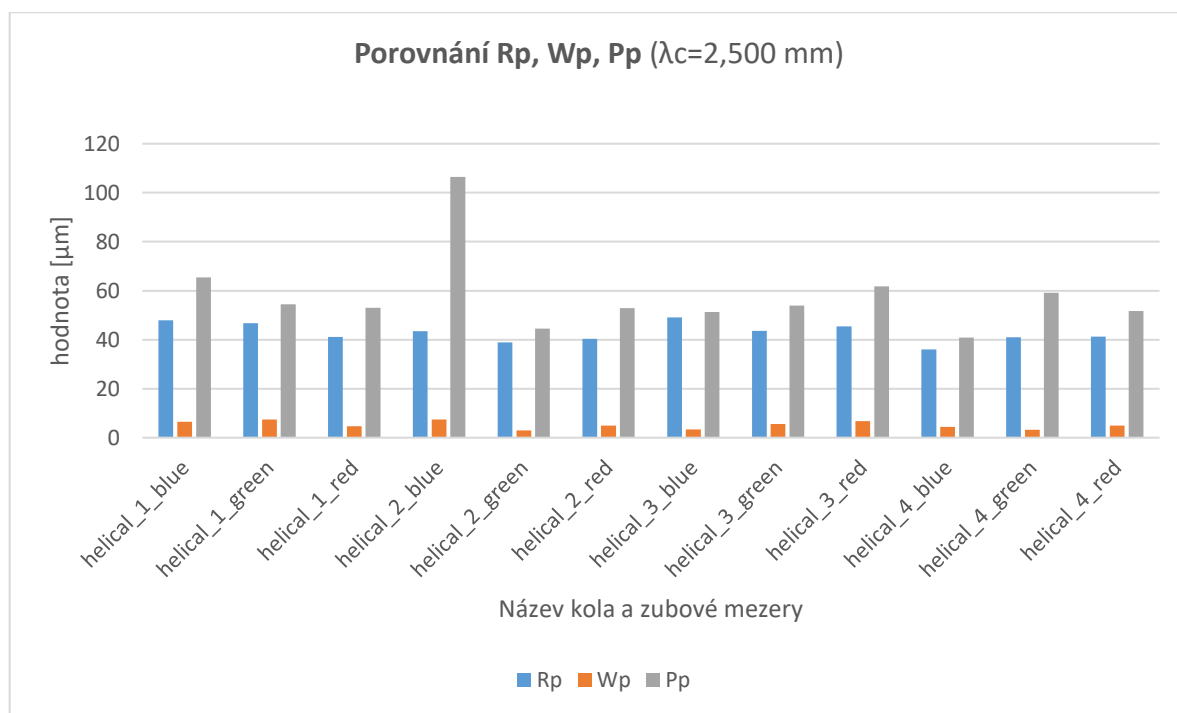
Pro porovnání parametrů Rz, Wz, Pz, Rp, Wp, Pp a Rv, Wv, Pv byl použit, stejný postup jako pro dřívější parametry Ra, Wa, Pa. Pro ukázkou na grafech 3, 4 a 5 je vidět porovnání hodnot parametrů při základní délce $\lambda c=2,500$ mm.



Graf 3: Hodnoty parametrů Rz, Wz a Pz pro dvanáct zubových mezer se základní délkou $\lambda c=2,500$ mm

Tabulka 10: Prům. hodnoty a směrodatné odchylky pro 12 zubových mezer a parametry Rz, Wz, Pz pro $\lambda_c=2,500$ mm

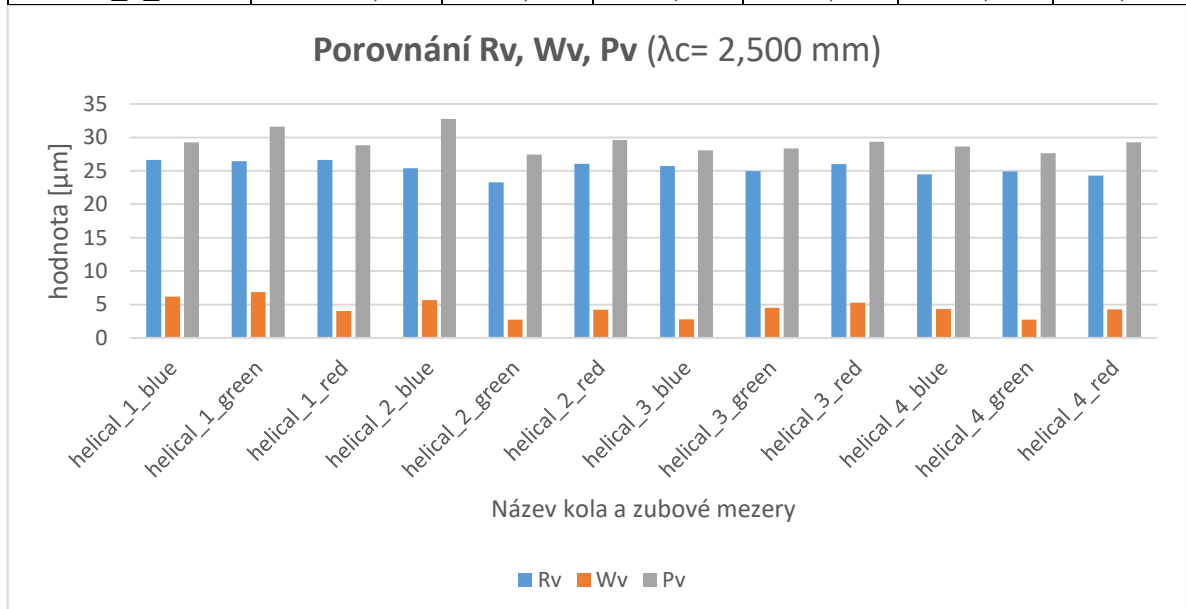
	Rz (\bar{x}) [μm]	Rz (s) [μm]	Wz (\bar{x}) [μm]	Wz (s) [μm]	Pz (\bar{x}) [μm]	Pz (s) [μm]
helical_1_blue	74,600	13,600	12,626	4,729	94,691	23,050
helical_1_green	73,125	22,132	14,292	5,345	86,134	18,570
helical_1_red	67,752	7,057	8,748	3,132	81,892	13,830
helical_2_blue	68,870	13,162	13,029	5,920	139,247	70,958
helical_2_green	62,245	23,196	5,720	1,424	71,986	21,042
helical_2_red	66,364	8,557	9,126	2,641	82,450	9,111
helical_3_blue	74,736	18,490	6,086	1,757	79,454	17,487
helical_3_green	68,489	24,109	10,113	3,588	82,245	23,443
helical_3_red	71,384	13,039	12,052	4,908	91,068	13,522
helical_4_blue	60,470	10,420	8,761	4,566	69,550	10,326
helical_4_green	65,865	6,099	5,962	2,231	86,834	17,442
helical_4_red	65,551	8,752	9,181	3,020	80,918	12,169



Graf 4: Hodnoty parametrů Rp, Wp a Pp pro dvanáct zubových mezer se základní délkou $\lambda_c=2,500$ mm

Tabulka 11: Prům. hodnoty a směrodatné odchytky pro 12 zubových mezer a parametry R_p , W_p , P_p pro $\lambda_c=2,500$ mm

	$R_p(\bar{x})$ [μm]	$R_p(s)$ [μm]	$W_p(\bar{x})$ [μm]	$W_p(s)$ [μm]	$P_p(\bar{x})$ [μm]	$P_p(s)$ [μm]
helical_1_blue	47,953	11,994	6,447	4,191	65,450	21,850
helical_1_green	46,677	18,231	7,453	3,695	54,507	16,192
helical_1_red	41,104	5,593	4,727	2,524	53,053	13,209
helical_2_blue	43,492	11,833	7,386	3,918	106,495	68,426
helical_2_green	38,953	21,435	2,984	1,070	44,550	19,497
helical_2_red	40,292	7,715	4,907	2,180	52,845	8,270
helical_3_blue	49,041	17,332	3,327	1,192	51,373	17,002
helical_3_green	43,556	24,003	5,595	3,081	53,902	23,257
helical_3_red	45,380	11,696	6,806	4,335	61,726	12,041
helical_4_blue	36,022	8,728	4,454	3,264	40,908	8,314
helical_4_green	40,978	5,241	3,215	1,607	59,202	16,271
helical_4_red	41,284	7,980	4,909	2,256	51,646	11,738



Graf 5: Hodnoty parametrů R_v , W_v a P_v pro dvanáct zubových mezer se základní délkou $\lambda_c=2,500$ mm

Tabulka 12: Prům. hodnoty a směrodatné odchylky pro 12 zubových mezer a parametry R_v , W_v , P_v pro $\lambda c=2,500$ mm

	$R_v(\bar{x})$ [μm]	$R_v(s)$ [μm]	$W_v(\bar{x})$ [μm]	$W_v(s)$ [μm]	$P_v(\bar{x})$ [μm]	$P_v(s)$ [μm]
helical_1_blue	26,647	5,002	6,179	1,324	29,241	3,352
helical_1_green	26,448	5,389	6,839	3,350	31,627	4,589
helical_1_red	26,648	3,791	4,021	1,676	28,839	3,806
helical_2_blue	25,378	5,258	5,642	2,171	32,752	6,610
helical_2_green	23,292	3,297	2,736	1,024	27,436	5,053
helical_2_red	26,072	3,827	4,219	1,520	29,605	3,651
helical_3_blue	25,695	5,446	2,759	0,810	28,081	5,049
helical_3_green	24,933	2,982	4,518	1,935	28,344	3,068
helical_3_red	26,004	3,939	5,245	1,388	29,342	4,059
helical_4_blue	24,448	3,735	4,308	1,572	28,642	4,332
helical_4_green	24,887	3,680	2,747	1,039	27,632	4,070
helical_4_red	24,266	3,112	4,271	1,318	29,272	3,854

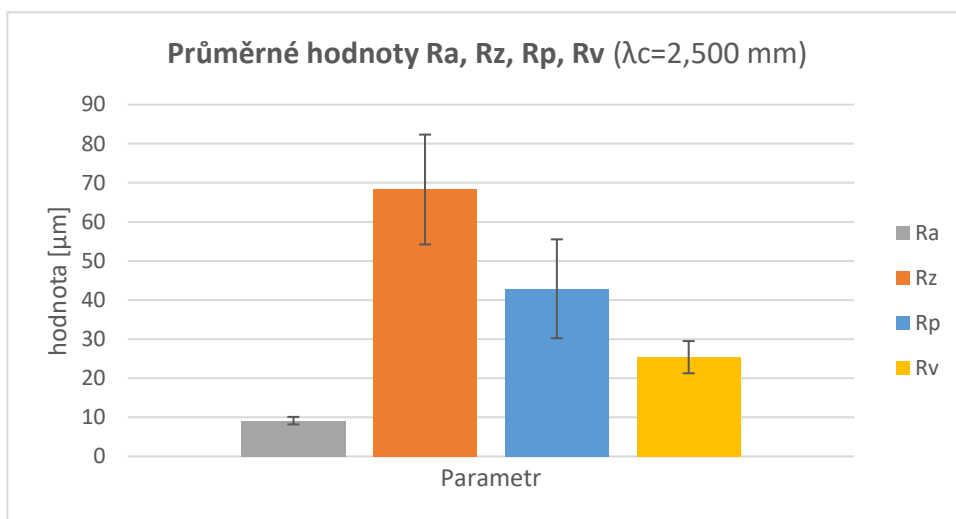
Výsledné průměrné hodnoty parametrů (\bar{x}) a směrodatné odchylky (s) jsou zaznamenány v tabulkách 8, 9 a pro $\lambda c_2=2,500$ mm jsou hodnoty znázorněny na grafech 6, 7, 8.

Tabulka 13: Průměrné hodnoty a směrodatné odchylky parametrů profilu drsnosti, profilu vlnitosti a základního profilu pro základní délku $\lambda c_1=0,800$ mm

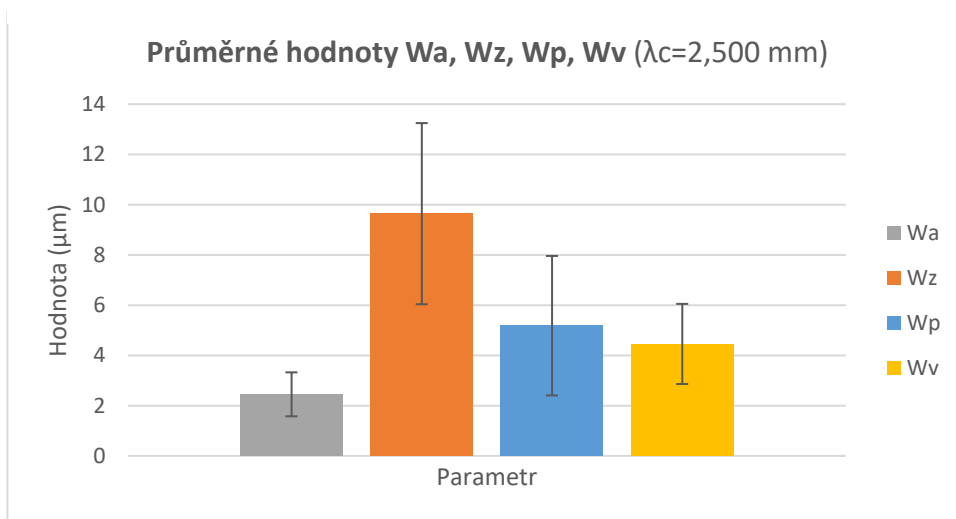
profil drsnosti	\bar{x} [μm]	s [μm]	profil vlnitosti	\bar{x} [μm]	s [μm]	základní profil	\bar{x} [μm]	s [μm]
Rp	33.684	4.804	Wp	11.135	5.018	Pp	57.971	19.672
Rz	55.576	6.089	Wz	19.017	5.767	Pz	87.206	20.912
Ra	8.861	0.820	Wa	3.595	0.970	Pa	9.832	0.999

Tabulka 14: Průměrné hodnoty a směrodatné odchylky parametrů profilu vlnitosti a základního profilu pro základní délku $\lambda c_2=2,500$ mm

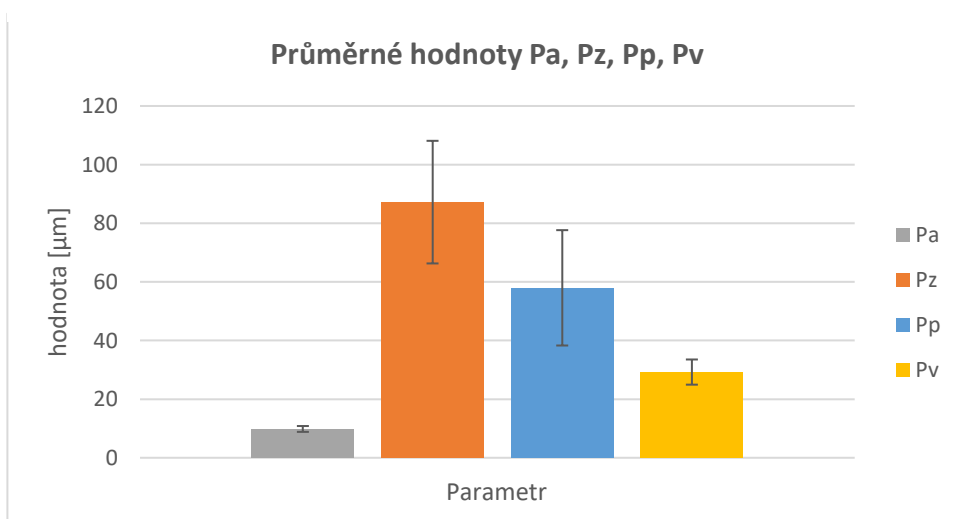
profil drsnosti	\bar{x} [μm]	s [μm]	profil vlnitosti	\bar{x} [μm]	s [μm]	základní profil	\bar{x} [μm]	s [μm]
Rp	42.894	12.648	Wp	5.184	2.776	Pp	57.971	19.672
Rz	68.287	14.051	Wz	9.641	3.605	Pz	87.206	20.912
Ra	9.148	0.965	Wa	2.452	0.875	Pa	9.832	0.999



Graf 6: Průměrné hodnoty parametrů Ra, Rz, Rp, Rv a k nim přiřazené chybové úsečky



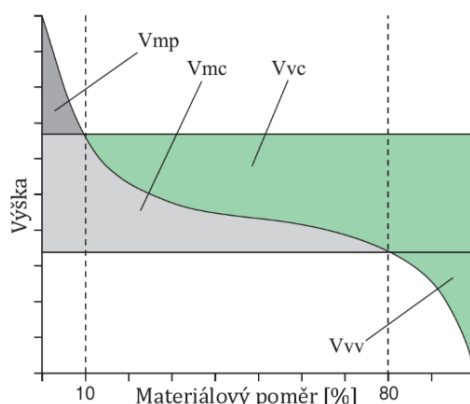
Graf 7: Průměrné hodnoty parametrů Wa, Wz, Wp, Wv a k nim přiřazené chybové úsečky



Graf 8: Průměrné hodnoty parametrů Pa, Pz, Pp, Pv a k nim přiřazené chybové úsečky

Dále byly vyhodnoceny také plošné a objemové parametry S_p , S_v , S_z , S_a , V_{mp} a V_{mc} .

V_{mp} (objem materiálu výstupku) a V_{mc} (objem jádra materiálu) jsou parametry, které určují objem materiálu na dané úrovni materiálového podílu (p , q). Závislost výšky na materiálovém poměru je vidět na obrázku 48 (Abbottova křivka). Výchozí hodnota p je 10 % a q 80 %. [24]

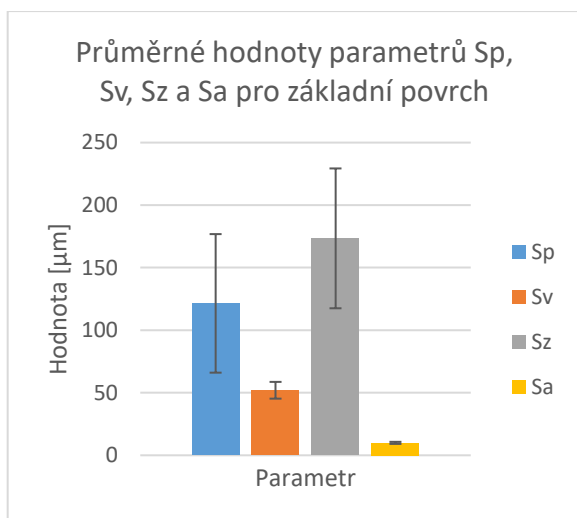


Obrázek 48: Abbottova křivka a objemové parametry V_{mp} , V_{mc} , V_{vc} , V_{vv} [24]

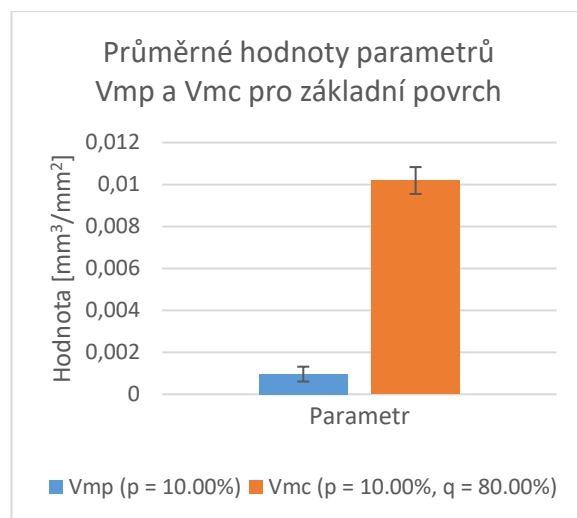
Do tabulky 15 jsou zaneseny výsledné průměrné hodnoty (\bar{x}) a k nim příslušné směrodatné odchylky (s) pro plošné a objemové parametry. Na grafech 9, 10, 11, 12, 13, 14 jsou hodnoty znázorněny graficky.

Tabulka 15: Průměrné hodnoty a směrodatné odchylky plošných a objemových parametrů

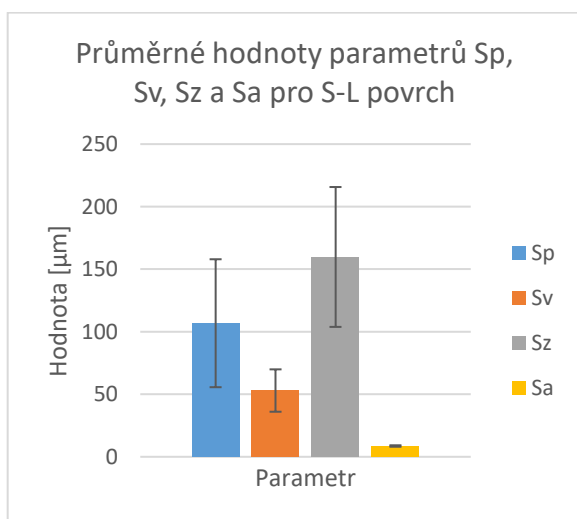
	základní povrch			S-L povrch			S-F povrch		
		\bar{x}	s		\bar{x}	s		\bar{x}	s
Plošné parametry [μm]	S_p	121.45 6	55.395	S_p	106.80 2	51,13 8	S_p	32.660	26.837
	S_v	51.989	6.697	S_v	52.983	16,93 8	S_v	13.475	3.405
	S_z	173.44 4	55.894	S_z	159.78 5	55,90 6	S_z	46.135	29.713
	S_a	9.946	0.837	S_a	8.639	0,584	S_a	3.659	0.802
Objemové parametry [mm^3/mm^2]	V_{mp} ($p = 10.00$ %)	0.000 96	0.000 35	V_{mp} ($p = 10.00$ %)	0.000 74	0,000 18	V_{mp} ($p = 10.00$ %)	0.000 43	0.000 29
	V_{mc} ($p = 10.00$ %, $q = 80.00$ %)	0.0101 9	0.000 64	V_{mc} ($p = 10.00$ %, $q = 80.00$ %)	0.008 68	0,000 51	V_{mc} ($p = 10.00$ %, $q = 80.00$ %)	0.003 86	0.000 70



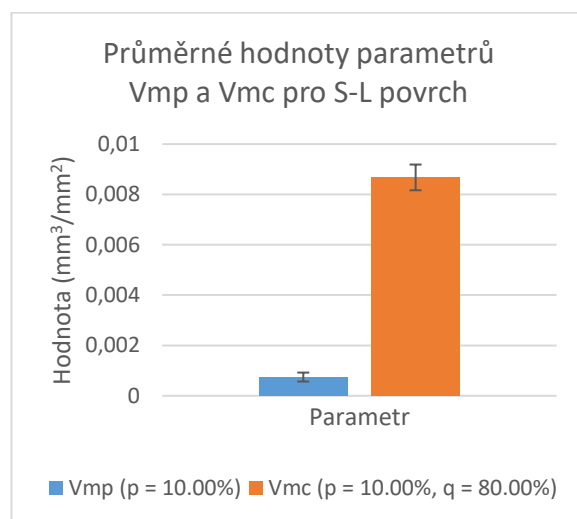
Graf 9: Průměrné hodnoty plošných parametrů pro základní povrch



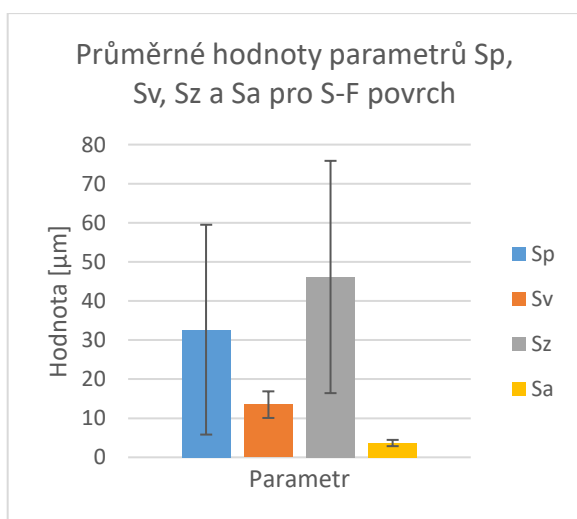
Graf 12: Průměrné hodnoty objemových parametrů pro základní povrch



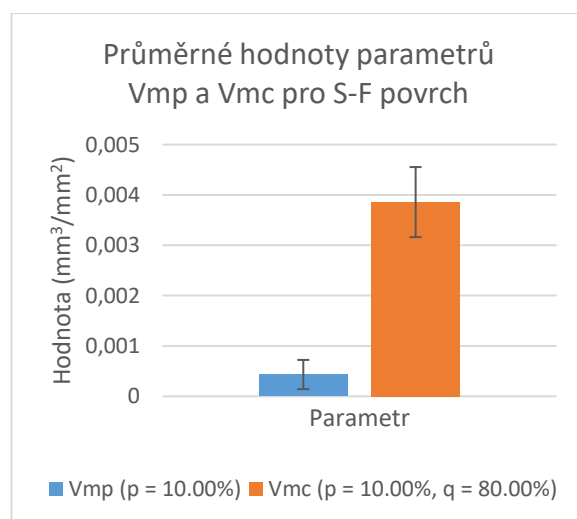
Graf 10: Průměrné hodnoty plošných parametrů pro S-L povrch



Graf 13: Průměrné hodnoty objemových parametrů pro S-L povrch



Graf 11: Průměrné hodnoty plošných parametrů pro S-F povrch



Graf 14: Průměrné hodnoty objemových parametrů pro S-F povrch

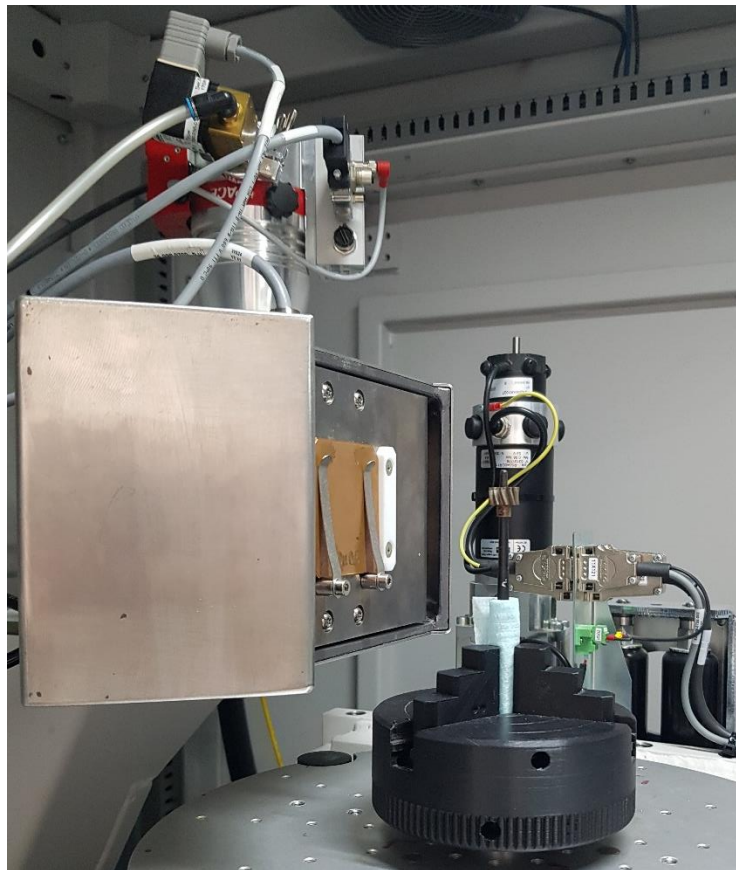
5.2 CT skenování

Porozita a geometrie ozubení byla zkoumána na CT od značky ZEISS s označením METROTOM 1500, viz obrázek 49. Toto CT využívá zdroj s napětím 225 kV a detektor o velikosti 2000 x 2000 pixelů, kde jeden pixel má velikost 0,2 mm.

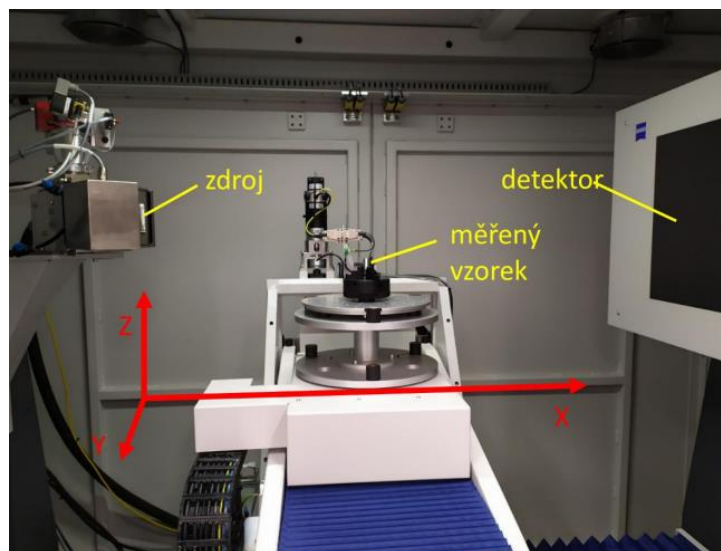


Obrázek 49: ZEISS METROTOM 1500 with 225 kV source and 2k detector

Pozorování proběhlo na vybraném kole číslo 3 s šikmým ozubením. Kolo bylo vloženo do přípravku a následně naskenováno. Upnutí je vidět na obrázku 50. Na levé části obrázku se nachází zdroj rentgenového záření a měděný filtr. Obrázek 51 ukazuje souřadný systém. Pomocí osy x je možné měnit zvětšení. Čím blíže je vzorek ke zdroji tím je dosahováno většího zvětšení a lepšího rozlišení.



Obrázek 50: Detail upnutí, zdroj záření a měděný filtr

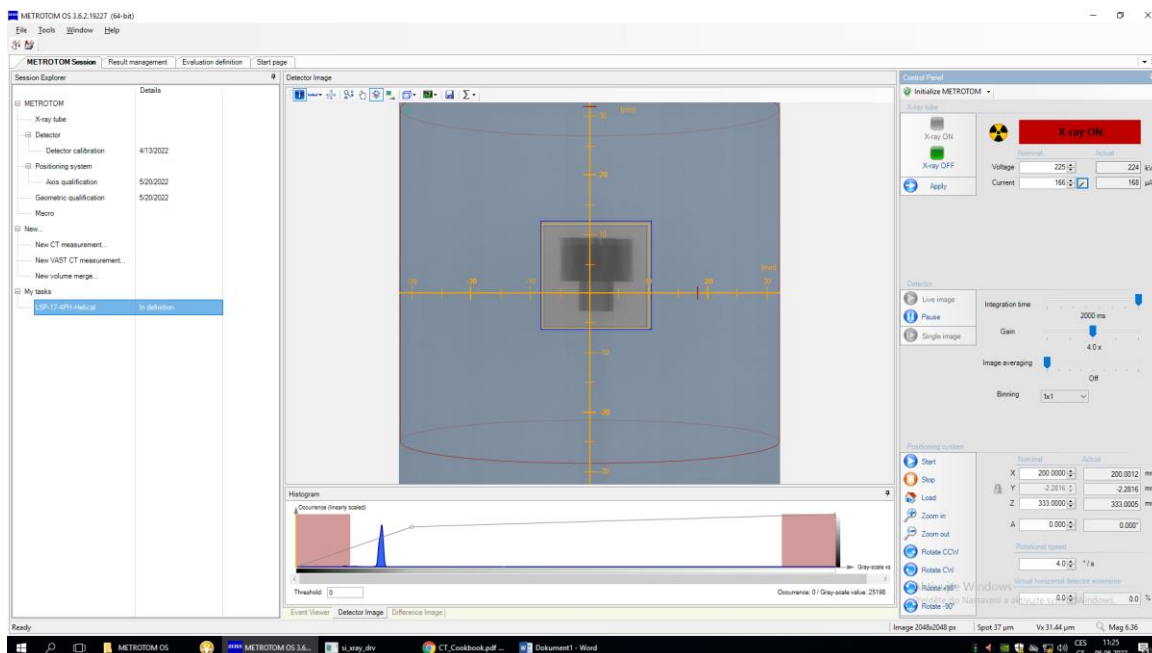


Obrázek 51: Souřadný systém a hlavní části CT

5.2.1 Nastavení CT

Vhodné procesní parametry jsou nastavovány v softwaru METROTOM OS, prostředí softwaru ukazuje obrázek 52. Pro rentgenové záření volíme napětí a proud. U detektoru volíme integrační čas (integration time), gain, image averaging a binning.

Dále je potřeba nastavit polohu vzorku v ose x, y a z. K omezení šumu a vzniku artefaktů je použit filtr.



Obrázek 52: Prostředí softwaru METROTOM OS

Filtr:

Pro danou maximální tloušťku skenované součásti a materiál byl zvolen měděný filtr. Materiál vzorku je ocel, maximální tloušťka součásti je přibližně 16 mm. Pro dosažení maximálního rozlišení byl použit filtr s tloušťkou 0,5 mm.

Napětí:

Další parametr, který volíme je napětí zdroje pro ocel a tloušťku 16 mm. Zvolené napětí je 225 kV viz. obrázek 53.

Voltage	ZEISS METROTOM with 225 kV source Max. wall thickness (max. transmission length)								
	2 mm	10 mm	30 mm	50 mm	100 mm	150 mm	200 mm	250 mm	300 mm
Plastic	max. 80 kV	100 kV	120 kV	160 kV	180 kV	180 kV	200 kV	200 kV	225 kV
Aluminum	180 kV	180 kV	180 kV	200 kV	200 kV	200 kV	225 kV	225 kV	
Titan	200 kV	225 kV	225 kV	225 kV	225 kV	225 kV			
Steel	225 kV	225 kV	225 kV	225 kV					

Obrázek 53: Hodnoty napětí zdroje dané výrobcem

Vzdálenost v ose x:

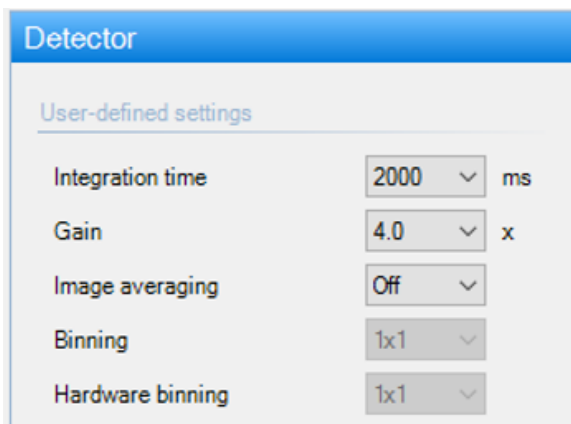
Výrobce také udává optimální vzdálenost objektu v ose X od zdroje podle velikosti voxelu. Tabulka vhodných vzdáleností je vidět na obrázku 54.

X Position	Voxel size										
	10 μm	20 μm	30 μm	40 μm	50 μm	60 μm	80 μm	100 μm	150 μm	200 μm	300 μm
ZEISS METROTOM 800 with 130 kV source	65 mm	125 mm	190 mm	250 mm	315 mm	380 mm	500 mm	600 mm			
ZEISS METROTOM 800 with 225 kV source and 1k detector	25 mm	70 mm	110 mm	150 mm	190 mm	230 mm	310 mm	390 mm	590 mm		
ZEISS METROTOM 800 with 225 kV source and 1,5k detector	40 mm	110 mm	170 mm	235 mm	300 mm	365 mm	490 mm	595 mm			
ZEISS METROTOM 1500 with 225 kV source and 1k detector	30 mm	70 mm	105 mm	145 mm	180 mm	220 mm	295 mm	370 mm	560 mm	750 mm	1130 mm
ZEISS METROTOM 1500 with 225 kV source and 2k detector	60 mm	140 mm	210 mm	290 mm	360 mm	440 mm	590 mm	740 mm	1120 mm		

Obrázek 54: Hodnoty vzdáleností v ose X

Nastavení detektoru:

V softwaru METROTOM OS je dále možné nastavit pro detektor hodnoty integračního času (Integration time), image averaging, gain, binning. Zvolené hodnoty pro skenování kol jsou vidět na obrázku 55.

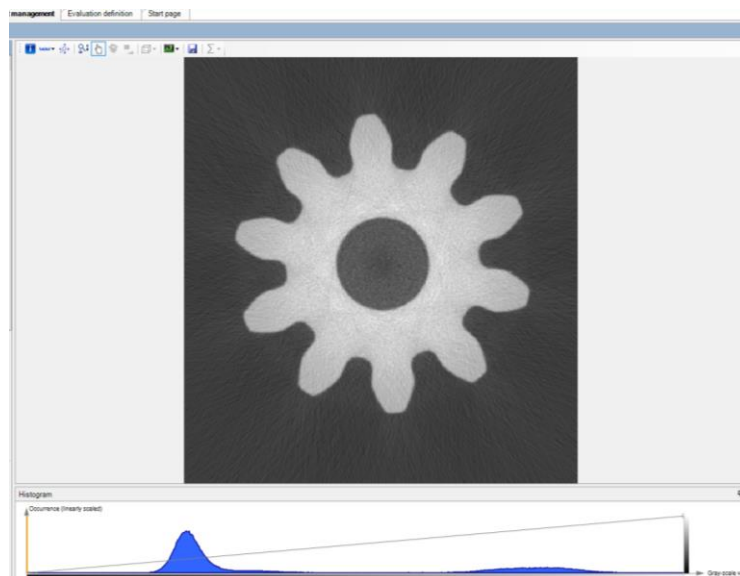


Obrázek 55: Nastavení detektoru

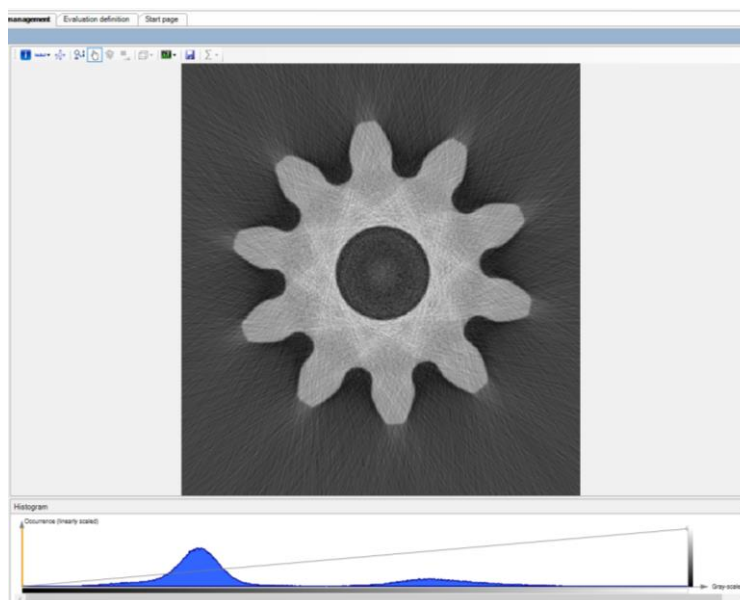
Pro získání nejlepších možných výsledků je dobré provést několik měření s různými parametry a vybrat následně nejlepší možný postup.

Na obrázcích 56, 57, 58 je vidět naskenované kolo s rozdílnou polohou v ose x. Vzdálenost v ose x je 200 mm a 120 mm. Pohled na kolo je na rovinu kolmou k ose z. Pozorování proběhlo vždy na 350. snímku z 559 (při x=120 mm ze 707 snímků).

Při pozorování byla využita korekce BHC (Beam Hardening Correction), která má pomocí softwaru za úkol zvýraznit hrany skenované součásti. Rozdíl je vidět na obrázcích 56, 57. Objekt se díky BHC jeví více zaostřen, ale vznikají zde nechtěné artefakty. [26]

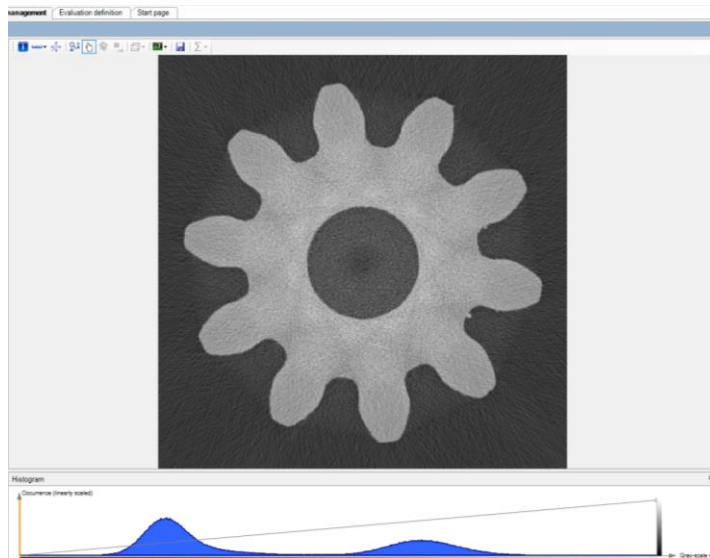


Obrázek 56: Vytvořený obraz s polohou osy x 200, bez BHC



Obrázek 57: Kolo s polohou osy x 200, s BHC

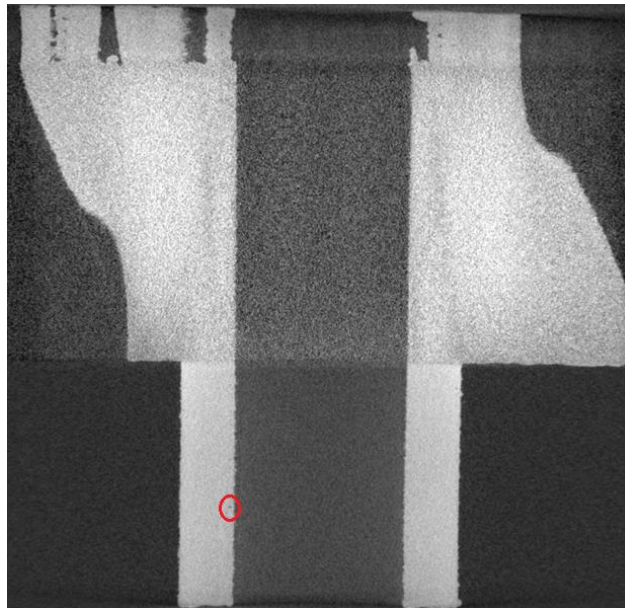
Vyšší zvětšení, tedy nižší vzdálenost objektu v ose x má za následek lepší rozlišení, ale vzniká zde penumbra efekt. Ten je ovlivněn také velikostí zdroje záření. Penumbra efekt zhoršuje ostrost hran skenovaného objektu. [27]



Obrázek 58: Kolo s polohou v ose x 120, bez BHC

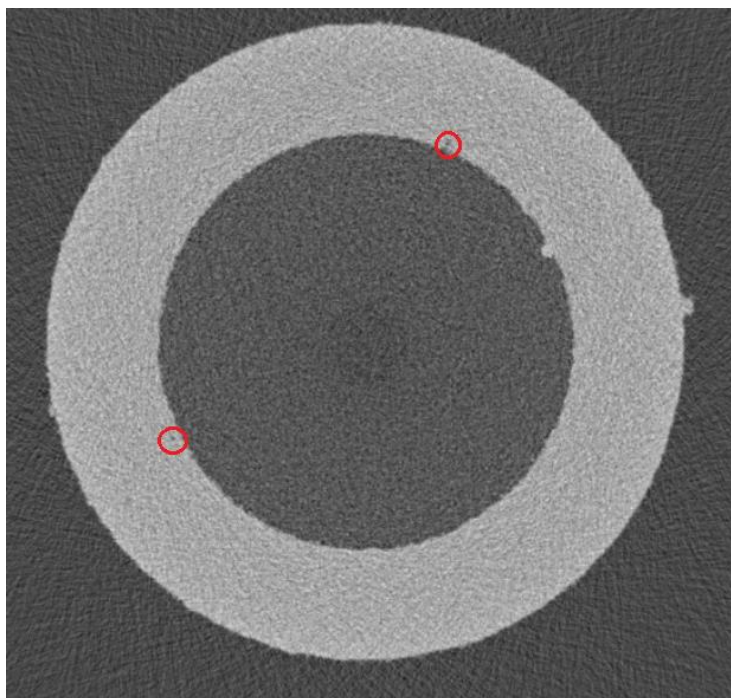
5.2.2 Pozorování porozity

Data z CT byla dále nahrána do softwaru VG Studio, kde byla dále upravována. Obrázek 59 ukazuje vliv maximální tloušťky na vznikající šum při skenování. Kolo je vidět v rovině rovnoběžné s osou z. Zvětšení je 15,85krát, poloha v ose x je 70 mm. Na obrázku je jasně vidět, že válcová plocha v dolní části obrázku, která má nižší maximální tloušťku je lépe zaostřena a lze zde pozorovat některé vzniklé póry. Na části kola s ozubením nejsou na první pohled vidět téměř žádné dutiny a vzniklý šum vyhodnocení komplikuje. V horní části je vidět zbytek podpor po 3D tištění.

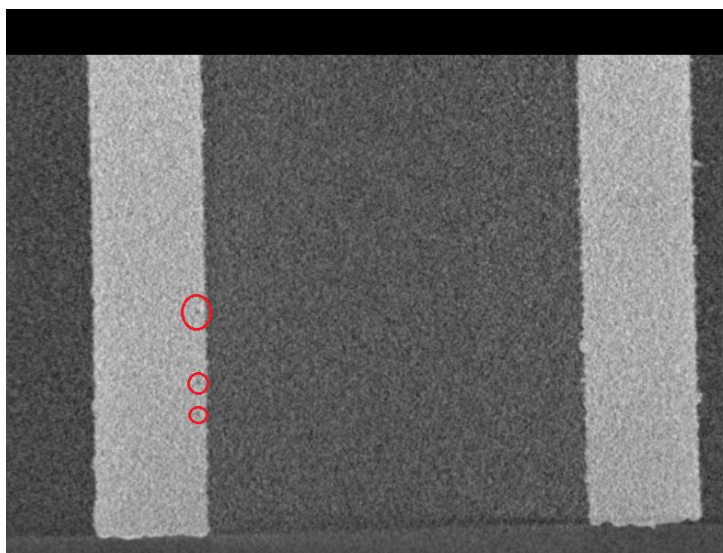


Obrázek 59: Porovnání vlivu tloušťky, vzniklého šumu a pozorování ojedinělých pórů na válcové ploše (dolní část) na kole se šikmým ozubením a polohou v ose x=70 mm

Bližší pozorování na části s válcovou plochou odhaluje malé a ojedinělé póry blízko povrchu viz. obrázek 60, 61, které vznikají z důvodu rozdílných parametrů tištění mezi konturou (skin) a vnitřní plochou (core). Parametry jsou v tabulce 5. Jinak můžeme říci, že jsou 3D díly (ozubená kola) z ocele 17-4PH vtištěné celkově s nízkou a špatně viditelnou porozitou. Jinak by to bylo u jiného druhu materiálu a jiných parametrů tištění.

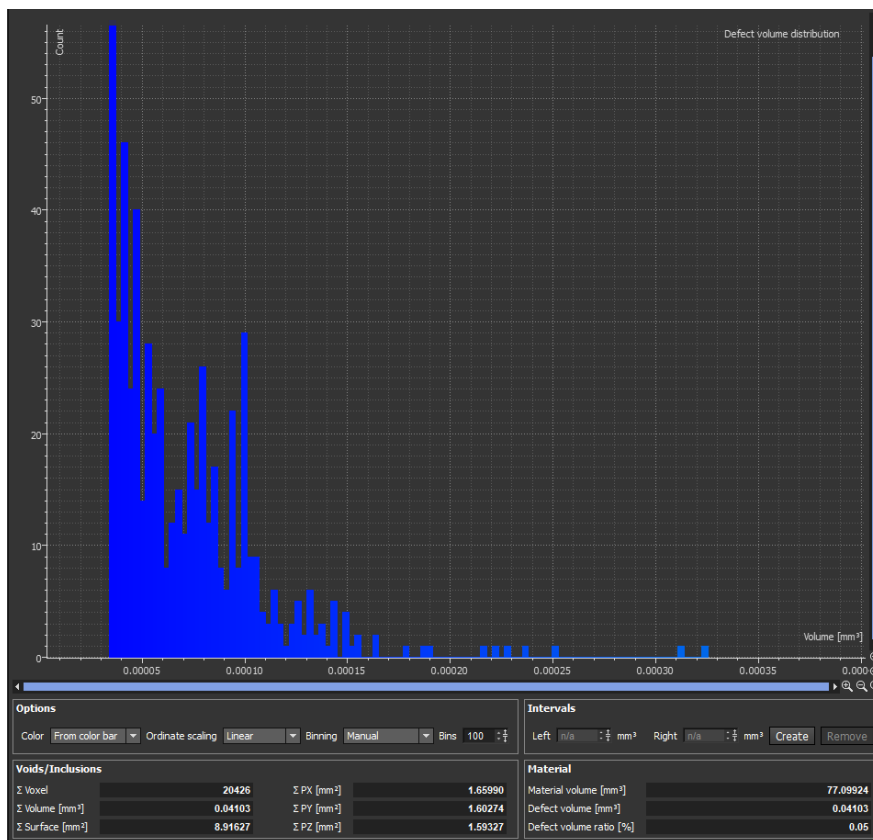


Obrázek 60: Póry blízko pod povrchem viditelné na válcové ploše ozubeného kola v řezu rovinnou x, y

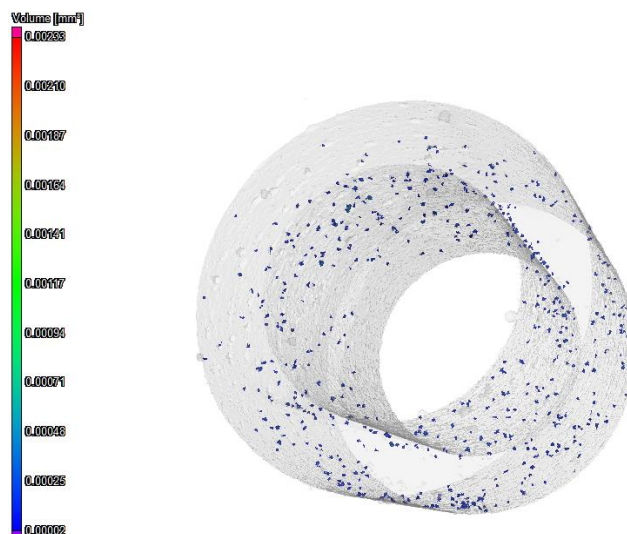


Obrázek 61: Pozorování porozity v řezu rovinnou y, z válcové plochy ozubeného kola

Na obrázku 62 je vidět histogram závislosti počtu pórů na jejich objemu. V dolní části obrázku je vidět celkové procento defektů ve válcové ploše, které odpovídá 0,05 %. Pohled na rozmístění porozity je vidět na obrázku 63, kde je opět vidět že porozita vzniká na rozhraní prostředí kontury a vnitřní plochy.



Obrázek 62: Histogram závislosti počtu pórů na jejich objemu a hodnoty charakteristických parametrů pro hodnocení porozity

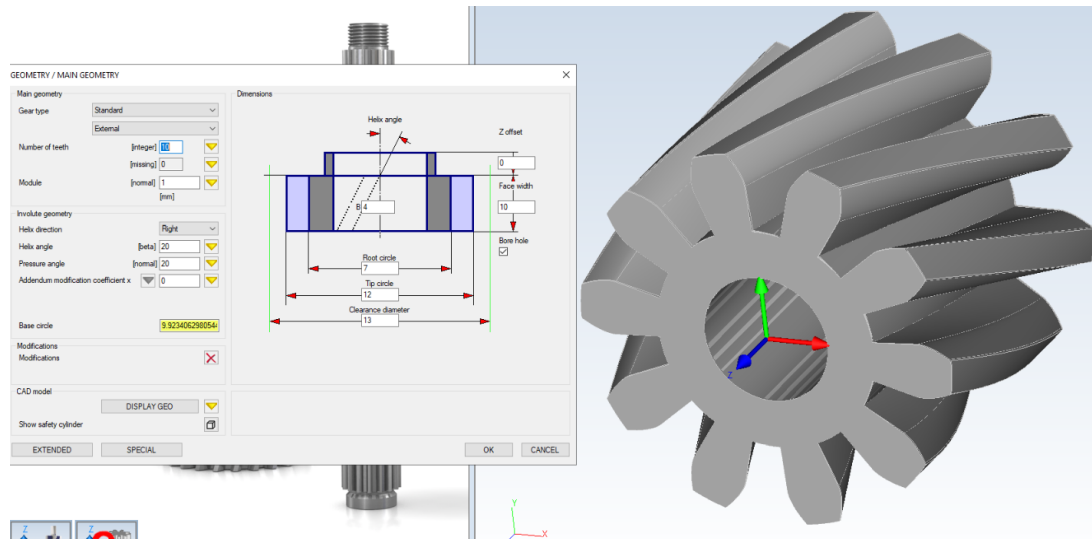


Obrázek 63: Rozmístění porozity uvnitř válcové plochy ozubeného kola

5.2.3 Měření geometrie ozubení

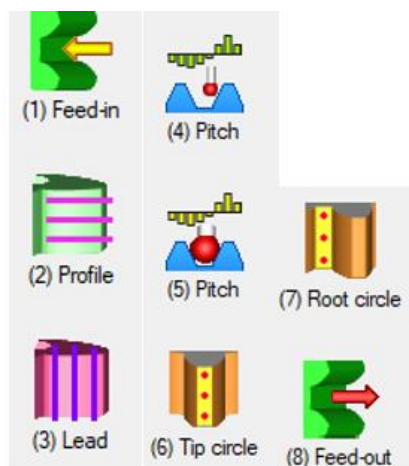
Z CT dat je možné také vyhodnocovat geometrii. To je možné v softwaru Gear Pro, který slouží k měření ozubení, v případě analýzy CT dat, měřené body extrahuje dle předem nastavených strategií z mraku bodů. Nejprve je však potřeba u součásti zvolit souřadný systém. Ten je zvolen v softwaru Calypso. Počáteční bod je průsečík osy díry a roviny čela kola viz. obrázek 64.

V softwaru Gear Pro je nejdříve potřeba nastavit základní parametry ozubení. Počet zubů, modul, úhel záběru, sklon zubů, korekce (v případě, že jsou na ozubení aplikovány), průměry hlavové, patní a základní kružnice.



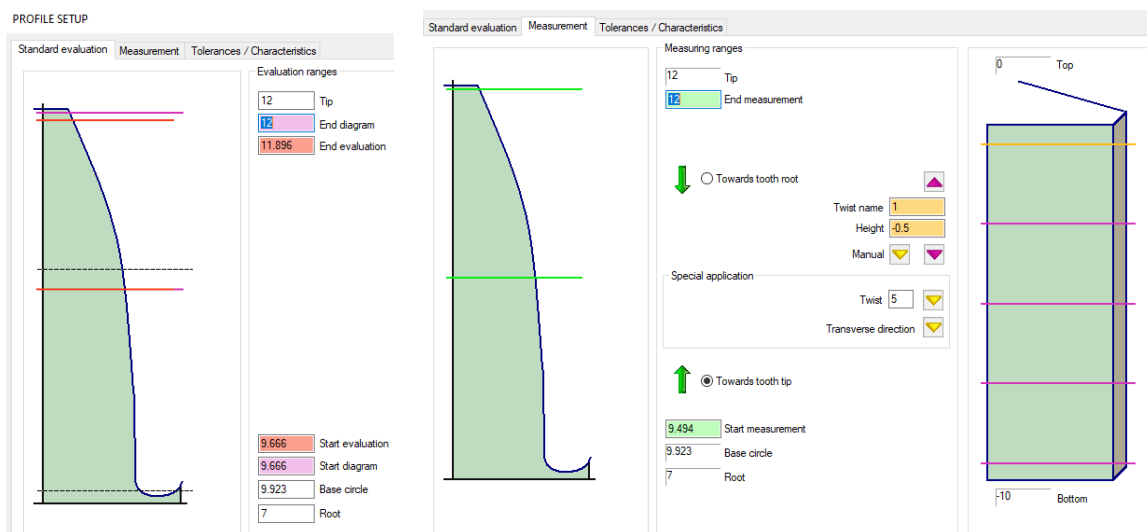
Obrázek 64: Software Gear Pro a nastavení parametrů ozubení pro šikmé zuby.

Dále se nastavuje příjezd a odjezd měřicí sondy, měření profilu zubu, sklonu zubu, roztečí, popřípadě hlavové a patní kružnice. V Gear Pro je pro to určeno 8 funkcí viz. obrázek 65, ze kterých se sestavuje plán měření.



Obrázek 65: Ikony pro jednotlivá nastavení v softwaru Gear Pro

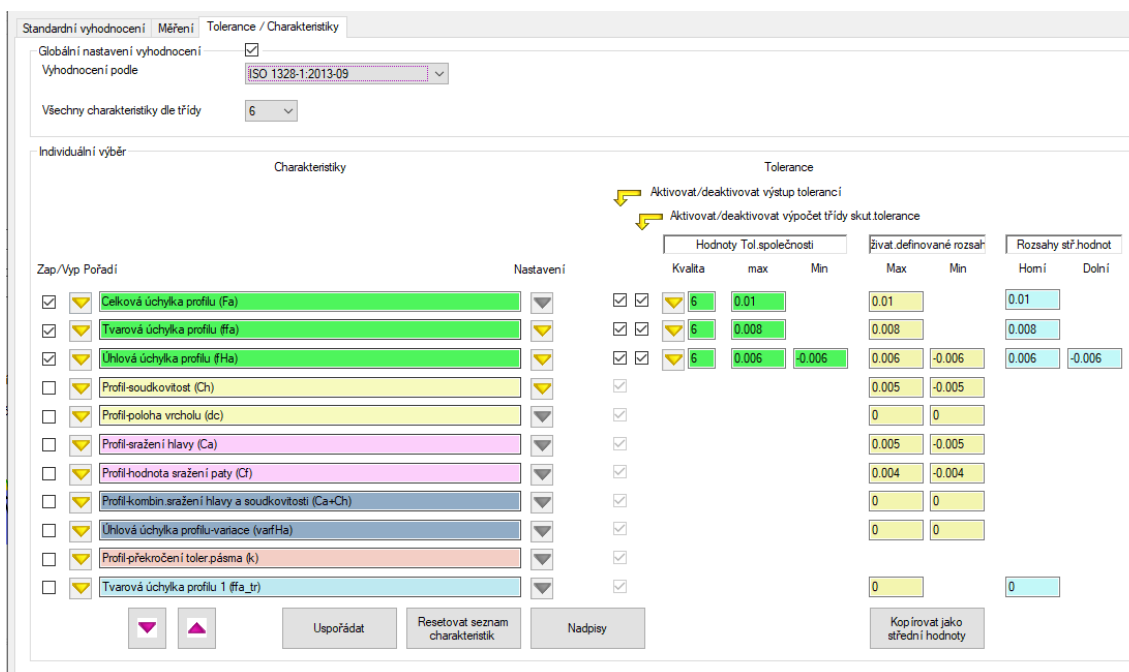
Při nastavení měření profilu zubu je nejprve určena oblast pro měření, kolik měření se na jednom zubu bude provádět (twist), směr měření (k hlavě, patě zubu). V našem případě bylo provedeno 5 měření na jednom zubu. Na obrázcích 66, 67 je vidět nastavení měření pro profil.



Obrázek 66: Základní nastavení oblasti měření pro profil zubu

Obrázek 67: Nastavení směru a počet úseků měření pro profil zubu

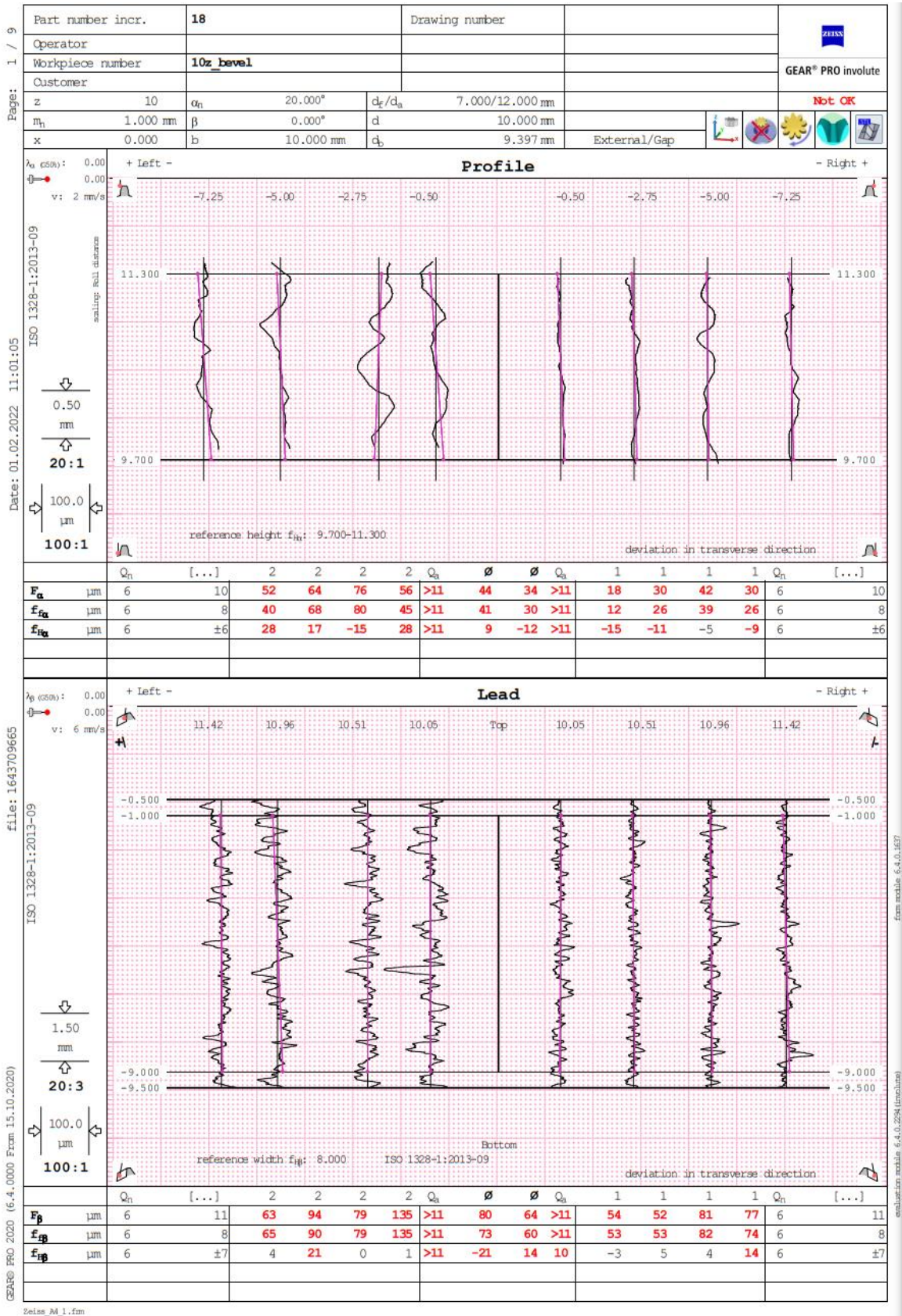
Dále je potřeba určit tolerance. Ty se zpravidla řídí normou ISO 1328, která má 11 tříd přesnosti. Hodnota tolerance se zvyšuje s vyšší třídou přesnosti. Volí se také jaké parametry se budou hodnotit. Hlavní jsou celková chyba/úchylka profilu (F_α) a jí náleží chyba/úchylka tvaru profilu ($f_{f\alpha}$) a chyba/úchylka úhlu profilu ($f_{H\alpha}$). Nastavení je na obrázku 68.



Obrázek 68: Nastavení tolerancí dle ISO 1328 pro profil zubu

Obdobné nastavení je také pro sklon zubů. Nastavujeme oblast měření, twist, směr (dolu, nahoru), úchylnku sklonu celkovou (F_{β}), tvaru ($F_{f\beta}$), úhlu ($F_{H\beta}$).

Jakmile je vše nastaveno program vygeneruje data, která se ukládají do protokolu viz. obrázek 69. V horní oblasti obrázku jsou vidět parametry ozubení. Horní část zahrnuje výsledky měření profilu zubu, dolní část sklonu zubu. Na protokolu jsou vidět 4 měření na levé straně zubu a 4 měření na pravé straně zubu (levé a pravé části protokolu). Měřilo se od průměru 9,7 mm po průměr 11,3 mm kde je evolventní profil. Ideální evolventu představují rovné čáry, odchylku od ideálního profilu představuje černá čára a odchylku úhlu fialová čára. Hodnoty F_{α} , $f_{f\alpha}$, $f_{H\alpha}$, F_{β} , $F_{f\beta}$, $F_{H\beta}$ jsou zaznamenány pod grafy. Výsledné hodnoty nevyhovují ani třídě přednosti 11. Pro třídu přesnosti 6 je tolerance F_{α} 10 μm . V našem případě se F_{α} pohybuje průměrně 44 μm na levé a 34 μm na pravé straně zubu. U sklonu je tolerance 11 μm . Průměr F_{β} na levé straně je 80 μm a na pravé 64 μm . Opět to nevyhovuje nejnižší přesnosti ozubení, tedy třídě přesnosti 11.



Obrázek 69: Protokol ze softwaru Gear Pro s grafy pro profil a sklon zubů a hodnoty úchylek F_a , f_{Fa} , f_{Ha} , F_b , F_{Fb} , F_{Hb}

5.3 LSP proces

Z důvodu komplikací s LSP zařízením nebylo možné včas provést LSP na ozubených kolech z oceli 17-4PH, a proto nebylo možné vyhodnotit texturu povrchu a porozitu, nicméně bych rád představil dřívější experiment na kolech stejných parametrů ozubení z nerezové ocele 316 L (parametry peenování jsou vidět v tabulce 16) a pozorování vlivu černé vinylové pásky na hliníkové slitině. LSP proces byl prováděn firmou HiLASE laserovým systémem BIVOJ.

Tabulka 16: Procesní parametry LSP pro peenování ozubených kol z oceli 316 L

Energie [mJ]	Délka pulzu [ns]	Frekvence [Hz]	Velikost laserového svazku [cm]	Overlap [%]	Hustota výkonu [W/cm ²]	Maximální hustota výkonu [GW/cm ²]
600	15	10	0.1	90	763.94	5.10

Na obrázku 70 je vidět komora pro LSP proces s robotem manipulujícím s peenovanými vzorky. V zadní části obrázku je vidět nádrž na odtékající vodu a výstup laseru. Konec optické soustavy laseru je vidět na obrázku 71.

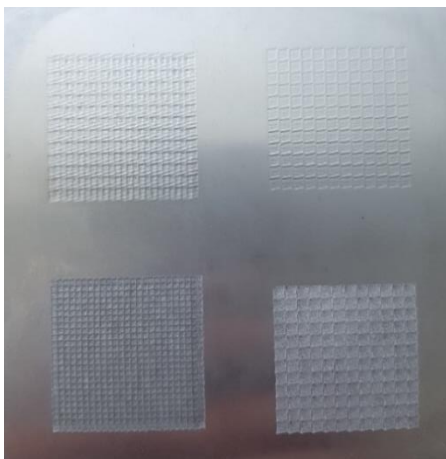


Obrázek 70: Komora pro LSP proces

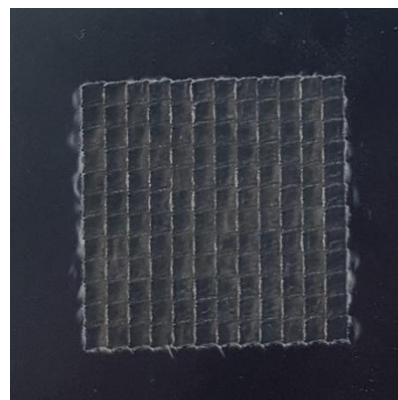


Obrázek 71: Konečný úsek optické soustavy laseru

Rozdíl použití černé vinylové pásky (absorpční vrstvy) při LSP procesu je zřetelný na obrázku 72. Horní část obrázku je s použitou páskou, dolní bez použité pásky. Je vidět, že povrch bez pásky je od laseru popálený. S využitím pásky se popálí páska a povrch zůstane lesklý. Na levé straně je vidět 100 % překryv složený ze čtyř proběhlých sekvencí (overlapping). Pravá strana je s jednou sekvencí. Při použití pásky je vždy nutné mezi sekvencemi pásku vyměnit za jinou. Popálená páska je vidět na obrázku 73.



Obrázek 72: Povrch destičky z hliníkové slitiny 2024 po ošetření LSP s použitím vinylové pásky (nahore), bez použití pásky (dole), s překryvem (vlevo) a bez překryvu (vpravo)



Obrázek 73: Popálený povrch černé vinylové pásky

5.4 Textura povrchu po LSP

U textury povrchu byly porovnány parametry profilu Ra, Rz, Rp, plošný parametr Sa a objemový parametr Vmp na dně pěti zubových mezer kol se šikmým ozubením z oceli 316 L před a po účincích LSP s procesními parametry viz. tabulka 16. Za poskytnuté výsledky chci poděkovat panu Ing. Ondřeji Stránskému.

V tabulkách 17, 18 jsou uvedeny celkové průměrné hodnoty parametrů před a po LSP. Je vidět že veškeré parametry mají nižší hodnoty po LSP procesu (Ra o 7 %, Rz o 19 %, Rp o 15 %, Sa a Vmp dokonce o 56 a 59 %). Podle parametrů Vmp a Rp je poznat, že při LSP došlo ke snížení výstupků a tím došlo ke zlepšení textury povrchu.

Tabulka 17: Průměrné hodnoty parametrů profilu Ra, Rz, Rp, plošného parametru Sa a objemového parametru Vmp před LSP na kole s šikmými zuby z oceli 316 L

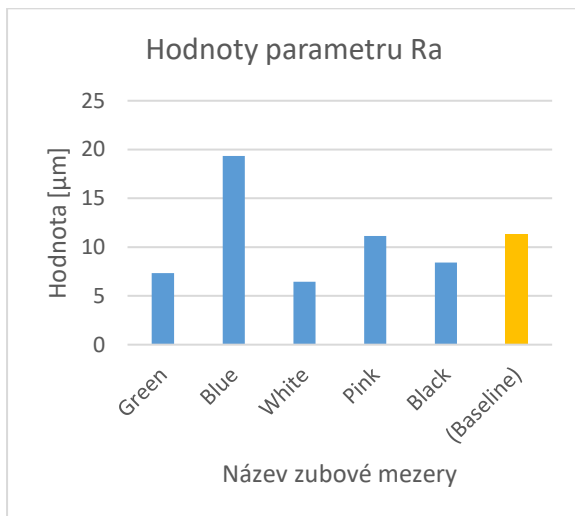
Parametry profilu drsnosti			Plošný parametr	Objemový parametr
Ra [μm]	Rz [μm]	Rp [μm]	Sa [μm]	Vmp [mm^3/mm^2]
11,310	81,045	35,290	64,116	5,481

Tabulka 18: Průměrné hodnoty parametrů profilu Ra, Rz, Rp, plošného parametru Sa a objemového parametru Vmp po LSP na kole s šikmými zuby z oceli 316 L

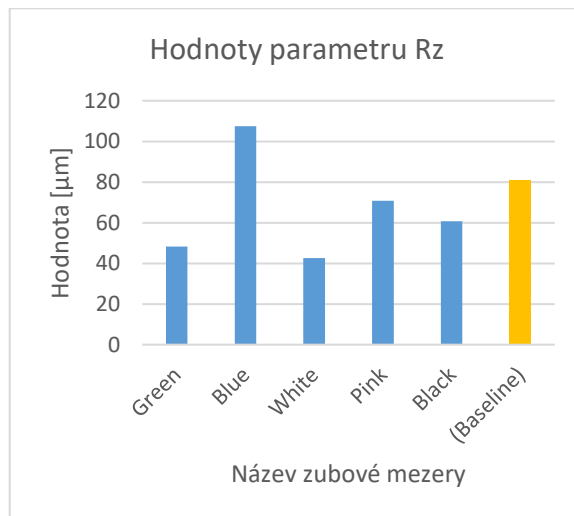
Parametry profilu drsnosti			Plošný parametr	Objemový parametr
Ra [μm]	Rz [μm]	Rp [μm]	Sa [μm]	Vmp [mm^3/mm^2]
10,542	65,949	29,991	28,239	2,257

Na grafech 15, 16, 17, 18, 19 je vidět porovnání parametrů po LSP u jednotlivých zubových mezer (modré sloupce) a průměrných hodnot před LSP (žluté sloupce).

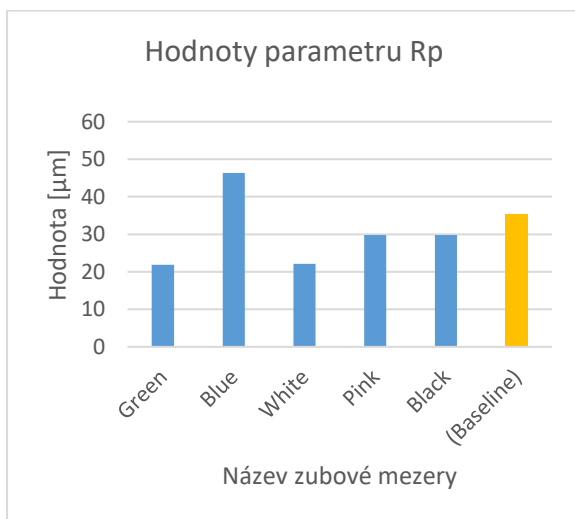
U Rp, Rz a Ra se liší hodnota zubové mezery s označením blue, u které došlo ke zhoršení textury povrchu po LSP procesu v průměru o 41 %. U zbylých zubových mezer jsou vidět nižší hodnoty než před LSP procesem. Průměrné hodnoty (tabulka 17, 18) však vykazují, že došlo ke snížení hodnot parametrů profilu drsnosti.



Graf 15: Porovnání hodnot parametru Ra před LSP (modré sloupce) a průměrné hodnoty Ra po LSP procesu (žlutý sloupec)

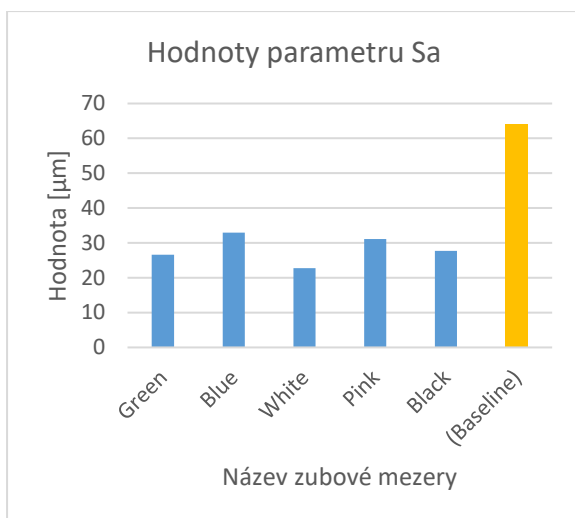


Graf 16: Porovnání hodnot parametru Rz před LSP (modré sloupce) a průměrné hodnoty Rz po LSP procesu (žlutý sloupec)

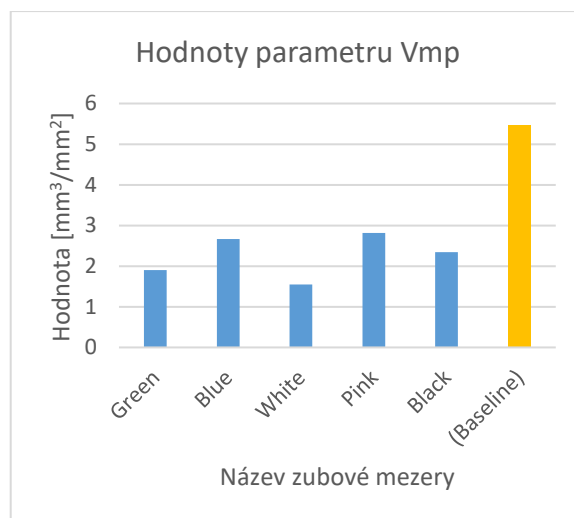


Graf 17: Porovnání hodnot parametru Rp před LSP (modré sloupce) a průměrné hodnoty Rp po LSP procesu (žlutý sloupec)

Plošný parametr Sa a objemový parametr Vmp jsou po LSP dva a vícekrát nižší. To značí celkové zlepšení textury povrchu LSP procesem. Dochází především ke snižování výstupků díky působícím rázovým vlnám laseru.



Graf 18: Porovnání hodnot parametru Sa před LSP (modré sloupce) a průměrné hodnoty Sa po LSP procesu (žlutý sloupec)



Graf 19: Porovnání hodnot parametru Vmp před LSP (modré sloupce) a průměrné hodnoty Vmp po LSP procesu (žlutý sloupec)

Závěr

Výrobní postupy mohou mít negativní vliv na vznik tahových napětí v materiálu. Těm se snažíme předejít, a naopak zejména u cyklicky namáhaných dílů se snažíme v tenké povrchové vrstvě vytvářet zbytková tlaková napětí, která zlepšují zejména únavovou životnost komponent.

Zbytková tlaková napětí jsou mechanicky indukována do materiálu pomocí vnějšího působení. Operacím, které ovlivňují texturu povrchu a vznikají při nich tlaková zbytková napětí se říká dokončovací bez úběru materiálu. Patří sem například válečkování, hlazení, kuličkování nebo progresivní metoda LSP.

LSP je proces, kdy pulzní laserový svazek naráží na součást a tvoří plastickou deformaci materiálu se vznikem tlakových zbytkových napětí. Oproti konvenčním operacím je výhodou LSP vyšší dosažená hloubka zbytkových napětí pod povrchem.

Důležité je nastavení procesních parametrů, aby bylo dosaženo ideálních funkčních vlastností výrobku. Určují se vlastnosti laseru, tj. jeho hustota výkonu, energie, délka pulzu, frekvence a vlnová délka. Dále je výhodné použití ochranných vrstev (absorpční, transparentní) pro dosažení maximální kvality upravovaného povrchu.

Zbytková napětí se dají charakterizovat Hugoniotovým elastickým limitem. Také se počítá plasticky ovlivněná hloubka a maximální povrchové zbytkové napětí dle elasticko-plastického modelu.

U LSP procesu řešíme například, jaká je optimální tloušťka absorpční vrstvy pro dosažení dobrých hodnot tvrdosti a hloubky zbytkových napětí. Důležitý je vliv velikosti svazku, tvar svazku a počet průchodů laserem.

LSP ovlivňuje morfologii povrchu, mikrostrukturu a zásadně mění mechanické vlastnosti jako jsou únavová životnost, odolnost proti korozi a tvrdost.

V dnešní době je velice rozvinutá aditivní výroba. I pro ni má LSP vhodné využití v podobě změny tahových zbytkových napětí na tlaková, snížení porozity a ovlivnění mikrostruktury zmenšením zrn a tvorbou dvojčatění. To způsobuje horší pohyb dislokací a dochází ke zpevnění.

K analýze materiálu ošetřeným LSP může sloužit mikroskopie SEM, TEM, rentgenová difrakce, měření tenzometry, konfokální mikroskopie a CT skenování.

Textura povrchu byla hodnocena na konfokálním mikroskopu. Důležitá je optimalizace vyhodnocovacího procesu. Bylo zvoleno vyhodnocení na více

základních délkách a na více parametrech pro srovnání výsledků z důvodu různého ovlivnění některých z nich. Výsledné střední aritmetické hodnoty drsnosti, vlnitosti a základního profilu vyšly: $R_a=9.148\ \mu\text{m}$, $W_a=2.452\ \mu\text{m}$, $P_a=9.832\ \mu\text{m}$ a největší výšky profilu drsnosti, vlnitosti a základního profilu: $R_z=68.287\ \mu\text{m}$, $W_z=9.641\ \mu\text{m}$, $P_z=87.206\ \mu\text{m}$. Povrch dílů vyráběných aditivními technologiemi je v porovnání s obráběnými díly velmi členitý.

Z CT skenování ozubeného kola nebylo možné vyhodnotit část s ozubením, jelikož vzniklý šum způsobený výrazně proměnlivou tloušťkou stěny prozařované součásti pozorování zhoršoval. Ani na části s válcovou plochou nebyla patrná vysoká míra porozity. Porozita byla hlavně na rozhraní kontury a vnitřního povrchu z důvodu jiných parametrů tištění. Poměr pórů vůči materiálu byl velice malý, jen 0,05 %.

Data s CT skenování byla následně použita pro analýzu ozubení, jednotlivé parametry profilu a sklonu zubu nespĺňují u tištěného dílu ani základní kvalitativní požadavky podle třídy přesnosti 11 dané normou ISO 1328, kdy se jedná o nejnižší přesnost ozubení. Celková chyba profilu F_α je $44\ \mu\text{m}$ na levé straně zubu a $34\ \mu\text{m}$ na pravé straně zubu. Celková chyba sklonu F_β vyšla $80\ \mu\text{m}$ na levé straně a $64\ \mu\text{m}$ na pravé straně.

Na povrchu upravovaném LSP procesem má velký vliv použití absorpční vrstvy (v našem případě černé vinylové pásky), která zabraňuje popálení povrchu.

Z důvodu výpadku na zařízení rentgenové difrakce pro měření zbytkových napjatostí nebylo možné provést včas LSP proces na ozubených kolech z oceli 17-4PH, proto jsou v práci uvedeny alespoň výsledky z dřívějšího experimentu prováděného na ozubených kolech z oceli 316 L, které ukazují, že ve většině případů laserové peenování zlepšuje hodnoty parametrů profilu drsnosti: R_a zlepšení o 7 %, R_z o 19 %, R_p o 15 %. K jedinému zhoršení došlo u zubové mezery s označením blue, kde došlo ke zhoršení v průměru o 41 %. U plošného parametru S_a došlo ke zlepšení v průměru o 56 % a u objemového parametru V_{mp} o 59 %.

Další experimenty by mohly odhalit, jaký vliv má LSP proces například na únavovou životnost nebo tvrdost materiálu.

Seznam použité literatury

- [1] GE, Mao-Zhong a XIANG, Jian-Yub. *Effect of laser shock peening on microstructure and fatigue crack growth rate of AZ31B magnesium alloy*. *Surface and Coatings Technology*. [Online] 2016. [Citace: 04. 06. 2017.] <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0925838816311586>. 09258388
- [2] CLAUER, Allan. *Laser shock peening for fatigue resistance. Surface performance of titanium: proceedings of a Symposium on Surface Performance of Titanium sponsored by the Titanium Committee of TMS, held at the 1996 Fall TMS Meeting in Cincinnati, Ohio, October 7- 9, 1996*. Warrendale, Pa.: Tms, 1996, s. 217–230. ISBN 087339402X.
- [3] BRAJER, Jan. *Vliv metody laser shock processing na integritu povrchu* [online]. Praha, 2018 [cit. 2022-07-28]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/79047>. Disertační práce. ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE.
- [4] S. MONTROSS, Charles, Tao WEI, Lin YE, Graham CLARK a Yiu-Wing MAI. Laser shock processing and its effects on microstructure and properties of metal alloys. *International Journal of Fatigue* [online]. 2002, 2002, **24**(10), 15 [cit. 2022-07-28]. ISSN 0142-1123. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142112302000221>
- [5] DING, K. a L. YE. *Laser shock peening performance and process simulation*. Anglie: Woodhead publishing limited, 2006. ISBN 0-8493-3444-6.
- [6] MANNAVA, Seetharamaiah a Stephen J. FERRIGNO. *Laser shock peening for gas turbine engine vane repair*. 1996. 5675892. Uděleno 14. 10. 1997. Zapsáno 20. 6. 1996.
- [7] H. CLAUER, Allan. LASER SHOCK PEENING FOR FATIGUE RESISTANCE. *The Metal Society of AIME* [online]. 14 [cit. 2022-07-28]. Dostupné z: <https://asset-pdf.scinapse.io/prod/2184591036/2184591036.pdf>
- [8] *Bodycote* [online]. bodycote, 2022 [cit. 2022-07-28]. Dostupné z: <https://www.bodycote.com/cs/sluzby/tepelne-zpracovani/zihani-normalizacni-zihani/rekrytalizace/>

- [9] Akustika. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2022-07-28]. Dostupné z: <https://www.wikiskripta.eu/w/Akustika>
- [10] BOHM, MAREK, JAN KAUFMAN, JAN BRAJER a DANIJELA ROSTOHAR. *ROBOTIC ARM HUMAN-MACHINE INTERFACE FOR LASER SHOCK PEENING APPLICATIONS* [online]. Praha, 2019 [cit. 2022-07-28]. Dostupné z: https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/87365/Bohm_Kaufman_Brajer_et_al__Robotic_arm_humanmachine_interface_for_laser_shock_peening_applications__%282019%29_PUBV_335970.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [11] LU, Jinzhong, Haifei LU, Xiang XU, Jianhua YAO, Jie CAI a Kaiyu LUO. High-performance integrated additive manufacturing with laser shock peening –induced microstructural evolution and improvement in mechanical properties of Ti6Al4V alloy components,. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* [online]. 2020, 148 [cit. 2022-07-28]. ISSN 0890-6955. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0890695519307230>
- [12] KALENTICS, Nikola, Manuel ORTEGA VARELA DE SEIJAS, Seth GRIFFITHS, Christian LEINENBACH a Roland E. LOGÉ. 3D laser shock peening – A new method for improving fatigue properties of selective laser melted parts, *Additive Manufacturing. Sciencedirect* [online]. 2020, 33 [cit. 2022-07-28]. ISSN 2214-8604. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214860419316926>
- [13] DOLEŽAL, P., PACAL, B. *Hodnocení mikrotvrdosti struktur materiálů* [online]. Brno: VUT, 2007 [cit. 2016-08-07]. Dostupné z: <http://ime.fme.vutbr.cz/images/umvi/opory/hmsm/index.htm>
- [14] ROUČEK, Jan. *Optimalizace strategie měření na CMM s ohledem na maximální produktivitu a opakovatelnost* [online]. Praha, 2019 [cit. 2022-07-28]. Dostupné z: https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/84881/F2-DP-2019-Roucek-Jan-DP_Roucek.pdf?sequence=-1&isAllowed=y. Diplomová práce. ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE.

- [15] PLÁŠEK, Jaromír. Konfokální mikroskop: Renezance experimentálních metod. *Vesmír* [online]. 1995, 5. 9. 1995, 5 [cit. 2022-07-28]. Dostupné z: <https://vesmir.cz/cz/casopis/archiv-casopisu/1995/cislo-9/konfokalni-mikroskop.html>
- [16] SMUTNÝ, Dominik. *Analýza porozity s využitím výpočetní tomografie* [online]. Praha, 2020 [cit. 2022-07-28]. Dostupné z: https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/90040/F2-DP-2020-Smutny-Dominik-Smutny_DP.pdf?sequence=-1&isAllowed=y. Diplomová práce. ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE.
- [17] KARTHIK, D., S. KALAINATHAN a S. SWAROOP. *Surface modification of 17-4 PH stainless steel by laser peening without protective coating process*, *Surface and Coatings Technology*, [online]. 2015, 138-145 [cit. 2022-07-28]. ISSN 0257-8972. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0257897215301912>
- [18] SVOBODA, Pavel, Jan BRANDEJS a Jiří DVOŘÁČEK. *Základy konstruování*. Šesté. Brno: Akademické nakladatelství, 2015. ISBN 978-80-7204-921.
- [19] VANČUROVÁ, Martina. *VYUŽITÍ SOUŘADNICOVÉHO MĚŘICÍHO STROJE PRO HODNOCENÍ KVALITY POVRCHU* [online]. Brno, 2018 [cit. 2022-07-28]. Dostupné z: https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=174308. Diplomová práce. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ.
- [20] MÁDL, Jan a kol. 2000. *Technologie obrábění*. 1. díl... Praha: ČVUT
- [21] HUMÁR, Anton. *TECHNOLOGIE I* [online]. Brno, 2005 [cit. 2018-07-30]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/oporysave/Dokoncovaci_a_nekonvencni_metody_obrabeni/TI_TO-3.cast.pdf. Interaktivní multimediální text pro bakalářský a magisterský studijní program. VUT.
- [22] Shot peening. *Engineered Abrasives* [online]. Alsip: Engineered Abrasives [cit. 2018-07-30]. Dostupné z: <https://www.engineeredabrasives.com/what-is-shotpeening.html>

- [23] *HOW LASER PEENING WORKS*. LSP Technologies [online]. Dublin: LSP Technologies [cit. 2018-07-30]. Dostupné z: <https://www.lsptechnologies.com/how-laserpeening-works.php>
- [24] ADAMUS, Petr. *POKROČILÉ METODY VYHODNOCOVÁNÍ TOPOGRAFIE POVRCHU PRO DOKONČOVACÍ OBRÁBĚNÍ* [online]. Brno, 2020 [cit. 2022-07-28]. Dostupné z: https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=213557. Diplomová práce. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ.
- [25] KREJSEK, Jiří. *Vliv řezné rychlosti na přesnost a drsnost obrobeného povrchu technologií víceosého frézování* [online]. Ostrava, 2019 [cit. 2022-07-28]. Dostupné z: <https://core.ac.uk/download/pdf/218459784.pdf>. Diplomová práce. Technická univerzita Ostrava.
- [26] BUREŠ, Lukáš. *Zkoušení přesnosti CMS využívající výpočetní tomografii* [online]. Praha, 2020 [cit. 2022-07-28]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/90077>. Diplomová práce. ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE.
- [27] KUEH, Audrey, Jason WARNETT, Gregory GIBBONS, Julia BRETTSCHEIDER, Thomas NICHOLS, Mark WILLIAMS a Wilfrid KENDALL. *Modelling the penumbra in Computed Tomography*. Journal of X-Ray Science and Technology [online]. IOS Press, 2016, 24(4), 583-597 [cit. 2021-06-03]. ISSN 08953996. Dostupné z: doi:10.3233/XST-160576

Seznam obrázků

Obrázek 1: Statické válečkování [3]	13
Obrázek 2: Vnější hlazení diamantem	14
Obrázek 3: Tvorba plastické deformace kuličkováním	14
Obrázek 4: Schématický obrázek technologie HP	15
Obrázek 5: LSP použití v praxi s absorpční vrstvou (černá páska) a transparentní vrstvou (tekoucí voda)	16
Obrázek 6: Povrch ošetřovaný technologií LSP, zobrazení vrstev [7]	18
Obrázek 7: Působení laserového svazku [7]	18
Obrázek 8: LSP strategie overlapping ze čtyř sekvencí [10]	20
Obrázek 9: Strategie s překrýváním jednotlivých pulzů [3]	20
Obrázek 10: Hloubka zbytkového napětí v hliníkové slitině 2024-T3 [4]	22
Obrázek 11: Závislost mikrotvrlosti (vlevo) a zbytkových napětí (vpravo) na tloušťce ablační vrstvy [3]	23
Obrázek 12: Hodnoty zbytkových napětí stanovené na povrchu oceli 55C1 [3], [4] ..	24
Obrázek 13: Hloubka tlakových zbytkových napětí při použití jednoho nebo dvou přejezdů laseru u slitiny Ti-6Al-4V při použití laseru s hustotou energie 200 J/cm ² a délce pulzu 30ns [3][4]	25
Obrázek 14: Závislost zbytkových napětí a jejich hloubky v 1,5mm tlustém plechu z oceli 4340 [3], [4]	26
Obrázek 15: Vyvolaný tlak v závislosti na hustotě výkonu při vlnových délkách 1064 nm, 532 nm a 355 nm [4]	27
Obrázek 16: Zbytková napětí ve slitině Inconel 718 vyvolaná technologiemi LSP a SP [3][4]	27
Obrázek 17: Porovnání iniciačních trhlin a lomů u SP a LSP při maximálním napětí 250 MPa na vzorku hliníkové slitiny 7075-T7351 [4]	29
Obrázek 18: S-N křivka pro vzorek oceli 55C1 zpracovaná LSP [4]	30
Obrázek 19: Závislost tvrdosti na počtu laserových šoků u korozivzdorné oceli 304 [4]	31
Obrázek 20: Tvrdost při různých hustotách výkonu a tlacích na povrchu [3]	31
Obrázek 21: Křivky zbytkových napětí SLM tištěných dílů s a bez použití LSP [11] ..	33
Obrázek 22: Rozdíl mikrotvrdotí SLM vzorků před a po úpravě LSP [11]	33

Obrázek 23: Schematické znázornění mikrostruktur Ti-6Al-4V horizontálně a vertikálně tištěného dílu před a po LSP [11]	35
Obrázek 24: Schematické znázornění difuze atomu za použití LSP [11].....	35
Obrázek 25: Souřadnicový měřicí stroj (CMM) [14].....	36
Obrázek 26: Princip konfokálního mikroskopu [15]	38
Obrázek 27: Princip a uspořádání CT [16]	39
Obrázek 28: Navržení stavby ozubených kol.....	40
Obrázek 29: Navržení stavby ozubených kol s podporami (modrá část)	40
Obrázek 30: Ozubené kolo s přímými zuby.....	41
Obrázek 31: Ozubené kolo s šikmým ozubením.....	41
Obrázek 32: Konfokální mikroskop MarSurf CM expert	41
Obrázek 33: Workflow (pracovní postup) v softwaru Mountains	42
Obrázek 34: Vstupní data.....	43
Obrázek 35: Povrch po vyrovnání	43
Obrázek 36: Data před (nahore) a po (dole) použití funkce: fill in non-measured points	43
Obrázek 37: Výběr plochy	44
Obrázek 38: Vybraná plocha	44
Obrázek 39: Povrch po použití filtru "remove form" (vlevo), odstraněná data (vpravo)	44
Obrázek 40: 3D zobrazení vyhodnocovaného povrchu po úpravě dat, základní povrch	45
Obrázek 41: S-L povrch při použití metrologického filtru se základní délkou $\lambda_{c1}=0,08$ mm	45
Obrázek 42: S-L povrch při použití metrologického filtru se základní délkou $\lambda_{c2}=0,25$ mm	45
Obrázek 43: S-F povrch při použití metrologického filtru se základní délkou $\lambda_{c1}=0,08$ mm	46
Obrázek 44: S-F povrch při použití metrologického filtru se základní délkou $\lambda_{c2}=0,25$ mm	46
Obrázek 45: základní profil (modře), profil drsnosti (zeleně) a profil vlnitosti (červeně) pro hodnotu základní délky $\lambda_{c1}=0,25$ mm	47
Obrázek 46: základní profil (modře), profil drsnosti (zeleně) a profil vlnitosti (červeně) pro hodnotu základní délky $\lambda_{c2}=0,800$ mm	47

Obrázek 47: základní profil (modře), profil drsnosti (zeleně) a profil vlnitosti (červeně) pro hodnotu základní délky $\lambda_{c3}=2,500$ mm.....	47
Obrázek 48: Abbottova křivka a objemové parametry V_{mp} , V_{mc} , V_{vc} , V_{vv} [24] ...	55
Obrázek 49: ZEISS METROTOM 1500 with 225 kV source and 2k detector.....	57
Obrázek 50: Detail upnutí, zdroj záření a měděný filtr.....	58
Obrázek 51: Souřadný systém a hlavní části CT	58
Obrázek 52: Prostředí softwaru METROTOM OS.....	59
Obrázek 53: Hodnoty napětí zdroje dané výrobcem	59
Obrázek 54: Hodnoty vzdáleností v ose X	60
Obrázek 55: Nastavení detektoru	60
Obrázek 56: Vytvořený obraz s polohou osy x 200, bez BHC	61
Obrázek 57: Kolo s polohou osy x 200, s BHC	61
Obrázek 58: Kolo s polohou v ose x 120, bez BHC	62
Obrázek 59: Porovnání vlivu tloušťky, vzniklého šumu a pozorování ojedinělých pórů na válcové ploše (dolní část) na kole se šikmým ozubením a polohou v ose $x=70$ mm	62
Obrázek 60: Póry blízko pod povrchem viditelné na válcové ploše ozubeného kola v řezu rovinou x, y.....	63
Obrázek 61: Pozorování porozity v řezu rovinou y, z válcové plochy ozubeného kola	63
Obrázek 62: Histogram závislosti počtu pórů na jejich objemu a hodnoty charakteristických parametrů pro hodnocení porozity	64
Obrázek 63: Rozmístění porozity uvnitř válcové plochy ozubeného kola	64
Obrázek 64: Software Gear Pro a nastavení parametrů ozubení pro šikmé zuby.	65
Obrázek 65: Ikony pro jednotlivá nastavení v softwaru Gear Pro	66
Obrázek 66: Základní nastavení oblasti měření pro profil zubu.....	66
Obrázek 67: Nastavení směru a počet úseků měření pro profil zubu.....	66
Obrázek 68: Nastavení tolerancí dle ISO 1328 pro profil zubu	67
Obrázek 69: Protokol ze softwaru Gear Pro s grafy pro profil a sklon zubů a hodnoty úchylek F_{α} , $f_{f\alpha}$, $f_{H\alpha}$, F_{β} , $F_{f\beta}$, $F_{H\beta}$	68
Obrázek 70: Komora pro LSP proces	69
Obrázek 71: Konečný úsek optické soustavy laseru	69

Obrázek 72: Povrch destičky z hliníkové slitiny 2024 po ošetření LSP s použitím vinylové pásky (nahore), bez použití pásky (dole), s překryvem (vlevo) a bez překryvu (vpravo).....	70
Obrázek 73: Popálený povrch černé vinylové pásky	70

Seznam tabulek

Tabulka 1: Běžné procesní parametry při LSP u některých materiálu	20
Tabulka 2: Podpovrchové zbytkové napětí ve slitině AW 6082 [3]	24
Tabulka 3: Srovnání zatěžovacích parametrů LSP a SP [4]	28
Tabulka 4: Porovnání drsností po LSP a SP na hliníkových slitinách A356 a 7075 [4]	28
Tabulka 5: Parametry tisku (nanášec, prášek, plyn)	40
Tabulka 6: Parametry tisku	40
Tabulka 7: Parametry ozubení ($\beta=20^\circ$ pro šikmé zuby)	41
Tabulka 8: Prům. hodnoty a směrodatné odchylky pro 12 zubových mezer a parametry R_a , W_a , P_a pro $\lambda_{c1}=0,800$ mm	49
Tabulka 9: Prům. hodnoty a směrodatné odchylky pro 12 zubových mezer a parametry R_a , W_a , P_a pro $\lambda_{c2}=2,500$ mm	50
Tabulka 10: Prům. hodnoty a směrodatné odchylky pro 12 zubových mezer a parametry R_z , W_z , P_z pro $\lambda_c=2,500$ mm	51
Tabulka 11: Prům. hodnoty a směrodatné odchylky pro 12 zubových mezer a parametry R_p , W_p , P_p pro $\lambda_c=2,500$ mm	52
Tabulka 12: Průměrné hodnoty a směrodatné odchylky parametrů profilu drsnosti, profilu vlnitosti a základního profilu pro základní délku $\lambda_{c1}=0,800$ mm	53
Tabulka 13: Průměrné hodnoty a směrodatné odchylky parametrů profilu vlnitosti a základního profilu pro základní délku $\lambda_{c2}=2,500$ mm	53
Tabulka 14: Průměrné hodnoty a směrodatné odchylky plošných a objemových parametrů	55
Tabulka 15: Procesní parametry LSP pro peenování ozubených kol z oceli 316 L	69
Tabulka 16: Průměrné hodnoty parametrů profilu R_a , R_z , R_p , plošného parametru S_a a objemového parametru V_{mp} před LSP na kole s šikmými zuby z oceli 316 L	70
Tabulka 17: Průměrné hodnoty parametrů profilu R_a , R_z , R_p , plošného parametru S_a a objemového parametru V_{mp} po LSP na kole s šikmými zuby z oceli 316 L	70

Seznam grafů

Graf 1: Hodnoty parametrů Ra, Wa a Pa pro dvanáct zubových mezer se základní délkou $\lambda_{c1}=0,800$ mm	48
Graf 2: Hodnoty parametrů Ra, Wa a Pa pro dvanáct zubových mezer se základní délkou $\lambda_{c2}=0,800$ mm	49
Graf 3: Hodnoty parametrů Rz, Wz a Pz pro dvanáct zubových mezer se základní délkou $\lambda_c=2,500$ mm	50
Graf 4: Hodnoty parametrů Rp, Wp a Pp pro dvanáct zubových mezer se základní délkou $\lambda_c=2,500$ mm	51
Graf 5: Hodnoty parametrů Rv, Wv a Pv pro dvanáct zubových mezer se základní délkou $\lambda_c=2,500$ mm	52
Graf 6: Průměrné hodnoty parametrů Ra, Rz, Rp, Rv a k nim přiřazené chybové úsečky	54
Graf 7: Průměrné hodnoty parametrů Wa, Wz, Wp, Wv a k nim přiřazené chybové úsečky	54
Graf 8: Průměrné hodnoty parametrů Pa, Pz, Pp, Pv a k nim přiřazené chybové úsečky	54
Graf 9: Průměrné hodnoty plošných parametrů pro základní povrch	56
Graf 10: Průměrné hodnoty plošných parametrů pro S-L povrch	56
Graf 11: Průměrné hodnoty plošných parametrů pro S-F povrch	56
Graf 12: Průměrné hodnoty objemových parametrů pro základní povrch	56
Graf 13: Průměrné hodnoty objemových parametrů pro S-L povrch	56
Graf 14: Průměrné hodnoty objemových parametrů pro S-F povrch	56
Graf 15: Porovnání hodnot parametru Ra před LSP (modré sloupce) a průměrné hodnoty Ra po LSP procesu (žlutý sloupec)	71
Graf 16: Porovnání hodnot parametru Rz před LSP (modré sloupce) a průměrné hodnoty Rz po LSP procesu (žlutý sloupec)	71
Graf 17: Porovnání hodnot parametru Rp před LSP (modré sloupce) a průměrné hodnoty Rp po LSP procesu (žlutý sloupec)	71
Graf 18: Porovnání hodnot parametru Sa před LSP (modré sloupce) a průměrné hodnoty Sa po LSP procesu (žlutý sloupec)	72
Graf 19: Porovnání hodnot parametru Vmp před LSP (modré sloupce) a průměrné hodnoty Vmp po LSP procesu (žlutý sloupec)	72

