

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ

Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie



**Aplikace technologie LSP na 3D tištěný
povrch materiálu AlSi10Mg**

**Laser shock peening technique application
on 3D printed surface of AlSi10Mg alloy**

Bakalářská práce

Studijní program:	B2343 Výroba a ekonomika ve strojírenství
Studijní obor:	2303R014 Technologie, materiály a ekonomika strojírenství
Autor bakalářské práce:	Zbyněk Soukup
Vedoucí bakalářské práce:	Ing. Libor Beránek, Ph.D., Ing. Ondřej Stránský

Praha 2022

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Soukup** Jméno: **Zbyněk** Osobní číslo: **491739**
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 3D tištěný povrch materiálu AISi10Mg

Název bakalářské práce anglicky:

Laser shock peening technique application on 3D printed surface of AISi10Mg Alloy

Pokyny pro vypracování:

1. Integrita povrchu a vliv vybraných parametrů na vlastnosti dílů
2. Princip technologie LSP a její využití v průmyslu
3. Aplikace technologie LSP na vzorky vyrobené technologií 3D tisku
4. Vyhodnocení vybraných parametrů integrity povrchu

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 bakalářskou práci s názvem: „Aplikace technologie LSP na 3D tištěný povrch materiálu AlSi10Mg“ vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady uvedené v příloženém seznamu citovaných zdrojů. Výsledky mohou být publikovány vedoucím bakalářské práce v případě, že budu uveden jako spoluautor.

Nemám závažný důvod pro použití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne:

.....

Podpis



Poděkování

Tímto bych chtěl vyjádřit poděkování vedoucímu Ing. Liboru Beránkovi, Ph.D. za vedení bakalářské práce, rady a připomínky při vypracování této práce. Stejně tak děkuji Ing. Ondřejovi Stránskému za rady, připomínky a umožnění provedení samotné aplikace LSP v laboratořích HiLase. V neposlední řadě děkuji mé rodině, přítelkyni a přátelům za jejich podporu během celého studia.



Anotační list

Jméno autora:	Zbyněk Soukup
Název:	Aplikace technologie LSP na 3D tištěný povrch materiálu AlSi10Mg
Rozsah práce:	74 str., 69 obr., 9 tab.
Akademický rok:	2021/2022
Studijní program:	B2343 Výroba a ekonomika ve strojírenství
Vysoká škola:	ČVUT v Praze, Fakulta strojní
Obor studia:	2303R014 Technologie, materiály a ekonomika strojírenství
Ústav:	Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie
Vedoucí bakalářské práce:	Ing. Libor Beránek Ph.D., Ing. Ondřej Stránský
Klíčová slova:	integrita povrchu, textura povrchu, dokončovací metody, laser, laser shock peening, 3D tisk, výpočetní tomografie, porozita
Anotace:	Práce je zaměřená na použití technologie Laser shock peening na 3D tištěný povrch materiálu AlSi10Mg. Teoretická část se věnuje integritě povrchu, dokončovacím metodám a LSP technologii. V praktické části byly vyhodnoceny vybrané parametry integrity povrchu 3D tištěných vzorků. Parametry byly porovnány před použitím a po použití technologie LSP. Cílem práce bylo zhodnocení vybraných parametrů a celkové možnosti využití technologie LSP na 3D tištěný materiál.



Annotation

Author:	Zbyněk Soukup
Title of bachelor thesis:	Laser shock peening technique application on 3D printed surface of AlSi10Mg alloy
Extent:	74 p., 69 fig., 9 tab.
Academic year:	2021/2022
Study programme:	B2343 Manufacturing and Economy in Mechanical Engineering
University:	CTU in Prague, Faculty of Mechanical Engineering
Branch of study/specialization:	2303R014 Technology, Materials and Management of Engineering
Department:	Department of Machining, Process Planning and Metrology
Supervisor:	Ing. Libor Beránek Ph.D., Ing. Ondřej Stránský
Key words:	surface integrity, surface texture, finishing methods, laser, laser shock peening, 3D printing, computed tomography, porosity
Abstract:	The work is focusing on application of LSP technique on 3D printed surface of AlSi10Mg alloy. Theoretical part describes surface integrity, finishing methods and LSP technique. The practical part evaluates chosen parameters of surface integrity 3D printed parts. The parameters were compared before application of LSP and after. The aim of this bachelor 's work was evaluation of the parameters and utilization LSP on 3D printed surface.



Obsah

1. Úvod	11
2. Integrita Povrchu	12
2.1 Zbytkové napětí	12
2.2 Tvrdost.....	18
2.3 Textura povrchu	21
2.4 Porozita.....	23
3. Metody dokončování povrchu.....	24
3.1 Metody s úběrem materiálu	24
3.1.2 Broušení	24
3.1.3 Honování	25
3.1.4 Lapování.....	25
3.1.5 Superfinišování.....	26
3.1.6 Leštění.....	26
3.1.7 Elektrolytické leštění	27
3.1.8 Omílání.....	27
3.2 Metody bez úběru materiálu	28
3.2.1 Tryskání	28
3.2.2 Válečkování.....	29
3.2.3 Vyhlazování	29
3.2.4 Vibrační zpevňování (kuličkování)	30
3.2.5 Kalibrování.....	30
3.2.6 Laser shock peening.....	31
4. Laser shock peening	32
4.1 Laser	32
4.1.1 Princip laseru.....	32
4.2 Historie LSP.....	33
4.3 Princip technologie LSP	34
4.4 LSP bez absorpční vrstvy	35
4.5 Procesní parametry laseru pro LSP	35
4.6 Vliv LSP na zbytkové napětí	38
4.7 Vliv LSP na drsnost povrchu	38
4.8 Ekonomické hodnocení technologie LSP.....	39
4.9 Vliv LSP na porozitu.....	39
4.10 Aplikace LSP v aditivní výrobě kovů	39
5. Aditivní technologie	41



5.1 Aditivní technologie pro zpracování polymerů	42
5.1.1 Stereolitografie	42
5.1.2 Digital light projection	42
5.1.3 Fused deposition modeling/Fused filament fabrication	43
5.1.4 Ink-jet printing/Direct ink writing	43
5.1.5 Selective heat sintering	44
5.1.6 Laminated object manufacturing	44
5.2 Aditivní technologie pro zpracování kovů	45
5.2.1 Direct metal laser sintering	45
5.2.2 Electron beam melting	46
5.2.3 Wire and arc additive manufacturing	47
6. Realizace a vyhodnocení experimentu	48
6.1 Měření vzorky AlSi10Mg	48
6.2 Měření textury povrchu	49
6.3 Měření porozity	52
6.4 Aplikace LSP	55
7. Vyhodnocení výsledků	58
7.1 Výsledky měření textury povrchu	58
7.2 Výsledky měření porozity	61
8. Závěr	64
9. Seznamy	66
9.1 Seznam obrázků	66
9.2 Seznam tabulek	68
9.3 Seznam příloh	68
10. Použitá literatura	69



Seznam zkratk a symbolů

Zkratky

ABS	acrylonitrilie budatiene styrene
CAD	computer aided design
CT	výpočetní tomografie
DLA	digital light projection
DMLS	direct metal laser sintering
EBM	electron meam melting
FDM	fused desposition modeling
FFD	fused filament fabrication
IT	stupeň přesnosti
LOM	laminated object manufacturing
LSP	laser shock peening
MAG	metal active gas welding
MIG	metal inert gas welding
ND	neutronová difrakce
PC	polycarbonate
PLA	polylactic acid
SD	synchrotronová difrakce
SHS	selective heat sintering
SLA	stereolitografie
SLS	selective laser sintering
SP	shot peening
STL	standard tessellation language
TIG	tungsten inert gas welding
UV	ultrafialové záření
WAAM	wire and arc additive manufacturing



Symbols

$d [mm]$	vzdálenost mezi rovinami / průměrná délka úhlopříček
$D [mm]$	průměr kuličky
$F [N]$	síla
$I [A]$	proud
$n [-]$	celé číslo
$Pa [\mu m]$	průměrná aritmetická úchylka základního profilu
$Ra [\mu m]$	průměrná aritmetická úchylka profilu drsnosti
$s [-]$	jednotkový vektor primárního záření
$s_0 [-]$	jednotkový vektor rozptýleného záření
$Sa [\mu m]$	průměrná aritmetická výška posuzované plochy
$Sp [\mu m]$	maximální výška vrcholu posuzované plochy
$Sv [\mu m]$	maximální hloubka prohlubně omezené stupnice povrchu
$Sz [\mu m]$	maximální výška posuzované plochy
$U [V]$	napětí
$V_{mc} [mm^3/mm^2]$	jádro objemu materiálu omezené stupnicí povrchu
$V_{mp} [mm^3/mm^2]$	vrcholek objemu materiálu omezené stupnicí povrchu
$V_{vc} [mm^3/mm^2]$	neplatný objem jádra omezené stupnice povrchu
$V_{vv} [mm^3/mm^2]$	neplatný objem údolí omezené stupnice povrchu
$Wa [\mu m]$	průměrná aritmetická úchylka profilu vlnitosti
$\theta [^\circ]$	úhel dopadu
$\lambda [nm]$	vlnová délka elektromagnetické vlny
$\lambda_f [mm]$	filtr profilu potlačující dlouhovlnné složky
$\lambda_c [mm]$	filtr profilu definující hranici mezi drsností a vlnitostí
$\lambda_s [mm]$	filtr profilu definující hranici mezi drsností a kratšími vlnami



1. Úvod

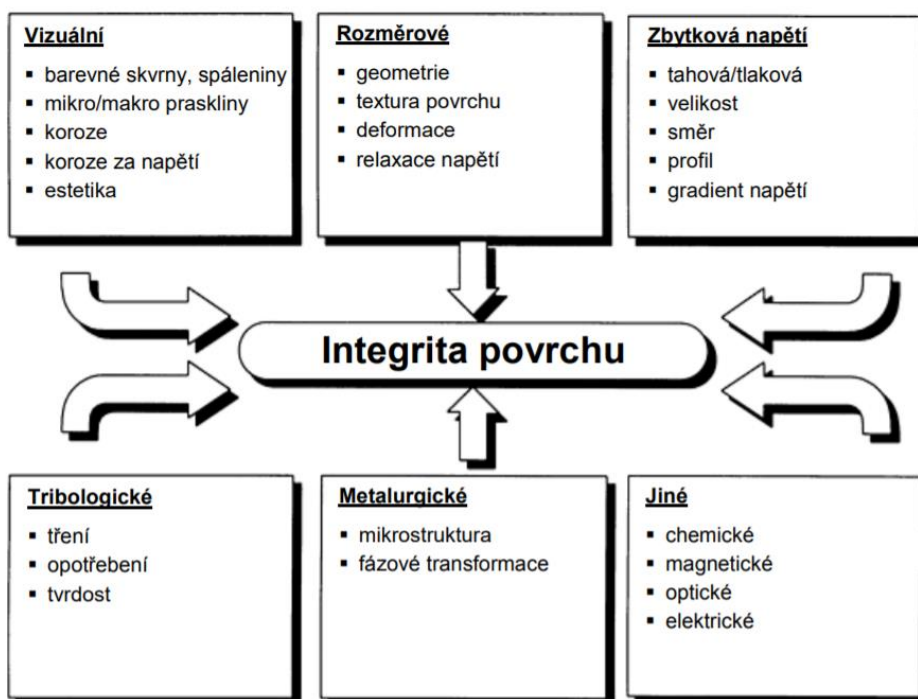
V dnešní době jsou požadavky na kvalitu povrchu součástí stále větší. S rostoucími nároky na celkové vlastnosti výrobků dochází k optimalizaci a rozvoji výrobních i dokončovacích technologií. Mezi jedny z novějších technologií patří aditivní výroba. Aditivní proces je opakem obrábění a spočívá v postupném přidávání materiálu. Nicméně ani tento způsob výroby není dokonalý a jsou zapotřebí různé metody dokončování povrchu. Při aditivní výrobě vzniká celá řada vnitřních defektů, díly vykazují anizotropii mechanických vlastností a integrita povrchu může být díky intenzivním tepelným jevům negativně ovlivněna z pohledu zbytkové napjatosti. Tyto vlastnosti je možné modifikovat např. nekonvenční technologií laser shock peening (LSP).

Tato bakalářská práce se zabývá problematikou aplikace technologie laser shock peening na 3D tištěný povrch slitiny hliníku. V teoretické části je vysvětlena integrita povrchu a některé z vybraných parametrů, které jsou pro tuto práci podstatné. Dále jsou popsány dokončovací metody povrchu, jejich rozdělení a princip laseru. Následující část pojednává o samotné technologii LSP, principu fungování, aplikacemi a vlivu na vybrané parametry integrity povrchu. V neposlední řadě je přiblížena aditivní technologie a její rozdělení na kovový a nekovový tisk.

Cílem této práce je vyhodnocení vybraných parametrů integrity povrchu zkoumaných vzorků, na které byla aplikována technologie LSP. Mezi vybranými parametry byla zvolena textura povrchu a porozita.

2. Integrita Povrchu

Integritou povrchu se rozumí souhrn vlastností, které ovlivňují výslednou kvalitu povrchu a popisují funkční vlastnosti materiálu. Tyto základní faktory integrity povrchu se dále rozdělují na geometrickou přesnost, drsnost povrchu, tvrdost, zbytkové napětí, strukturní změny, trhliny, změny fyzikálních a chemických vlastností. V případě technologie Laser shock peening se mezi nejdůležitější vlastnosti integrity povrchu řadí zbytkové napětí, mikrostruktura materiálu, mikro tvrdost, únava materiálu a korozní odolnost. [1]



Obrázek 1 Souhrn vlastností a faktorů definující integritu povrchu - upravené [2]

V následujících kapitolách se nachází výběr faktorů, které ovlivňují integritu povrchu a jsou důležité pro technologii LSP.

2.1 Zbytkové napětí

Zbytkové napětí lze obecně definovat jako víceosé napětí, které zůstává v materiálu i přesto, že na něj již nepůsobí žádné vnější síly. Zbytkové napětí vzniká v důsledku nehomogenní deformace. Dále se dělí podle příčin vzniku na deformační zbytkové napětí a strukturální. Tyto příčiny se obecně rozdělují na vznik nerovnoměrnou plastickou deformací, tepelnou přeměnou, nebo chemickými procesy. [3][4]



Zbytkové napětí má negativní i pozitivní vliv na materiál. Pozitivní vlivy vedou například ke zlepšení únavových vlastností za pomoci technologie LSP, či tryskání. Mezi negativní vlivy, které způsobuje tahové napětí patří vznik trhlin, prasklin, či výsledná destrukce celého dílu. Další nevýhodou zbytkového napětí je špatná možnost zjištění, kde se v daném materiálu nachází. [3][4]

Dle velikosti a oblasti působení se zbytková napětí dělí do 3. skupin a to na:

- **Zbytkové napětí I. druhu (makroskopická)**

Napětí I. druhu se rozumí ta, která zasahují celý objem součástky, mají makroskopický charakter a při porušení kompaktnosti dochází ke změně makrogeometrie. [5]

- **Zbytkové napětí II. druhu (mikroskopická)**

Tyto napětí zasahují pouze objem několika krystalových zrn, jsou podmíněná anizotropií a při porušení kompaktnosti nemusí docházet ke změně makrogeometrie. [5]

- **Zbytkové napětí III. druhu (submikroskopická)**

Submikroskopická napětí se projevují pouze v objemu několika atomových vzdáleností, porušením kompaktnosti nedochází ke změně makrogeometrie. [5]

Měření zbytkového napětí v materiálu

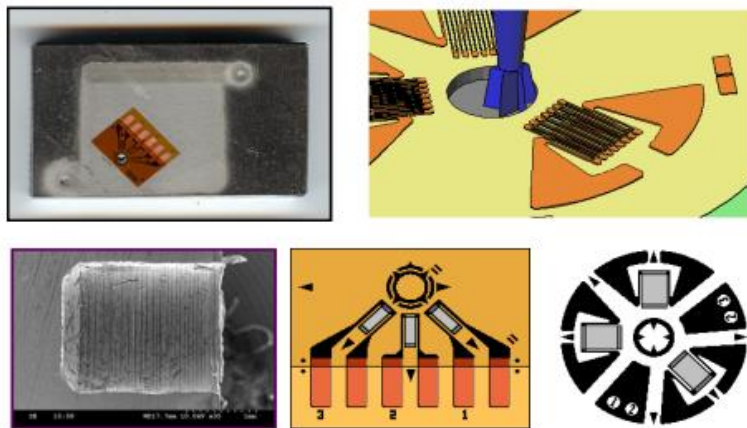
Zbytkové napětí se měří metodami, které jsou buď přímé nebo nepřímé. Tyto metody se také dají dělit na destruktivní, nedestruktivní a semidestruktivní. Bližší rozdělení těchto způsobů měření je na mechanické (odvrtávání, odleptávání), optické, magnetické, ultrazvukem a za pomoci rentgenové, synchrotronové, či neutronové difrakce. Mechanické metody jsou zejména destruktivní a spočívají v měření deformace po odstranění části vzorku, magnetická metoda využívá k měření Barkhausenova šumu, ultrazvuková spočívá v zaznamenávání vztahu mezi napětím a rychlostí ultrazvukových vln v materiálu. Rentgenové, či neutronové difrakce využívá rozptyl rentgenového záření, nebo neutronového toku v materiálu. [3]

Tabulka 1 Metody zjišťování zbytkového napětí [6]

Metoda zjišťování zbytkového napětí	Tvar součásti	Způsob měření	
Mechanické	plochý tvar	deformace pásku	změna délky
			změna zakřivení
		vrtání děr	válcová díra
			mezikruží
	rotační tvar	změna rozměru válce	odstranění povrchové vrstvy
		trubka	rozříznutí trubky
			odstranění povrchové vrstvy
			odstranění vnitřní vrstvy
		kroužek	rozříznutí
			změna křivosti
	podélné pásy z kroužků		
	obecný tvar	metoda sítí	deformace sítě
křehké laky		odraz vln	
křehké modely		vnitřní tlumení	
Fyzikální RTG	obecný tvar	difrakce	vzdálenost meziatomových rovin
Fyzikální ultrazvuk		šíření vln	změna rychlosti
			odraz vln
			vnitřní tlumení
Elektrické	obecný tvar	změna proudu	změna potenciálu procházejícího proudu
			změna velikosti vířivých proudů
			změna indukčního toku
Magnetické	obecný tvar	změna magnetismu	magnetická indukce
			zbytkový magnetismus
Akustické	obecný tvar	prozvučitelnost	četnost akustických emisí
Chemické	obecný tvar	difuze vodíku	trhliny na povrchu
		změna chemické aktivity	změna struktury

Odvrtávání

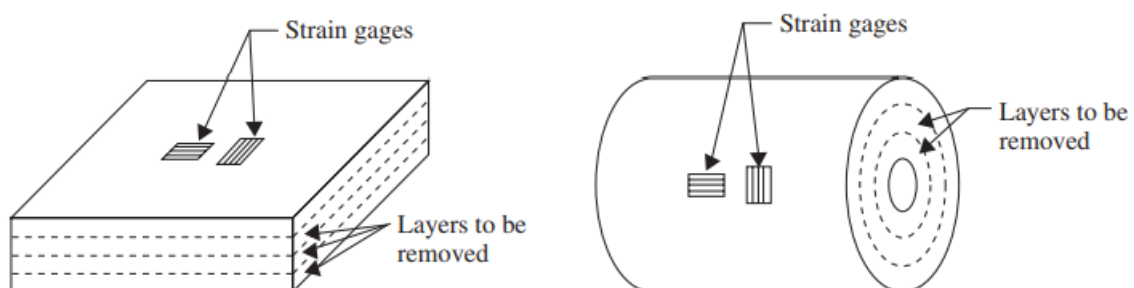
Odvrtávání je jednou z nejpoužívanějších metod pro zjišťování zbytkových napětí v povrchu materiálu. Odvrtávání spočívá ve vyvrtání malého otvoru o hloubce cca 1-2 mm. Po odvrtání vrstvy se následně v materiálu uvolní zbytkové napětí. Toto napětí se měří podle výsledné deformace za pomoci tenzometru. Následně jsou provedeny empirické vztahy k vypočítání výsledného napětí. [7][8]



Obrázek 2 Schéma tenzometrů kolem odvrtaného otvoru [8]

Odleptávání

Odleptávání je metoda, při které dochází k úběru povrchové vrstvy zkoušeného vzorku. Při odebrání vrstev se uvolňuje napětí a výsledná deformace vrstvy se následně změří. Odleptávání umožňuje dosažení velké hloubky měření zbytkového napětí. Nicméně metoda odleptávání je velice časově náročná a nemusí být pokaždé výhodná. [9]



Obrázek 3 Schéma metody odleptávání [9]

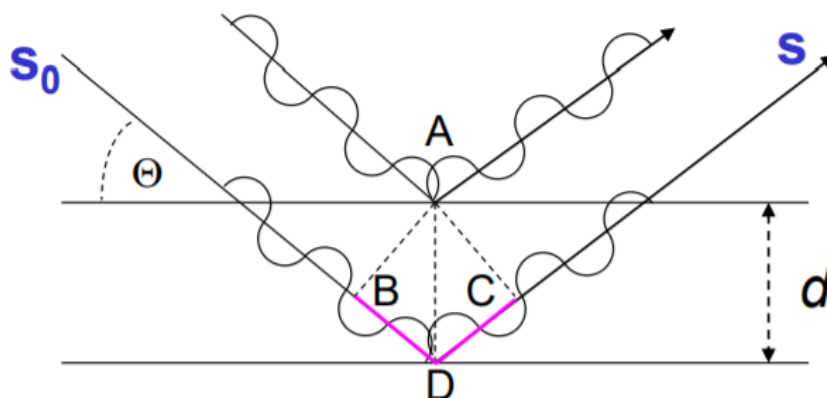
Rentgenová difrakce

Rentgenová difrakce je jednou z metod měření zbytkového napětí, která využívá rozptylu rentgenových paprsků na krystalech materiálu. Následně se měří vzdálenost atomových mřížkových rovin ovlivněných zbytkovým napětím. [3]

K difrakci rentgenového záření lze dojít pouze za určitých podmínek, tyto podmínky lze popsat pomocí Braggovy rovnice, či Laueho rovnicemi. Díky těmto rovnicím se dají vypočítat hodnoty konstant zkušebního materiálu. [10]

$$n\lambda = 2d \sin\theta \quad (2.1.1)$$

Kde λ je vlnová délka záření, d je vzdálenost mezi rovinami, n je celé číslo, θ je úhel dopadu, s je jednotkový vektor primárního záření a s_0 je jednotkový vektor rozptýleného záření. [10]



Obrázek 4 Grafické znázornění Braggovy rovnice [10]

Obecně rentgenová difrakce není příliš účinná pro hloubkové měření zbytkového napětí, jelikož dosahuje pouze 0,025 mm přibližné hloubky. I přes nevýhodu dosahované hloubky je rentgenová difrakce velice stabilní, přesná a jednou z nejvyužívanějších nedestruktivních metod. [9]

Neutronová difrakce

Neutronová difrakce (ND) je jednou z metod měření zbytkového napětí bez zničení zkoušeného objektu, a proto se řadí mezi metody nedestruktivní. Princip neutronové difrakce je stejný jako u rentgenové difrakce. Při dopadu neutronů na vzorek dochází k difrakci a následně se dá změřit poloha odražených neutronů. [11][12]



ND dokáže měřit zbytkové napětí v několikanásobně větší hloubce než předešlé dvě metody, avšak má několik nevýhod. Samotný proces je mnohem delší a finančně náročnější. Nicméně i přes tyto nevýhody nachází tato metoda široké uplatnění při měření zbytkového napětí u svařenců, válcových tyčí, plasticky deformovaných desek a mnoha dalších součástí. [9]

Synchrotronová difrakce

Metoda synchrotronové difrakce (SD) funguje na stejném principu jako rentgenová difrakce s rozdílem mnohem vyšší intenzity a energie. V důsledku vyšší energie je tato metoda schopna penetrace větší hloubky. Nevýhody SD jsou podobné jako u neutronové difrakce, mnohem dražší a delší proces. [9]

Magnetická metoda

Magnetické metody měření spočívají v zjišťování zbytkového napětí za pomoci odezvy materiálu na magnetické pole. K měření se využívá Barkhausenova šumu nebo detekčních cívek. Magnetická metoda dosahuje při měření hloubku kolem 1 mm. Průběh metody je poměrně rychlý a proces není příliš drahý. [9][13]

Ultrazvuková metoda

Ultrazvuková metoda využívá vztahu rychlosti šíření vln a elastických konstant materiálu. K měření se využívají podélně, nebo příčně polarizované vlny, díky kterým lze měření provést přes celý průřez vzorku. Nevýhodou ultrazvukové metody je nepřesnost měření, jelikož šíření vln nereaguje pouze na napětí, ale také na další mikrostrukturní charakteristiky. Patří sem například velikost zrna, krystalová mřížka a mnoho dalších. I přes tyto okolní faktory ultrazvuková měření nachází uplatnění na mnoha místech. [9][13]

Shrnutí metod měření zbytkového napětí

Jelikož samotná technologie LSP ovlivňuje povrch materiálu mezi hloubkou 0,1 mm až kolem 1 mm, jsou pro tuto technologii nejdůležitější následující metody: metoda odvrtávání, rentgenová difrakce, odleptávání, synchrotronová difrakce a ultrazvuková metoda. V následující tabulce se nachází rozdělení měřících metod podle hloubky měření, přesnosti a využití.

Tabulka 2 Charakteristika metod měření zbytkového napětí [9]

	Přesnost	Hloubka měření	Nejčastější využití	Omezení
Odleptávání	10 - 30 %	tloušťka vzorku	ploché desky, válečky jednotné tloušťky	časová náročnost
Odvrtávání	10 - 30 %	cca 2 mm	měření v blízkosti povrchu	max. mez kluzu 70%
Rentgenová difrakce	cca 20 MPa	< 0.03 mm	měření v blízkosti povrchu krystalických materiálů	odchyly v strukturu zrna a povrchu
Synchrotronová difrakce	cca 50 MPa	> 5 mm	hlubší nedestruktivní měření než u rentgenové difrakce	vyžaduje synchrotronní záření
Neutronová difrakce	cca 50 MPa	25 mm ocel, 100 mm hliník	hlubší nedestruktivní měření než u synchrotronové difrakce	vyžaduje neutronové záření
Magnetická metoda	> 25 MPa	1 mm	pouze u feromagnetických materiálů	vyžaduje specifickou kalibraci materiálu
Ultrazvuková metoda	> 25 MPa	1 - 20 mm	nízkonákladové měření pro srovnání	vyžaduje specifickou kalibraci materiálu


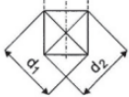

2.2 Tvrдость

Tvrдость je mechanická vlastnost materiálu, která lze definovat jako odpor proti vnikání cizího tělesa. Tvrдость se dále dělí na makrotvrдость, mikrotvrдость a nanotvrдость. Makrotvrдость se využívá k hodnocení tvrdosti celého materiálu, mikrotvrдость slouží pro stanovení lokálních vlastností, zatímco nanotvrдость slouží například k měření tvrdosti povlaků. Zkouška makrotvrlosti se pohybuje v rozmezí síly > 10 N, mikrotvrдость v rozmezí od 0,1 N až 10 N a nanotvrдость < 0,1 N. [14][15]

Tvrдость je měřena zkouškami, které lze rozdělit podle principu na vnikací, vrypové, odrazové a kyvadlové, podle rychlosti zatěžující síly na statické, dynamické a podle velikosti zatěžující síly. Mezi hlavní výhody zkoušek tvrdosti patří dostupnost, jednoduchost, opakovatelnost, rychlost a možnost provedení na hotovém výrobku. [14][15]

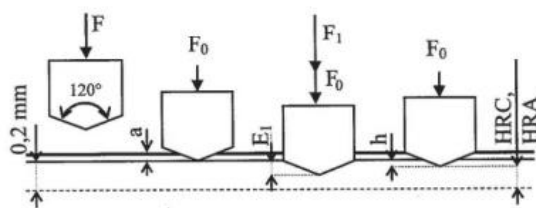
Nejčastěji používané zkoušky tvrdosti jsou statické. Princip statických zkoušek spočívá ve vtláčování objektu s vhodným tvarem (indentorem) do povrchu testovaného tělesa. V tělese se vytvoří vtisk, podle kterého se následně stanovuje hodnota tvrdosti. Statické vnikací zkoušky se dělí na zkoušky dle Rockwella, Vickerse a Brinella. [14][15]

Tabulka 3 Souhrn základních vnikacích metod měření tvrdosti [14]

Zkouška tvrdosti	Indentor	Vtisk	Označení a výpočet tvrdosti
Brinellova	kulička		$HBW = 0,102 \cdot \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot D \cdot (D - \sqrt{D^2 - d^2})}$
Vickersova	jehlan		$HV = 0,1891 \cdot \frac{F}{d^2}$
Rockwellova	kužel, kulička		HRC, HRD, HRA, HRN, HRG, HRB, HRF, HRT

Metoda dle Rockwella

Zkouška dle Rockwella spočívá ve vtláčování indentoru do povrchu materiálu a následného změření vtisku. Rockwellova zkouška využívá jako indentor diamantový kužel s vrcholovým úhlem 120°, pokud se jedná o testované materiály, které jsou kalené nebo tvrdé. Pro materiály měkké a středně tvrdé se využívá kuličky o průměru 1,6 mm. [14]



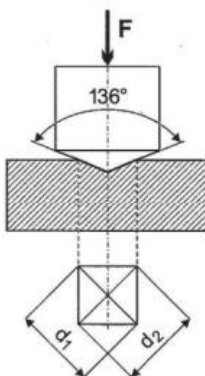
Obrázek 5 Schéma principu metody dle Rockwella [14]

Metoda dle Vickerse

Zkouška dle Vickerse využívá k vtláčování pravidelný čtyřboký jehlan s vrcholovým úhlem 136°. Po odlehčení indentoru se následně změří úhlopříčky vtisku, které zůstanou po odlehčení zkušebního tělesa. Výpočet pro tuto zkoušku je následný:

$$HV = 0,1891 \cdot \frac{F}{d^2} \quad (2.2.1)$$

Kde F [N] je zatěžovaná síla a d [mm] je průměrná délka úhlopříček. [14]



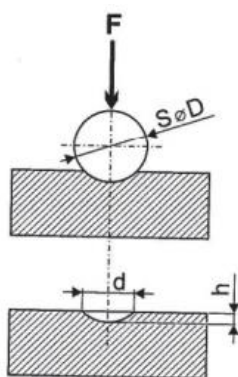
Obrázek 6 Schéma principu metody dle Vickerse [14]

Metoda dle Brinella

Zkouška dle Brinella využívá jako indentor tvrdokovovou kuličku o průměru D . Průměr kuličky může být 10, 5, 2,5 a 1 mm podle zkušební tělesa. Po odlehčení vtisku kuličky se navzájem změří průměr ve dvou na sobě kolmých směrech a vypočítá se střední průměr vtisku d [mm]. Doba zatěžování se pohybuje v rozmezí 10 až 15 s, záleží na materiálu zkoušeného tělesa. Výsledné označení podle Brinella se označuje HBW a vypočítá se dle vzorce:

$$HBW = 0,102 \cdot \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot D \cdot (D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (2.2.2)$$

F [N] je zkušební zatížení a D [mm] je průměr kuličky. [14]



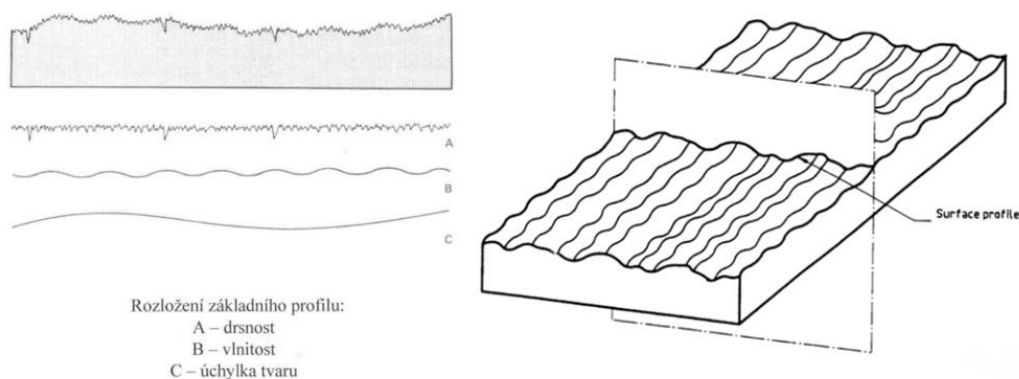
Obrázek 7 Schéma principu metody dle Brinella [14]

2.3 Textura povrchu

Texturu povrchu lze také definovat jako nerovnost povrchu, kde nedokonalosti povrchu jsou zanechávány na součástce po použití dané technologie. Obecné označování struktury povrchu se dělí na profilové a plošné. Profilová metoda, neboli přímkové měření na povrchu součásti je dáno normou ČSN EN ISO 1302. Plošná metoda, která zahrnuje plošné měření na povrchu součásti je dána normou ČSN ISO 25178-1. [16]

Pro vyhodnocení profilu povrchu v závislosti na filtru profilu, neboli rozsahu vlnových délek se určuje:

- **Základní profil (P – profil):** Profil, který je úplný po aplikaci krátkovlnného filtru λ_s . Tento profil je základem pro hodnocení parametrů základního profilu.
- **Profil drsnosti (R – profil):** Profil drsnosti je profil, který je odvozený ze základního profilu potlačením dlouhovlnných složek za použití filtru λ_c . Tento profil je pozměněn a je základem pro hodnocení parametrů drsnosti.
- **Profil vlnitosti (W – profil):** Profil vlnitosti je odvozen za pomoci postupné aplikace filtrů λ_f a λ_c na základní profil. Filtr λ_f potlačuje dlouhovlnné složky a λ_c potlačuje krátkovlnné složky.
- **Plošné parametry (S):** Plošné parametry povrchu S jsou převážně odvozeny z profilových parametrů. Mezi S skupinu parametrů patří dalších 12 parametrů, jako jsou například parametry výšky, prostoru, hybridní a pomocné.
- **Objemové parametry (V):** Objemové parametry povrchu V umožňují hodnocení funkční topografické prvky profilu. K hodnocení využívají tyto parametry analýzu objemu povrchu omezenou stupnicí. [17][18]

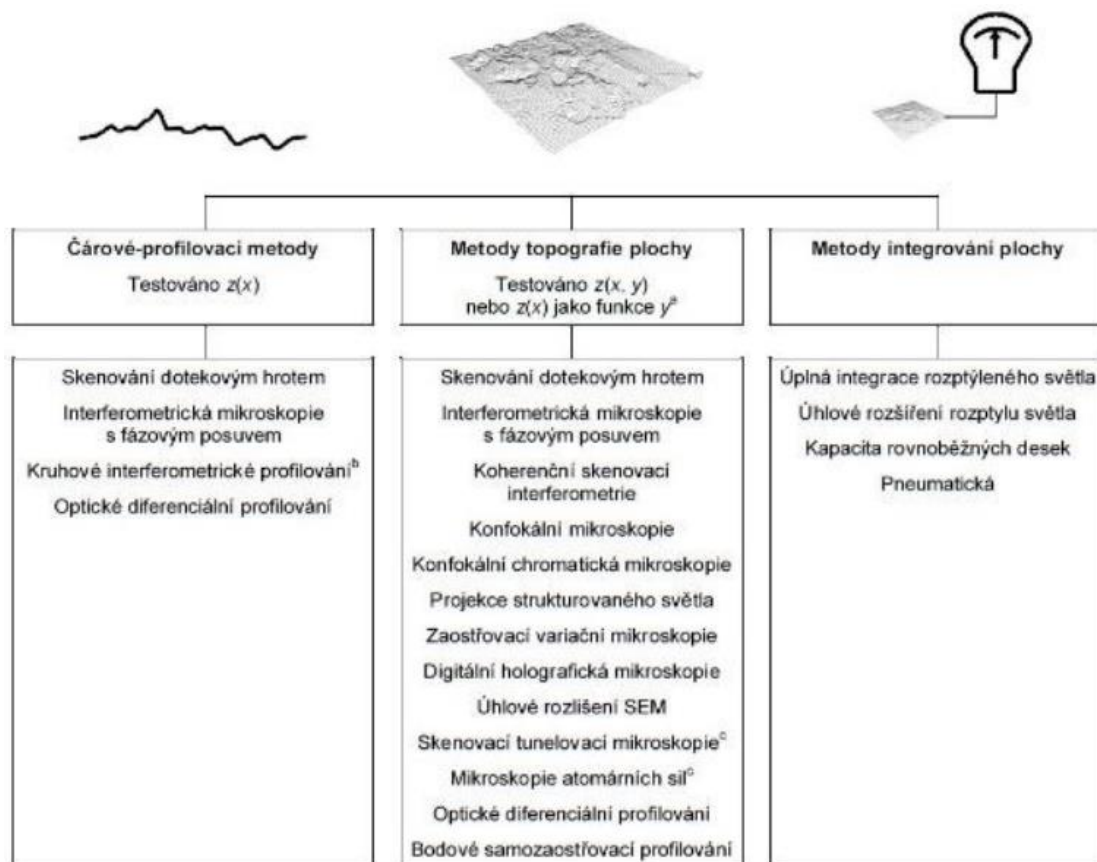


Obrázek 8 Textura, drsnost povrchu [17]

Mezi další parametry textury povrchu patří:

- Průměrná aritmetická úchylka profilu: Ra, Wa, Pa, Sa
- Průměrná kvadratická úchylka profilu: Rq, Wq, Pq, Sq
- Šikmost profilu: Rsk, Wsk, Psk, Ssk
- Špičatost profilu: Rku, Wku, Pku, Sku
- Průměrná šířka prvků profilu: RSm, WSm, PSm
- Materiálový poměr profilu drsnosti: Rmr
- Veličiny nosného podílu: Rk, Rpk, Rvk, M_{r1} , M_{r2}
- Maximální výšky vrcholu omezené stupnice povrchu: Sp
- Maximální výška prohlubně omezené stupnice povrchu: Sv
- Parametry neplatného objemu: Vvv, Vvc
- Parametry objemu materiálu: Vmp, Vmc

Pro měření textury povrchu se používají zejména tři skupiny metod, mezi které se řadí čárové profilovací metody, metody topografie plochy a metody integrování plochy. [17]



Obrázek 9 Metody měření textury povrchu [17]



2.4 Porozita

Porozita je jednou z vad materiálů a v případě 3D tištěných kovových součástí je jednou z hlavních. Ve srovnání s konvenčními metodami zpracování oceli, 3D tištěné mají velice vysokou porozitu, která vede k snížení životnosti součástek. V případě aditivní výroby lze klasifikovat porozitu na dva typy. První typ jsou metalurgické póry, které vznikají převážně absorpcí okolních plynů nebo vypařováním legovaných prvků. Druhým typem jsou póry podle parametrů děr. Další dělení je na mikro a makro porozitu, kde makro póry bývají o dost nebezpečnější. [19][20]

Pro zlepšení porozity dílu, textury povrchu a zredukování tahového zbytkového napětí je možno využít celou řadu dokončovacích metod. Vybrané dokončovací metody, jejich princip a aplikace jsou popsány v následující kapitole. [19][20]

3. Metody dokončování povrchu

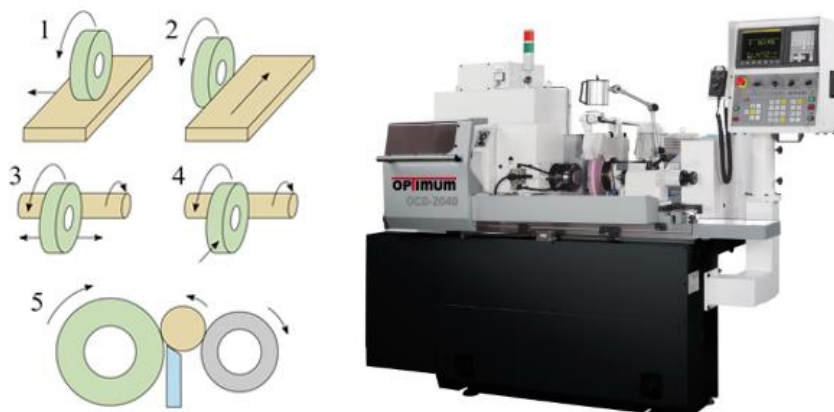
Metody dokončování, neboli poslední operace úpravy povrchu se provádí z důvodu změny vlastností. Mezi upravované vlastnosti se řadí geometrie povrchu, přesnost rozměrů, mechanické, fyzikální vlastnosti, či pouze vzhled povrchu. Procesy dokončování se dělí na metody s úběrem a bez úběru materiálu. [21]

3.1 Metody s úběrem materiálu

Metody s úběrem materiálu spočívají v odebrání dostatečného přídavku na dokončování. Přídavek u daného obrobku musí zaručit odebrání nežádoucích složek, které ovlivňují integritu povrchu. Mezi tyto složky patří zbytkové napětí, změny struktury, trhliny, tvarové a rozměrové nepřesnosti, nebo deformace po tepelném zpracování, či chemické reakci. [21]

3.1.2 Broušení

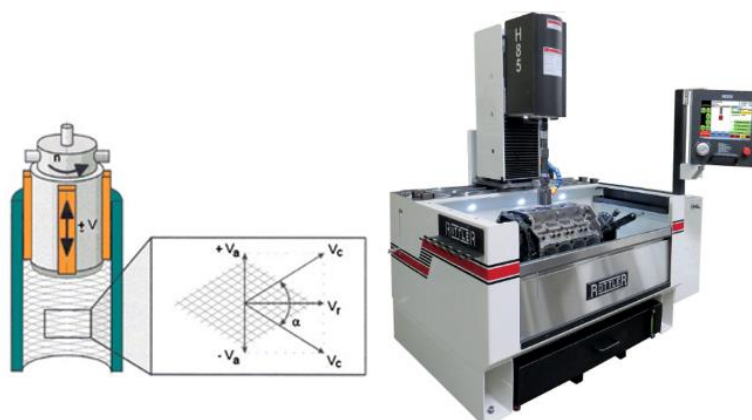
Broušení je jednou z nejpoužívanějších metod dokončování povrchu ve strojírenství. Jedná se o ubírání materiálu nástrojem s nedefinovanou řeznou geometrií. Řezná rychlost dosahuje při broušení 20 až 200 m.s⁻¹. Broušením lze obrábět skoro všechny plochy, které mohou být rotační (vnitřní, vnější), nebo ozubená kola, závity, či tvarové plochy. Hlavní předností broušení je výsledná jakost povrchu, kde dosahovaná drsnost povrchu je Ra 0,2 – 1,6 μm, IT 5 – IT 7. Další výhodou broušení je možnost obrábění velmi tvrdých materiálů a velkých ploch při poměrně nízkém čase. [21]



Obrázek 10 Metody broušení (vlevo) a CNC hrotová bruska (vpravo) [22][23]

3.1.3 Honování

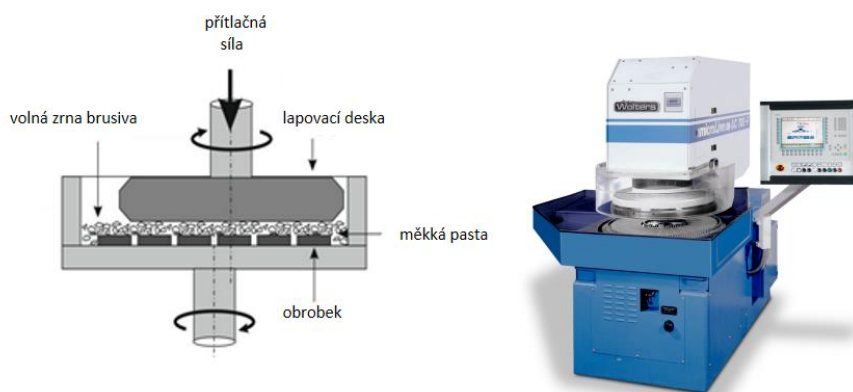
Honování je technologie obrábění, která se velice podobá broušení. Honování na rozdíl od broušení probíhá při velice nízké řezné rychlosti a jako brusivo se používá pevně vázaný honovací kámen. Princip honování spočívá v přitlačování kamenů při daném tlaku (0,2 – 1,5 MPa) a rotaci s posuvným pohybem. Metodou honování lze docílit opravení kruhovitosti a válcovitosti. Výsledné parametry honování jsou R_a 0,1 – 0,2 μm , IT 4 – IT 5. Uplatnění honování se nachází především ve výrobě spalovacích motorů, hydraulických prvků a vedení ventilů. [21]



Obrázek 11 Schéma principu honování (vlevo) a stroj na honování (vpravo) [24][25]

3.1.4 Lapování

Lapování je metoda dokončování, která využívá k úběru materiálu volná zrna brusiva. Zrna brusiva jsou mezi obrobek a nástroj vnášena za pomoci kapaliny, či měkké pasty. Lapovací nástroj následně pohybuje zrny po povrchu, čímž dochází k odebrání mikro nerovností. Lapováním lze dosáhnout velice vysoké kvality povrchu s drsností R_a 0,01 – 0,15 μm a IT 1 – IT 3. [21]

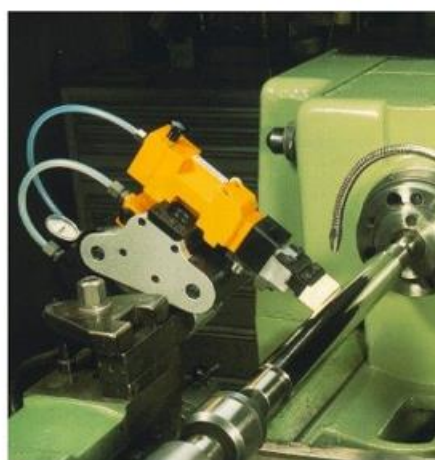
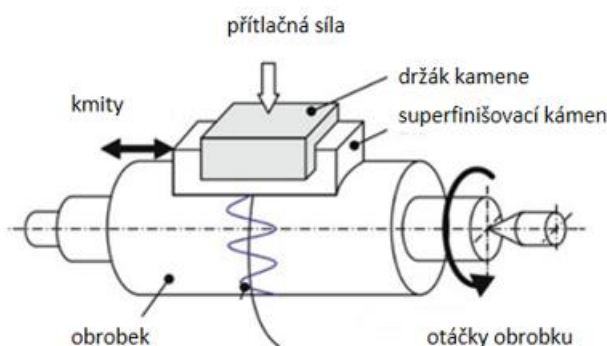


Obrázek 12 Princip lapování (vlevo) a lapovací stroj (vpravo) [26][27]

3.1.5 Superfinašování

Superfinašování je metoda dokončování povrchu za pomoci brousících kamenů. Brousící (superfinašovací) kameny konají kmitavý pohyb o dané frekvenci s amplitudou 2 až 6 mm a zároveň jsou přitlačovány na povrch obrobku. Obrobek koná rotující pohyb, kde se na povrch mezi stykové plochy přivádí řezná kapalina, nejčastěji petrolej, či olej. Metodou superfinašování lze dosáhnout drsnosti povrchu $Ra\ 0,05 - 0,1\ \mu\text{m}$, IT 1 – IT 3. [21]

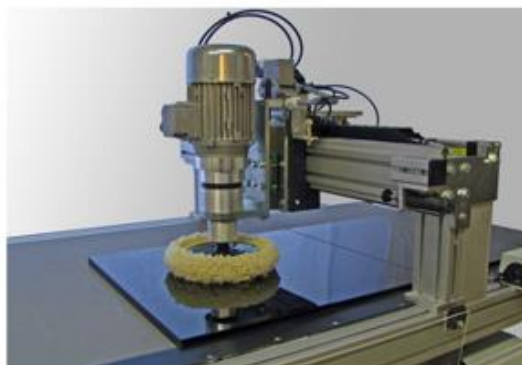
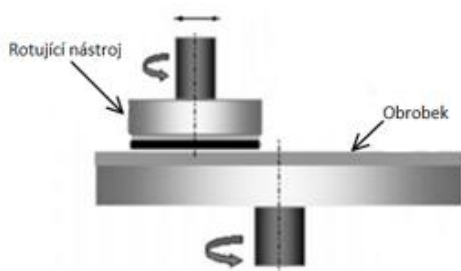
Se superfinašováním se můžeme setkat při obrábění hřídel, klikových hřídel, čepů a ventilů. [21]



Obrázek 13 Princip superfinašování (vlevo) a stroj na superfinašování (vpravo) [28][29]

3.1.6 Leštění

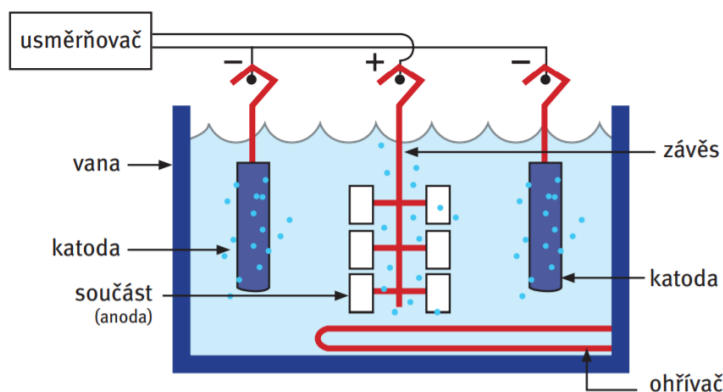
Leštění jako takové neslouží k docílení vyšší přesnosti rozměrů obrobku, ale jedná se pouze o operaci dokončování za účelem úpravy vzhledu povrchu. Metoda leštění odebrává pouze minimální část materiálu, odstraňují se převážně stopy po předešlých operacích. Leštění se rozděluje do tří etap na hrubování, jemné leštění a dolešťování. Drsnost povrchu po leštění se pohybuje v rozmezí $Ra\ 0,05 - 0,4\ \mu\text{m}$. [21]



Obrázek 14 Schéma chemicko-mechanického leštění (vlevo) a stroj na leštění [30][31]

3.1.7 Elektrolytické leštění

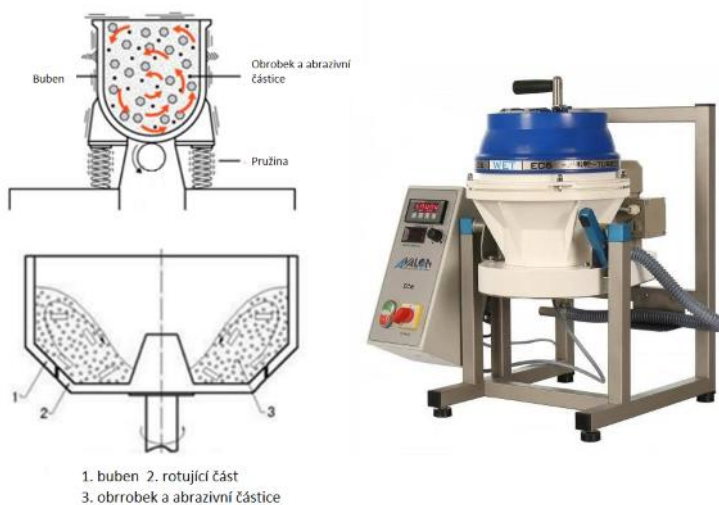
Elektrolytické leštění je jednou z nejúčinnějších metod povrchových úprav, které se využívá k odstranění nečistot a otřepů. Dále slouží ke snížení mikroskopické drsnosti povrchu na minimální hodnotu. Princip elektrolytického leštění spočívá v odebrání kovu ve formě iontů z povrchu materiálu. Využití elektrolytického leštění se nachází zejména ve zdravotním a potravinářském průmyslu. [12]



Obrázek 15 Schéma elektrolytického leštění [12]

3.1.8 Omílání

Omílání se řadí mezi nejproduktivnější metodu dokončování povrchu k získání požadovaného vzhledu. Princip omílání spočívá v úběru materiálu za pomoci abrazivních částic, které naráží na obrobek v bubnu na omílání. Dalšími druhy omílání je vibrační a odstředivé, které je zároveň ze všech nejproduktivnější. Dosahované parametry omíláním jsou Ra 0,05 – 1,6 μm . [21]



Obrázek 16 Schéma vibračního a odstředivého omílání (vlevo), stroj na omílání (vpravo) [32][33][34]

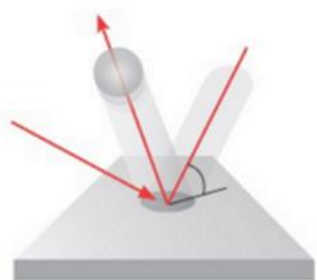
3.2 Metody bez úběru materiálu

Metody bez úběru materiálu využívají k dokončování povrchu plastickou deformaci. Plastická deformace se dělí podle průběhu, za tepla nebo za studena. Plastická deformace za studena způsobuje zpevnění materiálu, vnášení zbytkového napětí, či zlepšení drsnosti. Díky této metodě se celkovělepší mechanické vlastnosti dílu, únavová pevnost, odolnost proti otěru, korozi a tvrdost. [21]

Mezitím plastická deformace za tepla vykazuje opačné účinky než za studena. Zahřátím povrchu dochází k vyvolání tahových napětí, čímž je součástka náchylnější ke vzniku trhlin a sníží se její celková životnost. [21]

3.2.1 Tryskání

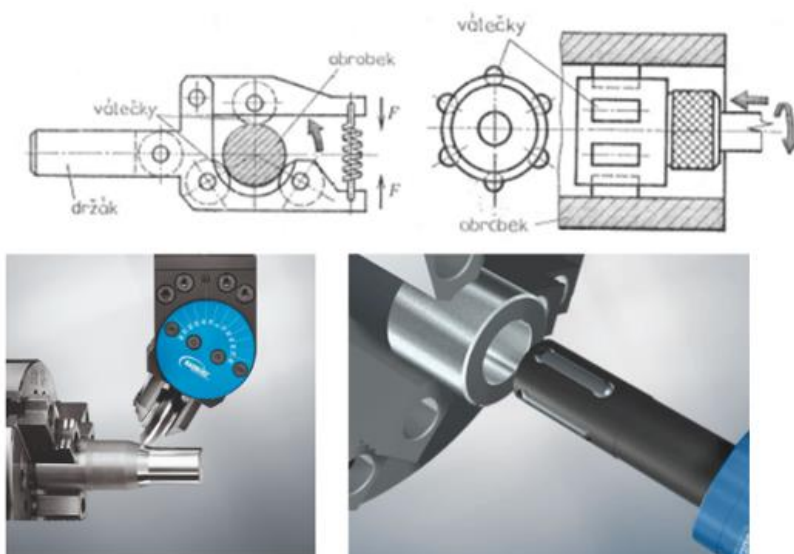
Tryskání, neboli shot peening (SP) se řadí mezi další technologie povrchových úprav bez úběru materiálu, které využívají rázovou vlnu pro vytvrzení povrchu materiálu. Při procesu tryskání se využívají kuličky z kovu nebo keramiky, které jsou vysokou rychlostí střeleny na požadovaný materiál, který chceme povrchově a mechanicky upravit. Kromě kuliček se používají broky, ocelový drát, či balotina (skleněné kuličky). Dosahovaná jakost tryskání je v rozmezí Ra 0,4 – 0,1 μm IT 7 – IT 9. S tryskáním se můžeme setkat při obrábění složitých tvarů v případech, kdy nelze použít jiná metoda, například u ozubených kol, turbín, torzních tyčí a klikových hřídelí. [21]



Obrázek 17 Princip metody kuličkování [35][36]

3.2.2 Válečkování

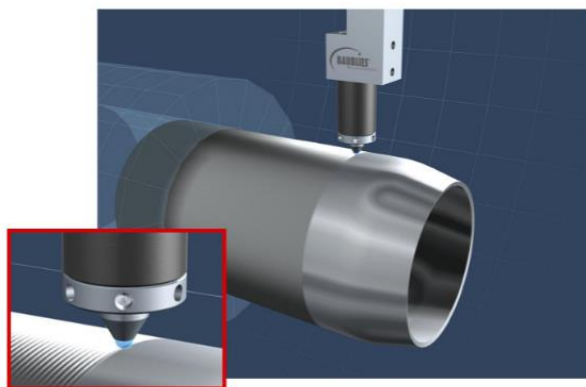
Válečkování spočívá ve valení otočného tělíska, které je zároveň přitlačováno k obrobku, na kterém dochází k plastické deformaci. Využití této metody vede ke změně struktury povrchu materiálu a zároveň zvýšení tvrdosti, pevnosti a odolnosti proti cyklickému namáhání. Válečkování se využívá k úpravě vnitřních a vnějších rotačních ploch, drážek, zápichů a závitů. Výsledná přesnost dokončování se pohybuje v rozmezí IT 4 – IT 7 a drsností Ra 0,05 – 0,4 μm . [21]



Obrázek 18 Schéma vnějšího a vnitřního válečkování válcových ploch (nahore), vnitřní a vnější válečkování (dole) [37][38][39]

3.2.3 Vyhlazování

Vyhlazování spočívá v přitlačování tělíska různých tvarů k rotující součástce. Na povrchu součásti dochází k plastické deformaci, zpevnění a změně drsnosti. Samotné vyhlazování se považuje za jeden z nejjednodušších způsobů plastické deformace. Dosahované parametry přesnosti jsou IT 4 – IT 7 a drsnost Ra 0,1 – 0,4 μm . [21]

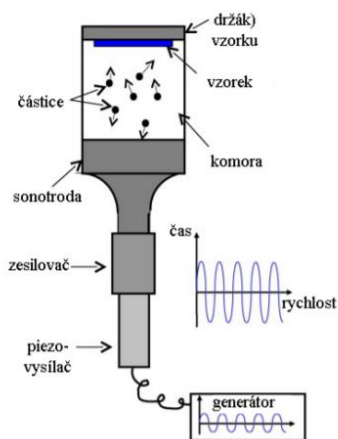


Obrázek 19 Schéma vnějšího vyhlazování diamantem [40]

3.2.4 Vibrační zpevňování (kuličkování)

Vibrační zpevňování je metoda dokončování povrchu, která využívá dopadu urychlených částic (kuliček) vibracemi na povrch materiálu. Následně dochází k plastické deformaci a změně integrity materiálu. Vibrace, které urychlují částice se dělí do dvou skupin na mechanické a vzniklé ultrazvukem. Mechanické urychlování využívá ocelové nebo litinové kuličky, které dopadají na povrch materiálu. Druhá metoda ultrazvukem dosahuje vibrací o vysokých frekvencích až 30 kHz, pevně upnutý obrobek je vystaven dopadu kuliček a dochází k vyhlazování povrchu. Dosahované parametry jsou IT 6 – IT 10 a drsnost povrchu Ra 0,2 – 1,6 μm . [21]

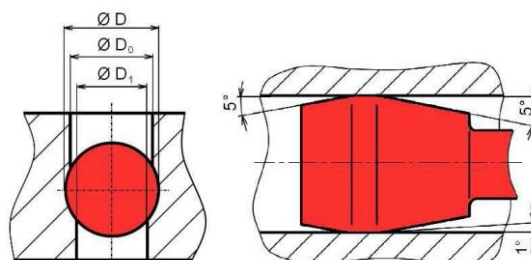
S využitím vibračního zpevňování se můžeme setkat zejména u dokončování tvarově složitých součástí. [21]



Obrázek 20 Ultrazvukové vibrační zpevňování [41]

3.2.5 Kalibrování

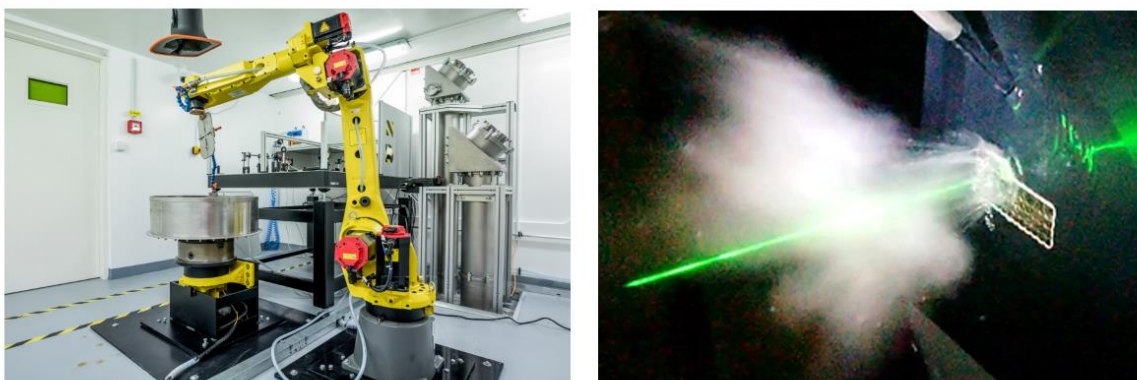
Kalibrování je metoda dokončování, která vyvolává plastickou deformaci přímočarým pohybem tvářecího elementu. Tvářecí elementy jsou pro tváření vnitřních ploch větší a pro vnější plochy menší. Výsledkem kalibrování je zpřesnění rozměrů na IT 6 – IT 4 a dosažení drsnosti Ra 0,01 – 0,4 μm . [21]



Obrázek 21 Kalibrování kuličkou a speciálním trnem [42]

3.2.6 Laser shock peening

Laser shock peening se řadí mezi jedny z nejprogresivnějších technologií dokončování povrchu bez úběru materiálu. Princip LSP je v generování zbytkových napětí v materiálu. Metoda LSP umožňuje vysoké zvýšení životnosti cyklicky namáhaných dílů, tvrdosti, či dalších mechanických vlastností. Mezi hlavní výhody využití oproti předešlým operacím patří opakovatelnost procesu při stejných parametrech, přesnost a v některých případech možné využití u geometricky složitých součástí. S praktickými aplikacemi této technologie se můžeme setkat zejména v leteckém průmyslu a mnoha dalších odvětví. [43]



Obrázek 22 Sestavení pracoviště (vlevo), průběh procesu LSP (vpravo) [44]

4. Laser shock peening

Laser shock peening se řadí mezi technologie povrchových úprav bez úběru materiálu. Proces LSP spočívá v produkování tlakového zbytkového pnutí za pomoci rázových vln generovaných pulsními lasery. [45][46]

LSP slouží zejména ke zlepšení únavových vlastností kovových materiálů, snížení šance vzniku trhlin, zvýšení cyklického namáhání, tvrdosti a odolnosti vůči korozi. Jedním z hlavních rozdílů technologie LSP od ostatních dokončovacích metod je, že se vnášené zbytkové napětí vyskytuje ve větší hloubce. Další výhodou LSP je možnost kontrolovaného procesu a realizovatelnost za stejných parametrů. Jedním z významných uplatnění je použití LSP na 3D vyráběné díly, kde jsou komplexní geometrické tvary jednou z hlavních předností. [45][46]

Aplikace LSP se nachází nejvíce v leteckém a jaderném průmyslu, v některých případech i v automobilovém a zdravotním. Limitním faktorem této technologie přes všechny výhody jsou vysoké náklady na zařízení a jeho provoz. [42][46]

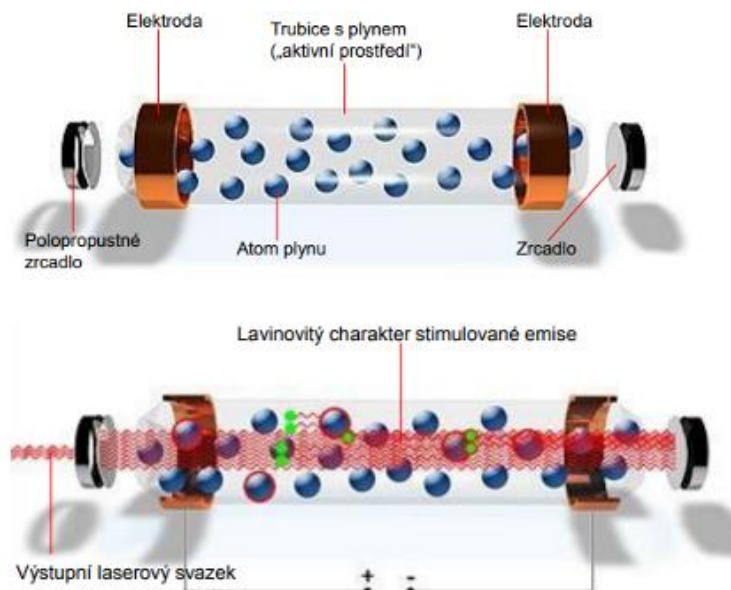
4.1 Laser

Laser přeložením z angličtiny „Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation“, je princip zesilování světla za pomoci stimulované emise záření. [47]

Lasery lze obecně rozdělit podle typu aktivního prostředí na pevnolátkové lasery, vláknové, plynové, polovodičové a chemické. Další možné rozdělení je podle typu generování laserového výstupního svazku. Zde se lasery dělí na kontinuální a pulzní. Kontinuální lasery generují souvislý výstupní svazek. Pulsní lasery oproti kontinuálním generují svazky laserového záření v pulsech. Využití pulsních laserů se uplatňuje zejména při gravírování, mikroobrábění, svařování a technologii LSP. Pulsní lasery se rozdělují do dalších podskupin podle délky generovaného pulsu. [47]

4.1.1 Princip laseru

Princip fungování laseru spočívá v buzení elektronů atomů a molekul v aktivním prostředí na vyšší energetickou hladinu, neboli do excitovaného stavu. Následně atomy uvolňují energii ve formě elektromagnetického záření (fotonů), fotony se srážejí s dalšími a dochází ke vzniku dalších. Samotný proces se nazývá stimulovanou emisí, která probíhá mezi 99,9% odrazivým a polopropustným zrcadlem. Vzniklé fotony se odrážejí mezi zrcadly po dobu nabití určité energie, při které se polopropustným zrcadlem dostává ven finální laserový svazek. [48]



Obrázek 23 Princip atomárního plynového laseru [48]

Mezi hlavní výhody využití laserů se řadí vysoká přesnost obrábění, rychlost, možnost opakovatelnosti při stejných parametrech, upravování těžce dostupných míst a obrábění těžkoobrobitelných materiálů. Mezi nevýhody patří vysoká pořizovací cena a přísná bezpečnostní opatření při procesu. [48]

Využití laserů je v dnešní době velice rozsáhlé a můžeme se s lasery setkat například v medicíně (oční lékařství, chirurgie, onkologie), astronomii, metrologii, holografie a strojírenském průmyslu (řezání, svařování, gravírování, mikroobrábění). [48]

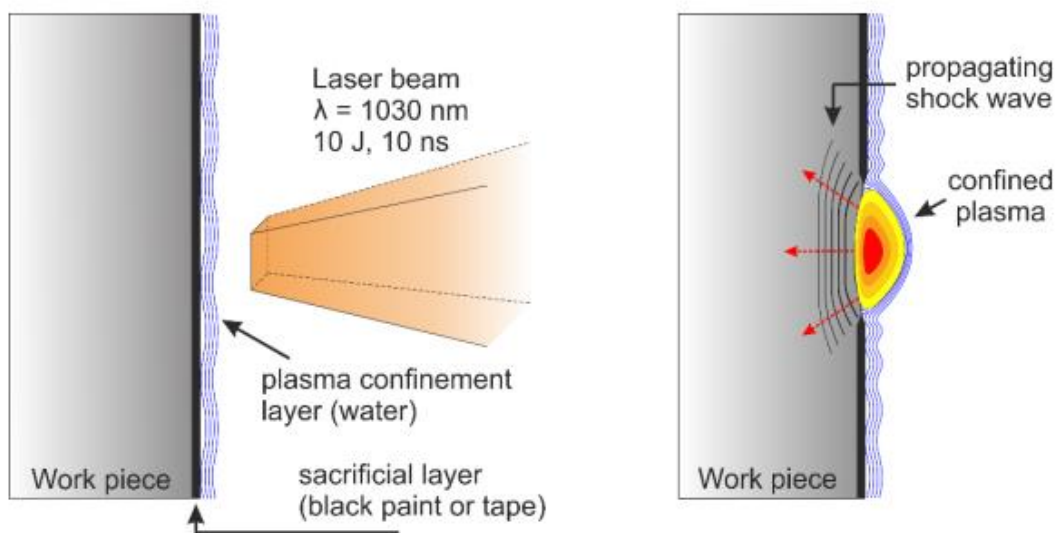
4.2 Historie LSP

První zmínky o LSP se objevily v 1960, kdy bylo zjištěno, že za pomoci vysoce intenzivního laseru by se dokázal vyvolat velice vysoký tlak na materiál a následné upravení mechanických vlastností. V následujících letech se řada vědců zabývala touto technologií, avšak pro úspěšné fungování a dosažení požadovaného výsledku bylo zapotřebí silnějšího laseru. [43]

O několik let později v roce 1968 začaly jedny z prvních experimentů pulsního laseru na povrch materiálu společností Battelle Institut (Columbus, OH, USA), následně do roku 1981 probíhaly výzkumné a experimentální práce na ocelích a slitinách hliníku v leteckém průmyslu. Jako další společnosti, které se podílely na vývoji LSP patří Cooperation Laser Franco-Allemande-Arcueil Cedex, Laboratoire d'Application des Lasers de Puissance-Arcueil Cedex a Laboratoire d'Utilisation des Lasers Intenses-Ecole Polytechnique, Palaiseau Cedex. [43]

4.3 Princip technologie LSP

Technologie LSP je považována za mechanický proces tváření za studena. Pro zvýšení účinnosti a dosažení lepších výsledků metodou LSP se používá pokrytí cíleného povrchu absorpčním povlakem. Tento povlak je po dopadu paprsku laseru zničen, dochází k jeho odpaření a vytváří se plazma. Při vzniku plazmy jsou zároveň generovány tlakové vlny, které plasticky deformují povrch a zbytková napětí jsou přenášena do materiálu. [46]



Obrázek 24 Schéma principu technologie LSP [49]

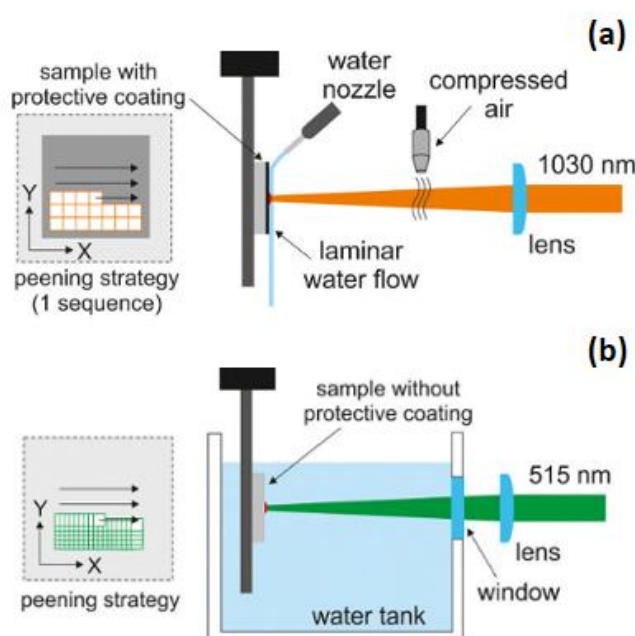
Absorpční vrstvy slouží k zabránění tavení cíleného povrchu a laserové ablaci, zároveň je díky nim metoda LSP schopna docílit vyšší kvality povrchu. Bez této vrstvy by nedocházelo k efektivní přeměně energie laseru na rázovou vlnu. Absorpční vrstva může být z materiálů jako je hliník, měď, olovo, vinylové pásky, zinku, nebo z černé pásky. Černá páska prokázala nejlepší schopnost absorpcie laserového záření, například oproti hliníku, který absorboval k 80%, černá páska byla schopna necelých 100%. Výsledkem je, že díky černé pásce je možné docílit nejlepší přeměny laserového záření na plazmu. [46]

Dále se kromě absorpční vrstvy využívá také transparentní (těsnící) vrstva. Tato vrstva slouží zejména k zabránění šíření se plazmatu mimo požadované místo působení laserového záření, zároveň se díky ní výrazně zvyšuje intenzita rázové vlny. Transparentní vrstva je také známa pod pojmem omezujícího média, které může být ve formě vody, křemene, borosilikátové skla, olovnatého skla, plexiskla, nebo silikonové pryže. Mezi hlavní rozhodující faktory volby omezujícího média patří aplikace, podkladový materiál, hustota a akustická rychlost. [46]

4.4 LSP bez absorpční vrstvy

Použití LSP bez absorpční vrstvy se využívá ke snížení citlivosti na praskliny způsobené stresovou korozi a zlepšuje celkové únavové vlastnosti materiálu. Jednou z nevýhod je popálení materiálu a ovlivnění drsnosti povrchu kvůli přímému kontaktu laserového paprsku s povrchem materiálu. Využití nachází tento proces například v jaderných elektrárnách pro zabránění vzniku prasklin způsobené korozi u reaktorových součástek. [50]

Další využití je například ke zvýšení životnosti nízkotlakových lopatek turbín v jaderných parních turbínách. [50]



Obrázek 25 použití LSP s absorpční vrstvou (obrázek a), použití LSP bez absorpční vrstvy (obrázek b) [51]

4.5 Procesní parametry laseru pro LSP



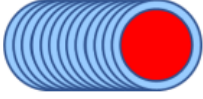


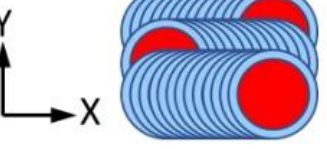

K docílení požadovaných parametrů pro funkčnost technologie LSP je jedním z nejdůležitějších faktorů správná volba laserových systémů. Efektivita LSP je také závislá na materiálu součástky, parametrech laseru a vlastnostech transparentní s absorpční vrstvou. Jedním z dalších typických požadavků pro LSP je rychle spínaný laser většinou na bázi neodymu nebo yterbia. Délka trvání tlaku rázové vlny se pohybuje obvykle v rozmezí 10 - 100 ns s energií 1 – 10 J na puls. Většinou se používají vlnové délky jako jsou 1064 nm (infra-červená), 532 nm (zelená) a 155 nm (ultrafialová), které jsou následně tlumeny vodou. Velikost geometrie kruhového profilu kruhového svazku se pohybuje v rozmezí průměru 1 – 6 mm.

Kruhový profil svazku laseru není jediný, další používané profily mohou být ve tvaru eliptickým, obdelníkovým, víceúhelníkovým a čtvercovým, který vykazuje nejlepší rovnoměrnost intenzity. Pro správně fungující proces technologie se používá frekvence nižší než je 1 kHz a intenzita výkonu v rozmezí 0,1 – 106 GW/cm². [46]

Tabulka 4 Typické procesní parametry pro technologii LSP [46]

Materiál	Hustota výkonu (GW/cm ²)	Délka pulzu (ns)	Absorpční povlak	Transparentní prostředí	Poznámky
Ti-6Al-4V	5	10	Al fólie	voda	Únavová životnost se zvýšila o 22,2% a 41,7% pro jeden a dva po sobě jdoucí průchody laseru ve srovnání s neovlivněným vzorkem.
Ti-17	3, 6, 9	9,27	Al	voda	Parametry měly vliv na profil zbytkového napětí. LSP nemělo žádný vliv na drsnost, malý vliv na zpevňování a velký vliv na tvrdost v důsledku tlakových napětí.
AA2195	5	18	Al	voda	Tempo růstu únavové trhliny ze svarového spoje bylo redukováno použitím LSP ve srovnání s SP. Rychlost růstu trhliny byla srovnatelná s nesvařeným materiálem.
Al2024 T3	5	18	černá barva	voda	LSP vzorek prokázal odolnost vůči růstu únavových trhlin pro různé geometrie vrubů v porovnání s neovlivněným vzorkem.
316 L SS	2,5	10	bez ochrany	voda	Došlo ke zlepšení korozního potenciálu (Ecorr) a korozní proudové hustoty (Icorr) se zvýšením hustoty laserového pulsu. Došlo k 30%-40% zvýšení mikrotvrdosti.
Alloy 22	10	25	Al	voda	Byl pozorován vztah mezi parametry LSP a ZN na plochých vzorcích.
Inconel 600	10 (J/cm ²)	12	bez ochrany	voda	V důsledku pohybu laseru po povrchu materiálu byla pozorována povrchová mikrotextura. Kvůli laserové ablaci byly pozorovány sférické nanočástice o průměru 60 nm.

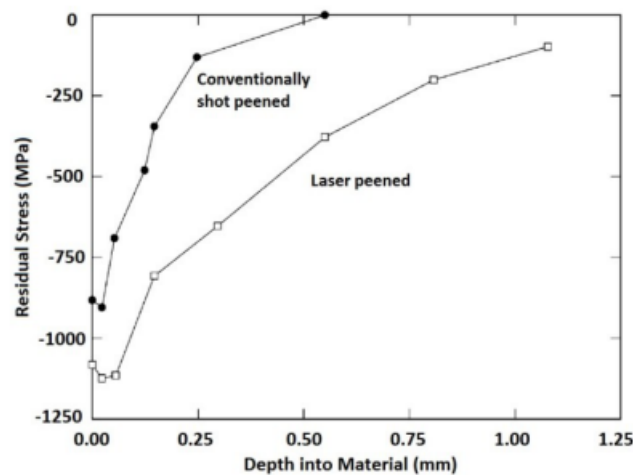
Technologie LSP také využívá principu překrývání jednotlivých pulzů neboli overlapping. Díky překrývání jednotlivých míst dochází ke zvýšení plastické deformace a rovnoměrnějšímu rozložení zbytkového napětí v materiálu. [46]

	Pattern of Irradiation	Residual Stress (RS) State	Schematic of RS State
A	0D (zero-dimensional) single pulse irradiation	Tensile RS under laser spot. Compressive RS on rim	
B	1D irradiation with sparse overlap	Wipeout of tensile RS is not sufficient. Average RS must be tensile	
C	1D irradiation with dense overlap	Wipeout of tensile RS is sufficient. Compressive except under final spot	
D	2D irradiation with sparse overlap (scan direction: X)	Wipeout of tensile RS is not sufficient. Average RS must be tensile	
E	2D irradiation with dense overlap (scan direction: X)	Wipeout of tensile RS is sufficient. Compressive except under final spot	
F	2D irradiation with dense overlap in X, sparse in Y (scan direction: X)	Equivalent to multiple laws of 1D irradiation. Compressive except under final spot of each line	
G	2D irradiation with sparse overlap in X, dense in Y (scan direction: Y)	Equivalent to multiple laws of 1D irradiation. Compressive except under spots of the final line	

Obrázek 26 Povrchové zbytkové napětí po několikanásobném překrytí pulsu laseru s různými způsoby. Modrá barva reprezentuje tlak a červená tah [50]

4.6 Vliv LSP na zbytkové napětí

Zbytkové napětí je hlavním výstupním faktorem metody LSP. Zbytkové napětí se po použití nejvíce nachází v blízkosti od povrchové vrstvy vzorku a s rostoucí vzdáleností od povrchu klesá. Ve srovnání s ostatními metodami jako je tryskání, ultrasonic shot peening, se u LSP dosahuje větší hloubky a rozsahu indukovaného zbytkového napětí. [46]



Obrázek 27 Srovnání zbytkového napětí ve slitině Inconel 718 mezi LSP a SP [52]

Mezi další parametry, které mají největší vliv na výsledné zbytkové napětí v materiálu patří ablační vrstva, omezující médium, tvar laserového svazku a jeho velikost, hustota výkonu, překrytí pulzů, vlnová délka laseru, doba pulzu a geometrii povrchu. [46]

4.7 Vliv LSP na drsnost povrchu

Vysoká drsnost povrchu slouží například k zabránění vzniku trhlin, které by jinak měly za následek nepříznivý dopad na životnost, odolnost proti opotřebení a stresové korozní praskání. [46]

Obecně lze aplikací LSP, či klasickým SP drsnost povrchu zlepšovat, nebo zhoršovat. Výsledná drsnost se zlepši v případě, že byla před aplikací technologií horší a naopak. Výsledná drsnost také závisí na daných parametrech nastavení LSP a SP. Aplikace metody LSP vykazuje výrazné výhody oproti klasickému SP. Například při povrchu zatěžovaném třením, kde je drsnost důležitá, LSP je značně výhodnější než SP. Zatímco při aplikaci povrchových vrstev, či nanášení barvy SP docílí k vyššímu zvýšení přilnavosti k povrchu oproti LSP. [46]

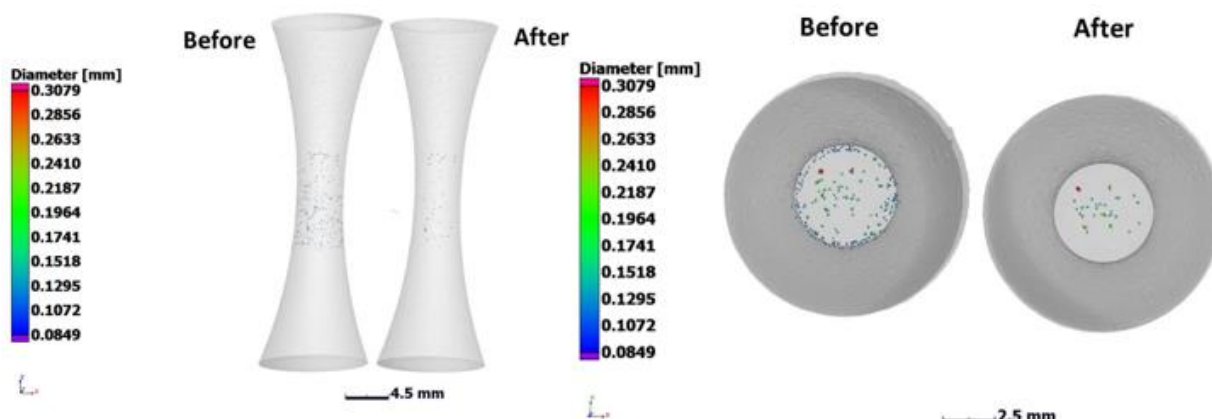
4.8 Ekonomické hodnocení technologie LSP

Jedním z hlavních faktorů, které ovlivňují vývoj technologie LSP jsou pořizovací a provozní náklady, které donedávna bránily masovému rozvoji. Provozní náklady technologie LSP u menších laserových systémů dosahují řádů několika tisíc korun. [42][53]

Provozní náklady u větších systémů například zařízení od společnosti SLP-Technologies v Německu dosahují v průměru 10 000 Kč/hodinu. Produktivita takto výkonných laserů s frekvencí 10 Hz je 36 000 pulzů za hodinu. Výsledná cena jednoho pulzu se pohybuje v rozmezí pod 0,30 Kč, kde malé součástky by se daly opracovat na několik pulzů ve velice krátkém časovém intervalu. V současné době pořizovací náklady výkonných laserů klesají a technologie LSP se stává dostupnější. [42][53]

4.9 Vliv LSP na porozitu

Jeden z hlavních faktorů, které ovlivňují životnost 3D tištěných součástí je pórovitost. Póry zde obecně způsobují vznik trhlin a prasklin. Technologie LSP využívá tlakového napětí, které umožňuje uzavírání pórů a tím pádem docílení celkového zvýšení životnosti součástek. [54]



Obrázek 28 3D vizualizace porozity ve středu 10 mm měřené části (vlevo před LSP), (vpravo po LSP) [54]

Obrázek 28 znázorňuje značnou redukci porozity, zejména pro póry nacházející se v povrchové vrstvě. [54]

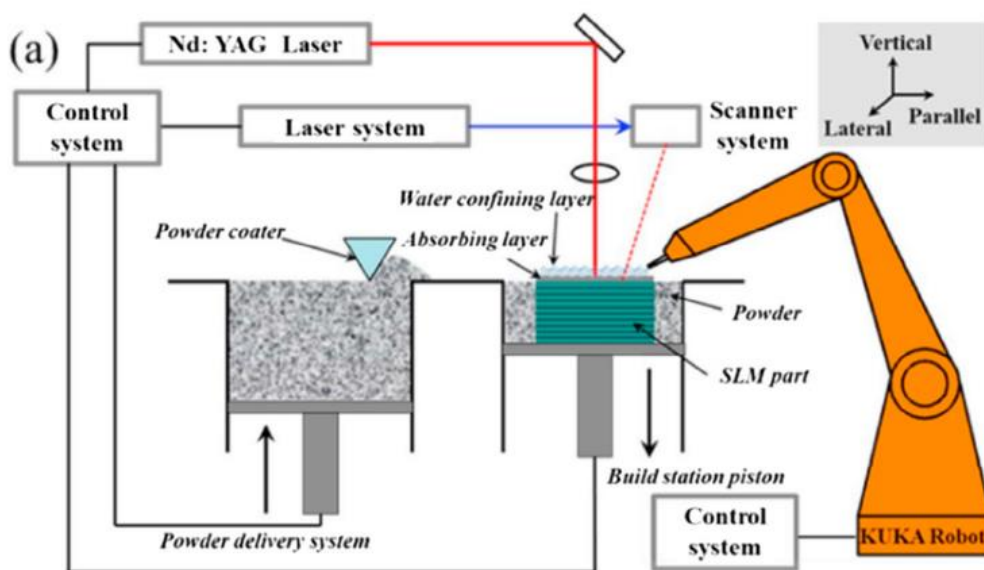
4.10 Aplikace LSP v aditivní výrobě kovů

Aditivní výroba kovů se v posledních letech široce rozšířila díky svým možnostem výroby součástek s komplexní geometrií, které by se nedaly zhotovit klasickými metodami. Nicméně aditivní výroba kovových součástek zahrnuje mnoho problémů, jako je vyšší pórovitost a přítomnost tahového zbytkového napětí. Výsledkem jsou součástky, které mají běžně špatné únavové vlastnosti.

K vyřešení těchto problémů se nabízí využití klasické technologie SP, nebo LSP. Po použití technologie LSP, či SP dojde ke zlepšení únavových vlastností, kde ve srovnání LSP vykazuje dosažení lepších vlastností než SP, a to díky tomu, že technologie LSP dokáže indukovat zbytkové napětí hlouběji v daném materiálu. [55]

Nicméně LSP je limitováno hloubkou, kterou dokážou ovlivnit laserové vlny. LSP je převážně používáno na povrchovou vrstvu a nedokáže odstranit tahové zbytkové napětí v celém vzorku. Jako eliminace tohoto problému se nachází koncept aditivní výroby se souběžným použitím LSP. Tento koncept spočívá ve vytvoření několika vrstev například technologií selective laser melting (SLM) a následném použití LSP (obrázek 29). [55]

Výsledkem je efektivní způsob ovlivnění vlastností součástek vytvořených aditivními technologiemi, kde souběžné použití s LSP je výrazně efektivnější. Nicméně souběžné použití by znamenalo značné zvýšení komplexnosti výroby a nákladů. [55]



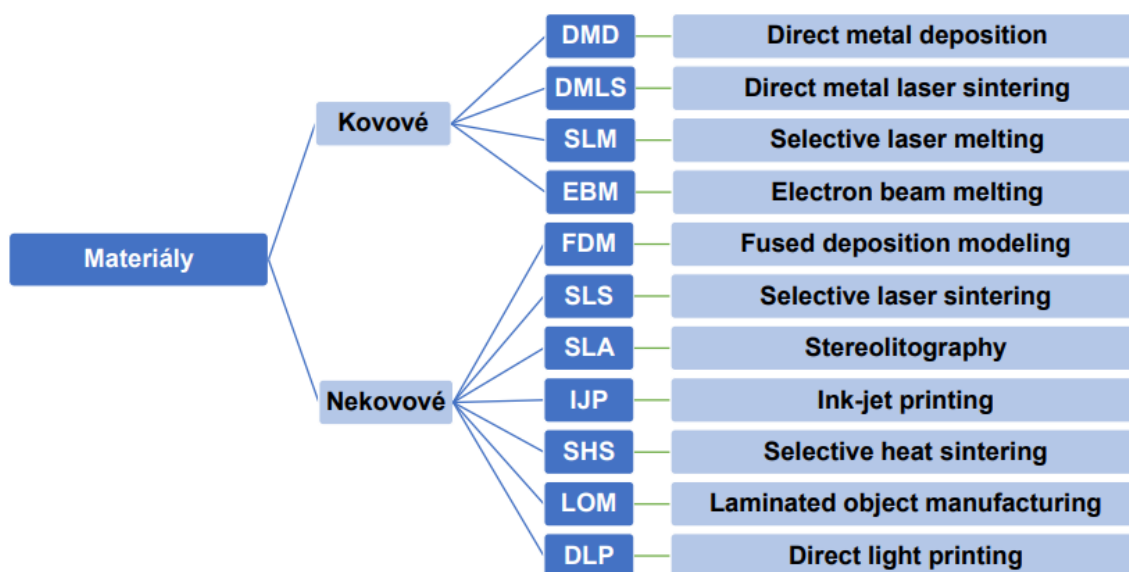
Obrázek 29 Kombinace aditivní výroby technologií SLM s LSP [55]

5. Aditivní technologie

Aditivní technologie neboli Additive Fabrication je proces výroby, který na místo odebrání materiálu materiál přidává. Dále je hojně využívána v oborech jako je Rapid Prototyping, Rapid Tooling a Additive Manufacturing. Hlavním principem aditivní technologie je postupné kladení vrstev materiálu na sebe několika různými způsoby. [56]

Přídavný materiál je nejčastěji ve formě prachu, kapaliny, drátu, či pásu. Materiál je dále nataven nebo vytvrzen dle dané technologie za pomoci laseru, elektronového svazku, plazmy, ultrafialových paprsků, ultrazvukového navařování nebo lepidla. [56]

Postup při výrobě aditivními technologiemi je následovný: nejprve se musí vytvořit model v jakémkoliv CADu, dále se model konvertuje do formátu pro 3D tisk, nejčastěji STL formát. STL formát je nahrán no výrobního zařízení, kde probíhá nastavení procesu tisku samotného. Následně po nastavení je objekt vytištěn a odstraněn ze zařízení. Poslední fází je postprocessing, který se skládá například z odebrání přebytečného materiálu, odstranění podpor a v některých případech i leštění, barvení, či jiné dokončovací úpravy materiálu. [56]



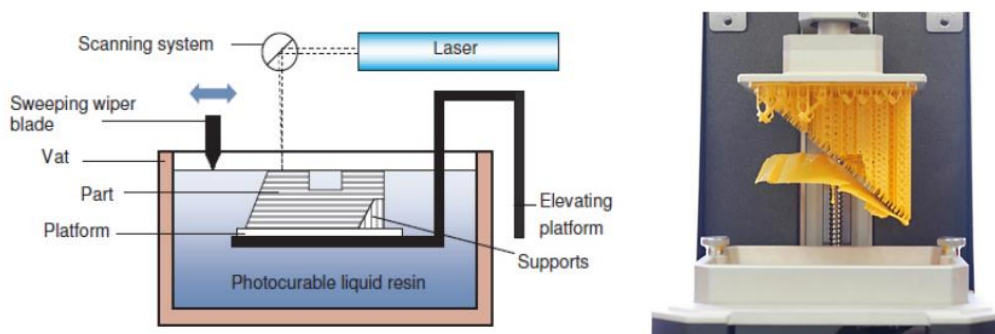
Obrázek 30 Klasifikace aditivních technologií dle používaného materiálu [56]

5.1 Aditivní technologie pro zpracování polymerů

Aditivní technologie umožňují 3D tisk z plastů, kompozitů, keramiky, papíru, vosku, biomateriálů a mnoha dalších. Materiál je nejčastěji ve formě kapalné, prášku nebo pevné. Oproti 3D tisku kovů je tisk polymerních materiálů levnější a z pravidla i rychlejší. Mezi nepoužívanější technologie se řadí Fused deposition modeling, Selective laser sintering, Stereolitografie, Ink-jet printing, Selective heat sintering, Laminated object manufacturing a Direct light printing. [56]

5.1.1 Stereolitografie

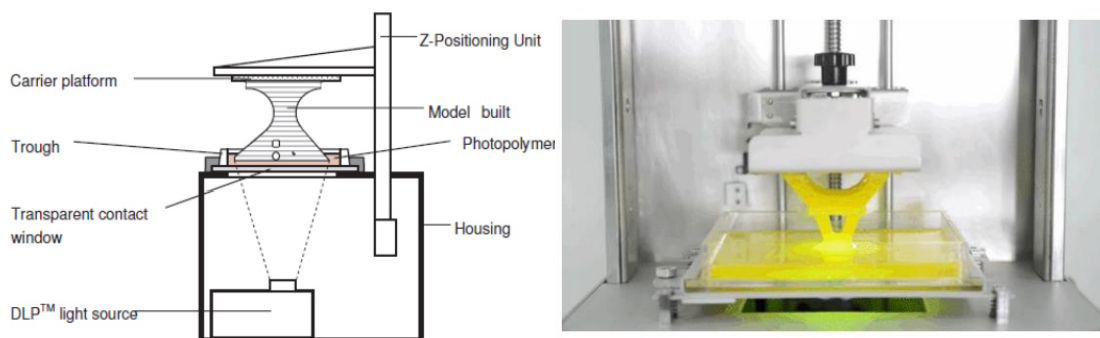
Stereolitografie neboli SLA je aditivní technologie, která využívá jako materiál světlocitlivý fotopolymer. SLA je zároveň nejstarší a jedna z nejpřesnějších metod 3D tisku. Tloušťka vrstvy se pohybuje v rozmezí 0,05 až 0,25 mm. Princip SLA spočívá v ozařování jednotlivých vrstev objektu za pomoci ultrafialového laserového paprsku, která vrstvu vykresluje na hladinu fotopolymeru. K vytvrzování využívá UV světlo. [56]



Obrázek 31 Princip SLA (vlevo), výsledný model (vpravo) [56]

5.1.2 Digital light projection

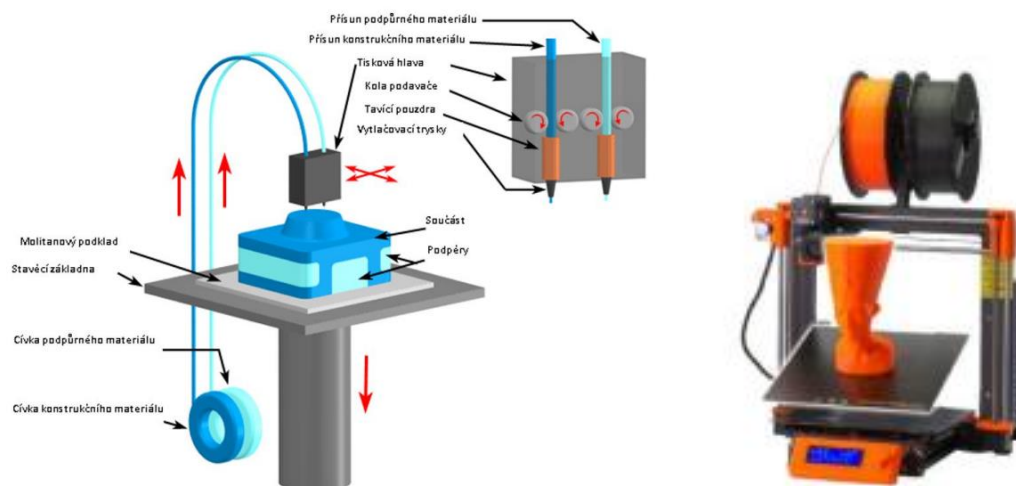
Digital light projection neboli DLA je technologie založena na principu nasvícení fotopolymeru UV světlem. Tloušťka vrstvy je v rozmezí 0,05 až 0,1 mm s dobou expozice 2 až 20 s. Technologie DLP funguje na stejném principu jako technologie SLA. [56]



Obrázek 32 Princip DLP (vlevo), výsledný model (vpravo) [56]

5.1.3 Fused deposition modeling/Fused filament fabrication

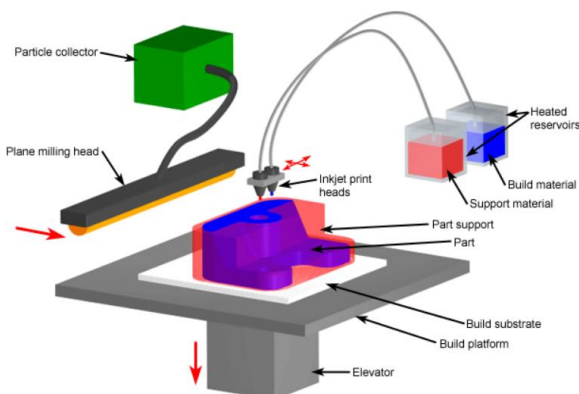
FDM/FFF je jedna z nejrozšířenějších metod aditivních technologií. Proces spočívá v natavování přídavného materiálu a jeho následné vytlačování malou tryskou. Konstrukční materiál může být například ABS, PC, PLA a mnoho dalších, jako podpůrný materiál se nejčastěji používá vosk, který je z finálního modelu odstraněn ponořením do rozpouštěcího roztoku. Tloušťka vrstvy se pohybuje v rozmezí 0,05 až 0,33 mm. [56]



Obrázek 33 Princip FDM (vlevo), výsledný model s tiskárnou (vpravo) [56]

5.1.4 Ink-jet printing/Direct ink writing

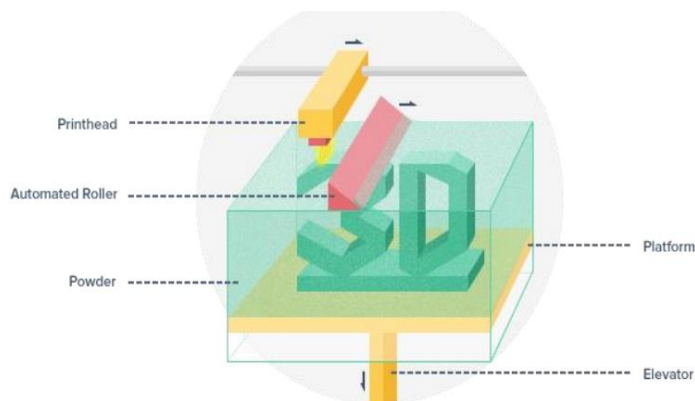
Technologie Ink-jet printing probíhá podobně jako FDM na postupném vytlačování materiálu z trysky a kladením vrstev na sebe. Vytlačování materiálu je prováděno dvěma způsoby, prvním je stálé vytlačování a druhý je postupným nanášením kapiček. Používané materiály jsou převážně polymery a polovodiče. Tloušťka vrstvy se pohybuje v rozmezích desetin milimetrů. Nejčastější použití a aplikace se nachází v elektronice a biochemii. [56]



Obrázek 34 Schéma technologie Ink-jet printing [57]

5.1.5 Selective heat sintering

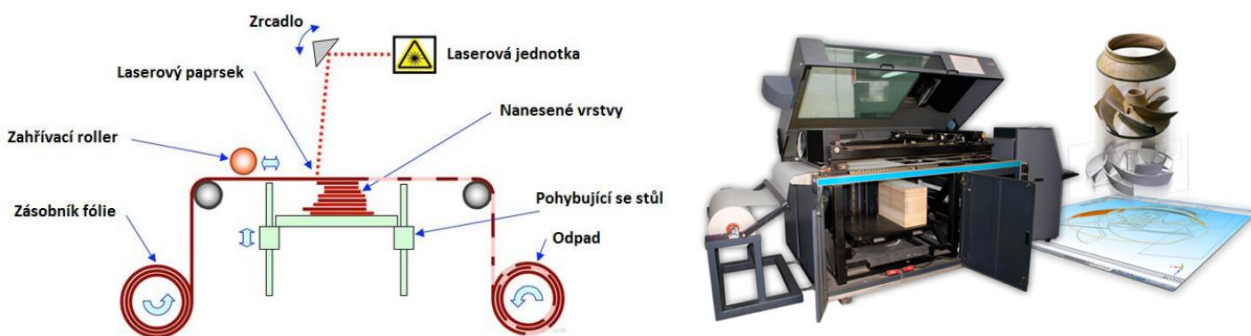
SHS neboli selective heat sintering je založena na principu vytvrzování termoplastu za pomoci tepelné hlavy. Materiál je v práškové formě postupně přidáván po vrstvách a následně selektivně vytvrzován. Přesnost SHS není příliš vysoká, a proto tato technologie nachází uplatnění především pro výrobu levných prototypů. [56]



Obrázek 35 Princip SHS [56]

5.1.6 Laminated object manufacturing

Laminated object manufacturing (LOM) je metoda, která spočívá ve vyřezávání a následném lepení vrstev objektu. Používanými materiály jsou nejčastěji papír, fólie a kompozity. LOM je poměrně rychlá technologie tisku s relativně nízkými náklady na tisk. Nevýhodou je velice malá přesnost s vysokým množstvím odpadu materiálu. [56]



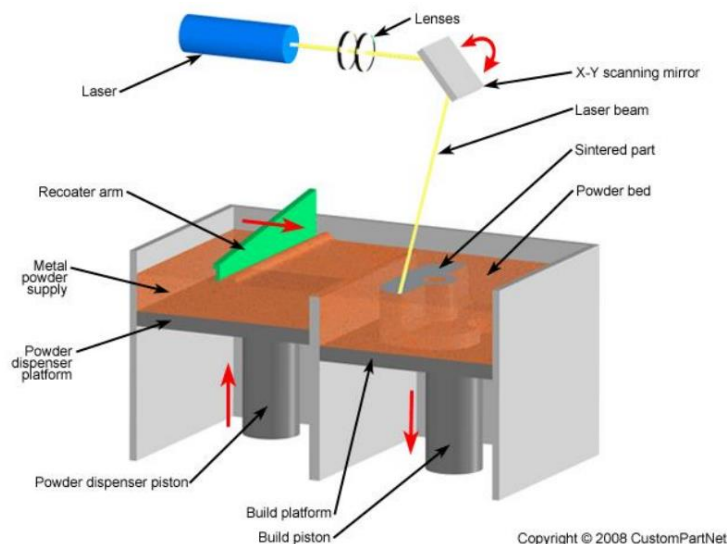
Obrázek 36 Princip LOM (vlevo), tiskárna technologie LOM (vpravo) [56]

5.2 Aditivní technologie pro zpracování kovů

Aditivní technologie pro zpracování kovů využívají k tisku materiál ve formě prášku, struny nebo drátu. Nejčastěji používané prášky jsou ocelové, titanové slitiny, hliníkové slitiny a spousta dalších. Kovový tisk je schopen vytvořit součástky se složitými tvary, které by nešly zhotovit konvenčními metodami. Využití kovového tisku, i přes vysoké náklady na zařízení, se nachází zejména v automobilovém, leteckém a lékařském průmyslu. Mezi nejpoužívanější metody kovového tisku patří Direct metal laser sintering, Electron beam melting a hybridní technologie Wire and arc additive manufacturing. [56]

5.2.1 Direct metal laser sintering

Direct metal laser sintering neboli DMLS je technologie kovového tisku, která využívá jako konstrukční materiál kovy ve formě prášku. Tloušťka vrstvy je v rozmezí 20 až 100 μm s přesností 0,02 – 0,25 mm. Proces metody spočívá v pohybu tiskové hlavy přes tiskovou plochu s naneseným práškem, který je následně ozařován a spékán laserovým paprskem. Po dokončení výrobního procesu se vyjme z pracovního prostoru a probíhá postprocessing, který se obvykle skládá z odebírání podpěr, odstranění prášku, tepelné úpravy a různé dokončovací operace. Jednou z výhod je, že nespotřebovaný prášek lze ve většině případech znovu použít. Mezi nevýhody patří časová náročnost procesu, pořizovací náklady, nutnost postprocessingu a neschopnost tisku uzavřených dutin. [56]



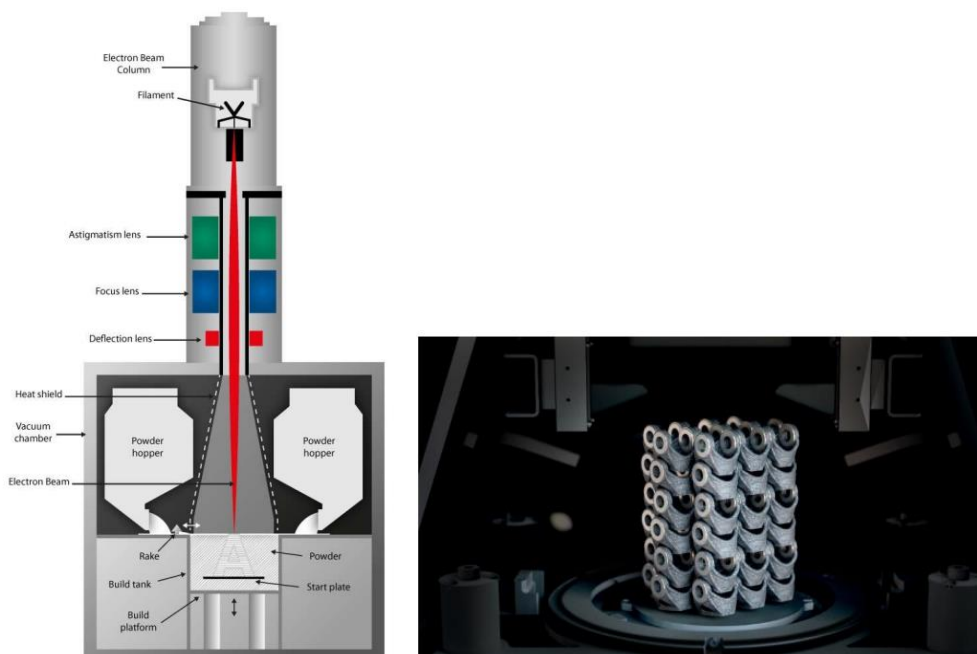
Obrázek 37 Schéma technologie DMLS [56]



Obrázek 38 Pracovní prostor technologie DMLS [56]

5.2.2 Electron beam melting

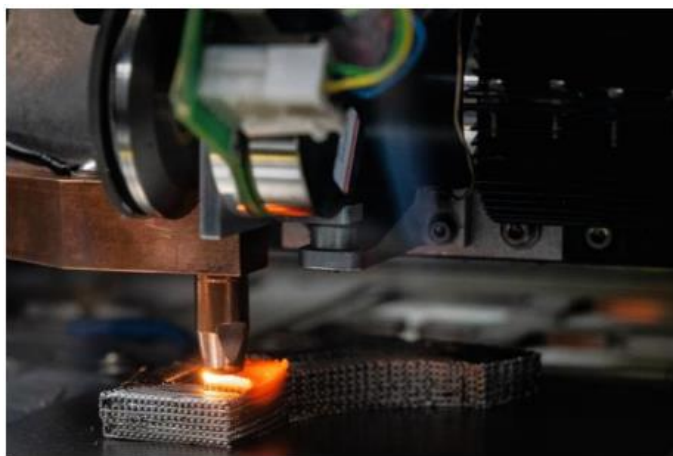
EBM neboli electron beam melting je technologie kovového tisku, která spočívá v tavení prášku ve vrstvách pomocí paprsku elektronů. Proces probíhá ve vakuu za zvýšené teploty. Na rozdíl od DMLS mají výsledné součástky velice malé vnitřní pnutí, a tudíž není třeba dodatečného tepelného zpracování. Dalšími výhodami jsou vynikající technické vlastnosti vytištěných objektů a rychlejší proces výroby než u DMLS a SLS. Nevýhodou je menší přesnost, dražší provoz a nutnost vakuové komory. [56]



Obrázek 39 Schéma EBM (vlevo), vytištěná součást metodou EBM (vpravo) [56]

5.2.3 Wire and arc additive manufacturing

WAAM je metoda výroby, která využívá postupného navařování jednotlivých svarů vedle sebe (resp. na sebe). Jako přídavný materiál se využívá kovového drátu, který je navařován konvenčními metodami svařování TIG, MIG, MAG. Samotný proces vyžaduje nutnost automatizace, která je zprostředkována robotickým pracovištěm. Výhodou WAAM je vysoká rychlost, minimální odpad, velké rozměry součástí, nízké provozní náklady. Nevýhodou je nižší tvarová složitost. [56]



Obrázek 40 Proces technologie WAAM (vlevo), výsledná součást (vpravo) [56]

6. Realizace a vyhodnocení experimentu

Cílem praktické části bakalářské práce bylo porovnání vybraných parametrů integrity povrchu slitiny hliníku AlSi10Mg před a po aplikaci technologie LSP na vytištěné vzorky. Mezi vybrané parametry integrity povrchu byla zvolena textura povrchu a porozita.

6.1 Měření vzorky AlSi10Mg

Vzorky byly vyrobeny ze slitiny hliníku AlSi10Mg, která se vyznačuje svými slévárenskými vlastnostmi, dobrá zabíhavost, smrštění, odolnost proti korozi a praskání. Nejčastěji se využívá na tenkostěnné výrobky s možností složitějších geometrií. Díky těmto vlastnostem je tato slitina vhodná pro 3D tisk.

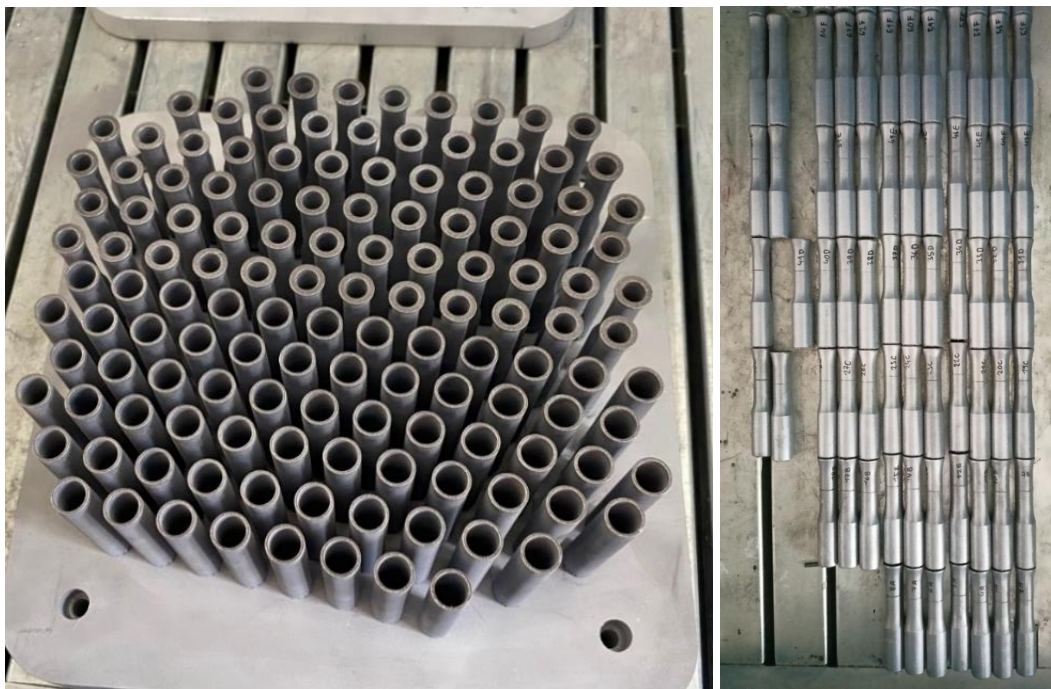
Tabulka 5 Chemické složení slitiny AlSi10Mg [58]

Prvek	Podíl [%]
křemík (Si)	9 – 11
hořčík (Mg)	0,2 – 0,45
železo (Fe)	0 – 0,55
mangan (Mn)	0 – 0,45
titan (Ti)	0 – 0,15
měď (Cu)	0 – 0,10
zinek (Zn)	0 – 0,10
uhlík (C)	0 – 0,05
nikl (Ni)	0 – 0,05
olovo (Pb)	0 – 0,05
cín (Sn)	0 – 0,05
hliník (Al)	zbytek

Tabulka 6 Charakteristické vlastnosti materiálu (prášku) CL 31AL pro aditivní výrobu [58]

Veličina	90°	45°	0°
mez kluzu [N/mm ²]	211 ± 4	215 ± 3	205 ± 3
mez pevnosti [N/mm ²]	329 ± 4	346 ± 3	344 ± 2
tažnost [%]	9 ± 1	7 ± 1	6 ± 1
modul pružnosti v tahu [N/mm ²]	75 · 10 ³	75 · 10 ³	75 · 10 ³

Zkoumané vzorky byly vytištěny za pomoci metody spékání práškového lože s pomocí laseru (powder bed fusion) na tiskárně *Concept laser M2*, vytištěné vzorky byly odebrány z tiskové podložky, popsány a připraveny pro následné měření vybraných parametrů.



Obrázek 41 Vytištěné vzorky

6.2 Měření textury povrchu

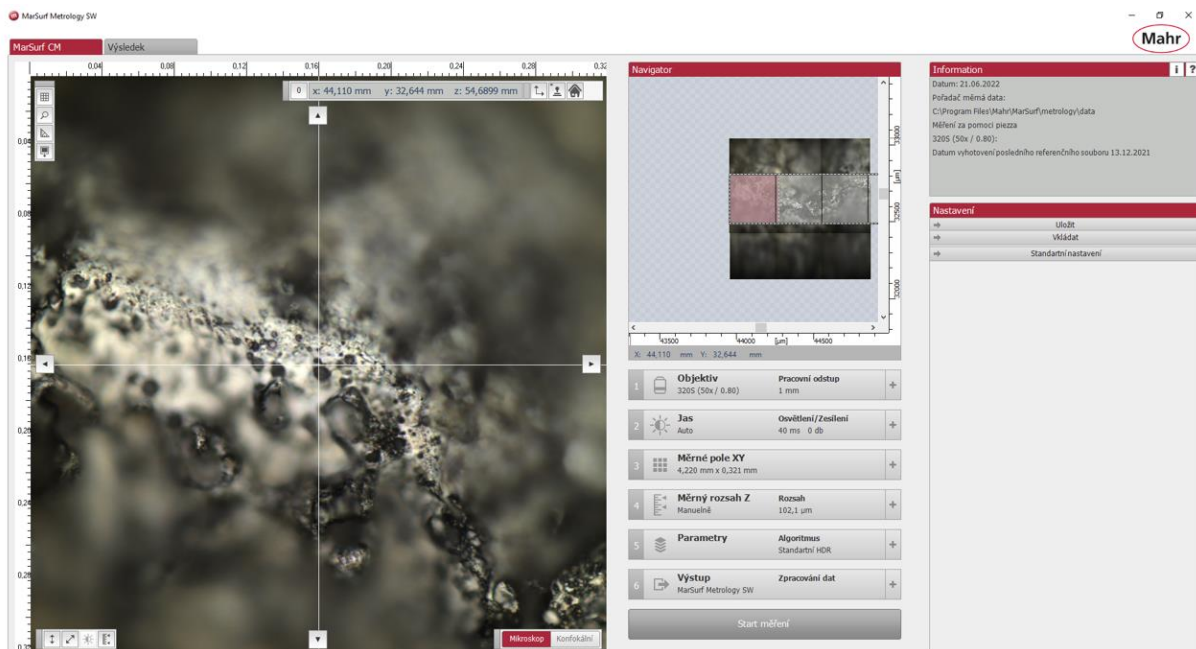
Pro hodnocení textury povrchu byl použit konfokální mikroskop v laboratořích ČVUT na Ústavu obrábění, projektování a metrologie. Konkrétně byl použit konfokální mikroskop *MarSurf CM Expert* (obrázek 44) a data byla následně zpracována v programu *MarSurf MfM*.

Postup měření

Samotný vzorek bylo nutno před měřením připevnit, aby se nepohnul. Měřená oblast byla stanovena na větším průměru vzorku s využitím objektivu pro padesátinásobné zvětšení *320S(50x/0.80)*. Dále se nastavila samotná výška měření a rozmezí, ve kterém se měřilo. Nastavené měrné pole pro osy XY bylo 4,220 mm x 0,321 mm.



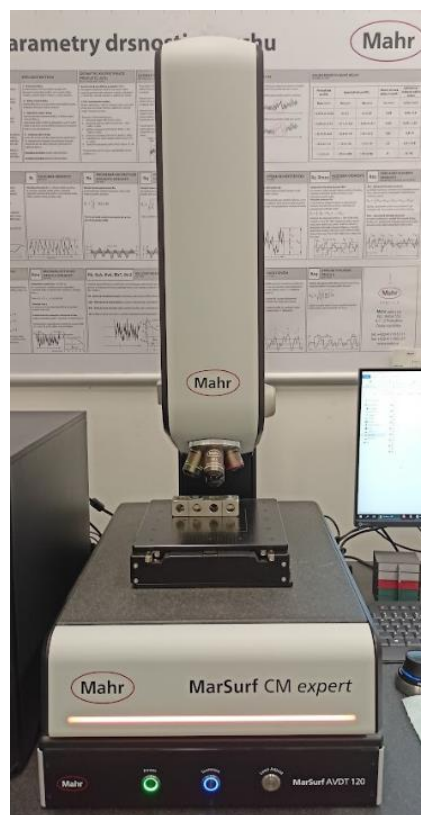
Obrázek 42 Detail upevněného vzorku



Obrázek 43 Pracovní plocha software MarSurf Metrology SW

Po změření vzorků byla data zpracována v programu *MarSurf MfM* pomocí následných kroků:

1. Level – Least squares plane method – Tento krok docílil vyrovnání nakloněného vzorku.
2. Fill in non-measured points – Tato operace slouží k doplnění chybějících bodů v rámci vyhodnocované oblasti.
3. Treshold – Operátor treshold slouží k odstranění odlehlých hodnot vyskytujících se v rámci měření.
4. Metrological filter – Metrologický filtr posloužil k rozdělení mikrogeometrie povrchu na drsnost a vlnitost. Naměřená data byla rozdělena následně za pomoci filtrů.
5. Waviness (S-F) – Vlnitost S-F: Gaussovský, 0,2500 mm filtr.
6. Roughness (S-L) – Drsnost S-L: Gaussovský, 0,2500 mm filtr.
7. Extract layers – Operací extract layers byla z naměřených dat vybrána pouze vrstva topografie povrchu.
8. Convert surface into series of profiles – Touto operací byla z povrchu extrahována řada profilů, ze kterých bylo prováděno statistické vyhodnocení vybraných parametrů profilu povrchu.



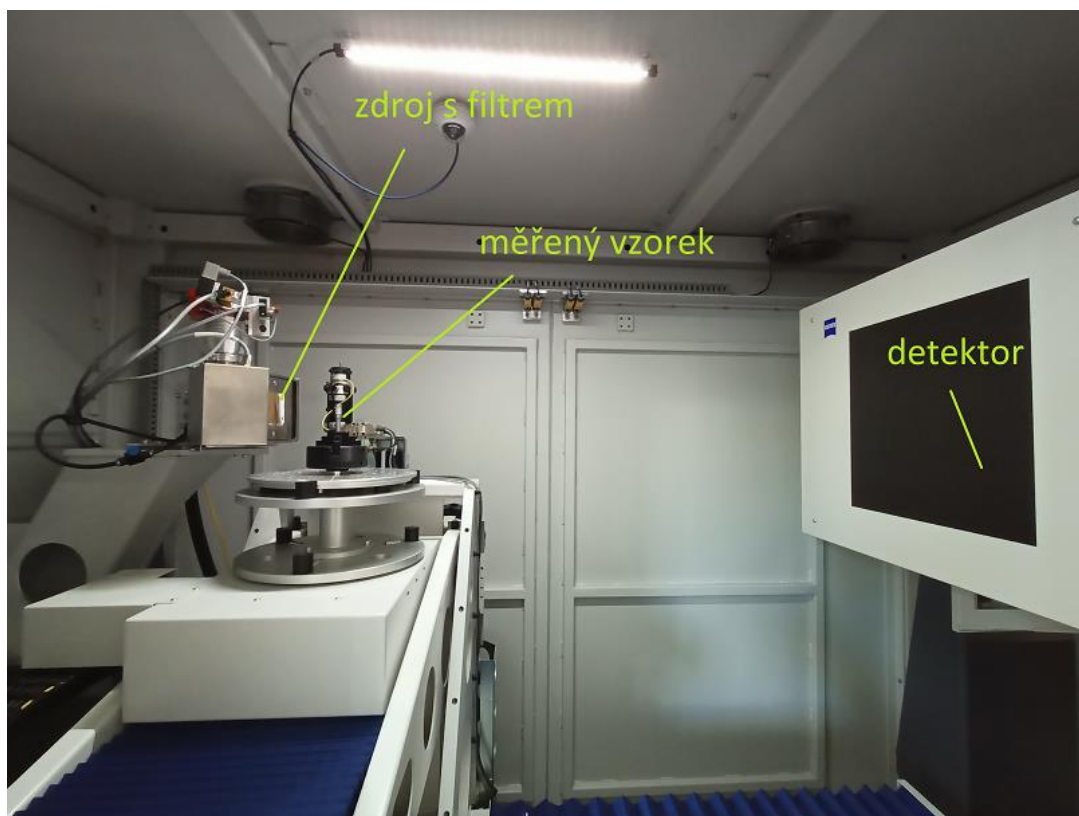
Obrázek 44 Konfokální mikroskop MarSurf CM expert

6.3 Měření porozity

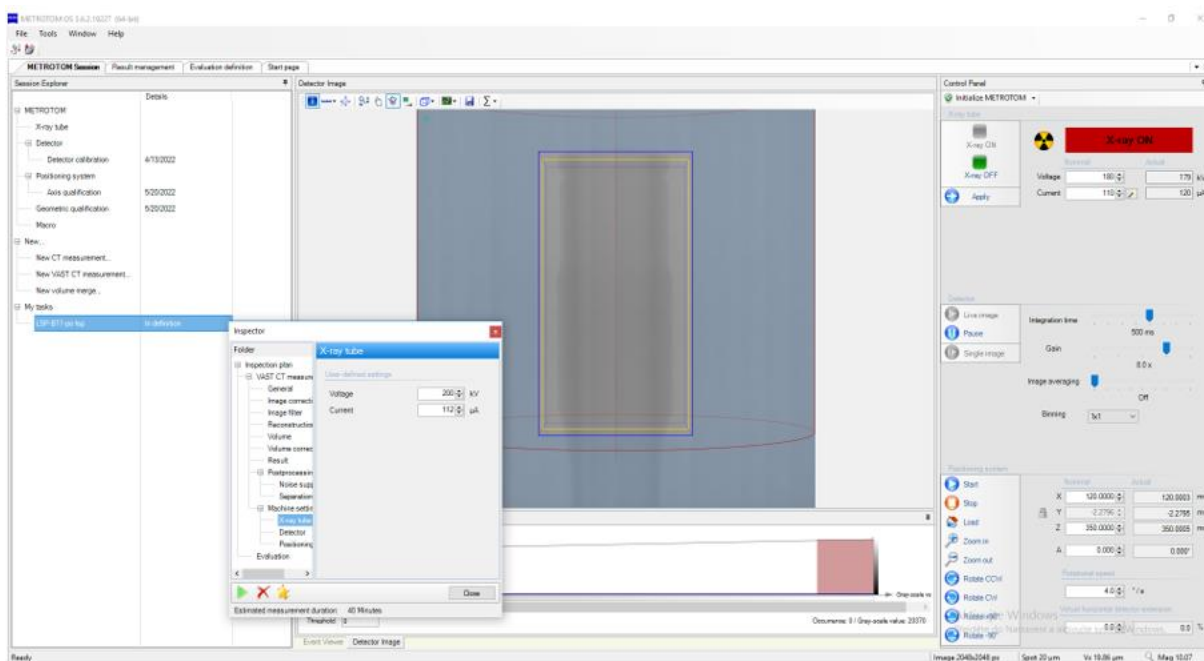
Porozita byla analyzována s využitím výpočetní tomografie. Vzorek byl nejprve upnut do plastového sklíčidla a následně uložen do měřicího zařízení CT na otočný stůl. Skenování probíhalo prostřednictvím zařízení *METRTOM 1500*, od firmy Zeiss. Zpracování dat, rekonstrukci mraku bodů z dílu, zajišťuje operační software *ZEISS METROTOM OS 3.6.219227*.



Obrázek 45 Upevněný vzorek v plastovém sklíčidle



Obrázek 46 Pohled pracovního prostor CT



Obrázek 47 Pracovní prostředí software METROTOM OS

V programu *METROTOM OS 3.6.219227* proběhlo nastavení parametrů procesu skenování. Mezi nejdůležitější parametry patří: napětí, integration time, image averaging, gain a vzdálenost vzorku od zdroje v ose X.

Integration time

Integrační čas znamená dobu expozice jednoho snímku na detektoru. Čím vyšší bude hodnota nastavení integračního času, tím bude jasnější obraz. Nevýhodou vysokého integračního času je celkové zvýšení skenovacího času.

Gain

Gain je faktor, který zesiluje citlivost fotodiody detektoru. Při zvýšení dochází k zesílení signálu obrazu a zvětšení přítomnosti šumu.

Image averaging

Funkce image averaging slouží k nastavení počtu snímků, které jsou pořízeny v jedné poloze dílu, v rámci vyhodnocení jsou tyto snímky následně zprůměrovány do jednoho.

Tabulka 7 Nastavené parametry pro skenování vzorků

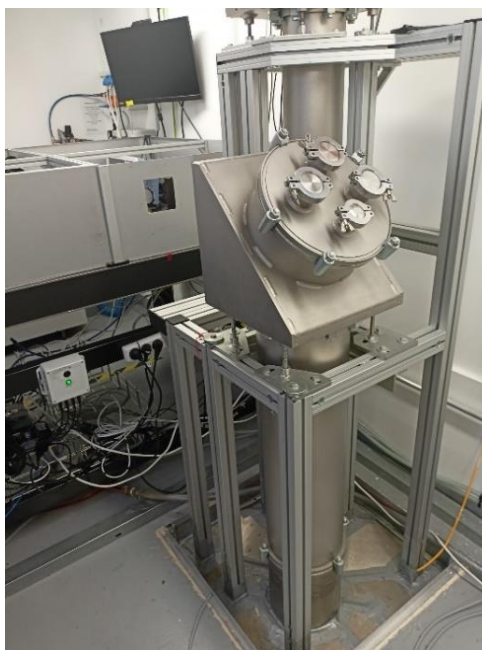
Napětí U [kV]	200
Proud I [A]	112
Osa X [mm]	120
Osa Z [mm]	345
Integration time [ms]	2000
Gain [-]	4x
Filtr Cu [mm]	0,5

Následné zpracování skenovaných dat proběhlo v softwaru *VGSTUDIO MAX 3.2*.

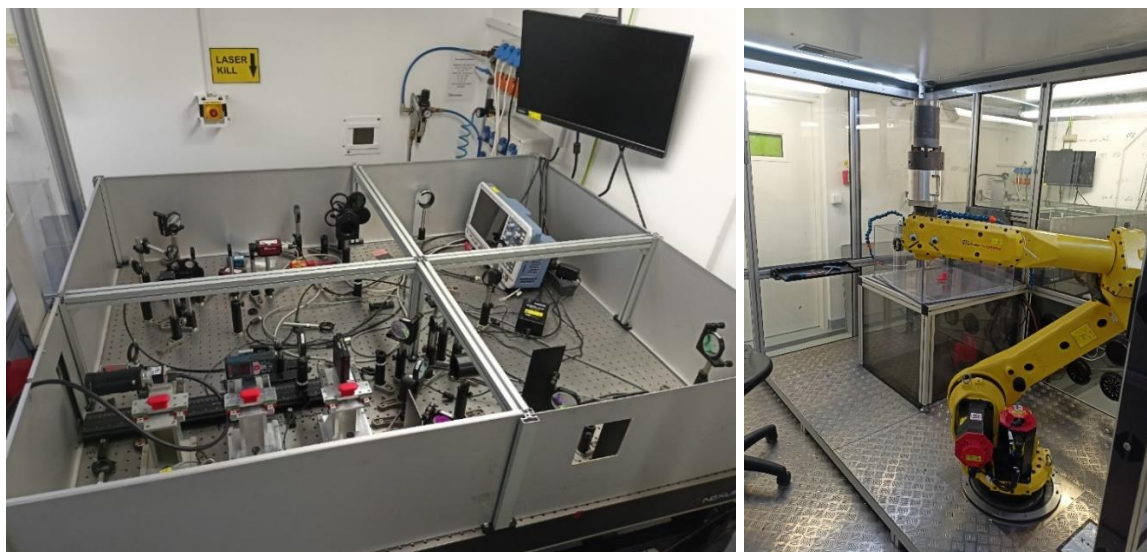
6.4 Aplikace LSP

Proces LSP se prováděl v laboratořích HiLASE v Dolních Břežanech. K experimentu byl použit vysokoenergetický nanosekundový laser *Bivoj* a stanice pro LSP (obrázek 49). Proces peenování se prováděl na vzorcích, které byly umístěny v LSP stanici na robotickém ramenu pomocí sklíčidla. Vzorky se v průběhu aplikace LSP otáčely na rotující části robota. Experiment probíhal bez použití absorpční vrstvy (pásky) s využitím vody.

Použité parametry laseru se pohybovaly v rozmezích 1 – 3 J energie na jeden pulz, délka pulzu 14 ns, frekvence 10 Hz, velikost laserového paprsku 1 – 2 mm a hustota výkonu 3 až 15 GW/cm². Mezi další důležité nastavení, které je třeba zmínit je překrývání jednotlivých pulzů laseru. Překrývání pulzů se pro vzorky 1A až 16B pohybovalo v rozmezí 0 % až 90 %. Vzorky zároveň byly opracovány různými pohybovými metodami, např.: spirálové peenování, či po obvodu.



Obrázek 48 Laser beam distribution system (přívod laserového svazku)



Obrázek 49 Optická dráha laseru (vlevo), LSP stanice (vpravo)

Parametry laseru Bivoj

- Opakovací frekvence: 1 Hz a 10 Hz
- Délka pulzu: 10 ns a 5 ns
- Rozměry svazku: 22 x 22 mm (čtverec)
- Vlnová délka: 1030 nm, 515 nm
- Lineární polarizace
- Energie na 1030 nm: 5,5 – 5 J, 10 ns, energie na 515 nm: 4,2 – 3,8 J, 5 ns
- Dostupnost: 11 am – 6 pm
- Fluktuace energie mezi pulzy: 3 %

Parametry stanice pro LSP

- Maximální zatížení: 20 kg
- Maximální velikost opracovávaného vzorku: 0,5 m
- Velikost svazku: až 5 x 5 mm
- Produktivita: až 200 cm²/hod

Tabulka 8 Tabulka použitých hodnot LSP pro jednotlivé vzorky

Označení vzorku	Energie pulzu [J]	Délka pulzu [ns]	Frekvence opakování [Hz]	Velikost paprsku [mm]	Překrytí (overlap) v ose Y [%]	Překrytí (overlap) v ose Z [%]	Oblast pulzu [mm ²]	Hustota výkonu [GW/cm ²]	Rychlost otáčení [mm/s]	Čas [s]
1A	2	14	10	1,5	45%	45%	2,25	6,35	8,25	111
2A	1	14	10	1,5	45%	45%	2,25	3,17	8,25	111
3A	2	14	10	1	45%	45%	1	14,29	5,5	250
4A	1	14	10	1	45%	45%	1	7,14	5,5	250
5A	1	14	10	1,5	0%	0%	2,25	3,17	15	34
6A	3	14	10	2	0%	0%	4	5,36	20	19
7A	2	14	10	2	0%	0%	4	3,57	20	19
8A	2	14	10	1	45%	45%	1	14,29	5,5	250
9B	2	14	10	1,5	45%	45%	2,25	6,35	8,25	111
10B	2	14	10	1,5	45%	45%	2,25	6,35	8,25	111
11B	2	14	10	1,5	45%	45%	2,25	6,35	8,25	111
12B	2	14	10	2	90%	90%	4	3,57	2	951
13B	1	14	10	1,5	90%	90%	2,25	3,17	1,5	1691
14B	3	14	10	1,5	90%	90%	2,25	9,52	1,5	1691
15B	2	14	10	1	90%	90%	1	14,29	1	3804
16B	3	14	10	2	45%	45%	4	5,36	11	35



Obrázek 50 Vzorky po aplikaci LSP

7. Vyhodnocení výsledků

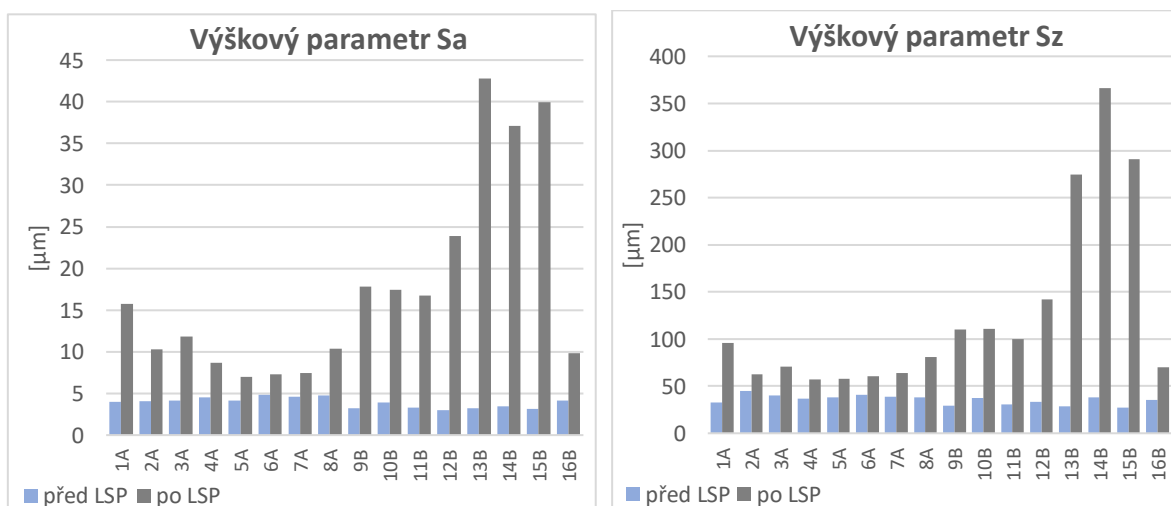
7.1 Výsledky měření textury povrchu

Naměřené výsledné hodnoty byly zpracovány do tabulek, ze kterých vyplývá, že po aplikaci LSP na tyto vzorky, došlo ke značnému zvýšení hodnot parametrů textury povrchu. Nejmarkantnější změna u průměrné aritmetické úchytky povrchu drsnosti nastala na vzorku 14B, kde došlo ke zvýšení o 15,834 μm (viz příloha 1). Zvýšení této hodnoty způsobila příliš vysoká hodnota nastavené hustoty energetického toku laseru a 90% překrytí pulzů. Průměrná aritmetická úchytka profilu vlnitosti vzrostla o 32,695 μm u vzorku 13B. Průměrná aritmetická úchytka základního profilu vzrostla o 40,072 μm u vzorku 13B.

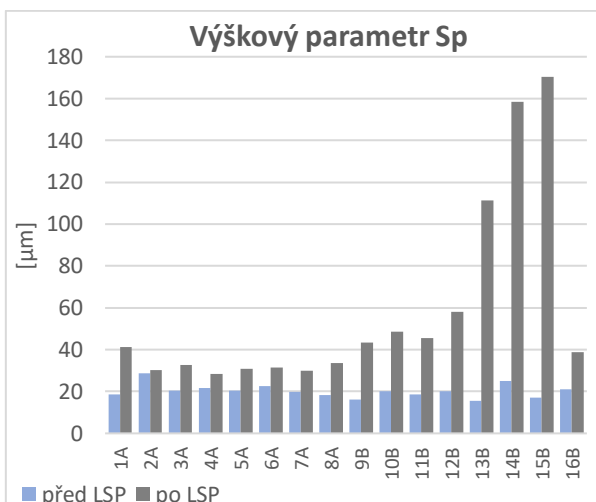
K nejmenšímu zhoršení kvality textury povrchu pro parametr Ra došlo u vzorku 5A a to o 1,574 μm . Pro parametr Wa o 0,912 μm u vzorku 7A. Pro parametr Pa došlo k nejmenšímu zvýšení o 2,770 μm u vzorku 5A. Příčinou nízkého zvýšení hodnot pro tyto vzorky byla aplikace LSP s 0% překrytí pulzů a nižší hodnota energetického toku.

Z těchto naměřených hodnot vyplývá, že aplikace LSP negativně ovlivňuje texturu povrchu a v případě nevhodné volby parametrů LSP i velmi výrazně.

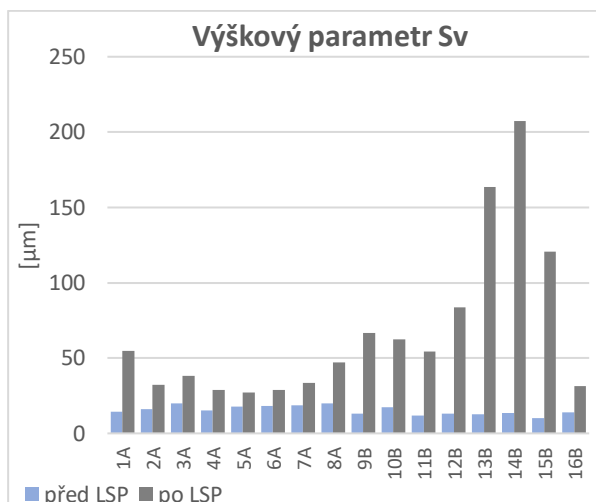
Výsledné naměřené hodnoty v podobě protokolu pro jednotlivé vzorky jsou zaznamenány v příloze 1. Kvůli příliš velkému rozsahu dat byly vybrány pouze 2 vzorky ke znázornění.



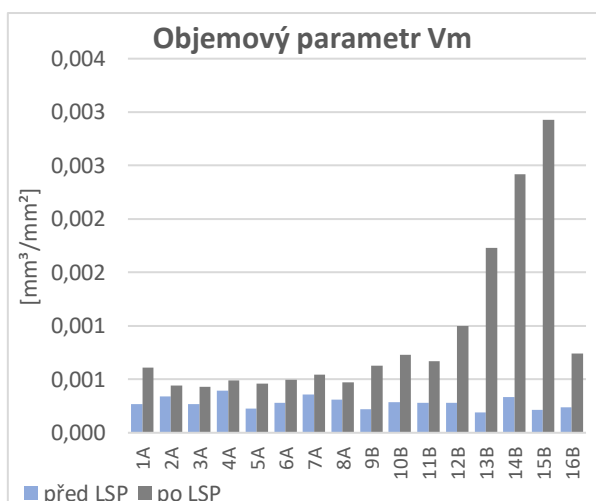
Obrázek 51 Výškový parametr Sa před a po aplikaci LSP Obrázek 52 Výškový parametr Sz před a po aplikaci LSP



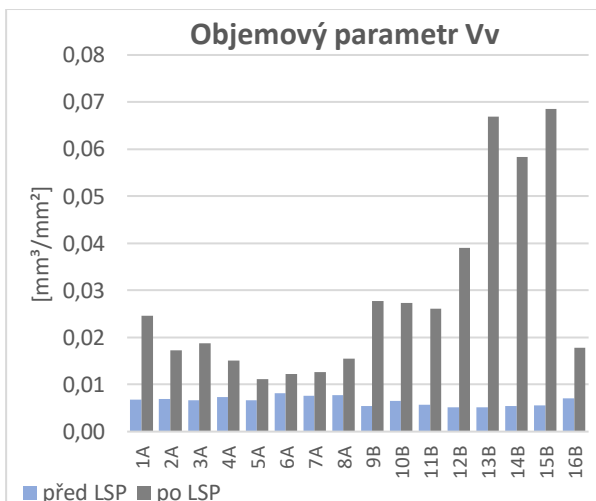
Obrázek 53 Výškový parametr Sp před a po aplikaci LSP



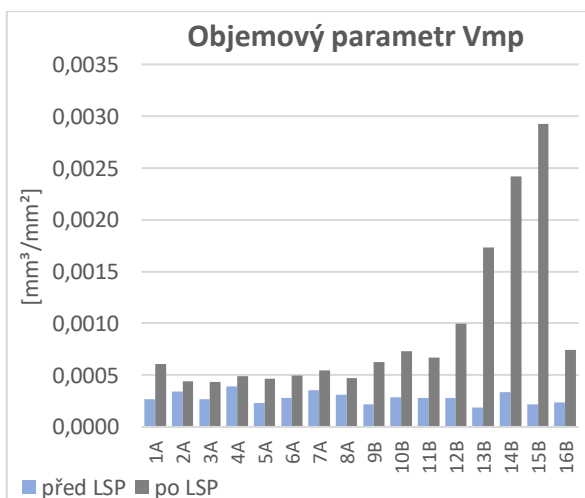
Obrázek 54 Výškový parametr Sv před a po aplikaci LSP



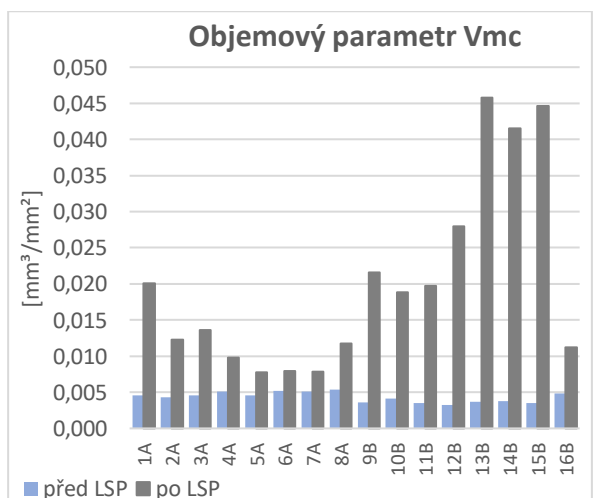
Obrázek 55 Objemový parametr Vm před a po aplikaci LSP



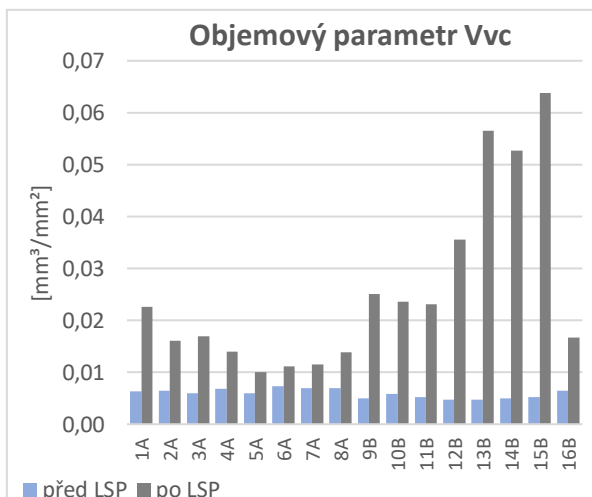
Obrázek 56 Objemový parametr Vv před a po aplikaci LSP



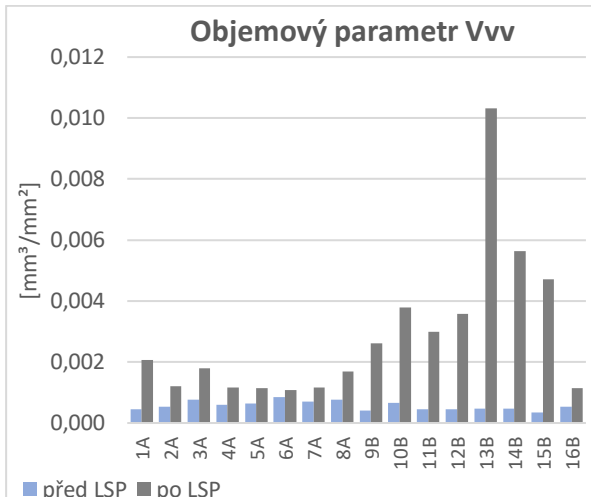
Obrázek 57 Objemový parametr Vmp před a po aplikaci LSP



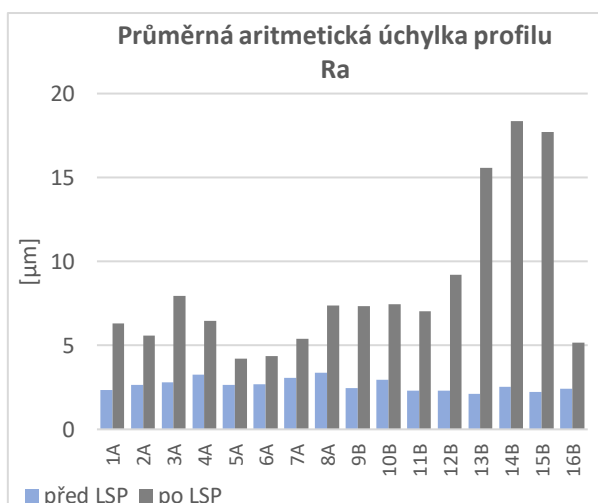
Obrázek 58 Objemový parametr Vmc před a po aplikaci LSP



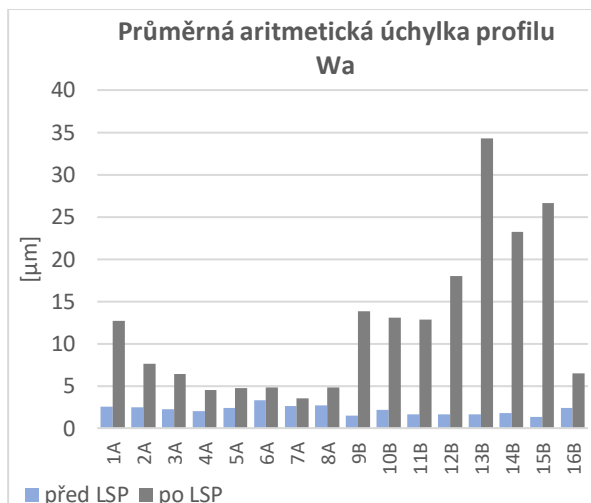
Obrázek 59 Objemový parametr Vvc před a po aplikaci LSP



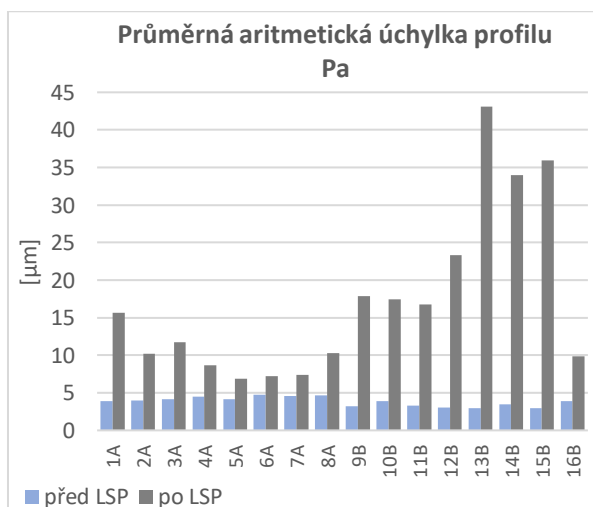
Obrázek 60 Objemový parametr Vvv před a po aplikaci LSP



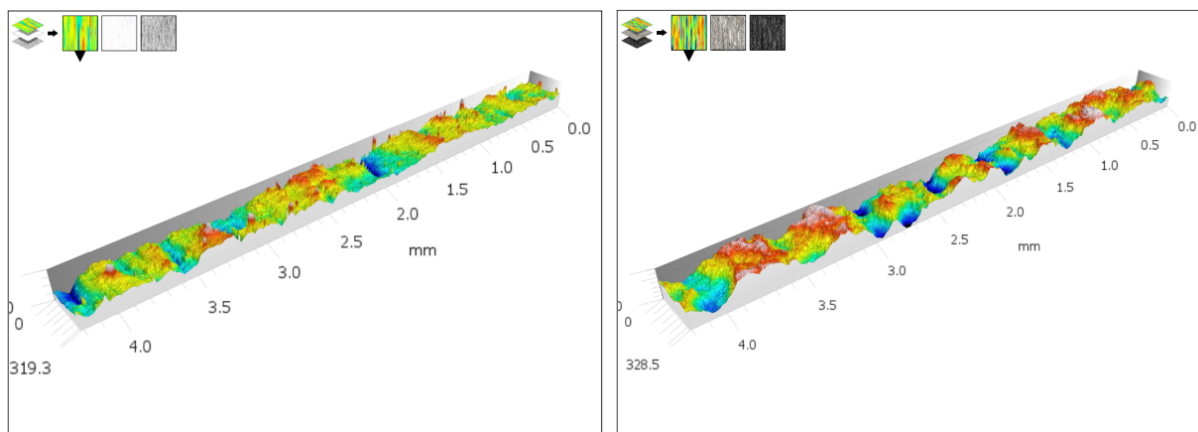
Obrázek 61 Parametr profilu Ra před a po aplikaci LSP



Obrázek 62 Parametr profilu Wa před a po aplikaci LSP



Obrázek 63 Parametr profilu Pa před a po aplikaci LSP



Obrázek 64 Porovnání textury povrchu před aplikací LSP a po na vzorku 3A

Diskuse vlivu vybraných parametrů LSP na parametr Sa

Posuzovaná průměrná aritmetická výška plochy pro vzorky 9B, 10B a 11B se při stejném nastavení parametrů laseru změnila minimálně a došlo k odchylce 6 %. Z naměřených parametrů pro vzorek 2A a 5A vychází, že zvýšením hodnot překrytí pulzů z 0 % na 45 % došlo k 32% zvýšení hodnoty Sa. Z nastavených hodnot laseru pro vzorky 12B a 15B vyplývá, že příliš vysoké zvýšení hustoty výkonu energetického toku o 10,72 GW/cm² mělo za následek 59% zvýšení hodnoty parametru Sa.

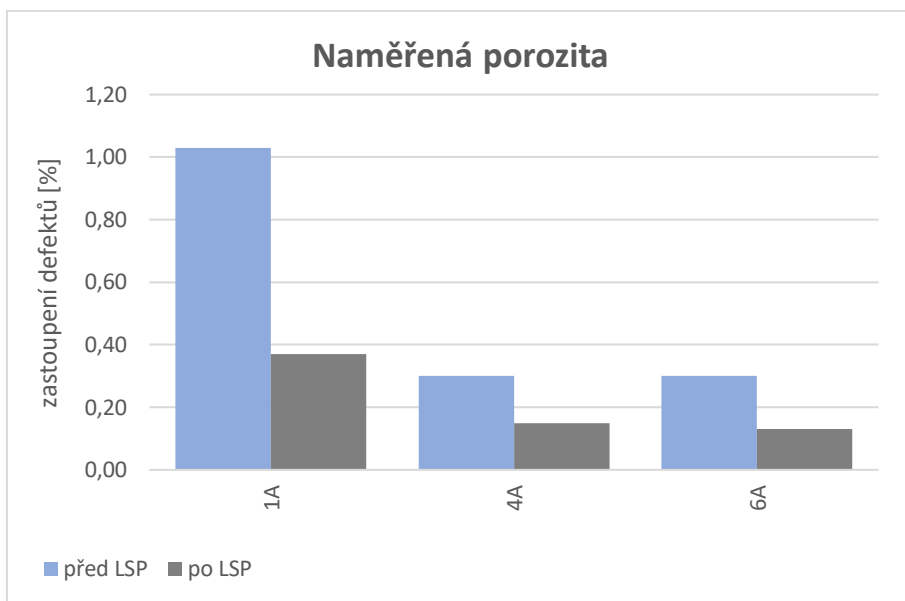
7.2 Výsledky měření porozity

Výsledné naměření porozity ukazuje značné snížení a uzavření pórů v blízkosti povrchové vrstvy vzorků (obrázek 55, 56, 57). Průměrné snížení porozity na zkoumaných vzorcích je o necelou polovinu z hodnot před aplikací LSP. Technologie LSP kvůli limitovanému dosahu ovlivnila zejména povrchovou vrstvu. Ukázalo se, že technologie LSP výrazně ovlivňuje porozitu, zejména v blízkosti ošetřeného povrchu. Největší vliv LSP nastal na vzorku 1A, kde došlo k 64 % snížení defektů.

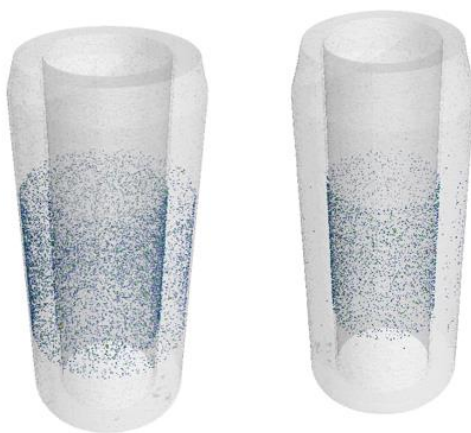
Při nastavení parametrů laseru na příliš vysokou hustotu energetického toku a 90% překrytí pulzů, byla vnesena do vzorku příliš vysoká hodnota tlakového napětí, které mělo za následek zvýšení tahového napětí v podpovrchové vrstvě (obrázek 69). Defekty se v této vrstvě spojily a mohlo by dojít k odtržení této části vzorku.

Tabulka 9 Naměřené hodnoty defektů ve vzorcích

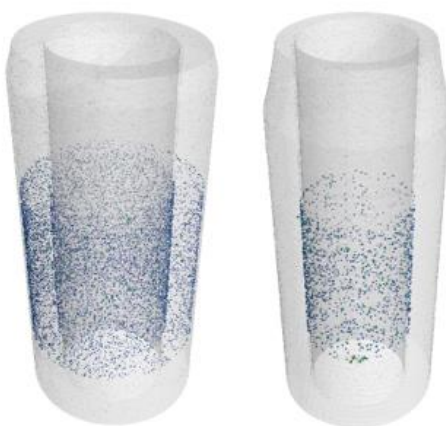
Veličina	Jednotky	A1 před	A1 po	A4 před	A4 po	A6 před	A6 po
Objem defektů	[mm ³]	7,598	2,957	2,445	1,180	2,446	1,070
Procentní vyjádření defektů	[%]	1,03	0,37	0,3	0,15	0,30	0,13



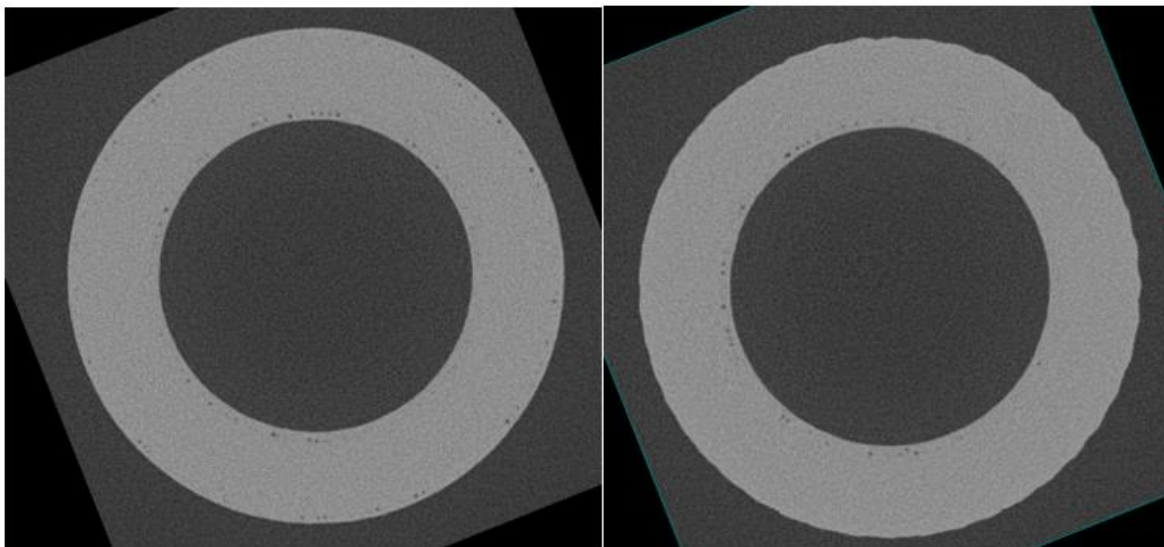
Obrázek 65 Naměřená porozita na vybraných vzorcích



Obrázek 66 Znáznornění porozity na vzorku 6A před použitím LSP (vlevo), po aplikaci LSP (vpravo)



Obrázek 67 Znáznornění porozity na vzorku 4A před použitím LSP (vlevo), po aplikaci LSP (vpravo)



Obrázek 68 Znáznornění pórovitosti vzorku 4A před aplikací LSP (vlevo), po aplikaci LSP (vpravo)



Obrázek 69 Znáznornění porozity na vzorku 14B

8. Závěr

Zaměření této bakalářské práce bylo na vyhodnocení vybraných parametrů integrity povrchu před a po aplikaci LSP na 3D tištěný povrch materiálu ze slitiny AlSi10Mg. V teoretické části byla nejprve vysvětlena integrita povrchu s vybranými parametry, které jsou pro technologii LSP důležité. Jedním z důležitých parametrů je zbytková napjatost, která byla podrobněji rozepsána i s příslušnými metodami měření. Následující část se věnovala tvrdosti, textuře povrchu a porozitě. Z těchto parametrů byla vybrána porozita a textura povrchu pro následné změření a vyhodnocení na testovaných vzorcích.

Další část pojednávala o dokončovacích metodách povrchu s rozdělením na metody s úběrem a bez úběru materiálu. Pro tuto práci byly důležitější metody bez úběru materiálu, poněvadž se mezi ně řadí samotná technologie LSP. Následně byla popsána technologie LSP od historie k principu, vlivu na vybrané vlastnosti integrity materiálů, využití a aplikaci v průmyslu. V neposlední řadě byla přiblížena aditivní výroba kovů, polymerních materiálů a jejich rozdělení dle způsobu tisku.

V rámci experimentu proběhlo měření 3D vytištěných vzorků před aplikací LSP na konfokálním mikroskopu pro získání parametrů textury povrchu a skenování na výpočetním tomografickém zařízení pro získání parametrů porozity. Po získání všech potřebných parametrů proběhla samotná aplikace LSP v laboratořích HiLase. Vzorky ošetřené technologií LSP byly znovu změřeny se stejným nastavením a následně došlo k vyhodnocení získaných parametrů.

Ze změřených parametrů textury povrchu došlo k největšímu zvýšení pro parametr R_a o 15,834 μm na vzorku 14B, pro W_a o 32,695 μm a pro P_a o 40,072 μm na vzorku 13B. Uvedené zvýšení parametrů bylo způsobeno nastavením laseru na příliš vysokou hodnotu hustoty energetického toku a 90% překrytí pulzů. Nejmenší zvýšení hodnoty R_a bylo o 1,574 μm , P_a o 2,770 μm na vzorku 5A a W_a o 0,912 μm na vzorku 7A. Zvýšení těchto hodnot bylo opět způsobeno zejména nastavenými parametry laseru hustotou energetického toku a překrytím pulzů.

Pro vybraný parametr průměrná aritmetická úchylka S_a se odchylka hodnot pohybovala v rozmezí 6 % při totožném nastavení parametrů laseru. Z výsledných hodnot vyplývá, že při zvýšení překrytí pulzů a zvýšení hustoty energetického toku laseru došlo k značnému zvýšení parametru S_a .



Výsledné hodnoty potvrzují, že aplikace LSP negativně ovlivňuje texturu povrchu. Konečná textura povrchu je značně ovlivňována volbou parametrů LSP a při nevhodném zvolení může dojít i velice k výraznému zhoršení parametrů textury povrchu.

Změřené parametry porozity proběhly na 3 vzorcích. Na všech vzorcích došlo k značnému snížení defektů, o 64 % (vzorek A1), o 50 % (vzorek A4) a o 57 % (vzorek 6A). K redukci defektů došlo zejména na povrchové vrstvě vzorků, kvůli možnosti technologie LSP ovlivňovat zejména tuto vrstvu. Při nevhodném zvolení parametrů LSP byla negativně ovlivněna podpovrchová vrstva spojením a rozšířením defektů. Z těchto výsledných hodnot vyplývá, že aplikace technologie LSP je při správné volbě parametrů vhodnou operací pro dokončení povrchu aditivně vyrobených dílů. Všechna stanovená měření proběhla úspěšně a zadané cíle bakalářské práce byly splněny.

Tato práce se zabývala zejména problematikou prokázání vlivu LSP na porozitu aditivně vyráběných vzorků a jejich texturu povrchu. V budoucnu bych se v rámci diplomové práce rád hlouběji věnoval optimalizaci parametrů procesu LSP, pro získání požadovaných vlastností integrity povrchu.

9. Seznamy

9.1 Seznam obrázků

Obrázek 1 Souhrn vlastností a faktorů definujících integritu povrchu - upravené [2]	12
Obrázek 2 Schéma tenzometrů kolem odvrtného otvoru [8]	15
Obrázek 3 Schéma metody odleptávání [9].....	15
Obrázek 4 Grafické znázornění Braggovy rovnice [10].....	16
Obrázek 5 Schéma principu metody dle Rockwella [14]	19
Obrázek 6 Schéma principu metody dle Vickerse [14].....	20
Obrázek 7 Schéma principu metody dle Brinella [14]	20
Obrázek 8 Textura, drsnost povrchu [17].....	21
Obrázek 9 Metody měření textury povrchu [17].....	22
Obrázek 10 Metody broušení (vlevo) a CNC hrotová bruska (vpravo) [22][23]	24
Obrázek 11 Schéma principu honování (vlevo) a stroj na honování (vpravo) [24][25].....	25
Obrázek 12 Princip lapování (vlevo) a lapovací stroj (vpravo) [26][27]	25
Obrázek 13 Princip superfinišování (vlevo) a stroj na superfinišování (vpravo) [28][29]	26
Obrázek 14 Schéma chemicko-mechanického leštění (vlevo) a stroj na leštění [30][31].....	26
Obrázek 15 Schéma elektrolytického leštění [12].....	27
Obrázek 16 Schéma vibračního a odstředivého omílání (vlevo), stroj na omílání (vpravo) [32][33][34].....	27
Obrázek 17 Princip metody kuličkování [35][36].....	28
Obrázek 18 Schéma vnějšího a vnitřního válečkování válcových ploch (nahore), vnitřní a vnější válečkování (dole) [37][38][39].....	29
Obrázek 19 Schéma vnějšího vyhlazování diamantem [40].....	29
Obrázek 20 Ultrazvukové vibrační zpevnování [41]	30
Obrázek 21 Kalibrování kuličkou a speciálním trnem [42].....	30
Obrázek 22 Sestavení pracoviště (vlevo), průběh procesu LSP (vpravo) [44].....	31
Obrázek 23 Princip atomárního plynového laseru [48].....	33
Obrázek 24 Schéma principu technologie LSP [49]	34
Obrázek 25 použití LSP s absorpční vrstvou (obrázek a), použití LSP bez absorpční vrstvy (obrázek b) [51].....	35
Obrázek 26 Povrchové zbytkové napětí po několikanásobném překrytí pulsu laseru s různými způsoby. Modrá barva reprezentuje tlak a červená tah [50].....	37
Obrázek 27 Srovnání zbytkového napětí ve slitině Inconel 718 mezi LSP a SP [52]	38

Obrázek 28 3D vizualizace porozity ve středu 10 mm měřené části (vlevo před LSP), (vpravo po LSP) [54]	39
Obrázek 29 Kombinace aditivní výroby technologií SLM s LSP [55]	40
Obrázek 30 Klasifikace aditivních technologií dle používaného materiálu [56]	41
Obrázek 31 Princip SLA (vlevo), výsledný model (vpravo) [56]	42
Obrázek 32 Princip DLP (vlevo), výsledný model (vpravo) [56]	42
Obrázek 33 Princip FDM (vlevo), výsledný model s tiskárnou (vpravo) [56]	43
Obrázek 34 Schéma technologie Ink-jet printing [57]	43
Obrázek 35 Princip SHS [56]	44
Obrázek 36 Princip LOM (vlevo), tiskárna technologie LOM (vpravo) [56]	44
Obrázek 37 Schéma technologie DMLS [56]	45
Obrázek 38 Pracovní prostor technologie DMLS [56]	46
Obrázek 39 Schéma EBM (vlevo), vytištěná součást metodou EBM (vpravo) [56]	46
Obrázek 40 Proces technologie WAAM (vlevo), výsledná součást (vpravo) [56]	47
Obrázek 41 Vytištěné vzorky	49
Obrázek 42 Detail upevněného vzorku	50
Obrázek 43 Pracovní plocha software MarSurf Metrology SW	50
Obrázek 44 Konfokální mikroskop MarSurf CM expert	51
Obrázek 45 Upevněný vzorek v plastovém sklíčidle	52
Obrázek 46 Pohled pracovního prostor CT	53
Obrázek 47 Pracovní prostředí software METROTOM OS	53
Obrázek 48 Laser beam distribution system (přívod laserového svazku)	55
Obrázek 49 Optická dráha laseru (vlevo), LSP stanice (vpravo)	56
Obrázek 50 Vzorky po aplikaci LSP	57
Obrázek 51 Výškový parametr Sa před a po aplikaci LSP Obrázek 52 Výškový parametr Sz před a po aplikaci LSP	58
Obrázek 53 Výškový parametr Sp před a po aplikaci LSP Obrázek 54 Výškový parametr Sv před a po aplikaci LSP	59
Obrázek 55 Objemový parametr Vm před a po aplikaci LSP Obrázek 56 Objemový parametr Vv před a po aplikaci LSP	59
Obrázek 57 Objemový parametr Vmp před a po aplikaci LSP Obrázek 58 Objemový parametr Vmc před a po aplikaci LSP	59



Obrázek 59 Objemový parametr V_{vc} před a po aplikaci LSP	Obrázek 60 Objemový parametr V_{vv} před a po aplikaci LSP	60
Obrázek 61 Parametr profilu R_a před a po aplikaci LSP	Obrázek 62 Parametr profilu W_a před a po aplikaci LSP.....	60
Obrázek 63 Parametr profilu P_a před a po aplikaci LSP		60
Obrázek 64 Porovnání textury povrchu před aplikací LSP a po na vzorku 3A		61
Obrázek 65 Naměřená porozita na vybraných vzorcích.....		62
Obrázek 66 Znázornění porozity na vzorku 6A před použitím LSP (vlevo), po aplikaci LSP (vpravo).....		62
Obrázek 67 Znázornění porozity na vzorku 4A před použitím LSP (vlevo), po aplikaci LSP (vpravo).....		62
Obrázek 68 Znázornění pórovitosti vzorku 4A před aplikací LSP (vlevo), po aplikaci LSP (vpravo).....		63
Obrázek 69 Znázornění porozity na vzorku 14B		63

9.2 Seznam tabulek

Tabulka 1 Metody zjišťování zbytkového napětí [6]	14
Tabulka 2 Charakteristika metod měření zbytkového napětí [9]	18
Tabulka 3 Souhrn základních vnikacích metod měření tvrdosti [14]	19
Tabulka 4 Typické procesní parametry pro technologii LSP [46]	36
Tabulka 5 Chemické složení slitiny AlSi10Mg [58]	48
Tabulka 6 Charakteristické vlastností materiálu (prášku) CL 31AL pro aditivní výrobu [58]	48
Tabulka 7 Nastavené parametry pro skenování vzorků.....	54
Tabulka 8 Tabulka použitých hodnot LSP pro jednotlivé vzorky	57
Tabulka 9 Naměřené hodnoty defektů ve vzorcích.....	61

9.3 Seznam příloh

Příloha 1 Naměřené hodnoty na konfokálním mikroskopu a zpracované parametry pro jednotlivé vzorky před a po aplikaci LSP	
--	--



10. Použitá literatura

- [1] ASTAKHOV, V. *Surface integrity: Definition and importance in functional performance*. Springer-Verlag London 2010. ISBN 978-1-4471-5748-9
- [2] GREZSIK, W. *Advanced machining processes of metallic materials-surface integrity*. Elsevier, 2017, ISBN 9780444637116, s. 533-561
- [3] KŘÍŽ, Antonín. *Integrita povrchu v oblasti tepelného zpracování* [online]. Západočeská univerzita v Plzni [cit. 2022-03-08]. Dostupné z: https://www.opi.zcu.cz/download/Integrita_prednaskaTZ.pdf. Přednáška.
- [4] BUMBÁLEK, Bohumil. *Integrita povrchu a její význam pro posouzení vhodnosti dané plochy pro její funkci*. [online]. [vid. 2011-10-21]. VUT v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Dostupné z: http://gps.fme.vutbr.cz/STAH_INFO/2512_Bumbalek.pdf
- [5] KŘÍŽ, A. *Vliv povrchu na užité vlastnosti výrobku*. [online]. [cit. 2022-01-26]. Dostupné z: https://www.opi.zcu.cz/download/kriz_prispevek_technologie_2011.pdf
- [6] BUMBÁLEK, L., BUMBÁLEK, B., MAZAL, P. a LIŠKUTÍN, P. *Vlastnosti povrchové vrstvy a jejich vliv na únavu*. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004. ISBN 80-7204-373-0
- [7] HONNER, M. *Měření ve fyzikálních technologiích*. Vydavatelství Plzeň: Západočeská univerzita, 2003. ISBN 80-7082-971-0. 98-102 s.
- [8] OCANA OCAÑA, J. L., MOLPECERES, C., PORRO, J.A., GÓMEZ, G., MORALES, M. *Experimental assessment of the influence of irradiation parameters on surface deformation and residual stresses in laser shock processed metallic alloys*. *Appl. Surf. Sci.* 2004, 238, 501–505.
- [9] S. SCHAJER, Gary a Clayton O.RUUD. *Overview of Residual Stresses and Their Measurement*. *Practical Residual Stress Measurement Methods* [online]. 2013, s. 1-27 [cit. 2022-03-08]. ISBN 9781118402832. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/278317510_Practical_Residual_Stress_Measurement_Methods_x
- [10] *Diffraction: Difrakce záření* [online]. Fyzikální ústav Akademie věd České republiky [cit. 2022-03-08]. Dostupné z: <https://www.fzu.cz/~knizek/prednaska/Diffraction.pdf>. Přednáška.



- [11] Development and Applications of Residual Stress Measurements Using Neutron Beams. *Technical Reports Series* [online]. 2014. Vienna: International atomic energy agency [cit. 2022-03-08]. ISBN 978-92-0-113313-7. Dostupné z: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/trs477_web.pdf
- [12] KOSMAČ, A. *Elektrolytické leštění korozivzdorných ocelí* [online]. [cit. 2022-01-25]. ISBN 978-2-87997-319-7. Dostupné z: https://www.worldstainless.org/Files/issf/non-image-files/PDF/Euro_Inox/Electropolishing_CZ.pdf
- [13] VÁCLAVÍK, J., BUNDA, Z., BOHDAN, P., WEINBERG, O. *Aplikace vybraných metod pro měření zbytkového napětí*. [online]. Defektoskopie 2012. 271-278 s. [cit. 2022-01-26]. Dostupné z: http://old.allforpower.cz/UserFiles/file/2011/271_p.pdf
- [14] ČIŽMÁROVÁ, Elena a Jana SOBOTOVÁ. *Nauka o materiálu I. a II.: cvičení*. V Praze: České vysoké učení technické, 2014. ISBN 978-80-01-05550-2.
- [15] DOLEŽAL, P., PACAL, B. *Hodnocení mikrotvrdosti struktur materiálů*. [online]. Brno: VUT, 2007 [cit. 2022-01-26]. Dostupné z: <http://ime.fme.vutbr.cz/images/umvi/opory/hmsm/index.htm>
- [16] PETR, Karel. *Strojírenské konstruování, Tvorba výkresové dokumentaci dle ISO norem*. V Praze: České vysoké učení technické, 2020. ISBN 978-80-01-06715-4
- [17] BERÁNEK, Libor. *Strojírenská metrologie. Textura povrchu, profil povrchu* [online]. [cit. 2022-03-08]. Přednášky. České vysoké učení technické v Praze
- [18] ČSN EN ISO 25178-2 Geometrické specifikace produktu (GPS) - Textura povrchu: Plocha - Část 2: Termíny, definice a parametry textury povrchu
- [19] YE, Chang, Chaoyi ZHANG, Jingyi ZHAO a Yalin DONG. Effects of Post-processing on the Surface Finish, Porosity, Residual Stresses, and Fatigue Performance of Additive Manufactured Metals: A Review. *Journal of Materials Engineering and Performance* [online]. 2021, 30(9), 6407-6425 [cit. 2022-03-15]. ISSN 1059-9495. Dostupné z: doi:10.1007/s11665-021-06021-7
- [20] MAHMOOD, Muhammad Arif, Diana CHIOIBASU, Asif UR REHMAN, Sabin MIHAI a Andrei C. POPESCU. Post-Processing Techniques to Enhance the Quality of Metallic Parts Produced by Additive Manufacturing. *Metals* [online]. 2022, 12(1) [cit. 2022-03-15]. ISSN 2075-4701. Dostupné z: doi:10.3390/met12010077



- [21] MÁDL, J., AJ. *Technologie obrábění-1., 2., 3. díl.* Praha. Vydavatelství ČVUT 2000. 3. sv. 246 s. ISBN 80-01-02091-6.
- [22] Grinding operations. Wikipedia [online]. [cit. 2022-03-08]. Dostupné z: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/0/06/Grinding_operations.svg
- [23] Hrotové brusky. Taima [online]. [cit. 2022-03-08]. Dostupné z: <http://www.taima.cz/hrotove-brusky/cnc-brusky/>
- [24] SABRI, L. a M. EL MANSORI. Process variability in honing of cylinder liner with vitrified bonded diamond tools. *Surface and coatings technology* [online]. 2009, s. 1046-1050 [cit. 2022-03-08]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0257897209004198#fig1>
- [25] Vertical honing machines. Pommee machines and equipment [online]. [cit. 2022 03- 08]. Dostupné z: <https://www.pommee.nl/product/h85a/>
- [26] DEACONESCU, Andrea a Tudor DEACONESCU. Improving the Quality of Surfaces Finished by Lapping by Robust Parameter Design. *Journal of Economics, Business and Management* [online]. 2014, 1-4 [cit. 2022-03-11]. ISSN 23013567. Dostupné z: doi:10.7763/JOEBM.2014.V2.88
- [27] Double wheel lapping machine. Produzon [online]. [cit. 2022-03-11]. Dostupné z: <http://www.produzon.com/images/assets/p/double-wheel-lapping-machine-ac-microline-470-%E2%80%932000-l-peter-wolters.jpg>
- [28] MICALLEF, Christian, Yuri ZHUK a Adrianus Indrat ARIA. Recent Progress in Precision Machining and Surface Finishing of Tungsten Carbide Hard Composite Coatings. *Coatings* [online]. 2020, 10(8) [cit. 2022-03-11]. ISSN 2079-6412. Dostupné z: doi:10.3390/coatings10080731
- [29] Superfiniš. Sts.si [online]. [cit. 2022-03-11]. Dostupné z: <http://www2.sts.si/arhiv/techo/projekt3/Superfinis/superfinis.htm>
- [30] JIANXIU, Su, Chen XIQU, Du JIAXI a Kang RENKE. Material removal rate in chemical-mechanical polishing of wafers based on particle trajectories. *Journal of Semiconductors* [online]. 2010, 31(5) [cit. 2022-03-11]. ISSN 1674-4926. Dostupné z: doi:10.1088/1674-4926/31/5/056002



- [31] Polishing and sanding machines for various materials: Polishing [online]. [cit. 2022-03-11]. Dostupné z: https://www.gottschild.de/e_hbs.htm
- [32] Odstředivé omílání. I01.i.aliimg.com [online]. [cit. 2022-04-05]. Dostupné z: http://i01.i.aliimg.com/img/pb/214/637/295/295637214_914.jpg
- [33] Schéma vibračního omílání. Cdn.gardnerweb [online]. [cit. 2022-03-11]. Dostupné z: <https://cdn.gardnerweb.com/resources/images/cdn/cms/web030101c.gif>
- [34] Diskový leštící stroj. Auren.cz [online]. [cit. 2022-03-11]. Dostupné z: https://auren.cz/3260-thickbox_default/diskovy-lestiaci-stroj-te6hd-w.jpg
- [35] Controlled shot peening. Cwst.se [online]. [cit. 2022-03-11]. Dostupné z: <http://www.cwst.se/services/controlled-shot-peening/>
- [36] Shot peening glass beads product features. Junda industrial [online]. [cit. 2022-03-11]. Dostupné z: <https://www.jundaglassbeads.com/News/85.html>
- [37] Dokončovací metody obrábění. Spzengrova [online]. [cit. 2022-03-11]. Dostupné z: <https://www.spzengrova.cz/wp-content/uploads/2020/04/ZAV3-Dokon%C4%8Dovac%C3%AD-metody-obr%C3%A1b%C4%9Bn%C3%AD-UT.pdf>
- [38] Variabilní jednokotoučový nástroj pro vnější použití. Albaprecision [online]. [cit. 2022-03-11]. Dostupné z: <http://albaprecision.cz/cz/portal/produkty/baublies/jednovaleckove-a-jednokotoucove-nastroje/variabilni-jednokotoucovy-nastroj-pro-vnejsi-pouziti/>
- [39] Nástroje pro vnitřní válečkování IRG. Albaprecision [online]. [cit. 2022-03-11]. Dostupné z: <http://albaprecision.cz/cz/portal/produkty/baublies/vicevaleckove-nastroje-/pro-vnitri-valeckovani/>
- [40] Diamantový nástroj pro vnější obrábění. Alba precision [online]. [cit. 2022-03-11]. Dostupné z: <http://albaprecision.cz/cz/portal/produkty/baublies/diamantove-nastroje/diamantovy-nastroj-pro-vnejsi-obrabeni/>



- [41] CHAISE, Thibaut, Jun LI, Daniel NÉLIAS, Régis KUBLER, Said TAHERI, Gérard DOUCHET, Vincent ROBIN a Philippe GILLES. Modelling of multiple impacts for the prediction of distortions and residual stresses induced by ultrasonic shot peening (USP). *Journal of Materials Processing Technology* [online]. 2012, 212(10), 2080-2090 [cit. 2022-04-05]. ISSN 09240136. Dostupné z: doi:10.1016/j.jmatprotec.2012.05.005
- [42] BRAJER, Jan. Vliv metody laser shock processing na integritu povrchu [online]. Praha, 2018 [cit. 2022-03-08]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/10467/79047>. Disertační práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní.
- [43] MONTROSS, C., WEI, T., YE, L., CLARK, G., MAI, Y. *Laser shock processing and its effects on microstructure and properties of metal alloys: A review*. *Int. J. Fatigue* 2006, 24, 1021–1036.
- [44] Laser shock peening. Hilase [online]. [cit. 2022-03-11]. Dostupné z: <https://www.hilase.cz/nabizime/sluzby/laser-shock-peening/>
- [45] DING, K., YE, L. *Laser Shock Peening, Performance and Process Simulation*, ISBN: 9781855739291, January 2006, Australia, 172 s.
- [46] GUBJA, AK., MEDRA, M., *Laser Peening Process and Its Impact on Materials Properties in Comparison with Shot Peening and Ultrasonic Impact Peening*. *Materials (Basel)*. 2014 Dec 10;7(12):7925-7974. doi: 10.3390/ma7127925.
- [47] NOVÁK, Miroslav. ZÁKLADNÍ PRINCIP LASERU A JEJICH DĚLENÍ. *LAO: Lasery a Optika* [online]. Praha: LAO, 2011 [cit. 2022-01-26]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---zakladni-princtip-laseru-127>
- [48] ČECH, Miroslav a Helena JELÍNKOVÁ. *Lasery a jejich aplikace* [online]. Praha [cit. 2022-03-08]. Dostupné z: <http://fyzu3v.fjfi.cvut.cz/current/web/prednasky/LaseryMC.pdf>. Přednáška. České vysoké učení technické v Praze.
- [49] Laser shock peening: Laserové technologie. Matca [online]. [cit. 2022-03-11]. Dostupné z: <https://matca.cz/technologie/laserove-technologie/laser-shock-peening/>
- [50] SANO, Yuji, Koichi AKITA a Tomokazu SANO. A Mechanism for Inducing Compressive Residual Stresses on a Surface by Laser Peening without Coating. *Metals - Open Access Metallurgy Journal* [online]. 2020 [cit. 2022-03-08]. Dostupné z: doi:10.3390/met10060816



- [51] KAUFMAN, Jan, Jan RACEK, Miroslav CIESLAR, et al. The effect of laser shock peening with and without protective coating on intergranular corrosion of sensitized AA5083. *Corrosion Science* [online]. 2022, 194 [cit. 2022-04-04]. ISSN 0010938X. Dostupné z: doi:10.1016/j.corsci.2021.109925
- [52] DANE, C., HACKEL, L., DALY, J. Shot peening with laser. *Adv. Mater. Process.* 1998, 153, 37–48.
- [53] BRAJER, J., MÁDL, J., -KAUFMAN, J. PRODUCTIVE LASER SHOCK PROCESSING Multioborová konference LASER57. Třešť, Brno: Ústav přístrojové techniky AV ČR, v. v. i.. 2017, s. 10. ISBN 978-80-87441-21-3. Dostupné z: <http://invenio.nusl.cz/record/369678>
- [54] DU PLESSIS, Anton, Daniel GLASER, Heinrich MOLLER, Ntombizodwa MATHE, Lerato TSHABALALA, Busisiwe MFUSI a Roelf MOSTERT. Pore Closure Effect of Laser Shock Peening of Additively Manufactured AlSi10Mg. *3D Printing and Additive Manufacturing* [online]. 2019, 6(5), 245-252 [cit. 2022-03-23]. ISSN 2329-7662. Dostupné z: doi:10.1089/3dp.2019.0064
- [55] ZHANG, Chaoyi, Yalin DONG a Ye CHANG. Recent Developments and Novel Applications of Laser Shock Peening: A Review. *Advanced engineering materials* [online]. 2021 [cit. 2022-03-08]. Dostupné z: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/adem.202001216>
- [56] ANDRONOV, Vladislav. Aditivní technologie [online]. [cit. 2022-03-08]. Přednáška. České vysoké učení technické v Praze.
- [57] Inkjet printing. Custompartnet [online]. [cit. 2022-03-11]. Dostupné z: <https://www.custompartnet.com/wu/images/rapid-prototyping/inkjet-printing.png>
- [58] CL 30AL / CL 31AL Aluminium alloys. *Additive manufacturing machines and materials / GE Additive* [online]. [cit. 2022-07-27]. Dostupné z: https://www.ge.com/additive/sites/default/files/2018-12/CLMAT_30_31AL_DS_EN_US_2_v1.pdf