

SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE

Materiálovotechnologická fakulta so sídlom v Trnave

Evidenčné číslo: MTF-104241-85366

Laserové leštenie povrchov nástrojových materiálov

Diplomová práca

SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE

Materiálovotechnologická fakulta so sídlom v Trnave

Evidenčné číslo: MTF-104241-85366

Laserové leštenie povrchov nástrojových materiálov

Diplomová práca

Študijný program: obrábanie a tvárnenie

Študijný odbor: strojárstvo

Školiace pracovisko: Ústav výrobných technológií

Vedúci záverečnej práce: prof. Ing. Peter Šugár, CSc.

Trnava 2021

Bc. Ivan Gendiar



ZADANIE DIPLOMOVEJ PRÁCE

Študent: **Bc. Ivan Gendiar**
ID študenta: 85366
Študijný program: obrábanie a tvárnenie
Študijný odbor: strojárstvo
Vedúci práce: prof. Ing. Peter Šugár, CSc.
Miesto vypracovania: MTF STU so sídlom v Trnave

Názov práce: **Laserové leštenie povrchov nástrojových materiálov**

Jazyk, v ktorom sa práca vypracuje: slovenský jazyk

Špecifikácia zadania:

- 1 Laserové leštenie – princíp, použitie, výhody a nevýhody
- 2 Laserové leštenie nástrojových materiálov
- 3 Štúdium laserového leštenia ocelí na výrobu kovacích zápustiek

Riešenie zadania práce od: 15. 02. 2021

Dátum odovzdania práce: 25. 04. 2021

Bc. Ivan Gendiar
študent

Ing. Ivan Buranský, PhD.
vedúci pracoviska

prof. Ing. Peter Šugár, CSc.
garant študijného programu

POĎAKOVANIE

Touto cestou by som sa chcel poďakovať vedúcemu mojej diplomovej práce prof. Ing. Petrovi Šugárovi, Csc. za jeho odbornú pomoc, cenné rady, podklady a usmernenia pri vypracovaní diplomovej práce.

Táto záverečná práca vznikla ako súčasť riešenia projektu KEGA 022STU-4/2019 “Zvyšovanie profesijných kompetencií absolventov univerzitného vzdelávania v odbore Výrobné technológie implementovaním prvkov duálneho vzdelávania“ a projektu Smart EUREKA S 0104 - Flex-Tool „Integrovaný, hodnotovo orientovaný reťazec hybridných výrobných procesov pre pružnú, rekonfigurovateľnú výrobu komplexných nástrojových systémov“, spolufinancovaného Ministerstvom školstva, vedy, výskumu a športu SR.

SÚHRN:

GENDIAR, Ivan, Bc.: *Laserové leštenie povrchov nástrojových materiálov* [Diplomová práca] - Slovenská technická univerzita v Bratislave. Materiálovotechnologická fakulta so sídlom v Trnave; Ústav výrobných technológií. - Školiteľ: prof. Ing. Peter Šugár, CSc., - Trnava: MTF STU, 2021. 83 s.

Diplomová práca je zameraná na kritické zhodnotenie súčasného stavu poznania v oblasti technologických procesov dokončovania povrchov nástrojových materiálov technológiou laserového leštenia. Na základe vykonanej analýzy z dostupných literárnych zdrojov poskytuje prehľad o fyzikálnych princípoch laserového leštenia, jeho použití, výhodách a nevýhodách. Zvýšená pozornosť je venovaná sumarizácii poznatkov o laserovom leštení nástrojových materiálov s primárnou orientáciou na materiály používané na výrobu nástrojov na objemové tvárnenie za tepla s dôrazom na poskytnutie pohľadu na vzťahy medzi vybranými parametrami procesu (pracovný režim lasera a jeho výkon, dĺžka pulzu, pulzná frekvencia, rýchlosť skenovacieho pohybu, typ a spôsob použitia ochranného plynu) a morfológiou a drsnosťou povrchov obrobkov vyrobených subtraktívnymi aj aditívnymi výrobnými procesmi.

Kľúčové slová: drsnosť, laser, leštenie, povrch, zápustka

ABSTRACT :

GENDIAR, Ivan, Bc.: *Laser polishing of tool material surfaces*. [Diplomar thesis] – Slovak university of technology in Bratislava. Faculty of materials science and technology with the residence in Trnava; Department of production technologies. – Supervisor: prof. Ing. Peter Šugár, CSc., - Trnava: MTF STU, 2021. 83 p.

The diploma thesis is focused on a critical evaluation of the current state of knowledge in the field of technological processes of finishing the surfaces of tool materials of laser radiation technology. Based on the analysis performed from available literature sources, it provides an overview of the physical principles of laser radiation, its use, advantages, and disadvantages. Increased attention is paid to summarizing the knowledge of laser polishing of tool materials with primary orientation to materials used for the production of volume thermoforming tools with an emphasis on providing insight into the relationships between selected process parameters (laser operating mode and power, pulse length, pulse frequency, scanning speed, type and method of shielding gas application) and morphology and surface roughness of workpieces produced by both subtractive and additive manufacturing processes.

Key words: roughness, laser, polishing, surface, forging die

OBSAH

ZOZNAM SYMBOLOV, SKRATIEK A ZNAČIEK	9
ZOZNAM ILUSTRÁCIÍ	11
ZOZNAM TABULIEK	14
ÚVOD	15
1. LASEROVÉ LEŠTENIE	16
1.1 Proces laserového leštenia	16
1.2 Princíp laserového leštenia kovových povrchov	17
1.3 Parametre ovplyvňujúce proces leštenia	19
1.4 Selektívne laserové leštenie	20
1.5 Kontinuálny a pulzný režim tavenia materiálu	21
1.6 Výhody laserového leštenia	24
2. LASEROVÉ LEŠTENIE NÁSTROJOVÝCH MATERIÁLOV	26
2.1 Leštenie nástrojových materiálov laserovým zväzkom	26
2.1.1 Leštenie nástrojovej ocele AISI H11 vhodnej na výrobu kovacích zápustiek ...	32
2.1.2 Aplikácie technológie laserového leštenia nástrojových materiálov vyrobených procesmi práškovej metalurgie	37
2.1.2.1 Leštenie rovinných povrchov	42
2.1.2.2 Leštenie povrchov s tvarovo zložitou geometriou	45
2.1.3 Laserové leštenie so stabilným pôsobením magnetického poľa	52
2.2 Laserové leštenie keramických materiálov	56
2.3 Laserové leštenie diamantového filmu	58
3. ŠTÚDIUM LASEROVÉHO LEŠTENIA OCELÍ NA VÝROBU KOVACÍCH ZÁPUSTIEK	60
3.1 Činitele ovplyvňujúce životnosť kovacích zápustiek	60
3.1.1 Požiadavky na materiál dutiny zápustky	60
3.1.2 Chemicko – tepelné spracovanie povrchov kovacích zápustiek	62
3.2 Degradácia povrchovej vrstvy kovacích zápustiek v procese kovania	63
3.2.1 Korózia	64
3.2.2 Prehriatie materiálu kovacej zápustky	64
3.2.3 Opatrebenie povrchových vrstiev	65
3.3 Drsnosť povrchu dutín kovacích zápustiek	66

ZHODNOTENIE, ZÁVERY, ODPORÚČANIA.....	69
ZÁVER.....	76
ZOZNAM BIBLIOGRAFICKÝCH ODKAZOV	78

ZOZNAM SYMBOLOV, SKRATIEK A ZNAČIEK

β	uhol dopadu laserového zväzku	(°)
λ	vlnová dĺžka	(m)
σ	zvyškové napätie	(MPa)
B	intenzita magnetického poľa	(T)
Co - Cr	zliatina kobaltu a chrómu	
E	Youngov modul pružnosti v ťahu	(MPa)
E_D, F₀	hustota energie laserového zväzku	(J.mm ²)
f_p	frekvencia opakovania	(Hz)
d_L, 2w₀	priemer stopy laserového zväzku v ohnisku	(μm)
d_y, Δy, H_{re}	posun stopy laserového zväzku v smere osi y	(μm)
HRC	tvrdosť podľa Rockwella	(HRC)
HV	tvrdosť podľa Vickersa	(HV)
LO	line overlap – prekrytie stôp laserového zväzku v smere osy y	(μm)
N, L_t	počet opakovaných prechodov laserového zväzku	(-)
Ov, PO	prekrytie stopy laserového zväzku	(%)
P, P_L	výkon laseru	(W)
PR_N	Polishing rate -leštená plocha za jednotku času	(cm ² .min ⁻¹)
Ra	stredná aritmetická odchýlka posudzovaného profilu	(μm)
Rq	stredná kvadratická odchýlka posudzovaného profilu	(μm)
Rz	najvyššia výška profilu	(μm)
Sa	stredná hodnota plošnej drsnosti	(μm)
Ti6Al4V	titánová zliatina	
TiN	nitrid titánu	
v_s, v_f	rýchlosť pohybu skenovania zväzku	(mm.s ⁻¹)
WC	karbid volfrámu	
Yb: YAG	Yterbium: Yttrium Aluminium Granát	

ALM	Additive Laser Manufacturing
CW	Continual Waves
CVD	Chemical Vapour Deposition
EBSD	Electron Backscatter Diffraction Analysis
FDM	Fused Deposition Modeling
HSM	High Speed Machining
L-PBF	Laser – Powder bed fusion
SLM	Selective Laser Melting
SLS	Selective Laser Sintering
SSM	Shallow Surface Melting
SOM	Surface Over Melting
USP	Ultra Short Pulses

ZOZNAM ILUSTRÁCIÍ

Obr. 1 Schéma procesu laserového leštenia pulzným laserom.....	18
Obr. 2 Schéma parametrov vstupujúcich do procesu laserového leštenia pulzným režimom.....	20
Obr. 3 Príklad tzv. dvojitého efektu lesku na oceli AISI410 (STN 17 021), pri použití selektívneho laserového leštenia.....	21
Obr. 4 Porovnanie kontinuálneho a pulzného režimu.....	21
Obr. 5 Schéma tvorby novej povrchovej topografie počas kontinuálneho režimu.....	22
Obr. 6 Topografia povrchu vzorky pred laserovým leštením, snímaná pri 350 násobnom zväčšení na elektrónovom mikroskope.....	23
Obr. 7 Snímky elektrónového mikroskopu pri 100 násobnom zväčšení, pri použití vysokého výkonu a kontinuálneho režimu (a) a pri použití nízkeho výkonu lasera v pulznom režime (b).....	23
Obr. 8 Povrch frézovanej súčiastky pred a po laserovom leštení.....	25
Obr. 9 Topografia povrchu frézovanej vzorky pred a po leštení laserom.....	27
Obr. 10 Dosahovaná drsnosť povrchu jednotlivých materiálov po laserovom leštení.....	28
Obr. 11 Schematické zobrazenie stratégie pohybu laserového zväzku.....	30
Obr. 12 Graf hĺbky pretavenej vrstvy materiálu - d ako funkcia hustoty energie pulzu- F_0 so zmenou skenovacej rýchlosti - v_s	31
Obr. 13 Graf plošnej mikro – drsnosti $S_{a\text{micro}}$ ako funkcia hustoty energie pulzu - F_0 so zmenou skenovacej rýchlosti - v_s a prekrytiu stôp laserového zväzku PO.....	31
Obr. 14 Snímka vzorky so 4 leštenými plôškami (15 x 15 mm) s rôznym nastavením parametrov.....	32
Obr. 15 Mikroskopická snímka laserom leštených plôch s procesnými parametrami P1 – P4.....	34
Obr. 16 Snímky zobrazujúce topografiu povrchovej vrstvy po laserovom leštení pri použití rozličných skupín parametrov P1 – P4.....	35
Obr. 17 Materiálové vlastnosti leštených vzoriek: a) tvrdosť podľa Vickersa, b) zvyškové napätia.....	35
Obr. 18 Fotografia vzorky (AISI H11) s plochou 20 x 25 mm vyleštenou laserom.....	36
Obr. 19 Skenovacia stratégia využitá pri leštení ocele ASP 23.....	38
Obr. 20 Porovnanie plošnej povrchovej drsnosti pri jednotlivých trajektóriách a) 1 b) 2, c) 3, d). 4 Čiarkovaná čiara reprezentuje počiatočnú drsnosť vzorky z ASP 23 ocele.....	38

Obr. 21 Schéma stratégie pohybu laserového zväzku pri leštení vzoriek AlSi10Mg.....	40
Obr. 22 Snímka povrchu vzorky z povrchovými chybami. a) pred leštením b) po leštení.....	41
Obr. 23 Morfológia povrchu vzoriek vyhotovená pomocou SEM. a) neleštená vzorka b) leštená vzorka.....	41
Obr. 24 Výsledná mikrotvrdosť leštených vzoriek podľa počtu prechodov L_t	42
Obr. 25 Topografia povrchu súčiastky vyrobenej aditívnym spôsobom výroby.....	43
Obr. 26 Povrch súčiastky pred a po leštení laserom a sprievodné povrchové chyby.....	44
Obr. 27 Vývoj topografie povrchu podľa počtu prechodov laserového zväzku.....	44
Obr. 28 Profily drsností pred a po leštení laserom po 5 prechodoch laserového zväzku....	45
Obr. 29 Rôzne typy vzoriek s komplexnou geometriou povrchu.....	46
Obr. 30 Morfológia povrchu rovinných vzoriek pred a po leštení laserom pomocou rôznych stratégií leštenia: a) počiatočný povrch, b) leštený povrch: $P = 40\text{W}$, $v = 300\text{mm.s}^{-1}$, $H = 0,05\text{ mm}$, c) leštený povrch: $P = 55\text{W}$, $v = 300\text{ mm.s}^{-1}$, $H = 0,02\text{ mm}$, , c) leštený povrch: $P = 70\text{ W}$, $v = 300\text{ mm.s}^{-1}$, $H = 0,003\text{ mm}$	48
Obr. 31 Morfológia povrchu rovinnej vzorky leštenej nízkym výkonom a vysokou hustotou energie zväzku.....	49
Obr. 32 Redukcia drsnosti povrchu vzoriek s komplexnou geometriou.....	49
Obr. 33 Topografia povrchu vzoriek so zložitou geometriou pred a po laserovom leštení. Snímky a) – c) zobrazujú počiatočnú drsnosť konvexného, konkávneho a šikmého povrchu, na snímkach d) – e) je zobrazená drsnosť leštených konvexných, konkávnych a šikmých povrchov.....	50
Obr. 34 Tenkostenná súčiastka s komplexnou geometriou leštená laserovým zväzkom....	50
Obr. 35 Topografia povrchov zubných implantátov po leštení.....	52
Obr. 36 Schematické znázornenie laserového leštenia s asistenciou magnetického poľa: a) experimentálne zariadenie, b) magnetické pole.....	53
Obr. 37 Grafy závislostí parametra drsností R_a , pri rôznej intenzite magnetického poľa : a) od výkonu lasera, b) od rýchlosti skenovania laserového zväzku.....	54
Obr. 38 3D topografia leštených povrchov : a) drsnosť povrchu neleštenej vzorky, b) topografia povrchu lešteného bez pomoci magnetického poľa, c) topografia lešteného povrchu s asistenciou magnetického poľa.....	55
Obr. 39 Účinok leštenia laserom na povrchové nerovnosti bez použitia a s použitím magnetického poľa.....	55

Obr. 40 3D Topografia povrchu po leštení Al_2O_3 keramického materiálu pri rýchlosti pohybu skenovania zväzkom 800 mm.s^{-1} a priemere stopy laserového zväzku 10 μm .	
a) drsnosť povrchu (R_a) nevyleštenej vzorky b) drsnosť povrchu (R_a) pri hustote energie zväzku $3,56 \text{ J.cm}^{-2}$ c) drsnosť povrchu (R_a) pri hustote energie zväzku $4,58 \text{ J.mm}^{-2}$ d) drsnosť povrchu (R_a) pri hustote energie zväzku $5,09 \text{ J.cm}^{-2}$ e) drsnosť povrchu (R_a) pri hustote energie zväzku $7,64 \text{ J.cm}^{-2}$	57
Obr. 41 Závislosť drsnosti povrchu od uhlu dopadu laserového zväzku.....	59
Obr. 42 Topografia povrchu diamantového filmu po leštení rozdielnou hustotou energie. a) $0,58 \text{ J.cm}^{-2}$ b) $1,16 \text{ J.cm}^{-2}$ c) $1,74 \text{ J.cm}^{-2}$ d) $2,32 \text{ J.cm}^{-2}$ e) $2,90$ f) $3,48 \text{ J.cm}^{-2}$	59
Obr. 43 Nástrojové materiály vhodné na výrobu kovacích zápustiek.....	61
Obr. 44 Schematické znázornenie druhov poškodenia povrchov kovacích zápustiek.....	63
Obr. 45 Nízkocyklová únava kovacej zápustky vyvolaná tepelno – mechanickým zaťažením.....	65
Obr. 46 Drsnosť povrchu kovacej zápustky pri troch rozdielnych typoch tepelného a chemicko-tepelného spracovania.....	67
Obr. 47 Grafické zobrazenie dosiahnutého zníženia drsnosti povrchov leštených kontinuálnym laserom podľa rôznych autorov.....	70
Obr. 48 Grafické zobrazenie dosiahnutého zníženia strednej hodnoty plošnej drsnosti leštených povrchov pulzným laserom podľa rôznych autorov.....	71
Obr. 49 Grafické zobrazenie redukcie strednej aritmetickej odchýlky plošnej drsnosti pri USP laserovom leštení.....	71
Obr. 50 Grafické zobrazenie výsledkov leštenia rovinnej plochy obrobku z Co-Cr zliatiny, leštenej pulzným laserom.....	72
Obr. 51 Grafické zobrazenie výsledkov leštenia plochy so zložitejšou geometriou z Co-Cr zliatiny, leštenej pulzným laserom.....	73

ZOZNAM TABULIEK

Tab. 1 Chemické zloženie ocele 1.2738 podľa normy ISO 4957:2018 v hm. %.....	29
Tab. 2 Parametre procesu laserového leštenia.....	30
Tab. 3 Chemické zloženie súčiastky z ocele AISI H11 udávané dodávateľskou spoločnosťou Deutche Edelstahlwerke.....	32
Tab. 4 Prehľad parametrov procesu pre jednotlivé laserom leštené polia P1 – P4.....	32
Tab. 5 Použité parametre laserového leštenia vzoriek materiálu AlSi10Mg.....	40
Tab. 6 Výsledná drsnosť povrchu po laserovom leštení.....	41
Tab. 7 Chemické zloženie leštenej vzorky z prášku AISI 316 L.....	43
Tab. 8 Chemické zloženie vzoriek vyrobených spoločnosťou SLM Solutions v %.....	45
Tab. 9 Základné parametre leštenia Co - Cr zliatiny.....	46
Tab. 10 Leštiace stratégie a im prislúchajúce hustoty energie laserového zväzku.....	47
Tab. 11 Chemické zloženie ocele S136H.....	52
Tab. 12 Parametre procesu leštenia s výkonom laseru 200 – 600 W.....	53
Tab. 13 Parametre procesu s rýchlosťou skenovania 200 – 1000 mm.s ⁻¹	53
Tab. 14 Opracovanie plôch podľa normy STN 228306.....	66

ÚVOD

Výskum v oblasti dokončovania povrchov laserovým zväzkom je v súčasnosti veľmi rozšírený a to hlavne preto, že tieto technológie dokážu nahradiť konvenčné spôsoby leštenia, ušetriť čas procesu a zlepšiť morfológiu a výslednú drsnosť povrchu. V procese laserového leštenia je materiál natavený iba lokálne v mieste dopadu laserového zväzku a keďže na povrch materiálu pôsobí zväzok len krátku dobu (rádovo v ns, ps a fs), teplom ovplyvnená oblasť lešteného materiálu je minimálna. Dokončovacie operácie povrchu pomocou lasera by mohli postupne nahradiť časovo náročné a chybové mechanické operácie, ktoré si často vyžadujú nástrojové materiály. Laserové leštenie sa preto javí ako efektívna, hospodárna a zároveň bezpečnejšia alternatíva, vďaka bezkontaktnému procesu leštenia a možnosti aplikovania na množstve nielen kovových ale aj nekovových povrchov. Výhodou oproti konvenčným metódam leštenia je vysoká presnosť, opakovateľnosť a možnosť automatizácie procesu. Praktické využitie nachádza technológia laserového leštenia napríklad pri opracovaní rôznych biokompatibilných materiálov v medicíne, pri výrobe nástrojov na objemové tvárnenie za tepla, v optike a všade tam kde je potrebná vysoká povrchová kvalita.

Obsahom práce je prehľadová štúdia z dostupných literárnych zdrojov z oblasti výskumu laserového leštenia, pričom zvýšená pozornosť je venovaná sumarizácii poznatkov o vplyvoch laserového leštenia na výslednú topografiu povrchov nástrojových materiálov, s dôrazom na materiály používané na objemové tvárnenie za tepla. Touto technológiou nie je nežiadúci materiál odstránený ale lokálne natavený a následne prerozdelený na iné miesto. V skutočnosti dochádza k roztaveniu materiálu na najvyšších výstupkoch profilu a následnému presunutiu do nižších miest profilu - priehlbín. Pre dosiahnutie čo najlepších výsledkov drsnosti povrchu, musia byť správne zvolené vstupné parametre procesu ako sú pracovný režim a výkon lasera, rýchlosť skenovacieho pohybu, prekrytie stopy laserového zväzku, doba trvania pulzu, pulzná frekvencia alebo typ a spôsob použitia ochranného plynu.

1. LASEROVÉ LEŠTENIE

Laserové leštenie je v súčasnej dobe inovatívny proces dokončovania súčiastok, ktorého princíp spočíva v natavení tenkej vrstvy materiálu za účelom zníženia drsnosti. Trendom posledných rokov v medicínskom a v priemyselnom sektore je rastúci dopyt po veľmi presných súčiastkach. Od svojho vynálezu v roku 1960 si laser všimlo veľa priemyselných odvetví pre rozličné aplikácie. Z dôvodu rastúceho trendu zvyšovania požiadaviek na presnosť a drsnosť povrchov sa neustále zvyšuje záujem o vyžitie procesu leštenia pomocou lasera. Výslednú kvalitu lešteného povrchu ovplyvňuje mnoho faktorov, vrátane východiskovej topografie povrchovej vrstvy materiálu, vlastností materiálu a vplyvu energetických parametrov procesu laserového leštenia ako sú výkon lasera, rýchlosť skenovania, poloha ohniska, geometrické parametre laserového zväzku a stratégia jeho pohybu. Okrem odstránenia pôvodných povrchových mikronerovností môže proces leštenia spôsobiť vznik novej morfológie povrchu a komplexne tak ovplyvniť vlastnosti povrchovej vrstvy materiálu, ako sú výškové a plošné parametre drsnosti, mikrotvrdosť materiálu a zvyškové napätia, čo môže výrazne vplývať na výslednú kvalitu laserom leštených súčiastok. (Chen ,Hai-Lung Tsai, 2018).

1.1 Proces laserového leštenia

Proces pretavovania povrchovej vrstvy materiálu pomocou laserového zväzku predstavuje nekonvenčnú technológiu dokončovania povrchov vyrábaných súčiastok. V procese laserového leštenia nie je materiál odstránený, ale prerozdelený v tekutom stave a po stuhnutí je výsledkom nová morfológia povrchovej vrstvy materiálu. (Temmler et al., 2019).

Laserovým leštením je možné výrazne znížiť drsnosť povrchu obrábaných častí. V procese laserového leštenia fokusovaný laserový zväzok ožaruje povrch vzorky s dostatočnou hustotou energie, čo zapríčiňuje tavenie povrchu rádovo až do niekoľkých mikrometrov. V porovnaní s konvenčnými metódami leštenia ako sú napríklad mechanické, zaistuje možnosť opracovať rôzne orientované povrchy, výhodou je absencia opotrebenia nástroja bez potreby abrazíva alebo tekutiny a vyznačuje sa najmä kratším obrábacím časom. V spojení s galvo zrkadlovým systémom sú výsledky vhodnejšie v prípade 3D obrobkov so zložitejšou geometriou. (Giorleo et. al., 2015).

Dokončovací proces leštenia je primárne určený na vyhladenie povrchových nedostatkov obrobku za účelom redukovania výstupkov a zníženia parametrov drsností. Taktiež môže byť použitý pre vylepšenie optických vlastností alebo pre účely zatriktívnenia dizajnu súčiastky v prípade viditeľných častí. Ďalej je tento proces využívaný na elimináciu nežiadúcej oxidácie, dodržanie tolerancií, vytvorenie reflexného povrchu alebo zabránenie korózie. Zlepšenie topografických vlastností sa dosahuje aj v prípade povrchovej úpravy veľkých kovových foriem. Mechanické leštenie je konvenčná technika používaná na povrchovú úpravu, pozostávajúca z viacerých krokov ako sú brúsenie a leštenie, realizovaných pomocou brúsnych a leštiacich nástrojov. Okrem výhod, vyžaduje mechanické leštenie veľké úsilie, kvôli nízkym leštiacim rýchlostiam. V prípade obrobkov, ktoré sa vyznačujú veľkou tvrdosťou je registrovaný aj nedostatok výkonu a obmedzený prístup k obrobku. Z dôvodu potreby fyzického kontaktu medzi povrchom obrobku a nástrojom je často finálna operácia leštenia vykonávaná ručne, čo v konečnom dôsledku značne predlžuje celkový čas výroby. V súčasnosti je ale k dispozícii efektívnejšia technológia na zlepšenie mikrogeometrických povrchových vlastností a tou je práve laserové leštenie (Giorleo et. al., 2015).

Povrch súčiastky nie je leštený ručne ani leštiacim médiom, ale prostredníctvom laserového zväzku, ktorý dokáže nataviť povrch do hĺbky 50 – 100 μm . Povrchové napätie zabezpečuje, že tekutý kov prúdi rovnomerne a rýchlo tuhne. Podobne ako pri konvenčných metódach, čím viac sa proces opakuje, tým sa dosahujú lepšie výsledky z hľadiska kvality topografie lešteného povrchu.

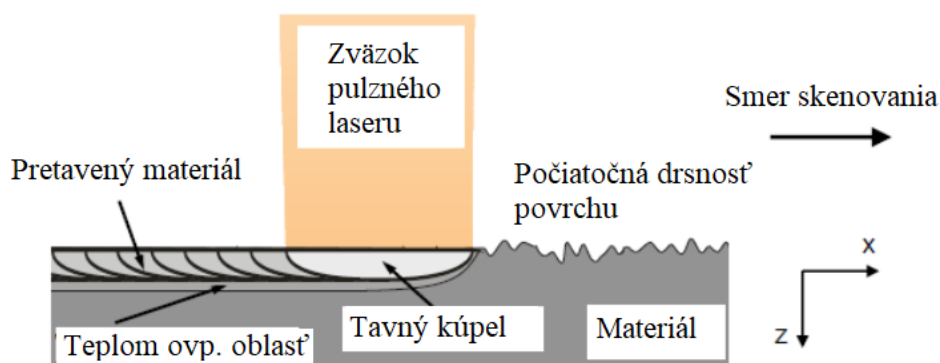
Laserové leštenie nedosahuje rovnakú úroveň parametrov drsnosti ako ručné leštiace nástroje, pretože dokonalým ručným leštením možno dosiahnuť drsnosť povrchu iba $R_a = 5$ nm, laser v súčasnosti dosahuje pri vhodných parametroch približne $R_a = 50$ nm. Drsnosť $R_a = 50$ nanometrov je dostatočná pre mnoho aplikácií vrátane foriem používaných na výrobu štandardných plastových dielov. Špičkové úrovne drsnosti preto naďalej zostanú doménou manuálnych leštiacich nástrojov. (Boughton, 2013).

1.2 Princíp laserového leštenia kovových povrchov

Pri využití laserového žiarenia na leštenie povrchov kovových súčiastok je pretavovaná tenká povrchová vrstva, ktorá je vyhladená za pomoci povrchového napätia. Inovácia laserového leštenia spočíva v jeho zásadne odlišnom spôsobe pôsobenia (pretavovania) v porovnaní s metódami založenými na mechanickom úbere materiálu, ako sú brúsenie alebo

mechanické leštenie. Pre kovové materiály sa spravidla využívajú pevnolátkové lasery. Pokiaľ už povrchy pred samotným leštením vykazujú malú drsnosť, napríklad po dokončovacích operáciách ako je brúsenie, môžu byť použité pulzné lasery s dĺžkou pulzu rádovo niekoľko 100 ns. V prípade drsnejších povrchov, napríklad po frézovaní alebo komponentov zhotovených aditívnou výrobou sa využívajú kontinuálne lasery. Hĺbka pretavenia sa pohybuje pri kontinuálnych laseroch až do 100 μm (Fraunhofer ILT, 2018).

Technológia laserového leštenia pomocou dlhších pulzov (ns) spočíva v pretavení tenkej povrchovej vrstvy súčiastky ($\leq 100 \mu\text{m}$). Samotný proces je založený na redistribúcii materiálu v kvapalnej fáze a nie ako pri bežných leštiacich procesoch na odstraňovaní prebytočného materiálu. Ako je možné vidieť na obr. 1, pohybom laserovej hlavy sa vytvára tavný kúpeľ o veľkosti zodpovedajúcej priemeru laserového zväzku. Súčasne s posuvom zväzku v smere x-ovej osi sa postupne povrch pretaví a dochádza k jeho vyhladeniu. Pri tejto progresívnej metóde teda nedochádza k žiadnemu úberu materiálu, ale iba k jeho prerozdeleniu.



Obr. 1 Schéma procesu laserového leštenia pulzným laserom (Temmler et. al., 2020).

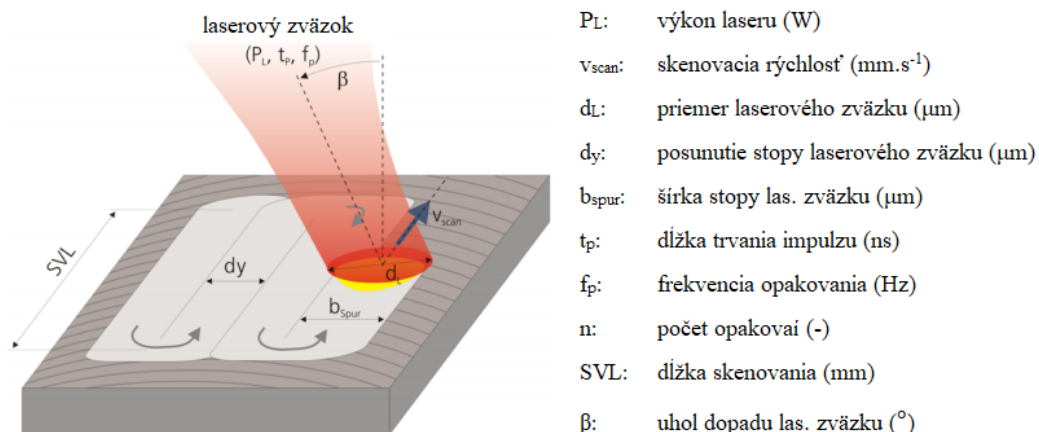
Laserové leštenie je zložitý termodynamický proces ovplyvnený morfológiou povrchovej vrstvy pred leštením, fyzikálnymi vlastnosťami materiálu závislých od času, parametrami procesu a interakciou medzi laserovým žiarením a obrábaným materiálom. Všeobecne je laserové leštenie kombináciou pretavovania a odparovania mikročastíc. Mechanizmus, ktorý dominuje procesu je prúdenie roztaveného materiálu tenkej povrchovej vrstvy účinkom povrchového napätia (Temmler et. al, 2020).

Pri typicky používaných parametroch procesu, t. j. doba trvania pulzu niekoľko stoviek ns, frekvencií niekoľko desiatok až stoviek kHz, skenovacej rýchlosti zvyčajne väčšej ako 100 mm.s^{-1} a priemere stopy laserového zväzku v rozmedzí mikrometrov, je roztavený materiál ztuhnutý ešte predtým, ako následný laserový pulz vytvorí ďalšiu

skupinu taveniny, ako je možné vidieť na obr. 1. Autor štúdie uvádza, že daný proces je skôr typicky diskontinuálny, diskrétny proces ako kontinuálny proces pretavovania. Pri použití priemeru laserového zväzku v rozpätí 30 – 300 μm , prevláda vysoký pomer priemeru laserového zväzku k hĺbke pretavenia a teda sa predpokladá jednorozmerný stav vedenia tepla počas samotného procesu leštenia za pomoci laserového zväzku (Temmler et. al., 2020).

1.3 Parametre ovplyvňujúce proces leštenia

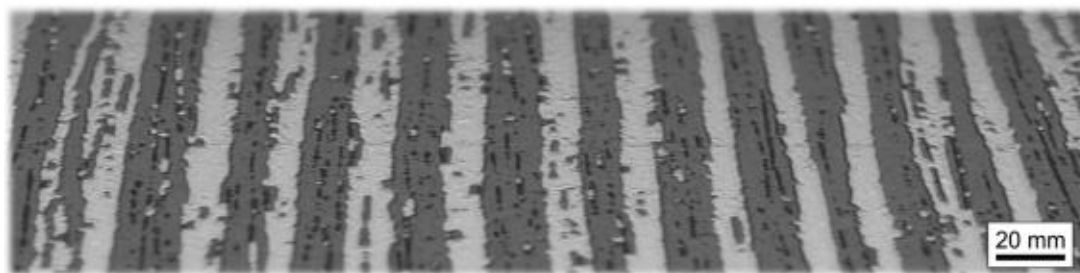
Medzi hlavné kategórie procesných parametrov, ktoré výrazne ovplyvňujú laserové leštenie patria parametre súvisiace s obrobkom, laserom, optikou a pohybom laserového zväzku. V skutočnosti môžu niektoré parametre súvisieť aj s viacerými kategóriami. Napríklad laserový zväzok je ovplyvnený samotným zdrojom ale aj optickými nastaveniami. V tejto súvislosti sú dôležitými parametrami procesu najmä tie, ktoré vyplývajú z charakteristík zdroja laserového zväzku a optického nastavenia. Patrí sem maximálny výkon lasera, vlnová dĺžka, frekvencia pulzov, doba trvania pulzu, tvar pulzu, hustota energie pulzu, kvalita zväzku, distribúcia intenzity a priemer zväzku. Pokiaľ ide o stratégiu laserového leštenia, dôležitými parametrami sú výkon lasera, priemer stopy laserového zväzku (d_L), rýchlosť skenovania (v_{scan}), frekvencia pulzov (f_P), celkový čas skenovania, uhol sklonu β , počet opakovaní n , posunutie stopy laserového zväzku (d_y) a percento prekrytia stopy laserového zväzku a šírka stopy b_{spur} . Mikroštruktúra a výsledné výškové a plošné parametre drsnosti, sú napríklad významne ovplyvnené aj materiálom, ktorý je leštený. Do tejto kategórie patria aj všetky vlastnosti pretavenej povrchovej vrstvy, ako je tvrdosť, zvyškové napätie, odolnosť proti korózií alebo odolnosť voči abrazívnemu a adhéznemu opotrebeniu. Jednotlivé parametre procesu sú uvedené na obr. 2 (Chow et. al., 2010).



Obr. 2 Schéma parametrov vstupujúcich do procesu laserového leštenia pulzným režimom (Temmler et. al., 2012).

1.4 Selektívne laserové leštenie

Selektívne laserové leštenie je špeciálna metóda, pri ktorej je povrch pretavený iba čiastočne, do hĺbky približne ($< 5 \mu\text{m}$) a vyhladené sú iba lokálne definované plochy. Selektívne laserové leštenie ponúka možnosť spracovania i veľmi malých plôch menších ako $0,1 \text{ mm}^2$. Tejto metóde sa podrobne venovali Temmler et. al. (2011). Na základe výsledkov štúdie vyvinul Temmler (2013) kompletný procesný reťazec pre selektívne laserové leštenie a demonštroval jeho použiteľnosť aj pre 3D objekty so zložitejšou geometriou. Podobne ako pri „veľkoplošnom“ laserovom leštení je možné vyhladenie povrchu pomocou pulzného alebo kontinuálneho režimu. Laserový zväzok kruhového priemeru d_L sa vedie cez povrch súčiastky v tvare meandra, skenovacou rýchlosťou v_{scan} . Na rozdiel od bežného laserového leštenia, energia pulzov nie je konštantná počas celého procesu. Výkon lasera sa môže taktiež počas procesu prepínať medzi rôznymi úrovňami výkonu lasera, kontrolovaným spôsobom v závislosti od pozície. Preto iba vybrané oblasti povrchu, kde pôsobí dostatok laserovej energie sú pretavené a vyhladené. Niektoré miesta na povrchu tak ostávajú bez opracovania. Povrch po selektívnom leštení vykazuje vizuálny dojem tzv. dvojitého lesku, zapríčinený priestorovou zmenou drsnosti povrchu, samozrejme v závislosti od rôznych parametrov, vstupujúcich do procesu. Na obr. 3 je vidieť kontrast malých matných neobrobených oblastí a lesklých, laserom leštených oblastí (Temmler et. al., 2020).



Obr. 3 Príklad tzv. dvojitého efektu lesku na oceli AISI410 (STN 17 021), pri použití selektívneho laserového leštenia (Temmler et. al., 2020).

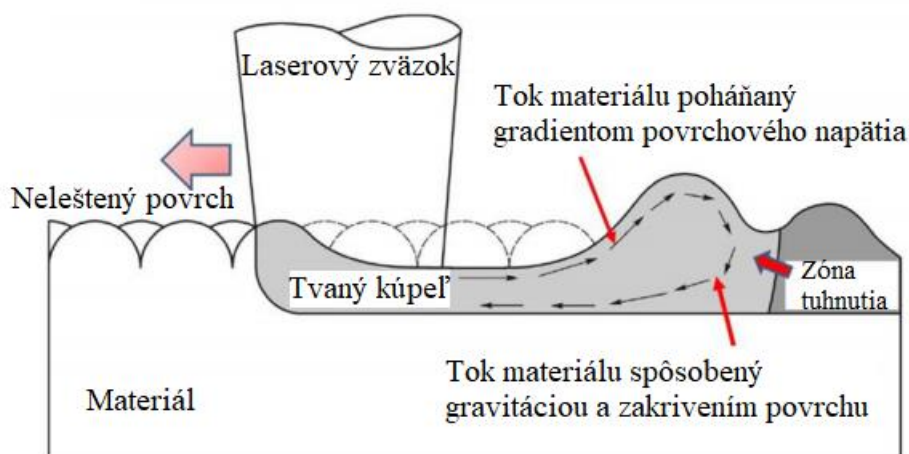
1.5 Kontinuálny a pulzný režim tavenia materiálu

V procese laserového leštenia je možné identifikovať dva pracovné režimy, v závislosti od hrúbky pretavenej vrstvy a veľkosti teploty ovplyvnenej oblasti. Jedným z nich je režim, pri ktorom dochádza iba k čiastočnému taveniu povrchovej vrstvy (SSM) a ďalšie je nadmerné pretavenie povrchu (SOM). V režime pulznom - SSM nie je dodávaná príliš veľká energia a hrúbka natavenej vrstvy je menšia, ako pri kontinuálnom, nepretržitom pracovnom režime. Výstupky sú postupne roztavené a následne postupne vyplňajú priehlbiny, pôsobením kapilárneho tlaku, preto je možné drsnosť povrchu znížiť iba čiastočne. Pri kontinuálnom režime -SOM nepretržitého pôsobenia laserového zväzku, je na povrch dodávaná väčšia energia ako pri predošlom režime, v dôsledku čoho sa vytvorí tavný kúpeľ, ktorý zapríčiní transformáciu pôvodnej topografie povrchu. Natavená oblasť je preto väčšia, a vytvára aj väčšiu teplotu ovplyvnenú oblasť ako je možné vidieť na obr. 4 vľavo (Young et. al., 2019).

Pracovný režim	Kontinuálny režim	Pulzný režim (100 - 1000 ns)
Schéma		
Hĺbka pretavenia	20 - 100 μm	<5 μm
Čas procesu natavenia	7 - 60 s/cm ²	1 - 10 s/cm ²
Počiatočná drsnosť povrchu	po sústružení, frézovaní, elektroerozívnom obrábani Ra = 0,4 - 10 μm	po brúsení, dokončovacích operáciách frézovania Ra = 0,2 - 0,8 μm
Dosahovaná drsnosť povrchu	V závislosti od materiálu, kvality materiálu a počiatočnej integrity povrchu Ra = 0,05 - 0,50 μm / Rz = 0,4 - 3 μm	

Obr. 4 Porovnanie kontinuálneho a pulzného režimu (Young et. al., 2019).

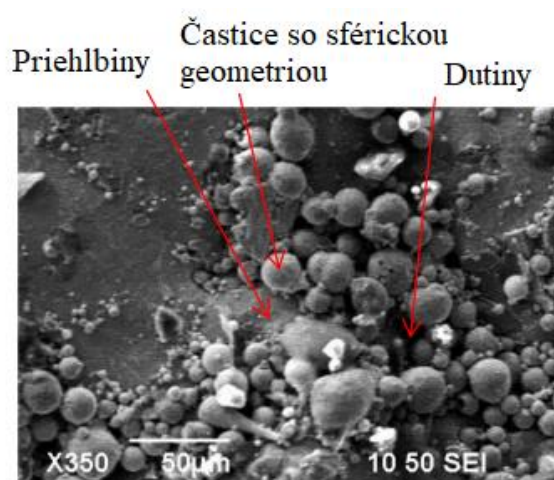
Pokiaľ ide o režim kontinuálny, nadmerné tavenie povrchu dopomáha výrazne znižovať drsnosť a súčasne pôsobením kapilárneho tlaku vyvolávať vlnitú štruktúru povrchu, zapríčinenú v dôsledku gradientu povrchového napätia za prednou časťou laserového zväzku, ako je znázornené na obr. 5 (Young et. al., 2019).



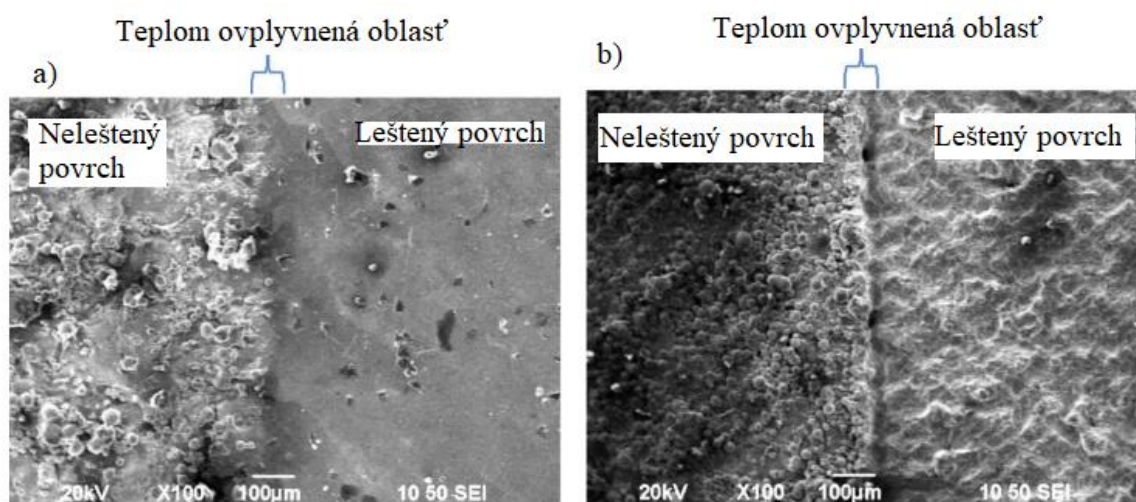
Obr. 5 Schéma tvorby novej povrchovej topografie počas kontinuálneho režimu (Young et. al., 2019).

Na obr. 6 je snímka vyhotovená na elektrónovom mikroskope, na ktorej je znázornená morfológia povrchu pred laserovým leštením vzorky vyrobenej pomocou aditívnej výroby. Po laserovom leštení je možné rozlíšiť na vzorkách 3 oblasti: neleštenú oblasť, teplom ovplyvnenú oblasť a vyleštenú oblasť, ktoré sú znázornené na obr. 7a,b. Pri experimente v danej štúdií je drsnosť povrchu neleštených vzoriek vyhotovených aditívnou výrobou $R_a = 12 \mu\text{m}$. Zo snímok je zrejmé, že teplom ovplyvnená oblasť vykazuje mierne odlišnú topografiu povrchu oproti neleštenej oblasti a vyleštená oblasť je výrazne vyhladená. V dôsledku rozdielneho množstva absorbovaného tepla a rozdielneho leštiaceho prostredia (vzduch, vákuum/ argón) môže v týchto troch oblastiach dochádzať k rôznym fyzikálnym a chemickým zmenám, ktoré majú za následok rozdielnu výšku výstupkov a priehlbín a rozdielne chemické zloženie povrchovej štruktúry v porovnaní s nevyleštenou topografiou povrchu. Na obr. 7a je znázornený povrch vzorky leštenej pri vyššom výkone a kontinuálnom pracovnom režime vo vákuovom prostredí. Výkon laseru je nastavený na 200 W, skenovacie rýchlosť 508 mm.s^{-1} a posunutie stopy laserového zväzku $0,127 \text{ mm}$. Druhý krát je vzorka leštená pri výkone 100 W, skenovacej rýchlosti 1016 mm.s^{-1} a šrafovej vzdialenosti $0,508 \text{ mm}$. Na základe výpočtu hustoty dodávanej energie pre prvé leštenie je približne $3,1 \text{ J.mm}^{-2}$ respektíve $0,2 \text{ J.mm}^{-2}$ pri druhom leštení. Hodnota drsnosti

bola nameraná $Ra = 0,735 \mu\text{m}$ na obr.7a. Na obr. 7b je vzorka leštená pri nízkom výkone bez ochrannej atmosféry. V pulznom režime je pri nižšom výkone vzorka leštená rovnako dva krát. Pri prvom leštení je výkon lasera nastavený na 40 W, skenovacia rýchlosť 1500 mm.s^{-1} a posunutie stopy laserového zväzku $0,008 \text{ mm}$. Pri druhom leštení je výkon znížený na 25 W, rýchlosť skenovania 2000 mm.s^{-1} a posunutie stopy laserového zväzku $0,05 \text{ mm}$. Hustota dodanej energie je pri prvom a druhom leštení $3,3 \text{ J.mm}^{-2}$ respektíve $0,3 \text{ J.mm}^{-2}$. Z obr. 7b je zrejmé, že častice prášku sú čiastočne roztavené a vytvárajú novú textúru, ktorá sa nevyznačuje až tak dobrou kvalitou povrchu. Dosiadnutá drsnosť je $Ra = 4,67 \mu\text{m}$ v leštenej oblasti (Young et. al., 2019).



Obr. 6 Topografia povrchu vzorky pred laserovým leštením snímaná pri 350 násobnom zväčšení na elektrónovom mikroskope (Young et. al., 2019).



Obr. 7 Snímky elektrónového mikroskopu pri 100 násobnom zväčšení, pri použití vysokého výkonu a kontinuálneho režimu (a) a pri použití nízkeho výkonu lasera v pulznom režime (b) (Young et. al., 2019).

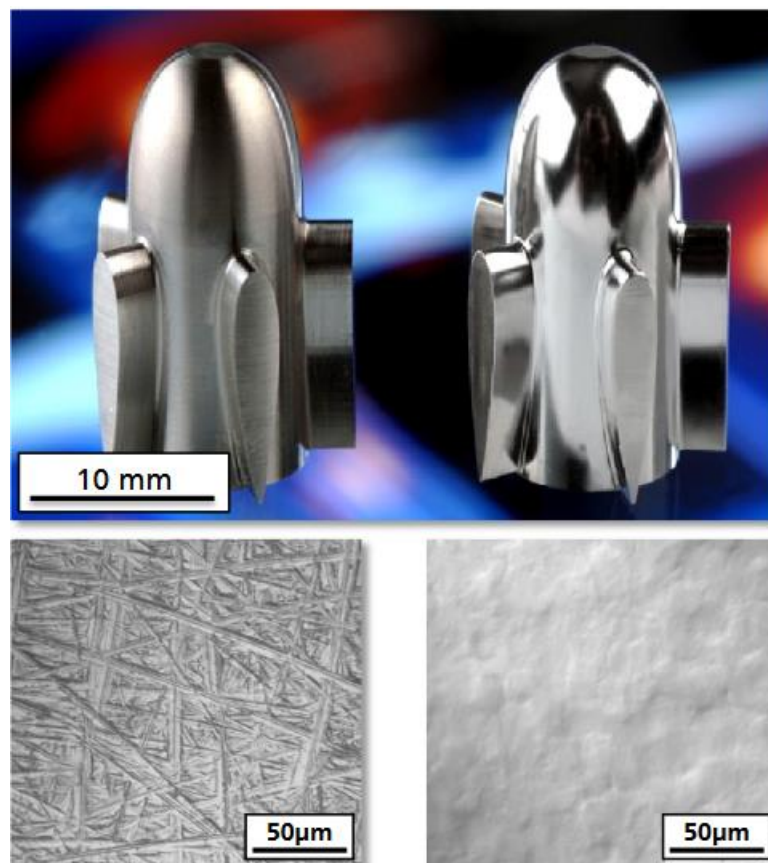
1.6 Výhody laserového leštenia

Na kvalitu povrchov sa neustále kladú väčšie požiadavky, preto inovácie najmä v súvislosti s dokončovaním, sa dostávajú stále do popredia, keďže sú založené na úplne odlišnom princípe úpravy povrchovej vrstvy, ako konvenčné spôsoby ako sú brúsenie alebo mechanické leštenie. Leštené môžu byť rozličné druhy materiálov, v závislosti od drsnosti povrchu pred leštením je potreba použiť vhodný pracovný režim. Zásadná výhodou je možnosť leštenia ťažko dostupných a tvarovo členitejších súčiastok so zložitejšou geometriou. Laserové leštenie sa často aplikuje na povrchy materiálov titánových a niklových zliatin, ale veľká pozornosť sa venuje aj lešteniu nástrojových materiálov v súvislosti s kladeným požiadaviek na výslednú kvalitu povrchu, kovacích zápustiek, foriem na vstrekovanie plastov a podobne. (Fraunhofer ILT, 2018).

Výhodou procesu je aj možnosť leštenia ťažko obrobitelných biokompatibilných materiálov na báze Ti. Titánové zliatiny majú často uplatnenie v biomedicínskom a leteckom priemysle, kvôli svojej špecifickej pevnosti a odolnosti voči korózií. Bežná výroba komponentov z titánových zliatin je kvôli nízkej tepelnej vodivosti a vysokej chemickej reakčnosti titánu pomerne zložitá, preto sa takéto súčiastky často vyrábajú procesmi práškovej metalurgie, ktorá sa využíva pri výrobe alebo oprave komponentov so zložitejšou geometriou najmä v medicínskom priemysle, kde sú komponenty malých rozmerov, vyžadujúce si špecifickú morfológiu povrchu, napríklad zubné alebo kostné implantáty a podobne. Komponenty zhotovené selektívnymi laserovým spekaním často dosahujú drsnosť väčšiu ako 10 μm , preto je vhodné použiť ešte potrebnú úpravu morfológie povrchu. V porovnaní s konvenčnými metódami leštenia, laserové leštenie mení morfológiu povrchu opätovným roztavením, bez toho aby sa z materiálu odoberalo alebo by sa výrazne ovplyvnili chemické vlastnosti. Vykazuje možnosť vysokého stupňa automatizácie a uplatnenia najmä pri opracovaní ťažko obrobitelných materiálov (Ma et. al., 2017).

Medzi ďalšie výhody procesu patrí možnosť koncentrácie laserového zväzku iba na veľmi malú oblasť povrchu opracováanej súčiastky, kde dochádza k nataveniu plochy často menšej ako 1 mm^2 . Rýchlosť procesu je vyššia v porovnaní s mechanickými metódami leštenia, avšak závisí od intenzity laserového zväzku a type lešteného materiálu. Technológia je aplikovateľná aj pri dokončovaní povrchov po frézovaní, sústružení, brúsení, nezaťažuje životné prostredie ako leštiace alebo brúsiace dokončovacie metódy, tým že nezanecháva žiaden odpad, alebo ho nijak neznečisťuje rôznymi leštiacimi pastami a podobne. Proces si nevyžaduje žiadnu výmenu nástrojov, preto je aj z dlhodobého hľadiska

ekonomicky veľmi výhodný, napríklad v sériovej výrobe. Nevyžaduje si ani potrebný školený personál, keďže proces je plne automatizovaný. V porovnaní s mechanickým, elektro chemickým, hydrodynamickým a magnetorheologickým leštením, laserové dosahuje najlepšie výsledky čo sa týka estetických a vizuálnych vlastností ako je napríklad lesk. Zabezpečuje dokonalé opracovanie aj zložitejšej geometrie povrchu, čo sa vždy nedá zabezpečiť pomocou starších leštiacich techník. Ďalšou výhodou je vysoká reprodukovateľnosť a zanedbateľné mechanické namáhanie, z dôvodu bezkontaktného procesu. Touto technikou sa dá za oveľa kratší čas vyleštiť väčšiu a zložitejšiu plochu povrchovej vrstvy materiálu, ako je vidieť na obr. 8 kde je zobrazená súčiastka používaná v medicíne, ktorej manuálne leštenie trvá 3 hodiny a laserové iba približne 5 minút. (Krishan, Fang 2019).



Obr. 8 Povrch frézovanej súčiastky pred a po laserovom leštení (Fraunhofer ILT, 2018).

2. LASEROVÉ LEŠTENIE NÁSTROJOVÝCH MATERIÁLOV

Trendom posledných rokov v priemyselnej výrobe je neustála miniaturizácia a s tým spojený priamoúmerný nárast dopytu po stále presnejších, zložitejších tvarových plochách, vďaka čomu narastá potenciál aplikovateľnosti laserového leštenia na povrchy nástrojových materiálov. V súčasnosti majú nástroje a formy z nástrojových ocelí širokú škálu uplatnenia pri navrhovaní a výrobe najrozličnejších priemyselných výrobkov od leteckého, automobilového a elektrického alebo medicínskeho priemyslu, až po výrobky pre domácnosť a spotrebný tovar. Pri výrobe foriem pre vstrekovanie plastov alebo kovacích zápustiek sú nástrojové ocele určené pre prácu za tepla kľúčové (Temmler et. al., 2020).

Nástrojové materiály majú veľké uplatnenie pri výrobe rozličných typov nástrojov kde sa vyžaduje zvýšená mechanická a tepelná odolnosť ako sú formy na vstrekovanie plastov, výroba kovacích zápustiek alebo formy určené pre vysokotlakové liatie. Štúdie ukazujú že využitie laserového leštenia môže byť aplikované aj pri komponentoch zhotovených aditívnym spôsobom výroby, pretože sa komponenty vyznačujú zlou kvalitou povrchovej vrstvy, ktorá nespĺňa geometrické tolerancie a nedosahuje ani požadovanú drsnosť. Tieto súčiastky sú zhotovené aditívnou výrobou najčastejšie metódou selektívneho spekania laserom - SLS (Selective Laser Sintering) alebo selektívneho laserového tavenia – SLM (Selektive Laser Melting). Na povrch leštených súčiastok z nástrojových ocelí je dodávané teplo prostredníctvom laserového zväzku s pulzným alebo kontinuálnym režimom pri rôznych procesných podmienkach, s cieľom dosiahnutia vynikajúcej topografie povrchovej vrstvy (Young et. al., 2019).

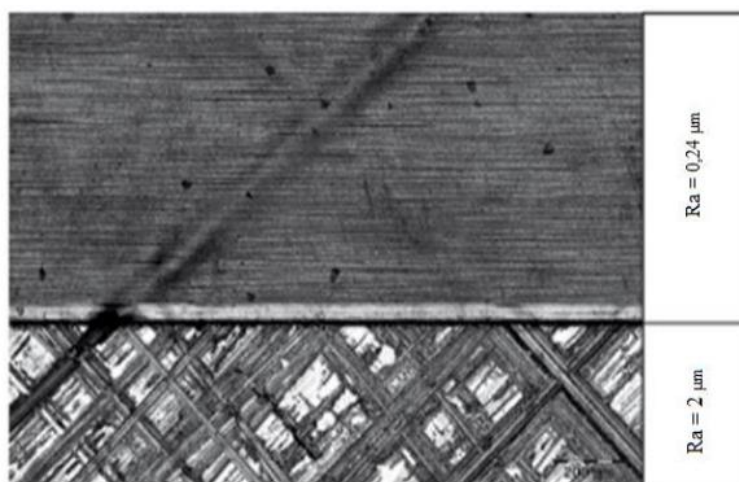
2.1 Leštenie nástrojových materiálov laserovým zväzkom

Dokončovacie operácie povrchov majú významnú úlohu a sú hlavným a veľmi dôležitým krokom v procese priemyselnej výroby nástrojov. V súčasnosti sa konečná operácia leštenia vykonáva manuálne, čo predstavuje viac ako 20 % z celkového času výroby tvárniacich nástrojov. Tento proces musia navyše realizovať kvalifikovaní pracovníci čo má za následok vysoké náklady na výrobu a predĺženie výrobných časov (Ukar et. al., 2009).

Pre leštenie nástrojovej ocele sa používajú lasery s kontinuálnym a pulzným režimom. Pre drsnejšie povrchy sa využíva kontinuálny režim a naopak pre hladšie povrchy pulzný režim. V mnohých publikovaných štúdiách sa podarila redukcia drsnosti pri použití

kontinuálneho režimu o 40 – 87 %, v porovnaní s východiskovou drsnosťou povrchu. V štúdií Hafiz et. al. (2012) vykonali laserové leštenie na vzorkách z ocele AISI H13 (STN 19 554) s rôznym percentuálnym prekrytím stôp laserového zväzku a tak zlepšili drsnosť povrchu o 87 %. Richter et. al. (2019) demonštrovali vhodnosť predikčného modelu kritickej frekvencie opakovaní Co-Cr-Mo zliatiny pomocou kontinuálneho zväzku, čím dosiahli redukciu drsnosti o 70 %. Miller et. al. (2017) pri leštení ocele AISI H13 (STN 19 554) zistili, že pri vhodnom nastavení výkonu lasera a skenovacej rýchlosti, sa kvalita povrchu zlepšila o 83 % (Xiao et. al., 2020).

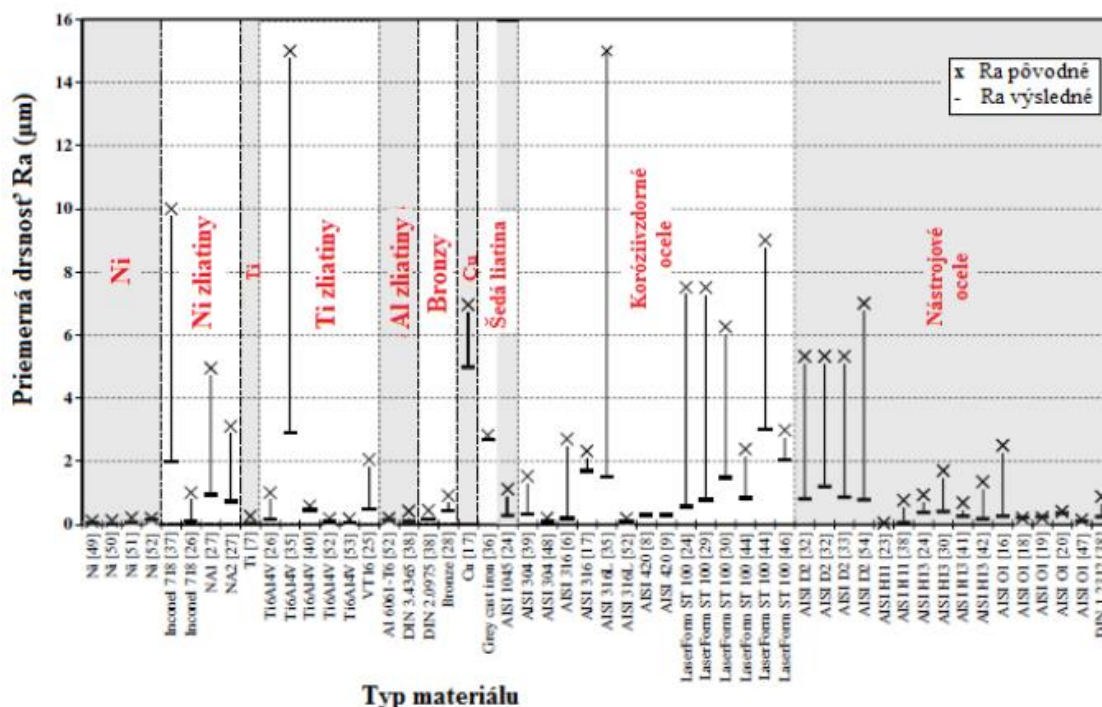
Na vyhodnotenie z hľadiska dosahovanej drsnosti, sa aplikovalo laserové leštenie v experimente na tri druhy ocelí - zušľachtená oceľ 1.2312 (STN 19 520), koróziívzdorná oceľ 1.4301 (STN 17 240) a popustená uhlíková oceľ 1.1191 (STN 12 050). Každý z povrchov bol opracovaný inou technológiou, kvôli rozdielnej topografii povrchu. Začiatočné hodnoty drsností sa pohybovali v rozmedzí od $R_a = 2 \mu\text{m}$ až do $R_a = 1,2 \mu\text{m}$, v prípade sústružených a frézovaných povrchov. Na brúsenom povrchu pred laserovým leštením bol nameraný parameter drsnosti $R_a = 0,8 \mu\text{m}$. Výkon lasera bol nastavený na 50 W, s dĺžkou trvania pulzu 10 ps a pulznou frekvenciou 8,2 MHz. Na sústružených povrchoch bola nameraná drsnosť povrchu $R_a = 0,24 \mu\text{m}$ čo je 5 – násobné zmenšenie oproti východiskovej drsnosti povrchu $R_a = 1,2 \mu\text{m}$. Na obr. 9 je znázornená topografia povrchu frézovanej plochy, kde boli zaznamenané najlepšie výsledky drsnosti, ktorá bola zmenšená z $R_a = 2 \mu\text{m}$ na výsledných $0,24 \mu\text{m}$, čo predstavuje až 8 – násobné zmenšenie drsnosti (Pauli 2014).



Obr. 9 Topografia povrchu frézovanej vzorky pred a po leštení laserom (Pauli 2014).

V štúdií Bordatchev a kolektív (2014) sa venovali zozbieraniu poznatkov, o dosahovaných drsnostiach po laserovom leštení rôznych typov materiálov. Experimentami

bolo zistené, že výslednú drsnosť povrchu ovplyvňuje aj leštený materiál, čo korešponduje s tvrdeniami v predchádzajúcich kapitolách. Na obr. 10 sú znázornené výsledky drsností povrchu po laserovom leštení. Chrómové ocele AISI H11 (STN 19 552) a AISI H13 (STN 19 554), určené na prácu za tepla, dosiahli najlepšie výsledky z hľadiska dosiahnutej drsnosti povrchu. Taktiež materiáli ako nikel, titán a zliatiny ako napríklad Ti6Al4V a Inconel 718 (NiCr19NbMo), dosahovali veľmi dobré výsledky drsností, často menšie ako $R_a = 0,1 \mu\text{m}$ (Bordatchev et. al., 2014).



Obr. 10 Dosahovaná drsnosť povrchu jednotlivých materiálov po laserovom leštení (Bordatchev et. al., 2014).

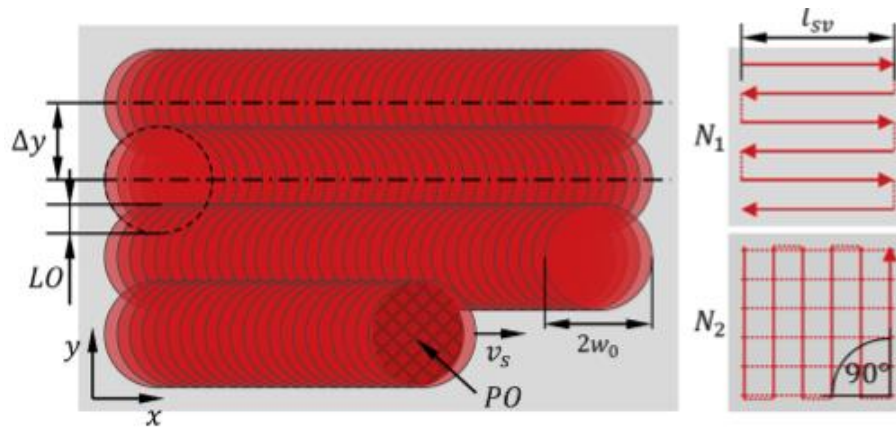
V dôsledku požiadavky po vysokopresných spracovaniach materiálu sa v oblasti laserového opracovania povrchov čoraz viac využívajú lasery s krátkou dobou trvania pulzov - USP (Ultra Short Pulses). Pri výrobe tvárniacich nástrojov a foriem sa pomocou laseru vytvárajú trojrozmerné štruktúry s hĺbkou 10 – 500 μm s výslednou plošnou drsnosťou povrchu $S_a = 0,4 - 2 \mu\text{m}$. Procesu USP laserového leštenia sa venovalo niekoľko štúdií, pričom počiatočné experimenty uskutočnili Hazif et. al. (2014) kedy použili frekvenciu opakovania pulzov 7,45 MHz s dĺžkou trvania pulzu 10,5 ps, v určitom rozsahu hodnôt hustoty dodávanej energie. Výsledná stredná odchýlka plošnej drsnosti povrchu ocele Inconel 718 sa redukovala z východiskovej drsnosti $S_a = 0,435 \mu\text{m}$ na výslednú $S_a = 0,127 \mu\text{m}$, v argónovej atmosfére. Chen et. al. (2018) uskutočnili experimenty s trvaním pulzu 10 ps a pulznou frekvenciou 10 MHz v atmosfére dusíka. Skúmal sa vplyv rôznych

energetických parametrov procesu laserového leštenia na výslednú drsnosť povrchu a hodnotila sa hrúbka pretavenej povrchovej vrstvy a výsledná teplota ovplyvnená oblasť. V ďalšej štúdií Brenner et. al. (2020) poukázali autori na všeobecnú uskutočniteľnosť USP laserového leštenia s vysokou frekvenciou 49,8 MHz s dĺžkou trvania pulzu 10 ps. Hodnotil sa vplyv hlavných parametrov procesu ako sú hustota energie, rýchlosť skenovania laserového zväzku a prekrytie stôp laserového zväzku, na výslednú strednú hodnotu plošnej drsnosti povrchu a dosiahlo sa zníženie drsnosti z $S_a = 0,41 \mu\text{m}$ na $S_a = 0,21 \mu\text{m}$, čo znamená redukovanie drsnosti o necelých 50 %. Autori štúdie konštatovali, že proces laserového leštenia reaguje na zmenu dodávanej hustoty energie veľmi citlivo, pričom rýchlosť skenovania laserovým zväzkom má iba sekundárny vplyv na výslednú drsnosť (Brenner et. al., 2020).

Princíp USP leštenia uvedený v tejto štúdií je založený na kontinuálnom natavení tenkej povrchovej vrstvy materiálu použitím vysokej frekvencie opakovania pulzov 48,92 MHz, kedy materiál medzi jednotlivými pulzami nestuhne a vytvorí sa iba veľmi tenká vrstva teplota ovplyvnenej oblasti. V štúdií Sassmannshausen et. al. (2021) sa podobne ako v predchádzajúcich štúdiách venovali laserovému lešteniu s krátkym trvaním pulzov. Experiment bol realizovaný na nástrojovej ocele 1.2738 (X40CrMnNiMo8) s chemickým zložením uvedeným v tab. 1. Laserové leštenie sa vykonávalo na pevnolátkovom Yb: YAG laseri s frekvenciou pulzov 48,92 MHz a dĺžkou trvania pulzu 800 fs. Maximálny výkon laseru je $P = 75 \text{ W}$ s vlnovou dĺžkou 1030 nm. Schéma stratégie pohybu laserového zväzku je znázornená a popísaná na obr. 11 a parametre procesu sú uvedené v tab. 2 (Sassmannshausen et. al., 2021).

Tab. 1 Chemické zloženie ocele 1.2738 podľa normy ISO 4957:2018 v hm.% (Sassmannshausen et. al., 2021).

C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo
0,35 – 0,45	0,2 – 0,4	1,3 – 1,6	1,8 – 2,1	0,9 – 1,2	0,15 – 0,25



Obr. 11 Schematické zobrazenie stratégie pohybu laserového zväzku

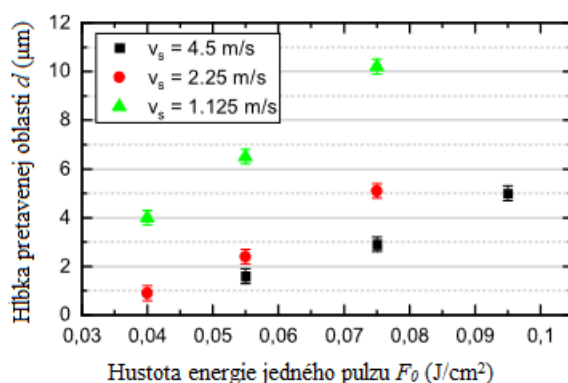
Δy – posun stopy laserového zväzku v smere osy $-y$, LO – prekrytie stôp laserového zväzku v smere osi y , v_s – rýchlosť skenovania, $2w_0$ – priemer stopy laserového zväzku v ohnisku, PO – prekrytie stôp laserového zväzku medzi jednotlivými pulzami v smere osi x (Sassmannshausen et. al., 2021).

Tab. 2 Parametre procesu laserového leštenia (Sassmannshausen et. al., 2021).

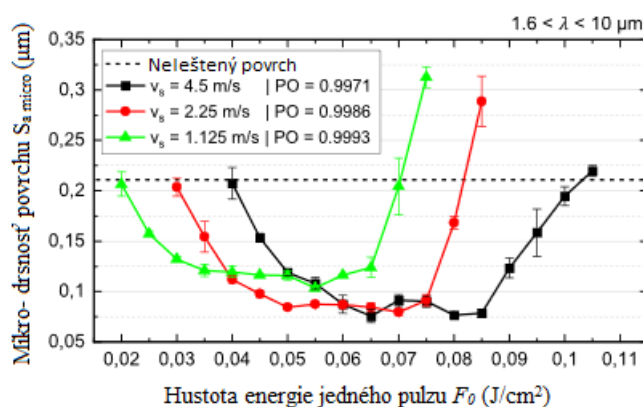
Parameter	Nastavenie
Počet prechodov las. zväzku N	2
Prekrytie stôp las. zväzku v smere osy $-y$ LO	0,83 μm
Priemer stopy laserového zväzku $2w_0$	32 μm , 56 μm
Rýchlosť skenovania las. zväzkom v_s	1125 – 7875 mm.s^{-1}
Hustota energie pulzu F_0	0,02 – 0,125 J.cm^{-2}

V štúdií sa vyhodnocuje stredná aritmetická odchýlka plošnej drsnosti S_a , podľa normy ISO 25178, ako ekvivalent k parametru drsnosti R_a . Pre podrobnejšiu analýzu povrchových štruktúr sa celková drsnosť povrchu rozdelí na jednotlivé intervaly priestorovej vlnovej dĺžky, za pomoci sekvenčnej aplikácie Gaussových filtrov podľa normy ISO 16610 s rozdielnymi medznými vlnovými dĺžkami v intervale $1.6 < \lambda < 10 \mu\text{m}$, definovaná ako mikrodrsnosť - $S_{a \text{ micro}}$. Ďalej v štúdií vyhodnotili produktivitu leštenia laserovým zväzkom pomocou ukazovateľa PR_N – leštená plocha za jednotku času, ktorej hodnota v tomto experimente bola $PR_1 = 12,15 \text{ cm}^2.\text{min}^{-1}$. Plošná drsnosť povrchu bola redukovaná z $S_a = 0,6 \mu\text{m}$ na $S_a = 0,29 \mu\text{m}$, čo predstavuje zníženie drsnosti o 52 %. Najmenšia nameraná drsnosť sa podarilo znížiť z $S_{a \text{ micro}} = 0,211 \mu\text{m}$ nevyleštenej vzorky na $S_{a \text{ micro}} = 0,076 \mu\text{m}$, čo predstavovala pokles drsnosti o 64%, pri skenovacej rýchlosti $v_s = 4,5 \text{ m.s}^{-1}$ s prekrytím stopy laserového zväzku $PO = 0,9971$ (99,71%).

Autori venovali pozornosť aj hĺbke pretavenia materiálu, ktorého výsledky sú uvedené na obr. 12. Z grafu je zrejmé, že hĺbka natavenia pri rýchlosti $v_s = 2,25 \text{ m.s}^{-1}$ a $v_s = 4,5 \text{ m.s}^{-1}$, je podobná avšak pre vyššiu rýchlosť skenovania je potrebné dodanie vyššej hustoty energie. Hrúbka natavenej vrstvy pri rýchlosti $v_s = 1,125 \text{ m.s}^{-1}$ je však výrazne väčšia ako pri predchádzajúcich väčších rýchlostiach skenovania, čo vedie k výrazne vyššej minimálnej mikroskopickkej drsnosti. Grafické zobrazenie vplyvu skenovacej rýchlosti na mikro – drsnosti $S_{a \text{ micro}}$ ako funkcia hustoty energie jedného pulzu je uvedený na obr. 13. (Sassmannshausen et. al., 2021).



Obr. 12 Graf hĺbky pretavenej vrstvy materiálu - d ako funkcia hustoty energie pulzu- F_0 so zmenou skenovacej rýchlosti - v_s (Sassmannshausen et. al., 2021).



Obr. 13 Graf plošnej mikro - drsnosti $S_{a \text{ micro}}$ ako funkcia hustoty energie pulzu - F_0 so zmenou skenovacej rýchlosti - v_s a prekrytiu stôp laserového zväzku PO (Sassmannshausen et. al., 2021).

2.1.1 Leštenie nástrojovej ocele AISI H11 vhodnej na výrobu kovacích zápustiek

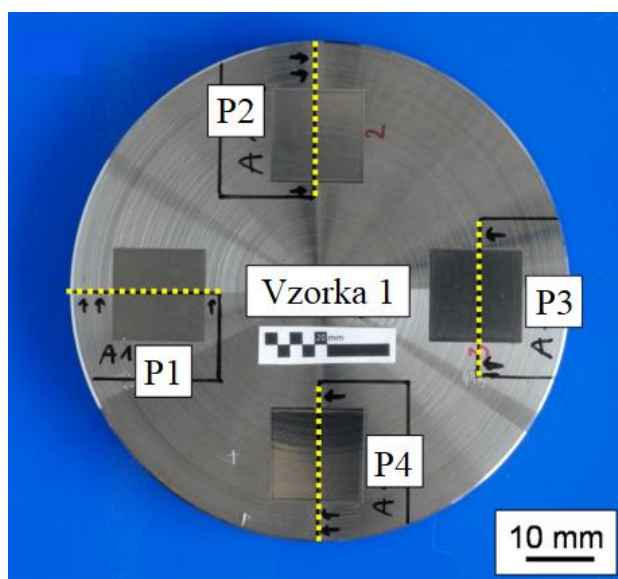
Štúdia Temmler et. al. (2020) skúma vplyv laserového zväzku na mikroštruktúrne vlastnosti chrómovej ocele AISI H11 (X37CrMoV5-1), ktorej ekvivalentom je STN 19 552 s chemický zložením uvedeným v tab. 3. Experiment bol realizovaný na celkovo siedmich kruhových skúšobných vzorkách. Na každej z nich boli leštené 4 polia (15 x 15 mm) znázornené na obr. 14, pričom každé pole s rozličným nastavením parametrov, ktoré sú uvedené v tab. 4. Každá vzorka bola leštená minimálne 4x, resp. štyrmi krokmi, okrem plôšky P3 a P4.

Tab. 3 Chemické zloženie súčiastky z ocele AISI H11 udávané dodávateľskou spoločnosťou Deutsche Edelstahlwerke (Temmler et. al., 2020).

Materiál	C	Si	Cr	Mo	Mn	V	Fe
AISI H11 (%)	0,38	1,0	5,15	1,3	0,4	0,4	-
Odchýlka (%)	± 0,04	± 0,0	± 0,35	± 0,2	± 0,1	± 0,1	-

Tab. 4 Prehľad parametrov procesu pre jednotlivé laserom leštené polia P1 – P4 (Temmler et. al., 2020).

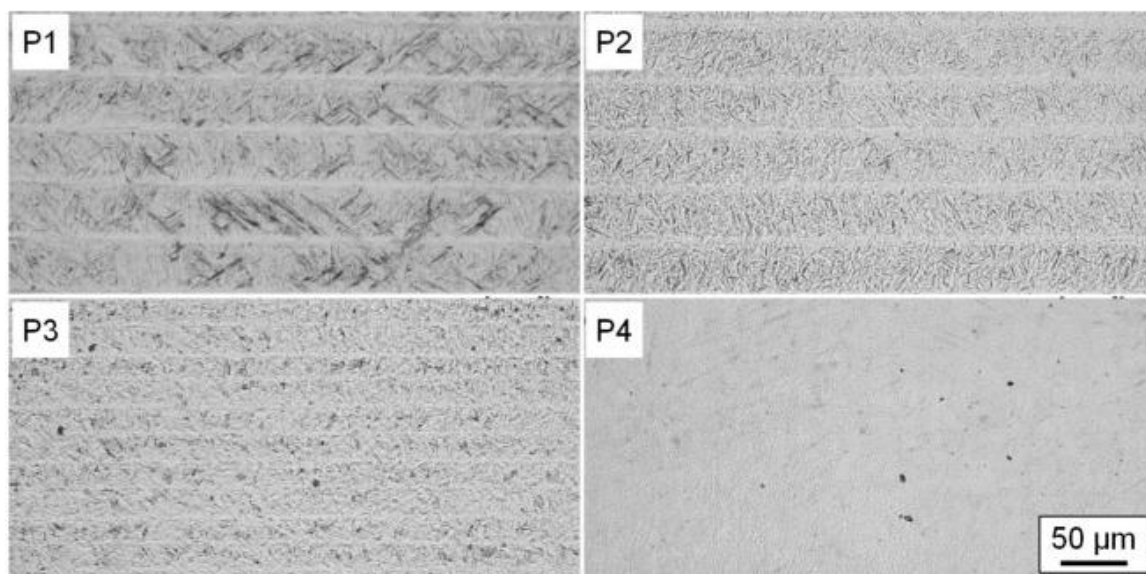
Procesné nastavenia	P1	P2	P3	P4			
Počet krokov	1-4	1-4	1-4	5	1-4	5	6
Frekvencia pulzov (kHz)	cw	cw	cw	cw	cw	cw	20
Priemer las. zväzku (μm)	250	250	250	150	250	150	500
Výkon (W)	100	100	100	70	100	70	110
Rýchlosť skenovania (mm.s ⁻¹)	100	100	100	200	100	200	1000
Posun stopy zväzku dy (μm)	40	40	40	20	40	20	30
Prechody	4	4	4	1	4	1	1
Ochranná atmosféra	Ar + O ₂	Ar + O ₂ +CO ₂	Ar + O ₂ +CO ₂	He+ O ₂	Ar + O ₂ +CO ₂	He+ O ₂	Ar + O ₂



Obr. 14 Snímka vzorky so 4 leštenými plôškami (15 x 15 mm) s rôznym nastavením parametrov (Temmler et. al., 2020).

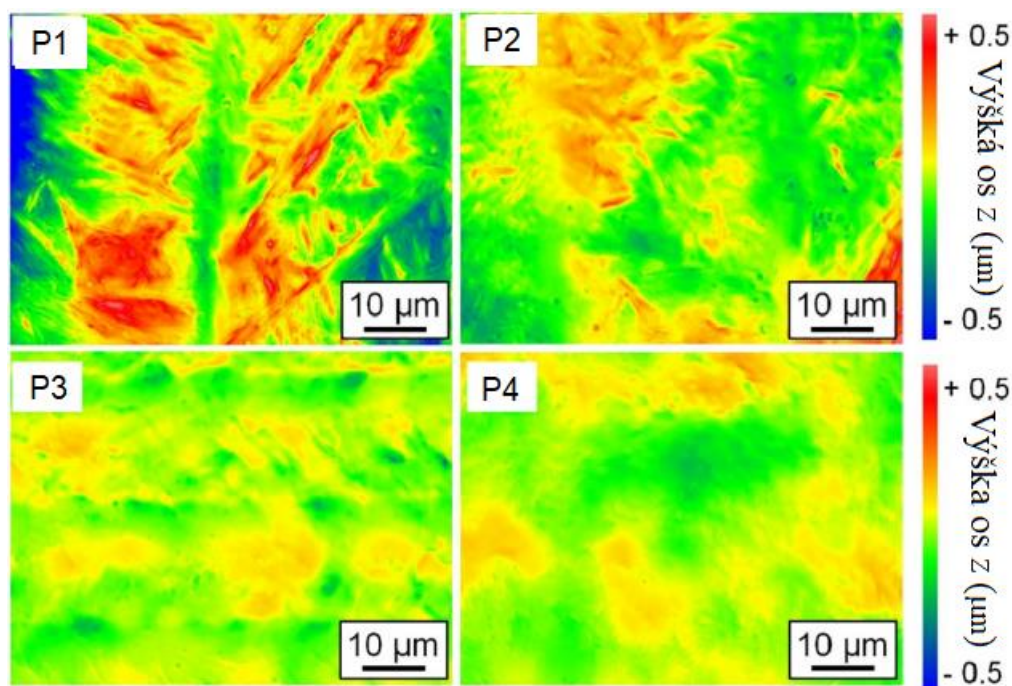
Jednotlivé leštené plochy P1 – P4 obsahujú minimálne štyri procesné kroky pretavovania. Plocha P1 je leštená 4 krát parametrami uvedenými v tab. 4, v ochrannej atmosfére obsahujúcej argón a kyslík s malým podielom „zvyškového vzduchu“ s obsahom kyslíka približne 0,02 %. Pre plochu P2 sa do ochrannej atmosféry pridáva 6 obj.% CO₂. Vyleštené plochy P1 a P2 je možné posudzovať z hľadiska vplyvu ochrannej atmosféry na povrchové vlastnosti materiálu. Parametre procesu pre leštenie plochy P3 sú totožné s plochou P2, avšak vzorka bola leštená až 5 krát s menším priemerom stopy laserového zväzku. Použité parametre pre leštenie plochy P4 sú totožné s P3, pričom je táto plocha pretavená až 6 krát, kde je posledné leštenie vykonané pulzným laserovým zväzkom. Porovnanie P3 a P4 sa použilo najmä na preskúmanie vplyvu posledného kroku leštenia na minimalizáciu mikronerovností a maximalizáciu stupňa lesku. Spracovanie celkovo siedmich vzoriek s rovnakými parametrami procesu pomáha štatisticky potvrdiť získané výsledky. Ďalej skúmal autor štúdie aj vplyv obsahu zvyškového kyslíka na vlastnosti pretavenej vrstvy. Na vzorke P1 boli preto skúmané 4 úrovne obsahu kyslíka, konkrétne 0,002 obj.%, 0,02 obj.%, 0,2 obj.% a 2 obj.%. Zvyčajne laserové leštenie prebieha v ochrannej atmosfére s obsahom kyslíka v rozmedzí 0,02 – 0,2 obj. %, preto obsah 0,002 obj. % a 2 obj.% obsahu zvyškového kyslíka slúži ako extrém v oboch smeroch pre určenie jasnej tendencie.

Výslednú topografiu leštených plôch je možné vidieť na snímkach zhotovených pomocou elektrónového mikroskopu. Obr. 15 zobrazuje snímky povrchov plôch P1 – P4 po laserovom leštení, spracovaných odlišným súborom parametrov. Na snímke so vzorkou P4 je možné vidieť, že na tejto ploche už došlo k výraznému vyhladeniu povrchu, kvôli vhodne zvoleným parametrom procesu (Temmler et. al. 2020).



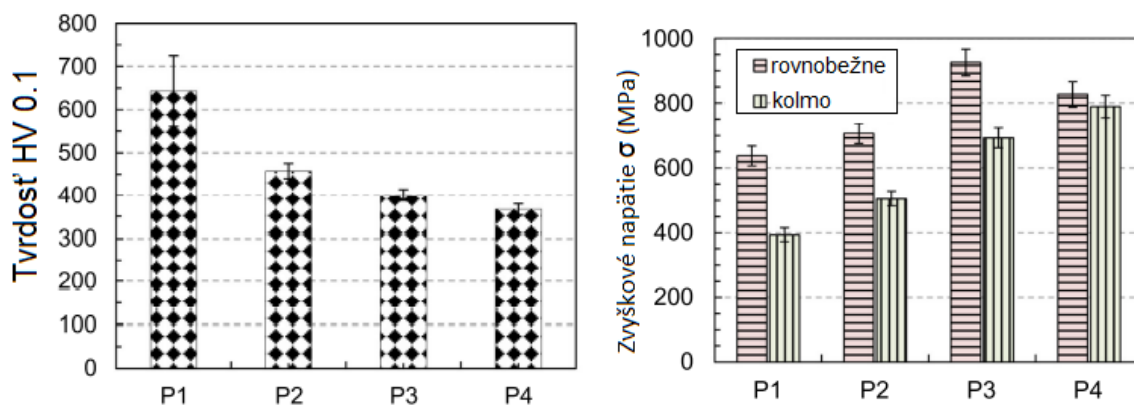
Obr. 15 Mikroskopická snímka laserom leštených plôch s procesnými parametrami P1 – P4 (Temmler et. al., 2020).

Kvalitatívny rozdiel z hľadiska integrity povrchu je už možné vidieť na mikroskopických snímkach medzi plochami P1 a P2. Pri rovnakom nastavení posunu stopy zväzku, sa na povrchu P1 jasne zobrazuje textúra martenzitickej štruktúry, pričom plocha P2, má homogénnejšie rozdelenie a ihlicovitý tvar martenzitu už nie je tak výrazný. Na povrchu P3 je možné vidieť kvalitatívne podobnú martenzitickú štruktúru ako pri vzorke P2. Na povrchu P4 už nie je možné jasne identifikovať pomocou snímok štrukturálne zložky. Na obr. 16 je vidieť farebnú mapu odchýlok výstupkov a priehlbín, povrchovej topografie jednotlivých plôch P1 – P4 (Temmler et. al. 2020).



Obr. 16 Snímky zobrazujúce topografiu povrchovej vrstvy po laserovom leštení pri použití rozličných skupín parametrov P1 – P4 (Temmler et. al., 2020).

Ďalšími skúmanými vlastnosťami materiálu bol podiel zvyškových napätí a mikrotvrdosť. Tvrdosť povrchu je meraná podľa normy DIN EN ISO 6507-1: 2005, doba zaťaženia je 10 sekúnd na prístroji Wolpert VDT 12. Výsledky analýzy povrchovej mikrotvrdoti a podielu zvyškových napätí rovnobežne a kolmo na smer stôp laserového zväzku je možné vidieť na obr. 17a, b (Temmler et. al., 2020).



Obr. 17 Materiálové vlastnosti leštených vzoriek (Temmler et. al., 2020).

a) tvrdosť podľa Vickersa, b) zvyškové napätia

Najvyššia tvrdosť povrchovej vrstvy bola nameraná na vzorke P1, 643 (±82) HV a naopak najnižšia tvrdosť 366 (±13) HV, bola zaznamenaná na vzorke P4. Z porovnania P1 a P2 vyplýva, že vďaka 6 obj. % CO₂ v atmosfére procesného plynu je výsledná tvrdosť 457

(± 18) HV nižšia približne o 30 %. Najpravdepodobnejším dôvodom je pokles koncentrácie uhlíka v dôsledku oduhličenia, v pretavenej povrchovej vrstve a teda znížená tvorba martenzitu. Porovnanie plôch P2 a P3 ukazuje, že pri obrobení vzoriek s nižším priemerom laserového zväzku je pokles tvrdosti povrchu ešte o ďalších približne 10 % na 400 (± 14) HV. Ďalšie spracovanie pomocou pulzného režimu vedie k ďalšiemu zníženiu povrchovej tvrdosti o približne 9 % až na 366 (± 13) HV na vzorke P4, kde sú zvyškové napätia čiastočne vyvážené v rovnobežnom aj kolmom smere, vzhľadom na smer spracovania. V štúdií sa tiež dospelo k záveru, že pokles tvrdosti je zapríčinený menšou hustotou dislokácií.

Merania ukazujú, že zvyškové napätia pre parametre procesu P1-P3 sú v rovnobežnom smere výrazne vyššie ako v smere kolmom na smer spracovania. Najmenšie zvyškové napätie bolo namerané pre P1 ($\sigma_{\perp} = 393 (\pm 22)$ MPa; $\sigma_{\parallel} = 637 (\pm 32)$ MPa). Použitie plynu CO₂ v porovnaní s P1 plochou zvyšuje zvyškové napätie o 30 % ($\sigma_{\parallel} = 707 (\pm 31)$ MPa) respektíve o 11 % v smere kolmo na smer pohybu zväzku, $\sigma_{\perp} = 505 (\pm 22)$ MPa.

Povrchové merania tvrdosti dokazujú významné vytvrdenie na mätko žíhaného materiálu z nástrojovej ocele AISI H11 (STN 19 552), používaného na výrobu kovacích zápustiek, v dôsledku zjemnenia zrna a tvorbe martenzitu. EBSD analýza odhalila zjemnenie zrna, rádovo o 1,1 až 1,5 μm v pretavených vrstvách materiálu pomocou kontinuálneho režimu pretavovania, v dôsledku teplotných gradientov pre ohrev a chladenie rádovo 10^5 K.s^{-1} . Východisková drsnosť povrchu bola $R_a = 0,53 \mu\text{m}$. Drsnosť meraná kontaktným meraním po leštení bola $R_a = 0,11 \mu\text{m}$ a dosiahla sa v argónovej atmosfére, avšak vďaka použitiu 6 obj. % CO₂ v atmosfére procesného plynu sa drsnosť redukovala na $R_a = 0,05 \mu\text{m}$, konkrétne na ploche P4 ako je možné vidieť na obr. 18. (Temmler et. al., 2020).



Obr. 18 Fotografia vzorky (AISI H11) s plochou 20 x 25 mm vyleštenou laserom (Temmler et. al., 2020).

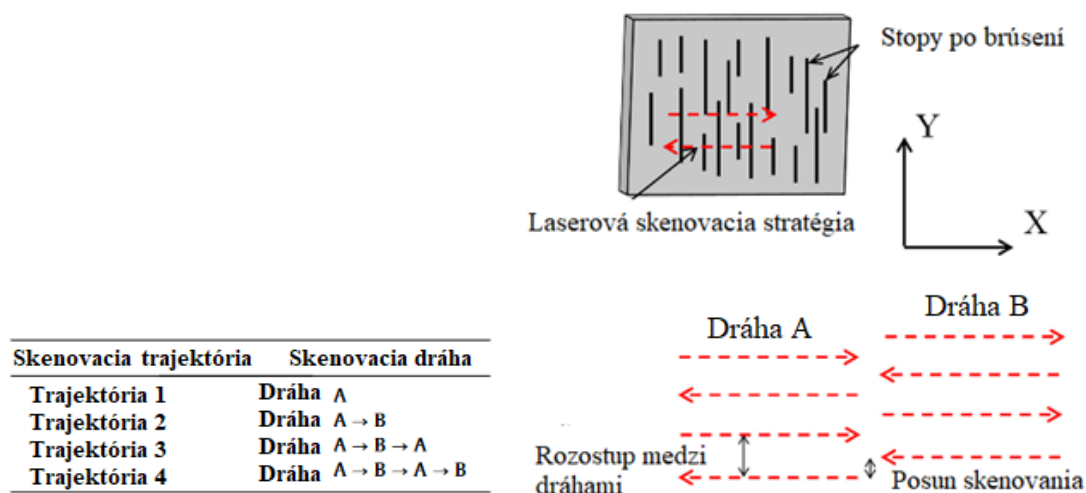
2.1.2 Aplikácie technológie laserového leštenia nástrojových materiálov vyrobených procesmi práškovej metalurgie

Pre uspokojenie potrieb sektoru výrobného priemyslu je laserové leštenie potenciálnou technológiou pre automatizáciu procesu leštenia. V roku 1982 bol na leštenie prvý krát použitý CO₂ laser s kontinuálnym laserovým zväzkom pre zlepšenie vlastností povrchu materiálu oxidu kremičitého využívaného v optike. Od vtedy niekoľko vedcov študovalo leštiace procesy na rôzne druhy materiálov ako sú kovy, optické sklo, diamanty a plasty. Medzi hlavné aplikácie patria komponenty vyrobené aditívnou technológiou, používané najmä v medicíne, kde sa na povrchy výrobkov kladú vysoké nároky z hľadiska výslednej topografie povrchu (Chen et. al., 2018).

V súčasnosti je zrejmé, že progresívna metóda bezkontaktného leštenia kovových materiálov komplexne vylepšuje integritu povrchu súčiastok zhotovených SLM (Selective Laser Melting) metódou, za rádovo kratší čas ako konvenčné dokončovacie technológie. Drsnosť súčiastok vyrobených touto technológiou je relatívne veľká, preto si vyžadujú ešte dokončovacie leštiace operácie, ktoré ju znížia (Young et. al., 2018).

Drsnosť je významným ukazovateľom integrity povrchu a významne ovplyvňuje vlastnosti súčiastok vyrábaných aditívnymi technológiami ako sú tribologické vlastnosti, odolnosť proti abrazívnemu opotrebeniu, odolnosť voči korózii, vlastnosti funkčných plôch, optické vlastnosti, vzhľad a podobne. Na zníženie drsnosti majú v procese laserového leštenia vplyv najmä výkon laseru, rýchlosť skenovania, stratégia pohybu laserového zväzku a vhodne zvolený asistenčný plyn. (Chen et. al., 2018).

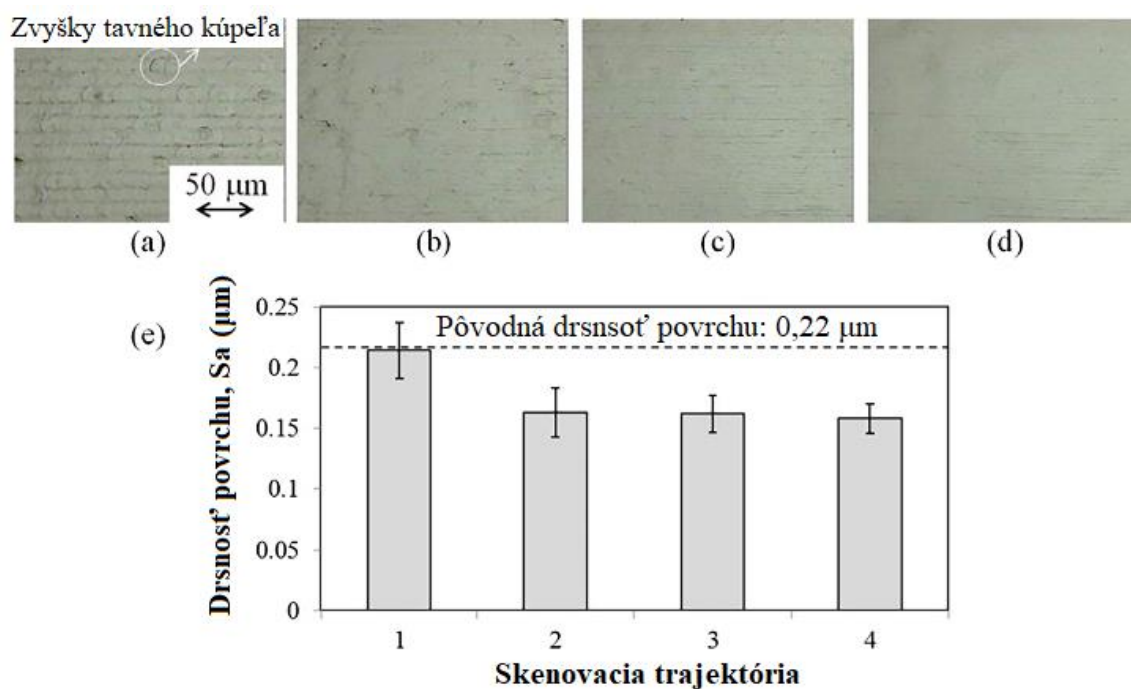
Chen et. al., (2018) skúmali rýchlorehnú legovanú oceľ ASP 23 (Cr-Mo-W-V) vyrobenú procesom práškovej metalurgie. ASP 23 s ekvivalentom označenia DIN 1. 3343 má vysokú kvalitu, dobrú odolnosť voči opotrebeniu a vynikajúcu húževnatosť, vďaka čomu sa využíva pri výrobe rezných nástrojov, kovacích zápustiek a rôznych foriem pre vstrekovanie. Vzorky s rozmermi 50 x 50 mm a hrúbkou 2 mm sú pred experimentom opracované mechanickým leštením, brúsením a elektroerozívnym obrábaním. Merala sa stredná aritmetická odchýlka plošnej drsnosti povrchu (Sa) vo vybraných oblastiach súčiastky, s veľkosťou plochy 0,8 x 0,8 mm. Štúdiou zistili, že skenovacia stratégia má významný vplyv na výslednú drsnosť povrchu a je kľúčom k jej zníženiu. Na obr. 19a je znázornená trajektória skenovacej stratégie a na obr. 19b sú popísané použité druhy stratégií. (Chen et. al., 2018).



Obr. 19 Skenovacia stratégia využitá pri leštení ocele ASP 23 (Chen et. al., 2018).

a) vzťah medzi trajektóriou a jednotlivými dráhami, b) grafické znázornenie dráhy pohybu laserového zväzku

Pre porovnanie stratégií je na obr. 20 zobrazená morfológia povrchu vzorky po laserovom leštení jednotlivými stratégiami, ktorá bola pred laserovým leštením brúsená a leštená mechanicky s východiskovou drsnosťou $S_a = 0,22 \mu\text{m}$.



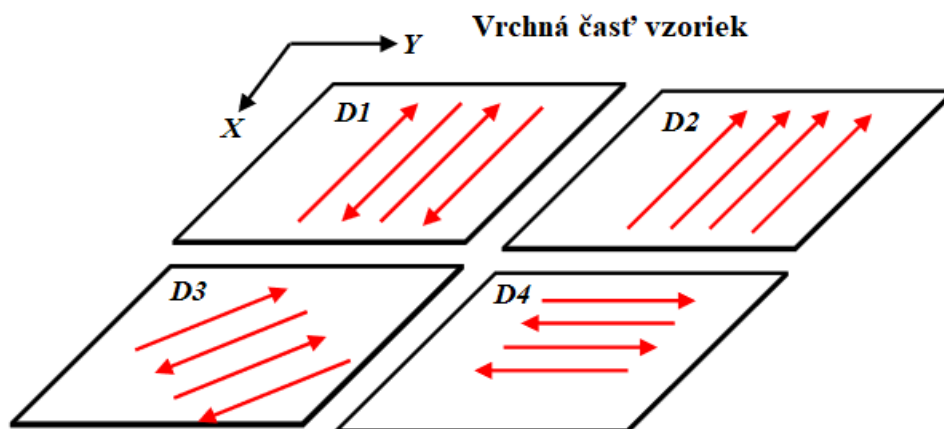
Obr. 20 Porovnanie plošnej povrchovej drsnosti pri jednotlivých trajektóriách a) 1 b) 2, c) 3, d) 4.

Čiarkovaná čiara reprezentuje počiatočnú drsnosť vzorky z ASP 23 ocele (Chen et. al., 2018).

Technológia laserového leštenia je čoraz častejšie využívaná na zlepšenie kvality povrchu výrobkov, ale skúmanie fyzikálneho mechanizmu však stále nie je dostatočne preskúmané. V štúdií Zhou et. al. (2021) bol vytvorený numerický model pre štúdium mechanizmu vývoja výslednej drsnosti a komplexného hydrodynamického správania roztavenej zmesi taveniny počas leštenia laserom, s ohľadom na fázové prechody, gravitáciu, tlak spätného rázu, povrchové napätie a Marangoniho efekt. Bolo možné simulovať zmenu teploty a rýchlosť distribúcie tepla lešteného povrchu, pričom sa skúmal najmä vplyv stratégie pohybu zväzku na výslednú morfológiu (drsnosť a mikrotvrdosť) povrchu vzoriek vyrobených aditívnou technológiou. Vzorky materiálu hliníkovej zliatiny AlSi10Mg boli vyrobené technológiou L-PBF (Laser – Power bed fusion), ktorá využíva vysokú hustotu energie čím sa dosiahne spájanie jednotlivých práškových vrstiev. Táto technológia poskytuje často veľa výhod, avšak často sa na povrchu výrobkov vyskytuje veľa chýb ako rôzne póry, trhliny či neočakávane drsný povrch výrobku. Mechanické vlastnosti takto vyrobených súčiastok sú výrazne ovplyvnené výslednou drsnosťou povrchu a rôznymi povrchovými chybami. Napríklad plytké povrchové praskliny môžu viesť k nízkej únavovej odolnosti výrobkov z korozivzdornej ocele vyrobených aditívnou technológiou. Po vyhotovení vzoriek bol použitý rovnaký laser aj na leštenie vzoriek, konkrétne pevnolátkový laser (IPG YLR-400-WC, IPG Photonics Corporation, Oxford, MA, USA). Výkon laseru bol nastavený na 400 W a rýchlosť skenovania laserovým zväzkom bola $0,5 \text{ m.s}^{-1}$ s vlnovou dĺžkou 1060 nm, s priemerom stopy laserového zväzku 70 μm . Vyhotovených bolo 9 vzoriek pričom každá bola leštená pri inom nastavení parametrov procesu uvedených v tab. 5 a pri inej stratégii pohybu vzhľadom na smer pohybu laserového zväzku pri výrobe vzoriek pomocou 3D tlače, ako je znázornené na obr. 21 (Zhou et. al., 2021).

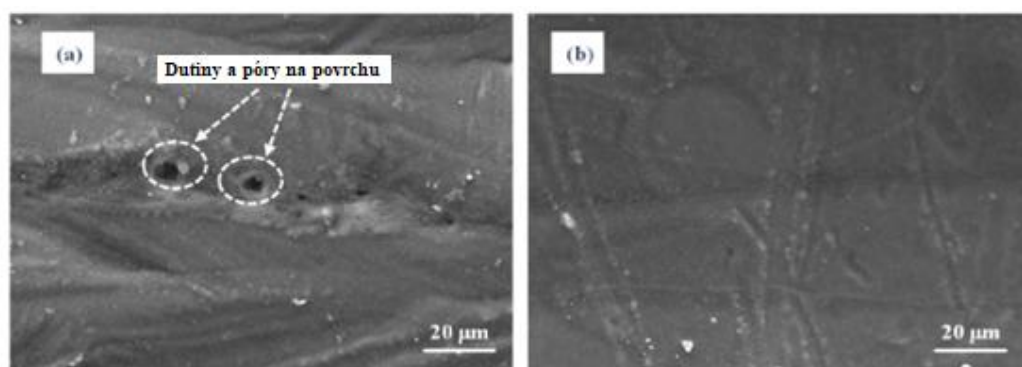
Tab. 5 Použité parametre laserového leštenia vzoriek materiálu AlSi10Mg (Zhou et. al., 2021).

Vzorka	Posunutie stopy las. zväzku (μm)	Stratégia pohybu las. zväzku pri leštení	Počet prechodov laserového zväzku
No.	H_{re}	L_s	L_t
1	-	-	0
2	40	D1	1
3	70	D1	1
4	100	D1	1
5	70	D1	2
6	70	D1	3
7	70	D2	1
8	70	D3	1
9	70	D4	1



Obr. 21 Schéma stratégie pohybu laserového zväzku pri leštení vzoriek AlSi10Mg (Zhou et. al., 2021).

Po aplikácii laserového leštenia vykazoval povrch vzorky značné zníženie parametru drsnosti R_a a rovnako aj redukciu plošnej drsnosti S_a . Ako je vidieť na obr. 22, povrchové nedostatky ako póry na povrchu boli eliminované a povrch bol značne vyhladený a bez povrchových nedostatkov, ktoré by mohli zapríčiniť zníženie mechanických vlastností.



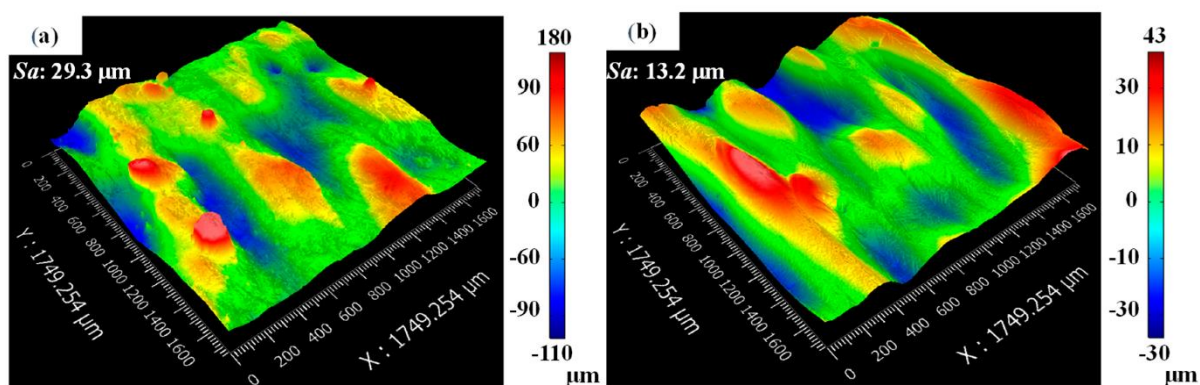
Obr. 22. Snímka povrchu vzorky z povrchovými chybami (Zhou et. al., 2021).

a) pred leštením b) po leštení

Výsledky meraní drsností vzoriek po leštení sú uvedené v tab. 6 a snímka elektrónovým mikroskopom, ktorá porovnáva neleštenú vzorku s leštenou vzorkou kedy sa znížila plošná drsnosť povrchu z Sa o 54,9 % je na obr. 23.

Tab. 6 Výsledná drsnosť povrchu po laserovom leštení (Zhou et. al., 2021).

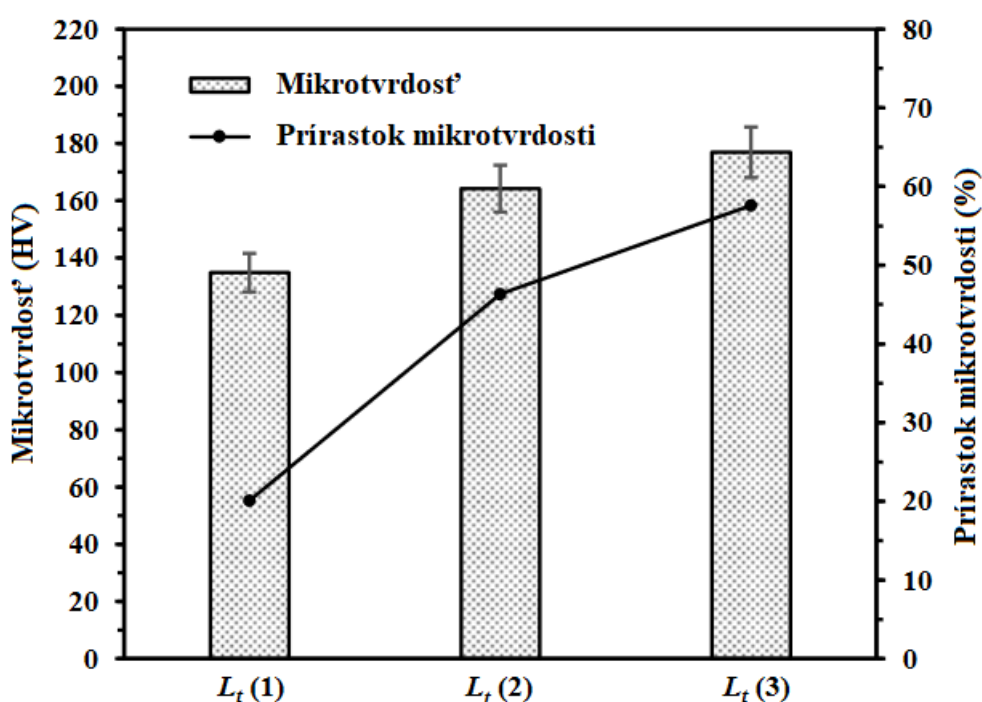
Vzorka	Drsnosť povrchu Ra (μm)	Redukcia Ra (%)	Drsnosť povrchu Sa (μm)	Redukcia Sa (%)
1	12.5	–	29.3	–
2	7.2	42.4	8.9	69.6
3	8.1	35.2	13.2	54.9
4	9.4	24.8	14.4	50.9
5	6.3	49.6	10.3	64.8
6	3.7	70.4	8.4	71.3
7	8.8	29.6	12.8	56.3
8	4.1	67.2	9.1	68.9
9	5.4	56.8	12.1	58.7



Obr. 23 Morfológia povrchu vzoriek vyhotovená pomocou SEM (Zhou et. al., 2021).

a) neleštená vzorka b) leštená vzorka

Autori štúdie tiež skúmali vplyv laserového zväzku pri leštení na výslednú mikrotvrdosť povrchu podľa Vickersa. Prišli so záverom, že výsledná drsnosť povrchu po leštení sa výrazne znížila o 70,4 % v prípade porametra R_a , respektíve o 71,4 % a mikrotvrdosť povrchovej vrstvy sa výrazne zvýšila. Ako je vidieť na obr. 24, mikrotvrdosť leštených povrchov s rôznym počtom prechodov leštenia 1, 2 a 3 bola 134,9 HV, 164,3 HV a 176,9 HV. Použitím viacerých prechodov laserového zväzku po povrchu je možné roztaviť zvyšné neroztavené častice a drsný povrch, čím sa dosiahne menšia drsnosť. Leštiaci efekt sa tak výrazne zlepšuje použitím viacnásobných prechodov laserového zväzku (Zhou et. al., 2021).



Obr. 24 Výsledná mikrotvrdosť leštených vzoriek podľa počtu prechodov – L_t (Zhou et. al., 2021).

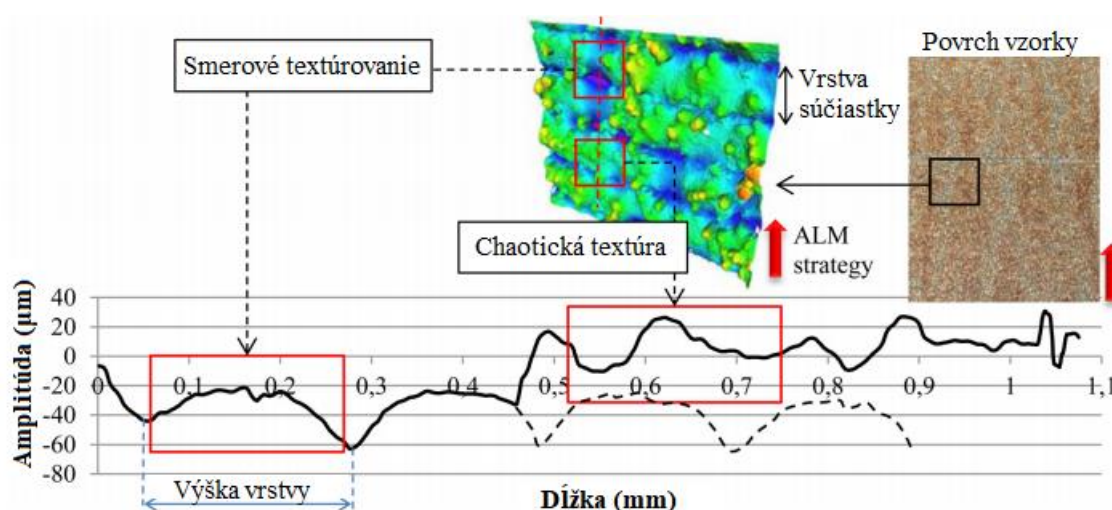
2.1.2.1 Leštenie rovinných povrchov

Problemátike leštenia ALM (Additive Laser Manufacturing) komponentov sa podrobne venovala štúdia Rosa et. al. (2015) kde je sledované konečné vyhladenie topografie povrchu a štruktúra lešteného povrchu. Experiment bol vykonávaný na vláknovom laseri s maximálnym výkonom $P = 800$ W a vlnovou dĺžkou 1070 nm. Každá vzorka je rozdelená na rovnakých 7 x 30 mm laserom leštených oblastí. Chemické zloženie ALM vzorky vyrobenej z prášku AISI 316 L (STN 17 349) s veľkosťou častíc v rozpätí 45 – 90 μm , je znázornené v tab. 7. Konečná topografia povrchu je závislá od materiálu obrobku,

energetických parametroch procesu, aj od východiskovej topografie leštenej súčiastky. V porovnaní s frézovanými povrchmi je povrch ALM súčiastok chaotickejší a heterogénny ako je znázornené na obr. 25, kde je možné vidieť pôvodnú topografiu povrchu leštenej vzorky tvorenú dvomi odlišnými textúrami. Smerová textúra je spôsobená smerom ukladania jednotlivých vrstiev vzorky. Chaotická štruktúra je spôsobená čiastočne roztaveným práškom. Na obr. 25 je taktiež vidno farebné zafarbenie povrchu vzorky, spôsobené oxidáciou, pre nedostačujúci prívod argónu, respektíve nedostatočným ochranným prostredím (Rosa et. al., 2015).

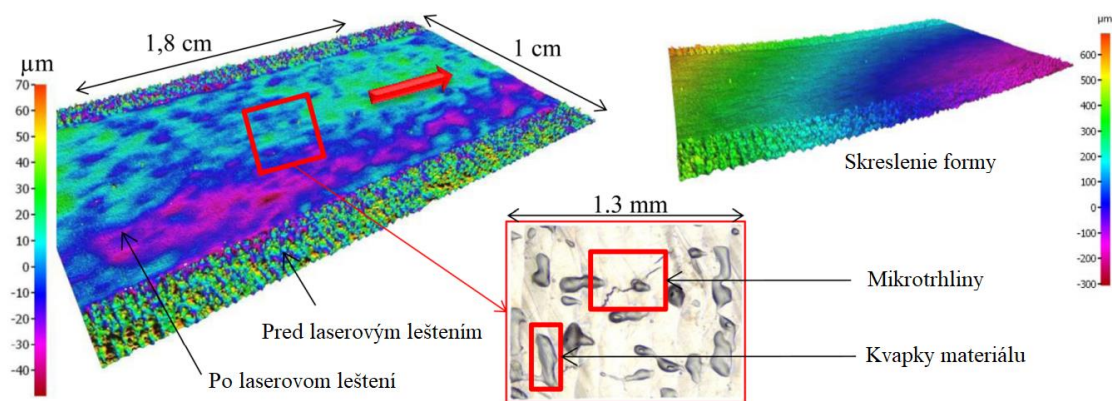
Tab. 7 Chemické zloženie leštenej vzorky z prášku AISI 316 L (Rosa et. al., 2015).

Komponent	Si	C	Mo	Ni	Mn	Cr
%	0,8	0,02	2,5	12,2	1,4	17,3



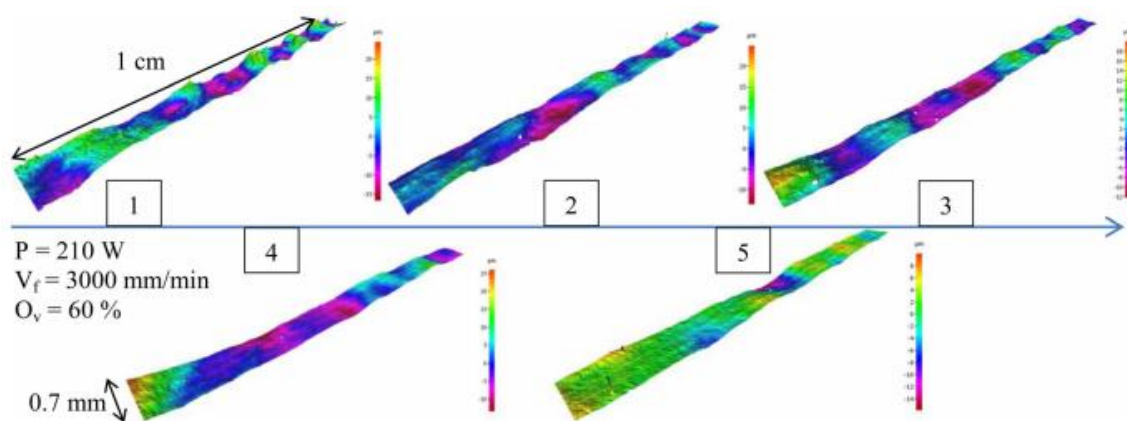
Obr. 25 Topografia povrchu súčiastky vyrobenej aditívnym spôsobom výroby (Rosa et. al., 2015).

Konečné parametre leštenia boli nastavené tak, že hustota energie zväzku $E_D = 525 \text{ J.cm}^{-2}$, ktorá sa získa pri výkone $P = 210 \text{ W}$, skenovacej rýchlosti $v_f = 3000 \text{ mm.min}^{-1}$ a prekrytia $O_v = 60 \%$. Po laserovom leštení sa povrch vyhladil, avšak výsledná topografia, podľa obr. 26, nie je dokonale vyhladená a stále obsahuje niektoré chyby ako napríklad kvapky materiálu a mikrotrhliny, ktoré znižujú odolnosť voči únavovému opotrebeniu funkčného povrchu. Kvapky materiálu majú tendenciu zvyšovať drsnosť povrchu a ovplyvňovať tribologické vlastnosti (Rosa et. al., 2015).

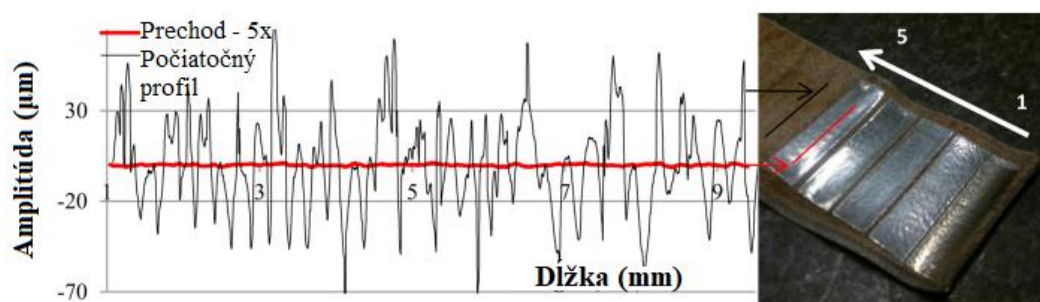


Obr. 26 Povrch súčiastky pred a po leštení laserom a sprievodné povrchové chyby (Rosa et. al., 2015).

Pre čo najlepšie vyhladenie povrchu bola zvolená stratégia viacnásobného prechodu laserového zväzku, s nastavením tých istých parametrov. Výsledkom je, že zvyšovaním počtu prechodov laserového zväzku dochádza k vyhladeniu povrchu, ako je znázornené na obr. 27. Po piatom prechode je počiatočná topografia výrazne vyhladená, ako je možné vidieť na obr. 28. Táto stratégia umožňuje dosiahnuť drsnosť povrchu $S_a = 0,79 \mu\text{m}$ s počiatočných $S_a = 21 \mu\text{m}$ a tak redukovať drsnosť povrchu až o 96 %. Po piatich prechodoch sú eliminované aj mikrotrhliny a tiež je znížená oxidácia oxidom kremičitým, pomocou vytvorenia homogénneho toku ochranného plynu v okolí tavného kúpeľa (Rosa et. al., 2015).



Obr. 27 Vývoj topografie povrchu podľa počtu prechodov laserového zväzku (Rosa et. al., 2015).



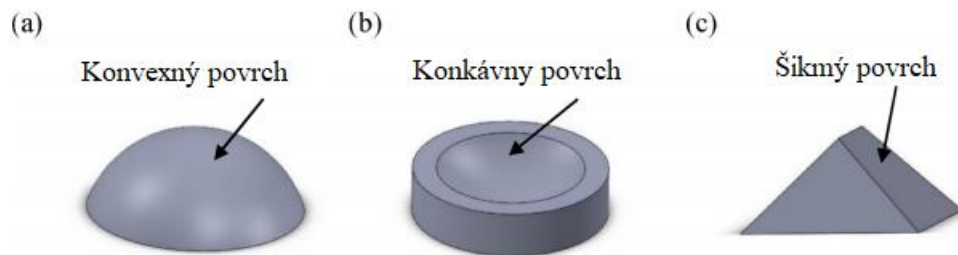
Obr. 28 Profily drsností pred a po leštení laserom po 5 prechodoch laserového zväzku (Rosa et. al., 2015).

2.1.2.2 Leštenie povrchov s tvarovo zložitou geometriou

V ďalšej štúdií sa zamerali autori na vplyv parametrov laserového leštenia pri leštení laserovým zväzkom Co - Cr zliatiny, s chemickým zložením uvedeným v tab. 8, vyrobenej SLM technológiou s hustotou materiálu $4,36 \text{ g.cm}^{-3}$. V minulosti bolo realizovaných viacero štúdií, ktoré boli realizované na vzorkách zliatiny kobaltu a chrómu s rovinným povrchom, avšak existujú správy o laserovom leštení zložitých geometrických komponentov zo zliatin Co - Cr, ako aj o ich vlastnostiach po vyhladení laserovým zväzkom. Morfológia nerovinného povrchu je zložitejšia čo vedie k väčším ťažkostiam pri ovládaní vzdialenosti zaostrenia laserového zväzku, takže proces leštenia povrchu zložitejšej geometrie je v porovnaní s rovinným povrchom komplikovanejší. Za účelom optimalizácie parametrov procesu leštenia pre ďalšie štúdium vzoriek so zložitou geometriou, sa najskôr uskutočnili experimenty na vzorkách s rovinným povrchom a následne na povrchoch s tvarovo zložitejšími plochami (konvexný, konkávny, šikmý – sklonený povrch), ako je znázornené na obr. 29 (Young et. al., 2018).

Tab. 8 Chemické zloženie vzoriek vyrobených spoločnosťou SLM Solutions v % (Yuong et. al., 2018).

Cr	Co	Mo	Si	N	Mn	Fe	Ni	Ostatné prvky
28,23	64,76	5,84	0,46	0,06	0,50	0,04	0,04	$\leq 0,07$



Obr. 29 Rôzne typy vzoriek s komplexnou geometriou povrchu (Young et. al., 2018).

Morfológia na vzorkách po aditívnej výrobe nespĺňa požiadavky pre praktické aplikácie, preto bol použitý vláknový laser v pulznom režime s vlnovou dĺžkou 1064 nm, s maximálnym prevádzkovým výkonom 70 W a priemerom stopy laserového zväzku 50 μm . Skúmaný bol hlavne vplyv troch kľúčových parametrov: výkon laseru P (W), skenovací rýchlosť v (mm.s^{-1}) a posunutiu stopy laserového zväzku H (mm). Hustota energie dodávaná laserovým zväzkom sa určuje na základe týchto troch parametrov. Podľa štúdie Gora et. al. (2016) sa drsnosť povrchu vzoriek Co - Cr zliatiny vyrobených aditívnym spôsobom výroby dá výrazne zlepšiť pri nastavení hustoty energie lasera na 30 J.mm^{-2} . Na základe hustoty energie laserového zväzku a kombináciou s inými parametrami sa vypočíta skupina skenovacích rýchlostí vybraných v rozsahu od najnižších po najvyššie rýchlosti. V tab. 9 sú uvedené zvolené parametre procesu v rôznych úrovniach. Podmienky návrhu testovania sú uvedené v tab. 10 (Young et. al., 2018).

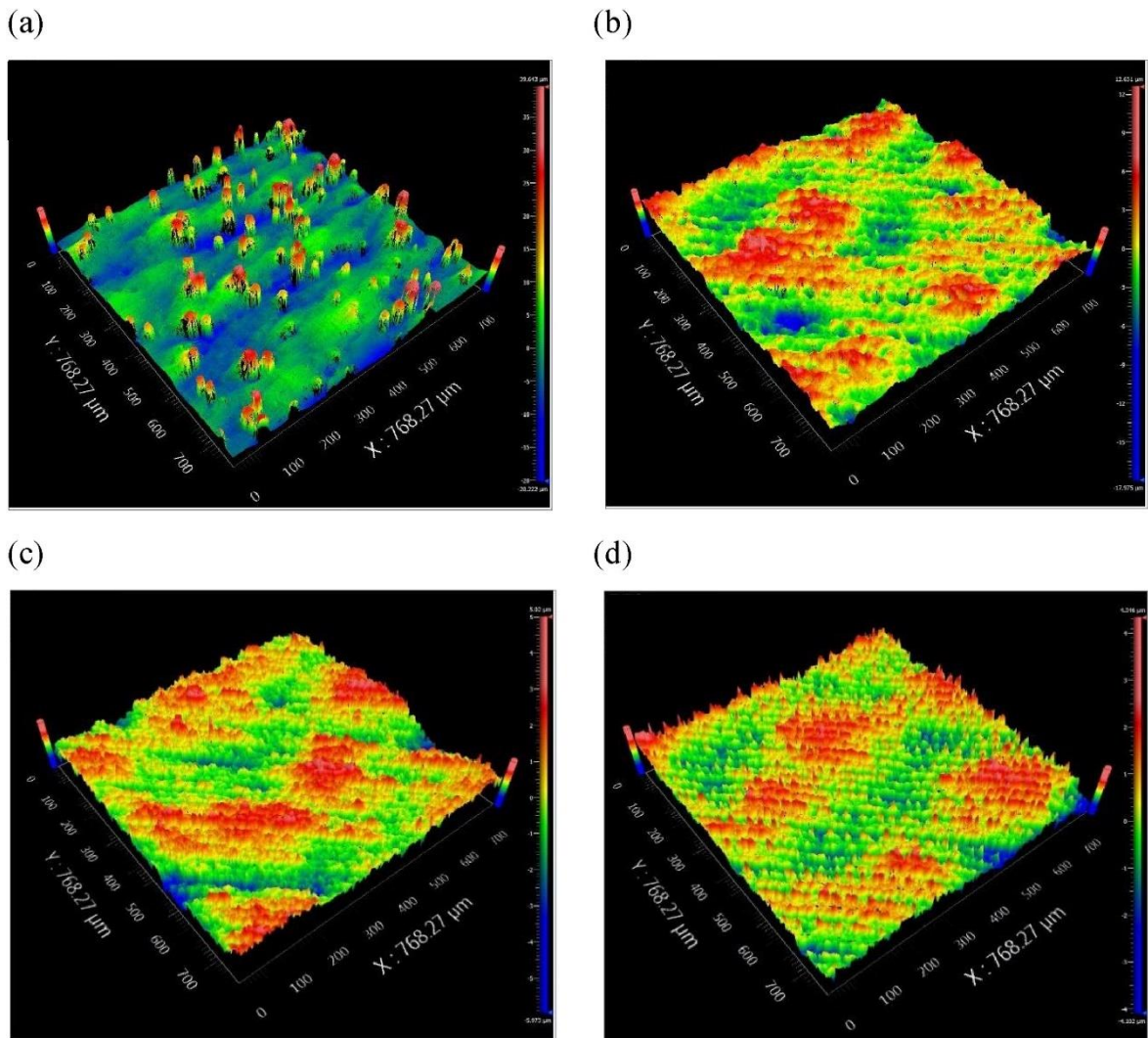
Tab. 9 Základné parametre leštenia CoCr zliatiny (Young et. al., 2018).

Úroveň	Level 1	Level 2	Level 3	Level 4
Výkon zväzku (W)	30	40	55	70
Rýchlosť skenovania (mm.s^{-1})	15	50	100	300
Šráfovacia vzdialenosť (mm)	0,02	0,03	0,04	0,05

Tab. 10 Leštiace stratégie a im prislúchajúce hustoty energie laserového zväzku (Young et. al., 2018).

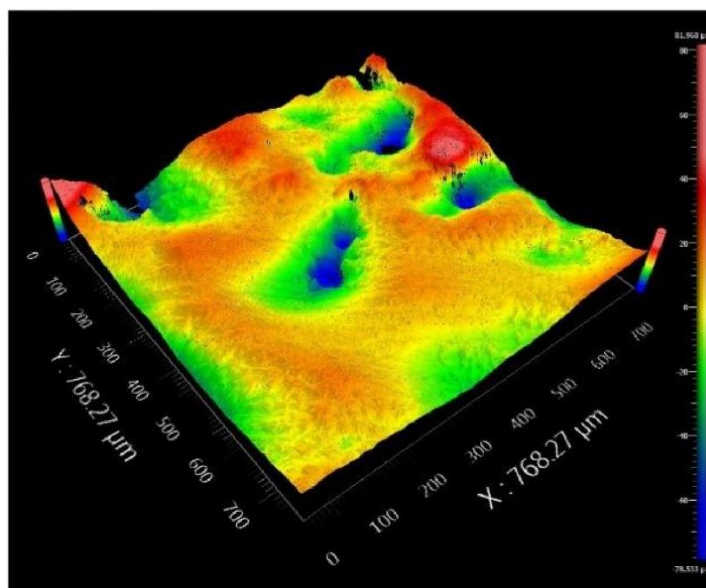
Stratégia	Výkon laserového zväzku (W)	Rýchlosť skenovania (mm.s ⁻¹)	Šráfovacia vzdialenosť (mm)	Hustota energie laserového zväzku (J.mm ²)	Drsnosť povrchu Sa (μm)
1	30	300	0,04	3	4,55
2	30	100	0,05	6	4,93
3	30	50	0,02	30	6,87
4	30	15	0,03	67	9,43
5	40	300	0,05	3	2,11
6	40	100	0,04	10	1,61
7	40	50	0,03	27	4,55
8	40	15	0,02	133	12,71
9	55	300	0,02	9	0,92
10	55	100	0,03	18	1,12
11	55	50	0,04	28	1,59
12	55	15	0,05	73	1,91
13	70	300	0,03	8	0,73
14	70	100	0,02	35	1,35
15	70	50	0,05	28	1,59
16	70	15	0,04	117	2,59

Východisková stredná aritmetická odchýlka plošnej drsnosti rovinného povrchu bola $Sa = 4,23 \mu m$ a redukcia drsnosti pre každú stratégiu bola výrazne odlišná v rozpätí od $Sa = 0,73 \mu m$ do $Sa = 12,71 \mu m$, ako je možné vidieť na obr. 30.



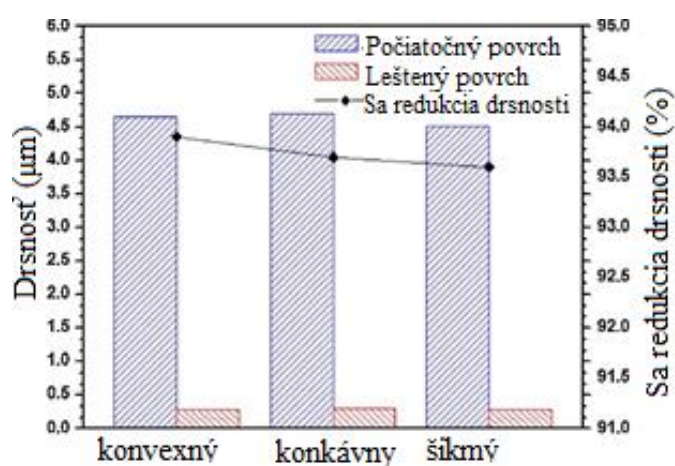
Obr. 30 Morfológia povrchu rovinných vzoriek pred a po leštení laserom pomocou rôznych stratégií leštenia
a) počiatočný povrch, b) leštený povrch: $P = 40 \text{ W}$, $v = 300 \text{ mm.s}^{-1}$, $H = 0,05 \text{ mm}$, c) leštený povrch: $P = 55 \text{ W}$, $v = 300 \text{ mm.s}^{-1}$, $H = 0,02 \text{ mm}$, d) leštený povrch: $P = 70 \text{ W}$, $v = 300 \text{ mm.s}^{-1}$, $H = 0,003 \text{ mm}$ (Young et. al., 2018).

Je treba zdôrazniť že výkon laseru má najväčší vplyv počas procesu leštenia, druhoradá je rýchlosť skenovania a posunutie stopy laserového zväzku má tretí najväčší vplyv na výsledky leštenia. Najlepšie výsledky pri leštení rovinných vzoriek dosiahli pri 5, 9 a 13 stratégií kedy sa drsnosť redukovala na $2,11 \text{ μm}$, $0,92 \text{ μm}$ a $0,73 \text{ μm}$. Maximálne zníženie drsnosti povrchu bolo až o 82,8 %, pri použitej stratégii č. 13, z čoho nám vyplýva, že parametre tejto stratégie sú najvhodnejšie pre skúmanie ďalších vzoriek so zložitejšou geometriou. Na obr. 31 je možné vidieť morfológiu vzorky leštenú podľa stratégie 8, kde pri malom výkone 40 W a vysokej hustote energie zväzku až 133 J.mm^{-2} , vznikajú značné poškodenia povrchu a taktiež je zaznamenaná zvýšená drsnosť povrchu (Young et. al., 2018).

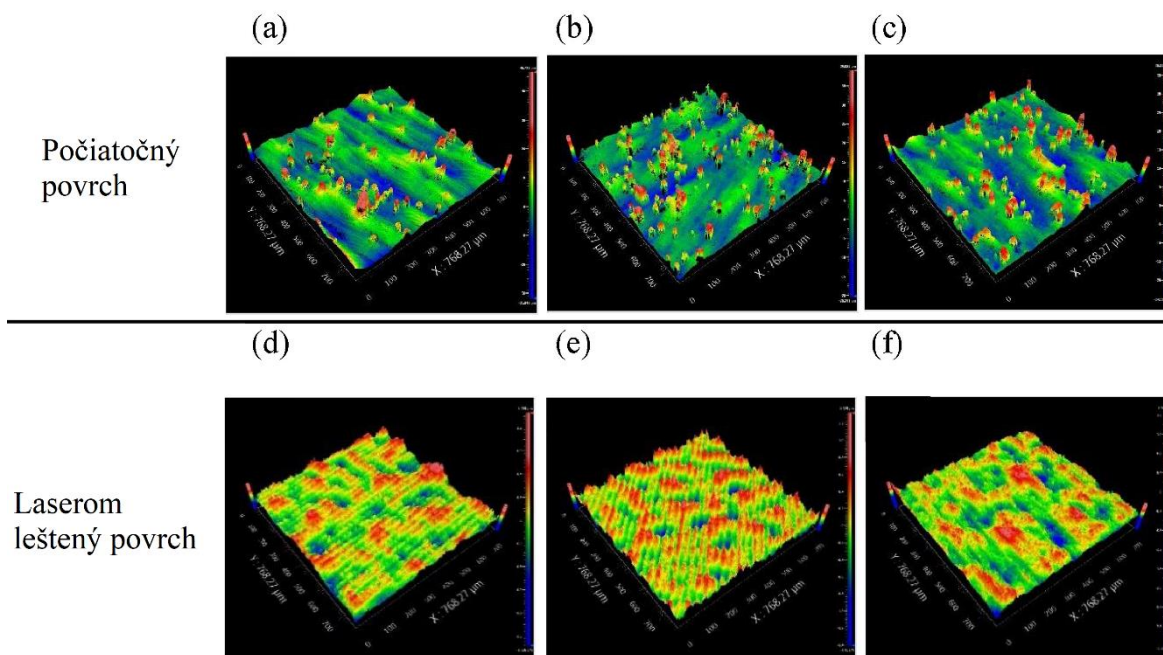


Obr. 31 Morfológia povrchu rovinnej vzorky leštenej nízkym výkonom a vysokou hustotou energie zväzku (Young et. al., 2018).

Z obr. 32 a obr. 33 je zrejmé, že drsnosť povrchu leštených vzoriek bola evidentne znížená v porovnaní s počiatočnou drsnosťou povrchu. Stredná hodnota plošnej drsnosti S_a , konvexného, konkávneho a šikmého povrchu bola redukovaná z $S_a = 4,65 \mu\text{m}$, $4,69 \mu\text{m}$, $4,51 \mu\text{m}$ na $0,28 \mu\text{m}$, $0,30 \mu\text{m}$, $0,29 \mu\text{m}$. Celkovo je povrchová drsnosť týchto vzoriek redukovaná o 93,9 %, 93,6%, 93,7 % ako je znázornené na obr. 32. Na obr. 33 sú zobrazené snímky zachytávajúce porovnanie topografie povrchu zložitejších geometrických tvarov a počiatočného povrchu týchto vzoriek. (Young et. al., 2018).

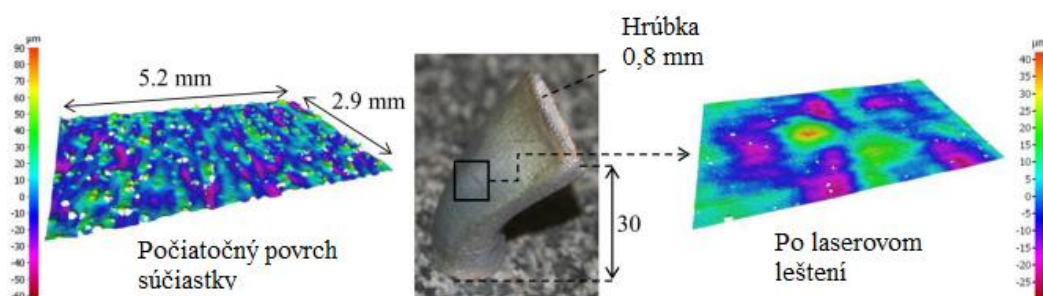


Obr. 32 Redukcia drsnosti povrchu vzoriek s komplexnou geometriou (Young et. al., 2018).



Obr. 33 Topografia povrchu vzoriek so zložitou geometriou pred a po laserovom leštení. Snímky a) – c) zobrazujú počiatočnú drsnosť konvexného, konkávneho a šikmého povrchu, na snímkach d) – f) je zobrazená drsnosť leštených konvexných, konkávnych a šikmých povrchov (Young et. al., 2018).

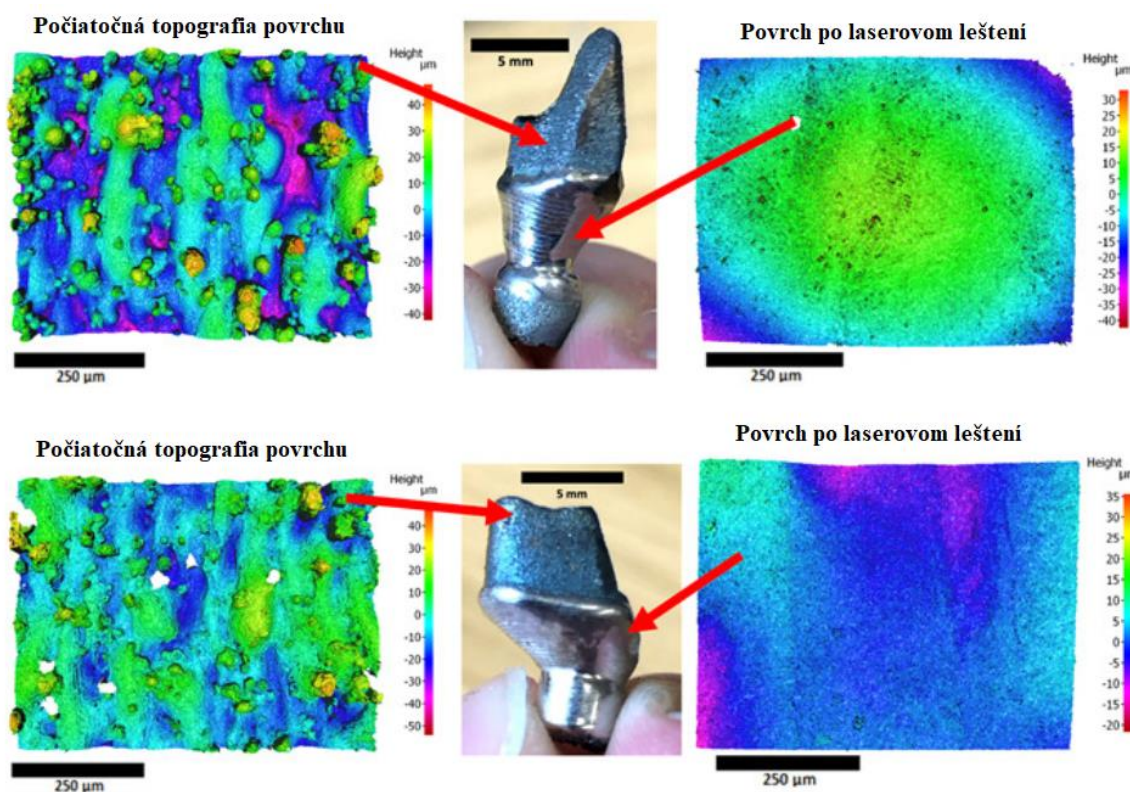
V štúdií Rosa et. al. (2015) bol taktiež uskutočnený experiment na súčiastke s tvarovo zložitejšou geometriou. Hustota energie laserového zväzku sa v porovnaní s predchádzajúcimi experimentami tejto štúdie na rovinných vzorkách znížila. Pre 5 prechodov laserového zväzku bol použitý výkon 100 W, rýchlosť skenovania 3000 mm.min⁻¹. Výsledkom procesu je, že povrch súčiastky je vyhladený a nie je zvýraznená žiadna geometrická odchýlka, ako je možné vidieť na obr. 34. Dosiahla sa redukcia strednej hodnoty plošnej drsnosti o 62 % z východiskovej $S_a = 14 \mu\text{m}$ na konečnú $S_a = 5,39 \mu\text{m}$. Pokles hustoty energie laseru umožňuje eliminovať geometrické odchýlky ale zvyšuje drsnosť povrchu (Rosa et. al., 2015).



Obr. 34 Tenkostenná súčiastka s komplexnou geometriou leštená laserovým zväzkom (Rosa et. al., 2015).

Vzhľadom na neustálu rastúcu popularitu výroby komponentov na báze kovového prášku, stále pribúda výskum zameraný na zlepšenie kvality povrchu takto vyrábaných súčiastok. Laserové leštenie ponúka vďaka svojej flexibilita a vhodnosti na automatizáciu veľký potenciál pre uplatnenie v priemyselnej výrobe. Zložitosť komponentov, ktoré je možné vyrobiť pomocou aditívnych technológií však predstavuje výzvy pri vývoji praktických a flexibilných riešení pre implementáciu procesu laserového leštenia.

V štúdií McDonald et. al., (2020) je pozornosť venovaná lešteniu zubných implantátov na báze kobaltu a chrómu, vyrobených procesmi aditívnej výroby, pomocou nízko - nákladového vláknového laseru, v kontinuálnom režime (CW). Zubné implantáty si vyžadujú dve odlišné typy povrchovej topografie, ako je znázornené na obr. 35. Drsný povrch v hornej časti implantátu umožňuje spojenie s korunkou zuba a hladký spodný povrch zabráňuje podráždeniu a šíreniu baktérií v ústach. Počas experimentu bol preto povrch v hornej časti implantátu ponechaný v stave v akom bol vyrobený. Veľkosť a hrúbka každého implantátu sa môže líšiť v závislosti od veľkosti a tvaru zuba, ktorý sa ide vymieňať, čo môže ovplyvniť akumuláciu tepla a tým spôsobiť rozdiel v nastavení procesných parametrov medzi jednotlivými implantátmi. V štúdií boli použité dva varianty, ako je znázornené na obr. 35. Menší variant vyžadoval nižšiu hustotu energie $E_D = 2,0 \text{ kJ.cm}^{-2}$, v porovnaní s väčším, kde bola hustota energie $E_D = 4,0 \text{ kJ.cm}^{-2}$. Prekrytie stôp laserového zväzku bolo nastavené v oboch prípadoch na 50%. Výsledný čas bol 60 sekúnd pre menší implantát a 120 sekúnd pre väčší. Výsledná topografia povrchu je znázornená na obr. 35, kde vidieť že drsnosť povrchu sa znížila z východiskovej plošnej drsnosti $S_a = 5,6 \text{ }\mu\text{m}$ na $0,45 \text{ }\mu\text{m}$ po laserovom leštení pre menší implantát, a pre väčší implantát sa redukovala drsnosť z $S_a = 4,9 \text{ }\mu\text{m}$ na $S_a = 0,63 \text{ }\mu\text{m}$ (McDonald et. al., 2020).



Obr. 35 Topografia povrchov zubných implantátov po leštení (McDonald et. al., 2020).

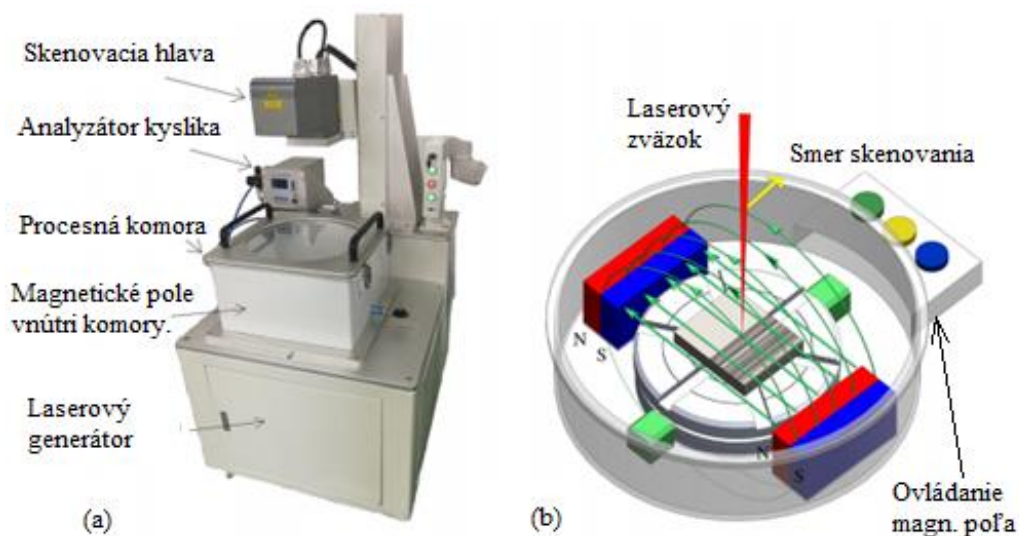
2.1.3 Laserové leštenie so stabilným pôsobením magnetického poľa

Autori danej štúdie sa zamerali na vplyv magnetického poľa na výslednú topografiu povrchu materiálu S136H (X40Cr14), so vzorkami obdĺžnikovitého tvaru s hrúbkou 10 mm. Táto oceľ sa používa najmä na výrobu dutín foriem pre výrobu plastov, prípadne na výrobu jadri, pre vstrekovanie plastov. Z chemického zloženia materiálu uvedeného v tab. 11 vyplýva, že žiadny prvok nemôže reagovať s asistenčným plynom N_2 pri vysokých teplotách, preto bol použitý tento typ ochrannej atmosféry. (Xiao et. al., 2020).

Tab. 11 Chemické zloženie ocele S136H (Xiao et. al., 2020).

Chem. prvok	C	Si	Mn	Fe	Cr	P	S
Obsah (%)	0,38	0,8	0,5	84	13,6	<0,03	<0,03

Experiment sa realizoval na zariadení, ktorého schéma s magnetickým poľom je na obr. 36, pri nastavení procesných parametrov uvedených v tab. 12 a tab. 13.



Obr. 36 Schematické znázornenie laserového leštenia s asistenciou magnetického poľa (Xiao et. al., 2020).

a) experimentálne zariadenie, b) magnetické pole

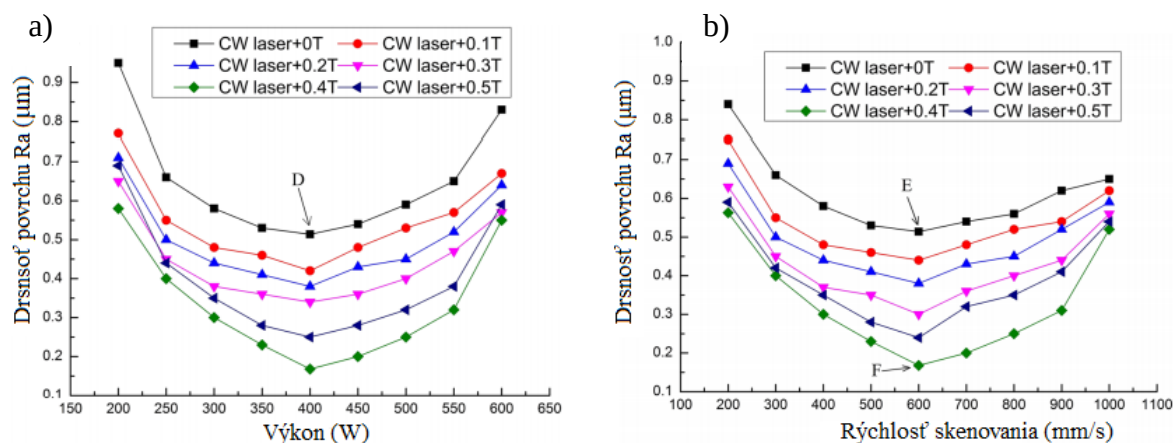
Tab. 12 Parametre procesu leštenia s výkonom laseru 200 – 600 W (Xiao et. al., 2020).

Faktor	Konštantná hodnota					
Intenzita magnetického poľa (T)	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
Rýchlosť skenovania (mm/s)	600					
Priemer stopy laserového zväzku (mm)	0,4					
Ostatné parametre	Vlnová dĺžka: 1080 nm; posun stopy laserového zväzku: 0,1 mm					

Tab. 13 Parametre procesu s rýchlosťou skenovania 200 – 1000 mm.s⁻¹ (Xiao et. al., 2020).

Faktor	Konštantná hodnota					
Intenzita magnetického poľa (T)	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
Výkon laseru (W)	400					
Priemer stopy laserového zväzku (mm)	0,4					
Ostatné parametre	Vlnová dĺžka: 1080 nm; posun stopy laserového zväzku: 0,1 mm					

Dosiahnuté výsledky parametra drsnosti povrchu Ra sú uvedené v grafoch na obr. 37. Východisková drsnosť povrchu bola $Ra = 1,873 \mu m$.

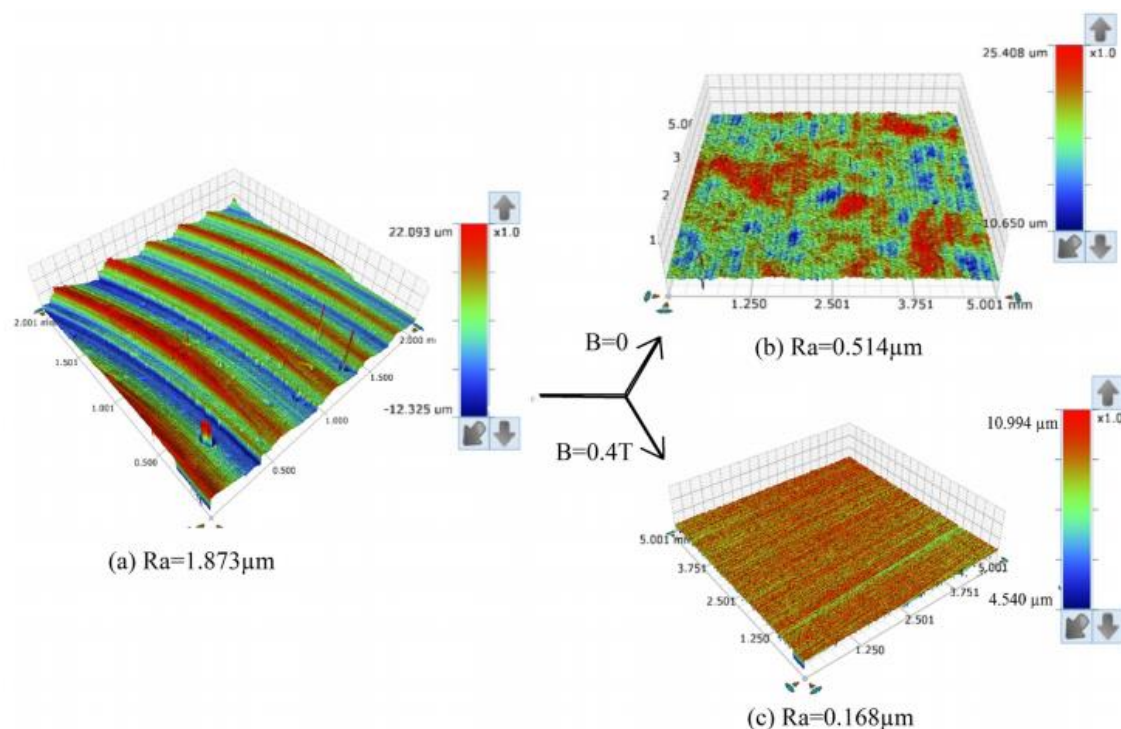


Obr. 37 Grafy závislosti parametra drsností Ra, pri rôznej intenzite magnetického poľa : a) od výkonu lasera, b) od rýchlosti skenovania laserového zväzku (Xiao et. al., 2020).

Keď sa intenzita magnetického poľa zvýši z nuly na 0,4 T, zohráva Lorentzova sila dôležitú úlohu pri potlačovaní pretečenia, ktoré vedie k sekundárnej drsnosti. Čím vyššia je stabilná magnetická intenzita poľa, tým je leštený povrch hladší. Výsledky meraní ukazujú, že keď je stabilná intenzita magnetického poľa 0,4 T drsnosť povrchu sa zníži o približne 65 %. Z obr. 37 vyplýva, že keď je intenzita magnetického poľa stabilná – 0,4 T, drsnosť povrchu sa zníži o približne 65 % v porovnaní s drsnosťou lešteného povrchu bez pomoci magnetického poľa. Intenzita magnetického poľa má nežiadúci vplyv, keď dosiahne hodnotu $B = 0,5$ T. Minimálna drsnosť povrchu lešteného bez pomoci magnetického poľa je $Ra = 0,514$ μm . Drsnosť $Ra = 0,168$ μm sa podarilo získať pri nastavení výkonu lasera $P = 400$ W a skenovacej rýchlosti 600 $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$, pomocou stabilného magnetického poľa ($B = 0,4$ T). Bod D na obr. 37a a bod E na obr. 37b znázorňujú dosiahnutú minimálnu drsnosť povrchu vzorky leštenej bez pôsobenia magnetickej poľa, zatiaľ čo bod F predstavuje minimálnu drsnosť povrchu nameranú na vzorke s intenzitou magnetického poľa $B = 0,4$ T (Xiao et. al., 2020).

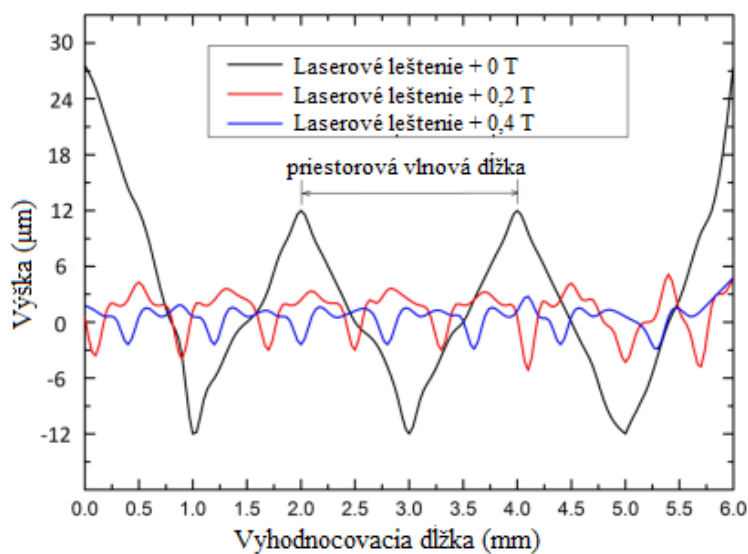
Topografia nelešteného povrchu je znázornená na obr. 38a, obr. 38b zobrazuje vyleštený povrch nástrojovej ocele S136H (X40Cr14) bez asistencie magnetického poľa, kde došlo k zníženiu drsnosti z $Ra = 1,873$ μm na $Ra = 0,514$ μm , čo predstavuje pokles drsnosti o 72,5 %. Obr. 38c zobrazuje povrch leštený s pomocou stabilného magnetického poľa, kde došlo k redukcii drsnosti až o 91 % na $Ra = 0,168$ μm . Drsnosť povrchu poklesla o viac ako 10 – 45 % v porovnaní s leštením bez použitia stabilného magnetického poľa bez ohľadu na to, ako sa menila rýchlosť skenovania či výkon lasera. Z uvedeného vyplýva, že zmena výkonu lasera a rýchlosti skenovania nemajú vplyv na výsledný trend drsnosti povrchu. Ako implementácia metódy leštenia laserom s pomocou magnetického poľa

ovplyvňuje výslednú štruktúru povrchu je možné vidieť na obr. 39. Je vidieť, že sa neznížila iba výška výstupkov a priehlbín, ale nastalo aj zmenšenie vlnovej dĺžky jednotlivých výstupkov (Xiao et. al., 2020).



Obr. 38 3D topografia leštených povrchov (Xiao et. al., 2020).

a) drsnosť povrchu neleštenej vzorky, b) topografia povrchu lešteného bez pomoci magnetického poľa, c) topografia lešteného povrchu s asistenciou magnetického poľa

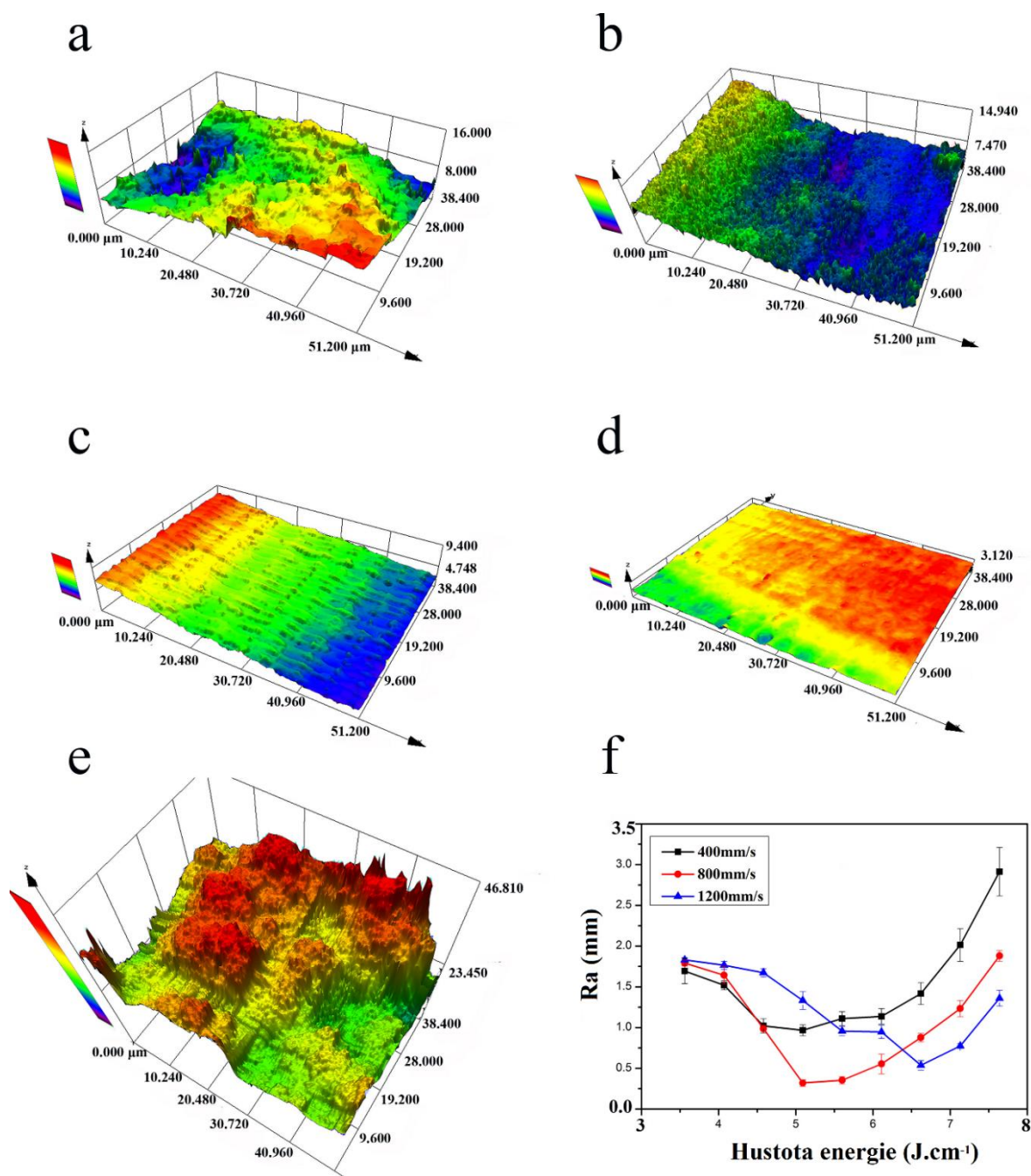


Obr. 39 Účinok leštenia laserom na povrchové nerovnosti bez použitia a s použitím magnetického poľa (Xiao et. al., 2020).

2.2 Laserové leštenie keramických materiálov

Technická keramika sa pre svoje tepelné a mechanické vlastnosti často využíva najmä v elektronike. Keramiky využívané v elektronike sa vyznačujú najmä odolnosťou voči vysokým teplotám okolo 1300 – 1500 °C, vysokým elektrickým odporom, ktorý s rastúcou teplotou klesá, rôzne dielektrické vlastnosti a nízkou odolnosťou voči náhlým zmenám teplôt. V elektrotechnike sa z hľadiska chemického zloženia využíva najmä keramika kremičitá a oxidová. Majoritnou zložkou kremičitej je kremeň (SiO_2) a kaolín, t. j. zahŕňa hmoty kremičito – hlinité. Oxidová keramika má v elektrotechnickom priemysle najväčšie uplatnenie, predovšetkým korundová keramika na báze Al_2O_3 . Teplota tavenia je okolo 2030 °C, speká sa pri teplote 1600 – 1800 °C vo vodíkovej atmosfére, kde sa dosahuje drsnosť povrchu $R_a < 0,005 \mu\text{m}$. Vyznačuje sa výbornou pevnosťou a mechanickou odolnosťou, pomerne veľkou tepelnou vodivosťou ($10 - 35 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$), chemickou stabilitou a odolnosťou voči náhlým zmenám teploty (Tuhé organické a anorganické látky, 2018).

V štúdií Zhang et.al. (2020) je pozornosť venovaná lešteniu oxidu hlinitého Al_2O_3 , kde bol použitý pikosekundový laser. Drsnosť povrchu sa podarilo znížiť o 82 %, keď sa drsnosť nevyleštenej vzorky $R_a = 1,80 \mu\text{m}$ znížila na $R_a = 0,32 \mu\text{m}$. Na obr. 40 sú znázornené 3D topografie povrchov leštených vzoriek Al_2O_3 a drsnosť povrchu nevyleštenej vzorky. Po leštení s hustotou energie $3,56 \text{ J.cm}^{-2}$ parameter drsnosti poklesol na $R_a = 1,5 \mu\text{m}$, ako je zobrazené na obr. 40b. Po zvýšení hustoty energie na $4,58 \text{ J.cm}^{-2}$ bola morfológia povrchu vzorky hladšia a drsnosť poklesla na $R_a = 0,8 \mu\text{m}$. Najhladší a najrovinatejší povrch sa dosiahol pri hustote energie $5,09 \text{ J.cm}^{-2}$, ktorý je na obr. 40d, kde sa dosiahlo zníženie drsnosti na $R_a = 0,32 \mu\text{m}$. Ďalším zvyšovaním hustoty energie už nenastal pokles drsnosti povrchu ale prudký nárast, ktorý presahoval hodnoty drsnosti $R_a = 1,80 \mu\text{m}$ neleštenej vzorky (Zhang et. al., 2020).



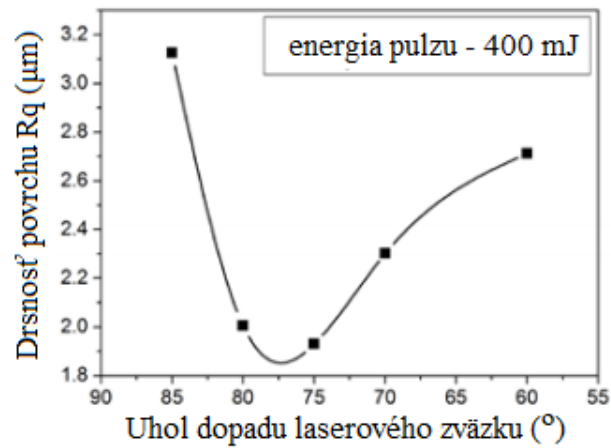
Obr. 40 3D Topografia povrchu po leštení Al_2O_3 keramického materiálu pri rýchlosti pohybu skenovania 800 mm.s^{-1} a priemere stopy laserového zväzku $10\text{ }\mu m$ (Zhang et. al., 2020).

a) drsnosť povrchu (R_a) nevyleštenej vzorky b) drsnosť povrchu (R_a) pri hustote energie zväzku $3,56\text{ J.cm}^{-2}$
 c) drsnosť povrchu (R_a) pri hustote energie zväzku $4,58\text{ J.cm}^{-2}$ d) drsnosť povrchu (R_a) pri hustote energie zväzku $5,09\text{ J.cm}^{-2}$ e) drsnosť povrchu (R_a) pri hustote energie zväzku $7,64\text{ J.cm}^{-2}$

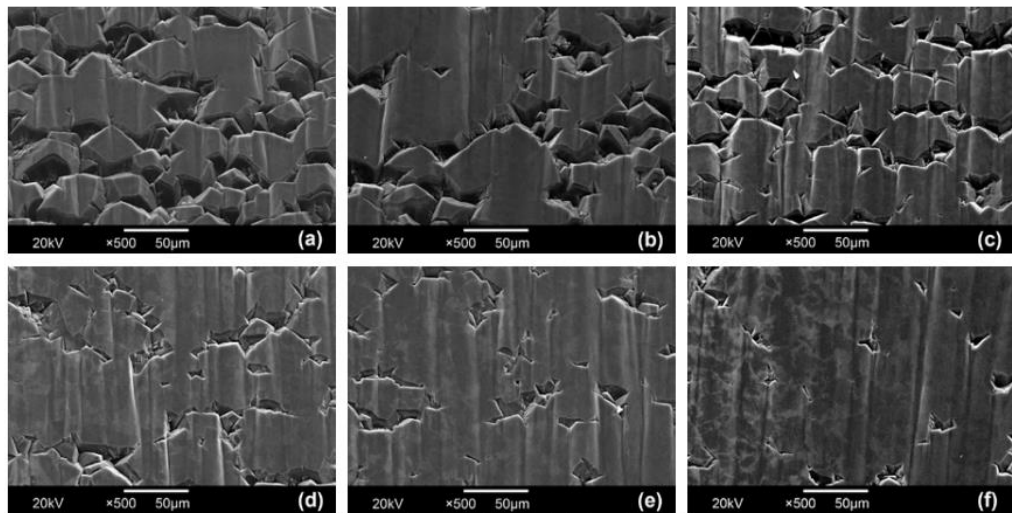
2.3 Laserové leštenie diamantového filmu

V súčasnosti sa diamantové filmy pripravujú pomocou chemickej vaporizácie CVD (Chemical Vapour Deposition) na substrátoch ako napríklad kremík, kremeň a podobne. Takto vyhotovený diamantový film sa vyznačuje relatívne drsným povrchom až niekoľko desiatok mikrónov, čo spôsobuje problém pri aplikácii v elektrotechnike, optike a podobne. Preto leštenie takýchto povrchov je kľúčové pre ich aplikovateľnosť v praxi. Momentálne sa povrchy polykryštalických diamantových „fólií“ leštia tradičnými kontaktnými metódami ako sú chemické leštenie a chemicko – mechanické leštenie. Pri týchto metódach sa pri kontakte s lešteným povrchom vyskytujú nežiadúce trhliny. Laserové leštenie ako bezkontaktná metóda má oproti uvádzaným kontaktným metódam viacero výhod, napríklad nízka miera poškodenia povrchu obrobku, možnosť leštenia tvarovo zložitých plôch alebo relatívne vysoká rýchlosť leštenia. Laserové leštenie sa tak stáva jednou z najrýchlejších sa rozvíjajúcich metód leštenia diamantov. V procese laserového leštenia diamantového filmu často ovplyvňujú výsledky parametre leštenia ako sú vlnová dĺžka laseru, uhol dopadu laserového zväzku, leštiaca atmosféra a podobne.

V štúdií Wang et. al., (2017) sa bližšie venovali lešteniu diamantového filmu s hrúbkou 250 μm a drsnosťou pred leštením $R_q = 3,314 \mu\text{m}$. Leštenie sa vykonávalo pomocou plynového excimerového laseru v kontinuálnom režime tavenia materiálu s vlnovou dĺžkou 248 nm, frekvenciou pulzov 20 kHz, energiu pulzu 400 mJ a dĺžkou trvania pulzu 25 ns. Diamantový film bol umiestnený na naklápací stolík, ktorý sa použil na zmenu uhla dopadu laserového zväzku. Vykonanými experimentami sa zistilo, že drsnosť lešteného povrchu sa najskôr znižovala a neskôr zvyšovala so znižujúcim sa uhlom dopadu. Na obr. 41 je znázornená závislosť kvadratickej odchýlky drsnosti povrchu R_q , od uhla dopadu laserového zväzku. Autori štúdie dospeli k záveru, že ideálny uhol dopadu laserového zväzku je $75^\circ - 80^\circ$. Sledovaná bola tiež hustota energie, kedy sa so zvyšujúcou hodnotou hustoty energie, drsnosť povrchu R_q znižovala. Pri najmenšej hustote energie $0,58 \text{ J.cm}^{-2}$ bola nameraná drsnosť povrchu $R_q = 2,869 \mu\text{m}$. Naopak pri najväčšej hustote energie $3,48 \text{ J.cm}^{-2}$ sa dosiahla drsnosť povrchu $1,299 \mu\text{m}$. Topografia povrchu vzoriek po leštení rozdielnymi hustotami energie, sú zobrazené na obr. 42 (Wang et. al., 2017).



Obr. 41 Závislosť drsnosti povrchu od uhlu dopadu laserového zväzku (Wang et. al., 2017).



Obr. 42 Topografia povrchu diamantového filmu po leštení rozdielnou hustotou energie (Wang et. al., 2017).

a) $0,58 \text{ J.cm}^{-2}$ b) $1,16 \text{ J.cm}^{-2}$ c) $1,74 \text{ J.cm}^{-2}$ d) $2,32 \text{ J.cm}^{-2}$ e) $2,90 \text{ J.cm}^{-2}$ f) $3,48 \text{ J.cm}^{-2}$

Treba poznamenať, že v danej štúdií autorom nešlo primárne o dosiahnutie čo najmenšej drsnosti ale aby boli poskytnuté poznatky o vhodných parametroch procesu leštenia laserom polykryštalických diamantových povlakov (Wang et. al., 2017).

3. ŠTÚDIUM LASEROVÉHO LEŠTENIA OCELÍ NA VÝROBU KOVACÍCH ZÁPUSTIEK

Povrchová vrstva vo veľkej miere ovplyvňuje životnosť nástrojov vystaveným dynamickému namáhaniu ako sú napríklad aj kovacie zápustky. Je to najmä z dôvodu, že povrchová vrstva je najviac vystavená rôznym účinkom jednotlivých faktorov ovplyvňujúcich ich životnosť. Problematika nástrojov určených na prácu za tepla je obzvlášť komplikovanejšia, nakoľko faktorov ovplyvňujúcich ich životnosť je viac v porovnaní s nástrojmi pracujúcimi za studena. Faktory, ktoré významnou mierou ovplyvňujú trvanlivosť kovacích zápustiek sú materiál zápustky, samotná konštrukcia zápustky, technológia výroby, druh a kvalita tepelného spracovania, povrchová úprava, tepelné a mechanické namáhanie a podmienky kovania. Kvalitu a celkovú životnosť kovacích ovplyvňuje aj spôsob výroby. (Bílik, 2012).

Súčasný vývoj smeruje k neustálemu zlepšovaniu technológií v oblasti úpravy povrchovej vrstvy dutín zápustiek, čo vedie k predĺženiu životnosti, avšak so zreteľom na ekonomickú efektívnosť samotnej výroby zápustiek, t. j. maximalizovať počet vyrobených výkovkov za čo najmenšiu cenu. Kvalita samotného výtvarku tiež zohráva dôležitú úlohu z hľadiska životnosti nástrojov pre zápustkové kovanie pre dodržanie presných rozmerov, tvarov a akostí na výtvarku, čo môže viesť ku skoršiemu vyradeniu nástroja, nakoľko už pri malom opotrebení nemusia byť tieto požiadavky dodržané (Bílik, 2006).

3.1 Činitele ovplyvňujúce životnosť kovacích zápustiek

Faktory, ktoré významne ovplyvňujú životnosť kovacích zápustiek sú: dosahovaná kvalita povrchovej vrstvy dutiny kovacej zápustky, základný materiál zápustky, konštrukcia zápustky, mechanické a tepelné namáhanie v procese kovania, technologické podmienky v procese kovania (Bílik, 2012).

3.1.1 Požiadavky na materiál dutiny zápustky

Kvalitu povrchovej vrstvy a životnosť z veľkej miery ovplyvňuje voľba materiálu, z ktorého bude zápustka zhotovená, predovšetkým chemické zloženie a vhodnosť materiálu na potrebný druh tepelného spracovania a samozrejme dodatočná úprava povrchov dutín zápustiek (tepelná, chemická, mechanická). Vysoké požiadavky sa kladú hlavne na tvrdosť povrchovej vrstvy a húževnatosť jadra. Podľa celkovej zložitosti a členitosti dutiny

zápustiek, druhu namáhania a spôsobu práce sa volí materiál, na ktorý sú kladené vysoké požiadavky. (Pollák, 2007).

Tvrdosť uhlíkových nástrojových oceli je závislá od hmotnostného obsahu uhlíka v chemickom zložení ocele. Pri legovaných oceliach je dôležité z hľadiska zvyšovania tvrdosti množstvo karbidotvorných prvkov ako sú W, Mo, Cr, V. S tvrdosťou povrchovej vrstvy materiálu súvisí aj odolnosť materiálu zápustky voči opotrebeniu, čomu sa tiež dá predísť použitím spomínaných karbidotvorných prvkov. Jedným z ďalších činiteľov je húževnatosť materiálu počas dynamického namáhania. Rázovú húževnatosť materiálu ovplyvňuje najmä spôsob tepelného spracovania a chemické zloženie, ale pozitívny vplyv na zvýšenie húževnatosti má aj prvok Ni. Rozmerová stálosť je tak isto rozhodujúcim faktorom, ktorý ovplyvňuje výslednú kvalitu výrobkov. Dôvodom nepresnosti rozmerov môžu byť zvyškové napätia v povrchovej vrstve po predchádzajúcich výrobných operáciách, čo vo výsledku zapríčiňuje vznik deformácií. Ďalšie požiadavky na vlastnosti materiálu kovacích zápustiek, na ktoré sa kladie dôraz sú vysoká ťažnosť, vysoká odolnosť proti zmenám teploty, stabilita vlastností za tepla, zachovanie vysokej pevnosti za zvýšených ale aj normálnych teplôt, odolnosť materiálu voči tvorbe trhliniek spôsobených tepelným únavovým opotrebením vyskytujúcich sa na funkčných plochách nástroja a iné. Na obr. 43 sú uvedené ocele vhodné na prácu za tepla a bežne používané na výrobu zápustiek (Bílik, 2006).

Druh ocele	Označenie materiálu	Chemické zloženie							Teplota [°C]		Tvrdosť po tepelnom spracovaní [HRC]
		C	Mn	Si	Cr	Mo	V	Ostatné	Kalenie	Popúšťanie	
Cr-Mo-V	32CrMoV12-28	0.32	0.3	0.25	3	2.8	0.55	–	1040	550	46
	X37CrMoV5-1	0.37	0.4	1	5.2	1.3	0.4	–	1020	550	48
	X40CrMoV5-1	0.4	0.4	1	5.2	1.4	1	–	1020	550	50
	X38CrMoV5-3	0.38	0.4	0.4	5	3	0.5	–	1040	550	50
	50CrMoV13-15	0.5	0.7	0.5	3.3	1.5	0.25	–	1010	510	56
Cr-W-V	X30WCrV9-3	0.3	0.3	0.25	2.8	–	0.4	W: 9	1150	600	48
Cr-Mo-W-V	X35CrWMoV5	0.35	0.35	1	5.1	1.4	0.35	W: 1,4	1020	550	48
Vysokoleg. oc.	38CrCoWV18-17-17	0.38	0.35	0.35	4.4	0.4	1.9	W: 4,2 Co: 4,3	1120	600	48
Nízkoalegovaná ocel	55NiCrMoV7	0.55	0.75	0.25	1	0.45	0.1	Ni: 1,6	850	500	42

Obr. 43 Nástrojové materiály vhodné na výrobu kovacích zápustiek (Hawryluk 2016).

3.1.2 Chemicko – tepelné spracovanie povrchov kovacích zápustiek

V súčasnosti pre neustále zvyšovanie požiadaviek na topografiu kvality povrchovej vrstvy dutín kovacích zápustiek sa na povrchy aplikujú technológie chemicko – tepelného spracovania ako sú nitridácia, boridovanie alebo technológie povlakovania tenkých vrstiev napr. TiN, prípadne rôzne špecifické úpravy povrchov ako plazmové nástreky, galvanické chrómovanie alebo naváranie. (Bílik, 2006)

Správne nastavenie podmienok chemicko - tepelného spracovania dopomáha v značnej miere odolávať vplyvom cyklického mechanického a tepelného namáhania kovacích zápustiek, čo ovplyvňuje ich životnosť. Tepelná a mechanická únava zapríčinená namáhaním má za následok vznik trhlín na povrchu dutín nástrojov kovacích zápustiek. Medzi činitele ovplyvňujúce tepelnú únavu materiálov zápustkových ocelí sa zaraďujú predovšetkým mechanické a fyzikálne vlastnosti nástrojov pre zápustkové kovanie, alebo prevádzkové pracovné podmienky nástrojov. (Bača, 2005; Lin et. al., 2012).

Spôsob výroby zápustiek nie vždy zaručuje ideálne vlastnosti a požadovanú funkčnosť a životnosť kovacích zápustiek, preto sa často využívajú rôzne úpravy povrchových vrstiev ako napríklad nitridovanie, boridovanie, mechanické spevňovanie povrchových vrstiev alebo elektroiskrové povlakovanie.

Nasycovanie povrchu dusíkom preukázateľne vedie k zvyšovaniu životnosti tvárniacich nástrojov určených na prácu za tepla. Nasýtená povrchová vrstva do hrúbky v rozmedzí 0,2 – 0,5 mm bežne dosahuje tvrdosť 60 – 65 HRC s nízkym koeficientom trenia. Okrem zvýšenia tvrdosti, zlepšuje odolnosť voči kavitačnému a abrazívnemu opotrebeniu funkčných plôch dutín zápustiek. Boridovanie sa uskutočňuje podobne ako nitridovanie za účelom zvýšenia tvrdosti povrchovej vrstvy zápustky, zvýšenia odolnosti proti opotrebeniu pri klznom trení, abrazívnom trení a trení pri zvýšených teplotách. Výhodou boridovania je možnosť nasycovania povrchu všetkých typov ocelí, do hrúbky najčastejšie 0,1 – 0,3 mm. Dosahovaná tvrdosť je v rozmedzí 1900 – 2100 HV.

Ďalšou z možností zlepšovania vlastností povrchovej vrstvy je mechanické spevňovanie. Metóda aplikovateľná aj na spevňovanie povrchovej vrstvy dutín zápustiek sa nazýva guľôčkovanie. V princípe ide o mechanické spevňovanie dynamickým guľôčkováním, založenom na metacom princípe. V procese spevňovania dochádza k zvýšeniu medze pevnosti, medze klzu a k zvýšeniu tvrdosti, vplyvom deformačného spevnenia. Vznikajú však aj nežiadúce zvyškové napätia, ktorých príčinou sú tlakové napätia vnesené v procese spevňovania do povrchových vrstiev materiálu (Bílik, 2012).

V súčasnosti nie až tak často využívané progresívne metódy úpravy povrchovej vrstvy dutín zápustiek, napríklad pomocou lasera. V prípade kovacích nástrojov sa laser využíva na tepelné spracovanie povrchovej vrstvy najmä pri zložitých, členitejších dutinách, najmä preto že umožňuje iba lokálne ale intenzívne zahriatie povrchu, v dôsledku čoho nastáva požadovaná zmena vlastností. Laserový zväzok nahreje povrch bez toho aby nedošlo k úplnému pretaveniu povrchovej vrstvy, čím sa umožňuje vnieť do povrchovej vrstvy karbidy volfrámu (WC) alebo stelity. Výsledkom procesu je po vychladnutí vrstva materiálu s odlišnými vlastnosťami a chemickým zložením (Hawryluk 2016).

3.2 Degradácia povrchovej vrstvy kovacích zápustiek v procese kovania

Kovacie zápustky sú vystavené mechanickému a tepelnému namáhaniu, čo v konečnom dôsledku poškodzuje povrch dutín nástrojov a ich podpovrchové vrstvy. Napätia sú prítomné nie len počas procesu kovania ale taktiež pri vytiahnutí kovanej súčiastky z dutiny kedy je zápustka chladená mazivom. Teplota formy pred kovaním a rýchlosť tvárnenia kovanej súčiastky sú ďalšími parametrami procesu, ktoré môžu ovplyvniť životnosť zápustky. Dôsledkom tohto nepriaznivého prostredia je možný výskyt niektorých druhov poškodenia povrchovej vrstvy nástrojového materiálu, ktoré sú uvedené v schéme na obr. 44 (Hazlinger a kol. 2010).



Obr. 44 Schematické znázornenie druhov poškodenia povrchov kovacích zápustiek (Kovové materiály, 2004).

3.2.1 Korózia

Na vyradenie tvárniacich nástrojov z prevádzky ako sú kovacie zápustky má zásadný vplyv korózia, ktorú charakterizujeme ako reakciu materiálu s okolitým prostredím. Táto reakcia následne vyvoláva nežiadúcu zmenu vlastností a stratu funkčnosti nástroja. Korózia materiálov určených na výrobu zápustiek je charakterizovaná ako súhrn elektrochemických a heterogénnych reakcií medzi povrchom dutiny zápustky a okolitým prostredím, ktoré vyvolávajú znehodnocovanie materiálu. V pracovnom prostredí, v ktorom zápustka vykonáva svoju činnosť môže nastať korózia v plynnom, kvapalnom alebo v inom agresívnom prostredí. Znehodnotenie materiálu sa prejaví vo forme straty lesku a farby povrchu, alebo môže dôjsť k porušeniu celistvosti materiálu. V technickej praxi sa rozlišujú viaceré druhy korózie materiálov. Pri sledovaní vnútorného mechanizmu korózných dejov sa rozlišuje elektrochemická a chemická korózia materiálov (Hazlinger a kol., 2010).

3.2.2 Prehriatie materiálu kovacej zápustky

V procese kovania v dôsledku pôsobenia merných tlakov na povrch súčiastok a pôsobením klzného trenia vysokou rýchlosťou, je prevádzková teplota 900 – 1250 °C a spôsobuje tak tepelné poškodenie povrchu materiálov dutín kovacích zápustiek. Po určitom čase, kedy je zápustka v prevádzke sa vytvára v určitých miestach funkčných plôch oxidická vrstva a sieť malých trhlín. Takého trhliny majú tendenciu sa ďalej šíriť a nepravidelne a prehlbovať až sa časti týchto funkčných plôch oddelia od zvyšku súčiastky, čo spôsobí stratu funkčnosti zápustky. Tieto nežiadúce zmeny nastávajú pri nevhodnej technológii výroby nástroja alebo pri nesprávnom nastavení pracovného cyklu kovacej zápustky. Cyklické tepelné napätia a degradácia funkčných plôch dutiny zápustky sú vyvolané cyklickými zmenami teplôt, čo vyvoláva vznik trhlín mechanizmom nízkokyklickej únavy, ktoré je vidieť na obr. 45. Vznik týchto trhlín sa zvyšuje rastúcou teplotou povrchu v dôsledku dlhodobého kontaktu nástroja s polotovarom a v dôsledku prehriatia polotvaru. Taktiež má nepriaznivý vplyv na iniciáciu trhlín nadmerné ochladenie povrchu kovacej zápustky, nesprávne zvolená teplota predhrevu nástroja, prípadne zlá kvalita tepelného spracovania a voľba materiálu. Vznikom únavových trhlín sú vytvorené vhodné podmienky na oddelenie väčších častí materiálu z funkčných plôch povrchu dutiny nástroja. Výsledkom týchto procesov je zatečenie materiálu do trhlín, ktoré komplikuje vybratie výkovku z dutiny formy (Bača, 2005; Klobčar et. al., 2012).



Obr. 45 Nízkocyklová únava kovacej zápustky vyvolaná tepelno – mechanickým zaťažením (Hazlinger a kol., 2010).

3.2.3 Opotrebenie povrchových vrstiev

Opotrebenie sa definuje ako trvalá nežiadúca zmena rozmerov alebo povrchu súčiastky spôsobená vzájomným pôsobením funkčných povrchov alebo funkčného povrchu a média, ktoré vyvoláva opotrebenie. Opotrebenie sa môže prejavovať mechanickým odstraňovaním alebo premiestňovaním častíc z opotrebovaného povrchu, prípadne kombináciou s inými vplyvmi. Opotrebenie však nevedie k náhlemu porušeniu súdržnosti, ale k postupnému porušeniu povrchových vrstiev materiálu a zhoršeniu kvality funkčných plôch, čo dramaticky znižuje životnosť nástrojov.

V miestach kde pôsobia vysoké tlaky a dochádza k premiestňovaniu materiálu s vysokou relatívnou rýchlosťou za súčasného prechodu tepla, vzniká opotrebenie tvárniacich nástrojov. Opotrebenie nastáva najmä na hranách tvarov s konvexnými rádiusmi a v rohoch dutín kovacích zápustiek. Medzi ďalšie mechanizmy vyvolávajúce opotrebovanie zaradujeme oter, príľnavosť a rozrušenie. V praxi sa stretávame so šiestimi typmi opotrebenia: adhézne, abrazívne, erozívne, kavitačné, vibračné a únavové. Tieto typy opotrebení sa len zriedka vyskytujú jednotlivo, vo väčšine prípadov ide o kombináciu viacerých druhov opotrebenia. Dutiny kovacích zápustiek sú poškodzované hlavne abrazívnym opotrebením (oterom), nadmernými tlakmi, vysokou teplotou alebo koróznym účinkom maziva alebo chladiva. Štúdiami bolo zistené že 70 až 75 % z celkového množstva poškodených kovacích zápustiek je spôsobené abrazívnym opotrebením. Vznikom a rozširovaním trhlín je poškodených 20 až 25 % kovacích zápustiek a iba 5 % poškodenia je spôsobených tepelnou únavou a deformáciou (Hazlinger a kol., 2010).

3.3 Drsnosť povrchu dutín kovacích zápustiek

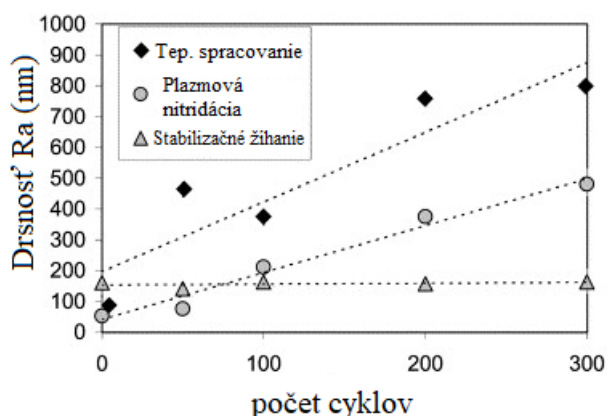
Významnú úlohu z hľadiska životnosti kovacích zápustiek a výslednej kvality výkovku, zohráva drsnosť povrchu dutiny kovacej zápustky. S rastúcou drsnosťou funkčných plôch kovacích zápustiek priamoúmerne narastá klzné trenie medzi nástrojom a obrobkom. Negatívny účinok klzného trenia môže spôsobiť zníženú životnosť nástroja a jeho vyradenie z prevádzky z dôvodu zvýšeného opotrebenia. Zvýšená drsnosť povrchu môže taktiež spôsobiť únavové opotrebenie, čo v konečnom dôsledku tiež znižuje životnosť nástrojov. (Karunathilaka et. al., 2019).

V tab. 14 sú uvedené drsnosti jednotlivých častí kovacej zápustky, podľa normy STN 228306. Pre dobrý tok materiálu v zápustkovej dutine a pozitívny vplyv na trvanlivosť povrchu sú zápustky, zápustkové vložky a vyhadzovače obrábané, brúsené, alebo leštené na vysoké akosti povrchu. Obvykle sú používané drsnosti odporúčané normou uvedené v tab. 14. Zápustky dutiny sú bežne leštené. Vysoká akosť povrchu má dobrý vplyv na trvanlivosť zápustiek a tiež na kvalitu výkovku. Materiál v dutine lepšie zateká a náradie má zvýšenú životnosť.

Tab. 14 Opracovanie plôch podľa normy STN 228306.

Plocha	Opracovanie Ra [μm]
Zápustka	
Dutina preddokončovacia	1,6 – 3,2
Dokončovacia dutina	0,8 – 3,2
Mostík	0,8 – 3,2
Dosadacie plochy	3,2
Upínacie plochy	3,2
Zásobník	12,5
Ostatné vonkajšie plochy	12,5
Vedenie zápustiek	1,6
Otvory pre dopravné kolíky	12,5
Otvory pre vyhadzovače	1,6
Zápustková vložka	
Dutina	0,8 – 3,2
Lícovaná časť	0,8 – 1,6
Dosadacia plocha	3,2
Predkovací tŕň	0,8 – 1,6
Vyhadzovače	
Vodiaca plocha	0,8 – 1,6
Činná časť	0,8 – 1,6
Dosadacia plocha	1,6 – 3,2
Ostatné	12,5

Drsnosť povrchu priamoúmerne narastá s počtom vyrobených výkovkov. V štúdií Panjan et. al. (2002) bol pozorovaný vplyv drsnosti po aplikácií plazmového nitridovania v porovnaní s inými technológiami tepelného spracovania. Drsnosť bola zmeraná vždy po 100 pracovných cykloch. Na obr. 46 je vidieť že drsnosť povrchu narastá s počtom vyrobených výkovkov pre nástroje, ktoré boli tepelné spracované a pomaly narastala pri nástroji, ktorý bol plazmovo nitridovaný. Pre nástroj, ktorý bol stabilizačné žiňaný sa drsnosť povrchu výrazne nezmenila (Panjan et. al., 2002).



Obr. 46 Drsnosť povrchu kovacej zápustky pri troch rozdielnych typoch tepelného a chemicko-tepelného spracovania (Panjan et. al., 2002).

Dosahovaná presnosť zápustiek z pravidla vychádza z normy podľa stupňa presnosti IT. Pre kovacie zápustky sa volí vyššia presnosť tolerance, rádovo o 1 až 3 stupne vyššia ako požadovaná presnosť výkovku. Presnosť sa zvyčajne volí IT 8/9 až IT 12. (MM spektrum, 2002).

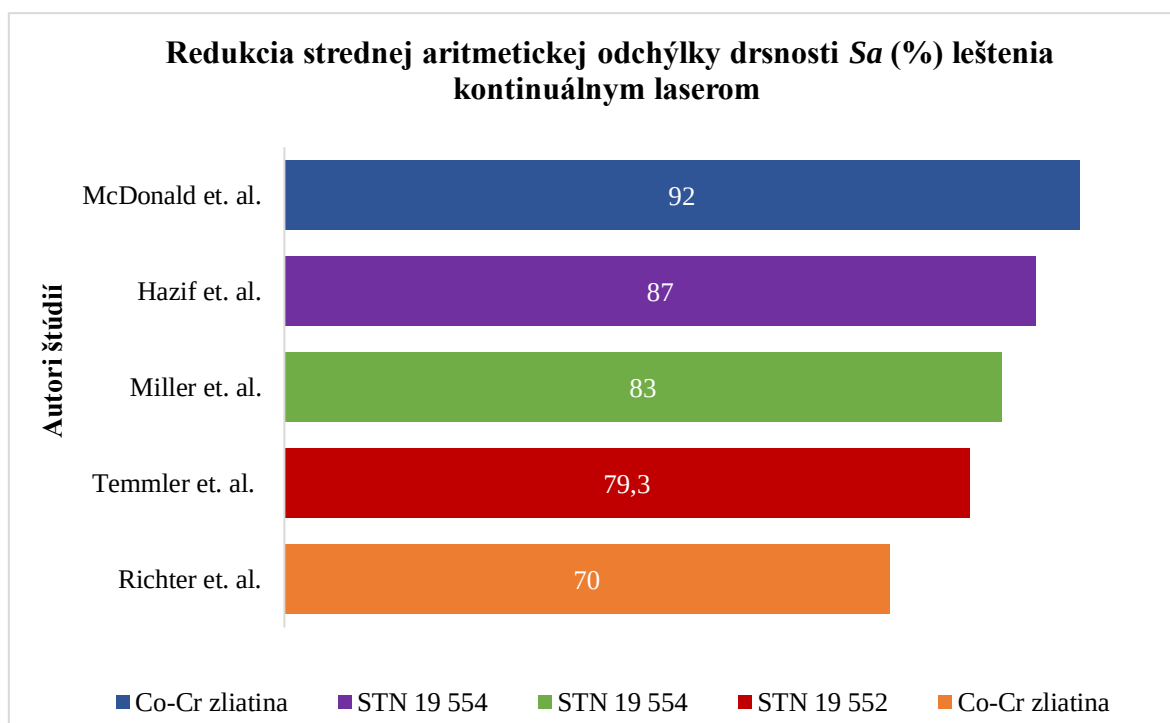
Súčasný vývoj technológii trieskového obrábania a progresívnych metód v obrábaní poskytuje možnosti opracovania povrchov dutín zápustiek na vysokej úrovni, kedy je možné dosahovať veľmi malé hodnoty drsnosti. Najrozšírenejším spôsobom výroby dutín zápustiek je vysokorýchlostné frézovanie (HSM), ktoré ponúka niekoľko výhod v porovnaní s klasickými metódami obrábania, napríklad nižšie rezné sily a lepšiu kvalitu povrchu. Metódou HSM sa dosahujú úrovne drsnosti povrchov blížiacim sa k hodnote $Ra = 0,1 \mu m$ a často sa aplikuje na kalené ocele s tvrdosťou 32 až 60 HRC. Povrch dutín kovacích zápustiek je charakteristický svojou textúrou a metalurgickými vlastnosťami povrchovej a podpovrchovej vrstvy ako sú tvrdosť a mikroštruktúra. Odstraňovaním triesky spôsobuje zmeny na povrchoch, ktoré môžu znižovať tvrdosť a únavovú pevnosť a spôsobovať praskanie, zmeny mikroštruktúry, prehriatie a nerovnosti povrchu. V praxi platí všeobecná

zásada, že čím je povrch hladší tým sú náklady na opracovanie väčšie, avšak poskytuje lepší výkon. Najhladší povrch však nemusí vždy znamenať že je nevyhnutne najlepší, pretože hrubší povrch môže lepšie držať mazivo a odolávať tak mechanizmom opotrebenia (Magri et. al., 2013).

ZHODNOTENIE, ZÁVERY, ODPORÚČANIA

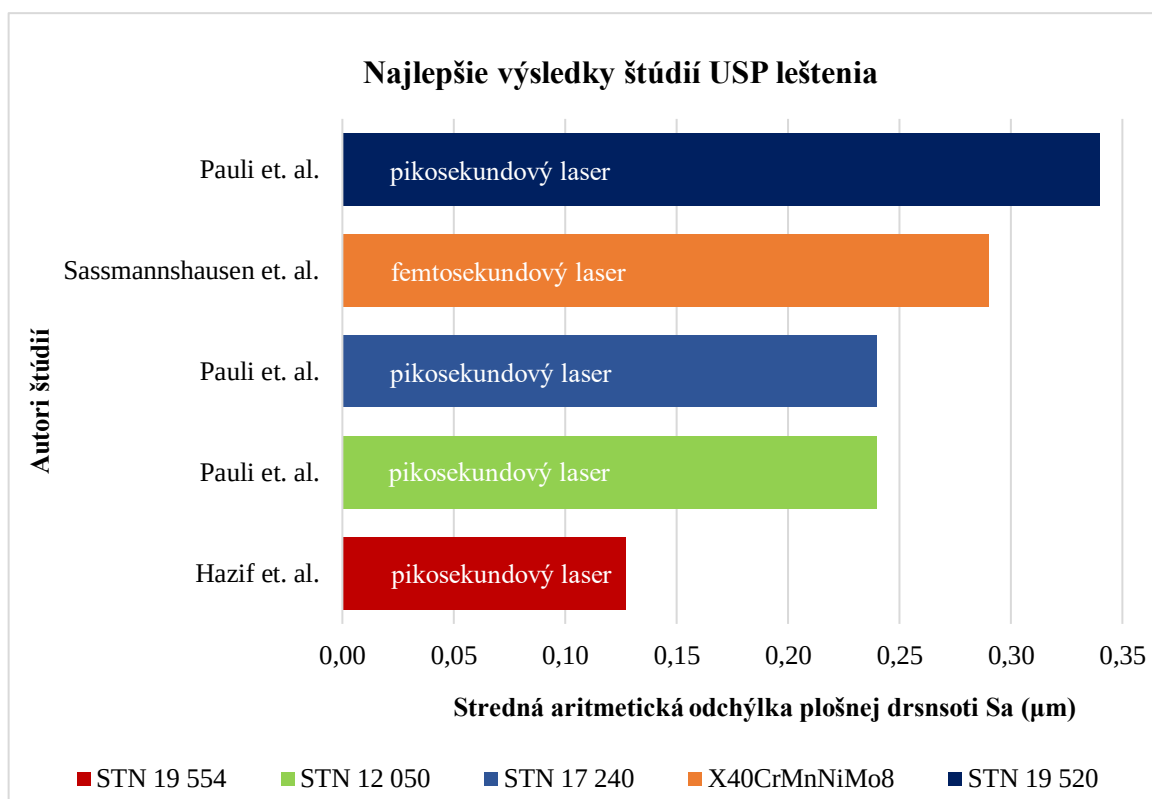
Vo všeobecnosti je známe, že kontaktné a funkčné plochy nástrojov používaných v strojárskom priemysle vyžadujú špecifický druh opracovania. Jedná sa často o dokončovacie operácie po predchádzajúcich technologických operáciách trieskového obrábania alebo aditívnej výroby. Trendom posledných rokov je neustála miniaturizácia rozmerov vyrábaných súčiastok, ktoré nie je možné leštiť mechanicky v dôsledku nedostupnosti niektorých plôch a svojim malým rozmerom. Otvára sa preto otázka ako takéto výrobky možno leštiť čo najefektívnejšie a najhospodárnejšie. Odpoveďou na túto otázku by mohlo byť laserové leštenie, pri ktorom sa nástroj neopotrebuje pretože je nahradený laserovým zväzkom, ktorý na obrobok nepôsobí žiadnou silou. Tento proces si preto nevyžaduje upínanie polotovaru, čo v konečnom dôsledku najviac šetrí čas a náklady na výrobu súčiastok. Na základe prehľadu súčasnej svetovej literatúry je možné odporučiť nasledovné:

- V literárnych štúdiách autori na leštenie nástrojových ocelí využívajú lasery s kontinuálnym a pulzným režimom. Pre povrchy vyznačujúce sa vyššou drsnosťou povrchu, je vhodné použiť kontinuálny režim tavenia materiálu, kedy hĺbka pretavenia dosahuje hodnoty 20 – 100 μm . Naopak pre povrchy s menšou východiskovou drsnosťou povrchu, napríklad po brúsení alebo dokončovacích operáciách frézovania, možno použiť pulzný režim, kde hĺbka pretavenia je $< 5 \mu\text{m}$. Čas potrebný na natavenie určitej plochy je však podstatne kratší v rozmedzí 1 – 10 s.cm^{-2} . V prípade kontinuálneho režimu sa tento čas natavenia pohybuje od 7 s.cm^{-2} do 60 s.cm^{-2} , možno ho však použiť pre drsnejšie povrchy, napríklad po sústružení, frézovaní alebo elektroerozívnom obrábaní, kde sa dosahuje drsnosť povrchu od $R_a = 0,4 \mu\text{m}$ do $10 \mu\text{m}$. Problematike leštenia kontinuálnym laserom sa venovalo viacero autorov z celého sveta, či už z Európy, USA alebo Ázie. Vo viacerých štúdiách sa podarila redukcia drsnosti od 40 až do 87 % v porovnaní s nevylešteným povrchom. Na obr. 47 je možné vidieť najlepšie dosiahnuté výsledky autorov, ktorí použili kontinuálne lasery.

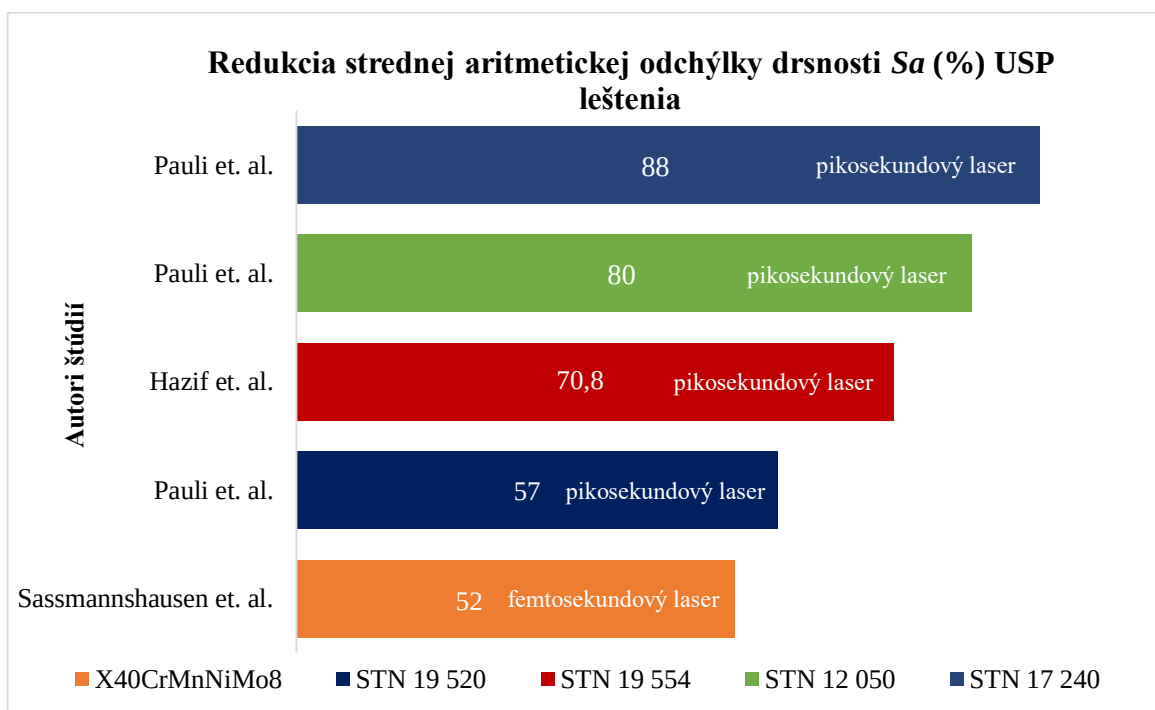


Obr. 47 Grafické zobrazenie dosiahnutého zníženia drsnosti povrchov leštených kontinuálnym laserom podľa rôznych autorov.

- V prípade pulzného laseru sa frekvencie pohybujú rádo vo niekoľkých 100 - 1000 kHz s dĺžkou trvania pulzu niekoľko nanosekúnd. Niektoré európske štúdie, však vo svojich experimentoch používajú lasery, ktoré pracujú pri vysokých frekvenciách rádo vo MHz, s krátkou dobou trvania pulzov niekoľko pikosekúnd až femtosekúnd. Na obr. 48 a obr. 49, sú uvedené najlepšie výsledky experimentálnych štúdií USP leštenia, s krátkou dobou trvania pulzov od 800 fs – 10 ps. Je možné konštatovať, že pri pulzných laseroch s krátkou dobou trvania pulzov možno dosiahnuť podstatne nižšie hodnoty strednej aritmetickej odchýlky plošnej drsnosti, v rozmedzí od $S_a = 0,127 \mu\text{m}$ do $S_a = 0,34 \mu\text{m}$. Treba však zdôrazniť, že väčšina vzoriek, ktoré boli leštené USP laserom vykazovali pomerne malú východiskovú drsnosť od $S_a = 0,5 \mu\text{m}$, čo korešponduje s predchádzajúcimi tvrdeniami, že pulzný laser s krátkou dobou trvania pulzov je vhodné aplikovať pri procesoch kde je východisková drsnosť veľmi malá, napríklad po brúsení alebo mechanickom leštení. Kontinuálny laser je určený najmä na leštenie drsnejších povrchov napríklad po aditívnej výrobe, prípadne po hrubovacích operáciách trieskového obrábania. Na nasledujúcich obr. 48 a obr. 49, sú uvedené najlepšie výsledky experimentálnych štúdií USP leštenia, podľa jednotlivých autorov.

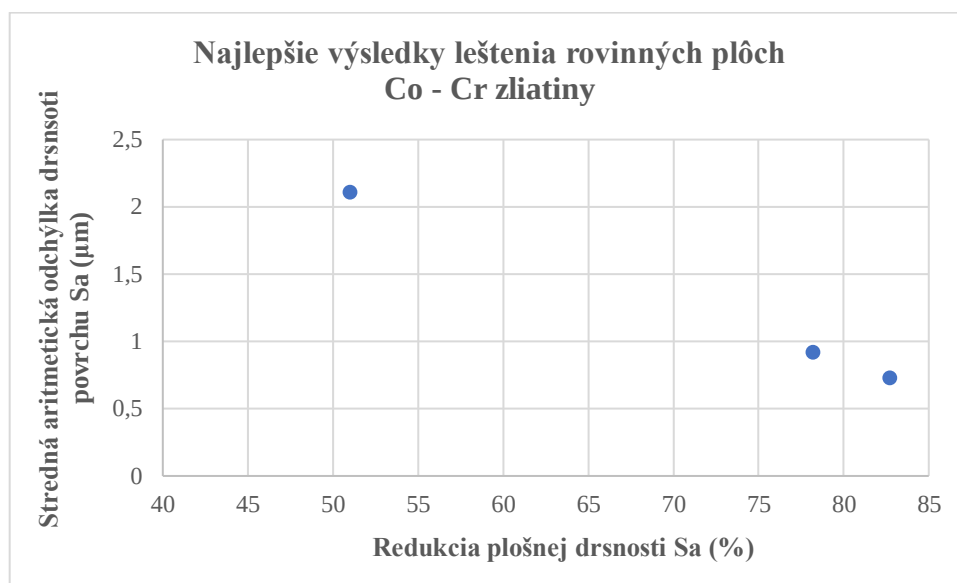


Obr. 48 Grafické zobrazenie dosiahnutého zníženia strednej hodnoty plošnej drsnosti leštených povrchov pulzným laserom podľa rôznych autorov.

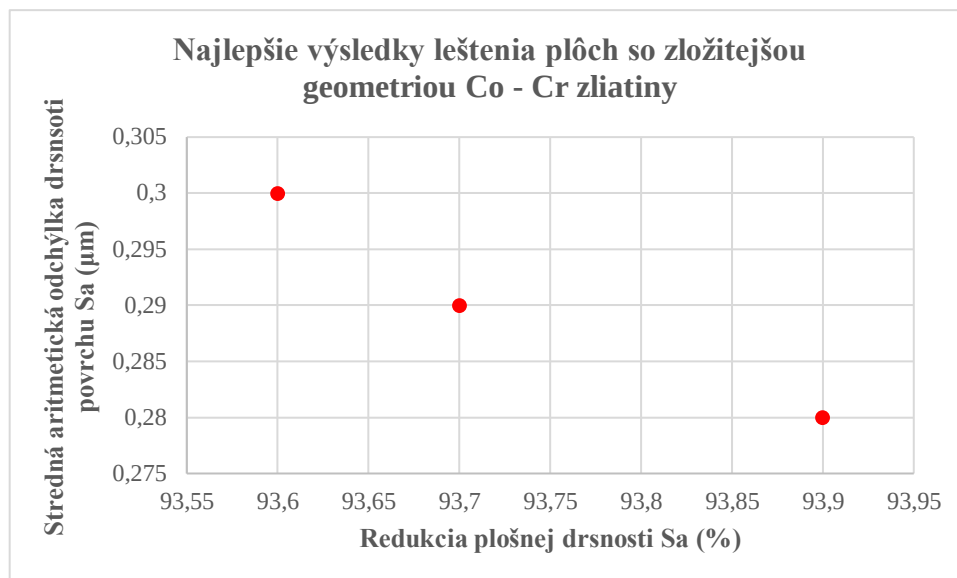


Obr. 49 Grafické zobrazenie dosiahnutého zníženia drsnosti povrchov leštených pulzným laserom podľa rôznych autorov.

- V literárnych štúdiách uvedených v tejto práci je pozornosť venovaná aj lešteniu rovinných a nerovinných plôch so zložitejšou geometriou. Autori často využívajú poznatky získané z leštenia rovinných plôch na nastavenie energetických parametrov procesu leštenia plôch so zložitejšou geometriou povrchu. Na obr. 50 je vidieť výsledky opracovania Co – Cr zliatiny rovinatej vzorky a porovnanie výsledkov leštenia rovnakého materiálu so zložitejšou geometriou na obr. 51. Použitý bol vláknový pulzný laser s vlnovou dĺžkou 1064 nm a maximálnym výkonom 70 W. Ako je vidieť na obr. 50, najmenšia drsnosť povrchu rovinatej vzorky, bola $Sa = 0,73 \mu\text{m}$, pri skenovacej rýchlosti laserového zväzku 300 mm.s^{-1} a hustote energie 8 J.mm^{-2} . Parametre použité pri tomto leštení, boli použité aj pri skúmaní vzoriek so zložitejšou geometriou. Z nasledujúcich porovnaní grafov leštenia toho istého materiálu povrchov s rovinnou a zložitejšou geometriou, je zrejmé že pri zložitejšej geometrii sa drsnosť redukovala o viac ako 90 %, čo je v porovnaní s rovinnou vzorkou ešte výraznejšie zlepšenie drsnosti povrchu.



Obr. 50 Grafické zobrazenie výsledkov leštenia rovinatej plochy obrobku z Co-Cr zliatiny, leštenej pulzným laserom.



Obr. 51 Grafické zobrazenie výsledkov leštenia plochy so zložitejšou geometriou z Co-Cr zliatiny, leštenej pulzným laserom.

- V literárnych štúdiách, ktoré sa zaoberajú problematike laserového leštenia, pracujú autori s viacerými energetickými parametrami. Ako najdôležitejšie parametre laserového leštenia sú výkon laseru (P), rýchlosť skenovacieho pohybu laserového zväzku (v_s / v_f), ale taktiež doba trvania pulzov, typ, množstvo a spôsob prívodu asistenčného plynu, východisková drsnosť a materiálové charakteristiky lešteného materiálu. Taktiež výrazný vplyv na výslednú drsnosť povrchu má aj stratégia pohybu laserového zväzku a počet obrábaných vrstiev. Na základe literárnych poznatkov a vykonaných analýz z jednotlivých štúdií, je možné konštatovať, že čím je väčší počet obrábaných vrstiev (n), tým je povrch leštenej súčiastky hladší a parametre drsnosti nižšie. Môžeme teda konštatovať a odporučiť nasledovné:

- Laser by mal byť pulzný alebo kontinuálny podľa východiskovej drsnosti povrchu. Z hľadiska vlnových dĺžok by mal byť použitý laser s vlnovými dĺžkami $\lambda = 10^{-5} - 10^{-6}$ m. Na leštenie laserom sa v štúdiách najviac využíva pevnolátkový Nd:YAG laser, s vlnovou dĺžkou 1,06 µm, ktorý dosahuje výkony až do 4 kW.
- **Voľba výkonu lasera by mala pohybovať** v rozmedzí od 40 W – 400 W.
- Skenovaciu rýchlosť zväzku je vhodné voliť : od 15 mm.s⁻¹ až do 7875 mm.s⁻¹. Pri vyšších rýchlostiach je potrebné zvýšenie výkonu laseru, kvôli dostatočnej hĺbke pretavenia.
- Priemer stopy laserového zväzku v ohnisku : 30 – 400 µm. Percentuálne prekrytie stôp laserového zväzku sa odporúča voliť čo najväčšie, ≥ 90 %.

- Ako asistenčný plyn sa ako najvhodnejší podľa štúdií javí argón s prietokom 20 l.min^{-1} . Môže byť použitý v kombinácii s viacerými plynmi napríklad s určitým percentuálnym podielom CO_2 .

- V procese aditívnej výroby, sa súčiastky často vyhotovujú postupným spekaním jednotlivých vrstiev častíc technológiou SLM alebo SLS. Častice sú v takomto prípade spekané laserom, čím možno vyrobiť súčiastku a následne aplikovať dokončovacie operácie na tom istom stroji, čo v konečnom dôsledku šetrí čas aj náklady na výrobu. Trendom posledných rokov je neustále rozrastajúci sa dopyt po aditívne vyrábaných súčiastkach a keďže po výrobe nespĺňajú požadovanú kvalitu z hľadiska integrity povrchu, musia byť dodatočne leštené. Keďže takto vyhotovené súčiastky sú často malých rozmerov, vyžadujú si špecifický proces opracovania, ktorý nie je možné vykonávať manuálne. Ako hospodárna a efektívna alternatíva sa javí laserové leštenie, ktoré šetrí čas pri výrobe, a môže tak nahradiť manuálnu prácu kvalifikovaných pracovníkov, čo v konečnom dôsledku šetrí najmä financie.

- Literárna štúdiá je orientovaná na leštenie nástrojových materiálov, ktoré si často vyžadujú špecifickú úpravu topografie povrchovej vrstvy. Cieľom bolo overiť možnosť leštenia nástrojových ocelí vhodných na prácu za tepla, z ktorých sa vyrábajú nástroje na zápustkové kovanie. Dutiny zápustky sú obvyčajne leštené manuálne, čo predstavuje 20 % z celkového času výroby nástroja. Tento fakt vyvoláva vo výrobnom priemysle neustály pokrok a vývoj v dokončovaní povrchov a otvára tak možnosti automatizácie procesu. Laserové leštenie sa vykonáva na automatizovanom laserovom pracovisku, čiže si nevyžaduje školený personál ako pri manuálnom spôsobe leštenia. V porovnaní s elektrochemickým, hydrodynamickým a magnetorheologickým leštením, laserové leštenie dosahuje najlepšie výsledky, z hľadiska estetických a vizuálnych vlastností ako je napríklad lesk. Touto technológiou je teda možné vyleštiť väčšiu a zložitejšiu plochu aj na ťažko dostupných miestach, za kratší čas. Viacero experimentov uvedených v tejto práci, sú leštené materiály, z ktorých sú zvyčajne vyrábané zápustky na kovanie. V procesoch tvárnenia za tepla, ako je zápustkové kovanie, sú na výslednú integritu povrchu nástroja kladené vysoké nároky. Pre dodržanie presných rozmerov, tvarov a akostí výtvarku, musí byť opracovanie plôch dutín kovacích zápustiek veľmi presné a bežne si vyžadujú leštiace práce. Celková životnosť týchto nástrojov je závislá najmä od výslednej drsnosti povrchu dutín zápustky, ktorá ovplyvňuje najmä trenie v procese kovania, taktiež od presnosti rozmerov, ktoré zaručujú presnosť výsledného výtvarku. Dutiny kovacích zápustiek sú často tvarovo zložitejšie a preto leštenie na ťažko dostupných miestach je komplikovanejšie. V štúdiách

bolo skúmané aj leštenie plôch so zložitejšou geometriou, na ktorých sa podarila redukcia drsnosti až o 90 %, čo by mohlo byť predmetom ďalších štúdií v tejto oblasti a bolo by vhodné zamerať sa na povrchy so zložitejšou geometriou a vyladiť tak energetické parametre procesu leštenia pre nástrojové ocele vhodné na výrobu nástrojov pre zápustkové kovanie. Viacerí autori ako Bordachev a kolektív (2014), uvádzajú že najlepšie výsledky sa dosiahli práve na oceliach vhodných na prácu za tepla ako je zápustkové kovanie. Sú to ocele podľa STN 19 552, STN 19 554, STN 19 520, na ktorých sa parameter drsnosti povrchu často blíži pod hranicu $Ra = 0,1 \mu m$. Možno konštatovať, že predmetom ďalšieho skúmania v tejto oblasti by mali byť predovšetkým nástrojové materiály používané na prácu za tepla.

ZÁVER

Leštenie laserovým zväzkom sa v súčasnosti dostáva do popredia, pretože nahrádza klasické spôsoby leštenia z dôvodu šetrenia času, lepšej drsnosti a lepších výsledných vlastností obrábaného povrchu. Jedná sa o dokončovací proces, pri ktorom pôsobením laserového zväzku dochádza k pretaveniu materiálu z vyšších miest do nižších, čím dochádza k vyhladeniu profilu povrchu.

Cieľom diplomovej práce bolo spracovanie súčasného prehľadu literatúry a možnostiach využitia laserovej technológie pri dokončovaní povrchov laserovým leštením. Laserové leštenie sa v súčasnosti javí ako technológia, ktorá by v budúcnosti mohla nahradiť neefektívne mechanické spôsoby leštenia.

Vedecké štúdie ukázali, že pri vhodnom nastavení parametrov leštenia ako sú výkon laseru, dĺžka trvania pulzu, vlnová dĺžka a typ laseru, rýchlosť skenovania alebo aj materiálové vlastnosti a východisková drsnosť lešteného materiálu, sa vedia dosiahnuť veľmi dobré výsledky kvality topografie povrchu. Dôležitú úlohu zohrávajú aj materiálové vlastnosti a chemické zloženie lešteného materiálu.

Z vykonanej analýzy literárnych zdrojov je možné konštatovať, že povrchové vrstvy materiálu kovacích zápustiek majú významný vplyv na životnosť nástroja. Kvalita tepelného spracovania a chemicko – tepelného spracovania prispievajú k zníženému opotrebeniu dutín kovacích zápustiek a celkovo tak vylepšujú integritu povrchu. Podľa normy STN 22 8306, si niektoré činné časti dutín kovacích zápustiek vyžadujú leštenie. Náklady na kvalifikovaný personál sú vysoké, preto vývoj smeruje k automatizácii leštiacich operácii. Vhodnou alternatívou môže byť práve laserové leštenie, kde nie je potreba kvalifikovaného pracovníka a teda sa minimalizujú náklady na pracovnú silu a taktiež sa minimalizuje poškodenie povrchu, čím sa šetria náklady spojené s výrobou kovacích zápustiek. Drsnosť povrchu výrazne ovplyvňuje funkčnosť činných častí nástroja, znižuje klzné trenie medzi nástrojom a obrobkom a teda znižuje opotrebenie povrchu a tým zvyšuje životnosť tvárniacich nástrojov pre zápustkové kovanie. Podľa vykonaných štúdií laserového leštenia sú v experimentoch často leštené nástrojové materiály vhodné na výrobu kovacích zápustiek. V štúdií Temmler et. al. (2020) sa podarilo dosiahnuť drsnosť povrchu $R_a = 0,05 \mu\text{m}$ ocele AISI H11 (STN 19 552), ktorá sa bežne používa ako materiál kovacích zápustiek. V ďalších štúdiách kde bolo použité laserové leštenie nástrojových materiálov sa tiež dosahujú drsnosti pod $R_a = 1 \mu\text{m}$, čo je vo väčšine prípadov dutín kovacích zápustiek potreba. Môžeme teda konštatovať, že na leštenie kovacích zápustiek je možné využiť technológiu laserového

leštenia, samozrejme s použitím vhodne zvolenej stratégie leštenia, pri správnom nastavení vhodne zvolených energetických parametrov vstupujúcich do procesu leštenia.

ZOZNAM BIBLIOGRAFICKÝCH ODKAZOV

BAČA, Jozef. 2005. Objemové tvárnenie : Zápustkové kovanie. Bratislava : STU, 2005
ISBN 80-227-2176-X

BÍLIK, Jozef. ©2012 Technológie výroby zápustiek a vložkovanie zápustiek [cit. 2020-11-29]. Dostupné na internete: <http://www.vsnk.sav.sk/data/files/705.pdf>

BÍLIK, Jozef. 2006. Životnosť zápustiek. In: *Kovárenství*. Bratislava: STU, s. 6-10. ISSN 1213-9829

BÍLIK, J. Životnosť zápustiek. In *Kovárenství*. 2006, č. 27, s. 6-10. ISSN 1213-9829

HAZLINGER, M., MORAVČÍK, R. 2008: Chemicko-tepelné spracovanie materiálov. Trnava: AlumniPress, 141 strán, ISBN 978-80-8096-067-4

BORDATCHEV, V. E., HAFIZ, M.K.A., TUTUNEA-FATAN, R.O. 2014. Performance of laser polishing in finishing of metallic surfaces. London: Industrial Materials Institute

BOUGHTON, P., ©2013 Laser polishing is faster than hand polishing [cit. 2020-10-17]. Dostupné na internete: <https://www.engineerlive.com/content/laser-polishing-faster-hand-polishing>

BRENNER, A., ROTHER, L., OSBILD, M., FINGER, J. 2020. *Laser polishing using ultrashort pulse laser. Laser-based Micro- and Nanoprocessing XIV*. San Francisco, United States, s. 23. [cit. 2021-04-01] Dostupné na internete: <https://doi.org/10.1117/12.2551481>

CHEN, C., TSAI, H. L. 2018. ElsevierLtd. *Fundamental study of the bulge structure generated in laser polishing process*. USA: Missouri University of Science and Technology [cit. 2020-10-10]. Dostupné na internete: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0143816617312757>

CHEN, Y.-D., TSAI, W.-J., LIU, S.-H., HORNG, J.-B., 2018. *Picosecond laser pulse polishing of ASP23 steel*. In: *Optics & Laser Technology*. Jg. 107, 180–185. [cit. 2021-04-02]. Dostupné na internete: <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2018.05.025>. S.

CHOW, M. T. C., HAFIZ, A.M.K., TUTUNEA- FATAN, O.R., KNOFF, G.K., BORDACHEV, E.V. 2011. *Experimental statistical analysis of laser micropolishing process* Canada: Toronto, International Symposium on Optomechatronic Technologies cit. 2020-10-19]. Dostupné na internete: <https://doi.org/10.1109/ISOT.2010.5687316>.

Fraunhofer Institute for Laser Technology ILT ©2018 *Laser polishing of metals* [cit. 2020-10-19]. Dostupné na internete: <https://www.ilt.fraunhofer.de/en/media-center/brochures/brochure-laser-polishing-of-metals.html>

GIORLIO, L., CERETTI, E., GIARDINI, C. 2015. ElsevierLtd. *Ti Surface Laser Polishing: Effect of Laser Path and Assist Gas*, Italy: Departement of Engineering, University of Bergamo. [cit. 2020-10-15]. Dostupné na internete: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827115007453#aep-article-footnote-id2>

GORAA, S. W., TIAN, Y., CABO, P.A., ARDON, M., MAIER, R. R. J., PRAGNELL, P., WESTON, N. J., HAND, D. P. 2016. Enhancing Surface Finish of Additively Manufactured Titanium and Cobalt Chrome Elements Using Laser Based Finishing. *Physics Procedia*, 82, 258 – 263. ISSN 1875-3892.

HAFIZ, A. M. K., BORDACHEV, E. V., TUTUNEA-FATAN, R. O. 2012 ElsevierLtd. *Influence of overlap between the laser beam tracks on surface quality in laser polishing of AISI H13 tool steel*. [cit. 2020-11-10]. Dostupné na internete: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1526612512000667?via%3Dihub>

HAZLINGER, M., MORAVČÍK, R. 2010. *Degradačné procesy a predikcia životnosti materiálov*. Bratislava: STU, s. 27-189. ISBN 978-80-227-3334-2.

HAWRYLUK, M. © 2016. Review of selected methods of increasing the life of forging tools in hot die forging processes, *Archiv. .* [cit. 2020-12-15]. Dostupné na internete : <https://link.springer.com/article/10.1016%2Fj.acme.2016.06.001>

KARUNATHILAKA, N., TADA, N., UEMORI, T., HANAMITSU, R., FUJII, M., OMIYA, Y., KAWANO, M. ©2019. Effect of Lubrication and Forging Load on Surface Roughness, Residual Stress, and Deformation of Cold. [cit. 2020-11-28]. Dostupné na internete : <https://www.mdpi.com/2075-4701/9/7/783>

KLOBČAR, D., MUHIČ, M., TUŠEK, J., KOSEL, F., PLETERSKI, M. 2011 Thermo fatigue cracking of die casting dies. *Engineering Failure Analysis* 20, 43-53. ISSN: 1350-6307.

KRISHMAN, A., FANG, F. 2019 *Review on mechanism and process of surface polishing using lasers* [cit. 2020-10-25]. Dostupné na internete:

<https://link.springer.com/article/10.1007/s11465-019-0535-0>

Kovové materiály ©2004 [cit. 2020-12-02]. Dostupné na internete :

https://www.stifner.sk/skola/doc/afm/texty_AFM_2004.doc

LIN, J., BALINT, D., PIETRZYK, M. 2012. *Microstructure Evolution in Metal Forming Process*. Woodhead Publishing, s. 416. ISBN 978-0-85709-074-4.

MA, C. P., GUANA, Y. C., ZHOU, W. 2017. ElsevierLtd. *Laser polishing of additive manufactured Ti alloys* China: Beihang University [cit. 2020-10-28]. Dostupné na internete:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0143816616302780>

MAGRI, M. L., DINIZ, A.E., BUTTON, S.T. 2013. Influence of surface topography on the wear of hot forging dies. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 65, s. 459–471. ISSN 1433-3015.

MCDONALD, W. M., GORA, S. W., STEVENSON, S. G., WESTON, J. N., HAND, D. P. 2020. Practical implementation of laser polishing on additively manufactured metallic components, *Jurnal of Laser Applications*, 32 (4). ISSN 1938-1387.

MILLER, J. D., TUTUNEA-FATAN, O. R., BORDACHEV, E. V. 2017. Experimental Analysis of Laser and Scanner Control Parameters During Laser Polishing of H13 Steel. *Procedia Manufacturing*, 10, 720 – 729. ISSN 2351-9789.

MM Spektrum ©2002 [cit. 2020-12-07]. Dostupné na internete:

<https://www.mmspektrum.com/clanek/vysokorychlostni-frezovani-kalenych-oceli-pri-vyrobe-zapustek.html>

PANJAN, P., URANKAR, I., B.NAVIŠEK, B., M.TERČELJ, M., TUNK, R., ČEKADA, M., LESKOVŠEK, V. 2002. Improvement of hot forging tools with duplex treatment. *Surface and Coatings Technology*, 10, s. 505-509, ISSN 0257-8972.

PAULI, Anton. 2014 *Faster and Smoother Thanks to Laser Polishing*. Germany: Deggendorf

POLLÁK, L. ©2007 Tvárniace nástroje – znalostné výrobky strojárenského priemyslu. In *Strojárstvo*. [cit. 2020-11-30]. Dostupné na internete: https://www.atpjournal.sk/buxus/docs/atp-2003-11-86_88.pdf

RICHTER, B., BLAKE, N., WERNER, C., VOLLERTSEN, F., PFEFFERKORN, F. E. 2019. Effect of Initial Surface Features on Laser Polishing of Co-Cr-Mo Alloy Made by Powder-Bed Fusion. *The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society*, 71, 912 – 919. ISSN 1543-1851.

ROSA, B., MOGNOL, P., HASCOET, J. 2015. Laser polishing of additive laser manufacturing surfaces. *Journal of laser applications*, 27(2). ISSN 1938-1387.

SASSMANNSHAUSEN, A., BRENNER, A., FINGER, J. 2021 Ultrashort pulse laser polishing by continuous surface melting. *Journal of Materials Processing Technology*, 293, ISSN 0924-0136.

TEMMLER, A., COMIOTTO, M., ROSS, I., KUEPPER, M., LIUL, D.M., POPRAWE, R. 2019. *Journal of laser applications. Surface structuring by laser remelting of 1.2379 (D2) for cold forging tools in automotive applications* [cit. 2020-10-15]. Dostupné na internete: <https://lia.scitation.org/doi/full/10.2351/1.5070077>

TEMMLER, A., LIU, D., LUO, J., POPRAWE, R., 2020. ElsevierLtd, *Influence of pulse duration and pulse frequency on micro-roughness for laser micro polishing (LμP) of stainless steel AISI 410*, Germany: Aachen University. [cit. 2020-10-19]. Dostupné na internete: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0169433220300283>

TEMMLER, A., LIU, D., PREUSSNER, J., OESER, S., LUO, J., POPRAWA, R., SCHLEIFENBAUM, J.H. 2020. Influence of laser polishing on surface roughness and microstructural properties of the remelted surface boundary layer of tool steel H11. *Materials & Design*, 192, ISSN 0264-1275.

TEMMLER, A., WILLENBORG, E., WISSENBAACH, K. 2011. ElsevierLtd, *Design Surfaces by Laser Remelting*, Germany: RWTH Aachen University, Chair for Laser Technology. [cit. 2020-10-24]. Dostupné na internete:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1875389211001325?via%3Dihub>

WILLENBORG, E., 2006. Polieren von Werkzeugstählen mit Laserstrahlung. Aachen, Techn. Hochsch., ISBN: 978-3-8322- 4896-3.

XIAO, H., ZHOU, Y. Q., LIU, M. L., XU, X. 2020 Laser polishing of tool steel using a continuous-wave laser assisted by a steady magnetic field. *AIP Advances*, 10 (2). ISSN 2158-3226.

YUNG, K. C., CAI, Z. X., CHOY, H. S., XIAOA, T. Y., WANG, W. J. 2018. ElsevierLtd. Laser polishing of additive manufactured CoCr alloy components with complex surface geometry. *Journal of Mechanical Working Technology*, 262, 53 – 64. ISSN: 0924-0136.

YUNG, K. C., ZHANG, S. S., DUAN, L., CHOY, H. S., CAI, Z. X. 2019. Laser polishing of additive manufactured tool steel components using pulsed or continuous-wave lasers. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 105, 425–440. ISSN 1433-3015.

ZHANG, X., JI, L., ZHANG, L., WANG, W., YAN, T. 2020. Polishing of alumina ceramic to submicrometer surface roughness bypicosecond laser. *Surface and Coatings Technology*, 397. ISSN 0257-8972.

ZHOU, J., HAN, X., LI, H., LIU, S., SHEN, S., ZHOU, X., ZHANG, D. 2021 In-Situ Laser Polishing Additive Manufactured AlSi10Mg:Effect of Laser Polishing Strategy on Surface Morphology, Roughness and Microhardness. *Materials* 2021, 14, 393. [cit. 2021-04-03]. Dostupné na internete: <https://doi.org/10.3390/ma14020393>

ČESTNÉ PREHLÁSENIE

Podpísaný Bc. Ivan Gendiar čestne prehlasujem, že som na diplomovej práci *Laserové leštenie povrchov nástrojových materiálov* pracoval samostatne na základe teoretických a praktických poznatkov získaných počas štúdia, konzultácii a štúdia odbornej literatúry, uvedenej v zozname bibliografických odkazov. Uvedenú prácu som vypracoval pod vedením prof. Ing. Petra Šugára, CSc.



Trnava dňa 25.04.2021.....

Bc. Ivan Gendiar