

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

Ústav výrobních strojů a zařízení



Diplomová práce

Využití pokročilých funkcí laserového zařízení pro odstraňování povlaku

2021

Bc. Josef Hlavinka

(Zadání)

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl v příloženém seznamu veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací, vydaným ČVUT v Praze 1. 7. 2009.

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

V Praze dne

.....

podpis

Poděkování

Rád bych poděkoval Ing. Pavlu Zemanovi, Ph.D. za vedení této práce a také za to, že mně pokaždé postrčil správným směrem. Dále mé díky patří Ing. Tomášovi Primusovi za podnětné připomínky, užitečné rady, čas a pomoc, které mi věnoval během tvorby této práce. Také bych rád poděkoval zaměstnancům Ústavu výrobních strojů a zařízení za kolegiální přístup. V neposlední řadě bych rád poděkoval své rodině a přátelům za podporu a porozumění.

Tato práce vznikla s podporou projektu OPVVV: „Nové nanostruktury pro inženýrské aplikace umožněné kombinací moderních technologií a pokročilých simulací“, CZ.02.1.01/0.0/0.0/16_026/0008396.

Anotace

Autor:	Bc. Josef Hlavinka
Název DP:	Využití pokročilých funkcí laserového zařízení pro odstraňování povlaku
Rozsah práce:	92 stran, 51 obrázků, 19 tabulek
Akademický rok vyhotovení:	2020/2021
Univerzita:	ČVUT v Praze, Fakulta strojní
Ústav:	Ú121315 – Ústav výrobních strojů a zařízení
Vedoucí diplomové práce:	Ing. Pavel Zeman, PhD.
Konzultant:	Ing. Pavel Kožmín, Ph.D. – HOFMEISTER s.r.o.
Zadavatel:	ČVUT FS
Využití:	Odstranění daného povlaku z řezného nástroje laserem pomocí sub-mikronového úběru materiálu a zefektivnění dráhového řízení laserového svazku
Klíčová slova:	Laser, laserové čištění, ochranné povlaky, laser stripping, řízení dráhy svazku
Anotace:	Práce se zabývá odstraňováním ochranných povlaků řezných nástrojů laserem pomocí pokročilých funkcí laserových systémů. V teoretické části jsou popsány principy laserové ablace, je sestavena metodika pro provádění technologie. Dále jsou rozebrány technické komponenty laserových systému, stejně jako jejich kinematika. Jsou zhodnoceny limitní možnosti laserových systémů. Je zde uveden zobecněný postup pro provedení technologie laser stripping. Postup je experimentálně ověřen. V experimentální části je dále zkoumána strategie pohybu laserového svazku. Je popsána úprava řízení skenovací hlavy pomocí funkce SkyWriting a zhodnocen vliv tohoto zásahu na proces odstraňování povlaku.

Annotation

Author:	Bc. Josef Hlavinka
Title of master thesis:	Laser equipment advanced functionalities for coating removal
Extent:	92 pages, 51 figures, 19 tables
Academic year:	2020/2021
University:	CTU in Prague, Faculty of Mechanical Engineering
Department:	Ú121315 – The Department of Production Machines and Equipment
Supervisor:	Ing. Pavel Zeman, PhD.
Consultant:	Ing. Pavel Kožmín, Ph.D. – HOFMEISTER s.r.o.
Submitter:	CTU in Prague
Application:	Laser stripping of particular coating from cutting tool with sub-micron material removal and effectivization of laser beam track control
Key words:	Laser, laser cleaning, protective coatings, laser stripping, beam track control
Annotation:	<p>This thesis pursues the idea of cutting tool protective coating removal with advanced function of laser systems. In theoretical part, principles of laser ablation are described, and methodology of laser stripping is put together. Technical components of laser systems are also analysed, as well as their kinematics. Limits and possibilities of said laser systems are evaluated. This thesis produces a generalised method for practising laser stripping technology.</p> <p>The method is experimentally verified. Adjustment of scanning head track control through SkyWriting function is described. Influence of said adjustment on laser stripping process is evaluated.</p>

Obsah

1	Úvod	12
2	Technologie odstraňování povlaku laserem	13
2.1	Porovnání technologií odstraňování povlaků	13
2.2	Parametry laserového svazku	14
2.2.1	Základní parametry světelné vlny	14
2.2.2	Kvalita laserového svazku	15
2.2.3	Intenzita laserového svazku	15
2.3	Mechanismy ablace	17
2.3.1	Mechanismus A) částečné odpaření a částečné tavení	17
2.3.2	Mechanismus B) odpaření v důsledku rychlého ohřátí	17
2.3.3	Mechanismus C) exploze způsobená akumulací tlaku na přechodu mezi vrstvami	18
2.4	Metodika technologie laser stripping	18
2.4.1	Zjištění ablačního prahu	19
2.4.2	Ablací odstraněný objem materiálu	21
2.4.3	Stanovení tloušťky povlaku	22
2.4.4	Překryv pulsů	22
2.5	Aktuální stav poznatků technologie	24
2.6	Shrnutí možností odstraňování povlaku laserem	26
3	Laserové systémy pro mikroobrábění	28
3.1	Vhodné laserové zdroje	28
3.2	Klíčové komponenty optické cesty	29
3.2.1	Beam expander	30
3.2.2	Galvo-skener	30
3.2.3	Polygonální skener	32
3.2.4	F-Theta čočka	32
3.2.5	Beam splitter	33
3.2.6	Attenuator	33
3.3	Rozbor kinematik a konstrukcí laserových systémů	34
3.3.1	Kinematika (0+0+2)	35
3.3.2	Kinematika (0+1+2)	35
3.3.3	Kinematika (1+0+2)	35
3.3.4	Kinematika (2+0+2)	36
3.3.5	Kinematika (3+0+2)	36



3.3.6	Kinematika (3+1+2).....	37
3.3.7	Kinematika (3+2+2).....	38
3.3.8	Kinematika (0+6+2).....	39
3.4	Přídavné softwarové funkce laserového systému.....	39
3.4.1	Formulace problému při pohybu laserového svazku.....	39
3.4.2	Možnosti kompenzace nežádoucího efektu.....	41
3.4.3	Funkce SkyWriting	42
3.5	Shrnutí možností laserových systémů.....	45
4	Podstata a návrh experimentu.....	48
4.1	Podstata experimentu	48
4.2	Fáze experimentu	48
4.3	Experimentální zařízení.....	49
4.4	Zařízení pro vyhodnocení.....	52
4.5	Testovaný materiál.....	53
5	Experiment.....	54
5.1	Fáze 1: Určení vhodné oblasti pracovních podmínek	55
5.1.1	Měření ablačního prahu	55
5.1.2	Měření tloušťky povlaku	58
5.2	Fáze 2: Kompenzace dynamických efektů	59
5.3	Fáze 3: Odstranění povlaku	65
5.3.1	Vliv funkce SkyWriting na odstranění povlaku na IH.....	67
5.3.2	Vliv funkce SkyWriting na odstranění povlaku na IIH.....	72
5.3.3	Vliv funkce SkyWriting na odstranění povlaku na IIH.....	76
5.4	Shrnutí výsledků experimentu	80
6	Závěr.....	83
	Seznamy	85
	Seznam použité literatury	85
	Seznam obrázků.....	90
	Seznam tabulek.....	91
	Seznam příloh	92
	Seznam elektronických příloh	92

Seznam použitých zkratk

Zkratka	Popis
AlTiN	Hliník-titan-dusíkový povlak řezných nástrojů
ArF	Argon-Fluor, excitovaný dvousložkový plyn používaný jako zdroj laseru
Att1	Attenuator umístěný ve zdroji laserového zařízení
Att2	Attenuator umístěný před skenovací hlavou v optické cestě
CrTiAlN	Chrom-titan-hliník-dusíkový povlak, používaný na řezných nástrojích
HAZ	Heat-affected zone: teplem ovlivněná oblast při kontaktu svazku s materiálem
IH	První harmonická frekvence laserového zdroje o vlnové délce 1030 nm
IIH	Druhá harmonická frekvence laserového zdroje o vlnové délce 515 nm
IIIH	Třetí harmonická frekvence laserového zdroje o vlnové délce 343 nm
IR	Infra-red, označení světelného záření v infračerveném spektru
KrF	Krypton-Fluor, excitovaný dvousložkový plyn používaný jako zdroj laseru
LS	Laser stripping, označení pro technologii odstraňování povlaku laserem
Nd:YAG	Yttrium Aluminium Granát (Y3Al5O12) dopovaný ionty neodymu (Nd ³⁺) – umělý krystal
OZ	Otevřená záklopka laseru
SW	Funkce SkyWriting
P10	Označení typu břitových destiček z karbidu typu P: WC+TiC+Co
TiN	Titan-dusíkový povlak řezných nástrojů
TiAlN	Titan-hliník-dusíkový povlak řezných nástrojů
Ti:Al ₂ O ₃	Umělý krystal používaný jako zdroj laserů
Ti-6Al-4V	Titanová slitina
UV	Ultra-violet, označení světelného záření v ultrafialovém spektru
VBD	Vyměnitelné břitové destičky
XeCl	Xenon-Chlor, excitovaný dvousložkový plyn používaný jako zdroj laseru
XeF	Xenon-Fluor, excitovaný dvousložkový plyn používaný jako zdroj laseru
ZZ	Zavřená záklopka laseru

Seznam použitých symbolů

Označení	Jednotka	Popis
a	[-]	Směrnice aproximační přímky
A	[cm ²]	Plocha ozářená paprskem
acc	[μs]	Acceleration - doba zrychlení galvo skeneru při zapnuté funkci SkyWriting v Módu 2
ang	[°]	Limit úhlu pro dráhové řízení při zapnuté funkci SkyWriting v Módu 3
B	[T]	Magnetická indukce
c	[m·s ⁻¹]	Rychlost světla ve vakuu
D	[mm]	Průměr ozářeného bodu
dec	[μs]	Deceleration - doba zpomalení galvo skeneru při zapnuté funkci SkyWriting v Módu 2
E	[V·m ⁻¹]	Intenzita elektrického pole
E_p	[μJ]	Energie v pulsu
E_{th}	[μJ]	Energie v pulsu odpovídající ablačnímu prahu
f	[Hz]	Frekvence světelného záření
f_p	[Hz]	Opakovací frekvence pulsu
f_{popt}	[Hz]	Optimální opakovací frekvence pulsu
F	[J·cm ⁻²]	Plošná intenzita energie, tzv. Fluence
F_{th}	[J·cm ⁻²]	Ablační práh materiálu – minimální energie potřebná pro laserovou ablaci
F_m	[J·cm ⁻²]	Změřená Fluence – pro výpočet F_{th}
H	[A·m ⁻¹]	Intenzita magnetického pole
$H_{x/y}$	[%]	Překryv pulsů v jednom směru
L_s	[μs]	Laser on shift - parametr určující zpoždění záklopky při zapnuté funkci SkyWriting
M^2	[-]	Faktor kvality svazku, tzv. M squared
N	[-]	Počet pulsů
N_U	[-]	Počet potřebných vrstev pro kompletní odstranění povlaku ze substrátu
P	[W]	Průměrný výkon
r	[mm]	Poloměr ozářeného bodu
Ra	[μm]	Střední aritmetická výška profilu
$S_{x/y}$	[mm]	Posuv bodu svazku
T_L	[μs]	Timelag – parametr určující otevření/ zavření záklopky při zapnuté funkci SkyWriting

T_p	[ns],[ps],[fs]	Doba trvání pulsu
v_f	[mm·s ⁻¹]	Rychlost rozmítání svazku
ΔV	[mm ³]	Objem ablace (odpařený objem)
\dot{V}	[mm ³ ·min ⁻¹]	Objem ablace (odpařený objem) za čas, tzv. ablation rate
\dot{V}_{max}	[mm ³ ·min ⁻¹]	Maximální objem ablace (odpařený objem) za čas
U_{celk}	[μm]	Celková odstraněná hloubka při experimentu odstranění povlaku
U_{cp}	[μm]	Celkový průměrný úběr v jedné vrstvě při experimentu odstranění povlaku
U_{max}	[μm]	Maximální úběr v jedné vrstvě při experimentu odstranění povlaku
U_{min}	[μm]	Minimální úběr v jedné vrstvě při experimentu odstranění povlaku
U_{plus}	[μm]	Poškození substrátu způsobené v další vrstvě při experimentu odstranění povlaku
U_{prum}	[μm]	Průměrný úběr v jedné vrstvě při experimentu odstranění povlaku
Z_{abl}	[μm]	Hloubka ablace
α	[-]	Efektivní absorpční koeficient
δ	[nm]	Penetrační hloubka ablace
ξ	[-]	Inkubační faktor ablačního prahu
λ	[nm]	Vlnová délka
ω_0	[nm]	Poloměr svazku v ohnisku
π	[-]	Pí, Ludolfovo číslo
θ	[°]	Úhel divergence (odklonu) svazku

1 Úvod

V současné době je trendem zefektivňování, zrychlování a zvyšování produktivity výroby. Také je vytvářen tlak na výrobu se sníženým dopadem na životní prostředí. V rámci výrobní technologie se tento přístup dá aplikovat mimo jiné v oblasti výroby a použití řezných nástrojů. U určitých nástrojů je po konci jejich trvanlivosti ekonomicky výhodnější obnovení jejich řezné hrany. Avšak aby se proces obnovení břitů nástroje povedl, může být potřeba nejprve odstranit ochranný povlak, který se na nástroje běžně aplikuje.

Progresivní metodou je odstraňování ochranného povlaku laserem. Technologie vyžaduje použití komplexních laserových systémů, skládající se mimo jiné z nosné konstrukce, pohybových os, optické cesty a zdroje laserového svazku. V současné době se laserové systémy navrhují tak, aby byly co nejuniverzálnější, tedy aby obsáhly i jiné technologie, např. laserové čištění, gravírování a mikroobrábění. Pro korektní nastavení takového systému je třeba prozkoumat interakci laseru s materiálem. U univerzálních systémů může v některých případech dojít k problémům při řízení svazku, které vychází z principu funkce jednotlivých komponent. Kompenzaci těchto problémů je věnováno značné úsilí i v této práci.

V teoretické části této práce jsou popsány možnosti technologie a její zaznamenané případy. Také je pro technologii sestavena metodika. Dále jsou popsány laserové systémy z konstrukčního hlediska a je proveden rozbor vhodnosti kinematických řetězců pohybových os pro technologii odstraňování povlaku. V experimentální části je demonstrována technologie odstraňování povlaku AlTiN laserem s využitím prvků pokročilého laserového systému. V první fázi je popsána metodika odstraňování povlaku, kdy je nejprve prozkoumána interakce laseru s daným materiálem, poté je určena tloušťka povlaku a vhodné parametry pro jeho odstranění. V druhé fázi experimentální části je analyzován pohyb laserového svazku po ploše a je proveden zásah do dráhového řízení svazku. Třetí a finální fáze experimentu sleduje vliv pokročilé funkce SkyWriting na proces odstraňování povlaku. Je porovnáno odstranění povlaku s použitím funkce a bez ní. U procesu odstranění povlaku je sledován úběr materiálu ve vrstvách a jeho nejistota v návaznosti na rychlost svazku.

2 Technologie odstraňování povlaku laserem

Technologie odstraňování ochranného povlaku laserem, tzv. laser stripping (LS), je rozvíjející se metoda úběru materiálu. Jedná se o proces založený na laserové ablaci, což je postupné vypařování molekul materiálu na malém prostoru. Na základě rychlého vypařování minima materiálu stojí laserové řezání, vrtání, čištění, gravírování a mikroobrábění. Technologie odstranění povlaku laserem spočívá v použití usměrněného proudu světla (laseru) pro předání energie do materiálu. Základními vlastnostmi laserového svazku jsou monochromaticnost (o specifické vlnové délce), kolimovanost (nerozbíhavost) a koherentnost (stálost fáze kmitání fotonů). Může být generován v kontinuálním nebo pulsním režimu. V pulsním režimu je možné dosáhnout několikanásobně většího špičkového výkonu, proto je jeho použití pro odstraňování povlaků klíčové [1].

2.1 Porovnání technologií odstraňování povlaků

Tradičně je odpovlakování prováděno chemickou, elektrochemickou cestou, nebo mechanickou cestou [2] [3]. Chemická metoda však trvá dlouho a vznikají velké objemy odpadních, těžko likvidovatelných roztoků. Další možností odstranění povlaku je pomocí mechanického tryskání, a to buď tryskání s abrazivou, nebo pomocí suchého ledu [3]. Tryskání je poměrně levné a rychlé, ale značným způsobem poškozuje podkladový materiál. Je tedy potřeba jiná metoda, která je produktivní, nedestruktivní a ohleduplná k životnímu prostředí. Porovnání jednotlivých technologií je v Tab. I.

Tab. I Porovnání jednotlivých metod odstraňování povlaku, vzhledem k technologii laser stripping; + lepší vlastnost, - horší vlastnost, 0 srovnatelná vlastnost

	Laser Stripping	Chemický stripping	Tryskání
Doba trvání	Ref.	-	0
Náročnosti operací	Ref.	0	+
Výsledná drsnost povrchu	Ref.	0	-
Náročnost na energii	Ref.	+	+
Cena	Ref.	0+	+

2.2 Parametry laserového svazku

Laser má jako svazek světla mnoho parametrů, které více či méně ovlivňují jeho vlastnosti při dopadu na povrch. Světlo jako elektromagnetické záření je ovlivňováno mnoha proměnnými a nastavení jednotlivých světelných prvků může značně změnit výsledek procesu laserového obrábění. Některé limity svazku jsou dány laserovým zdrojem [4] [5].

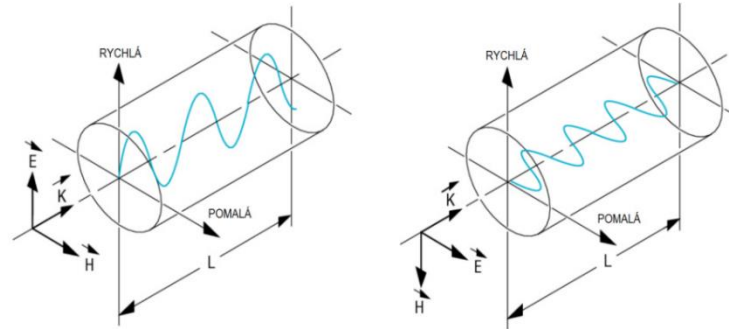
2.2.1 Základní parametry světelné vlny

Světlo je druh elektromagnetického záření. Je tedy tvořeno periodickými kmity elektrického a magnetického pole, které jsou provázané. Obě pole jsou popsána pomocí vektorů, konkrétně vektor intenzity elektrického pole E a vektor magnetické indukce B (popř. vektor intenzity magnetického pole H) [1] [5]. Protože kmity jsou periodické, záření má frekvenci f [Hz]. Rychlost světla c ve vakuu je přibližně $299\,792\,458\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ [5]. Závislost frekvence f a rychlosti světla je pak dána vztahem [5]:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad [\text{nm}] \quad (1)$$

Kde λ [nm] je vlnová délka světla. U laserových svazků se vlnová délka pohybuje přibližně od 200 nm do 1100 nm, a obsahuje tedy UV záření, viditelné spektrum a IR záření [1] [6] [7]. Vlnová délka ovlivňuje energii absorbovanou materiálem. Každý materiál pohlcuje danou vlnovou délku jiným způsobem. Toto je popsáno Beer-Lambertovým zákonem, který vyjadřuje energii absorbovanou materiálem pro daný svazek [6] [8].

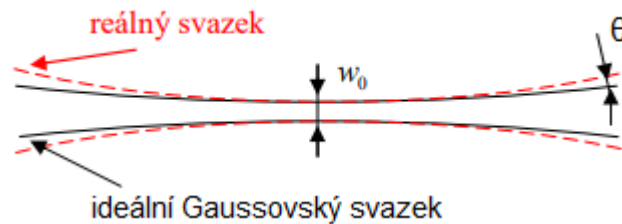
Při pohybu světla v prostoru se velikost vektorů E a B periodicky mění. Obecně je záření v prostoru tvořeno superponovanými vlnami. Nejjednodušší světelnou vlnou je rovinná vlna, kdy se kmity polí pohybují pouze v jedné rovině – nenatáčejí se. Jinými slovy, svazek je vždy rovnoběžný se směrem šíření záření a příliš se nerozsbíhá. Druhou uvažovanou vlnou je sférická vlna, kdy se svazky šíří zároveň do všech směrů od zdroje, a vektory polí tedy tvoří kulovou plochu [1] [4] [5]. Změna směru kmitů vektorů obou polí se nazývá polarizace [1] [4] [5] [6] [7]. Pomocí různých typů polarizátorů dochází k jiným typům polarizace. V laserových strojích se nejčastěji používá lineární polarizace (tedy použití rovinné vlny). Rozlišuje se p-polarizace (paralel, také nazývána rychlá) a s-polarizace (senkrecht=kolmý, také pomalá) viz Obr. 1.[1] [4] [5] [6] [7] [8].



Obr. 1 Polarizace svazku: rychlá – P (vlevo) a pomalá – S (vpravo) [8]

2.2.2 Kvalita laserového svazku

Jednou z výhod lineární polarizace je fakt, že se svazek jen velmi málo rozbíhá od směru šíření. Rozbíhavost je možno měřit pomocí úhlu divergence θ [°], viz Obr. 2. Rozbíhavost je vlastnost typická pro tzv. Gaussovské svazky.



Obr. 2 Tvar Gaussovského svazku v ohnisku (upraveno). [4]

Pomocí úhlu divergence je možno hodnotit kvalitu svazku. Tu popisuje tzv. M^2 faktor (M squared). Jedná se o číslo, které vyjadřuje odchylku tvaru svazku od ideálního Gaussovského svazku. Lze ho spočítat jako [4]:

$$M^2 = \frac{\pi}{\lambda} \cdot \omega_0 \cdot \theta \quad [-] \quad (2)$$

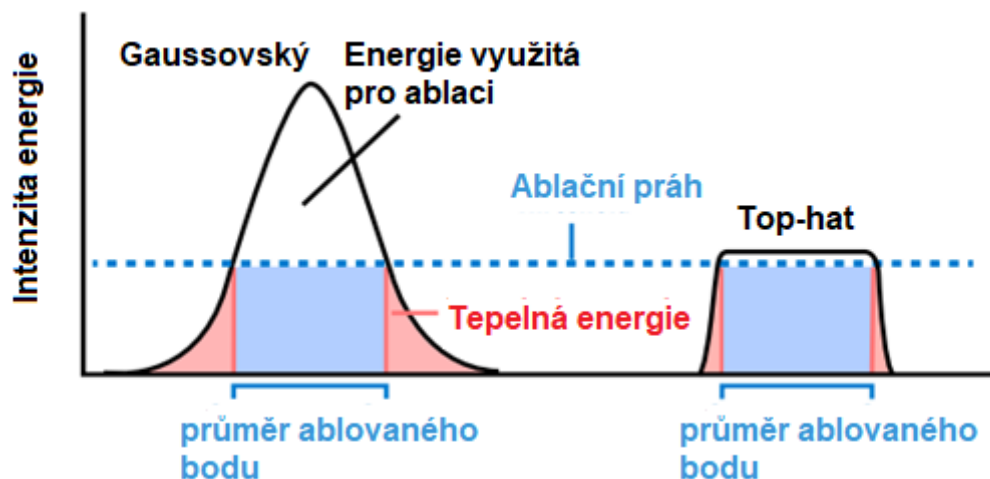
Kde λ [nm] je vlnová délka, ω_0 [mm] je poloměr svazku v ohnisku a θ [°] je úhel divergence. M^2 nabývá hodnot 1 a více. Čím více se M^2 blíží jedné, tím je svazek kvalitnější [2] [8].

2.2.3 Intenzita laserového svazku

Svazek je na své cestě od zdroje různými způsoby upravován, poslední úpravou je zaostření (tzv. fokusace). Nicméně běžně používaný Gaussovský svazek se z ohniska mírně rozbíhá. To má vliv na intenzitu energie svazku.

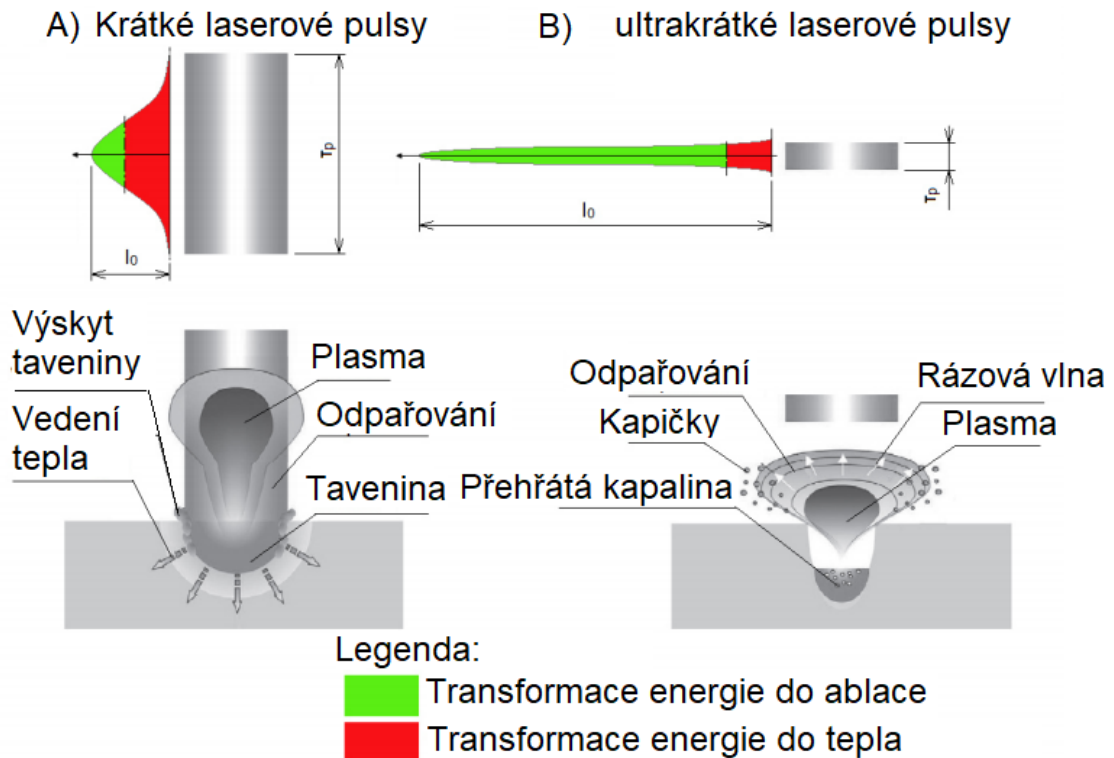
Tvar intenzity Gaussovského profilu je znázorněn na Obr. 3 vlevo. Největší intenzitu energie má svazek v ose. Charakteristické je pro něj nerovnoměrné rozložení energie, kdy pouze určité procento je využito přímo na ablaci. Velká část energie svazku se mění na tepelnou energii a vzniká tak velká tepelně ovlivněná oblast (tzv. heat-affected zone, HAZ). To způsobuje tavení materiálu na okrajích ozářeného bodu. Tento typ svazku je nejběžnější [1] [2] [6] [7].

Typ svazku se dá změnit pomocí speciálních čoček. Vhodným tvarem je cylindrický, neboli Top-hat profil, který znázorněn na Obr. 3 vpravo. Svazek je zaostřen tak, že má zploštělou špičku. Minimum energie se tedy ztrácí v podobě tepla, většina energie je využita pro ablaci [6] [7] [8].



Obr. 3 Gaussovský (vlevo) a tzv. top hat profil laserového paprsku (upraveno) [7]

Pro laserovou ablaci je běžně používán laser v pulsním režimu. Doba trvání jednotlivých pulsů T_p výrazně ovlivňuje proces ablace. Běžné jsou doby trvání pulsů v nanosekundách [ns], pikosekundách [ps] a femtosekundách [fs]. Doba trvání pulsu je popisována jako krátká pro ns pulsy, a ultrakrátká pro desítky ps níže. U ns pulsů dochází k přeměně velké energie svazku do tepelné energie. Materiál je svazkem taven a vytlačován k okraji (viz Obr. 4 A). Při zkracování pulsu se snižuje HAZ, dochází k preciznějšímu úběru materiálu a celý proces je možné snáze řídit. Tím také dochází ke změně ablačního mechanismu, viz kap. 2.3. U fs pulsů může dojít k lokální deformaci svazku díky ohromné intenzitě energie zaostřené v ohnisku. Pro ultrakrátké pulsy [fs] je třeba také složitější zdroj, což vede ke zvýšení nákladů na laserový systém [6] [7] [8].



Obr. 4 Schématické porovnání doby trvání pulsu a interakce s materiálem.
 A) demonstrace krátkých pulsů B) demonstrace ultrakrátkých pulsů (upraveno) [8]

2.3 Mechanismy ablace

Interakce svazku s materiálem se odvíjí od konkrétních vlastností laseru, nejvíce od doby trvání pulsu. V zásadě se dá popsat pomocí tří mechanismů: A) částečné odpaření a částečné tavení materiálu, B) odpaření v důsledku rychlého ohřátí materiálu, C) exploze způsobená akumulací tlaku na přechodu mezi vrstvami [8] [9] [10] [11] [12] [13] [14] [15] [16].

2.3.1 Mechanismus A) částečné odpaření a částečné tavení

Tento mechanismus je typický pro krátké pulsy. Velká část energie se mění na tepelnou energii (kvůli tvaru Gaussovského paprsku, viz kap. 2.2.3). Pouze v ose svazku je dostatečná intenzita energie, aby došlo k vypařování materiálu. Výpary z nehlubšího místa v ose se derou ven z otvoru a tlačí před sebou taveninu. Tavenina pak zatuhne na okraji ablovaného bodu, vytvoří hřeben a tím se zvyšuje celková drsnost výsledného povrchu. Tento efekt je částečně odstraněn překrýváním jednotlivých pulsů [8] [11] [13] [14].

2.3.2 Mechanismus B) odpaření v důsledku rychlého ohřátí

Mech. B) je v mnohém podobný mech. A), rozdílem je použití ultrakrátkých pulsů. Svazek při dopadu předává svou energii materiálu, nicméně kvůli

mnohem kratší době interakce je intenzita energie výrazně vyšší. Velká část materiálu se okamžitě vypařuje a odchází z původního místa, čímž tvoří rázovou vlnu. Ta zachytává kapičky přehřáté kapaliny a odnáší je s sebou. Je zde mnohem menší HAZ než v případě A) a tavenina se nezachytává na okraji bodu. Výsledkem je poměrně čistý otvor bez otřepů a nahromaděné taveniny [9] [10] [12] [13] [14] [15].

2.3.3 Mechanismus C) exploze způsobená akumulací tlaku na přechodu mezi vrstvami

Třetí mechanismus je atypický a také nejdestruktivnější. Je známo, že materiály dokážou absorbovat jen záření o určitých vlnových délkách. Při specifické kombinaci materiálu a laseru může svazek projít skrz vnější vrstvu povlaku. Svazek je poté absorbován v některé z vnitřních vrstev povlaku. Zde se kvůli teplotní roztažnosti materiálu akumuluje tlak, který nakonec vede k explozi. Exploze vytrhává kusy povlaku, ale i kusy substrátu. Tento mechanismus poškozuje substrát povlakového dílu [8] [11] [16].

2.4 Metodika technologie laser stripping

Úspěch laserového odstraňování materiálu závisí na typu laserového zařízení a jeho nastavení [16]. Jedním z důležitých parametrů je bezesporu výkon laseru. Energie laserového svazku je často charakterizována jako plošná intenzita energie F , tzv. laser Fluence [$\text{J}\cdot\text{cm}^{-2}$] [8]. Pro Gaussovské svazky se dá vypočítat takto [8]:

$$F = \frac{2 \cdot E_p}{A} \quad [\text{J} \cdot \text{cm}^{-2}] \quad (3)$$

Kde E_p [J] je energie pulsu laseru, vypočtena dle (4). A [cm^2] je plocha bodu ozářeného paprskem. Nutno podotknout, že rovnice (3) [8] vyjadřuje špičkovou intenzitu energie, tedy v ose svazku [8].

$$E_p = \frac{P}{f_p} \quad [\text{J}] \quad (4)$$

Kde P [W] je výkon laseru a f_p [Hz] je opakovací frekvence.

Jak už bylo popsáno výše, každý svazek interaguje jinak s jiným materiálem. Je proto nutné najít nějakou vhodnou materiálovou charakteristiku pro nastavení parametrů. Tou je ablační práh materiálu F_{th} [$\text{J}\cdot\text{cm}^{-2}$].

2.4.1 Zjištění ablačního prahu

Ablační práh materiálu je nejmenší množství energie, které je nutné dodat laserem na povrch materiálu, aby se poškodily meziatomové vazby a byla odebrána svrchní vrstva atomů [17].

Hodnota ablačního prahu závisí na podobě ablace, resp, době trvání pulzu. Dále také na vlnové délce svazku, na daném materiálu, jeho fyzikálně mechanických vlastnostech a na interakci svazku s materiálem. Proto pro specifické kombinace laser-materiál bude hodnota ablačního prahu jiná [8] [11] [17].

Samotný test spočívá ve vypálení řady bodů, každý několika pulzy. V řadě má každý pulz větší energii než ten předchozí. Zvětšující se poškození je klíčem k určení ablačního prahu. Existují různé metody, jak poškození vyhodnotit [18] [19]

- I) Metoda měření průměru ablovaného bodu – spočívá v měření průměru vypálených bodů, které se s rostoucí energií v pulzu zvětšují. Pomocí lineární regrese je určena hodnota ablačního prahu F_{th} [18].
- II) Objemová metoda – spočívá v měření odpařeného objemu z materiálu pomocí Mikroskopie atomárních sil (při které je materiál zatěžován měřícím přístrojem a sledují se reakce atomárních sil na toto zatížení). Uvažuje tzv. lavinovou ionizaci materiálu při ozáření laserem, která má lineární závislost na velikosti Fluence. S větší Fluencí se odpaří více materiálu, a proto je možné pomocí lineární regrese zjistit hodnotu ablačního prahu. Tato metoda je náročnější a vyžaduje dražší měřící zařízení [18].
- III) Statistická metoda – principem je vypálení sítě mnoha (např. 50) bodů do povrchu. Energie v pulsu není náhodná, ale vybrána z předem určené skupiny energií. Dále se počítá pravděpodobnost poškození materiálu. Ze sítě bodů se uvažují pouze ty, které vykazují poškození. Sledují se body, které vykazují minimální a maximální poškození, z energií v pulzu těchto bodů je poté určen ablační práh [18].

S ohledem na dostupné přístroje byla v této práci použita metoda I).

Hodnota ablačního prahu F_{th} [$\text{J}\cdot\text{cm}^{-2}$] se poté počítá ze vzorce (5) [18]:

$$F_{th} = \frac{2 \cdot E_p}{\pi \cdot \omega_0^2} \cdot e^{-\frac{r^2}{\omega_0^2}} \quad [\text{J} \cdot \text{cm}^{-2}] \quad (5)$$

Kde ω_0 [mm] je poloměr svazku v ohnisku a r [mm] je poloměr ablovaného bodu.

Pro zjednodušení lze uvést:

$$F_m = \frac{2 \cdot E_p}{\pi \cdot \omega_0^2} \quad [\text{J} \cdot \text{cm}^{-2}] \quad (6)$$

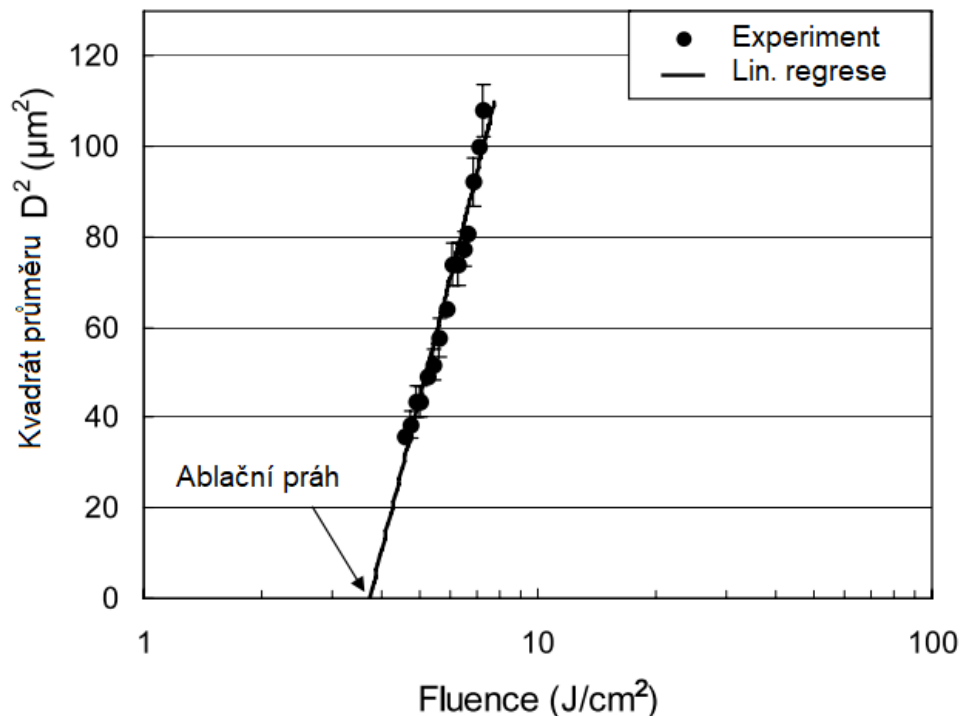
Kde F_m [$\text{J} \cdot \text{cm}^{-2}$] změřená Fluence pro vytvoření daného bodu.

Další úvaha:

$$D^2 = \ln\left(\frac{F_m}{F_{th}}\right) \cdot 2 \cdot \omega_0^2 \quad [\text{mm}^2] \quad (7)$$

Kde D [mm] je změřený průměr bodu.

V dalším kroku je potřeba vypočítat lineární regresi, jak je to naznačeno na Obr. 5. V grafu jsou vyneseny naměřené hodnoty průměrů bodů v závislosti na Fluenci (v logaritmickém měřítku). Lineární regrese vede k minimální hodnotě energie – ablačnímu prahu v bodě $D^2 = 0$.



Obr. 5 Lineární regrese pro výpočet ablačního prahu (upraveno) [18]

Při běžném ablačním procesu dopadá více pulsů do jednoho místa (viz Kap. 2.4.4). Každý puls má sám o sobě energii, která při předání mění vlastnosti

materiálu. S každým pulsem dopadajícím do stejného místa se mění vlastnosti ozařovaného povrchu – snižuje se ablační práh. Tento jev se nazývá inkubační efekt [18] [19]. Při více pulsech s akumulací defektů je ablační práh určen jako:

$$F_{th}(N) = F_{th}(1) \cdot N^{\xi-1} \quad [\text{J} \cdot \text{cm}^{-2}] \quad (8)$$

Kde ξ [-] je inkubační faktor a N [-] je počet pulsů v jednom bodě. Pro ablaci se faktor pohybuje v rozmezí $0 < \xi \leq 1$. Když je faktor roven jedné, pak inkubační efekt nenastává. Pokud je větší než jedna, dochází k vytvrzování materiálu [8].

2.4.2 Ablací odstraněný objem materiálu

Pro evaluaci ablačního procesu je možné spočítat hloubku a odstraněný objem materiálu. Obě tyto hodnoty závisí na konkrétních vlastnostech materiálu. Výpočty se odvíjí od absorpčního koeficientu α . Hloubka ablace z_{abl} se spočítá dle (9):

$$z_{abl} = \delta \cdot \ln\left(\frac{F}{F_{th}}\right) \quad [\mu\text{m}] \quad (9)$$

Kde δ [nm] je penetrační hloubka, vyjadřující vzdálenost, ve které jsou fotony pohlceny a intenzita svazku poklesne na $1/e$ (cca 37 %) maximální hodnoty. Literatura [14] [18] [19] [20] uvádí, že platí:

$$\delta = \frac{1}{\alpha} \quad (10)$$

Kde α je efektivní absorpční koeficient. F_{th} dle (5) vyjadřuje intenzitu energie v závislosti na poloměru ablovaného bodu r a F_m dle (6) je špičková energie v ose svazku. Rovnice (5) (6) (9) vedou na:

$$\Delta V = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot \omega_0^2 \cdot \delta \cdot \ln^2\left(\frac{F_m}{F_{th}}\right) \quad [\text{mm}^3] \quad (11)$$

Kde ΔV [mm³] je odpařený objem (objem ablace) na jeden puls [18] [19] [20]. Za předpokladu, že během procesu dopadne do bodu více pulsů, je třeba provést derivaci dle času (= odpařený objem za čas \dot{V} [mm³min⁻¹]). Dosazením rovnic (3), (4) a (6) dostaneme:

$$\dot{V} = \frac{1}{4} \cdot f_p \cdot \pi \cdot \omega_0^2 \cdot \delta \cdot \ln^2\left(\frac{2 \cdot P}{f_p \cdot \pi \cdot \omega_0^2 \cdot F_{th}}\right) \quad [\text{mm}^3 \cdot \text{min}^{-1}] \quad (12)$$

Pomocí grafického znázornění objemu odpaření v závislosti na frekvenci je možné získat maximální odpařený objem \dot{V}_{max} , a optimální frekvenci f_{popt} :

$$\dot{V}_{max} = \frac{2 \cdot \delta}{e^2 \cdot F_{th}} \cdot P \quad [\text{mm}^3 \cdot \text{min}^{-1}] \quad (13)$$

$$f_{popt} = \frac{2 \cdot P}{e^2 \cdot \pi \cdot \omega_0^2 \cdot F_{th}} \quad [\text{Hz}] \quad (14)$$

2.4.3 Stanovení tloušťky povlaku

Jako další etapa technologie laser stripping byl zvolen proces stanovení tloušťky povlaku. Ideální situací je porovnání klasického kalotestu, informací od výrobce povlaku a jednoho z procesů popsaného níže. První proces určení tloušťky povlaku má dva kroky. Nejprve je páleno do jednoho místa bez pohybu laserového svazku a je sledován počet pulsů N , kterými se svazek propálí na substrát. Tím je určen interval počtu pulsů. Ve druhém kroku se svazek pohybuje v jedné ose a vypaluje linii. Proces je nastaven tak, aby na začátku linie dopadlo na povrch tolik pulsů, kolik určuje počáteční číslo intervalu. Na každé další místo v linii pak dopadá o puls více, dokud se svazek bezpečně nepropálí do substrátu. Pomocí mikroskopie je pak změřena hloubka povlaku a zároveň je určen nejoptimálnější počet pulsů potřebný pro odstranění povlaku [8] [10] [13] [14]. Druhý proces je obdobný, ale vynechává první krok. Svazek se pohybuje v jedné ose a vypaluje linii. Další linie je pak vypálena na stejné místo, ale s menší délkou. Je tak možné odlišit jednotlivé vrstvy. Proces se opakuje, dokud se laser nepropálí do substrátu. Prakticky je možné ubírat materiál v tenkých vrstvách a sledovat změnu povrchu materiálu optickým mikroskopem.

2.4.4 Překryv pulsů

Dalším parametrem ovlivňující úspěch technologie laser stripping je tzv. overlap – překryv pulsů ($H_{x,y}$). Standardně se používá překryv v linii (liniích) a vyjadřuje se v procentech. Je možné ho spočítat pomocí následující rovnice [8]:

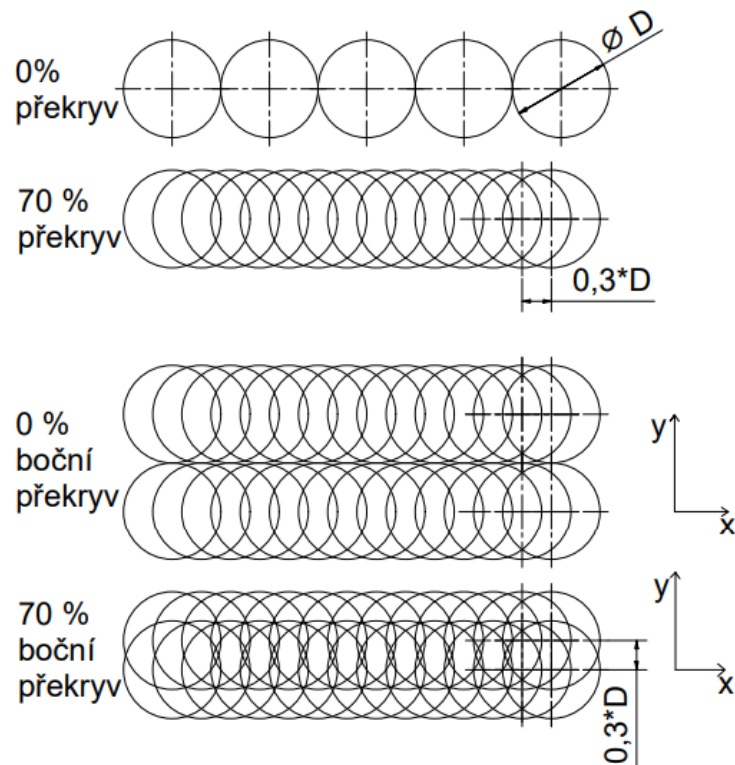
$$H_x = \left(1 - \frac{v_f}{2 \cdot \omega_0 \cdot f_p}\right) \cdot 100 \quad [\%] \quad (15)$$

Kde v_f [$\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$] je rychlost svazku, ω_0 [mm] je průměr svazku v ohnisku a f_p [Hz] je opakovací frekvence.

Pomocí procentuálního překryvu je pak dopočten posuv:

$$S_x = \omega_0 \cdot \left(1 - \frac{H_x}{100}\right) \quad [\text{mm}] \quad (16)$$

Překryv je zobrazen na Obr. 6. Překryv má vliv na výslednou drsnost povrchu [13] [14] a na ablovanou hloubku [10].



Obr. 6 Překryv pulsů ve dvou směrech

Pro odstranění povlaku v adekvátní hloubce a s co nejmenším poškozením substrátu je třeba nastavit počet pulsů N v jednom bodě. Nejsnáze se toto na laserových zařízeních nastavuje pomocí rychlosti svazku v_f , která vychází z překryvu pulsů a frekvence. Rychlost přímo ovlivňuje hloubku odstraněné vrstvy (při vyšší rychlosti je odstraněný menší objem materiálu) [10] [13] [14] a produktivitu odstraňování. Hloubka odstraněné vrstvy je tedy závislá na počtu pulsů, které dopadly do jednoho místa, intenzitě energie a rychlosti svazku a překryvu jednotlivých pulsů [10] [13] [14] [16].

2.5 Aktuální stav poznatků technologie

Technologie laser stripping je předmětem zájmu několika výzkumných týmů. Vychází z technologií laserového čištění a gravírování. Často se také prolíná s technologiemi mikroobrábění a strukturování povrchů. Samotná technologie odstranění povlaku laserem z řezného nástroje je proto spíše jen okrajovou záležitostí, oproti například použití laseru pro vytváření funkčních struktur na nástrojích. V této kapitole je uvedeno šest odborných publikací, které se technologií laser stripping v minulosti zabývaly [9] [10] [13] [14] [16] [21].

Long See a spol. [9] pracoval na odstraňování 1,5 μm TiAlN povlaku ze slinutého karbidu. V experimentech byl použit UV laser s vlnovou délkou $\lambda=355$ nm, dobou trvání pulsu $T_p=50$ ns. Byl testován vliv změny Fluence a počtu pulsů na proces strippingu. Bylo zjištěno, že vyšší počet pulsů vede k větší drsnosti povrchu substrátu. Povlak zde byl úspěšně odstraněn pomocí dvou nastavení: $F=2,7$ J·cm⁻² a $N=285$ pulsů; $F=3,38$ J·cm⁻² a $N=117$ pulsů [9].

V literatuře [10] byl použit GSI IPEX excimerový laser s vlnovou délkou $\lambda=248$ nm, dobou trvání pulsu $T_p=18$ ns na odstranění 2 μm CrTiAlN povlaku z rychlořezné oceli. Zvolená Fluence pro proces byla $F=2$ J·cm⁻², lehce nad ablačním prahem. Povlak byl odstraněn za pomoci 200 pulsů v jednom místě, při 90 % překryvu pulsů a rychlosti $v_f=4,2$ mm·s⁻¹ s výslednou drsností Ra 0,415 μm [10].

Marimuthu a spol. [13] se zabýval odstraněním TiAlN povlaku o tloušťce 2 μm ze slinutého karbidu (P10). Byl použit GSI IPEX excimerový laser s vlnovou délkou $\lambda=248$ nm, dobou trvání pulsu $T_p=18$ ns. Nejlépe byl povlak odstraněn pomocí $F=2$ J·cm⁻², $N=250$ pulsů, rychlost $v_f=1,6$ mm·s⁻¹, překryv 93,7 %. Výsledná drsnost Ra byla 0,415 μm s minimální poškozením substrátu [13].

Nejkomplexněji se problému odstranění povlaku z řezného nástroje věnoval Marimuthu a spol. [14]. Zabýval se odstraněním TiN povlaku o tloušťce 2 μm ze slinutého karbidu. Zde byl předmětem zájmu monolitní nástroj. Konkrétně se jednalo o mikro frézu, s průměrem $\varnothing 0,5$ mm a délkou 1 mm; dřík o průměru $\varnothing 3$ mm a délce 35 mm. Fréza se při odstraňování kontinuálně otáčela s rychlostí 10 ot·min⁻¹. Byl využit GSI IPEX excimerový laser s vlnovou délkou

$\lambda=248$ nm, dobou trvání pulsu $T_p = 16$ ns. Povlak byl odstraněn pomocí $F=2$ J·cm⁻², 250 pulsů, rychlost $v_f=0,02$ mm·s⁻¹, frekvence 25 Hz. Výsledná drsnost byla 0,35 μm [14]. Po laser strippingu byl nástroj opět napovlakován a otestován v řezu. Data pak byla porovnána s frézováním pomocí nástroje bez povlaku, novým nástrojem a znovu napovlakovaným nástrojem strippovaným chemickou cestou. Nejmenší opotřebení vykazoval nový nástroj a největší opotřebení nástroj bez povlaku. Při malých řezných rychlostech vykazovaly nástroje s redepozicí obdobné opotřebení jako nový nástroj. Při vyšších řezných rychlostech vykazoval nástroj po laser strippingu druhé nejmenší opotřebení a nástroj po chemickém strippingu druhé největší opotřebení [14]. Dále byla sledována dosažitelná drsnost. Pomocí přepovlakovaných nástrojů je možné dosáhnout srovnatelné drsnosti povrchu, jako s novým nástrojem. Obnova břítu nástroje tedy sníží jeho životnost, ale neovlivní jeho ostatní řezné vlastnosti. Doba odstraňování byla v tomto případě 16mm² za 320 s [14].

V literatuře [16] byly použity Ti:Al₂O₃ a KrF lasery pro odstranění povlaku TiAlN o tloušťce 20 μm povlaku z Ti-6Al-4V slitiny. Ti:Al₂O₃ je femtosekundový laser ($T_p = 120$ fs), s vlnovou délkou $\lambda=800$ nm a frekvencí 1 kHz. Ablací práh povlaku byl stanoven na 0,63 J·cm⁻². Byla provedena optimalizace procesu. Nejvhodnější parametry byly stanoveny na $P=300$ mW, $v_f=0,65$ mm·s⁻¹. Povlak byl odstraněn s průměrnou drsností povrchu substrátu $R_a = 1$ μm. Podobně pak byl optimalizován stripping u druhého laseru (KrF laser s vlnovou délkou $\lambda=248$ nm a $T_p=20$ ns). U druhého laseru byl ablační práh stejného povlaku stanoven na 1,7 J·cm⁻². Parametry použité pro odstranění povlaku byly: $P=300$ mW, $v_f=1,5$ mm·s⁻¹, s výslednou R_a 1,8±0,3 μm. Pomocí KrF laseru byl povlak odstraněn výrazně rychleji, ale za cenu zhoršené kvality povrchu. Dle autorů je KrF laser pro tuto aplikaci vhodnější [16].

Obdobným problémem se zabývali i Assurin a spol. [21]. Bylo demonstrováno odstranění DLC povlaku o tloušťce 3,2 μm. Byl použit KrF laser o vlnové délce $\lambda=248$ nm, s opakovací frekvencí 25 Hz a počet pulsů byl stanoven na $N=400$ v jednom bodě. Byly stanoveny základní parametry pro odstraňování DLC povlaků [21].

Z uvedených zdrojů [9] [10] [13] [14] [16] je patrné, že pro stripping tenkých povlaků s obsahem titanu (např. AlTiN, TiN) je vhodné použít laser s vlnovou délkou okolo 300 nm. Intenzita energie by měla být těsně nad ablačním prahem (od $2 \text{ J}\cdot\text{cm}^{-2}$ do $3 \text{ J}\cdot\text{cm}^{-2}$); počet pulsů nad 200 s překryvem okolo 90 %. Tato nastavení jsou sice účinná, ale nepříliš produktivní. V této práci byl odstraňován komerčně dostupný povlak AlTiN z karbidového substrátu. S ohledem na dostupné zařízení byly v této práci použity tři svazky o vlnových délkách 1030 nm (IH), 515 nm(IIH) a 343 nm (IIIH) a výsledky byly porovnány mezi sebou. Překryv pulsů byl zachován. Dalším požadavkem na odstranění povlaku byla vyšší produktivita, proto byla použita mnohonásobně vyšší opakovací frekvence: (200÷1000) kHz. Díky tomu byla rychlost zvýšena až o pět řádů oproti uvedeným odborným publikacím. Doba trvání pulsu byla $T_p=270 \text{ fs}$. Následně byl upraven výkon tak, aby odpovídal určitému násobku výkonu pro ablační práh na konkrétní vlnové délce.

2.6 Shrnutí možností odstraňování povlaku laserem

Technologie laser stripping je proces založený na laserové ablacii, podobný laserovému čištění či gravírování. Jedná se o předání energie fotonu svazku do materiálu, který se následně velice rychle ohřívá a vypařuje. Do procesu vstupuje mnoho podmínek, které ovlivňují jeho úspěch.

První z nich je vlnová délka svazku. Ta by měla být taková, aby ji daný materiál dobře pohltil. Každý materiál dobře absorbuje jen určitý interval vlnových délek světelného spektra. Potřebná intenzita energie pro danou kombinaci materiál – laser je charakterizována tzv. ablačním prahem. U svazku s vhodnou vlnovou délkou dále hraje roli jeho polarizace a v důsledku i rozbíhavost. Polarizovaný svazek může mít Gaussovský nebo cylindrický tvar profilu, což ovlivňuje jeho intenzitu energie.

Nejčastěji se používá Gaussovský profil svazku. Jeho rozložení intenzity energie není ideální a je možné ho kompenzovat pomocí doby trvání pulsu. Nejvhodnější je doba trvání pulsu řádově ve femtosekundách. U těchto, tzv. ultrakrátkých pulsů je malá tepelně ovlivněná oblast. Pro laser pracující v pulsním režimu je důležitá jeho opakovací frekvence. Ta udává celkovou

rychlost svazku za určitého překryvu pulsů. Frekvence může dosahovat řádově až MHz.

Obecně je pro technologii laser stripping potřeba kvalitního a upraveného svazku. Tím je vytvořen požadavek na samotný stroj. Jednotlivé prvky laserového zařízení musí tedy vytvořit laserový svazek, vhodně ho upravit a dopravit do pracovního prostoru. Zde vzniká jako vedlejší produkt ablace teplo a kovové zplodiny, které ve velké míře mohou představovat zdravotní riziko pro obsluhu. Laserový stroj může mít mnoho variant. S ohledem na velikost, tvar a materiál nástroje, ze kterého chceme odstranit povlak je třeba vhodně vybrat rozložení os stroje, laserový zdroj a optické a pohybové komponenty.

Technologie laser stripping je vhodná pro odstraňování povlaku z řezného nástroje. Je ale třeba pro technologii nadefinovat metodický postup, aby bylo možné korektně určit parametry a nastavení laserového systému. Na základě interakce laseru s materiálem je pak možné rozhodnout o vhodnosti daného svazku. Odstraňování povlaku a obnovování břitů se nejméně vyplatí na tvarově složitých nástrojích. Pro úspěšné odstranění povlaku z takového nástroje je třeba jím a laserovým svazkem pohybovat zároveň. Dráhové řízení svazku a vhodné pohyby strippovaného nástroje jsou určovány laserovým systémem.

3 Laserové systémy pro mikroobrábění

Laserový systém pro mikroobrábění je komplexní celek, který zajišťuje generování svazku, proces interakce svazku s materiálem a i zpracování odpadu. Podstatnou vlastností systému je schopnost vytvořit laserový svazek, upravit ho (např. polarizací) a dopravit ho do místa interakce s povrchem. Zde dochází k obrábění laserem na základě ablačního procesu a jsou zde kombinovány pohyby svazku (nástroje) a obrobku. Laserový stroj tedy obsahuje laserový zdroj, optickou cestu a pohybové mechanické osy. To vše na adekvátní nosné struktuře z oceli, litiny a v poslední době i granitu či polymerního betonu. Celý laserový systém je složen ze stroje, jeho periférií (například ventilační obvod či manipulátory), dále nadřazeného řídicího systému propojujícího pohyby mechanických a optických prvků. Systém také zodpovídá za chlazení laserového zdroje, odsávání zplodin z pracovního prostoru a v některých případech i čerpání inertních plynů (např. argon). Popsané periferie se ale liší v závislosti na konkrétní technologii.

3.1 Vhodné laserové zdroje

Technologie odstraňování povlaku laserem je relativně nová, a proto se pro ni běžně nevyrábí specializované zdroje. Vhodné zdroje jsou takové, které jsou určeny pro obrábění pomocí laserové ablace – technologie gravírování, mikrostrukturování a čištění. Jako vhodné se ukázaly lasery pracující v UV spektru: Excimerový KrF laser s vlnovou délkou $\lambda=248$ nm [10] [13] [14] [16]; a Diodový laser s vlnovou délkou $\lambda=355$ nm [9]. Je možné použít i červený laser Ti:Al₂O₃ s vlnovou délkou $\lambda=800$ nm [16]. Ani použití infračervených laserů není výjimkou, například Nd:YAG s vlnovou délkou $\lambda=1064$ nm, nebo vláknový laser s $\lambda=1030$ nm. Dle [22] je ablace TiN povlaku závislá na vlnové délce jen málo. Vhodnost laserových zdrojů pro technologii laser stripping spočívá spíše v době trvání pulsu a opakovací frekvenci.

V současné době výrobci laserových zdrojů doporučují pro dané technologie především vláknové lasery. V katalogích jednotlivých výrobců je možné najít mnoho variant: [23] [24] [25] [26] [27]. Firma LightConverison například nabízí zdroj, u kterého je možné měnit vlnovou délku [27]. Firma LightMachinery nabízí celou řadu excimerových laserů: ArF, KrF, XeCl, XeF s odlišnou vlnovou délkou [28].

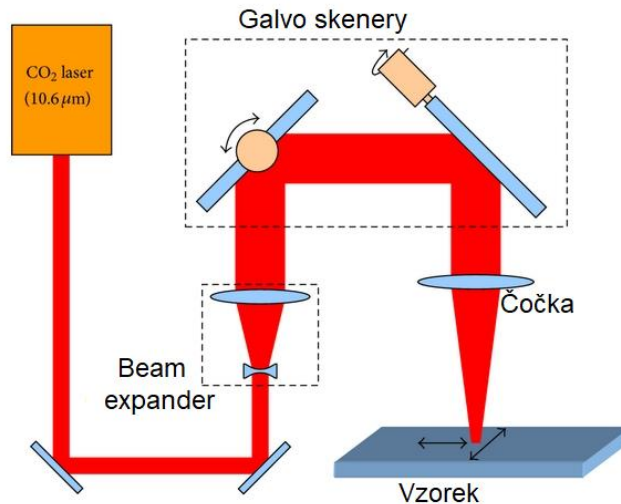
V Tab. II jsou uvedeny vhodné, komerčně dostupné laserové zdroje.

Tab. II Shrnutí dostupných laserových zdrojů [23] [24] [25] [26] [28] [28]

Vláknové lasery			
Výrobce	Vlnová délka [nm]	Průměrný výkon [W]	Doba trvání pulsu [-s]
ThorLabs	1035	20	170 fs
SPI Lasers	1060	20; 30; 40;50;70;	20-280 ns
IPG	1060	10;20;30;50; 100;	25; 50; 100 ns
Coherent	1064;1070	18;48	100 ns; 120 ns
LightConversion	1030;515;343;257	80	290 fs – 10 ps
Excimerové lasery			
Výrobce	Vlnová délka [nm]	Výkon [W]	Délka pulsu [-s]
LightMachinery	248	10;20;30;40;60;80	12-20 ns

3.2 Klíčové komponenty optické cesty

Pro úspěšné odstranění povlaku ze substrátu je nutné korektně řídit pohyb svazku. Svazek je nutné dopravit od zdroje ke vzorku, zaostřit ho a pak s ním hýbat v požadovaném směru požadovanou rychlostí. Na výslednou kvalitu svazku má vliv mnoho prvků, kterými svazek po cestě projde. Na každé komponentě svazek ztratí určité procento energie. Jednotlivé komponenty je třeba vhodně zvolit a nastavit. Příklad optické cesty je na Obr. 7. Každý laser je vybaven záklopkou a fokusační čočkou. Záklopka, tzv. shutter, je prvek, který brání svazku pokračovat v cestě. Otevíráním/zavíráním záklopky je laser pouštěn do dalších prvků optické cesty. Fokusační čočka má za úkol zaostřit svazek. Každý prvek optické cesty je pokryt speciálním odrazivým nebo propustným povlakem. Takový povlak má zajistit co největší odrazivost zrcadel (až 99 %). Slouží také k ochraně prvku a prodlužuje jeho životnost. Povlak bývá určen pro malý rozsah vlnových délek [29].



Obr. 7 Příklad optické cesty laseru (upraveno) [30]

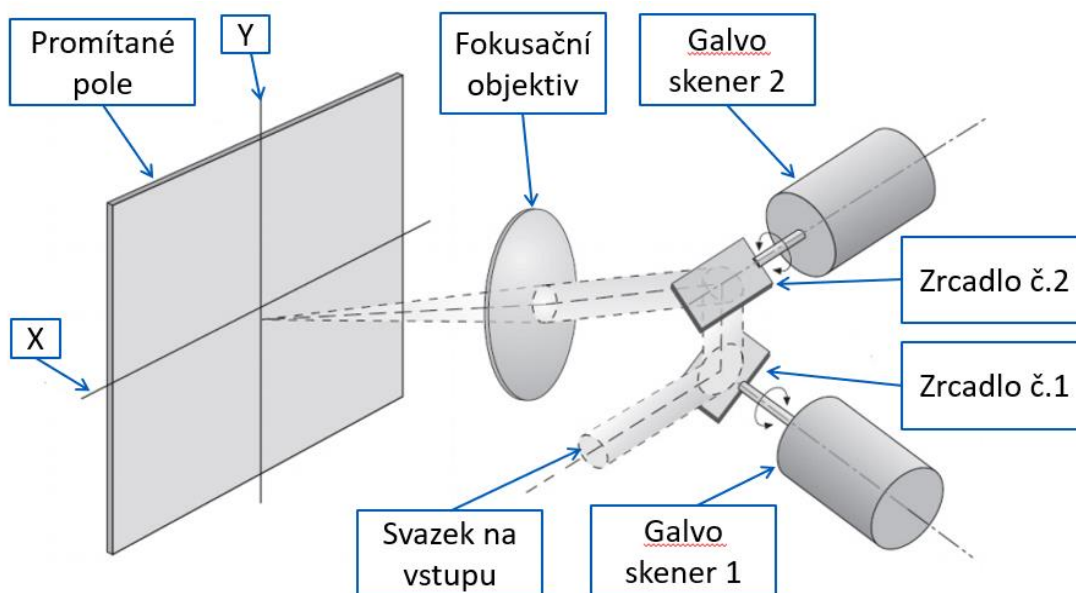
3.2.1 Beam expander

Tento prvek se používá k zvětšení nebo zmenšení průměru svazku. Může mít několik podob. Expandér využívající odrazivé díly se skládá z několika zahnutých zrcadel. Refrakční typ expandéru je složen z čoček. Kepleriánský expandér má dvě pozitivní (spojné) čočky. Svazek je mezi čočkami převrácen. Dochází ke koncentraci energie v ohnisku první čočky, což může způsobit ionizaci plynu nebo zvýšení teploty. Tyto efekty mají vliv na kvalitu svazku. Mnohem vhodnější je Galeiánský expandér, který je tvořen jednou negativní (rozptylnou) a jednou pozitivní (spojnou) čočkou. Tento expandér nemá vlastní ohnisko a svazek nepřevrací [6] [7].

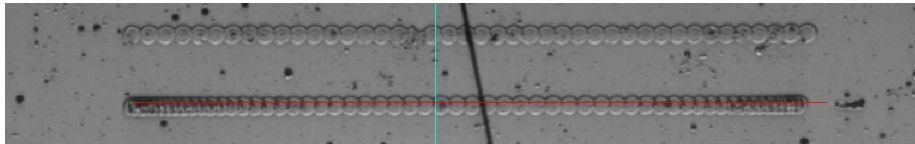
3.2.2 Galvo-skener

Jednou z možností vychylování (=rozmitání, skenování) svazku vysokou rychlostí je použití galvo skeneru (také galvo mechanismus, galvanometrický skener nebo jen galvo). Jedná se o komponentu složenou z elektromotoru, enkodéru a zrcadla. Zrcadlo je upevněno na rotor, který je vyroben z permanentních magnetů a uložen ve velice přesných ložiskách [31] [32]. Na rotor je poté napojena torzní pružina, která ho vrací do původní polohy. Stator je opatřen trojfázovým vinutím [32]. Z hlediska mechaniky je možné galvo skener považovat za jednodmotový systém. Galvo skener je řízen pomocí zpětnovazební regulace. Pohyb galvo skeneru je třeba řídit s ohledem na výsledný pohyb svazku, u kterého je důležitá jeho poloha a konstantní rychlost.

Výrobní lasery mají zpravidla dva galvo skenery namontované v tzv. skenovací hlavě. Rotace a poloha zrcadel je ovládána pomocí enkodérů. Velikost galvo skeneru se odvíjí od průměru vychylovaného svazku, a ten závisí na prováděné technologii. Rozměry dosahují maximálně desítek milimetrů a hmotnost maximálně stovek gramů [23] [31] [32] [33]. Princip práce spočívá ve vychylování svazku pomocí obou zrcadel zároveň. Každé zrcadlo vychyluje svazek v jedné ose: v ose X je svazek vychýlen zrcadlem 1 a v ose Y zrcadlem 2. Vychýlený svazek dále pokračuje do objektivu, ve kterém je F-Theta čočka (viz kap. 3.2.4), kde je zaostřen, viz Obr. 8 [8]. Galvo skener rotuje jen v určitém úhlu: $\pm 10^\circ$ až $\pm 40^\circ$ [23] [31] [33]. Maximální hodnoty natočení se liší dle velikosti zrcadla a konkrétní aplikace. Maximální teoretická dosažitelná rychlost galvo skenerů je $v_f = 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ [8]. U reálných systémů je však maximální rychlost omezena konstrukcí konkrétních komponent. U galvo skenerů může snadno dojít k propalu povrchu tzv. burn-in. To je způsobeno akcelerací zrcadel: při zrychlování na začátku a zpomalování na konci linie svazku dopadají pulsy na povrch s větším překryvem, než je dosaženo požadované rychlosti (viz Obr. 9). Tento problém je dále rozebírán v experimentální části práce.



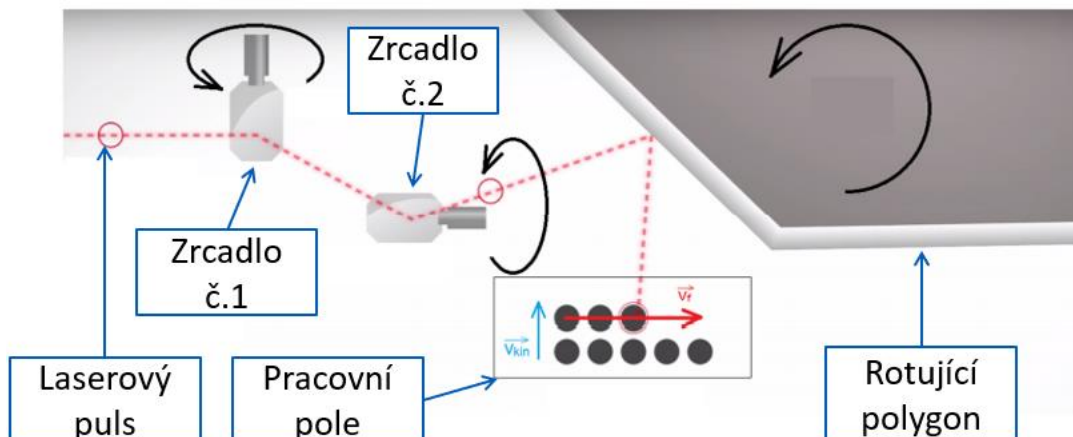
Obr. 8 Princip rozmitání svazku pomocí galvo skenerů (upraveno) [8]



Obr. 9 Příklad znásobené ablace vlivem zrychlování svazku – dolní linie. Horní linie byla vypálena pomocí přídatné funkce, viz kap 3.4

3.2.3 Polygonální skener

Trend zvyšování produktivity výroby vytváří potřebu rychlejších systémů rozmítání svazku v pracovní rovině. Proto byl vyvinut polygonální skener, který je teoreticky schopen dosáhnout rozmítací rychlosti $25-100 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ [34]. Princip spočívá v odrážení svazku pomocí polygonu, který rotuje konstantní rychlostí. Kvůli konstrukci rotující osy je možné rozmítání pouze v jednom směru. Je tedy potřeba přidat nějaký systém, který zajistí rozmítání i ve směru kolmém. Je možné využít přídatných zrcadel (viz Obr. 10). Další možností je přidání posuvného stolu, který je schopen lineárního pohybu v jedné ose. V obou případech je nutná synchronizace rotace polygonu, druhého skenovacího systému a časování pulsů. Polygonální skener je tak náročnější na konstrukci, softwarové řízení a regulaci [34]. Polygonální skener je jednou z možností, jak nastavit skenovací proces tak, aby nedocházelo k nežádoucímu překryvu pulsů při zrychlování a zpomalování [34].

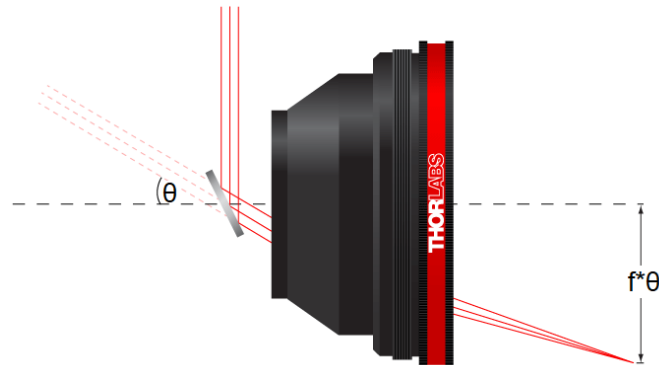


Obr. 10 Princip rozmítání svazku pomocí polygonálního skeneru (upraveno) [8]

3.2.4 F-Theta čočka

Běžná kulatá čočka dokáže zaostřit svazek na kulatou plochu, tedy na plochu, která je vzdálená o určitý poloměr od ohniska. Mnoho laserových technologií, jako například gravírování nebo mikroobrábění však vyžaduje pohyb svazku po

rovině. Proto byla vyvinuta F-Theta čočka. Tato čočka dokáže zaostřit vychýlený svazek tak, že vzdálenost kontaktního bodu od optické osy je lineárně závislá na vstupním úhlu θ (konkrétně jde o součin vstupního úhlu a ohniskové vzdálenosti) viz Obr. 11 [23].



Obr. 11 Funkce F-Theta čočky [23]

3.2.5 Beam splitter

Beam splitter je schopen rozdělit svazek na dva v určitém poměru. Druhý svazek pak může být využit pro diagnostiku svazku nebo paralelní obrábění dvěma svazky v jednom pracovním prostoru. Dva nejpoužívanější typy jsou kubický a deskový, dále existují také vláknové a zrcadlové. Kubický se skládá ze dvou trojúhelníkových pravoúhlých krystalů, které jsou spojeny k sobě. Kubický splitter je větší, těžší a dražší. Deskový splitter je tvořen plochým krystalem, na který světlo dopadá pod úhlem 45° [6] [7].

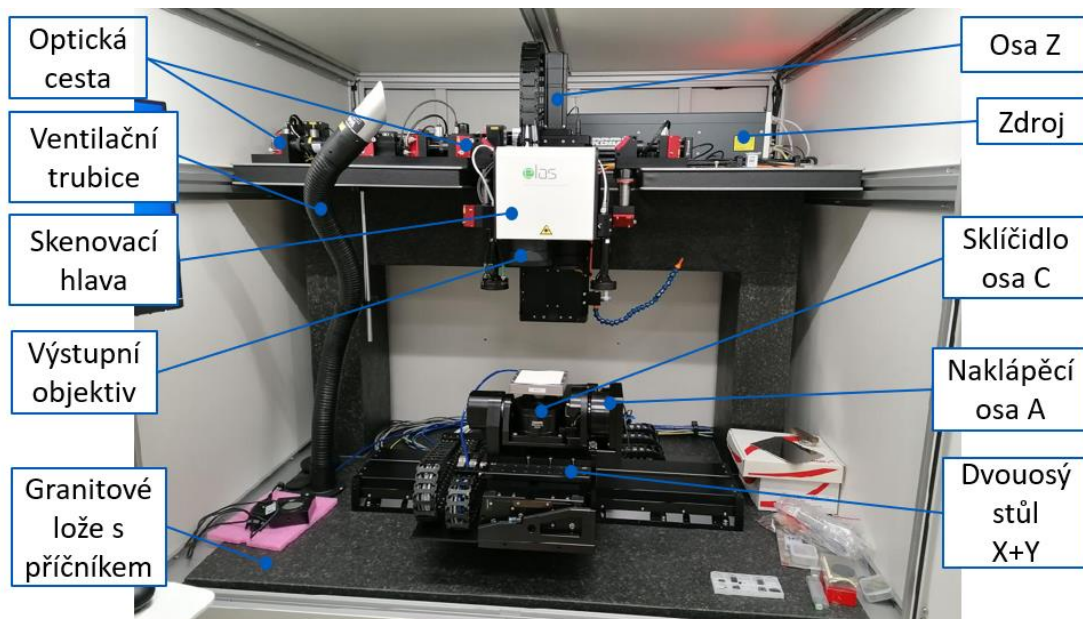
3.2.6 Attenuator

Tento prvek je určen k redukci výkonu svazku. Nejjednodušší konstrukci tvoří absorpční filtry. Zde je ale energie svazku změněna na tepelnou energii. Lokální ohřátí vzduchu může narušit chod svazku. Často používaný attenuator se skládá z tzv. půlvlnné destičky, tzv. half waveplate, komponenty, která otáčí polarizaci svazku, a krystalu. Krystal obdobně jako beam splitter rozděluje paprsek na dva a jednu větev posílá do svazkového odpadu, tzv. beam dump, kde zaniká. Pomocí otáčení destičky se mění úhel polarizace a tím je ovlivněn poměr, ve kterém krystal paprsek rozděluje. Nastavení attenuatoru se běžně uvádí v procentech. V tomto případě procenta značí část energie svazku, kterou attenuator pustí do optické cesty [6] [7].

3.3 Rozbor kinematik a konstrukcí laserových systémů

Vzhledem k charakteru rozmitání svazku je možné říct, že každý laserový systém má dvě optické osy (X a Y). Obě osy mají určitou maximální vzdálenost, do které je možné svazek vychýlit. Maximální ozářená plocha má obvykle tvar čtverce o délce hrany v řádu desítek mm. Pro náročnější aplikace je pak třeba přidávat další pohybové osy, čímž se zvyšuje náročnost konstrukce celého zařízení. Aktuální program je pak třeba rozdělit na jednotlivé segmenty, protože pohyb lineárními osami dosahuje výrazně menší rychlosti než optické osy. V této práci je rozsah os systému popsán pomocí třímístného kódu v závorce. Jednotlivé pozice vyjadřují počet jednoho typu os: (T+R+O). První číslice vyjadřuje počet translačních os, druhá počet rotačních os a třetí počet optických os.

Na Obr. 12 je uveden příklad víceosého laserového zařízení. Konkrétně se jedná o systém MASTER 1 od litevské firmy Elas [35]. Jsou zde vidět komponenty optické cesty, které přivádějí svazek do skenovací hlavy. Skenovací hlava je umístěna na pohybové ose Z. Na straně stolu jsou pak čtyři pohybové osy (2 translační, 2 rotační), které zajišťují pohyb obrobku. Toto zařízení využívá femtosekundový zdroj CARBIDE od firmy LightConversion [27] a nanosekundový zdroj redEnergy od firmy SPI [24]. Tento stroj byl použit při vlastním experimentu.



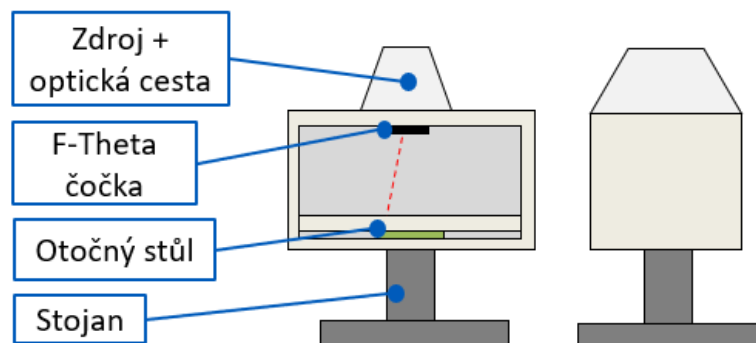
Obr. 12 Fotografie struktury laserového zařízení.

3.3.1 Kinematika (0+0+2)

Základní kinematika určená pro jednoduché aplikace. Tento systém je tvořen v podstatě jen zdrojem a optickou cestou, ozářená plocha je poměrně malá a tvořená jen pomocí skeneru. Laserem je možné obrábět jen v jedné rovině. Tato kinematika je vhodná pro obrábění v kusové výrobě plochých dílů, anebo pro integraci do výrobní linky [36]. Tuto kinematiku je možno použít pro odstranění povlaku jen z velice jednoduchých vyměnitelných břitových destiček (VBD). Pro složitější nástroje je tedy nevhodná.

3.3.2 Kinematika (0+1+2)

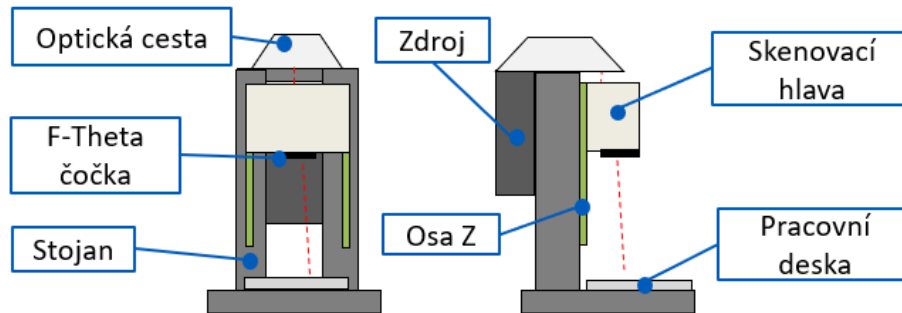
Tato kinematika je v mnohém podobná jako (0+0+2), s tím rozdílem, že je přidán otočný karuselový stůl (viz Obr. 13). To umožňuje zakládání více obrobků najednou a tím pádem je obrábění kontinuální a mnohem rychlejší. Tato varianta je také nevhodná pro odstranění povlaku ze složitějšího rezného nástroje, ale je možné ji použít pro velice jednoduché břitové destičky.



Obr. 13 Příklad popisovací stanice s otočným stolem

3.3.3 Kinematika (1+0+2)

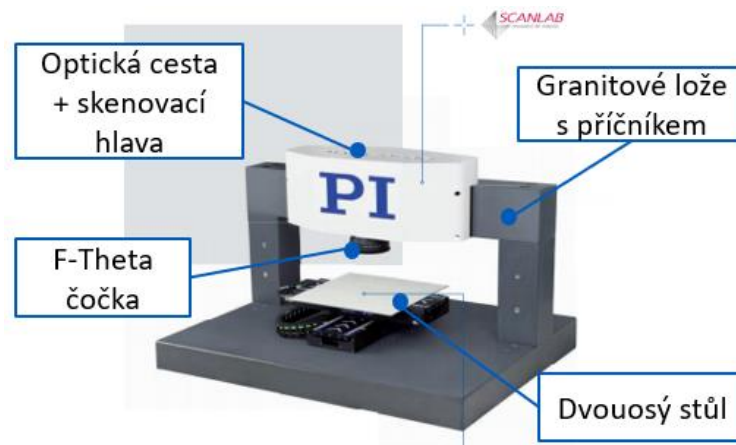
V této kinematice je přidána pohybová osa Z. To umožňuje lepší fokusaci svazku a obrábění v mnoha rovinách. S přídatnou osou Z je také možné obrábět větší obrobky. Osa Z může být realizována pomocí kuličkového šroubu a lineárního vedení připojeného na laserové hlavě (viz Obr. 14), případně lineárním motorem. Druhou možností je použití výsuvného aktuátoru, který ovládá stůl [36]. Stejně jako předchozí konstrukce, je i tato vhodná pro odstranění povlaku jen z prostých VBD.



Obr. 14 Příklad popisovací stanice s pohybovou osou Z

3.3.4 Kinematika (2+0+2)

Zde jsou oproti základní kinematice přidány pohybové osy X a Y. To umožňuje obrábění větších rovinných dílů. Příklad této konstrukce je na Obr. 15. Pracovní plocha je poháněna dvěma lineárními motory. Je zde také vidět granitové lože, které tlumí externí vibrace a zajišťuje tak přesnou fokusaci svazku. Vzhledem k tomu, že tato kinematika umožňuje obrábění laserem jen na ploše, je vhodná pro odstranění povlaku z jednodušších nástrojů a prostých VBD.

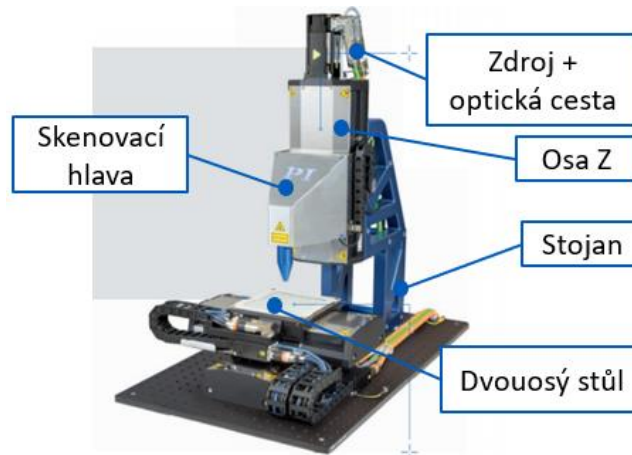


Obr. 15 Příklad kinematiky laseru s dvěma pohybovými osami (upraveno) [37]

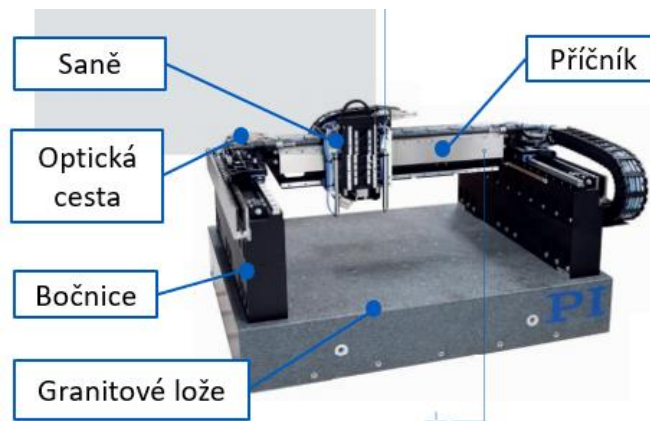
3.3.5 Kinematika (3+0+2)

Dalším typem je kombinace dvou předchozích variant, tedy laserové zařízení se třemi pohybovými osami X, Y, Z. Tato kinematika může mít několik variant. Na Obr. 16 je varianta se stojanem, tedy se dvěma pohybovými osami na obrobku a jednou na laserové hlavě. Osy X a Y jsou poháněny lineárními motory, osa Z je poháněna pomocí synchronního servomotoru a kuličkového šroubu [37]. Výhodou je přístupný pracovní prostor, nevýhodou je méně tuhá konstrukce. Stojan obvykle bývá svařovaný z oceli.

Druhou variantou je pohon horní gantry (viz Obr. 17). Zde jsou všechny osy na straně laserové hlavy. Pohybové osy jsou realizovány pomocí lineárních motorů a kombinací lineárních a aerostatických vedení. Výhoda této konstrukce je tuhý nosný rám a možnost vysokých rychlostí (díky lehkému příčnicku a saním). Nevýhodou je uzavřený pracovní prostor [36] [37]. Tato konstrukční varianta je vhodná pro odstranění povlaku z břitových destiček.



Obr. 16 Příklad kinematiky (3+0+2), varianta se stojanem (upraveno) [37]



Obr. 17 Příklad kinematiky (3+0+2), varianta gantry (upraveno) [37]

3.3.6 Kinematika (3+1+2)

Další možnost spočívá v přidání jedné rotační osy do systému. Jedná se zpravidla o přídatnou osu A (viz Obr. 18). Přidaná osa má podobu sklíčidla, které vykonává pomocný pohyb. Proto zde není vysoký nárok na pohon osy, ale spíše je požadována dostatečná síla čelistí. Sklíčidlo může být poháněno například krokovým motorem [38]. Tento typ laserového zařízení je vhodný pro odstraňování povlaku z většiny rezných nástrojů.



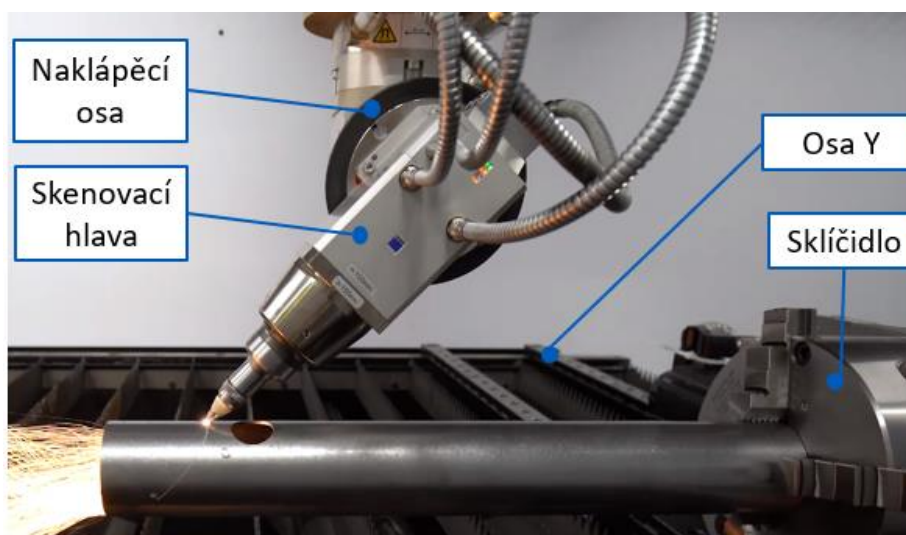
Obr. 18 Příklad kinematiky (3+1+2). Přídavné sklíčidlo (osa A) na stole [38]

3.3.7 Kinematika (3+2+2)

Tato kinematika má dvě rotační osy, zpravidla osu A na stole a osu B na laserové hlavě (viz Obr. 19). Tuto kinematiku využívají moderní laserové stroje pro obrábění tvarově složitých obrobků. Komponenty tvořící osu A jsou poměrně kompaktní. Někteří výrobci proto nabízí možnost odmontovat sklíčidlo a namontovat ho na stůl, čímž se transformuje do rotační osy C.

Je ovšem možné umístit obě rotační osy na stranu stolu (viz Obr. 12). Tím se poněkud zmenší pracovní prostor. Toto uspořádání je vhodné pro malé, ale přesné aplikace.

Obě varianty jsou vhodné pro odstranění povlaku z libovolného typu nástroje.



Obr. 19 Příklad kinematiky (3+2+2) [38].

3.3.8 Kinematika (0+6+2)

Laserovou hlavu je možné integrovat i na šestiosého robota. To umožňuje odstraňování povlaku z tvarově složitých a objemných dílů. Zároveň se také snižují možnosti úpravy svazku, z důvodu malého prostoru a menší nosnosti na robotickém ramenu. Tato konstrukce je vhodná pro odstranění povlaku z objemných nástrojů, které by bylo náročné umístit do pracovního prostoru menších systémů.



Obr. 20 Příklad umístění laserové hlavy na šestiosém robotu [39]

3.4 Příklad softwarové funkce laserového systému

Veškeré komponenty laserového systému mají určité mechanické vlastnosti či limity, vyplývající z podstaty jejich funkce. U velké části laserových systémů je jednou z nejvýraznějších zrychlování a zpomalování elektromotoru galvo skenerů. To se projevuje i na pohybu svazku a v důsledku na výsledné ploše. S ohledem na co nejkvalitnější výsledný povrch je třeba se těmito nežádoucími vlastnostmi systémů zabývat. Limity pohybových os laserových systémů je vhodné odstranit či kompenzovat pomocí pokročilých softwarových funkcí, které je možné integrovat do řídicího systému.

3.4.1 Formulace problému při pohybu laserového svazku

Během obrábění je svazek vychylován pomocí dvou galvo skenerů, umístěných v tzv. galvo hlavě. Hlava obsahuje také F-Theta čočku. Vychylování svazku se řídí Snellovým zákonem. Galvo skenery jsou opatřeny digitálními enkodéry pracujícím na principu světelné interferometrie [31]. Moderní galvo skenery jsou servomechanismy řízené pomocí kaskádní zpětnovazební regulace. Vstupem do regulační smyčky bývá obvykle rampa polohy s požadavkem na konstantní rychlost [31] [40] [42]. Rychlost svazku v_f běžně dosahuje řádů stovek až tisíců

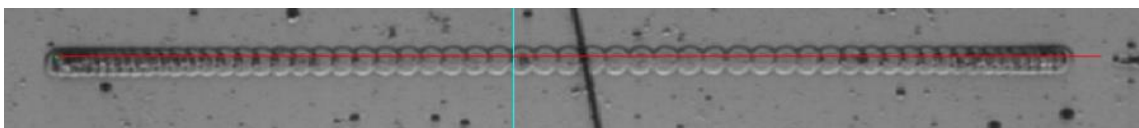
mm·s⁻¹ a je určena opakovací frekvencí f_p a posuvem v ose $S_{x,y}$, dle rovnice (17):

$$v_f = S \cdot f_p \quad [\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (17)$$

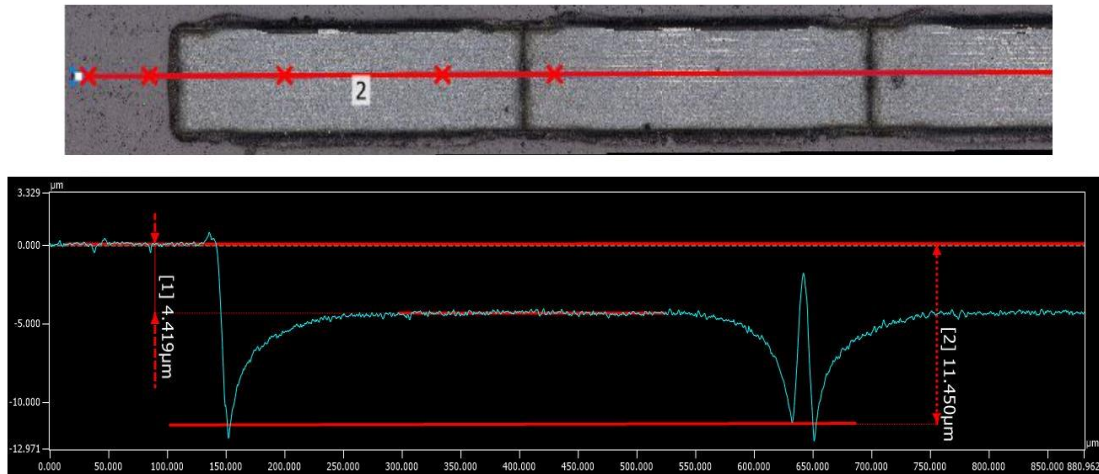
Kde $S_{x,y}$ je spočten dle rovnice (16), a závisí na průměru svazku ω_0 a překryvu pulsů H .

$$S_{x,y} = \omega_0 \cdot \left(1 - \frac{H_{x,y}}{100}\right) \quad [\text{mm}] \quad (16)$$

Při spuštění programu je otevřena záklopka laserového zdroje a zároveň dochází k rozhýbání galvo skenerů. Výsledná rychlost svazku se odvíjí od rychlosti rotace obou skenerů. Díky malým rozměrům a hmotnosti má galvo skener extrémní dynamické vlastnosti a díky zpětnovazební regulaci dosáhne stavu ustálené rychlosti velice rychle. Toto extrémní zrychlení se projeví na pohybu svazku. Při otevřené záklopce dochází v oblasti na začátku dráhy svazku k násobně většímu překryvu pulsů. To má za následek zvýšené množství energie dodané svazkem do materiálu. Kvůli tomu dochází k odstranění většího objemu materiálu, než je třeba. Tento efekt se nazývá propal („burn-in“) a je nežádoucí. Lokálním odstraněním materiálu je vytvořen na řezném nástroji vrub, od kterého se mohou při následném obrábění šířit trhliny, a to může vést až k destrukci nástroje. Stejný efekt nastává na konci dráhy, kde galvo skenery opět zpomalují na nulovou rychlost. Propal je možno vidět na Obr. 21 a Obr. 22.



Obr. 21 Propal na jedné linii pulsů



Obr. 22 Propal vzniklý při experimentu pro zjištění tloušťky povlaku: snímek plochy (nahore) a odpovídající hloubkový profil (dole)

3.4.2 Možnosti kompenzace nežádoucího efektu

Propal je možné kompenzovat, resp. mu předcházet. První možností je nastavení zpoždění otevírání záklopky („Laser On/Off delay“). Toto je v dnešní době už běžně dostupné nastavení laseru. Zpoždění se však dá nastavit pouze staticky. Rychlost a zrychlení svazku a v důsledku i délka propálené dráhy závisí na frekvenci a překryvu pulsů. Jinými slovy je tato dráha proměnlivá. Proto je třeba před každým zapnutím programu znovu korektně vypočítat a nastavit zpoždění. Toto zpoždění však také ovládá jen záklopku, a tím pádem je ve výsledku zkrácená dráha svazku. To se dá řešit nastavením přesahu dráhy galvo skeneru přes požadovanou plochu. Možnost nastavení zpoždění je vhodná jen pro nejjednodušší programy [40] [41].

Jako druhá možnost bylo uvažováno omezení ryvu a zrychlení galvo skeneru. Omezení ryvu způsobuje rampu zrychlení. Při plynulém náběhu zrychlení je prodloužena doba, za kterou svazek (resp. galvo skener) dosáhne konstantní rychlosti, stejně jako dráha pro zrychlení. S ohledem na krátkou celkovou dobu potřebnou pro zrychlení svazku (řádově desítky až stovky μs) se jeví tento způsob jako nepraktický. Omezení ryvu problém propalu neodstraňuje, ale pouze snižuje jeho velikost.

Třetí možností je změna galvo skenovací hlavy za polygonální skenovací hlavu. Při výměně je ale třeba také upravit řízení laserového systému, protože polygonální skener pracuje na odlišném principu než galvo skener.

U polygonálního skeneru je třeba synchronizovat pohyby rotujícího polygonu, opakovací frekvence zdroje a pohyby přidavného rozmítacího prvku. Polygonální hlava je oproti galvo hlavě nákladnější [31] [34].

Čtvrtou možností je využití funkce SkyWriting (SW). Tato funkce kompenzuje propal tak, že uměle prodlouží naprogramovanou dráhu svazku. Poté otevírá záklopku tak, aby byl svazek rozmítán galvo skenery při konstantní rychlosti. Funkce SkyWriting také kompenzuje zpomalení svazku na obloukové dráze. Funkci je potřeba správně kalibrovat. Funkce byla vyvinuta a je podporována firmou Scanlab [31] [41].

Další možností kompenzace propalu je změna parametrů svazku v reálném čase. To zajišťuje algoritmus ScanPack, od firmy Cambridge technology. Funkce upravuje při rozmítání výkon, frekvenci a dobu trvání pulsu. Je však potřeba pokročilého laserového systému. Zatím neexistuje mnoho laserových zdrojů kompatibilních s tímto algoritmem [33] [41].

Problémem kompenzace propalu se zabývají různé výzkumné týmy. Univerzitou v Birminghamu byl například vyvinut Adaptivní postprocesor, který na základě mechanického modelu skenovací hlavy počítá adaptivní vektor dráhy svazku [41]. Obecně se však dá říct, že neexistuje univerzální řešení. Dostupná řešení jsou exkluzivním produktem daných firem. S ohledem na dostupné zařízení byla v této práci použita kompenzace pomocí funkce SkyWriting.

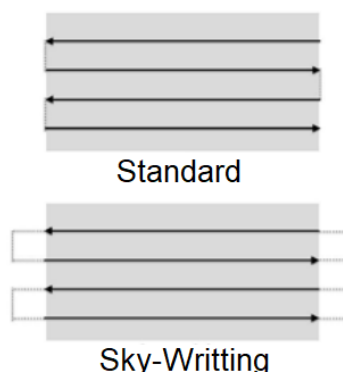
3.4.3 Funkce SkyWriting

Funkce nahrazuje nastavení zpoždění záklopky tak, že kombinuje řízení pohonu galvo skeneru a spínání záklopky zdroje. Funkce upravuje řízení galvo skeneru na základě požadované dráhy (resp vektoru pohybu svazku) a polohové odchylky. Je třeba sledovat rotaci galvo skeneru, ale nejdůležitější je pohyb a chování laserového svazku. Chyba řízení galvo skeneru se poté projevuje na dráze svazku a tím i na kvalitě obráběného materiálu. Obvyklou skenovací strategií je rozdělení plochy na jednotlivé linie (šrafy) [41] [42].

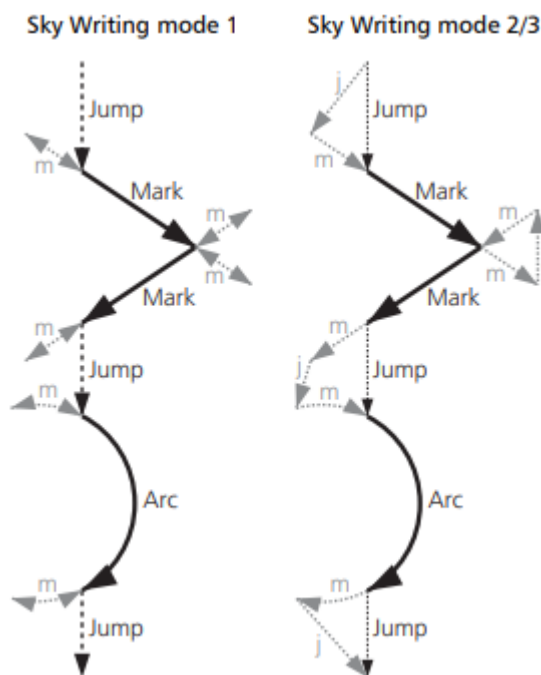
Standardně je šrafování provedeno tak, že na začátku dráhy se otevírá záklopka (OZ), svazek se pohybuje v jednom směru (např. v ose X), na konci

požadované dráhy se zavírá záklopka (ZZ) a galvo skenery se následně přestavují rychloposuvem ($5000 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$) na začátek další linie nad ní. Poté se obdobným způsobem pohybuje v ose X v opačném směru (viz Obr. 23). Proces se opakuje, dokud není obrobena celá kontura dle zadaného programu. Proces ale nutně vede k tomu, že na začátku každé linie svazek akceleruje a na konci opět deceleruje. Jak bylo uvedeno výše, to způsobuje nežádoucí propal.

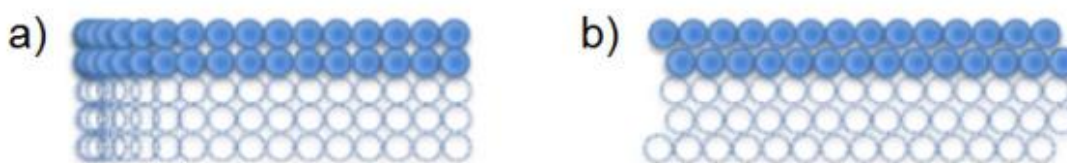
Princip funkce SkyWriting spočívá v přidávání pohybů galvo skenerů při ZZ a v korekci pohybů při OZ. Funkce umožňuje systému do jisté míry predikovat potřebnou dráhu svazku a zároveň dráhu uměle prodlužuje. Díky tomu se dráha svazku přibližuje k ideální dráze. Při zapnuté funkci SkyWriting se v oblasti ZZ galvo skenery natočí rychloposuvem tak, aby svazek dopadal na začátek dráhy. Následně se svazek pohybuje opačným než požadovaným směrem. Urazí určitou dráhu a poté se směr pohybu otočí. Svazek se dále pohybuje plynule v požadovaném směru. Poté se otevře záklopka zdroje a probíhá obrábění. V bodě odpovídajícímu konci naprogramované dráhy se zavírá záklopka. Dráha ale nekončí v tomto okamžiku, ale pokračuje dále a přesáhne původní zakončení dráhy. Poté se vrátí na požadovaný konec a rychloposuvem se přesune na začátek další linie. Funkce tedy vytvoří pro dráhu svazku náběh a doběh, na kterém svazek zrychlí a zpomalí. Obě tyto oblasti jsou mimo obráběnou plochu a neprojeví se díky řízení záklopky. (viz Obr. 24) Při této strategii však může dojít k fázovému posunu mezi jednotlivými šrafy (viz Obr. 25) [42] [43].



Obr. 23 Skenovací strategie běžná (nahore) a při použití funkce SkyWriting (dole) [43]



Obr. 24 Princip přidaných pohybů funkce SkyWriting: Jump/j – skok, rychloposuv; Mark/m – značení, pracovní posuv; Arc – oblouk; plná čára označuje pohyb při otevřené záklopce; vlevo Mód 1, vpravo Módy 2 a 3 [42]

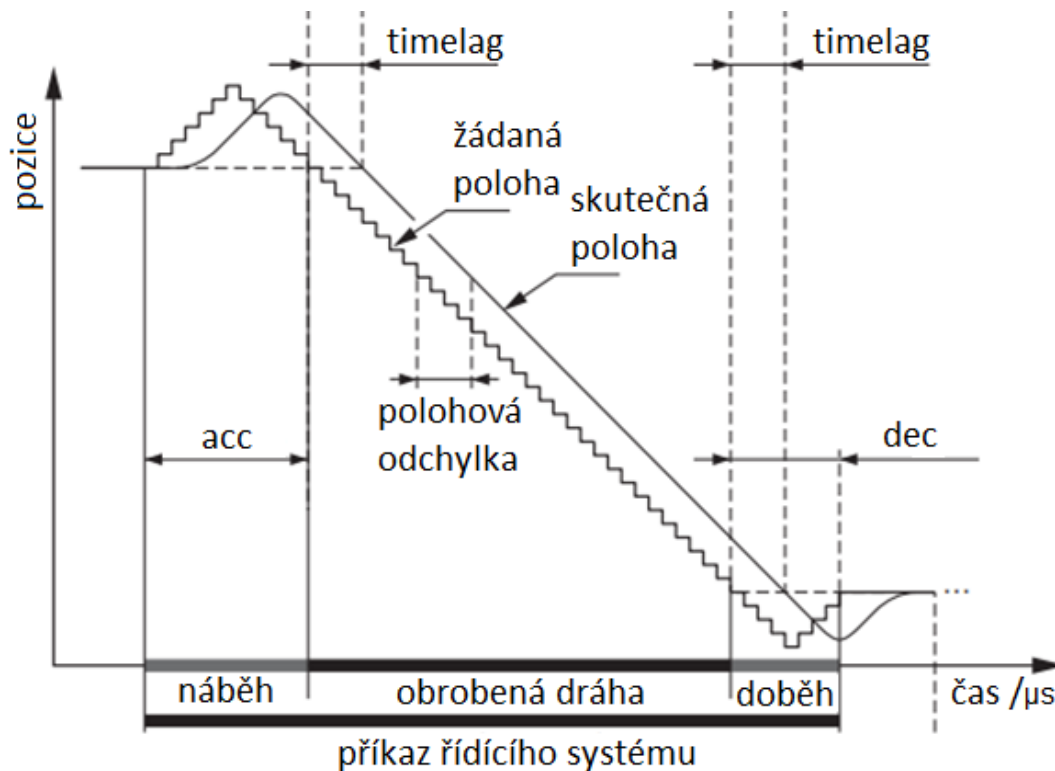


Obr. 25 Rozložení pulsů: a) bez funkce, b) s funkcí SkyWriting [8]

Funkci je možné používat ve třech módech. V Módu 1 funkce přidává náběhy a doběhy za každou dráhu bez ohledu na jejich vzájemnou polohu (viz Obr. 24 vlevo). To výrazně zvyšuje pracovní čas a ovlivňuje přesnost obrábění. Mód 1 je vhodný pro obrábění jednoduchých tvarů, jako jsou obdélníky. V Módu 2 pak systém dopočítává pohyby rychloposuvem mezi jednotlivými náběhy a doběhy. Pohyby galvo skeneru při ZZ jsou efektivnější a obrábění je plynulejší. Mód 3 dále rozvíjí druhý mód a přidává navíc možnost korigovat napojení drah ve chvíli, kdy není potřeba dramaticky změnit směr [42].

Funkce umožňuje v Módu 1 nastavení dvou parametrů, těmi jsou: časové zpoždění T_L [μs] (Timelag), které udává dobu pohybu galvo skenerů při ZZ požadovaným směrem (viz Obr. 26), a časový posun otevření záklopky L_s [μs]

(Laser on shift). Na základě rychlosti si systém dopočítá velikost náběhu a doběhu. Při zvýšení rychlosti se přímo úměrně zvyšuje i zrychlení.



Obr. 26 Vizualizace chování funkce SkyWriting (upraveno) [42]

V Módu 2 se funkce SkyWriting chová stejně jak při Módu 1, nicméně je schopna propojit fiktivní (při ZZ) začátky požadovaných drah tak, že se mezi nimi galvo skenery pohybují rychloposuvem. Díky tomu je efektivněji řízená dráha svazku při ZZ a snižuje se celkový čas obrábění. Aby byly pohyby rychloposuvem korektně spočteny, je třeba znát dobu náběhu acc [μs] a dobu doběhu dec [μs] (viz Obr. 26). Takto nastavené hodnoty jsou přesnější, než při automatickém dopočtení v Módu 1. Mód 2 se nejvíce projeví na dráze, která má velké změny směru pohybu.

V Módu 3 je možné nastavit všechny čtyři předchozí parametry a úhlový limit ang [$^\circ$]. Limit určuje maximální úhel mezi dvěma napojenými dráhami, při kterém se neuplatní princip přidávání drah při ZZ. Napojení těchto drah se pak proloží spline křivkou.

3.5 Shrnutí možností laserových systémů

Laserové systémy jsou typem výrobních strojů. Výše popsané systémy jsou vhodné pro povrchové úpravy, jako jsou gravírování, kalení, nárazové

vytvrzení [44], tvorba funkčních povrchů [45], leštění a v neposlední řadě jsou využitelné pro odstraňování povlaků. Nosná konstrukce musí být dostatečně tuhá, aby potlačila vnější vlivy a zajistila tak nekmitavost svazku.

Srdcem laserového systému je laserový zdroj. Zde dochází k emisi fotonů a je vytvářen laserový svazek. Zdroj je vybaven záklopkou, která opakovaným otevíráním odděluje jednotlivé pulsy. U zdroje je třeba sledovat vlnovou délku svazku a délku pulsu. Tyto parametry přímo ovlivňují interakci svazku s materiálem [24] [25] [26] [27].

Laserové systémy mají zpravidla 2 optické osy, charakterizované rotací skenovacích zrcadel. Galvo skenery (popř. polygonální skenery) jsou umístěny ve skenovací hlavě. Za skenovací hlavou následuje F-Theta čočka. Před skenovací hlavou se nachází optická cesta. Pomocí optických komponent je možné nastavit výkon, polarizaci, průměr svazku, zaostření, v některých případech i tvar a vlnovou délku svazku [6] [7] [23] [26] [27]. Nastavení svazku se liší v závislosti na obráběném materiálu. Jednou z vlastností materiálu důležitých pro laserový proces je jeho odrazivost (resp. pohltivost). Každý materiál pohlcuje světlo o vlnové délce v určitém rozsahu. Svazky o jiných vlnových délkách pak více či méně odráží. Korektním nastavením svazku je možné vliv odrazivosti do jisté míry snížit. Další možností optických os je tzv. 3D skenovací hlava. Ta má skenery umístěné před F-Theta čočkou. Jednou z vlastností čočky je, že svazek ztrácí více energie, když se blíží okraji promítaného pole. 3D skenovací hlava má oproti standardní 2D hlavě přidaný pohyb v ose Z, a tím kompenzuje ztrátu výkonu svazku [23] [40].

Laserový systém může mít několik pohybových os. Od počtu a rozložení os se odvíjí možnosti obrábění daného stroje. S ohledem na požadavky na obrábění pak může laserový systém mít podobu portálu; nebo kompaktního stroje s malým pracovním prostorem, ale s preciznějším vedením svazku [38] [39].

Často přidávaným zařízením je ventilační obvod. Při laserovém procesu vznikají výpary (v závislosti na obráběném materiálu). Titanové, hliníkové, chromové, křemíkové i mnohé jiné zplodiny představují potenciální riziko přímo pro obsluhu stroje, ale i pro životní prostředí. Kvalitní odsávací a filtrační systém toto riziko snižuje [39].

Nedílnou součástí laserových systémů je i adekvátní krytování. To musí zajistit, aby žádné světlo neprošlo ven ze stroje a nemohlo poranit obsluhu. Existují 4 stupně bezpečnosti dle intenzity záření. Třída 4 je zdraví nebezpečná, svazek je schopen poškodit lidské tkáň při kontaktu. Třída 1 je bezpečná, je jí dosaženo krytováním. Krytování může být realizováno pomocí filtračních skel, které nepropouští danou vlnovou délku. Filtrační sklo může mít podobu tabulí zabudovaných ve stroji, nebo ochranných brýlí [5] [6] [39].

Laserový systém také může obsahovat různá přídatná zařízení. Jedná se převážně o manipulátory, zakladače dílů a zásobníky dílů. Laserový zdroj, optická cesta a skenovací hlava také mohou být zakomponovány do výrobní linky (např. pro kontinuální popisování). Laserový systém může obsahovat i více různých zdrojů nebo skenovacích hlav pro souběžné obrábění více svazky v jednom pracovním prostoru [35] [38] [39].

Pohybové možnosti stroje jsou omezeny různými parametry. Průměrem svazku D (resp. jeho poloměrem v ohnisku ω_0) a opakovací frekvencí f_p je omezena skenovací rychlost, dle rovnic (16) a (198). Procentuální překryv pulsů určuje hodnotu posuvu v jednom směru a frekvence zdroje určuje maximální dosažitelnou rychlost při daném překryvu. Další omezení rychlosti je dané mechanickými vlastnostmi galvo skenerů – velikost (resp. moment setrvačnosti) omezuje úhlovou rychlost a nosnost galvo skeneru. Obecně se dá říct, že svazek s větším průměrem potřebuje větší zrcadlo, které vyžaduje větší elektromotor. To vede na sníženou maximální rychlost.

Fyzikální limity mechanických komponent laserového systému ovlivňují pohyb svazku. Nedokonale se pohybující svazek pak způsobuje nežádoucí efekty na povrchu. Jedním z nejvýraznějších efektů je propal, způsobený zrychlováním a zpomalováním galvo skenerů. Je vhodné hledat a nacházet způsoby, jakými tyto efekty odstranit nebo kompenzovat. Díky tomu dovedeme vylepšit proces odstranění povlaku, resp. obrábění laserem obecně. Výsledkem je kvalitnější laserem obrobený povrch.

4 Podstata a návrh experimentu

Experiment odstranění povlaku AlTiN byl navržen za účelem zvýšení produktivity procesu a vhodné úpravy dráhového řízení laserového svazku.

4.1 Podstata experimentu

Povlak AlTiN je jeden z rozšířených komerčních povlaků řezných nástrojů pro obrábění oceli. V současné době je velice časté použití karbidových nástrojů s povlakem na bázi titanu. Pro uživatele takových nástrojů je atraktivní mít možnost obnovit břity nástroje a použít opravený nástroj, protože je méně nákladný než nový nástroj. Se zvyšující se produktivitou odstranění povlaku se snižují vedlejší výrobní náklady.

Jedním z možných problémů při odstraňování povlaku laserem je vznik propalu při použití galvo skenerů pro rozmítání svazku. Propal je třeba odstranit s ohledem na požadavek kvalitního odstranění povlaku ze substrátu. Jednou z možností odstranění propalu je výměna galvo skenerů za polygonální skener. Pokud toto není možné nebo chtěné, nabízí se možnost softwarové kompenzace pohybů galvo skenerů. Pro tuto práci byla zvolena kompenzace propalu pomocí přídatné funkce SkyWriting. Důvodem bylo, že zásah do řízení galvo skenerů je jednodušší a levnější než konstrukční zásah do struktury laserového systému.

Cílem vlastního experimentu této práce bylo nalézt vhodné podmínky pro odstranění povlaku AlTiN daným laserem, pochopit princip funkce SkyWriting, odstranit povlak ze substrátu a určit vliv přídatné funkce na odstranění povlaku. Protože podstata těchto dílčích cílů je odlišná, bylo rozhodnuto, že experimentální část bude rozdělena do tří fází. V první fázi experimentu byla zkoumána interakce laserového svazku a povlaku AlTiN. Ve druhé fázi byl zkoumán princip funkce SkyWriting. Ve třetí fázi se zužitkovaly informace z obou předchozích fází. Byl porovnán úběr povlaku bez zásahu do řízení galvo skenerů a se zapnutou funkcí SkyWriting.

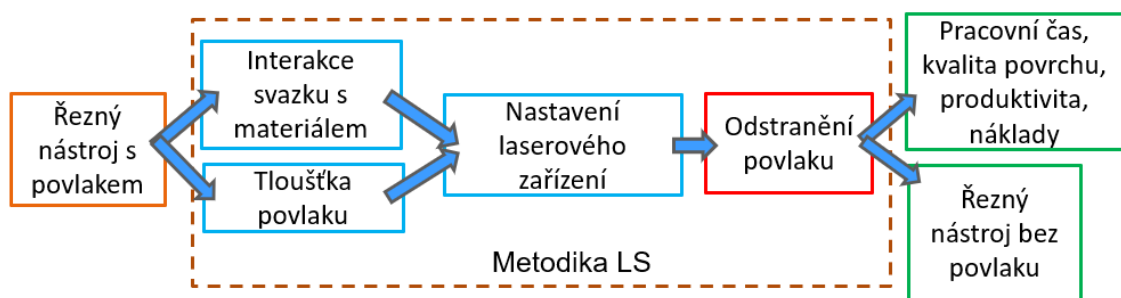
4.2 Fáze experimentu

V první fázi experimentu byla věnována pozornost interakci tří laserových svazků s povlakem AlTiN ($\lambda=1030$; 515 a 343 nm). Konkrétně byl zjištěn ablační práh povlaku, pomocí postupu popsaném v kap. 2.4.1. Dále byla zjištěna

tloušťka povlaku. Měření tloušťky povlaku spočívá v jemném úběru povlaku v mnoha vrstvách. Cílovou hloubku je možné získat pomocí opakovaných přejezdů svazku po ploše. Zároveň byly určeny vhodné parametry pro odstranění povlaku.

Ve druhé fázi byl zkoumán způsob, jakým je možné kompenzovat nepříznivý vliv akcelerace galvo skenerů pomocí funkce SkyWriting. Byly provedeny testy pro určení vhodných parametrů pro nastavení této funkce s ohledem na skenovací rychlost. Nejprve bylo určeno zrychlení svazku odpovídající konkrétní rychlosti a následně byl proveden odhad hodnot parametrů funkce. Z odhadu pak vyplynul rozsah testovaných hodnot parametrů funkce SkyWriting.

Ve třetí fázi byl odstraněn povlak z řezného nástroje pomocí sub-mikronového úběru v jednotlivých vrstvách. Byl porovnán úběr bez zásahu do řízení galvo skenerů a se zapnutou funkcí SkyWriting. Byl určen vliv funkce na kvalitu obrobeného materiálu, v závislosti na rychlosti svazku a vlnové délce laseru. Byl určen minimální počet vrstev, kdy je povlak úspěšně odstraněn. Experiment byl proveden v rozsahu rychlostí, kterých bylo možné dosáhnout pomocí opakovacích frekvencí zdroje. Byl zachován překryv pulsů ve dvou směrech 90 %, dále intenzita energie laseru a podoba šrafů. Rozdíl u jednotlivých pokusů byl v opakovací frekvenci, vlnové délce svazku a použití funkce SkyWriting. Zvolené opakovací frekvence byly: 200, 400, 600, 800 a 1000 kHz. Metodika odstraňování povlaku je znázorněna na Obr. 27.

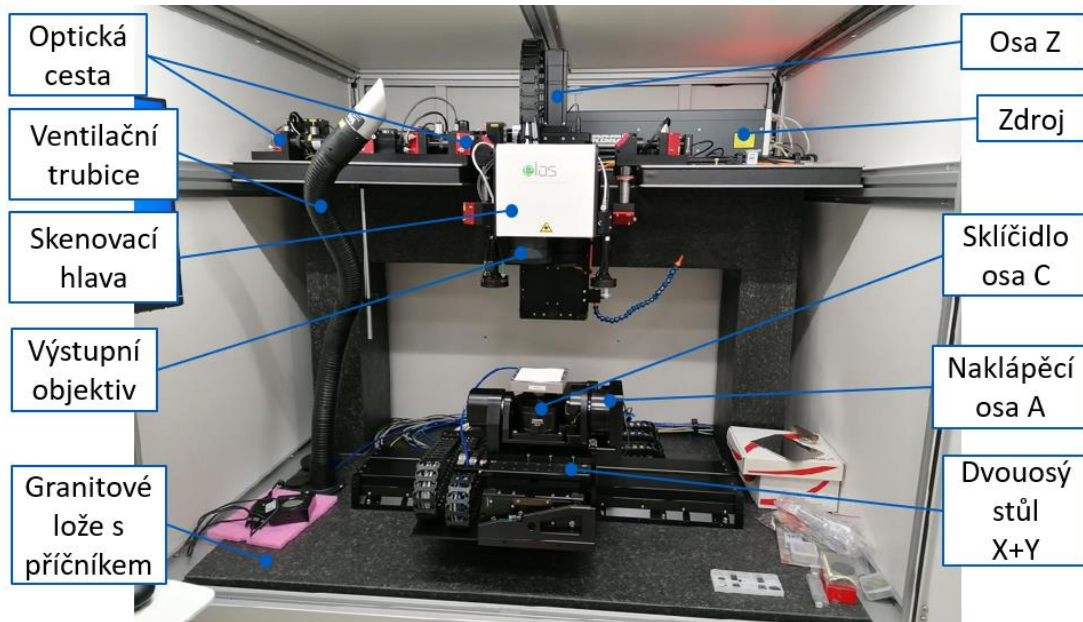


Obr. 27 Schéma metodiky pro technologii laser stripping

4.3 Experimentální zařízení

Laserové zařízení MASTER1 je víceosý stroj určený pro mikroobrábění laserem (viz Obr. 28). Zařízení má dvě rotační (A, C) a dvě translační osy (X a Y) na straně stolu (viz Obr. 29), dále jednu translační osu (Z) a dvě optické osy na straně nástroje [35] [46]. Nástrojem je myšlen laserový svazek. Charakteristika

mechanických os je v Tab. III. Osy jsou řízeny pomocí zpětnovazební kaskádní regulace. Zařízení má femtosekundový zdroj CARBIDE s možností změny harmonické frekvence [26]. Zdroj dosahuje maximálního výkonu 40 W a maximální opakovací frekvence 1 MHz. Systém má také integrovaný nanosekundový zdroj redEnergy od firmy SPI [24]. Zařízení obsahuje ventilační a filtrační systém [35][46].



Obr. 28 Fotografie pracovního prostoru systému MASTER1, který byl použit ve vlastním experimentu

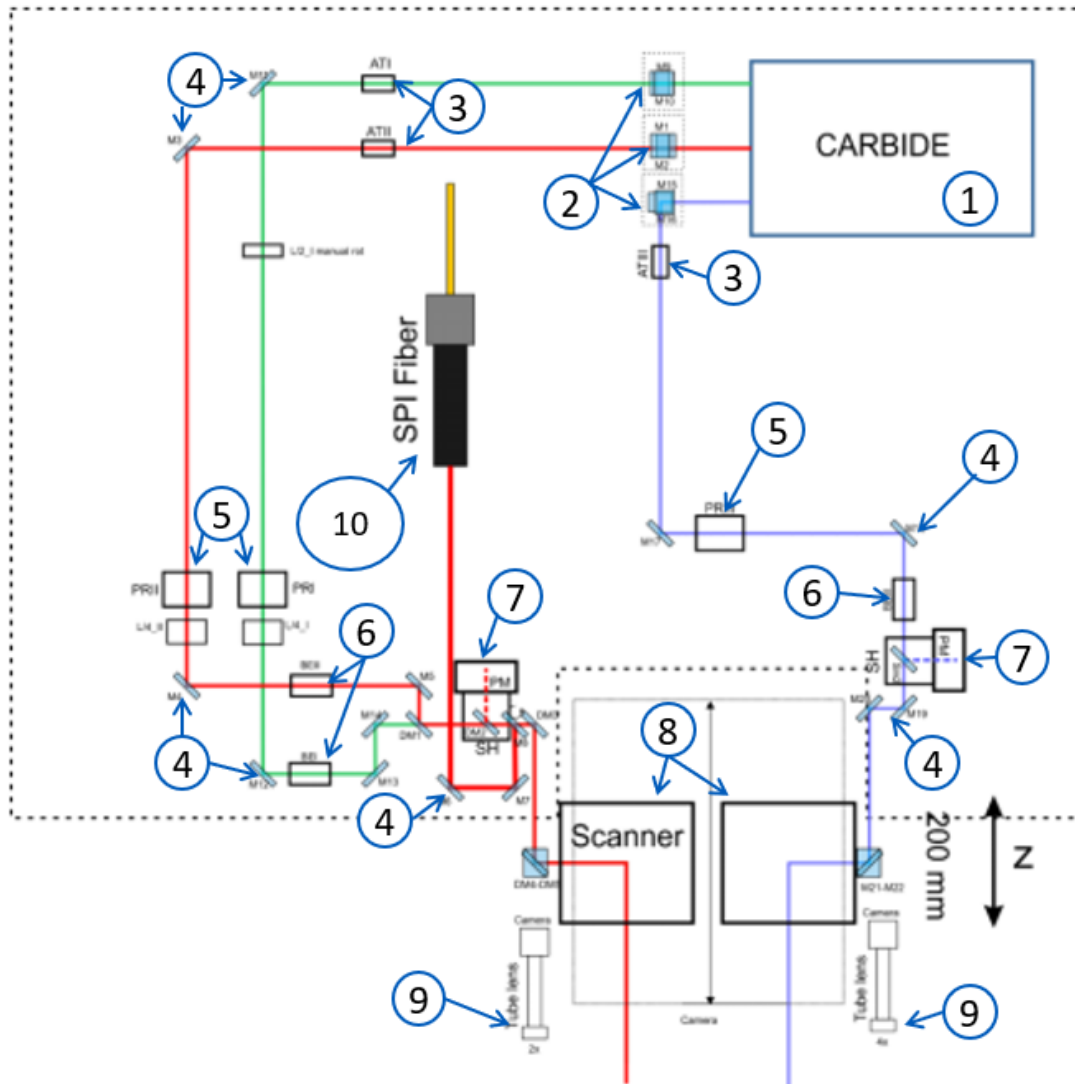


Obr. 29 Pohyblivé mechanické osy stolu laserového zařízení MASTER 1 (upraveno) [46]

Tab. III Charakteristika mechanických os experimentálního zařízení [46]

Osa	X	Y	Z	C	A
Rozsah pohybu [mm/°]	600	400	200	±360°	±120°
Přesnost [μm]	±1	±0,5	±1,2	±12	±12.12
Opakovatelnost [μm/μrad]	±0,11	±0,09	±0,08	±8,31	±8,3
Max. rychlost [mm·s ⁻¹]/ [1/min]	800	1000	150	1500 (bez zátěže)	1500 (bez zátěže)

Zařízení je možné ovládat pomocí integrovaného DMC softwaru se specializovanými aplikacemi pro oba laserové zdroje [46] [47]. Dále je možné naprogramovat pohyb os pomocí G-kódu [46]. Zařízení je také vybaveno kamerou, která snímá pracovní prostor v referenční poloze.



Obr. 30 Optická cesta zařízení MASTER1: 1) Zdroj CARBIDE, 2) dvojitá zrcadla, 3) attenuatory, 4) zrcadla, 5) polarizátory, 6) beam expandery, 7) měřidlo výkonu svazku, 8) galvo skenovací hlavy, 9) čočky kamer 10) optické vlákno ze zdroje SPI [46]

Na Obr. 30 je zobrazeno schéma optické cesty experimentálního zařízení. Je zde vidět, že všechny typy laserových svazků mají vlastní optickou cestu. Jeden galvo skener je určen pro první (1030 nm), druhou harmonickou frekvenci (515 nm) a pro SPI laser (1060 nm). Druhý galvo skener je naopak určen jen pro třetí harmonickou frekvenci (343 nm). Toto uspořádání je dané konkrétními ochrannými povlaky, které zvyšují odrazivost pro určitý interval vlnových délek.

Povlakování optických prvků tak, aby se daly použít pro celé spektrum by bylo příliš drahé a náročné.

Zařízení má v optické cestě dva attenuatory. Jeden je ve zdroji (Att1), a druhý je před skenovací hlavou (Att2). Kombinací jejich natočení je regulován výkon svazku.

Stroj využívá dvě skenovací galvo hlavy Intelliscan od firmy Scanlab [31]. Jedna skenovací hlava je určena pro femtosekundový zdroj pro vlnové délky 1030 nm (IH), 515 nm (IIH) a nanosekundový zdroj (1060 nm) – pro zjednodušení Galvo1. Druhá hlava je určena pro vlnovou délku 343 nm (IIIH) – dále jen Galvo2. Důvodem pro rozdělení je optický povlak aplikovaný na zrcadlech. Galvo skenery jsou ovládány řídicí kartou RTC5. Vlastnosti skenovací hlavy jsou v Tab. IV. S ohledem na vlnovou délku zdroje se také mění průměr svazku ω_0 . Pro zařízení MASTER1 byl průměr svazku určen o velikost 30 μm pro Galvo1 a 20 μm pro Galvo2. Menší průměr svazku pro Galvo2 ovlivňuje maximální rychlost svazku (při konstantním překryvu pulsů).

Tab. IV Vlastnosti skenovací hlavy Intelliscan [31]

Vlastnost	Hodnota
Rozsah rotace	$\pm 20^\circ$ (0,35 rad)
Odezva na skok rychlosti [ms]	0,45-3
Opakovatelnost natočení [μrad]	2
Max. rychlost [$\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$]	5000

4.4 Zařízení pro vyhodnocení

Primárním vyhodnocovacím zařízením byl laserový konfokální mikroskop od firmy Keyence, série VK-X (viz Obr. 31) [48]. Mikroskop snímá povrch opticky a zároveň pomocí laserového svazku. Tím je vytvořen kompletní 3D model, který je poté možné měřit. Svazek mikroskopu má vlnovou délku 661 nm a maximální výkon 1 mW. Mikroskop má k dispozici objektivy se zvětšením 2,5x, 5x, 10x, 20x, 50x a 150x. Maximální rozlišení výšky je 5 nm, maximální rozlišení šířky je 10 nm [48]. Mikroskop má také stůl se dvěma poháněnými osami (X, Y) a rotační platformou (osa C).

Pro měření byl využit software Multifile analyzer. Tento program umožňuje na nasnímaném modelu měřit hloubku odstraněné vrstvy, drsnost povrchu

a mnoho dalších parametrů povrchu. Naměřené hodnoty mají odchylku ± 2 %. Měření s takovou odchylkou je pro vyhodnocení hodnot v této práci dostatečné.



Obr. 31 Laserový konfokální mikroskop Keyence

4.5 Testovaný materiál

Pro experimentální část byl vybrán ochranný povlak AlTiN. Konkrétní složení je Al₅₅Ti₄₅N. Tento komerčně používaný povlak pro obrábění ocelí se používá jako abrazivní ochrana nástroje a prodlužuje jeho životnost [49] [50] [51]. Důležitými vlastnostmi jsou především vysoká tvrdost, (až 3000 HV [51]) a teplotní odolnost [49] [51]. Tloušťka povlaku se pohybuje obvykle v rozmezí 2÷6 μm [50] [51].

Povlak byl deponován na karbidu třídy N. Tato třída je určena pro neželezné kovy – slitiny mědi a hliníku a plasty. Hlavní složkou karbidu této třídy je karbid Wolframu. S rostoucí teplotou ztrácí svou tvrdost. Karbidy třídy N jsou vhodné pro obrábění materiálu, které tvoří drobnou třísku. Jako takové se někdy zahrnují pod skupinu K [52].

Experiment byl proveden na plochých válcových vzorcích o průměru 20 mm a výšce 4 mm.

5 Experiment

Vlastní experiment probíhal dle zadání a z něj vycházejícího návrhu. V Tab. V jsou uvedeny základní (defaultní) omezení rychlosti, zrychlení a ryvu pro pohybové osy. Z translačních os má osa Z nejmenší dosažitelnou rychlost, a to kvůli citlivým optickým komponentám, se kterými hýbe. Osa Z byla navržena tak, aby byla co nejvíce tuhá. Pro tuto práci byly použity pouze translační osy X, Y, Z, protože nejprve bylo třeba proces odladit na jednoduchých břitových destičkách. Pro odstranění povlaku z plochy je potřeba maximálně tři pohybových os. Ploché vzorky se dají považovat za srovnatelné VBD.

Tab. V Základní nastavení omezení pohybu os

Osa	X	Y	Z	A	C
Omezení rychlosti [$\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$] / [$\text{deg}\cdot\text{s}^{-1}$]	100	100	25	20	50
Omezení rychlosti při vypnutém laseru [$\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$] / [$\text{deg}\cdot\text{s}^{-1}$]	100	100	25	20	50
Omezení zrychlení [$\text{mm}\cdot\text{s}^{-2}$] / [$\text{deg}\cdot\text{s}^{-2}$]	1000	1000	1000	1000	1000
Omezení zrychlení při vypnutém laseru [$\text{mm}\cdot\text{s}^{-2}$] / [$\text{deg}\cdot\text{s}^{-2}$]	1000	1000	500	1000	1000
Omezení ryvu [$\text{mm}\cdot\text{s}^{-3}$] / [$\text{deg}\cdot\text{s}^{-3}$]	0	0	0	0	0

V následující tabulce (Tab. VI) jsou uvedeny defaultní hodnoty nastavení galvo skenerů. Pro Galvo1 bylo promítané pole 45x45 mm a nastavená maximální rychlost je 1000 $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$. Galvo2 mělo nastavené promítané pole 70x70 a rychlost 200 $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$. Tyto hodnoty omezení byly na začátku experimentu změněny na svou maximální hodnotu 5000 $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$, aby bylo možné rychlost svazku měnit přímo ve skriptu dle aktuálních požadavků.

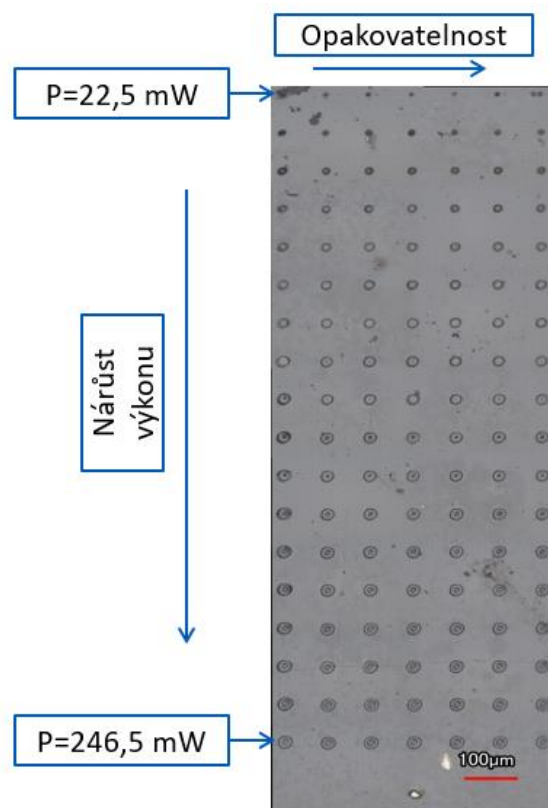
Tab. VI Základní nastavení galvo skenerů

	Galvo1	Galvo2
Velikost promítaného pole v ose X [mm]	45	70
Velikost promítaného pole v ose Y [mm]	45	70
Natočení promítaného pole [deg]	0	0
Maximální rychlost rozmítání při zapnutém laseru [$\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$]	1000	200
Maximální rychlost rozmítání při vypnutém laseru [$\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$]	1000	1000
Maximální zrychlení [$\text{mm}\cdot\text{s}^{-2}$]	10^9	10^9
Zpoždění záklopky na začátku programu [μs]	100	50
Zpoždění záklopky na konci programu [μs]	200	150

5.1 Fáze 1: Určení vhodné oblasti pracovních podmínek

5.1.1 Měření ablačního prahu

V první části experimentu byl určen ablační práh materiálu. Byl použit femtosekundový laser CARBIDE od firmy LightConversion. Ablací práh byl určen pro tři vlnové délky: 1030 nm, 515 nm a 343 nm. Dále byl porovnán ablační práh pro různé počty pulsů: 1, 10, 50, 100 a 1000 pulsů. Tedy jeden bod byl vypálen pomocí určitého počtu pulsů. Pomocí attenuatoru bylo nastaveno 20 hodnot výkonů laseru. Opakovací frekvence byla stanovena na $f_p=200$ kHz. Doba trvání pulsu byla $T_p=276$ fs. Průměr svazku $D=0,03$ mm pro Galvo1 a $D=0,02$ mm pro Galvo2. Pro každý výkon pak bylo vypáleno několik bodů, takže vznikla matice, viz Obr. 32. Následně byl pomocí analyzačního softwaru mikroskopu Keyence změřen průměr jednotlivých bodů. Pro snížení nejistot byl změřen průměr u každého bodu ve dvou na sebe kolmých směrech, u pěti bodů v každé řadě. Výsledky měření jsou v příloze (viz Příloha 0 1 Data z měření ablačního prahu).



Obr. 32 Body vytvořené laserovým svazkem pro určení ablačního prahu, 1000 pulsů, IH

Z výsledků je patrné, že pro 1 puls je potřeba většího výkonu, oproti stavu, kdy dopadá více pulsů do jednoho místa. Toto je důsledkem inkubačního efektu. Každý puls, který dopadá na materiál nese určité množství energie. Energie je při kontaktu pulsu předána materiálu, mění se v tepelnou energii a ovlivňuje vlastnosti materiálu. Každý další puls, který dopadne do stejného místa pak potřebuje menší energii, aby materiál ovlivnil. Tím se efektivně sníží ablační práh [18] [19]. Inkubační efekt je vyjádřen pomocí inkubačního faktoru ξ [-] dle rovnice (8):

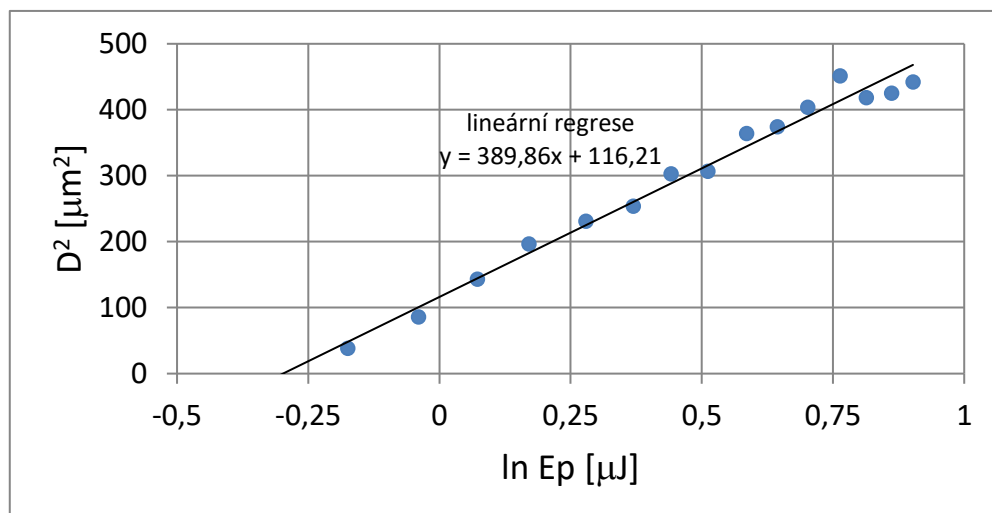
$$F_{th}(N) = F_{th}(1) \cdot N^{\xi-1} \quad [\text{J} \cdot \text{cm}^{-2}] \quad (8)$$

Inkubační faktor se pohybuje v rozmezí $0 < \xi \leq 1$. Když je faktor roven jedné, pak inkubační efekt nenastává. Pokud je větší než jedna, dochází ke zpevnování materiálu. Čím je faktor nižší, tím nižší je ablační práh pro daný počet pulsů [8].

Následně byla pro každou hodnotu dopočítána energie v pulsu dle rovnice (4). Opakovací frekvence byla 200 kHz.

$$E_p = \frac{P}{f_p} = \frac{0,247}{200\,000} = 1,235 \cdot 10^{-6} \text{ [J]} \quad (4)$$

Hodnoty energií v pulsu byly v logaritmickém měřítku vyneseny do grafu proti druhé mocnině změřeného průměru viz Obr. 33.



Obr. 33 Graf hodnot energií v pulsu pro určení průměru svazku v ohnisku.

Vynesené hodnoty poté byly proloženy aproximační přímkou, s obecnou rovnicí $y=a \cdot x+b$. Hodnota, ve které přímka protíná osu X odpovídá energii v pulsu E_{th} ,

tedy energii svazku pro ablační práh. Pomocí grafu je možné určit poloměr svazku v ohnisku ω_0 , dle vztahu [8]:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{a}{2}} \quad [\mu\text{m}] \quad (18)$$

Kde a [-] je směrnice aproximační přímky.

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{a}{2}} = \sqrt{\frac{389,86}{2}} = 13,96 \quad [\mu\text{m}] \quad (198)$$

Následně je možné dopočíst ablační práh z rovnice (20). Naměřená data pro určení ablačního prahu jsou v příloze (Příloha 1). Výsledné ablační prahy pro všechny vlnové délky jsou uvedeny v Tab. VII.

Tab. VII Výsledné hodnoty ablačních prahů F_{th} [$\text{J}\cdot\text{cm}^{-2}$] pro tři vlnové délky

Vlnová délka [nm]	Počet pulsů v jednom bodě [-]				
	1	10	50	100	1000
1030	0,347	0,121	0,162	0,145	0,124
515	0,446	0,260	0,101	0,141	0,078
343	0,347	0,212	0,167	0,142	0,056

Z tabulky je patrné, že ablační prahy se liší pro každou vlnovou délku a počet pulsů. Pro 10 pulsů je nejnižší ablační práh na první harmonické frekvenci. Pro 50 pulsů je nejnižší ablační práh na druhé harmonické. Na třetí harmonické je nejnižší ablační práh pro 1000 pulsů. Pro jediný puls je ablační práh stejný pro první a třetí harmonickou frekvenci. U počtu 100 pulsů je hodnota ablačního prahu srovnatelná pro všechny tři harmonické. Inkubační efekt se nejvíce uplatní u první harmonické frekvence (1030 nm) u 10 pulsů (viz Tab. VIII).

Tab. VIII Výsledné inkubační faktory ξ [-] pro tři vlnové délky

Vlnová délka [nm]	Počet pulsů v jednom bodě [-]			
	10	50	100	1000
1030	0,541	0,804	0,810	0,851
515	0,766	0,620	0,750	0,748
343	0,787	0,813	0,806	0,737

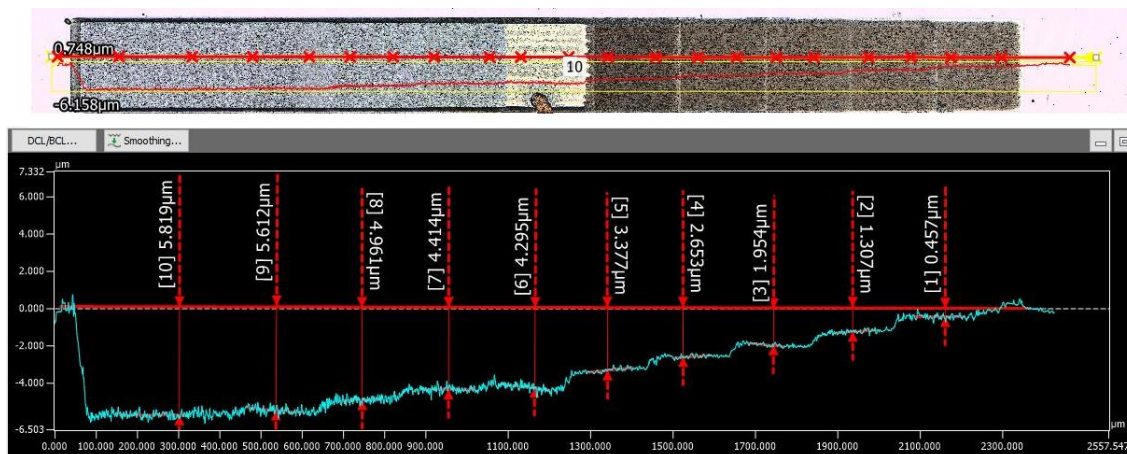
Jako nejvhodnější hodnota byla vybrána hodnota intenzity energie při 10 pulsech. Této hladiny energie se dá snadno dosáhnout tím, že se nastaví překryv pulsů na 90 %. Toto nastavení ale omezuje maximální skenovací rychlost svazku v_f . Při velikosti průměru svazku 30 μm pro Galvo1 a maximální

opakovací frekvenci 1 MHz je možné dosáhnout skenovací frekvence $3000 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$. Pro Galvo2 je při velikosti průměru svazku $20 \text{ }\mu\text{m}$ a maximální opakovací frekvenci 1 MHz možné dosáhnout skenovací rychlosti $2000 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$. Z tohoto důvodu byl pro třetí fázi experimentu uvažován rozsah skenovacích rychlostí od 0 do $3000 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ (resp. od 0 do $2000 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ pro Galvo2).

5.1.2 Měření tloušťky povlaku

Pro určení tloušťky povlaku byla vybrána první harmonická frekvence s 10 pulsy dopadajícími do jednoho místa. Odpovídající výkon pro ablační práh o hodnotě $0,121 \text{ J}\cdot\text{cm}^{-2}$ je 85 mW. Obrábění svazkem na hladině ablačního prahu je velice jemné a téměř nepozorovatelné. Proto bylo nutné zvýšit výkon svazku. Byl použit výkon 255 mW. Na první harmonické frekvenci odpovídá tento výkon trojnásobku ablačního prahu.

Při měření tloušťky povlaku bylo záměrem vytvoření stupňů v povlaku s konstantním úběrem materiálu (konstantní hloubkou odstraněné vrstvy). Linie byla rozšířena na obdélník, aby bylo možné lépe změřit hloubku odstraněné vrstvy. Nejprve byl vypálen do povlaku úzký obdélník v jedné vrstvě (jedním přejezdem). Poté byla zkrácena délka obdélníku, a ten byl vypálen tak, aby překrýval první obdélník. Proces se opakoval desetkrát. Rozdíl mezi povlakem a substrátem bylo možno pozorovat opticky – podkladový karbid má světlejší barvu a je lesklý (viz Obr. 34). Díky odleskům světla od karbidu je možné odhadnout úspěšnost odstranění povlaku do hloubky pomocí kamery umístěné v pracovním prostoru laseru. Skutečná hloubka byla následně změřena na laserovém konfokálním mikroskopu Keyence. Na první testované výkonové hladině nebylo pozorováno odstranění povlaku. Úběr povlaku v jedné vrstvě pro výkon 255 mW byl v průměru $0,3 \text{ }\mu\text{m}$. Měření bylo následně provedeno pro hodnoty výkonu 340 mW, 425 mW, a 510 mW, odpovídajícím v pořadí 4, 5 a 6 násobku ablačního prahu. Průměrný úběr povlaku byl v pořadí $0,7 \text{ }\mu\text{m}$, $0,9 \text{ }\mu\text{m}$ a $1,4 \text{ }\mu\text{m}$. Naměřená data jsou v Tab. IX. Bylo určeno, že povlak AlTiN má tloušťku v rozmezí $(3,8\div 4,1) \text{ }\mu\text{m}$.



Obr. 34 Měření tloušťky povlaku na IH, 340 mW

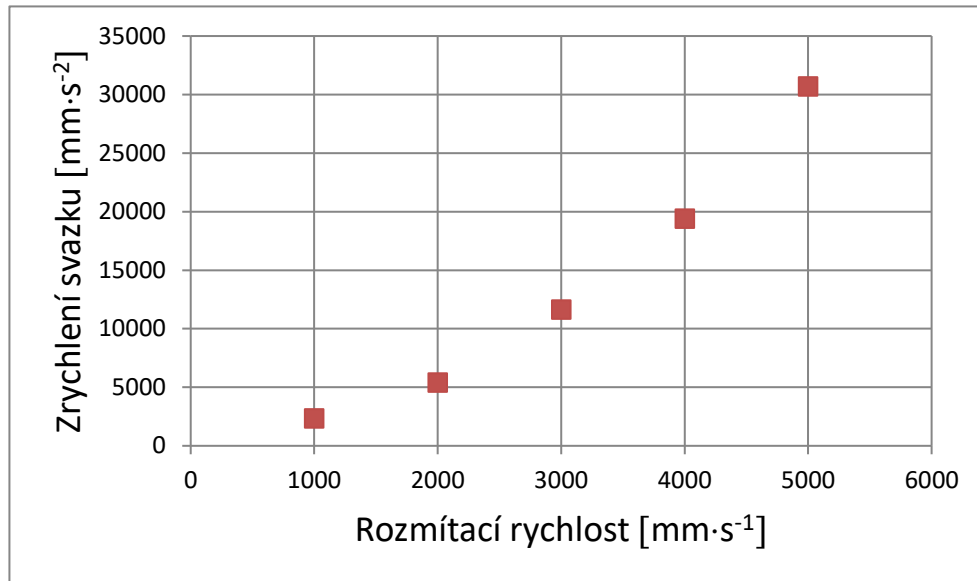
Tab. IX Naměřená data odstraněná pro zjištění tloušťky povlaku [μm]

Počet vrstev	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
255 mW	0,35	0,742	1,092	1,215	1,626	2,156	2,211	2,668	3,070	3,074
340 mW	0,457	1,307	1,954	2,653	3,377	4,295	4,441	4,961	5,612	5,819
425 mW	0,776	2,006	2,838	4,136	4,587	5,256	5,620	6,353	7,173	7,453
510 mW	1,049	2,564	4,391	4,770	5,641	6,658	7,137	7,973	8,958	9,534

Z fáze 1 vyplývá, že vhodné nastavení výkonu pro obrábění povlaku AlTiN se pohybuje v určitém intervalu, v závislosti na použité vlnové délce. Interval byl určen na $P=(300\div 500)$ mW při frekvenci $f_p=200$ kHz na IH a IIH. Při změně frekvence je třeba změnit i výkon, a to v poměru obou frekvencí. Tím bude zachována intenzita energie F . Avšak na IIIH je menší průměr svazku, proto pro stejnou intenzitu energie bude dostačovat poloviční výkon (viz rovnice (3) a (4)).

5.2 Fáze 2: Kompenzace dynamických efektů

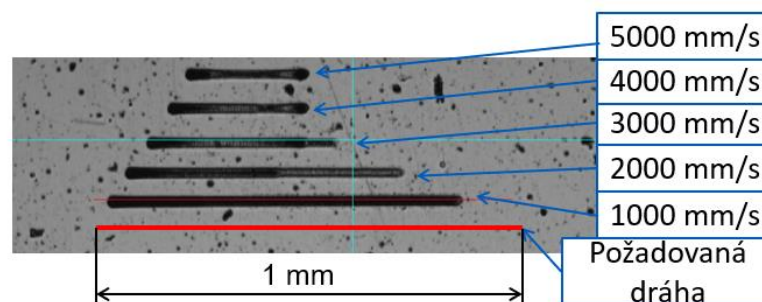
Při vykonávání programu je svazek vychylován pomocí dvou galvo skenerů. Oba skenery jsou umístěny tak, že jejich osy jsou mimoběžné. Ve výchozí poloze jsou natočeny pod úhlem 45° od přichozího svazku. Ve statické poloze je svazek odražen v úhlu 90° a pokračuje do objektivu. Při spuštění programu je otevřena záklopka laserového zdroje a zároveň dochází k rozhýbání galvo skenerů. Výsledná rychlost svazku se odvíjí od rychlosti rotace obou skenerů. Rychlost svazku v_f běžně dosahuje řádů stovek až tisíců $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$. Zrychlení svazku tak může dosahovat i $30\,000\text{ mm}\cdot\text{s}^{-2}$ (viz Obr. 35).



Obr. 35 Závislost zrychlení svazku na rozmítací rychlosti

Toto extrémní zrychlení se projeví na pohybu svazku. Při otevření záklopce dochází v oblasti na začátku dráhy svazku k propalu na ploše. Pro kompenzaci propalu byla v této práci použita funkce SkyWriting.

Funkce umožňuje v Módu 1 nastavení dvou parametrů, těmi jsou: časové zpoždění T_L [μs] (Timelag), a časový posun otevření záklopky L_s [μs] (Laser on shift). Bylo uvažováno, že nastavení funkce SkyWriting se odvíjí od požadované rychlosti svazku. Na základě rychlosti si systém dopočítá velikost náběhu a doběhu. Při zvýšení rychlosti se přímo úměrně zvyšuje i zrychlení. Na základě této úvahy byl proveden test chování svazku bez ovlivnění záklopky. Dráha svazku byla určena jako individuální linie o délce 1 mm. Výsledek je na Obr. 36.

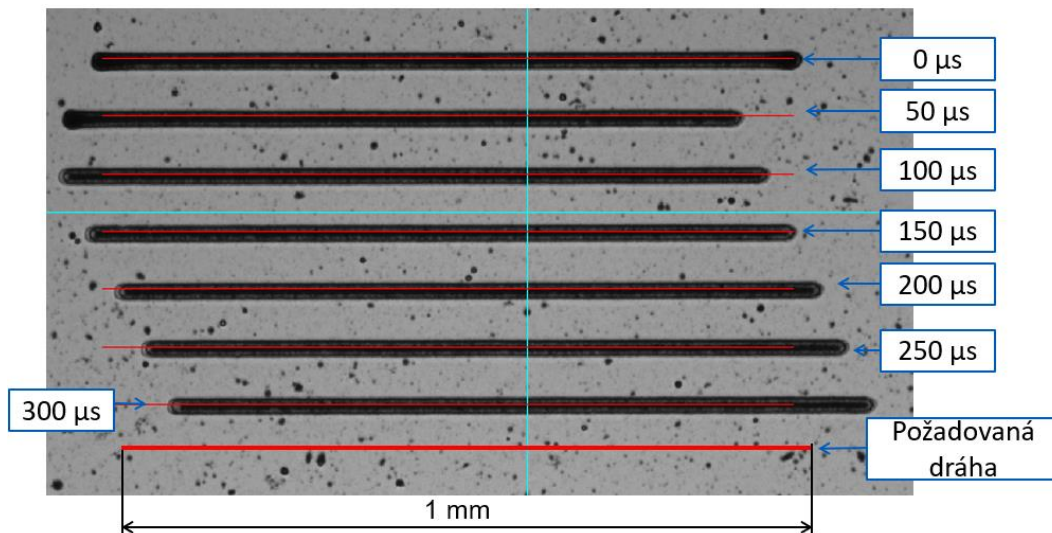


Obr. 36 Chování svazku při různých rozmítacích rychlostech

Test potvrdil domněnku, že při vyšší požadované rychlosti svazku se zvyšuje i jeho zrychlení (bez omezení ryvu). Díky vyššímu zrychlení bude kratší délka propalu. Dále je také patrné, že se zkrátila ablovaná dráha oproti požadované dráze. To je dáno zmenšením počtu pulsů při vyšším zrychlení. Použitá

opakovací frekvence byla $f_p=200$ kHz bez nastavení překryvu pulsů. Protože doba trvání pulsu $T_p=276$ fs je mnohem kratší než opakovací perioda zdroje, je možné uvažovat, že doba trvání pulsu nemá na rychlost vliv. Bez jakýchkoli kompenzací systém uvažuje, že svazek má konstantní rychlost na celé dráze. Proto si pouze dopočítá potřebný počet pulsů (při dané frekvenci a rychlosti) a vypustí ze zdroje pouze tento počet pulsů. Tento efekt se dá jednoduše odstranit nastavením vhodné rozteče mezi pulsy (v linii i mezi šrafy). Další vlastností je posun začátku skutečné dráhy oproti požadované dráze. Toto je přímo způsobené odrazem pulsu od rotujícího zrcadla. Při vysokém požadavku na zrychlení je nutně rychlejší i rotace galvo skeneru. Za čas, který puls potřebuje na průchod optickou cestou je natočení galvo skeneru vyšší, a tím pádem je první puls v řadě odražen pod vyšším úhlem. Posun začátku kompenzuje přímo timelag T_L . To indikuje, že parametr T_L , který ovládá prodloužení dráhy, je přímo úměrný rozmítací rychlosti. Pomocí testu chování svazku byl vytvořen odhad hodnot parametrů: $T_L=(100\div 300)$ μs , $L_s=(10\div 30)$ μs . Dalším předpokladem je, že se parametry budou lišit pro obě skenovací hlavy, a to z důvodu odlišného průměru svazku a v důsledku i nižší rychlosti hlavy Galvo2.

Následně byla funkce SkyWriting v Módu 1 prověřena pro rozsah skenovacích rychlostí od 600 do 3000 $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$, s krokem 300 $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ pro Galvo1 na třech harmonických frekvencích. Pro Galvo2 byl rozsah rychlostí od 400 do 2000 $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$, s krokem 200 $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$. Test spočíval ve vypálení jednotlivé linie o délce 1 mm do testovacího vzorku. Bylo vypáleno několik linií, při různém nastavení parametru timelag T_L : od 0 do 300 μs . Nulová hodnota byla zvolena pro referenci. Naměřené hodnoty jsou v příloze (viz Příloha 2 2 Měření pro určení parametrů funkce skyWriting). Příklad výsledku testu je na Obr. 37.

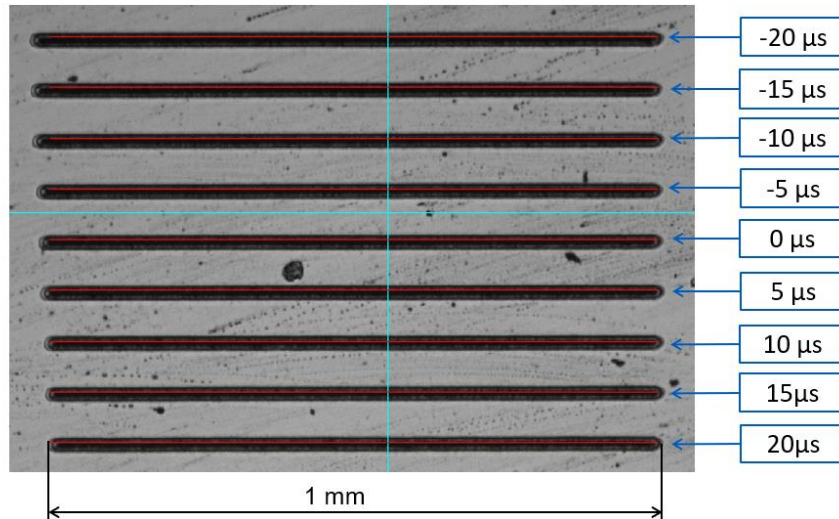


Obr. 37 Test parametru timelag pro rozmítací rychlost $900 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$

Z obrázku je patrné, že při hodnotě $0 \mu\text{s}$ je funkce v podstatě vypnutá, skutečná dráha svazku sice odpovídá žádané dráze, ale je zde vidět zvýšený úběr materiálu způsobený propalem. Nejvhodnější nastavení parametru pro Galvo1 je $T_L=150 \mu\text{s}$, resp. v jeho blízkosti. V tomto případě se skutečná dráha svazku bez propalu nejvíce blíží požadavku svojí délkou a polohou. Pro všech devět hodnot rychlostí byl výsledek stejný. Proto byl následně proveden podobný test, tentokrát při nastavení $T_L=(140\div 165) \mu\text{s}$. Ukázalo se, že vhodné nastavení parametru timelag pro Galvo1 je následující: $T_L=150 \mu\text{s}$ pro rychlost do $1000 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$; $T_L=155 \mu\text{s}$ pro rychlost $(1000\div 2000) \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ a $T_L=160 \mu\text{s}$ pro rychlost $(2000\div 3000) \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$. Vhodné nastavení parametru timelag pro Galvo2 je následující: $T_L=200 \mu\text{s}$ pro rychlost do $1000 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$; $T_L=205 \mu\text{s}$ pro rychlost $(1000\div 2000) \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$. Byl tak potvrzen předpoklad, že parametr roste s rostoucí skenovací rychlostí. Obecně je dostačující, když je parametr nastavený na jednu hladinu tak, že se konec skutečné dráhy shoduje s požadavkem. Začátek dráhy je možné vyladit pomocí parametru Laser on Shift.

Parametr L_s upravuje otevírání záklopy. Standartně je nastaven na hodnotu $0 \mu\text{s}$. V tomto případě se jeho vliv neprojeví a záklopka se otevře v čase určeném parametrem T_L . Hodnota L_s posouvá otevírání záklopy v čase oproti tomuto okamžiku. Pokud má zápornou hodnotu, záklopka se otevírá před tímto okamžikem a prodlužuje tak skutečnou obrobenu dráhu. Pokud má kladnou hodnotu, záklopka se otevírá se zpožděním a dráhu zkracuje. Byl proveden test

pro určení optimální hodnoty L_s . Bylo vypáleno několik linií, při různém nastavení parametru L_s : od $-20 \mu\text{s}$ do $20 \mu\text{s}$, pro rozsah skenovacích rychlostí od 600 do $3000 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, s rozdílem mezi dvěma testovanými rychlostmi $300 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ pro Galvo1 a od 400 do $2000 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, s krokem $200 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ pro Galvo2 (viz příklad na Obr. 38).

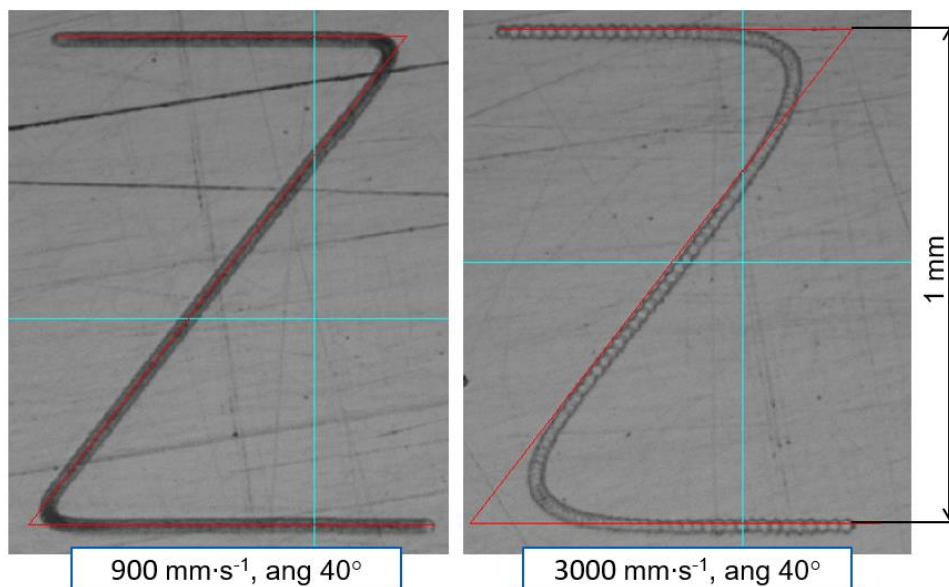


Obr. 38 Test parametru laser on shift pro rozmítací rychlost $900 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$; při hodnotě $T_L=150 \mu\text{s}$

Z obrázku je patrné, že pro kladné hodnoty L_s skutečná dráha mnohem lépe kopíruje požadavek. Nejmenší odchylka délky dráhy a její polohy oproti požadavku byla určena pro $L_s=(5\div 15) \mu\text{s}$ pro Galvo1 i Galvo2. Zpoždění záklopky dané parametrem L_s se na nízké rychlosti ($0\div 1000$) $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ projeví málo. Mnohem větší vliv má toto nastavení při vysoké rychlosti, zde je vhodné pásmo nastavení užší. Pro rychlost svazku ($2000\div 3000$) $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ je $L_s=(8\div 12) \mu\text{s}$. V ideálním případě tak obsluha laserového zařízení nastaví do aktuálního skriptu hodnoty T_L a L_s , jak byly určeny výše a řídicí systém si sám automaticky dopočte potřebné pohyby galvo skenerů a zanesse je do vykonávaného NC kódu. Prakticky tak může obsluha nastavit hodnotu T_L dle požadované rychlosti svazku a následně zkorigovat skutečnou polohu dráhy parametrem L_s (pokud to bude třeba). Tím se zmenší počet požadovaných iterací na vyladění procesu a sníží se nepracovní čas přípravy procesu. Při správném nastavení dosahuje vypálená dráha požadované délky s maximální odchylkou $\pm 20 \mu\text{m}$, odchylka skutečné polohy od žádané je maximálně $\pm 15 \mu\text{m}$. Pro technologii odstranění povlaku z řezného nástroje je tato přesnost dostačující.

V dalším kroku byl prověřen Mód 2. V tomto případě se funkce SkyWriting chová stejně jako při Módu 1, nicméně je schopna propojit fiktivní začátky požadovaných drah (při ZZ). V Módu 2 je možné určit dobu náběhu acc [μs] a dobu doběhu dec [μs]. Takto nastavené hodnoty jsou přesnější, než při automatickém dopočtení v Módu 1. Mód 2 se nejvíce projeví na dráze, která má velké změny směru pohybu. Nicméně i u jednoduchých liniových šrafů se vyplatí použít Mód 2, protože snižuje dobu obrábění (oproti Módu 1). Pomocí obdobných testů s liniovými drahami bylo zjištěno, že pro hodnoty parametrů acc a dec je nejvhodnější použít násobky T_L . Konkrétní hodnoty jsou $acc=(1,5\div 2,5)*T_L$; $dec=(1\div 2)*T_L$.

Dále byla věnována pozornost Módu 3. Zde je přidán parametr úhlový limit ang [$^\circ$]. Limit určuje maximální úhel mezi dvěma napojenými drahami, při kterém se neuplatní princip přidávání drah při ZZ. Napojení těchto drah se pak proloží spline křivkou. Mód 3 je nejvhodnější nastavení funkce SkyWriting pro obrábění složitějších tvarů, popř. vytváření struktur na materiálu. Pro technologii laser stripping nemá příliš velký význam. Pro zjištění vlivu úhlového limitu byl proveden test se složitější požadovanou dráhou svazku pro různé skenovací rychlosti. Dráha měla tvar písmene Z o výšce 1 mm (viz Obr. 39).



Obr. 39 Vizualizace dráhového řízení při Módu 3. Dráha písmene Z o výšce 1 mm, při rozdílných rychlostech a stejném úhlovém limitu

Na obrázku je vidět identická požadovaná dráha písmene Z pro dvě skenovací rychlosti (900 a $3000 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$) při stejném úhlovém limitu $ang=40^\circ$. Jak bylo očekáváno, systém nahradil ostré napojení jednotlivých drah pomocí spline. Je patrné, že při nízké skenovací rychlosti skutečná dráha mnohem lépe kopíruje požadavek než při vysoké skenovací rychlosti. Při rychlosti $3000 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ je napojovací oblouk výrazný a střední sklopená část dráhy je vzdálená od požadované polohy. Taková změna tvaru dráhy je nepřijatelná. V tomto případě by bylo vhodnější úhlový limit snížit, aby se jednotlivé dráhy napojily jako v Módu 2. Také by bylo možné nastavit omezení ryvu, popř zrychlení, které má vliv na velikost obráběného oblouku. Z těchto informací vyplývají poznatky: je třeba správně analyzovat tvar požadované dráhy pro nastavení parametru ang ; a pro obrábění křivek je nevhodné používat vysoké rychlosti svazku. Všechny parametry funkce SkyWriting byly integrovány do řídicího skriptu programu DMC pomocí globálních proměnných.

Z fáze 2 vyplývá, že nastavení parametrů funkce SkyWriting se pohybuje v určitém intervalu v závislosti na maximální dosažitelné rychlosti galvo skenerů. Konkrétně to jsou: $T_L=(150\div 160) \mu\text{s}$; pro Galvo1; $T_L=(200\div 205) \mu\text{s}$; pro Galvo2; $L_S=(5\div 15) \mu\text{s}$, $acc=(1,5\div 2,5)*T_L$, $dec=(1\div 2)*T_L$ pro Galvo1 i Galvo2.

5.3 Fáze 3: Odstranění povlaku

Ve finální fázi experimentální části práce bylo cílem odstranit povlak AlTiN z karbidového substrátu, za použití znalostí získaných v předchozích fázích. Při odstraňování povlaku jsou požadavky na co nejproduktivnější a nejkvalitnější proces, co nejmenší poškození substrátu a co nejmenší ekologický dopad. Z těchto hledisek je žádoucí, aby proces probíhal při největší možné rychlosti svazku. Experiment byl proveden postupně pro všechny tři dostupné harmonické frekvence. Parametry pro laser stripping na povlaku AlTiN jsou v Tab. X.

Tab. X Parametry laserového zařízení pro odstranění povlaku na třech harmonických

Typ laseru	IH (1030 nm)		IIH (515 nm)		IIIH (343 nm)	
Průměr svazku [mm]	0,03		0,03		0,02	
Intenzita energie [$J \cdot cm^{-2}$]	0,21		0,25		0,24	
Překryv pulsů [%]	90		90		90	
Frekvence [kHz]	Rychlost [$mm \cdot s^{-1}$]	Výkon [W]	Rychlost [$mm \cdot s^{-1}$]	Výkon [W]	Rychlost [$mm \cdot s^{-1}$]	Výkon [W]
200	600	0,3	600	0,35	400	0,15
400	1200	0,6	1200	0,7	800	0,3
600	1800	0,9	1800	1,05	1200	0,45
800	2400	1,2	2400	1,4	1600	0,6
1000	3000	1,5	3000	1,75	2000	0,75

Průměr svazku byl konstantní během celého experimentu. Intenzita energie byla zvolena tak, aby byla srovnatelná pro všechny harmonické frekvence, a zároveň zohledňovala určený ablační práh. Při změně frekvence došlo ke snížení energie v pulsu a v důsledku intenzity energie. Aby byla zachována konstantní intenzita energie, bylo třeba při zvýšení frekvence zvýšit i výkon. Překryv pulsů 90 % v obou směrech byl zvolen na základě rešerše technologie laser stripping, kdy se vysoká hodnota ukázala jako nejvhodnější pro úspěšné odstranění povlaku [10] [13]. Výkon pro IIIH je nižší z důvodu menšího průměru svazku pro Galvo2.

Povlak byl odstraněn z plošného vzorku na oblasti tvaru obdélníku. Odstranění bylo provedeno v deseti vrstvách tak, aby bylo možné vidět rozdíl úběru v jednotlivých vrstvách. Povlak byl odstraněn bez zapnuté funkce SkyWriting, s funkcí v Módu 1 a s funkcí v Módu 2. Následně byly obrobené povrchy porovnány mezi sebou.

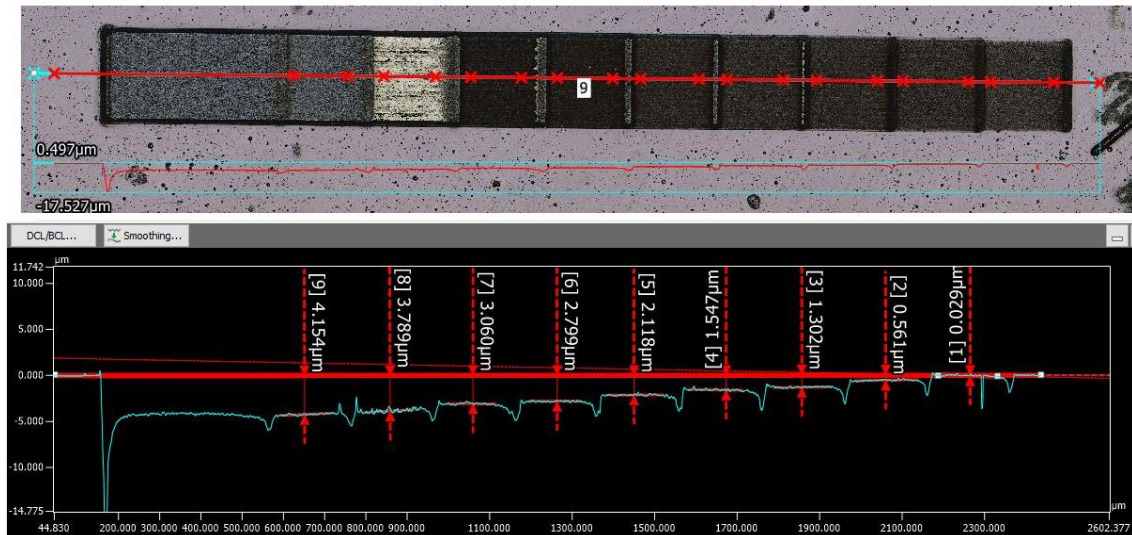
5.3.1 Vliv funkce SkyWriting na odstranění povlaku na IH

Povlak AlTiN byl ze substrátu odstraněn pomocí parametrů uvedených v Tab. X. Konkrétní nastavení komponent laserového zařízení je v Tab. XI.

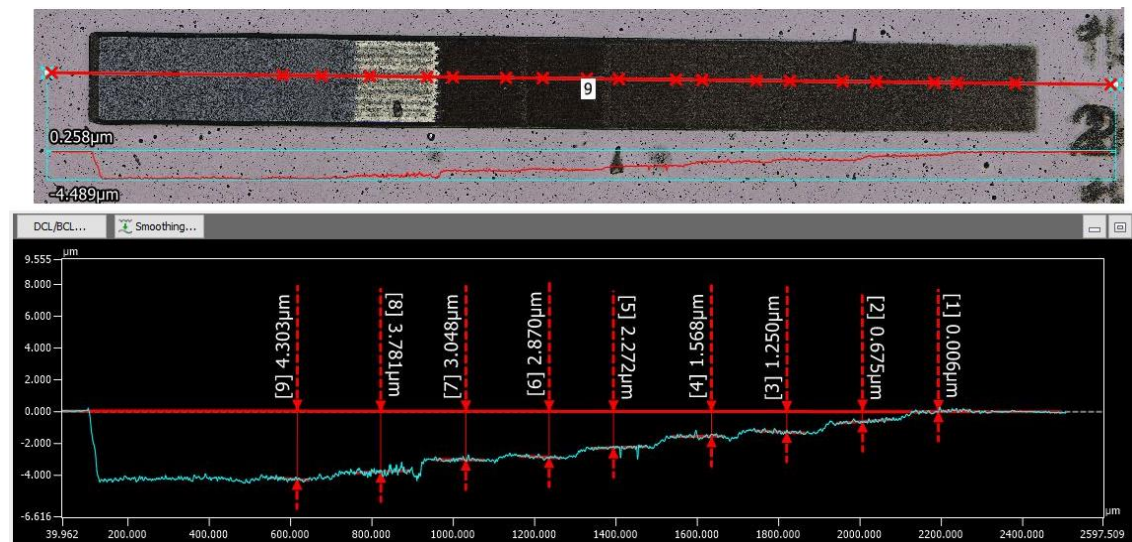
Tab. XI Nastavení attenuátorů a parametrů Timelag a Laser on shift pro odstranění povlaku na IH

IH							
Frekvence [kHz]	Rychlost [mm·s ⁻¹]	Výkon [W]	Att1 [%]	Att2 [%]	Max výkon [W]	T_L [μs]	L_S [μs]
200	600	0,3	10	80	5	150	10
400	1200	0,6	5	27	40	155	10
600	1800	0,9	5	44	40	155	10
800	2400	1,2	5	63	40	160	10
1000	3000	1,5	5	80	40	160	10

Výkon svazku byl nastaven pomocí dvou attenuátorů. Pro výkon 300 mW jsou attenuátory nastaveny na vyšší hodnotu. To je z důvodu aktuálního maximálního výkonu. Laserový systém má od výrobce předpřipravené sety frekvence-maximální výkon. Pro nižší frekvence je tedy z hlediska bezpečnosti omezen výkon. Pro funkci SkyWriting byla nastavena optimální hodnota parametru T_L a střední hodnota parametru L_S . V tomto případě dosahuje skutečná dráha adekvátní přesnosti. V Módu 2 byl parametr určen parametrem $acc=2 \cdot T_L$ a parametr $dec=1,5 \cdot T_L$. Opět se jedná o střední hodnoty, které mají pro laser stripping dostačující přesnost. Z obrobeného povrchu byly následně pomocí optického mikroskopu odečteny hloubky pro jednotlivé vrstvy. Následně byl určen počet vrstev potřebných pro úplné odstranění povlaku N_U [μm], průměrný úběr v jedné vrstvě U_{prum} [μm] a poškození substrátu způsobené v další vrstvě U_{plus} [μm]. Byla poté určena celková odstraněná hloubka U_{celk} [μm]. Z naměřených dat byl dále určen maximální úběr v jedné vrstvě U_{max} [μm] a minimální úběr v jedné vrstvě U_{min} [μm]. Příkladný profil odstraněného povlaku je na Obr. 40 a Obr. 41.



Obr. 40 Profil odstraněného povlaku na IH, rychlosti svazku $600 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, bez funkce SkyWriting



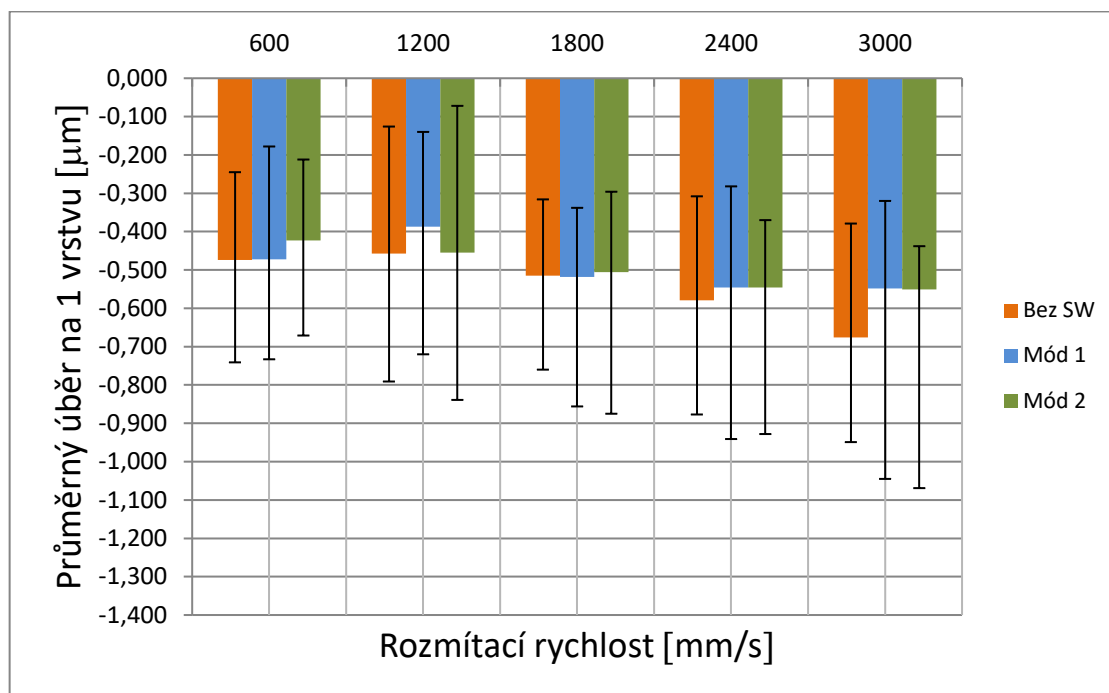
Obr. 41 Profil odstraněného povlaku na IH, rychlosti svazku $600 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, SkyWriting Mód 1

Na Obr. 40 je možno pozorovat propal na začátcích a koncích drah. V tomto případě dosahuje hodnoty $2 \mu\text{m}$ oproti dané vrstvě. Při rychlosti $3000 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ ale dosahuje až $8 \mu\text{m}$. Mezi vrstvami 8 a 9 na Obr. 40 je také vidět přestřík roztaveného materiálu, který po zatuhnutí vytvořil špičku. Na Obr. 41 je profil při použití funkce SkyWriting v Módu 1. Nedochozí zde k propalu a úběr materiálu je mnohem plynulejší. Profil Módu 2 vypadá obdobně. Na obou profilech je možné vidět, že v první vrstvě nedošlo k prakticky žádnému úběru, povlak byl pouze tepelně ovlivněn. V prvních sedmi vrstvách je úběr nedostatečný a hloubka obrobené plochy je v povlaku. Na snímku je možno pozorovat změnu

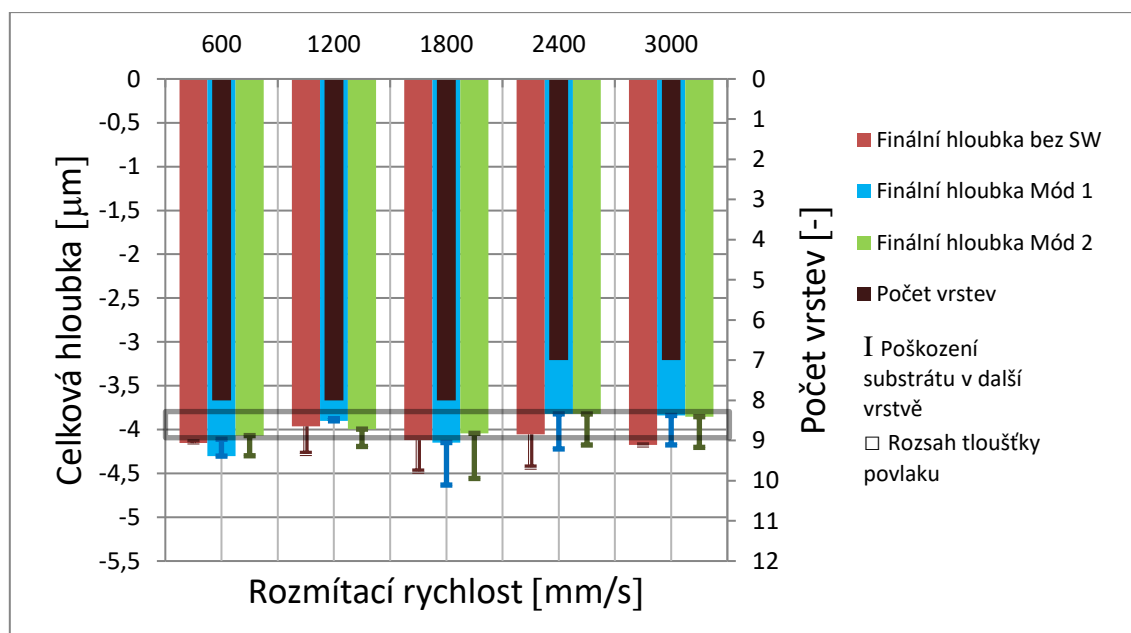
barvy v osmé vrstvě. Od této plochy bylo odražena větší část skenovacího svazku mikroskopu než v předchozích případech. To indikuje změnu materiálu, resp. přechod mezi povlakem a substrátem. Nicméně povlak je úspěšně odstraněn až v deváté vrstvě. Mezi osmou a devátou vrstvou je možno pozorovat menší úběr, který je způsobený odlišnými vlastnostmi povlaku a karbidu. V osmé vrstvě je mnohem větší obsah karbidu než v předchozích vrstvách, proto se materiál chová odlišně při obrábění stejnými parametry. Naměřené výsledky jsou v Tab. XII a byly vyneseny do grafů (viz Obr. 42 a Obr. 43).

Tab. XII Výsledky odstraňování povlaku na IH

Rychlost [mm·s ⁻¹]	Mód funkce SW	U_{max} [μm]	U_{prum} [μm]	U_{min} [μm]	U_{celk} [μm]	N_U [-]	U_{plus} [μm]
600	Bez SW	-0,741	-0,474	-0,245	-4,154	8	-4,14
1200		-0,791	-0,457	-0,126	-3,962	8	-4,272
1800		-0,76	-0,515	-0,316	-4,121	8	-4,474
2400		-0,877	-0,579	-0,308	-4,054	7	-4,428
3000		-0,949	-0,676	-0,379	-4,175	6	-4,175
600	Mód 1	-0,733	-0,473	-0,178	-4,303	8	-4,111
1200		-0,72	-0,387	-0,14	-3,901	8	-3,875
1800		-0,856	-0,519	-0,338	-4,148	8	-4,633
2400		-0,941	-0,546	-0,199	-3,721	7	-4,221
3000		-1,045	-0,548	-0,32	-3,779	7	-4,175
600	Mód 2	-0,671	-0,423	-0,212	-4,069	8	-4,299
1200		-0,839	-0,455	-0,072	-3,995	8	-4,193
1800		-0,875	-0,505	-0,296	-4,043	8	-4,558
2400		-0,928	-0,546	-0,3	-3,752	7	-4,176
3000		-1,069	-0,550	-0,438	-3,779	7	-4,203



Obr. 42 Průměrný úběr na 1 vrstvu při odstraňování povlaku pro IH



Obr. 43 Celková hloubka odstraněné vrstvy povlaku pro IH

Z naměřených hodnot je vidět, že průměrný úběr v jedné vrstvě U_{prum} má velkou nejistotu. Rozdíl minimálního a maximálního úběru v jedné vrstvě se pohybuje od 0,45 μm do 0,73 μm (viz Obr. 42 a Tab. XII). To je pravděpodobně způsobené ohřevem materiálu v jednotlivých vrstvách. Při každé interakci laseru s materiálem se část energie přemění na teplo. Ohřátý povrch poté potřebuje menší množství energie, aby se odpařil. Svazek dodává stejnou

energii v každém pulsu, což způsobí úběr většího objemu. Průměrný úběr se zvyšuje s rostoucí rychlostí svazku. Při zapnutí funkce SkyWriting (v Módu 1 i v Módu 2) je průměrný úběr materiálu srovnatelný nebo menší. Rozptyl úběru v jedné vrstvě je při použití funkce SkyWriting srovnatelný nebo horší.

Povlak AlTiN byl na první harmonické frekvenci odstraněn v osmi vrstvách pro rychlosti 600, 1200 a 1800 mm·s⁻¹. Pro rychlosti 2400 a 3000 mm·s⁻¹ byl povlak odstraněn v 7 vrstvách (viz Obr. 43 a Tab. XII). Kompletní odstranění bylo potvrzeno opticky a pomocí měření hloubky mikroskopem. Pro rychlosti 2400 a 3000 mm·s⁻¹ byla celková hloubka U_{celk} těsně pod hranicí určené tloušťky povlaku, ale nebyly zde pozorovány stopy povlaku. U těchto dvou rychlostí taky došlo ke snížení celkové hloubky při použití funkce SkyWriting. Na nižších rychlostech nebyl pozorován výrazný vliv funkce na celkovou hloubku. Na Obr. 43 je obdélníkem vyznačeno pásmo tloušťky povlaku. Spodní linie obdélníku ukazuje maximální tloušťku povlaku. Pokud celková hloubka dosáhne této linie, je povlak stoprocentně odstraněn. V nejhorším případě je substrát poškozen do hloubky 0,3 μm. Z hlediska kvality procesu je důležitější, že obrobena plocha je v rovině a nejsou na ní například projevy vlnitosti. Dále byla změřena hloubka v následující vrstvě U_{plus} , aby bylo určeno možné poškození substrátu (viz Obr. 43). V průměru bylo ze substrátu odstraněno 0,2 μm, maximálně bylo ze substrátu odstraněno 0,5 μm při rychlosti 1800 mm·s⁻¹. Karbid typu N má odlišné vlastnosti oproti povlaku AlTiN, proto je úběr jiný při stejných parametrech. Pro rychlosti 2400 a 3000 mm·s⁻¹ je přídatný úběr v tolerovaném pásmu tloušťky povlaku. Pro všechny testované rychlosti se průměrné poškození substrátu zvýšilo na 0,3 μm při použití funkce SkyWriting.

Byl odstraněn povlak AlTiN z karbidového substrátu laserovým svazkem o vlnové délce 1030 nm (IH). Při úpravě dráhového řízení pomocí funkce SkyWriting byl odstraněn propal způsobený akcelerací galvo skenerů. Na IH byl při použití funkce nižší průměrný úběr na 1 vrstvu U_{prum} , ale zvýšila se jeho nejistota. Výraznější vliv měla funkce na rychlostech 2400 a 3000 mm·s⁻¹, kde byla kromě průměrného úběru zmenšena i celková odstraněná hloubka U_{celk} , a tedy méně poškozený substrát. Obecně se ale dá říct, že na IH má funkce SkyWriting pozitivní vliv ve všech aspektech na vyšších rychlostech. Na

rychlostech 600,1200 a 1800 mm·s⁻¹ má funkce kladný vliv jen na odstranění propalu, úběr materiálu ponechává stejný a zvyšuje jeho nejistotu.

5.3.2 Vliv funkce SkyWriting na odstranění povlaku na IIH

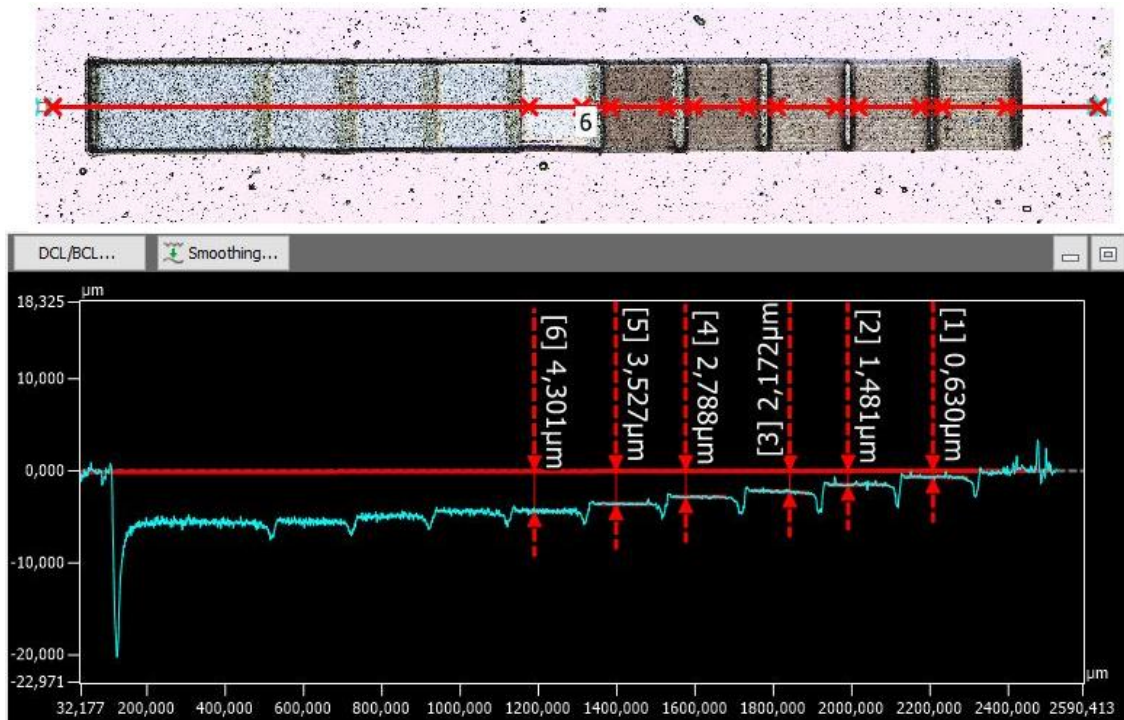
Povlak AlTiN byl ze substrátu odstraněn pomocí parametrů uvedených v Tab.

X. Konkrétní nastavení komponent laserového zařízení pro IIH je v Tab. XIII.

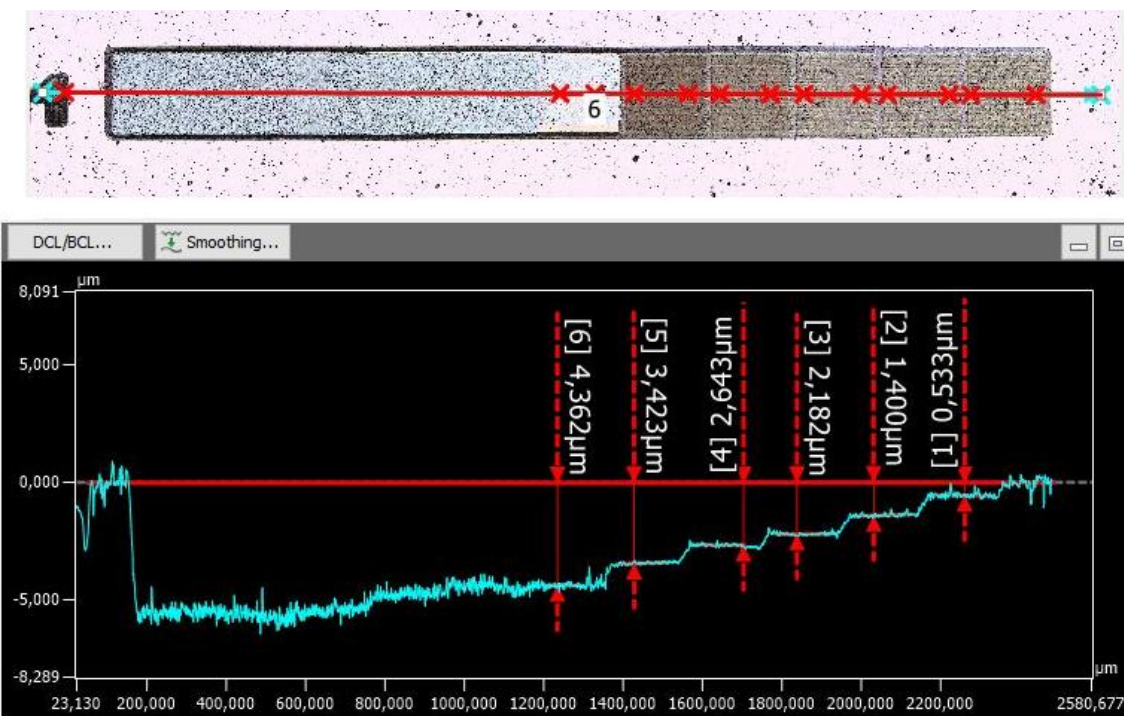
Tab. XIII Nastavení attenuátorů a parametrů Timelag a Laser on shift pro odstranění povlaku na IIH

IIH							
Frekvence [kHz]	Rychlost [mm·s ⁻¹]	Výkon [W]	Att1 [%]	Att2 [%]	Max výkon [W]	T_L [μs]	L_S [μs]
200	600	0,35	40	8	11	150	10
400	1200	0,7	40	25	21	155	10
600	1800	1,05	40	54	21	155	10
800	2400	1,4	40	95	21	160	10
1000	3000	1,75	60	68	21	160	10

Výkon svazku byl nastaven pomocí dvou attenuátorů. Pro funkci SkyWriting byla nastavena optimální hodnota parametru T_L a střední hodnota parametru L_S . V tomto případě dosahuje skutečná dráha adekvátní přesnosti. V Módu 2 byl parametr určen parametr $acc=2 \cdot T_L$ a parametr $dec=1,5 \cdot T_L$. Opět se jedná o střední hodnoty, které mají pro laser stripping dostačující přesnost. Z obrobeného povrchu byly následně pomocí optického mikroskopu odečteny hloubky pro jednotlivé vrstvy, počet vrstev potřebných pro úplné odstranění povlaku N_U , průměrný úběr v jedné vrstvě U_{prum} a poškození substrátu způsobené v další vrstvě U_{plus} . Dále byl z naměřených dat určen maximální (U_{max}) a minimální (U_{min}) úběr v jedné vrstvě. Příkladný profil odstraněného povlaku je na Obr. 44 a Obr. 45.



Obr. 44 Profil odstraněného povlaku na IH, rychlosti svazku $600 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, bez funkce SkyWriting



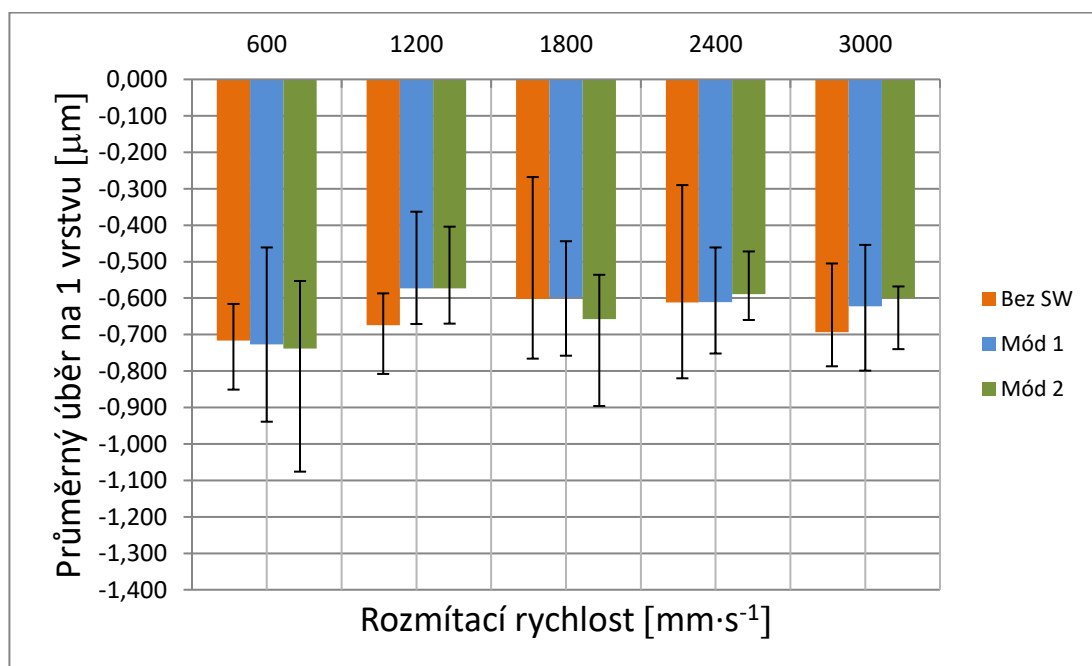
Obr. 45 Profil odstraněného povlaku na IH, rychlosti svazku $600 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, SkyWriting Mód 1

Na Obr. 44 je možno pozorovat propal na začátcích a koncích drah. Velikost propalu oproti dané vrstvě dosahuje $(2\div 7) \mu\text{m}$, roste se zvyšující se rychlostí. Na Obr. 45 je profil při použití funkce SkyWriting v Módu 1. Nedochozí zde

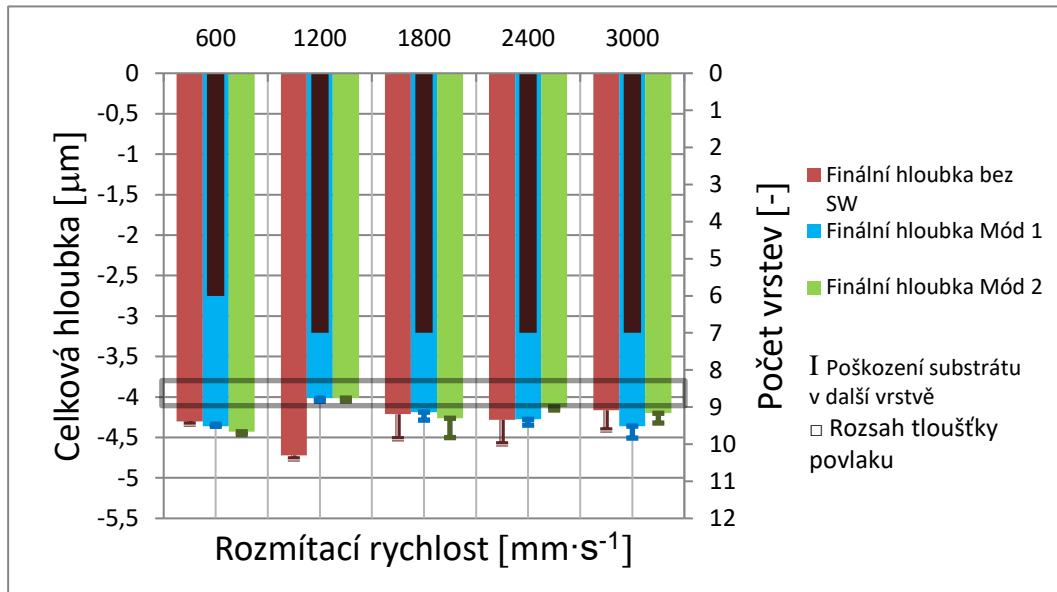
k propalu a úběr materiálu je mnohem plynulejší. Profil Módu 2 vypadá obdobně. Oproti IH je zde úběr již v první vrstvě. Tím je také snížen celkový počet vrstev potřebných pro odstranění povlaku. V prvních pěti vrstvách je úběr nedostatečný a hloubka obrobeneé plochy je v povlaku. Na snímku je možno pozorovat odstranění povlaku v šesté vrstvě, čemuž odpovídá i změřená hloubka U_{celk} . Naměřené výsledky jsou v Tab. XIV a byly vyneseny do grafů (viz Obr. 46 a Obr. 47).

Tab. XIV Výsledky odstraňování povlaku na IIH

Rychlost [mm·s ⁻¹]	Mód funkce SW	U_{max} [μm]	U_{prum} [μm]	U_{min} [μm]	U_{celk} [μm]	N_U [-]	U_{plus} [μm]
600	Bez SW	-0,851	-0,717	-0,616	-4,301	6	-4,334
1200		-0,808	-0,675	-0,587	-4,722	7	-4,765
1800		-0,766	-0,602	-0,268	-4,213	7	-4,516
2400		-0,82	-0,612	-0,29	-4,283	7	-4,579
3000		-0,787	-0,694	-0,505	-4,164	6	-4,407
600	Mód 1	-0,939	-0,727	-0,461	-4,362	6	-4,337
1200		-0,671	-0,574	-0,363	-4,015	7	-4,052
1800		-0,758	-0,598	-0,444	-4,187	7	-4,286
2400		-0,752	-0,611	-0,461	-4,276	7	-4,348
3000		-0,799	-0,623	-0,454	-4,36	7	-4,508
600	Mód 2	-1,076	-0,738	-0,553	-4,43	6	-4,465
1200		-0,67	-0,573	-0,404	-4,014	7	-4,05
1800		-0,896	-0,658	-0,536	-4,263	7	-4,502
2400		-0,66	-0,589	-0,472	-4,123	7	-4,161
3000		-0,74	-0,600	-0,568	-4,201	7	-4,322



Obr. 46 Průměrný úběr na 1 vrstvu při odstraňování povlaku pro IIH



Obr. 47 Celková hloubka odstraněné vrstvy povlaku pro IIH

Průměrný úběr v jedné vrstvě U_{prum} má určitou nejistotu: rozdíl minimálního a maximálního úběru v jedné vrstvě se pohybuje od 0,19 μm do 0,53 μm (viz Obr. 46 a Tab. XIV). Při zapnutí funkce SkyWriting je pro rychlosti 1200, 2400 a 3000 $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ průměrný úběr materiálu srovnatelný nebo menší. Pro rychlosti 600 a 1800 $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ je při SW průměrný úběr srovnatelný nebo horší. Pro všechny rychlosti kromě 600 $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ je nejistota menší při použití funkce SkyWriting. Průměrný úběr je vyšší oproti úběru na IH.

Povlak AlTiN byl na druhé harmonické frekvenci odstraněn v sedmi vrstvách pro všechny rychlosti kromě 600 $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$, kde byl odstraněn v šesti vrstvách. (viz Obr. 47 a Tab. XIV). Kompletní odstranění bylo potvrzeno opticky a pomocí měření hloubky mikroskopem. Pro rychlosti 1200 a 2400 $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ došlo ke snížení celkové hloubky při použití funkce SkyWriting. Na ostatních rychlostech došlo k mírnému zvýšení celkové hloubky. Na Obr. 47 je obdélníkem vyznačeno pásmo tloušťky povlaku. Spodní linie obdélníku ukazuje maximální tloušťku povlaku. Pokud celková hloubka dosáhne této linie, je povlak stoprocentně odstraněn. V nejhorším případě je substrát poškozen do hloubky 0,3 μm . Z hlediska kvality procesu je důležitější, že obrobena plocha je v rovině a nejsou na ní projevy vlnitosti. Pro všechny rychlosti byla celková hloubka v tolerovaném pásmu nebo ho překročila. Dále byla změřena hloubka v následující vrstvě, aby bylo určeno možné poškození substrátu (viz Obr. 47). V průměru bylo ze substrátu odstraněno 0,18 μm , maximálně bylo ze substrátu

odstraněno 0,3 μm při rychlosti 1800 $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$. Pro rychlost 1200 $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ je přídavný úběr v tolerovaném pásmu tloušťky povlaku. Pro všechny testované rychlosti se průměrné poškození substrátu snížilo na 0,06 μm při Módu 1 a na 0,09 μm při Módu 2.

Byl odstraněn povlak AlTiN z karbidového substrátu laserem o vlnové délce 515 nm (IIH). Při úpravě dráhového řízení pomocí funkce SkyWriting byl odstraněn propal způsobený akcelerací galvo skenerů. Na IIH byl při použití funkce převážně nižší průměrný úběr na 1 vrstvu, a také se snížila jeho nejistota. Nejmenší vliv měla funkce na rychlosti 600 $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$, kde byly průměrný úběr, jeho nejistota a celková hloubka mírně navýšeny. Obecně se ale dá říct, že na IIH má funkce SkyWriting pozitivní vliv na odstranění propalu, úběr materiálu, jeho nejistotu a poškození substrátu.

5.3.3 Vliv funkce SkyWriting na odstranění povlaku na IIIH

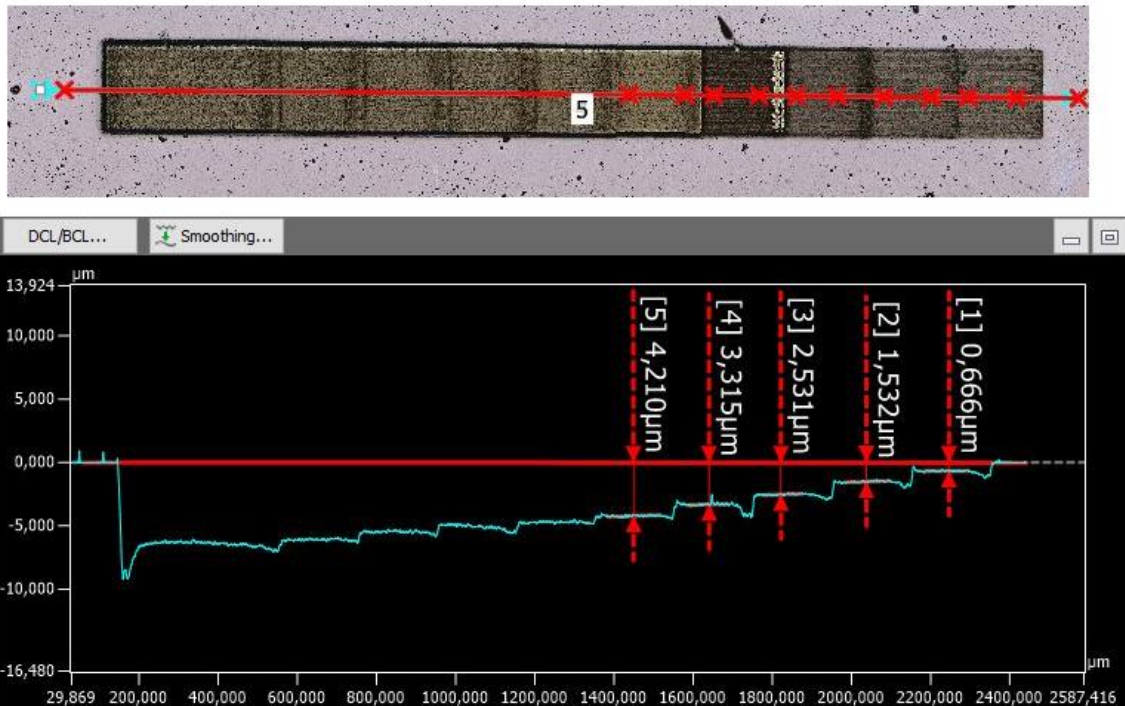
Povlak AlTiN byl ze substrátu odstraněn pomocí parametrů uvedených v Tab. X. Konkrétní nastavení komponent laserového zařízení pro IIIH je v Tab. XV.

Tab. XV Nastavení attenuátorů a parametrů Timelag a Laser on shift pro odstranění povlaku na IIIH

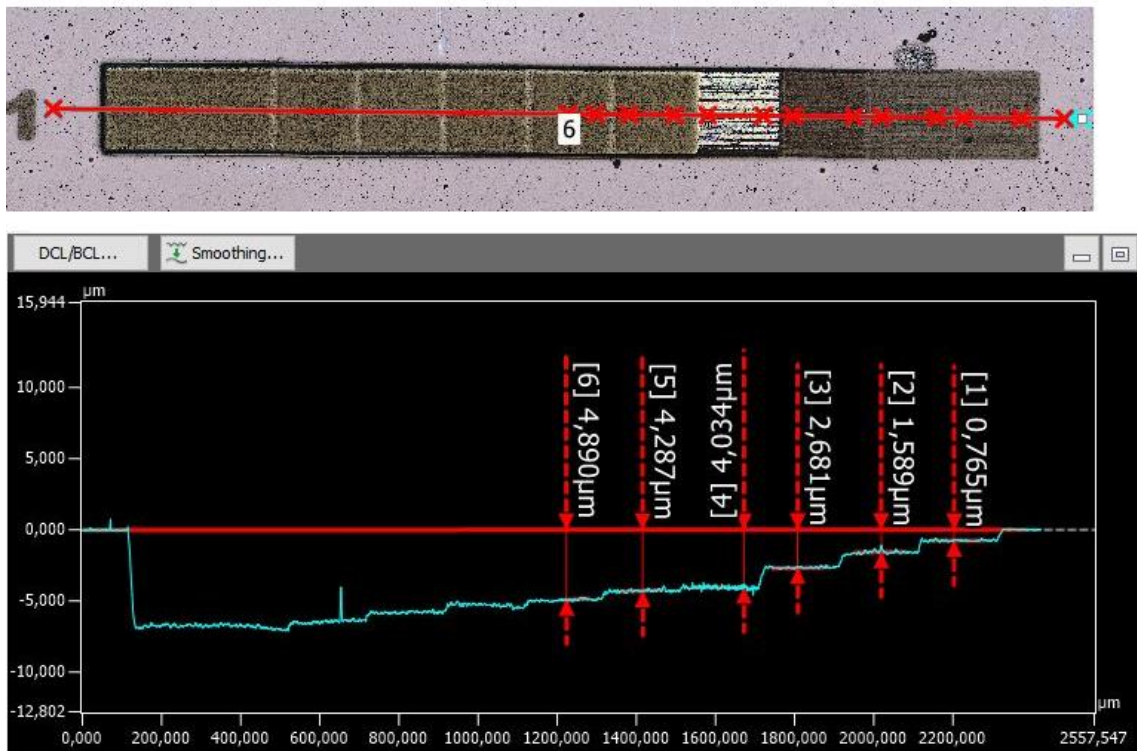
IIIH							
Frekvence [kHz]	Rychlost [$\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$]	Výkon [W]	Att1 [%]	Att2 [%]	Max výkon [W]	T_L [μs]	L_S [μs]
200	400	0,15	60	9	11	205	10
400	800	0,3	60	19	11	205	10
600	1200	0,45	60	59	11	210	10
800	1600	0,6	80	60	11	210	10
1000	2000	0,75	90	84	11	210	10

Výkon svazku byl nastaven pomocí dvou attenuátorů. Pro funkci SkyWriting byla nastavena optimální hodnota parametru T_L a střední hodnota parametru L_S . V tomto případě dosahuje skutečná dráha adekvátní přesnosti. V Módu 2 byl parametr určen parametr $acc=2\cdot T_L$ a parametr $dec=1,5\cdot T_L$. Opět se jedná o střední hodnoty, které mají pro laser stripping dostačující přesnost. Z obrobeného povrchu byly následně pomocí optického mikroskopu odečteny hloubky pro jednotlivé vrstvy, počet vrstev potřebných pro úplné odstranění povlaku, průměrný úběr v jedné vrstvě U_{prum} a poškození substrátu způsobené v další vrstvě U_{plus} . Dále byl z naměřených dat určen maximální (U_{max})

a minimální (U_{min}) úběr v jedné vrstvě Příkladný profil odstraněného povlaku je na Obr. 48 a Obr. 49.



Obr. 48 Profil odstraněného povlaku na IIIH, rychlosti svazku 400 mm·s⁻¹, bez funkce SkyWriting

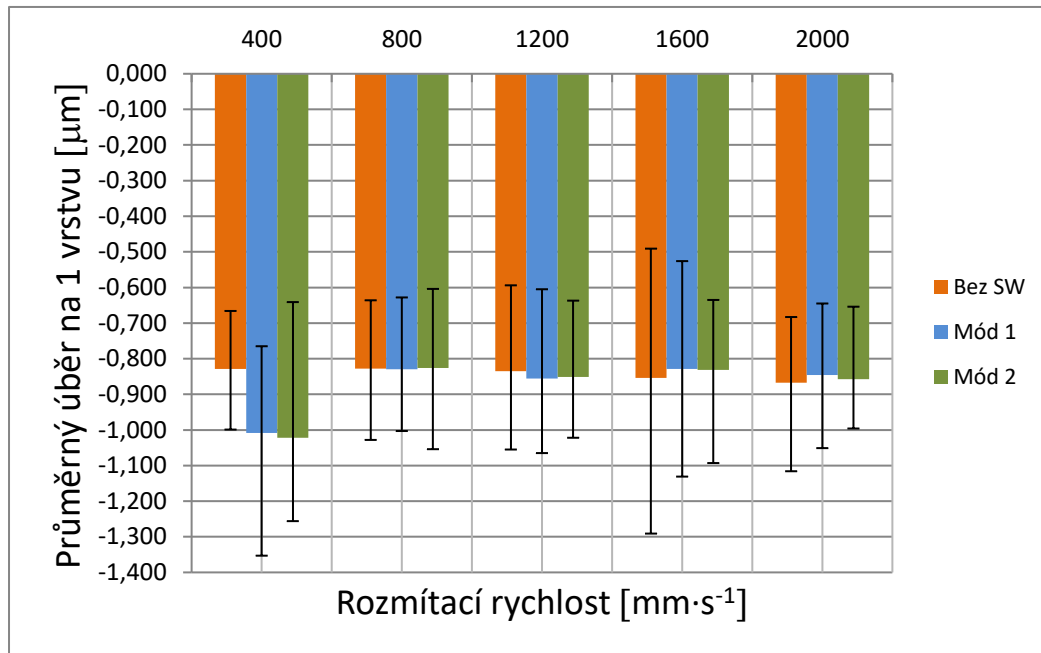


Obr. 49 Profil odstraněného povlaku na IIIH, rychlosti svazku 400 mm·s⁻¹, SkyWriting Mód 1

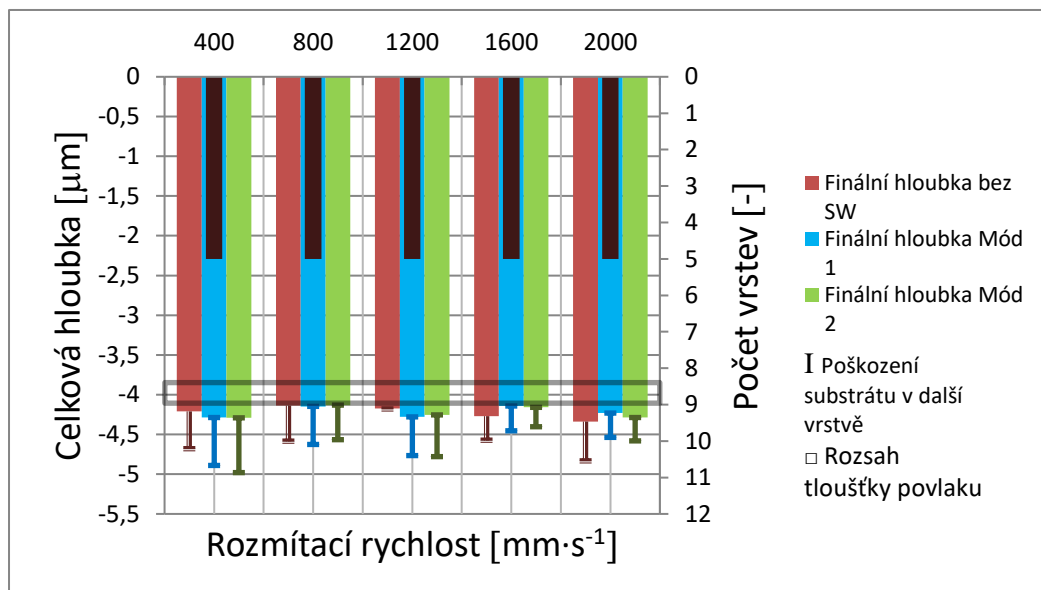
Na Obr. 48 je možno pozorovat propal na začátcích a koncích drah. Velikost propalu oproti dané vrstvě dosahuje $(1\div 5)$ μm , roste se zvyšující se rychlostí. Na Obr. 49 je profil při použití funkce SkyWriting v Módu 1. Nedochozí zde k propalu a úběr materiálu je mnohem plynulejší. Profil Módu 2 vypadá obdobně. Oproti IH je zde úběr již v první vrstvě, stejně jako u IIH. Tím je také snížen celkový počet vrstev potřebných pro odstranění povlaku. V prvních třech vrstvách je úběr nedostatečný a hloubka obrobené plochy je v povlaku. Na snímku je možné pozorovat změnu barvy ve čtvrté vrstvě, způsobenou změnou materiálu. Nicméně povlak je úspěšně odstraněn až v páté vrstvě, čemuž odpovídá i změřená hloubka U_{celk} . Naměřené výsledky jsou v Tab. XVI a byly vyneseny do grafů (viz Obr. 50 a Obr. 51).

Tab. XVI Výsledky odstraňování povlaku na IIIH

Rychlost [mm·s ⁻¹]	Mód funkce SW	U_{max} [μm]	U_{prum} [μm]	U_{min} [μm]	U_{celk} [μm]	N_U [-]	U_{plus} [μm]
400	Bez SW	-0,999	-0,829	-0,666	-4,21	5	-4,679
800		-1,028	-0,827	-0,636	-4,137	5	-4,584
1200		-1,055	-0,835	-0,594	-4,173	5	-4,179
1600		-1,291	-0,854	-0,491	-4,27	5	-4,572
2000		-1,116	-0,868	-0,683	-4,338	5	-4,832
400	Mód 1	-1,353	-1,009	-0,765	-4,287	5	-4,89
800		-1,003	-0,829	-0,628	-4,147	5	-4,626
1200		-1,065	-0,856	-0,605	-4,279	5	-4,766
1600		-1,131	-0,828	-0,526	-4,142	5	-4,454
2000		-1,051	-0,846	-0,645	-4,231	5	-4,537
400	Mód 2	-1,256	-1,022	-0,641	-4,291	5	-4,98
800		-1,054	-0,826	-0,604	-4,131	5	-4,566
1200		-1,022	-0,851	-0,637	-4,254	5	-4,779
1600		-1,093	-0,832	-0,635	-4,159	5	-4,403
2000		-0,996	-0,857	-0,654	-4,287	5	-4,581



Obr. 50 Průměrný úběr na 1 vrstvu při odstraňování povlaku pro IIIH



Obr. 51 Celková hloubka odstraněné vrstvy povlaku pro IIIH

Průměrný úběr v jedné vrstvě U_{prum} má určitou nejistotu: rozdíl minimálního a maximálního úběru v jedné vrstvě se pohybuje od 0,33 μm do 0,8 μm (viz Obr. 50 a Tab. XVI). Při zapnutí funkce SkyWriting je pro rychlosti 800, 1600 a 2000 mm·s⁻¹ průměrný úběr materiálu srovnatelný nebo menší. Pro rychlosti 400 a 1200 mm·s⁻¹ je při SW průměrný úběr srovnatelný nebo horší. Pro všechny rychlosti kromě 400 mm·s⁻¹ je nejistota menší při použití funkce SkyWriting. Průměrný úběr je vyšší oproti úběru na IH i IIH.

Povlak AlTiN byl na třetí harmonické frekvenci odstraněn v pěti vrstvách pro všechny rychlosti (viz Obr. 51 a Tab. XVI). Kompletní odstranění bylo potvrzeno opticky a pomocí měření hloubky mikroskopem. Pro rychlosti 1600 a 2000 mm·s⁻¹ došlo ke snížení celkové hloubky U_{celk} při použití funkce SkyWriting. Pro rychlosti 400 a 1200 mm·s⁻¹ došlo ke zvýšení celkové hloubky při použití funkce SkyWriting. Pro rychlost 800 mm·s⁻¹ nedošlo ke změně celkové hloubky. Na Obr. 51 je obdélníkem vyznačeno pásmo tloušťky povlaku. Spodní linie obdélníku ukazuje maximální tloušťku povlaku. Pokud celková hloubka dosáhne této linie, je povlak stoprocentně odstraněn. Pro všechny rychlosti byla celková hloubka na spodní hranici pásma nebo ho překročila. Dále byla změřena hloubka v následující vrstvě U_{plus} , aby bylo určeno možné poškození substrátu (viz Obr. 51). V průměru bylo ze substrátu odstraněno 0,35 μm, maximálně bylo ze substrátu odstraněno 0,5 μm při rychlosti 2000 mm·s⁻¹. Pro rychlosti 1600 a 2000 mm·s⁻¹ se průměrné poškození substrátu snížilo na 0,28 μm při použití funkce SkyWriting. Pro ostatní rychlosti se průměrné poškození substrátu zvýšilo na 0,55 μm při použití funkce SkyWriting.

Byl odstraněn povlak AlTiN z karbidového substrátu laserem o vlnové délce 343 nm (IIIH). Při úpravě dráhového řízení pomocí funkce SkyWriting byl odstraněn propal způsobený akcelerací galvo skenerů. Na IIIH byl při použití funkce převážně nižší průměrný úběr na jednu vrstvu U_{prum} pro rychlosti 1600 a 2000 mm·s⁻¹. Pro rychlosti vyšší než 400 mm·s⁻¹ se snížila nejistota průměrného úběru. Nejmenší vliv měla funkce na rychlosti 400 mm·s⁻¹, kde byly průměrný úběr, jeho nejistota a celková hloubka navýšeny. Obecně se ale dá říct, že na IIIH má funkce SkyWriting pozitivní vliv na odstranění propalu, úběr materiálu, jeho nejistotu a poškození substrátu při vysokých rychlostech.

5.4 Shrnutí výsledků experimentu

Byly provedeny tři fáze experimentu, ve kterých bylo nejprve určeno vhodné nastavení laserového systému MASTER1, a následně byl odstraněn povlak AlTiN z karbidového substrátu.

V první fázi experimentu byl určen ablační práh F_{th} pro tři harmonické frekvence laseru a při rozdílném počtu pulsů. Jako neoptimálnější byl zvolen ablační práh

pro 10 pulsů v jednom bodě. Tento počet pulsů je jednoduše dosažitelný pomocí nastavení překryvu 90 %. Naměřené a v experimentu použité hodnoty ablačních prahů jsou v Tab. XVII.

Tab. XVII Naměřené hodnoty ablačních prahů pro 10 pulsů a jejich odpovídající výkon

Vlnová délka [nm]	Ablační práh F_{th} [J·cm ⁻²]	Průměr svazku D [μm]	Odpovídající výkon P [mW]
1030 (IH)	0,121	30	85
515 (IIH)	0,260	30	175
343 (IIIH)	0,212	20	75

Dále byla pomocí úběru v několika vrstvách zjištěna tloušťka povlaku. Povlak Al55Ti45N má tloušťku (3,8÷4,1) μm.

Ve druhé fázi byla prověřena funkce SkyWriting. Testy spočívaly ve vypálení dráhy o délce 1 mm při různých nastaveních funkce. Byla sledována celková délka skutečné dráhy a její polohová odchylka od požadované polohy. Bylo nalezeno optimální nastavení funkce pro obě galvo hlavy. Nastavení se liší, protože skenovací hlavy mají odlišné maximální rychlosti. Výsledné hodnoty druhé fáze jsou v Tab. XVIII.

Tab. XVIII Optimální nastavení parametrů funkce SkyWriting pro obě skenovací hlavy

	Galvo1	Galvo2
Timelag T_L [μs]	150÷160	200÷205
Laser on shift L_S [μs]	5÷15	5÷15
Náběh acc [μs]	(1,5÷2,5)* T_L	(1÷2)* T_L
Doběh dec [μs]	(1,5÷2,5)* T_L	(1÷2)* T_L

Ve třetí fázi byl odstraněn povlak AlTiN ze substrátu. Byl porovnán proces odstraňování povlaku bez kompenzace propalu a s kompenzací pomocí funkce SkyWriting. Odstranění proběhlo v několika vrstvách. Na IH je celkový průměrný úběr $U_{cp} = -0,54_{-0,28}^{+0,26}$ μm a při použití funkce SkyWriting v Módu 1 je $U_{cp} = -0,49_{-0,24}^{+0,36}$ μm. Byl snížen celkový průměrný úběr na vrstvu, ale byla zvýšena jeho nejistota. Povlak byl odstraněn v 7-8 vrstvách. Na IIH je celkový průměrný úběr $U_{cp} = -0,66_{-0,21}^{+0,14}$ μm a při použití funkce SkyWriting v Módu 1 je $U_{cp} = -0,63_{-0,18}^{+0,15}$ μm. Byl snížen celkový průměrný úběr na vrstvu a byla mírně snížena jeho nejistota. Povlak byl odstraněn v 6-7 vrstvách. Na IIIH je celkový průměrný úběr $U_{cp} = -0,84_{-0,23}^{+0,26}$ μm a při použití funkce SkyWriting v Módu 1 je $U_{cp} = -0,88_{-0,24}^{+0,25}$ μm. Byl snížen celkový průměrný úběr na vrstvu a nejistota

nebyla výrazně ovlivněna. Povlak byl odstraněn v 5 vrstvách. Všechny výsledky jsou v Tab. XIX.

Tab. XIX Výsledky odstranění povlaku bez funkce a se zapnutou funkcí SkyWriting na třech harmonických frekvencích

Rychlost [mm·s ⁻¹]	Mód funkce SW	IH			IIH		
		U_{prum} [μm]	U_{celk} [μm]	N_U [-]	U_{prum} [μm]	U_{celk} [μm]	N_U [-]
600	Bez SW	-0,474 ^{+0,23} _{-0,27}	-4,154	8	-0,717 ^{+0,1} _{-0,13}	-4,301	6
1200		-0,457 ^{+0,33} _{-0,33}	-3,962	8	-0,675 ^{+0,09} _{-0,13}	-4,722	7
1800		-0,515 ^{+0,2} _{-0,24}	-4,121	8	-0,602 ^{+0,33} _{-0,16}	-4,213	7
2400		-0,579 ^{+0,27} _{-0,29}	-4,054	7	-0,612 ^{+0,32} _{-0,21}	-4,283	7
3000		-0,676 ^{+0,3} _{-0,27}	-4,175	6	-0,694 ^{+0,19} _{-0,09}	-4,164	6
600	Mód 1	-0,473 ^{+0,29} _{-0,26}	-4,303	8	-0,727 ^{+0,26} _{-0,21}	-4,362	6
1200		-0,387 ^{+0,25} _{-0,33}	-3,901	8	-0,574 ^{+0,21} _{-0,1}	-4,015	7
1800		-0,519 ^{+0,18} _{-0,33}	-4,148	8	-0,598 ^{+0,15} _{-0,16}	-4,187	7
2400		-0,546 ^{+0,26} _{-0,4}	-3,721	7	-0,611 ^{+0,15} _{-0,14}	-4,276	7
3000		-0,548 ^{+0,23} _{-0,5}	-3,779	7	-0,623 ^{+0,17} _{-0,18}	-4,36	7
600	Mód 2	-0,423 ^{+0,21} _{-0,25}	-4,069	8	-0,738 ^{+0,19} _{-0,34}	-4,43	6
1200		-0,455 ^{+0,38} _{-0,38}	-3,995	8	-0,573 ^{+0,17} _{-0,1}	-4,014	7
1800		-0,505 ^{+0,21} _{-0,37}	-4,043	8	-0,658 ^{+0,12} _{-0,24}	-4,263	7
2400		-0,546 ^{+0,18} _{-0,38}	-3,752	7	-0,589 ^{+0,12} _{-0,07}	-4,123	7
3000		-0,550 ^{+0,11} _{-0,51}	-3,779	7	-0,600 ^{+0,03} _{-0,14}	-4,201	7
		IIIH					
400	Bez SW	-0,829 ^{+0,16} _{-0,17}	-4,21	5			
800		-0,827 ^{+0,19} _{-0,2}	-4,137	5			
1200		-0,835 ^{+0,24} _{-0,22}	-4,173	5			
1600		-0,854 ^{+0,36} _{-0,44}	-4,27	5			
2000		-0,868 ^{+0,18} _{-0,25}	-4,338	5			
400	Mód 1	-1,009 ^{+0,24} _{-0,34}	-4,287	5			
800		-0,829 ^{+0,2} _{-0,17}	-4,147	5			
1200		-0,856 ^{+0,25} _{-0,21}	-4,279	5			
1600		-0,828 ^{+0,3} _{-0,3}	-4,142	5			
2000		-0,846 ^{+0,2} _{-0,2}	-4,231	5			
400	Mód 2	-1,022 ^{+0,4} _{-0,23}	-4,291	5			
800		-0,826 ^{+0,22} _{-0,23}	-4,131	5			
1200		-0,851 ^{+0,21} _{-0,17}	-4,254	5			
1600		-0,832 ^{+0,19} _{-0,26}	-4,159	5			
2000		-0,857 ^{+0,2} _{-0,14}	-4,287	5			

6 Závěr

Tato diplomová práce se zabývá problematikou odstraňování ochranného povlaku AlTiN z karbidového substrátu laserem pro tři různé vlnové délky. Je zde popsán princip dráhového řízení svazku a zásahu, který byl do řízení proveden. Je zde zhodnocen vliv zásahu pomocí funkce SkyWriting na pohyb svazku a na odstranění povlaku pro různé rychlosti svazku.

V teoretické části jsou popsány klíčové vlastnosti laserového svazku: jeho vlnová charakteristika, kvalita, intenzita energie a její rozložení. Byly vysvětleny mechanismy ablace v závislosti na době trvání pulsu a vlnové délce. Byla sestavena a popsána metodika technologie laser stripping, konkrétně postup zjištění minimálního potřebného množství energie (ablační práh) a postup zjištění tloušťky povlaku pomocí úběru v několika vrstvách. Poté byla provedena rešerše aktuálního stavu technologie. Bylo zjištěno, že odstraněním povlaku z řezného nástroje laserem a depozicí nového povlaku není snížena kvalita obrobeného povrchu, ale je snížena životnost nástroje v řezu.

Následně byl proveden průzkum dostupných laserových systémů. Pro technologii laser stripping jsou vhodné laserové zdroje vláknové, excimerové a pevnolátkové (např. Nd:YAG), které jsou výrobci doporučeny pro laserové gravírování, strukturování a čištění. Dále byla věnována pozornost klíčovým komponentám pro úpravu svazku v optické cestě. V následujícím kroku byl proveden rozbor kinematických struktur laserových systémů. Laserový systém může mít až tři translační osy a až dvě rotační osy, v případě umístění na robotické rameno až šest rotačních os. Množství a rozložení os na stroji udává možnosti laserového obrábění. Limitní pohyby strojů jsou dané velikostí průměru svazku, opakovací frekvencí a dynamickými vlastnostmi pohyblivých komponent.

Praktická část práce byla provedena na pětiosém (resp. sedmiosém) zařízení MASTER1. V první fázi experimentální části byly určeny ablační prahy povlaku AlTiN a jeho tloušťka, a také optimální parametry pro jeho odstranění daným laserem. Ve druhé fázi experimentální části byl prozkoumán princip pohybu svazku při rozmítání galvo skenerem. Kvůli akceleraci a deceleraci svazku je způsoben na začátku a na konci dráhy nežádoucí propal. Tento efekt je možné

kompenzovat vhodným zásahem do řízení galvo skenerů. V této práci byla kompenzace provedena pomocí funkce SkyWriting, která přidává k dráze náběhy a doběhy při zavřené záklopce. Byl prověřen rozsah parametrů funkce SkyWriting na intervalu skenovacích rychlostí svazku. Nastavení se odvíjí od skenovací rychlosti. Použitím funkce SkyWriting je odstraněn propal. Skutečná ablovaná dráha při použití funkce má dostatečnou přesnost. Ve třetí fázi byl odstraněn povlak AlTiN z karbidového substrátu pomocí tří harmonických frekvencí. Byl zhodnocen vliv funkce SkyWriting na odstranění povlaku.

V této diplomové práci byl demonstrován zásah do řízení pohybu laserového svazku použitím pokročilé funkce SkyWriting. Funkce umožňuje odstranit nežádoucí propal způsobený akcelerací galvo skenerů. Nejvyšší vliv na odstranění povlaku má funkce na vyšších rychlostech ($2000\div 3000$) $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$, kde byla v určitých případech nejistota průměrného úběru v jedné vrstvě snížena z $\pm 0,4 \mu\text{m}$ na $\pm 0,22 \mu\text{m}$. Díky tomu bylo dosaženo většího porozumění procesu laserového obrábění a je možný lepší odhad výsledku obrábění na vyšších rychlostech. To je žádoucí z pohledu trendu zvyšování produktivity a efektivity obrábění laserem.

Seznamy

Seznam použité literatury

- [1] BUCHFINK, Gabriela. *The Laser As a Tool*. Německo: Vogel Buchverlag Wurzburg, 2007, ISBN 978-3834330727.
- [2] TOBOLA, D., I. WRÓNSKA, K. CZECHOWSKI, A. ŁĘTOCHA a T. MILLER. The effects of the coating stripping process on regenerated tool cutting edges. *Journal of achievements in materials and manufacturing engineering* [online]. 2013, 61(2), 294-301 [cit. 2020-11-17]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/265876785_The_effects_of_the_coating_stripping_process_on_regenerated_tool_cutting_edges
- [3] NĚNIČKA, Jakub. *ODSTRAŇOVÁNÍ PŮVODNÍCH POVLAKŮ ŘEZNÝCH NÁSTROJŮ PŘED NOVÝM POVLAKOVÁNÍM*. Brno, 2008. Diplomová práce. VUT v Brně.
- [4] HAJNOVÁ, Anna. *Diagnostika laserových svazků*. Olomouc, 2010. Diplomová práce. Přírodovědecká fakulta Univerzity Palackého v Olomouci. Vedoucí práce Prof. RNDr. Zdeněk Bouchal, Dr.
- [5] VRBOVÁ, M., H. JELÍNKOVÁ a P. GAVRILOV. *Úvod do laserové techniky*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1998.
- [6] *RP photonics: Encyclopedia* [online]. Německo, 2020 [cit. 2020-11-29]. Dostupné z: <https://www.rp-photonics.com/encyclopedia.html>
- [7] *Edmund optics: Knowledge center* [online]. USA, 2020 [cit. 2020-11-29]. Dostupné z: <https://www.edmundoptics.com/knowledge-center/#!/&CategoryId=112>
- [8] ČERMÁK, Adam. *LASER v procesech mikroobrábění monolitních rezných nástrojů*. Plzeň, 2017. Disertační práce. Západočeská Univerzita v Plzni. Vedoucí práce Ing. Pavel Kožmín, Ph.D.
- [9] T. LONG SEE, T. LI, D. CHANTZIS, R. MARIMUTHU, I. METSIOS a M. ANTAR. *Ultraviolet-Diode Pump Solid State Laser Removal of Titanium Aluminium Nitride Coating from Tungsten Carbide Substrate*. *Lasers in Manufacturing and materials processing*. [online]. 2017,(4) , 93-107 [cit. 2020-11-17]. DOI: 10.1016/j.optlastec.2009.04.003. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/318432297_Ultraviolet-Diode_Pump_Solid_State_Laser_Removal_of_Titanium_Aluminium_Nitride_Coating_from_Tungsten_Carbide_Substrate
- [10] MARIMUTHU, S., D. WHITEHEAD, P. MATIVENGA, L. LI a K.E. COOKE. *Excimer laser decoating of chromium titanium aluminium nitride to facilitate re-use of cutting tools* [online]. 2009, (41), 938-944 [cit. 2020-11-17]. DOI: 10.1016/j.optlastec.2009.04.003. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/229371674_Excimer_laser_decoating_of_chromium_titanium_aluminium_nitride_to_facilitate_re-use_of_cutting_tools
- [11] RAZAB, Mohammad K.A.A., An'amt M. NOOR, Mohamad S. JAAFAR a Kolektiv. A review of incorporating Nd:YAG laser cleaning principal in automotive industry. *Journal of radiation reserch and applied sciences* [online]. 2018, 2018, 11(4), 393-402 [cit. 2020-11-29]. Dostupné z: [doi:https://doi.org/10.1016/j.jrras.2018.08.002](https://doi.org/10.1016/j.jrras.2018.08.002)
- [12] LONG SEE, Tian, Ioannis METSIOS, Mohammad ANTAR a Marimuthu SUNDAR. Feasibility study and demonstration of cleaning with laser

- adaptively by novel use of sensors. *Procedia CIRP* [online]. 2018, 2018, **74**, 376-380 [cit. 2020-11-29]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.08.146>
- [13] MARIMUTHU, S., A.M. KAMARA, D. WHITEHEAD, P. MATIVEGA, L. LI, S. YANG a K. COOKE. Laser stripping of TiAlN coating to facilitate reuse of cutting tools. *Journal of Engineering Manufacture* [online - closed access]. 2011, **225**(10), 1851-1862 [cit. 2020-11-17]. Dostupné z: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0954405411414313>
doi:10.1177/0954405411414313
- [14] MARIMUTHU, S., A.M. KAMARA, D. WHITEHEAD, P. MATIVEGA, L. LI a M.F. RAJEMI. Laser Surface Cleaning: Removal of Hard Thin Ceramic Coatings. *Laser Technology: Applications in Adhesion and Related Areas* [online - closed access]. 2018, , 325-378 [cit. 2020-11-17]. Dostupné z: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/9781119185031.ch9>
doi:10.1002/9781119185031.ch9
- [15] HU, Ch., G. HE, J. CHEN, Z. FANG, Z. YANG a Z. ZHANG. Research on Cleaning Mechanism of Anti-Erosion Coating Based on Thermal and Force Effects of Laser Shock. *Coatings* [online]. 2020, **2020**(10), 1-15 [cit. 2020-11-17]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/342973084_Research_on_Cleaning_Mechanism_of_Anti-Erosion_Coating_Based_on_Thermal_and_Force_Effects_of_Laser_Shock doi:10.3390/coatings10070683
- [16] RAGUSICH, A, M. MEUNIER, G. TAILLON, L. MARTINU a J.E. KLEMBERG-SAPIEHA. Selective pulsed laser stripping of TiAlN erosion-resistant coatings: Effect of wavelength and pulse duration. *Surface and coatings technology* [online]. 2013, 2013(232), 758-766 [cit. 2020-11-17]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2013.06.092>
- [17] LEITZ, Karl-Heinz, Benjamin REDLINGSHÖFER, Yvonne REG, Andreas OTTO a Michael SCHMIDT. Metal Ablation with Short and Ultrashort Laser Pulses. *Physics Procedia* [online]. 2011, **12**(230-238), 1-10 [cit. 2020-03-20]. DOI: 10.1016/j.phpro.2011.03.128. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/251709713_Metal_Ablation_wit h Short and Ultrashort Laser Pulses](https://www.researchgate.net/publication/251709713_Metal_Ablation_with_Short_and_Ultrashort_Laser_Pulses)
- [18] SANNER, Nicolas, Olivier UTÉZA, Benoît BUSSIERE, G. COUSTILLIER, A. LERAY, Tatiana ITINA a D.E. ZEITOUN. Measurement of femtosecond laser-induced damage and ablation thresholds in dielectrics. *Applied physic A* [online]. 2008, **2009**(1), 1-10 [cit. 2020-03-27]. DOI: 10.1007/s00339-009-5077-6. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/226876022_Measurement_of_femtosecond_laser-induced_damage_and_ablation_thresholds_in_dielectrics
- [19] JAEGGI, B., B. NEUENSCHWANDER, M. SCHMID, M. MURALT, J. ZUERCHER a U. HUNZIKER. Influence of the Pulse Duration in the ps-Regime on the Ablation Efficiency of Metals. *Physics Procedia* [online]. 2011, 2011, **12**, 164-171 [cit. 2020-11-29]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1875389211001970>
doi:10.1016/j.phpro.2011.03.118

- [20] NEUENSCHWANDER, B., B. JAEGII, M. SCHMID, U. HUNZIKER a G. HENNIG. Surface structuring with ultra-short laser pulses: Basics, limitations and needs for high throughput. *Physics Procedia* [online]. 2014, 2014, **56**, 1047-1058 [cit. 2020-11-29]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S187538921400162X> doi:10.1016/j.phpro.2014.08.017
- [21] ASSURIN, S.R., P. MATIVENGA, F. RAJAB, K. COOKE a S. FIELD. Laser de-coating of hard DLC coatings from tungsten carbide cutting tool. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers: Part B: Journal of Engineering manufacture*. 2020, 2020, **235**(1-2), 13-22. DOI:10.1177/0954405420962389
- [22] KONONENKO, T.V., S.V. GARNOV, P.M. PIMENOV, V.I. KONOVA, V. ROMANO, B. BORSOS a H.P. WEBER. Laser ablation and micropatterning of thin TiN coatings. *Applied Physics A: Materials Science and Processing* [online]. 2000, 2000(71), 627-631 [cit. 2020-12-14]. Dostupné z: doi:10.1007/s003390000572
- [23] Thorlabs Tutorial. *Thorlabs.com* [online]. [cit. 2020-11-17]. Dostupné z: <https://www.thorlabs.com/>
- [24] *SPI lasers: redEnergy Pulsed laser* [online]. 2020 [cit. 2020-12-20]. Dostupné z: <https://www.spilasers.com/industrial-fiber-lasers/redenergy-g4/>
- [25] *IPG Photonics: Lasers* [online]. 2020 [cit. 2020-12-20]. Dostupné z: <https://www.ipgphotonics.com/en/products/lasers>
- [26] *Coherent: Laser applications* [online]. 2020 [cit. 2020-12-20]. Dostupné z: <https://www.coherent.com/applications>
- [27] *LightConversion: femtosecond lasers* [online]. 2021 [cit. 2021-01-25]. Dostupné z: <http://lightcon.com>
- [28] *AmsTechnologies - LightMachinery: Laser and Light sources* [online]. 2020 [cit. 2020-12-20]. Dostupné z: <https://www.amstechnologies-webshop.com/Medicom: Popisovací lasery> [online]. 2020 [cit. 2020-12-20]. Dostupné z: <https://www.medicom.cz/prumyslove-lasery-katalog/produkty/>
- [29] *Vortex optical control: Products* [online]. Leicestershire, Velká Británie, 2020 [cit. 2021-03-11]. Dostupné z: <https://vortexopticalcoatings.co.uk/>
- [30] LIAO, W, Ch. ZHANG, X. SUN, L. ZHANG a X. YUAN. Full Aperture CO₂ Laser Process to Improve Laser Damage Resistance of Fused Silica Optical Surface. *Advances in Condensed Matter Physics* [online]. 2014, 2014, (12), 1-5 [cit. 2021-01-28]. doi:10.1155/2014/676108
- [31] *Scanlab: innovations for industry* [online]. 2021 [cit. 2021-03-11]. Dostupné z: <https://www.scanlab.de/en>
- [32] DUMA, V.-F., P. TANKAM, J. HUANG, J. WON a J.P. ROLLAND. Optimization of galvanometer scanning for optical coherence tomography. *Applied Optics* [online]. 2015, 54(17), 5495-5507 [cit. 2021-03-15]. Dostupné z: doi:10.1364/AO.54.005495
- [33] *Cambridge technology: Galvanometer* [online]. 2021 [cit. 2021-03-11]. Dostupné z: <https://www.cambridgetechnology.com/laser-beam-technology>

- [34] DE LOOR, R. Polygon Scanner System for Ultra Short Pulsed Laser Micro-Machining Applications. *Physics Procedia* [online]. (41), 544-551 [cit. 2020-11-17]. doi:10.1016/j.phpro.2013.03.114
- [35] *Elas: Laser solutions for science and industry* [online]. Vilnius, Litva, 2020 [cit. 2021-03-11]. Dostupné z: <https://e-lasers.com>
- [36] *Narran: Katalog produktů* [online]. 2020 [cit. 2020-12-20]. Dostupné z: <https://narran.cz/katalog-laseru-a-produktu/>
- [37] *Physik Instrumente: Laser Material Processing* [online]. 2020 [cit. 2020-12-20]. Dostupné z: https://automation.physikinstrumente.com/en/laser-processing/?gclid=CjwKCAiAt9z-BRBCEiwA_bWv-Dbl2TUrXHMWUui08QioBM_fwZFM3WT2z7X5m5tneuD4gYVqL7KH5hoCX-MQAvD_BwE
- [38] *Trumpf: Stroje a systémy* [online]. Praha [cit. 2021-01-08]. Dostupné z: https://www.trumpf.com/cs_CZ/produkty/stroje-systemy/
- [39] *LASCAM: Produkty* [online]. Praha [cit. 2021-01-09]. Dostupné z: <https://www.lascam.cz/home/>
- [40] *Photonics: Motion Control Solutions for High-Precision, Large-Field Laser Micromachining* [online]. Pittsfield, USA [cit. 2021-01-09]. Dostupné z: https://www.photonics.com/Articles/Motion_Control_Solutions_for_High-Precision/a65146
- [41] POTHEN, M., K. WINANDS a F. KLOCKE. Compensation of scanner based inertia for laser structuring processes. *Journal of laser applications* [online]. 2017, **29**(1) [cit. 2021-03-18]. Dostupné z: doi:doi.org/10.2351/1.4974906
- [42] *Installation and Operation RTC5 PCI Board for Real Time Control of Scan Heads and Lasers: manuál*. SCANLAB, 2017
- [43] COMANNS, P., K. WINANDS, M. POTHEN, R.A. BOTT, H. WAGNER a W. BAUMGATNER. The Texas horned lizard as model for robust capillary structures for passive directional transport of cooling lubricants. *Proceedings of SPIE* [online]. Nevada. U.S., 2016, (9797) [cit. 2021-5-23]. Dostupné z: doi:10.1117/12.2218873
- [44] BRAJER, Jan. *Vliv metody laser shock processing na integritu povrchu*. Praha, 2018. Disertační práce. ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie. Vedoucí práce Prof. Ing. Jan Mádl, CSc.
- [45] PRIMUS, Tomáš. *Tvorba bionicky motivovaných povrchů laserem*. Praha, 2019. Diplomová práce. ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav výrobních strojů a zařízení. Vedoucí práce Ing. Pavel Zeman, PhD.
- [46] *MASTER1 PSGFRT Femtosecond Laser micromachining system for precise manufacturing: Návod k použití*. Vilnius, Litva, 2020.
- [47] *Direct machine control: Software for laser machines* [online]. Vilnius, Litva, 2020 [cit. 2021-03-11]. Dostupné z: <https://directmachining.com/products/dmc/>
- [48] *Keyence: Laser scanning confocal microscopes* [online]. USA, 2021 [cit. 2021-03-16]. Dostupné z: https://www.keyence.com/ss/products/microscope/glossary/cat2/laser_scanning_confocal_microscopes/



- [49] LEYENDECKER, T., O. LEMMER, S. ESSER a J. EBBERINK. The development of the PVD coating TiAlN as a commercial coating for cutting tools. *Surface coatings and technology* [online]. 1991, **1991**(48), 175-178. DOI:10.1016/0257-8972(91)90142
- [50] SHUGUROV, A.R. a M.S. KAZACHENOK. Mechanical properties and tribological behavior of magnetron sputtered TiAlN/TiAl multilayer coatings. *Surface coatings and technology* [online]. 2018, **2018**(353), 254-262. DOI:10.1016/j.surfcoat.2018.09.001
- [51] *Advamat* [online]. Jihlava, 2018 [cit. 2021-03-16]. Dostupné z: <https://www.advamat.cz/>
- [52] DEMBEK, Jiří. *SLINUTÉ KARBIDY A JEJICH EFEKTIVNÍ VYUŽITÍ*. Brno, 2010. Diplomová práce. VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Doc. Ing. Anton Humár, CSc.

Seznam obrázků

Obr. 1 Polarizace svazku: rychlá – P (vlevo) a pomalá – S (vpravo) [8]	15
Obr. 2 Tvar Gaussovského svazku v ohnisku (upraveno). [4]	15
Obr. 3 Gaussovský (vlevo) a tzv. top hat profil laserového paprsku (upraveno) [7]	16
Obr. 4 Schématické porovnání doby trvání pulsu a interakce s materiálem. A) demonstrace krátkých pulsů B) demonstrace ultrakrátkých pulsů (upraveno) [8]	17
Obr. 5 Lineární regrese pro výpočet ablačního prahu (upraveno) [18].....	20
Obr. 6 Překryv pulsů ve dvou směrech.....	23
Obr. 7 Příklad optické cesty laseru (upraveno) [30].....	30
Obr. 8 Princip rozmítání svazku pomocí galvo skenerů (upraveno) [8].....	31
Obr. 9 Příklad znásobené ablace vlivem zrychlování svazku – dolní linie. Horní linie byla vypálena pomocí přídavné funkce, viz kap 3.4	32
Obr. 10 Princip rozmítání svazku pomocí polygonálního skeneru (upraveno) [8]	32
Obr. 11 Funkce F-Theta čočky [23].....	33
Obr. 12 Fotografie struktury laserového zařízení.	34
Obr. 13 Příklad popisovací stanice s otočným stolem.....	35
Obr. 14 Příklad popisovací stanice s pohybovou osou Z.....	36
Obr. 15 Příklad kinematiky laseru s dvěma pohybovými osami (upraveno) [37]	36
Obr. 16 Příklad kinematiky (3+0+2), varianta se stojanem (upraveno) [37].....	37
Obr. 17 Příklad kinematiky (3+0+2), varianta gantry (upraveno) [37].....	37
Obr. 18 Příklad kinematiky (3+1+2). Přídavné sklíčko (osa A) na stole [38].....	38
Obr. 19 Příklad kinematiky (3+2+2) [38].	38
Obr. 20 Příklad umístění laserové hlavy na šestiosém robotu [39].....	39
Obr. 21 Propal na jedné linii pulsů.....	40
Obr. 22 Propal vzniklý při experimentu pro zjištění tloušťky povlaku: snímek plochy (nahore) a odpovídající hloubkový profil (dole)	41
Obr. 23 Skenovací strategie běžná (nahore) a při použití funkce SkyWriting (dole) [43]	43
Obr. 24 Princip přidaných pohybů funkce SkyWriting: Jump/j – skok, rychloposuv; Mark/m – značení, pracovní posuv; Arc – oblouk; plná čára označuje pohyb při otevřené záklopce; vlevo Mód 1, vpravo Mody 2 a 3 [42].....	44
Obr. 25 Rozložení pulsů: a) bez funkce, b) s funkcí SkyWriting [8]	44
Obr. 26 Vizualizace chování funkce SkyWriting (upraveno) [42].....	45
Obr. 27 Schéma metodiky pro technologii laser stripping.....	49
Obr. 28 Fotografie pracovního prostoru systému MASTER1, který byl použit ve vlastním experimentu.....	50
Obr. 29 Pohyblivé mechanické osy stolu laserového zařízení MASTER 1(upraveno) [47].....	50
Obr. 30 Optická cesta zařízení MASTER1: 1) Zdroj CARBIDE, 2) dvojitá zrcadla, 3) attenuatory, 4) zrcadla, 5) polarizátory, 6) beam expandery, 7) měřidlo výkonu svazku, 8) galvo skenovací hlavy, 9) čočky kamer 10) optické vlákno ze zdroje SPI [46].....	51
Obr. 31 Laserový konfokální mikroskop Keyence.....	53
Obr. 32 Body vytvořené laserovým svazkem pro určení ablačního prahu, 1000 pulsů, IH.....	55
Obr. 33 Graf hodnot energií v pulsu pro určení průměru svazku v ohnisku.....	56



Obr. 34 Měření tloušťky povlaku na IH, 340 mW	59
Obr. 35 Závislost zrychlení svazku na rozmítací rychlosti	60
Obr. 36 Chování svazku při různých rozmítacích rychlostech	60
Obr. 37 Test parametru timelag pro rozmítací rychlost $900 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$	62
Obr. 38 Test parametru laser on shift pro rozmítací rychlost $900 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$; při hodnotě $T_L=150 \mu\text{s}$	63
Obr. 39 Vizualizace dráhového řízení při Módu 3. Dráha písmene Z o výšce 1 mm, při rozdílných rychlostech a stejném úhlovém limitu	64
Obr. 40 Profil odstraněného povlaku na IH, rychlosti svazku $600 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, bez funkce SkyWriting.....	68
Obr. 41 Profil odstraněného povlaku na IH, rychlosti svazku $600 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, SkyWriting Mód 1	68
Obr. 42 Průměrný úběr na 1 vrstvu při odstraňování povlaku pro IH.....	70
Obr. 43 Celková hloubka odstraněné vrstvy povlaku pro IH	70
Obr. 44 Profil odstraněného povlaku na IIH, rychlosti svazku $600 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, bez funkce SkyWriting.....	73
Obr. 45 Profil odstraněného povlaku na IIH, rychlosti svazku $600 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, SkyWriting Mód 1	73
Obr. 46 Průměrný úběr na 1 vrstvu při odstraňování povlaku pro IIH.....	74
Obr. 47 Celková hloubka odstraněné vrstvy povlaku pro IIH	75
Obr. 48 Profil odstraněného povlaku na IIIH, rychlosti svazku $400 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, bez funkce SkyWriting.....	77
Obr. 49 Profil odstraněného povlaku na IIIH, rychlosti svazku $400 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, SkyWriting Mód 1	77
Obr. 50 Průměrný úběr na 1 vrstvu při odstraňování povlaku pro IIIH	79
Obr. 51 Celková hloubka odstraněné vrstvy povlaku pro IIIH	79

Seznam tabulek

Tab. I Porovnání jednotlivých metod odstraňování povlaku, vzhledem k technologii laser stripping; + lepší vlastnost, - horší vlastnost, 0 srovnatelná vlastnost.....	13
Tab. II Shrnutí dostupných laserových zdrojů [23] [24] [25] [26] [28] [28]	29
Tab. III Charakteristika mechanických os experimentálního zařízení [46]	50
Tab. IV Vlastnosti skenovací hlavy Intelliscan [31]	52
Tab. V Základní nastavení omezení pohybu os	54
Tab. VI Základní nastavení galvo skenerů	54
Tab. VII Výsledné hodnoty ablačních prahů $F_{th} [\text{J}\cdot\text{cm}^{-2}]$ pro tři vlnové délky	57
Tab. VIII Výsledné inkubační faktory $\xi [-]$ pro tři vlnové délky	57
Tab. IX Naměřená data odstraněné pro zjištění tloušťky povlaku [μm]	59
Tab. X Parametry laserového zařízení pro odstranění povlaku na třech harmonických... ..	66
Tab. XI Nastavení attenuátorů a parametrů Timelag a Laser on shift pro odstranění povlaku na IH	67
Tab. XII Výsledky odstraňování povlaku na IH.....	69
Tab. XIII Nastavení attenuátorů a parametrů Timelag a Laser on shift pro odstranění povlaku na IIH	72



Tab. XIV Výsledky odstraňování povlaku na IIH	74
Tab. XV Nastavení attenuátorů a parametrů Timelag a Laser on shift pro odstranění povlaku na IIIH.....	76
Tab. XVI Výsledky odstraňování povlaku na IIIH	78
Tab. XVII Naměřené hodnoty ablačních prahů pro 10 pulsů a jejich odpovídající výkon	81
Tab. XVIII Optimální nastavení parametrů funkce SkyWriting pro obě skenovací hlavy	81
Tab. XIX Výsledky odstranění povlaku bez funkce a se zapnutou funkcí SkyWriting na třech harmonických frekvencích.....	82

Seznam příloh

1 Data z měření ablačního prahu.....	93
2 Měření pro určení parametrů funkce SkyWriting	101

Seznam elektronických příloh

Přiložené CD obsahuje :

- Textová část práce : DP_hlavinka_1794.pdf
- Výsledky měření ablačního prahu :
DP_hlavinka_1794_ablacni_prah_altin.xlsx
- Výsledky testu pro určení zrychlení :
DP_hlavinka_1794_galvo_zrychleni.xlsx
- Výsledky z experimentu pro určení parametrů funkce SkyWriting :
DP_hlavinka_1794_faze_2-parametry_funkce_skywriting.xlsx
- Výsledky z experimentu odstranění povlaku :
DP_hlavinka_1794_faze_3-odstraneni_povlaku.xlsx

Přílohy

1 Data z měření ablačního prahu

Vlnová délka	1030	nm	Vlnová délka	1030	nm
počet pulsů	10		počet pulsů	1	
krok attenuátoru [%]	naměřený výkon [W]	průměr bodu z deseti měření [μm]	krok attenuátoru [%]	naměřený výkon [W]	průměr bodu z deseti měření [μm]
5	0,023	0	5	0,048	0
10	0,035	0	10	0,082	0
15	0,047	0	15	0,117	0
20	0,060	0	20	0,156	0
25	0,071	0	25	0,187	0
30	0,084	6,18	30	0,221	9,37
35	0,096	9,25	35	0,255	11,36
40	0,108	11,95	40	0,290	12,26
45	0,119	14,01	45	0,322	13,71
50	0,132	15,19	50	0,359	15,12
55	0,145	15,92	55	0,391	15,91
60	0,155	17,40	60	0,422	15,81
65	0,167	17,51	65	0,455	16,95
70	0,180	19,07	70	0,490	17,77
75	0,190	19,34	75	0,523	18,25
80	0,202	20,09	80	0,555	19,12
85	0,214	21,24	85	0,588	19,89
90	0,226	20,45	90	0,622	20,21
95	0,237	20,61	95	0,652	21,15
100	0,247	21,02	100	0,680	21,61

Vlnová délka	1030	nm	Vlnová délka	1030	nm
počet pulsů	50		počet pulsů	100	
krok attenuátoru [%]	naměřený výkon [W]	průměr bodu z deseti měření [μm]	krok attenuátoru [%]	naměřený výkon [W]	průměr bodu z deseti měření [μm]
5	0,0225	0	5	0,0225	0
10	0,0345	0	10	0,0345	0
15	0,0467	0	15	0,0467	0
20	0,0605	0	20	0,0605	0
25	0,0709	0	25	0,0709	0
30	0,0840	0	30	0,0840	0
35	0,0961	0	35	0,0961	4,332
40	0,1075	5,053	40	0,1075	5,853
45	0,1186	6,808	45	0,1186	7,229
50	0,1322	9,910	50	0,1322	9,293
55	0,1447	10,618	55	0,1447	12,276
60	0,1554	11,905	60	0,1554	13,837
65	0,1667	13,335	65	0,1667	14,434
70	0,1796	14,574	70	0,1796	15,167
75	0,1904	14,761	75	0,1904	17,204
80	0,2017	17,056	80	0,2017	18,210
85	0,2145	16,913	85	0,2145	18,590
90	0,2256	17,243	90	0,2256	18,534
95	0,2366	18,151	95	0,2366	19,472
100	0,2465	19,492	100	0,2465	19,713

Vlnová délka	1030	nm	Vlnová délka	515	nm
počet pulsů	1000		počet pulsů	1	
krok attenuátoru [%]	naměřený výkon [W]	průměr bodu z deseti měření [μm]	krok attenuátoru [%]	naměřený výkon [W]	průměr bodu z deseti měření [μm]
5	0,0225	0	5	0,0480	0
10	0,0345	0	10	0,0820	0
15	0,0467	0	15	0,1173	0
20	0,0605	0	20	0,1555	0
25	0,0709	0	25	0,1866	0
30	0,0840	5,443	30	0,2205	0
35	0,0961	7,226	35	0,2547	0
40	0,1075	11,829	40	0,2900	13,004
45	0,1186	13,400	45	0,3222	13,968
50	0,1322	14,702	50	0,3592	14,530
55	0,1447	14,423	55	0,3906	13,773
60	0,1554	15,509	60	0,4221	13,584
65	0,1667	16,133	65	0,4548	15,329
70	0,1796	17,736	70	0,4903	15,402
75	0,1904	19,124	75	0,5228	14,824
80	0,2017	19,718	80	0,5546	15,837
85	0,2145	19,768	85	0,5883	15,902
90	0,2256	20,683	90	0,6223	16,550
95	0,2366	20,645	95	0,6524	16,945
100	0,2465	22,335	100	0,6799	17,349



Vlnová délka	515	nm	Vlnová délka	515	nm
počet pulsů	10		počet pulsů	50	
krok attenuátoru [%]	naměřený výkon [W]	průměr bodu z deseti měření [μm]	krok attenuátoru [%]	naměřený výkon [W]	průměr bodu z deseti měření [μm]
5	0,0225	0	5	0,0480	0
10	0,0345	0	10	0,0820	0
15	0,0467	0	15	0,1173	10,591
20	0,0605	0	20	0,1555	11,181
25	0,0709	6,207	25	0,1866	12,599
30	0,0840	7,059	30	0,2205	13,405
35	0,0961	8,237	35	0,2547	15,130
40	0,1075	8,712	40	0,2900	14,265
45	0,1186	9,705	45	0,3222	17,154
50	0,1322	10,425	50	0,3592	16,601
55	0,1447	9,830	55	0,3906	18,020
60	0,1554	12,347	60	0,4221	18,661
65	0,1667	11,776	65	0,4548	17,927
70	0,1796	12,137	70	0,4903	18,105
75	0,1904	13,209	75	0,5228	19,675
80	0,2017	12,936	80	0,5546	20,040
85	0,2145	14,416	85	0,5883	19,764
90	0,2256	13,695	90	0,6223	20,819
95	0,2366	14,395	95	0,6524	19,886
100	0,2465	14,961	100	0,6799	19,267



Vlnová délka	515	nm	Vlnová délka	515	nm
počet pulsů	100		počet pulsů	1000	
krok attenuátoru [%]	naměřený výkon [W]	průměr bodu z deseti měření [μm]	krok attenuátoru [%]	naměřený výkon [W]	průměr bodu z deseti měření [μm]
5	0,0225	0	5	0,0225	0
10	0,0345	0	10	0,0345	0
15	0,0467	0	15	0,0467	12,922
20	0,0605	0	20	0,0605	14,128
25	0,0709	7,985	25	0,0709	14,487
30	0,0840	9,973	30	0,0840	15,994
35	0,0961	10,678	35	0,0961	15,770
40	0,1075	12,053	40	0,1075	16,888
45	0,1186	14,389	45	0,1186	18,062
50	0,1322	13,659	50	0,1322	18,295
55	0,1447	15,813	55	0,1447	19,353
60	0,1554	16,327	60	0,1554	19,442
65	0,1667	15,368	65	0,1667	20,130
70	0,1796	17,935	70	0,1796	20,955
75	0,1904	16,920	75	0,1904	21,644
80	0,2017	18,247	80	0,2017	21,967
85	0,2145	18,492	85	0,2145	22,708
90	0,2256	19,759	90	0,2256	22,887
95	0,2366	19,311	95	0,2366	21,685
100	0,2465	19,077	100	0,2465	23,206



Vlnová délka	343	nm	Vlnová délka	343	nm
počet pulsů	1		počet pulsů	10	
krok attenuátoru [%]	naměřený výkon [W]	průměr bodu z deseti měření [μm]	krok attenuátoru [%]	naměřený výkon [W]	průměr bodu z deseti měření [μm]
5	0,0480	0	5	0,0225	
10	0,0820	0	10	0,0345	
15	0,1173	0	15	0,0467	
20	0,1555	0	20	0,0605	
25	0,1866	7,651	25	0,0709	4,605
30	0,2205	9,372	30	0,0840	8,742
35	0,2547	11,361	35	0,0961	9,641
40	0,2900	12,262	40	0,1075	10,426
45	0,3222	13,709	45	0,1186	11,023
50	0,3592	15,118	50	0,1322	11,777
55	0,3906	15,906	55	0,1447	12,770
60	0,4221	15,808	60	0,1554	13,197
65	0,4548	16,948	65	0,1667	13,930
70	0,4903	17,766	70	0,1796	14,550
75	0,5228	18,250	75	0,1904	14,523
80	0,5546	19,119	80	0,2017	14,776
85	0,5883	19,894	85	0,2145	15,036
90	0,6223	20,207	90	0,2256	14,780
95	0,6524	21,151	95	0,2366	15,530
100	0,6799	21,613	100	0,2465	15,505



Vlnová délka	343	nm	Vlnová délka	343	nm
počet pulsů	50		počet pulsů	100	
krok attenuátoru [%]	naměřený výkon [W]	průměr bodu z deseti měření [μm]	krok attenuátoru [%]	naměřený výkon [W]	průměr bodu z deseti měření [μm]
5	0,0125		5	0,0120	
10	0,0182		10	0,0165	
15	0,0241		15	0,0217	
20	0,0289		20	0,0260	
25	0,0341		25	0,0319	
30	0,0393		30	0,0363	
35	0,0435		35	0,0413	3,334
40	0,0494	4,021	40	0,0470	4,143
45	0,0548	6,067	45	0,0521	4,808
50	0,0603	6,959	50	0,0573	5,544
55	0,0642	7,880	55	0,0610	6,060
60	0,0697	8,479	60	0,0662	6,189
65	0,0745	9,654	65	0,0707	6,813
70	0,0793	9,739	70	0,0754	7,637
75	0,0840	10,329	75	0,0798	7,942
80	0,0905	10,147	80	0,0859	10,861
85	0,0943	11,042	85	0,0896	11,744
90	0,0991	11,811	90	0,0941	12,490
95	0,1036	12,193	95	0,0985	12,681
100	0,1089	12,387	100	0,1089	13,483

Vlnová délka	343	nm
počet pulsů	1000	
krok attenuátoru [%]	naměřený výkon [W]	průměr bodu z deseti měření [μm]
5	0,0125	
10	0,0182	
15	0,0241	
20	0,0289	
25	0,0341	
30	0,0393	
35	0,0435	5,378
40	0,0494	6,682
45	0,0548	7,755
50	0,0603	8,942
55	0,0642	9,774
60	0,0697	9,982
65	0,0745	10,988
70	0,0793	12,318
75	0,0840	12,810
80	0,0905	17,517
85	0,0943	18,942
90	0,0991	20,145
95	0,1036	20,454
100	0,1089	21,747

2 Měření pro určení parametrů funkce SkyWriting

Testování parametru Timelag T_L [μs] funkce SkyWriting pro Galvo1 (IH a IIH), požadovaná délka dráhy 1 mm									
Rychlost [$\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$]	T_L [μs]	Skutečná délka dráhy [mm]	Posunutí oproti začátku [mm]	Je vidět propal?	Rychlost [$\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$]	T_L [μs]	Skutečná délka dráhy [mm]	Posunutí oproti začátku [mm]	Je vidět propal?
600	0	1,029	-0,017	ANO	1800	0	1,015	-0,07	ANO
	50	1	-0,038	ANO		50	0,936	-0,094	ANO
	100	1,028	-0,045	NE		100	1,003	-0,098	NE
	150	1,024	-0,019	NE		150	1,01	-0,021	NE
	200	1,02	0,008	NE		200	1,011	0,053	NE
	250	1,013	0,035	NE		250	1,005	0,13	NE
	300	1,018	0,059	NE		300	1,008	0,206	NE
900	0	1,025	-0,019	ANO	2100	0	1,007	-0,01	ANO
	50	0,983	-0,056	ANO		50	0,915	0,107	ANO
	100	1,021	-0,058	NE		100	1,003	-0,106	NE
	150	1,017	-0,014	NE		150	1,005	-0,017	NE
	200	1,019	0,021	NE		200	1	0,07	NE
	250	1,017	0,063	NE		250	0,99	0,165	NE
	300	1,012	0,098	NE		300	1,003	0,245	NE
1200	0	1,018	-0,01	ANO	2400	0	1,012	-0,01	ANO
	50	0,963	-0,063	ANO		50	0,9	-0,117	ANO
	100	1,018	-0,067	NE		100	1,013	-0,129	NE
	150	1,017	-0,018	NE		150	0,993	-0,019	NE
	200	1,008	0,036	NE		200	1,005	0,081	NE
	250	1,008	0,087	NE		250	0,992	0,189	NE
	300	1,013	0,13	NE		300	0,99	0,281	NE
1500	0	1,017	-0,015	ANO	2700	0	1,01	-0,005	ANO
	50	0,941	-0,075	ANO		50	0,882	-0,13	ANO
	100	1,016	-0,085	NE		100	1,013	-0,14	NE
	150	1,01	-0,014	NE		150	0,992	-0,016	NE
	200	1,005	0,046	NE		200	1	0,094	NE
	250	1,016	0,106	NE		250	0,985	0,212	NE
	300	1,016	0,169	NE		300	0,98	0,313	NE
1800	0	1,015	-0,07	ANO	3000	0	1,007	0	ANO
	50	0,936	-0,094	ANO		50	0,867	-0,143	ANO
	100	1,003	-0,098	NE		100	0,995	-0,157	NE
	150	1,01	-0,021	NE		150	0,989	-0,024	NE
	200	1,011	0,053	NE		200	0,98	0,111	NE
	250	1,005	0,13	NE		250	1,003	0,222	NE
	300	1,008	0,206	NE		300	0,97	0,346	NE

Testování parametru Timelag T_L [μs] funkce SkyWriting pro Galvo1 (IH a IIH), požadovaná délka dráhy 1 mm				
Rychlost [$\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$]	T_L [μs]	Skutečná délka dráhy [mm]	Posunutí oproti začátku [mm]	Je vidět propal?
600	140	1,026	-0,008	NE
	145	1,02	-0,005	NE
	150	1,013	-0,003	NE
	155	0,999	0,003	NE
	160	1,006	-0,002	NE
	165	1,006	-0,001	NE
1200	140	0,999	-0,015	NE
	145	1	-0,009	NE
	150	1,004	-0,006	NE
	155	1,001	-0,002	NE
	160	0,996	0,006	NE
	165	0,994	0,011	NE
2400	140	1,021	-0,037	NE
	145	1,015	-0,031	NE
	150	1,011	-0,023	NE
	155	1,006	-0,02	NE
	160	1,004	-0,01	NE
	165	0,999	0,005	NE

Testování parametru Timelag T_L [μs] funkce SkyWriting pro Galvo2 (IIH), požadovaná délka dráhy 1 mm										
Rychlost [$\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$]	T_L [μs]	Skutečná délka dráhy [mm]	Posunutí oproti začátku [mm]	Je vidět propal?	Rychlost [$\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$]	T_L [μs]	Skutečná délka dráhy [mm]	Posunutí oproti začátku [mm]	Je vidět propal?	
400	0	1,008	-0,007	ANO	1400	0	0,977	-0,003	ANO	
	50	0,974	-0,019	ANO		50	0,866	-0,047	ANO	
	100	0,997	-0,031	NE		100	0,981	-0,1	NE	
	150	1,013	-0,028	NE		150	1,01	-0,074	NE	
	200	1,009	-0,005	NE		200	0,997	-0,005	NE	
	250	1,009	0,009	NE		250	1,004	0,047	NE	
600	0	1,013	-0,004	ANO	1600	300	1,01	0,104	NE	
	50	0,968	-0,023	ANO		0	0,969	-0,006	ANO	
	100	1,016	-0,047	NE		50	0,84	-0,051	ANO	
	150	1,025	-0,032	NE		100	0,975	-0,122	NE	
	200	1,028	-0,009	NE		150	1,012	-0,086	NE	
	250	1,028	0,016	NE		200	1,005	-0,01	NE	
800	300	1,032	0,04	NE	1800	250	1,004	0,056	NE	
	0	0,995	-0,007	ANO		300	1,006	0,122	NE	
	50	0,925	-0,024	ANO		0	0,965	-0,006	ANO	
	100	0,988	-0,057	NE		50	0,822	-0,055	ANO	
	150	1,007	-0,043	NE		100	0,968	-0,127	NE	
	200	1,005	-0,012	NE		150	1,005	-0,091	NE	
1000	250	1,01	0,024	NE	2000	200	1,005	-0,015	NE	
	300	1,008	0,056	NE		250	1,004	0,065	NE	
	0	0,972	-0,006	ANO		300	1	0,141	NE	
	50	0,897	-0,03	ANO		0	0,957	-0,004	ANO	
	100	0,981	-0,075	NE		50	0,805	-0,07	ANO	
	150	1,003	-0,053	NE		100	0,964	-0,145	NE	
1200	200	1,003	-0,006	NE		150	1,009	-0,1	NE	
	250	1,001	0,029	NE		200	1,003	-0,017	NE	
	300	1,004	0,075	NE		250	1,001	0,069	NE	
	0	0,973	-0,005	ANO		300	1,005	0,153	NE	
	50	0,884	-0,041	ANO						
	100	0,978	-0,091	NE						
	150	1,009	-0,064	NE						
	200	1	-0,003	NE						
	250	0,996	0,047	NE						
	300	1,008	0,09	NE						

Testování parametru Timelag T_L [μs] funkce SkyWriting pro Galvo2 (IIIH), požadovaná délka dráhy 1 mm				
Rychlost [$\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$]	T_L [μs]	Skutečná délka dráhy [mm]	Posunutí oproti začátku [mm]	Je vidět propal?
200	185	1,012	-0,008	NE
	190	1,008	-0,005	NE
	195	1,006	-0,003	NE
	200	1,013	0,003	NE
	205	1,006	-0,002	NE
	210	1,006	-0,001	NE
	215	1,002	0,004	NE
1000	185	0,999	-0,008	NE
	190	1	-0,009	NE
	195	1,004	-0,006	NE
	200	1,001	-0,002	NE
	205	0,994	0,06	NE
	210	0,996	0,008	NE
	215	1	0,013	NE
2000	185	1,002	-0,039	NE
	190	1,002	-0,037	NE
	195	1,004	-0,023	NE
	200	1,004	-0,01	NE
	205	1,012	-0,002	NE
	210	1,005	0,005	NE
	215	1,008	0,009	NE